

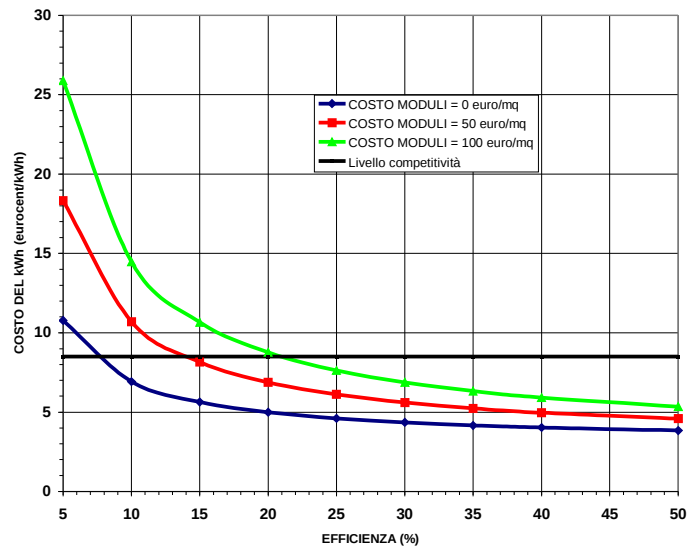
Punto della situazione sulla terza generazione fotovoltaica

Domenico Coiante – 5/12/2011

Costo di produzione del kWh

In un precedente lavoro (Coiante, 2010a) sono state esaminate le prospettive della tecnologia fotovoltaica dei film sottili, detta anche di II generazione per distinguerla da quella di I generazione del silicio mono e policristallino, che oggi domina il mercato (Coiante, 2010b). Uno degli argomenti dello studio riguardava l'analisi prospettica del costo di produzione del kWh. Il grafico di Fig.1 riassume il risultato, mostrando la riproduzione dell'andamento del costo dell'energia in funzione dell'efficienza di conversione dei moduli per diversi valori del costo.

Fig.1 – Andamento del costo del kWh generato dai moduli fotovoltaici a film sottile nelle condizioni d'insolazione dell'Italia meridionale e per valori dei costi del "balance of system" proiettati al minimo prevedibile



Le tre curve si riferiscono rispettivamente ad un costo dei moduli di 100 €/m² (in verde), 50 €/m² (in rosso) e 0 €/m² (in blu). Il livello della competitività in rete è rappresentato dalla barra orizzontale (in nero).

La prima considerazione riguarda la modalità di scelta del livello per la competitività del kWh. Sappiamo che questo livello può variare nel tempo in funzione del prezzo dei combustibili fossili: negli ultimi anni esso ha oscillato all'incirca tra 6 e 10 centesimi, rimanendo entro tali limiti anche quando il prezzo del petrolio è salito oltre i 100 \$/barile. In pratica, si verifica che l'ampiezza delle oscillazioni è limitata verso l'alto a causa dell'effetto calmierante prodotto dal prezzo del carbone: quando il petrolio sale oltre un certo prezzo, l'opzione del carbone diviene più conveniente e i kWh termoelettrici prodotti con questa fonte vanno a sostituire quelli petroliferi. Pertanto, si può assumere che, finché ci sarà abbondanza di carbone a basso prezzo, il livello di competitività si manterrà probabilmente dentro l'intervallo sopra indicato. Ciò ci porterebbe a fissare la competitività indicativamente a 8 centesimi di euro come valore medio della fascia. Tra l'altro tale valore oggi rappresenta il prezzo unico nazionale medio, pagato dal Gestore dei Servizi Elettrici per i kWh immessi in rete.

Dobbiamo, però, tenere anche presente che il livello di competitività dipende dal riconoscimento economico delle esternalità, cioè dalla quantificazione dei benefici ambientali apportati dall'energia rinnovabile. Questo argomento è spesso utilizzato per scontare in parte il differenziale di costo dell'energia rinnovabile, ma esso è ancora molto dibattuto e contrastato perché non si è trovato ancora un metodo ufficiale per la valutazione economica dei benefici. Soltanto i paesi che hanno aderito al Protocollo di Kyoto hanno cominciato a fissare un valore per una delle esternalità, quella relativa alla quantità di CO₂ equivalente evitata. Ciò è stato fatto mediante l'istituzione del mercato dei certificati d'emissione. Ad esempio, sul mercato europeo, la quotazione attuale di una tonnellata di CO₂ è pari a 10,42 €, cioè circa 1 centesimo al kg (<http://www.mercatoelettrico.org/It/Default.aspx>). Poiché ogni kWh termoelettrico immesso nella rete elettrica nazionale è accompagnato dall'emissione di 0,5 kg di CO₂ equivalente, il beneficio associato al kWh fotovoltaico, quando va a sostituire quello termoelettrico, vale all'incirca 5 millesimi di euro. Ciò equivale a scontare il costo di produzione di mezzo centesimo, o alternativamente ad aggiungere questa cifra

al livello di competitività portandone il valore a 8,5 centesimi di euro a kWh, come si è fatto nel grafico di Fig.1.

La seconda considerazione è che, anche al costo idealmente nullo dei moduli (curva blu), il costo (proiettato nella fattispecie al minimo) del resto del sistema da solo impone per la competitività un'efficienza minima dell'8%. Questo importante risultato detta la condizione necessaria per la competitività di tutte le tecnologie dei materiali fotovoltaici a basso costo: esse devono offrire la garanzia del raggiungimento di un'efficienza minima dell'8-10% a livello di modulo. Pertanto, il conseguimento di questo valore deve essere considerato come un livello di soglia per qualunque tecnologia fotovoltaica.

La terza considerazione riguarda la curva del costo dei moduli a 100 €/m² (curva verde). Questa curva rappresenta la situazione attuale di mercato dei moduli a film sottile. Infatti, il prezzo migliore presente sul mercato è all'incirca pari a 0,89 €/Wp (<http://solarbuzz.com/facts-and-figures/retail-price-environment/module-prices>). Dato che l'efficienza dei moduli commerciali è intorno al 9%, il loro prezzo a m² corrisponde a circa 100 €. Osservando la curva in Fig.1, si vede che essa incontra il livello di competitività per un'efficienza di circa il 21%, valore molto distante dalla situazione presente.

Anche se riuscissimo a dimezzare il costo dei moduli a 50 €/m² (cosa difficilmente praticabile perché questo valore corrisponde all'incirca al costo del solo vetro su cui sono realizzati i moduli), dovremmo raggiungere un'efficienza di soglia del 14% per avere la competitività (curva rossa).

La conclusione è che la presente tecnologia dovrebbe migliorare in modo tale da abbassare ulteriormente il costo dei moduli al di sotto del valore attuale e contemporaneamente aumentare l'efficienza di conversione fino a raggiungere almeno il 20%.

E' possibile questo risultato?

Efficienza di conversione

Sulle tabelle che registrano puntualmente i record d'efficienza per i moduli realizzati con le diverse tecnologie (<http://www.eecs.berkeley.edu/news/SCefficiencytablesV37.pdf>), si trovano i seguenti valori per i moduli a film sottile:

Tab.1 – Situazione dell'efficienza record per i moduli a film sottile

| Materiale | Efficienza (%) | Area modulo (cm ²) | Produttore |
|---------------------------------|----------------|--------------------------------|-------------|
| CIGS ¹ | 15,7 ± 0,5 | 9703 | Miasole |
| CIGSS ² | 13,5 ± 0,7 | 3459 | Showa Shell |
| CdTe ³ | 10,9 ± 0,5 | 4874 | BP Solarex |
| a-Si/a-SiGe/a-SiGe ⁴ | 10,4 ± 0,5 | 905 | USSC |

¹CIGS = seleniuro di indio, rame, gallio.

²CIGSS = seleniuro di indio, rame, zolfo (senza cadmio)

³CdTe = Tellururo di cadmio

⁴a-Si/a = Silicio amorfo/lega idrogeno; a-SiGe = silicio amorfo/germanio/lega idrogeno; tecnologia tandem.

L'efficienza più alta è mostrata dai moduli CIGS con il 15,7%. Seguono poi gli altri materiali con valori più bassi. Si tratta naturalmente di risultati di laboratorio, che si riducono notevolmente quando si passa alla scala industriale. Il valore da noi assunto per la media dei migliori prodotti commerciali (9%) è perfettamente in linea con la situazione dei record.

Per giustificare quest'affermazione, basta considerare che l'analoga tabella relativa al silicio cristallino registra un record del 21,4% per un modulo di laboratorio da 1,5 m² contro l'efficienza media di circa il 16% per i migliori moduli commerciali.

Aggiungendo, inoltre, che la situazione dei moduli a film sottile è mutata molto poco nel corso degli ultimi 10 anni, si deve concludere che le attuali tecnologie hanno qualche difficoltà a raggiungere l'efficienza del 20%, come soglia minima richiesta per la competitività.

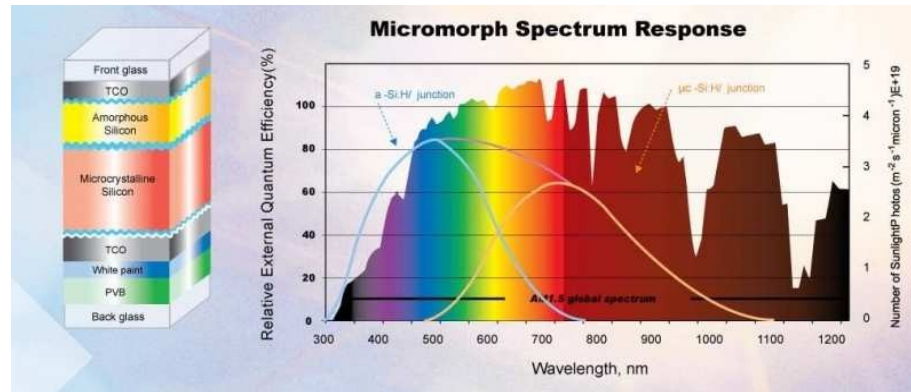
Questa difficoltà è ben presente agli operatori industriali, che stanno tentando di superare l'ostacolo mediante il ricorso alla tecnica delle celle a giunzioni sovrapposte (tandem) di materiali fotovoltaici microcristallini a risposta spettrale complementare. Incoraggia a percorrere questa strada il successo delle celle multistrato a giunzione tripla basate sull'arseniuro di gallio e sue leghe, che ha raggiunto recentemente il record assoluto d'efficienza di conversione di oltre il 42% sotto illuminazione solare concentrata a 406 soli.

L'ultima riga della tabella riporta il record ottenuto da un modulo realizzato con struttura a giunzioni sovrapposte di silicio amorfo, silicio idrogenato e germanio, la cui risposta spettrale è estesa fino alla componente rossa della luce solare.

Il principio di funzionamento di questo tipo di dispositivo è descritto in dettaglio con riferimento alla tecnologia del silicio detto micromorfo (acronimo ottenuto dai termini microcristallino e amorfo). Questo materiale è indicato con la sigla ($\mu\text{-Si:H}$) perché è costituito da microcristalli di silicio sottoposti ad idrogenazione durante la fase di formazione (Keppner, 1999). Deponendo una cella a film sottile di silicio amorfo idrogenato sopra ad una di silicio microcristallino idrogenato, si realizza un dispositivo *tandem micromorfo*. La Fig.2 mostra una sezione ingrandita dei vari strati dei materiali che formano il dispositivo realizzato con questa tecnologia nei moduli messi in commercio dalla Società RCI Solar Network (www.rcisolar.com).

Fig.2 – Rappresentazione schematica di un dispositivo tandem micromorfo e della sua risposta spettrale

Osserviamo la figura seguendo il percorso dei raggi luminosi, sia all'interno del pacco di strati, sia sul grafico a lato, dove sono mostrate le due risposte spettrali delle



celle e la curva totale risultante, sovrapposte allo spettro solare di fondo. La luce penetra nella prima cella dall'alto attraverso uno strato di vetro (*front glass*) ed attraversa uno strato conduttore di ossido trasparente (*TCO*) prima di entrare dentro la cella al silicio amorfo dove le componenti violette, blu e verdi dello spettro solare sono trasformate in fotocorrente. La parte rimanente dello spettro prosegue il suo cammino entrando dentro la seconda cella a silicio microcristallino, che è sensibile alle lunghezze d'onda del giallo, arancione e rosso. Da queste componenti si ha pertanto un ulteriore contributo alla corrente fotogenerata, con ciò permettendo un aumento notevole dell'efficienza di conversione rispetto a quella della singola cella a silicio amorfo. Un secondo strato di TCO fa da contatto ohmico posteriore per la raccolta della fotocorrente e, nel contempo, permette il recupero della luce residua che viene riflessa (e immessa nuovamente dal basso nella cella al silicio microcristallino) dal sottostante strato di vernice bianca (*white paint*). Uno strato di plastica (*PVB*) sigilla il tutto, mentre una seconda lastra di vetro contribuisce ad aumentare la robustezza dell'intero modulo.

I moduli a film sottile di silicio micromorfo sono commercializzati con caratteristiche di efficienza stabile di circa il 10%. I due materiali contribuiscono a questo valore ciascuno per circa il 50%. La garanzia è estesa ai primi 5 anni di funzionamento per difetti di fabbricazione, mentre le prestazioni di potenza sono garantite entro l'80% di quella iniziale per una vita operativa di 20 anni.

Questo prodotto commerciale dà la dimostrazione pratica dell'efficacia del concetto delle giunzioni multiple anche per la tecnologia a film sottile. Tuttavia, il valore raggiunto dall'efficienza rimane ancora sotto di un fattore 2 dalla soglia per la competitività.

In conclusione, il grande sforzo di sviluppo dei materiali semiconduttori a film sottile ha prodotto, da un lato, il risultato atteso della riduzione del costo dei moduli mediante la messa a punto di nuove tecnologie (deposizione dei materiali su grandi superfici in linee automatizzate a scala industriale), ma, dall'altro lato, non è riuscito finora a conseguire l'obiettivo di produrre moduli fotovoltaici aventi un'efficienza di conversione adeguata al requisito della competitività.

Dal momento che, a livello di celle fotovoltaiche da 1 cm^2 , quasi tutti i materiali elencati in tabella mostrano la capacità di raggiungere efficienze fino al 19-20%, il motivo del basso valore a livello di modulo (superficie minima dell'ordine del m^2) sembra risiedere nella difficoltà di mantenere le caratteristiche di purezza chimica e perfezione cristallina nella deposizione dei materiali su grande superficie. Mentre sono in corso intense ricerche volte a comprendere i fenomeni fisici e a superare le difficoltà che causano questo limite, un'altra parte della ricerca sta provando a oltrepassare l'ostacolo mediante un approccio innovativo e fisicamente molto diverso, quello dei nanocristalli quantistici, o *quantum dots*.

III generazione fotovoltaica

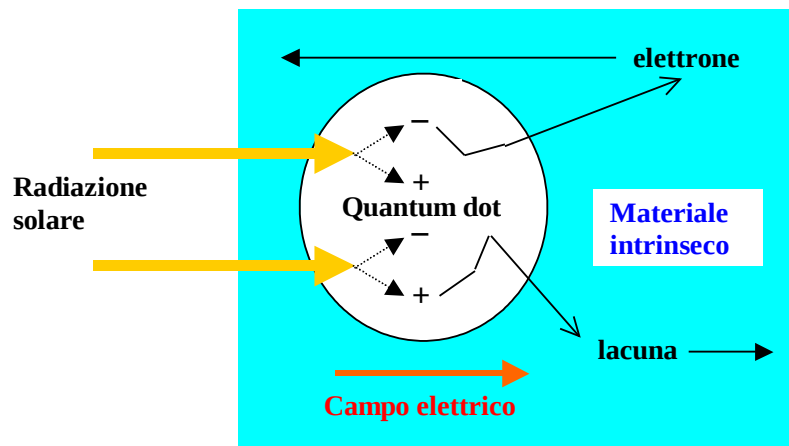
In un precedente lavoro (Coiante, 2006) si è considerata l'opportunità di indirizzare la ricerca verso la cosiddetta "ingegneria" dei nuovi materiali fotovoltaici creati appositamente allo scopo di migliorare lo

sfruttamento dello spettro solare in dispositivi ad alta efficienza. In quel caso si è cominciato a parlare di ricerche per dispositivi fotovoltaici di terza generazione. Successivamente si è individuata, come una possibile scelta concreta per realizzare i nuovi materiali, quella basata sulle nanotecnologie ed in particolare si è descritta la nuova tecnologia dei materiali a microcristalli quantistici, *quantum dots (QD)*, applicata ai dispositivi fotovoltaici (Coiante, 2008) e si è incominciato a dare notizia delle prime ricerche sperimentali. A distanza di tre anni da quei primi dati, si vuole tornare sull'argomento per verificare lo stato della situazione.

Con l'aiuto della Fig.3, si ricorda rapidamente che cosa è un QD e come avviene la fotogenerazione delle cariche ed il loro trasporto. Il QD è un piccolo aggregato microcristallino di atomi, in numero da 10 a 100 circa, di dimensioni 1-10 nm, fatto con un materiale semiconduttore (nella fattispecie di silicio), in cui la larghezza, E_G , della banda dei livelli energetici proibiti dipende dal numero di atomi aggregati. Ad esempio nel caso del silicio, si parte da 1,1 eV del materiale massivo per arrivare a 1,5 - 2 eV per aggregati di 10 atomi. Ciò significa che, mentre il silicio cristallino è sensibile sostanzialmente alle componenti verde, gialla e arancione della luce, i QD di silicio possono essere resi sensibili anche al blu e al violetto, allargando così la risposta spettrale di eventuali dispositivi fotovoltaici realizzati con questi nuovi materiali.

Nella Fig.3 il QD è schematizzato in due dimensioni come un'area quasi circolare (in bianco), al cui interno sono contenuti una decina o più atomi. Il QD è immerso in un materiale isolante e trasparente alla luce (in celeste), in cui esiste un campo elettrico prodotto artificialmente. Lo spazio interno al QD gode della proprietà di rimanere equipotenziale anche in presenza del campo elettrico esterno, per cui le cariche elettriche eventualmente presenti all'interno non risentono di tale campo.

Fig.3 – Fotogenerazione e trasporto di carica in un materiale a quantum dots.

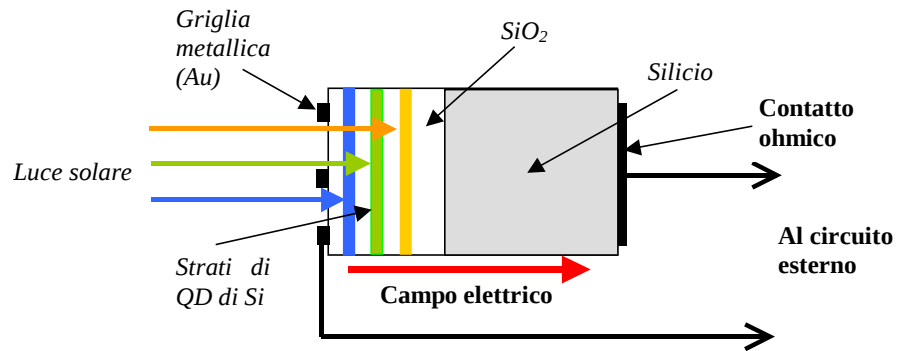


I fotoni della radiazione solare, che penetrano all'interno del QD, possono interagire con gli atomi per effetto fotoelettrico, creando coppie di portatori di carica (elettrone-lacuna). Poiché all'interno del QD non c'è alcun campo elettrico, le cariche sono

libere di muoversi a caso all'interno dell'area sotto l'azione dell'agitazione termica. Alcune di esse si ricombineranno durante il percorso, scomparendo dal bilancio elettrico, ma altre riusciranno a raggiungere i confini dell'area e a diffondere all'esterno. Qui, il campo elettrico agisce su di esse: separa subito gli elettroni dalle lacune, impedisce la loro ricombinazione e indirizza le cariche verso gli elettrodi, dove si raccolgono formando la corrente fotovoltaica che scorre nel circuito esterno.

Oltre al silicio, esistono numerosi semiconduttori tra i materiali composti, che sono adatti alla realizzazione di QD. Però, essi spesso sono rari in natura o hanno caratteristiche chimiche che male si conciliano con la sostenibilità ambientale, soprattutto in una prospettiva di sviluppo del fotovoltaico su larga scala, quale qui si ipotizza. Al contrario, il silicio è un elemento abbondante e possiede le migliori qualità di basso impatto ambientale, qualora sia usato con la tecnologia a film sottile e in un'ottica di completo riciclaggio. Principalmente per questi motivi, il Centro di Ricerche Fotovoltaiche dell'Università australiana del Nuovo Galles del Sud (www.pv.unsw.edu.au), centro di eccellenza a livello mondiale, ha deciso di basare la propria strategia d'indagine su questo materiale. Un dispositivo, basato sui QD di silicio, è allo studio da qualche anno presso i suoi laboratori e la Fig.4 ne indica schematicamente in sezione la composizione. Il silicio usato come base è in forma di uno strato sottile microcristallino ricoperto da un film di biossido di silicio (SiO_2) purissimo. La struttura indicata per realizzare la cella è quella dei diodi detti MIS, cioè metallo/isolante/semiconduttore. In questo caso il campo elettrico viene fornito dall'effetto Schottky, cioè dalla barriera di potenziale che esiste quando si mette in intimo contatto un metallo con un semiconduttore. Tale barriera persiste anche nel caso dell'interposizione tra il metallo (griglia d'oro) ed il semiconduttore di un piccolo strato di isolante (SiO_2).

Fig.4 – Schema di principio di un dispositivo fotovoltaico a QD con struttura MIS



Il biossido di silicio (quarzo) è un isolante trasparente alla luce. Lo spessore rappresentato in figura è molto ampliato per ragioni visive e lo stesso è per gli strati di QD (in colori diversi) immersi all'interno del biossido. I QD sono realizzati con il silicio puro ed inglobati nell'isolante mediante un'opportuna tecnologia di deposizione. Le dimensioni dei QD sono controllate in modo da accordare la loro "energy gap", cioè la loro fotosensibilità, alle componenti dello spettro solare. Il primo strato assorbe solo la luce blu, il secondo solo quella verde ed il terzo quella gialla e arancione. Come si detto, gli elettroni fotogenerati dalla radiazione solare all'interno dei QD migrano per diffusione termica nel biossido dove essi hanno una vita media molto lunga di modo che il campo elettrico può raccogliergli ed avviarli al circuito esterno.

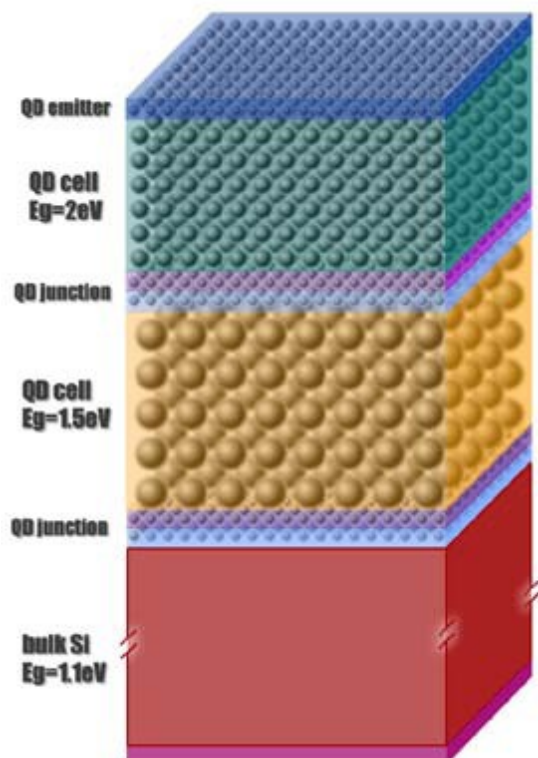
Lo studio di questo dispositivo è iniziato in laboratorio fin dal 2006 (*Third Generation PV 2006 Annual Report*, www.pv.unsw.edu.au) con la priorità assegnata alle ricerche per la messa a punto della tecnologia della formazione dei QD di Si e del loro inglobamento nel biossido. Si è potuto misurare le caratteristiche di assorbimento e di emissione della luce da parte degli strati dei QD, dimostrando il loro corretto comportamento.

Le ricerche sono continuate ininterrottamente negli anni successivi. L'ultima versione pubblica del rapporto annuale d'attività, quella del 2010/11, descrive lo stato di avanzamento del lavoro e riporta i principali risultati raggiunti (http://www2.pv.unsw.edu.au/nsite-files/anreports/ARC_PV_ANREP_UNSW_2010&11.pdf).

Un'idea geometrica del dispositivo, che si sta tentando di realizzare, si può avere dalla rappresentazione di Fig.5, tratta dal citato rapporto.

Fig.5 – Dispositivo fotovoltaico tandem fatto con QD di silicio immersi in una matrice di SiO_2 puro. La cella solare superiore è realizzata con un super reticolo di QD di piccolissime dimensioni così da avere un energy gap di 2 eV (sensibile al violetto-blu). La cella intermedia, fatta con QD di maggiori dimensioni, ha un energy gap di 1,5 eV (sensibile al verde-giallo). La cella inferiore, realizzata in silicio microcristallino normale, ha un energy gap di 1,1 eV (sensibile all'arancione-rosso). L'intero spessore è dell'ordine di qualche micron, come per le celle a film sottile.

La tecnologia dei dispositivi a QD è sostanzialmente simile a quella dei film sottili e per tale motivo gode di tutti i vantaggi economici di basso costo ad essa associati. Ma essa non soffre della presenza del limite d'efficienza teorica massima, intorno al 31%, delle celle a film sottile. Nel caso dei QD il valore limite termodinamico dell'efficienza è situato molto più in alto, a circa il 74% in condizioni d'illuminazione non concentrata. Si presume, pertanto, che tali dispositivi possano raggiungere in pratica



un'efficienza analoga a quella record delle celle cristalline a tripla giunzione, superiore al 30% in condizioni d'illuminazione non concentrata.

Alla realizzazione del dispositivo concettuale di Fig.5 si arriverà per gradi poiché l'azione comporta la necessità di risolvere un notevole numero di problemi teorici e pratici in gran parte nuovi. Mentre sul lato teorico occorre riuscire a comprendere meglio la fisica dei nanocristalli quantistici in modo da ottenere un modello utilizzabile a livello dell'ingegneria dei materiali, sul lato pratico è necessario mettere a punto una nuova tecnologia fatta di tecniche in gran parte innovative per la formazione dei QD al Si, di dimensioni controllate, da introdurre in strati alternati dentro la matrice di SiO₂. Alcuni di questi problemi sono stati risolti. Ad esempio, la fig.6, riprodotta dal citato rapporto annuale d'attività, mostra il risultato delle misure della variazione di *energy gap* dei QD, rispetto a quella del Si normale su tre campioni di strati di QD di differenti dimensioni.

Fig.6 – Allargamento dell'*energy gap* del Si in funzione delle dimensioni dei Q di tre campioni rispettivamente S3 = 3, S4 = 4 e S5 = 5 nm

Si nota chiaramente l'effetto di ampliamento della banda proibita del silicio in funzione delle dimensioni dei QD. Si è ottenuto un aumento di circa 0,8 eV per S3, di 0,6 eV per S4 e 0,5 eV per S5, portando l'*energy gap* rispettivamente da 1,1 eV fino a circa 1,9, 1,7 e 1,6 eV.

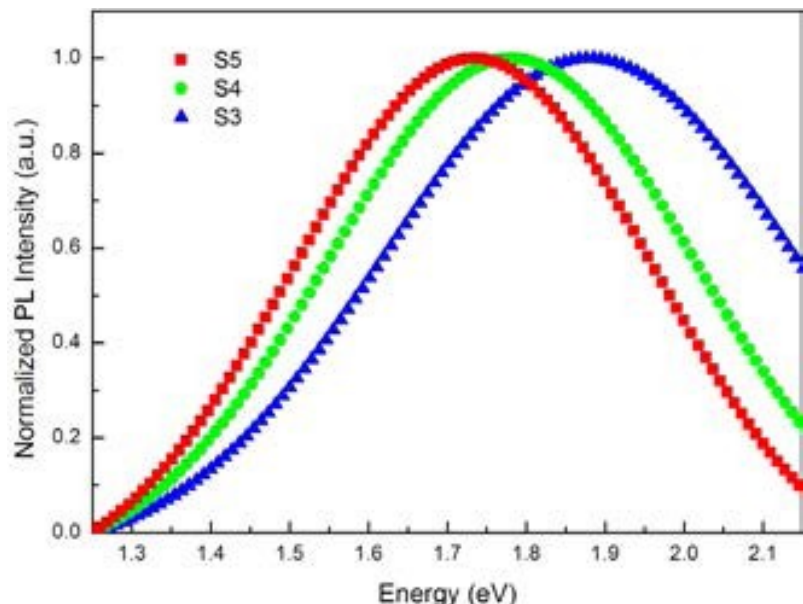
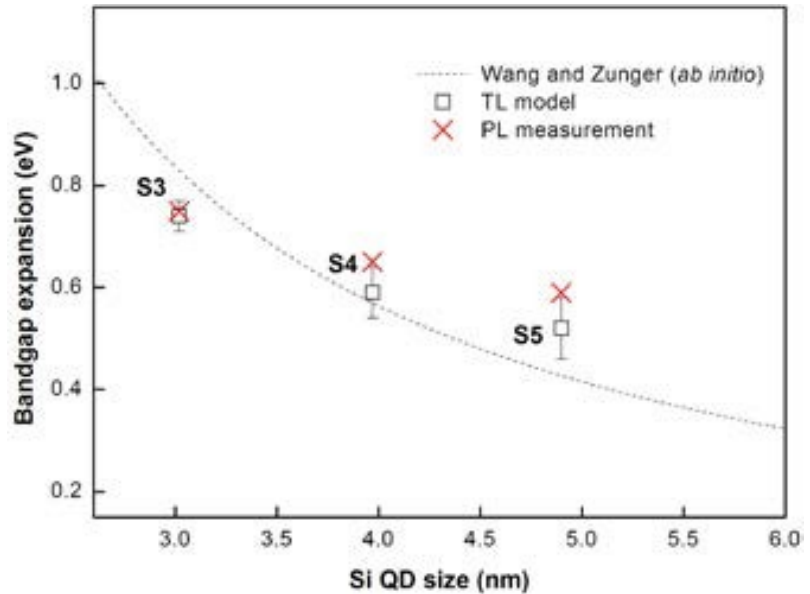
La Fig.7 mostra i risultati delle misure di fotoluminescenza (PL = *Photo Luminescence*) sui tre campioni di QD descritti.

Fig.7 – Misure di fotoluminescenza (PL) su tre campioni di materiali a QD di silicio di dimensioni rispettivamente: S5 = 5 nm; S4 = 4 nm; S3 = 3 nm.

I grafici dimostrano chiaramente il diverso comportamento optoelettronico dei QD. In accordo con la teoria, il picco di fotoemissione si sposta verso energia più alta al diminuire delle dimensioni dei QD. Ciò equivale a dire che lo strato di QD da 3 nm è sensibile selettivamente alla luce blu-violetta, quello da 4 nm vede principalmente il verde e quello da 4 nm il rosso.

In conclusione, si può dire che la tecnica di formazione controllata e di deposizione in strati dei QD può essere considerata ormai acquisita e si può passare alla fase successiva di costruzione dei dispositivi fotovoltaici.

Come si è visto in precedenza, gli strati di QD sono elettricamente neutri. Le coppie elettrone-lacuna generate in essi per effetto fotoelettrico sarebbero destinate a ricombinarsi dopo un tempo pari alla vita media caratteristica del materiale dei QD (dell'ordine del microsecondo). Lo stesso destino avrebbero anche



quelle cariche che fossero riuscite ad uscire dal confinamento quantistico del QD e a raggiungere il biossido di silicio circostante, dove sopravviverebbero per un tempo dell'ordine del millisecondo. Dopo questo tempo, non ci sarebbe più alcuna traccia dell'evento di fotogenerazione di carica. Se, però, all'interno del biossido di silicio fosse presente un campo elettrico d'intensità adeguata, le cariche sarebbero raccolte prima della loro ricombinazione ed avviate agli opportuni elettrodi.

Nella Fig.4 si è indicata una possibile realizzazione di una cella fotovoltaica a strati di QD. In essa, la presenza del campo elettrico è assicurata dalla particolare struttura MIS scelta per la giunzione a causa della sua facilità di realizzazione in laboratorio. Utilizzando questa tecnologia sono stati prodotti alcuni campioni di celle di piccolissime dimensioni (qualche decina di mm^2), con le quali si è potuto verificare il comportamento optoelettronico della giunzione e confermare le caratteristiche elettriche dei materiali. Tuttavia, questo tipo di tecnologia non permette di portare i dispositivi alla scala delle applicazioni industriali, soprattutto per la difficoltà di ottenere caratteristiche fotovoltaiche adeguate su celle di grande superficie. Nella pratica il campo elettrico realizzabile con questa struttura non raggiunge l'intensità necessaria alla completa raccolta delle cariche e, di conseguenza, l'efficienza di conversione è bassa.

Nelle celle fotovoltaiche convenzionali, il modo più semplice e più economico per ottenere campi elettrici di grande intensità è quello di sfruttare l'effetto Volta, realizzando una giunzione tra due strati di semiconduttore drogati N e P (rispettivamente con fosforo e boro). Passando ai QD, si tratta, pertanto, di vedere se i nuovi materiali (costituiti dagli strati di QD a silicio immersi nel biossido di silicio) possano essere a loro turno drogati con il fosforo ed il boro per ottenere la giunzione NP e, quindi, realizzare facilmente il campo elettrico di raccolta delle cariche fotogenerate.

La fase attuale delle ricerche in corso è focalizzata proprio sugli esperimenti di drogaggio dei nuovi materiali a QD al Si. I primi risultati mostrano inattese difficoltà. In pratica avviene che il fenomeno della segregazione delle impurezze sulla superficie dei bordi dei grani, ben noto nel caso della realizzazione dei semiconduttori cristallini e microcristallini, costituisce una forte limitazione nel caso dei QD. A livello delle dimensioni nanocristalline, gli atomi di fosforo e di boro, che dovrebbero legarsi strutturalmente con il reticolo cristallino del Si all'interno dei QD, vengono visti, invece, come impurezze chimiche da segregare sulla superficie del nanocristallo. Pertanto, durante il processo di formazione dei QD, nella fase di "annealing", cioè di ricottura termica per permettere l'aggregazione degli atomi di silicio in nanocristalli, il fosforo ed il boro sono espulsi dall'interno dell'aggregato e accumulati sulla sua superficie, dove perdono le loro caratteristiche di droganti e, per giunta, vanno a costituire altrettanti centri di ricombinazione delle cariche, cosa che fa peggiorare le caratteristiche optoelettroniche del materiale. In altri termini, non si riesce ad ottenere strati N e P di QD e così non si possono fare le giunzioni.

Mentre sono in corso ricerche specifiche per comprendere meglio questo fenomeno, in modo da superare l'ostacolo, si deve riconoscere che la nuova fisica quantistica della cosiddetta "ingegneria delle bande", per l'ottenimento di nuovi materiali fotovoltaici non esistenti in natura, si sta mostrando molto più difficile di quanto ci si aspettasse. Allo stato attuale delle ricerche sui QD, non si è ancora ottenuto in laboratorio un dispositivo fotovoltaico a stato solido come quello indicato nello schema di Fig.5, che possa confermare le attese di altissima efficienza riposte su questa nuova tecnologia.

In conclusione, il lavoro da fare è ancora tanto, ma gli intensi sforzi di ricerca in corso e i progressi continui effettuati lasciano sperare nel conseguimento dell'obiettivo in un futuro non molto lontano.

Bibliografia

- Coiante D., 2006, *Il fotovoltaico di terza generazione*, <http://www.aspoitalia.it/images/stories/coiante/coiantefotovoltaico.pdf> , 25/10/2006
- Coiante D., 2008, *Nanotecnologia ed efficienza delle celle fotovoltaiche*, <http://www.aspoitalia.it/archivio-articoli/204-nanotecnologia-ed-efficienza-delle-celle-fotovoltaiche>, 22/02/2008
- Coiante D., 2010a, *Fotovoltaico di seconda generazione: limiti e possibilità*, www.aspoitalia.it/archivio-articoli/attachments/283, 08/07/2010
- Coiante D., 2010b, *Fotovoltaico di prima generazione: il punto*, <http://www.aspoitalia.it/archivio-articoli/280-la-situazione-del-fotovoltaico-di-prima-generazione> , 13/06/2010
- Keppner H. et al., 1999, *Microcrystalline silicon and micromorph tandem solar cells*, Appl. Phys. A: Materials Science & Processing 69, issue 2, p.169-177