

# Produzione di nanomateriali: tecnologie chimiche e fisiche

Si definiscono nanomateriali quei materiali che hanno almeno una dimensione nell'intervallo compreso tra 1 e 100 nm. Con il termine nanotecnologia si fa riferimento, invece, allo studio dei fenomeni e della manipolazione dei materiali a livello atomico e molecolare. I materiali portati alle dimensioni nanometriche assumono particolari proprietà chimico-fisiche differenti dai corrispondenti macromateriali convenzionali. Intervenendo sulla struttura dei materiali a scala nanometrica è possibile controllarne alcune fondamentali proprietà (ad es. temperatura di fusione, proprietà magnetiche ed elettriche) senza variarne la composizione chimica. In tale ottica sono di fondamentale importanza la conoscenza e il controllo dei processi produttivi al fine di progettare e ottenere il nanomateriale più adatto a una specifica applicazione. A tale scopo vengono descritti una serie di processi di produzione dei nanomateriali con esempi applicativi

DOI 10.12910/EAI2015-029

■ L. Giorgi, E. Salernitano

## Introduzione

L'interesse per i nanomateriali e le nanotecnologie ha assunto negli ultimi anni un livello tale che i due termini sono oramai familiari non solo agli addetti ai lavori, ma anche ad un pubblico più ampio. Si definiscono nanomateriali tutti i materiali caratterizzati dall'aver almeno una delle tre dimensioni spaziali inferiori ai 100 nm. La scala nanometrica rappresenta una zona di confine in cui si attua il passaggio tra il mondo macroscopico, regolato dalle leggi della fisica classica, e la scala atomica, regolata invece dalla meccanica quantistica. Le nanotecnologie presuppongono la capacità di controllare e manipolare la materia su scala nanometrica e hanno come obiettivo lo sfruttamento delle proprietà e dei fenomeni fisici e chimici che si manifestano su tale

scala dove, a causa dell'elevatissimo rapporto superficie/volume, diventano predominanti le proprietà degli atomi di superficie che sono numericamente prevalenti.

Nanomateriali e nanotecnologie si sono sviluppati come conseguenza dei significativi progressi della scienza dei materiali. Sono settori di ricerca altamente interdisciplinari, che riguardano contemporaneamente la fisica, la chimica, la biologia, la scienza dei materiali e tutte le discipline ingegneristiche, rendendoli estremamente ricchi di potenzialità ma, allo stesso tempo, molto complessi da studiare.

I nanomateriali possiedono specifiche proprietà strutturali e funzionali diverse sia da quelle su scala atomica che da quelle di massa [1]. Possono essere prodotti con varie tecnologie ed è da aspettarsi che il

loro impiego avrà un notevole impatto nello sviluppo industriale e nella vita quotidiana, in particolare nei seguenti settori: energia, trasporto, elettronica industriale e di consumo, salute, edilizia ecc.

## Classificazione e proprietà dei nanomateriali

Per comprendere e apprezzare la diversità dei nanomateriali è necessaria una certa categorizzazione e il metodo migliore è quello di classificarli in base alla loro dimensionalità, cioè al numero delle dimensioni che sono confinate nel campo della

Contact person: Leonardo Giorgi  
leonardo\_giorgi@libero.it

nanoscala (<100 nm). Come mostrato in Tabella 1, si distinguono quindi strutture zero-dimensionali (0D, in cui tutte e tre le dimensioni sono su scala nanometrica), mono-dimensionali (1D, in cui solo una delle tre dimensioni è superiore ai 100 nm), bi-dimensionali (2D, in cui solo una delle tre dimensioni è su scala nanometrica) e tri-dimensionali (3D, in cui nessuna delle tre dimensioni è su scala nanometrica). A queste categorie possono poi appartenere materiali amorfi o cristallini, mono o policristallini, costituiti da uno o più elementi chimici, isolati o integrati in una matrice ecc., offrendo quindi una gamma di possibilità e combinazioni molto ampia.

I materiali ridotti a scala nanometrica possono mostrare proprietà differenti rispetto a quelle che esibiscono su scala macroscopica, rendendo possibili applicazioni uniche: materiali opachi diventano trasparenti (rame); materiali chimicamente inerti acquistano proprietà catalitiche (oro, nichel, ferro); materiali stabili diventano combustibili (alluminio); materiali isolanti diventano conduttori (silicio). Tali cambiamenti sono legati a effetti quantistici quali la variazione della struttura elettronica, un elevato numero di atomi superficiali, un aumento dei legami insaturi (dangling bond), le variazioni della banda proibita (band gap).

### Tecnologie per la produzione di nanomateriali

Il controllo del processo di sintesi dei nanomateriali, cioè la capacità di ottenere nanostrutture con

Nanomateriali tipici		Dimensioni	Materiali
(0D)	Nanocristalli, cluster, quantum dots	Diametro 1-10 nm	Metalli, semiconduttori, materiali magnetici
	Altre nanoparticelle	Diametro 1-100 nm	Ossidi ceramici
(1D)	Nanofili	Diametro 1-100 nm	Metalli, semiconduttori, ossidi
	Nanotubi	Diametro 1-100 nm	Carbonio, TiO <sub>2</sub> , ZnO
(2D)	Matrici di nanoparticelle	Svariati nm <sup>2</sup> -µm <sup>2</sup>	Metalli, semiconduttori, materiali magnetici
	Superfici e film sottili	Spessore 1-100 nm	Materiali vari inorganici e organici
(3D)	Strutture tridimensionali	Diversi nm nelle tre dimensioni	Metalli, semiconduttori, materiali magnetici

**TABELLA 1** Classificazione dei nanomateriali

Metodi in fase vapore	Deposizione fisica da fase vapore (PVD)
	Deposizione chimica da fase vapore (CVD) con diversi sistemi di attivazione (T=thermal, PE=plasma enhanced, HF=hot filament, MO=metal organic, MW=micro wave ecc.)
Metodi in fase gas	Pirolisi in fiamma
	Ablazione laser
	Sintesi in plasma con radiofrequenza (RF) e microonde (MW)
	Plasma spray
	Condensazione in gas inerte
Metodi allo stato solido	Espansione in gas inerte (free-jet)
	Alligazione meccanica
	Sintesi meccanochimica
Metodi chimici	Macinazione
	Deposizione sol-gel
	Sintesi idrotermica
	Sintesi organica, inorganica e metallo-organica
	Sintesi elettrochimica
	Elettrodeposizione (ELD)
	Autoassemblaggio
Trattamento sono-chimico	

**TABELLA 2** Tecnologie di sintesi dei nanomateriali

specifiche morfologie, e quindi controllate, è un requisito fondamentale per ottenere il materiale

più adatto ad una specifica applicazione.

Gli approcci utilizzati possono essere di tipo chimico e fisico. L'approccio chimico (detto anche "bottom up") si basa sull'assemblaggio di atomo dopo atomo o molecola dopo molecola, per costruire il nanomateriale. A questo scopo viene sfruttata la capacità che hanno alcuni atomi o molecole di autoassemblarsi in ragione della loro natura e di quella del substrato. L'approccio fisico (detto anche "top down") si basa, invece, sulla creazione di strutture molto piccole partendo da macromateriali, come nel caso dei "microchip" di silicio. Nella pratica, la sintesi dei nanomateriali è effettuata con tecnologie che possono anche combinare l'approccio chimico con quello fisico. Nella Tabella 2 sono riportati alcuni tra i metodi più comunemente utilizzati per la sintesi di nanomateriali, classificati in base alla tipologia. Di seguito saranno descritti alcuni dei metodi più comunemente impiegati, indicando anche il tipo di dimensionalità del nanomateriale che è possibile ottenere. Maggiori dettagli saranno forniti con riferimento in particolare all'elettrodeposizione, alla sintesi chimica di nanotubi e alla deposizione chimica da fase vapore. Di tali tecnologie di sintesi saranno inoltre riportati alcuni esempi dei risultati sperimentali ottenuti.

#### *Condensazione in gas inerte (nanomateriali 0D)*

Un materiale inorganico o organico è vaporizzato in una camera sotto vuoto in cui è immes-

so periodicamente Ar o He. La sorgente del vapore può essere una navicella di evaporazione, un "target" per sputtering o per ablazione laser. Quando gli atomi evaporano, perdono rapidamente energia collidendo con il gas inerte. Il vapore si raffredda rapidamente e supersatura per formare nanoparticelle di dimensioni comprese fra 2 e 100 nm, che sono raccolte su un "dito freddo" raffreddato con N<sub>2</sub> liquido e successivamente raschiate, ancora in atmosfera inerte, per le lavorazioni successive.

Tale tecnologia consente anche la produzione di nanoparticelle di leghe metalliche o compositi metallo/ossido utilizzando sorgenti multiple.

Il problema principale della condensazione in gas inerte è l'agglomerazione delle nanoparticelle, che può essere controllata regolando i parametri di processo e utilizzando un opportuno substrato di deposizione.

#### *Espansione in gas inerte (nanomateriali 0D)*

Il materiale è vaporizzato e gli atomi prodotti sono trasportati da una corrente di elio ad alta pressione che poi si espande attraverso una strozzatura a velocità supersonica in una camera a bassa pressione. L'espansione adiabatica comporta un raffreddamento rapido, così gli atomi vaporizzati condensano formando cluster di pochi nanometri. La dimensione e la distribuzione dimensionale delle particelle sono controllate dalla velocità di vaporizzazione e dal flusso di gas inerte.

#### *Trattamento sono-chimico (nanomateriali 0D)*

Nel processo sono-chimico per nucleare una reazione chimica sono utilizzati gli ultrasuoni, in un campo di frequenza fra 15 kHz e 1 GHz. Un trasduttore magnetostriativo o piezoelettrico genera un'onda ultrasonica in un reattore pieno di liquido che ne consente la trasmissione. Le onde ultrasoniche non sono di dimensioni molecolari, perciò non vi è un accoppiamento diretto del campo acustico con le specie chimiche, ma le reazioni avvengono per cavitazione. La componente elastica delle onde è sufficientemente intensa da espellere il liquido e formare una minuscola cavità. La componente compressiva dell'onda comprime la cavità, ma prima che ciò accada, parte dei reagenti vaporizza al suo interno. La successiva onda elastica espande nuovamente la bolla, il cui volume oscilla alla frequenza dell'onda acustica. Quando la bolla raggiunge una dimensione critica, collassa. Il collassamento è un processo adiabatico, poiché la sua elevata velocità non lascia tempo per un flusso di calore, generando un piccolo "hot spot" localizzato. Le temperature che si raggiungono sono molto alte (fino a 5000 °C, come la superficie del Sole) come pure le pressioni (circa 2000 atm, come le profondità oceaniche), le quali attivano le reazioni di formazione delle nanoparticelle dentro lo "spot". Utilizzando precursori organo-metallici, ceramici e metallici, si possono ottenere nano-

particelle piccole fino a 2 nm. La tecnica sono-chimica può essere utilizzata per produrre elevati volumi di nanomateriali per applicazioni industriali.

#### *Deposizione sol-gel (nanomateriali 0D)*

Mediante tale processo è possibile ottenere particelle ultrafini, nanofilm e membrane nanoporose. Viene preparata, con appropriato solvente, una soluzione di uno o più precursori, in genere sali metallici o composti organometallici come gli ioni di alcossidi metallici. I precursori sono sottoposti a una reazione di polimerizzazione per formare una sospensione colloidale (sol) costituita da particelle discrete finemente disperse, che sono mantenute in sospensione aggiungendo un tensioattivo. Il sol può essere trattato per estrarre le particelle o essere colato o depositato mediante rotazione (spin coating) su un substrato. È quindi convertito in un gel mediante un trattamento chimico che produce un "superpolimero", cioè un'enorme molecola sotto forma di un reticolo tridimensionale. La successiva evaporazione del solvente consente di ottenere, in base alla specifica applicazione, un film denso o nanoporoso. La tecnologia sol-gel è utilizzata per la produzione di un'ampia varietà di materiali, incluse vernici, ceramiche, cosmetici, detergenti, materiali tubolari e rivestimenti.

#### *Autoassemblaggio molecolare (nanomateriali 0D/2D)*

Il metodo dell'autoassemblaggio molecolare consiste nell'auto-

organizzazione di molecole organiche e/o inorganiche. L'intero mondo naturale si basa su tale processo. L'esempio più evidente è la cristallizzazione: basta raffreddare una soluzione satura di zucchero o sale da cucina e le molecole si autoassemblano in un cristallo.

A livello di processo di laboratorio o industriale è necessario creare condizioni tali per cui gli atomi o le molecole si autoassemblino in strutture utilizzabili, guidati dalla minimizzazione della loro energia. Il grande vantaggio dell'autoassemblaggio risiede nel fatto che il sistema converge verso una specifica configurazione senza la necessità di un ulteriore controllo. Tipicamente, gli aggregati formati tendono ad essere legati con legami relativamente deboli con energie poco più grandi di  $kT$ /mole. Le molecole autoassemblate formano le micelle, cioè aggregati di molecole con una parte idrofila e una parte idrofoba. Tali aggregati si formano spontaneamente con una dimensione che dipende dalla concentrazione delle molecole anfifiliche in soluzione. Il centro delle micelle agisce come camera di reazione e determina le dimensioni delle nanoparticelle che si generano.

#### *Deposizione fisica da fase vapore (PVD) (nanomateriali 0D/2D)*

Uno strato sottile di materiale è depositato da fase vapore su un substrato da rivestire. Il deposito può essere costituito da nanoparticelle isolate, agglomerati di nanoparticelle o da un film continuo di spessore nanometrico. Il ma-

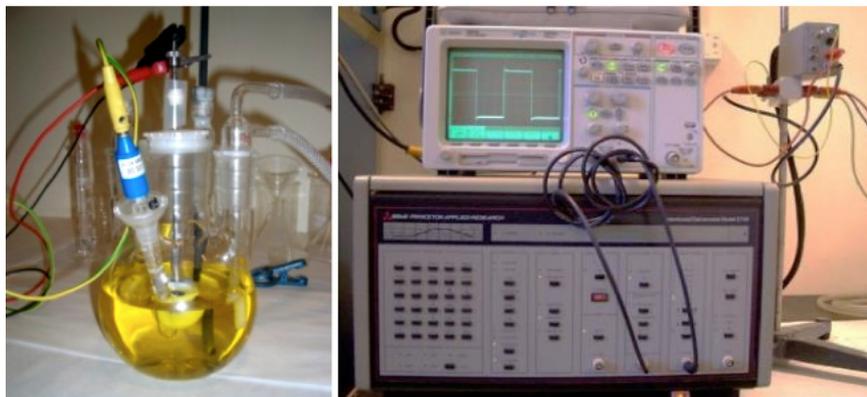
teriale da depositare è evaporato, in una camera sotto vuoto, per riscaldamento diretto o mediante un fascio elettronico per poi condensare sul substrato freddo.

La PVD può essere assistita da "ion plating", in cui il vapore è ionizzato e accelerato da un campo elettrico (la sorgente funziona da catodo e il substrato da anodo). Nella PVD assistita da "sputtering" un campo elettrico accelera degli ioni argon sul target, che emette quindi ioni del materiale da depositare verso il substrato dove vengono neutralizzati. Introducendo un gas reattivo si possono formare composti (ad es.:  $Ti+0.5N_2 \rightarrow TiN$ ).

Pressoché ogni metallo o composto che non decompone chimicamente può essere depositato per "sputtering", rendendo tale processo molto flessibile. I "target" possono essere cambiati durante il processo, consentendo la costruzione di multistrati nanostrutturati. È un processo utilizzabile su scala industriale per rivestimenti protettivi, antiusura e catalitici.

#### *Elettrodeposizione (ELD) (nanomateriali 1D/2D)*

È una tecnica semplice e poco costosa, normalmente utilizzata in ambito industriale per il rivestimento con un metallo di oggetti di forma anche complessa, per scopi protettivi, estetici e funzionali. Consente di depositare nanoparticelle o strati metallici (anche leghe) su un substrato conduttore. Il processo consiste nella riduzione potenziostatica o galvanostatica di ioni metallici presenti in soluzione acquosa sulla super-



**FIGURA 1** Strumentazione utilizzata per l'elettrodeposizione

ficie del substrato. In Figura 1 è mostrata una cella elettrochimica con la relativa strumentazione.

I parametri di processo, cioè la sovratensione applicata, la carica e la durata del processo, determinano la morfologia e la densità dei cluster metallici che costituiscono il deposito. Lo spessore dello strato dipende dalla densità di corrente e dal tempo di elettrolisi. Il deposito può essere anche staccato dal substrato, se quest'ultimo è in qualche modo solubilizzabile. Variando i parametri di elettrodeposizione e applicando la po-

larizzazione in maniera impulsiva è possibile controllare la morfologia del deposito: film compatto nanostrutturato, film nanoporoso, strutture colonnari, nanotubi, nanoparticelle separate fra loro.

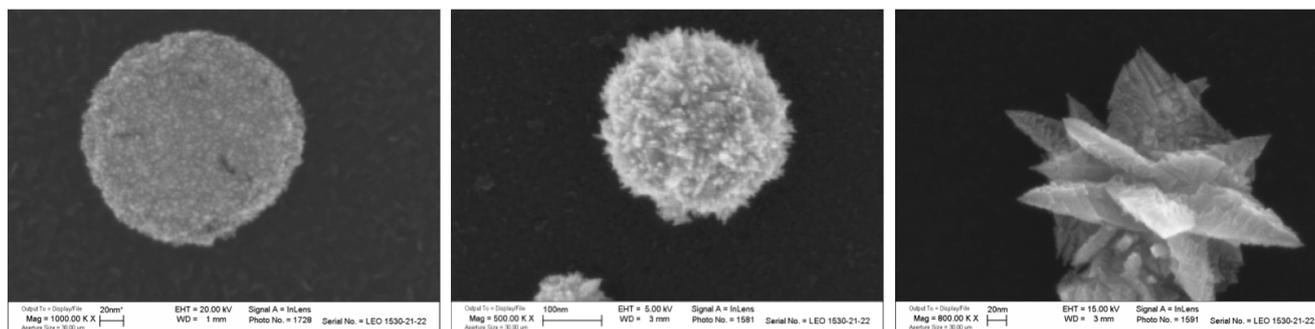
In Figura 2 sono mostrate, ad esempio, tre diverse morfologie di nanoparticelle di Pt elettrodepositate su un substrato di carbone vetrificato.

Il controllo della micro/nanostruttura è cruciale per adeguare il deposito alle specifiche applicazioni. La maggior parte dei depositi cresce in maniera colonnare. Per

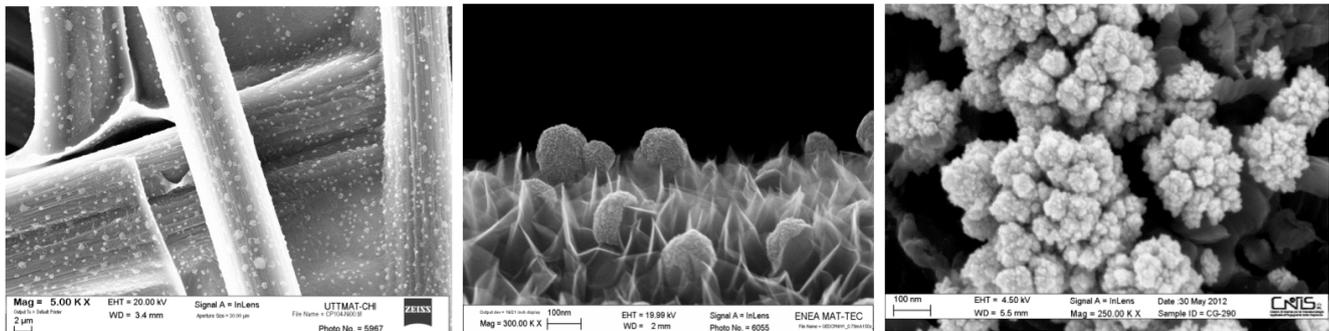
ottenere nanoparticelle è necessario bloccare la crescita dei cristalli quando sono ancora molto piccoli e nuclearne di nuovi. Un metodo è quello di utilizzare una polarizzazione impulsiva combinata con un'elevata densità di corrente. Tale polarizzazione può essere applicata con un controllo del potenziale o della corrente (per un processo industriale è preferibile quest'ultima).

Un'importante applicazione ai nanomateriali è la sintesi di nano-elettrocatalizzatori per celle a combustibile ad elettrolita polimerico. In particolare, l'ELD consente di ridurre notevolmente il carico di catalizzatore (Pt o catalizzatori bimetallici a base di Pt), passando da 0,3 a 0,01 mg cm<sup>-2</sup>, mantenendo però elevate prestazioni catalitiche e aumentando allo stesso tempo la stabilità nel tempo.

In Figura 3 sono riportati alcuni esempi di impiego dell'elettrodeposizione nell'ambito delle celle a combustibile ad elettrolita polimerico: nanoparticelle di Ni elettrodepositate su carta di grafite come catalizzatori per la sintesi di nanofibre



**FIGURA 2** Differenti morfologie di elettrodepositi di platino ottenuti variando i parametri di processo [2]



**FIGURA 3** Nanocompositi nichel/carta di grafite, platino/nanopareti di carbonio, platino-oro/nanofibre di carbonio

di carbonio [3], nanoparticelle di Pt elettrodepositate su nanopareti di carbonio come elettrocatalizzatori per l'ossidazione dell'idrogeno [4,5], nanoparticelle bimetalliche di Pt e Au elettrodepositate su nanofibre di carbonio come elettrocatalizzatori per l'ossidazione del metanolo [6,7].

#### Sintesi elettrochimica di nanotubi (nanomateriali 1D)

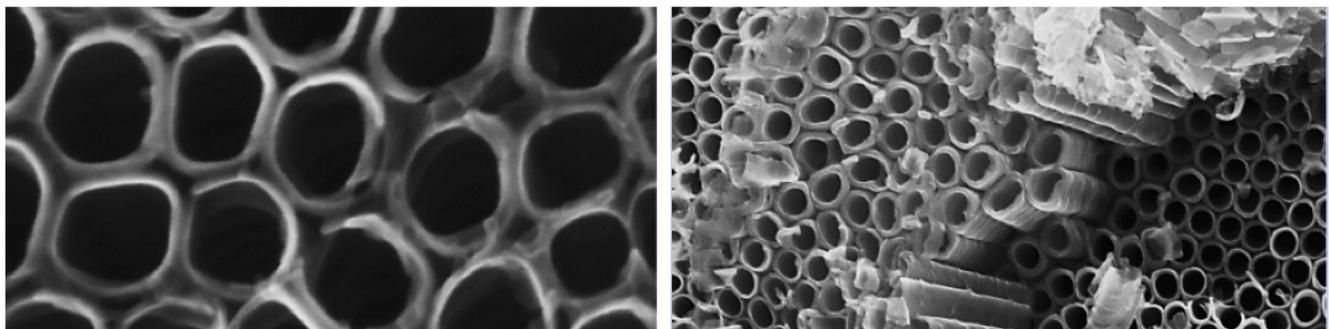
Si tratta di un processo di formazione di nanotubi mediante ossidazione elettrochimica di un metallo in un elettrolita contenente ioni fluoruro. La sintesi consiste in tre fasi: I) crescita anodica di un

ossido compatto sul metallo; II) formazione di un ossido poroso; III) dissoluzione chimica dell'ossido da parte degli ioni  $F^-$ , assistita dal campo elettrico, con formazione di nanotubi.

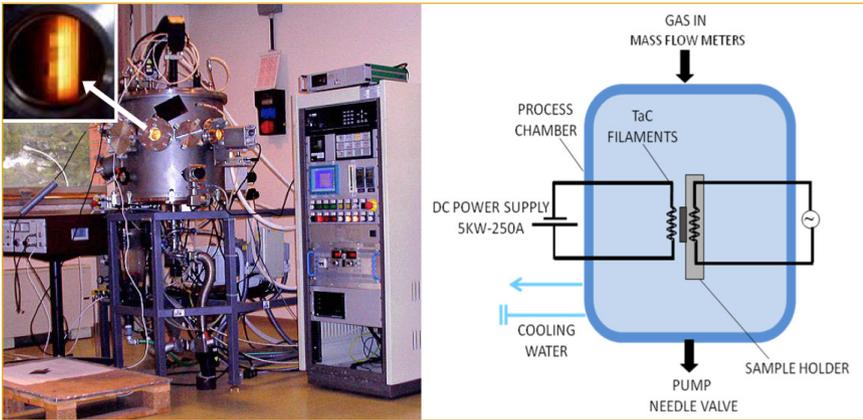
Un esempio interessante è quello della titania ( $TiO_2$ ), nel cui caso si ottiene un *semiconduttore di tipo n* con nanotubi che raggiungono lunghezze di decine di mm e diametro compreso fra 20 e 100 nm (Figura 4). I nanotubi di  $TiO_2$  trovano impiego in molteplici applicazioni: celle solari a sensibilizzante organico, celle a combustibile, sensori di gas, batterie, foto-abbattimento di inquinanti organici.

#### Deposizione chimica da fase vapore (CVD) (nanomateriali 0D, 1D, 2D, 3D)

Tale tecnica si basa sulla dissociazione, in genere catalitica, in fase gassosa delle molecole dei precursori e sulla deposizione degli atomi così ottenuti sulla superficie di un substrato. I catalizzatori nei processi CVD sono riscaldati a temperature comprese tra 500 e 1000 °C, e i precursori gassosi fluiscono nella camera di reazione, dove sia la pressione sia la composizione sono controllate e mantenute costanti. La composizione e la morfologia del catalizzatore e le interazioni



**FIGURA 4** Nanotubi di  $TiO_2$ , ottenuti mediante anodizzazione elettrochimica [8]



**FIGURA 5** Impianto HFCVD dell'ENEA e sua rappresentazione schematica [9]

substrato/catalizzatore sono, pertanto, parametri importanti da considerare nell'ottimizzazione del processo per una produzione di nanostrutture su larga scala e a costi accettabili.

La CVD presenta il vantaggio di essere un metodo continuo o semi-continuo, scalabile fino a livello industriale, che consente la produzione di grandi quantità di nanomateriali di elevata purezza, e permette la sintesi di nanostrutture anche su substrati "patternati".

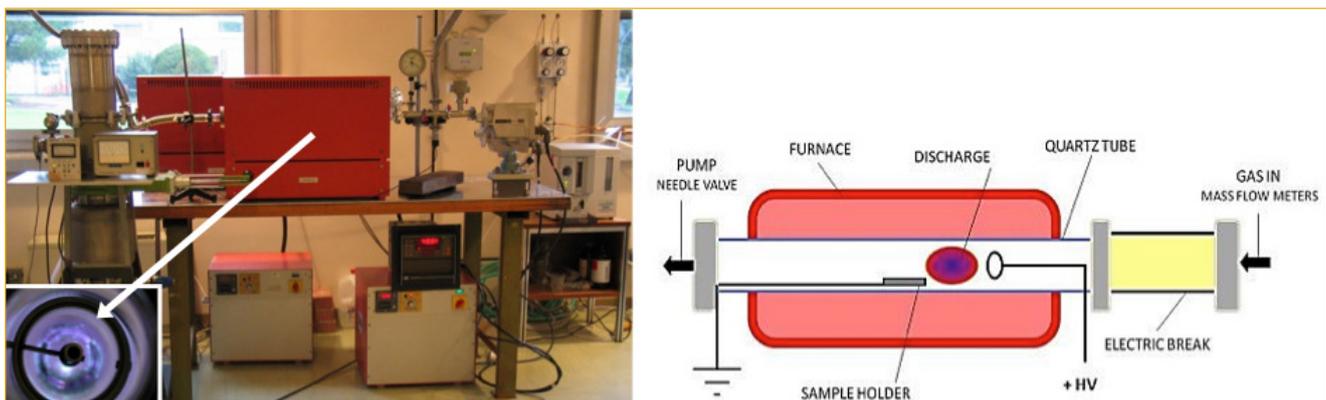
Tutte le tecniche CVD richiedono che la miscela dei gas precursori sia attivata con una sorgente di energia. Le principali tecniche di attivazione sono quella termica (TCVD, Thermal CVD), di cui la più utilizzata fa uso di filamenti caldi (HFCVD, Hot Filaments CVD), quella che utilizza plasmi (PECVD, Plasma Enhanced CVD), di cui la più comune fa uso di microonde (MWCVD, Micro Wave CVD), e quella attivata mediante reazioni di combustione. In una

variante della CVD convenzionale, si utilizzano dei precursori metallo-organici (MOCVD).

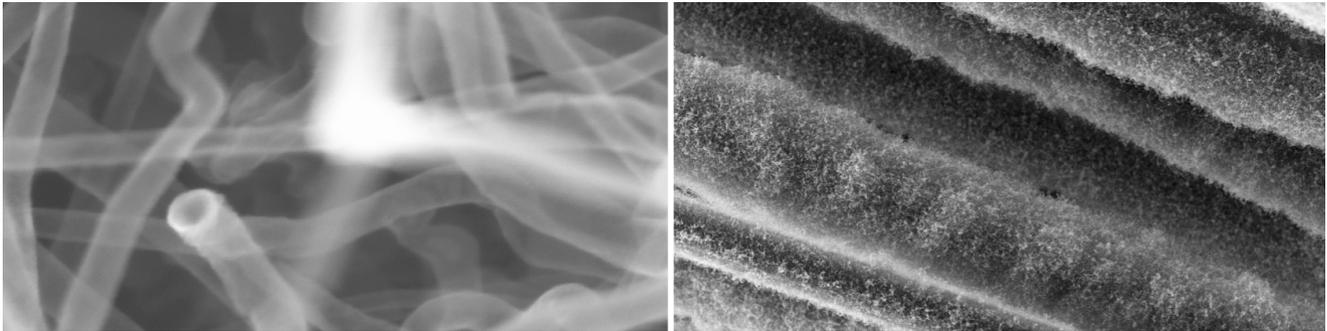
In Figura 5 è rappresentato l'impianto HFCVD presente nei laboratori UTMAT-SUP del centro di ricerca ENEA Casaccia con il relativo schema di processo.

Nell'HFCVD sono presenti dei filamenti, tenuti a massa ad un'estremità, ai cui capi è applicata una tensione per il loro riscaldamento. Il sistema prevede anche la possibilità di applicare una differenza di potenziale fra il substrato e i filamenti e fra i filamenti e una griglia appositamente montata allo scopo di incrementare il flusso di ioni sulla superficie del substrato. Gli elettroni emessi dai filamenti caldi sono così accelerati verso la griglia positiva ionizzando atomi e molecole e creando una regione di scarica. Tale scarica genera un plasma da cui una corrente di ioni positivi può essere estratta verso il substrato, che è così bombardato.

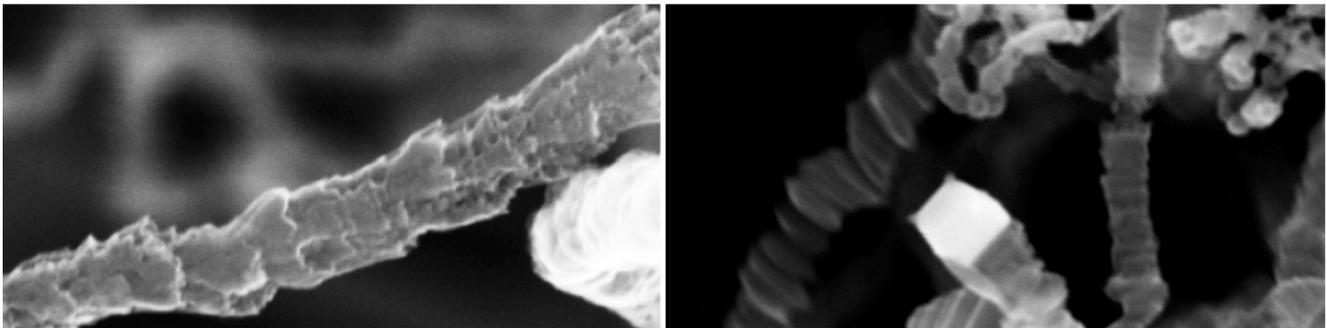
In Figura 6 è rappresentato l'impianto PECVD presente nei labo-



**FIGURA 6** Impianto PECVD dell'ENEA e sua rappresentazione schematica [10]



**FIGURA 7** Nanomateriali di carbonio 1D: nanotubi cresciuti su un substrato piano [11] e su un tessuto tridimensionale di fibre di carbonio [3]



**FIGURA 8** Nanomateriali di carbonio 1D: nanofibre di morfologia non tubolare (herringbone e platelet) [12]

ratori UTTMAT-SUP del centro di ricerca ENEA Casaccia con il relativo schema di processo.

Il sistema prevede, oltre all'attivazione termica dei precursori gassosi, anche la possibilità di attivare le molecole attraverso un plasma generato mediante applicazione di una differenza di potenziale tra due elettrodi. Tale plasma promuove la dissociazione dei gas e la relativa formazione di radicali e specie attive che poi reagiscono dando origine ai nanomateriali sintetizzati. Il principale vantaggio nell'utilizzo di un sistema assistito da plasma risiede nella riduzione dell'ener-

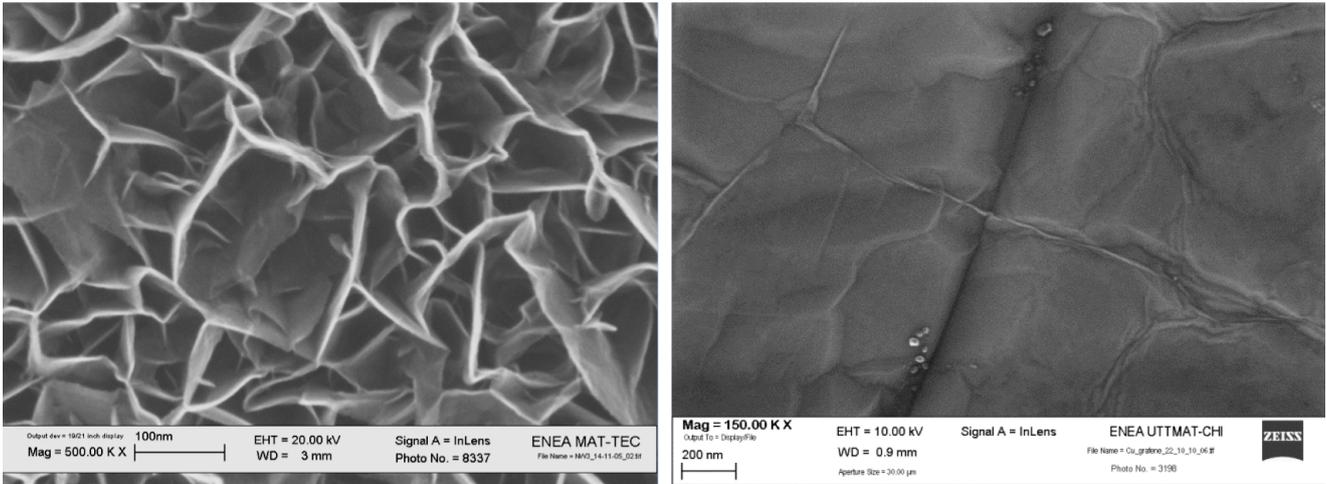
gia di attivazione necessaria per la sintesi delle nanostrutture, e di conseguenza nella possibilità di condurre i processi di crescita a temperature inferiori rispetto al CVD termico.

Tra i nanomateriali prodotti mediante deposizione chimica da fase vapore rivestono notevole interesse le nanostrutture di carbonio di tutte le dimensionalità (nanotubi, nanofibre, grafene, nanopareti, nanodiamante ecc.). Nelle Figure 7, 8, 9 e 10 sono mostrati nanomateriali di carbonio monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali prodotti mediante CVD attivato da filamenti caldi o assistito da plasma.

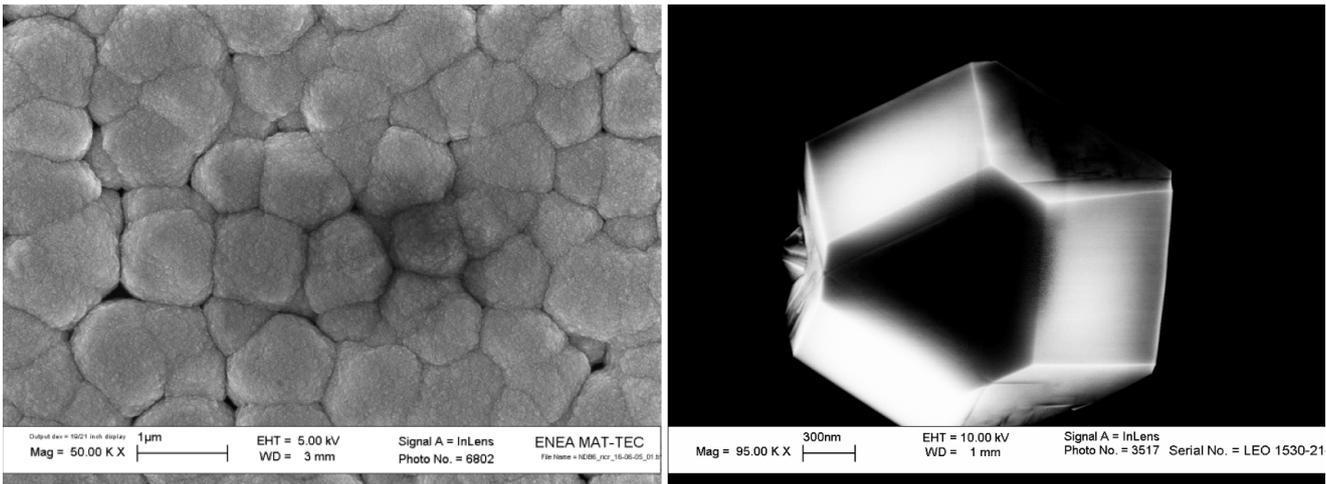
*Macinazione e alligazione meccanica ad alta energia (nanomateriali 3D)*

La macinazione meccanica è una tecnica che combina una deformazione estrema con una alligazione violenta di due materiali. Le particelle dei materiali sono immesse in un mulino a sfere (in genere di acciaio o carburo) ad alta energia di macinazione. I materiali sono intrappolati, schiacciati, appiattiti, fusi e spezzati. Il processo crea particelle meccanicamente alligate altamente deformate, fino alla nanoscala.

Si può utilizzare un gas inerte per evitare l'ossidazione e promuove-



**FIGURA 9** Nanomateriali di carbonio 2D: nanopreti e grafene [9,13]



**FIGURA 10** Nanomateriali di carbonio 3D: film e singolo cristallo di nanodiamante [14,15]

re l'unione delle particelle. Per prevenirne l'ingrossamento si utilizza il "criomilling", cioè un raffreddamento intenso. Il processo consente la produzione di leghe metalliche e composti per varie applicazioni (catalizzatori, materiali per accumulo di idrogeno, pigmenti ecc.).

### Prospettive di applicazione dei nanomateriali

L'ampia gamma di tecnologie di produzione disponibile e di nanomateriali che è possibile sintetizzare, ne consentono l'applicazione in numerosi settori, come quelli riportati di seguito:

- Energetico/Chimico
  - Produzione (nanocatalizzatori, nanoelettrocatalizzatori, purificazione di acqua e aria)
  - Immagazzinamento energia (batterie, supercondensatori, accumulo idrogeno)
  - Risparmio energia (cavi elettrici, isolamento)



- Applicazione energia (celle a combustibile, batterie, celle solari inorganiche e organiche)
- Cosmetici
- Bio-medicale
  - Nanocompositi per rilascio controllato di farmaci (drug delivery)
  - Bio-imaging (visualizzazione cellule, tessuti, organi)
- Ingegneria dei tessuti (implantologia attiva e passiva)
- Nanocompositi per odontoiatria
- Nanosensori
- Farmaci
- Trasporto e spazio
  - Nanocompositi leggeri e resistenti
  - Nanocompositi polimerici
  - Rivestimenti
- Tecnologia elettronica/ottica
  - Nanomateriali per fotonica ed elettronica
  - Elettronica molecolare ibrida
  - Strutture monodimensionali come nanofili e nanotubi
  - Display.

**Leonardo Giorgi**

Scienza dei Materiali & Elettrochimica – Anzio (Roma)

**Elena Salernitano**

ENEA, Unità Tecnica Tecnologie dei Materiali, Laboratori di Faenza

bibliografia

- [1] M.F. Ashby, P.J. Ferreira, D.L. Schodek (2009), "Nanomaterials, nanotechnologies and Design-An Introduction for Engineers and Architects", Butterworth-Heinemann, Burlington (USA)
- [2] C. Paoletti, A. Cemmi, L. Giorgi, R. Giorgi, L. Pilloni, E. Serra, M. Pasquali (2009), "Electro-deposition on carbon black and carbon nanotubes of Pt nanostructured catalysts for methanol oxidation", *Journal of Power Sources*, 183, 84-91
- [3] M.F. De Riccardis, D. Carbone, Th. Dikonimos Makris, R. Giorgi, N. Lisi, E. Salernitano (2006), "Anchorage of carbon nanotubes grown on carbon fibres", *Carbon*, 44, 671-674
- [4] L. Giorgi, Th. Dikonimos Makris, R. Giorgi, N. Lisi, E. Salernitano (2007), "Electrochemical properties of carbon nanowalls synthesized by HF-CVD", *Sensors and Actuators, B Chemical*, 126, 144-152
- [5] R. Giorgi, L. Giorgi, S. Gagliardi, E. Salernitano, M. Alvisi, Th. Dikonimos, N. Lisi, D. Valerini, M.F. De Riccardis, E. Serra (2011), "Nanomaterials-based PEM electrodes by combining chemical and physical depositions", *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, 8, 0410041-0410046
- [6] L. Giorgi, E. Salernitano, Th. Dikonimos Makris, S. Gagliardi, V. Contini, M. De Francesco (2014), "Innovative electrodes for direct methanol fuel cells based on carbon nanofibers and bimetallic PtAu nanocatalysts", *International Journal of Hydrogen Energy, International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 21601-21612
- [7] L. Giorgi, R. Giorgi, S. Gagliardi, E. Serra, M. Alvisi, M. A. Signore, E. Piscopiello (2011), "Platinum-Gold Nanoclusters as Catalyst for Direct Methanol Fuel Cells", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11, 8804-8811
- [8] L. Giorgi, E. Salernitano, Th. Dikonimos Makri, S. Gagliardi, R. Giorgi, N. Lisi, M. Falconieri, E. Leoni, M.L. Grilli (2014), "Semiconducting properties of titania nanotubes films grown by electrochemical anodization", 11th Symposium of European Vacuum Coaters, Sept.29th Oct.1st, Anzio ( Roma)
- [9] N. Lisi, R. Giorgi, M. Re, T. Dikonimos, L. Giorgi, E. Salernitano, S. Gagliardi, F. Tatti (2011), Carbon nanowalls growth on carbon paper by hot filament chemical vapour deposition and its microstructure, *Carbon*, 49, 2134-2140
- [10] T. Dikonimos, R. Giorgi, N. Lisi, E. Salernitano (2007), Reattore Termico con Plasma a Corrente Continua per la Deposizione, da Fase Vapore, di Nanotubi, Nanofibre e Nanopareti di Carbonio, e Relativo Procedimento, Brevetto RM2007A000614
- [11] E. Salernitano, L. Giorgi, Th. Dikonimos Makris, R. Giorgi, N. Lisi, V. Contini, M. Falconieri (2007), "Purification of MWCNTs grown on a nanosized unsupported Fe-based powder catalyst", *Diamond and related materials*, 16 (8), 1565-1570
- [12] L. Giorgi, E. Salernitano, S. Gagliardi, Th. Dikonimos, R. Giorgi, N. Lisi, M.F. De Riccardis, V. Martina (2011), "Electrocatalysts for methanol oxidation based on Platinum/Carbon Nanofibers Nanocomposite", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 11, 8812-8817
- [13] R. Giorgi, N. Lisi, Th. Dikonimos, M. Falconieri, S. Gagliardi, E. Salernitano, P. Morales, L. Pilloni (2011), "Graphene: large area synthesis by Chemical Vapor Deposition", rivista bimestrale dell'ENEA "Energia, Ambiente e Innovazione" (EA), 3, 68-74
- [14] N. Lisi, R. Giorgi, Th. Dikonimos, E. Salernitano, S. Gagliardi, L. Giorgi, V. Contini, P. Morales (2010), "Graphitized filament plasma enhanced CVD deposition of nanocrystalline diamond", *Diamond & Related Materials* 19, 1382-1386
- [15] Th. Dikonimos Makris, M. Falconieri, S. Gianoglio, L. Giorgi, R. Giorgi, N. Lisi, E. Salernitano (2006), "Nanocrystalline diamond films by bias enhanced nucleation and argon assisted growth in a HFCVD system", *Advances in Science and Technology*, 48, 44-49