

LA SCIENZA DEI MATERIALI

ANTONIO PAPAGNI (*)

Nota presentata dal m.e. Stefano Maiorana
(Adunanza dell'11 aprile 2013)

SUNTO. – La Scienza dei Materiali è il frutto logico della naturale convergenza di discipline scientifiche classiche e storiche quali la Fisica, la Chimica e la Matematiche il cui mutuo contributo sinergico alla sua definizione ed evoluzione è alla base del notevole sviluppo tecnologico osservato negli ultimi decenni. La vasta varietà di materiali di cui questa disciplina scientifica si occupa, oltre ad essere strategico per l'economia di un paese, è anche parte integrante di molti aspetti del nostro vivere quotidiano. Molti di questi materiali sono a base organica, cioè costituiti da molecole o polimeri organici, non solo per il loro potenziale applicativo, basso costo e flessibilità di preparazione ma anche per la loro facile elaborabilità e limitato impatto ambientale.

ABSTRACT. – Materials Science represents the natural convergence of hard scientific disciplines such as Physics Mathematics and Chemistry whom synergic contribution to its definition and evolution is at the basis of huge technologic development observed during the last few decades. The wide variety of materials under investigation by this discipline is both strategic for the economy of a Nation as well as a fundamental aspect of everyday life. Among the most relevant ones so far proposed, many advanced materials are organic-based or, in other words, constituted by molecules or organic polymers, not only for their application potential, low costs and preparation flexibility but also for their processability and limited environmental impact.

(*) Università degli Studi di Milano-Bicocca, Dipartimento di Scienza dei Materiali, Milano, Italy.
E-mail: antonio.papagni@mater.unimib.it

1. INTRODUZIONE

La Scienza dei Materiali è, tra le scienze multidisciplinari, quella dove il contributo sinergico dato da discipline scientifiche classiche e storiche quali la Fisica, la Chimica e la Matematica alla sua definizione ed evoluzione, rappresenta uno tra i meglio riusciti. La Scienza dei Materiali è anche alla base del notevole sviluppo tecnologico osservato negli ultimi decenni con fondamentali contributi allo sviluppo e alla individuazione di importanti settori applicativi e di ricerca anche nuovi quali ad esempio: Fonti di energia rinnovabili (fotovoltaico e/o combustibili di origine solare o solar fuels), Materiali polimerici, Optoelettronica, Elettronica, Metallurgia.

E' notevole l'ambito applicativo dei materiali di cui si occupa questa disciplina scientifica che, oltre ad essere strategici per l'economia di un paese, sono anche parte integrante di molti aspetti del nostro vivere quotidiano. Sistemi fotovoltaici per abitazioni o per l'alimentazione di dispositivi portatili (computer, telefoni cellulari), sistemi ottici foto ed elettrocromatici (occhiali fotocromatici e finestre intelligenti o smart windows), memorie portatili (flash memories), e schermi video ultrasottili sono solo alcuni esempi esemplificativi e non esaustivi di quanto questa scienza sia presente nella vita di tutti i giorni.

Tra le varie tipologie di materiali di estremo interesse, per il loro potenziale applicativo e tecnologico nel campo dell'elettronica, sono quelli a base organica, cioè costituiti da molecole organiche o polimeri organici [1]. L'elettronica basata su sistemi organici apre, infatti, a svariate e innovative applicazioni aumentando considerevolmente il panorama dei prodotti disponibili in commercio e, la relativa facilità di stampaggio dei circuiti elettronici e la possibilità di variare le proprietà optoelettroniche dei sistemi organici impiegati attraverso un design molecolare ottimizzato per la prestazione o applicazione voluta, li rendono accessibili a costi relativamente bassi. Display o monitor attivi e dispositivi emettitori di luce (OLEDs), sono già disponibili in commercio. Nel settore delle energie rinnovabili c'è un forte interesse per lo sviluppo di sistemi fotovoltaico a base organica in quanto, grazie alla flessibilità di questi sistemi è possibile utilizzare tecniche di produzione ben consolidate come quelle impiegate nella stampa di giornali o tessuti (sistemi *Roll to Roll*) consentendo di realizzare sistemi sottili e flessibili adattabili a superfici anche non piate molto estese e, quindi, integrarli pienamente nella struttura architettonica di edifici adibiti ad abitazione o uffici e/o attività industriali.

2. MATERIALI E LORO CLASSIFICAZIONE

2.1 *Struttura elettronica*

Le proprietà elettroniche dei materiali e conseguentemente il loro potenziale applicativo è strettamente correlato con la differenza di energia tra gli orbitali di valenza (chiamata genericamente banda di valenza o banda piena di elettroni) e gli orbitali vuoti disponibili (chiamata genericamente banda di conduzione o banda vuota di elettroni). Nei materiali inorganici è possibile visualizzare questi concetti (banda di valenza e di conduzione) partendo dalla struttura elettronica di un atomo e considerando che i livelli energetici degli orbitali del materiale derivino dalla sovrapposizione degli orbitali atomici di ogni singolo atomo. Questa sovrapposizione o combinazione di orbitali porta alla formazione delle rispettive bande: quella occupata da elettroni a energia più bassa del livello di Fermi (E_f) è chiamata banda di valenza (VBM), mentre quella vuota a più alta energia del livello di Fermi è chiamata banda di conduzione (CBM) separate di solito da una differenza di energia chiamato gap energetico (*Fig. 1*).

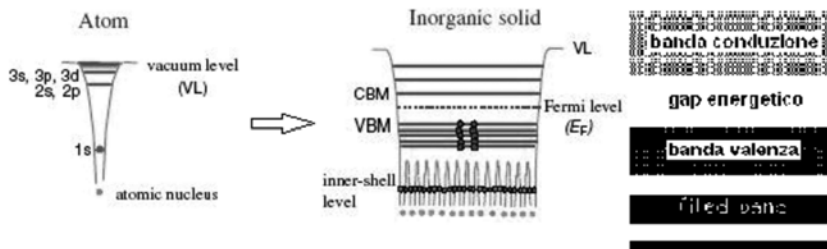


Fig. 1 – Visualizzazione della struttura in bande per un solido inorganico (vacuum level o livello energia del vuoto corrisponde all'energia elettrone libero, l'energia del livello di Fermi si trova a metà del gap energetico tra banda di conduzione e di valenza).

Le proprietà dei materiali inorganici sono caratterizzate dall'insieme complessivo degli atomi cioè sono il risultato della collettività degli atomi che lo compongono.

I materiali a base organica, contrariamente a quelli inorganici, sono costituiti da molecole o macromolecole (polimeri) e le proprietà del materiale possono essere spesso riconducibili o prevedibili a partire da quelle intrinseche della singola molecola. Questa sostanziale differenza tra i mate-

riali organici e inorganici è alla base del notevole interesse che la ricerca attualmente riversa sui materiali organici. Infatti, mentre le proprietà dei materiali inorganici, come detto, sono il risultato della collettività degli atomi che li compongono e, quindi, non prevedibili *a priori*, quelle dei materiali organici sono fortemente condizionate dalle caratteristiche delle singole molecole (queste ultime possono essere prevedibili sulla base della struttura molecolare) che forniscono ai ricercatori indicazioni molto utili per ottimizzarne le proprietà e le prestazioni. Da un punto di vista delle proprietà, i materiali organici vengono trattati in maniera analoga a quelli inorganici solo anche al posto dei singoli atomi si utilizzano le molecole e al posto degli orbitali atomici si sostituiscono gli orbitali molecolari. A livello molecolare gli orbitali si distinguono in orbitali molecolari di legame e in orbitali molecolari di non legame e, tra questi set di orbitali, due giocano un ruolo di primaria importanza nel determinare le proprietà elettroniche e ottiche di una molecola: l'orbitale di legame occupato a più alta energia o HOMO e quello a minor energia non occupato o LUMO. Le molecole, nel formare il materiale, combinano gli orbitali molecolari e, analogamente a quanto visto per i materiali inorganici, ciò porta alla formazione di bande di conduzione e di valenza separate da un gap energetico che nasce dalla combinazione degli orbitali LUMO e di quelli HOMO delle singole molecole. In Fig. 2 è riportato come variano il livello energetico e il numero di orbitali molecolari di un sistema politiofenico al variare del numero di unità tiofeni costituenti la molecola. Come si può apprezzare all'aumentare del numero di anelli tiofenici, gli orbitali molecolari aumentano fino a diventare indistinguibili tra di loro, cioè confluyendo in vere e proprie bande rendendo più evidente cosa si intende con il concetto di banda di valenza e di conduzione per materiali organici (Fig. 2).

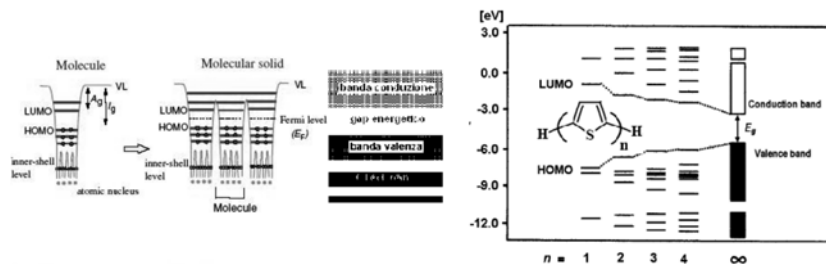


Fig. 2 – Visualizzazione della struttura a bande per un solido organico (molecole al posto di atomi). Ag affinità elettronica della molecola (cioè energia tra LUMO e il livello di vuoto); I_g potenziale di ionizzazione della molecola (cioè l'energia tra l'HOMO e il livello di vuoto).

I materiali, in base alle loro proprietà di conduzione elettrica (proprietà questa direttamente correlata al gap energetico tra la banda di valenza e quella di conduzione, Fig. 3), si suddividono in tre principali tipologie:

- 1) Isolanti: Alto gap energetico con elettroni essenzialmente confinati nella banda di valenza.
- 2) Semiconduttore: gap energetico medio basso con elettroni confinati nella banda di valenza ma con la possibilità di passare in quella di conduzione per stimoli luminosi o termici.
- 3) Conduttori: gap energetico nullo, sovrapposizione della banda di valenza con quella di conduzione con la possibilità per gli elettroni di muoversi liberamente nel materiale.

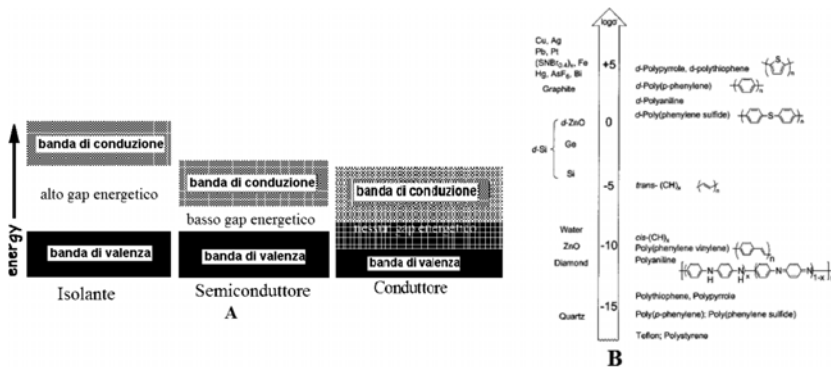


Fig. 3 – Definizione della tipologia dei materiali e tipo di materiali in base alle loro proprietà: isolanti (conducibilità σ molto basse o $\log \sigma$ molto negativo), semiconduttori (conducibilità σ modeste-basse o $\log \sigma$ negativo o prossimo allo zero), conduttori (conducibilità σ buone-alte o $\log \sigma$ positivo).

3. SEMICONDUTTORI PER DISPOSITIVI ELETTRONICI [2]

I semiconduttori a base organica trovano un loro potenziale utilizzo nella realizzazione di un'ampia gamma di dispositivi elettronici quali ad esempio transistor, emettitori di luce e celle fotovoltaiche ed è su questi sistemi che si stanno conducendo molti sforzi in termini di ricerca e di finanziamenti in quanto potranno, in un prossimo futuro, fornire una risposta, anche se parziale, alla crescenti richieste dell'economia globale sia in termini di energia e velocità dei sistemi di comunicazione sia in termini di sistemi produttivi sempre rispettosi dell'ambiente.

3.1 Transistors

I semiconduttori sono tra i materiali investigati quelli che rivestono un ruolo primario nello sviluppo tecnologico in quanto le loro proprietà elettriche ed elettroniche possono essere controllate e/o modulate da stimoli esterni. A seconda del tipo di cariche che sono in grado trasportare, i semiconduttori si dividono in semiconduttori di tipo p, quando trasportano preferenzialmente cariche positive e semiconduttori di tipo n quando trasportano preferenzialmente quelle negative.

Il primo dispositivo elettronico inorganico allo stato solido, un transistor a base di silicio, fu sviluppato da William Shockley nel 1947 e questo rappresenta un anno fondamentale nello sviluppo tecnologico e miniaturizzazione dei dispositivi elettronici osservato a partire da quell'anno fino ai giorni nostri. Accanto ai dispositivi elettronici inorganici a base di silicio, già negli anni '60 la ricerca in questo settore si è anche rivolta verso lo studio e lo sviluppo di dispositivi elettronici a base di semiconduttori organici. Infatti, è del 1998 il primo transistor ad effetto di campo sperimentale a base di semiconduttore di tipo p organico. Il transistor a effetto di campo sono quelli che inizialmente, per le loro caratteristiche, si sono prestati meglio all'uso di semiconduttori organici. Nel suo principio di funzionamento base, la tensione applicata all'elettrodo di controllo gate induce nel materiale semiconduttore un accumulo di cariche all'interfaccia semiconduttore/isolante dielettrico che, se il semiconduttore è di tipo p, saranno cariche positive quando al gate si applica una tensione negativa. La corrente che fluisce tra gli elettrodi di source e drain sarà quindi, proporzionale alla differenza di potenziale applicata tra source e drain e alla tensione applicata al gate. Più alto è il potenziale di gate e più alto è l'accumulo di cariche all'interfaccia e più alta la corrente che fluisce tra source e drain a parità di differenza di potenziale applicato tra questi due elettrodi. A tensioni fisse di gate si costruiscono quelle che vengono chiamate caratteristiche tensione/corrente che caratterizzano le proprietà elettroniche del transistor a effetto di campo (*Fig. 4*).

I semiconduttori organici mostrano diversi vantaggi rispetto a quelli inorganici tra i quali vale la pena sottolineare i bassi costi di produzione, flessibilità sintetica e di modulazione delle proprietà elettroniche, facile processabilità e possibilità di miniaturizzazione molto spinte; tuttavia mostrano svantaggi tra i quali, i più seri sono la loro limitata stabilità meccanica, termica e ambientale, difficoltà di ottenere materiali

ad altissima purezza, scarso controllo sulle proprietà di impaccamento a livello di cristallo, problemi di interfaccia con le elettroniche o sistemi a base inorganica.

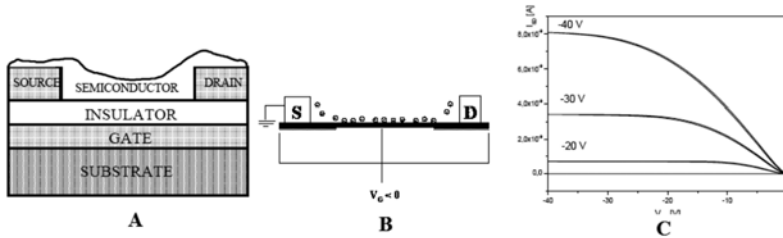


Fig. 4 – A) Tipologia di un transistor organico a effetto di campo;

B) movimento delle cariche dal source S al drain D;

C) caratteristiche corrente-tensione in funzione della tensione applicata al drain e all'elettrodo di controllo gate di un transistor a effetto di campo con semiconduttore organico di tipo p.

Il problema della purezza dei materiali organici è un fattore molto cruciale che condiziona in maniera importante il loro potenziale utilizzo in questo contesto. Infatti, le reali e intrinseche proprietà elettroniche di un materiale sono evidenziate quando la concentrazione dei contaminanti è la più bassa possibile. Ad esempio il comportamento intrinseco da semiconduttore del silicio si osserva quando la concentrazione dei contaminanti è intorno a parti per miliardo (cioè una purezza di circa 99,999999%) e purezze di questo livello sono state possibili impiegando tecniche di purificazione idonee come ad esempio la crescita di cristalli singoli da silicio fuso. Le tecniche di purificazione sviluppate per il silicio o semiconduttori inorganici non sono in genere applicabili ai semiconduttori organici in quanto questi mostrano una limitata stabilità termica, cioè tendono facilmente a degradare quando scaldati a temperature relativamente basse e conseguentemente la rimozione di contaminanti o il loro confinamento a livelli simili a quelli ottenuti per il silicio, è un problema difficile da affrontare. Ragionevoli purezze sono ottenute con tecniche di sublimazione o mediante tecniche trasporto in gas inerte alle opportune temperature.

Tra i semiconduttori di tipo p organici più promettenti vale la pena citare il tetra e il sexi-tiofene, il pentacene e il rubrene. Cristalli singoli di quest'ultima molecola hanno mostrato caratteristiche di semiconduttore (mobilità dei portatori di carica di circa $45\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)

molto vicine a quelle del silicio amorfo e quindi potenzialmente utilizzabile quale sostituto del silicio in molti dispositivi elettronici. Inoltre i protocolli di preparazione di questa molecola permettono l'introduzione di gruppi in posizioni strategiche della struttura molecolare consentendo di ottimizzarne sia le caratteristiche elettroniche sia di intervenire sull'impaccamento cristallino delle molecole (Fig. 5).

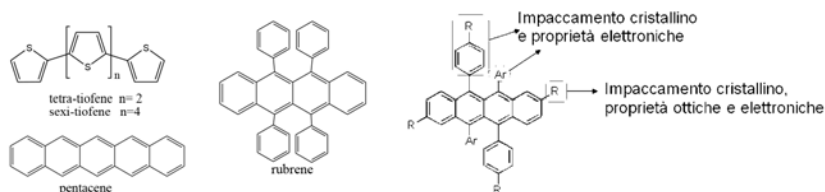


Fig. 5 – Alcune tipologie di semiconduttori organici.

4. CELLE FOTOVOLTAICHE E DISPOSITIVI ELETTROLUMINESCENTI O DIODI EMETTITORI DI LUCE ORGANICI (OLED)

Il gap energetico tra la banda di valenza e di conduzione nei semiconduttori è importante nel definire il campo applicativo di questi materiali. Quando questo cade nella regione del visibile le applicazioni più importanti sono nel campo dei dispositivi elettroluminescenti e delle celle fotovoltaiche dove, nei primi si ha la conversione di energia elettrica in luce mentre nelle seconde la conversione della radiazione luminosa in energia elettrica attraverso due processi fisici concettualmente molto simili tra loro. Infatti, aspetto comune ad entrambi è la formazione di uno stato eccitato nel materiale (cioè la promozione di un elettrone dalla banda di valenza in quella di conduzione o a livello di singola molecola la promozione di un elettrone dall'orbitale HOMO al LUMO).

4.1 Dispositivi elettroluminescenti

I dispositivi elettroluminescenti trovano ampio utilizzo nei sistemi di illuminazione (abitazioni, automobili, elettrodomestici ecc.) e in sistemi di riproduzione di immagini (televisori, monitor per computer o cellulari ecc.).

Nei dispositivi elettroluminescenti il decadimento dallo stato eccitato al fondamentale (cioè il ritorno dell'elettrone dalla banda di condu-

zione a quella di valenza) è accompagnata da rilascio di energia (pari al gap energetico) che in questi dispositivi consiste nella emissione di luce nello spettro del visibile. Lo stato eccitato viene indotto nel materiale per incontro dei portatori di carica nel materiale: lacune (Holes) o cariche positive iniettate all'anodo nella banda di valenza (HOMO a livello di singola molecola) e elettroni iniettati al catodo nella banda di conduzione (LUMO, singola molecola) secondo lo schema mostrato in Fig. 6.

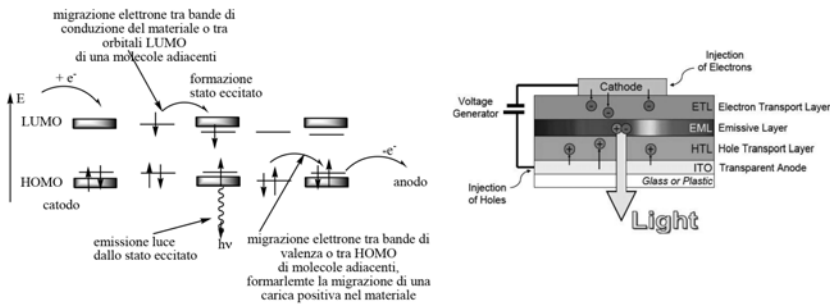


Fig. 6 – Schema di funzionamento di un dispositivo elettroluminescente e struttura tipica di un dispositivo elettroluminescente.

A seconda delle proprietà ottiche (assorbimento di luce e emissione di luce) dei materiali o delle molecole utilizzate è possibile coprire tutta la gamma di colori, bianco e nero inclusi e quindi ottenere schermi a colori con elevate qualità cromatiche e di luminanza.

Ad esempio derivati antracenicici sono noti per emettere luce nel blu mentre quelli a base rubrenica nel giallo-arancio, per cui con essi è possibile ottenere dispositivi elettroluminescenti nel blu, nel giallo-arancio o luce bianca con dispositivi che impieghino miscele di questi sistemi (Fig. 7).

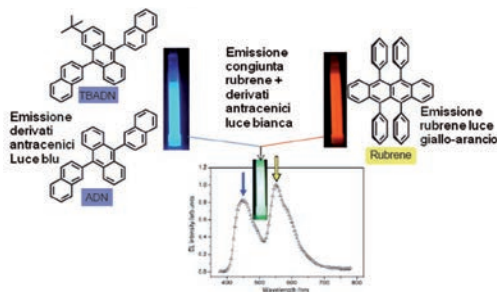


Fig. 7 – Alcune strutture organiche utilizzate in dispositivi elettroluminescenti.

4.2 Celle fotovoltaiche

Come già introdotto, il funzionamento di una cella fotovoltaica è molto simile a quello di un sistema elettroluminescente con la differenza che in questi sistemi si utilizza la luce per generare uno stato eccitato nel materiale. Questo può essere visto come una coppia carica negativa (elettrone nella banda di conduzione o LUMO) e una carica positiva (una vacanza elettronica nella banda di valenza o HOMO) chiamata anche coppia eccitonica o coppia elettrone/lacuna foto indotta o più semplicemente eccitone. La separazione dell'eccitone, con migrazione e raccolta delle cariche agli elettrodi è alla base dell'effetto fotovoltaico. Il processo di separazione dell'eccitone è fondamentale in questi dispositivi e questo avviene più efficacemente quando il materiale utilizzato è costituito da due materiali con proprietà e funzioni distinte: un componente detto donatore (dove per assorbimento della luce si genera lo stato eccitato) e un componente detto accettore coinvolto nel processo di separazione dell'eccitone. Quest'ultimo deve possedere una banda di conduzione o LUMO di energia un po' più bassa della banda di conduzione o LUMO del donatore e questo per facilitare la separazione dell'eccitone in cariche distinte. Entrambe le componenti donatrice e accettrice sono coinvolte nel processo di trasporto delle cariche: quella positiva nel materiale donatore e quella negativa nell'accettore, cioè entrambi essere materiali con buone proprietà di conduzione (*Fig. 8*).

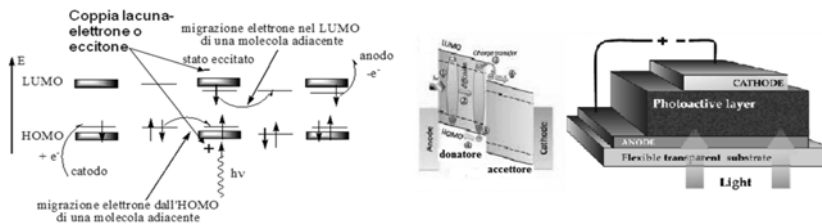


Fig. 8 – Schema di funzionamento di una cella fotovoltaica e struttura di un dispositivo fotovoltaico.

Due sono essenzialmente le tipologie di celle fotovoltaiche studiate e che sono in fase di sviluppo commerciale:

- 1) Celle fotovoltaiche di tipo Greatzel o a coloranti.
- 2) Celle fotovoltaiche a etero giunzione massiva.

4.2.1 Celle fotovoltaiche di tipo Greatzel

Nelle celle di Greatzel, il materiale accettore è costituito un semiconduttore inorganico come ad esempio ossido di titanio (TiO_2) mentre quello donatore è un colorante che abbia uno spettro di assorbimento nella regione del visibile abbastanza ampio e un livello energetico della banda di conduzione superiore a quello di TiO_2 . Il colorante è adsorbito sulla superficie di TiO_2 e a seguito dell'assorbimento della luce, l'elettrone promosso nella banda di conduzione del colorante viene trasferito in quella di conduzione di TiO_2 e da questo trasferito al catodo e al circuito esterno dove svolge lavoro elettrico prima di rientrare nella cella dall'anodo. Il colorante, a seguito del trasferimento dell'elettrone a TiO_2 , si trova in uno stato ossidato e, per poter essere ancora attivo nel processo di fotovoltaico, deve essere ridotto. Questo avviene ad opera di ioni ioduro I^- , che si ossida a I_3^- la cui riduzione a I^- avviene ad opera degli elettroni che rientrano dall'anodo (Fig. 9).

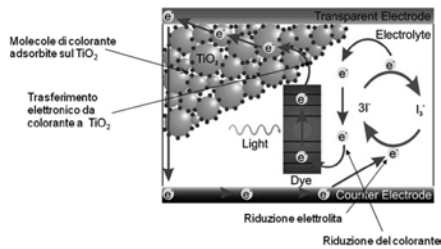


Fig. 9 – Struttura di una cella fotovoltaica di tipo Greatzel.

Con questo tipo di celle si ottengono efficienze di conversione della luce solare superiori al 10%. Come donatori si possono usare coloranti sintetico come ad esempio complessi bi-piridinici del Rutenio, oppure coloranti di origine naturale a base antocianinica (presenti nell'uva, mirtillo e nel radicchio) o a base di Betalaine (presenti nella barbabietola rossa e fichi d'india) [6].

4.2.2 Celle fotovoltaiche a etero-giunzione massiva

In queste celle i materiali donatori e accettori, immiscibili tra di loro, sono dispersi l'uno nell'altro con opportune tecniche di miscelamento in modo da creare una interfaccia (giunzione) tra i due materiali la più estesa possibile. Le tecniche di deposito e di miscelamento vanno

ottimizzate in modo da ottenere, almeno per il materiali donatore, domini di circa 10 nm. Questa è la distanza massima percorsa per diffusione dall'eccitone all'interno del donatore prima di decadere nello stato fondamentale. Entro questa distanza l'eccitone deve raggiungere l'interfaccia con l'accettore affinché la sua separazione possa avvenire efficacemente. Il poli-3-esil-tiofene (P3HT) in miscela con il PCBM (estere metilico dell'acido fenil-C61-butirrico un derivato del fullerene) è sicuramente l'esempio di giunzione più studiata. In questo sistema il poliesiltiofene, semiconduttore di tipo p, si comporta da materiale donatore e il PCBM, semiconduttore di tipo n, funge da materiale accettore. I due materiali non sono miscibili tra di loro e quando dispersi formano domini costituiti dai singoli materiali. Nel P3HT si genera l'eccitone e questo si muove liberamente al suo interno. Quando raggiunge l'interfaccia con il PCBM avviene la sua separazione. Il processo di separazione dell'eccitone lascia una carica positiva nel P3HT (buon conduttore di cariche positive) e una carica negativa nel PCBM (buon conduttore di elettroni). Le cariche raggiungendo i rispettivi elettrodi sono utilizzabili per svolgere lavoro elettrico (Fig. 10).

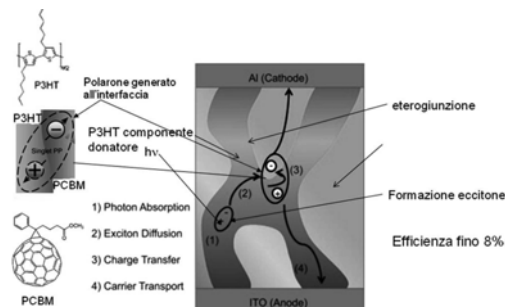


Fig. 10 – Struttura di una cella fotovoltaica a eterogiunzione massiva.

Oltre alla stabilità temporale, la limitata quantità di luce che il P3HT è in grado di assorbire (non assorbe efficacemente luce con lunghezza d'onda $>$ di 630nm) è uno dei limiti principali del sistema P3HT/PCBM. Al fine di trovare una risposta a questi problemi, la ricerca scientifica sta attualmente studiando sistemi polimerici donatori alternativi al P3HT e in particolare sistemi polimeri contenenti al loro interno una alternanza di sistemi elettron-ricchi (chiamati donatori D) ed elettron-poveri (chiamati accettori A) in quanto la combinazione degli orbitali molecolari delle unità donatrici con quelli delle unità

accettrici comporta la formazione di nuovi set di orbitali molecolari con una riduzione delle gap energetico tra banda di conduzione e banda di valenza cioè, in altre parole, si traduce in materiali con assorbimenti che si spingono verso il rosso e perfino nell'Infrarosso, migliorando sensibilmente la quantità di luce assorbibile dal materiale. Molti sono i sistemi accettori e donatori attualmente sotto investigazione e molti altri potranno aggiungersi in un prossimo futuro mettendo a disposizione della scienza dei materiali una ampia gamma di sistemi con i quali individuare quelli più idonei non solo in termini di efficienza di luce convertita in corrente elettrica ma anche in termini di durata del dispositivo fotovoltaico organico e aprendo in questo modo una reale competizione tra questi sistemi fotovoltaici con gli analoghi basati sul silicio e altri semiconduttori inorganici [7] (Fig. 11).

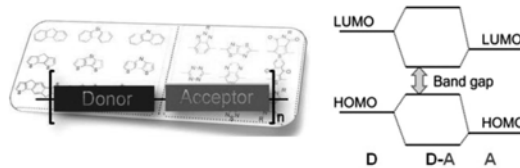


Fig. 11 – Nuove possibilità di sviluppo nelle celle fotovoltaiche a etero-giunzione massiva.

5. CONCLUSIONI

La Scienza dei Materiali sempre di più giocherà in futuro un ruolo fondamentale nel fornire risposte alle sempre crescenti richieste in termini di energia e di dispositivi atti al suo utilizzo ottimale e necessari per sostenere uno sviluppo tecnologico rispettoso dell'ambiente e in grado ridurre al minimo gli sprechi. I materiali organici potenzialmente consentiranno livelli di miniaturizzazione dei dispositivi elettronici estremamente elevate aprendo, in questo contesto, a nuove possibilità in termini di velocità e elaborazione di dati inaccessibili ai quelli inorganici dando nuovo spunto allo sviluppo tecnologico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ostroverkhova O. *Handbook of Organic Materials for Optical and (Opto)Electronic Devices*, 1-784, Woodhead Publishing Limited, Cambridge (UK) 2013.
- [2] Pope M., Swenberg C.E. “*Electronic Processes in Organic Crystals and Polymers*”, 1-1327, Oxford University Press, New York (USA), 1999.
- [3] Dong H.L., Zhu H.F., Meng Q., Gong X., Hu W.P. “Organic photoresponse materials and device”, *Chem. Soc. Rev.*, 2012, 41, 1754-1808.
- [4] Sam-Shajing S., Dalton L.R. *Introduction to Organic Electronic and Optoelectronic Materials and Devices*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [5] Müller T.J.J., Uwe P., Bunz H.F. *Functional Organic Materials: Syntheses, Strategies and Applications*, Wiley VCH 2007; Puigdollers J., Voz C., Martin I., Orpella A., Vetter M., Alcubilla R. “Organic Electronic Devices: Overview and future trends”, *Electron Devices*, 2005, 11-14; Kovac J., Jakabovic J., Peternai L., Lengyel O., Kytka M. “Recent Advances in Organic Electronic” *Advanced Semiconductor Devices and Microsystems*, 2006, 287-294.
- [6] Graetzel M. “Photoelectrochemical Cells”, *Nature*, 2001, 414, 338-344; Graetzel M. “Dye-sensitized solar cells”, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 2003, 145-153; Narayan M.R. “Dye sensitized solar cells based on natural photosensitizers”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012, 16, 208-215.
- [7] Zhang Z.G., Wang J. “Structures and properties of conjugated Donor-Acceptor for solar cell applications”, *J. Mater. Chem.*, 2012, 22, 4178-4187, Gong X. “Towards high performance inverted polymer solar cells”, *Polymer*, 2012, 53, 5437-5448.