



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.

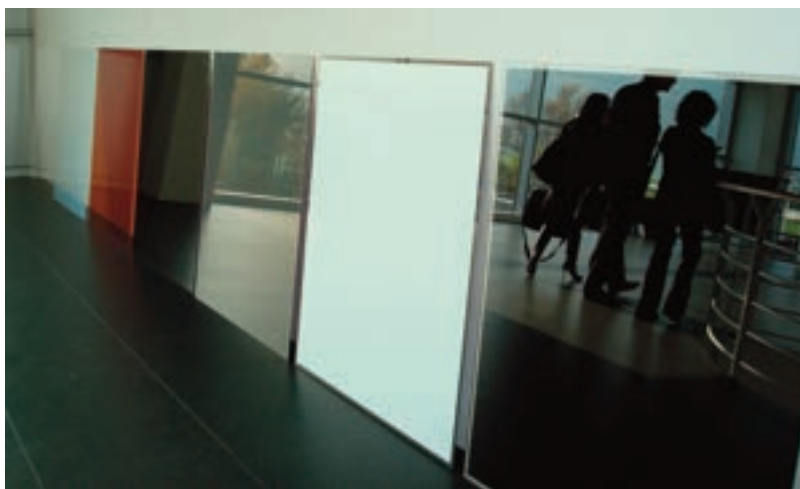
I moduli a film sottile di silicio hanno acquistato un rilievo crescente grazie a una nuova generazione di dispositivi, le cosiddette celle solari a base di silicio "micromorfe", che consentono di ottenere prodotti più efficienti. Questo tipo di dispositivo ha una struttura piuttosto complessa nella quale la geometria del substrato e ciascuno degli strati attivi che la compongono hanno un impatto sull'intero dispositivo. Il miglioramento delle prestazioni e la riduzione dei costi di produzione possono essere ottenuti ottimizzando l'intrappolamento della radiazione solare all'interno

del dispositivo, anche grazie allo sviluppo di nuove architetture di dispositivo, e utilizzando materiali innovativi che consentano di semplificare il processo di fabbricazione. 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 $\text{Cu}_2\text{-II-IV-VI}_4$ 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. L'argomento proposto presenta anche altre potenzialità, visto che la famiglia dei composti $\text{Cu}_2\text{-II-IV-VI}_4$ è ancora poco studiata e presenta un intervallo di variabilità delle gap molto ampio. È quindi anche possibile, in linea di principio, utilizzare questi materiali per la fabbricazione di celle a multi-giunzione a basso costo. D'altro canto, lo sviluppo di celle organiche è auspicabile per ottenere dispositivi di bassissimo costo, considerata l'economicità e l'abbondanza dei materiali precursori. Per dimostrare il potenziale di tale tecnologia per la produzione di energia in applicazioni di potenza è necessario ottenere celle solari con adeguate efficienze di conver-



sione stabili nel tempo. Le attività proposte su tale tema puntano a migliorare le attuali prestazioni dei dispositivi, utilizzando nuovi materiali polimerici che assorbono la radiazione solare in modo più efficiente e modificando l'architettura di cella per ottenere un efficiente trasferimento di carica tra i materiali costituenti lo strato attivo.

OBIETTIVI

Il progetto ha l'obiettivo di promuovere lo sviluppo di tecnologie 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 materiali 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 innovativo di tipo *p* a base di ossido di silicio microcristallino con caratteristiche migliori in termini di trasparenza rispetto ai tipici film utilizzati. 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 l'intento è quello di individuare i punti critici di fabbricazione del dispositivo e ottimizzare sia i materiali che i processi per la realizzazione delle varie in-

terfacce. Si lavora all'ottimizzazione del contatto frontale e allo sviluppo di riflettori posteriori e di processi di testurizzazione dei wafer. Sono, inoltre, studiati emitter innovativi di tipo *n* a base di ossido di silicio, grazie anche alle competenze acquisite su tale tipo di materiale negli ultimi anni.

Riguardo allo sviluppo di celle a film sottili policristallini di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, a valle di un'analisi delle varie tecniche di crescita del CZTS, si vuole sviluppare un nuovo processo che consenta di ottenere un materiale assorbitore di migliore qualità. Parallelamente si intende investigare una tecnica alternativa per la deposizione del CZTS da soluzioni.

L'attività prevista nell'ambito dello sviluppo di celle fotovoltaiche organiche riguarda sia la sintesi di nuovi materiali polimerici che il loro test come materiali attivi nei dispositivi. Sono sperimentate, inoltre, strutture a elevato grado di ordine da utilizzare per sfruttare al meglio le potenzialità dei materiali attivi ed è previsto uno studio sulla stabilità di tali dispositivi.

In sintesi gli obiettivi della ricerca sono:

- Sviluppare materiali e architetture di dispositivo per celle solari tandem micromorfe
- Sviluppare TCO ad alta efficienza di confinamento ottico per celle a film sottile di silicio
- Sviluppare celle a film sottile di silicio cristallino
- Sviluppare materiali e celle a film sottili policristallini a base di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$.
- Sviluppare celle organiche.



Impianto multicamera utilizzato per la fabbricazione di materiali e celle solari a film sottile di silicio

RISULTATI

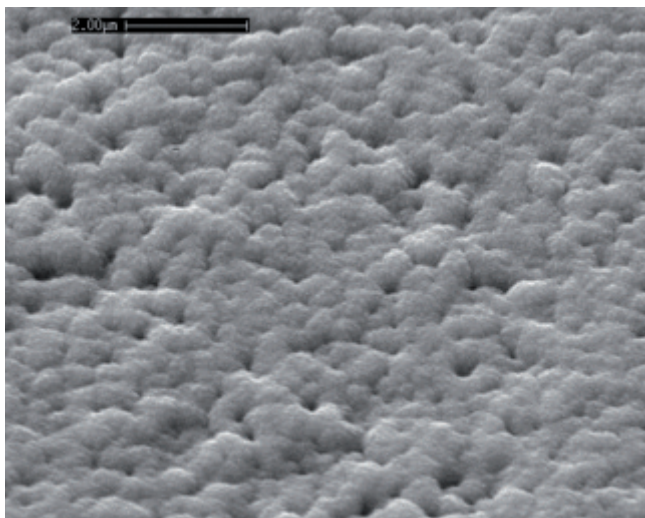
La linea sullo sviluppo di celle a film sottile di silicio ha avuto come primo obiettivo la realizzazione di film drogati di tipo *p* a base di ossido di silicio microcristallino con tecnica PECVD ad alta frequenza. Grazie alle peculiari proprietà ottiche di tali strati innovativi è stato possibile migliorare in termini di corrente di corto circuito le prestazioni della cella.

Sono state poi progettate architetture per migliorare l'assorbimento della radiazione solare e sono stati eseguiti test preliminari di realizzazione di celle solari su tali strutture. Per quanto riguarda la parte frontale della cella, parallelamente allo sviluppo di ossidi trasparenti e conduttivi (TCO) naturalmente testurizzati, sono stati messi a punto processi di strutturazione del vetro, utilizzando due possibili tecniche: la nanostrutturazione auto-organizzata tramite Proiezione Ionica Litografica (IPL) e l'Aluminium Induced Texture (AIT). In entrambi i casi sono stati ottenuti risultati incoraggianti. I dispositivi fabbricati sui substrati nanostrutturati hanno infatti mostrato una migliore risposta spettrale, e quindi una corrente di corto circuito più alta, rispetto a quella misurata sul substrato non trattato. È stata avviata un'attività sulla modellizzazione ottica dei substrati testurizzati con lo scopo di valutare l'influenza della morfologia superficiale sull'intrappolamento della radiazione. Sono stati inoltre progettati riflettori posteriori in configurazione aperiodica, proponendo varie strutture di cella con lo scopo di massimizzare l'assorbimento della luce nei dispositivi. Per verificare la fattibilità e le potenzialità delle strutture proposte è stata avviata una sperimentazione con un sistema di nanolitografia avanzato, quale il Focused Ion Beam (FIB), che

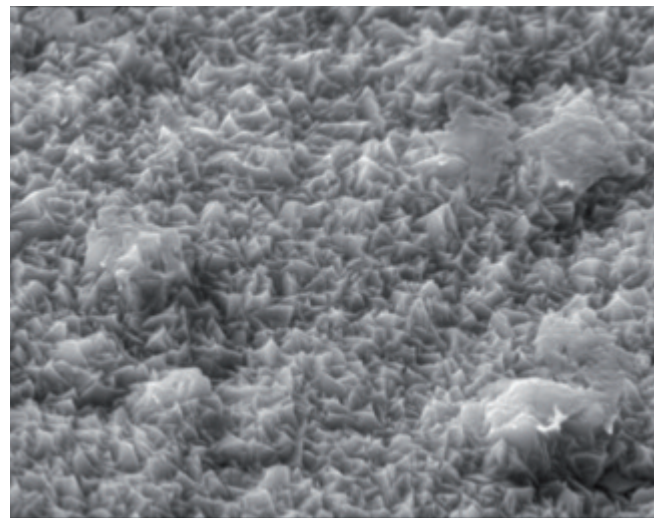
ha consentito di realizzare alcuni prototipi di celle.

Per quanto riguarda la ricerca condotta sullo sviluppo di celle solari a eterogiunzione in silicio su wafer sottili si è lavorato all'ottimizzazione dell'ossido trasparente e conduttivo frontale, valutando la possibilità di introdurre un multistrato ZnO/Ag/ZnO con idonee caratteristiche ottiche ed elettriche. È continuato il lavoro sullo sviluppo di riflettori posteriori a multistrato in configurazione Bragg ottenuti alternando strati di silicio amorfo e nitrato di silicio e sullo sviluppo di processi di testurizzazione dei wafer. Sono stati ottimizzati emitter innovativi di tipo *n* a base di ossido di silicio che hanno consentito di migliorare la risposta spettrale dei dispositivi nella regione dello spettro solare a basse lunghezze d'onda. Sono stati messi a punto processi di screen printing a bassa temperatura di sintering e a bassa resistività specifica di contatto per la realizzazione di griglie metalliche su diversi tipi di TCO. La massima efficienza misurata sui dispositivi è pari al 15,8%, ma, simulando il comportamento di una cella a eterogiunzione con tutte le migliorie di processo finora prese in considerazione, è stato mostrato che è possibile ottenere efficienze di conversione fotovoltaica maggiori del 22%. Riguardo la realizzazione di celle solari a film sottili policristallini di $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, il principale obiettivo dell'attività è stato quello di mettere a punto il processo di crescita del CZTS per co-sputtering, effettuando un confronto critico con la tecnica precedentemente utilizzata (evaporazione e-beam).

La tecnica del co-sputtering ha consentito di sviluppare un nuovo processo in cui i tre solfuri metallici (per esempio ZnS, CuS e SnS) vengono depositati contemporaneamente; in tal modo i metalli nei precursori sono distribuiti fin dall'inizio in maniera uniforme e già



(a)



(b)

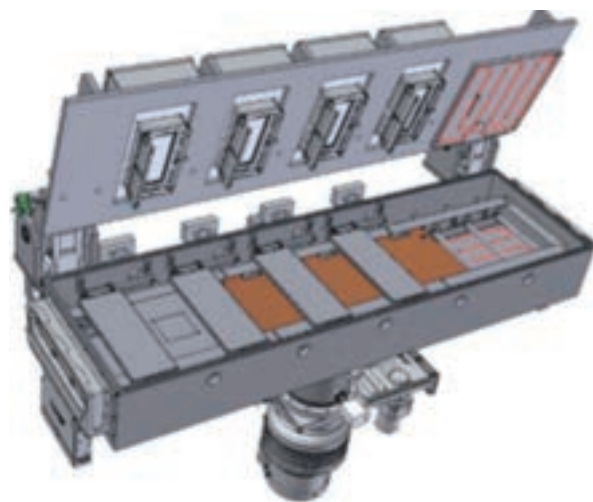
Immagine SEM della morfologia superficiale di un film di ZnO:Ga depositato per sputtering su vetro rugoso (a) e di un film di ZnO:B depositato per MOCVD su vetro rugoso (b).

sostanzialmente solforizzati. A seguito dell'installazione di un nuovo sistema di sputtering per la deposizione dei contatti (Mo, ZnO) è stata necessaria una nuova ottimizzazione dei processi di crescita che ha determinato un miglioramento delle caratteristiche di questi materiali. Il lavoro svolto su tutti i materiali costituenti il dispositivo ha dato risultati molto soddisfacenti, consentendo di ottenere un'efficienza massima sul dispositivo del 5,6%.

Le attività precedentemente svolte sullo sviluppo di celle fotovoltaiche polimeriche ha consentito di ottenere un'efficienza di conversione del 6,3%, utilizzando materiali disponibili in commercio. In questa annualità

sono stati realizzati nuovi materiali polimerici, alcuni dei quali sono stati testati in dispositivi fotovoltaici.

Le efficienze raggiunte sono piuttosto basse rispetto a quelle ottenute con materiali più convenzionali. Tuttavia la sintesi di nuovi materiali è uno tra i temi di ricerca ritenuti strategici nel contesto generale dello sviluppo di celle FV a base organica. Sono state inoltre sperimentate strutture a elevato grado di ordine da utilizzare per sfruttare al meglio le potenzialità dei materiali organici. Infine è stato avviato anche uno studio sulla stabilità dei dispositivi organici per determinare i fattori che limitano le prestazioni delle celle.



Impianti per il co-sputtering di solfuri binari (configurazione confocale, a sinistra) e per lo sputtering in linea di Mo, ZnO e ZnO:Al (configurazione planare, a destra)



Glove Box per lo sviluppo di celle solari polimeriche in ambiente privo di umidità e ossigeno

*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*