



## Energia elettrica da fonte solare celle fotovoltaiche innovative

### SCENARIO DI RIFERIMENTO

L'attività di ricerca punta a innovare alcune delle attuali tecnologie fotovoltaiche (FV) per ottenere dei prodotti che abbiano caratteristiche competitive in termini di prestazioni e costi. Negli ultimi anni i prezzi degli impianti fotovoltaici si sono ridotti grazie soprattutto all'incremento della produzione, con la creazione di grandi unità produttive in Asia che ha determinato una diminuzione del costo di fabbricazione dei moduli. Tuttavia solo l'abbassamento di tali costi a valori inferiori a 0,5 €/Wh potrà favorire l'affermarsi

di questa tecnologia a prescindere dai sistemi incentivanti. Le tecnologie fotovoltaiche basate su film sottili di materiale semiconduttore presentano grandi potenzialità di riduzione di costo attraverso il miglioramento delle prestazioni degli attuali moduli a film sottile, superando le difficoltà di alcune tecnologie legate all'utilizzo di materiali scarsamente disponibili, e grazie allo sviluppo di nuovi moduli basati su materiali organici. I moduli a film sottile di silicio hanno acquistato un rilievo crescente grazie a una nuova generazione di dispositivi, le cosiddette celle solari tandem "micromorfe", realizzate utilizzando una giunzione anteriore di silicio amorfo e una posteriore di silicio microcristallino. Attualmente molte ricerche sono condotte sullo sviluppo di celle a tripla giunzione e di idonee strategie di intrappolamento della luce nel dispositivo con lo scopo di migliorare ulteriormente l'efficienza del prodotto. Sempre nell'ottica di utilizzare piccole quantità di silicio e processi a bassa temperatura, è interessante studiare dispositivi a eterogiunzione (a-Si/c-Si) che utilizzino wafer sottili di silicio cristallino. Anche in questo

caso l'architettura del dispositivo è determinante per ottenere un buon assorbimento della radiazione solare. L'attività sui film sottili policristallini di Cu<sub>2</sub>-II-IV-VI<sub>4</sub> parte dall'idea di valutare la possibilità di sostituire l'indio, utilizzato nella tecnologia fotovoltaica a film sottile basata sulla lega CIGS (Copper-



indium-gallium-selenide), con coppie di elementi II-IV della tavola periodica, conservando alti valori di efficienza del dispositivo. Questo potrebbe favorire un'espansione del mercato per tale tecnologia, risolvendo i potenziali problemi dovuti alla scarsità dell'indio. D'altro canto, lo sviluppo di celle organiche è auspicabile per ottenere dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e abbondanza dei materiali precursori.

### OBIETTIVI

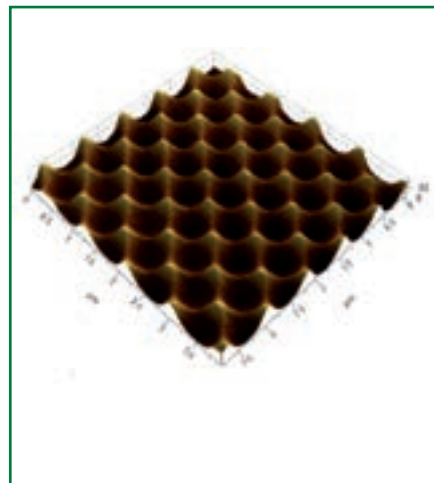
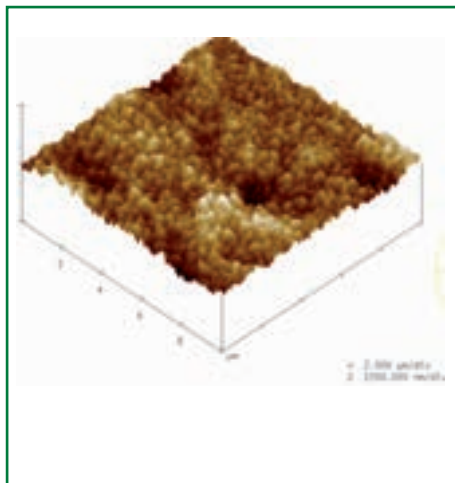
Il progetto ha l'obiettivo di promuovere lo sviluppo di tecnologie innovative ritenute potenzialmente interessanti per la realizzazione di moduli fotovoltaici caratterizzati da buone efficienze di conversione e bassi costi di produzione. Lo scopo delle attività è quello di mettere a disposizione del Paese tecnologie fotovoltaiche avanzate che possano contribuire a rendere il sistema produttivo nazionale innovativo e competitivo in questo settore. L'attività è focalizzata sullo sviluppo di tecnologie FV a film sottile di ma-

teriali semiconduttori, prestando attenzione all'utilizzo di materiali a basso costo, ampiamente disponibili e non tossici. In particolare le attività sono state concentrate sullo sviluppo di celle solari a film sottili inorganici a base di silicio e di film policristallini di  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS) e sullo sviluppo di celle solari organiche. Nell'ambito delle attività sui film sottili di silicio è previsto lo sviluppo di uno strato assorbitore innovativo ad alta gap a base di ossido di silicio che possa essere utilmente applicato in celle a multigiunzione, consentendo, inoltre, di incrementare la tensione di circuito aperto del dispositivo.

Inoltre, per migliorare l'assorbimento della radiazione solare, si intende implementare soluzioni innovative sviluppate sia per il contatto frontale che per quello posteriore della cella. Riguardo le celle solari a eterogiunzione in silicio su wafer sottili di tipo p, l'attività ricerca è dedicata all'ottimizzazione del contatto frontale e dello strato passivante intrinseco utilizzato all'interfaccia tra il wafer di silicio e l'emitter innovativo di tipo n a base di ossido di silicio sviluppato nelle precedenti annualità. Nell'ambito dello sviluppo di celle solari a film sottile policristallino di  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS), sono esplorate diverse strade per aumentare l'efficienza delle celle fotovoltaiche. In particolare si vuole indagare l'influenza di vari parametri e step di processo e della stechiometria del CZTS sulle prestazioni dei dispositivi. Parallelamente si intende investigare una tecnica alternativa per la deposizione del CZTS da soluzioni. È previsto, infine, uno studio di materiali per celle solari tandem CZTS/c-Si. In particolare si vuole valutare quali materiali possano essere utilizzati per la costruzione della giunzione tunnel necessaria a connettere le due celle. Lo sviluppo di celle fotovoltaiche organiche ha l'obiettivo di migliorare le prestazioni delle celle stesse seguendo due possibili strategie: ampliare lo spettro della radiazione solare efficacemente utilizzato dai dispositivi e migliorare il trasporto elettrico delle cariche.

In sintesi gli obiettivi della ricerca sono:

- sviluppare materiali e architetture di dispositivo per celle solari a multigiunzione,
- sviluppare celle a eterogiunzione a-Si/c-Si,
- sviluppare materiali e celle a film sottili policristallini a base di  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ,
- sviluppare celle organiche.



*Immagini AFM di  $\text{ZnO}:\text{B}$  depositato per LPCVD su vetro testurizzato mediante tecnica Aluminum Induced Texture (sinistra) e di un substrato di vetro nanostrutturato opportunamente progettato (destra)*

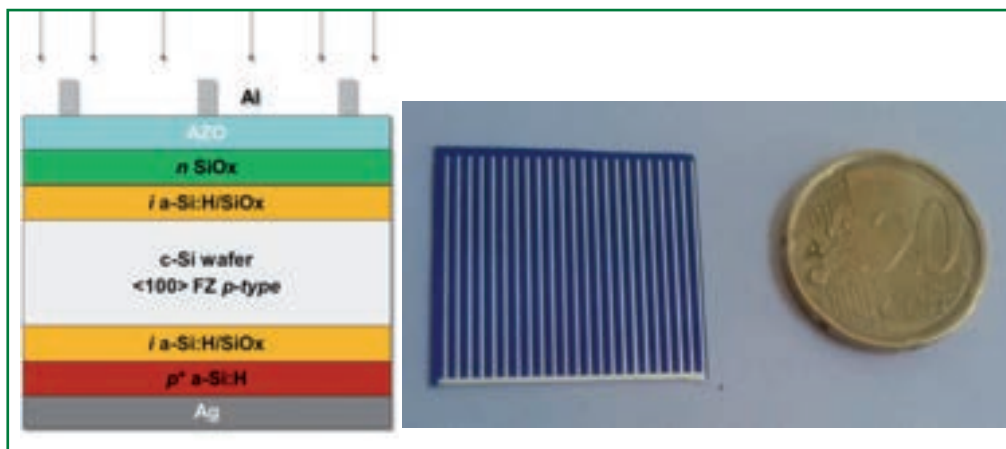
## **RISULTATI**

### **Materiali e architetture di dispositivo per celle a multigiunzione basate su film sottili di silicio**

L'attività sulle celle solari a film sottile di silicio ha avuto l'obiettivo di sviluppare materiali innovativi e appropriate architetture di dispositivo con lo scopo di migliorare le attuali prestazioni delle celle. In particolare è stato sviluppato uno strato assorbitore innovativo ad alta gap di energia a base di ossido di silicio amorfo idrogenato depositato mediante tecnica VHF PECVD. Utilizzando tale materiale come strato assorbitore in celle a singola giunzione p-i-n è stata misurata una tensione massima di circuito aperto superiore a 1 V. Per quanto riguarda le strategie per ottenere un efficace intrappolamento della radiazione solare nel dispositivo, è stato sviluppato un modello numerico per la progettazione di riflettori posteriori per celle solari a film sottile di silicio, testandolo su celle realizzate su substrati nanostrutturati. Sono state, infine, indagate due differenti tecniche, Aluminum Induced Texture e attacco chimico, per sviluppare vetri testurizzati. Entrambe le tecniche sembrano essere promettenti al fine di sviluppare elettrodi frontali ad alta efficacia di scattering ottico da utilizzare come substrati nell'industria del fotovoltaico a film sottile.

### **Celle a eterogiunzione a-Si/c-Si**

La ricerca condotta sullo sviluppo di celle solari a eterogiunzione in silicio è proseguita lavorando all'ottimizzazione del contatto frontale e dello strato passivante intrinseco utilizzato all'interfaccia tra il wafer di silicio e l'emitter. Per quanto riguarda il con-



*Architettura (sinistra) e immagine (destra) del dispositivo di test ad eterogiunzione a-Si/c-Si*

tatto frontale, sono state ottimizzate le proprietà dell'ossido trasparente e conduttore (TCO) e si è lavorato all'ottimizzazione del contatto TCO/Ag serigrafico.

Per quanto riguarda la passivazione della superficie del c-Si, è stato condotto uno studio sistematico delle proprietà passivanti di film sottili di silicio amorfo idrogenato depositati mediante VHF PECVD in varie condizioni di processo, variando in particolare la composizione dei gas di processo e la frequenza di eccitazione del plasma. In alternativa allo strato intrinseco in silicio amorfo si è anche condotto uno studio preliminare sulla passivazione con il più trasparente ossido di silicio amorfo ottenuto in vari regimi di crescita. Per valutare le proprietà passivanti degli strati studiati, essi sono stati utilizzati per la fabbricazione di dispositivi ad eterogiunzione, utilizzando una struttura test non ottimizzata in termini sia di contatto frontale che posteriore. Su tali dispositivi è stata misurata un'efficienza massima del 17,4% su area attiva che consente di ritenere che efficienze di conversione > 18% possano essere ottenute a breve con l'architettura ottimizzata.

### **Celle a film sottili policristallini a base di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS)**

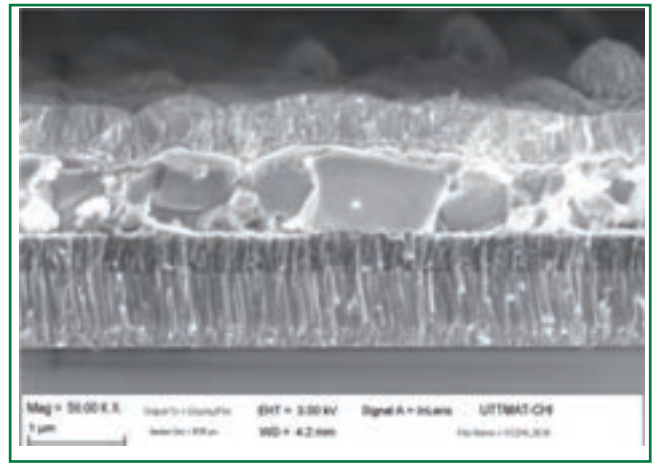
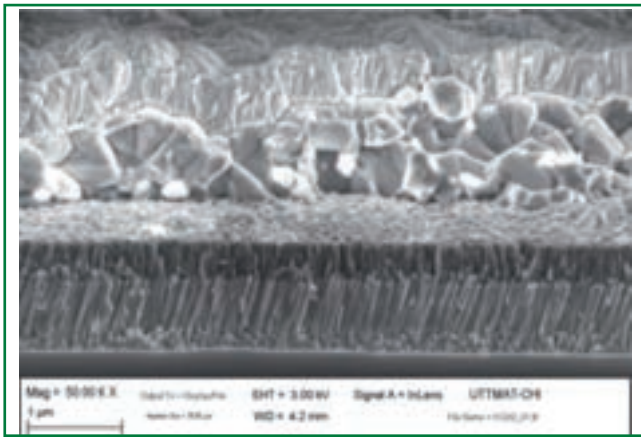
Nell'ambito dello sviluppo di celle solari a film sottile di CZTS, sono state esplorate diverse strade per aumentare l'efficienza delle celle FV. In particolare si è lavorato all'ottimizzazione della stechiometria del CZTS, servendosi anche di array di dispositivi fotovoltaici caratterizzati da materiali con stechiometrie diverse. Sono stati indagati inoltre vari parametri e step di processo (pressione di sputtering dei precursori, interfaccia CZTS/Mo, processo di deposizione del CdS ecc.). I risultati ottenuti hanno consentito di individuare i problemi più importanti su cui concen-

trare le future sperimentazioni e consolidare le attuali efficienze di conversione fotovoltaica intorno al 6% su un consistente numero di campioni. Nell'ambito, poi, dello sviluppo di tecniche di deposizione del CZTS da liquido, è proseguito il lavoro di ottimizzazione del processo di deposizione del CZTS da soluzioni mediante dip-coating e si è dato inizio ad un nuovo filone di attività sulla preparazione di dispersioni di nanoparticelle di CZTS e sul loro utilizzo per la crescita di film compatti da usare per la realizzazione di dispositivi fotovoltaici.

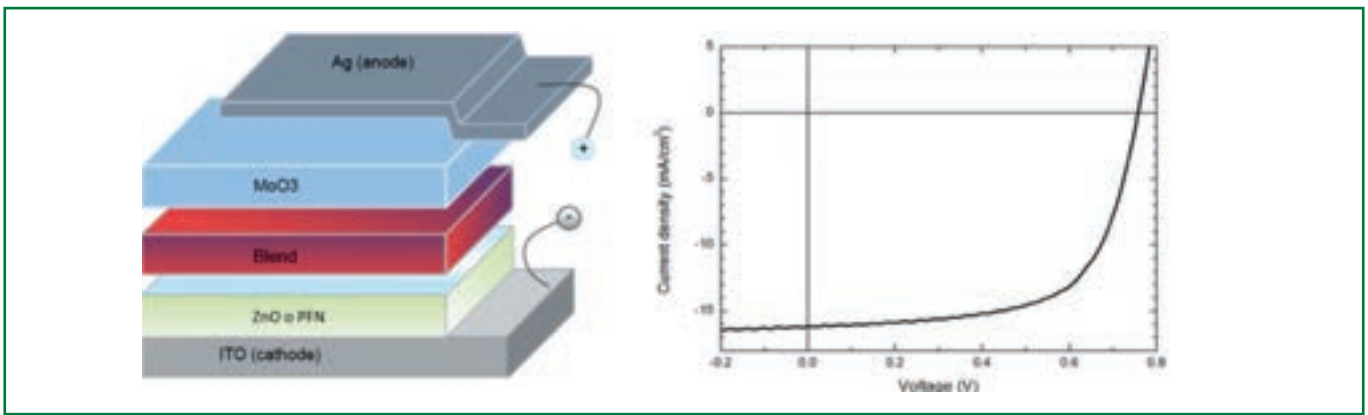
È iniziato, infine, uno studio di materiali per celle solari tandem CZTS/c-Si. In particolare si è cercato di valutare quali materiali possano essere utilizzati per la costruzione della giunzione tunnel necessaria a connettere le due celle. Il lavoro, in fase preliminare, ha indagato alcune possibilità: il drogaggio di tipo p del CZTS, l'utilizzo di uno strato di  $\text{MoO}_3$  o di uno strato di NiO.

### **Sviluppo di celle organiche**

Le attività di ricerca sono rivolte al superamento dei limiti di conversione delle celle fotovoltaiche organiche proponendo soluzioni in grado di apportare miglioramenti all'efficienza dei dispositivi. In particolare si è indagata la possibilità di ampliare lo spettro della radiazione solare efficacemente utilizzato dai dispositivi e migliorare il trasporto elettrico delle cariche. Per quanto riguarda il primo approccio sono stati sviluppati strati luminescenti in grado di convertire lunghezze d'onda a più alta energia, non efficientemente assorbite dal materiale attivo, in fotoni di energia compresa nell'intervallo spettrale di assorbimento delle celle organiche. Sono state sviluppate differenti tipologie di materiali da applicare esternamente al cuore del dispositivo o come strati intermedi tra il contatto frontale e lo strato assorbitore della cella. Quest'ultima soluzione ha consentito di



Immagini SEM della sezione di due celle in CZTS fabbricate da precursori ottenuti in condizioni



Schema di una cella polimerica a struttura inversa (sinistra) e caratteristica J-V della cella solare sulla quale è stata misurata un'efficienza di 8,04%

ottenere dispositivi sui quali è stata misurata un'efficienza di conversione di poco superiore all'8%. Sono continuati, inoltre, gli studi sullo sviluppo di nanocompositi a base di copolimeri a blocchi nanostrutturati da utilizzare come matrice per l'infiltrazione selettiva di molecole organiche attive in modo da sfruttare al meglio le potenzialità dei materiali assorbitori.

### Comunicazione e diffusione dei risultati e collaborazioni internazionali

L'ENEA è impegnata nelle attività svolte nel "Photovoltaic Power Systems Programme" della IEA, in qualità di rappresentante Italiano, ed è inserita in un

gruppo di lavoro il cui obiettivo principale è quello di favorire la penetrazione del fotovoltaico nelle reti elettriche, tenendo conto delle problematiche tecniche legate all'uso dei generatori FV nelle reti di trasmissione e distribuzione, inclusi i servizi ancillari e di rete da loro richiesti.

L'ENEA ha curato l'organizzazione del workshop "Stato e Prospettive del Fotovoltaico in Italia" (ENEA-Roma, 26 giugno 2014) e si è impegnata nella divulgazione dell'attività di ricerca attraverso pubblicazioni e presentazioni a conferenze e convegni del settore.

Area di ricerca: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente  
 Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare – Celle fotovoltaiche innovative  
 Referente: P. Delli Veneri, [paola.delliveneri@enea.it](mailto:paola.delliveneri@enea.it)