

CELLE FOTOVOLTAICHE DI ALTA EFFICIENZA A ETEROGIUNZIONE SILICIO AMORFO-NANOCRISTALLINO/SILICIO CRISTALLINO PER APPLICAZIONI INDUSTRIALI SU VASTA SCALA

F. Zignani^{°*}, E. Centurioni*, A. Desalvo[°], D. Iencinella^{°*}, R. Rizzoli*, C. Summonte*

[°]Università di Bologna, DICASM, Facoltà di Ingegneria, Viale Risorgimento 1, 40136 Bologna,
* CNR-IMM, Sezione di Bologna, via Gobetti 101, 40129 Bologna

SOMMARIO

Dal *PV Status report 2003* della Commissione Europea risulta che la produzione annua mondiale fotovoltaica presenta un incremento esponenziale a partire dal 1998. Estrapolando tale andamento le previsioni indicherebbero già per il 2010 una produzione annua mondiale di 8÷10 gigawatt.

Un obiettivo di tale portata potrà essere raggiunto solo se saranno disponibili processi di fabbricazione del dispositivo fotovoltaico che rispondano ad una serie di requisiti, fra i quali i principali sono l'alta efficienza di conversione, processi a pochi stadi e a basso consumo di energia, lunga durata d'esercizio, basso costo, e infine abbondanza, reperibilità e non tossicità dei materiali usati.

I dispositivi fotovoltaici ad eterogiunzione, oggetto della presente ricerca dal 1996, presentano le caratteristiche fisiche e tecnologiche in grado di rispondere, se adeguatamente sviluppate, ai requisiti sopra elencati.

In particolare tali caratteristiche sono:

- a) Possibilità di raggiungere alte efficienze di conversione (>20%) su dimensioni di interesse industriale, (10x10) cm².
- b) Processo di fabbricazione a bassa temperatura (≤ 250 °C) e basso consumo di energia.
- c) Compatibilità del processo con wafer di silicio di grado solare di costo limitato.
- d) Processo con un numero limitato di stadi con tempi complessivi di esecuzione relativamente bassi.
- e) Durata di esercizio, già sperimentata su dispositivi commerciali standard, prossima ai 30 anni.

Risultano quindi evidenti le potenzialità di una tale tecnologia in vista di applicazioni industriali nel breve-medio periodo.

INTRODUZIONE

Quale futuro per la conversione fotovoltaica nel panorama energetico?

Nel 2004 la potenza fotovoltaica installata nel mondo ammontava a qualche gigawatt. Questa cifra non è che una frazione minima rispetto al fabbisogno globale di energia elettrica. Resterà minima anche nei prossimi vent'anni? Non è questo quello che si deduce ad esempio dal PV Status Report 2003, pubblicato dalla Commissione Europea [1], che limitatamente alle più importanti aree di sviluppo: USA, Europa, e Giappone, prevede per il 2030, una potenza installata pari a non meno di 140 gigawatt. Il dato è riportato in tabella 1.

D'altra parte, se si guarda al passato, dal 1997 al 2002 l'andamento della produzione fotovoltaica per anno (Fig.1, tratto ancora da Ref. [1]; il 2002 è l'ultimo dato riportato) è cresciuta con un andamento esponenziale, risultato che trova d'accordo la totalità delle analisi di settore, e anche un'estrapolazione prudente al solo 2010 indica che a quella data la produzione annua mondiale di potenza fotovoltaica potrebbe sfiorare i 10 gigawatt /anno.

E' tuttavia imprudente spingere oltre l'estrapolazione senza assumere che la ricerca fotovoltaica riesca nel frattempo a centrare vari obiettivi, i più importanti dei quali sono:

- a- Una ancora maggiore efficienza di conversione della cella solare,
- b- Basso costo della potenza installata,
- c- Lunga durata del pannello fotovoltaico senza apprezzabile degrado delle sue prestazioni nelle condizioni climatiche in cui opera.

Efficienza

L'importanza della alta efficienza è chiarita dall'osservazione, riportata dal documento della Commissione Europea di cui in Ref [2], che una efficienza di conversione del pannello fotovoltaico attorno al 20% costituisce un obiettivo sufficiente a consentire la competitività con le fonti energetiche convenzionali. Da una parte l'obiettivo risulta realistico, se si osserva che per quanto riguarda l'efficienza del dispositivo fotovoltaico, limitandosi al silicio (che attualmente copre quasi il 99% del mercato, ripartito in oltre il 90% nella forma cristallina Solar

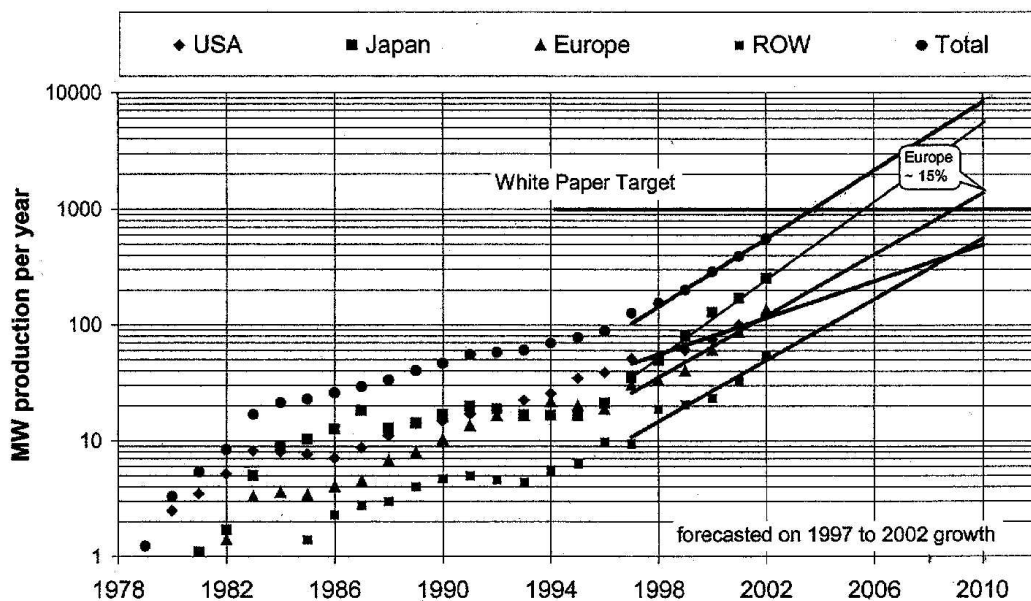


Fig 1 – Elettricità solare: produzione per anno. Effettiva fino al 2002, proiezioni a partire dal 2002 . Da Ref. [1]

Grade ed il restante nella forma amorfa o micro-nanocristallina) sono state sperimentate efficienze superiori al 20-24% in laboratorio. Dall'altra, il passaggio dal laboratorio alla produzione, per la quale si arriva fino a circa il 17%, implica che le tecnologie impiegate siano compatibili con quest'ultima, cosa che costringe a mettere da parte il meglio della tecnologia ottenibile in laboratorio e a orientare la ricerca nella direzione di semplificare il processo in tutte le sue fasi.

Costi di installazione

Questo costo è strettamente legato all'efficienza del dispositivo. Una alta efficienza permette aree inferiori a parità di potenza installata, con relativa riduzione di costi. Una recente analisi del Georgia Institute of Technology – USA [3] stima già possibile attualmente un costo di produzione di 2 US\$/watt per pannelli fotovoltaici al silicio cristallino Solar Grade. L'analisi prevede inoltre una riduzione del costo al di sotto di 1 US\$/watt purchè siano raggiunte le seguenti condizioni: efficienza della cella solare $\geq 17 - 18\%$,

Tabella I – Evoluzione della capacità di produzione dell'elettricità solare fino al 2030 (Da Ref. [1])

Year	2000	2010	2020	2030
USA [MW]	140	3.000	15.000	25.000
Europe [MW]	150	3.000	15.000	30.000
Japan[MW]	250	5.000	30.000	72.000
World-wide[MW]	1.000	14.000	70.000	140.000

spessore del wafer di silicio di 150 – 200 micron, ed una linea di produzione con volume annuo di 100 –500 megawatt.

Durata dell'impianto

La durata dell'impianto costituisce un requisito fondamentale ai fini della valutazione del costo effettivo per kilowattora dell'energia elettrica prodotta, il solo che può essere confrontato con le altre fonti energetiche per poterne valutare la competitività. Si stima che sulla base della durata dei pannelli fotovoltaici già in esercizio da oltre vent'anni, la durata attuale sia non inferiore ai trent'anni ma possa essere realisticamente estesa a 50 anni con l'evoluzione delle tecnologie di contattatura e montaggio. E' forse il caso di sottolineare che, per celle in silicio monocrystalino, contrariamente a quello che avviene per altre tecnologie, la giunzione, ossia il 'cuore' del dispositivo fotovoltaico, una volta formata, è praticamente indistruttibile; il degrado riguarda invece il resto del sistema, come ad esempio i contatti metallici, o il montaggio all'interno del pannello (laminazione), il quale negli anni può perdere la necessaria impermeabilità; tutti aspetti tecnologici per cui non è irrealistico immaginarsi una efficace soluzione.

Costi occulti ?

Al di là dei discorsi sulla protezione dell'ambiente, nel confronto fra i costi, quando si tratta di energia convenzionale vengono completamente trascurati i costi occulti, difficilmente quantificabili ma non trascurabili, dovuti, per fare qualche esempio, a

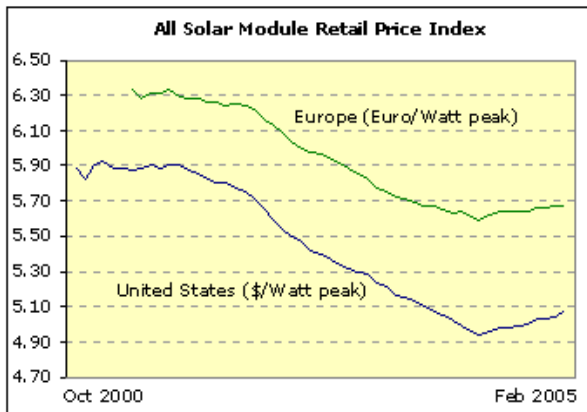


Fig.2 – Costo medio del pannello solare. Da Ref. [4].

inquinamento locale (e quindi costi medici sulla salute della popolazione), o a impatto sul clima globale nel caso di centrali elettriche alimentate a combustibili fossili, o, nel caso di centrali nucleari, allo smantellamento dell'impianto a fine esercizio e al problema, tuttora non risolto, dello smaltimento delle scorie radioattive, nonché al loro controllo nel tempo, oltre che ai rischi connessi agli incidenti, statisticamente inevitabili.

Il costo energetico

Fra i motivi di scetticismo verso l'elettricità solare esiste, o meglio esisteva, il sospetto che un impianto fotovoltaico non sia in grado di fornire l'energia che è stata necessaria per produrlo. Questo sospetto, che vent'anni fa pesava negativamente sull'ipotesi di un utilizzo vantaggioso dell'elettricità solare, è stato ormai definitivamente rimosso. Con le tecnologie attuali si calcola un pay-back time energetico intorno ai quattro anni, e si può ragionevolmente immaginare un'ulteriore riduzione fino a due anni, cifra tanto più realistica quanto più saranno efficienti i dispositivi che si riusciranno a produrre. Considerata uguale a trent'anni la durata di un impianto, un risultato di questo tipo lascia, nell'esercizio dell'impianto, un margine di ventotto anni di energia pulita, senza emissioni di gas serra e virtualmente senza più costi.

Cosa si fa in Italia

A dispetto di così incoraggianti premesse, nel 2002 l'Italia copriva soltanto il 4% del mercato europeo [1], nonostante il forte irraggiamento solare del nostro territorio. Alla fine del 2004 la situazione è ulteriormente peggiorata, scendendo a meno dell'1% del mercato. Ma cosa si fa in Italia, come attività di ricerca sulla conversione fotovoltaica? A partire dalla conclusione del progetto Finalizzato Energetica del CNR a fine anni '80, essa è praticamente inesistente, con l'esclusione del Centro di Ricerche Fotovoltaiche di Portici dell'Enea e di qualche gruppo universitario o CNR. Eppure esistono esempi, come in Giappone in

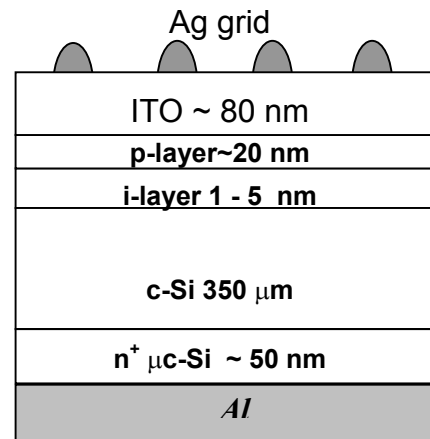


Fig. 3 – Cella solare a eterogiunzione: struttura del dispositivo

primis, o in Germania e in Spagna, dove l'intervento governativo è stato in grado di dare un impulso molto forte allo sviluppo sia della produzione che della diffusione degli impianti, chiarendo ancora una volta il ruolo che, anche in questo campo, le scelte politiche possono avere.

Perché celle in silicio

Esiste un'opinione diffusa che una tecnologia basata sul silicio cristallino sia perdente in partenza, a causa dell'alto costo della materia prima. Al contrario, il pannello al momento più economico, a parità di potenza, è appunto in silicio cristallino, con 3.64 \$ per Watt di picco, prezzo al dettaglio [4].

Non solo: l'alta efficienza ottenibile con il silicio cristallino significa maggiore stabilità nel tempo, e significa minore superficie impegnata, con conseguenti minori costi legati all'area, come montaggio, strutture di sostegno, cablaggi, costo della superficie stessa. E' chiaro quindi che in attesa che tecnologie alternative raggiungano una loro maturità, dal punto di vista sia dell'affidabilità che dell'efficienza, una tecnologia basata sul silicio è quella dalla quale aspettarsi i migliori risultati nel breve- medio periodo.

A che punto siamo

Se la cifra indicata nel paragrafo precedente è già un buon risultato (l'industria fotovoltaica punta a un abbattimento, da raggiungersi nei prossimi dieci anni, fino a 1.5 - 2 US\$/ watt, che è il target considerato necessario per la definitiva diffusione su vasta scala dell'elettricità solare, vedi Ref [4], target al quale, qualora si passi a linee di produzione di alcune centinaia di megawatt/anno è fondamentale che contribuisca l'economia di scala [3]), il costo medio della potenza fotovoltaica, (vedi Fig.2), tendenzialmente in diminuzione, è però più alto, restando fermo intorno ai 5 \$ /Watt ormai dalla metà del 2003. La necessità di investire nella ricerca applicata su nuove tecnologie in grado di innescare una nuova tendenza al ribasso risulta quindi evidente.

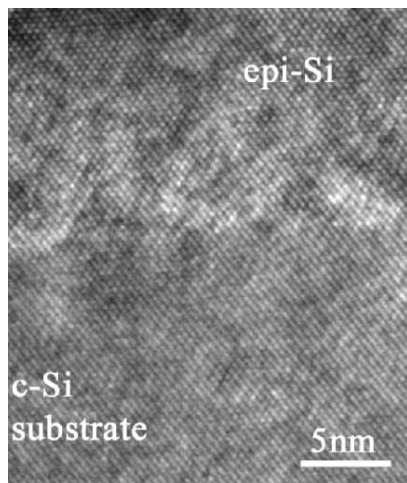


Fig. 4 – Immagine ad alta risoluzione di una sezione trasversale, osservata al microscopio elettronico in trasmissione, dell'omo-giunzione silicio epitassiale / silicio monocristallino, fabbricata da fase plasma a bassa temperatura.

Nella presente memoria vengono illustrati i risultati della attività di ricerca presso la sezione di Bologna del CNR-IMM relativi alla realizzazione di prototipi di celle solari ad eterogiunzione in silicio amorfo o nanocristallino su silicio cristallino, ad alta efficienza e basso costo.

CELLE SOLARI AD ETEROGIUNZIONE

Che strada scegliere

A parità di costo del substrato in silicio, una buona percentuale del costo del dispositivo è costituita dal costo di fabbricazione, nel quale giocano un ruolo notevole i processi ad alta temperatura (750°C –

900°C) necessari a formare la giunzione, i quali, a meno di non applicare procedure di gettering, con ulteriore aumento del tempo di processo, hanno lo svantaggio di influenzare negativamente le proprietà elettriche del silicio stesso, rendendo il dispositivo più soggetto a degrado in corso di utilizzo. Sia dal punto di vista qualitativo che energetico, l'abbassamento della temperatura massima di processo è quindi uno degli obiettivi più importanti. Si tratta pertanto di definire un'intera sequenza di processo che si affranchi dalle tecniche microelettroniche per la formazione della giunzione, la fabbricazione dei contatti e il completamento del dispositivo.

La tecnologia dell'eterogiunzione silicio amorfo o nanocristallino / silicio cristallino

La fabbricazione di una giunzione su silicio monocristallino a bassa temperatura è possibile attraverso i processi di deposizione chimica da fase vapore assistiti da plasma, [5] già largamente utilizzati nei più disparati campi tecnologici. Utilizzando la deposizione da fase plasma, la formazione della giunzione avviene con la deposizione di uno strato di silicio per dissociazione del gas precursore, mentre la temperatura del substrato può restare limitata su valori che possono essere di poco superiori ai 100°C. Altri passaggi coinvolti sono l'iniziale trattamento antiriflettente della superficie, la formazione dei contatti sul retro e sul fronte, quest'ultimo costituito da una griglia che riduca l'ombreggiatura senza tuttavia penalizzare la raccolta, e la deposizione di un ulteriore strato antiriflettente sul fronte del dispositivo.

RISULTATI RAGGIUNTI

Interfaccia amorfo o nanocristallino / cristallino e formazione della giunzione

La struttura del dispositivo finale è riportata in Fig.3. Un passaggio chiave nella realizzazione del dispositivo descritto è stato raggiungere il controllo della deposizione da fase plasma sin dalle primissime

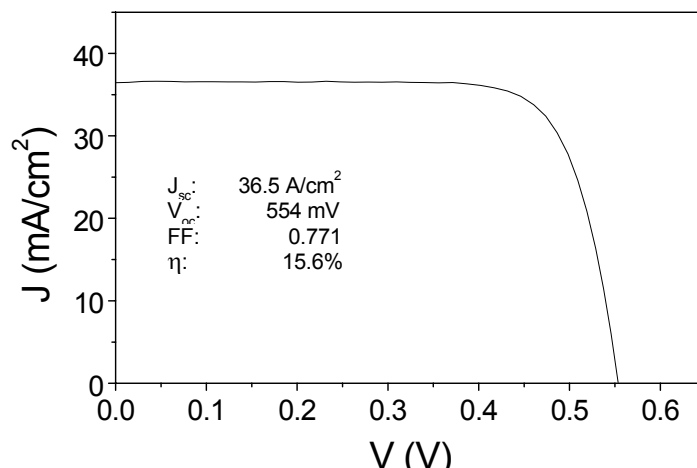


Fig.5 – Caratteristica sotto illuminazione di una cella solare a eterogiunzione

fasi della crescita su silicio cristallino, e questo perché dalla qualità dell'interfaccia fra lo strato p (amorfo, nanocristallino, o epitassiale) e lo strato n cristallino deriva la massima tensione a circuito aperto ottenibile. A questo risultato si è arrivati lavorando sia sulla preparazione della superficie prima della deposizione, che attraverso lo studio della crescita del silicio nanocristallino o epitassiale [6 – 10]. E' rappresentativo a questo proposito il risultato riportato in Fig. 4, dove è mostrata una immagine in alta risoluzione ottenuta al microscopio elettronico in trasmissione. La perfetta epitassia del silicio depositato rispetto al silicio del substrato è stata ottenuta a soli 170°C.

Contatto sul retro

Altro punto chiave è la qualità del contatto sul retro. Per ottenere un buon contatto ohmico, la tecnologia microelettronica prevederebbe la creazione, a temperature superiori a 850°C, di uno strato molto drogato dello stesso tipo del materiale di base, seguito dall'evaporazione termica del metallo con successivo trattamento a 450°C. Utilizzando la deposizione da fase plasma, il contatto sul retro è stato invece ottenuto depositando uno strato in silicio microcristallino drogato direttamente da fase gas, a temperature inferiori a 200°C. La successiva deposizione del metallo non è seguita da trattamenti termici.

Procedure di light trapping

Ottimizzare la raccolta di luce all'interno della regione attiva del dispositivo, in questo caso il substrato in silicio monocristallino, significa aumentare la densità di corrente ottenibile. Sotto questo aspetto la ricerca è focalizzata su tre aspetti: qualità dello strato antiriflettente e conduttore che copre il dispositivo (indicato con ITO in Fig. 3) [11 – 15]; procedure di trattamento della superficie finalizzate all'abbattimento della frazione di luce riflessa, con particolare attenzione alla messa a punto di un processo che, oltre a essere ottenuto con una tecnologia basata su attacchi chimici a costo contenuto, ha la caratteristica di non danneggiare la qualità elettronica del materiale di partenza [16]; analisi del profilo di assorbimento di luce nel dispositivo, lavoro, questo, che ha implicato lo sviluppo di un complesso software [17] in grado di trattare strutture comprendenti strati coerenti e incoerenti senza alcun vincolo riguardo alla sequenza, oltretutto la formazione di strati a fase mista con diverso contenuto di frazioni nanocristalline.

CONCLUSIONI

Il percorso scientifico che ha portato ai risultati qui brevemente descritti è riportato in bibliografia [18 – 21]. A titolo rappresentativo, in Fig. 5 riportiamo la caratteristica corrente-tensione di una cella solare a eterogiunzione che raduna i risultati finora raggiunti essendo stata fabbricata interamente a bassa temperatura. Non sono tuttavia esauriti gli aspetti

tecnologici da esplorare. E' quindi fondata la speranza di raggiungere a breve termine l'obiettivo finale di realizzare prototipi di celle solari a eterogiunzione con efficienza attorno al 20%.

Non si può però fare a meno di evidenziare che la ricerca descritta è stata finora finanziata da programmi governativi in scadenza con la fine del 2004. In assenza di ulteriori finanziamenti il progetto di ricerca dovrà essere necessariamente interrotto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. A. Jäger-Waldau, *PV Status Report 2003* – European Commission, Directorate-Generale, Joint Research Centre, EUR 20850 EN, 2003
2. *European Roadmap for PV R&D*, PVNET, Ed.: A. Jäger-Waldau, European Commission, Directorate-Generale, Joint Research Centre, EUR 21087 EN, 2004
3. A. Rohatgi, World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Osaka, 2003)
4. Solarbuzz, Inc., Solar Energy Research and Consultancy, <http://www.solarbuzz.com/Moduleprices.htm>
5. M. Tanaka, S. Okamoto, S. Tsuge and S. Kiyama, Proc. 3rd World Conf. on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003.
6. R. Rizzoli, C. Summonte, J. Plá, E. Centurioni, G. Ruani, A. Desalvo and F. Zignani, Thin Solid Films 383 (2001) 7
7. C. Summonte, R. Rizzoli, A. Desalvo, F. Zignani, E. Centurioni, R. Pinghini, G. Bruno, M. Losurdo, P. Capezzuto and M. Gemmi, Phil Mag B80 (2000) 459
8. C. Summonte, R. Rizzoli, A. Desalvo, F. Zignani, E. Centurioni, R. Pinghini and M. Gemmi, J. Non-Crystalline Solids 266-269 (2000) 624
9. R. Rizzoli, C. Summonte, J. Plá, E. Centurioni, R. Pinghini, A. Desalvo and F. Zignani, Proc. 16th EPVSEC, 1-5 May 2000, Glasgow, UK, p.593
10. M. Losurdo, R. Rizzoli, C. Summonte, G. Cicala, P. Capezzuto and G. Bruno, J. Appl. Phys. 88 (2000) 2408
11. E. Centurioni, D. Iencinella, IEEE Electron Device Letter, vol. 24, no. 3 (2003) 177-179.
12. J. Plá, M. Tamasi, R. Rizzoli, M. Losurdo, E. Centurioni, C. Summonte, F. Rubinelli, Thin Solid Films 425/1-2 (2003) 185

13. M. Losurdo, M. Giangregorio, P. Capezzuto, G. Bruno, R. De Rosa, F. Roca, C. Summonte, J. Plà, R. Rizzoli, *J. Vac. Sci and Technology A20* (2002) 37
14. D.Iencinella, E.Centurioni, *Proc. of PV in Europe - From PV Technology to Energy Solutions*, 7-11 October 2002, Rome, edited by WIP-Munich and ETA-Florence, (2002) 336.
15. J. Plà, M. Tamasi, E. Centurioni, R. Rizzoli, C. Summonte, J. Durán, *17th E PVSEC München*, (D) 2001, p.3027
16. D. Iencinella, E. Centurioni, R. Rizzoli, and F. Zignani, *Solar Energy Materials and Solar Cells* (2005), in press
17. E. Centurioni, *Applied Optics*, to be published.
18. C. Summonte, R. Rizzoli, D. Iencinella, E. Centurioni, A. Desalvo, F. Zignani, *Journal of Non-Crystalline Solids* 338-340 (2004) 706-709.
19. F. Zignani, A. Desalvo, E. Centurioni, D. Iencinella, R. Rizzoli, C. Summonte, A. Migliori, *Thin Solid Films* 451-452 C (2004) 350-354
20. E. Centurioni, D. Iencinella, R. Rizzoli, C. Summonte, A. Desalvo, F. Zignani, A. Migliori, *19th EPVSEC*, Paris, June 2004, p.1285
21. E. Centurioni, D. Iencinella, R. Rizzoli and F.Zignani . *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. 51, N. 11, (2004), pp. 1818-1824.