



bimestrale dell'ENEA
anno 61
novembre - dicembre 2015

Energia, Ambiente e Innovazione

6/2015



**Luce dall'ENEA:
Ieri, Oggi e Domani**





Registrazione

Tribunale Civile di Roma
Numero 148 del 19 aprile 2010 del Registro Stampa

Direttore Responsabile

Diana Savelli

Comitato di Direzione

Gaetano Borrelli, Gian Piero Celata, Roberto Moneta,
Roberto Morabito, Aldo Pizzuto

Comitato tecnico-scientifico

Osvaldo Aronica, Ilaria Bertini, Paolo Clemente,
Paolo Di Lazzaro, Andrea Fidanza,
Stefano Giammartini, Giorgio Graditi, Massimo Maffucci,
Laura Maria Padovani, Emilio Santoro

Coordinamento editoriale

Giuliano Ghisu

Collaboratori

Daniela Bertuzzi, Paola Carrabba, Sergio Cappucci,
Orietta Casali, Antonino Dattola, Barbara Di Giovanni,
Giovanni Puglisi

Traduzione e revisione lingua inglese

Carla Costigliola

Progetto grafico

Paola Carabotta, Bruno Giovannetti, Cristina Lanari

Edizione web

Antonella Andreini, Serena Lucibello, Concetta Manto

Sviluppo App

Giordano Vicoli

Promozione

Paola Crocianielli

*Gli articoli riflettono le opinioni degli autori
e non necessariamente quelle dell'ENEA*

Impaginazione

Varigrafica Alto Lazio
Via Cassia, km 36,300 (zona industriale) - 01036 Nepi (VT)

Stampa

Laboratorio Tecnografico - Centro Ricerche ENEA Frascati

Numero chiuso nel mese di **marzo 2016**

Disponibile sul sito www.enea.it
e su App Store per i dispositivi mobili Apple



Prodotto realizzato impiegando carta Symbol Freelifce certificata FSC



Prefazione

2 *P. Di Lazzaro, R.M. Montereali*



Research & development

Gli anni ruggenti

4 **La scoperta della luce coerente
(il laser) e la ricerca sulla fusione
nucleare**

S. Martellucci

12 **Dai fasci di elettroni ai fasci di fotoni**

A. Renieri

22 **La doppia luminescenza
dei Centri di Colore**

G. Baldacchini

29 **Laser e molecole: la stagione
dei multifotoni a Frascati
negli anni 70 e 80**

R. Fantoni, E. Borsella, A. Palucci, A. Giardini

Luce dall'ENEA: ieri, oggi e domani

38 **Tutti i 'colori' dell'ENEA**

*P. Di Lazzaro, R. De Angelis,
G.P. Gallerano, A. Doria*

55 **Fotoluminescenza e fotonica:
dalle sorgenti di luce miniaturizzate
ai rivelatori di radiazione**

*R.M. Montereali, F. Bonfigli, E. Nichelatti,
M. Piccinini, M.A. Vincenti*

65 **Dispositivi luminescenti OLED
per applicazioni di illuminazione**

*M.G. Maglione, S. Aprano, P. Tassinì,
V. Criscuolo, T. Prontera, A. Rubino,
P. Manini, C. Minarini*

74 **Film sottili per manipolare
raggi di luce**

A. Piegari, A. Sytchkova

84 **Manipolare impulsi di luce
nello spazio-tempo**

*S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora,
L. Mezi, D. Murra, A. Torre*

93 **Vortici ottici e fasci di luce**

G. Dattoli, F. Nguyen

100 **Solare a concentrazione:
ottenere energia dalla luce solare
in modo sostenibile e rinnovabile**

M. Montecchi

107 **Il consumo per l'illuminazione
e la certificazione energetica
negli edifici in Italia**

L. Blaso, V. Lo Verso, G. Mutani



La 68esima sessione dell'Assemblea Generale dell'ONU ha proclamato il 2015 **Anno Internazionale della Luce e delle tecnologie basate sulla luce**, vedi <http://www.light2015.org/Home/About/Resources.html>.

Il principale scopo dell'iniziativa dell'Anno Internazionale della Luce <http://www.light2015.org/Home/About.html> è di accrescere la conoscenza e la consapevolezza di ciascuno di noi sul modo in cui le tecnologie basate sulla luce promuovano lo sviluppo sostenibile e forniscano soluzioni alle sfide globali, ad esempio nei campi dell'energia, della salute e dell'agricoltura, e consentano considerevoli progressi sia nella ricerca scientifica sia nell'accrescimento della competitività in numerosi settori industriali, spaziando dalla comprensione dell'origine dell'Universo alla diffusione delle telecomunicazioni su scala globale. È stato quindi attivato un grande progetto multidisciplinare, che riunisce con l'UNESCO <http://www.unesco.it/cni/index.php/news/304-2015-anno-internazionale-della-luce>, numerosi soggetti, tra cui le società scientifiche e gli Enti di ricerca, le istituzioni educative, dalla scuola dell'obbligo all'Università, le piattaforme tecnologiche, le organizzazioni non profit e partner del settore privato, tutte coese a divulgare l'importanza della luce in campo scientifico e nella vita di tutti i giorni.

Ovviamente, per "luce" non si intende solo il ristretto ambito spettrale dai circa 400 nanometri (violetto) ai circa 700 nanometri (rosso) che i nostri occhi riescono a per-

cepire, e che per questo viene chiamato "luce visibile": per "luce" si intende tutto lo spettro della radiazione elettromagnetica, dai raggi gamma fino alle onde radio. Perché proprio il 2015? Quest'anno cadono alcune importanti ricorrenze nella storia dello studio della luce:

- la pubblicazione mille anni fa, nel 1015, del "*Kitab al Manazir*" (letteralmente significa *Libro dei binocoli*, più correttamente tradotto come *Libro di Ottica*) di Ibn al-Haytham (conosciuto in Occidente come Alhazen, che significa "la mente") considerato l'iniziatore dell'ottica moderna;
- la pubblicazione nel 1815 del lavoro "*Premier mémoire sur la diffraction de la lumière*" di Fresnel che descrive la diffrazione della luce;
- la pubblicazione nel 1865 del lavoro "*A dynamical theory of the electromagnetic field*" di Maxwell dove compaiono per la prima volta le celebri equazioni in cui la luce è espressa come un'onda elettromagnetica;
- la pubblicazione nel 1915 del lavoro "*Die Feldgleichungen der Gravitation*" di Einstein, contenente l'equazione di campo, il cuore della relatività generale;
- la pubblicazione nel 1965 dell'articolo "*A Measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s*" di Penzias e Wilson, che presenta la scoperta della radiazione cosmica di fondo, per la quale gli stessi autori hanno ricevuto il Premio Nobel.



Nella generazione e nelle applicazioni della luce, l'ENEA ha una storia importante, un passato e un presente di assoluto rilievo internazionale. In pochi sanno, ad esempio, che il primo sistema LASER italiano è stato sperimentato al CNEN (poi ENEA) di Frascati nel 1961, presso il laboratorio Gas Ionizzati diretto da Ugo Ascoli Bartoli, grazie all'interessamento di Franco Rasetti (uno dei 'ragazzi' di via Panisperna) che portò con sé dagli USA un prototipo di bacchetta di rubino sintetico con le estremità lavorate a specchio. Questo LASER permise di realizzare la prima diagnostica dei plasmi tramite tecniche spettroscopiche Schlieren fino al famoso esperimento di fusione term nucleare "Hot Ice", descritto nel primo articolo di questo volume.

L'attuale presenza presso il Centro ENEA di Frascati di un impressionante ventaglio di sorgenti di luce che spaziano su tutto lo spettro, dal Terahertz fino ai raggi-X (si tratta di un unicum in ambito italiano) e di laboratori di eccellenza nelle molteplici applicazioni della spettroscopia e dei sistemi LASER, è una diretta conseguenza degli esperimenti LASER dei primi anni 60 che attrassero l'interesse di tutta la comunità scientifica internazionale e crearono la sensibilità culturale e le competenze che sono state trasmesse e aggiornate sino ad oggi, non solo a Frascati ma nei diversi Centri ENEA.

Ci sembra quindi doveroso, oltre che opportuno, dedicare un numero speciale della storica rivista ENEA *Energia, Ambiente e Innovazione* all'Anno Internazionale della Luce "visto" dagli occhi dei Ricercatori ENEA.

Nei quattro articoli sugli "Anni Ruggenti" del CNEN, poi ENEA, sono delineate le figure di personaggi di rilievo assoluto che hanno attraversato e influenzato a vario titolo la storia scientifica del Centro ENEA di Frascati, da Franco Rasetti a Ugo Ascoli Bartoli, da Edward Teller a Matthew Sands, da Anna Giardini a Italo Federico Quer-

cia. Sullo sfondo dei risultati scientifici di livello internazionale nella produzione e applicazioni della "luce", in questi articoli sono descritti aneddoti inediti, soprannomi, equivoci, scelte strategiche, decisioni sofferte, intromissioni politiche nazionali e internazionali, che ben rendono l'idea del vivacissimo clima scientifico e intellettuale a Frascati dal 1960 al 1990.

Passando agli anni più recenti, gli otto articoli del capitolo "Luce dall'ENEA: Ieri, Oggi e Domani" spaziano dalle più recenti sorgenti di luce coerenti e incoerenti "prototipali" alle sofisticate tecniche di manipolazione dei fasci di fotoni, dai rivelatori di radiazione a lettura ottica ai dispositivi miniaturizzati emettitori di luce di tipo OLED, dall'influenza dell'illuminazione nella certificazione energetica degli edifici alla produzione di energia pulita tramite concentratori della luce del Sole, dalla nuova frontiera dei vortici ottici alla fotonica.

Gli articoli raccolti in questo volume non possono essere esaustivi delle molteplici attività e tecnologie ENEA basate sulla luce, ma abbiamo la fondata speranza di offrire una panoramica di alcuni sviluppi significativi a livello internazionale attualmente in corso in diversi Centri ENEA, dalla Casaccia a Portici, da Frascati a Ispra. In questo ambito, il volume è dedicato alle centinaia di Ricercatori e Tecnici ENEA che dal 1960 hanno guadagnato e mantenuto un livello di eccellenza internazionale sulla produzione della luce e sulle sue applicazioni, ma soprattutto ai Ricercatori e Tecnici di oggi e di domani, che con impegno, ingegno, determinazione e consapevolezza operano quotidianamente nei laboratori dei Centri di Ricerca ENEA promuovendo lo studio, lo sviluppo e le applicazioni delle tecnologie basate sulla luce in un contesto internazionale sempre più competitivo, *challenging*, e proprio per questo, entusiasmante.

Buona lettura!



La scoperta della luce coerente (il laser) e la ricerca sulla fusione nucleare

Le applicazioni del laser alla diagnostica ed alla produzione di plasmi a partire dalla scoperta del laser a rubino di Maiman, sviluppate nel gruppo di "Ottica e Spettroscopia" del "Laboratorio Gas Ionizzati" del CNEN, di cui l'autore faceva parte

DOI 10.12910/EAI2015-088

■ S. Martellucci

Le prime ricerche in Italia sulla fisica del plasma e la fusione nucleare

Nel 1957, studente del corso di laurea in Fisica all'Università "Sapienza" di Roma, eseguivo calcoli numerici per elaborare misure sperimentali ottenute da un gruppo di ricercatori che studiavano i raggi cosmici con il metodo della camera di Wilson, posizionata ad alta quota in un laboratorio sul Plateau Rosa del Monte Cervino sulle Alpi. Nell'estate si diffuse la notizia che nella seconda metà dell'anno accademico successivo, durante il quale avrei dovuto scegliere l'argomento della mia tesi di laurea, fosse previsto il soggiorno presso l'Istituto di Fisica del professor Franco Rasetti, in anno sabatico dall'Università Johns Hopkins di Baltimora, Maryland, USA.

Franco Rasetti, il "Cardinale" del gruppo noto con il nome di "ragazzi di Via Panisperna", aveva lavorato con Enrico Fermi (il "Papa"), nel vecchio e prestigioso Istituto di Fisica di Via Panisperna dell'Università di Roma, negli esperimenti che erano valsi a Fermi il conferimento del Premio Nobel per le Scienze Fisiche.

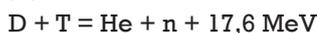
Emigrato, dopo Fermi, prima all'Università Laval, Québec, Canada e poi negli Stati Uniti alla Johns Hopkins University, doveva decidere dove trascorrere quel periodo di anno sabatico. Aveva ricevuto un'offerta all'Università di Miami in Florida solo per un semestre: da settembre 1958 a febbraio 1959; la seconda metà dell'anno accademico la trascorse a Roma, dove i professori Edoardo Amaldi ed Enrico Persico lo avevano invitato a collaborare a un nascente progetto di ricerca sulla fisica del plasma. Questo progetto era sorto, su iniziativa di Persico, in seguito alle due Conferenze internazionali di Ginevra per l'uso pacifico dell'energia nucleare: in quella circostanza gli inglesi avevano tolto il vincolo di segretezza militare alle loro ricerche sull'argomento, aprendo i loro laboratori anche a scienziati di paesi, come l'Italia, che erano stati sconfitti in guerra. Un assistente di Persico, il prof. Bruno Brunelli, si recò allora a Culham, in Inghilterra, per imparare le tecniche che consentissero di cominciare anche in Italia un'attività di ricerca sulla fusione termonucleare controllata, secondo l'approccio magnetico già intrapreso dagli inglesi. Poco dopo il ritorno di Brunelli in Italia, il 26 giugno 1952, fu istituito il CNRN (Consiglio Nazionale delle Ricerche Nucleari).

Contact person: Sergio Martellucci
martellucci.sergio@gmail.com



Il CNRN nel 1960 si trasformò in CNEN (Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare) e successivamente in ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente).

La fusione è una delle due reazioni nucleari (l'altra è la fissione) attraverso le quali si sviluppa energia; consiste nell'unione di due nuclei leggeri, ad esempio deuterio e trizio, in uno più pesante, in questo caso elio. Come avviene nel Sole, in questo processo si libera energia poiché la massa dei prodotti finali (elio e un neutrone) è minore della massa inizialmente presente (deuterio e trizio); in formula



Per far venire in contatto i due nuclei iniziali, vincendo la loro repulsione coulombiana, serve una gran quantità di energia: per ottenere in laboratorio reazioni di fusione, ad esempio, è necessario portare una miscela di deuterio e trizio a temperature elevatissime (oltre i 100 milioni di gradi, circa 10 keV) per tempi sufficientemente lunghi. A queste temperature gli atomi di un gas si ionizzano e il gas diventa una miscela di particelle cariche elettricamente (ioni ed elettroni) che prende il nome di "plasma". Investigare il comportamento del plasma utilizzando l'intensa luce che emette, e imparare a misurarne i parametri caratteristici, è quindi propedeutico a qualsiasi ricerca sulla fusione nucleare. Rasetti cominciò a studiare questo argomento cercando informazioni nei laboratori statunitensi, ma dovette presto scontrarsi con la segretezza ancora imposta a molte ricerche.

Fu molto stizzito da questi impedimenti, scrisse infatti ad Amaldi: «Ho domandato a Dieke, che si occupa di spettroscopia, che cosa c'è di pubblicato sul plasma ad alta temperatura e soggetti simili, ma a quanto pare in America non c'è quasi niente perché il molto lavoro che si fa è tutto segretissimo, supponendosi che possa servire all'utilizzo dell'energia termonucleare (per tenerlo segreto non si sa a chi, dato che i russi, a giudicare dal satellite, ne devono sapere molto di più degli altri anche in fatto di reazioni termonucleari). Forse esistono pubblicazioni in paesi che hanno in minor grado il complesso della segretezza, e se ne conosci gradirei averne le indicazioni». La lettera, datata 19 ottobre 1957, è conservata a Roma presso l'Archivio Amaldi. Il satellite cui Rasetti si riferisce è lo Sputnik, mandato in orbita dai russi il 4 ottobre 1957.

Vista l'impossibilità di trovare la documentazione necessaria negli Stati Uniti, Rasetti chiese informazioni a Persico, con il quale ebbe un ricco scambio di corrispondenza nel periodo precedente il suo lungo soggiorno a Roma. Per organizzare meglio il lavoro dei sei mesi che avrebbe trascorso presso il "Laboratorio Gas Ionizzati", decise di dedicare una parte delle sue vacanze estive del 1958 alla programmazione delle attività di ricerca e alla scelta degli strumenti da acquistare. Rasetti era solito trascorrere il periodo estivo in Italia, dividendosi tra visite alla madre, che viveva a Roma, ed escursioni alpine; nel giugno 1958 si fermò anche qualche tempo a Roma per prendere accordi con il futuro collega Ugo Ascoli-Bartoli e per aiutare Persico e Bruno Brunelli nella scelta degli strumenti spettroscopici più convenienti.

Prima di ripartire per gli Stati Uniti, il 2 settembre, passò di nuovo da Roma, dove poté comunicare ad Amaldi che gran parte del materiale ordinato era già ammassato nei locali del laboratorio. Il programma di ricerca sul plasma poteva quindi iniziare. L'uso di tecniche interferometriche e spettroscopiche è oggi di routine in tutti gli esperimenti di fisica del plasma, ma nel 1959, quando Rasetti arrivò a Roma, le ricerche sull'argomento non erano molto avanzate e, spesso, erano ancora soggette a vincoli di segretezza militare.

L'incontro con Franco Rasetti, il "Cardinale" del gruppo di Via Panisperna

Sollecitato dalla fama che circondava questa personalità, chiesi al prof. Persico, di cui seguivo le lezioni del corso di Fisica Teorica, il permesso di fare con lui il mio lavoro di tesi di laurea. È così che la mia carriera come fisico è cominciata sotto la guida di Franco Rasetti. Quando ci incontrammo, i laboratori di Frascati ancora non erano stati costruiti, e quindi le ricerche si svolgevano presso l'Istituto Marconi di Roma, in due stanzoni vicino allo studio del professor Persico. Fu là che Rasetti mi accolse quando io, ancora timido studente, gli fui presentato, e Rasetti mi classificò subito come il "laureabondo", non il "laureando", secondo il suo carattere da toscano brillante, capace di esporre in maniera scherzosa ciò che pensava senza alcuna remora.

Non è stato un inizio facile: se sbagliavo qualcosa, non

potevo ripetere l'errore una seconda volta: bastava che ricordassi come mi aveva trattato per non ripeterlo... Era comunque un piacere stare vicino a lui perché anche solo ascoltandolo e vedendo ciò che lui faceva si imparava moltissimo. È stato una fonte di notizie preziosa e anche umanamente... la battuta salace alleggeriva la pesantezza del lavoro sperimentale.

Il gruppo sperimentale di "Optica e Spettroscopia" del "Laboratorio Gas Ionizzati" del CNRN era costituito allora da quattro o cinque persone; di questo gruppo diretto da Ugo Ascoli-Bartoli, Rasetti era un consulente esterno, chiamato da Persico, suo stretto amico, che pensò fin dal primo momento di associarlo in tutte le ricerche che riguardavano il difficilissimo problema delle misure sperimentali della cosiddetta "diagnostica del plasma", ovvero la misura dei parametri fisici del plasma (densità, temperatura ecc.).

Rasetti si rivelò un collaboratore prezioso sotto vari aspetti. Era in grado di costruirsi da solo tutto ciò che serviva per l'esperimento, inoltre sapeva saldare non solo il vetro, ma anche il quarzo, e ce l'ha insegnato, a noi ed anche ai tecnici... questo per dare un'idea della capacità sperimentale di quest'uomo. Aveva delle mani d'oro e nella valutazione degli ordini di grandezza era insuperabile, senza dubbio. Si sporcava le mani in prima persona, adoperandosi nella costruzione delle apparecchiature e nel farle funzionare: indossava un camice da laboratorio grigio perché diceva che quello bianco se lo possono permettere solo i medici, che non toccano gli strumenti, mentre lui poteva sporcarsi. Sotto la sua direzione abbiamo progettato e costruito uno spettrografo a reticolo di alta risoluzione per la misura della temperatura del plasma analizzando la luce emessa dal plasma (Figura 1).

Rasetti era una guida preziosa per ritrovare strumentazioni utili nella ricca dotazione dell'Istituto di Fisica Marconi, accumulate nel corso dei decenni: ad esempio, ricordava l'esistenza di un interferometro di Jamin che abbiamo poi utilizzato nell'esperimento di misura interferometrica del plasma. Lui lo ritrovò tra la dotazione strumentale che la Germania aveva ceduto all'Italia in conto riparazione danni di guerra del 1915-18. In veste di laureabondo io seguivo Rasetti negli scantinati dell'Istituto di Fisica, per scoperchiare tutte le casse del trasloco che era stato fatto da via Panisperna alla nuova sede dell'Istituto di Fisica, nella Città Universitaria di Roma. Rasetti ricordava ancora benissimo le caratteri-

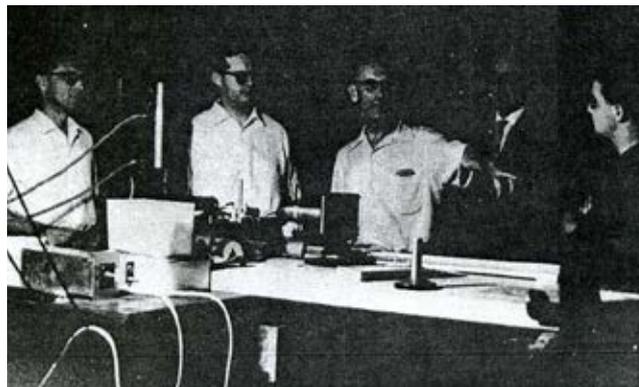


FIGURA 1 Ugo Ascoli-Bartoli, Alberto De Angelis, Franco Rasetti, Antonio Bolle e Sergio Martellucci (da sinistra a destra) discutono il principio di funzionamento di uno spettrografo a reticolo ad alta risoluzione costruito per la misura della temperatura del plasma ("Laboratorio Gas Ionizzati" al piano sotterraneo dell'Istituto di Fisica "Guglielmo Marconi" di Roma, 1959)

Fonte: Servizio Documentazione dell'ENEA di Frascati

stiche delle apparecchiature usate molti anni prima, ai tempi delle ricerche con Fermi. Ricordava anche calcoli, formule e teorie sviluppate in precedenza, con Fermi, e sapeva con certezza dove andare a cercare i risultati ottenuti in passato, nel momento in cui si fossero rivelati utili per nuovi esperimenti. Ad esempio, la formula che dà la refrattività del plasma, Rasetti me la fece trovare su una pubblicazione di Fermi conservata nella biblioteca dell'Istituto Guglielmo Marconi sull'indice di rifrazione dei plasmi interstellari. Utile anche nella stesura dei testi in inglese: il primo lavoro in lingua inglese me l'ha corretto lui ed io conservo ancora il manoscritto con le sue correzioni originali. Allora non c'erano i calcolatori e tuttavia lui lavorava con la stessa logica di composizione: se per esempio bisognava ricomporre lo scritto, lui lavorava con la colla e le forbici e ritagliava il tutto. In parallelo alle attività di laboratorio e alla stesura degli articoli, alle undici di ogni mattina, Rasetti raccoglieva tutto il gruppo assieme ad altri dell'Istituto che volessero ascoltarlo, ci portava in un'aula libera e ci faceva il corso di meccanica statistica che lui era abituato a tenere a quella stessa ora a Baltimora, alla Johns Hopkins University. Spiegava con una conoscenza teorica che era pari alla sua abilità sperimentale. Rasetti, in collaborazione con Ugo Ascoli-Bartoli, eseguì la prima misura al mondo della densità elettronica

di un plasma mediante interferometro ottico; i risultati furono pubblicati nel 1959 sul «Nuovo Cimento» [1].

Io, all'epoca ancora laureando in Fisica sotto la guida di Ascoli-Bartoli e Rasetti, rammento che in questa esperienza venne utilizzato l'interferometro di Jamin già ricordato, di produzione tedesca, di qualità ottica eccezionale, costruito alla fine del secolo precedente. Grazie a questo interferometro il gruppo di ricercatori del "Laboratorio Gas Ionizzati" misurò la variazione dell'indice di rifrazione dell'argon quando questo gas veniva ionizzato con una scarica a radiofrequenza. L'indice di rifrazione di un materiale indica la velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica (un segnale luminoso) in quel materiale, rapportata alla sua velocità nel vuoto. Per un gas di elettroni questo indice dipende, oltre che dalla frequenza della radiazione incidente, dalla densità degli elettroni. Poiché l'indice di rifrazione si può misurare con tecniche interferometriche, è possibile in tal modo ricavare la densità elettronica. Questa è la strada che seguirono Rasetti e Ascoli-Bartoli, aiutati dai due giovani collaboratori Martellucci e De Angelis, ricordati nei ringraziamenti della pubblicazione.

L'articolo del 1959 è l'unico sull'argomento che porti la firma di Rasetti, ma il suo contributo è all'origine anche di numerose ricerche successive, pubblicate da Ascoli-Bartoli e dal suo gruppo in quegli anni. In questi articoli il nome di Rasetti compare solo nei ringraziamenti. Noi volevamo che lui firmasse i lavori, ma si è sempre rifiutato di farlo perché diceva che il suo interesse in questo campo era zero. Lui lo aveva fatto solo per il piacere di continuare a lavorare in laboratorio con noi. Nonostante il suo interesse fosse quasi nullo, Rasetti continuava a offrire la propria collaborazione: ci ha seguito dandoci consigli preziosi ogni volta che ne avevamo bisogno, anche attraverso colloqui telefonici, lui negli Stati Uniti e noi in Italia. Quando Rasetti tornava in Italia, non mancava mai di venirci a trovare e noi, pur di continuare a beneficiare dei suoi consigli, ritardammo il più possibile il trasferimento a Frascati nell'attuale sede degli esperimenti del programma sulla fusione nucleare.

Il primo laser a rubino

I miei ricordi non sono limitati al 1959, quando Rasetti era in anno sabatico a Roma, ma si estendono anche

agli anni seguenti. Nel 1960, Rasetti ci comunicò che era stata fatta la più importante scoperta scientifica del secolo: la rivista inglese *Nature* aveva pubblicato il successo di Ted Maiman, della Hughes Aircraft Co. nel far funzionare il primo laser a rubino al mondo, sorgente di luce coerente nel rosso a 6943 Å. Osservò che bisognava essere grati al "referee" della rivista inglese *Nature* (forse lui stesso) che l'aveva autorizzata, superando le forti opposizioni delle riviste scientifiche americane che ne avevano impedito la pubblicazione per favorire il primato della scoperta dell'industria Bell Telephone Co. che stava mettendo a punto il laser a gas ad He-Ne. La coerenza della luce laser permetteva di ottenere, oltre la monocromaticità della radiazione, tutte quelle conseguenze che costituiscono oggi i risultati della moderna ricerca dell'ottica o elettronica quantistica. Per noi fu subito evidente che, dopo tanti sforzi spesi nel ricercare sorgenti di luce impulsate così brillanti da superare la luce emessa dal plasma, avevamo finalmente a disposizione la migliore sorgente di luce possibile da utilizzare a questo scopo. Da Rasetti venne il suggerimento di cominciare a usare il laser. Ci serviva una sorgente di notevole brillantezza e Rasetti mi suggerì di cominciare a costruirmi da solo un laser in casa. «Il rubino sintetico te l'ho portato io», disse, e tirò fuori dalla tasca la barretta di rubino sintetico che ci aveva portato dagli Stati Uniti. Questo fu solo uno dei numerosi aiuti e consigli che Rasetti continuò a dispensare tutte le volte che passava a trovarci, cosa che non mancava mai di fare quando si trovava a Roma.

Non solo per la fisica, però: una volta si precipitò in laboratorio per un motivo particolare. Un giorno stavamo lavorando in laboratorio io e De Angelis, che aveva il compito di curare i sistemi da vuoto. Il professor Rasetti, senza alcun preavviso, piombò in laboratorio ancora in tenuta da montagna e chiamò De Angelis chiedendogli di aprire immediatamente una campana sotto vuoto; De Angelis la aprì e Rasetti vi mise la sua macchina fotografica, accese la pompa e disse: «Speriamo di esserci riusciti ... » A cosa? «Io vengo direttamente dal Gran Sasso», ci spiegò. «Sono venuto giù di corsa perché ero a fotografare lo sbocciare di un fiore. Ho fatto delle fotografie eccezionali di cui sono a caccia da tempo. Dopo aver fatto queste foto, mi sono avvicinato al fiore, che si trovava in prossimità di un ruscello; chinandomi per osservarlo meglio, la macchina fotografica, che portavo a

tracolla, mi è andata nell'acqua... A me della macchina non importa, ma voglio recuperare la pellicola; allora ho pensato di venire qui a Roma a far aspirare sotto vuoto tutta l'acqua e l'umidità che è entrata nella macchina per salvare il rullino. Ora», concluse rivolgendosi a De Angelis, «sono nelle tue mani». Ha funzionato.

L'Accademia dei Lincei, su proposta di Amaldi, ha pubblicato nel 1980 il suo libro *I fiori delle Alpi*. Quindi non solo fisica, ma conversazioni piacevoli sui più disparati argomenti. Solo un tema è sempre stato tabù: sono stato a lungo con Rasetti per parecchi anni, parlando di tutto, dalle barzellette, alle donne (era molto brillante anche da quel punto di vista...), fino al problema di Majorana, gli insetti, i fiori ... solo della bomba atomica non ha mai, mai, mai voluto parlare. Il "problema di Majorana" cui si fa riferimento è la scomparsa del compagno di via Panisperna e la fantasiosa ipotesi fatta nel romanzo di Sciascia su tale scomparsa: Amaldi e anche Persico ritenevano che quel libro fosse offensivo nei confronti della memoria di Majorana. Loro stimavano moltissimo Majorana. Ritenevano che fosse caduto in una fortissima depressione dopo aver vinto una cattedra a Napoli, e questo stava alla base del suicidio nel viaggio per mare da Napoli a Palermo, dove risiedeva la sua famiglia. Majorana era un fisico teorico brillantissimo, con delle intuizioni prodigiose, e discuteva solamente con Fermi. Per esempio, Persico diceva che Majorana era una persona capace di risolvere qualunque problema teorico gli sottoponesse. «Allora», raccontava Persico, «la procedura era questa: noi, se avevamo un problema, lo discutevamo con Fermi e mettevamo insieme il quesito per scritto. Lo davamo a Majorana che ci lavorava da solo e ci rispondeva per iscritto in maniera chiarissima, inequivocabile e sempre perfetta». «L'unico problema», aggiungeva Rasetti, «era che scriveva con una calligrafia minuscola su pezzetti di carta molto piccoli ed era difficile decifrare il testo!» Questo era il carattere toscano di Rasetti che metteva tutto sullo scherzo. Però anche lui aveva di Majorana una stima incredibile. Più tardi le visite iniziarono a diradarsi dopo la morte della madre, nel 1972. La fisica cominciò a cedere sempre più il posto ad altri interessi: la paleontologia, la botanica, l'entomologia. La sua ricca e rara collezione di trilobiti, vedi la Figura 2, è conservata al museo dell'ISPRA di Roma (<http://www.anms.it/upload/rivistefiles/8d62f9fc1c2dc8ce2d937699f9021eff.pdf>).

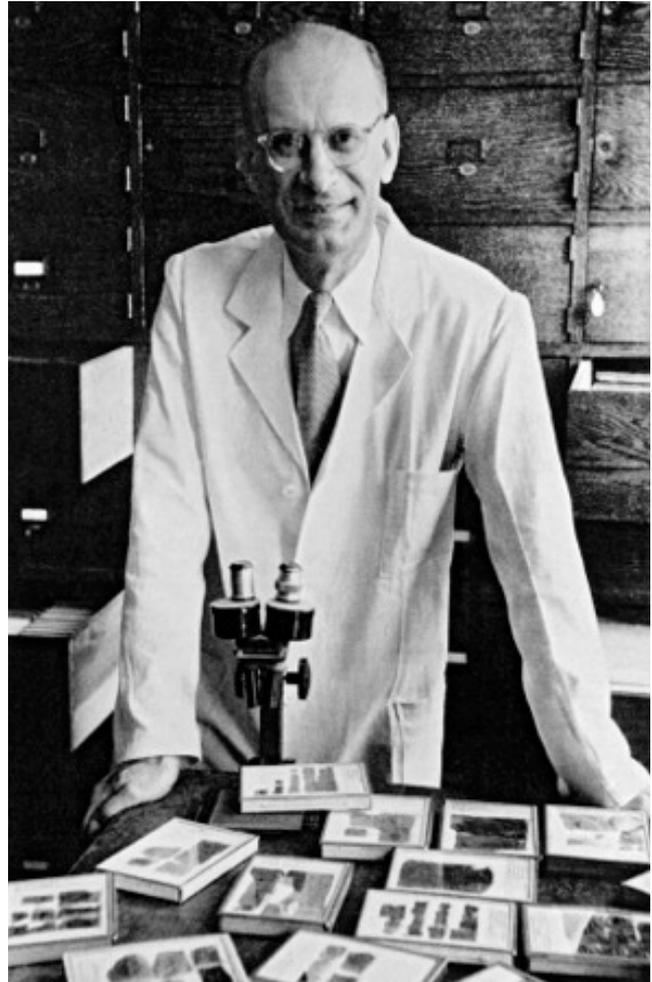


FIGURA 2 Franco Rasetti con la sua collezione di trilobiti alla Johns Hopkins University, nel 1953
Fonte: <http://www.francorasetti.it/>

Il gruppo di "Ottica e Spettroscopia" del "Laboratorio Gas Ionizzati" di Frascati

Il lavoro di ricerca, iniziato con Rasetti, proseguì poi nel gruppo di "Ottica e Spettroscopia" del "Laboratorio Gas Ionizzati" di Frascati con gli sviluppi delle tecniche laser sotto la guida di Ugo Ascoli-Bartoli. Egli partecipò alla vita del Laboratorio di Frascati fin dalla sua costituzione nell'ottobre 1957. Inizialmente vi partecipava



FIGURA 3 Ugo Ascoli-Bartoli illustra le disomogeneità di un plasma “theta-pinch” evidenziate con una foto “shadowgraph” ottenuta con un laser a rubino impulsato (Amsterdam 1962)

Fonte: Servizio Documentazione dell’ENEA di Frascati

nei pomeriggi e nei fine settimana liberi dal suo impegno presso l’Istituto Sperimentale delle FF.SS., Ferrovie dello Stato, successivamente a pieno tempo, da quando venne distaccato da quell’Istituto ed associato all’EURATOM. Il contributo o meglio l’impulso dato con originalità di concezione e di realizzazione alle esperienze con plasma diagnosticato otticamente è testimoniato dai numerosi lavori pubblicati, dapprima con gli esperimenti pionieristici basati sulla refrattività del plasma

che con ingegnosi accorgimenti tecnici egli realizzò con sorgenti luminose standard.

Dopo la scoperta del laser di Maiman, dal 1962 introdusse l’uso del laser a rubino impulsato nelle tecniche di interferometria, schlieren e shadowgraph, applicate al plasma per misurarne la densità, il suo gradiente ed il suo laplaciano, e nel 1963 eseguì il primo esperimento di scattering (diffusione) di luce laser dal plasma, sempre a scopo diagnostico, per misurarne la temperatura. In Europa molti ricordano ancora le belle diapositive *shadowgraph* di un *thetapinch* di Frascati proiettate due volte su richiesta dei partecipanti allo European Study Group on Fusion, tenutosi nel 1962 ad Amsterdam (Figura 3).

Negli anni successivi tutte queste tecniche, diventate di uso generale nella fisica del plasma, sono state ripetutamente applicate negli esperimenti del Laboratorio di Frascati con la costante e fattiva collaborazione del prof. Ascoli-Bartoli. Il suo apparato di laser scattering per la misura della temperatura elettronica del plasma utilizzato sul Tokamak FT (Frascati Torus) in Italia, è stato impiegato anche sul Tokamak Alcator al MIT (Massachusetts Institute of Technology) di Boston, negli Stati Uniti.

Ancora nello stesso periodo, in piena guerra fredda, grazie ad uno speciale accordo tra EURATOM e l’Accademia delle Scienze dell’URSS, il gruppo inglese di Culham, diretto da Nicol J. Peacock, utilizzò a Mosca sul Tokamak T-3 dell’Istituto Kurchatov lo stesso metodo di laser scattering per la misura di temperatura del plasma.

Un’altra importante impresa sperimentale, avviata e mandata avanti con vigore dal prof. Ascoli-Bartoli sin dal 1963, è stato l’esperimento di ablazione mediante laser di un granello di idrogeno solido colpito al volo. Si avviava così a Frascati un nuovo filone di ricerca, tutt’ora vivo, che dava significativi risultati nel campo della fusione a confinamento inerziale, con un anticipo di quasi dieci anni rispetto alla data (1972) della ‘declassificazione’ di questa linea alternativa a quella del confinamento magnetico.

Ricordo ancora l’entusiasmo di Ugo Ascoli-Bartoli che, di ritorno dalla Conferenza Internazionale sull’Elettronica Quantistica di Parigi del 1963, ci raccontava l’intervento (e le sue successive discussioni con lui) di Nicolay G. Basov sulla possibilità di innescare reazioni di fusione nucleare utilizzando laser impulsati di elevatissima potenza. Basov nell’anno successivo (1964) condivise il Premio Nobel per la Fisica con Alexander M. Prokhorov

e Charles H. Townes, per i loro studi e ricerche nel campo degli oscillatori ed amplificatori maser e laser. Dopo breve tempo abbiamo messo a punto, sotto la sua guida, tutti gli apparati sperimentali necessari (il sistema laser a impulsi ultracorti di altissima potenza, il sistema criogenico per solidificare il deuterio alla temperatura di 4K, il sistema di diagnostica neutronica per la misura delle reazioni di fusione prodotte, ecc.).

Il nostro senso dell'umorismo (anzi prevalentemente quello di Ugo) ci suggerì di dare all'esperimento il nome di "Hot Ice", in italiano "Ghiaccio Bollente", il soprannome dato ad Anita Ekberg, la fascinosa attrice svedese protagonista del film "La dolce vita" di Federico Fellini, la fredda donna nordica riscaldata dal "latin lover" Marcello Mastroianni. L'esperimento ha raggiunto nel 1970 il regime termonucleare, ottenendo neutroni da reazioni di fusione, ma è stato chiuso su richiesta di EURATOM perché il confinamento inerziale era allora ancora classificato in Italia. I ricercatori del gruppo "Optica e Spettroscopia", aumentati a circa 10 persone nel corso degli anni, passarono ad altri programmi, ad esempio allo studio del Tokamak FT di Frascati, compreso Ugo Ascoli-Bartoli, ovvero si trasferirono in altri enti di ricerca in Italia e all'estero. Ugo Ascoli-Bartoli è morto all'età di 57 anni all'alba dell'11 settembre 1980. Ugo dalla vita di laboratorio ebbe grandi soddisfazioni, ma non si può non ricordare il suo cruccio, quando quotidiane difficoltà e limitazioni di mezzi non gli permettevano di realizzare le tecniche più avanzate che avrebbero aumentato nell'esperimento la precisione, la ricchezza di informazione o semplicemente l'eleganza della soluzione.

Studi e programmi sulla fisica del laser e le sue applicazioni

Io, che, come Ascoli-Bartoli, avevo già avuto esperienze di insegnamento universitario con corsi di "Elettronica Quantistica" presso l'Università dell'Aquila e di "Fisica" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "Sapienza", sono stato chiamato, vincitore di concorso di prima fascia, sulla cattedra di "Fisica" della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli e, poi, all'Università di Roma "Tor Vergata", a partire dalla sua fondazione. Sempre, comunque, la mia attività di ricerca è stata rivolta alla fisica del laser e alle sue applicazioni.

Ho preso parte ad altri programmi di ricerca laser sia CNEN (ad es. di arricchimento isotopico dell'uranio, Progetto AIFA, Arricchimento Isotopico Foto-Assistito) sia CNR (Progetti Finalizzati "Laser di potenza" e "Tecnologie elettro-ottiche", dedicati alle applicazioni meccaniche, mediche dei laser, e dei sistemi optoelettronici per la difesa militare, l'ambiente e l'informatica), sia nazionali che internazionali (come EUROLASER), coinvolgendo in questi progetti aziende pubbliche, private, centri di ricerca ed università di tutta l'Italia.

Nel 1980 il prof. Zichichi mi ha poi nominato Direttore della Scuola Internazionale di Elettronica Quantistica del suo Centro e Fondazione di Cultura Scientifica "Ettore Majorana" di Erice, della quale si sono tenuti sino ad oggi circa 60 corsi dedicati sempre alla fisica del laser ed alle sue applicazioni a partire dal primo corso dedicato ai FEL (Laser ad Elettroni Liberi). Nel 40° Corso di questa Scuola, nel 2004, per festeggiare il 40° anniversario del conferimento del Premio Nobel per la Fisica nel 1964 a Basov, Prokhorov e Townes, che ho già ricordato, ho invitato ad Erice il prof. Townes che ha tenuto la lezione di apertura [2], ricordando che il 2004 rappresentava anche il 50° anniversario della realizzazione nel 1954 del suo primo maser a microonde (Figura 4).

Basov e Prokhorov erano già morti, mentre Townes è morto quasi centenario alla fine del gennaio 2015. Egli è stato uno degli scienziati invitati ad Erice dopo



FIGURA 4 Charles H. Townes e Sergio Martellucci ad Erice durante la premiazione con la medaglia Galileo Galilei della Società Italiana di Ottica e Fotonica (Erice 2004)
Fonte: Centro e Fondazione "Ettore Majorana", Erice (Trapani)

aver vinto il Premio Nobel per la Fisica, ma nel Workshop “Progress in Microemulsions” della mia Scuola nel 1985, e nel Corso “Bose-Einstein Condensates and Atom Laser” nel 1999, hanno partecipato il prof. Pierre Gilles de Gennes ed il prof. Wolfgang Ketterle, che hanno successivamente vinto il Premio Nobel per la Fisica nel 1991 e nel 2001, rispettivamente. Mi piace concludere osservando che forse il prof. Townes ha voluto la-

sciarsi dopo che nel 2014 il Premio Nobel per la Fisica è stato assegnato ad Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura per l’invenzione dei laser a LED (diodi emettitori di luce) e dopo l’inizio dell’anno 2015, dedicato dalla comunità scientifica internazionale alla celebrazione dell’International Year of Light (IYL 2015). ●

Sergio Martellucci
Università di Roma “Tor Vergata”, Facoltà di Ingegneria

abstract

The discovery of the coherent light (the laser) and the nuclear fusion research

The author describes the laser applications to the plasma diagnostics and production starting from the Maiman ruby laser discovery that have been studied by the “Optics and Spectroscopy” group of the CNEN “Ionized Gases Laboratory” he was member of.

bibliografia

- [1] U. Ascoli-Bartoli and F. Rasetti, “Measurement of the Refractive Index of a Plasma in the Optical Region”, *Il Nuovo Cimento* 1959, Serie X, Vol. 13, pp. 1296-1299
- [2] C.H. Townes, “Birth of the maser and laser”, in *Proceedings of the NATO A.S.I. Optical Chemical Sensors*, 29 July – 10 August 2004, Editors: F. Baldini, A.N. Chester, J. Homola and S. Martellucci. Springer, NATO Science Series Vol. 224 (2006), pag. 1-15

Gran parte del materiale presente in questo articolo è stato tratto da precedenti pubblicazioni dello stesso autore, in italiano o in inglese, ricordate di seguito:

- Quaderni de *La Ricerca Scientifica*, n. 111, Gruppo Nazionale di Elettronica Quantistica e Plasmi del CNR, “2° Congresso Nazionale Elettronica Quantistica e Plasmi” (Palermo, 1980, a cura di V. Degiorgio, S. Martellucci & S. Riva Sanseverino), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma 1983, pag. 11
- Sergio Martellucci, “The birth of plasma diagnostics and production by laser. Selected papers and talks in memory of Ugo Ascoli-Bartoli”, Università di Roma Tor Vergata – ENEA – ARACNE 22 (2004), pag. VII
- Valeria Del Gamba, *Il ragazzo di via Panisperna: l'avventurosa vita del fisico Franco Rasetti*, Saggi – Scienze – Bollati Boringhieri (2007) pag. 106-109, 134-137
- William A. Barletta and Henning Wegener, “Averting Disaster: Science for Peace in a Perilous Age. The Erice International Seminars on Nuclear War and Planetary Emergencies: From 1981 to 2008”, *World Scientific* (2010), pag. 101-104



Dai fasci di elettroni ai fasci di fotoni

In questo articolo cerco di rievocare al meglio gli eventi e le emozioni che io, insieme ai miei colleghi, sperimentammo in quel periodo in cui io, giovane ricercatore, lavoravo al Centro di Frascati del CNEN. Verso la metà degli anni 70 le attività di fisica delle alte energie svolte in Frascati vennero trasferite dal CNEN all'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) e il personale ebbe la possibilità di scegliere se continuare a lavorare al CNEN (ovviamente in un differente campo di ricerca) o continuare a lavorare nel campo delle alte energie, ma presso l'INFN. Decisi di rimanere al CNEN e, conseguentemente, dovetti cambiare campo di ricerca. Passai così dagli acceleratori di particelle di alta energia ai laser, campo di ricerca nel quale proprio in quel tempo stava partendo un nuovo interessante progetto sulla "separazione isotopica dell'uranio tramite radiazione laser". L'articolo è concentrato sulle attività di ricerca teorica e sperimentale sviluppate negli anni 70 e 80 presso il centro di Frascati del CNEN su un laser molto particolare che si prevedeva di utilizzare in quel progetto. In questo tipo di laser il mezzo attivo non è costituito da atomi o molecole ma da un fascio di "elettroni liberi" fatto correre lungo una struttura magnetica spazialmente periodica: questo laser è il "Laser ad Elettroni Liberi"

DOI 10.12910/EAI2015-089

■ A. Renieri

Premessa

In questo articolo ho riportato i miei ricordi di "giovane ricercatore" nel CNEN di Frascati negli anni 70 e 80. Ammetto che molte considerazioni che vi troverete sono affette da quel "senno di poi" che affligge tipicamente tutti i ricordi dei tempi passati (parliamo di un periodo di circa 10 anni a partire da più di 40 anni fa). Spero però di essere riuscito, almeno in parte, a rendere "intelligibile" l'atmosfera, gli entusiasmi, le soddisfazioni e, ahimè, anche le delusioni di quegli anni.

Dai fasci di elettroni...

È l'anno 1976. Una grossa rivoluzione sta avvenendo nei Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) dell'allora Comita-

to Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN), oggi ENEA. Le attività di ricerca nel campo delle particelle elementari svolte da sempre sotto la direzione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) vengono scorporate dal CNEN e assegnate (laboratori e personale) direttamente all'INFN. Le procedure per tale trasferimento di attività prevedono la libera scelta del personale, che può optare di restare nel CNEN, ovviamente in altri ambiti di ricerca, o accettare il passaggio all'INFN, mantenendo gli stessi impegni di lavoro già svolti presso il CNEN. Per molti di noi la scelta non fu facile, specialmente per chi era impegnato in attività di supporto, come, nel mio caso, quelle relative agli acceleratori di particelle. Le prospettive di lavoro a Frascati nel campo degli acceleratori non erano a quel tempo così rosee. Pochi anni prima era stato affossato il Progetto Superadone, che avrebbe permesso di mantenere a Frascati le attività di ricerca sugli anelli di accumulazione elettrone-positrone ($e^- e^+$) ai livelli raggiunti con la realizzazione negli anni 60, su ideazione di Bruno Touschek, di ADA, primo anello ad essere realizzato nel mondo, e poi di Adone, che aveva

Contact person: Alberto Renieri
kristinalb@libero.it



fatto seguito alla macchina francese ACO, acceleratore alla cui realizzazione il Gruppo Adone aveva dato importanti contributi.

Proprio in Adone io mossi i primi passi nel mondo degli acceleratori ed ebbi la ventura di seguire, anche con trepidazione, la travagliata messa in operazione della macchina. Si era nel 1968 e un gravissimo problema affliggeva l'anello di accumulazione elettroni-positroni: non si riuscivano ad iniettare i positroni! La notizia filtrò in qualche modo all'esterno e Adone ebbe l'onore di un lungo e ben documentato articolo su *Playmen*, con un titolo in linea con la scelta editoriale di quel giornale: "Adone impotente". In quel frangente ben capii cosa volesse dire "ricerca".

Due fisici teorici (Claudio Pellegrini e Matthew Sands) capirono velocemente il problema: una instabilità di fascio dovuta all'accoppiamento tra i moti longitudinali e trasversali (rispetto alla traiettoria) delle particelle accumulate nell'acceleratore (instabilità testa-coda). Non solo capirono il problema, ma trovarono anche il colpevole, cioè chi provocava quell'accoppiamento. Si trattava degli elettrodi che dovevano servire a modificare le traiettorie degli elettroni e positroni, in modo da far sì che le collisioni avvenissero ad angolo e non "frontali". Tolti gli elettrodi tutto funzionò perfettamente. Era, se ben ricordo, la vigilia del Natale del 1968 quando si riuscì finalmente ad iniettare in modo sostanziale i positroni nella macchina. Sembrava un caso da manuale, preparato apposta per istruire me, giovanissimo "macchinista". Di Adone si parlò nuovamente nella stampa, ma con tutt'altro tono. La notorietà così acquisita aveva anche un prezzo. Le lettere di cultori di fisica "non convenzionale" (tipo: moto perpetuo, non è vero che non si può superare la velocità della luce, il motore ad acqua...) arrivavano copiose. Una fu anche indirizzata al "Prof. Adone", e dunque la nostra macchina acquisì anche titoli accademici. Nel 1976, ci si trovò, come prima detto, di fronte alla scelta se restare nel CNEN o passare all'INFN. La mia scelta fu di lasciare il Gruppo Adone, al quale era legata tutta la mia attività di ricerca fin dal lavoro di preparazione della Tesi di Laurea. Fui spinto a questa sofferta decisione (ero e sono poi rimasto sempre molto legato ai colleghi del gruppo Adone e alla comunità dei "macchinisti") da due considerazioni:

- Le scarse prospettive di realizzazione di una nuova macchina acceleratrice nel futuro prossimo: avevo con

entusiasmo collaborato alla preparazione della proposta del progetto Superadone e la delusione per la bocciatura fu forte. In effetti a Frascati si dovettero attendere molti anni prima di partire con un nuovo progetto di punta in questo campo (Dafne negli anni 90).

- L'interesse crescente che vi era per le sorgenti laser, anche in relazione alle attività legate ad importanti sviluppi nel campo dell'energia nucleare. Tale opzione stava allora nuovamente prendendo quota in Italia dopo la crisi energetica seguita alla guerra del Kipur del 1973 tra Egitto, Siria e Israele, crisi provocata dal blocco delle esportazioni di petrolio verso USA e Olanda dai paesi arabi aderenti all'OPEC e dal susseguente innalzamento vertiginoso (circa triplicato) del prezzo del petrolio.

Cominciò così per me, e per molti altri colleghi che presero la mia stessa decisione, una nuova avventura in un campo nuovo, stimolante, ma anche abbastanza per noi sconosciuto: dovevamo ricominciare da capo per inserirci a pieno titolo in questa nuova (per noi) comunità. Comunità che in realtà fu fin dall'inizio molto ben disposta verso noi nuovi adepti. Furono organizzati in Frascati corsi "accelerati" di ottica quantistica, tenuti da docenti ben felici di aprirci le porte del loro mondo. Eravamo però una anomalia, come fu rimarcato in una comunicazione al Congresso della Società Italiana di Fisica del 1978 a Trento, dove, presentando lo stato delle ricerche in Italia sull'ottica quantistica, si citarono le attività di un gruppo di "fisici disoccupati delle alte energie" in Frascati.

...ai fasci di fotoni

Nel centro di ricerca del CNEN di Frascati le ricerche nel campo dei laser erano attive, nella "Divisione Gas Ionizzati", fin dall'inizio dello sviluppo di questa tecnologia. Erano nate per sviluppare sia nuovi sistemi diagnostici nel campo della fisica dei plasmi sia per lo studio dell'interazione laser-materia finalizzata alla realizzazione di sistemi di fusione inerziale. I programmi di ricerca nei quali stavano per impegnarsi i ricercatori e i tecnici che avevano optato per il CNEN riguardavano in parte i temi prima menzionati, in parte un nuovo tema, sempre legato alle problematiche energetiche, *l'arricchimento isotopico foto assistito*. È su questo tema che fui io impegnato fin dall'inizio e il decollo di una delle attività nelle quali era

questo tema articolato cercherò di tratteggiare nel seguito di questo articolo.

L'arricchimento isotopico dell'uranio

Per poter sfruttare il processo di fissione nucleare ai fini di produzione di energia è necessario disporre di combustibile nucleare opportunamente "arricchito" dell'isotopo ^{235}U , unico isotopo fissile esistente allo stato naturale, rispetto all'isotopo ^{238}U , che non è fissile. Il rapporto tra i due isotopi nell'uranio naturale è oggi circa 0,71% (tale rapporto varia col tempo a causa della diversa emivita dei due isotopi). I metodi classici per l'arricchimento isotopico dell'uranio, arricchimento che per gli impieghi in campo energetico tipicamente deve essere di circa il 3% rispetto allo 0,71% naturale, sfruttano la differente massa dei due isotopi in processi di diffusione o di centrifugazione.

In Europa il combustibile nucleare veniva a quei tempi prodotto dal consorzio EURODIF che, utilizzando il processo di diffusione del gas UF_6 , arrivava ad un arricchimento di circa il 3-5%. L'Italia era uno dei partner di EURODIF e utilizzava il combustibile lì prodotto per alimentare le sue centrali elettronucleari allora in attività. Ma, oltre al combustibile arricchito, all'Italia spettavano anche le corrispondenti "code" di arricchimento, cioè l'uranio impoverito (depleto) che restava dopo il processo di arricchimento. Si stimava in circa 20.000 tonnellate la dimensione di queste code. Tale materiale conteneva ancora quantità importanti di ^{235}U , una frazione rispetto all'isotopo ^{238}U dell'ordine del 0,25-0,4% contro il circa 0,71% dell'uranio naturale. E dunque queste code costituivano una piccola "miniera di uranio" a disposizione per ulteriori utilizzi. Il valore "commerciale" era all'epoca stimato in svariate migliaia di miliardi di lire. Non era possibile sfruttare tali code per ottenere ulteriore materiale arricchito mediante il processo di diffusione in quanto, a quei livelli di abbondanza isotopica residua del ^{235}U , si arriva a saturazione. Vi era però un altro metodo di arricchimento allora in corso di investigazione in vari paesi, in particolare a Los Alamos negli USA, l'*arricchimento isotopico foto assistito*, che prometteva più alta efficienza ed economicità, oltre a non essere soggetto a saturazione. Tale processo permette di arricchire l'uranio sia in forma metallica (vapori di uranio) sia in forma molecolare (UF_6 : esafluoruro di uranio).

L'arricchimento isotopico foto assistito

Il processo di arricchimento isotopico foto assistito sfrutta il piccolo "shift isotopico" delle righe spettrali dell'atomo di uranio (o dei suoi composti, in particolare l'esafluoruro di uranio UF_6) dovuto alla differenza di massa (tre neutroni rispetto a 238 tra protoni e neutroni) tra i due isotopi ^{238}U e ^{235}U . Caratteristica di tale processo è di non essere soggetto a saturazione. È dunque il processo ideale per sfruttare le code di arricchimento. Va anche detto che, per la stessa ragione, è anche ideale per scopi non pacifici, e, come vedremo, questo si rivelerà per noi un grosso problema.

Nel seguito mi concentrerò esclusivamente sulla attività nella quale fui io impegnato: lo sviluppo del laser di alta potenza media per il processo di arricchimento dell'uranio in forma molecolare nel medio infrarosso (MIR). Altri importantissimi studi per la separazione isotopica nell'IR dell' UF_6 partendo da esperimenti su molecole con struttura simile sono descritti in questo volume [1].

Il laser di alta potenza media nel MIR

Una prima cosa ci fu molto chiara fin dall'inizio di questa avventura, e ci stimolò oltremodo a tentare l'impresa: un laser operante nel MIR in grado di soddisfare tutte le richieste poste dal processo di arricchimento non esisteva ancora.

Un laser adeguato per essere utilizzato proficuamente in un impianto di arricchimento doveva in primo luogo essere accordabile con continuità attorno alla lunghezza d'onda di $16\ \mu\text{m}$ con larghezza di riga sufficientemente stretta ($\Delta\nu/\nu < 10^{-3}$ che è l'ordine di grandezza dello *shift* isotopico nel UF_6) in modo da poter eccitare selettivamente solo la molecola contenente uno dei due isotopi dell'uranio e di essere in grado di produrre un fascio di radiazione di adeguata potenza media (dell'ordine di 0,1-1 kW). Deve infine avere una efficienza il più possibile elevata al fine di garantire una adeguata economicità del processo di arricchimento.

Il nostro primo impegno fu dunque di riuscire a individuare quale tipo di sorgente presentasse le potenzialità di raggiungere, con opportuna attività di ricerca e sviluppo, le caratteristiche richieste. Sembrava non vi fossero a breve scelte percorribili tranne una. Nel 1976 era stato annunciato da un gruppo di ricerca presso l'Univer-

sità di Stanford, guidato da un giovane ricercatore, John Madey, il successo di un esperimento di amplificazione di radiazione laser, alla lunghezza d'onda di 10,6 μm generata da un laser CO_2 , realizzato con un dispositivo “non convenzionale”, nel quale il mezzo attivo non era costituito da atomi e molecole ma da elettroni liberi di alta energia fatti passare lungo una struttura magnetica periodica (“Ondulatore”) [2]. L'anno dopo [3] lo stesso gruppo annunciò la prima operazione alla lunghezza d'onda di 3,417 μm di un oscillatore laser basato su tale dispositivo. Il nome dato a questo nuovo laser fu FEL (Free Electron Laser, cioè laser ad elettroni liberi). Una delle caratteristiche peculiari del FEL è la sua accordabilità. Con una opportuna scelta del passo e del campo magnetico dell'ondulatore e dell'energia del fascio di elettroni, è possibile, in linea di principio, coprire un vastissimo campo spettrale che, con la tecnologia attuale, è arrivato fino ai raggi X [4].

Il laser ad elettroni liberi (FEL): Si parte per una avventura che ancora continua

La decisione di partire con una attività di ricerca e sviluppo nel campo dei FEL fu presa in breve tempo, malgrado tutte le possibili controindicazioni che tale impresa presentava. In particolare:

- Esisteva all'epoca un solo dispositivo di tipo FEL, quello di Stanford. Vi erano molti dubbi sui risultati ottenuti e non era affatto chiaro quali fossero i limiti di quel dispositivo, specialmente in termini di potenza media ed efficienza. Per di più aveva operato con successo solo per un periodo molto limitato: per anni il gruppo di Madey non riuscì a rimmetterlo più in funzione (ma questo noi non lo potevamo prevedere).
- Il FEL non è un dispositivo “da laboratorio”, infatti è tipicamente di grandi dimensioni, molto costoso e di difficile operazione: in particolare utilizza fasci di elettroni di energia relativamente elevata (per la regione spettrale di nostro interesse alcune decine di MeV), e dunque necessita di sistemi di protezione per le radiazioni ionizzanti e di un sistema di controllo remoto di tutte le operazioni (quelle ottiche comprese).

Ma a favore del FEL vi erano due aspetti per noi importantissimi:

- La “totale” accordabilità.
- L'alta potenza media e di picco che si poteva preve-

dere di conseguire, dato il livello allora raggiunto dalla tecnologia di produzione e accelerazione dei fasci di elettroni relativistici, e una prevista “sufficiente” efficienza di trasferimento di energia (fascio elettroni) \rightarrow (fascio laser).

Fu dunque realmente una scommessa l'esserci impegnati in tale impresa. Una spinta particolare ci venne dall'entusiasmo col quale questa idea fu portata avanti dall'allora Capo del Laboratorio Sviluppo Laser 2, della Divisione “Nuove Attività” (DNA), dove nel 1976 avevo iniziato la mia nuova esperienza di lavoro, una persona alle cui ampie capacità di visione si deve tanta parte dello sviluppo sia delle attività di ricerca in Frascati sia di molte delle imprese nelle quali prima il CNEN poi l'ENEA sarà poi negli anni successivi coinvolto, questa persona era Angelo Marino.

In realtà va detto che non si partiva “al buio”. A Frascati avevamo tutte le competenze necessarie per tale impresa, sia riguardo agli acceleratori di elettroni (ex gruppo macchina Sincrotrone e “transfughi” dal gruppo Adone, come il sottoscritto), sia riguardo alle tecnologie necessarie alla realizzazione di magneti speciali, come gli ondulatori. Riguardo alle tecnologie ottiche si aveva il valido supporto di colleghi che avevano sviluppato la loro esperienza nel campo lavorando nei progetti della Divisione Gas Ionizzati.

Chi non conosce la storia è condannato a ripeterla

Come si è accennato nel paragrafo precedente, nel 1977 i meccanismi di funzionamento del FEL non erano affatto chiari. Madey aveva ricavato le relazioni fondamentali che legavano lunghezza d'onda e guadagno laser alle caratteristiche del fascio di elettroni e dell'ondulatore utilizzando un approccio quantistico [5]. Ma alla fine la costante di Planck scompariva, il che faceva supporre che tale dispositivo fosse puramente classico, come in effetti fu poco dopo dimostrato dal gruppo teorico dell'allora “Optical Sciences Center” di Tucson in Arizona (ora “College of Optical Sciences”), guidato da Marlan Scully [6].

La fine degli anni 70 vide i primi gruppi che avevano iniziato a lavorare nel campo dei FEL impegnati in accanite discussioni sulla natura di tale dispositivo. In realtà la storia del FEL inizia molto tempo prima dell'esperimento di Stanford, ma questo lo sapevano gli esperti di tubi a microonde, non gli esperti di ottica quantistica o di



acceleratori di particelle! Fortunatamente ci fu alla fine l'incontro tra esperienze diverse, incontro che portò a un benefico travaso interdisciplinare di conoscenze. In particolare vennero riportati alla luce i lavori pubblicati molti anni prima da H. Motz e collaboratori [7], nei quali veniva descritto un dispositivo per la produzione di microonde da elettroni preventivamente impacchettati fatti passare lungo l'asse di un magnete ondulatore. Questo dispositivo fu dagli autori chiamato Ubitron. Il FEL non è altro che un Ubitron nel quale si utilizzano elettroni relativistici e una cavità ottica per realizzare il processo di emissione stimolata, superando così le difficoltà legate al pre-impacchettamento di elettroni a lunghezze d'onda ottiche, difficoltà ben evidenziate dallo stesso Motz. Si evitò così di "riscoprire l'acqua calda" e ci si poté concentrare sugli aspetti di questa particolare tecnologia ancora allora effettivamente oscuri.

Le attività teoriche sui FEL a Frascati

Con riferimento ad un unico esperimento si iniziò a Frascati, nell'ambito del Progetto AIFA (Arricchimento Isotopico Foto Assistito), una attività teorica volta a chiarire se le prestazioni di un FEL operante nel MIR potessero essere adeguate per il processo di separazione isotopica.

Analisi classica e quantistica

Non si partì da soli. Una scelta autarchica sarebbe stata velleitaria e sicuramente inefficace. Esisteva già da qualche anno un'importante collaborazione tra la DNA e l'allora Laboratorio di Elettronica Quantistica del CNR di Firenze (LEQ, poi, dopo varie trasformazioni organizzative, confluito nell'IFAC, Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara"). La collaborazione riguardava il campo dei laser dye (a colorante organico) e ad eccimeri, (cioè basati sull'utilizzo di composti eccitati di gas nobile), campo esplorato nel CNEN al fine dello sviluppo di laser per l'arricchimento isotopico foto assistito dell'uranio metallico nella regione spettrale UV-Visibile sempre nell'ambito del Progetto AIFA. Ebbi la fortuna di poter lavorare sulla teoria del FEL con Arturo Bambini del LEQ e, in seguito, con Stig Stenholm, del "Research Institute for Theoretical Physics" dell'Università di Helsinki (Finlandia). Ricordo con nostalgia le giornate "fiorentine" passate

a lavorare con Arturo. Come ebbe a dire un collega del LEQ a mia moglie che chiedeva di me, passavamo il tempo a "stropicciarci con una hamiltoniana", che era poi quella che descriveva il nostro modello di FEL.

Un primo successo di questa collaborazione fu una trattazione classica della teoria FEL [8]. I risultati confermarono i precedenti lavori che indicavano tale dispositivo come puramente "classico", ma con una particolare scelta del modello. La scelta del sistema di riferimento solidale col fascio di elettroni (descritto da quella hamiltoniana con la quale ci si stropicciava) permise di approssimare il campo dell'ondulatore come una onda elettromagnetica (vista la velocità degli elettroni nel sistema di riferimento del laboratorio molto prossima a quella della luce) e di trattare il processo FEL come diffusione all'indietro dei "fotoni dell'ondulatore" stimolata dai fotoni laser co-propagantesi (nel laboratorio) con il fascio di elettroni. Tale modello si rivelò molto efficace per una analisi quantitativa della radiazione prodotta, aspetto questo che era, all'epoca, molto dibattuto (...è il FEL un laser? ...è la radiazione prodotta coerente?).

Nel frattempo la DNA si arricchiva di nuove giovani e valenti forze, sia sul versante teorico sia su quello sperimentale. In particolare sul versante teorico si dimostrò, come già accennato, estremamente efficace il modello prima descritto per l'analisi delle caratteristiche di coerenza quantistica della radiazione generata da dispositivi FEL [9] (uso il plurale, ma va ricordato che allora di dispositivi ce n'era uno solo, quello di Stanford!). In seguito si aggiunsero alla DNA contributi di alta eccellenza della allora "Divisione Calcolo" del CNEN di Bologna, che, in collaborazione con i colleghi di Frascati e sotto il generoso impulso di Pier Luigi (Gigi) Ottaviani, portò allo sviluppo di nuovi codici di simulazione del processo FEL (tra i quali spicca Prometeo [10]), codici apprezzati e, da allora fino ad oggi, ininterrottamente e largamente utilizzati in campo nazionale e internazionale.

La collaborazione tra Frascati e Bologna prima che un rapporto di lavoro tra colleghi fu un incontro tra amici. Si andava a Bologna per lavorare, ma anche per passare delle belle serate insieme. L'ospitalità di Gigi era poi proverbiale. Ci teneva a prepararci lui direttamente delle favolose cene a base di pesce. Lui affermava di aver imparato a cucinare il pesce così bene dai bagnini della sua città natale, Cattolica.

FEL in Anello di Accumulazione

Un problema aperto, di grande importanza pratica per noi del CNEN impegnati nel progetto AIFA, era quello relativo alla potenza media ed alla efficienza che ci si poteva aspettare nelle migliori condizioni da un FEL. La domanda era: quanta energia possiamo al massimo trasferire dal fascio di elettroni al fascio laser? Nel caso di un FEL a “singolo passaggio”, cioè nel quale il fascio di elettroni viene sfruttato solo una volta e poi mandato a morire in un pozzo di spegnimento, l'efficienza è limitata dalla larghezza di riga omogenea che è proporzionale all'inverso del doppio del numero di periodi dell'ondulatore. Ciò in quanto la perdita di energia del fascio di elettroni nel passaggio lungo l'ondulatore provoca uno spostamento della riga di risonanza. Se tale spostamento è maggiore della larghezza di banda della curva di guadagno gli elettroni escono di risonanza e non cedono più energia al fascio di fotoni. Con i valori tipici in gioco, questa efficienza è di qualche percento. Ovviamente l'efficienza totale del FEL dipenderà dalle perdite nella cavità ottica, dall'efficienza con la quale viene prodotto il fascio di elettroni, oltre che dalla potenza eventualmente impegnata per gli altri impianti di cui si compone il sistema, come, in particolare, i magneti e, eventualmente, la criogenia.

L'idea più immediata che viene alla mente per aumentare l'efficienza (fascio di elettroni)→(fascio laser) è quella di utilizzare più volte il fascio di elettroni, invece di mandarlo a morire subito dopo il primo passaggio nell'ondulatore. Dispositivi di questo genere esistevano già e a Frascati si era all'avanguardia nel campo: erano gli anelli di accumulazione (che in seguito denomineremo più brevemente SR (Storage Ring)), dove è possibile “accumulare” fasci di elettroni che rimangono per ore a circolare nella macchina con perdite molto limitate. È necessario solo rifornire quell'energia che perdono per irraggiamento nei magneti curvanti con opportune cavità acceleranti a radio-frequenza.

L'idea di utilizzare uno SR era stata formulata già da Madey, che aveva proposto di utilizzare delle strutture già esistenti (il doppio SR per elettroni di Cornell) per assemblare un primo prototipo di FEL di questo tipo. La dinamica di un fascio di elettroni in SR nel quale era operante una sorgente FEL, era però ancora tutta da chiarire. Un primissimo tentativo fu fatto da Matthew Sands (University of California, Santa Cruz (UCSC)) pochi mesi

dopo il primo esperimento di amplificazione FEL a Stanford. Si era nel dicembre del 1975, pochi mesi prima della divisione dei laboratori di Frascati tra CNEN ed INFN, e Sands era ospite presso il gruppo Adone, presso il quale io ancora lavoravo. Spesso era in Italia (nel 1968, con Claudio Pellegrini, aveva individuato nell'effetto testa coda il problema che impediva di accumulare stabilmente i positroni in Adone, come già detto nel paragrafo “Dai fasci di elettroni...”).

In Italia amava di tanto in tanto tornare e, viceversa, con piacere accoglieva noi ospiti italiani nella sua bella casa a Santa Cruz in California. Aveva una personalità e una competenza poliedriche. Partecipò giovanissimo al progetto Manhattan in Los Alamos, fu collega di Richard Feynman, per cui curò la stesura delle famose “Lectures on Physics”, e che convinse nel 1965 ad accettare il Premio Nobel che Feynman disdegnava insieme alla corrispondente notorietà (gli fece capire che non accettandolo avrebbe avuto ancora maggiore notorietà). Infine era un grande esperto di macchine acceleratrici e, in particolare, di SR. Aveva anche un aspetto molto particolare, accentuato dalla fascia che a volte portava, con orgoglio, sulla fronte, a ricordo delle sue origini (la nonna era una indiana d'America). Era reduce da Stanford dove aveva appena appreso i risultati ottenuti dal gruppo di Madey. Il risultato di quel primo studio non fu mai pubblicato, ma rimase come Memorandum Interno del Progetto Adone [11]. Fu in quella occasione che io sentii per la prima volta parlare di FEL (l'articolo [2] nel quale veniva annunciato il successo dell'esperimento di amplificazione ottenuto a Stanford non era ancora stato pubblicato). I risultati ottenuti da Sands erano notevoli. L'obiettivo del suo lavoro era di ricavare le condizioni di equilibrio e stabilità di un sistema SR-FEL. Nell'articolo dimostrava che una trattazione linearizzata del processo portava a determinare una dispersione in energia del fascio di elettroni fuori dal dominio in cui l'approssimazione lineare era valida, e dunque vi era la necessità di una trattazione completa non lineare.

Come prima cosa per affrontare il problema era necessaria una analisi multimodale del processo FEL, nella quale il fascio laser venisse correttamente descritto nella sua struttura spaziale e temporale. Il lavoro che si fece in quegli anni portò alla formulazione della “Teoria Classica Multimodale del FEL” [12], che fu la base per la trattazione in termini di “Supermodi” della pro-

pagazione dell'impulso ottico lungo un amplificatore FEL [13]. La dinamica del sistema accoppiato SR-FEL poteva ormai essere affrontata con gli strumenti giusti. Si arrivò così a formulare prima la teoria di un amplificatore FEL operante in uno SR [14] e poi ad una trattazione completa di un oscillatore SR-FEL [15]. Furono così ricavate le condizioni di equilibrio e stabilità per il fascio di elettroni circolante nello SR e per il fascio laser nel FEL.

Il risultato che a noi di più premeva era quello relativo alla efficienza e alla conseguente potenza media del FEL. Purtroppo risultò che l'efficienza era ancora data dalla larghezza di riga omogenea. Ciò in quanto la potenza media FEL risultò proporzionale alla potenza irradiata dal fascio di elettroni lungo la macchina per emissione di sincrotrone nei magneti curvanti e in eventuali altri dispositivi magnetici, potenza che va restituita al fascio di elettroni, tramite le cavità acceleratrici a radio frequenza, se si vuole mantenere stabilmente il fascio accumulato nella macchina.

La ragione di questo fatto nasce dal "riscaldamento" provocato dall'interazione FEL, dovuto al processo di "randomizzazione" generato dal moto di sincrotrone (il moto longitudinale degli elettroni accumulati nello SR). Ad ogni passaggio il singolo elettrone è soggetto ad una variazione di energia e impulso che dipendono dalla fase di ingresso nell'ondulatore rispetto al campo elettromagnetico della radiazione laser intrappolata nella cavità ottica. Nel viaggio dell'elettrone lungo il resto della macchina tale "ricordo di fase" si "perde" a causa del moto di sincrotrone, che genera spostamenti di fase molto maggiori della lunghezza d'onda della radiazione prodotta dal FEL. Tale "riscaldamento" è contrastato solo dal "damping di radiazione", dovuto all'irraggiamento di luce di sincrotrone negli elementi magnetici della macchina, di qui la dipendenza della potenza FEL dalla potenza totale irradiata. La costante di proporzionalità è ancora data dalla larghezza di riga omogenea in quanto per spostamenti in energia oltre tale valore l'elettrone non è più in risonanza e pertanto non partecipa più al processo di cessione di energia al campo laser.

E dunque, in definitiva, l'utilizzo di uno SR non porta ad un aumento dell'efficienza rispetto ad un dispositivo che utilizzi il fascio di elettroni solo per un passaggio, contrariamente a quanto prima ipotizzato da molti,

compreso noi di Frascati. Si era arrivati addirittura a pensare che l'interazione FEL potesse "raffreddare" il fascio di elettroni!

Quello che si ottenne a Frascati costituì una pietra miliare per i FEL operanti in SR. I risultati ottenuti in [15] furono poi verificati sperimentalmente per la prima volta nella sorgente SR-FEL realizzata negli anni 80 a Orsay in Francia [16], e poi in tutte le altre sorgenti SR-FEL realizzate successivamente in Giappone, negli USA, in Unione Sovietica, in Germania e in Italia. Questo lavoro fu anche parte della motivazione del "International FEL Prize" conferito agli autori di quelle ricerche nel 1994 [17].

Il Progetto LEDA

Torniamo a quegli anni e alle richieste del Progetto AIFA, cioè un fascio laser accordabile attorno a $16 \mu\text{m}$ di lunghezza d'onda con larghezza di riga minore di 0,1 % e con potenza media dell'ordine del kW. Si provò, utilizzando la teoria appena sviluppata, a progettare un SR-FEL che soddisfacesse quelle caratteristiche. Il risultato fu la proposta di progetto "LEDA" (acronimo, ad essere sinceri un po' forzato, da "Laser ad Elettroni Da Accumulatore") [18]. LEDA è uno SR per elettroni operante all'energia di 750 MeV di tipo "race-track".

Le lunghe sezioni dritte della struttura "race track", permettono di alloggiare, oltre all'ondulatore del FEL, le cavità acceleranti e gli elementi di focalizzazione (quadrupoli) e di correzione (sestupoli), anche vari tripletti di magneti curvanti ad alto campo (Wiggler) al fine di aumentare considerevolmente la potenza media irradiata dagli elettroni per emissione di sincrotrone e dunque di aumentare di conseguenza la potenza media di uscita del FEL, che veniva stimata dell'ordine di alcuni kW, con larghezza di riga minore dello 0,01%, in linea dunque con le richieste del progetto AIFA. Anche la stabilità dell'energia della macchina doveva, ovviamente, rientrare in tali limiti, per cui un progetto definitivo avrebbe dovuto poi anche affrontare in modo prioritario tale aspetto. Ma un progetto definitivo non fu mai fatto. LEDA nacque e morì nel giro di un anno. La ragione era semplice: vista l'inutilità di utilizzare uno SR per alzare l'efficienza del sistema, appariva più appetibile sviluppare un FEL a singolo passaggio, certamente meno costoso e più semplice da operare.

L'oscillatore FEL

Si era così arrivati alla primavera del 1979. Molti aspetti della dinamica FEL erano stati chiariti ed era ormai tempo di partire a Frascati col programma sperimentale (va ricordato che il progetto AIFA era in attesa delle sorgenti adeguate per la separazione isotopica). Nella primavera del 1985 fu raggiunto il primo obiettivo: la messa in operazione del primo oscillatore FEL in Italia [19]. Il fascio di elettroni era prodotto dal microtrone [20, 21] che, dalla fine degli anni 60, fu l'iniettore dello storico Sincrotrone di Frascati fino alla sua chiusura. L'ondulatore scelto era un elettromagnete lineare impulsato (Figura 1).

Ovviamente per il tipo di ondulatore scelto si poteva solo lavorare ad impulso singolo, ma in questa fase non si era interessati alla potenza media, ma solo alla dinamica dell'impulso laser. La lunghezza d'onda di operazione fu scelta coincidente con quella del laser CO₂ ($\approx 10,6 \mu\text{m}$). In Figura 2 è mostrata la foto dell'apparato appena montato. Il microtrone è sullo sfondo, mentre al centro si vede l'ondulatore impulsato. In primo piano campeggia il magnete curvante (di colore blu) che serve a deflettere gli elettroni verso il pozzo di spegnimento (di colore bianco).

Nella Figura 3 si vede la foto della sala di controllo del nostro FEL, dove campeggiano strumentazioni degli anni 80, che ben figurerebbero oggi in un museo. Infine, nella Figura 4 è riportata la tipica potenza di uscita dell'impulso laser prodotto.

Questo successo ci spronò a passare rapidamente alla fase realizzativa della sorgente per il progetto AIFA. Tale sorgente avrebbe operato con più alto guadagno, mag-

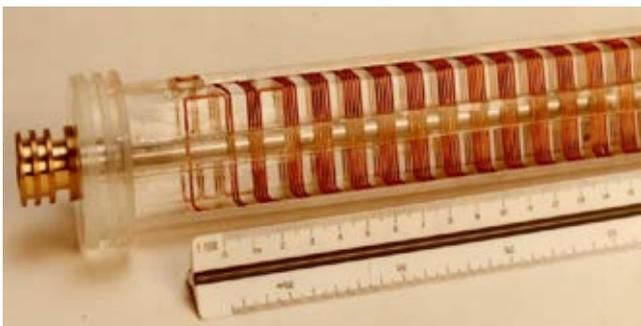


FIGURA 1 Ondulatore lineare impulsato utilizzato per il primo oscillatore FEL in Italia



FIGURA 2 Apparato sperimentale



FIGURA 3 Sala controllo FEL. Da sinistra a destra: Eugenio Fiorentino, Alberto Renieri, Elio Sabia

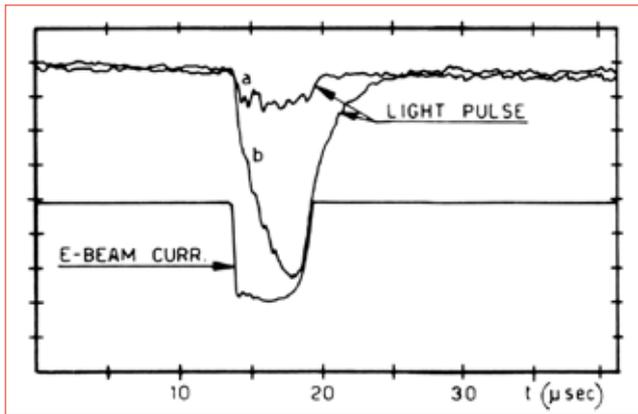


FIGURA 4 Potenza di uscita dell'impulso di luce (LIGHT PULSE) a 10,6 μm : (a) sotto soglia. (b) sopra soglia alla corrente media di 60 mA

giore durata del microimpulso e più alta frequenza di ripetizione. Ma la sorgente operante alla fatidica lunghezza d'onda di 16 μm non vide mai la luce.

Il nucleare in Italia

A metà degli anni 80 due fatti portarono ad un cambiamento radicale dei programmi FEL all'ENEA (la nuova denominazione del CNEN). Il primo era collegato alla natura stessa del processo di arricchimento. Il processo di arricchimento isotopico foto assistito (obiettivo del Progetto AIFA) fu considerato "pericolosamente proliferante" in quanto potenzialmente utilizzabile per la produzione di materiale fissile a scopi bellici. In effetti, come già sottolineato alla fine del paragrafo sull'arricchimento isotopico dell'uranio, tale processo non è soggetto a saturazione, inoltre non richiede grandi impianti e dunque può facilmente sfuggire ad azioni di controllo da parte degli enti internazionali vigilanti. L'attività di sviluppo di sorgenti laser per l'arricchimento nella regione dei 16 μm fu "sconsigliata" proprio per tali implicazioni. Questo tipo di suggerimento ci arrivò dopo una "visita" effettuata a Frascati da Edward Teller (allora "Direttore Emerito" dei Laboratori di Livermore dove, agli inizi degli anni 50,

aveva ideato e realizzato la bomba all'idrogeno, e consigliere del presidente Reagan). L'incontro ebbe un che di surreale. Dopo la visita dei laboratori ci fu richiesto di descrivere le nostre attività (purtroppo tutte fortemente indiziate di essere "proliferanti"). Teller ascoltò ma non commentò. Un secondo evento si verificò proprio poco tempo dopo il successo del nostro primo FEL.

Nel 1986 vi fu l'incidente nucleare di Chernobyl il cui impatto emotivo porterà, attraverso un referendum, alla moratoria delle attività nucleari in Italia, moratoria che poi si tramuterà (almeno fino ad oggi e con alterne vicende), in uno stop praticamente definitivo. Tutto ciò portò ad un radicale mutamento dei programmi nucleari dell'ENEA e, in particolare, alla chiusura del Progetto AIFA.

Conclusioni

Ci si trovò così a mezza strada. La realizzazione della sorgente FEL a 16 μm fu interrotta, ma non furono interrotte le attività sui laser ad elettroni liberi. Forti dell'esperienza maturata in quegli anni, furono prese altre strade di grande interesse, in particolare verso la realizzazione di sorgenti operanti sia nell'infrarosso lontano, fino ai THz [22], sia, a partire dagli anni 2000, nella regione UV - X [23]. Queste attività, che hanno fatto tesoro di quanto sviluppato in quei primi 10 anni di lavoro, sono state portate avanti (e lo sono tuttora) nell'ambito di vaste collaborazioni, nazionali e internazionali, con il supporto sia dei programmi nazionali sia dei programmi quadro dell'Unione Europea.

Ringraziamenti

Un mio caldo ringraziamento va in primo luogo a tutti quei colleghi con i quali ho avuto l'onore di collaborare e che mi hanno permesso di vivere l'affascinante avventura che ho cercato di descrivere al meglio in questo articolo. Un ringraziamento particolare va poi Giuseppe (Pino) Dattoli col quale ho condiviso in tutti questi anni passioni, dispiaceri, ma anche gioie, che il nostro lavoro di fisici ci ha riservato. Lo ringrazio infine anche per avere avuto la pazienza di leggere criticamente le bozze di questo scritto, dandomi i suoi preziosi suggerimenti. ●

Alberto Renieri
già ENEA, Centro Ricerche Frascati

From Electron Beams to Photon Beams

In this article I try to report at the best the events and the emotions I experienced, together with my colleagues, when I was a young researcher working at the Frascati Center of CNEN. In the middle of 70's the high energy physics activities carried out in Frascati were transferred from CNEN to INFN (Istituto Nazionale Fisica Nucleare) and the personnel had the chance to chose to continue to work at the CNEN (obviously in a different research field) or to continue to work in high energy physics, but at the INFN. I decided to remain at the CNEN and, consequently, I had to change my research activity. I moved from the high energy accelerators research field to the lasers research field in which, at that time at the CNEN, a new interesting project on "uranium laser isotope separation" was just starting. This article is focused on the theoretical and experimental development activity, carried out in the years 70's-80's at the CNEN Frascati Center, on a quite particular kind of laser to be utilized in that project. In this laser the active medium is not made of atoms or molecules but is a beam of free electrons running along a spatially periodic magnetic structure: this laser is the "Free Electron Laser".

- [1] R. Fantoni, E. Borsella, A. Palucci, A. Giardini, *Laser e molecole: la stagione dei multifotoni a Frascati negli anni 70 e 80*, pagg. 29-37 in questo volume
- [2] L.R. Elias, W.M. Fairbank, J.M.J. Madey, H.T. Schwettman and T.I. Smith, *Phys. Rev. Lett.* **36**, 717 (1976)
- [3] D.A.G. Deacon, L.R. Elias, J.M.J. Madey, G.J. Ramian, H.T. Schwettman and T.I. Smith, *Phys. Rev. Lett.* **38**, 892 (1977)
- [4] P. Emma et al. *Nat. Photon.* **176**, 1038 (2010)
- [5] J.M.J. Madey, *J. of Appl. Phys.* **42**, 1906 (1971)
- [6] F.A. Hopf, P. Meystre, M.O. Scully and W.L. Luisell, *Phys. Rev. Lett.* **37**, 1342 (1976)
- [7] H. Motz, *J. of Appl. Phys.* **22**, 527 (1951); H. Motz, W. Thon and R.N. Whithurst, *J. of Appl. Phys.* **24**, 826 (1953)
- [8] A. Bambini and A. Renieri, *Lett. Nuovo Cimento* **21**, 399 (1978); A. Bambini, A. Renieri and S. Stenholm, *Phys. Rev.* **A19**, 2013 (1979)
- [9] R. Bonifacio, G. Dattoli, A. Renieri and F. Romanelli, *Optics Comm.* **34**, 240 (1980); G. Dattoli, A. Renieri and F. Romanelli, *Optics Comm.* **35**, 245 (1980); G. Dattoli, M. Richetta, *Optics Comm.*, **50**, 165 (1984)
- [10] G. Dattoli, M. Galli and P.L. Ottaviani, ENEA Internal Report No RT/INN/93/09
- [11] M. Sands, Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN, Progetto ADONE – Memorandum Interno " Storage-Ring-Laser (Summary of what I know), **T-73**, 29/12/1975
- [12] G. Dattoli and A. Renieri, *Lett. Nuovo Cimento* **24**, 121 (1979); G. Dattoli, A. Marino and A. Renieri, *Opt Commun.* **35**, 407 (1980)
- [13] G. Dattoli, J.C. Gallardo, T. Hemsen, A. Renieri and A. Torre, *Phys. Rev.* **A37**, 4326 (1988); G. Dattoli, T. Hemsen, L. Mezi, A. Renieri and A. Torre, *Phys. Rev.* **A37**, 4334 (1988)
- [14] A. Renieri, *Il Nuovo Cimento* **53B**, 160 (1979)
- [15] G. Dattoli and A. Renieri, *Il Nuovo Cimento* **59B**, 1 (1980)
- [16] M. Billardon, P. Elaume, J.M. Ortega, C. Bazin, M. Bergher, Y. Petroff and M. Velghe, *Nucl. Instr. and Meth.* **A237**, 244 (1985)
- [17] P. Sprangle, Chairman FEL-Prize Committee, *Nucl. Instr. and Meth.* **A358**, p. ix (1995)
- [18] R. Barbini, G. Dattoli, T. Letardi, A. Marino, A. Renieri and G. Vignola, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS26**, 3836 (1979)
- [19] U. Bizzarri, F. Ciocci, G. Dattoli, A. De Angelis, E. Fiorentino, G.P. Gallerano, I. Giabbai, G. Gordano, T. Letardi, A. Marino, G. Messina, A. Mola, L. Picardi, A. Renieri, E. Sabia and A. Vignati, *Nucl. Instr. and Meth.* **A250**, 254 (1986)
- [20] U. Bizzarri and A. Vignati, *Il Nuovo Cimento* **68A**, 513 (1970)
- [21] U. Bizzarri and A. Vignati, CNEN Report **80.41/p**, Centro di Frascati, Frascati, Rome, Italy (1980) and *Lett. Nuovo Cimento* **31**, 277 (1981)
- [22] F. Ciocci, G. Dattoli, A. De Angelis, A. Di Pace, A. Doria, L. Giannessi, G.P. Gallerano, A. Renieri, E. Sabia, A. Torre and D.A. Jaroszynski, *Nucl. Instr. and Meth.* **A296**, 75 (1990)
- [23] A. Renieri, *Nucl. Instr. and Meth.* **A507**, 507 (2003)



La doppia luminescenza dei Centri di Colore

Un esperimento sulla luminescenza dei Centri di Colore (CCs) effettuato nel 1987 nei Laboratori ENEA di Frascati ebbe esito negativo, ma indagini successive hanno mostrato che non si trattava di un fallimento ma della scoperta di un nuovo fenomeno. Sin dall'avvento dei laser, i CCs negli alogenuri alcalini erano stati utilizzati con successo come materiali otticamente attivi, in particolare i Centri FA. Uno di questi centri, ben noto per la sua emissione laser nel medio infrarosso a 77 K, portato alla temperatura di 2 K emetteva però nel vicino infrarosso e senza effetto laser. Ulteriori indagini hanno mostrato che la doppia luminescenza era una proprietà fondamentale allora ignota. Questo importante risultato fu reso possibile a Frascati dalla esistenza sin dal 1973 di solide e ampie competenze nel campo dei CCs, che sono continuate nel tempo e infine applicate ai moderni dispositivi miniaturizzati fotonici

DOI 10.12910/EAI2015-090

■ G. Baldacchini

Il 20 febbraio 1987 era in corso un'esperienza in uno dei laboratori dell'edificio n. 10, SUD-1, del Centro ENEA di Frascati [Nota 1]. Era intenzione dei ricercatori presenti [Nota 2] studiare le proprietà ottiche del Centro $F_A(II)$ nel cristallo $RbCl:Li$ alla temperatura dell'elio liquido. A quel tempo, c'erano essenzialmente due modi per lavorare a basse temperature: utilizzare il vecchio e collaudato sistema dei criostati con elio liquido oppure i più moderni criogeneratori. Nel primo caso, il campione da studiare era immerso nell'elio liquido al di sotto della temperatura superfluida $T_\lambda = 2,17$ K, mentre nel secondo, il campione veniva attaccato nel vuoto a un dito metallico raffreddato dalla temperatura ambiente (RT) fino a circa 10 K. Nel nostro caso, poiché le precedenti misure in $RbCl:Li$ erano già state effettuate con un criogeneratore, si optò necessariamente per l'elio liquido, e quindi venne usato un criostato costruito all'ENEA [1].

Queste esperienze iniziavano il giorno prima con il montaggio e raffreddamento del campione con azoto liquido, e finalmente al mattino seguente si trasferiva elio liquido. Si pompava poi sull'elio liquido per ridurne la temperatura, e l'esperienza vera e propria iniziava nel pomeriggio e proseguiva fino a esaurimento dell'elio liquido, spesso fino all'alba del giorno dopo. Quel mattino, il campione era stato controllato otticamente a 200 K e la sua luminescenza misurata intorno a $2,9 \mu m$, dove era prevista. Quando nel tardo pomeriggio si misurò di nuovo la luminescenza, con grande sorpresa essa era sparita. Si controllarono allora il sistema elettronico, l'allineamento ottico-geometrico, e altri dettagli sperimentali, ma senza alcun risultato. Ben dopo la mezzanotte i partecipanti si dichiararono sconfitti e decisero di terminare l'esperimento, che richiedeva ancora alcune ore di diverse procedure standard di laboratorio per collegare il criostato al sistema di recupero del gas elio [Nota 3].

In pratica, dopo tre giorni di lavoro tutti i partecipanti tornarono a casa convinti di un fallimento totale, ma non sapevano ancora che erano solo all'inizio di una nuova e importante scoperta scientifica che avrebbe cambiato le conoscenze sui Centri di Colore (CCs).

Contact person: Giuseppe Baldacchini
giuseppe.baldacchini@gmail.com



Ioni, atomi, molecole, lacune di atomi o ioni, e altre imperfezioni localizzate distruggono l'ordine di una struttura cristallina perfetta, e per questa ragione vengono chiamati Difetti Puntiformi. Tra essi, i CCs negli alogenuri alcalini vennero scoperti per caso nella metà del 19-imo secolo, e furono i primi ad essere studiati sistematicamente [2]. Tra le loro numerose proprietà, il ciclo ottico è quello che più li caratterizza. Infatti quando un cristallo li contiene, esso appare colorato dal rosso al blu a seconda del tipo di cristallo. Questo colore deriva dall'assorbimento della luce da parte del cristallo, che assume quindi il colore complementare: ma il processo ottico continua con la generazione di luminescenza nel vicino-medio infrarosso che è tanto più efficiente quanto più bassa è la temperatura [3].

Tra i CCs, i Centri F_A occupano una posizione particolare perché sono generati quando un Centro F (una lacuna con un elettrone) e una impurità si legano tra di loro, un sistema piuttosto semplice. Ma, a causa dei gradi di libertà di questi due costituenti elementari nel reticolo cristallino, esistono due tipi di Centri noti come $F_A(I)$ e $F_A(II)$ [4] [5], e le loro proprietà ottiche sono descritte in Figura 1, che riporta assorbimenti ed emissioni nel

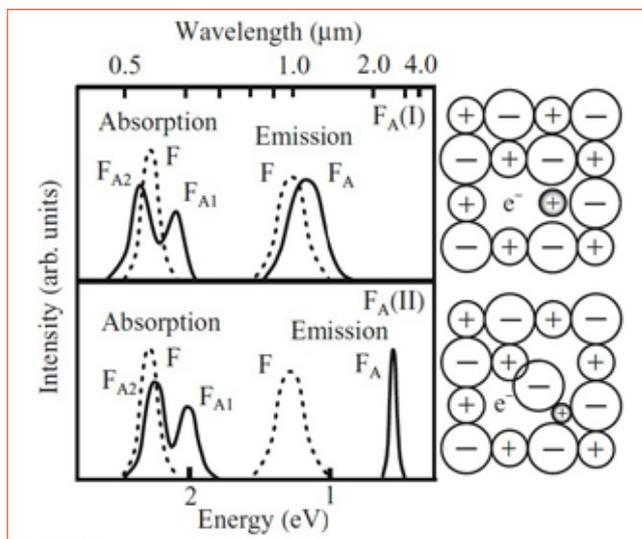


FIGURA 1 A sinistra, spettri di assorbimento ed emissione a 4 K dei Centri F, linea tratteggiata, dei Centri $F_A(I)$ in KCl:Na, linea continua in alto, e $F_A(II)$ in KCl:Li, linea continua in basso. A destra è riportata la corrispondente configurazione ionica dei Centri F_A

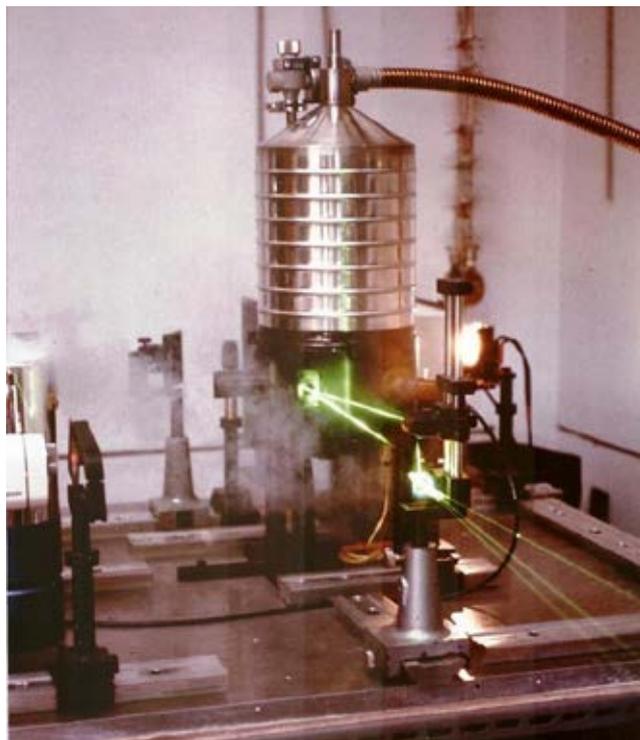


FIGURA 2 Il laser a CCs, soprannominato LACECO, funzionante a Frascati a partire dall'estate del 1979. Il fascio verde è la riga a 514,5 nm di un laser ad Argon che pompa una cavità a tre specchi nel cui fuoco c'è il cristallo KCl:Li con i Centri $F_A(II)$. Il fascio laser a 2,7 μm esce a sinistra perpendicolare a quello di pompa e non è visibile perché infrarosso. Foto ENEA Frascati N.79-021-03 scattata e/o riprodotta da Fiorenzo Pepi il 13/01/1983

caso del cristallo KCl. Si nota che, mentre l'assorbimento è circa lo stesso nei Centri F, $F_A(I)$ e $F_A(II)$, l'emissione è molto diversa. Questa differenza, che a prima vista potrebbe sembrare secondaria, si è poi dimostrata di grande importanza nel campo dello sviluppo laser. Infatti, i Centri F e $F_A(I)$ non sono in grado di emettere radiazione laser, mentre i Centri $F_A(II)$ lo sono e con grande efficienza, e in aggiunta sono continuamente accordabili [6]. Sebbene questi laser richiedano una temperatura inferiore a RT, il semplice fatto di essere gli unici accordabili con altissima risoluzione spettrale, li ha resi insostituibili nella spettroscopia molecolare [7], e nello sviluppo delle telecomunicazioni [8].

Anche Frascati ha partecipato allo sviluppo di questi laser, e la Figura 2 mostra un prototipo realizzato nell'estate del 1979 in collaborazione con le Università di Roma e Pisa, e a quel tempo l'Italia era il terzo paese al mondo dopo USA e Germania a possederne uno. Il laser vero e proprio era contenuto nelle parte bassa del cilindro nero, mentre la parte alta in acciaio lucido bombato conteneva un criostato ad azoto liquido in grado di mantenere il cristallo attivo alla temperatura di 77 K per circa 40 ore. I laser a CCs sono stati utilizzati fino al 2000 circa, quando arrivarono i diodi laser a semiconduttori che avevano prestazioni altrettanto buone e in aggiunta lavoravano a RT. Quindi, fino al 2000 circa gli studi sui CCs erano ancora molto attivi, sia per scoprirne di nuovi che per migliorare l'efficienza ottica di quelli già noti. E proprio questo ultimo era il caso dei Centri $F_A(II)$ in RbCl:Li, le cui proprietà erano state studiate fino alla temperatura di 4 K, con la conclusione che fossero Centri $F_A(II)$ con il picco di emissione a $2,89 \mu\text{m}$ [4]. In pratica, fino al 1987 il loro ciclo ottico era descritto dalla parte superiore della Figura 3, dove si osserva a sinistra il tipico assorbimento a due bande del Centro F_A e a destra l'emissione tipica dei Centri $F_A(II)$. A questo punto si deve aggiungere che, sebbene fossero stati pubblicati i dati sperimentali alla temperatura dell'elio liquido, non erano però stati riportati gli spettri sperimentali di assor-

bimento ed emissione. E proprio questa mancanza era la ragione dell'esperienza del 20 febbraio, e quindi si può immaginare la sorpresa quando, raggiunta la temperatura di circa 2 K, non si riuscì ad osservare alcuna luminescenza a $2,89 \mu\text{m}$!

Ancora nella confusione e contraddizione di questo risultato inaspettato, l'esperienza venne ripetuta con un nuovo campione il 25 febbraio, ma i risultati furono gli stessi di quella precedente. A questo punto, essendo l'emissione a $2,89 \mu\text{m}$ già stata data per certa da altri, si ipotizzò una possibile contaminazione del nostro cristallo da impurità, e si decise quindi di crescere nuovi cristalli partendo da componenti purissime. Ciò venne fatto dal prof. Augusto Scacco e il tecnico Carlo Sanipoli, e una misura eseguita il 29 giugno diede lo stesso risultato delle precedenti, per cui si prese seriamente in considerazione un possibile errore nei dati già pubblicati [4].

Allora, si programmarono esperimenti mirati, che vennero eseguiti a Frascati il 10 e 15 dicembre. Essi rivelarono per la prima volta a 2 K una emissione a $1,46 \mu\text{m}$, vedi la Figura 3 in basso a destra, che aveva tutte le caratteristiche dei Centri $F_A(I)$ come già osservate in KCl, vedi Figura 1, e non c'era alcuna traccia di emissione a $2,89 \mu\text{m}$! Inoltre, si osservò che la nuova emissione a $1,46 \mu\text{m}$ diminuiva fino a sparire del tutto sopra i 30 K, mentre contemporaneamente la vecchia emissione a

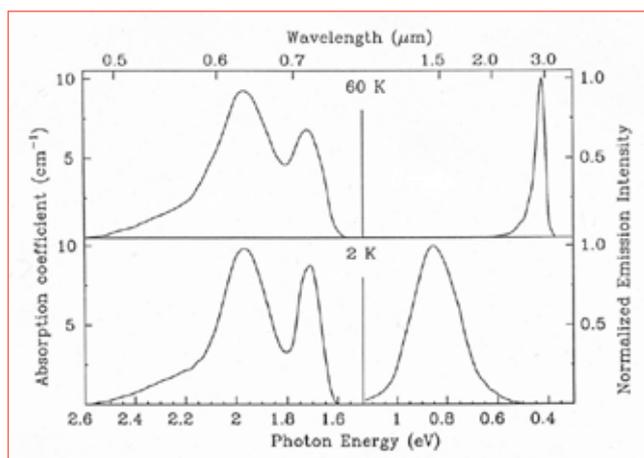


FIGURA 3 Spettri di assorbimento ed emissione dei Centri F_A in RbCl:Li a 60 e 2 K, rispettivamente. La misura a 60 K è stata eseguita presso l'Università di Roma Tor Vergata, mentre quella a 2 K presso il Centro ENEA di Frascati

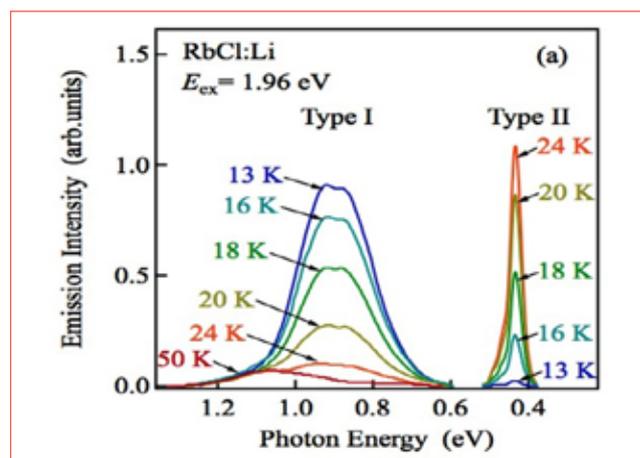


FIGURA 4 Spettri di emissione dei Centri F_A in RbCl:Li a diverse temperature eccitati dalla riga 632,8 nm di un laser He-Ne. Le due luminescenze sono complementari rispetto alla temperatura, che implica un'origine comune

2,89 μm riappariva fino ad essere dominante. In pratica, si era in presenza di un fenomeno nuovo che andava studiato in dettaglio, e numerosi esperimenti furono allora eseguiti presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma Tor Vergata nel 1988, utilizzando un criogeneratore ottico.

La Figura 4 riporta la emissione di questo cristallo eccitato dalla riga a 632,8 nm di un laser He-Ne a diverse temperature al di sotto di 50 K, e si osserva che mentre la banda di emissione a 2,89 μm diminuisce col diminuire della temperatura, quella a 1,46 μm aumenta in modo complementare [9].

La doppia luminescenza ha mostrato che i Centri F_A in RbCl:Li sono di tipo I alla temperatura dell'elio liquido e II alla temperatura dell'azoto liquido. Le implicazioni di questa reversibilità termica del Centro F_A furono subito evidenti sia dal punto di vista applicativo che fondamentale. Infatti, questi CCs erano utilizzati per emissione laser alla temperatura dell'azoto liquido, ma non potevano più esserlo a quella dell'elio liquido. Allora, per verificare se questa proprietà inusitata fosse appannaggio solamente del RbCl:Li, si iniziò uno studio sistematico, e nel 1993 si ottennero risultati analoghi in KF:Na [10]. In aggiunta, i CCs in questo nuovo cristallo si dimostrarono complessi al punto che furono scoperte numerose emissioni dipendenti dalla temperatura, tra queste una rossiccia talmente intensa da illuminare il laboratorio attraverso la piccola finestra del DOM, come riportato in Figura 5.

I risultati ottenuti in RbCl:Li e KF:Na hanno dimostrato che i Centri F_A non potevano essere distinti in tipo I e tipo II solo in base al cristallo ospitante e lo ione ospitato, come era fino ad allora, ma anche la temperatura giocava un ruolo fondamentale. Senza entrare nei dettagli di questa scoperta, essa suggerì che il ciclo ottico dei Centri F_A poteva essere descritto da un modello unico in cui l'eccitazione e il rilassamento elettronico conducono alla configurazione di tipo I o, attraverso una transizione assistita termicamente, alla configurazione di tipo II [9] [11]. Questo modello era giustificato dai dati sperimentali, ma non era in grado di affermare con sicurezza se il rilassamento procedesse prima sul potenziale di tipo I e poi su quello di tipo II. Questa controversia è stata finalmente risolta nel 2012 a seguito di una fruttuosa collaborazione italo-giapponese [12], nella quale la sequenzialità dei due rilassamenti è stata dimostrata sperimentalmente.

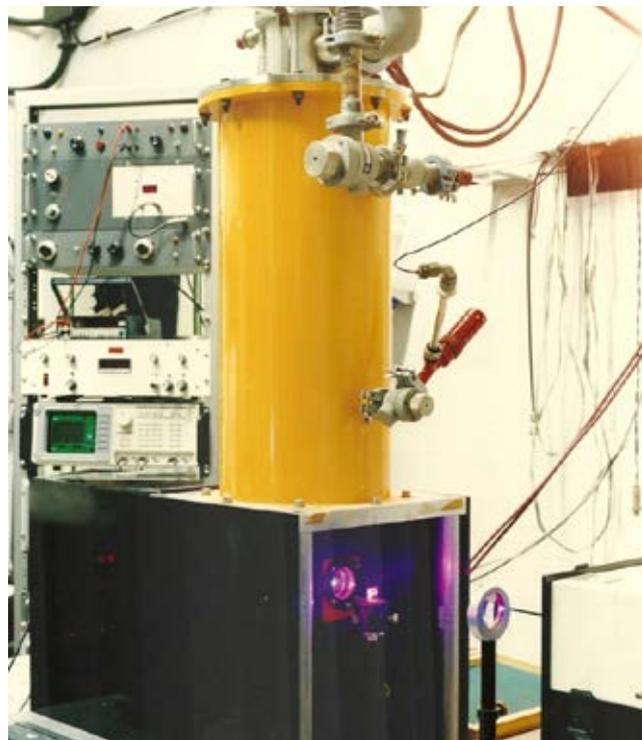


FIGURA 5 Il criostato DOM (Dewar Ottico Magnetico) venne costruito nel 1975 per eseguire esperienze ottiche e dicroiche a campi magnetici variabili fino a 8,5 T. Venne poi utilizzato nel corso degli anni per numerose esperienze, e tra il 1993 e il 1999 anche per studiare le intense emissioni dei CCs in KF:Na. Si nota in particolare la luce rossiccia da una delle sue finestre. Foto ENEA Frascati N.950310301 scattata e/o riprodotta da Sergio Ciarlo

La ricerca sui CCs a Frascati è iniziata nel 1973, dopo che l'autore era tornato da una lunga permanenza negli Stati Uniti d'America, presso l'Università della California a Berkeley, reiterata nel 1977 presso l'Università dello Utah a Salt Lake City. Poi negli anni seguenti è proseguita a Frascati con tale successo da dare origine alla cosiddetta "Scuola Italiana dei Centri di Colore", che si basava essenzialmente sul sodalizio di Giuseppe Baldacchini (ENEA Frascati), Umberto Maria Grassano (Università di Roma Sapienza prima e Tor Vergata poi) e Augusto Scacco (Università Sapienza), e più tardi di Fabrizia Somma (Università Sapienza).

Questo lavoro si riferisce alla scoperta inaspettata, ma non casuale, di una nuova emissione luminosa che ha cambiato per sempre la descrizione dei Centri F_A . In effetti, era stato trovato un fenomeno di doppia luminescenza dipendente dalla temperatura. In aggiunta, contrariamente a quello che avviene per gli altri CCs, tutti i Centri F_A posseggono questa nuova potenzialità di una doppia emissione, che quindi è una proprietà di carattere fondamentale.

I Centri F_A che operano a basse temperature si sono dimostrati un campo fertilissimo di nuove scoperte scientifiche sia fondamentali che applicative, e la ricerca sui CCs nei cristalli è continuata intensamente fino al 1990

circa, quando fu evidente che nuove tecnologie stavano emergendo prepotentemente. Allora, le vecchie conoscenze sono state trasferite al nuovo campo della nanotecnologia e fotonica. Gli inizi sono stati timidi [13], ma i risultati raggiunti in anni di lavoro sistematico con i CCs in LiF [14, 15], hanno premiato questa scelta, e oggi la modesta linea di ricerca, che era nata come una costola della "Scuola Italiana dei Centri di Colore" con l'inserimento di Rosa Maria Montereali nel 1988, è un punto di riferimento in Italia e nel mondo per i dispositivi optoelettronici miniaturizzati [16, 17] e altro [18] [Nota 4]. E tutto è iniziato per un seme gettato con passione circa

50 anni fa in un ambiente molto ricettivo come quello del Laboratorio Criogenico [Nota 5]. Infatti, non ci sarebbe stato nulla di quanto raccontato se non fosse stata concessa sin dall'inizio una certa libertà di ricerca personale, sempre all'interno degli ambiti istituzionali del CNEN prima ed ENEA dopo, per la quale sono ancora da ringraziare i Direttori del Centro [Nota 6], del Dipartimento e dei singoli Laboratori, e in ultima analisi le Direzioni dell'Ente nel tempo, che hanno sempre permesso la nascita e la sopravvivenza di questa e di altre piccole e importanti isole di ricerca seminale.

Dedica

Questo lavoro è dedicato alla memoria di Umberto Maria Grassano (Alessandria 25 maggio 1939 - Roma 4 maggio 2000) e Augusto Scacco (Roma 11 ottobre 1943 - 31 agosto 1998), che hanno contribuito in modo essenziale alla nascita e sviluppo della linea di ricerca sui Centri di Colore a Frascati. ●

Giuseppe Baldacchini
già ENEA, Centro Ricerche Frascati



FIGURA 6 Lettera di commiato di Italo Federico Quercia a Nicola Cabibbo del 29 novembre 1985, quando Quercia aveva avuto una cattedra all'Università di Roma Tor Vergata e quindi lasciava ufficialmente la sua posizione all'INFN di Frascati. Nella lettera vengono utilizzati alcuni dei suoi famosissimi timbri, che numerosissimi erano sulla sua scrivania

The double luminescence of Color Centers

An experiment on the luminescence of Color Centers (CCs) carried out in 1987 at the ENEA Laboratories in Frascati had a negative result, but subsequent investigations showed that it was not a failure but rather a discovery of a new phenomenon. Since the coming of lasers, CCs in alkali halides have been successfully used as optically active materials, in particular FA Centers. One of these centers, well known for its medium infrared laser emission at 77 K, cooled further to 2 K emitted in the near infrared and without laser effect. Further investigations showed that the double luminescence was a fundamental property unknown until that time. This important discovery was achieved in Frascati because of the existence since 1973 of a solid and extensive expertise in the field of CCs, which continued over time and later on applied to the modern miniaturized photonic devices.

1. Questo laboratorio faceva parte del Laboratorio Criogenico dal 1960, ma dalla metà degli anni 70 venne inserito nel Laboratorio di Spettroscopia Molecolare (SPET), uno dei quattro della Divisione Sistemi Laser e Acceleratori (LAC) operativa a Frascati, che era parte dell'Unità Settoriale di Fisica Applicata (FIS), che a sua volta apparteneva al Dipartimento Tecnologie Intersettoriali di Base (TIB) con sede direzionale nel Centro della Casaccia. Quindi il laboratorio era indicato con la sigla TIB-FIS-LAC-SPET, che incuteva rispetto e timore ai visitatori.
2. Dott. Giuseppe Baldacchini (ricercatore e leader del laboratorio), Fabio De Matteis e Emilio Giovenale (laureandi di Fisica dell'Università di Roma Sapienza). La ricerca sui CCs a Frascati era effettuata in collaborazione con il prof. Umberto Maria Grassano (Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma Tor Vergata), prof. Augusto Scacco e prof.ssa Fabrizia Somma (Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma Sapienza), che spesso partecipavano alle stesse esperienze, e il dott. Mauro Casalbani (ricercatore dell'Università di Roma Tor Vergata). Scacco era il relatore di De Matteis, mentre Baldacchini, Grassano e Scacco lo erano di Giovenale.
3. L'atomo di elio è neutro e quindi non esistono minerali che contengono elio e dai quali si possa estrarre. L'elio presente sulla Terra è quello primordiale intrappolato nelle sue viscere, ed è stato sempre estratto come prodotto secondario dai pozzi petroliferi. All'epoca il più grande produttore erano gli USA, dai quali veniva acquistato in forma liquida o gassosa, ed era molto costoso. Allora, per non disperdere questo gas prezioso in atmosfera, era stato costruito un elio-dotto per tutto il Centro di Frascati che aveva come punto di raccolta il Liquefattore, dove il gas veniva recuperato e liquefatto di nuovo. Frascati per un certo periodo di tempo rifornì praticamente una buona parte d'Italia, ma poi molti si resero autonomi, e la distribuzione rimase solamente per l'area di Roma. A Frascati non ci furono mai incidenti, ma c'è ne fu uno spettacolare nel 1980 circa presso l'Istituto di Fisica di Roma. Un dewar metallico contenente elio liquido era stato appena utilizzato per un trasferimento ma, quando si cercò di togliere il tubo di trasferimento infilato nel suo collo, si incontrarono delle difficoltà. Infatti il tubo si era saldato con il ghiaccio che si era formato, e ogni tentativo di sfilarlo risultò vano. Allora, il dewar venne portato sul terrazzo dell'Istituto, e vennero chiamati i Vigili del Fuoco e la Polizia. L'Istituto fu evacuato per precauzione e le strade circostanti isolate e interdette al traffico. I tentativi di estrarre il tubo continuarono ma senza successo, e alla fine si decise di sparare con un'arma da fuoco sul dewar per fare un foro attraverso i suoi molteplici contenitori e schermi metallici, e favorire così la fuoriuscita del gas ad alta pressione. Ma proprio quando il poliziotto si accingeva a fare fuoco da una posizione protetta, il prof. Giancarlo Chiarotti si lanciò in un ultimo tentativo disperato e, preso con le mani il tubo di trasferimento, riuscì ad estrarlo in una gigantesca nuvola di vapore e liquido, e tutto tornò alla normalità. Ma lo spavento fu grande e il giorno dopo la notizia sui media fu ingigantita fino al punto che si era evitata un'esplosione in grado di distruggere l'Istituto e parte dell'Università. In realtà, non c'era stato questo pericolo ma l'impressione fu enorme per qualche tempo.
4. Nel tempo, la linea di ricerca sui CCs ha prodotto risultati scientifici e tecnici a livello nazionale e internazionale, e numerosi Laureati/e che oggi occupano posizioni di responsabilità in Italia e all'estero, che sono: **Gian Piero Gallerano** (1980) C, Emanuela Polito (1981) C, Antonio Lanciano (1985) C, Fabio De Matteis (1987) C, **Emilio Giovenale** (1988) C, **Sabina Botti** (1988) C, Marco Rossi (1989) C, Marco Cremona (1989) C, Roberta Coluzzi (1990) C, Massimo Ferri (1990) F, Ernesto Ciarabella (1991) C, Alessandro Ercoli (1991) F, Claudia Marasca (1992) C, Claudia Giliberti (1993) C, Rossella Bottazzi (1994) C, Giuliano D'Auria (1995) F, Elena De Nicola (1996) C, **Antonella Mancini** (1996) F, Luca Ercoli (1996) C, **Francesca Menchini** (1998) C, **Massimo Piccinini** (1999) F, Stefano Bigotta (2000) C & F, Tiziana Marolo (2002) F & C, **Maria Aurora Vincenti** (2007) F. I nomi in grassetto si riferiscono a coloro che poi sono entrati in ENEA come Ricercatori(trici), tra parentesi è riportato l'anno della laurea, mentre le lettere C e F si riferiscono a tesi in Cristalli o Film.
5. Il Laboratorio Criogenico venne fondato dal prof. Giorgio Careri nel 1955 e, quando nel 1964 entrai come laureando del dott. Vinicio Montelatici, era guidato dal prof. Francesco Scaramuzzi, coadiuvato dal prof. Ivo Modena e da un folto stuolo di tecnici eccezionali. Imparai presto e bene, grazie a una scuola unica e insuperata, a lavorare alle bassissime temperature dell'elio liquido, cosicché quando queste conoscenze servirono nel 1973 per lo studio dei CCs, non ci furono difficoltà a realizzare in casa strumenti e apparati necessari allo scopo, all'epoca non ancora esistenti nel mercato scientifico e tecnico. Molti tecnici hanno contribuito al successo di questa linea di ricerca, e tra questi è d'uopo ricordare Remo Bolli (un meccanico di precisione di grande esperienza), Italo Cenciarelli (un tecnico di laboratorio preciso e metodico), Pietro Cardoni (il miglior progettista e realizzatore meccanico al mondo), Italo Giabbai (un progettista meccanico preciso e metodico), Mauro Giardoni (un tecnico di laboratorio tuttofare ed esuberante), Luciano Mori (un tecnico di laboratorio onnivale), Edoardo Solinas (un capotecnico severo e di grandissima esperienza), Aldo Vietti (un capace elettronico con altre ambizioni). In un secondo tempo, un aiuto decisivo venne da Angelo Pace (un tecnico di laboratorio capace e disponibile), migrato nel 1991 a Frascati dal Centro della Casaccia grazie al minore impegno nucleare dell'ENEA.
6. Tra i numerosi Direttori di Centro che ho conosciuto, vorrei qui ricordare il prof. Italo Federico Quercia (1921-1987). Quando andai a trovarlo per chiedere il permesso di lasciare per un anno i Laboratori di Frascati e anche una lettera di presentazione, il prof. Quercia fu subito entusiasta di questo mio desiderio, e allora io gli proposi un mio fac-simile di lettera, che non prese bene, e infatti mi disse che era capacissimo di scriverla da solo e che l'avrebbe inviata a chi di dovere. Lo fece e la sua lettera produsse gli effetti sperati. In quell'occasione, osservai la sua famosa collezione di timbri che usava continuamente nella corrispondenza personale e ufficiale, in special modo nei casi in cui poche parole potevano sortire l'effetto voluto. Alcuni timbri avevano scritte irripetibili, altre erano molto più garbate, e mentre dei primi non sono riuscito a trovarne traccia a distanza di anni, dei secondi ho conservato una lettera scritta nel 1985 all'allora presidente dell'INFN Nicola Cabibbo (1935-2010) che riporto in copia in Figura 6.



- [1] G. Baldacchini (1975), *Dewar Ottico Magnetico-DOM*, Rapporto CNEN LNF-75/43(R)
- [2] G. Baldacchini (2005), *Defect Centers in Insulating Solids, Optical Properties of*, Encyclopedia of Condensed Matter Physics, G.F. Bassani, G.L. Liedl, and P. Wyder, eds., pp. 379-386, Elsevier Academic Press
- [3] *Physics of Color Centers* (1968), edited by W. Beall Fowler, Academic Press, New York
- [4] F. Lüty (1968), F_A Centers in Alkali Halide Crystals, in *Physics of Color Centers*, edited by W. Beall Fowler, Chapter 3, pp. 181-242, Academic Press, New York
- [5] G. Baldacchini, G.P. Gallerano, U.M. Grassano, A. Lanciano, A. Scacco, F. Somma, M. Meucci, and M. Tonelli (1986), *Effects of the Off-Center Position of the Li^+ Ion on the Optical Properties of the F_A Center in KCl*, Phys. Rev. B33, pp. 4273-82
- [6] L.F. Mollenauer and D.H. Olson (1975), *Broadly Tunable Lasers Using Color Centers*, J. Appl. Phys. 46, pp. 3109-3118
- [7] G. Baldacchini, U.M. Grassano, e M. Tonelli (1993), *Sorgenti Laser a Centri di Colore*, Il Nuovo Saggiatore, 9, 5/6, pp. 63-78
- [8] L.F. Mollenauer and R.H. Stolen (1984), *The Soliton Laser*, Opt. Lett. 9, pp. 13-15
- [9] G. Baldacchini, E. Giovenale, F. De Matteis, A. Scacco, F. Somma, M. Casalboni, and U.M. Grassano (1988), *New Luminescence of the F_A Centre in RbCl:Li*, Europhys. Lett. 7, 647-650
- [10] G. Baldacchini, M. Cremona, R.M. Montereali, C. Gillberti, A. Scacco, U.M. Grassano, and A. Shpak (1994), *Thermal Conversion of F_A Center Relaxed Excited States in KF:Na⁺*, J. Lumin. 58, 278-280
- [11] G. Baldacchini (1997), *Optical Excitation and Relaxation in Active Color Centers*, in Tunable Solid State Lasers, V. Strek, E. Lukowiak, and B. Nissen-Sobocinska, Eds, Proc. SPIE Vol. 3176, 142-54
- [12] N. Akiyama, T. Shiroasaki, S. Muramatsu, and G. Baldacchini (2012), *Vibronic Relaxation Processes of the F_A Center in RbCl:Li*, J. Lumin. 132, 1649-1655
- [13] R.M. Montereali, G. Baldacchini, S. Martelli, and L.C. Scavarda do Carmo (1991), *LIF Films: Production and Characterization*, Thin Solids Films 196, 75-83
- [14] G. Baldacchini (2002), *Colored LiF: An Optical Material for all Seasons*, J. Lumin. 100, 333-343
- [15] R.M. Montereali (2002), *Point Defects in Thin Insulating Films of Lithium Fluoride for Optical Microsystems*, in Handbook of Thin Film Materials, H.S. Nalwa ed., Vol.3: Ferroelectric and Dielectric Thin Films, Academic Press, Ch.7, 399-431
- [16] F. Bonfigli, M.A. Vincenti, S. Almaviva, R.M. Montereali, E. Nichelatti, R.N. Nogueira and H.J. Kalinowski (2009), *Photo-Induced Gratings in Thin Color Center Layers on Lithium Fluoride*, Appl. Opt. 48, 31, G38-43
- [17] R.M. Montereali, F. Bonfigli, M.A. Vincenti, and E. Nichelatti (2013), *Versatile Lithium Fluoride Thin-Film Solid-State Detectors for Nanoscale Radiation Imaging*, Nuovo Cimento, 36, 35-42
- [18] M.A. Vincenti, M. Ambrico, G. Baldacchini, V.S. Kalinov, R.M. Montereali, E. Nichelatti, L. Schiavulli, and A.P. Voitovich (2015), *Thermoluminescence in LiF Crystals and the Role of Impurities*, Materials Science and Engineering, 80, 0120221-5

Laser e molecole: la stagione dei multifotoni a Frascati negli anni 70 e 80

In questo lavoro viene presentata una rassegna storica delle attività di ricerca condotte tra la fine degli anni 70 e l'inizio anni 80 al centro ricerche ENEA di Frascati sull'interazione della radiazione emessa da laser infrarossi e le molecole poliatomiche in fase gassosa allo scopo di indurre processi di dissociazione a più fotoni caratterizzati da selettività isotopica.

L'ambiente internazionale estremamente vivace in quegli anni ha permesso di svolgere una ricerca a tutto campo, partendo dai fondamenti del meccanismo d'interazione, definendo l'eccitazione multifotonica attraverso livelli vibro-rotazionali, alle ricadute applicative legate allo sviluppo di sorgenti e sistemi per attuare i processi in strumentazione prototipale (laser, reattori) adatti alla successiva implementazione commerciale.

La portata delle ricerche è stata tale che la loro eredità ha condizionato lo sviluppo successivo del laboratorio negli anni 90 sia su temi di ricerca di base (spettroscopia IR ad alta risoluzione, studi di aggregati molecolari in fascio supersonici) che applicativi quali le nanotecnologie assistite da laser e i sistemi lidar

DOI 10.12910/EAI2015-091

■ R. Fantoni, E. Borsella, A. Palucci, A. Giardini

Introduzione

In questo articolo verranno delineate le fasi principali dell'attività svolta alla fine degli anni 70-inizio anni 80 da un gruppo di ricercatori dell'ENEA per comprendere il processo di interazione fra la radiazione infrarossa (IR) emessa da sorgenti laser di potenza elevata ed i modi vibrazionali di molecole in fase gassosa, inseguendo da una parte il sogno di una fotochimica selettiva per uno specifico legame chimico e dall'altra la concreta prospettiva dell'applicazione di questo processo all'arricchimento isotopico dell'uranio in impianti di piccola scala [1-5].

Questa attività si inseriva in un più vasto progetto dell'ENEA (inizialmente CNEN) mirante a sviluppare varie tipologie di processi LIS (Laser Isotope Separation) per l'arricchimento isotopico dell'uranio e fu resa possibile dalla disponibilità delle prime sorgenti laser impulsate con emissione nell'IR, caratterizzate da elevata densità di potenza ($>MW/cm^2$) e durata dell'impulso inferiore al μs . Al gruppo ENEA attivo a

Frascati toccò il compito di mettere a punto un processo efficiente per la separazione isotopica nell'IR dell' UF_6 partendo da esperimenti su molecole con struttura simile, quali l' SF_6 che presentava bande di assorbimento risonanti con l'emissione a $10 \mu m$ delle sorgenti laser di potenza a CO_2 (all'epoca già commerciali) e il cui utilizzo non richiedeva radioprotezione. Vennero presi in considerazione per motivi teorici anche alcuni freon che presentavano diverse ed interessanti simmetrie molecolari ed erano risonanti o quasi-risonanti con la radiazione emessa dai laser a CO_2 .

I punti critici della ricerca erano legati da una parte

Contact person: Roberta Fantoni
roberta.fantoni@enea.it

alla difficoltà di eccitare con radiazione monocromatica una molecola poliatomiche fino ed oltre la soglia di dissociazione (a causa dell'anarmonicità tipica dei modi vibrazionali all'aumentare dell'energia di eccitazione) e dall'altra alla mancanza di una sorgente laser di potenza con emissione accordabile nell'intervallo dei 16 μm , in corrispondenza con il modo vibrazionale ν_3 dell' UF_6 , attivo nell'IR, che manifestava uno spostamento in frequenza fra le diverse specie isotopiche [6]. Era inoltre necessario operare in assenza di collisioni per evitare di ridurre la selettività isotopica del processo [4].

In questo contesto, il gruppo effettuò in quegli anni importanti ed originali studi di eccitazione e dissociazione multifotonica sulle molecole simulanti in regime privo di collisioni, sia in cella a bassa pressione che in fascio molecolare supersonico [7-10], utilizzando in alcuni casi due sorgenti laser accordate su frequenze diverse per superare l'ostacolo rappresentato dall'anarmonicità dei modi vibrazionali pompate dalla radiazione infrarossa [11-12]. I risultati più rilevanti a livello internazionale sono legati alla rivelazione di risonanze a più fotoni nell'eccitazione dei livelli vibrazionali discreti e all'osservazione di strutture nel quasi-continuo dei livelli vibrazionali in tutte le molecole considerate (SF_6 , CF_3Br , CF_3I , $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$) [13-16], nonché alla realizzazione di un prototipo di reattore in flusso per la separazione isotopica del ^{13}C in CF_3Br [17].

In parallelo il gruppo si dedicò alla realizzazione di una sorgente non commerciale per l'eccitazione selettiva della molecola di UF_6 nella regione spettrale dei 16 μm . Per utilizzare lo schema a due laser messo a punto nello studio del processo sull' SF_6 , si scelse di sviluppare una coppia di sorgenti laser basate sullo spostamento dell'emissione da 10 μm verso 16 μm per effetto Raman in para idrogeno [18].

L'attività si concluse con un esperimento di irraggiamento a 16 μm dell' UF_6 , effettuato poco prima della crisi che si manifestò a livello nazionale nello sviluppo delle tecnologie nucleari per la fissione. L'acquisizione di conoscenze fondamentali nel campo dell'interazione laser IR-molecole in fase gassosa e delle tecnologie correlate ha rappresentato il punto di partenza per intraprendere le attività successive del gruppo, dalla sintesi laser di nano-polveri e nano-strutture alle diagnostiche remote di tipo lidar.

Descrizione del processo

Meccanismo di eccitazione multifotonica nell'IR di molecole poliatomiche

Nell'ambito del modello generalmente adottato per spiegare le modalità dell'eccitazione a multifotoni (MPE: Multi Photon Excitation) di molecole poliatomiche gli stati vibrazionali delle molecole vengono suddivisi in tre regioni distinte ad energia crescente [5]: la regione del discreto a basse energie dove hanno luogo transizioni ottiche fra livelli discreti, la cosiddetta regione del quasi-continuo caratterizzata da un fitto spettro di transizioni associate a livelli che si vanno via via addensando sotto la soglia di dissociazione, la regione del continuo vero e proprio al di sopra della quale la molecola si frammenta. Le tre regioni sono mostrate schematicamente in Figura 1.

Questo modello permette di descrivere mediante equazioni quanto-meccaniche l'interazione fra la radiazione laser ed i primi livelli discreti [11] e prevede la presenza di risonanze multifotoniche di ordine N allorché le molecole sono eccitate con fotoni di energia $h\omega$ tale che $h\omega = 1/N (\epsilon_N - \epsilon_0)$, in cui ϵ_N ed ϵ_0 sono rispettivamente l'energia dello stato finale e dello stato iniziale. La sezione d'urto del processo [11] ri-

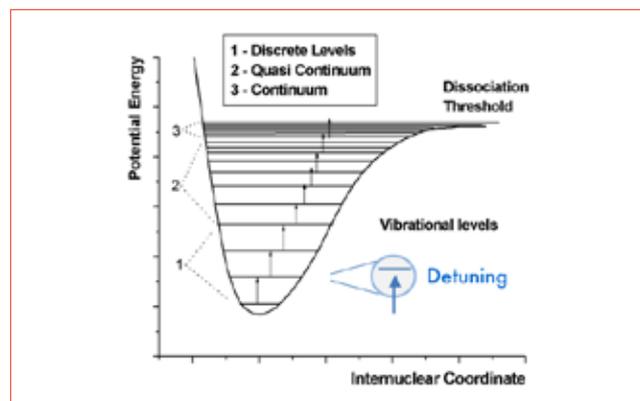


FIGURA 1 Schema di eccitazione multifotonica lungo un modo normale di una molecola poliatomiche. I livelli vibrazionali sono raggruppati nelle tre zone citate nel testo. L'eccitazione è indotta da 2 frequenze laser leggermente diverse, la prima quasi risonante nel discreto e la seconda nel quasi-continuo. Si noti il *detuning* per alcune transizioni sia nel discreto che nel quasi continuo

sulta proporzionale ad I^N (dove I è l'intensità del laser di eccitazione) ed inversamente proporzionale al prodotto dei *detunings* δ_i fra la frequenza della radiazione e le transizioni intermedie (Figura 1).

Meccanismo di dissociazione multifotonica e arricchimento isotopico

Nei primi modelli teorici, sviluppati per spiegare il fenomeno dell'eccitazione a multifotoni IR, si assumeva che al di sopra dei primi stati vibrazionali discreti (tipicamente da 3 a 6) la congestione fra i livelli fosse già così alta da consentire l'uso di un approccio statistico come nel vero e proprio continuo degli stati al di sopra della soglia di dissociazione. Si prevedeva quindi la redistribuzione casuale dell'energia assorbita dalla molecola fra tutti i suoi modi di vibrazione, con accumulo di energia nei modi più bassi e conseguente rottura del legame più debole, indipendentemente da quale legame fosse stato inizialmente eccitato. Questo spiegava l'impossibilità osservata sperimentalmente di rompere selettivamente uno specifico legame chimico pompato dal laser [2].

Questo modello associa la possibilità di arricchimento isotopico, in assenza di collisioni, alla presenza di risonanze multifotoniche a frequenze caratteristiche per ciascuna specie isotopica. Si noti che la *randomizzazione* dell'energia non comporta una perdita di selettività perché avviene all'interno della sola specie isotopica inizialmente eccitata dalla radiazione laser. Il processo è schematizzato in Figura 2 per la molecola di CF_3Br , che in corrispondenza del modo di vibrazione ν_1 (a $1056,5 \text{ cm}^{-1}$) mostra uno spostamento di circa 28 cm^{-1} fra le molecole contenenti l'isotopo C^{12} e C^{13} .

Esperimenti in regime privo di collisioni

Per mantenere la coerenza dell'eccitazione nel pompaggio dei primi stati discreti è necessario condurre gli esperimenti in assenza di collisioni, condizione raggiungibile o in cella con il gas rarefatto a pressione sufficientemente bassa da garantire che il tempo fra due successivi urti fra le molecole sia superiore alla durata dell'impulso laser o in fascio molecolare supersonico [1-2], in cui le molecole fredde si muovono tutte nella medesima direzione senza urtarsi. In ambedue i casi occorre ipotizzare un meccanismo ef-

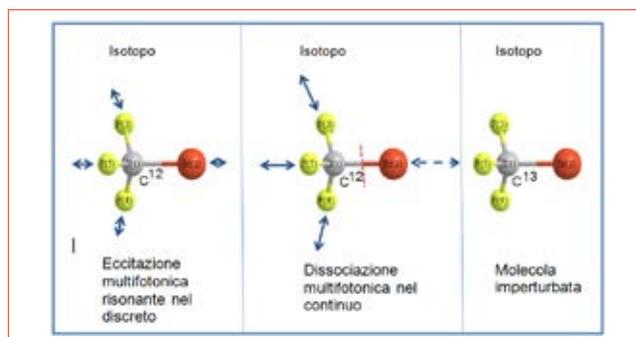


FIGURA 2 Schematizzazione del processo isotopicamente selettivo di eccitazione e dissociazione multifotonica della molecola di CF_3Br . L'eccitazione avviene sul modo di vibrazione ν_1 dell'isotopo ^{12}C , la dissociazione porta alla rottura del legame C-Br

ficiente che permetta di superare l'anarmonicità dei livelli vibrazionali coinvolti nelle risonanze multifotoniche: per molecole in cella a temperatura ambiente il contributo principale proviene dall'accoppiamento vibro-rotazionale, compresi effetti di ordine elevato quali le interazioni di Coriolis; per le molecole in fascio supersonico, che sono invece rotazionalmente fredde, diventano dominanti gli effetti di *splitting* di simmetria e le interazioni fra diversi modi di vibrazione (quali le interazioni di Fermi) [2, 3].

Gli esperimenti di MPE sono stati condotti su specie fluorurate (fluoro-idrocarburi quali i freon, SF_6 , SiF_4) di diversa simmetria in quanto dotate di:

- i) intense bande di assorbimento nel medio infrarosso ($9\text{-}10 \mu\text{m}$),
- ii) elevata densità degli stati del quasi continuo raggiungibili con risonanze a pochi fotoni (tipicamente 3),
- iii) bassa soglia di dissociazione.

Gli esperimenti di MPE ed MPD (Multi Photon Dissociation) in cella sono stati effettuati utilizzando una o due sorgenti monocromatiche di radiazione laser (in Figura 1 è riportato il caso dell'eccitazione a due frequenze), spazialmente sovrapposte ed adeguatamente sincronizzate. In particolare il gruppo dell'ENEA a Frascati ha rivelato la presenza di risonanze multifotoniche nell'assorbimento di tutte le molecole esaminate fra cui $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$, CF_3Br , CF_3I e SF_6 [12-16, 19-21].



FIGURA 3 Schema e foto della Camera MPD realizzata a Frascati per esperimenti indotti da una o due radiazioni laser (sorgenti commerciali a CO_2). Il percorso dei fasci laser infrarossi è visualizzato mediante laser visibile a HeNe. Nella terza immagine, due ricercatrici (A. Giardini e R. Fantoni) durante l'allineamento

Gli esperimenti di MPD in fascio molecolare supersonico hanno richiesto la realizzazione di un impianto complesso dotato di tre stadi di pompaggio differenziale per: espansione del fascio molecolare attraverso un *nozzle* di diametro selezionabile fra 100 e 20 mm (con caduta di pressione di un fattore dell'ordine di 10^{-6}), collimazione del fascio attraverso uno *skimmer* per permettere l'interazione in assenza di collisioni con la radiazione laser, e rivelazione dei frammenti in uno spettrometro di massa a tempo di volo tenuto in UHV (10^{-8} mbar). Lo schema dell'apparato è mostrato nella parte bassa di Figura 3.

L'apparato "camera MPD" realizzato all'ENEA Frascati è mostrato in Figura 3 e fu progettato tenendo conto dei risultati degli esperimenti pionieristici condotti a Berkeley dal gruppo del premio Nobel prof. Yuan Lee in cui venne provato che in regime privo di collisioni si può avere eccitazione multifonica selettiva, ma il primo a rompersi è sempre il legame più debole. Alla sperimentazione del gruppo del prof. Yuan Lee sul $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ aveva partecipato come ospite dall'ENEA di Frascati la prof. Anna Giardini [22] che appare nella foto a sinistra mentre è impegnata nelle procedure di allineamento del fascio.

A Frascati il ruolo delle risonanze vibrazionali, rivelate sia nel discreto che nel quasi-continuo, è stato oggetto di approfondite indagini in esperimenti di MPD indotta da eccitazione a una o due frequenze laser

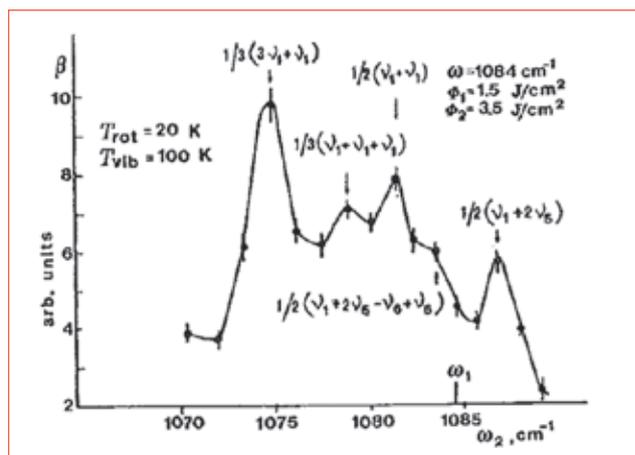


FIGURA 4 MPD di CF_3Br in fascio supersonico indotta da 2 laser con assegnazione delle risonanze osservate nella regione del discreto degli stati

sulle molecole in fascio supersonico, sovra-raffreddate anche in presenza di un gas nobile di trasporto (Ar) fino a $T_{\text{rot}} \sim 20$ K e $T_{\text{vib}} \sim 100$ K. Intense strutture nel quasi-continuo sono state rivelate per molecole a simmetria sferica (SF_6 [19]), per rotatori simmetrici (CF_3Br [20]) ed asimmetrici ($\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ [21]).

Un esempio di risonanze nel discreto, rivelate mediante MPD a due frequenze (eccitando il modo ν_1 sulla testa di banda vibrazionale a $1084,64$ cm^{-1} e variando ν_2 nella regione 1067 - 1090 cm^{-1}), è riportato

in Figura 4 per il CF_3Br . L'assegnazione è basata sulle costanti spettroscopiche note del CF_3Br coinvolgendo la risonanza di Fermi fra ν_1 e $2\nu_5$ e le bande calde del ν_6 . Altre strutture, relative al quasi-continuo sopra i 4000 cm^{-1} , sono state osservate per la prima volta in una regione ancor più spostata verso il rosso (fra $1033\text{-}1057,5\text{ cm}^{-1}$) e la loro rivelazione ha confermato la natura strutturata del quasi-continuo per rotatori simmetrici [21].

Ricadute applicative

Gli studi condotti dal gruppo di Frascati ebbero un impatto significativo nel chiarire il complesso meccanismo del processo di eccitazione multifotonica di molecole poliatomiche. In parallelo il gruppo portò avanti con successo anche le attività istituzionali legate all'arricchimento isotopico mediante laser realizzando un prototipo di reattore in flusso (testato sull'arricchimento di ^{13}C in freon) e un sistema laser a doppio impulso per eccitare il modo ν_3 dell' UF_6 a $16\text{ }\mu\text{m}$.

Realizzazione del reattore in flusso per arricchimento in ^{13}C

Gli esperimenti di dissociazione multifotonica nell'IR della specie isotopica più abbondante (^{12}C) del $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ e del CF_3Br avevano mostrato la possibilità di ottenere arricchimento nel gas residuo delle specie contenenti gli isotopi più rari ^{13}C e ^{14}C . Questo risultato portò alla realizzazione di un reattore prototipale in flusso costituito da una cella a doppio passo ($l=1,5\text{ m}$, $p=0,5\text{ torr}$) dotata di un sistema di ricircolo del gas. Nella cella l'isotopo eccitato selettivamente dal laser giunge a dissociazione. La ricombinazione viene evitata aggiungendo un gas che reagisce con uno dei frammenti (*scavenger*), tipicamente O_2 o H_2 , dando luogo a prodotti che si depositano sul fondo della cella come polveri solide o vengono separati successivamente per distillazione frazionata. Il gas viene poi fatto ricircolare per *step* successivi di eccitazione delle molecole indissociate.

Mediante questo prototipo (Figura 5) fu possibile raggiungere un'efficienza di dissociazione molto alta dell'isotopo contenente ^{12}C nel CF_3Br naturale ed un conseguente arricchimento dell'ordine del

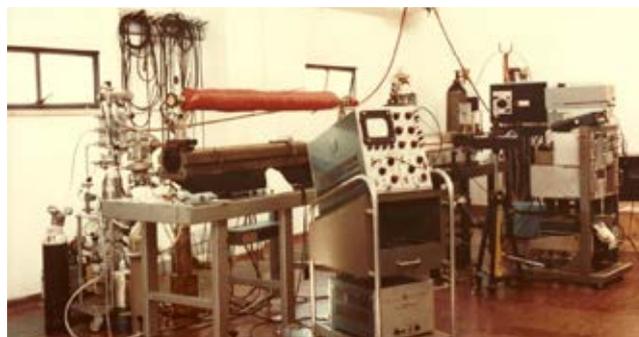


FIGURA 5 Foto del prototipo di reattore per arricchimento isotopico via laser di freon operante con processo MPE indotto da laser a CO_2

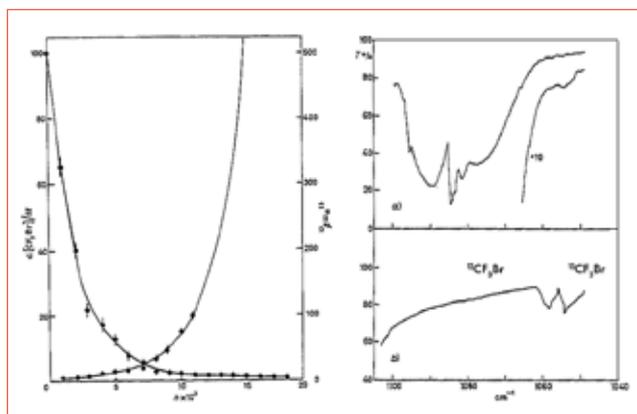


FIGURA 6 Arricchimento isotopico in ^{13}C ottenuto da CF_3Br naturale mediante il reattore in flusso basato sul processo laser MPE: a sinistra efficienza di dissociazione e fattore di arricchimento, a destra visualizzazione dell'effetto dissociazione (scomparsa della banda ν_1 del $^{12}\text{CF}_3\text{Br}$) ed arricchimento (emersione dal fondo della banda ν_1 del $^{13}\text{CF}_3\text{Br}$) mediante spettroscopia IR

95% sugli isotopi più rari, così come mostrato in Figura 6 per il ^{13}C [17]. Sistemi analoghi per altri freon furono successivamente ingegnerizzati da altri gruppi [23].

Realizzazione di sorgenti a 16 micron per l'eccitazione nell'IR dell' UF_6

Una volta compreso il meccanismo di MPE di molecole poliatomiche nell'IR e dimostrata la fattibilità di

processi di arricchimento isotopico mediante laser in un reattore in flusso, l'attività si concentrò sull' UF_6 . Il primo passo fu la misura estremamente accurata dello *shift* isotopico della banda ν_3 attiva nell'IR dell' $^{235}UF_6$ rispetto all' $^{238}UF_6$ e di altri importanti parametri spettroscopici (bande di combinazione e bande calde in prossimità del modo considerato) [6]. Queste misure furono effettuate mediante spettroscopia ad alta risoluzione con diodi laser, ma un processo efficiente di arricchimento isotopico richiedeva la disponibilità di sorgenti laser di potenza elevata operanti nella regione dei $16 \mu m$ e non commerciali.

Per sfruttare al meglio la tecnologia più matura e la componentistica commerciale disponibile in quegli anni furono presi in considerazione alcuni schemi per spostare verso i $16 \mu m$ la radiazione emessa nell'intervallo dei $10 \mu m$ dai laser a CO_2 . In particolare il gruppo ENEA attivo in Casaccia si focalizzò sul pompaggio ottico di idrocarburi fluorurati, selezionando gli isotopi del CF_4 [24-25], mentre il gruppo di Frascati scelse di realizzare la sorgente attraverso un *Raman shifter*, nello specifico una cella multipasso contenente para-idrogeno (pH_2) a bassa temperatura [18].

Considerazioni sull'efficienza dell'effetto Raman stimolato hanno portato a dover realizzare sistemi di pompaggio prototipali, caratterizzati da un'elevata qualità spaziale, spettrale e temporale degli impulsi, per ambedue le frequenze a $10 \mu m$ da spostare verso i $16 \mu m$ nello schema MPE a due laser. In particolare furono realizzati nel laboratorio due oscillatori ibridi costituiti da una sezione di scarica impulsata a pressione atmosferica e di una sezione a scarica continua (operata sotto soglia) all'interno di una singola cavità ottica che utilizzava un reticolo ad alta risoluzione per la selezione delle righe di emissione del laser a CO_2 . In questo modo si sono ottenuti impulsi dell'ordine dei $100mJ/100ns$ in singolo modo trasverso TEM_{00} e longitudinale.

L'emissione ottica con profilo gaussiano ha permesso di controllare la propagazione ottica senza perdite per aberrazioni e rispondente alle necessità ottiche della cella multipasso contenente il pH_2 . L'impiego del modulo a bassa pressione ha permesso di stringere la banda di emissione ottica del laser a CO_2 atmosferico dai $3 GHz$ ai $75 MHz$ in modo da aumentare la selettività di eccitazione. L'adozione di un reticolo

intracavity ha permesso di selezionare righe di emissione nella banda $9-11 \mu m$.

I due fasci laser sono stati sovrapposti per polarizzazione e fatti passare attraverso un polarizzatore circolare per incrementare il processo di generazione stimolata Raman. Successivamente, sono stati fatti passare attraverso due stadi di amplificazione per ottenere $E = 1J$ dopo il primo stadio e raggiungere $E = 4J$ dopo il secondo. Uno specchio concavo di opportuna focale ha permesso di ottimizzare i fasci prima dell'ingresso alla cella multipasso ed evitare processi di scarica spuri.

La cella multipasso era formata da due specchi sferici di rame ultrapuro OFHC (Oxygen-free high thermal conductivity) del diametro di $20 cm$, posizionati a $430 cm$ di distanza per ottenere, dopo 25 passaggi, un cammino ottico di $110 m$. La cella veniva riempita con H_2 liquido mantenuto in termostato per il tempo

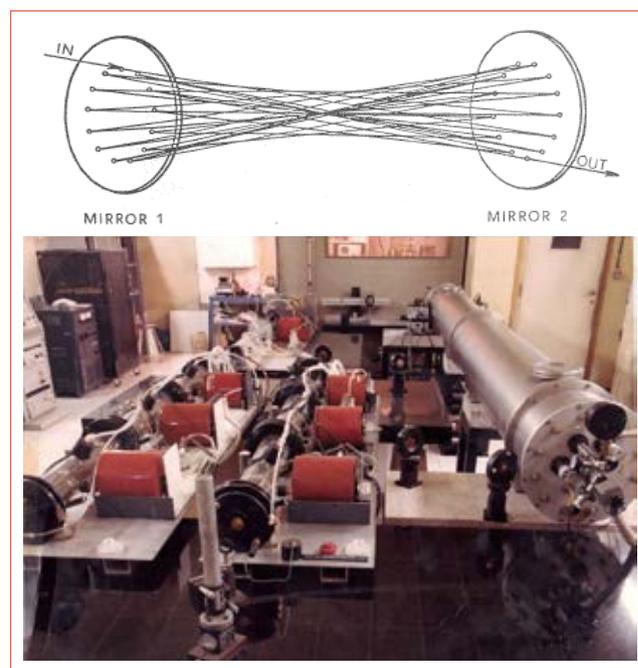


FIGURA 7 Sistema laser Raman: in alto lo schema della cella multipasso, in basso la foto dell'intero apparato di generazione laser a $16 \mu m$, a sinistra la catena di oscillatore + i due amplificatori, a destra l'ingresso della cella multipasso ed in fondo la gabbia di Faraday per la sperimentazione

necessario alla sua trasformazione. Successivamente, veniva introdotto all'interno della cella multipasso, che grazie ad un doppio isolamento con vuoto permetteva di mantenere il gas p-H₂ alla temperatura dell'azoto liquido.

L'apparato completo di una sorgente ibrida più due amplificatori laser a CO₂ insieme alla cella multipasso sono mostrati nella Figura 7. Con questa particolare cella multipasso raffreddabile sono stati utilizzati anche altri gas per ottenere emissioni nel medio e nel lontano infrarosso, come NH₃ @11,70 μm e 100 μm, CH₃F @ ≈ 100 μm.

Il sistema fu utilizzato con successo dissociando in una cella a bassa pressione un campione naturale di UF₆. La cella fu completamente progettata e realizzata a Frascati in modo da massimizzare l'interazione del gas con la radiazione laser. Come mostrato in Figura 8, era dotata di una finestra laterale per la rivelazione on-line della fluorescenza emessa dall'HF [26] prodotto in uno stato vibrazionale eccitato a seguito della cattura dei radicali F[•] da parte dell'H₂ aggiunto come *scavenger* per evitare la ricombinazione dei frammenti. I dati sull'arricchimento ottenuto non sono rilasciabili in quanto ancora classificati per motivi di riservatezza. Le tecnologie di arricchimento isotopico mediante laser dell'uranio vennero infatti ritenute proliferanti, per la possibilità di realizzare impianti anche di piccola taglia, e strategicamente segretate.

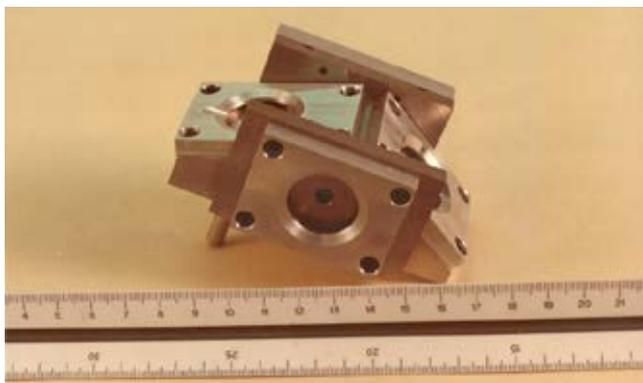


FIGURA 8 Foto della cella di volume minimo per la dimostrazione di dissociazione multifotonica isotopicamente selettiva dell'UF₆, la finestra laterale permetteva il monitoraggio ottico on line del processo di dissociazione per singolo impulso laser

Ulteriori sviluppi e conclusioni

La sperimentazione sull'UF₆ terminò nel 1984 con la chiusura delle attività relative all'arricchimento isotopico mediante laser dell'uranio, considerato una tecnologia proliferante, e fu definitivamente abbandonata con la fine del programma italiano di fissione nucleare a seguito del referendum post Chernobyl del 1986.

Lo studio teorico e sperimentale dei processi di MPE proseguì comunque a Frascati dando origine ad una nuova linea di ricerca: la crescita di nanostrutture mediante LCVD (Laser Chemical Vapour deposition). Si portavano a dissociazione molecole poliatomiche più leggere dei freon, in particolare idrocarburi leggeri (etilene [27]) e silani (silano [28]), sfruttando per l'eccitazione a più fotoni nel discreto la presenza di livelli intermedi disponibili per simmetria e le interazioni con altre bande debolmente attive. La minore densità dei livelli nel quasi-continuo in questi composti leggeri richiede però di ricorrere a meccanismi collisionali per raggiungere ed oltrepassare la soglia di dissociazione con gli impulsi caratteristici dei laser TEA a CO₂ (2J in 100 ns di picco con una tipica coda di qualche microsecondo). L'interesse scientifico ed applicativo per questi processi risiede nella possibilità di dissociare composti molecolari i cui frammenti danno luogo alla formazione e crescita di nanostrutture con proprietà predefinite (amorfe/cristalline in una specifica fase) sia a base di silicio [29] che di carbonio [30], includendo fra queste ultime i film di tipo diamond-like ed il fullerene.

Altri studi significativi sono stati condotti nella seconda metà degli anni 80 attraverso prestigiose collaborazioni internazionali sulla condensazione e dissociazione di molecole sovra-raffreddate in micro-aggregati (i "cluster" molecolari [31]) tenuti assieme da deboli legami di Van Der Waals in fasci molecolari supersonici [32-34]. Allo scopo sono state messe a punto a Frascati tecnologie specifiche, inizialmente sviluppate nell'ambito del progetto di arricchimento isotopico del UF₆, quali il bolometro superconduttore [35], e realizzati apparati per spettroscopia IR ad alta risoluzione quali il fascio Laval [36].

Dall'esperienza maturata nella realizzazione di sor-

genti unimodali per ottenere una efficiente generazione di radiazione Raman in paraidrogeno è derivato lo sviluppo delle cavità SFUR [37-38] e la realizzazione di altre sorgenti laser nel medio e lontano infrarosso (FIR) per effetto Raman in molecole leggere (D_2 , NH_3 , CH_3F) [39-40]. Dall'attività sulle cavità SFUR discende l'intera linea di ricerca sui lidar atmosferici nell'IR per la caratterizzazione sia di gas inquinanti nella troposfera che di particolato [41].

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano tutti i tecnici dell'ENEA Frascati per il loro prezioso contributo agli esperimenti citati: Remo Belardinelli, Pietro Cardoni, Italo Cenciarelli, Mariano Giorgi, Lorenzo Martinis, Marco Nardelli, Sergio Ribezzo, Gianni Schina, e i colleghi ENEA coinvolti in at-

tività specifiche di spettroscopia: Giuseppe Baldacchini, Massimo Bernardini, Sauro Marchetti, Vinicio Montelatici e Giovanni Sanna. Vanno inoltre ricordati i laureandi: Françaises Maday, Claudio Clementi, Umberto del Bello, Alessandro Ferretti, Domenica Masci, Giovanni Petrocelli, Rosanna Larciprete, Luisa Caneve. Un ringraziamento particolare va inoltre ai numerosi ospiti italiani e stranieri, coautori dei lavori citati in bibliografia. ●

Roberta Fantoni, Antonio Palucci

ENEA, Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare, Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute

Elisabetta Borsella
già ENEA Frascati

Anna Giardini
Università di Roma "Sapienza", Dipartimento di Chimica, già ENEA Frascati

abstract

Laser and molecules: the season of multiphoton in Frascati in the 70s and 80s

This paper consists of a historical review of the research activities going on at the end of the '70s and beginning of the '80 at ENEA Frascati Research Centre on the topic of infrared laser molecule interactions in the gas phase. Main goal of the studies was the implementation of isotopically selective multiphoton dissociation.

The activity, conducted in an extended framework of fruitful international cooperation, ranged from fundamental research addressed to the understanding of the mechanism of the excitation process in climbing the vibro-rotational ladder, to applicative consequences in the realization of process prototypes (laser, reactors) suitable to successive commercialization.

The entire activity successively pushed the laboratory development in the '90 both on fundamental research themes (like the high resolution IR spectroscopy and the study of molecular clusters in ultracold supersonic beams) and on other applicative fields, like laser driven nano-technologies and lidar systems.

bibliografia

- [1] Letokhov V.S., Non Linear Laser Chemistry, Springer Series in *Chemical Physics* 22 (Springer Verlag) 1983
- [2] *Laser Applications in Chemistry*, Eds. G. Scoles and J. Wanner (Plenum Press, N.Y.) 1983, 151-160 e referenze incluse
- [3] *Laser Spectroscopy VI*, Eds. H.P. Weber and W. Luthy (Springer Verlag, Heidelberg) 1983
- [4] K. von Puttkamer, H.-R. Dübal and Martin Quack, "Time-dependent processes in polyatomic molecules during and after intense infrared irradiation", *Faraday Discuss. Chem. Soc.*, 1983, 75, 197-210
- [5] C.D. Cantrell, S. M. Freund and J. L. Lyman, *Laser Handbook*, Vol. 3, Ed. M. L. Stitch (North Holland, Amsterdam, 1979) pp 485-576
- [6] G. Baldacchini, R. Fantoni, S. Marchetti, V. Montelatici, A. Giardini-Guidoni, P. Morales, F. Catoni, "Diode laser absorption of UF_6 at room temperature around $16 \mu m$ ", *Il Nuovo Cimento D8* (1986) 203
- [7] Amirav, U. Even, and Joshua Jortner, "Intramolecular dynamics of an isolated ultracold large molecule", *J. Chem. Phys.* 71, 2319 (1979)
- [8] T. E. Gough, R. E. Miller and G. Scoles, "Infrared laser spectroscopy of molecular beams", *Appl. Phys. Lett.* 30, 338 (1977)

- [9] G. Luijks, S. Stolte, J. Reuss, "Molecular beam diagnostics by Raman scattering", *Chem. Phys.* 62, 217-229 (1981)
- [10] D. Bassi, A. Boschetti, M. Scotoni, M. Zen, "Molecular beam diagnostics by means of fast superconducting bolometer and pulsed infrared laser", *Applied Physics B* 26, 99-103 (1981)
- [11] J. Stone and M.F. Goodman, *J. Chem Phys.* 71 (1979) 408
- [12] C. Di Lauro, F. Lattanzi, G. Sanna, "Concurrence of the $n\nu_3$ and $(n-1)\nu_3 + \nu_2 + \nu_6$ vibrational ladders in the collisionless multiphoton excitation of SF_6 ", *Chem. Phys.*, 73 (1982) 215-221
- [13] Giardini-Guidoni, E. Borsella, R. Fantoni: "Dynamics of multiphoton excitation of CF_3Br studied by means of one or two IR laser frequencies", *La Gazzetta Chimica italiana* 113 (1983) 635
- [14] E. Borsella, R. Fantoni, A. Giardini-Guidoni, D.R. Adams, C.D. Cantrell, "Resonance structure of multiple-photon excitation in symmetric and asymmetric tops", *Chem. Phys. Lett.* 101 (1983) 86
- [15] U. Del Bello, E. Borsella, R. Fantoni, A. Giardini-Guidoni, C.D. Cantrell, "Study of IR multiphoton resonances in the CF_3I molecule", *Chem. Phys. Lett.* 114 (1985) 467
- [16] E. Borsella, R. Fantoni, G. Petrocelli, G. Sanna, M. Capiteli, M. Dilonardo, *Chem. Phys.* 63 (1981) 219
- [17] E. Borsella, C. Clementi, R. Fantoni, A. Palucci, *Il Nuovo Cimento* 73A (1983) 364-372
- [18] M. Bernardini, A. Ferrario, M. Giorgi, S. Marchetti, A. Palucci, Parametric study of a Raman p-H₂ laser with over 30 MW emission at 16 mm. *Il Nuovo Cimento D* Vol 6, 520-528 (1984)
- [19] E. Borsella, R. Fantoni, Liu-Yu-Shem, M. Nardelli, *Il Nuovo Cimento* 4D (1984) 548-556
- [20] E. Borsella, R. Fantoni, A. Ferretti, A. Giardini-Guidoni, M. Di Lonardo, *J. Reuss, Chem. Phys.* 94 (1985) 309-326
- [21] E. Borsella, R. Fantoni, A. Giardini-Guidoni, C.D. Cantrell, *Chem. Phys. Lett.* 87 (1982) 284-288
- [22] D.J. Krajnovich, A. Giardini-Guidoni, A.S. Sudbo, P.A. Schulz, Y. R. Shen and Y. T. Lee, in "Laser Induced Processes in Molecules", Springer Series in Chemical Physics, vol. 6 (Springer, Berlin 1979) p. 176
- [23] W. Fuss, J. Göthel, M. Ivanenko, K. L. Kompa, W. E. Schmid, "Isotope selective dissociation of $CHClF_2$ by one- and two-wavelength Q-switched CO_2 laser", *Z. Phys. D24* (1992) 47
- [24] Bonanni F, Castiglione S, Salvetti G., "Parametric characterization of an optically pumped CF_4 laser operated in a non-saturating pump regime", *Il Nuovo Cimento B*66 (1981) 129-144
- [25] Cavaiali M., Salvetti G., "Tuning characteristics of an optically pumped CF_4 laser", *Optics Communications*, 42 (1982) 431-436
- [26] E. Borsella, R. Fantoni, S. Ribezzo, G. Salvetti, "Some aspects of CO_2 laser induced fluorescence in SF_6+H_2 mixtures", *Opt. Commun.* 39 (1981) 365
- [27] V.M. Gordienko, E.O. Danilov, V.T. Platonenko, V.A. Slobodanyuk, *J. Molecular Structure* 349 (1995) 219-222
- [28] M. Snels, R. Larciprete, R. Fantoni, E. Borsella, A. Giardini-Guidoni, *Chem. Phys. Lett.* 122 (1985) 480-488
- [29] R. Bilenchi, I. Gianinoni, M. Musci, *J. Appl. Phys.* 53 (1982) 6479
- [30] X. Armand, N. Herlin, I. Voicu, M. Cauchetier, *J. Chem. Phys, Solids*, 58 (1997) 1853-1859
- [31] Roy G. Gordon and Yung Sik Kim, "Theory for the Forces between Closed-Shell Atoms and Molecules", *J. Chem. Phys.* 56, 3122 (1972)
- [32] M. Snels, R. Fantoni, M. Zen, S. Stolte, J. Reuss, "VanderWaals modes and rotational fine structure in C_2H_4 dimers", *Chem. Phys. Lett.* 124 (1986) 1
- [33] M. Snels, R. Fantoni, "IR dissociation of dimers of high symmetry molecules: SF_6 , SiF_4 , SiH_4 ", *Chem. Phys.* 109 (1986) 67
- [34] M. Snels, R. Fantoni, R. Sanders, W. Leo Meerts, "IR dissociation of ammonia clusters", *Chem. Phys.* 115 (1987) 79
- [35] G. Sanna, M. Nardi and G. Tomassetti, "Apparatus for the study of the IR multiple-photon resonance of polyatomic molecules via the optothermal technique. I. Description of the apparatus", *Rev. Sci. Instrum.* 61, 1371 (1990)
- [36] G. Baldacchini, P.K. Chakraborti, F. D'Amato, "Lineshape in a Laval molecular beam and pressure broadening of N_2O transition lines", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 49, 439-447 (1993)
- [37] D'Amato F., Giorgi M., Marchetti S., "High Tunability, High Beam Quality CO_2 Laser with SFUR Cavity and Beam Expander", *Opt. Commun.* 76, 121-126(1990)
- [38] Barbini R., Colao F., D'Amato F., Giorgi M., Marchetti S., "A Long Pulse TE CO_2 Laser with a Negative Branch Unstable Resonator", *Nuovo Cimento D* 12, 967-974 (1990)
- [39] D'Amato F., Bernardini M., Giorgi M., Marchetti S., "Coherent Radiation Generation in (7.9÷8.7) μm and (11÷14) μm Regions by Rotational Raman Scattering in Deuterium", *Nuovo Cimento D* 10, 1061-1067 (1988)
- [40] Marchetti S., Martinelli M., Simili R., D'Amato F., Giorgi M., "Emission of simultaneous tunable off-resonance and line centre FIR Raman lines in NH_3 and CH_3F ", *Opt. Commun.* (1998) 156, 285-288
- [41] R. Barbini, A. Ghigo, M. Giorgi, K.N. Iyer, A. Palucci, S. Ribezzo, "Injection-locked single-mode high-power low-divergence TEA CO_2 laser using SFUR configuration", *Opt. Comm.* Vol 60, 239-243 (1986)



Tutti i 'colori' dell'ENEA

A partire dai pioneristici studi sui sistemi laser applicati alla diagnostica dei plasmi del gruppo di Ascoli Bartoli nei primissimi anni 60 a Frascati, i laboratori del CNEN poi ENEA hanno sviluppato e mantenuto nei decenni competenze di assoluto livello internazionale nello sviluppo e nelle applicazioni di sistemi laser e più in generale di sorgenti di luce sia coerenti, sia incoerenti. Oggi, la compresenza nello stesso Centro di diverse sorgenti di luce che coprono una larghissima parte dello spettro delle onde elettromagnetiche (tutti 'i colori' a cui fa riferimento il titolo), dal THz ai raggi X duri, costituisce un caso unico in Italia di cui si parla poco ma che è una realtà scientifica e tecnologica acclarata da decenni. In questo articolo presentiamo un riassunto di alcune sorgenti di luce progettate e realizzate nel Centro ENEA di Frascati, e delle loro applicazioni in diversi campi scientifici e tecnologici

DOI 10.12910/EAI2015-092

■ P. Di Lazzaro, R. De Angelis, G.P. Gallerano, A. Doria

Eccimeri all'ENEA

La figura carismatica di Ugo Ascoli Bartoli e gli straordinari risultati scientifici ottenuti dal suo gruppo presso il Laboratorio Gas Ionizzati del CNRN (poi CNEN e ora ENEA) a Frascati sono delineati nell'articolo [1] in questo numero. Tra gli innumerevoli meriti scientifici di Ascoli Bartoli uno dei meno noti è la proposta nel 1979 di realizzare un laser ad eccimero in grado di generare impulsi ultravioletti (UV) di energia 8 J/impulso, a 10 Hz di cadenza di ripetizione, allo scopo di misurare l'evoluzione della temperatura del plasma a confinamento magnetico mediante scattering Thomson [2]. Nel 1979 la tecnologia dei laser ad eccimeri stava muovendo i primi passi in direzione opposta, più consona alle caratteristiche intrinseche del mezzo attivo eccimero, ovvero una ridotta energia di uscita (mJ) ad elevata cadenza di ripetizione (diverse centinaia di Hz). In pratica, le prestazioni richieste nel rapporto [2] erano irraggiungibili. Proprio per questo motivo, la proposta di Ascoli fu

accolta come una sfida scientifica e diede il via ad un nuovo filone di ricerca frascatana che avrebbe portato a risultati scientifici e tecnologici di grande rilievo internazionale: lo sviluppo di laser eccimeri ad elevata energia per impulso e le loro applicazioni nella fisica del plasma e nella lavorazione di materiali.

Il sistema laser suggerito da Ascoli nel 1979 sarà realizzato passo dopo passo, da prototipo di laboratorio (laser Hercules, fine anni 80, vedi Figura 1) a strumento per applicazioni avanzate di interazione laser-materia e generazione di plasmi (sorgente laser-plasma EGERIA, anni 90), fino a chiudere il suo cerchio evolutivo nel 1999, con il prototipo di laser eccimero industriale Hercules L [3, 4], vedi Figura 2, che genera impulsi UV da 10 J/impulso a 10 Hz i quali, resi omogenei da un sistema ottico brevettato da ENEA, erano ottimizzati per la ricristallizzazione di silicio amorfo su vetro, primo passo per realizzare transistori a film sottile (TFT) che oggi troviamo negli schermi di cellulari, tablet, computer portatili [5].

I laser ad eccimeri più efficienti sono basati su una miscela di alogenuri di gas nobile, ad esempio XeCl, KrF, ArF. Tipicamente, il mezzo attivo è costituito da una decina di mbar di un gas nobile (Xe, o Kr, o Ar) e meno

Contact person: Paolo Di Lazzaro
paolo.dilazzaro@enea.it

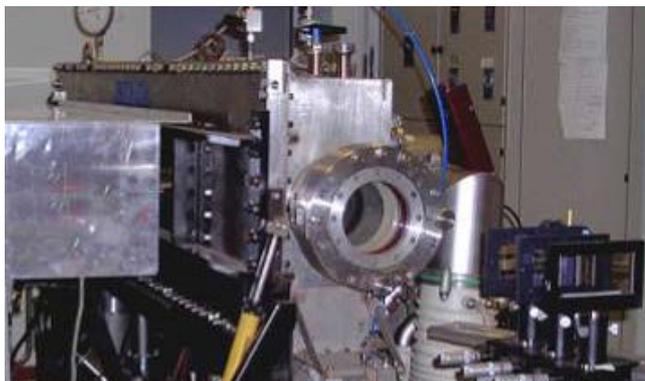


FIGURA 1 Vista frontale del sistema laser eccimero Hercules, interamente progettato e realizzato dal Laboratorio Eccimeri, ENEA Frascati. Da sinistra a destra: involucro contenente il sistema LC-inversion in grado di modulare 600 J elettrici, testa laser con la finestra di uscita degli impulsi laser 10 cm x 10 cm, pompa a diffusione per il vuoto nella camera contenente il diodo a raggi X (non visibile), ottiche per la manipolazione spaziale degli impulsi laser
Fonte: ENEA



FIGURA 2 Vista laterale del sistema laser eccimero Hercules L, progettato e realizzato dal Laboratorio Eccimeri, ENEA Frascati in collaborazione con El.En. SpA. Da sinistra a destra: camera da vuoto contenente il diodo a raggi X, sistema di controllo della miscela laser, testa laser con la finestra di uscita degli impulsi laser 10 cm x 10 cm, parte del tubo di ricircolo longitudinale del mezzo attivo, involucro contenente il modulatore LC-inversion
Fonte: ENEA

di 2 mbar di HCl o F₂, rispettivamente precursori degli alogeni Cl e F. Essendo l'alogenuro di gas nobile una molecola formata da una scarica elettrica, è convenien-

te aggiungere un gas buffer (Ne o He) alla pressione di alcuni bar, allo scopo di aumentare l'impedenza della miscela gassosa, in modo da trasferire l'energia della scarica con maggiore efficienza al gas buffer e da questi al precursore dell'alogeno e al gas nobile. La scarica elettrica di pompaggio deve avere una breve durata, minore di 200 ns, perché l'alogenuro di gas nobile è una molecola "innaturale" altamente instabile e si dissocia in pochi ns rilasciando i fotoni UV laser la cui lunghezza d'onda varia a seconda dell'alogenuro. Ad esempio, i tre alogenuri più usati sono ArF che emette $\lambda = 193$ nm, KrF $\lambda = 249$ nm, e XeCl $\lambda = 308$ nm. Maggiori dettagli sulla cinetica chimico-fisica dei laser eccimeri possono essere facilmente trovati utilizzando i motori di ricerca web.

Il "Laboratorio Eccimeri" costituitosi a Frascati nel 1980, dovendo realizzare un laser eccimero di elevata energia per impulso, e di conseguenza un pompaggio di elevatissima energia elettrica (infatti, l'efficienza calcolata come energia laser/energia elettrica è inferiore a 3-4%), scelse i 308 nm dello XeCl piuttosto che i 249 nm del KrF, perché la potenza elettrica necessaria per ottenere l'inversione di popolazione laser scala come λ^{-2} [6]. Inoltre, per ottenere un'elevata energia per impulso era necessario avere un volume di scarica maggiore di un litro, ed essendo la lunghezza massima della scarica limitata a circa un metro (a causa dell'elevato guadagno, lunghezze maggiori avrebbero generato contributi spuri e non coerenti da ASE, Amplified Stimulated Emission [6]) era altresì necessario avere una gap di scarica tra elettrodi superiore ai 5 cm [6], e quindi utilizzare una pre-ionizzazione del gas tramite raggi X, essendo la ionizzazione convenzionale tramite UV poco efficace a distanze superiori a qualche cm. Insomma, la realizzazione di un laser eccimero di elevata energia proponeva difficoltà tecnologiche e fisiche di notevole portata, dal diodo in riflessione lungo un metro che genera raggi X per Bremsstrahlung al modulatore elettrico in grado di fornire diverse centinaia di Joule in 200 ns, dal materiale e profilo degli elettrodi atto a generare una scarica uniforme al progetto e realizzazione del sistema di ricircolo del gas in grado di ricambiare il mezzo attivo nel tempo che intercorre tra due colpi consecutivi, dalla scelta quasi alchemica della miscela giusta per ritardare la terminazione della scarica in filamenti elettrici alla trappola criogenica atta a man-

tenere costante la quantità di alogeno e a condensare le impurità generate dalla scarica (ad esempio specie chimiche assorbenti luce laser e polveri metalliche da erosione elettrodi).

In ciascuno di questi aspetti scientifici e tecnologici il Laboratorio Eccimeri ha dato un contributo innovativo che ha attirato l'attenzione della comunità laseristica nazionale e internazionale. In estrema sintesi, a valle dei primi prototipi sviluppati tra il 1980 e il 1986 [7] le principali *milestones* ottenute a Frascati in ciascun sottosistema sono le seguenti:

Scarica elettrica ed evoluzione filamentosa:

- Prima misura al mondo di interferometria olografica risolta nel tempo della scarica del laser eccimeri, che ha mostrato la formazione e l'evoluzione tridimensionale delle turbolenze filamentose della scarica nella zona catodica che si propagano su tutto il mezzo attivo, fino a terminare la fase omogenea del pompaggio e quindi ponendo fine all'impulso laser [8] vedi Figura 3.
- Modellistica 2-D della scarica elettrica e del guadagno nei laser eccimeri risolta nel tempo, la prima in assoluto che ha dato risultati pienamente coerenti con i dati sperimentali [9].
- Prima dimostrazione sperimentale della scarica pilotata dall'impulso a raggi X del preionizzatore in un laser di grande volume attivo [10, 11]. Questa tecnica, originariamente proposta dalla CGE francese per laser eccimeri di piccolo volume [12], si è rivelata di fondamentale importanza nel caso opposto, cioè eccimeri di grande energia e grande volume, perché permette di far partire la scarica di diverse centinaia di joule in un tempo tanto breve quanto la durata della salita dell'impulso a raggi X, il quale non agiva più da pre-ionizzatore che precede la scarica per renderla omogenea, ma da interruttore della stessa scarica. In questo modo, abbiamo sciolto l'insoluto problema di trovare un interruttore in grado di modulare una enorme quantità di energia elettrica in meno di 50 ns senza fluttuazioni temporali.

Elettrodi di scarica:

- Progetto e realizzazione di un innovativo profilo "misto", di tipo "Stappaerts" per il catodo e di tipo "Ernst" per l'anodo che ha confermato sperimentalmente la capacità di migliorare l'uniformità della scarica elettrica su distanze catodo-anodo molto grandi, fino a 10 cm, come previsto dalla simulazione numerica descritta in [13].

- Brevetto e realizzazione di una doppia scarica a tre elettrodi nello stesso mezzo attivo, in cui due anodi sono posti a distanze diverse dal catodo in comune, in modo da controllare il ritardo delle due scariche, potendo quindi realizzare uno schema oscillatore-amplificatore in due regioni diverse dello stesso mezzo attivo [14, 15].

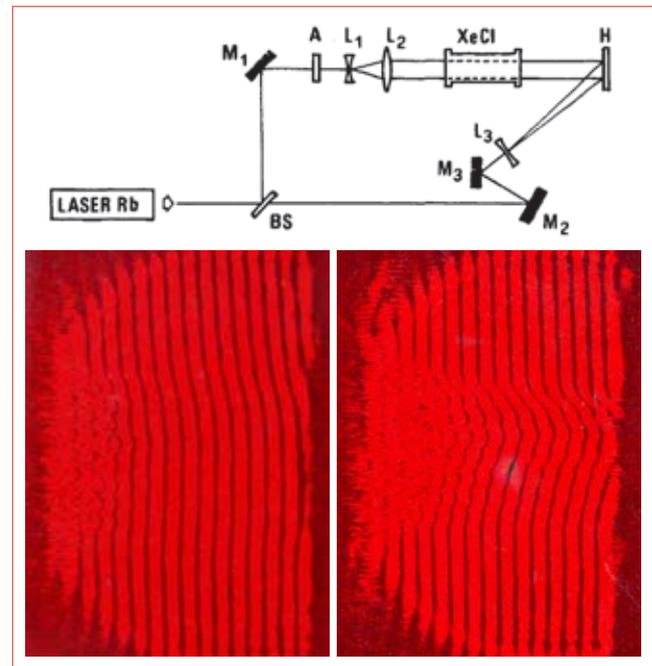


FIGURA 3 In alto, schema dell'interferometro olografico utilizzato per misurare l'evoluzione spazio-temporale della scarica di pompaggio del laser eccimeri. Il laser a rubino JK2000 emette un doppio impulso (20 ns, 5 J/impulso) a ritardo variabile, con 1 m di lunghezza di coerenza. BS=separatore di impulso; M1 e M3 = specchi totalmente riflettenti; M2 = specchio vibrante; A = attenuatore; L1-L2 = espansore di fascio; L3 = lente divergente; XeCl = mezzo attivo laser eccimeri; H = lastra olografica Kodak. In basso a sinistra: foto dell'interferogramma olografico 135 ns dopo l'inizio della scarica di pompaggio, perpendicolare all'asse ottico del mezzo attivo laser. A sinistra della foto, nella zona catodica, si nota una filamentazione della scarica allo stato iniziale, nel momento in cui l'impulso laser sta raggiungendo il suo picco di intensità. In basso a destra: foto dell'interferogramma olografico 350 ns dall'inizio della scarica di pompaggio. La filamentazione ha quasi raggiunto l'anodo e l'impulso laser è terminato dal collasso della scarica. La distanza tra anodo e catodo è di 4 cm
Fonte: [8]

Preionizzazione a raggi X:

Nei dodici generatori di raggi X il catodo a plasma deve fornire una nube di elettroni pulsati che sono accelerati verso l'anodo, realizzati con un metallo ad elevato numero atomico, generando raggi X per effetto Bremsstrahlung. Il catodo è il componente più stressato e facilmente usurabile, e richiede una sostituzione ogni milione di colpi circa. Il problema è stato risolto con la realizzazione di un innovativo catodo a plasma di lunga vita media basato su candele per motori nautici, il cui test di usura ha dimostrato una vita media di cento milioni di colpi [16, 17].

Come accennato all'inizio, la fase di ricerca e sviluppo di nuovi sistemi laser eccimeri iniziata nel 1979 e qui sinteticamente riassunta, dopo 20 anni esatti raggiunge la degna conclusione con la realizzazione di Hercules I, il primo prototipo industriale italiano di laser eccimeri [3, 4], vedi Figura 2, realizzato dal Laboratorio Eccimeri in collaborazione con la più grande industria italiana produttrice di sistemi laser, la El.En. SpA di Calenzano (Firenze).

Oltre a questi risultati di rilievo internazionale, vanno ricordati gli studi sui risonatori ottici e ottiche esterne in grado di ottimizzare sia l'estrazione degli impulsi dal mezzo attivo sia la loro qualità in termini spaziali e temporali, di cui si parla nell'articolo [18] in questo numero.

I plasmii laser

In parallelo allo sviluppo di sistemi laser UV, nei primi anni 90 il Laboratorio Eccimeri, in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università de L'Aquila e in seguito con i plasmisti dell'istituto VNIFTRI di Mosca, ha sviluppato una sorgente da laser-plasma utilizzando dapprima il laser Hercules e poi un sistema laser eccimeri commerciale, in entrambi i casi focalizzando gli impulsi laser su un bersaglio a nastro metallico (Figura 4). Dopo i primi incoraggianti risultati [19] la sorgente laser-plasma è stata caratterizzata [20] e perfezionata, sfruttando la lunga durata dell'impulso laser di Hercules in modo da ottenere una emissione da plasma di durata oltre i 100 ns (eccezionalmente lungo rispetto ai plasmii laser che di solito sono ottenuti da impulsi laser nella regione 10 ns-100 fs) ottenendo di conseguenza una efficienza di conversione da laser a plasma molto più ele-

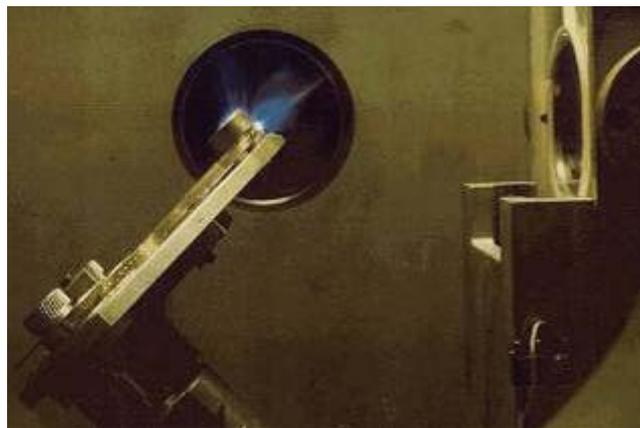


FIGURA 4 Foto all'interno della camera da vuoto durante la generazione del plasma laser. A destra si vede la lente che focalizza l'impulso laser sul sottile nastro metallico montato su un sistema di scorrimento comandato a distanza in modo sincrono con gli impulsi laser, in modo da ottenere emissione da plasma in frequenza di ripetizione. La "piuma" di emissione bluastro che accompagna l'espansione del plasma dal punto del nastro colpito dall'impulso laser è chiaramente visibile
Fonte: [20]

vata rispetto agli altri plasmii, e quindi una considerevole energia associata all'impulso del plasma (circa 1 J nello spettro 10-30 nm emesso su metà angolo solido, 2π). Inoltre, sfruttando il know how acquisito sulla selezione del modo trasverso del laser e quindi della sua focalizzabilità abbiamo ottenuto un plasma la cui temperatura (e quindi lo spettro di emissione) poteva essere variato con continuità dai 10 eV fino a 1200 eV semplicemente variando l'intensità laser sul target e il materiale dello stesso target. Questa flessibilità dello spettro di emissione si è rivelata di fondamentale importanza per l'applicazione dello stesso plasma in campi molto diversi tra loro, dalla microscopia a contatto di campioni biologici in vivo [21] alla radiobiologia [22], dalla generazione di ioni [23] alla spettroscopia atomica [24-26].

Le lampade eccimeri

Alla fine degli anni 90, da parte del mercato era richiesta una sorgente di luce UV quasi monocromatica e di basso costo. Infatti, alcune importanti

applicazioni in fototerapia dermatologica, sterilizzazione, modifica superficiale di tessuti richiedevano irraggiamenti di radiazione UV impulsata su aree relativamente grandi, ma senza effetti collaterali generati dalla banda di emissione troppo larga delle normali lampade a mercurio. I laser eccimeri commerciali erano troppo costosi per diventare un'alternativa alle lampade. Bisognava dunque realizzare una lampada che contenesse una miscela gassosa come quella dei laser eccimeri (ottenendo emissione spontanea, spazialmente incoerente ma quasi monocromatica) senza gas di buffer. Nel Laboratorio Eccimeri fu realizzata dapprima una lampada a scarica longitudinale con un'originale sistema di trigger [27], poi in collaborazione con la El.En. SpA, una lampada a "scarica silente" le cui prestazioni furono misurate e caratterizzate a Frascati [28, 29]. A valle delle nostre misure di caratterizzazione, la Deka (sussidiaria di El.En.) ha ingegnerizzato la lampada e l'ha messa sul mercato clinico ospedaliero e per studi dermatologici [http://www.unimed srl.com/deka_excilite.asp].

Gli esperimenti con le lampade richiedevano precauzioni finanche maggiori di quelle codificate per l'utilizzo dei laser, perché la mancanza di direzionalità dell'emissione UV rendeva difficile evitare esposizioni accidentali della pelle durante le misure: dopo la prima fortuita esposizione e conseguente eritema sul collo di un ricercatore, attivammo rimedi poco canonici ma efficaci, come mostrato nella Figura 5.



FIGURA 5 Ricercatori del Laboratorio Eccimeri durante una misura della distribuzione spaziale dell'intensità UV emessa dal prototipo di lampada eccimero a scarica silente [28, 29]
Fonte: ENEA

Oggi

Così come la realizzazione di Hercules L, il primo prototipo industriale italiano di laser eccimero, era la degna e logica conclusione dello sviluppo di sistemi laser eccimeri ad elevata energia per impulso iniziato nel 1979, così lo studio e lo sviluppo di sorgenti da laser plasma iniziato nel 1991 avrebbe avuto un'altrettanta degna conclusione nel 2008 con la realizzazione di un prototipo industriale di Micro Exposure Tool (MET) nell'estremo ultravioletto (EUV) per la microlitografia di prossima generazione [30, 31].

L'idea è di usare la radiazione EUV come estensione della litografia ottica convenzionale allo scopo di ridurre la dimensione minima di pattern arbitrari su fotoresist fino a poche decine di nanometri. In questo modo, è possibile ad esempio realizzare un maggior numero di transistori a parità di dimensione del chip, il cuore dei computer, rendendolo più veloce e potente senza aumentare la sua dimensione fisica. Purtroppo, lo sviluppo di sorgenti EUV abbastanza potenti per assecondare una produzione industriale ha portato a prototipi estremamente costosi, dell'ordine del miliardo di euro, per cui l'industria ancora preferisce basarsi sulla litografia ottica convenzionale utilizzando laser ArF a 193 nm.

A Frascati abbiamo investigato un approccio diverso, verificando se fosse possibile ottenere un pattern con una risoluzione migliore di 100 nm tramite un MET dal costo totale dell'ordine del milione di euro. Nell'ambito di un progetto nazionale FIRB, in collaborazione con le Università di Padova e L'Aquila, l'INFN di Legnaro e le aziende El.En. SpA e Media Lario Technologies Srl abbiamo progettato e realizzato ex-novo un MET costituito da una sorgente di radiazione EUV da laser-plasma accoppiata ad un sistema di proiezione e riduzione spaziale del disegno di una maschera riflettente alla lunghezza d'onda di 14 nm.

Come mostrato nella Figura 6, gli impulsi emessi dal laser Hercules vengono focalizzati su un nastro metallico in movimento, creando il plasma descritto in precedenza. La radiazione di ricombinazione emessa dal plasma viene raccolta da ottiche ellissoidali, opportunamente filtrata in banda da un filtro di zirconio e dalle ottiche multilayer di trasporto e infine inviata a una maschera sagomata che riflette il pattern voluto alla lunghezza d'onda di 14 nm. Questo pattern (formato da una serie di righe, nel caso più semplice) viene ridotto di un fattore 100 in area da un obiettivo Schwarzschild e infine proiettato sul wafer-fotoresist che agisce da *storage device*.

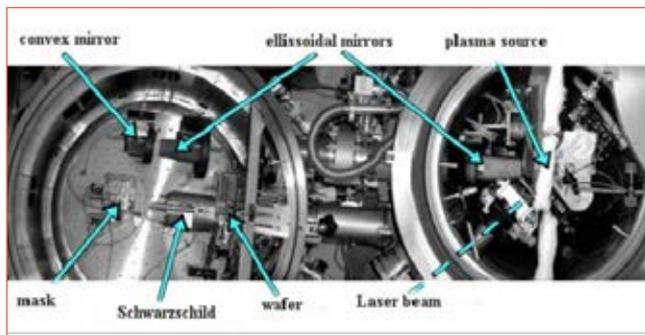


FIGURA 6 Vista dall'alto dell'apparato MET EGERIA presso il Laboratorio Eccimeri
Fonte: ENEA

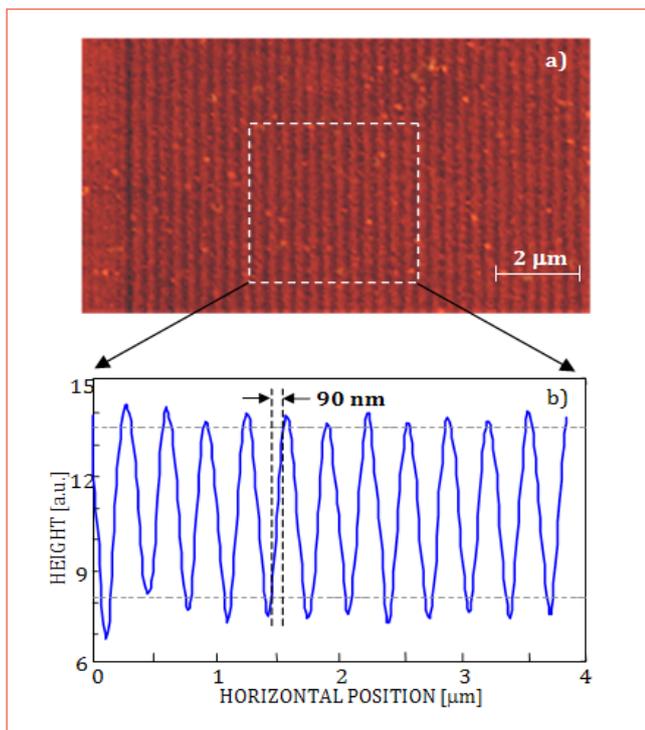


FIGURA 7 a) Foto al microscopio a forza atomica del pattern di righe ottenuto sul materiale PMMA da fotoregistrazione commerciale. b) Profilo delle righe all'interno della zona centrale delimitata dai segmenti tratteggiati in a)

Nella realizzazione del MET EGERIA abbiamo affrontato e risolto diversi problemi, i più interessanti dei quali sono stati:

- Abbattimento sia delle vibrazioni meccaniche sia delle escursioni termiche onde mantenere le posizioni reciproche delle ottiche di trasporto entro frazioni di micrometro durante l'esposizione.
- Soppressione dei detriti atomici e ionici emessi dal plasma che possono danneggiare le ottiche e le diagnostiche poste nelle vicinanze del plasma stesso [32].
- Allineamento ottimizzato dell'obiettivo di Schwarzschild con una procedura innovativa [33].
- Misura del valore e durabilità delle riflettività dei film multistrato che rivestono gli specchi e loro reciproca corrispondenza in banda spettrale.

La Figura 7 mostra un tipico pattern ottenuto a partire da una maschera con reticolo di passo 1,6 μm ridotta linearmente di un fattore 10 dall'obiettivo Schwarzschild sul wafer di PMMA.

Si possono notare le righe ben equispaziate su tutto il campo di osservazione. La risoluzione spaziale, definita come spazio di salita tra il 10% e il 90% del profilo di riga (edge response) è pari a 90 nm.

Al momento, i 90 nm di *edge response* mostrati nella Figura 7 rappresentano una tra le migliori risoluzioni ottenute tramite sistemi di proiezione nell'EUV a basso costo. Precedenti risultati sono del Fraunhofer IOF Institut (ottenuti 125 nm) e del LETI, CNRS francese (ottenuti 900 nm). Recentemente, Intel ha pubblicato il raggiungimento di una risoluzione inferiore ai 40 nm con un sistema di proiezione di costo elevato, pari a 700 milioni di euro.

Un riassunto aggiornato sulle prestazioni del MET EGERIA e sui risultati raggiunti, può essere trovato negli articoli di rassegna [34, 35].

Fusione nucleare e plasma

Da oltre 50 anni l'ENEA dedica un notevole impegno alla ricerca sullo sfruttamento energetico della fusione nucleare controllata. L'obiettivo è quello di creare un sistema fisico nel quale avvenga un elevato numero di reazioni esoenergetiche di fusione. In particolare la reazione deuterio-trizio con produzione di nuclei di elio e neutroni ($D+T = \alpha (3,5 \text{ MeV}) + n (14,1 \text{ MeV})$), può avvenire spontaneamente in una miscela gassosa di questi elementi, portata a temperature dell'ordine di 10 keV ($\sim 10^8 \text{ }^\circ\text{C}$). Gas di questo tipo, noti come plasmi, sono ca-



FIGURA 8 Camera sperimentale dell'impianto ABC



FIGURA 9 Il tokamak FTU

ratterizzati da elevati gradi di ionizzazione pur essendo elettricamente neutri su scala sufficientemente grande. Nei laboratori per la fusione dell'ENEA di Frascati si possono produrre plasmi di altissima densità (impianto laser ABC (Figura 8) per la ricerca sulla fusione a Confinamento Inerziale [36, 37, 38]) e di bassa densità (impianto tokamak FTU (Figura 9) per ricerca sulla fusione a confinamento magnetico [39, 40, 41]) con temperature fino ad alcuni keV.

La radiazione dei plasmi

La presenza di elettroni liberi e di ioni di varie specie e stati di carica fa sì che la vita di un plasma sia accompagnata da una complessa e variegata emissione di radiazione.

Densità, temperatura e composizione del plasma giocano il ruolo principale nel determinare lo spettro di emissione del plasma che si estende ad una estesa regione spettrale. La radiazione emessa contribuisce significativamente al bilancio delle perdite energetiche del plasma, ma per il fisico diagnostico è ricca di informazioni. Questa emissione è massima nella regione X dello spettro, pur avendo importanti componenti discrete (emissione di riga) e continue in una regione spettrale molto più ampia. L'emissione di riga è caratteristica degli ioni presenti nel plasma e permette di caratterizzarne la composizione, questo è un problema particolarmente sentito per un tokamak, dove alla componente principale del plasma (idrogeno, deuterio) si aggiungono sempre ioni provenienti dai materiali che lo circondano. La Figura 10 mostra due spettri del plasma di FTU dominati dalla elementi di contaminazione leggeri (ossigeno, carbonio ecc.) o da elementi metallici, più pesanti (ferro, nickel, molibdeno ecc.).

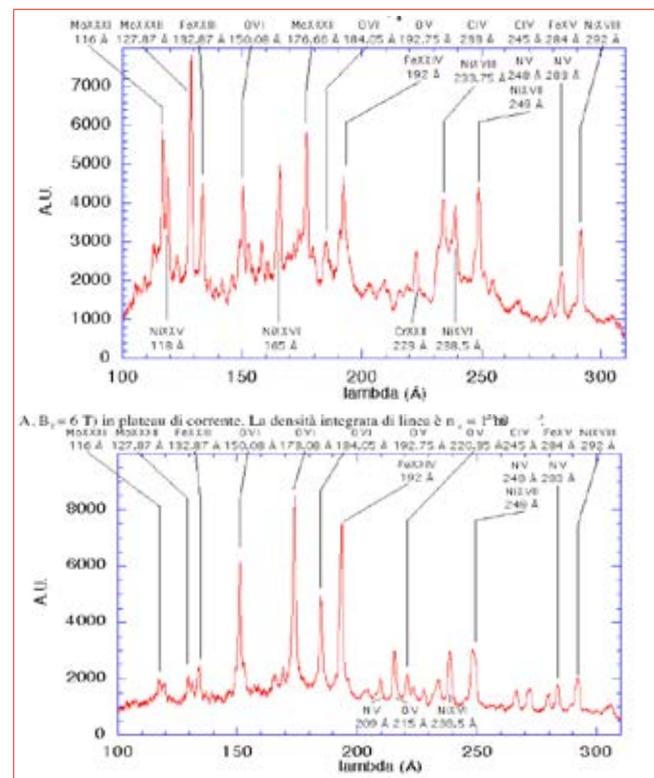


FIGURA 10 Esempi di spettri nella regione ultravioletta da vuoto nel tokamak FTU

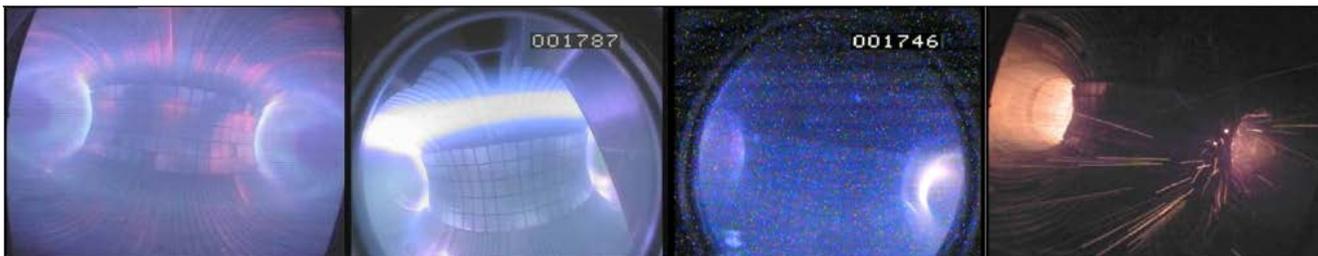


FIGURA 11 Immagini ottiche della periferia del tokamak FTU durante una scarica di plasma:

- La parte calda centrale del plasma è quasi completamente non visibile nella zona ottica. L'emissione proviene quasi esclusivamente dai bordi della scarica
- In scariche di alta densità il gas freddo si può accumulare in zone fortemente emittenti del plasma
- In scariche di bassa densità gli elettroni subiscono pochi urti e vengono accelerati ad alte energie, dando luogo ad una emissione frontale (luce di sincrotrone) con una tipica sagoma asimmetrica
- Radiazione emessa da detriti incandescenti a fine scarica

L'osservazione nella banda visibile di un tokamak mostra quasi esclusivamente le zone periferiche fredde del plasma, dove sono presenti atomi neutri o poco ionizzati. La Figura 11 riporta alcune immagini registrate da una videocamera ottica che guarda verso il centro del plasma.

Nell'emissione di un tokamak non mancano forti componenti continue dovute al moto degli elettroni: emissione di ciclotrone, bremsstrahlung, luce di sincrotrone. Dall'esame di queste si possono ricavare informazioni sulla temperatura elettronica, la carica media del plasma, l'energia di elettroni veloci non confinati ecc.

Sorgenti di luce per creare e comprimere un plasma

L'interazione della luce con la materia ha molteplici applicazioni scientifiche e tecnologiche, in gran parte stimolate dallo sviluppo di sorgenti laser di grande intensità. Nello studio dei plasmi è importante l'interazione con sorgenti di radiazione esterna.

Per le applicazioni fusionistiche, l'assorbimento della luce laser da parte di un bersaglio solido, con la conseguente creazione di un plasma in rapida espansione, può essere utilizzato per la compressione di una miscela deuterio-trizio fino alle condizioni di ignizione nucleare. Studi connessi a queste problematiche, vengono effettuati nel Centro ricerche di Frascati utilizzando il laser ABC, costruito negli anni 80 del secolo scorso.

ABC è una sorgente in grado di concentrare 1000 GW di luce infrarossa su 1 cm² di bersaglio per circa 3 nanosecondi, è l'impianto laser più grande sviluppato in Italia e si basa sull'utilizzo di barre di vetro fosfato al neodimio (Figure 12, 13 e 14).



FIGURA 12 Vista complessiva del laser ABC



FIGURA 13 Una delle barre di vetro al neodimio fosfato che costituiscono il mezzo attivo per la amplificazione della luce

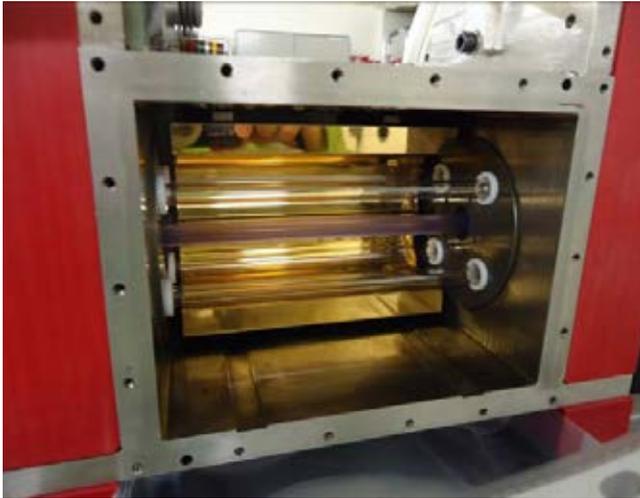


FIGURA 14 Una testa di amplificazione del laser - la barra centrale di vetro al neodimio è circondata dalle lampade lineari per il pompaggio ottico e dai riflettori dorati per l'ottimizzazione dell'efficienza ottica

Nella Figura 15 è illustrato il percorso del fascio laser dalla cavità ottica dell'oscillatore fino alla camera sperimentale dove esso viene focalizzato sul bersaglio riducendone le dimensioni da un diametro di 75 mm fino a circa 500 μm per raggiungere l'intensità di circa $10^{14}\text{-}10^{15}\text{W/cm}^2$.

Nello schema si può notare come una porzione del fascio principale sia inviata ad un duplicatore di armonica che genera un fascio nella regione verde dello spettro. Questo fascio, sincrono con quello principale, viene usato per studiare proprietà del plasma legate al suo indice di rifrazione (shadowgrafia, interferometria) e quindi alla sua densità. La breve durata di questo impulso luminoso (500 picosecondi) permette di fare delle istantanee del plasma durante la sua evoluzione. La Figura 16 mostra immagini del bersaglio e del plasma illuminati dal fascio di luce diagnostico.

L'interazione di un fascio laser intenso con un plasma di alta densità può produrre instabilità accompagnate da emissione di riga caratteristica e molto intensa, distinta da quella dovuta alle transizioni di livello degli atomi. Le lunghezze d'onda tipiche di questa emissione sono frazioni della lunghezza d'onda fondamentale del laser, come mostrato nello spettro mostrato nella Figura 17.

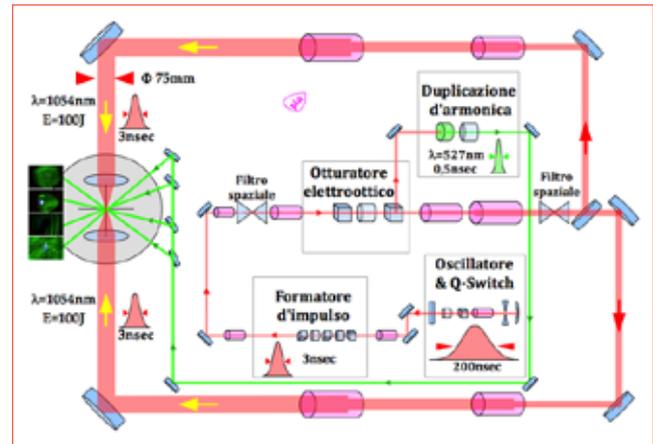


FIGURA 15 Schema di funzionamento del laser ABC. Il fascio originato nella cavità dell'oscillatore viene formato temporalmente con otturatori elettroottici ed amplificato dalle barre di neodimio prima di essere diviso in due fasci uguali e focalizzato sul bersaglio all'interno della camera sperimentale (lato sinistro della figura). La presenza dei filtri spaziali migliora la qualità del fascio. Parte del fascio laser attraversa un duplicatore di armonica che permette di generare un fascio secondario di lunghezza d'onda 527 nm, usato per la diagnosi ottica del plasma

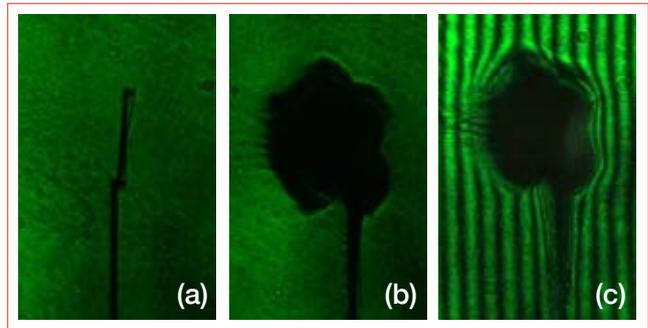


FIGURA 16 Immagini del bersaglio prima e circa 10 nanosecondi dopo l'irraggiamento del laser principale (proveniente dal lato sinistro) sparo #506. Le immagini a) e b) mostrano le ombre dovute al fascio diagnostico (in luce verde, perpendicolare al fascio principale ed al piano del foglio). Nell'immagine c) la luce attraversa un interferometro che mostra variazioni della densità del plasma come deformazioni del sistema di frange parallele. Le parti scure in b) e c) sono dovute alla presenza di un plasma denso, assorbente, o fortemente rifrattivo per la luce verde ($\lambda = 527$ nanometri)

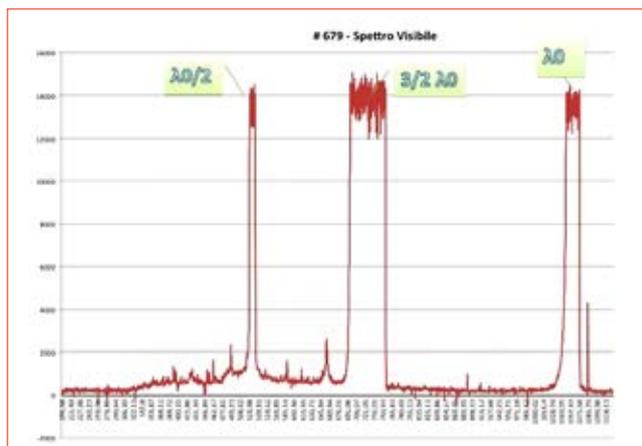


FIGURA 17 Spettro tipico di instabilità parametriche in un colpo del laser ABC su un bersaglio solido

Laser ad Elettroni Liberi nella regione del Terahertz e delle onde millimetriche

L'attività Laser ad Elettroni Liberi (FEL) a Frascati ebbe inizio alla fine degli anni settanta, immediatamente dopo la realizzazione del primo FEL all'Università di Stanford [42]. In campo teorico un notevole sforzo fu dedicato alla comprensione del processo di emissione FEL nei suoi vari elementi [43], da una formulazione completa dell'emissione da onduttore agli effetti degli allargamenti di riga disomogenei sul meccanismo di guadagno, alla saturazione e all'efficienza di estrazione. Furono sviluppate inoltre una teoria del FEL in anello di accumulazione [44] ed una teoria dell'evoluzione dei modi longitudinali del FEL operante in regime impulsato (Teoria dei supermodi) [45]. L'attività teorica s'indirizzò quindi verso lo sviluppo di un modello che potesse descrivere l'operazione FEL anche in condizioni di alto guadagno, nonché la dipendenza del guadagno dalla qualità del fascio di elettroni [46].

In quegli anni furono formulate le prime proposte di progetto per la realizzazione di un FEL nel medio-infrarosso mettendone in evidenza la potenziale applicazione alla separazione isotopica dell'uranio a $16 \mu\text{m}$. Sulla base dell'esperienza maturata a Frascati nel campo degli acceleratori di elettroni, furono considerati sia schemi operanti in anello di accumulazione che in macchine

a singolo passaggio (Linac e microtrone). I requisiti di modesta energia del fascio (circa 20 MeV) per operare nell'infrarosso fecero optare per la realizzazione di un FEL pilotato da un microtrone, che offriva anche buone prestazioni in termini del guadagno per singolo passaggio [47]. Il piano di lavoro prevedeva inizialmente la costruzione di un onduttore elicoidale impulsato, da impiegare per l'analisi dell'emissione spontanea a $10,6 \mu\text{m}$, seguita da un esperimento di amplificazione del fascio emesso da un laser CO_2 , e quindi dalla realizzazione di un oscillatore FEL di lunghezza d'onda accordabile tra i $24 \mu\text{m}$ e i $32 \mu\text{m}$. L'onduttore elicoidale impulsato non era adatto per un esperimento di oscillatore, in quanto l'elevato valore dell'emittanza nel piano radiale del microtrone (circa due volte maggiore di quella nel piano ortogonale a quello dell'orbita) avrebbe drasticamente ridotto il coefficiente di guadagno di un'onda a polarizzazione circolare. Esso fornì comunque una solida base sperimentale su cui progettare nuovi dispositivi. Gli ottimi risultati delle misure di emissione spontanea in onduttore elicoidale impulsato [48] portarono infatti alla progettazione ed alla realizzazione di un nuovo onduttore impulsato a polarizzazione lineare (verticale), in grado di consentire l'operazione in regime di oscillatore, in quanto, in questo caso, il coefficiente di guadagno non sarebbe dipeso dall'emittanza radiale (orizzontale) del microtrone.

Il funzionamento sopra soglia di tale oscillatore fu dimostrato sperimentalmente nel 1985 [49]. Negli anni tra il 1981 ed il 1985 una considerevole mole di lavoro sperimentale fu dedicata alla progettazione e realizzazione di cavità ottiche di grandi dimensioni e dei relativi problemi di stabilità e di controllo attivo dell'allineamento [50]. Negli anni seguenti venne installato un onduttore a magneti permanenti, in cui la "gap" tra le espansioni polari poteva essere variata per consentire l'accordabilità del FEL nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 24 e $32 \mu\text{m}$. Su quest'impianto sperimentale, sebbene non fu ottenuto il funzionamento in regime di oscillatore, fu provata per la prima volta un nuovo tipo di cavità ottica impiegante un accoppiatore d'uscita costituito da una sottile griglia metallica "trasparente agli elettroni" [51]. Questo tipo di dispositivo, successivamente brevettato sotto il nome di ETM (Electron Transparent Mirror), consentì la riduzione della lunghezza della cavità ottica, che altrimenti doveva accomodare intorno all'onduttore ingombranti ma-

gneti per la deflessione del fascio di elettroni al fine di consentirne l'iniezione e l'estrazione dalla cavità ottica. Un'analisi della perdita di qualità del fascio di elettroni all'attraversamento dell'ETM rivelò inoltre che, a grandi lunghezze d'onda (tipicamente $\lambda > 100 \mu\text{m}$), tali specchi potevano essere usati anche come riflettori d'ingresso senza che il guadagno venisse significativamente ridotto. Questo fu il primo passo verso quelle che furono in seguito definite sorgenti FEL compatte.

La versatilità del FEL in termini di accordabilità spettrale e dei livelli di potenza d'uscita ottenibili ha come controparte l'elevato costo, la complessità e le grandi dimensioni del sistema. Le dimensioni del sistema in particolare hanno impedito che il FEL diventasse uno strumento di laboratorio confrontabile con i laser convenzionali, ed ha fatto sì che esso trovasse una più naturale collocazione nell'ambito di grandi installazioni, quali le macchine di luce di sincrotrone, o come grande installazione (facility) a sé stante. Tuttavia, alla fine degli anni 80 apparve evidente che nella regione spettrale del lontano infrarosso e delle onde millimetriche, o regione del THz, compresa tra 100 GHz e 10 THz (lunghezza d'onda compresa tra 3 mm e 30 μm), scarsamente coperta dalle sorgenti laser convenzionali, il FEL poteva soddisfare i requisiti di costi e dimensioni contenuti.

Il funzionamento in questa regione spettrale richiede infatti modeste energie del fascio di elettroni ($E \leq 5 \text{ MeV}$), che, in acceleratori a radio-frequenza, possono essere ottenute su dimensioni lineari inferiori ai 50 cm. A tali energie ($\gamma < 10$) valori elevati del coefficiente di guadagno possono essere raggiunti con correnti moderate del fascio di elettroni ($I = 1 \text{ A}$) ed un piccolo numero di periodi dell'ondulatore ($N = 10$). Inoltre, a tali grandi lunghezze d'onda, la diffrazione attraverso la gap dell'ondulatore non consente propagazione ottica della radiazione, ma richiede generalmente l'impiego di guide d'onda, che migliorano il fattore di riempimento tra sezione del fascio di elettroni e sezione del modo laser. Altri schemi d'interazione tra fasci di elettroni e campo di radiazione possono inoltre essere sfruttati in questa regione spettrale e sono stati testati con successo negli anni utilizzando il fascio di elettroni prodotto da un microtrone ad energie comprese tra 2,3 e 5 MeV per pilotare gli esperimenti FEL-Cerenkov [52] e Grating-FEL [53] (Figura 18).

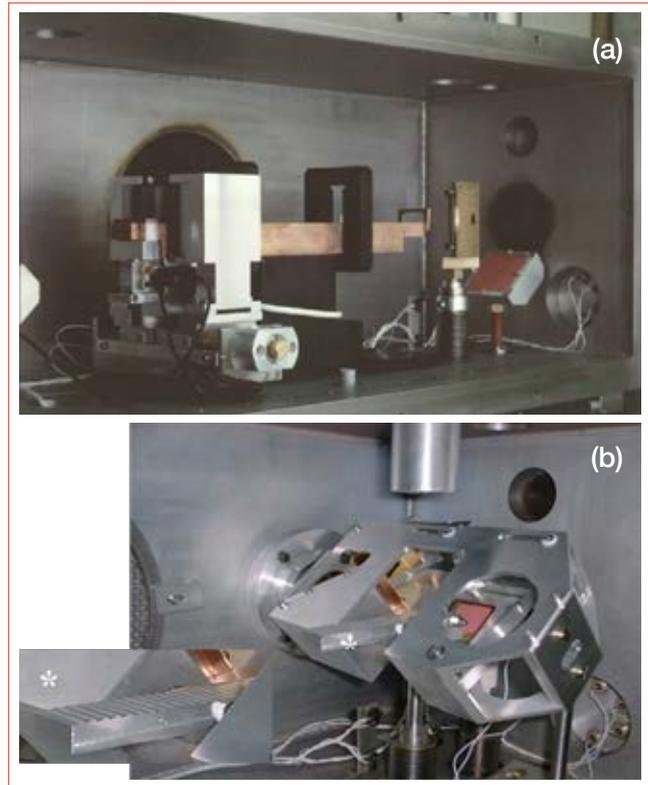


FIGURA 18 Foto degli esperimenti a) FEL-Cerenkov, b) Grating-FEL

L'analisi dell'operazione FEL in guida d'onda fu affrontata negli anni 1987-1990 in occasione di uno studio di fattibilità di una sorgente FEL di elevata potenza media per il riscaldamento di plasmi termonucleari. Apparve chiaro che le condizioni al contorno imposte dalla presenza della guida d'onda andavano a modificare l'espressione della lunghezza d'onda risonante, che veniva a dipendere dalla relazione di dispersione $\omega(k)$ della guida. Si notò che, sotto particolari condizioni, era possibile ottenere una curva di guadagno a larga banda, centrata intorno ad un valore di frequenza per la quale la velocità di gruppo dell'onda guidata era uguale alla velocità di deriva degli elettroni lungo l'ondulatore [54]. Tale condizione, definita di «zero slippage» rendeva di fatto possibile l'operazione FEL a grandi lunghezze d'onda anche con fasci di elettroni impulsati (di durata dell'ordine del ps) quali quelli prodotti da macchine a radio-frequenza.

Grazie ad un intenso lavoro sperimentale, il primo FEL Compatto operante con fascio di elettroni modulato a radio-frequenza, impiegante un ondulatore di 20 cm di lunghezza ($N=8$, $\lambda_u=2,5$ cm) ed un risonatore con specchi trasparenti agli elettroni di soli 30 cm di lunghezza entrò in funzione nel maggio del 1992 [55] ed è tuttora operante presso il Centro ENEA di Frascati per l'utilizzazione da parte di utenti esterni (CETRA Facility). Significativi miglioramenti sono stati apportati a questa sorgente nel corso degli anni, ed attualmente il FEL Compatto emette nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 2 e 3,5 mm con una potenza d'uscita di circa 10 kW su impulsi della durata di 50 ps (Figura 19). Quando la lunghezza d'onda d'emissione è confrontabile con la durata degli impulsi di elettroni, anche in assenza di risonatore, i contributi dei singoli elettroni al campo elettromagnetico radiato si sommano in fase dando luogo al meccanismo di "emissione spontanea

coerente" [56]. L'interferenza costruttiva così realizzata innalza il livello di potenza dell'emissione spontanea di circa tre ordini di grandezza al di sopra del contributo non coerente. In aggiunta a questo meccanismo, la struttura periodica del fascio di elettroni modulato a radio-frequenza, dà luogo ad emissione coerente, all'interno della curva di risonanza, solo a frequenze che siano un multiplo intero della frequenza fondamentale di modulazione. Questo meccanismo è stato investigato in dettaglio negli anni 90, sia da un punto di vista teorico che sperimentale, e riveste una notevole importanza nella progettazione di sorgenti FEL operanti con impulsi ultracorti. Verso la fine degli anni 90 nuovi meccanismi di manipolazione della distribuzione degli elettroni nello spazio delle fasi longitudinale sono stati investigati per incrementare l'efficienza d'estrazione della radiazione [57]. Si è osservato, infatti, che la dipendenza della fase del campo radiato dalle differenti velocità degli elettroni all'interno dell'impulso poteva essere compensata mediante un'opportuna correlazione tra l'energia e la posizione temporale di ciascun elettrone.

Una nuova sorgente FEL basata su questo principio, denominata FEL-CATS (Compact Advanced Terahertz Source) è stata progettata all'ENEA di Frascati [58] ed è entrata in funzione nell'intervallo spettrale compreso tra i 0,4 e 0,7 THz nel 2002 [59] (Figura 20).

I recenti sviluppi tecnologici nel campo delle sorgenti di radiazione coerente nella regione spettrale del Terahertz, di confine tra le microonde ed il lontano infrarosso, hanno reso possibile un gran numero di nuove applicazioni in campi che vanno dalla scienza dei materiali alle diagnostiche per i beni culturali, alla "security" e alla biologia. Le applicazioni biologiche si basano sulle specifiche caratteristiche spettroscopiche dei sistemi biologici in questa regione spettrale, che rendono possibile l'acquisizione d'immagini ad alto contrasto.

Il progetto europeo THz-BRIDGE (acronimo di Terahertz radiation in Biological Research, Investigations on Diagnostics and study on potential Genotoxic Effects) [60, 61], coordinato dall'ENEA negli anni 2001-2004 ha avuto come obiettivo l'indagine dell'interazione della radiazione elettromagnetica nella regione spettrale compresa tra 100 GHz e 20 THz con sistemi biologici di complessità crescente, da biomolecole ad enzimi, da membrane cellulari a colture di linfociti umani e cellule epiteliali, attraverso nuove

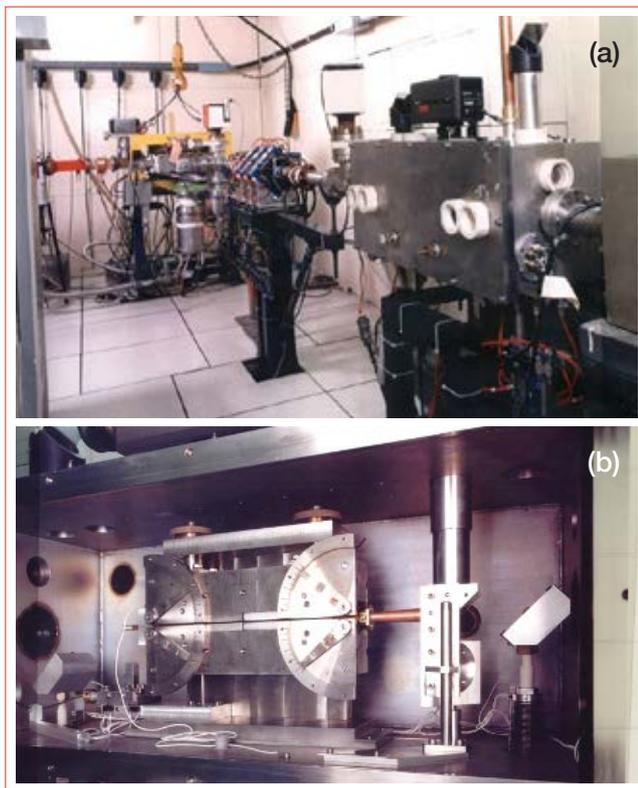


FIGURA 19 Impianto FEL-Compatto: a) Visione d'insieme; b) Ondulatore e risonatore in guida d'onda

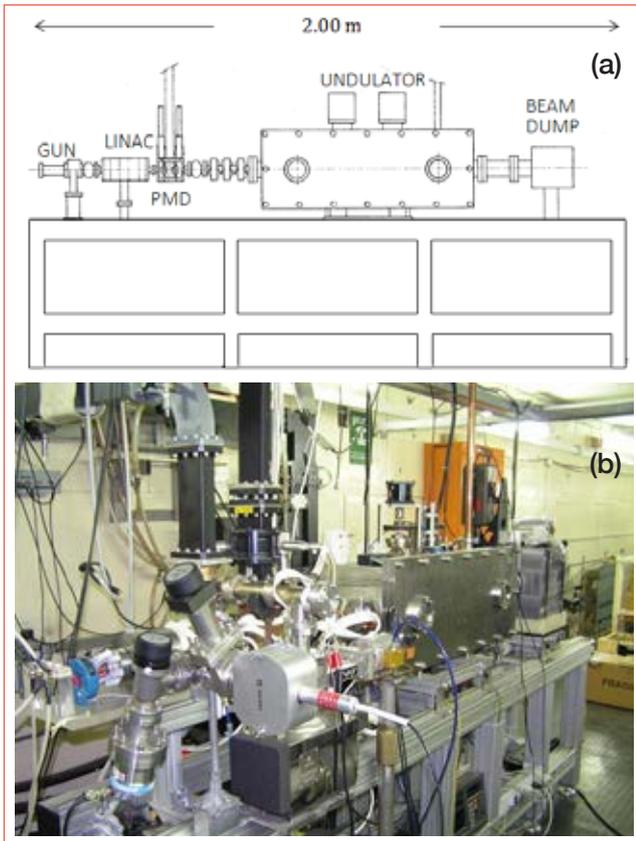


FIGURA 20 Impianto FEL-CATS: a) Schema del lay-out sperimentale; b) Visione d'insieme

tecniche di misura spettroscopiche e microscopiche. Un'ampia gamma di sistemi biologici è stata investigata con la sorgente FEL ENEA nell'ambito del progetto THz-BRIDGE sfruttando, in particolare, la peculiare caratteristica della struttura temporale della radiazione emessa. Quest'ultima, infatti, consente di analizzare gli effetti di elevate potenze di picco sui campioni biologici, mantenendo, nel contempo, bassi livelli di potenza media incidente, tipicamente di alcuni mW. In questo modo viene esclusa la possibilità di "effetti termici" sui campioni biologici.

Una rassegna di questa prima serie di applicazioni biologiche è riportata in [62]. Più di recente un nuovo progetto, denominato GREAM [63] ha permesso di approfondire alcuni temi già affrontati in THz-BRIDGE; in

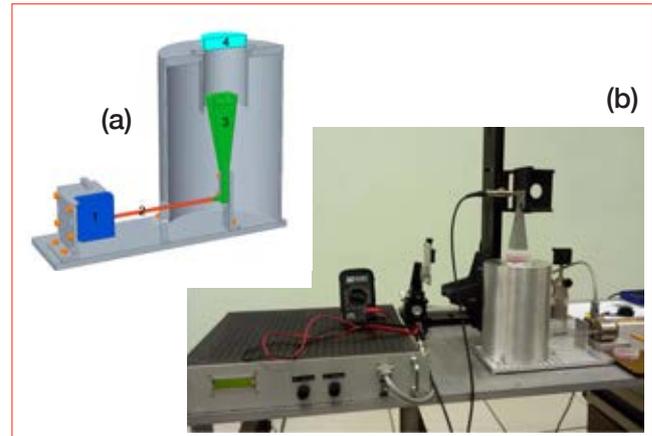


FIGURA 21 Irraggiamenti a 25 GHz: a) Schema del lay-out sperimentale; b) Visione d'insieme

particolare per quanto riguarda l'analisi di possibili effetti genotossici su colture di cellule epiteliali umane. Per perseguire tale progetto, oltre all'uso del citato FEL Compatto, è stata utilizzato un oscillatore a stato solido di tipo YIG per irraggiare i campioni alla frequenza di 25 GHz (Figura 21).

Uno strumento investigativo di grande rilievo è stato messo a punto a partire dalla fine del primo decennio di questo secolo per investigare, con il FEL Compatto, ma non solo, campioni di varia natura. Tale strumento è "l'imaging" nella regione del THz. Durante questi ultimi dieci anni, infatti, nel mondo si è avuto un notevole impulso per lo sviluppo e l'applicazione di queste tecniche in campo biomedico, per lo studio di organismi vegetali e suoli in condizioni di differente idratazione [64], ma anche per esaminare opere d'arte di varia natura [65] o per migliorare i sistemi di sicurezza per mezzo dell'acquisizione di immagini, in tempo reale, di oggetti sospetti [66].

Un sistema versatile di "imaging" in riflessione al THz è stato sviluppato e realizzato presso l'ENEA di Frascati [67], vedi Figura 22. Questo sistema è oggi parte integrante dell'area applicativa del FEL Compatto e permette di acquisire immagini di $5 \times 5 \text{ cm}^2$ fino ad una frequenza massima di 5 pixel/s. Risoluzioni spaziali fino a $200 \mu\text{m}$ sono state ottenute alla frequenza di 150 GHz. Esempi di applicazioni effettuate con tale dispositivo sono riportate in [67, 68].

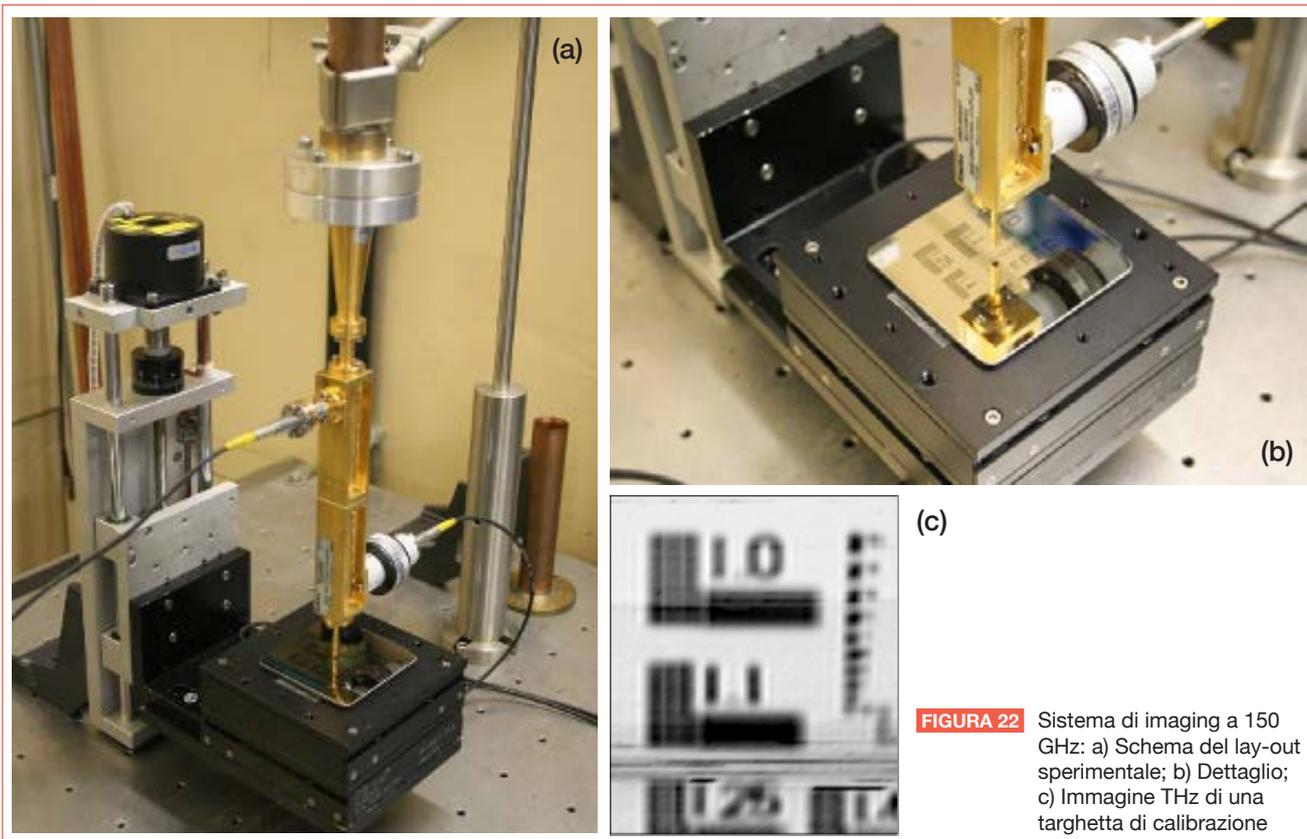


FIGURA 22 Sistema di imaging a 150 GHz: a) Schema del lay-out sperimentale; b) Dettaglio; c) Immagine THz di una targhetta di calibrazione

Una variante di tale sistema è in questo momento in fase di assemblaggio e test, nell'ambito del progetto di cooperazione Italia-Giappone, chiamato THz-Arte. Il nuovo dispositivo è a tutti gli effetti trasportabile poiché è associato ad una sorgente di radiazione a stato solido che emette alla frequenza di circa 100 GHz e consentirà di acquisire immagini di dimensioni $30 \times 50 \text{ cm}^2$ con una frequenza superiore a 20 pixel/s.

Ringraziamenti

La realizzazione dei complessi sistemi laser e delle sorgenti di luce sommariamente descritte in questo articolo ha ovviamente richiesto un lavoro di equipe, e gli autori ricordano il contributo essenziale di tutti i Colleghi coautori dei lavori citati nelle referenze.

In aggiunta, c'è un enorme contributo di capacità di progettazione e realizzazione sia di sistemi meccanici complessi sia di elettronica di potenza, da parte del personale tecnico del Centro ENEA di Frascati, che spesso non viene ricor-

dato formalmente nelle pubblicazioni. È quindi doveroso ringraziare in questa sede un nutrito stuolo di tecnici meccanici ed elettronici, le cui capacità fuori dal comune hanno giocato un ruolo essenziale per il montaggio e la realizzazione *ab initio* delle sorgenti di luce descritte in questo articolo. In ordine alfabetico, ricordiamo e ringraziamo: Rolando Andreassi, Pierluigi Andreoli, Pierluigi Belli, Mario Bortoli, Ilio Bruno, Ezio Campana, Ivo Cerioni, Salvatore Coleschi, Giuseppe Cristofari, Enrico Del Prete, Giorgio Di Giorgio, Armando Di Paolo, Luigi Di Virgilio, Sandro Falcioni, Mario Fascetti, Antonio Fastelli, Giorgio Gazzi, Italo Giabbai, Gualtiero Giordano, Mario Giraldo, Roberto Grossi, Enrico Montanari, Manrico Moroni, Romano Palli, Feliciano Roccon, Luigi Rossi, Gianni Schina, Roberto Sensoli, Gino Traversari, Giorgio Ubaldini, Davide Vicca. ●

Paolo Di Lazzaro, Riccardo De Angelis, Gian Piero Gallerano, Andrea Doria
 ENEA, Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare,
 Laboratorio sorgenti, antenne e diagnostiche

All the 'colours' of ENEA

Since the pioneering studies on laser systems used as plasmas diagnostic by the group of Ascoli Bartoli in the early 60s in Frascati, CNEN (then ENEA) laboratories have developed and maintained in the decades internationally recognised skills in the development and applications of laser systems, and more generally of both coherent and incoherent light sources. Today, the coexistence in the same Center of many light sources that cover a large part of the spectrum of electromagnetic waves, from THz to hard X-rays, is a unique case in Italy, little known and publicized but a scientific and technological reality established since decades. In this paper we present some examples of light sources designed and built at the Frascati ENEA Research Center, and their applications in various fields.

- [1] S. Martellucci: *La scoperta della luce coerente (il laser) e la ricerca sulla fusione nucleare*, pag. 4 in questo numero
 - [2] U. Ascoli Bartoli, G. Dattoli, E. Forentino, T. Letardi, A. Marino, M. Matera, A. Renieri: *Proposal for development of high repetition rate pulsed gas laser for Thomson scattering measurements on JET*, Rapporto tecnico interno ENEA Frascati (marzo 1979)
 - [3] T. Letardi, A. Baldesi, S. Bollanti, F. Bonfigli, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, D. Murra, G. Schina, C.E. Zheng: *Industrial large aperture XeCl laser for surface processing in High-Power Lasers in Manufacturing*, edited by X. Cheng, T. Fujioka, A. Matsunawa, Proc. SPIE vol. 3888 (2000) pp. 587-597
 - [4] P. Di Lazzaro, S. Bollanti, F. Flora, G. Giordano, T. Letardi, D. Murra, C.E. Zheng, A. Baldesi: *Laser eccimero industriale "Hercules L" e omogeneizzatore trasfocale di fascio*, in 40 Anni di LASER, Collana Quaderni di Ottica e Fotonica vol. 7, a cura di G.C. Righini e M. Forastiere (CTE 2001) pp. 113-117
 - [5] D. Della Sala, C. Privato, P. Di Lazzaro, G. Fortunato: *Microelettronica gigante*, Energia, Ambiente e Innovazione 4, 52-63 (1999)
 - [6] T. Letardi, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, N. Lisi, C.E. Zheng: *Some design limitations for large-aperture high-energy per pulse excimer lasers*, Il Nuovo Cimento D 14, 495-507 (1992). Vedi anche P. Di Lazzaro: *Hercules, an XeCl laser facility for high-intensity irradiation experiments* Proc. 2nd GR-I Int. Conf. on New Lasers, Technologies and Applications, edited by A. Carabelas, P. Di Lazzaro, A. Torre, G. Baldacchini, Proc. SPIE vol. 3423 (1998) pp. 35-43
 - [7] T. Letardi, G.P. Gallerano, R.M. Montereali: *Attività laser in ENEA*, in 40 Anni di LASER, Collana Quaderni di Ottica e Fotonica vol. 7, a cura di G.C. Righini e M. Forastiere (CTE 2001) pp. 9-13
 - [8] A. De Angelis, P. Di Lazzaro, F. Garosi, G. Giordano, T. Letardi: *XeCl discharge diagnostic by holographic interferometry*, Applied Physics B 47, 1-6 (1988)
- Alcune conseguenze pratiche di questi esperimenti interferometrici sono esplicitate nell'articolo: P. Di Lazzaro, T. Letardi, C.E. Zheng: *Discharge medium uniformity influence on XeCl excimer laser beam quality*, Il Nuovo Cimento D 14, 41-48 (1992)
- [9] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, T. Letardi, N. Lisi, C.E. Zheng: *Space- and time-resolved discharge evolution of a large volume X-ray triggered XeCl laser system*, Applied Physics B 55, 84-91 (1992)
 - [10] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Hermesen, T. Letardi, C.E. Zheng: *Performance of a ten-liter electron avalanche discharge XeCl laser device*, Applied Physics B 50, 415-423 (1990)
 - [11] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Letardi, N. Lisi, G. Schina, C.E. Zheng: *X-ray triggering of a ten-litre discharge excimer system*, Proc. Int. Conf. on Lasers '89, D. Harris, T. Shay eds. (STS Press Mc Lean, VA 1990) pp. 139-144
 - [12] B. Lacour, G. Vannier: *Phototriggering of a 1-J excimer laser using either UV or x rays* Journal of Applied Physics 62, 754-758 (1987)
 - [13] P. Di Lazzaro, G. Giordano, L. Mezi, C.E. Zheng: *Field uniformity of discharge lasers: electrode profiles and current return path effect*, Optics & Laser Technology 26, 15-19 (1994)
 - [14] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, T. Letardi, D. Murra, C. Petrucci, O. Uteza, C.E. Zheng: *Study of a compact three-electrode oscillator-amplifier excimer laser system*, Optics Communications 132, 565-573 (1996)
 - [15] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Letardi, G. Schina, C.E. Zheng: *Ianus, the three-electrode excimer laser*, Applied Physics B 66, 401-406 (1998)
 - [16] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Letardi, D. Murra, G. Schina, C.E. Zheng: *Pulsed X-ray diode with a long-lifetime plasma cathode*, Applied Physics B 68, 683-688 (1999)
 - [17] S. Bollanti, F. Bonfigli, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Letardi, D. Murra, G. Schina, C.E. Zheng: *Pulsed X-ray generator for commercial gas lasers*, Review Scientific Instruments 72, 3983-3988 (2001)
 - [18] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, A. Torre: *Manipolare impulsi di luce nello spazio-tempo*, pag. 84 in questo numero

- [19] L. Palladino, A. Reale, G. Taglieri, D. Batani, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, T. Letardi, G. Schina, M. Belli, A. Scafati: *XUV generation from plasma produced by a XeCl excimer laser on a Cu target*, *Il Nuovo Cimento D* 15, 1133-1146 (1993)
- [20] S. Bollanti, F. Bonfigli, E. Burattini, P. Di Lazzaro, F. Flora, A. Grilli, T. Letardi, N. Lisi, A. Marinai, D. Murra, C.E. Zheng, *High efficiency, clean EUV plasma source at 10-30 nm, driven by a long pulsewidth excimer laser*, *Applied Physics B* 76, 277-285 (2003)
- [21] P. Albertano, L. Reale, L. Palladino, A. Reale, R. Cotton, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, N. Lisi, A. Nottola, K.V. Papadaki, T. Letardi, D. Batani, A. Conti, M. Moret, A. Grilli: *X-ray contact microscopy using an excimer short plasma source with different target materials and laser pulse duration*, *Journal of Microscopy* 187, 96-103 (1997)
- [22] S. Bollanti, P. Albertano, M. Belli, P. Di Lazzaro, A. Faenov, F. Flora, G. Giordano, A. Grilli, F. Ianzini, S. Kukhlevsky, T. Letardi, A. Nottola, L. Palladino, T. Pikuz, A. Reale, L. Reale, A. Scafati, M. Tabocchini, E. Turcu, K. Vigil-Papadaki and G. Schina: *Soft X-ray plasma source for atmospheric pressure microscopy, radiobiology and other applications*, *Il Nuovo Cimento D* 20, 1685-1702 (1998)
- [23] P. Fournier, H. Haseroth, H. Kugler, N. Lisi, R. Scrivens, F. Varela Rodriguez, P. Di Lazzaro, F. Flora, S. Duesterer, R. Sauerbrey, H. Schillinger, W. Theobald, L. Veisz, J. W. Tisch, R. A. Smith: *Novel laser ion sources*, *Review Scientific Instruments* 71, 1405-1408 (2000)
- [24] F. Rosmej, A. Faenov, T. Pikuz, F. Flora, P. Di Lazzaro, S. Bollanti, N. Lisi, T. Letardi, A. Reale, L. Palladino, D. Batani, S. Bossi, A. Scafati, L. Reale, A. Ziegler, M. Fraenkel, R. Cowan: *Inner shell satellite transitions in dense short pulse plasmas*, *Journal of Quantum Spectroscopy and Radiation Transfer* 58, 859-878 (1997)
- [25] K. Fournier, A. Faenov, T. Pikuz, A. I. Magunov, I. Skobelev, F. Flora, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra, V. S. Belyaev, V. Vinogradov, A. S. Kyrilov, A. Matafonov, M. Francucci, S. Martellucci, and G. Petrocelli: *Analysis of high-n dielectronic Rydberg satellites in the spectra of Na-like Zn XX and Mg-like Zn XIX*, *Physical Review E* 70, 016406-1 016406-15 (2004)
- [26] M. May, P. Beiersdorfer, J. Dunn, N. Jordan, S. Hansen, A. Osterheld, A. Faenov, T. Pikuz, I. Skobelev, F. Flora, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra, A. Reale, G. Tomassetti, A. Ritucci, M. Francucci, S. Martellucci, G. Petrocelli: *Accurate wavelength measurements and modeling of Fe XV to Fe XIX spectra recorded in high-density plasmas between 13.5 and 17 Å*, *Astrophysical Journal, Supplement Series* 158, 230-241 (2005)
- [27] S. Bollanti, G. Clementi, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Letardi, F. Muzzi, G. Schina, C.E. Zheng: *Excimer lamp pumped by a triggered longitudinal discharge*, *IEEE Transaction Plasma Science* 27, 211-218 (1999)
- [28] D. Murra, P. Di Lazzaro, S. Bollanti, S. Fu, A. Baldesi, C.E. Zheng: *Lampada eccimero per fototerapia UV-B: distribuzione spaziale dell'intensità di radiazione emessa*, *Rapporto Tecnico ENEA RT/2003/39/FIS* (2003)
- [29] P. Di Lazzaro, D. Murra, G. Felici, S. Fu: *Spatial distribution of the light emitted by an excimer lamp used for UV-B phototherapy: Experiment and modeling*, *Review Scientific Instruments* 75, 1332-1336 (2004)
- [30] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra and A. Torre: *First results of high-resolution patterning by the ENEA laboratory-scale extreme ultraviolet projection lithography system*, *European Physics Letters* 84, 58003 p1-58003 p5 (2008)
- [31] P. Di Lazzaro, S. Bollanti, F. Flora, L. Mezi, D. Murra and A. Torre: *Excimer-Laser-Driven EUV Plasma Source for Single-Shot Projection Lithography* *IEEE Transactions of Plasma Science* 37, 475-480 (2009)
- [32] P. Di Lazzaro, S. Bollanti, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, A. Torre: *Mitigation of ion and particulate emission from laser-produced plasmas used for extreme ultraviolet lithography* *Applied Surface Science* 272, 13-18 (2013)
- [33] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, A. Torre: *New technique for aberration diagnostics and alignment of an extreme ultraviolet Schwarzschild objective* *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 720, 168-172 (2013)
- [34] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, A. Torre: *ENEA Extreme Ultraviolet Lithography Micro-Exposure Tool: main features* in *Short Wavelength Laboratory Sources, Principles and Practices*, D. Bleiner, J. Costello, F. Dortan, G. O'Sullivan, L. Pina, A. Michette Eds. (RSC Publishing, 2015) pp. 245-269. DOI:10.1039/9781849735018-00245
- [35] P. Di Lazzaro, S. Bollanti, F. Flora, L. Mezi, D. Murra and A. Torre: *Characterization and mitigation of ions and particulate emitted by sources for extreme ultraviolet lithography* in *Short Wavelength Laboratory Sources, Principles and Practices*, D. Bleiner, J. Costello, F. Dortan, G. O'Sullivan, L. Pina, A. Michette Eds. (RSC Publishing, 2015) pp. 270-282. DOI:10.1039/9781849735018-00270
- [36] A. Caruso: *Model Experiments for Laser-Driven Hydrodynamics*, *Il Nuovo Cimento* 67B, 173 (1982)
- [37] R. De Angelis: *Energia Ambiente e Innovazione* Aprile 2012, pagg. 53-58
- [38] S. Atzeni and J. Meyer-ter-vehn: *The Physics of Inertial Fusion* (Oxford University Press) (2004, 2009); ISBN: 978-0-19-856264-1
- [39] J. Wesson: *Tokamaks*. Oxford University Press (2004). ISBN 0-19-850922-7
- [40] S. Segre G. Pucella: *Fisica del Plasma* ISBN: 9788808063830
- [41] J.A. Bittencourt: *Fundamentals of Plasma Physics* ISBN: 978-0-08-033923-8
- [42] L.R. Elias et al., *Phys. Rev. Lett* 36, 717 (1976)
- [43] Per un review di questi lavori iniziali, vedi G. Dattoli and A. Renieri, in *Laser Handbook* vol. 4, p. 1, M.L. Stinch and M.S. Bass eds., North Holland, Amsterdam 1985 e anche A. Renieri, *Dai fasci di fotoni ai fasci di elettroni*, pag. 12 in questo numero

- [44] A. Renieri, *Il Nuovo Cimento* 53B, 160 (1979)
- [45] G. Dattoli, A. Renieri, *Nuovo Cimento* 61B, 153 (1981)
- [46] G. Dattoli, T. Letardi, J.M. Madey and A. Renieri, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-20, 637 (1984)
- [47] U. Bizzarri et al., *Nucl. Instr. and Meth.* 208, 127 (1983)
- [48] U. Bizzarri et al., *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* A237, 213 (1985)
- [49] U. Bizzarri et al., *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* A250, 254 (1986)
- [50] A. De Angelis et al., *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res.* A237, 220 (1985)
- [51] A. Dipace, A. Doria, G.P. Gallerano, M.F. Kimmitt, P. Raimondi, A. Renieri, E. Sabia, *IEEE J. Quantum Electron.* QE-27, 2629-2635 (1991)
- [52] F. Ciocci, A. Doria, G.P. Gallerano, I. Giabbai, M. F. Kimmitt, G. Messina, A. Renieri, J. E. Walsh, *Phys. Rev. Lett.* 66, 699-702 (1991)
- [53] A. Doria, G.P. Gallerano, E. Giovenale, G. Messina, V.B. Asgekar, G. Doucas, M.F. Kimmitt, J.H. Brownell, J.E. Walsh, *Nucl. Instr. Meth.* (2001)
- [54] A. Doria, G.P. Gallerano, A. Renieri, *Opt. Commun.* 80, 417-424 (1991)
- [55] F. Ciocci, R. Bartolini, A. Doria, G.P. Gallerano, E. Giovenale, M.F. Kimmitt, G. Messina, A. Renieri, *Phys. Rev. Lett.* 70, 928-931 (1993)
- [56] A. Doria, R. Bartolini, J. Feinstein, G.P. Gallerano, R. H. Pantell *IEEE J. Quantum Electron.* QE-29, 1428-1436 (1993)
- [57] A. Doria, G.P. Gallerano, E. Giovenale, S. Letardi, G. Messina, C. Ronsivalle *Phys. Rev. Lett.* 80, 2841-2844 (1998)
- [58] E. Giovenale, A. Doria, G.P. Gallerano, S. Letardi, G. Messina, C. Ronsivalle, A. Vignati *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* A437 128-133 (1999)
- [59] A. Doria, G.P. Gallerano, E. Giovenale, G. Messina, I. Spassovsky "Enhanced coherent emission of THz radiation by energy-phase correlation in a bunched electron beam", *Phys. Rev. Lett* 93 264801 (2004)
- [60] European project THz-BRIGE 2001 -2004, documentazione disponibile online: www.frascati.enea.it/THz-BRIDGE
- [61] A. Doria, G. P. Gallerano, E. Giovenale, G. Messina, A. Lai, A. Ramundo-Orlando, V. Sposato, M. D'Arienzo, A. Perrotta, M. Romanò, M. Sarti, M. R. Scarfi, I. Spassovsky, O. Zeni, "THz radiation studies on biological systems at the ENEA FEL Facility", *Infr. Phys.* 45, 2004, pp. 339-347
- [62] A. Ramundo Orlando, G.P. Gallerano, "Terahertz Radiation Effects and Biological Applications", *J Infrared Milli Terahz Waves* 30, 2009, pp. 1308-1318
- [63] A. De Amicis, S. De Sanctis, S Di Cristofaro, V. Franchini, F. Lista, E. Regalbutto, E. Giovenale, G.P. Gallerano, P. Nenzi, R. Bei, M. Fantini, M. Benvenuto, L. Masuelli, E. Coluzzi, C. Cicia, A. Sgura, "Biological effects of in vitro THz radiation exposure in human foetal fibroblasts", *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, Special Issue - ISCA11 (2014), June 9, 2015; doi:10.1016/j.mrgentox.2015.06.003
- [64] A. Doria, G.P. Gallerano, M. Germini, E. Giovenale, A. Lai, G. Messina, I. Spassovsky, L. d'Aquino, "Imaging in the frequency range between 100 GHz and 1 THz using Compact Free Electron Lasers", *Proceedings 31st International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves and 14th International Conference on THz Electronics*, IRMMW-THz2006, IEEE 2006, ISBN: 1-4244-0400-2, pp. 161
- [65] G.P. Gallerano, A. Doria, E. Giovenale, G. Messina, A. Petralia, I. Spassovsky, K. Fukunaga, I. Hosako, "THz-ARTE: Non-Invasive Terahertz Diagnostics for Art Conservation", Proceedings of the "33rd Int. Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves" IRMMW-THz2008, IEEE 2008, ISBN: 978-1-4244-2119-0, T2G2.1628
- [66] M. Tonouchi, "Cutting edge Terahertz Technology", *Nature Photonics*, vol.1, 2007, pp. 97-105
- [67] G.P. Gallerano, A. Doria, M. Germini, E. Giovenale, G. Messina, I.P. Spassovsky, "Phase-Sensitive Reflective Imaging Device in the mm-wave and Terahertz Regions", *J Infrared Milli Terahz Waves* 30, 2009, pp. 1351-1361
- [68] A. Coppa, V. Foglietti, E. Giovine, A. Doria, G.P. Gallerano, E. Giovenale, A. Cetronio, C. Lanzieri, M. Peroni, F. Evangelisti, "Active electric near field imaging of electronic devices", *Infr. Phys. Tech* 51, 2008, pp. 470-472

Fotoluminescenza e fotonica: dalle sorgenti di luce miniaturizzate ai rivelatori di radiazione

La fotonica è il campo della scienza e tecnologia che abbraccia la generazione, la rivelazione nonché la gestione della luce mediante confinamento, manipolazione ed amplificazione. I fenomeni di luminescenza sono ampiamente utilizzati in sorgenti di luce e rivelatori di radiazione a stato solido basati su difetti puntiformi in materiali isolanti. Tra questi, i centri di colore aggregati F_2 ed F_3+ , indotti nel fluoruro di litio (LiF) tramite radiazioni ionizzanti di varia natura e laser attivi nell'intervallo spettrale del visibile, sono stati studiati ed utilizzati con successo al Centro Ricerche ENEA Frascati per la realizzazione di sorgenti luminose miniaturizzate prototipali in configurazione di guida d'onda e di microcavità ottiche verticali per l'ottica integrata, nonché come nuovi rivelatori di immagini per raggi-X, basati sulla lettura ottica della fotoluminescenza dei difetti localmente indotti. L'elevatissima risoluzione spaziale intrinseca su un largo campo di vista e la versatilità offerta dall'abilità nella crescita mediante evaporazione termica di film sottili di LiF consentono applicazioni nei settori della nanofotonica, scienza della vita, energia. Recentemente l'uso è stato esteso anche alla diagnostica avanzata di fasci di protoni, con promettenti risultati per imaging e dosimetria tramite fotoluminescenza

DOI 10.12910/EAI2015-093

■ R.M. Montereali, F. Bonfigli, E. Nichelatti, M. Piccinini, M.A. Vincenti

Fotoluminescenza e fotonica: alcune definizioni

La luminescenza, o emissione di luce, è un fenomeno che presentano alcune sostanze capaci di emettere, sotto forma di radiazione elettromagnetica (e.m.), una frazione dell'energia assorbita precedentemente in varie forme [1]. Essa può consistere di radiazioni e.m. di qualsiasi frequenza, dall'infrarosso (NIR, Near Infra-Red) ai raggi gamma, e si verifica nei gas, nei liquidi e nei solidi; tuttavia alcune delle applicazioni più comuni sfruttano l'emissione di luce visibile dei materiali solidi. A seconda delle cause di eccitazione si distinguono varie specie di luminescenza, p.es. l'elettroluminescenza è dovuta dall'azione di un campo elettrico ed è alla base del funzionamento dei LED (Light Emitting Diodes) inorganici [2] ed organici (OLED) [3]; la termoluminescenza, ampiamente utilizzata per datazione e

dosimetria, è causata dal riscaldamento del materiale ecc. Nel caso di emissione di luce provocata da processi di assorbimento della radiazione e.m. si usa spesso la parola *fotoluminescenza* [4].

Il termine *fotonica* fu coniato per la prima volta nel 1967 dallo scienziato francese Pierre Aigrain, che ne diede la seguente definizione: "*Photonics is the science of the harnessing of light. Photonics encompasses the generation of light, the detection of light, the management of light*

Contact person: Rosa Maria Montereali
rosa.montereali@enea.it



through guidance, manipulation, and amplification, and most importantly, its utilisation for the benefit of mankind" [5]. La fotonica è quindi il campo della Scienza e Tecnologia che abbraccia la generazione, la rivelazione nonché la gestione della luce (radiazione e.m.) mediante confinamento, manipolazione ed amplificazione, ossia attraverso lo studio delle proprietà della luce e delle sue interazioni con la materia.

La *miniaturizzazione dei dispositivi ottici passivi ed attivi* è tra gli obiettivi fondamentali della fotonica [6], che è una delle tecnologie abilitanti dell'attuale Programma Quadro Europeo H2020; la fotonica, che fa parte dell'ICT (Information and Communication Technologies) è stata anche definita la microelettronica del 21° secolo, per il positivo impatto previsto sulla crescita del sistema produttivo industriale e sulla qualità della vita dei cittadini.

Fotoluminescenza di difetti puntiformi e centri di colore nel fluoruro di litio

I fenomeni di fotoluminescenza sono ampiamente utilizzati in sorgenti di luce, amplificatori, laser e rivelatori di radiazione a stato solido basati su difetti puntiformi in materiali isolanti. Con il termine *difetti elettronici puntiformi* vengono chiamati ioni, atomi, molecole, lacune di atomi o ioni, e altre imperfezioni localizzate che distruggono l'ordine di una struttura cristallina perfetta. Tra essi, i *Centri di Colore (CC)* negli alogenuri alcalini furono i primi ad essere studiati sistematicamente [7] e furono utilizzati per la realizzazione di laser a stato solido a pompaggio ottico accordabili nel NIR, stabili ad 80 K, a seguito delle loro peculiari proprietà di assorbimento ed emissione alle lunghezze d'onda ottiche (200-1200 nm) secondo un tipico schema a 4 livelli.

Tra gli alogenuri alcalini, il *fluoruro di litio (LiF)* è un materiale dielettrico particolarmente interessante e promettente per numerose applicazioni in virtù delle sue peculiari proprietà chimico-fisiche ed ottiche, utilizzato sia per dosimetri termoluminescenti [8] che come mezzo attivo in laser a stato solido accordabili a pompaggio ottico [9], stabili a temperatura ambiente (RT, Room Temperature). I cristalli di LiF sono duri, praticamente non igroscopici, otticamente trasparenti nella regione spettrale da 120 nm a 7 μm e, se irrag-

giati con radiazioni ionizzanti di varia natura (raggi-X, gamma, elettroni, ioni ecc.), ospitano numerosi tipi di CC stabili. Tra essi, il centro primario F (un elettrone legato ad una vacanza anionica) presenta una banda di assorbimento ottico (banda F) la cui intensità è massima a 248 nm, mentre la fotoluminescenza, ad oggi non osservata con certezza, è teoricamente prevista debole e centrata a circa 900 nm. I centri aggregati F_2 ed F_3^+ (due elettroni legati rispettivamente a due e tre vacanze anioniche adiacenti) presentano bande di assorbimento quasi sovrapposte che complessivamente danno luogo ad una larga banda di assorbimento (banda M) posizionata a circa 450 nm, nel blu [10]. Pompando otticamente in questa regione spettrale, i centri F_2 emettono a RT un'intensa fotoluminescenza nel rosso, con massimo d'intensità a 678 nm, mentre i centri F_3^+ nel verde, a 541 nm [10]. Il loro utilizzo è stato esteso alla realizzazione di dispositivi ottici attivi miniaturizzati [11,12] e di rivelatori di immagini per radiazioni ionizzanti ad elevata risoluzione spaziale [13].

Guide d'onda attive prodotte mediante litografia elettronica in cristalli di LiF ed emissione spontanea amplificata

La ricerca di materiali e tecnologie per realizzare dispositivi ottici miniaturizzati, in grado di svolgere funzioni sia attive che passive, è in continuo sviluppo. In questo ambito il LiF irraggiato con tecniche di litografia elettronica, ha mostrato risultati molto promettenti. Infatti l'irraggiamento con elettroni di energia dell'ordine del keV produce efficientemente nello strato superficiale del LiF elevate concentrazioni di difetti puntiformi laser-attivi nel visibile, che posseggono alta stabilità ed elevati guadagni. Il valore della penetrazione massima degli elettroni può essere controllato variando il potenziale accelerante e per l'intervallo di energie 12-20 keV l'intervallo di penetrazione massima corrispondente è pari a 1,5-3,7 μm . Tale irraggiamento induce localmente anche un incremento della parte reale dell'indice di rifrazione del materiale nell'intervallo spettrale in cui è localizzata l'emissione dei difetti [14]. Si può così ottenere simultaneamente la formazione di centri laser attivi a RT nell'intervallo spettrale del visibile e del vicino infrarosso ed un confinamento della luce emessa [15].

In Figura 1 è riportata la fotografia dell'emissione di fotoluminescenza dei centri F_2 ed F_3^+ , visibile ad occhio nudo, in guide d'onda a canale attive realizzate in collaborazione con INFN-LNF. Nell'ambito del progetto europeo E.C. ESPRIT n. 24503 WAFFLE, "Active Waveguides tunable in the visible produced by Low energy Electrons bombardment in Alkali Fluoride Films" (1997-98), a coordinamento ENEA, si dimostrò per la prima volta al mondo la possibilità di realizzare guide d'onda attive ed a singolo modo in cristalli di LiF, basate sui centri di colore di tipo F_2 , in cui i coefficienti di guadagno erano superiori alle perdite ottiche [16], nonostante i fenomeni di "concentration quenching" presenti alle elevatissime densità di difetti necessarie per modificarne l'indice di rifrazione.

La Figura 1b riporta l'andamento supra-lineare del segnale ASE (Amplified Spontaneous Emission) dei centri F_2 , misurato in funzione della potenza di pompa, su una delle prime guide d'onda attive a canale realizzate in un cristallo di LiF tramite scrittura diretta con fasci di elettroni.

Più recentemente, mediante scrittura diretta con laser al femtosecondo, si è dimostrata la fattibilità di guide d'onda attive a canale multi-modali [17], laser distribui-

ti (DFB, Distributed Feedback) e reticoli diffrattivi basati su CC in cristalli di LiF per la progettazione di dispositivi ottici miniaturizzati non-ibridi completamente basati su cristalli di LiF e la ricerca è molto attiva in ambito internazionale (Giappone, Brasile, Cina, USA).

Microcavità ottiche verticali basate su centri di colore luminescenti in film sottili di LiF

A differenza delle guide d'onda, caratterizzate da una geometria planare, le microcavità sono risonatori verticali, che hanno almeno una dimensione paragonabile alla lunghezza d'onda della radiazione e.m. che vi si propaga. All'interno di una microcavità ottica è possibile modificare le caratteristiche dell'emissione spontanea di un materiale luminescente sfruttando le proprietà di confinamento della luce su dimensioni spaziali paragonabili con la sua lunghezza d'onda. Sulla base dei primi risultati [18] ottenuti nell'intervallo spettrale millimetrico e del vicino infrarosso (NIR), l'interesse si è rapidamente spostato su scala micro e sub micrometrica [19] per le applicazioni nel campo delle telecomunicazioni e dell'industria optoelettronica. La scienza

e l'ingegnerizzazione dell'integrazione radiazione-materia su queste scale spaziali viene anche indicata con il termine 'nanofotonica'. La peculiare conformazione fisica dei multistrati di alto e basso indice di rifrazione che costituiscono la microcavità, il cui spessore tipico è pari a multipli della metà della lunghezza d'onda di risonanza $\lambda_r/2$, modifica le caratteristiche del campo e.m. locale e di conseguenza altera le proprietà spaziali, spettrali e temporali di emissione di centri luminescenti posti al loro interno. Tale comportamento rende lo studio delle microcavità ottiche attive molto interessante sia dal punto di vista fondamentale, come test per la teoria CQED (Cavity Quantum Electro-Dynamics), che sotto

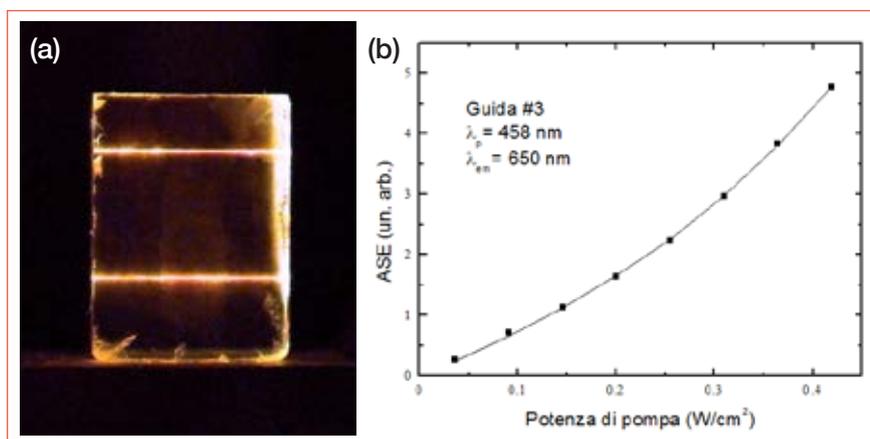


FIGURA 1 (a) Fotografia dell'emissione di fotoluminescenza dei centri F_2 ed F_3^+ in guide d'onda a canale attive colorate con elettroni di bassa energia (12 keV) in un cristallo di LiF. L'eccitazione è effettuata con un laser ad Argon a 458 nm; (b) Intensità di emissione dei centri F_2 a 650 nm per diversi valori della potenza di pompa per la guida#3, colorata con elettroni da 12 keV, pompata con la riga a 458 nm di un laser ad Argon in regime quasi continuo. La linea continua è il best-fit eseguito con la formula dell'ASE [16]

il profilo applicativo, per lo sviluppo di dispositivi ottici attivi miniaturizzati, quali diodi emettitori di luce ad alta direzionalità e sorgenti miniaturizzate di luce coerente, amplificatori e laser a bassa soglia.

Nell'ambito del programma italo-francese GALILEO n. 99090, in collaborazione con l'Università di Roma Tre, nel 1999 si avviò lo studio, la realizzazione e la caratterizzazione di microcavità ottiche planari completamente dielettriche risonanti nel rosso, basate su CC di tipo F_2 prodotti mediante litografia elettronica in film sottili di LiF depositi per evaporazione termica direttamente su specchi di Bragg, che costituivano gli estremi della cavità simmetrica [20]. Grazie alle proprietà di fotoluminescenza di questi difetti, in particolare l'accordabilità ed elevati coefficienti di guadagno, questi sistemi compatti hanno il vantaggio di emettere luce in un intervallo spettrale che si estende dal visibile (VIS) al NIR e richiedono tecnologie di preparazione più semplici rispetto a quelle richieste per la deposizione controllata di semiconduttori inorganici.

La Figura 2a mostra la fotografia dell'emissione di fotoluminescenza direzionale dei centri F_2 e la Figura 2b l'intensità della stessa emissione in funzione dell'an-

golo, misurato rispetto alla normale alla superficie del multistrato, sia per una mezza cavità che per la microcavità simmetrica, in cui l'emissione lungo la normale è più intensa di un fattore 2.5.

I diagrammi di irraggiamento, ossia la distribuzione angolare dell'energia emessa dal materiale attivo posto all'interno della struttura, mostrano in maniera più completa come il risonatore induca un restringimento spettrale dell'emissione ed un conseguente aumento della direzionalità e dell'intensità lungo l'asse della cavità. Per la cavità completa l'emissione è confinata in uno stretto cono di apertura circa 20° attorno all'asse della cavità, mentre si estende su 50° nel caso della mezza cavità. Tutte le modificazioni osservate nell'emissione spontanea dei centri F_2 sono attribuibili alla natura risonante della struttura in cui essi sono situati. Anche una riduzione del 20% del tempo di vita è stata misurata sulle stesse strutture [21] ed ulteriori esperimenti sono stati svolti su microcavità con fattori di merito più elevati, fino a 160, nonché su cavità asimmetriche. I risultati sperimentali sono stati confrontati con simulazioni numeriche basate su modelli teorici semi-classici, recentemente

sviluppati in formule analitiche, estese con successo anche a multistrati metallo-semiconduttore-dielettrico contenenti materiali organici con emissione a larga banda, quali OLED [22] ed alle microcavità basate su centri F_2 in film di LiF [23].

Rivelatori di immagini per raggi-X molli basati sulla fotoluminescenza visibile di centri di colore in film sottili di LiF

Una delle più ovvie e diffuse applicazioni della fotonica è l'imaging, le cui potenzialità si estendono anche in regioni spettrali differenti da quelle del visibile, sia per quanto riguarda le applicazioni scientifiche che quelle industriali.

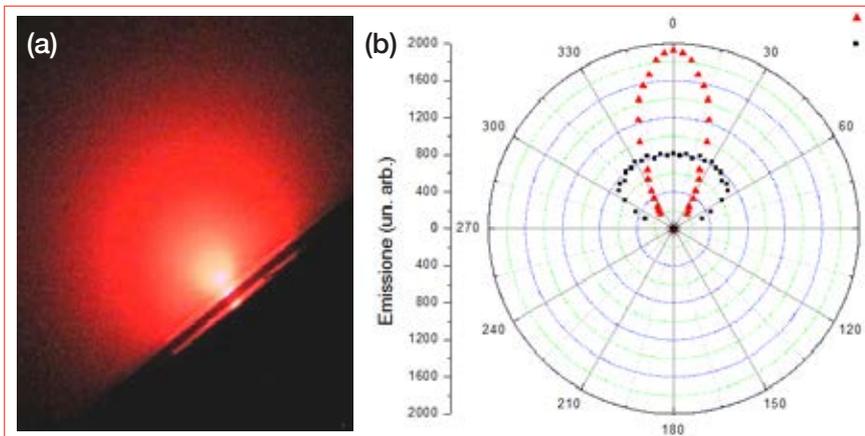


FIGURA 2 (a) Fotografia dell'emissione di fotoluminescenza direzionale dei centri F_2 in una microcavità ottica verticale simmetrica, basata su un film di LiF di spessore ottico $\lambda_r/2$ colorato con elettroni di bassa energia (3 keV) come mezzo attivo. L'eccitazione è effettuata con un laser ad Argon a 458 nm; (b) Diagramma di irraggiamento misurato alla lunghezza d'onda di risonanza $\lambda_r = 665$ nm di una mezza cavità (quadrati neri) e della microcavità simmetrica completa (triangoli rossi), basata su un film di LiF di spessore ottico $\lambda_r/2$ colorato con elettroni di bassa energia (3 keV). L'eccitazione è effettuata con un laser ad Argon a 458 nm [20]

Tra tutte, quelle legate alla crescente domanda di più sofisticate tecniche diagnostiche bio-mediche rappresentano un'opportunità di innovazione e, soprattutto, di miglioramento della nostra salute. Sebbene il termine 'biofotonica' sia piuttosto recente ed i suoi confini non ben definiti, le sue origini vanno sicuramente ricercate nell'uso della microscopia ottica per l'indagine dei campioni biologici. La diagnostica medica rimane uno dei campi più comuni di utilizzo dei raggi-X duri, ma oggi una delle maggiori sfide per le tecnologie dei raggi-X è l'esplorazione e la comprensione del mondo microscopico vivente. In particolare, la possibilità di ottenere immagini nell'intervallo spettrale dei raggi-X molli (SXR, Soft X-Rays), che coprono la regione che si estende da circa 200 eV a 2 keV, è considerato estremamente significativo per le scienze della vita. Queste radiazioni sono attualmente utilizzate da fisici e biologi per ottenere immagini di campioni viventi spessi fino a qualche decina di micrometri con una risoluzione spaziale inferiore a 100 nm, che è un valore intermedio tra la microscopia ottica convenzionale e quella elettronica. La microscopia a raggi-X molli combina la capacità di ingrandimento della microscopia ottica con il potere penetrante dei raggi-X, per ottenere immagini bidimensionali di dettagli interni estremamente piccoli, anche per campioni *in vivo*.

Presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati sono stati proposti [24,25] ed attualmente in sviluppo [26, 13] rivelatori di immagini innovativi per raggi-X basati sulla fotoluminescenza di difetti elettronici puntiformi in strati sottili di LiF. Essi sono stati utilizzati come lastra radiografica ad altissima risoluzione spaziale (< 300 nm) ed elevata dinamica di contrasto, anche su un ampio campo di vista (> 10 cm²), facilmente leggibile con un microscopio ottico operante in fluorescenza. Il rivelatore risulta versatile, maneggevole, compatto e la sua semplicità d'uso lo rende adatto per numerose applicazioni in settori quali scienze della vita, nanotecnologie, ingegneria dei materiali ecc.

Alcune caratteristiche dei CC nel LiF rendono questo materiale ideale per essere usato quale rivelatore di immagini per raggi-X molli, la cui penetrazione nei solidi è molto bassa, dalle decine di nanometri [27] a pochi micrometri. I CC, infatti, hanno una dimensione spaziale tipica inferiore al nm, che permette di ottenere immagini ad altissima risoluzione spaziale su un lar-

go campo di vista, limitata praticamente dal sistema di lettura adoperato. Inoltre, i CC nel LiF sono stabili a RT e non possono essere generati né cancellati dalla luce ambientale, per cui il rivelatore può essere maneggiato facilmente, senza il rischio di esposizioni accidentali, come invece avviene per le pellicole fotografiche. I CC possono essere distrutti con riscaldamento a temperatura $T > 400^{\circ}\text{C}$, permettendo l'eventuale riutilizzo del rivelatore. Infine, il LiF può essere cresciuto per evaporazione termica sotto forma di film policristallino [12, 13] su diversi substrati, rendendolo compatibile con differenti configurazioni sperimentali. L'intervallo spettrale visibile in cui cade la fotoluminescenza di alcuni CC, l'ampiezza delle loro bande di emissione e la possibilità di pomparli otticamente con una singola lunghezza d'onda, semplificano il processo di lettura, attraverso microscopi ottici convenzionali, confocali o a campo prossimo (SNOM, Scanning Near Field Optical Microscope) operanti in modalità fluorescenza, che risulta molto efficiente, anche data l'elevata sensibilità dei fotorivelatori nella regione spettrale del visibile.

In particolare, la regione tra 0,28 e 0,53 keV (4,4-2,3 nm), che prende il nome di "finestra dell'acqua" (ww, water window) svolge un ruolo peculiare in ambito biologico, in quanto l'acqua risulta sostanzialmente trasparente alla radiazione rispetto al carbonio, costituente fondamentale delle cellule, fornendo un naturale contrasto in assorbimento per i composti organici in soluzione acquosa. Essa viene usata per la microradiografia e la microscopia a raggi-X molli di campioni biologici, utilizzando prevalentemente sorgenti laser-plasma, che emettono impulsi intensi e di breve durata in questo intervallo di energie.

Una tra le prime microradiografie a raggi-X di campioni biologici realizzate su rivelatori a film sottile di LiF luminescenti è quella di un'ala di zanzara (*Diptera*) immagazzinata in un film di LiF di spessore inferiore a 200 nm depositato tramite evaporazione termica su un substrato di silicio, in condizioni controllate di temperatura del substrato e di velocità di deposizione, che è riportata in Figura 3. L'ala, posta a contatto con la superficie del rivelatore di LiF, fu irraggiata con raggi-X molli prodotti da una sorgente laser-plasma sviluppata presso il Centro Ricerche ENEA Frascati [28]. La microradiografia-X sul rivelatore di LiF in Figura 3 è stata letta sia con un microscopio ottico confocale a scansione laser in mo-

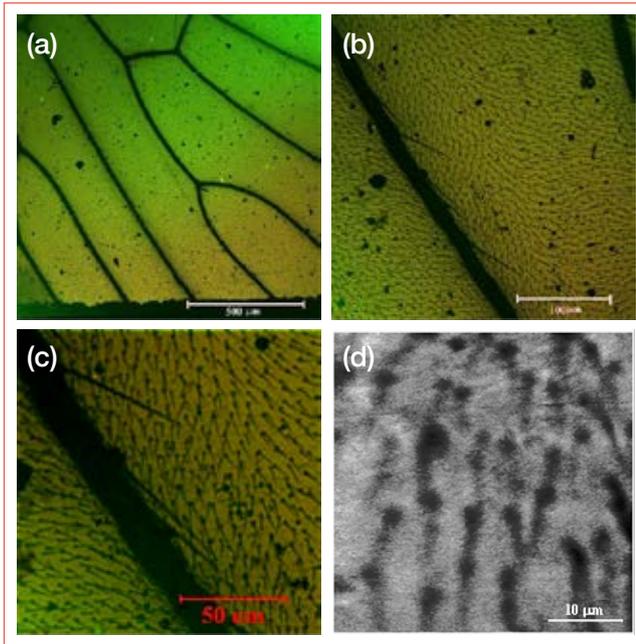


FIGURA 3 Microradiografia a raggi-X di una ala di zanzara (*Diptera*) immagazzinata da un film sottile di LiF cresciuto su un substrato di silicio e letta con un microscopio ottico confocale a scansione laser in modalità fluorescenza a tre diversi ingrandimenti, a), b) e c), e con un microscopio ottico a campo prossimo SNOM in fluorescenza (d)

dalità fluorescenza a tre diversi ingrandimenti (Figura 3a), b) e c)) che con uno SNOM in fluorescenza (Figura 3d), dove i dettagli della peluria dell'ala sono ben definiti. In collaborazione con il CNR-ISM di Roma Tor Vergata, sono state dimostrate risoluzioni spaziali fino a 30 nm [29]. Brillanti risultati di microscopia X su LiF sia di cellule vegetali [30] che animali [31] *in vivo* sono stati successivamente ottenuti.

Sulla base delle sue caratteristiche, il LiF si candida come un promettente materiale per la rivelazione di immagini ad alta risoluzione ed elevata dinamica di contrasto, basato sulla lettura della fotoluminescenza, per sorgenti di radiazione-X di varia natura, che spaziano dai tubi compatti a raggi-X di alcuni keV [32,33], ai fasci di raggi-X di alcune decine di keV nei sincrotroni [34], ai fasci ultracorti nei FEL-X (Free Electron Laser) [35].

Aumento dell'efficienza dei rivelatori di radiazione luminescenti basati su centri di colore in film sottili di LiF

I rivelatori di radiazioni ionizzanti a lettura ottica basati sulla fotoluminescenza di centri di colore in film di LiF, cresciuti per evaporazione termica in condizioni sperimentali controllate su differenti tipi di substrato (vetro, silicio, quarzo fuso, plastica ecc.), sono caratterizzati da un'elevata versatilità in quanto è possibile scegliere spessore del film di LiF, geometria e dimensioni del rivelatore in base alle caratteristiche della radiazione ionizzante utilizzata ed al tipo di esperimento da realizzare.

I film di LiF cresciuti per evaporazione termica sono otticamente trasparenti e policristallini. Le loro proprietà ottiche, morfologiche e strutturali (grado di cristallinità, dimensioni dei cristalliti, compattezza ecc.) sono dipendenti dai principali parametri di deposizione ed in particolare dal tipo di substrato e dalla sua temperatura durante il processo di deposizione, dallo spessore totale e dalla velocità di crescita del film [12]. I parametri di deposizione influenzano anche l'efficienza di formazione dei CC primari ed aggregati indotti dall'irraggiamento del film con radiazioni ionizzanti. Infatti il rapporto superficie-volume e la compattezza del film di LiF giocano un ruolo fondamentale determinando la densità dei bordi di grano, che agisce come sorgente di vacanze durante i processi di formazione e stabilizzazione dei CC. Come conseguenza, a parità di dose di irraggiamento, la sensibilità ai raggi-X dei rivelatori basati su film di LiF è maggiore di quella dei cristalli di LiF [12,36] per la stessa profondità di colorazione.

La sensibilità dei rivelatori basati su film di LiF può essere migliorata, fino ad un ordine di grandezza, anche aumentando l'efficienza di emissione del segnale di fotoluminescenza dei CC durante il processo di lettura del rivelatore. A tal fine vengono opportunamente individuati il materiale del substrato, in base all'indice di rifrazione complesso ed alla compatibilità chimico-fisica col LiF, e lo spessore del film di LiF, utilizzando il modello matematico appositamente sviluppato per OLED e microcavità basati su film sottili con emissione a larga banda [23] per tenere conto degli effetti di confinamento della luce nel rivelatore multistrato.

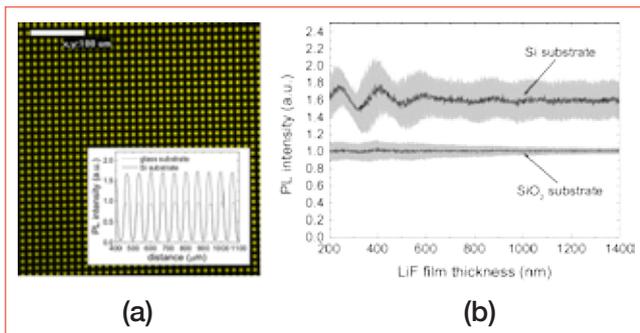


FIGURA 4 Immagine in fluorescenza, acquisita con un microscopio ottico confocale, della micro-radiografia X a contatto di una mesh di nickel immagazzinata in un rivelatore a film di LiF depositato su un substrato di Si. Il riquadro confronta il profilo di intensità di PL degli spot luminosi acquisiti lungo una linea orizzontale per la micro-radiografia X immagazzinata nel rivelatore cresciuto su Si con quello ottenuto utilizzando un film di LiF cresciuto su vetro nello stesso run di deposizione ed irraggiato nelle medesime condizioni sperimentali (a). Andamento teorico del segnale di PL di un film di LiF cresciuto su Si e di uno cresciuto su SiO₂ in funzione dello spessore del film (b)

La Figura 4a mostra l'immagine in fluorescenza, acquisita con un microscopio ottico confocale laser Nikon Eclipse 80i-C1, della micro-radiografia-X a contatto di una mesh di nichel, immagazzinata in un rivelatore a film di LiF, di spessore 1 μm , depositato su substrato di Si, irraggiata con raggi-X molli presso la sorgente laser plasma sviluppata all'Università Tor Vergata [37]. Con lo scopo di evidenziare l'effetto del tipo di substrato sulla sensibilità del rivelatore, il riquadro di Figura 4a confronta il profilo di intensità di PL degli spot luminosi acquisiti lungo una linea orizzontale per la micro-radiografia X immagazzinata nel rivelatore cresciuto su Si con quello ottenuto utilizzando un film di LiF cresciuto su vetro nella stessa deposizione ed irraggiato nelle medesime condizioni sperimentali. Il segnale di PL dovuto ai CC F₂ ed F₃⁺ relativo al film cresciuto su Si è più elevato di quello cresciuto su vetro: il rapporto fra le loro intensità è $1,76 \pm 0,11$. La Figura 4b riporta l'andamento teorico del segnale di PL di un film di LiF cresciuto su Si e di uno depositato su SiO₂ in funzione dello spessore del film [23]. Le bande in grigio di ciascuna curva rappresentano la deviazione standard. L'intensità

di PL prevista teoricamente per film di LiF di spessore 1 μm cresciuti su Si e SiO₂ sono di $(1,60 \pm 0,22)$ a.u. e di $(1,00 \pm 0,05)$ a.u., rispettivamente. L'intensità di PL per il film di LiF cresciuto su Si è quindi $1,60 \pm 0,30$ volte maggiore di quella del film di LiF cresciuto su SiO₂, in buon accordo con quanto ottenuto sperimentalmente comparando il profilo d'intensità di PL delle micro-radiografie X delle mesh di nichel.

Rivelatori luminescenti a film sottile di LiF per diagnostica e dosimetria di fasci di protoni

Recentemente l'uso di cristalli e di rivelatori a film sottile di LiF è stato sperimentato per fasci di protoni di energia 3 e 7 MeV [38], prodotti da un acceleratore lineare in fase di sviluppo presso il Centro Ricerche ENEA Frascati per applicazioni di protonterapia [39]. L'interazione di queste particelle con la matrice cristallina del LiF è complessa, in quanto coinvolge sia processi elettronici che gli ioni del reticolo [38]; la distribuzione dell'energia depositata in funzione della profondità presenta un picco in prossimità della penetrazione massima dei protoni, noto come picco di Bragg. Gli spettri di fotoluminescenza nel visibile dei CC F₂, F₃⁺ indotti da questo tipo di particelle in film di LiF, mostrati in Figura 5a, consistono nella sovrapposizione delle ben note larghe bande di emissione piccate rispettivamente nel rosso e nel verde. È interessante notare che il segnale è più alto nel film irraggiato con protoni di energia minore, in quanto la profondità di penetrazione, alcune decine di micrometri, è superiore allo spessore del film utilizzato (1 μm), e la deposizione lineare dell'energia a inizio traccia è inversamente proporzionale alla velocità della particella. Il segnale di fotoluminescenza integrato presenta un andamento lineare in funzione della dose nell'intervallo 10^3 - 10^6 Gy [40]. L'elevata dinamica della risposta di fotoluminescenza in funzione della dose in film sottili di LiF consente anche di ottenere immagini bidimensionali con risoluzione spaziale submicrometrica della distribuzione trasversale d'intensità del fascio e di identificare la posizione del picco di Bragg, esponendo in aria i film di LiF al fascio di protoni in differenti geometrie ed acquisendo successivamente l'immagine dell'area irraggiata tramite un microscopio ottico convenzionale in fluorescenza, come mostrato in Figura 5b [38].

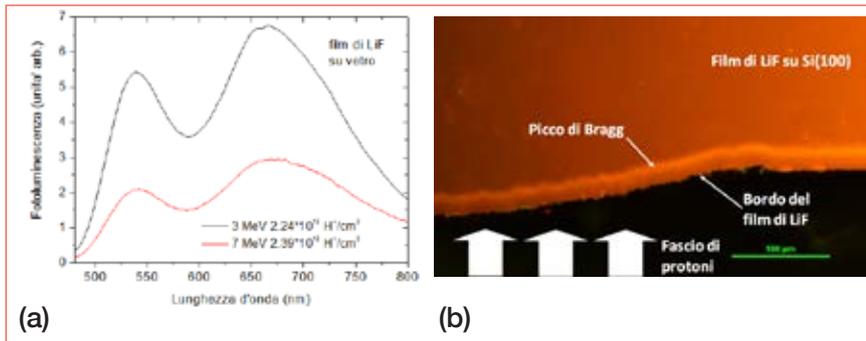


FIGURA 5 (a) Spettri di fotoluminescenza a RT dei centri F_2 ed F_3^+ in film di LiF di spessore $1 \mu\text{m}$ colorati con protoni da 3 e 7 MeV in aria alla stessa fluensa. L'eccitazione è effettuata con un laser ad Argon a 458 nm; (b) Immagine in fluorescenza della superficie di un film di LiF di spessore $1 \mu\text{m}$ cresciuto su substrato di Si(100), in cui l'intensità di emissione dei centri F_2 ed F_3^+ è proporzionale all'energia rilasciata dai protoni in funzione della profondità di penetrazione

Futuri sviluppi e conclusioni

In conclusione, al Centro Ricerche ENEA Frascati le peculiari proprietà di fotoluminescenza dei centri di colore indotti da radiazione in film sottili di LiF sono state proposte e studiate per la realizzazione di nuove sorgenti di luce miniaturizzate con emissione a larga banda e di rivelatori di radiazioni ionizzanti innovativi ad elevatissima risoluzione spaziale per imaging di raggi-X e do-

simetria di fasci di protoni, basati sulla lettura ottica, aprendo interessanti opportunità di sviluppo nelle applicazioni industriali della fotonica, che spaziano dalla scienza dei materiali alla biomedicina. Le strutture a multistrato a bassa dimensionalità offrono l'opportunità di migliorare le prestazioni di questi dispositivi a stato solido e di funzionalizzarne le proprietà in specifici ambiti di ricerca e sviluppo, cercando di sfruttare l'esperienza e l'eccellenza finora raggiunte e riconosciute a livello internazionale in un contesto sempre più competitivo.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano per il supporto tecnico e morale e per il loro prezioso contributo Stefano Libera e Angelo Pace, dell'ENEA di Frascati, ed Antonio Grilli ed Agostino Raco, dell'INFN-LNF. Un ringraziamento particolare va ai numerosi laureandi, borsisti, ospiti e collaboratori italiani e stranieri, coautori dei lavori citati in bibliografia. ●

Rosa Maria Montereali, Francesca Bonfigli, Enrico Nichelatti, Massimo Piccinini, Maria Aurora Vincenti
ENEA, Dipartimento Fusione e tecnologie per la Sicurezza Nucleare, Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute

Photoluminescence and Photonics: from miniaturised light sources to radiation detectors

Photonics is the science of the harnessing of light. Photonics encompasses the generation of light, the detection of light, the management of light through guidance, manipulation, and amplification. Luminescence phenomena are widely used in solid state light sources and radiation detectors based on point defects in insulators. Among them, F_2 ed F_3^+ aggregate colour centres are induced in lithium fluoride (LiF) by various kinds of ionizing radiation and are laser active in the visible spectral region. They have been studied and successfully used at Frascati ENEA Research Centre for realizing prototypes of both miniaturized light sources, in the form of waveguides and vertical optical microcavities for integrated optics, and of novel X-ray imaging detectors, based on the optical reading of photoluminescence of the locally induced defects. The highest intrinsic spatial resolution on a wide field of view and their versatility, achieved by the growth of LiF thin films by thermal evaporation, allow using such detectors in the frameworks of nanophotonics, life science and energy. Recently, they have been also used in the advanced diagnostics of proton beams, with promising results in imaging and dosimetry based on photoluminescence.

- [1] Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, A.Mondadori ed., Milano (1976), 777
- [2] http://www.lescienze.it/news/2014/10/07/news/nobel_fisica_2014-2321542
- [3] G. Baldacchini, S. Gagliardi, S. Gambino, S. Loreti, R.M. Montoreali, A. Pace (2003), *Diodi Organici Luminescenti*, Energia, Ambiente e Innovazione 4, 83-84
- [4] R.M. Montoreali, T. Marolo, S. Gagliardi, S. Gambino (2002), *Spettroscopia Combinata di Emissione ed Eccitazione (CEES): una Tecnica Promettente per lo Studio di Nuovi Materiali Emittitori di Luce*, ENEA Technical Report RT/2002/57/FIS
- [5] http://cordis.europa.eu/fp7/ict/photonics/home_en.html
- [6] *The Handbook of Photonics*, M.C. Gupta, J. Ballato (2007), eds., CRC Press, Boca Raton
- [7] G. Baldacchini, *La Doppia Luminescenza dei Centri di Colore*, in questo stesso numero EAI e referenze ivi citate
- [8] *Phosphor Handbook*, S. Shionoya, W.M. Yen, eds., CRC Press, Boca Raton, 1998 T
- [9] T.T. Basiev, S.B. Mirov, V.V. Osiko (1988), IEEE J. Quantum Electron. 24, 1052
- [10] J. Nahum, D. A. Wiegand (1967), Phys. Rev. 154, 817
- [11] V.V. Ter-Mikirtychev, T. Tsuboi (1996), Prog. Quant. Electr. 20 (3), 219
- [12] R.M. Montoreali (2002), *Point Defects in Thin Insulating Films of Lithium Fluoride for Optical Microsystems*, in Handbook of Thin Film Materials, H.S.Nalwa ed., Vol.3: Ferroelectric and Dielectric Thin Films, Academic Press, Ch.7, 399-431
- [13] R.M. Montoreali, F. Bonfigli, M.A. Vincenti, and E. Nichelatti (2013), *Versatile Lithium Fluoride Thin-Film Solid-State Detectors for Nanoscale Radiation Imaging*, Nuovo Cimento, 36, 35-42
- [14] M. Montecchi, E. Nichelatti, A. Mancini, R.M. Montoreali (1999), *Optical Characterization of Low-Energy Electron-Beam-Colored LiF Crystals by Spectral Transmittance Measurements*, J. Appl. Phys., 86, 3745
- [15] R.M. Montoreali, A. Mancini, G.C. Righini, S. Pelli (1998), *Active Stripe Waveguides Produced by Electron Beam Lithography in LiF Crystals*, Opt. Comm. 153, 223-225
- [16] R.M. Montoreali, M. Piccinini, E. Burattini (2001), *Amplified Spontaneous Emission in Active Channel Waveguides Produced by Electron Beam Lithography in LiF Crystals*, Appl. Phys. Lett. 78, 26, 4082-4084
- [17] I. Chiamenti, F. Bonfigli, A.S.L. Gomes, F. Michelotti, R.M. Montoreali, and H.J. Kalinowski (2014), *Optical characterization of femtosecond laser induced active channel waveguides in lithium fluoride crystals*, Journal of Applied Physics 115, 2, 023108-1-7
- [18] P. Goy, J.M. Raimond, M. Gross, and S. Haroche, Phys. Rev. Lett. 50, 1903 (1983)
- [19] F. De Martini, G. Innocenti, G.R. Jacobovitz and P. Mataloni (1987), Phys. Rev. Lett. 59, 2995
- [20] A. Belarouci, F. Menchini, H. Rigneault, B. Jacquier, R.M. Montoreali, F. Somma, P. Moretti, M.Cathelinaud (2001), *Control of F₂ Color Centers Spontaneous Emission in LiF Thin Films inside Optical Microcavities*, Optical Materials 16, 63-67
- [21] F. Bonfigli, B. Jacquier, R.M. Montoreali, P. Moretti, M. Piccinini, H. Rigneault, F. Somma (2001), *Color Center Luminescence Decay Times in Optical Microcavities based on LiF Films*, J. Lumin. 94-95, 811-814
- [22] E. Nichelatti, F. Bonfigli, M.A. Vincenti, and R.M. Montoreali (2011), *Optical Modelling of an Alq₃-based Organic Light-Emitting Diode*, Journal of Optical Technology 78, 7, 424-429
- [23] E. Nichelatti and R.M. Montoreali (2012), *Photoluminescence from a homogeneous volume source within an optical multilayer: analytical formulas*, J. Opt. Soc. Am. A 29, 3, 303-312
- [24] G. Baldacchini, F. Bonfigli, A. Faenov, F. Flora, R.M. Montoreali, A. Pace, T. Pikuz, L. Reale (2003), *Lithium Fluoride as a Novel X-Ray Image Detector for Biological μ -World Capture*, J. Nanoscience and Nanotechnology 3, 6, 483-486
- [25] G. Baldacchini, S. Bollanti, F. Bonfigli, F. Flora, P. Di Lazzaro, A. Lai, T. Marolo, R.M. Montoreali, D. Murra, A. Faenov, T. Pikuz, E. Nichelatti, G. Tomassetti, A. Reale, L. Reale, A. Ritucci, T. Limongi, L. Palladino, M. Francucci, S. Martellucci and G. Petrocelli (2005), *A Novel Soft X-Ray Submicron Imaging Detector Based on Point Defects in LiF*, Review Scientific Instruments 76, 113104-1,12 (Also selected for publication in the Virtual Journal of Biological Physics Research 10(11), December 1, 2005)
- [26] Rosa Maria Montoreali, Francesca Bonfigli, Enrico Nichelatti, Maria Aurora Vincenti, Brevetto RM2013A000123 del 01/03/2013, numero di riferimento ENEA 773, "Dispositivo semplice ad elevata efficienza per la rivelazione di radiazione ionizzante basato su film sottile di fluoruro di litio luminescente, e relativi metodi di preparazione e lettura del dispositivo"
- [27] E. Nichelatti, F. Bonfigli, A.Y. Faenov, F. Flora, T. Marolo, M. Montecchi, R.M. Montoreali, T. Pikuz, G. Baldacchini (2005), *Surface Generation of Color Centers in Lithium Fluoride by EUV-Irradiation*, J. Non-Crystalline Solids 351, 1774-1779
- [28] S. Bollanti, P. Albertano, M. Belli, P. Di Lazzaro, A.Ya. Faenov, F. Flora, G. Giordano, A. Grilli, F. Ianzini, S.V. Kukhlevsky, T. Letardi, A. Nottola, L. Palladino, T. Pikuz, A. Reale, L. Reale, A. Scafati, M.A. Tabocchini, I.C.E. Turcu, K. Vigi-Papadaki, and G. Schina (1998), *Il Nuovo Cimento D* 20, 1685
- [29] A. Ustione, A. Cricenti F. Bonfigli, F. Flora, A. Lai, T. Marolo, R.M. Montoreali, G. Baldacchini, A. Faenov, T. Pikuz, L. Reale (2006), *Scanning Near-Field Optical Microscopy Images of Microradiographs Stored in Lithium Fluoride Films with an Optical Resolution of $\lambda/12$* , Appl. Phys. Lett. 88, 141107-9

- [30] F. Bonfigli, A. Faenov, F. Flora, M. Francucci, P. Gaudio, A. Lai, S. Martellucci, R.M. Montereali, T. Pikuz, L. Reale, M. Richetta, M.A. Vincenti and G. Baldacchini (2008), *High-Resolution Water Window X-Ray Imaging of In Vivo Cells and Their Products Using LiF Crystal Detectors*, *Microscopy Research and Techniques* 71, 1, 35-41
- [31] L. Reale, F. Bonfigli, A. Lai, F. Flora, P. Albertano, M. I. Di Giorgio, L. Mezi, R.M. Montereali, A. Faenov, T. Pikuz, S. Almaviva, M. Francucci, P. Gaudio, S. Martellucci, M. Richetta and A. Poma (2015), *Contact X-ray Microscopy of Living Cells by using LiF Crystal as Imaging Detector*, *Journal of Microscopy* 258, 2, 127-129
- [32] S. Almaviva, F. Bonfigli, I. Franzini, A. Lai, R.M. Montereali, D. Pelliccia, A. Cedola, S. Lagomarsino (2006), *Hard X-Ray Contact Microscopy with 250 nm Spatial Resolution using a LiF Film Detector and a Tabletop Microsource*, *Appl. Phys. Lett.* 89, 54102-4
- [33] D. Hampai, S.B. Dabagov, G. Della Ventura, F. Bellatreccia, M. Magi, F. Bonfigli, and R.M. Montereali (2011), *High-resolution X-ray Imaging by Polycapillary Optics and Lithium Fluoride Detectors Combination*, *Europhysics Letters* 96, 60010, 1-4
- [34] S. Heidari Bateni, F. Bonfigli, A. Cecilia, T. Baumbach, D. Pelliccia, F. Somma, M.A. Vincenti and R.M. Montereali (2013), *Optical Characterization of Lithium Fluoride Detectors for Broadband X-ray Imaging*, *Nucl. Instr. Meth. A* 720, 109-112
- [35] T.A. Pikuz et al. (2013), *Applied Optics* 52, 3, 509-515
- [36] G. Baldacchini, M. Cremona, G. d'Auria, S. Martelli, R.M. Montereali, M. Montecchi, E. Burattini, A. Grilli and A. Raco (1996), *Nucl. Instrum. Methods B*, 116, 447
- [37] M. Richetta, M. Francucci, P. Gaudio, S. Martellucci, C. Bellecci, D. Toscano, A. Rydzy, M. Gelfusa, P. Ciuffa (2006), *J. Phys. Cond. Matter* 18, 2039
- [38] M. Piccinini, F. Ambrosini, A. Ampollini, M. Carpanese, L. Picardi, C. Ronsivalle, F. Bonfigli, S. Libera, M.A. Vincenti and R.M. Montereali (2014), *Solid state detectors based on point defects in lithium fluoride for advanced proton beam diagnostics*, *J. Lum.* 156, 170-174
- [39] C. Ronsivalle, et al. (2011), *Eur. Phys. J Plus* 126 (7), 68
- [40] M. Piccinini, F. Ambrosini, A. Ampollini, L. Picardi, C. Ronsivalle, F. Bonfigli, S. Libera, E. Nichelatti, M.A. Vincenti and R.M. Montereali (2015), *Photoluminescence of Radiation-Induced Color Centers in Lithium Fluoride Thin Films for Advanced Diagnostics of Proton Beams*, *App. Phys. Lett.* 106, 261108_1_4

Dispositivi luminescenti OLED per applicazioni di illuminazione

Gli OLED (Organic Light Emitting Diode), dispositivi elettro-luminescenti organici, sono i dispositivi optoelettronici organici più studiati e con applicazioni commerciali per l'illuminazione e nei display. I vantaggi principali sono: larga area di emissione, flessibilità, generazione di luce diffusa, dispositivi sottili e leggeri, efficienza, emissione di una vasta gamma di colori.

Molte aziende e gruppi di ricerca studiano gli OLED per illuminazione, anche sviluppando linee pilota per processi continui su substrati a nastro (roll-to-roll) per ridurre i costi.

Nel Laboratorio Nanomateriali e Dispositivi del Centro Ricerche ENEA Portici, da oltre dieci anni gli OLED vengono studiati per migliorare l'efficacia luminosa, studiare materiali emissivi innovativi, incrementare l'estrazione luminosa e studiare i meccanismi di degrado per aumentare la durata dei dispositivi.

Inoltre, da poco è iniziato lo studio delle celle elettrochimiche ad emissione di luce (LEEC)

DOI 10.12910/EAI2015-094

■ M.G. Maglione, S. Aprano, P. Tassini, V. Criscuolo, T. Prontera, A. Rubino, P. Manini, C. Minarini

L'elettronica organica è il settore dell'elettronica che utilizza materiali attivi organici, cioè molecole a base di carbonio, e sfrutta la combinazione di nuovi materiali e processi di produzione su larga area, che aprono nuovi ed avveniristici campi di applicazione.

I dispositivi elettronici organici possono essere realizzati in spessori sottilissimi su supporti anche flessibili, pesano poco, e sono potenzialmente riciclabili e quindi a zero impatto ambientale. Varie tipologie di dispositivi sono studiate e sviluppate: sorgenti luminose, transistori, molti tipi di sensori, celle fotovoltaiche, dispositivi passivi ecc.. I dispositivi che, attualmente, sono quelli più studiati e hanno già trovato applicazione commerciale sono gli OLED (Organic Light Emitting Diode), dispositivi elettro-luminescenti organici, utilizzati nel campo dell'illuminazione (Lighting) e per i display piatti. Gli OLED sono composti da strati di materiali organici sovrapposti, che emettono luce quando vengono attraversati da corrente elettrica.

Per le applicazioni di illuminazione, gli OLED vengono proposti in maniera complementare ai noti LED inorganici: gli OLED possono avere potenzialmente

una grande area ed essere applicati su superfici curve e flessibili, mentre i LED sono sorgenti puntiformi. Insieme, questi due tipi di dispositivi vengono indicati come sorgenti luminose a stato solido (Solid State Lighting, SSL) [1], e rivestono un'importanza commerciale sempre maggiore, grazie alle loro proprietà: efficienza energetica, assenza di sostanze pericolose e, soprattutto, la possibilità di combinare insieme caratteristiche di design con il risparmio energetico permesso da tali dispositivi. In particolare, gli OLED sono impiegati in vari prodotti di design per applicazioni Lighting già in commercio.

La tecnologia OLED è da anni oggetto di un gran numero di progetti di ricerca, sia europei sia mondiali. In Europa, progetti come OLED100.eu, con un grosso coinvolgimento industriale, hanno dato

Contact person: Maria Grazia Maglione
mariagrazia.maglione@enea.it



un contributo sostanziale allo sviluppo di tale tecnologia. Aziende ed istituti di ricerca, come BASF, MERCK, Fraunhofer, Novaled ecc., hanno indirizzato molti sforzi verso questa tecnologia (Figura 1). Philips, OSRAM e General Electric hanno immesso sul mercato prodotti OLED per l'illuminazione, mentre industrie più piccole, come Black Body, stanno sviluppando nuovi prodotti. I prodotti OLED promettono: larga area di emissione, flessibilità, generazione di luce diffusa, dispositivi sottili, alta efficienza, emissione di una vasta gamma di colori. Tra le varie applicazioni, c'è anche quella nel settore automobilistico (Figura 2) [2].

Due tipi di tecnologie sono stati sviluppati per la realizzazione di prodotti OLED: deposizione dei materiali mediante evaporazione in ultra alto vuoto (*small*

molecule OLED), e deposizione di sostanze in soluzione (*polymer* OLED) applicabile anche in aria. Ad oggi, i prodotti in commercio sono realizzati su supporti rigidi, principalmente vetro, depositati in vuoto, mentre sono stati presentati soltanto prototipi di OLED flessibili depositati da soluzione.

La competizione degli OLED con le sorgenti luminose esistenti non è semplice, soprattutto per i loro limiti attuali: non essere trasparenti, area emissiva ancora troppo piccola ed utilizzo di substrati rigidi. Nonostante ciò, i benefici potenziali degli OLED, soprattutto in termini di design, grazie alla possibilità di ridurre moltissimo gli spessori, promettono che questi dispositivi raggiungano un notevole successo commerciale (Figura 3) (Tabella 1).

I parametri chiave, e la loro standardizzazione, per utilizzare efficacemente gli OLED nel campo del *lighting* sono ampiamente discussi dalle industrie. I tre parametri che vengono riconosciuti più critici sono: il tempo di vita, la luminanza (quantità di luce prodotta) e l'efficacia. Altri parametri importanti includono: dimensioni, costo, qualità della luce (Color Rendering Index, CRI) e temperatura di colore [3].

- Tempo di vita: è il tempo che l'OLED impiega per raggiungere una certa percentuale della luminanza iniziale, di solito 50% (*lifetime* 50%, LT50) o 70% (LT70), a causa dei vari meccanismi di degrado. Per le applicazioni nel campo dell'illuminazione, è necessario un tempo di vita di almeno 10.000 ore al 70%; a lungo termine, si prevede di raggiungere le 100.000 ore di funzionamento.

- Efficacia: indica la quantità di luce emessa per ogni unità di potenza elettrica di alimentazione. Una efficacia bassa, ad es. intorno a $10 \div 20$ lm/W, può essere sufficiente per utilizzi di illuminazione decorativi; per essere competitivi con altri tipi di sorgenti luminose, sono richiesti almeno 50 lm/W.

- Dimensione: è l'area della superficie che emette luce. Il successo degli OLED dipende dalla scalabilità su grande area, partendo da almeno 10 cm^2 fino a molte centinaia di centimetri quadri ed oltre.

- Luminanza: è l'intensità di luce emessa per unità di area emissiva. Livelli bassi di luminanza, intorno a $100 \div 300 \text{ cd/m}^2$, possono essere sufficienti per applicazioni per gli interni di automobili; per l'utilizzo nella segnaletica, sono richiesti almeno 5000 cd/m^2 .

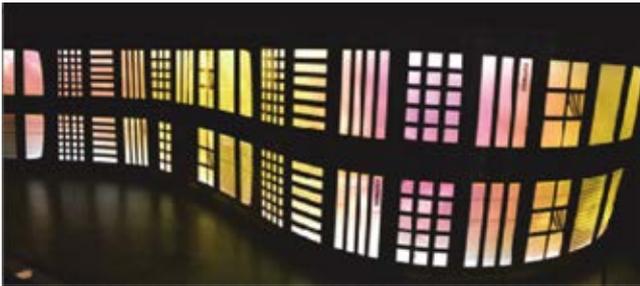


FIGURA 1 Esempio di OLED flessibili con processo di fabbricazione in tecnologia su nastro continuo (roll-to-roll)
Fonte: Fraunhofer COMEDD



FIGURA 2 Swarm - OLED per future applicazioni automobilistiche
Fonte: Audi AG

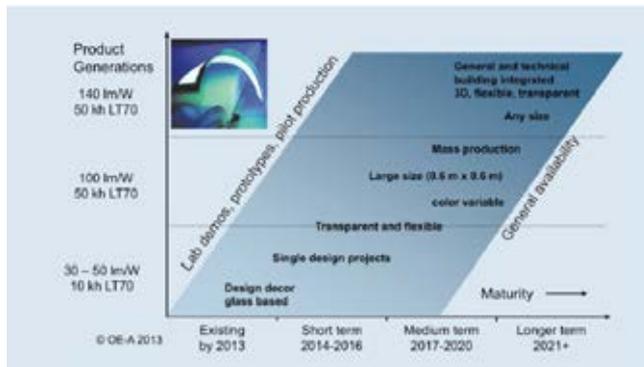


FIGURA 3 Roadmap delle applicazioni OLED lighting: sviluppo di differenti generazioni di prodotti, da medie ad alte prestazioni e larga area, e capacità di indirizzarsi verso differenti mercati
 Fonte: Holst Centre / Organic Electronic Association (OE-A) Roadmap 2013

PUNTI DI FORZA	DEBOLEZZE
Alta brillantezza Trasparenza - Larga area	- Tolleranza alla temperatura (ad es. 85 °C nell'auto) - Incapsulamento - Prestazioni - Tempo di vita - Costo
OPPORTUNITÀ	MINACCE
- Flessibilità - Omogeneità - Spessore - Specifiche lunghezza d'onda di emissione	- Prestazioni in miglioramento di LED - guide di luce

TABELLA 1 Analisi dei punti di forza e di debolezza, e delle opportunità e dei pericoli per la tecnologia OLED (SWOT analysis)
 Fonte: OE-A

- Costo: perché tali dispositivi vengano accettati in maniera diffusa dal pubblico, si valuta che il costo debba essere inferiore ad 1 euro/lm. Inoltre, per essere competitivi con altri approcci, il costo per unità di area deve essere inferiore a 500÷1000 euro/m².

Il limite maggiore attuale per la commercializzazione dell'OLED Lighting resta quello del tempo di vita e dei metodi per incrementarlo. I materiali utilizzati in un di-

spositivo OLED sono suscettibili di degradazione da parte di ossigeno e vapore acqueo atmosferici, pertanto è assolutamente necessario il loro incapsulamento, ovvero l'isolamento del dispositivo dall'aria. E mentre i metodi di incapsulamento degli OLED su vetro hanno trovato ormai una tecnologia standard di applicazione, l'incapsulamento di OLED su supporto flessibile è ancora alla ricerca di materiali barriera efficaci e di opportuni processi di produzione.

L'efficacia degli OLED potrà crescere notevolmente se si migliorano i metodi di estrazione della luce dal dispositivo luminoso, luce in parte persa per l'effetto guida d'onda causato dai differenti indici di rifrazione dei vari materiali che lo compongono.

Nel settore dell'illuminotecnica, che spinge al limite la creatività di architetti e designer, grazie a flessibilità, leggerezza e libertà di variare l'emissione luminosa, gli OLED rappresentano la più innovativa delle soluzioni. Non sono abbaglianti e non si riscaldano, come invece le più comuni lampade in commercio. Alcune proposte li vedono inglobati in specchi e finestre, a dare una sensazione di illuminazione sempre più versatile e vicina a quella naturale.

Per tali soluzioni, sono richieste sorgenti che emettano luce bianca. Purtroppo, non esiste un singolo materiale che emetta omogeneamente su tutto lo spettro, generando luce bianca, ma è necessario un accurato bilanciamento dell'emissione quasi monocromatica di diversi materiali (almeno due) al fine di ottenere il tono di bianco desiderato, sia esso "colorless" o "warm white" (secondo lo standard CIE 1931). Le principali problematiche degli OLED bianchi derivano da tre aspetti: difficoltà nella sintesi di materiali che presentino contemporaneamente emissione blu profonda e elevata stabilità; diversi tempi di vita ed efficienze dei singoli materiali emettitori nei diversi colori; elevatissime proprietà barriera richieste ai materiali utilizzati per l'incapsulamento, soprattutto se i dispositivi sono destinati all'utilizzo *outdoor*.

Poiché ciascun materiale ha una stabilità differente dagli altri, ciascun colore tenderà a degradare con velocità diversa. Inoltre, nelle applicazioni *lighting*, di solito un dispositivo viene stressato notevolmente, poiché sono richieste luminanze dell'ordine di 3000 cd/m² o più. Dunque, un effetto indesiderato che si verifica è legato al viraggio dell'emissione verso il rosso con il

tempo, dovuto alla più rapida degradazione dei cromofori di colore blu, che quindi nel tempo contribuiscono sempre meno allo spettro di emissione complessivo.

Per l'incapsulamento flessibile, sono allo studio strati barriera multistrato organico-inorganico, per bloccare la permeazione di ossigeno ed acqua. Tuttavia, non è ancora totalmente chiaro come superare questo problema, e molti gruppi di ricerca lavorano esclusivamente su tale problematica.

Grazie ai grossi investimenti in ricerca e sviluppo, alcune compagnie sono riuscite apparentemente a raggiungere dei risultati soddisfacenti, e sono ormai presenti commercialmente diversi prodotti destinati ad un mercato di alta fascia, con prezzi di acquisto elevati, essendo luminarie con un design unico. Le immagini che fino a pochi anni fa erano frutto di elaborazioni di grafica virtuale, oggi sono ambienti dimostrativi reali in cui sorgenti OLED vengono testate ed esposte (Figura 4). Dunque, le problematiche appena indicate, seppur importanti, rappresentano una sfida tecnologica accessibile al mondo

della ricerca e dell'industria, per materiali più stabili e sistemi di incapsulamento sempre più efficaci.

Come accennato, varie industrie sono impegnate nello sviluppo di OLED per illuminazione; tra le principali: Philips, OSRAM, Samsung, LG, General Electric, AUO, Lumiotec, Konica Minolta, Kaneka, Pioneer, Mitsubishi, NEC, Panasonic ecc.. Già alcune lampade OLED per illuminazione sono in commercio, ma si è ancora lontani dalla diffusione di massa di questi prodotti.

Nel 2009, la Philips è stata la prima compagnia a realizzare pannelli OLED *lighting*, chiamati Lumiblade. Philips stessa descrisse le lampade Lumiblade come "... sottili (meno di due millimetri di spessore) e piatte, con poca dissipazione, facilmente integrabili in qualsiasi oggetto e superficie, dalle sedie, ai tavoli, ai vestiti, ai muri, alle finestre, senza limiti per i designer ...".

Nel 2012, Philips ha presentato l'elica a pannelli OLED Lumiblade, in cui ciascun OLED è meno di 3,3 mm di spessore, largo circa 125 mm, ed emette 120 lm. Inoltre, sempre nel 2012, Philips ha mostrato un pannello illuminante, denominato Lumiblade

Reflections, composto da dozzine di OLED Lumiblade e di sensori all'infrarosso, disposti a formare uno specchio interattivo: quando una persona si pone davanti allo specchio, la sua posizione viene rilevata dai sensori, facendo spegnere gli OLED posti in corrispondenza dell'osservatore e lasciando accesi tutti gli altri, così circondando di luce l'immagine riflessa. Nell'aprile 2013, Philips ha avviato la commercializzazione di LivingSculpture, progettato da WHITEvoid con i pannelli Lumiblade, presentandolo a EuroLuce durante il Salone Internazionale del Mobile a Milano. Il design di questo avanzato sistema di illuminazione ha vinto il prestigioso Red Dot Product Design Award (Figura 5). Le aspettative di Philips erano quelle di avere pannelli per illuminazione Lumiblade decorativi, con 130 lm/W di efficienza per il 2018.

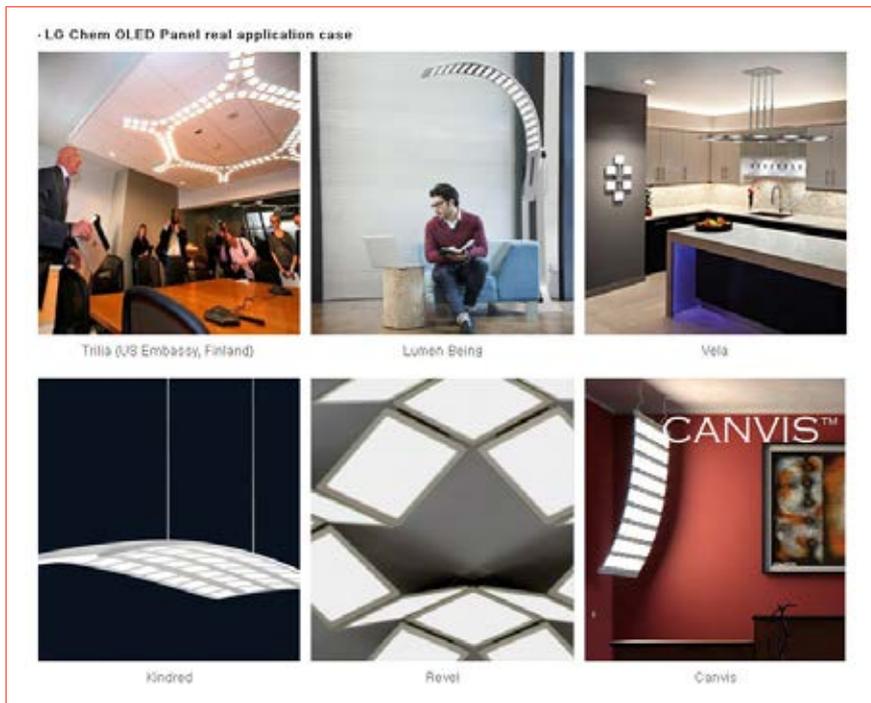


FIGURA 4 Esempi di applicazioni OLED lighting
Fonte: <http://www.lgoledlight.com>

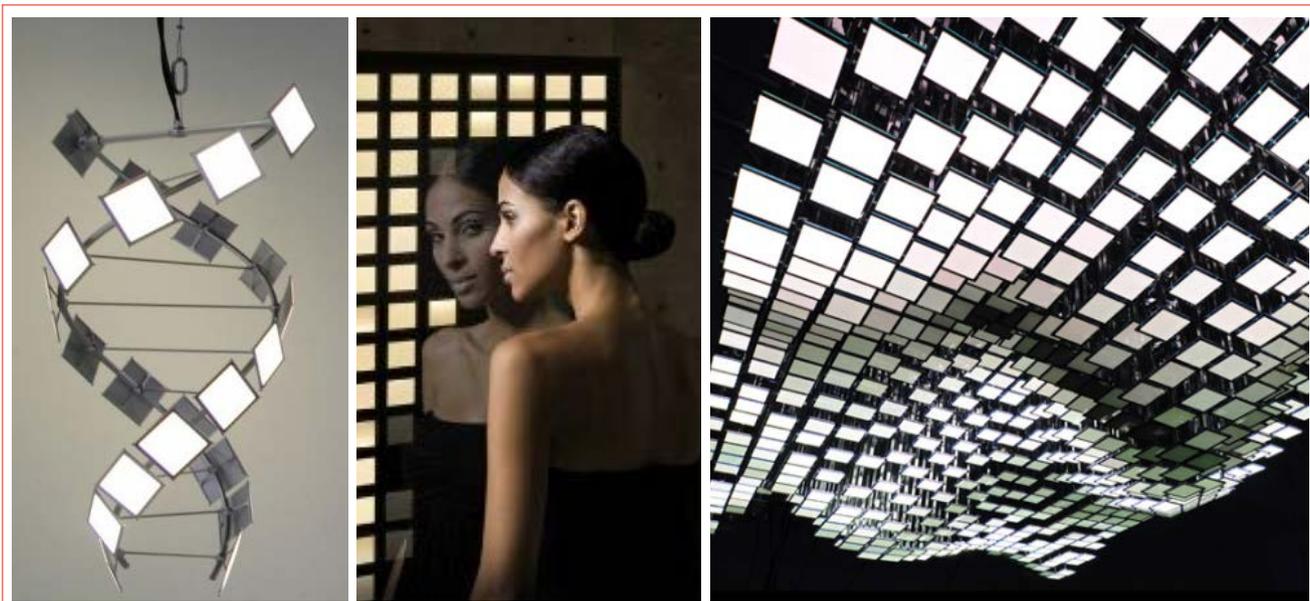


FIGURA 5 Sinistra: Composizione elicoidale di pannelli e lampade sospese Lumiblade OLED di Philips lighting GL 350, 2012. Centro: Specchio Philips Lumiblade Reflections, 2012. Destra: Philips / WHITEvoid LivingSculpture, 2013
Fonte: Philips

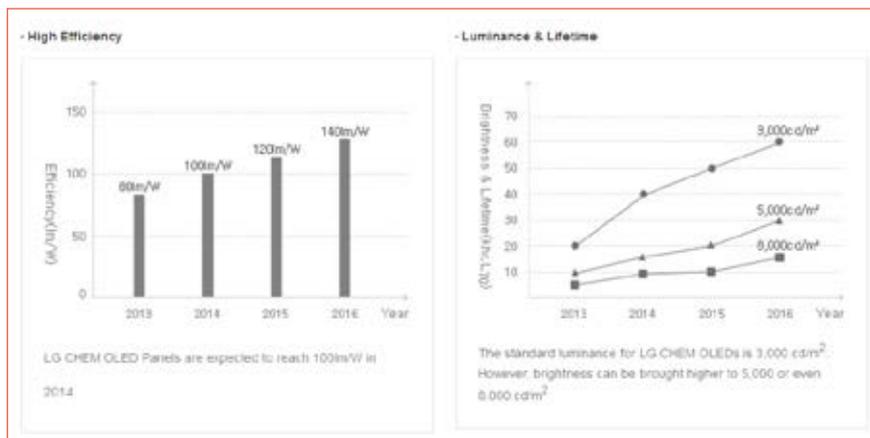


FIGURA 6 Efficacia, luminanza e tempo di vita di dispositivi OLED presentati da LG
Fonte: <http://www.lgchem.com/global/green-energy/oled-lighting>

Le previsioni legate ad efficienza, luminanza e tempo di vita proposte da LG, lasciano pensare che nel giro di pochi anni assisteremo ad un sostanziale incremento delle prestazioni degli OLED, che saranno quindi pronti ad una massiccia commercializzazione (Figura 6).

OSRAM offre una lampada OLED (OLED Reading Lamp) montabile facilmente in qualunque posizione, particolarmente adatta per la lettura. Essa viene garantita 5 anni, lasciando pensare che soluzioni ragionevoli alle problematiche sopra citate siano state trovate, con un costo appena inferiore ai 200,00 euro.

Numerosi centri di ricerca e aziende, inoltre, intraprendono la sperimentazione di linee pilota per processi su nastro continuo (*roll-to-roll*) per lo sviluppo di dispositivi OLED flessibili [4]. L'obiettivo è quello di ottenere, a

basso costo, prodotti altamente performanti e con tempi di vita soddisfacenti per le richieste del mercato. Questi target non sembrano più così lontani. Nel marzo 2014, Konika Minolta ha annunciato il lancio della prima produzione pilota di OLED bianchi su larga scala e con tec-



FIGURA 7 OLED con differenti colori di emissione
 Fonte: ENEA, Dip. Sostenibilità dei sistemi produttivi e territoriali, Divisione Tecnologie e processi dei materiali, Laboratorio Nanomateriali e Dispositivi

niche roll-to-roll compatibili (http://www.konicaminolta.com/about/releases/2014/0318_01_01.html). Tale stabilimento si prefigge di riuscire a produrre un milione di sorgenti OLED al mese, portando ad una riduzione sostanziale dei prezzi.

Gli annunci di varie aziende per il 2015 indicano prodotti con efficienza fino a 100 lm/W, luminanza di 5000 cd/m² e LT70 di 20.000 ore, mentre nel 2018 si conta di raggiungere 130 lm/W, 5000 cd/m² e 40.000 ore. Ciò indica che l'evoluzione dei prodotti OLED per illuminazione nei prossimi anni e l'incremento delle loro prestazioni saranno molto aggressivi, anche

per colmare il gap che attualmente queste sorgenti hanno rispetto ai più diffusi LED. Saranno sviluppati dispositivi di tipi diversi per una penetrazione differenziata sul mercato, con sorgenti ad altissime prestazioni e costi notevoli per applicazioni di design ad alto livello, accanto a lampade con prestazioni meno rilevanti ma anche più economiche, per una diffusione più larga sul mercato di massa.

Molte attività di ricerca e sviluppo sono in corso nel mondo, per superare gli attuali limiti di questa tecnologia: molti nuovi materiali sono allo studio sia per la generazione della luce, sia per l'incapsulamento, sia per ridurre il costo dei dispositivi, così come vari metodi innovativi di produzione per sorgenti a grande area e flessibili. Sebbene ci sia ancora molto lavoro da fare affinché il know-how sulla tecnologia OLED si diffonda, ci sono numerosi segnali che suggeriscono un importante



FIGURA 8 Sinistra: OLED utilizzati per illuminare piante in serre, per controllarne il benessere. Destra: Test di OLED sviluppati per illuminare un vano porta-verdure di un frigorifero
 Fonte: ENEA, Dipartimento Sostenibilità dei sistemi produttivi e territoriali, Divisione Tecnologie e processi dei materiali per la sostenibilità, Laboratorio Nanomateriali e Dispositivi



FIGURA 9 Logo ENEA realizzato con OLED su vetro e su plastica
 Fonte: ENEA, Dipartimento Sostenibilità dei sistemi produttivi e territoriali, Divisione Tecnologie e processi dei materiali per la sostenibilità, Laboratorio Nanomateriali e Dispositivi

impatto commerciale di queste sorgenti, che diventeranno una delle principali fonti luminose nei prossimi anni.

Nel Laboratorio Nanomateriali e Dispositivi del Centro Ricerche ENEA Portici, da oltre dieci anni si fa ricerca sugli OLED. Le attività principali riguardano il miglioramento dell'efficacia del dispositivo mediante l'utilizzo di materiali fosforescenti altamente emissivi e di architetture innovative, lo studio di materiali emissivi innovativi anche biodegradabili, lo sviluppo di metodi di estrazione luminosa per recuperare parte della luce persa a causa dei differenti indici di rifrazione dei materiali dell'OLED, e lo studio dei meccanismi di degrado dei dispositivi per incrementarne il tempo di vita. In particolare, per quest'ultimo aspetto, si utilizza un proprio layout brevettato per l'incapsulamento, e tecnologie innovative di deposizione di strati incapsulanti e/o barriera.

Il Laboratorio è in grado di realizzare OLED su substrati rigidi e flessibili (utilizzando metodi di fabbricazione che comprendono sia tecniche da ultra alto vuoto, con sistemi di deposizione integrati in *glove-box*, sia tecniche da soluzione, in ambienti con atmosfera inerte e non), e di caratterizzarne l'emissione a qualsiasi lunghezza d'onda, potendo preparare dispositivi con geometrie e dimensioni che vanno da pochi millimetri quadrati di area fino a circa 10 cm². Vengono realizzati OLED con emissione di luce bianca calda o fredda. I dispositivi incapsulati con vetro hanno un tempo di vita stimato di circa 10.000 ore, bassa tensione di accensione e raggiungono una luminanza di circa 50.000 cd/m² a 10 V (Figure 7, 8, 9).

Le applicazioni sviluppate puntano a soluzioni intelligenti ed ecosostenibili, come ad esempio le "smart windows", ad alta efficienza, e di grande area.

Oltre gli OLED, da poco è iniziata un'attività dedicata allo studio delle celle elettrochimiche ad emissione di luce (Light-Emitting Electrochemical Cell, LEEC) [5], dispositivi che si propongono quasi come successori degli OLED. Nel LEEC, il semiconduttore organico elettroluminescente è un materiale costituito da una coppia ionica, cioè è un materiale costituito di due parti, una su cui è concentrata una carica positiva, ed un'altra con carica negativa. L'uso di tali materiali semplifica notevolmente la struttura del dispositivo, che diventa a singolo strato, perché non è più necessario avere strati che iniettino e trasportino elettroni e lacune (Figura 10).

Lo strato emissivo dei LEEC contiene ioni mobili che sono in grado di muoversi verso gli elettrodi, anche ap-

plicando una bassa tensione. La riduzione e l'ossidazione degli ioni dello strato emissivo in prossimità degli elettrodi provoca un drogaggio, in particolare di tipo "p" vicino l'anodo, e di tipo "n" vicino il catodo. Le regioni drogate inducono un contatto ohmico con gli elettrodi facilitando l'iniezione di elettroni e lacune, che si ricombinano all'interfaccia tra le due regioni, analogamente ad una giunzione p-n. Come risultato, un dispositivo LEEC di questo tipo risulta operativo già a tensioni molto basse.

Anche i LEEC possono essere di due tipi, a seconda se il materiale organico emettitore sia un polimero o un composto a basso peso molecolare. Nel primo caso si ha un PLEEC (polymer-LEEC) e lo strato emettitore è costituito da tre componenti, un polimero elettroluminescente, un sale organico e un polimero semiconduttore; nel secondo caso si parla di i-TMC-LEEC (ionic Transition Metal Complex-LEEC) e lo strato emettitore è costituito da un solo componente, tipicamente un sale organico di un complesso di un metallo di transizione (Ir, Ru, Os).

Ad oggi, l'approccio i-TMC-LEEC è quello più studiato per l'applicazione nei display, in quanto unisce la semplicità del dispositivo a singolo strato, al fatto che tipicamente i complessi di metalli di transizione danno emissione per fosforescenza. Un caso particolare è rappresentato dai complessi dell'iridio che, per la peculiare struttura elettronica, sono caratterizzati da: a) transizioni a bassa energia di tipo metallo-ligando (MLCT); b) un'efficienza praticamente unitaria dell'*intersystem crossing* (ISC) dallo stato di singoletto eccitato allo stato di tripletto eccitato (Figura 11).

Nel complesso, questo porta i complessi dell'iridio a dare emissioni per fosforescenza molto intense e so-

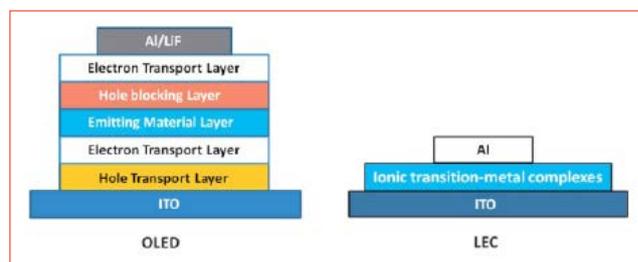


FIGURA 10 Confronto tra le strutture tipiche di (sinistra) un OLED e (destra) un LEEC [5]

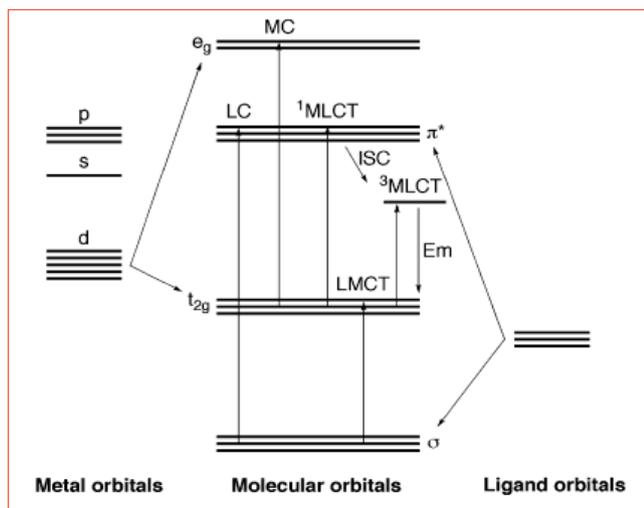


FIGURA 11 Diagramma degli orbitali molecolari per un complesso dell'iridio(III) a geometria ottaedrica distorta. In evidenza, le possibili transizioni energetiche [6]

prattutto significativamente modulabili in termini di colore. Selezionando opportunamente la tipologia di ligando e la natura dei sostituenti, è possibile modulare l'energia dell'HOMO e/o del LUMO, e quindi selezionare un preciso colore per l'emissione del materiale.

In tale contesto si inserisce l'attività di ricerca del Laboratorio Nanomateriali e Dispositivi in collaborazione con il Dipartimento di Scienze Chimiche dell'Università di Napoli "Federico II", rivolta alla sintesi di nuovi materiali fosforescenti bio-ispirati, basati su complessi di iridio(III) per applicazioni in dispositivi LEEC. Per tali complessi, si è scelto di utilizzare come leganti ancillari dei derivati ispirati ai precursori delle melanine, i pigmenti responsabili della colorazione di pelle, peli e delle iridi dei mammiferi. In particolare, utilizzando come base di partenza la dopamina (DA), è stato sintetizzato il ligando DHQ, che è stato utilizzato quindi per la sintesi del complesso cationico dell'iridio(III) [7] mostrato in Figura 12.

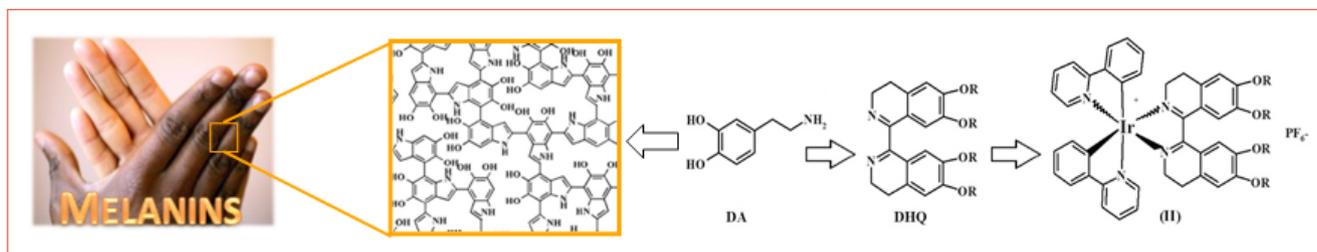


FIGURA 12 Realizzazione di nuovi complessi dell'iridio(III) fosforescenti bio-ispirati alle melanine, per applicazioni in dispositivi LEEC [7]

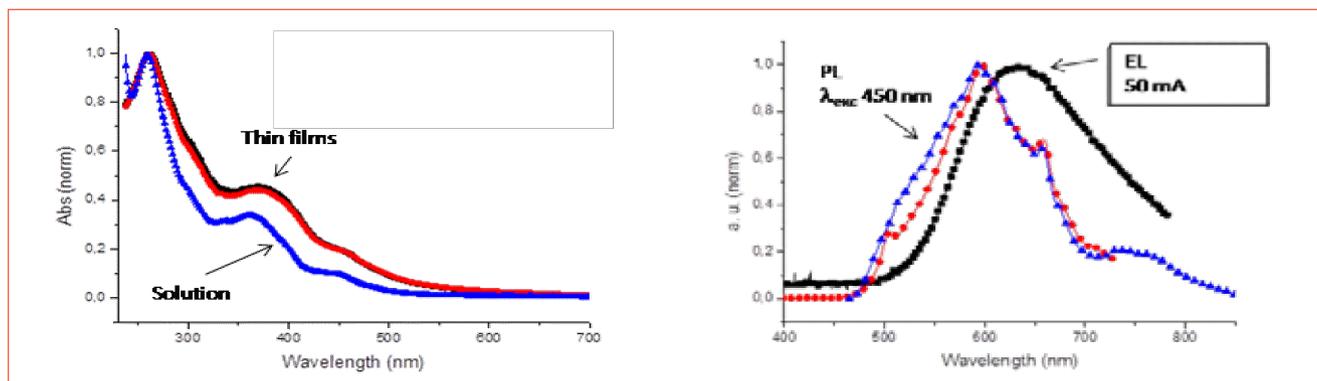


FIGURA 13 Spettri normalizzati di assorbimento, fotoluminescenza ed elettroluminescenza del complesso Ir(ppy)2DHQ sintetizzato
Fonte: Università di Napoli Federico II, Dipartimento Scienze Chimiche

Studi di fotoluminescenza, sia in soluzione sia per film sottili, hanno mostrato che tale complesso emette nel rosso a circa 600 nm. Test preliminari, condotti su un dispositivo di tipo LEEC con configurazione ITO / PEDOT:PSS / Ir(ppy)₂DHQ / Ag, hanno confermato l'emissione per elettroluminescenza nel rosso a 630 nm (Figura 13).

Il Laboratorio porta, quindi, avanti varie linee di attività sugli OLED, sui materiali, sui dispositivi e sui processi di fabbricazione, che trovano positivo riscontro nella collaborazione con varie aziende ed istituti di ricerca italiani ed europei, che si occupano sia di illuminazione ed incapsulamento, sia di materiali, sia di dispositivi e processi (Vimar, Electrolux, BTicino, Saes Getters, CNR, UniNA, UniSA, VIT, CEA, CNRS, Fraunhofer, COATEMA, EVG, OXFORD ecc.), e nel coordinamento di progetti di ricerca finanziati, di cui si ricordano, solo negli ultimi anni, il Laboratorio

Pubblico Privato TRIPODE/Progetto RELIGHT (Research For Light), ed il Progetto ALADIN (Industria 2015)-Sistemi di Illuminazione e Segnalazione intelligenti. Inoltre, il Laboratorio fa parte di organizzazioni internazionali, quali la Organic and Printed Electronic Association (OE-A) e il gruppo di illuminazione (WG4) della piattaforma tecnologica europea Photonics21, che costituiscono i riferimenti mondiali di questa tecnologia. ●

Maria Grazia Maglione¹, Salvatore Aprano¹⁻²⁻³, Paolo Tassini¹, V. Criscuolo¹⁻⁴, T. Prontera¹⁻⁴, Alfredo Rubino³, Paola Manini⁴, Carla Minarini¹

¹ LPP-TRIPODE / ENEA, Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e Territoriali, Laboratorio Nanomateriali e Dispositivi

² SESMAT Srl, San Giorgio del Sannio (Benevento)

³ Università di Salerno, Dipartimento Ingegneria Industriale, Fisciano (Salerno)

⁴ Università di Napoli "Federico II", Dipartimento Scienze Chimiche

abstract

Organic Light Emitting Diode for lighting applications

OLEDs (Organic Light Emitting Diodes) are opto-electronic organic devices that have been intensively studied in the last decades for lighting and display applications. This technology offers many advantages such as: wide active area, flexibility, very thin devices, efficiency, color tunability. Many companies and research institutes are dedicated to the development of OLEDs for lighting, also using innovative roll-to-roll fabrication processes for cost reduction.

In the Laboratory of Nanomaterials and Devices in the Portici ENEA Research Center, there is a ten years' experience on OLEDs. Main activities are: the improvement of the devices efficiency, the study of new electroluminescent materials, the development of light extraction methods, and the study of the devices degradation pathways.

Along with OLEDs, recently a new technology has been introduced in the Laboratory of Nanomaterials and Devices research activities: LEECs, Light Emitting Electrochemical Cells.

bibliografia

- [1] N. Thejo Kalyani et al, "Organic light emitting diodes: Energy saving lighting technology - A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012), 2696-2723
- [2] N. Kimura et al, "Development of Organic Light Emitting Diode (OLED) Driver for Automotive Components", *Oki Technical Review* 2007/Issue 211 Vol.74 No. 3
- [3] Organic and Printed Electronic Association (OE-A) - Roadmap 2013
- [4] J. W. Park et al, "Large-area OLED lightings and their applications", *Semicond. Sci. Technol.* 26 (2011) 034002
- [5] T. Hu et al, "Solid-state light-emitting electrochemical cells based on ionic iridium(III) Complexes", *J. Mater. Chem.* 22 (2012), 4206-4215
- [6] E. Baranoff, J.-H. Yum, M. Graetzel, Md. K. Nazeeruddin, "Cyclometallated iridium complexes for conversion of light into electricity and electricity into light", *J. Organometallic Chemistry* 694 (2009), 2661-2670
- [7] F. Neve et al, "Cationic Cyclometallated Iridium Luminophores: Photophysical, Redox, and Structural Characterization", *Organometallics* 23 (2004), 5856-5863



Film sottili per manipolare raggi di luce

La manipolazione dei raggi di luce avviene frequentemente facendo interagire tali raggi con la superficie di un materiale, come per un tipico specchio, o facendoli passare attraverso varie superfici costituite da strati di materiali diversi. Questi strati sono denominati film sottili in quanto il loro spessore è in genere comparabile con la lunghezza d'onda della luce. La luce può essere riflessa, trasmessa, assorbita nel modo voluto: si può eliminare la luce riflessa o rifletterla totalmente, si possono dividere o combinare raggi di luce di diverse lunghezze d'onda o con diverse direzioni e molto altro. Per ottenere il risultato desiderato bisognerà scegliere opportunamente il numero di strati e i materiali che li costituiscono. I fenomeni alla base di questa manipolazione della luce sono essenzialmente fenomeni di interferenza ed esistono specifici programmi di calcolo che consentono di progettare dispositivi ottici in grado di riflettere e trasmettere la luce in diverse zone dello spettro elettromagnetico. Le applicazioni sono molteplici sia per l'uso nella vita quotidiana sia per scopi più strettamente scientifici, come verrà descritto in questo articolo

DOI 10.12910/EAI2015-095

■ A. Piegari, A. Sytchkova

Introduzione

La tecnologia dei film sottili consente di modificare il comportamento mostrato da un materiale o da un dispositivo, a seguito dell'arrivo sulla sua superficie di un raggio di luce. In pratica si tratta di ricoprire il materiale di partenza con strati molto sottili (tipicamente con spessori minori del micron) costituiti da uno o più materiali aventi proprietà diverse. Questa tecnica trova applicazione in molti settori: meccanica, elettronica, ottica, ma le applicazioni in ottica hanno costituito il punto di partenza per lo sviluppo industriale dei film sottili e hanno determinato in gran parte il progresso tecnico nel settore.

Nel seguito ci si limiterà al campo dell'ottica, all'interno del quale ci sono comunque diverse aree di applicazione. Il fattore comune è la manipolazione della luce in-

cidente, dove il termine luce sarà esteso per comodità anche alla radiazione non visibile, in particolare ultravioletta e infrarossa.

A seconda dell'applicazione, lo spessore dei film sottili assume una diversa importanza, ma tipicamente tale spessore è un parametro fondamentale in ottica perché determina il cammino ottico dei raggi quando questi attraversano i vari strati, e influisce fortemente sul risultato finale essendo questo basato in gran parte su fenomeni di interferenza. Brevi accenni di teoria saranno riportati nel successivo paragrafo.

L'applicazione dei film sottili in ottica è nota da moltissimi anni, le trattazioni teoriche risalgono all'Ottocento e il primo riferimento a un rivestimento (*coating*) antiriflettente risale probabilmente a Fraunhofer alla fine dell'Ottocento.

La trattazione teorica si è andata perfezionando tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento (Fresnel, Poisson, Rayleigh, Abelès ecc.) e contemporaneamente sono state fatte varie realizzazioni pratiche sviluppando tecniche di tipo fisico e chimico.

Contact person: Angela Piegari
angela.piegari@enea.it



La vera crescita a livello industriale si ebbe però negli anni Quaranta in corrispondenza della Seconda Guerra Mondiale. Infatti, in quel periodo, ci fu un grande sviluppo di strumenti ottici (binocoli, telescopi ecc.) le cui prestazioni miglioravano notevolmente con l'uso di *coatings* antiriflettenti che consentivano di aumentare la trasmissione della luce.

Le applicazioni dei film sottili per ridurre la luce riflessa furono inizialmente quelle di maggior successo, ma si cominciarono anche a produrre specchi e filtri ottici basati sugli stessi principi di funzionamento.

Dopo la Guerra, la crescita del settore continuò velocemente, sia sviluppando nuovi *coatings* ottici sia ottimizzando le tecniche di fabbricazione e, in breve, una gran parte dei componenti ottici fu dotata di un *coating* a film sottile per migliorarne le caratteristiche di interazione con la luce, non solo nello spettro visibile ma anche nell'infrarosso.

Questo sviluppo fu trainato da alcuni settori applicativi quali la spettroscopia, l'astronomia, i laser e si rese necessario produrre specchi, ottiche polarizzanti, filtri passabanda, che furono realizzati mediante *coatings* multistrato sia metallici sia dielettrici.

Alcuni esempi in campi di applicazione molto diversi saranno descritti nel paragrafo "Alcune applicazioni", e le tecniche di deposizione di tipo fisico in uso saranno descritte nel paragrafo "Tecniche di fabbricazione". Alle applicazioni iniziali se ne sono aggiunte molte altre nel tempo e i nuovi sviluppi riguardano sia i materiali sia la struttura dei rivestimenti a film sottile, come sarà illustrato nel paragrafo "Nuovi materiali e recenti sviluppi".

Suggerimenti di letture per ulteriori approfondimenti sono riportati nella bibliografia [1-5].

Brevi nozioni teoriche

La manipolazione della luce viene in genere ottenuta facendo passare la radiazione attraverso una serie di superfici ottiche, in modo che sia riflessa, trasmessa, assorbita, fino a ottenere il risultato voluto, alle lunghezze d'onda di interesse. La quantità di luce trasmessa o riflessa dipende dalle proprietà ottiche dei materiali e per modificarla si possono cambiare le proprietà delle superfici suddette applicando dei *coatings* ottici a film sottile.

I materiali in uso sono tipicamente dielettrici, metallici o semiconduttori, dove questi ultimi vengono assimilati ai dielettrici per quanto riguarda il comportamento nell'ottica dei film sottili. I materiali dielettrici trasmettono la luce con poche perdite e il comportamento dei *coatings* dielettrici si basa essenzialmente su fenomeni di interferenza. I metalli riflettono la maggior parte della luce che arriva su di essi e, se il film metallico è molto sottile, una parte della luce lo attraversa ma viene fortemente attenuata. In qualche caso i film metallici possono trasmettere la luce in modo significativo a una particolare lunghezza d'onda e vengono usati nei rivestimenti interferenziali, come sarà mostrato in un esempio nel paragrafo "Alcune applicazioni".

I materiali a film sottile sono caratterizzati dall'indice di rifrazione n e dal coefficiente di estinzione k , che formano l'indice di rifrazione complesso ($n-ik$). Il coefficiente di estinzione è molto piccolo nei dielettrici mentre assume un valore significativo nei metalli e ad esso è legato il coefficiente di assorbimento $\alpha = 4\pi k/\lambda$, dove λ è la lunghezza d'onda.

Un altro parametro importante è lo spessore ottico, dato dal prodotto dell'indice di rifrazione n moltiplicato per lo spessore geometrico del film d . Infatti i fenomeni di interferenza che si ottengono quando il valore del prodotto nd è comparabile con la lunghezza d'onda della luce incidente λ , sono regolati dai cammini ottici dei raggi che vengono riflessi e trasmessi a ogni interfaccia. In Figura 1 sono rappresentate due interfacce parallele che corrispondono alle due superfici di un film sottile, con le riflessioni multiple dei raggi.

L'interferenza sarà di tipo costruttivo o distruttivo a seconda dell'ampiezza e della fase di questi raggi. Il risultato viene calcolato

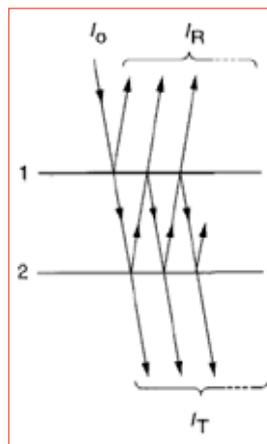


FIGURA 1 Raggi riflessi e trasmessi da un *coating* a film sottile sul quale arriva un raggio con intensità I_0 , la luce riflessa e trasmessa avrà rispettivamente intensità I_R e I_T

via computer utilizzando appositi software, la teoria si basa sulle equazioni di Maxwell e nel caso dell'interazione della luce con una struttura a film sottili ci sono dei metodi di calcolo appositi, che sono utilizzati da tali software.

I campi elettrici e magnetici sono calcolati attraverso una matrice di trasferimento caratteristica del *coating* a film sottili in esame, e alla fine si ottengono i valori di trasmissione e riflessione in funzione della lunghezza d'onda.

Il calcolo consente di ottenere tali valori anche in funzione dell'angolo di incidenza o dello spessore degli strati ed è inoltre possibile studiare l'effetto di variazioni dell'indice di rifrazione di uno o di vari strati sulla risposta spettrale del *coating* ottico.

Nel caso di particolari strutture non complesse, si possono usare semplici formule per prevedere il comportamento del *coating*.

Un esempio tipico è uno strato antiriflettente che, quando viene depositato su un materiale massivo (substrato) con indice di rifrazione n_s , ne annulla la riflessione alla lunghezza d'onda λ se il suo indice di rifrazione è $n_{film} = \sqrt{n_s}$ e il suo spessore ottico $n_{film}d = \lambda/4$ (che si indica come *spessore quarter-wave*). Infatti nel caso di un film con spessore *quarter-wave*, la formula che dà il valore della riflessione R a quella lunghezza d'onda è:

$$R = \left(\frac{1 - n_{film}^2/n_s}{1 + n_{film}^2/n_s} \right)^2 \quad (1)$$

dove l'indice di rifrazione dell'aria viene considerato uguale a 1.

Se invece si deposita un film che è *quarter-wave* a una certa lunghezza d'onda λ e ha indice di rifrazione più alto di quello del substrato, ad esempio $n_{film} = 2,5$ (e assorbimento nullo), su un vetro con $n_s = 1,5$, si avrà un valore di riflessione alto $R = 38\%$ a quella lunghezza d'onda di riferimento, che è il massimo ottenibile con tale film. Alle altre lunghezze d'onda si avrà una riflessione con un andamento oscillante tra un minimo e un massimo. Il minimo sarà uguale alla riflessione del substrato $R_s = [(1 - n_s)/(1 + n_s)]^2$ e ciò avviene alla lunghezza d'onda in cui lo spessore ottico del film è $n_{film}d = \lambda/2$ (*spessore half-wave*). Se invece si vuole uno specchio, è sufficiente depositare uno strato metallico che, se non è così sottile da lasciar passare la luce, si comporterà come un materiale massivo e la riflessione sarà:

$$R = \left[\frac{1 - (n - ik)}{1 + (n - ik)} \right]^2 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2)$$

dove $n - ik$ è l'indice di rifrazione complesso del metallo. In tal caso la riflessione non sarà determinata dall'interferenza ma dalle proprietà del materiale. Il coefficiente di estinzione nei metalli è in genere alto e ha un ruolo determinante.

Sono comunque pochi i casi in cui si possono ottenere prestazioni utili con un singolo strato e inoltre lo spessore degli strati non è sempre *quarter-wave* o *half-wave*, che sono le situazioni più semplici. Come si vede dalla formula (1), per ottenere un antiriflettente con un solo strato bisognerebbe avere un materiale con indice di rifrazione pari alla radice quadrata dell'indice del substrato, ma in natura è difficile trovarlo. Sono quindi necessari due strati per avere un antiriflettente a una singola lunghezza d'onda o più di due, se si vuole che funzioni su una larga banda, come ad esempio in tutto lo spettro visibile. Se si vuole realizzare uno specchio non metallico ma costituito da materiali dielettrici, sono tipicamente necessari oltre venti strati e le lunghezze d'onda a cui riflette sono limitate. In generale per ottenere le prestazioni volute, ad esempio per filtrare la luce a diverse lunghezze d'onda, si utilizzano vari strati, anche più di cento se necessario, di materiali diversi benché per motivi correlati alla fabbricazione si cerchi sempre di ridurre al minimo il numero di strati e di usare soltanto due o tre materiali, alternando film a indice di rifrazione alto e film a indice basso.

La luce che non viene riflessa, viene trasmessa se non c'è assorbimento. In generale la somma della luce riflessa R , trasmessa T , assorbita A e diffusa S è uguale all'unità:

$$R + T + A + S = 1 \quad (3)$$

Spesso la luce assorbita o diffusa viene considerata una perdita e, in alcuni casi, può portare anche al deterioramento del componente ottico, quindi si cerca di minimizzare queste quantità.

Il progetto di un *coating* ottico che in funzione della lunghezza d'onda abbia diversi comportamenti, ad esempio rifletta la radiazione ad alcune lunghezze d'onda e la trasmetta ad altre, si fa tipicamente via computer an-

che se l'esperienza è di grande aiuto per trovare la soluzione migliore. La soluzione non è in genere unica, ma ci sono varie strutture a film sottile che possono dare un risultato soddisfacente utilizzando diversi materiali e un diverso numero di strati. La scelta dipende anche da fattori che riguardano la realizzazione successiva del componente ottico e il suo utilizzo.

Ad esempio in alcuni casi i materiali metallici non sono adatti, sia per il loro assorbimento sia per la scarsa resistenza a specifiche condizioni d'uso.

La prima fase per la realizzazione di un *coating* ottico è quella del progetto a seguito di dettagliate richieste, poi segue la fabbricazione e infine i test di funzionamento. Le tre fasi sono comunque correlate in quanto in tal modo si può effettuare più correttamente la scelta dei materiali da utilizzare, in base alle loro proprietà reali che spesso dipendono dalla tecnica di fabbricazione (deposizione) e risultano diverse da quelle disponibili in letteratura.

Alcune applicazioni

Le applicazioni dei film sottili per manipolare la luce sono molte ed esempi del loro uso si trovano sia nella vita quotidiana sia in settori più tecnici, benché la distinzione non sia netta. Esempi del primo tipo sono gli occhiali antiriflettenti, le vetrate per edilizia, i filtri per l'illuminazione, gli schermi dei cellulari, i dispositivi anticontraffazione ecc. Nel secondo caso, tra i tanti esempi possibili, verranno descritte tre applicazioni che sono state studiate nei laboratori del Centro Ricerche ENEA Casaccia e che al momento della realizzazione non erano disponibili commercialmente.

Sorgenti laser

Come già accennato, lo sviluppo delle sorgenti laser ha dato un grande impulso alla realizzazione di ottiche a film sottile soprattutto per quanto riguarda gli specchi della cavità laser. Inizialmente questi specchi erano di tipo metallico per avere una elevata riflessione, nei laser però l'elevata riflessione è necessaria in genere a una sola lunghezza d'onda, e gli specchi dielettrici sono preferibili perché hanno minori perdite. In effetti nei laser di elevata potenza la luce assorbita dallo specchio può causare la sua di-

struzione. Gli specchi per laser sono comunque commercialmente disponibili anche con soglie di danneggiamento elevate, e tipicamente hanno un valore di riflessione uniforme sulla loro superficie.

Lo sviluppo effettuato nei laboratori della Casaccia negli scorsi anni ha riguardato particolari *coatings* ottici da usare come specchi di uscita di risonatori laser instabili, con lo scopo di migliorare la qualità del fascio di uscita. Questi specchi devono avere una riflessione non uniforme sulla loro superficie raggiungendo un valore massimo al centro che diminuisce gradualmente verso il bordo, con una simmetria circolare.

Per ottenere questo risultato il *coating* è formato da vari strati alternati di due materiali con spessore *quarter-wave* alla lunghezza d'onda del laser, tranne lo strato centrale che ha uno spessore non uniforme lungo il raggio dello specchio, come mostrato in Figura 2a. La variazione radiale di tale spessore viene calcolata in modo da ottenere una variazione radiale della riflessione che deve seguire un'equazione predefinita (gaussiana o altre).

L'effetto visivo di tale variazione, con simmetria circolare, si può notare nella parte centrale delle fotografie di due specchi a riflessione variabile, riportate in Figura 2b e 2c.

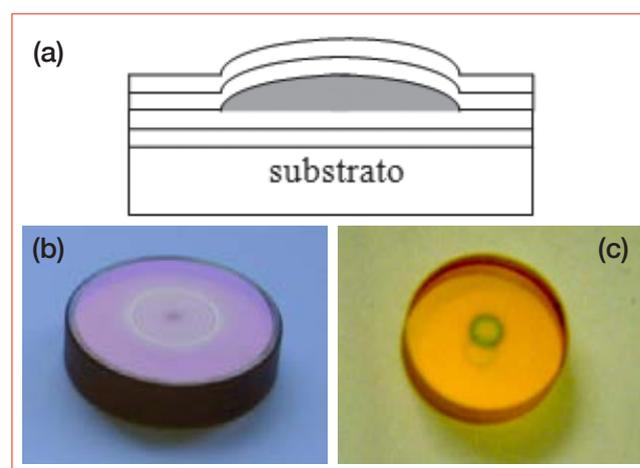


FIGURA 2 a) Sezione di un *coating* su un substrato di quarzo, con strati alternati di due materiali e con lo strato centrale radialmente variabile; b) e c) fotografie di due specchi supergaussiani per laser

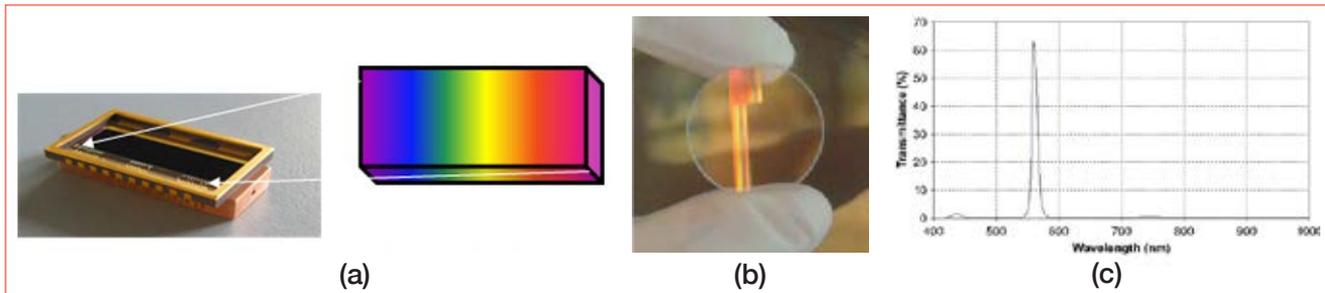


FIGURA 3 a) disegno di un filtro variabile accoppiato a un rivelatore CCD; b) fotografia di un filtro linearmente variabile realizzato in laboratorio; c) curva spettrale di un filtro di trasmissione a banda stretta corrispondente a una singola posizione sulla superficie del filtro variabile

Questi specchi sono stati realizzati mediante sputtering a radiofrequenza, una tecnica descritta nel seguito, usando apposite maschere introdotte nella camera da vuoto per ottenere lo strato con spessore variabile. Gli specchi sono stati fabbricati per varie lunghezze d'onda dall'ultravioletto all'infrarosso, corrispondenti a diverse sorgenti laser (XeCl, Nd:YAG, CO₂), con dimensioni del raggio da qualche millimetro ad alcuni centimetri, e utilizzando materiali diversi per ciascuna applicazione.

La misura delle prestazioni degli specchi è stata fatta utilizzando un fascio laser focalizzato (alla lunghezza d'onda di interesse) e muovendo il campione lungo il suo raggio per ottenere una misura radiale di riflessione. Inoltre è stata misurata la soglia di danneggiamento laser ed è stata anche analizzata la distribuzione radiale della fase.

Strumenti per lo spazio

L'applicazione dei rivestimenti a film sottili per le ottiche che si trovano all'interno di strumentazione per lo spazio, oltre alle prestazioni ottiche deve prevedere l'uso di questi componenti in particolari condizioni ambientali. Infatti nello spazio bisogna tener conto di escursioni termiche notevoli e dell'irraggiamento di protoni, elettroni, neutroni, oltre all'effetto della radiazione solare.

Una caratteristica comune a tutte le missioni spaziali è la riduzione del peso e delle dimensioni degli strumenti. Il tipo di *coating* qui descritto è stato sviluppato per uno strumento miniaturizzato da usare per le osservazioni della Terra dallo Spazio e in particolare

per la spettrometria d'immagine. A tale scopo è stato realizzato un filtro ottico di piccole dimensioni che, combinato con un rivelatore CCD (Figura 3a), potesse consentire la fabbricazione di un particolare sensore ottico da utilizzare come elemento principale di uno spettrometro. In tal modo si possono evitare le ottiche tradizionali (prismi, reticoli ecc.) e parti in movimento, e quindi ridurre peso e dimensioni dello strumento. Anche in questo caso, il *coating* ha caratteristiche variabili sulla superficie, in particolare si tratta di un filtro in trasmissione a banda stretta, il cui picco di trasmissione si sposta in modo lineare a diverse lunghezze d'onda, lungo una direzione sulla superficie del filtro stesso (nella direzione perpendicolare il filtro è uniforme).

Questa variazione appare visivamente come mostrato nel disegno di Figura 3a e nella fotografia di un filtro reale in Figura 3b. Nel grafico di Figura 3c è riportata la curva di trasmissione di un filtro metallo-dielettrico a 21 strati, con il picco di trasmissione centrato a una lunghezza d'onda specifica (560 nm). La lunghezza d'onda di picco viene fatta variare linearmente lungo la superficie del filtro stesso, nell'intervallo 440-950 nm, mediante la variazione dello spessore del *coating*. I materiali utilizzati sono ossido di silicio, ossido di tantalio e argento, e si è sfruttato un fenomeno detto di trasmissione indotta, in base al quale si riesce ad ottenere una elevata trasmissione dello strato metallico a una lunghezza d'onda definita, mediante un *matching* ottico opportuno del suo indice di rifrazione con il mezzo circostante.

Per la fabbricazione di questi componenti è stata usa-

ta la tecnica dello sputtering a radiofrequenza e, per ottenere la variazione spaziale dello spessore degli strati, è stato inserito all'interno della camera da vuoto un sistema di maschere mobili. Questa operazione risulta piuttosto complessa tenendo conto che i filtri hanno una dimensione di pochi millimetri nella direzione della variazione. Di solito i film sottili per ottica devono avere uno spessore uniforme su tutta la loro dimensione e gli impianti di produzione sono ottimizzati a questo scopo. Per applicazioni spaziali sono stati realizzati anche filtri ottici il cui problema principale era proprio ottenere una elevata uniformità su larghe superfici, ma non verranno descritti qui.

Per le applicazioni dedicate allo spazio sono stati eseguiti test a temperature criogeniche e con irraggiamento di particelle per osservare eventuali deterioramenti nelle loro prestazioni, e si è notato che alcune variazioni delle caratteristiche spettrali possono avvenire nell'ultravioletto a seconda dei materiali usati.

Opere d'arte

Un settore di largo interesse è quello dei beni culturali, anche in questo caso la tecnologia dei film sottili è utile per alcune applicazioni che riguardano la luce. L'esempio di seguito riportato ha come scopo sia la protezione sia la fruizione delle opere d'arte. È noto che le opere d'arte, in particolare i dipinti, possono subire deterioramenti dovuti all'illuminazione sia naturale sia artificiale. Lo scolorimento e l'ingiallimento

della carta esposta alla luce del sole sono facilmente osservabili. Lo scopo del *coating* da depositare sui vetri di protezione anti-vandalismo, posti davanti ai dipinti, è quello di eliminare dalla luce che illumina il quadro tutte le lunghezze d'onda non utili per la visione, cioè tutte quelle minori di 410 nm e maggiori di 680 nm.

Il taglio della radiazione ultravioletta viene spesso ottenuto mediante un foglio di plastica inserito tra due vetri, ma in questo modo si taglia soltanto la radiazione con lunghezza d'onda al di sotto di 380 nm e non si riduce la radiazione infrarossa.

La caratteristica addizionale del *coating* qui descritto è quella di ridurre le riflessioni della luce dovute al vetro che disturbano l'osservazione, soprattutto quando i colori del dipinto sono scuri. La funzione antiriflettente nello spettro visibile è anche utilizzata per gli occhiali o le vetrine ma con caratteristiche diverse. Nel caso delle opere d'arte bisogna combinare nello stesso *coating* varie funzioni: taglio di ultravioletto e infrarosso, antiriflettente nel visibile e non alterazione dei colori ad angoli di osservazione obliqui. È noto infatti che i *coatings* interferenziali cambiano la loro risposta in funzione dell'angolo di incidenza perché cambiano i cammini ottici dei raggi che attraversano i vari strati.

Esistono sul mercato *coating* dielettrici che tagliano ultravioletto e infrarosso e sono antiriflettenti nel visibile, ma sono dedicati ad altre applicazioni e cambia-

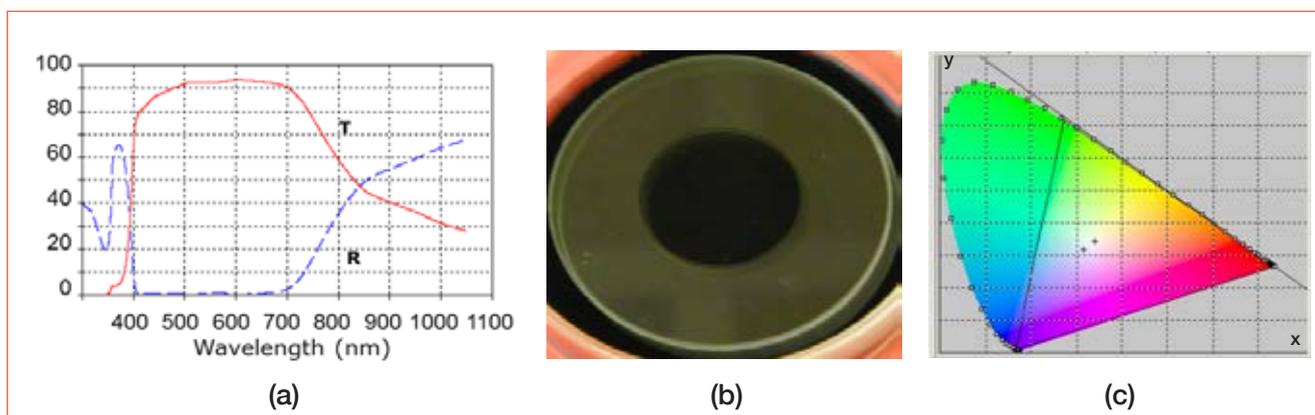


FIGURA 4 Riflessione R e trasmissione T spettrale del *coating* a otto strati; b) fotografia di un *coating* antiriflettente su vetro (area circolare centrale); c) diagramma CIExyz dove le crocette indicano le coordinate tricromatiche in riflessione e trasmissione a 35 gradi

no notevolmente colore con l'angolo di osservazione. Inoltre contengono più di cinquanta strati e quindi la realizzazione su larghe superfici risulta complessa. Lo scopo del *coating* proposto era quindi quello di ottenere tutte le funzioni richieste simultaneamente, con pochi strati.

La soluzione trovata comprende soltanto otto strati, e utilizza come materiali ossido di titanio, ossido di silicio e ossido di indio e stagno (ITO) che fa parte di una classe di materiali conduttori e trasparenti (TCO) e contribuisce a bloccare la radiazione infrarossa. Questo *coating* (brevetto ENEA) ha le caratteristiche spettrali riportate in Figura 4a con un taglio dell'ultravioletto e una riduzione dell'infrarosso e inoltre una funzione di antiriflettente nel visibile (Figura 4b) in grado di preservare la resa cromatica a un'osservazione obliqua, come si vede dal diagramma CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) riportato in Figura 4c.

Il prototipo è stato realizzato mediante evaporazione con fascio elettronico, una tecnica che si presta a fabbricazioni su grandi superfici. Il numero di strati ridotto rende questo *coating* di facile realizzazione a livello commerciale e utile per la protezione e la fruizione delle opere d'arte in musei, gallerie, esposizioni.

Tecniche di fabbricazione

Ci sono molti processi per la fabbricazione dei film sottili ma non tutti consentono un controllo dello spessore con l'accuratezza richiesta per le applicazioni ottiche. Per queste ultime si utilizzano in genere processi in vuoto, fisici o chimici, dove i film si formano da un materiale che condensa dalla fase vapore. I processi in vuoto comprendono la deposizione fisica da fase vapore (PVD) e la deposizione chimica da fase vapore (CVD). La differenza principale sta nel materiale di partenza e nel modo in cui viene creato il vapore. Nelle tecniche PVD il materiale che si vuole depositare è un solido (target), come ad esempio un ossido in polvere, sintetizzato o in granuli, che viene poi depositato sul substrato con diversi metodi. Nelle tecniche CVD si adoperano gas precursori e una reazione chimica avviene nella camera di deposizione prima che il materiale si condensi sul substrato.

Le tecniche PVD più consolidate e ampiamente usate sono lo sputtering e l'evaporazione termica. I *coatings* ottici nei laboratori della Casaccia sono prodotti con queste due tecniche; nelle Figure 5 e 6 sono mostrate le fotografie di un impianto di sputtering a radiofrequenza e di un impianto di evaporazione mediante fascio elettronico, con lo schema di funzionamento.

Lo sputtering è un processo energetico in cui il vapore viene prodotto mediante un "bombardamento" del materiale di partenza (target) con gli ioni accelerati di un gas con alto peso atomico, come ad esempio l'argon, che collidono con il target ed estraggono molecole in fase vapore.

L'eccitazione del gas di lavoro si ottiene mediante diversi tipi di sorgenti elettromagnetiche, come la generazione di un campo in continua (DC) o a radiofrequenza (RF) con il target operante come uno degli elettrodi, oppure tramite l'impiego di sorgenti particolari di ioni che vengono inviati direttamente verso il target (ion-beam sputtering). In alcuni casi si utilizza una seconda sorgente di ioni per bombardare il film durante la sua crescita (dual ion-beam sputtering), effettuando la cosiddetta assistenza ionica con lo scopo di migliorare le proprietà del film. Questo processo è in uso presso i laboratori della Casaccia assieme allo sputtering a radiofrequenza.

L'evaporazione è un processo diverso in cui le polveri del materiale di partenza vengono fatte evaporare mediante riscaldamento termico del materiale desiderato, posizionato in un crogiolo, oppure concentrando un fascio elettronico, generato da un cannone elettronico, sul materiale nel crogiolo.

Nel primo caso si parla di evaporazione termica, mentre il secondo tipo è noto come evaporazione a fascio di elettroni. Nei laboratori della Casaccia sono disponibili entrambi i sistemi. Il materiale evaporato può subire una parziale dissociazione e il film può risultare carente di qualche componente.

In questi casi si usa aggiungere un altro gas nella camera da vuoto e si parla di processi reattivi. Ciò è tipico per migliorare ad esempio la stechiometria dei film di ossidi, compensando in tal modo la mancanza di ossigeno. Inoltre in alcuni casi si usa il bombardamento ionico del film durante la crescita, per aumentare la densità del materiale del film che potrebbe presentare dei vuoti nella sua struttura.

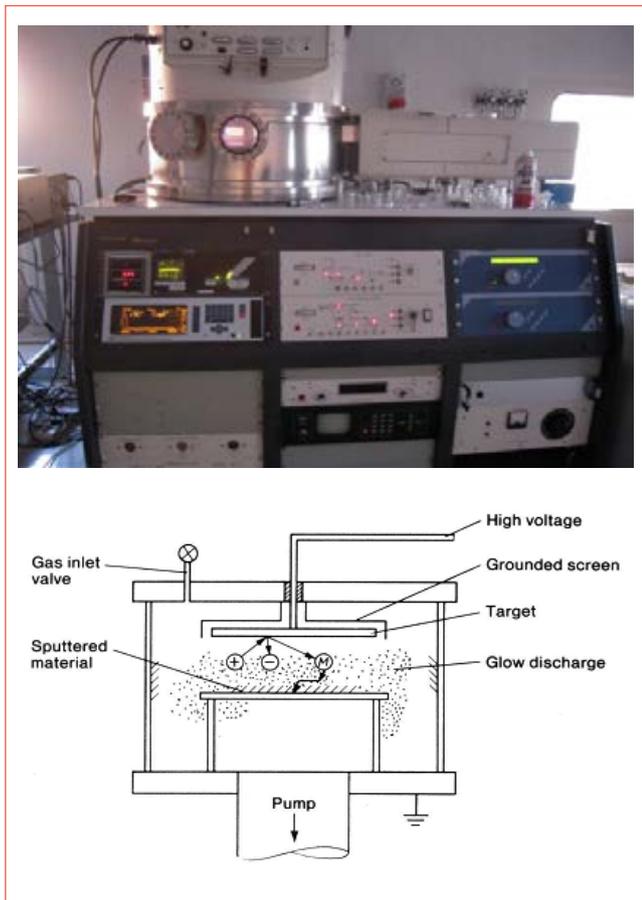


FIGURA 5 Impianto di sputtering a radio frequenza presso i laboratori del Centro Ricerche ENEA Casaccia e schema di funzionamento

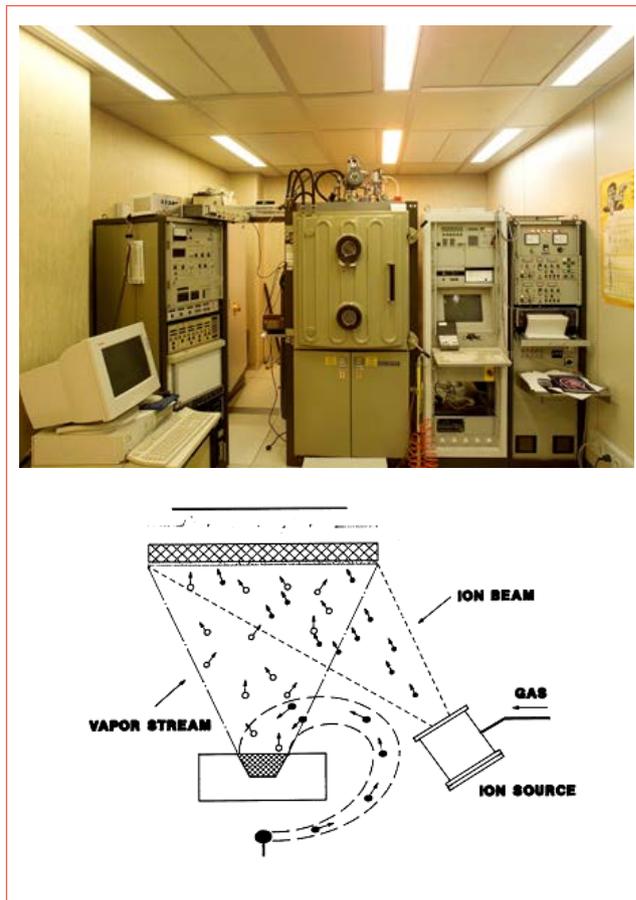


FIGURA 6 Impianto di evaporazione a fascio elettronico con assistenza ionica presso i laboratori della Casaccia e schema di funzionamento

Ogni tecnica di deposizione ha le proprie caratteristiche che possono costituire vantaggi o svantaggi a seconda dell'applicazione. Ad esempio, la velocità di deposizione relativamente alta, tipica dei processi di evaporazione, è una caratteristica positiva quando si tratta di un *coating* con alto numero di strati di spessori di centinaia di nanometri, come per le applicazioni nel visibile o infrarosso. In tal caso può essere tollerata una probabile imprecisione di qualche nanometro nello spessore degli strati, dovuta a un minore controllo del processo proprio a seguito della sua alta velocità. Se invece bisogna produrre un dispositivo con strati

aventi spessore di qualche nanometro, come per le applicazioni nell'estremo ultravioletto, la scelta del processo di produzione sarà prevalentemente orientata verso lo sputtering.

Tanti altri parametri influiscono sul processo di deposizione e quindi sulle caratteristiche finali dei singoli film e dei *coatings* risultanti. Nei laboratori della Casaccia tutti gli impianti di deposizione sono stati modificati adattandoli al tipo di dispositivo oggetto di studio e nella maggior parte di essi è stato inserito un controllo online delle caratteristiche ottiche del *coating* durante il processo di fabbricazione.

Nuovi materiali e recenti sviluppi

Come si può immaginare, più è ampia la gamma di possibili scelte dei materiali per i *coatings* ottici, più flessibile è il design, e maggiori proprietà di interesse si potranno ottenere dal *coating* stesso. Si può guadagnare sia in termini della risposta ottica sia in termini della combinazione delle proprietà ottiche con quelle morfologiche, elettriche, tribologiche e così via.

I materiali tradizionalmente utilizzati per i rivestimenti ottici sono quelli naturali inorganici e cioè gli ossidi dei metalli e semiconduttori, i nitruri, alcuni fluoruri, i metalli. Le loro specifiche costanti ottiche (costante dielettrica e conducibilità elettrica) sono parametri regolabili con la variazione delle condizioni di deposizione. Così l'opportuna aggiunta di alcuni gas nella camera da vuoto durante la deposizione o un trattamento post-deposizione può cambiare notevolmente le proprietà del film. Ad esempio un modo per mantenere lo stato di ossidazione di un ossido al valore desiderato consiste, come già detto, nel regolare la quantità di ossigeno nella camera da vuoto durante il processo di deposizione. Un altro esempio è il controllo di vacanze d'ossigeno negli ossidi conduttori trasparenti (TCO): l'aggiunta di una piccola percentuale d'idrogeno induce in un film di AZO ($ZnO:Al_2O_3$) una migliore mobilità e concentrazione delle cariche libere rendendolo quindi un TCO di migliore qualità. L'*annealing* dei TCO in condizioni appropriate può migliorare ulteriormente le loro prestazioni, grazie al cambiamento della morfologia del film e/o dello stato di ossidazione.

Il *tuning* del processo è quindi uno dei sistemi per potenziare la scelta possibile dei materiali per i film sottili dedicati ad applicazioni ottiche. La misura in cui è possibile indurre una variazione delle costanti ottiche dei materiali e delle loro proprietà meccaniche non può comunque superare il livello di qualche per cento, se si agisce solo sui parametri di deposizione e con un trattamento post-deposizione. La continua ricerca di perfezionamento delle prestazioni dei dispositivi ottici spinge i ricercatori a individuare modi per superare le limitazioni intrinseche dei *coating* tradizionali, non solo attraverso processi di deposizione sempre più controllabili e precisi, ma anche cercando di ampliare la scelta dei materiali che compongono il *coating* multistrato.

Un esempio tipico è il recente sviluppo nel campo dei rivestimenti anti-riflesso che è stato spinto dall'esigenza di realizzare un trattamento su materiali organici come le lenti polimeriche e quindi flessibili, con una buona adesione e con la funzione di antiriflesso per raggi provenienti da tante direzioni contemporaneamente. La soluzione proposta è stata quella di combinare il fenomeno dell'interferenza con la morfologia dello strato polimerico. Quest'ultimo, sottoposto al trattamento *etching* con il plasma, cambia e la sua superficie diventa molto rugosa con proprietà ottiche simili alla struttura dell'occhio della mosca come mostrato in Figura 7.

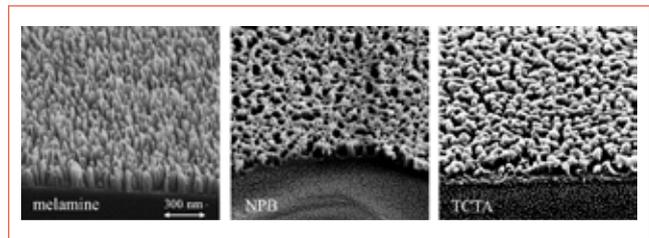


FIGURA 7 Immagini SEM di alcuni materiali polimerici trattati con il plasma
Fonte: Ulrike Schulz, "Hybrid Organic-inorganic Coatings for Optical Applications", *Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest -online- 2013*

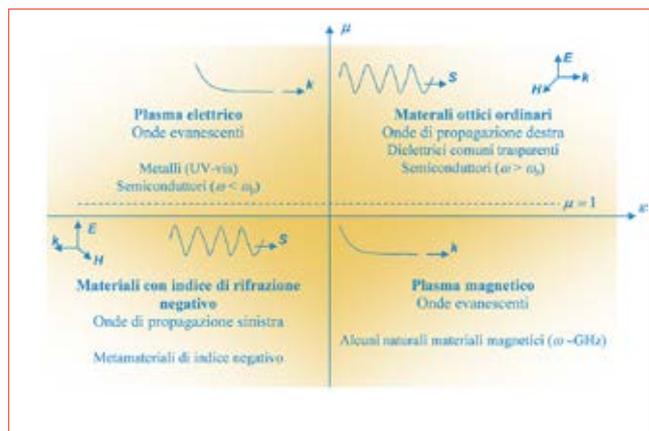


FIGURA 8 Classificazione dei materiali in base alle loro proprietà dielettriche e magnetiche. La linea tratteggiata corrisponde a materiali non magnetici $\mu=1$ (S è il vettore di Poynting)

L'inserimento degli strati polimerici nei *coatings* può renderli più flessibili meccanicamente e quindi ridurre la possibilità di distacco del rivestimento dal substrato. Questo è particolarmente vero per i *coatings* spessi, come ad esempio per le applicazioni nell'infrarosso.

Un metodo innovativo per ottenere valori delle funzioni ottiche inesistenti in natura è creare materiali particolari che abbiano una risposta effettiva alla luce come un insieme di "atomi" artificiali. Sfruttando il fenomeno di

risonanza plasmonica o del campo vicino in generale, è possibile ottenere un indice di rifrazione effettivo negativo, in natura inesistente (i cosiddetti metamateriali), per una limitata zona dello spettro (Figura 8). Tale argomento è troppo complesso per essere trattato in questo breve articolo, ma un'accurata bibliografia si può trovare in uno specifico capitolo del libro [3]. ●

Angela Piegari, Anna Sytchkova
ENEA, Dipartimento Tecnologie Energetiche,
Laboratorio ingegneria processi e sistemi per l'energia

abstract

Thin films for the manipulation of light

The manipulation of light is typically accomplished by a series of optical surfaces on which the incident beam is reflected, or through which the beam is transmitted.

Thin film coatings help to modify the behavior of such surfaces for obtaining the desired result: antireflection coatings to reduce reflection losses, high-reflectance mirrors, filters to divide or combine beams of different wavelengths, and many other types. The amount of light that is transmitted or reflected depends on the optical parameters of the materials and on interference phenomena in thin-film structures.

Dedicated software is available to design the proper coating for each requirement. There are several applications of optical thin films, many of them are useful in the everyday life, many others are dedicated to scientific purposes, as will be described in this paper.

bibliografia

- [1] J. A. Dobrowolski, (1994), Optical properties of films and filters, in M. Bass (Ed.), *Handbook of Optics (2nd ed.)*, McGraw-Hill, New York
- [2] H. A. Macleod, (2001), *Thin Film Optical Filters (3rd ed.)*, Institute of Physics Publishing, Bristol, Philadelphia
- [3] A. Piegari, F. Flory (2013) *Optical thin films and coatings*, Elsevier, Cambridge
- [4] H. K. Pulker, (1999), *Coatings on Glass (2nd ed.)*, Elsevier, Amsterdam
- [5] F. Flory (1995), *Thin Films for Optical Systems*, Marcel Dekker, New York

Manipolare impulsi di luce nello spazio-tempo

Presentiamo un breve riassunto di alcune tecniche originali sviluppate nel Centro Ricerche ENEA di Frascati che permettono di modulare in modo 'estremo' le caratteristiche spaziali e temporali della luce emessa dai sistemi laser, per rendere l'impulso laser spazialmente omogeneo, per raggiungere il limite di diffrazione e per ottenere impulsi con durata di appena un miliardesimo di secondo. In particolare, descriviamo i risultati sperimentali ottenuti applicando queste tecniche ai sistemi laser Eccimeri che emettono impulsi di luce ultravioletta. Queste tecniche hanno suscitato grande interesse e attenzione da parte di diversi Laboratori internazionali, e alcune di esse sono state brevettate

DOI 10.12910/EAI2015-096

■ S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, A. Torre

Introduzione

È sicuramente capitato a molti di noi di percepire l'annullamento della continuità del movimento in presenza di luci stroboscopiche, o di osservare come la luce emessa da una lampadina sia trasformata in un fascio direzionale quando viene posta nel fuoco di uno specchio parabolico, come nei fari delle automobili. In entrambi i casi, per ottenere il risultato desiderato è stata effettuata una manipolazione della luce, rispettivamente nel dominio del tempo e in quello dello spazio. In questo articolo riassumiamo alcune tecniche sviluppate in modo originale nel Centro ENEA di Frascati che permettono di modulare in modo 'estremo' le caratteristiche spaziali e temporali della luce emessa dai sistemi laser per rendere uniforme la distribuzione spaziale dell'intensità dei fasci di luce, per raggiungere il limite di diffrazione e per ottenere impulsi con durata di appena un miliardesimo di secondo. Alcune di queste

tecniche sono state brevettate e hanno suscitato grande interesse e attenzione da parte di diversi Laboratori internazionali.

Modulare la forma spaziale dell'intensità dei fasci di luce

Esistono molte applicazioni della luce, per esempio nei campi industriale e medico, come anche nell'ambito della ricerca, per le quali occorre distribuire in modo uniforme la radiazione luminosa su una data superficie. Contrariamente a quanto ci si possa aspettare, ottenere questo risultato non è semplice. Anche la radiazione coerente emessa da un laser spesso non soddisfa i requisiti più stringenti di uniformità spaziale e nettezza dei bordi del fascio. Se osservata su uno schermo o misurata su un piano perpendicolare alla propria direzione di propagazione, la radiazione laser presenta, infatti, una distribuzione spaziale di intensità spesso irregolare e decrescente allontanandosi dal centro del fascio. Lo possiamo osservare anche nel caso del laser Hercules dell'ENEA, uno dei laser ad

Contact person: Sarah Bollanti
sarah.bollanti@enea.it

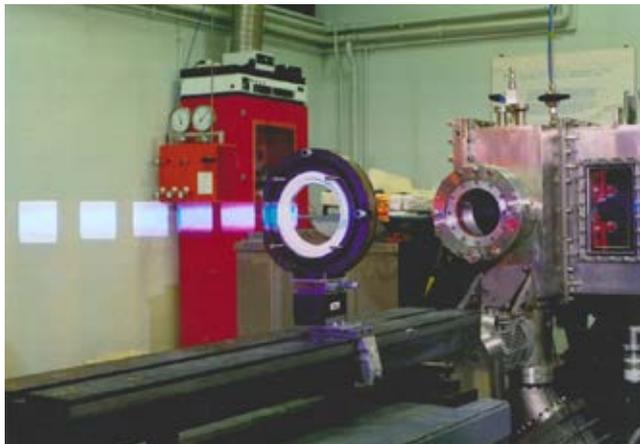


FIGURA 1 Sequenza di impulsi del laser Hercules a XeCl (cloruro di xenon), operante nei Laboratori ENEA di Frascati; gli impulsi ultravioletti sono visibili grazie alla fluorescenza da essi indotta su lastre di plexiglass
Fonte: ENEA

eccimeri con maggiore dimensione del fascio laser al mondo [1-3]. Nella foto della Figura 1 il fascio laser ultravioletto (invisibile al nostro occhio) è visualizzato grazie alla sua interazione con una successione di lastre di plexiglass, nelle quali la luce ultravioletta induce un'emissione bluastra. Sono così osservabili le "impronte" generate da diversi impulsi del laser, che rivelano qualitativamente le disuniformità nella distribuzione della radiazione.

Molti campi di applicazione richiedono una distribuzione di intensità laser altamente uniforme, pertanto è necessario ricorrere ad una manipolazione spaziale del fascio laser. A questo scopo sono stati sviluppati diversi metodi [4, 5], tra i quali il più diffuso consiste nel suddividere la sezione trasversa del fascio in tante sezioni più piccole, e nel farle sovrapporre sul piano di utilizzo. In questo modo le disuniformità dei vari fascetti si mediano e si annullano l'un l'altra. Questo sistema ottico viene chiamato "omogeneizzatore di fascio".

Nella versione più semplice, l'omogeneizzatore di fascio è costituito dalla combinazione di un "divisore", cioè una matrice di lenti sulla quale viene inviato il fascio, ed un "condensatore", un'unica lente che raccoglie tutti i fascetti generati dal divisore e li fa convergere, sovrapponendoli, sul suo piano focale, come illustrato nella Figura 2a.

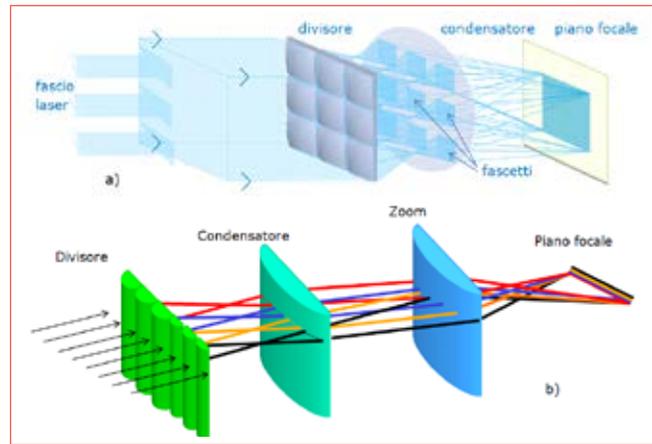


FIGURA 2 Schema di un omogeneizzatore di fascio:
a) omogeneizzatore di tipo tradizionale, con dimensioni finali del fascio fissate ed uguali per i due assi;
b) omogeneizzatore trasfocale brevettato da ENEA (mostrato relativamente ad un solo asse e con lenti del divisore di diversa dimensione), che permette di avere dimensioni finali del fascio variabili ed indipendenti per le due direzioni trasverse, e un grado di omogeneizzazione ottimizzato per le date caratteristiche del fascio in ingresso

Il sistema ottico omogeneizzatore si può rendere molto più efficiente e versatile. Si può ad esempio correggere localmente il livello di disuniformità del fascio laser, adottando dimensioni differenziate delle lenti del divisore, più piccole là dove maggiore è la disuniformità. L'omogeneizzatore può altresì essere progettato in modo che si possa variare con continuità la dimensione dello spot finale, regolando inoltre anche in maniera indipendente larghezza ed altezza, a seconda delle necessità della sua applicazione [6-8]. Tale omogeneizzatore, che prevede l'introduzione di un'ulteriore lente di 'zoom' dopo il condensatore, viene detto trasfocale. Entrambe le caratteristiche citate, adattamento alle disuniformità locali del fascio iniziale e possibilità di variare con continuità le dimensioni del fascio omogeneizzato, sono state ideate e brevettate dall'ENEA [9]. La possibilità di variare indipendentemente larghezza ed altezza del fascio omogeneizzato viene poi realizzata sostituendo lenti sferiche con lenti cilindriche operanti separatamente sulle due direzioni ortogonali. Un esempio di omogeneizzatore trasfocale con lenti cilindriche è mostrato nella Figura 2b.

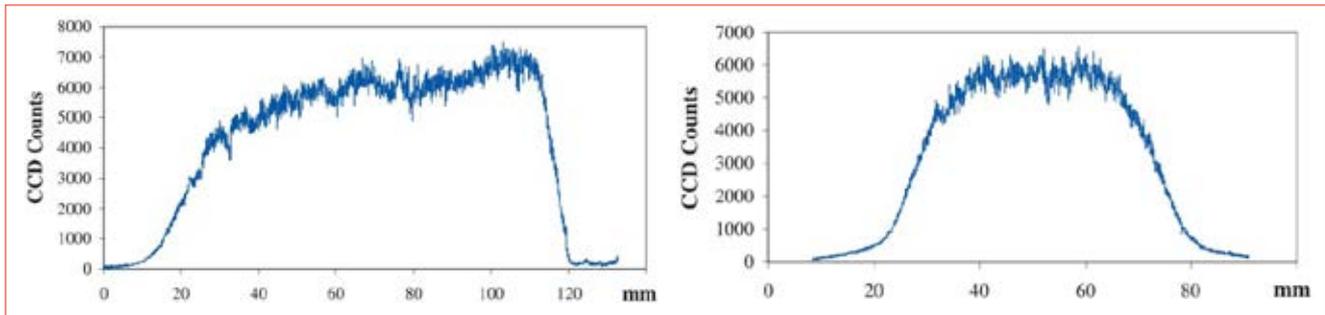


FIGURA 3 Profili di intensità del fascio del laser Hercules prima di passare nell'omogeneizzatore, sul piano ortogonale alla direzione di propagazione, lungo l'asse orizzontale (a sinistra) e verticale (a destra)
Fonte: [6]

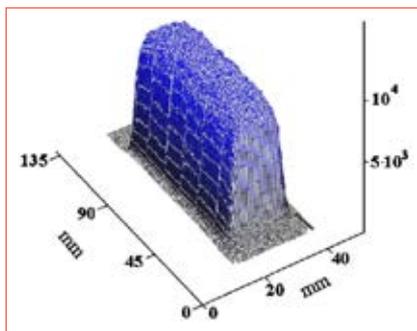


FIGURA 4 Profilo di intensità 3-D del fascio del laser Hercules, sul piano ortogonale alla direzione di propagazione, dopo l'omogeneizzatore ENEA
Fonte: [6]

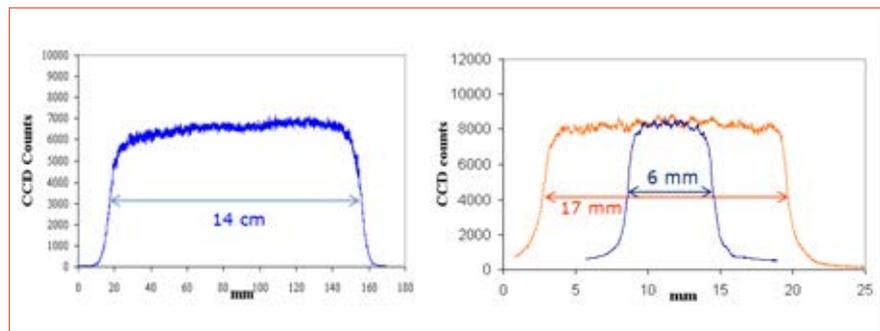


FIGURA 5 Profili di intensità del fascio del laser Hercules dopo l'omogeneizzatore ENEA, sul piano ortogonale alla direzione di propagazione, in orizzontale (a sinistra) ed in verticale per due diversi fattori di zoom (a destra). Da confrontare con gli analoghi profili del fascio laser in ingresso all'omogeneizzatore mostrati nella Figura 3
Fonte: [7]

Tornando al fascio del laser Hercules, per renderlo spazialmente uniforme è stato progettato e realizzato un omogeneizzatore che permettesse di variare la dimensione dello spot finale in una sola direzione, quindi con un'unica lente zoom cilindrica [6-7].

È stata effettuata una misura quantitativa della distribuzione spaziale dell'intensità del fascio prima del suo ingresso nell'omogeneizzatore, tramite una fotocamera CCD. Nella Figura 3 sono riportati i profili di intensità laser ottenuti nelle due direzioni orizzontale (al centro verticalmente) e verticale (al centro orizzontalmente).

Dopo aver fatto propagare il fascio attraverso l'omogeneizzatore ENEA, si ottiene la distribuzione di in-

tensità mostrata nella Figura 4 con rappresentazione in 3-D e nella Figura 5 tramite profili, con due diversi fattori di zoom per la direzione verticale. È evidente dal confronto tra la Figura 3 e la Figura 5 che l'uniformità della distribuzione spaziale di intensità del fascio e la ripidità dei suoi bordi sono nettamente migliorate.

Il fascio omogeneizzato del laser Hercules è stato utilizzato con successo in numerosi trattamenti superficiali, come, per esempio, la ricristallizzazione del silicio amorfo (finalizzata alla realizzazione di transistor a film sottile), la rimozione controllata di graffiti da diversi materiali (metalli, pietre, gomma), la pulizia e disossidazione dell'alluminio [10-12].

Modulare la focalizzabilità dei fasci di luce

C'è un'altra importante caratteristica della luce laser che si può notevolmente migliorare con un'opportuna manipolazione spaziale del fascio: il parallelismo durante la propagazione e quindi la focalizzabilità. In termini più scientifici, questa caratteristica dipende dalla regolarità del fronte d'onda del fascio laser in uscita dal risonatore (o cavità ottica) ed è quantificata tramite la divergenza intrinseca del fascio stesso. A differenza dell'uniformità spaziale, la divergenza intrinseca non è migliorabile una volta che il fascio laser è stato generato, a meno di non accettare di perdere una buona parte dell'energia del fascio stesso.

Per ottenere da un laser emissione di radiazione a bassa divergenza, quindi di alta qualità ottica, si deve allora intervenire nella fase iniziale di formazione del fascio all'interno del risonatore ottico, risonatore che deve introdurre alte perdite sui modi trasversi di oscillazione più divergenti. Tali risonatori sono detti instabili e sono stati oggetto di esteso studio e sviluppo nei Laboratori ENEA di Frascati. Nella Figura 6 vengono riportate come esempio una cavità instabile di tipo autofiltrante (SFUR) [13-15] e la sua generalizzazione (GSFUR),

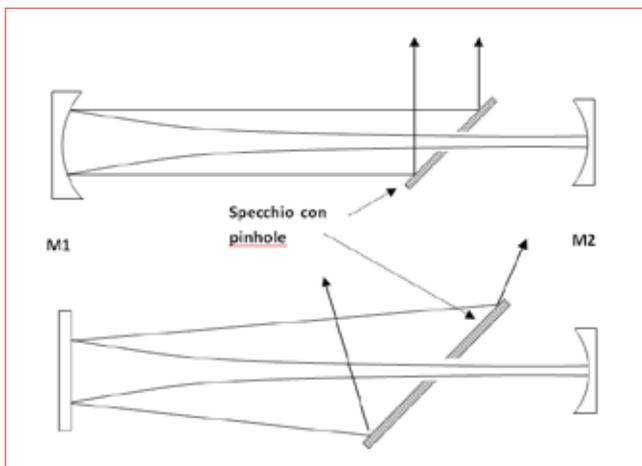


FIGURA 6 Schema di cavità instabile di tipo SFUR (sopra) e GSFUR (sotto). Nella realizzazione pratica di questi risonatori, il *pinhole* (forellino) è ricavato su di uno specchio totalmente riflettente inclinato di circa 45°, che opera come accoppiatore di uscita. M1 e M2 sono gli specchi del risonatore ottico totalmente riflettenti

quest'ultima ideata dal nostro Laboratorio per estrarre maggiore energia dal mezzo attivo mantenendo la stessa selezione dei modi trasversi [16, 17].

La presenza del *pinhole*, su cui gli specchi del risonatore focalizzano la radiazione intracavitaria, aiuta a selezionare rapidamente le componenti a più bassa divergenza, dato che solamente i raggi che si propagano pressoché paralleli all'asse ottico passano per il foro, la cui dimensione è scelta opportunamente.

La divergenza del fascio laser emergente dallo SFUR risulta vicina al limite teorico θ_{dl} dovuto alla diffrazione, determinato dalla dimensione trasversa del fascio D e dalla sua lunghezza d'onda λ :

$$\theta_{dl} = k \times \lambda/D,$$

dove il valore della costante k è compreso tra 1,27 (nel caso di profilo di intensità gaussiano) e 2,44 (profilo di intensità piatto, cosiddetto *top-hat*).

La determinazione sperimentale della divergenza θ di un fascio laser reale si effettua misurando la dimensione d dello spot generato da una lente di lunghezza focale f priva di aberrazioni, essendo le tre grandezze legate dalla relazione:

$$d = \theta \times f$$

Tuttavia, bisogna tenere presente che la misura della dimensione dello spot laser non è banale. Si può paragonare alla misura del diametro di un batuffolo di lana: così come il diametro del batuffolo cambia a seconda di quanto lo si stringe tra gli estremi di un calibro, così il diametro di uno spot laser dipende dagli estremi scelti sul profilo spaziale di intensità: prendere gli estremi del profilo dall'inizio della salita del profilo dell'intensità (valore zero) alla fine (sempre valore zero) sembra una buona idea ma non è fattibile, perché esiste sempre un rumore alla base del profilo che falsifica la determinazione del punto "zero". Convenzionalmente, in molti casi si scelgono come estremi i punti in cui il valore di intensità è pari a $1/e^2 = 0,135$ dell'intensità di picco, che garantisce di essere al di sopra dell'eventuale rumore di fondo. Il rapporto θ / θ_{dl} è un parametro pari a quante volte la divergenza del fascio laser è superiore al suo valore minimo, ed è denominato *Times Diffraction Limit* (TDL) [18].

Utilizzando una cavità instabile di tipo GSFUR, il laser ad eccimeri Ianus dei Laboratori ENEA di Frascati [19, 20] ha generato un fascio molto vicino al suo limite di diffrazione. Abbiamo misurato dapprima il profilo spaziale di intensità in uscita dal laser (*near field*), che è riportato in Figura 7a, necessario per determinare la divergenza minima ad esso associata, cioè quella limitata dalla diffrazione. Nella figura i punti sono i dati sperimentali e la curva continua ne è l'interpolazione con una funzione prodotto di convoluzione tra una gaussiana ed una funzione rettangolo [21]. Il minimo al centro della distribuzione è dovuto alla presenza del foro sullo specchio di uscita.

Successivamente è stata misurata la distribuzione spaziale di intensità del fascio di Ianus nel fuoco di una lente (*far field*) e confrontata con quella che avrebbe un fascio ideale al limite diffrattivo, quest'ultima ricavata in maniera immediata grazie alle particolari proprietà di propagazione della funzione utilizzata per l'interpolazione del *near field* [21]. Il risultato del confronto, riportato in Figura 7b, fornisce il valore TDL = 1.1, cioè la divergenza ottenuta è solo il 10% maggiore di quella minima teoricamente ottenibile. Si tratta di un risultato di eccezionale valore.

I fasci di luce laser a bassa divergenza sono altamente focalizzabili, per cui la potenza del laser può essere concentrata su superfici molto piccole. Questa condizione, se ottenuta su fasci laser di alta potenza, permette di raggiungere intensità molto elevate, fino a $>10^{20}$ W/cm² (nel caso

di impulsi ultracorti), aprendo la strada alla generazione ed allo studio di plasmi puntiformi e a tutte le applicazioni della radiazione emessa da questi ultimi [22-24].

Modulare la durata degli impulsi di luce laser

Sin dai primi sistemi laser impulsati realizzati intorno al 1960, si è presentata la necessità di poter variare la durata degli impulsi laser rispetto alla loro naturale lunghezza temporale (*free-running*) che varia di diversi ordini di grandezza, dai millisecondi alle decine di nanosecondi, a seconda delle caratteristiche di guadagno e di vita media dello stato eccitato del mezzo attivo. Moltissime tecniche sono state proposte da allora, ricordiamo (senza nostalgia) tra le prime un prisma posto all'interno del risonatore ottico, messo in rapidissima rotazione da un piccolo motore: la rapida rotazione del prisma permetteva all'impulso di luce propagantesi all'interno della cavità ottica di "vedere" entrambi gli specchi della cavità per un tempo brevissimo, "forzando" il mezzo attivo a generare l'impulso laser in quella breve finestra temporale, dopo aver accumulato una grande inversione di popolazione durante il periodo in cui il prisma, ruotando, era disallineato rispetto agli specchi. Si trattava della prima versione della tecnica cosiddetta a 'impulso gigante' (*Q-switch*), ed oltre alla difficoltà di ottenere risultati riproducibili, l'intenso ru-

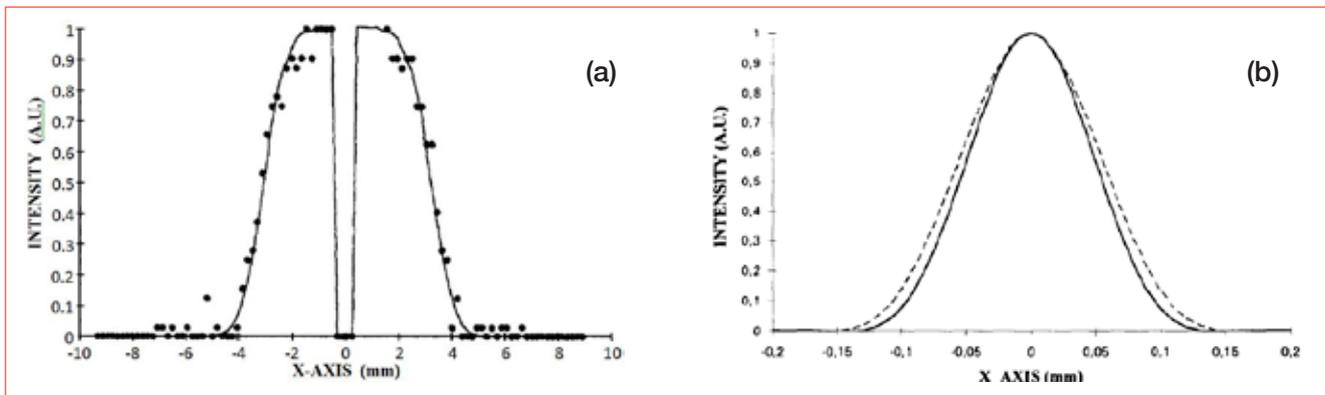


FIGURA 7 Profili spaziali di intensità del laser ad eccimeri Ianus equipaggiato con GSFUR: a) all'uscita del laser (*near field*), dove i punti sono i dati sperimentali e la linea continua la loro interpolazione; b) nel fuoco di una lente (*far field*), dove la linea tratteggiata è il profilo misurato sperimentalmente e quella continua è la distribuzione del fascio limitato per diffrazione
Fonte: [18]

more del motorino rendeva i ricercatori ipoacusici per periodi più o meno lunghi al termine degli esperimenti. Negli anni a seguire, le tecniche di accorciamento dell'impulso si sono raffinate, ma rimaneva il problema di generare una durata dell'impulso variabile a piacere a seconda delle esigenze: infatti, ciascuna tecnica proposta (*Q-switch* e *mode locking*, tra le più popolari) permetteva un accorciamento dell'impulso free-running ad un dato valore, non modificabile in modo semplice.

Partendo dai risultati della tecnica di auto-iniezione laser proposta alla fine degli anni 70 per laser a dye e a stato solido [25], in seguito perfezionata nel Laboratorio di Ottica Quantistica dell'Università di Roma [26], abbiamo sviluppato nel nostro Laboratorio Eccimeri una versione modificata di auto-iniezione [27, 28] che consente di ottenere impulsi laser ultravioletti di durata variabile da 2 ns a 12 ns, come descritto nel seguito.

In riferimento alla Figura 8, all'inizio la luce emessa dal mezzo attivo (AM) è sotto soglia di emissione laser, riempie tutto il risonatore e viene polarizzata linearmente dal polarizzatore P. La cella di Pockels (PC) è un cristallo KH_2PO_4 che ruota la polarizzazione della luce di una quantità che dipende dalla tensione applicata agli elettrodi posti intorno al cristallo [29].

Applicando una tensione tale da sfasare di un quarto di lunghezza d'onda i raggi straordinari e ordinari all'interno della PC (cioè trasformando la polarizzazione da lineare a circolare) per una durata uguale al tempo necessario alla luce per fare un giro completo del risonatore (ovvero $T_g = 2(L_1 + L_2)/c$, dove c è la velocità della luce), tutta la radiazione che all'inizio dell'impulso di tensione alla PC è contenuta tra PC e M2 viene espulsa dal

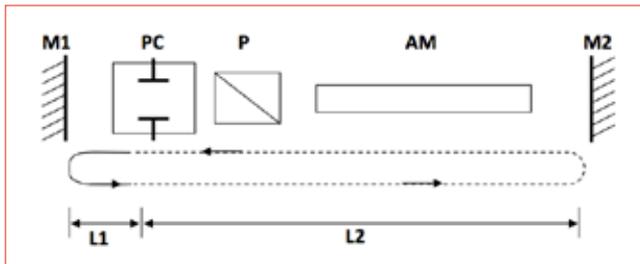


FIGURA 8 Schema del sistema laser auto-iniettato. AM è il mezzo attivo laser inserito nel risonatore ottico delimitato dai due specchi totalmente riflettenti M1 ed M2; P è il polarizzatore; PC è la cella di Pockels

polarizzatore P, perché passa due volte attraverso la PC e quindi la polarizzazione viene sfasata due volte di un quarto di lunghezza d'onda, ovvero la luce viene polarizzata linearmente in direzione perpendicolare rispetto alla polarizzazione iniziale [29]. Viceversa, la radiazione compresa tra PC ed M1 (Figura 8) passa solo una volta attraverso la PC, e quindi la polarizzazione circolare acquisita viene solo in parte espulsa da P.

La parte non espulsa è un "seme" di luce, di durata $2L_1/c$, che continua a propagarsi nel risonatore e viene amplificato dal mezzo attivo (Figura 9a) in modo molto efficace, perché gli specchi M1 ed M2 sono totalmente riflettenti, quindi non ci sono perdite. In pratica, è come se avessimo iniettato nel risonatore ottico un impulso di durata $2L_1/c$ proveniente da un laser esterno: in questo senso si parla di auto-iniezione.

Quando l'intensità raggiunge il valore massimo, un secondo impulso di tensione alla PC ruota la polarizza-

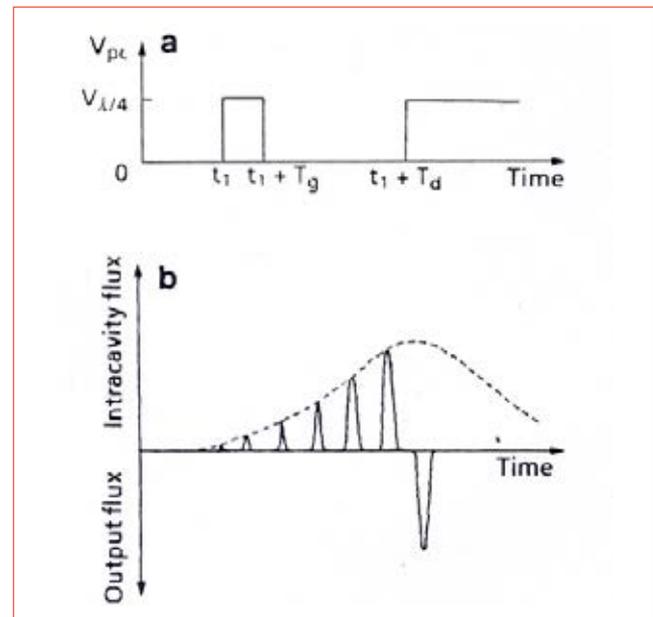


FIGURA 9 Schema di funzionamento elettro-ottico della tecnica di auto iniezione. a) Successione di impulsi elettrici applicati alla cella di Pockels. b) Corrispondente evoluzione dell'impulso laser all'interno del risonatore ottico. L'impulso estratto dal risonatore è disegnato 'negativo' per motivi di chiarezza grafica. Le scale temporali in a) e b) sono sincronizzate
Fonte: [28]

zione dell'impulso, che ha molte probabilità di trovarsi tra PC ed M2, perché $L2 \gg L1$ (Figura 8). L'impulso laser, trovandosi tra PC ed M2, attraversa due volte la PC acquisendo una polarizzazione lineare in direzione perpendicolare rispetto a P e quindi viene espulso da P, esce dal risonatore laser per essere utilizzato, vedi Figura 9b.

In questo modo, abbiamo estratto dal risonatore un

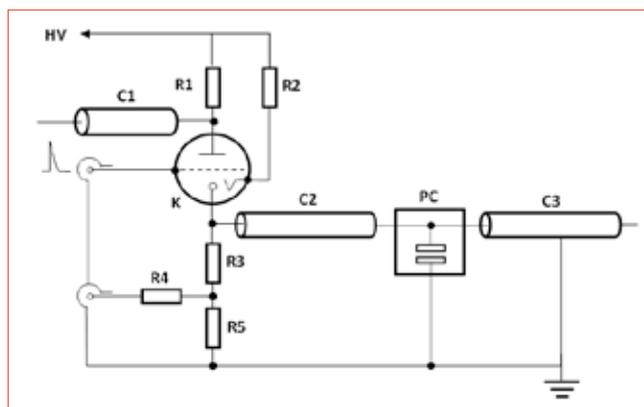


FIGURA 10 Schema del circuito elettrico in grado di generare impulsi elettrici di circa 1 kV con tempi di salita dell'ordine di 1 ns sulla cella di Pockels PC. C1, C2 e C3 sono cavi coassiali di lunghezza variabile; K è un krytron KN22 della EG&G; R1=11,8 M Ω ; R2=12,7 M Ω ; R3=40 Ω ; R4=40 Ω ; R5=12 Ω
Fonte: [27]

impulso di durata pari a $2L1/c$, molto più breve della durata free-running che è pari a $2N(L1+L2)/c$, dove $N \gg 1$ è un parametro che dipende dalla durata del guadagno sopra soglia del mezzo attivo laser. È chiaro che semplicemente variando $L1$ (vedi Figura 8) possiamo selezionare la durata degli impulsi laser a piacimento.

Tuttavia, quanto esposto è il principio di funzionamento ideale. Dallo schema in Figura 9, è chiaro che un impulso laser di durata pari a $2L1/c$ si ottiene solo se il tempo di salita dell'impulso di tensione è istantaneo. Per tempi di salita diversi da zero, la durata dell'impulso è sempre maggiore di $2L1/c$. Sorge quindi la necessità di realizzare un circuito in grado di applicare alla PC un impulso elettrico di circa 1kV con un tempo di salita più breve possibile. La Figura 10 mostra lo schema del circuito che abbiamo progettato e realizzato, e che ha generato impulsi elettrici da 850 V sulla PC con tempo di salita 10%-90% di 1 ns.

Durante il tempo di salita di un nanosecondo la luce si propaga per 30 cm, e la polarizzazione della luce che passa nella PC viene ruotata a valori intermedi, quindi viene espulsa dal polarizzatore P in percentuali variabili col tempo, e le perdite possono essere quantificate solo da un accurato codice di calcolo che simula l'evoluzione temporale dell'impulso laser al variare dei diversi parametri geometrici del risonatore, del valore e del momento di applicazione della tensione alla PC, e dei tempi di salita della stessa tensione. I risultati del

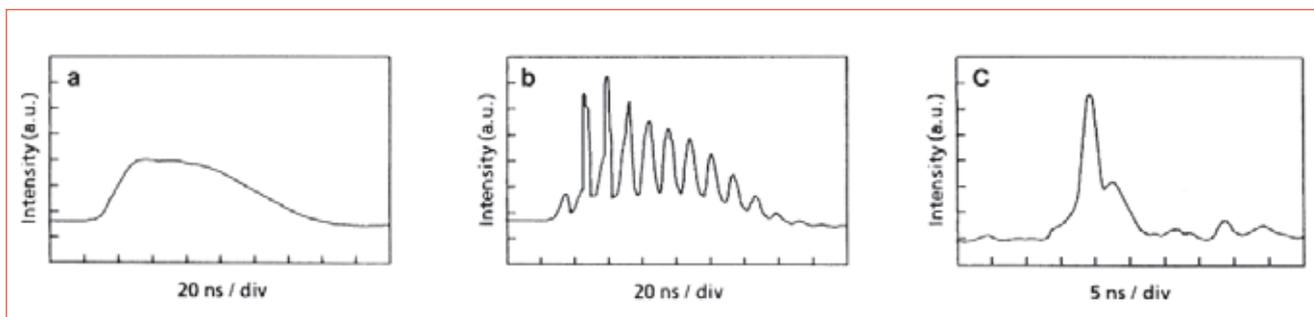


FIGURA 11 Evoluzione temporale dell'impulso laser all'interno del risonatore in diverse condizioni. a) Quando la PC è spenta (free-running). b) Quando viene applicato alla PC il primo impulso di tensione ma non il secondo per estrarre l'impulso laser, vedi Figura 8a. c) Impulso laser estratto. Bisogna tenere conto che la durata temporale degli impulsi è integrata dal tempo di salita di 2,2 ns del sistema di rivelazione (fotodiodo + cavo coassiale + oscilloscopio). Dopo opportuna deconvoluzione, la 'vera' durata dell'impulso laser in c) risulta pari a 1,8 ns a metà altezza
Fonte: [28]

codice di calcolo che abbiamo sviluppato [28] hanno permesso di ottimizzare le prestazioni della tecnica di auto-iniezione applicata ad un laser eccimero XeCl, ottenendo tra l'altro risultati sperimentali in ottimo accordo con le previsioni teoriche. Abbiamo generato impulsi laser di durata variabile tra 1,8 ns e 12,1 ns, con energia associata all'impulso variabile tra 4 mJ e 7 mJ, ed un aumento di intensità di picco rispetto al free-running pari a 3.

La Figura 11 mostra le tipiche evoluzioni temporali

dell'impulso laser all'interno del risonatore a PC spenta, a PC attivata ma senza estrazione dell'impulso, e un impulso laser di uscita dal risonatore (*cavity-dumped*) (vedi anche la Figura 9b). ●

Sarah Bollanti, Paolo Di Lazzaro, Francesco Flora, Luca Mezi, Daniele Murra

ENEA, Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare, Laboratorio sorgenti, antenne e diagnostiche

Amalia Torre

ENEA, Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare, Laboratorio teoria, simulazione e modellistica

abstract

Space- and time-modulation of light pulses

We present a brief summary of some original techniques developed at the ENEA Frascati Research Center that allow modulating the spatial and temporal characteristics of the light emitted by laser systems, to make homogeneous the spatial distribution of the laser intensity, to reach the diffraction limit and to obtain pulses with duration down to billionth of a second. In particular, we describe the experimental results obtained by applying these techniques to Excimer lasers emitting ultraviolet light pulses. Some of these techniques have been patented and attracted great interest and attention from various international laboratories.

bibliografia

- [1] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Hermesen, T. Letardi, C. E. Zheng (1990), "Performance of a ten-liter electron avalanche discharge XeCl laser device", *Appl. Phys. B*, 50, 415-423
- [2] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, T. Letardi, N. Lisi, C. E. Zheng (1992), "Space and time resolved discharge evolution of a large volume x-ray triggered XeCl laser system", *Appl. Phys. B*, 55, 84-91
- [3] T. Letardi, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, N. Lisi, C. E. Zheng (1992), "Some design limitations for large-aperture high-energy per pulse excimer lasers", *Il Nuovo Cimento D*, 14, 495-507
- [4] F.M. Dickey, S.C. Holswade (2000), *Laser Beam Shaping: Theory and Techniques*, M. Dekker, New York, Basel
- [5] F.M. Dickey "Laser Beam Shaping", *Optics and Photonics News*, 14, 30-35 (2003)
- [6] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra, E. Tefouet Kana and G. Felici, "Edge steepness and plateau uniformity of a nearly flat-top-shaped laser beam", *Appl. Phys. B*, 78, 195-198 (2004)
- [7] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra, "More about the light beam shaping by the integration method", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 28, 179-186 (2004)
- [8] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra, "Performance of a zoom homogenizer for reshaping coherent laser beams", *Opt. Comm.*, 264, 174-179 (2006)
- [9] D. Murra, S. Bollanti, P. Di Lazzaro (2000), "Sistema ottico per la omogeneizzazione spaziale di fasci di luce, con uscita a sezione variabile", Brevetto No. IT01316395, U.I.B.M.; D. Murra, S. Bollanti, P. Di Lazzaro (2003), "Optical system for homogenization of light beams, with variable cross-section output", United States Patent No. US 6,639,728
- [10] A. Pecora, R. Carluccio, L. Mariucci, G. Fortunato, D. Murra, S. Bollanti, P. Di Lazzaro (2003), "Observation of super lateral growth in long pulse (170 ns) excimer laser crystallization of a-Si", *Thin Solid Films*, vol. 427, pp. 319-323
- [11] P. Di Lazzaro, D. Murra, S. Bollanti (2006), "Rimozione di graffiti mediante tecnologia laser", *Trattamenti e Finiture*, vol. 2, Aprile 2006, pp. 70-77, Tecniche Nuove Editore, Milano
- [12] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra, M. Piccinini (2006), "Pulizia e disossidazione di alluminio mediante irraggiamento laser", *Trattamenti e Finiture*, vol. 6, ottobre 2006, pp. 66-71, Tecniche Nuove Editore, Milano
- [13] P. G. Gobbi, S. Morosi, G. C. Reali, and Amin S. Zarkasi (1985), "Novel unstable resonator configuration with a self-filtering aperture: experimental characterization of the Nd:YAG loaded cavity", *Applied Optics*, vol. 24, Issue 1, pp. 26-33

- [14] V. Boffa, P. Di Lazzaro, G. Gallerano, G. Giordano, T. Hermsen, T. Letardi, C.E. Zheng (1987), "Self-filtering unstable resonator operation of XeCl excimer laser", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 23, pp. 1241-1244
- [15] R. Barbini, A. Ghigo, A. Palucci, S. Ribezzo (1988), "Line tunable tea CO₂ laser using SFUR configuration", *Opt. Comm.*, vol. 68, Issue 1, pp. 41-44
- [16] P. Di Lazzaro, T.W.P.M. Hermsen, C. Zheng (1988), "A generalization of the self-filtering unstable resonator", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 24, Issue 8, pp. 1543-1547
- [17] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra, C.E. Zheng (2002), "More about the self-filtering unstable resonators", *Opt. Comm.*, vol. 209, pp. 383-389
- [18] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra (1997), "How many times is a laser beam diffraction-limited?", *Opt. Comm.* 134, 503-513
- [19] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, T. Letardi, D. Murra, C. Petrucci, O. Uteza (1996), "Study of a compact three-electrode oscillator-amplifier excimer laser system", *Opt. Comm.*, 132, 565-573
- [20] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. Giordano, T. Letardi, G. Schina, C.E. Zheng (1998), "lanus, the three-electrode excimer laser", *Appl. Phys. B*, 66, 401-406
- [21] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, D. Murra, A. Torre, C.E. Zheng (2005), "Propagation of doughnut-shaped super-Gaussian beams, convolution theorem and Hankel transform", *J. Mod. Opt.*, vol. 52, n. 4, pp. 551-561
- [22] S. Bollanti et al. (1998), "Soft X-ray plasma source for atmospheric-pressure microscopy, radiobiology and other applications", *Il Nuovo Cimento D*, vol. 20, pp. 1685-1701
- [23] S. Bollanti, F. Bonfigli, E. Burattini, P. Di Lazzaro, F. Flora, A. Grilli, T. Letardi, N. Lisi, A. Marinai, L. Mezi, D. Murra, C. Zheng (2003), "High-efficiency clean EUV plasma source at 10-30 nm, driven by a long-pulse-width excimer laser", *Appl. Phys. B*, vol. 76, pp. 277-284
- [24] S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, A. Torre (2008), "First results of high-resolution patterning by the ENEA laboratory-scale extreme ultraviolet projection lithography system", *EPL*, vol. 84, 58003-p1-58003-p5
- [25] Y.S. Liu (1979) "Nanosecond pulse generation from a self-injected laser-pumped dye laser using a novel cavity-flipping technique", *Optics Letters*, vol. 3, pp.167-169
- [26] C.H. Brito Cruz, E. Palange, F. De Martini (1984) "A study of the self-injected laser for subnanosecond pulse generation", *Applied Physics B*, vol. 35 pp. 95-104
- [27] P. Di Lazzaro, F. Flora, A. Gerardino, T. Letardi (1993) "XeCl excimer laser system with a continuously tunable output pulsewidth", *Optics Communications*, vol. 95, pp. 336-344
- [28] P. Di Lazzaro, F. Flora, A. Gerardino, T. Letardi (1995) "The self-injected XeCl laser", *Applied Physics B*, vol. 61, pp. 619-628
- [29] Vedi ad esempio https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Pockels



Vortici ottici e fasci di luce

La polarizzazione della luce è una proprietà ben nota anche in ambito non scientifico, così come l'uso dei polarizzatori per trasformare, ad esempio, luce con polarizzazione circolare in lineare. In termini leggermente più tecnici si può affermare che la luce (o radiazione) circolarmente polarizzata porti con sé un momento angolare che in realtà è la somma degli spin dei singoli fotoni costituenti. Lo spin è un momento angolare intrinseco distinto da quello orbitale. Nel recente passato è stato evidenziato come fasci di luce dotati di momento angolare intrinseco siano compatibili con le equazioni di Maxwell e la loro esistenza è stata verificata sperimentalmente. In questo articolo discuteremo la fenomenologia di questi fasci e le loro possibili applicazioni

DOI 10.12910/EAI2015-097

■ G. Dattoli, F. Nguyen

Introduzione

Il fatto che la luce (visibile e non) abbia proprietà, per così dire, meccaniche, quali impulso e momento angolare, è noto fin da prima della meccanica quantistica [1]. Il momento lineare del campo elettromagnetico, ovvero il vettore di Poynting, è associato all'intensità trasportata da un'onda elettromagnetica e la polarizzazione è la "manifestazione" macroscopica del momento angolare.

La meccanica quantistica ha completato il quadro con l'introduzione del fotone come componente microscopico di un fascio di luce che, al pari di una particella dotata di massa, è caratterizzato da un impulso e da un momento angolare intrinseco.

Il modo più semplice per legare gli aspetti micro e macro di cui sopra è tenere conto del fatto che il momento angolare (lungo la direzione di propagazione) J_z , l'energia E e l'impulso P di un'onda (ideale) di pulsazione ω circolarmente polarizzata sono legati al numero n di fotoni costituenti dalle relazioni

$$\begin{aligned} J_z &= n\hbar, \\ E &= n\hbar\omega \\ P &= n\hbar k \end{aligned} \quad (1)$$

dove $k = \frac{c}{\omega}$ è il vettore d'onda.

Il vettore di Poynting P , parallelo alla direzione di propa-

gazione dell'onda e perpendicolare al suo fronte, è dato dal prodotto vettoriale dei campi elettrico e magnetico. Sebbene la definizione delle quantità riportate in eq. (1) faccia esplicito uso della costante di Planck ridotta \hbar e del concetto di fotone, la loro riscrittura nella forma

$$\begin{aligned} E &= J_z\omega, \\ P &= J_z k \end{aligned} \quad (2)$$

autorizza a ritenere che il legame tra energia, impulso e momento angolare di un'onda elettromagnetica, circolarmente polarizzata (Figura 1), siano concetti di natura classica [1]. Qualora volessimo generalizzare le relazioni precedenti, estendendole al caso di polarizzazione ellittica, potremmo scrivere la prima delle eq. (2) come

$$\frac{J_z}{E} = \frac{\sigma}{\omega}, \quad -1 \leq \sigma \leq 1 \quad (3)$$

dove i valori di $\sigma = 0, \pm 1$ si riferiscono a polarizzazione lineare, circolare sinistra (+) e destra (-) (Figura 1).

Contact person: Federico Nguyen
federico.nguyen@enea.it

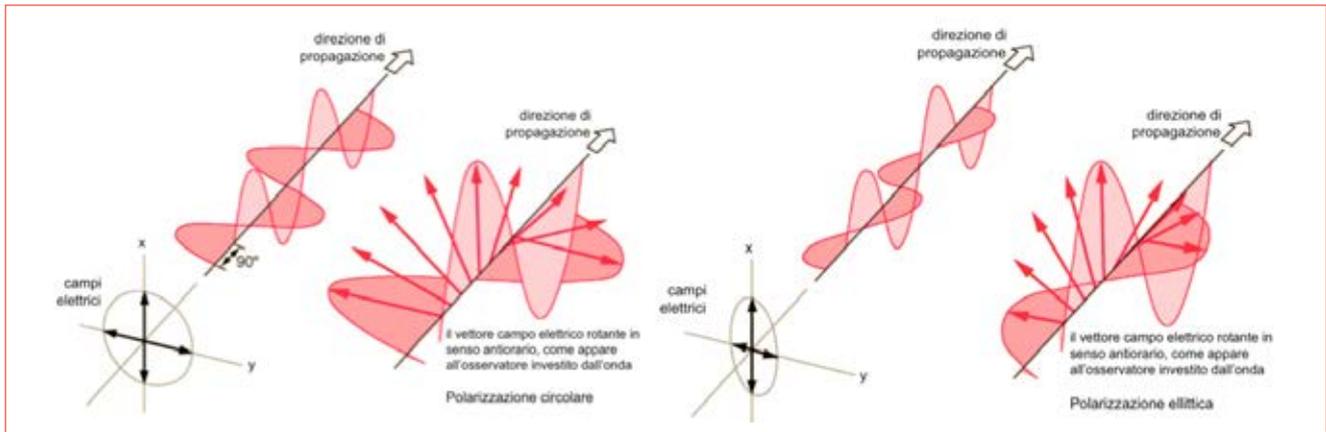


FIGURA 1 Polarizzazioni circolare ed ellittica
 Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

Come abbiamo già sottolineato, l'esistenza di un momento angolare non nullo della radiazione è dovuto al momento angolare intrinseco dei fotoni, ma potremmo ipotizzare l'esistenza di un momento angolare orbitale, caratterizzato da un numero quantico orbitale m , in modo tale che la relazione energia-momento angolare sia modificata in [2]

$$\frac{J_z}{E} = \frac{m \pm \sigma}{\omega} \quad (4)$$

Fasci di luce, con numeri quantici m diversi da zero, definiscono fasci OAM (Orbital Angular Momentum) con una fenomenologia del tutto nuova, rispetto a quella dei fasci con solo momento angolare intrinseco, e che riassumeremo brevemente nel seguito (per una trattazione più dettagliata si veda la ref. [3]).

Il fronte di propagazione di un'onda OAM non è semplicemente planare, tanto per visualizzare una delle possibili forme geometriche possiamo ricorrere a quella di un "fusillo", riportata in Figura 2.

Il vettore di Poynting, così come quello d'onda, non è più semplicemente parallelo alla direzione di propagazione, ma si attorciglia intorno ad essa come mostrato in Figura 3. Le motivazioni per ritenere che un fascio di radiazione possa "trasportare" un momento angolare orbitale, indipendente dallo spin, sono essenzialmente due:

- a. Una squisitamente matematica, ovvero che le equazioni di Maxwell sono compatibili con l'eventualità



FIGURA 2 "Fusillo" come utile modello geometrico per la propagazione di un fronte d'onda con momento angolare orbitale

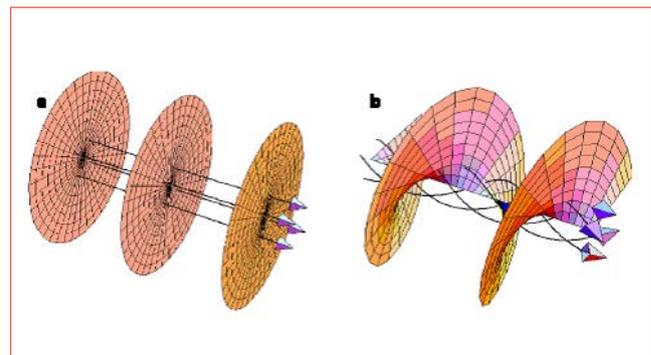


FIGURA 3 Fronte d'onda con polarizzazione circolare e Orbital Angular Momentum (OAM)

- che la struttura trasversale di un fascio di luce sia caratterizzata da un numero quantico azimutale.
- b. Fasci di luce OAM sono stati effettivamente prodotti tramite tecniche diverse e potranno essere utilizzati per applicazioni specifiche, cui accenneremo nel seguito.

Proprietà, produzione e applicazioni di fasci OAM

All'inizio degli anni 90 del secolo scorso fu dimostrato [2] che fasci OAM costituiscono una soluzione "naturale" dell'equazione di Helmholtz in approssimazione parassiale.

La struttura trasversa di fasci OAM può essere descritta tramite modi di Laguerre-Gauss (LG) o Hermite-Gauss (HG) tramite un fattore di fase aggiuntivo $e^{im\phi}$, in cui m può assumere valori interi positivi o negativi. In Figura 4 è stata riprodotta la struttura dei fasci corrispondenti ai primi quattro OAM (incluso anche il caso di semplice polarizzazione intrinseca).

Il dato significativamente importante è il fatto che il numero di stati possibili, associato al numero quantico m , è pressoché infinito. La qual cosa, come vedremo nel seguito, apre importanti prospettive nella trasmissione di informazioni.

Il valore di $|m|$ corrisponde agli avanzamenti di fase del fronte d'onda (positivi se in verso orario, negativi nel caso contrario) lungo l'asse di propagazione z . L'esempio della geometria a "fusillo" è relativo al caso di $m=3$ con un avanzamento di fase (in una rotazione intorno all'asse) pari a 6π , come meglio illustrato in Figura 5.

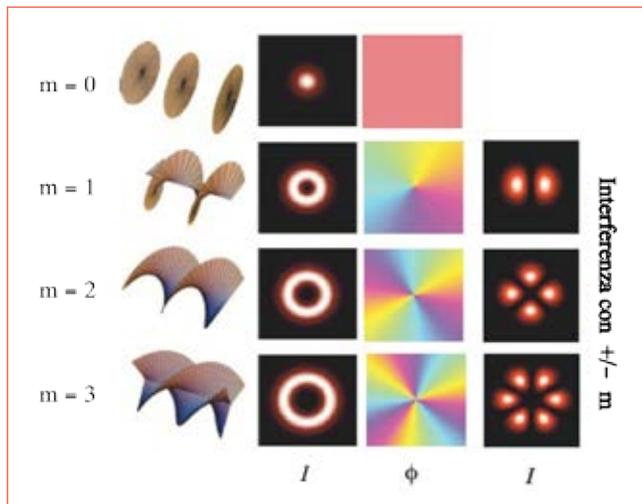


FIGURA 4 I primi 4 fasci LG-OAM. La distribuzione trasversa ha una struttura anulare (il campo è nullo sull'asse), la distribuzione di fase è degenera solo nel caso $m=0$, sono possibili figure interferenziali corrispondenti a valori di m con segno opposto

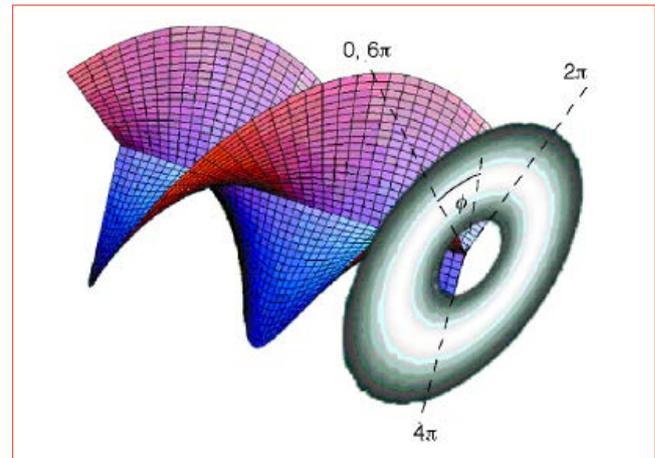


FIGURA 5 Avanzamenti di fase del fronte d'onda per $m=3$

La struttura trasversa è quella dei modi ottici di ordine superiore e pertanto ha una forma anulare.

Nella Figura 6 viene riportata la forma elicoidale di un OAM, insieme al vettore di Poynting localmente ortogonale al fronte d'onda. Le componenti dei campi elettrici e magnetici nella direzione di propagazione non sono nulle, determinando una corrispondente valore azimutale del vettore di Poynting, che, a sua volta, induce, lungo z , un momento angolare non nullo

$$(\vec{r}_\perp \times \vec{P}) \propto [\vec{r}_\perp \times (\vec{E} \times \vec{B})]_z \neq 0$$

che si somma algebricamente alla componente di spin.

La precedente considerazione, seppure qualitativa, fornisce una idea fisica del legame tra energia, impulso e momento angolare in un fascio OAM.

È evidente che il campo di un laser in una cavità ottica è essenzialmente una sovrapposizione di modi OAM. L'estrazione di uno di questi costituirebbe di per sé la generazione di un fascio con momento angolare orbitale.

Tale possibilità, seppure concettualmente semplice, non risulta percorribile nella pratica. Di seguito discuteremo alcuni schemi di generazione basati su tecniche diverse, ma tutte essenzialmente riconducibili alla conservazione del momento angolare.

Un esempio paradigmatico è quello di Figura 7a), in

cui un fascio, inizialmente con polarizzazione circolare, viene diffratto attraverso una fenditura costituita da un ologramma a forcella [4]. Nel caso di Figura 7b) il fascio iniziale attraversa un piatto di materiale birfrangente a forma di spirale, durante l'interazione con il mezzo, la radiazione acquista una struttura OAM [5], dopo aver ceduto una corrispondente parte di momento angolare al mezzo.

In merito alla tecnica dell'ologramma la Figura 8 fornisce qualche dettaglio in più [6]. A differenza del piatto a spirale, che agisce tramite una modulazione di fase, la tecnica dell'ologramma induce una modulazione del campo, i differenti colori nella Figura 7a rappresentano valori differenti della trasmissività.

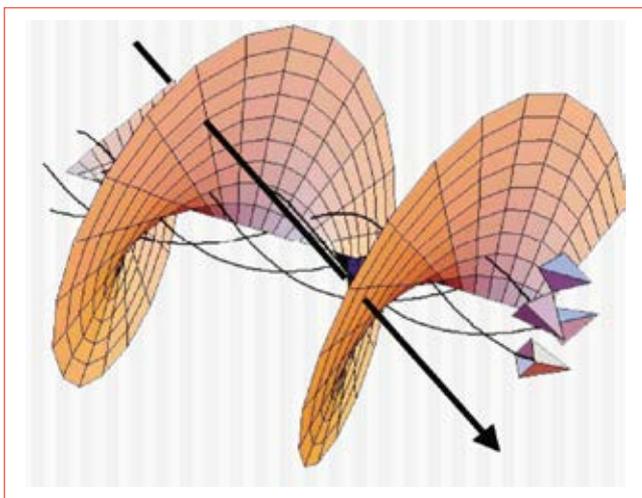


FIGURA 6 Relazione tra la componente azimutale del vettore di Poynting e la “generazione” del momento angolare orbitale

Una tecnica meno convenzionale è rappresentata da quella riportata in Figura 9. Il metodo di generazione di fasci OAM utilizza, in questo caso, una interazione di tipo laser ad elettroni liberi, basato sul processo di emissione da parte di un fascio di elettroni relativistici, in moto all'interno di un magnete ondulatorio e modulato tramite l'interazione di un fascio laser sovrapposto all'interno del magnete. La modulazione impressa al fascio è, tra le altre cose, il risultato della struttura trasversa dell'ondulatore e del moto che gli elettroni acquisiscono in tale struttura. Nel caso di un ondulatore a polarizzazione elicoidale gli elettroni descrivono un'elica. Se il fascio modulato viene estratto e iniettato in un successivo ondulatore, a polarizzazione lineare, il processo di emissione fornisce radiazione di tipo OAM (per ulteriori dettagli si veda il Rif. [7]).

Senza scendere nei dettagli dell'interazione, facciamo notare che quest'ultima tecnica di trasferimento di momento angolare tra un fascio di elettroni liberi e radiazione, potrebbe giocare un ruolo nella produzione di fasci con momento angolare non nullo nella regione dei raggi X.

Considerazioni conclusive e applicazioni

Nel paragrafo introduttivo abbiamo tenuto a sottolineare le caratteristiche “meccaniche” della radiazione elettromagnetica, che possono costituire gli elementi di riferimento per un modello euristico, adatto ad una prima comprensione della fenomenologia dei fasci OAM. Proviamo pertanto a definire il momento angolare di un fascio OAM utilizzando quantità tipiche della meccanica quali velocità angolare e momento d'inerzia.

Come illustrato in Figura 10 (si veda il Rif. [3]), un fascio di

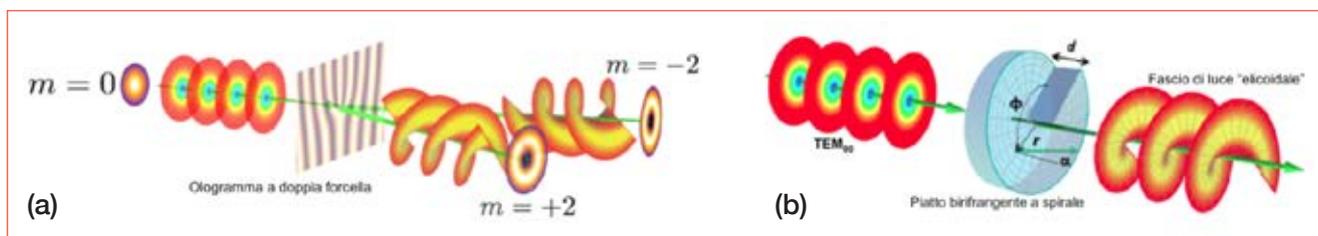


FIGURA 7 Produzione di fasci ottici dotati di momento angolare: a) Tecnica dell'ologramma a forcella; b) Tecnica del mezzo birfrangente sagomato a spirale
Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Angular_momentum_of_light

radiazione realizzato da una sovrapposizione di un fascio gaussiano e da un modo LG(0,1) si propaga nella direzione longitudinale e viene monitorato a distanze diverse dal waist, specificate da multipli della distanza di Rayleigh Z_R . La figura mostra la dinamica di propagazione associata, caratterizzata dal normale processo di espansione del fascio con l'aggiunta di una rotazione evidenziata da uno spostamento della posizione della parte oscura.

Per identificare le grandezze meccaniche dalla descrizione precedente, ricordiamo che il momento angolare L del sistema può essere scritto, in termini di momento di inerzia $I(z)$ e di velocità angolare $\Omega(z)$, come

$$L = I(z) \Omega(z) \quad (5)$$

dove

$$I(z) = m_e b^2(z)$$

$$b(z) = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_R}\right)^2} \quad (6)$$

con m_e abbiamo indicato la massa elettromagnetica legata al vettore di Poynting da

$$m_e = \frac{\Phi}{c^3} \quad (7)$$

E con $b(z)$ il raggio del *waist* del modo, che, come ben noto dall'ottica fisica tende ad espandersi durante la propagazione. Inoltre la velocità angolare può essere scritta nella forma

$$\Omega(z) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{c}{b^2(z)} \quad (8)$$

ed evidentemente tende a diminuire allontanandosi dal *waist*.

Le relazioni precedenti, pur nella loro semplicità, rendono conto della dinamica di Figura 10, in cui la propagazione del modo è caratterizzata dagli effetti diffrattivi, associati alla espansione del *waist* e da quelli di rotazione indotti dal momento angolare e, a loro volta, compensati dalla crescita delle dimensioni trasverse.

Abbiamo tenuto a mettere ulteriormente in evidenza tali peculiarità meccaniche, perché un aspetto che lega fasci OAM e corpi rotanti è la possibilità di una mutua interazione tra questi, con il trasferimento reciproco di mo-

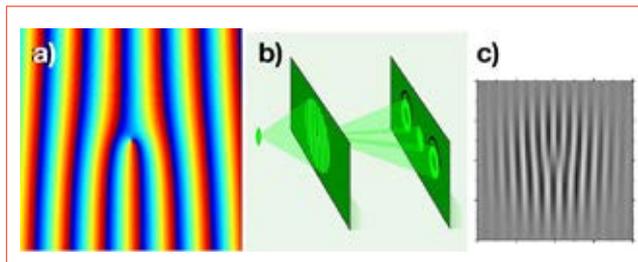


FIGURA 8 a) Ologramma a forcella ottenuto tramite una simulazione numerica; b) Schema concettuale dell'apparato; c) Ologramma ottenuto sperimentalmente

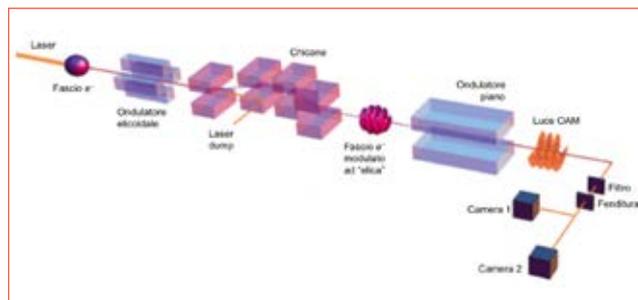


FIGURA 9 Schema di produzione di fasci OAM tramite interazione FEL
Fonte: [7]

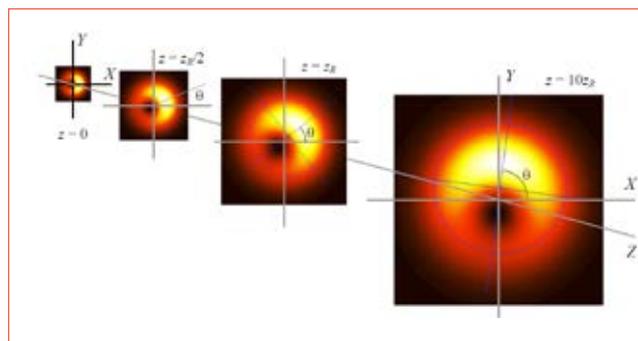


FIGURA 10 Propagazione di un fascio OAM lungo la direzione longitudinale

mento angolare. Questa caratteristica (insieme al fatto che i fotoni OAM possono indurre transizioni vietate da quelli di solo spin) permetterà, allorché si disporrà di fasci OAM ultracorti nella regione degli X, di pilotare strutture molecolari e, ad esempio, di indurre sia rotazioni che transizioni molecolari che possano favorire o inibire



una determinata reazione. In altre parole la “luce” potrà essere utilizzata sia per le sue caratteristiche meccaniche che per quelle di natura elettromagnetica, associate alla sua capacità di “accoppiarsi” con particelle cariche. Senza indugiare ulteriormente su scenari abbastanza lontani nel futuro, non è difficile arguire, in base a quanto detto in precedenza, che uno degli ambiti in cui fasci OAM possono essere utilizzati in applicazioni fruibili nel futuro prossimo è quello delle comunicazioni. Infatti un fascio di luce ad una certa lunghezza d’onda può essere adattato in un numero praticamente infinito di stati OAM. Pertanto, i dati trasmissibili attraverso un solo canale aumentano drasticamente.

Un esperimento che avvalorava quanto detto è stato già fatto, trasmettendo l’immagine di Mozart sul cielo di Vienna per 3 km, in atmosfera turbolenta [8]. L’informazione associata all’immagine è stata “codificata” utilizzando 16 modi OAM diversi e poi decodificata dall’apparato ricevente.

Gli autori del presente articolo consigliano la visione del filmato dell’esperimento riportato in [8].

Per concludere, non è inappropriato citare la possibilità di considerare una applicazione per i computer quan-

tistici. In questo caso l’informazione sarebbe codificata tramite tre gradi di libertà (direzione, propagazione e numero quantico orbitale). Inoltre l’architettura del computer stesso potrebbe essere costituita da soli elementi ottici. Un ologramma (o un piatto a spirale) potrebbero determinare una variazione di numero quantico m , uno specchio un cambiamento di segno del fronte di fase ed infine un prisma per indurre una rotazione di fase [9].

È opinione degli autori che la ricerca in questo settore possiede indubbi aspetti di interessi su entrambi i piani speculativo e applicativo.

Le future applicazioni potranno avere importanti ricadute tecnologiche, allo stato attuale della ricerca la possibilità di attrezzare laboratori per tale scopo non è assolutamente dispendiosa (si veda ad es. Rif. [10], dove un fascio OAM viene prodotto e caratterizzato tramite l’utilizzo di un laser He-Ne e di semplice strumentazione ottica come specchi, lenti e CCD) e acquisire competenze (teoriche e sperimentali) in tale direzione dovrebbe essere fortemente incentivata. ●

Giuseppe Dattoli, Federico Nguyen

ENEA, Dipartimento Fusione e Tecnologie
per la Sicurezza Nucleare, Laboratorio teoria, simulazione e modellistica

abstract

Optical vortices and light beams

Light polarization is a well-known property also in non-scientific contexts, as well as the use of polarizers to transform, for example, circularly polarized into linearly polarized light. In slightly more technical terms, we may say that circularly polarized light or radiation carries an angular momentum that is actually the sum of the spins of each single photon. The spin is an intrinsic angular momentum, different from the orbital angular momentum. In the recent past it has been proven that light beams with intrinsic angular momentum are consistent with Maxwell equations and their existence has been verified experimentally. In this article we discuss the phenomenology of these beams and their possible applications.

- [1] Poynting, J.H. (1909) "The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light", *Proc. R. Soc. London Ser. A*, **82**, 560–567
- [2] Allen, L., Beijersbergen, M.W., Spreeuw, R.J.C., and Woerdman, J.P. (1992) "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes", *Phys. Rev. A*, **45**, 8185–8189
- [3] A. Bekshaev, M. Soskin and M. Vasnetsov (2008), "Paraxial light beams with angular momentum", arXiv:0801.2309 [*physics.optics*]
- [4] Heckenberg, N. R., McDuff, R., Smith, C. P., and White, A. G. (1992), *Optics. Lett.*, **17**, 221
- [5] J. Courtial, K. O'Holleran, *Eur. Phys. J. Special Topics* 145, 35-47 (2007)
- [6] G. Volpe, *Opt. and Phot. Focus* **12**, 3 (2011). S. G. Garanin, F. A. Starikov, Y. I. Malakhov, *Adaptive Optics and Optical Vortices*, 147-190 (2012)
- [7] E. Hemsing et al., "Coherent optical vortices from relativistic electron beams", *Nature Physics*, Vol 9, September 2013 (549)
- [8] <http://www.gizmag.com/twisted-light-beam-data-transmission-vienna/34713>
- [9] J. C. Garcia-Escartin and P. Chamorro-Posada, *Phys. Rev. A*, 86, 032334 – Published 25 September 2012
- [10] S. G. Reddy et al., "Propagation of an arbitrary vortex pair through an astigmatic Optical System and determination of its net topological phase", arXiv:1309.3095v2 [*physics.optics*]



Solare a concentrazione: ottenere energia dalla luce solare in modo sostenibile e rinnovabile

La radiazione solare che irraggia la Terra è una straordinaria fonte di energia sostenibile e rinnovabile.

Nel solare a concentrazione, mediante specchi, la luce solare è focalizzata in un'area ridotta ove è posto un ricevitore per la conversione dell'energia luminosa in energia termica accumulabile.

L'ENEA ha sviluppato la tecnologia Italiana per sistemi parabolici-lineari e si è dotata delle apparecchiature necessarie alla caratterizzazione dei componenti. L'articolo ne descrive alcune di natura prettamente ottica

DOI 10.12910/EAI2015-098

■ M. Montecchi

Introduzione

Il pianeta Terra è costantemente irraggiato dalla luce emessa dalla stella a lui più vicina: il Sole. La vita e molte tra le forme di energia utilizzate oggi dall'uomo (petrolio incluso) discendono più o meno direttamente dalla luce solare. Senza il Sole la Terra sarebbe buia, immota e congelata. Ciò nonostante solo recentemente, a causa di ripetute crisi economiche e petrolifere, si è prestata attenzione alle tecnologie atte a ottenere energia dalla luce solare.

La tecnologia più semplice, ma non per questo meno rilevante, è quella dei pannelli termici per la generazione di acqua calda; in sostituzione di boiler elettrici e caldaie a gas, l'adozione diffusa dei pannelli termici consente di ridurre il fabbisogno di energia elettrica e di idrocarburi.

Una tecnologia più complessa è quella dei pannelli fotovoltaici (Fotovoltaic, PV) che generano corrente

elettrica a partire dalla luce solare mediante l'effetto fotovoltaico. Negli ultimi anni, grazie agli incentivi statali, in Italia si è verificato un notevolissimo incremento di GW installati, tanto da portare alla chiusura di diverse centrali elettriche di tipo convenzionale. Ad oggi il punto critico della tecnologia PV è la mancanza di accumulo: tutta l'energia generata deve essere subito immessa in rete. D'altra parte nelle ore notturne non c'è produzione e di giorno la nuvolosità riduce e destabilizza la resa, rendendo complessa l'integrazione e la gestione del PV nella rete di distribuzione elettrica. Per ovviare a questo serio limite è partita la corsa allo sviluppo di batterie a basso costo e basso impatto ambientale per dotare il PV di accumulo.

Un diverso approccio, di origine assai antica (si pensi ai famosi specchi ustori di Archimede), è il solare a concentrazione (Concentrating Solar Power, CSP): mediante specchi (concentratori) la luce solare è focalizzata in un'area ridotta ove è posto un ricevitore per la conversione dell'energia luminosa in energia termica veicolata da un fluido termo-vettore. Il fluido termo-vettore riscaldato può essere utilizzato sia per fornire energia termica che per produrre energia elettrica;

Contact person: Marco Montecchi
marco.montecchi@enea.it

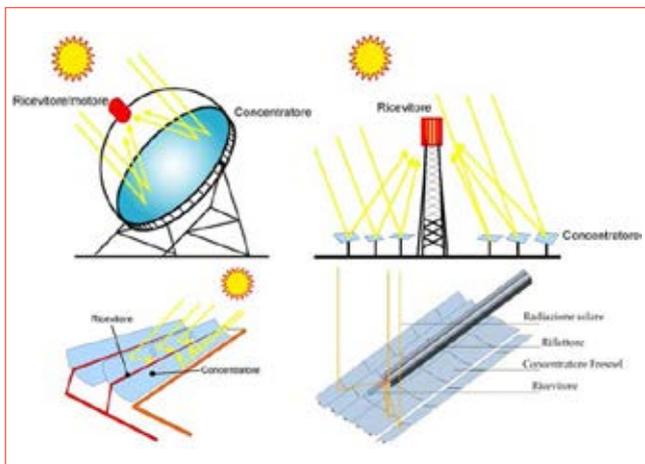


FIGURA 1 Tipologie impianti CSP: dish (in alto a sinistra), torre (in alto a destra), parabolico-lineare (in basso a sinistra), Fresnel-lineare (in basso a destra)
Fonte: ENEA

nonché può essere accumulato in vista di un utilizzo successivo. Energia-termica e accumulo sono i due vantaggi che il CSP oggi vanta nei confronti del più economico PV.

Come mostrato in Figura 1, gli impianti CSP sono classificati in tre tipologie: 1) dish, 2) torre e 3) lineare, suddiviso a sua volta in parabolico e Fresnel. L'ENEA, con il Grande Progetto Solare Termodinamico (GPST), a partire dal 2001 ha sviluppato la tecnologia Italiana per il CSP di tipo parabolico-lineare, stimolando al contempo lo sviluppo di una articolata filiera industriale nazionale [1]. Il progetto è culminato il 15 luglio 2010 con l'inaugurazione della prima centrale a sali fusi al mondo: la centrale ENEL Archimede di Priolo Gargallo (Siracusa), 5 MWe, costruita interamente con tecnologia Italiana [2]. In quanto segue saranno brevemente ricordati gli aspetti salienti del GPST e alcuni degli strumenti sviluppati in ENEA di natura squisitamente ottica.

Il Grande Progetto Solare Termodinamico, pietra miliare per l'Italia

Il Grande Progetto Solare Termodinamico è nato per iniziativa del premio Nobel Carlo Rubbia, Presidente dell'ENEA dal 1999 al 2005. Nella visione di Rub-

bia il CSP era una tecnologia di interesse strategico nazionale perché poteva essere utilizzata per ridurre la dipendenza energetica dell'Italia dall'estero: nel Sud dell'Italia si sarebbero dovute costruire un primo gruppo di 10 centrali da 50 MWe (2007, durante il secondo governo Prodi). Purtroppo ad oggi quel sogno non si è ancora realizzato, ma rimane la solida realtà di una tecnologia e di una filiera industriale che in taluni casi ha raggiunto livelli d'eccellenza ancora ineguagliati nel resto del mondo.

La tecnologia italiana nasce adottando diverse soluzioni innovative che la hanno contraddistinta fin dall'inizio: 1) l'utilizzo di sali-fusi come fluido termovettore con l'innalzamento della temperatura massima a 550 °C ; 2) lo sviluppo di un rivestimento ottico resistente a 550 °C, fortemente assorbente nella regione VIS-NIR e basso emissivo in quella IR per ridurre le perdite per irraggiamento, 3) specchi a vetro sottile (meno di 1 mm di spessore, per innalzare la riflettanza solare) accoppiati a dorso rigido che conferisce la forma parabolico-lineare; 4) semplificazione della struttura meccanica del collettore mediante l'introduzione del tubo di torsione da cui dipartono le centine, collegate da correnti su cui sono installati i pannelli riflettenti.

Per realizzare il GPST Rubbia costituì in ENEA un apposito gruppo di lavoro, composto da circa 100 persone, tra ingegneri, fisici, chimici, tecnici e amministrativi. Fin dall'inizio il progetto è stato caratterizzato da un profondo contatto con l'industria nazionale: una volta disegnato un componente, si andava alla ricerca delle industrie capaci di realizzarlo, per poi sollecitarle alla produzione di prototipi. Tali prototipi erano quindi caratterizzati in ENEA, innescando in molti casi un circuito pubblico-privato di ricerca e sviluppo del componente.

La capacità di caratterizzare il componente è di fondamentale importanza sia per verificare la rispondenza delle caratteristiche del manufatto alle necessità del progetto, sia per confrontare tra loro componenti di produttori diversi. Perciò nel corso dello sviluppo del progetto, sono state realizzate tutte le attrezzature necessarie alla qualifica dei componenti; talune di carattere originale. Diverse di queste attrezzature sono basate sulla luce, o più propriamente sull'ottica; ad esse è dedicato il seguito del presente articolo.

Luce per caratterizzare

Nel CSP lo specchio è il primo anello della catena di produzione dell'energia e per questo svolge un ruolo di primaria importanza.

Per comodità il concentratore solare è suddiviso in pannelli riflettenti di dimensioni adatte al trasporto e al maneggiamento (tipicamente 1-2 m per lato). Le caratteristiche principali di qualsivoglia pannello sono la *riflettanza solare* (la media sullo spettro di emissione solare) e la *forma*: la prima indica la frazione di energia solare rinviata verso il ricevitore; la seconda determina la distribuzione della radiazione solare nei dintorni della zona focale dove è posto il ricevitore. Entrambe queste caratteristiche possono essere misurate con strumenti ottici, ossia basati sulla luce.

Misurare la riflettanza solare: SMQ

Per calcolare la riflettanza solare è necessario misurare lo spettro di riflettanza nell'intervallo di emissione solare (circa 300-2500 nm, vedi Figura 2) per poi mediarlo sullo spettro di emissione stesso.

Sebbene questo compito possa apparire semplice, a tutt'oggi non è codificato da una normativa internazionale. Nell'ambito del Task III di SolarPACES un gruppo di esperti (tra cui ENEA) sta scrivendo le linee guida [3], coadiuvato dall'attività sperimentale svolta da alcuni dei più importanti laboratori (CEA, CENER, CIEMAT, ENEA, DLR, ISE) su un gruppo di campioni rappresentativi della produzione industriale. La difficoltà maggiore proviene dalla peculiarità della riflettanza di interesse per il CSP: come mostrato in Figura 3, la sorgente (il Sole) è estesa, sicché la radiazione incidente è divergente ($2\varphi_S = 9,7$ mrad in condizioni di cielo sereno); lo specchio può aumentare ulteriormente la divergenza della radiazione riflessa per scattering di superficie; in ogni caso il ricevitore può catturare solo la radiazione riflessa all'interno dell'angolo di visuale sotteso dal punto di riflessione ($2\varphi_R$).

Attualmente non esistono strumenti commerciali capaci di siffatta misura, pertanto i laboratori stanno approntando degli apparati sperimentali ad hoc; la Figura 4 mostra lo schema del SMQ [4] proposto da ENEA, capace di misurare la riflettanza emisferica, quasi-speculare con φ_R tra 3 e 20 mrad, e diffusa oltre 20 mrad a tre lunghezze d'onda nel visibile. Brevemente, il fascio laser

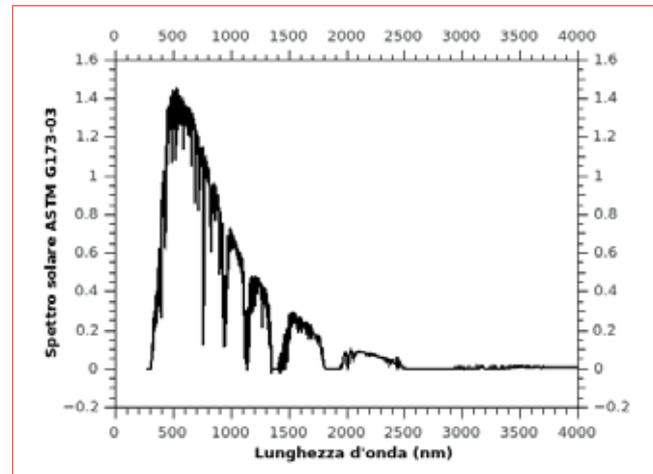


FIGURA 2 Spettro di emissione solare secondo la normativa ASTM G173-03

Fonte: elaborazione ENEA su dati ASTM

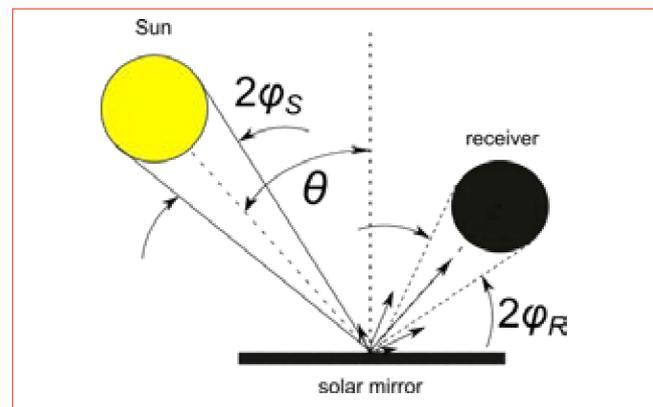


FIGURA 3 Nelle applicazioni CSP lo specchio è utilizzato per riflettere la radiazione solare sul ricevitore. La frazione intercettata dipende dagli angoli di divergenza solare $2\varphi_S$ e di visuale del ricevitore $2\varphi_R$ che è sotteso dal punto di riflessione

Fonte: ENEA

(divergenza minore di 1 mrad) di uno dei tre diodi-laser è inviato sul campione. Nella configurazione superiore il riflesso è analizzato mediante la sfera integratrice IS1 per diversi valori del semi-angolo di accettazione φ_R (tra 3-20 mrad); nel contempo mediante IS2 è misurata la radiazione diffusa oltre 20 mrad. Nella configurazione inferiore, a parità di condizioni, si misura la riflettanza

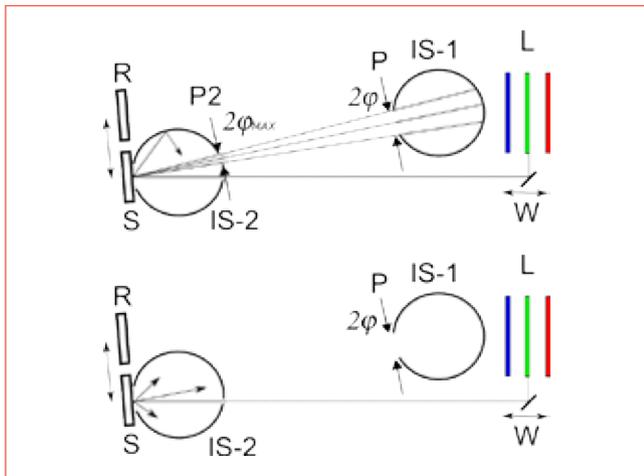


FIGURA 4 Schema del Solar Mirror Qualification set-up sviluppato da ENEA
Fonte: ENEA

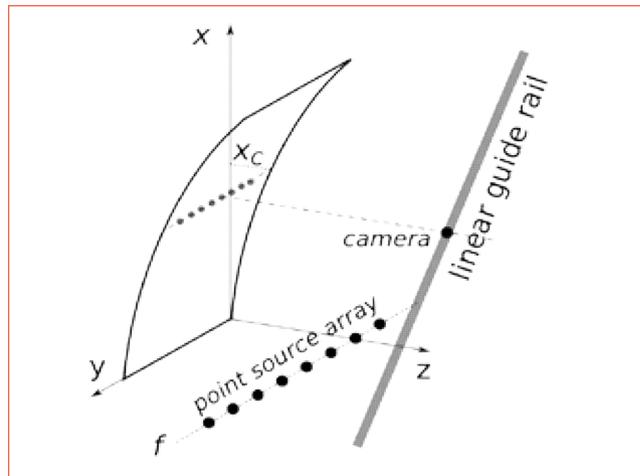


FIGURA 5 Schema ottico del VISprofile, lo strumento per misurare la forma dei pannelli parabolici-lineari in laboratorio/ambiente di produzione sviluppato da ENEA
Fonte: ENEA

emisferica. Sulla base dei valori così misurati e dello spettro della riflettanza emisferica (misurato con uno spettrofotometro commerciale equipaggiato con sfera integratrice), è possibile stimare l'andamento della riflettanza solare in funzione dell'angolo di incidenza e dell'angolo di accettazione del ricevitore.

Misurare la forma: VISprofile

Sebbene in linea di principio la forma di un pannello riflettente possa essere misurata con un tastatore meccanico, nella realtà, per convenienza economica e di tempo di misura, si utilizzano sempre metodi ottici, quali fotogrammetria, scansione laser, e deflettometria. Recentemente ENEA ha introdotto il Sistema di Ispezione Visiva (VIS) [5], sviluppando una famiglia composta di strumenti. La metodologia VIS si basa sull'idea di osservare da uno o più punti nel campo vicino, uno o più sorgenti luminose poste nei dintorni del fuoco nominale dello specchio. La Figura 5 mostra lo schema del VISprofile [6], strumento per la misura della forma in laboratorio/ambiente industriale di pannelli per il CSP parabolico-lineare: una serie di sorgenti puntuali sono allineate lungo la linea focale nominale della parabola; una camera installata su un binario motorizzato acquisisce immagini in corrispondenza di diversi valori dell'ascissa della parabola. Conoscendo le posizioni i) di

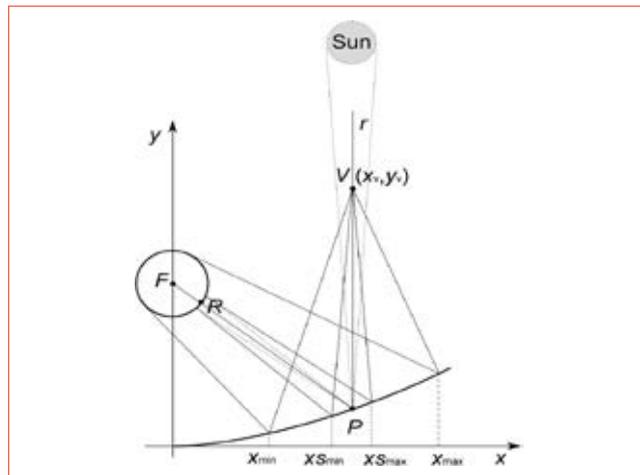


FIGURA 6 Schema ottico del VISfield, lo strumento per la verifica in campo dello stato di mutuo allineamento di parabola-lineare e ricevitore
Fonte: ENEA

ogni sorgente puntuale, ii) delle loro rispettive immagini osservate dalla camera sulla superficie del pannello e iii) della camera stessa, è possibile desumere il versore normale alla superficie; integrando opportunamente si ricostruisce la forma 3D del pannello; infine mediante

simulazione (ray-tracing) è possibile stimare l'efficienza di concentrazione del pannello. La bontà del pannello è espressa da una serie di parametri, tra cui lo scostamento dalla forma parabolica di riferimento in termini di quota e arcotangente della superficie, nonché dal fattore di intercettazione, ossia la frazione dei raggi riflessi intercettata geometricamente dal ricevitore.

ENEA ha firmato un accordo di collaborazione con la MARPOSS al fine di commercializzare gli strumenti VIS. In questi mesi è in corso di ultimazione il primo prototipo industriale di VISprofile presso la sede MARPOSS di Bentivoglio (Bologna).

Misurare l'allineamento in campo: VISfield e VISfly

Il giusto problema da porsi in campo, di fronte ad un collettore parabolico-lineare, non è quale sia la forma di ogni singolo pannello, bensì qual è lo stato del mutuo allineamento di parabola-lineare e tubo ricevitore. Il concentratore lineare è costituito da collettori a loro volta composti da moduli larghi 12 m, con apertura della parabola di 6 m circa. In campo la metodologia VIS è applicata utilizzando come "sorgente" lo stesso tubo ricevitore; lo schema ottico del VISfield [7] è mostrato in Figura 6.

In sostanza il fattore di intercettazione è desunto dalla sovrapposizione tra l'immagine del tubo ricevitore e la zona attesa dello spot solare (Figura 7).

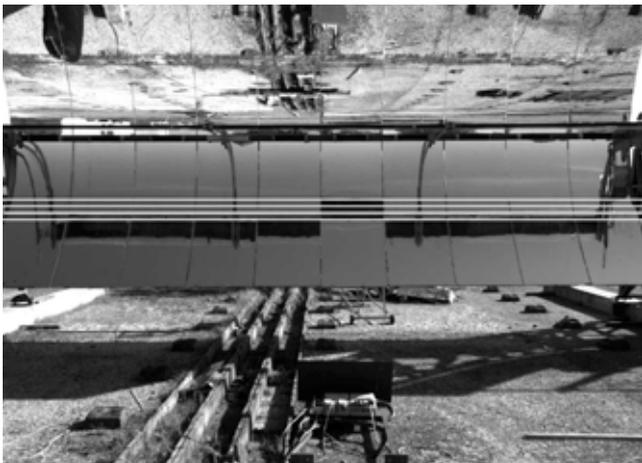


FIGURA 7 Valutazione del fattore di intercettazione in una delle immagini acquisite con il VISfield
Fonte: ENEA

La Figura 8 mostra il carrello VISfield commercializzato dalla MARPOSS: il carrello va posizionato centralmente al modulo in esame, a circa 7 m di distanza; quindi si abbassano gli stabilizzatori e si mette in bolla. Alla camera è abbinata una livella laser che consente di portare con precisione la camera alla quota dell'asse di rotazione del modulo. Orientando il modulo verso l'orizzonte è possibile verificare la correttezza dell'angolo di offset ed eventualmente correggerlo. Quindi si scansiona il modulo ottenendo sia la mappa del fattore di intercettazione (Figura 9) che indicazioni puntuali su come migliorare l'allineamento di ogni singolo pannello. Infine, se non ci sono margini di miglioramento, la mappa del fattore di intercettazione rappresenta il controllo finale della bontà della forma di ogni singolo pannello in termini di funzionalità. I pannelli difettosi dovranno essere sostituiti con altri più conformi alle specifiche. Il limite principale del VISfield è il tempo di misura complessivo: tra posizionamento, allineamento e misura, occorrono circa 30 minuti/modulo (senza apportare modifiche al modulo). Pertanto il VISfield è uno strumento assai utile durante l'installazione

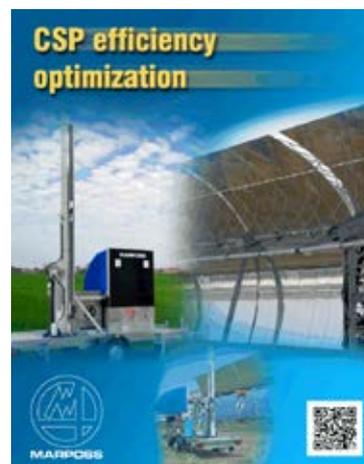


FIGURA 8 Locandina pubblicitaria del VISfield commercializzato da MARPOSS su licenza ENEA
Fonte: MARPOSS

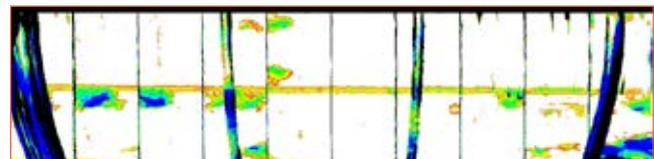


FIGURA 9 Mappa del fattore di intercettazione ottenuta con il VISfield di un semi-modulo dell'impianto Prova Collettori Solari, installato presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA
Fonte: ENEA

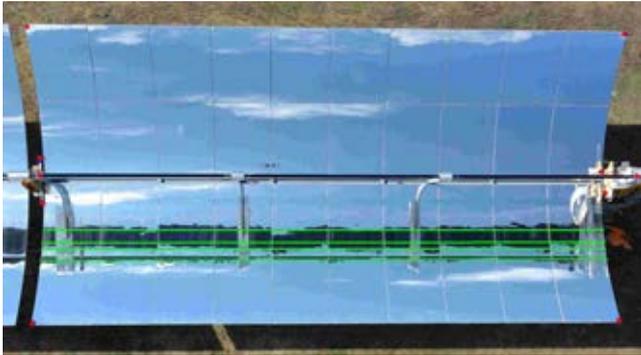


FIGURA 10 Valutazione del fattore di intercettazione per una immagine aerea ripresa dal VISfly
Fonte: ENEA

dell'impianto, ma non adatto alla verifica periodica dello stesso, poiché un campo solare di norma è composto da migliaia di moduli.

Per ovviare a questo limite, in collaborazione con un operatore esperto di droni (Cloud-Cam by Nuovi Sistemi) e della MARPOSS, si sta sperimentando la versione volante denominata VISfly, ossia un drone equipaggiato con una camera nel visibile per la verifica di allineamento sopra descritta. Inoltre, per massimizzare il rapporto benefici/costi il drone è anche munito di termo-camera per il controllo dello stato di vuoto dei tubi ricevitori (i tubi che hanno perso il vuoto appaiono più caldi degli altri). Il VISfly è meno accurato del VISfield, ma fornisce un quadro complessivo dello stato del campo solare, localizzando e valutando i moduli più carenti. Successivamente il VISfield può essere utilizzato in maniera mirata sui moduli più carenti. Il problema principale del trasporto della metodologia VIS su drone è la determinazione della posizione e dell'assetto del drone. La tecnologia nel settore è in tumultuoso sviluppo e stanno comparando sul mercato i primi dispositivi elettronici *Differential Global Position System* e *Real Time Kinematic* imbarcabili su drone. Nel frattempo si stanno ottenendo dei risultati assai interessanti utilizzando la fotogrammetria su un esiguo numero di target, disposti nei punti cospicui di ogni modulo (Figura 10).

Allineare e caratterizzare un dish: VISdish

Come detto nell'introduzione, l'ENEA con il GPST ha studiato la tipologia CSP parabolico-lineare. Pertanto la maggior parte degli strumenti di misura finora svi-

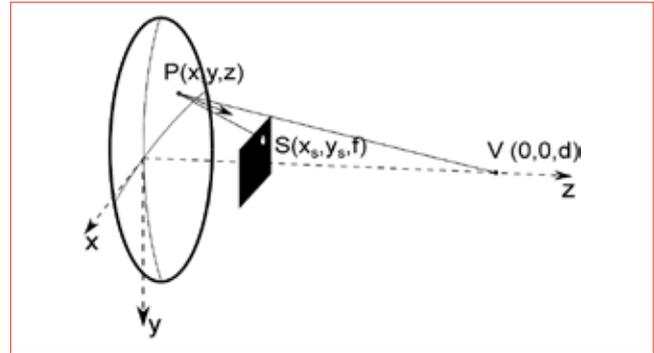


FIGURA 11 Schema ottico del VISdish, lo strumento per la caratterizzazione ottico-geometrica in campo di un dish
Fonte: ENEA

luppato sono adatti a questa tipologia di impianto; tuttavia la metodologia VIS può essere applicata anche alle altre. Un esempio ne è il VISdish in corso di sperimentazione sul dish recentemente installato in ENEA Casaccia nell'ambito del progetto Europeo OMSOP [8]. Il fine del progetto è di sperimentare l'utilizzo di una micro-turbina a gas al posto dell'usuale motore Stirling, posizionato assieme al ricevitore nel fuoco del dish.

Come mostrato in Figura 11 nel VISdish la "sorgente" è costituita da uno schermo TV LCD da 50" posizionato nei pressi del punto focale. L'osservatore V è in posizione fissa, lungo l'asse del paraboloide a qualche decina di metri dal vertice del dish. Lo strumento ha una doppia funzionalità: 1) allineamento dei pannelli e infine 2) misura della forma 3D del paraboloide. Nel primo caso lo schermo LCD visualizza un singolo disco bianco (S) su fondo nero, posizionato in modo tale che l'osservatore veda l'immagine di S riflessa in corrispondenza del centro del pannello in esame (P), assumendo che questo sia correttamente allineato secondo la superficie del paraboloide ideale. In caso contrario si dovrà agire sui punti di aggancio del pannello in modo da allinearli per realizzare la condizione summenzionata.

Una volta che tutti i pannelli siano stati registrati, lo strumento opera nella seconda modalità: il disco bianco S è via via visualizzato in tutti i quadranti di una scacchiera ideale in cui lo schermo LCD è stato suddiviso, acquisendo di volta in volta l'immagine del dish e calcolando la normale alla superficie del paraboloide in tutti i punti P dove è riflessa l'immagine di S. Aggiu-

stando la dimensione del disco S e il passo della scacchiera sullo schermo è possibile campionare la normale alla superficie del dish in modo sufficientemente fitto da poter ricostruire la sua forma 3D. Quindi con un software di simulazione appositamente sviluppato (SIMULDISH) sarà possibile valutare sia la posizione ottimale della finestra del ricevitore che la distribuzione dell'intensità della radiazione solare concentra-

ta incidente. Questa valutazione sarà confrontata con i risultati sperimentali della misura del flusso ottenuta misurando il bagliore della radiazione solare concentrata diffusa da una lastra di rame raffreddata, rivestita di allumina, posta nel fuoco. ●

Marco Montecchi

ENEA, Dipartimento Tecnologie Energetiche,
Laboratorio ingegneria delle tecnologie solari

abstract

Concentrating solar power: a sustainable and renewable way to get energy from solar light

Solar light irradiating the Earth is a great sustainable and renewable power source. In concentrating solar power plants, mirrors are used to redirect the solar light toward a small area where a receiver captures and converts it into thermal-energy which can be stored. ENEA has been developing the parabolic-trough Italian technology, as well as several facilities for the component characterization. The paper reports on some of those which are purely optical instruments.

bibliografia

- [1] V. Brignoli, "Solare Termico Italiano", <http://www.solarthermalpower.it/Storia%20Grande%20Progetto%20Solare%20Term.%20Archimede%281%29.htm>
- [2] Sito ENEA, "Impianto Archimede", <http://www.enea.it/it/per-la-stampa/le-parole-dellenergia/solare-termodinamico/impianto-archimede>
- [3] Sito SolarPACES, "Reflectance guidelines", <http://www.solarpaces.org/tasks/task-iii-solar-technology-and-advanced-applications/reflectance-measurement-guideline>
- [4] M. Montecchi (2014), "Upgrading of ENEA Solar Mirror Qualification Set-up", *Energy Procedia* vol. 49, 2154-2161 (2014)
- [5] M. Montecchi: Metodo e Sistema di Ispezione Visiva per il Controllo di Qualità della Forma di Riflettori Concentratori. Brevetto Italiano n. 1388769, depositato il 3 marzo 2008, n. domanda RM2008A000151
- [6] M. Montecchi, A. Benedetti, G. Cara (2011), "Fast 3D optical-profilometer for the shape-accuracy control of parabolic-trough facets", in *Proceedings of 17th SolarPACES Conference*, September 20-23 2011 Granada (Spain). <http://www.solarpaces2011.org/cms>
- [7] M. Montecchi, A. Benedetti, G. Cara (2010), "Optical alignment of parabolic trough modules", in *Proceedings of 16th SolarPACES Conference*, September 21-24 2010 Perpignan (France). <http://www.solarpaces.org/index.php/2013-09-19-07-40-05/16th-solarpaces-conference-21-24-september-2010-perpignan-france>
- [8] Sito progetto OMSoP, <https://omsop.serverdata.net/Pages/Home.aspx>



Il consumo per l'illuminazione e la certificazione energetica negli edifici in Italia

Questo lavoro valuta la procedura proposta dalla normativa tecnica per il calcolo degli indici di prestazione energetica di edifici considerando gli apporti di calore legati al sistema di illuminazione e propone una nuova procedura basata sul *Lighting Energy Numerical Indicator*, LENI (UNI EN 15193:2008). La nuova procedura di calcolo si sviluppa secondo i seguenti punti: i) calcolo degli apporti di calore interni dell'illuminazione considerando l'integrazione tra apparecchi ed illuminazione naturale; ii) valutazione mensile di tutti gli apporti interni; iii) calcolo mensile ed annuale degli indici di prestazione energetica per: l'illuminazione, la climatizzazione invernale ed estiva e la produzione di acqua calda sanitaria. Come caso-studio è stato utilizzato l'edificio del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino, ipotizzandolo posizionato sia a Torino, sia a Palermo, in presenza di sistemi di controllo manuale (on/off) o fotosensori, confrontando gli indici di prestazione energetica trovati secondo i due approcci (normativo e proposto dagli autori)

DOI 10.12910/EAI2015-099

■ L. Blaso, V. R.M. Lo Verso, G. Mutani

Background e obiettivi

Nel quadro sempre più urgente del contenimento dei consumi energetici e dell'impatto ambientale in termini di emissione di gas serra in atmosfera, gli edifici sono uno degli elementi chiave. In quest'ottica, l'Unione Europea ha emanato una serie di direttive specifiche che impongono la verifica della prestazione energetica di tutti gli edifici (esistenti o di nuova costruzione) in termini del loro consumo globale (per illuminazione, riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria) imponendo anche dei valori limite da non superare. È stato inoltre emanato un protocollo per la riduzione entro il 2020 del consumo di energia primaria di un edificio attraverso un maggior utilizzo delle fonti di energia rinnovabili e la riduzione delle emissioni di gas serra.

In Italia, le "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici" (2009) hanno definito i criteri generali, i metodi di calcolo ed i requisiti minimi per la

progettazione di edifici energeticamente efficienti, includendo le prestazioni dell'involucro e degli impianti di illuminazione, di climatizzazione e per la produzione di acqua calda sanitaria. Per la classificazione energetica degli edifici, è stato introdotto l'indice globale di prestazione energetica EP_{gl} , inteso come somma di quattro indicatori:

$$EP_{gl} = EP_i + EP_{acs} + EP_e + EP_{ill} \quad (1)$$

dove EP_i , EP_{acs} , EP_e e EP_{ill} sono gli indici di prestazione energetica rispettivamente per riscaldamento inver-

Contact person: Laura Blaso
laura.blaso@enea.it



nale, produzione di acqua calda sanitaria (acs), raffrescamento estivo e illuminazione. Tutti gli indici sono espressi in (kWh/m²/anno) nel caso di edifici residenziali e in (kWh/m³/anno) per tutte le altre tipologie di edifici. I vari indici devono essere calcolati su base mensile, tenendo conto dell'effettivo bilancio fra l'energia dispersa dall'edificio, quella captata dall'edificio e quella prodotta internamente dalle sorgenti di calore e dagli impianti. Nella normativa tecnica, gli apporti interni dovuti a persone, apparecchiature elettriche ed impianti di illuminazione sono considerati attraverso un valor medio annuale costante (ad es. 6 W/m² per gli uffici).

Questo approccio è oggetto di discussione in questo articolo, in particolare per quanto riguarda il ruolo svolto dagli apporti di calore interni legati ai sistemi di illuminazione: infatti, l'approccio non considera aspetti cruciali quali la potenza elettrica installata al m² in funzione del livello di illuminamento sui piani di lavoro, l'efficienza luminosa dei sistemi di illuminazione (sorgenti luminose e componenti ottici), il comportamento dell'utente, la presenza di sistemi di controllo degli apparecchi illuminanti o dei sistemi di schermatura. Ad esempio, il progetto EIE EL-TERTIARY [1], attraverso un'analisi condotta su 123 edifici del settore terziario, dimostra come l'illuminazione abbia un peso determinante nel consumo di energia elettrica di un edificio. Il calcolo degli apporti di calore interni per illuminazione deve pertanto essere affrontato con maggior precisione, dal momento che contribuisce in maniera significativa alla prestazione energetica finale di un edificio.

Se l'equazione (1) ha il merito di fornire un approccio integrato per il calcolo dell'indice EP_{gl}, dall'altro occorre sottolineare come in questo approccio i quattro contributi (riscaldamento invernale, produzione di acs, raffrescamento estivo ed illuminazione) siano considerati separatamente. Questa semplificazione non tiene conto delle numerose dinamiche di mutua influenza fra i diversi consumi di energia: ad esempio, l'uso di sistemi di illuminazione poco efficienti si traduce in un elevato valore dell'indice EP_{ill}, ma determina anche un maggior contributo di energia termica in ambiente che può portare nel periodo invernale ad una riduzione dell'energia consumata per riscaldamento (EP_r) e nel periodo estivo ad un maggior consumo di energia per raffrescamento (EP_e). Inoltre, il contributo

di apporti interni dovuto all'impianto di illuminazione è differente nei diversi mesi dell'anno, a causa di un diverso profilo di utilizzo legato alla differente disponibilità di luce naturale.

In questo quadro, lo studio presentato in questo articolo ha i seguenti obiettivi:

- proporre una nuova, più accurata procedura per il calcolo degli apporti di calore interni per illuminazione, che tenga conto mensilmente della mutua influenza fra i fabbisogni di energia per illuminazione e per climatizzazione invernale ed estiva, al fine di valutare la classe energetica dell'edificio attraverso l'indice EP_{gl};
- applicare la procedura proposta ad un caso studio reale, confrontando gli indici di prestazione energetica che si ottengono attraverso le due diverse procedure: quella prescritta dalla norma (che assume per gli apporti interni un valor medio di 6 W/m²) e quella proposta dagli Autori;
- applicare le due procedure di cui al punto b) a climi diversi (Nord e Sud Italia), ripetendo la simulazione considerando lo stesso edificio a Torino e Palermo.

Caso-studio: Edificio del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino

Il caso di studio utilizzato è un edificio del Politecnico di Torino (latitudine: 45.1°N), sede del Dipartimento Energia (DENERG) [2]. L'edificio è costituito da 67 uffici, 1 biblioteca e 2 laboratori. La Figura 1 riporta una serie di viste bi- e tri-dimensionali del corpo di fabbrica del dipartimento e degli edifici circostanti. Nella Figura 2 è rappresentata la distribuzione dei vari ambienti all'interno dell'edificio, indicando anche la densità di potenza elettrica installate per ciascuna tipologia di ambiente.

All'interno del DENERG, tutti gli ambienti sono illuminati anche naturalmente grazie alla presenza di ampie superfici finestrate; gli ambienti esposti a Nord sono dotati di vetri doppi chiari (valore di trasmissione luminosa misurato $\tau_v=84\%$), mentre quelli a Sud hanno vetri doppi chiaro/selettivo ($\tau_v=55\%$, misurato). Gli apparecchi di illuminazione sono installati a soffitto e sono equipaggiati con sorgenti fluorescenti controllate manualmente con interruttori on/off.

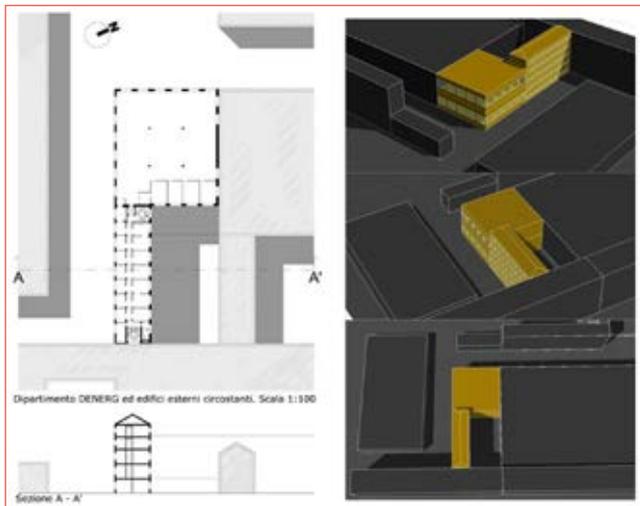


FIGURA 1 Vista dell'edificio del DENERG e degli spazi esterni circostanti



FIGURA 2 Planimetrie dei 5 piani del DENERG

L'edificio DENERG è stato realizzato nel 1958. Per l'involucro, non isolato, si sono assunti i seguenti valori medi di trasmittanza termica:

U_{pareti}	=	1,41 W/(m ² K),
U_{finestre}	=	3,68 W/(m ² K),
U_{tetto}	=	1,30 W/(m ² K),
$U_{\text{solaio sul seminterrato}}$	=	1,15 W/(m ² K).

Il sistema di riscaldamento è collegato alla rete del teleriscaldamento, mentre quello di raffrescamento è alimentato da una pompa di calore ad alta efficienza con cuscinetti magnetici ($EER_m=4$). Il sistema di distribuzione del calore negli uffici non presenta isolamento termico ed in ogni ufficio sono installati ventilconvettori e termostati. Negli uffici non è presente un sistema di ventilazione mentre i laboratori sono dotati di tre unità di trattamento aria (UTA) che riscaldano e raffrescano; infine due caldaie a gas forniscono acqua calda sanitaria a tutti i servizi igienici e laboratori.

Metodologia

Come detto in precedenza, il cuore di questo lavoro è la definizione di una procedura alternativa al metodo prescritto dalla normativa tecnica per il calcolo degli apporti di calore interni mensili che tenga conto del sistema di illuminazione artificiale presente ai fini del calcolo del consumo energetico globale di un edificio. La procedura utilizza gli apporti interni per illuminazione come elemento di connessione tra gli apporti interni complessivi (per illuminazione, persone e apparecchiature elettriche) e il consumo di energia per un edificio. Gli apporti interni derivanti dai sistemi di illuminazione sono determinati secondo la procedura prevista dalla norma tecnica UNI EN 15193:2008 e poi utilizzati per il calcolo degli indicatori di prestazione energetica EP_1 , EP_e e EP_{acs} secondo le norme UNI/TS 11300:2008.

In dettaglio, la procedura è strutturata nei seguenti passi:

1. L'energia necessaria per l'illuminazione per l'edificio DENERG di Torino viene calcolata attraverso l'indice L_{ENI} (kWh/m²/anno). Per una validazione, i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli calcolati attraverso Dialux 4.12. Nel calcolo, sono stati utilizzati i valori forniti dalla normativa in relazione ai seguenti parametri:
 - FD (fattore di dipendenza della luce naturale) che tiene conto della disponibilità di luce naturale in ambiente;
 - F_c (fattore di illuminamento costante) che considera la possibile riduzione di potenza elettrica dell'impianto di illuminazione ottenibile con l'utilizzo di un fotosensore, mantenendo costante l'illuminamento medio sul piano di lavoro;
 - F_o (fattore di dipendenza dell'occupazione) che tiene conto della presenza di utenti in ambiente.

Per il calcolo del LENI, si è assunto che l'impianto di illuminazione fosse acceso per 2607 ore/anno, valore quantificato attraverso un calcolo giorno per giorno dei due tempi "daylight time usage (t_d)" e "non-daylight time usage (t_n)". Si sono inoltre considerati due diversi sistemi di controllo per l'illuminazione: interruttore manuale on-off e controllo con fotosensore. Coerentemente con quanto prescritto della normativa, i sistemi di schermatura solare non sono stati considerati nel calcolo del LENI.

2. Per ogni valore LENI annuale, sono stati calcolati anche due valori 'stagionali': un valore LENI invernale (periodo di 6 mesi, dal 15 di ottobre al 15 di aprile, per un totale di 1514 ore di accensione delle luci) e un LENI estivo (3 mesi da giugno ad agosto, per un totale di 657 ore di accensione).
3. Dal calcolo del fabbisogno energetico annuo/stagionale per illuminazione è stata derivata la quota di calore immessa in ambiente (gli apparecchi di illuminazione sono, di fatto, sorgenti di calore interne all'ambiente. Partendo da dati di letteratura, per sorgenti fluorescenti lineari (attualmente in uso nell'edificio DENERG), si è assunta come energia termica immessa in ambiente una percentuale pari al 75% della potenza elettrica degli apparecchi; tale valore è stato considerato come il miglior compromesso tra due diversi valori di letteratura del 79% [3] e 72,5% [4]. Inoltre, il 75% è anche il valore citato in un testo ampiamente utilizzato in ambito illuminotecnico [5]).
4. I guadagni di calore interni dovuti all'illuminazione sono stati convertiti in (W/m^2).
5. Si è calcolato il valore totale degli apporti interni (in W/m^2) come somma degli apporti interni per l'illuminazione (calcolati al punto 4) e per la presenza di persone e di apparecchiature elettriche. Questi ultimi apporti sono stati ricavati dalla tabella G9 della norma ISO/FDIS 13790:2007, la quale, in relazione agli edifici ad uso ufficio, fornisce due valori, $7,4 W/m^2$ per gli uffici veri e propri (60% della superficie) e $3,1 W/m^2$ per gli altri spazi: il valore medio ponderato per il Dipartimento Energia è risultato pari a $5,68 W/m^2$; in questo valore, mancano ancora gli apporti dovuti all'illuminazione. Gli apporti totali sono stati dunque calcolati come:

$$(5,68 + \text{LENI}) W/m^2 \quad (2)$$

6. Il valore trovato per gli apporti interni totali, equazione (2), è stato utilizzato per calcolare gli indici di prestazione energetica per l'edificio DENERG. Si sono calcolati i valori degli indici EP_i , EP_e , EP_{acs} , EP_{ill} per ognuno dei tre seguenti valori di apporti interni totali:

- $6 W/m^2$ per uffici (come da normativa tecnica UNI/TS 11300);
- $(5,68 + \text{LENI}_{manuale}) W/m^2$, con un sistema di controllo manuale;
- $(5,68 + \text{LENI}_{fotosensore}) W/m^2$, con un sistema di controllo con fotosensore.

A differenza del valore di $6 W/m^2$, fissato indipendentemente dal sito considerato e dal controllo di illuminazione, i valori ottenuti tramite l'equazione (2) sono specifici per il sito di Torino e per il sistema di controllo dell'illuminazione utilizzato.

L'indice EP_{ill} è stato calcolato mediante la seguente equazione:

$$EP_{ill, pavimento} = \frac{\text{LENI}}{\eta_{el}} \quad (kWh/m^2/anno) \quad (3)$$

dove η_{el} è l'efficienza media degli impianti termoelettrici italiani, assunta pari a 0.46, come indicato dall'Autorità italiana per l'energia elettrica del gas e acqua con la delibera EEN 3/08:2008. L'equazione (3) è anche riportata nella versione italiana del protocollo LEED:2009 [6].

Il valore LENI, espresso in ($kWh/m^2/anno$), è stato poi convertito in ($kWh/m^3/anno$):

$$EP_{ill, volume} = EP_{ill, superficie} \cdot \frac{S_{utile}}{V_{lordoriscaldato}} \cdot (kWh/m^3/anno) \quad (4)$$

7. Infine, si è potuto calcolare l'indice globale di prestazione energetica EP_{gl} e la corrispondente classe energetica per l'edificio DENERG.
8. L'intera procedura è stata reiterata assumendo che l'edificio DENERG fosse a Palermo, mantenendo lo stesso tempo di accensione per l'impianto di illuminazione artificiale (2607 ore/anno). È stata invece modificata la durata dei periodi di climatizzazione: il periodo invernale è stato assunto uguale a circa 4 mesi (da dicembre a marzo, per un totale di 864 ore di accensione delle luci), mentre il periodo estivo è stato assunto pari a circa 6 mesi (da maggio a ottobre, per un totale di 1.314 ore di accensione).

9. I risultati ottenuti con le diverse procedure di calcolo dei guadagni interni (cfr. punto 6) sono stati confrontati. Nelle sezioni seguenti, i tre approcci sopra descritti ed adottati per il calcolo dei guadagni interni e per il calcolo di EP_{gi} sono denominati:
- a. Indici di prestazione energetica calcolati con apporti di calore interni medi pari a 6 W/m^2 per tutto l'anno (valore standard);
 - b1. Indici di prestazione energetica calcolati con apporti interni calcolati a partire dall'indice LENI con un sistema di controllo manuale (on/off);
 - b2. Indici di prestazione energetica calcolati con apporti interni calcolati a partire dall'indice LENI con un sistema di controllo con fotosensore.

Risultati e discussione

In Figura 3 sono rappresentate le differenze di apporti interni ottenute attraverso gli approcci A, B1 e B2 (approccio mensile): si può osservare come nel caso A gli apporti interni siano sottostimati rispetto ai casi B1 e B2 (che utilizzano l'indice LENI). Confrontando invece i risultati degli approcci B1 e B2 fra di loro, con i fotosensori si osserva una riduzione degli apporti interni legati all'illuminazione (a cui corrisponde una riduzione del consumo di energia elettrica). Gli apporti interni sono inoltre minori durante la stagione di raffreddamento di quanto non lo siano in relazione alla stagione di riscaldamento, grazie alla maggiore disponibilità di illuminazione naturale: tale aspetto è ancor più evidente con i fotosensori. Sempre con i fotosensori, appare evidente anche la differenza tra l'edificio a Torino e a Palermo. In generale, emerge dunque come il metodo di calcolo mensile sia molto più dettagliato, consentendo di valutare come variano i diversi indicatori di prestazione energetica nei diversi periodi dell'anno, tenendo conto del diverso contributo fornito dagli apporti di calore interni (Figura 4).

La Tabella 1 sintetizza invece le differenze tra i risultati di indicatori di prestazione energetica EP con le metodologie di calcolo A, B1 e B2 (l' EP_{acs} non è stato riportato in quanto costante). Le differenze maggiori si riscontrano sull' EP_i : a Torino, maggiori consumi per illuminazio-

ne (come si ottiene con i metodi B1 e B2) vuol dire avere maggiori apporti interni e quindi un EP_i minore, un EP_e maggiore, un EP_{iii} molto maggiore e, complessivamente, un EP_{gi} leggermente maggiore. A Palermo, dove si registrano minori consumi per climatizzazione invernale EP_i , si ottengono risultati maggiormente diversi in funzione delle procedure di calcolo utilizzate: con i diversi sistemi di controllo per l'illuminazione artificiale manuale e con fotosensori si raggiungono differenze relative rispettivamente del 25 e 14%.

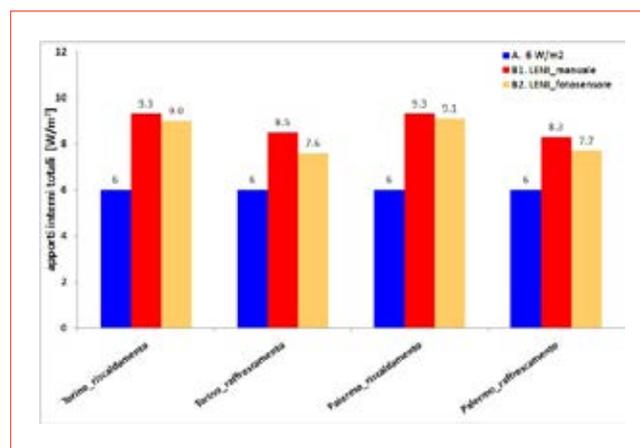


FIGURA 3 Apporti interni utilizzati per la stagione di riscaldamento e raffreddamento del DENERG, ipotizzato a Torino e Palermo

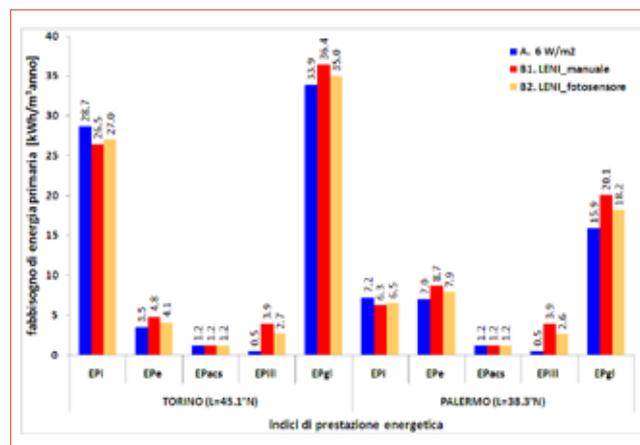


FIGURA 4 Indici di prestazione energetica per l'edificio DENERG a Torino e Palermo



	Torino				Palermo			
	EP _i	EP _e	EP _i	EP _{g1}	EP	EP _e	EP _i	EP _{g1}
$\Delta(B1:A)$ *	-7,4%	35,7%	804,8%	7,2%	-12,7%	24,1%	±10,8%	25,4%
$\Delta(B2:A)$ *	5,8%	17,6%	896,6%	3,4%	0,2%	12,8%	304,7%	13,7%

* $\Delta(B1:A) = (EP_{B1} - EP_A) / EP_A \cdot 100$

TABELLA 1 Differenze relative considerando le diverse metodologie di calcolo: A, B1, B2

In sintesi, si possono dedurre le seguenti considerazioni:

- Il consumo di energia per l’illuminazione EP_{ill} mostra andamenti simili per Torino e Palermo (coerentemente con i valori degli apporti interni per l’illuminazione, vedi Figura 3); confrontando le metodologie B1 e B2 con a A, la differenza relativa massima osservata è del +604% per Torino e del +611% per Palermo.
- Il consumo di energia per climatizzazione invernale EP_i è più elevato a Torino (dove il periodo di riscaldamento dura di più rispetto a Palermo); i valori ottenuti mediante gli approcci B1 e B2 sono inferiori a quanto riscontrato attraverso l’approccio A (differenza massima: -7,4% per Torino e -12,7% per Palermo, in presenza di un controllo dell’illuminazione di tipo manuale on-off). Nonostante queste differenze, l’edificio DENERG situato a Torino risulta nella stessa classe energetica (F) con tutte le metodologie A, B1, B2, il che significa che il tipo di procedura non determina un salto di classe. A Palermo invece si ottiene una classe E con le procedure A o B2 ed una classe D con l’approccio B1: l’uso di controlli manuali on/off comporta un maggior utilizzo dell’illuminazione artificiale con maggiori apporti di calore interni e quindi un consumo di energia per la climatizzazione invernale inferiore.
- Il consumo di energia per la climatizzazione estiva EP_e è inferiore per Torino (dove la stagione di raffreddamento ha una minor durata rispetto a Palermo); la differenza massima osservata tra le metodologie B1, B2 e la A è del +35,7% per Torino e +24,1% per Palermo (in presenza di un controllo manuale on-off dell’illuminazione artificiale). La classe energetica per il raffreddamento estivo dell’involucro edilizio a

Palermo non cambia (classe V) in base alla metodologia utilizzata, mentre un cambiamento di classe è stato riscontrato a Torino: classe II con un approccio A e classe III con approcci B1 e B2; l’utilizzo dei fotosensori comporta apporti interni minori per l’illuminazione e quindi una domanda di energia per il raffreddamento inferiore.

- Il consumo di energia EP_{g1} è più elevato a Torino che non a Palermo, il che si traduce con una diversa classe energetica dell’edificio: F a Torino e D/E a Palermo; in particolar modo a Palermo, sottostimare gli apporti interni dovuti al sistema di illuminazione utilizzato può causare una conseguente sottovalutazione dei consumi di energia per climatizzazione estiva e per illuminazione artificiale; questa differenza si può tradurre in questo caso in una differente classe energetica. La differenza massima osservata tra le metodologie B1, B2 e la A è del +7,2% per Torino e del +25,4% per Palermo (in presenza di un controllo manuale on-off per l’illuminazione).

I risultati ottenuti dimostrano che l’adozione di una procedura sulla base dell’indice LENI (quale quella proposta in questo articolo) per calcolare i guadagni interni dovuti all’illuminazione determina notevoli differenze rispetto al metodo indicato dalla normativa tecnica: si può verificare un salto di classe energetica che può anche determinare ripercussioni sul suo costo dell’edificio in fase di compravendita. Tale procedura ha il merito di tenere in considerazione fattori quali la densità di potenza installata, il tipo di controllo per l’illuminazione, il comportamento dell’utenza ed il contributo della potenza parassita dei dispositivi di illuminazione, nonché la disponibilità di luce naturale caratteristica del sito di progetto. Gli Autori auspicano che una procedura più precisa (sebbene più lunga e articolata) per il calcolo degli apporti interni negli edifici possa essere presto implementata nelle procedure prescritte dalle normative tecniche.

Questo studio è in qualche modo complementare ad uno studio di Magrini et al. [7], in cui gli autori hanno analizzato una serie di parametri che influenzano il consumo energetico di un edificio. Essi concludono che *“l’adozione di metodologie diverse per calcolare alcuni parametri di input può portare ad una determinazione non univoca dell’indicatore di prestazione energetica di un edificio. Poiché la certificazione energetica dovrebbe*

essere uno strumento di confronto tra edifici, la metodologia di calcolo dovrebbe essere univoca per la definizione della classe energetica”.

La continua evoluzione della normativa tecnica (in particolare le UNI/TS 11300 e UNI EN 15193) permetterà di effettuare ulteriori valutazioni prendendo in considerazione nuovi aspetti, espandendo l'attività di ricerca ad altri casi di studio.

Conclusioni

Il risultato principale di questo studio è la definizione di una nuova procedura, basata sul Lighting Energy Numerical Indicator (LENI) secondo la norma tecnica UNI EN 15193:2008, per tenere conto dell'integrazione fra luce naturale ed artificiale per il calcolo degli apporti di calore dovuti ai sistemi di illuminazione artificiale. Questi apporti, sommati agli apporti interni dovuti agli occupanti ed alle apparecchiature elettriche, vengono poi utilizzati per il calcolo dei vari indicatori di prestazione energetica di un edificio (per riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda e illuminazione). Il procedimento proposto tiene conto della diversa disponibilità della luce naturale nei diversi mesi dell'anno, in funzione della località considerata e del sistema di controllo degli apparecchi di illuminazione. In particolare, in questo lavoro sono stati analizzati

un sistema di controllo manuale (on/off) ed un sistema con fotosensori; quindi sono stati calcolati gli indici di prestazione energetica per un edificio ad uso uffici e laboratori del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino. Si è assunto inoltre che tale edificio fosse collocato sia a Torino, sia a Palermo. I valori EP sono stati calcolati attraverso la procedura standard prevista dalla normativa tecnica ed la nuova procedura proposta.

Si è potuto constatare che gli apporti di calore interni basati sul LENI sono superiori al valore standard di 6 W/m^2 fissato dalle norme tecniche italiane per gli uffici: questo naturalmente ha influenzato i risultati di prestazione energetica EP_1 , EP_e e EP_{III} , osservando anche uno spostamento della classe energetica in base all'approccio utilizzato. Questo cambiamento potrebbe anche avere un impatto sul prezzo di un edificio. Gli aspetti economici relativi al risparmio energetico ed ai costi dei dispositivi di illuminazione e dei sistemi di controllo devono pertanto essere studiati con maggiore attenzione rispetto a quanto non venga attualmente previsto dalla normativa tecnica. ●

Laura Blaso

ENEA, Dipartimento Tecnologie Energetiche,
Laboratorio smart cities and communities (Ispra – Varese)

Valerio R.M. Lo Verso

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia,
Gruppo di Ricerca TEBE

Guglielmina Mutani

Politecnico di Torino, Dipartimento Energia

abstract

Lighting consumption and buildings' energy certifications in Italy

This paper discusses the procedure prescribed by Italian Standards to account the heat gains due to artificial lighting in the calculation of the energy performance indices for a building. A new procedure, based on the Lighting Energy Numerical Indicator (LENI), is proposed. This consists of three steps: i) internal gains from lighting are calculated accounting for daylighting and controls; ii) these gains are summed to the internal heat gains from occupants and appliances; iii) the global heat gains are used to calculate the energy performance indices (for lighting, cooling, heating and hot water production) for an office building following the Italian Technical Standards. The case-study used is the building hosting the Department of Energy at Politecnico di Torino. The building was assumed to be located in Turin and Palermo, and the use of a manual on/off switch and of a photodimming sensor was also compared. For each configuration, all energy performance indices were calculated comparing standard and new approach.



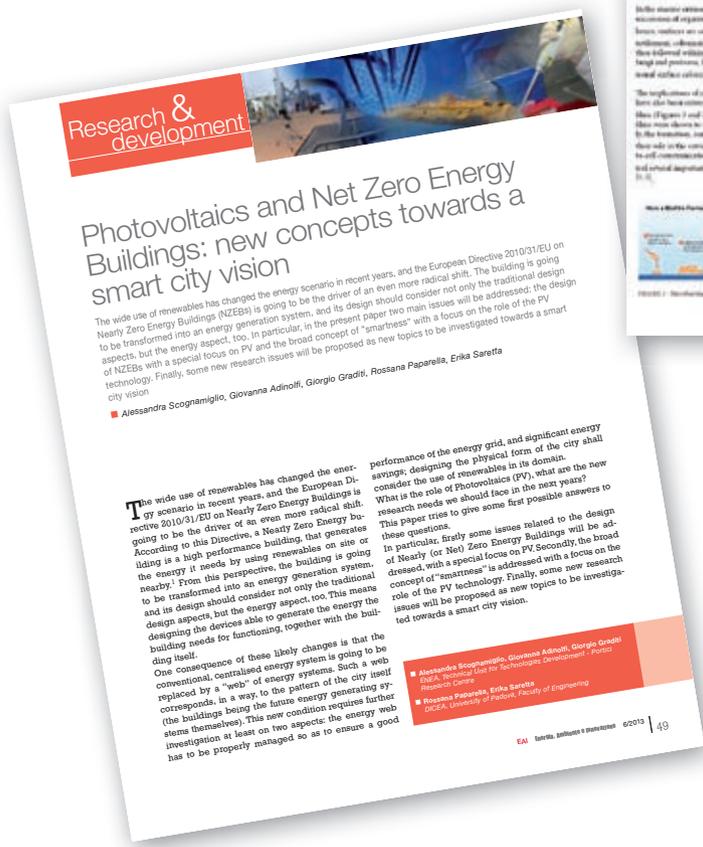
bibliografia

- [1] EL-TERTIARY (2008), Monitoring electricity consumption in the tertiary sector: <http://www.eu.fhg.de/el-tertiary>
- [2] V. R. M. Lo Verso, G. Mutani, L. Blaso (2014), A Methodology to Link the Internal Heat Gains from Lighting to the Global Consumption for the Energy Certification of Buildings in Italy. *Journal of Daylighting* 1, pag. 56-67
- [3] IESNA (1999), "Lighting Handbook", *Illuminating Engineering Society of North America*, New York, USA
- [4] R. Kane R, H. Sell H (2001), *Revolution in Lamps: A Chronicle of 50 Years of Progress*, Second Edition, Taylor & Francis, London, UK
- [5] G. Forcolini, (2004), "Lighting". HOEPLI, Milano, Italia
- [6] GBC-Italy, (2009), *Green building. Nuove costruzioni e ristrutturazioni*, Distributed through the Green Building Council Italy
- [7] A. Magrini, L. Magnani, R. Perneti, (2012), "The effort to bring existing buildings towards the A class: A discussion on the application of calculation methodologies", *Applied Energy* 97, pag. 438-450

Energia, Ambiente e Innovazione in rete

La rivista **Energia, Ambiente e Innovazione** è disponibile gratuitamente sul web (per computer ed e-reader) e sui dispositivi mobili Apple:

- sul web alla pagina <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/EAI> tutti gli articoli pubblicati dal 2003 al 2014 in formato pdf e, a partire dal 2014, anche in formato epub, utilizzato per visualizzare i libri digitali
- sui dispositivi mobili Apple (iPhone, iPad e iPod touch) grazie ad una App liberamente reperibile in App Store



Gli Speciali di Energia, Ambiente e Innovazione

La rivista, oltre ai fascicoli a cadenza bimestrale, realizza numeri “Speciali” monografici su tematiche tecnico-scientifiche di attualità.

Dieci gli Speciali finora pubblicati:

- Le tecnologie di Carbon Capture and Storage
- Forests: a millenary heritage that guarantees us life
- Verso la green economy: strategie, approcci e opportunità tecnologiche
- Knowledge, Diagnostics and Preservation of Cultural Heritage
- Biotecnologie per lo sviluppo sostenibile
- ENEA Technologies for Security
- Idee per lo sviluppo sostenibile
- Transition and global challenges towards low carbon societies
- Ocean energy: Ongoing research in Italy
- ENEA per EXPO 2015

Tutti gli Speciali sono disponibili online.



**energia
ambiente
e innovazione**

bimestrale dell'ENEA

anno 61

novembre - dicembre 2015