



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

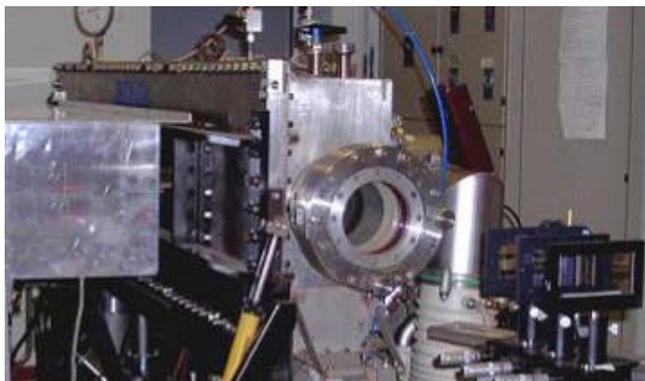


FIGURA 1 Vista frontale del sistema laser eccimero Hercules, interamente progettato e realizzato dal Laboratorio Eccimeri, ENEA Frascati. Da sinistra a destra: involucro contenente il sistema LC-inversion in grado di modulare 600 J elettrici, testa laser con la finestra di uscita degli impulsi laser 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 eccimero, 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].

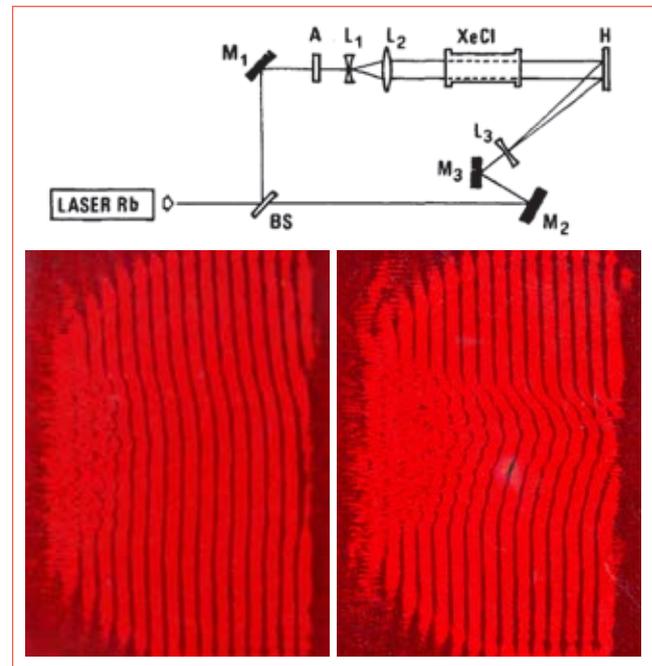


FIGURA 3 In alto, schema dell'interferometro olografico utilizzato per misurare l'evoluzione spazio-temporale della scarica di pompaggio del laser eccimero. Il laser a rubino JK2000 emette un doppio impulso (20 ns, 5 J/impulso) a ritardo variabile, con 1 m di lunghezza di coerenza. BS=separatore di impulso; M1 e M3 = specchi totalmente riflettenti; M2 = specchio vibrante; A = attenuatore; L1-L2 = espansore di fascio; L3 = lente divergente; XeCl = mezzo attivo laser eccimero; 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 bluastrea 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*.

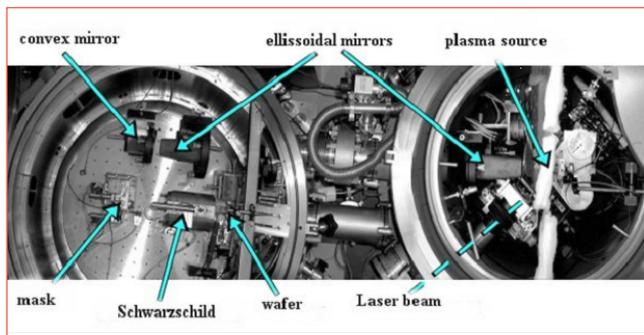


FIGURA 6 Vista dall'alto dell'apparato MET EGERIA presso il Laboratorio Eccimeri
Fonte: ENEA

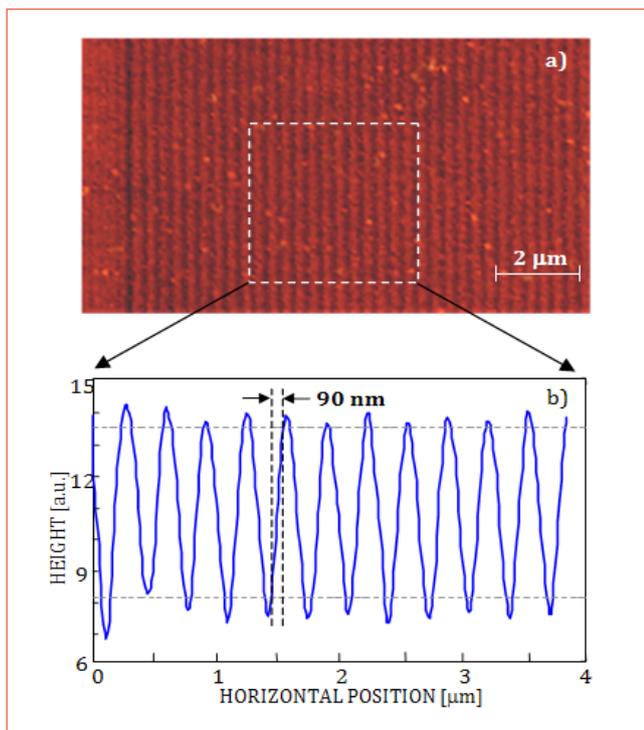


FIGURA 7 a) Foto al microscopio a forza atomica del pattern di righe ottenuto sul materiale PMMA da fotoregistrazione commerciale. b) Profilo delle righe all'interno della zona centrale delimitata dai segmenti tratteggiati in a)

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 $1,6 \mu\text{m}$ 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-

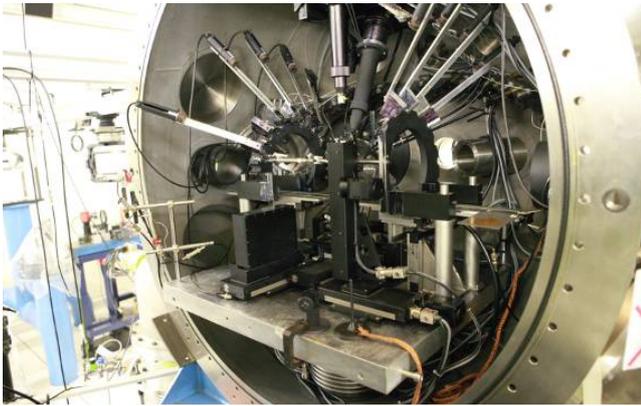


FIGURA 8 Camera sperimentale dell'impianto ABC



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.).

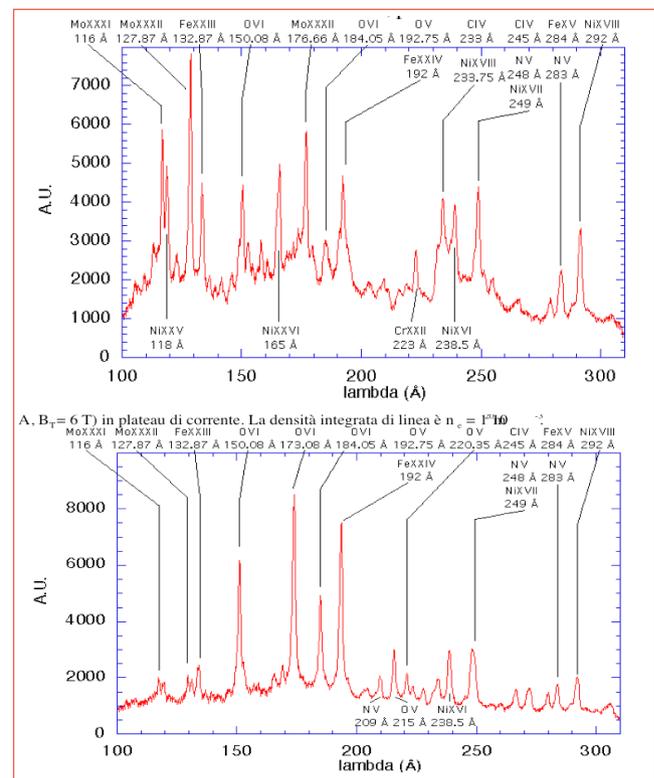


FIGURA 10 Esempi di spettri nella regione ultravioletta da vuoto nel tokamak FTU

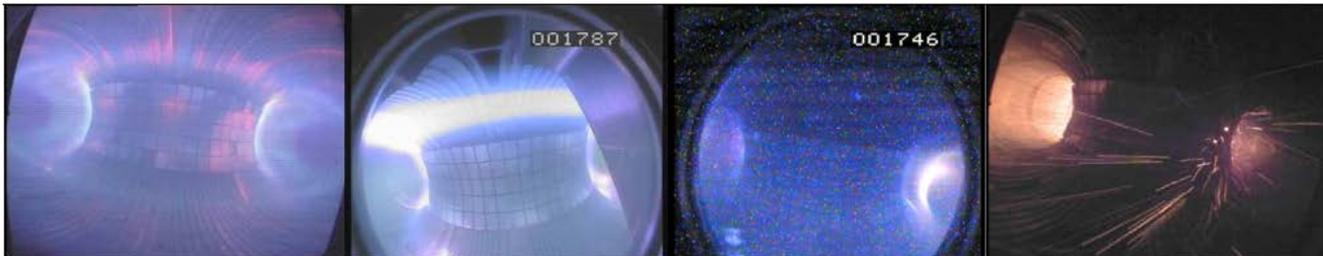


FIGURA 11 Immagini ottiche della periferia del tokamak FTU durante una scarica di plasma:

- 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

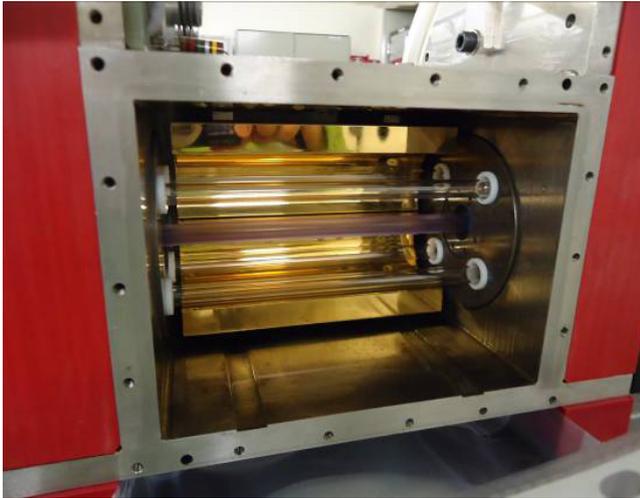


FIGURA 14 Una testa di amplificazione del laser - la barra centrale di vetro al neodimio è circondata dalle lampade lineari per il pompaggio ottico e dai riflettori dorati per l'ottimizzazione dell'efficienza ottica

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} - 10^{15} W/cm².

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.

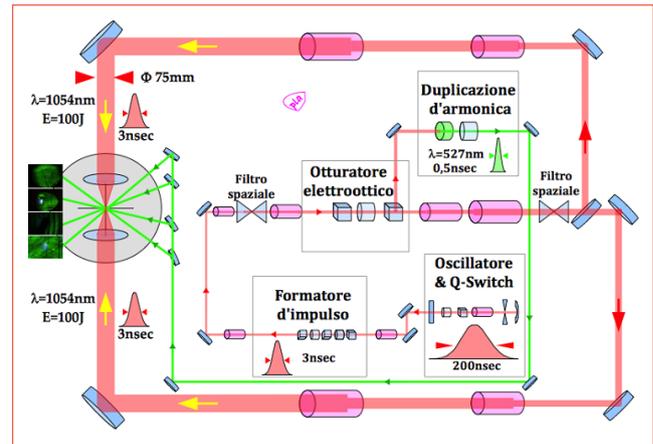


FIGURA 15 Schema di funzionamento del laser ABC. Il fascio originato nella cavità dell'oscillatore viene formato temporalmente con otturatori elettroottici ed amplificato dalle barre di neodimio prima di essere diviso in due fasci uguali e focalizzato sul bersaglio all'interno della camera sperimentale (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

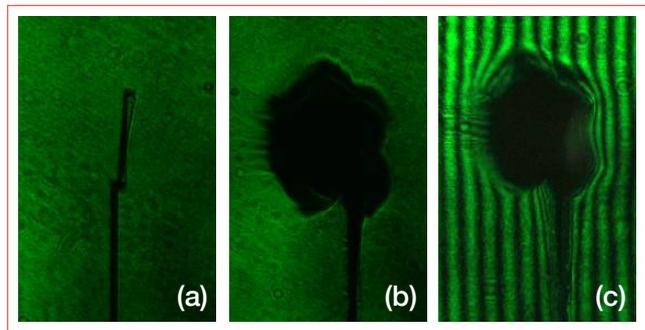


FIGURA 16 Immagini del bersaglio prima e circa 10 nanosecondi dopo l'irraggiamento del laser principale (proveniente dal lato sinistro) sparo #506. Le immagini a) e b) mostrano le ombre dovute al fascio diagnostico (in luce verde, perpendicolare al fascio principale ed al piano del foglio). Nell'immagine 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)

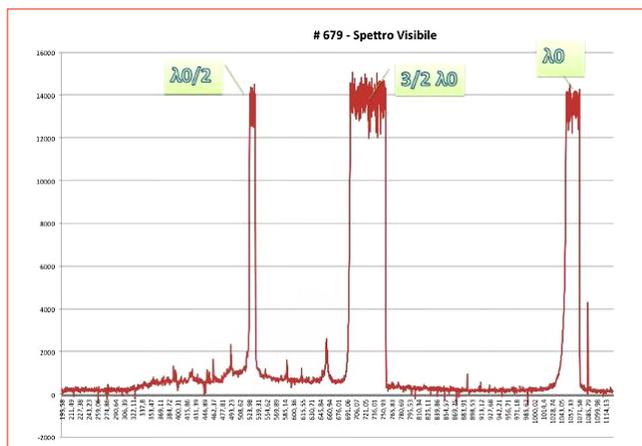


FIGURA 17 Spettro tipico di instabilità parametriche in un colpo del laser ABC su un bersaglio solido

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 μm . 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 μm , 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 μm e i 32 μm . 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 i 32 μm . 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).

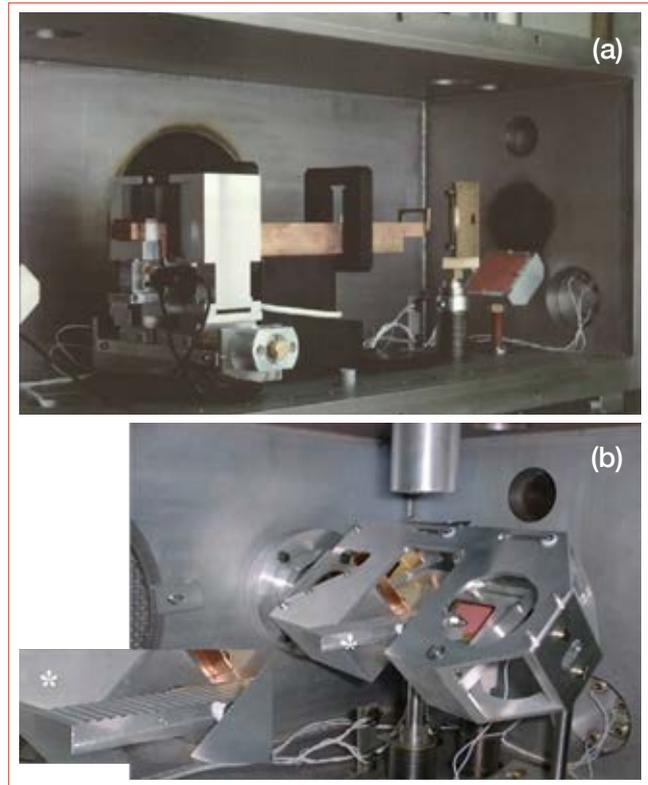


FIGURA 18 Foto degli esperimenti a) FEL-Cerenkov, b) Grating-FEL

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

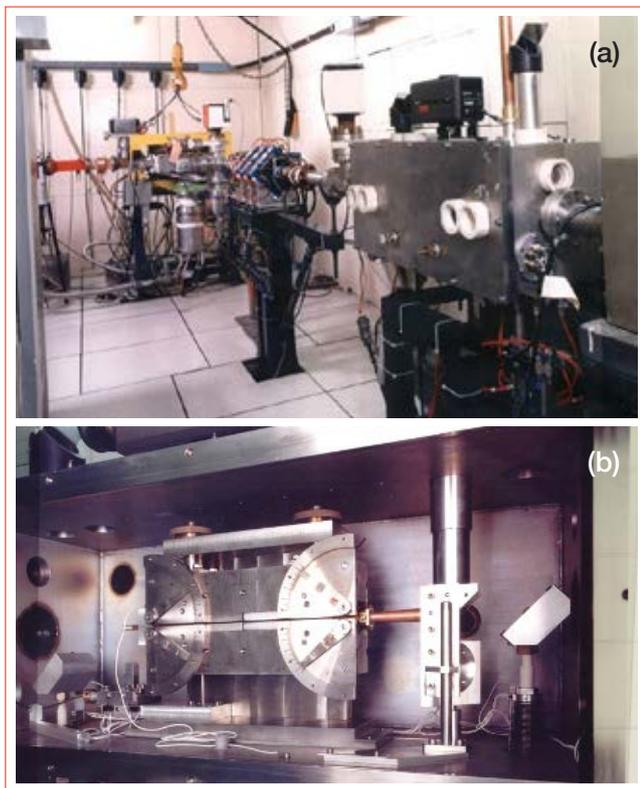


FIGURA 19 Impianto FEL-Compatto: a) Visione d'insieme; b) Ondulatore e risonatore in guida d'onda

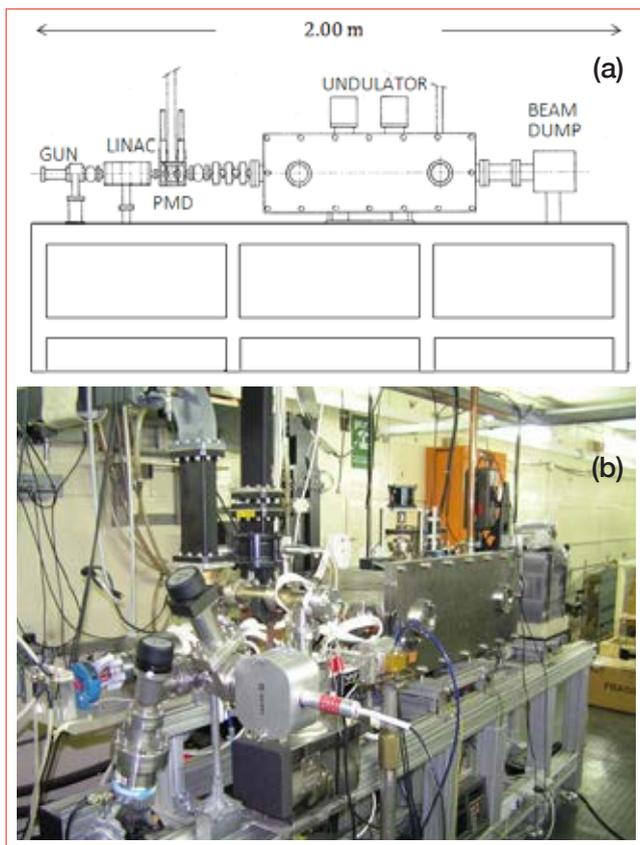


FIGURA 20 Impianto FEL-CATS: a) Schema del lay-out sperimentale; b) Visione d'insieme

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

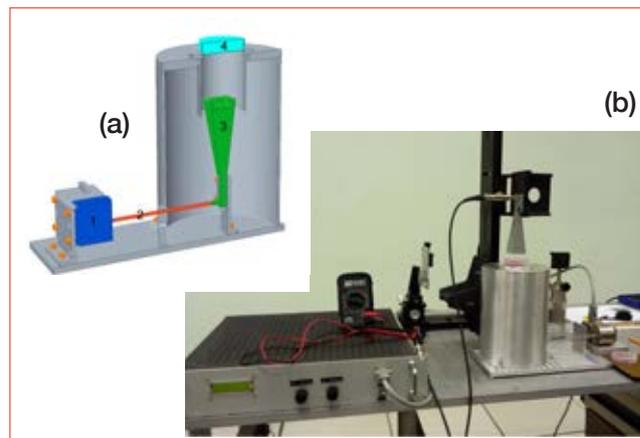


FIGURA 21 Irraggiamenti a 25 GHz: a) Schema del lay-out sperimentale; b) Visione d'insieme

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].

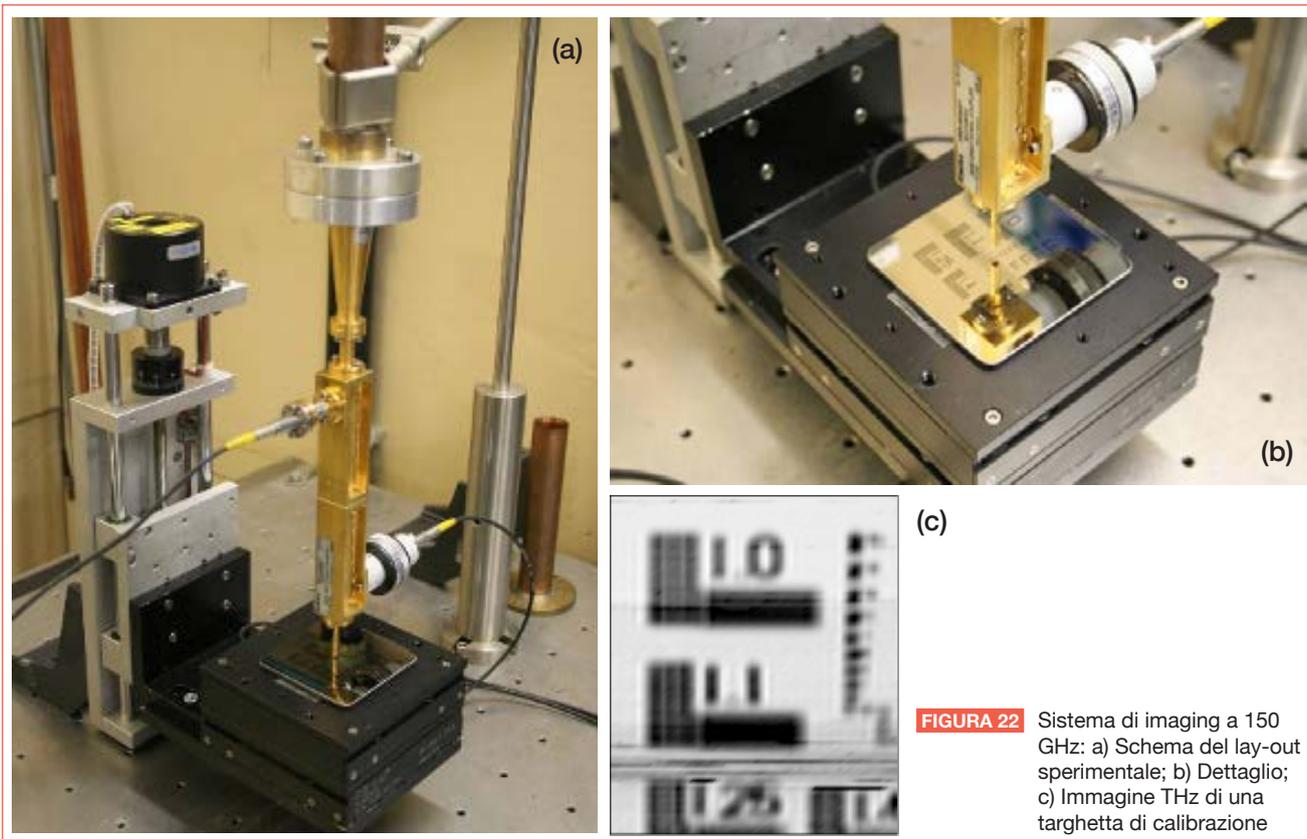


FIGURA 22 Sistema di imaging a 150 GHz: a) Schema del lay-out sperimentale; b) Dettaglio; c) Immagine THz di una targhetta di calibrazione

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. Cioia, 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. Gemini, 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. Gemini, 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