

# Nanotecnologie per il fotovoltaico

Andrea Li Bassi *Politecnico di Milano*

**I**l soddisfacimento del fabbisogno energetico mondiale rappresenta una delle grandi sfide dell'umanità per il XXI secolo; si pensi ad esempio che il solo consumo di energia elettrica nel mondo è oggi stimato essere superiore ai 20.000 TWh per anno. Tra le cosiddette sorgenti energetiche alternative o rinnovabili un ruolo sempre più importante, almeno a livello di potenzialità, è svolto dalle tecnologie fotovoltaiche, che sfruttano la radiazione solare per la produzione di energia elettrica; tali tecnologie possono in linea di principio essere utilizzate sia per la produzione locale di energia, sia per la produzione di energia in impianti fotovoltaici connessi alla rete elettrica. In aggiunta, il fotovoltaico può svolgere un ruolo di rilievo come futura soluzione energetica *portabile* (ad es. per caricare dispositivi elettronici, per integrazione in tessuti o indumenti, ecc.).

Tuttavia, ad oggi, il solare fotovoltaico risulta ancora solo marginalmente sfruttato (la stima della capacità totale di potenza fotovoltaica installata nel mondo, sebbene in continua crescita negli ultimi anni, nel 2013 si attestava intorno ai 140 GW [1], contribuendo per meno dell'1% alla produzione totale di potenza elettrica nel mondo) e ancora non economicamente sostenibile o competitivo con altre fonti di energia. In aggiunta, altri aspetti dovranno essere affrontati affinché il fotovoltaico possa rivestire un ruolo di rilievo nella futura produzione energetica mondiale; si pensi ad esempio alla questione dell'immagazzinamento

dell'energia (legato allo sviluppo di batterie o accumulatori sempre più potenti ed efficienti) o alla sua distribuzione.

In questo articolo vogliamo invece fornire un'idea di quello che può essere il ruolo delle cosiddette nanotecnologie nella ricerca scientifica volta allo sviluppo di nuovi materiali per il fotovoltaico o di celle innovative basate su concetti diversi da quelli su cui si basa il funzionamento della maggior parte delle celle solari oggi commercialmente disponibili.

Infatti, affinché la produzione di energia fotovoltaica diventi competitiva è necessario (anche se non sufficiente) che gli elementi attivi costitutivi dei pannelli fotovoltaici, ovvero le celle solari, diventino sempre più efficienti (in termini di conversione da potenza di irraggiamento solare a potenza elettrica) e sempre meno costosi. Perché questo sia possibile la ricerca si sta orientando allo sviluppo di nuovi materiali e nuove architetture di cella solare, e le nanotecnologie svolgono in questo un ruolo di rilievo, con la loro promessa di realizzare materiali ingegnerizzati con proprietà migliori rispetto ai materiali tradizionali (e quindi potenzialmente promettenti per il raggiungimento di elevate efficienze) o addirittura proprietà nuove (ad es. che permettano la realizzazione di celle solari *flessibili* implementabili in tessuti).

Possiamo qui definire le nanotecnologie come quelle tecnologie che sfruttano il *confinamento quantico* (cioè la dipendenza delle proprietà di un materiale dalla sua dimensione/dimensionalità quando si scende alla scala nanometrica, a causa delle leggi della meccanica quantistica) per la realizzazione di materiali o dispositivi con proprietà completamente nuove e modulabili rispetto ai materiali tradizionali. In un senso più lato poi le nanotecnologie riguardano in generale la realizzazione di materiali o dispositivi con un controllo fine della loro struttura e proprietà alla scala nanometrica, per ragioni di miniaturizzazione o di modulazione del rapporto superficie/volume.

Uno dei paradigmi per la riduzione dei costi è poi l'abbinamento dei semiconduttori inorganici oggi utilizzati nelle celle solari con materiali organici. Va sottolineato fin da subito che questo tipo di ricerca è fortemente interdisciplinare, e necessita della convergenza di competenze negli ambiti

della fisica, della chimica, della scienza dei materiali e dell'ingegneria.

## Le tre generazioni del fotovoltaico

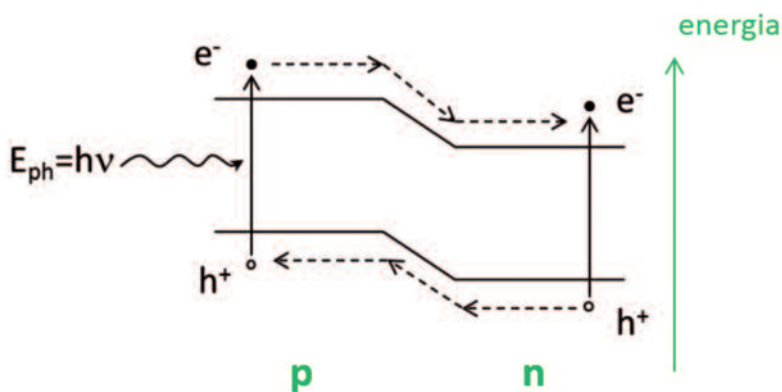
Lo sviluppo della tecnologia fotovoltaica viene usualmente schematizzato nel succedersi di 3 generazioni di celle solari [2].

- **1<sup>a</sup> generazione:** celle solare a base di silicio (mono o policristallino), rappresentano più dell'80% delle celle solari attualmente in commercio. Le migliori efficienze di conversione energetica (*power conversion efficiency*) si attestano al di sotto del 25% sulla scala di laboratorio (il record è del 25% [3]) e al di sotto del 20% per un modulo fotovoltaico.
- **2<sup>a</sup> generazione:** celle a film sottile, si tratta sempre di celle basate sull'impiego di semiconduttori inorganici, nelle quali però la riduzione dello spessore alla scala micrometrica può in prospettiva portare alla riduzione dei costi, anche se in genere l'efficienza è inferiore al 20%. Fra le tipologie più sviluppate citiamo le celle ad arseniuro di gallio (GaAs), caratterizzate da efficienze di conversione energetica simili a quelle di 1<sup>a</sup> generazione; le celle a silicio amorfo o nanocristallino (caratterizzate da bassi costi ma anche basse efficienze); le celle a tellururo di cadmio (CdTe) e quelle basate su materiali cosiddetti CIGS (*Copper Indium Gallium Selenide*).
- **3<sup>a</sup> generazione:** si tratta di un insieme di concetti o architetture di cella, generalmente ancora al livello di ricerca di base o al più

di prototipi, in cui le nanotecnologie vengono utilizzate per sfruttare le peculiari proprietà dei nanomateriali o diversi fenomeni fisici allo scopo di aumentare le efficienze oltre i limiti oggi possibili [3]; spesso viene fatta rientrare in questa categoria la ricerca riguardante le celle di tipo organico o ibrido, le cui efficienze sono invece inferiori a quelle delle celle a film sottile.

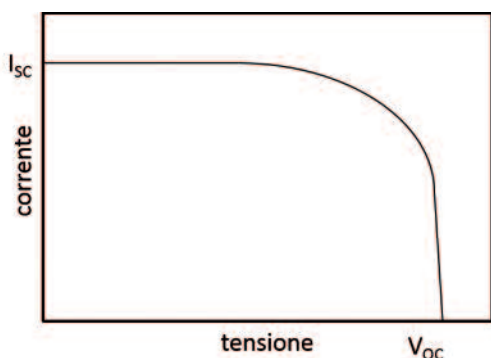
## La cella solare, ovvero una giunzione p-n illuminata

È utile descrivere in modo semplice il funzionamento di una cella solare tradizionale (come quelle al silicio) che non è altro che una giunzione a semiconduttore p-n illuminata [2]. Un materiale semiconduttore è in grado di assorbire *foto* (quanti di energia elettromagnetica la cui energia è pari a  $h\nu$ , dove  $h \approx 6.63 \times 10^{-34}$  Js è la costante di Planck e  $\nu$  è la frequenza della radiazione) quando la loro energia è maggiore del gap energetico tra banda di valenza e banda di conduzione del materiale. Affiancando due regioni di semiconduttore drogato in modo diverso (con impurezze di tipo donore o accettore) si crea una giunzione p-n, e alla giunzione si instaura un campo elettrico dovuto alla diffusione delle cariche maggioritarie da un semiconduttore all'altro (negative, cioè elettroni nel caso di drogaggio n, e positive, cioè buche o lacune nel caso di drogaggio p). La giunzione p-n è un diodo, con caratteristica corrente-tensione non lineare (rettificante). Quando la giunzione viene illuminata vengono fotogenerati portatori di carica aggiuntivi (coppia elettrone-lacuna, in seguito all'assorbimento di un fotone e alla promozione di un elettrone dalla banda di valenza a quella di conduzione), che vengono poi separati e trasportati in direzioni diverse dal campo elettrico della giunzione (Figura 1), dando origine a un flusso di corrente elettrica che può alimentare un carico esterno (si veda in figura 2 la tipica caratteristica corrente-tensione di una cella fotovoltaica).



**Figura 1**

Schema delle bande di energia in una giunzione p-n



**Figura 2**

Tipica caratteristica tensione-corrente di una cella solare

## Il possibile ruolo delle nanotecnologie nel fotovoltaico di terza generazione

È intuitivo che l'efficienza di assorbimento del materiale attivo di una cella è tanto maggiore quanto minore è il *gap*, dal momento che anche fotoni di bassa energia saranno assorbiti, e questo influenza il numero di portatori fotogenerati e quindi la massima corrente ottenibile ( $I_{SC}$ , corrente a circuito chiuso), mentre la massima tensione che si può ottenere ai capi della cella ( $V_{OC}$ , tensione di circuito aperto) è limitata dal *gap* energetico, che fornisce il massimo potenziale chimico della coppia elettrone-lacuna fotogenerati ( $E_g/e$ , con  $E_g$  *gap* di energia ed  $e$  carica dell'elettrone). Pertanto c'è un *trade-off* tra i due aspetti e un'analisi quantitativa (dovuta originariamente a Shockley e Queisser) mostra che il *gap* "ottimale" è a un valore intermedio di circa 1,4 eV, per il quale la massima efficienza teorica è di poco superiore al 30% [2]. Il *gap* del Si è pari a 1,1 eV.

Al fine di superare questo limite intrinseco è necessario estrarre più lavoro (cioè energia) per ogni singolo fotone incidente sulla cella, ad esempio aumentando la probabilità di assorbimento; o facendo in modo che tutta l'energia del fotone sia convertita in potenziale chimico (e quindi elettrico), ad esempio minimizzando le perdite di energia dei portatori di carica sotto forma di calore (perdita dell'energia in eccesso rispetto al *gap* energetico, dovuta a urti elettrone-fonone). Un'altra strada è quella di fare in modo che a un singolo fotone corrisponda la generazione di più coppie elettrone-lacuna, con conseguente aumento della corrente di cella.

Esistono oggi varie idee o *concetti*, basati sull'uso di nanostrutture o sulle particolari proprietà di strutture quantiche, su come implementare queste possibili soluzioni in dispositivi reali [2, 4], anche se va detto che spesso queste idee sono a uno stadio molto prematuro di sviluppo sperimentale e in molti casi resta ancora da dimostrare l'effettiva possibilità di sfruttare questi fenomeni in una vera e propria cella solare.

Elenchiamo e commentiamo brevemente di seguito alcuni di questi approcci.

- Celle a multigiunzione (o *tandem*): in grado di sfruttare in modo ottimale lo spettro della radiazione solare. Si tratta di celle formate da 2 o più (tipicamente 3) giunzioni *p-n* a base di semiconduttori con *gap* diverso, e quindi in grado di assorbire selettivamente fotoni provenienti da regioni diverse dello spettro solare. Il vantaggio consiste nell'essere in grado contemporaneamente di assorbire più fotoni (maggiore corrente), e di minimizzare al contempo la perdita del-

l'energia in eccesso rispetto al *gap* (sotto forma di calore), in quanto i fotoni di maggiore energia saranno assorbiti dal materiale con *gap* più ampio mentre quelli di energia inferiore dal materiale con *gap* più piccolo. La tensione ai capi della cella sarà la somma delle tensioni ai capi delle 3 giunzioni in serie, attraversate dalla stessa corrente. Lo spessore di ciascuna giunzione è micrometrico; le celle attualmente più efficienti utilizzano semiconduttori composti di tipo III-V (GaAs o simili, dove la composizione del materiale può essere sfruttata per modulare il *gap*), e raggiungono efficienze di conversione del 38% o del 46% con *concentrazione* (vedi sotto) [3]. C'è oggi un forte interesse al possibile uso di punti quantici (*quantum dots*, QD, nanoparticelle di semiconduttori che presentano confinamento quantico) in celle solari tandem di futura generazione, grazie alla possibilità di modulare il *gap* energetico di un materiale controllandone la dimensione alla scala nanometrica, e di realizzare così celle tandem basate su un solo materiale (ad es., QD di silicio, Figura 3).

- Celle solari a banda intermedia (*intermediate band*): è una sorta di realizzazione del concetto alla base delle celle a multigiunzione, ma in un unico materiale, attraverso l'introduzione di bande elettroniche intermedie all'interno del *gap* del semiconduttore (ad es., attraverso ingegnerizzazione della struttura elettronica ottenibile mediante inserimento controllato di impurezze in particolari strutture cristalline); in tal modo si verrebbero a realizzare nel singolo materiale più *gap* energetici in grado di assorbire fotoni di diversa energia, minimizzando le perdite sotto forma di calore.
- *Multiple-exciton* (o *multiple carrier*) generation (ovvero generazione multipla di eccitoni, cioè coppie elettrone-lacuna, o di portatori di carica): un fotone di energia molto elevata (pari almeno al doppio del *gap*) genera due o più coppie elettrone-lacuna. Se implementata questa soluzione permette di incrementare l'efficienza di conversione attraverso un aumento della corrente generata. Esistono lavori sperimentali che mostrano e discutono come la generazione multipla sia favorita in nanostrutture quali QD, ma ancora pochi esempi a livello di laboratorio di celle solari in cui questo si traduca in un effettivo aumento di corrente; lo stadio di sviluppo è ancora molto prematuro.
- Celle a portatori caldi (*hot carrier*): se il fotone assorbito è molto energetico (piccole lunghezze d'onda) non tutta la sua energia viene convertita in potenziale chimico degli elettroni, e quindi in potenziale (e lavoro) elettrico, infatti come già accennato l'energia in eccesso rispetto al *gap*

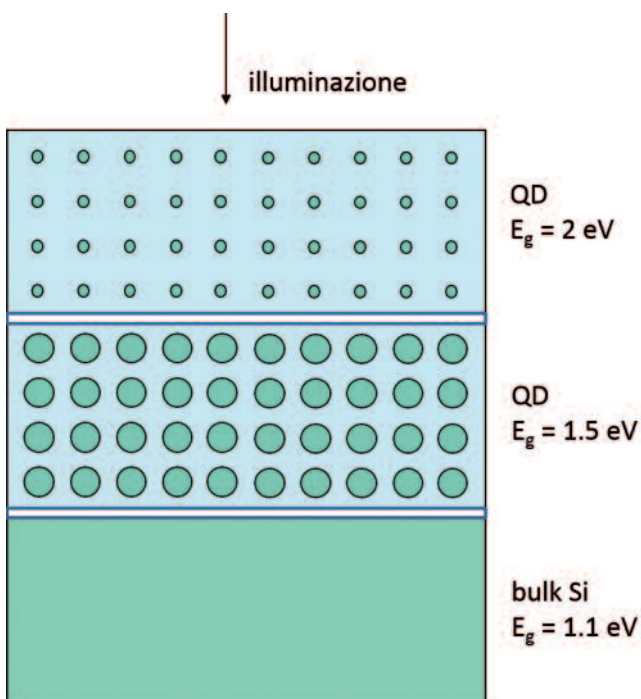
viene persa (dissipata) in tempi brevissimi ( $10^{-12}$  -  $10^{-15}$  s) sotto forma di calore (energia vibrazionale del reticolo cristallino). Se si fosse in grado di estrarre gli elettroni fotogenerati *prima* di questa perdita di energia saremmo in grado di realizzare celle più efficienti, caratterizzate da una maggiore differenza di potenziale. Si ritiene che questo sia possibile utilizzando materiali a base di QD, in quanto i fenomeni di perdita di energia sotto forma di calore sono ridotti in sistemi a bassa dimensionalità (soppressione di interazione elettroni-fononi in QD); è inoltre necessa-

rio sviluppare contatti elettrici selettivi in energia, ovvero in grado di estrarre dal materiale attivo solo gli elettroni (e le lacune) di elevata energia; anche qui si pensa di utilizzare le nanotecnologie per progettare materiali con livelli elettronici appositamente progettati. Va detto che questo tipo di approccio è ancora più acerbo del precedente e possiamo dire che si tratta di un *concetto* di terza generazione, a cui non corrisponde ancora un tipo vero e proprio di cella. Altri approcci si propongono di aumentare l'efficienza di conversione della radiazione solare non attraverso la realizzazione di nuovi materiali o architetture di cella, ma attraverso una modifica dello spettro solare incidente sulle celle in modo da sfruttare al meglio le proprietà delle celle esistenti.

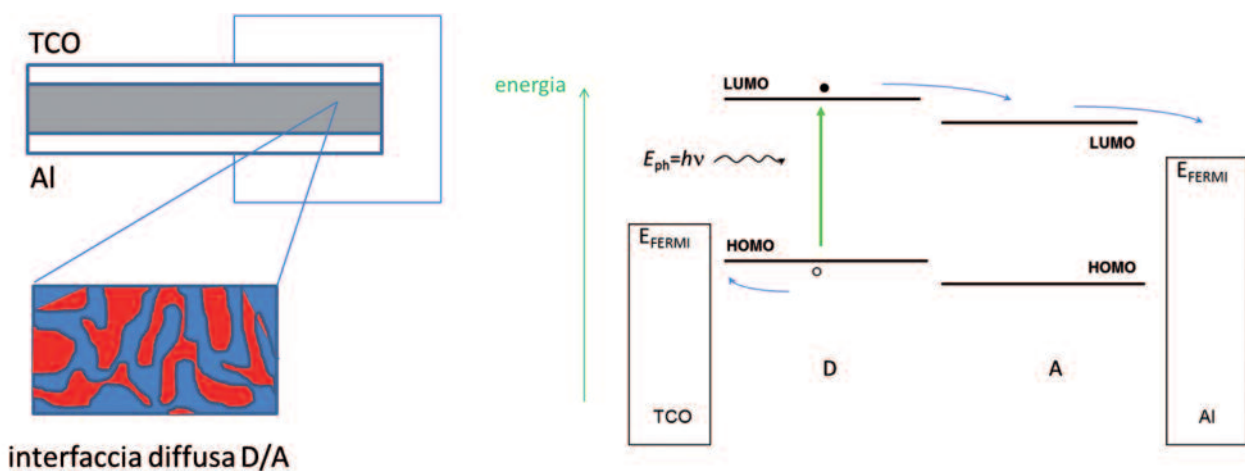
- *Up-conversion*: modifica dello spettro solare mediante un materiale che sia in grado di convertire due fotoni di bassa energia che non verrebbero assorbiti dal materiale attivo della cella ( $E < E_g$ ) in un fotone di energia maggiore ( $E > E_g$ ).
- *Down-conversion*: modifica dello spettro solare mediante un materiale che sia in grado di convertire un fotone di alta energia ( $E > E_g$ ) in due o più fotoni di energia inferiore ma sempre superiore al gap, in modo da ridurre la dissipazione di energia in eccesso sotto forma di calore.

Diversi nuovi materiali sono oggi studiati per implementare questi approcci.

Infine, l'efficienza di una cella solare può essere incrementata aumentando la densità di energia incidente sulla superficie della cella (espressa in  $W/m^2$ ). Si parla in questo caso di fotovoltaico a *concentrazione*, con diversi approcci possibili (ad es., usando specchi parabolici o lenti di Fresnel a focale corta per concentrare la radiazione solare). Spesso questo approccio va in parallelo con concetti di 3<sup>a</sup> generazione: l'attuale record di efficien-



**Figura 3**  
Schema di una cella a multigiunzione a base di QD



**Figura 4**  
A sinistra, schema dell'architettura di una cella organica a eterogiunzione diffusa e, a destra, diagramma dei livelli energetici coinvolti nel funzionamento

za (> 46%) è stato ottenuto mediante una cella a multi giunzione a base di GaAs e composti simili, con luce concentrata di un fattore 500.

Accanto a questi approcci vi è poi una strada completamente diversa, che consiste nello studio e realizzazione di celle solari più economiche mediante utilizzo di materiali organici [5] (celle solari organiche o ibride). L'esempio più importante è fornito dalle cosiddette celle a eterogiunzione diffusa (*bulk heterojunction*, Figura 4), in cui la giunzione è realizzata usando due materiali organici (un polimero donore e un materiale accettore, organico o semiconduttore) miscelati e interpenetranti alla scala nanometrica, in modo da realizzare interfacce diffuse per la separazione di carica e superare così la difficoltà dovuta alla lunghezza di diffusione estremamente limitata (circa 10 nm) degli eccitoni elettrone-lacuna nei materiali organici, dovuta a fenomeni di ricombinazione e a un trasporto di carica non particolarmente efficace.

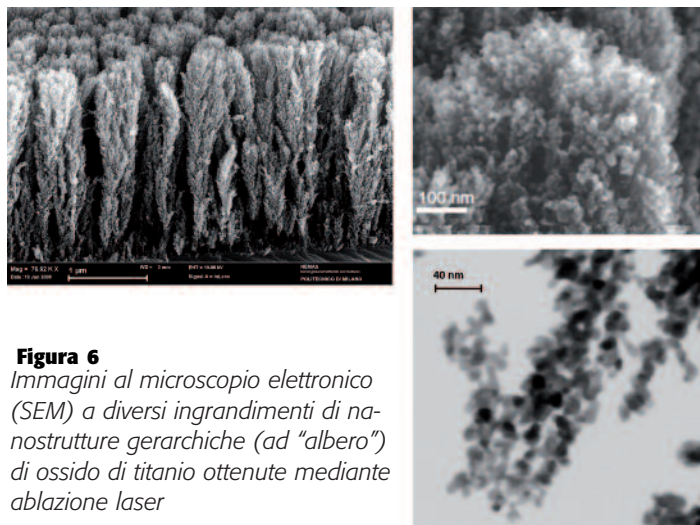
Questo tipo di celle risulta interessante anche perché potrebbe in linea di principio permettere l'implementazione di nuove funzionalità, quale ad esempio la flessibilità. Le efficienze sono ad oggi piuttosto basse (tipicamente < 10%) e il principale problema da affrontare riguarda la loro affidabilità (*stabilità e durabilità*).

## La cella solare a colorante

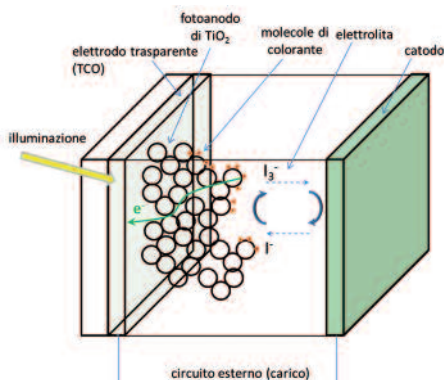
Accanto alle celle organiche o ibride un posto particolare meritano le cosiddette celle solari a colorante (*Dye-Sensitized Solar Cells* - DSSC), o celle di Grätzel dal nome del loro inventore e principale studioso [6]. In questo tipo di cella *elettrochimica* l'anodo è realizzato con un ossido nanoporoso di elevata area superficiale

(il *fotoanodo*, un film di nanoparticelle di biossido di titanio dello spessore di qualche decina di micron), la cui superficie è rivestita da un monostrato di molecole coloranti (*dye*) in grado di assorbire la luce. L'assorbimento di un fotone porta la molecola in uno stato eccitato, con conseguente iniezione di un elettrone nella banda di conduzione del fotoanodo; l'elettrone è poi trasportato all'elettrodo trasparente su cui il fotoanodo poroso è deposto; poi attraverso il carico esterno, dove compie lavoro elettrico, fino al contro elettrodo. Il circuito della cella è chiuso da un elettrolita contenente una coppia redox in grado di trasportare l'elettrone dal catodo fino alla molecola, permettendone così la riduzione e chiudendo il ciclo (Figura 5). Recenti sviluppi hanno portato l'attenzione a varianti delle DSSC in cui l'elettrolita è solido (un polimero trasportatore di buche), con vantaggi in termini di stabilità e *durabilità* della cella (DSSC a stato solido) [7].

Una delle caratteristiche principali delle DSSC è la struttura nanoporosa del fotoanodo, che permette di raggiungere elevate aree superficiali, dell'ordine delle centinaia di m<sup>2</sup>/g, o delle centinaia o migliaia di cm<sup>2</sup> per cm<sup>2</sup> di superficie geometrica della cella (il cosiddetto *roughness factor*). Questo significa che un numero molto elevato di molecole può essere depositato sull'unità di area geometrica della cella, permettendo un efficace assorbimento della luce e pertanto un'elevata corrente elettrica (valori tipici sono del-

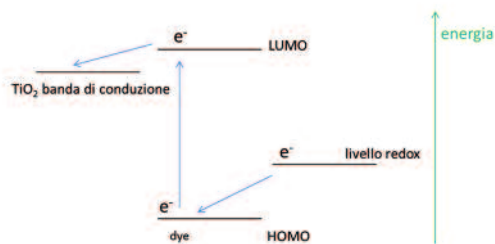


**Figura 6**  
Immagini al microscopio elettronico (SEM) a diversi ingrandimenti di nanostrutture gerarchiche (ad "albero") di ossido di titanio ottenute mediante ablazione laser



**Figura 5**

A sinistra, schema dell'architettura di una cella solare a colorante (DSSC); a destra, diagramma dei livelli energetici coinvolti nel funzionamento della cella



l'ordine di decine di mA/cm<sup>2</sup>).

Il trasporto di elettroni attraverso la rete di nanoparticelle di TiO<sub>2</sub> potrebbe essere ottimizzato utilizzando nanostrutture monodimensionali (1D), con trasporto direzionale di carica, ma in genere nanofili e nanotubi di TiO<sub>2</sub> (o altri ossidi) hanno un'area superficiale limitata. Una soluzione per combinare elevata area superficiale e direzionalità del trasporto di carica è l'utilizzo di strutture quasi-1D, come le nanostrutture gerarchiche, ad albero, mostrate in figura 6 e ottenute mediante deposizione da laser pulsato [8].

Una struttura di tipo gerarchico (e quindi multi-scala, ovvero con una morfologia che presenti organizzazione e lunghezze caratteristiche a scale diverse) può inoltre presentare altri vantaggi, ad esempio l'organizzazione gerarchica permette la presenza di metastrutture (gli 'alberi') con dimensioni caratteristiche dell'ordine delle centinaia di nm, confrontabili con la lunghezza d'onda della radiazione nella regione visibile dello spettro solare. Questo potenzialmente garantisce un'efficace ed elevata *diffusione* della luce (in inglese *scattering*) in direzioni diverse da quella della radiazione incidente, aumentando così il percorso della luce nella cella e favorendo l'interazione con le molecole fotoassorbenti: si parla in questi casi di *light trapping* (intrappolamento) o *harvesting* (raccolta).

Nanostrutture gerarchiche di ossido di titanio sono state testate come fotoanodi in DSSC a elettrolita liquido [9] (mostrando un aumento delle proprietà di trasporto elettrico), e in DSSC a stato solido (polimeriche) [10], per le quali si è dimostrato che l'effetto di diffusione della luce porta a un aumento dell'assorbimento da parte del *dye* e di conseguenza a un aumento dell'efficienza di conversione energetica (dal 2,3% al 4%, in prototipi alla scala di laboratorio) rispetto all'utilizzo di fotoanodi di tipo tradizionale ottenuti da paste di nanoparticelle di TiO<sub>2</sub>.

Le DSSC sono, fra le celle ibride, quelle probabilmente con uno sviluppo tecnologico più avanzato e più vicine a una possibile applicazione commerciale diffusa. La loro efficienza è relativamente elevata (record di laboratorio >12%, e ancora maggiore nel caso di DSSC a stato solido con *perovskiti* quale materiale assorbitore al posto delle molecole di colorante, che oggi sono in assoluto le più studiate nell'ambito della ricerca scientifica [11]); si stima che i costi di produzione possano essere contenuti e i materiali utilizzati sono generalmente abbondanti e sicuri. La possibilità di costruire le celle su substrati plastici e di modularne il colore attraverso la scelta del colorante le rende, ad esempio, appetibili per un loro utilizzo in applicazioni portabili, o per integrazione in ele-

menti architettonici di edifici ad alta tecnologia: *Building-Integrated PhotoVoltaics*- BIPV).

## Conclusioni

Abbiamo citato alcuni esempi di come il controllo della struttura dei materiali alla scala nanometrica possa essere utilizzato (almeno in linea di principio in alcuni casi) per migliorare le prestazioni di dispositivi con architetture innovative per la conversione fotovoltaica. Ovviamente molto resta da capire e molto è il lavoro di ricerca che resta da fare prima che alcuni di questi dispositivi possano essere effettivamente realizzati e utilizzati; tuttavia vale la pena concludere osservando che la ricerca in questo campo (nanoscienze, nanomateriali, nanotecnologie per il solare fotovoltaico) può portare allo sviluppo di materiali innovativi di interesse anche per altri campi di applicazione (si pensi alla fotocatalisi, per la quale le proprietà di interazione dei materiali con la luce sono ovviamente fondamentali). Inoltre, spesso tale tipo di ricerca porta a significative ricadute in termini di ricerca di base, ad esempio legate alla comprensione di nuovi fenomeni fisici alla scala nanometrica o della relazione tra struttura e proprietà funzionali in materiali di nuova concezione.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] *Renewables 2014 Global Status Report*, REN21 Secretariat, Paris, 2014: [www.ren21.net](http://www.ren21.net)
- [2] J. Nelson: *The Physics of Solar Cells*, London, Imperial College Press, 2003.
- [3] *NREL efficiency chart*: [www.nrel.gov/ncpv](http://www.nrel.gov/ncpv)
- [4] G. Conibeer: Third-generation photovoltaics, *Materials Today*, vol. 10, 2007, pp. 42-50.
- [5] A. C. Mayer, S. R. Scully, B. E. Hardin, M. W. Rowell, M. D. McGehee: Polymer-based solar Cells, *Materials Today*, vol.11, 2007, pp. 28-33.
- [6] B. O'Regan, M. Grätzel: A low-cost, high efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO<sub>2</sub> films, *Nature*, vol. 353, 1991, pp. 737-740.
- [7] H. J. Snaith, L. Schmidt-Mende: Advances in Liquid-Electrolyte and Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells, *Advanced Materials*, vol. 19, 2007, pp. 3187-3200.
- [8] F. Di Fonzo, C. S. Casari, V. Russo, M. F. Brunella, A. Li Bassi, C. E. Bottani: Hierarchically organized nanostructured TiO<sub>2</sub> for photocatalysis applications, *Nanotechnology*, vol. 20, 2009, 015604/1-7.
- [9] F. Sauvage, F. Di Fonzo, A. Li Bassi, C.S. Casari, V. Russo, G. Divitini, C. Ducati, C.E. Bottani, P. Comte, M. Grätzel: Hierarchical TiO<sub>2</sub> Photoanode for Dye-Sensitized Solar Cells, *Nano Letters*, vol. 10, 2010, pp. 2562-2567.
- [10] L. Passoni, F. Ghods, P. Docampo et alii: Hyperbranched Quasi-1D Nanostructures for Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells, *ACS Nano*, vol. 11, 2013, pp. 10023-10031.
- [11] H. J. Snaith: Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells, *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 4, 2013, pp. 3623-3630.