RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

Materiali e architetture di dispositivo per la realizzazione di celle tandem perovskite/silicio (LA1.27)

E. Bobeico, M. Della Noce, L. V. Mercaldo, L. Lancellotti, G. V. Sannino, I. Usatii, A. Citarella, A. Romano, L. Verdoliva, L. Martini, F. Menchini, L. Serenelli, E. Nonni, F. Di Giacomo, F. Matteocci, A. Di Carlo, M. Tucci, P. Delli Veneri

RdS_PTR 22-24_PR 1.1_LA1.27_049

MATERIALI E ARCHITETTURE DI DISPOSITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI CELLE TANDEM PEROVSKITE/SILICIO (LA1.27)

E. Bobeico[1], M. Della Noce[1], L. V. Mercaldo[1], L. Lancellotti[1], G. V. Sannino[1,3], I. Usatii[1], A. Citarella[1], A. Romano[1], L. Verdoliva[1], L. Martini[1], F. Menchini[1], L. Serenelli[1], E. Nonni[2], F. Di Giacomo[2], F. Matteocci[2], A. Di Carlo[2], M. Tucci[1], P. Delli Veneri[1]

1 ENEA – TERIN FSD
2 Università deli Studi di Tor Vergata - Dipartimento di Ingegneria Elettronica
3 Università degli Studi di Napoli "Federico II" – Dipartimento di Chimica

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione
Progetto: 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza"
Linea di attività: LA1.27
Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA
Responsabile Linea di Attività: ENEA
Mese inizio previsto: 01
Mese inizio effettivo: 01
Mese fine previsto: 18
Mese fine effettivo: 18

Indice

1 RISULTATI ATTESI 3

2 RISULTATI OTTENUTI 3

3 PRODOTTI ATTESI 3

4 PRODOTTI SVILUPPATI 3

5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 3

6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 4

7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 5

8 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 14

1 Risultati attesi

Sviluppo di celle tandem perovskite/silicio monolitiche e connesse meccanicamente su piccola area (circa 1 cm^2). Valutazioni delle potenzialità/limiti dei vari approcci considerati sia in termini di architetture di dispositivo che di materiali, attraverso l'analisi delle prestazioni fotovoltaiche delle celle tandem realizzate. Studio della crescita di film di perovskite su wafer di silicio testurizzato per trasferire la tecnologia della cella monolitica su tale tipologia di wafer. Ottimizzazione della cella a singola giunzione in perovskite semitrasparente da utilizzare per l'accoppiamento meccanico con quella in Si. Realizzazione di un dispositivo tandem perovskite/silicio con efficienza superiore al 28%.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti

Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- Sviluppo di celle a eterogiunzione di silicio su wafer di Si d tipo p monolappato da utilizzare come componente bottom in celle tandem;
- Celle tandem monolitiche perovskite/silicio con efficienze maggiori del 23%;
- Test di crescita di film di perovskite su wafer di c-Si testurizzato mediante co-evaporazione termica;
- Celle tandem perovskite/silicio connesse meccanicamente con efficienze superiori al 28%.

3 Prodotti attesi

Report tecnico dal titolo "Materiali e architetture di dispositivo per la realizzazione di celle tandem perovskite/silicio"

4 Prodotti sviluppati

Il presente report "Materiali e architetture di dispositivo per la realizzazione di celle tandem perovskite/silicio" - RdS_PTR22-24_PR1.1_049

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il lavoro è proceduto secondo le previsioni e le attività pianificate hanno raggiunto gli obiettivi stabiliti. Non si segnalano, quindi, scostamenti tra i risultati attesi e quelli ottenuti.

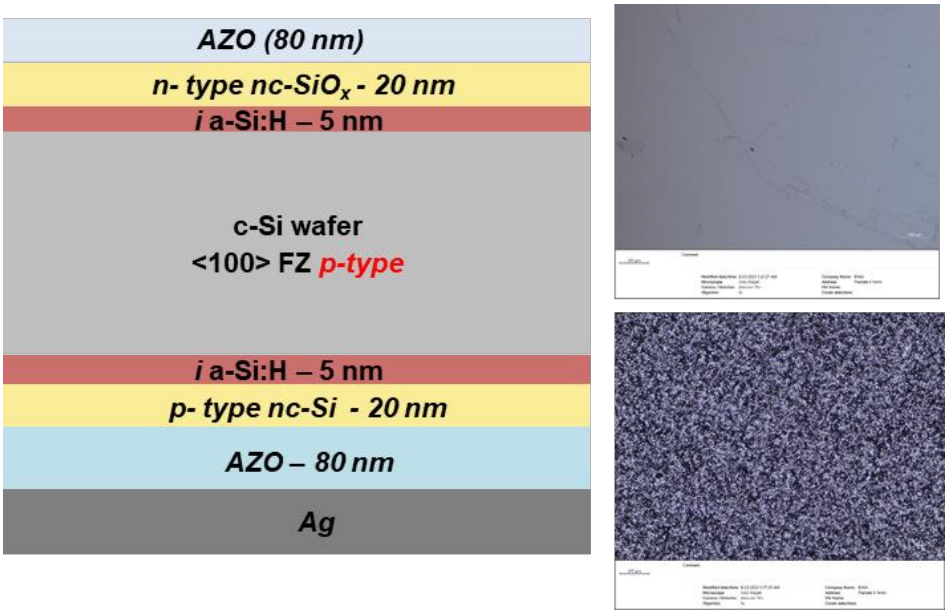
6 Sintesi delle attività svolte

L'attività ha riguardato lo sviluppo di celle solari tandem perovskite/silicio, dove la componente in silicio è una eterogiunzione di Si (SHJ). Le celle tandem sono state realizzate con connessione meccanica in serie tra i singoli dispositivi e crescendo direttamente la componente frontale in perovskite su quella in Si (cella tandem in configurazione monolitica).
Le celle tandem monolitiche realizzate con wafer di c-Si di tipo p e cella in perovskite p-i-n hanno evidenziato un'efficienza massima pari a 23,2% (efficienza nello scorso triennio di circa il 18%). Sono, poi, iniziati studi sulla crescita per evaporazione di film di perovskite su wafer di c-Si testurizzato.
Migliorando le prestazioni della cella frontale in perovskite di tipo n-i-p, grazie all'ottimizzazione del trasportatore di lacune e alla passivazione delle interfacce, è stata ottenuta un'efficienza massima per celle tandem con connessione meccanica di 28,44% (efficienza nello scorso triennio pari a circa il 27%).

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Sviluppo di celle tandem monolitiche perovskite/silicio

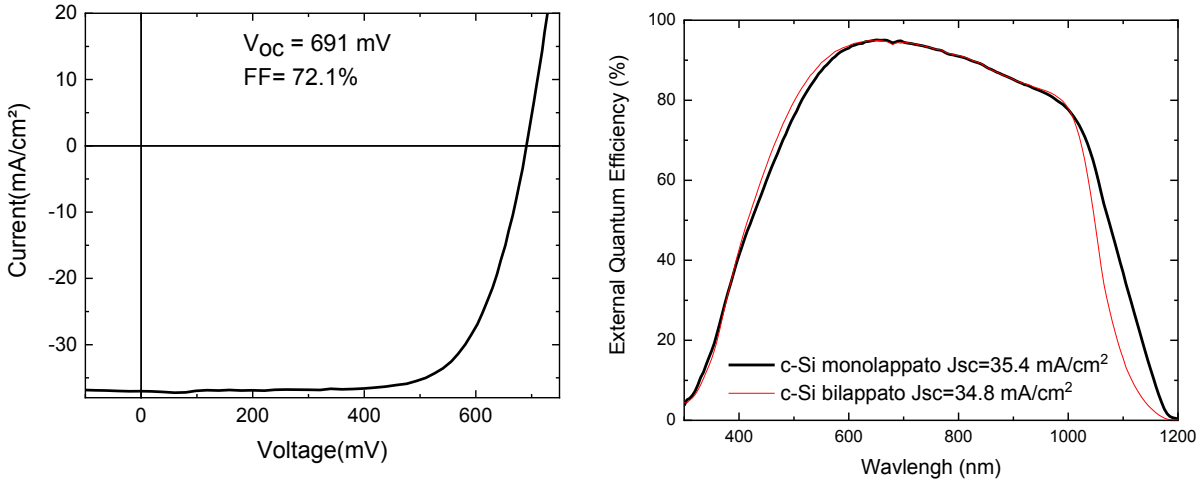
L'attività svolta nello scorso triennio sullo sviluppo di celle tandem monolitiche perovkite/silicio ha valutato diverse architetture di cella, partendo generalmente da wafer flat di c-Si tipo n [1]. Le sperimentazioni di questa LA si sono concentrate sul potenziale utilizzo di wafer di silicio di tipo p, tipologia di wafer comunemente utilizzata dall'industria FV. In particolare, sono stati utilizzati wafer di Si monolappati, caratterizzati cioè da una superficie flat, mentre l'altra faccia ha una microrugosità superficiale che può consentire un migliore utilizzo della radiazione solare (figura 1b). Le celle ad eterogiunzione di silicio (SHJ) sono state progettate in modo da poter essere integrate con una cella in perovskite di tipo p-i-n, tipologia di cella molto utilizzata per la realizzazione di celle tandem monolitiche e che ha consentito di ottenere i record attuali [2]. Lo schema di cella SHJ utilizzato in questa sperimentazione è mostrato in figura 1a. I film sottili di silicio, passivanti e trasportatori di carica, sono depositati mediante tecnica PECVD; in particolare, la passivazione delle superfici del wafer di c-Si è ottenuta con circa 5 nm di silicio amorfo (i a-Si:H), mentre film nanocristallini di silicio (p-type nc-Si:H) e ossido di silicio (n-type nc-SiOx:H) sono utilizzati rispettivamente come strati trasportatori di lacune ed elettroni. Film di ossido di zinco drogato alluminio (AZO) depositati per sputtering sono stati utilizzati come ossido trasparente e conduttore, mentre i contatti metallici, tipicamente realizzati con film di alluminio o argento, sono ottenuti mediante evaporazione termica.



(a) (b)

Figura 1. (a) Architettura di cella solare SHJ utilizzata come cella bottom di una cella tandem monolitica. I film sottili di silicio, passivanti e trasportatori di carica, sono depositati mediante tecnica PECVD. (b) immagine al microscopio ottico della superficie flat e di quella microrugosa di wafer di c-Si di tipo p mono-lappati utilizzati nella sperimentazione.

Nella prima fase della sperimentazione sono state realizzate celle SHJ di area 2 x 2 cm2 per verificare il funzionamento della singola giunzione prima di inserirla nelle tandem. In figura 2a e 2b sono mostrate rispettivamente la curva JV e la risposta quantica esterna (EQE) di una tipica cella realizzata con la struttura di fig.1b. La figura 2b mostra anche il confronto tra le curve EQE misurate su wafer di tipo bilappato e monolappato da cui è evidente il guadagno in corrente ottenibile col wafer monolappato grazie al migliore intrappolamento della radiazione solare nel dispositivo. Le prestazioni ottenute sulle celle SHJ sono in linea con le attese e pienamente adeguate ad essere utilizzate come cella bottom del dispositivo tandem.



(a) (b)

Figura 2. (a) Curva caratteristica J-V di una cella SHJ e (b) relativa efficienza quantica esterna (curva nera). Nello stesso grafico è riportata per confronto anche la EQE misurata su una cella SHJ realizzata a partire da wafer bilappato (curva rossa).

In parallelo sono state realizzate celle in perovskite a giunzione p-i-n semitrasparenti, ottenute secondo lo schema mostrato in figura 3. La parte più delicata dello sviluppo di tale tipologia di cella è la messa a punto del contatto trasparente realizzato sull'intero stack del dispositivo che sostituisce il contatto metallico delle celle standard. Allo scopo è, infatti, necessario utilizzare un film di TCO depositato per sputtering, processo che può danneggiare in maniera più o meno sensibile lo strato sottostante tipicamente realizzato con un materiale organico.

Figura 3. Schema di cella in perovskite con architettura p-i-n realizzata con contatto posteriore trasparente.

Per ottenere buone prestazioni sul dispositivo è stata sperimentata la possibilità di inserire uno strato buffer tra il trasportatore di elettroni (PCBM) e l'ITO; tale strato buffer è stato preparato per spin-coating a partire da nanoparticelle di ossido di zinco commerciali di varia tipologia (tabella 1). Questo approccio è sicuramente low-cost rispetto alle strategie ad oggi maggiormente utilizzate, dove tra il trasportatore di elettroni e il TCO è posto uno strato di SnO_2 depositato mediante Atomic Layer Deposition (ALD), tecnica in vuoto piuttosto costosa e con limitate prospettive industriali. Quindi tutti gli strati della cella p-i-n, incluso il buffer layer sono stati depositati mediante spin-coating.

Tabella 1. Tipologie di nanoparticelle metalliche commerciali (Avantama) utilizzate per lo sviluppo di celle solari in perovskite semitrasparenti.

Nanoparticelle di ossido di zinco		WF (eV)	Solvente
ZnO	N10	4.3	2-propanol
ZnO	N10 X Flex	4.3	Mixture of butanols
ZnO	N11	3.9	Mixture of alcohols
ZnO	N12	4.3	Ethanol
Al:ZnO	N20 X Flex	4.3	Mixture of butanols
Al:ZnO	**N21 X**	**3.9**	**Mixture of alcohols**
Al:ZnO	N21 X Flex	3.9	Mixture of butanols

In figura 4 sono riportati i parametri fotovoltaici delle celle realizzate con le differenti nanoparticelle e per confronto sono mostrati anche i parametri delle celle solari opache completate col contatto BCP/Cu. Dalla figura si vede che le nanoparticelle di AZO consentono di ottenere prestazioni migliori rispetto a quelle di ZnO, principalmente grazie alla possibilità di evitare perdite in termini di Voc e FF; con la tipologia N21X è stato valutato un FF superiore all'80% ed un'efficienza del 18,3%, praticamente equivalente a quella ottenuta per le celle con contatto metallico opaco.

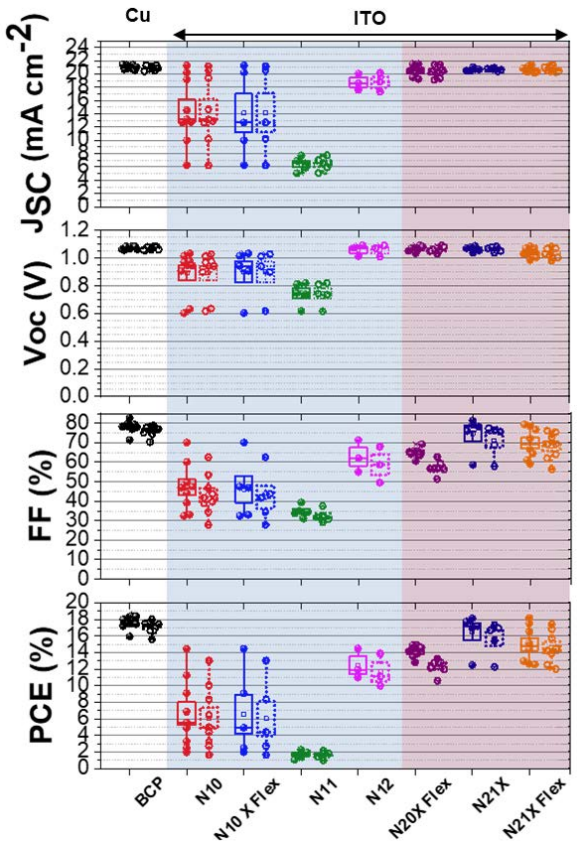
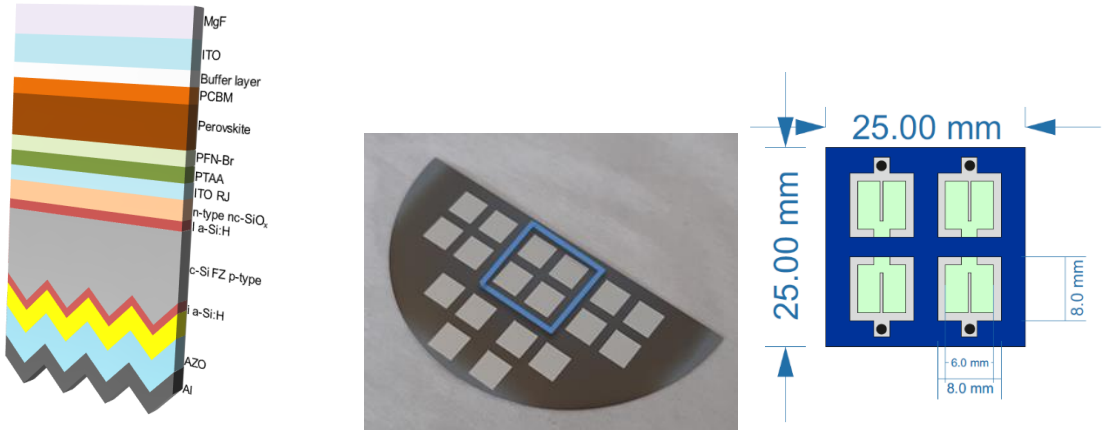


Figura 4. Sintesi del lavoro svolto per ottimizzare il buffer layer necessario ad evitare il danneggiamento dello strato trasportatore di elettroni durante il processo di sputtering del contatto frontale in ITO. Per le diverse nanoparticelle di ossido di zinco di tipo commerciale sono riportati i parametri fotovoltaici valutati a partire dalle curve caratteristiche JV delle celle semitrasparenti. Per confronto in figura sono riportati anche i parametri FV delle celle opache completate con contatto BCP/Cu.

Avendo messo a punto e verificato le prestazioni delle singole giunzioni in silicio e in perovskite, si è proceduto a realizzare celle tandem monolitiche perovskite/Si, realizzando lo stack mostrato in figura 5a, dove si vede che la giunzione ricombinante è realizzata con un film di ITO di 20 nm (ITO RJ). Sono state fabbricate diverse celle SHJ, definendo sul wafer mediante maschere i contatti metallici posteriori della struttura (figura 5b), mentre il layout del contatto frontale è mostrato in figura 5c. Le celle tandem monolitiche realizzate hanno area di circa 0,35 cm^2.

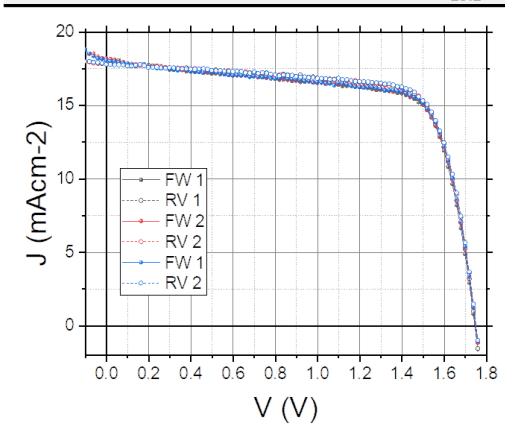


(a) (b) (c)

Figura 5. (a) Architettura di cella tandem monolitica realizzata utilizzando 20 nm di ITO come strato ricombinante per le cariche provenienti dalle due celle componenti (elettroni per la cella bottom e lacune per la top). (b) La deposizione dei vari strati della cella SHJ è stata effettuata su mezzo wafer di c-Si, definendo sulla parte posteriore della cella, mediante maschere metalliche, il contatto posteriore della cella tandem. Sul wafer sono stati ritagliati differenti pezzi (linea blu della figura) che sono stati processati per realizzare le celle tandem utilizzando per il contatto frontale il layout mostrato in (c).

La figura 6a mostra la curva JV della cella che ha mostrato le migliori prestazioni durante la sperimentazione effettuata: è stata misurata un'efficienza pari a 23,2%, che migliora in maniera consistente il risultato ottenuto nello scorso triennio dove si era raggiunto un valore di efficienza sulle celle tandem perovskit/Si monolitiche di circa il 18%.

Voc (V) RV	Jsc (mA/cm2) RV	Fill Factor (%) RV	Efficiency (%) RV
1.75	17.76	74.58	23.21
Voc (V) FW	**Jsc (mA/cm2) FW**	**Fill Factor (%) FW**	**Efficiency (%) FW**
1.75	18.05	72.18	22.81
			Efficiency (%) MPPT
			23.2



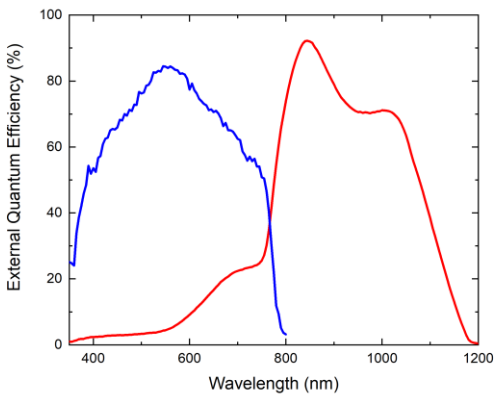


Figura 6. (a) Curva caratteristica JV della cella tandem perovskite/Si che ha mostrato le migliori prestazioni in tutta la sperimentazione effettuata; (b) curva di efficienza quantica esterna della cella tandem.

Sono stati poi avviati dei test di crescita di film di perovskite su wafer di c-Si testurizzati mediante co-evaporazione termica, tecnica che consente una crescita conformale e quindi potrà consentire di realizzare tandem di tipo monolitico anche su wafer testurizzato. In figura 7 sono riportate immagini SEM rappresentative dell'indagine svolta che mostra l'effettivo ricoprimento conforme delle piramidi su scala micrometrica del wafer di Si con film di perovskite a singolo catione MAPI (CH3NH3PbI3) co-evaporata di spessore delle centinaia di nm.

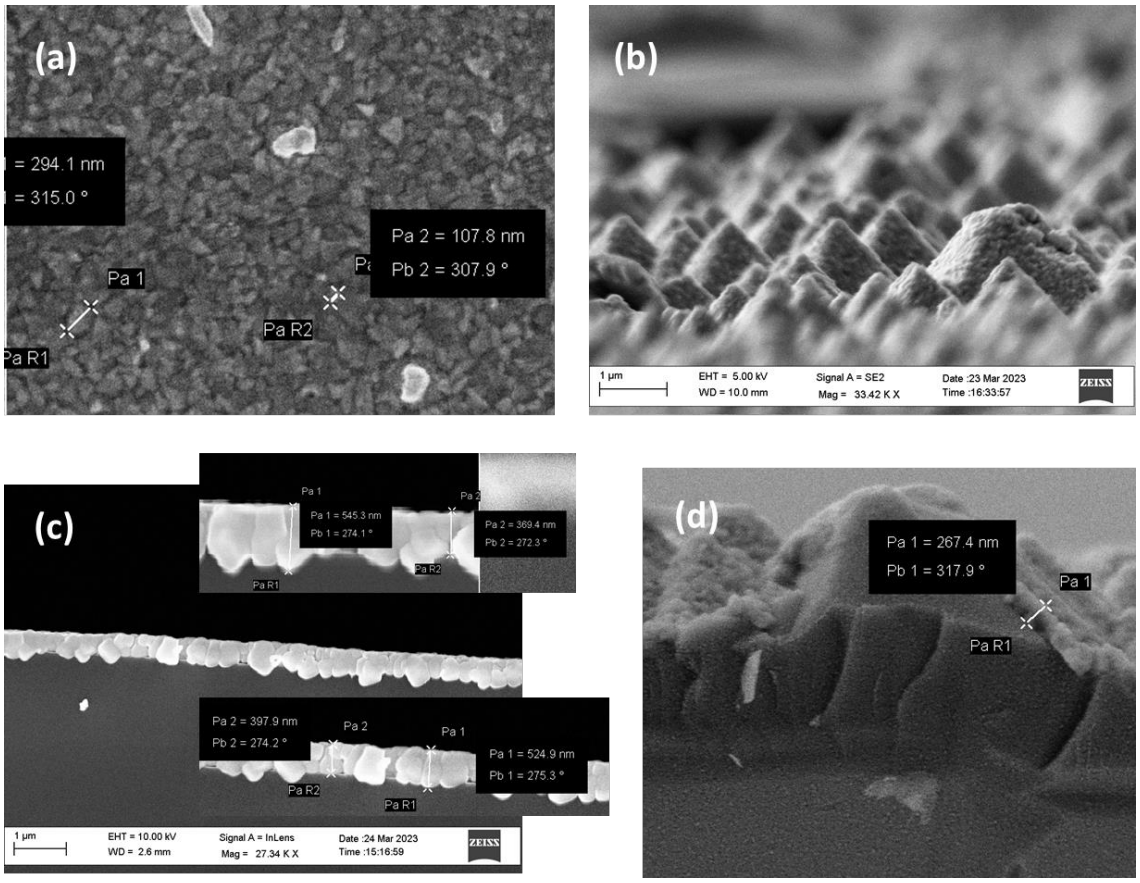


Figura 7. Studi morfologici mediante SEM di film di MAPI co-evaporati nello stesso batch su substrati flat (vetro -a-, silicio -c-) e su silicio con texturing piramidale (b,d). In (a) è evidente la struttura compatta del film, a grani di dimensioni nel range 100-300 nm, (b) e (d) mostrano la crescita conforme, e il confronto tra (c) e (d) mostra il fattore di scala di 1.7 tra spessore cresciuto su substrato flat (valore medio nel presente run di 460 nm) e su piramide di c-Si (circa 270 nm). I film sono stati depositati nell'impianto della Kenosistec installato alla fine dello scorso triennio nei laboratori del Centro ENEA di Portici, che consente la co-evaporazione delle componenti organiche ed inorganiche della perovskite (in questo caso PbI2 e MAI rispettivamente).

7.2 Sviluppo di celle tandem perovskite/silicio connesse meccanicamente

Le celle tandem con connessione meccanica perovskite/Si sono ottenute con una cella SHJ su wafer di c-Si testurizzato di tipo n e con una cella in perovskite ad architettura n-i-p che utilizza uno strato compatto e uno mesoporoso di titania come trasportatore di elettroni (c-TiO_2/m-TiO_2).

Una prima fase della sperimentazione è stata dedicata a mettere a punto film di perovskite con energy gap (Eg) di circa 1.7 eV, valore che risulta ottimale per l'utilizzo nella tandem in combinazione col silicio. Questo valore di Eg consente, infatti, di migliorare la trasparenza nel vicino infrarosso, determinando un incremento della foto-corrente nella cella bottom in Si e una maggiore tensione di circuito aperto del dispositivo tandem. Oltre ad incrementare la Eg, è stato scelto anche di realizzare uno strato di perovskite più sottile, sempre nell'ottica di migliorare il light management nelle tandem. L'ottimizzazione dello strato di perovskite è iniziata dalla composizione $Cs0._{17}FA0._{83}Pb(I_{0.90}Br_{0.10})_3$ con la concentrazione della soluzione dei precursori 1.45M

descritta in un lavoro precedente con cui sono stati prodotti film caratterizzati da una Eg di 1.61 eV e 500 nm di spessore [3]. Per poter aumentare l'energia di gap, è stato ulteriormente aumentato il contenuto di Br al 25% col quale è stato possibile ottenere una Eg di 1.66 eV (figura 8). Allo stesso tempo, riducendo la concentrazione della soluzione dei precursori a 1.2M è stato possibile ridurre lo spessore dello stack ETL/perovskite a 410 nm.

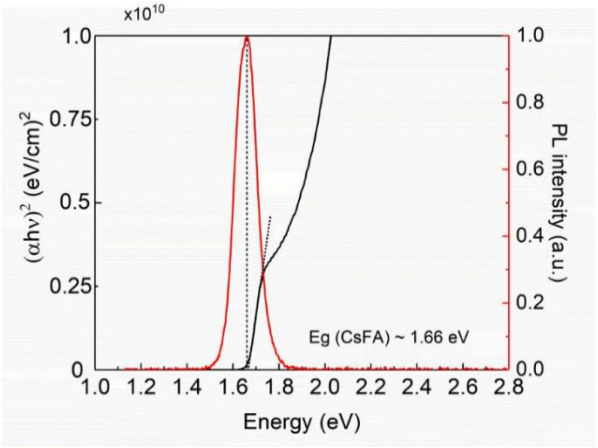


Figura 8. Picco di fotoluminescenza e Tauc plot della perovskite con Br per la valutazione della Eg del materiale.

Se da un lato il Br aiuta ad aumentare la energy gap, dall'altro può dare luogo a vacanze nell'assorbitore che comportano la presenza di stati trappola, con conseguente perdita di tensione. Per mitigare questo effetto si possono introdurre sali organici alogenuri come PEABr (1 mg/mL in IPA), PEAI (1 mg/mL in IPA), F-PEAI (2.5 mg/mL in IPA) che possono essere depositati via spin coating sopra lo strato di perovskite. La catena corta di alogenuro ammonio è efficace nel ridurre le vacanze intrinseche di bromo. NH3+ può passivare i difetti carichi negativamente attraverso interazioni elettrostatiche mentre le molecole basate su anelli di benzene danno buone proprietà di trasporto. Inoltre, il fluoro può aumentare l'idrofobicità grazie alla sua elevata elettronegatività. La figura 9 mostra l'impatto di vari elementi passivanti sulla Voc della cella singola in perovskite: in tutti i casi la passivazione migliora la Voc rispetto alla cella di riferimento senza passivazione, PEABr e PEAI consentono di misurare i migliori valori di Voc sui dispositivi (circa 1.1 V). In figura 10 è riportata una statistica dell'efficienza di celle a singola giunzione in perovskite fabbricate a partire da ETL mesoporoso con l'utilizzo di passivanti. Il risultato mostra una migliore efficienza con il PEABr. Quindi esso è stato scelto come passivante per le ottimizzazioni successive del dispositivo tandem.

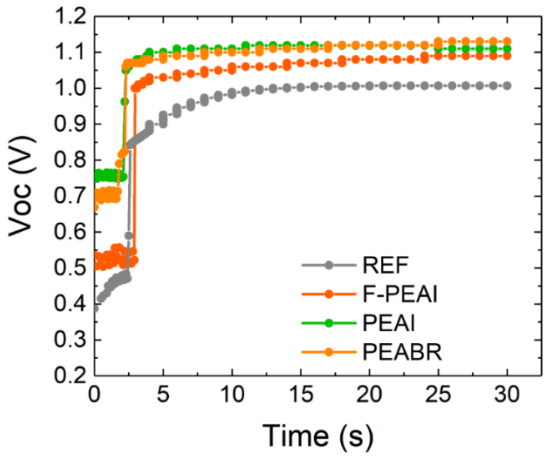


Figura 9. Impatto di diverse strategie di passivazione sulla Voc delle celle, misurata nel tempo. Sono utilizzate due diverse condizioni di illuminazione: nei primi 5 secondi solo una luce verde a 555 nm pulsata, quindi 1 sole (spettro solare 1000 W/m^2).

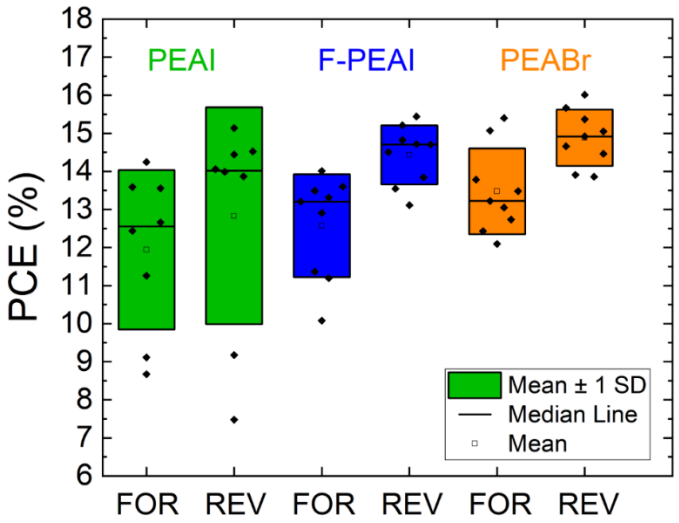


Figura 10. Misure di efficienza (PCE) sotto illuminazione AM1.5G di celle con diverse strategie di passivazione. Sono riportate le efficienze valutate da curve JV ottenute in scansione diretta (for) e inversa (rev).

Per migliorare le proprietà di trasporto dello strato trasportatore di lacune (HTL), il PTAA, sono stati introdotti diversi elementi droganti per aumentare la mobilità delle lacune e quindi il FF del dispositivo. In particolare sono stati testati:

1. Lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (LiTFSI): dopante di tipo p che abbassa il livello di Fermi del HTL verso il livello HOMO
2. 4-tert-Butylpyridine (t-BP): additivo che agisce come bloccante della ricombinazione, evitando che i sali di litio si accumulino. Funziona anche come controllore della morfologia migliorando l'uniformità dell'HTL.
3. 2,3,5,6-Tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyanoquinodimethane (F4TCNQ): per aumentare il Fill Factor, riducendo la resistenza serie.

I migliori risultati sono stati ottenuti combinando i tre droganti, come mostrato dalla figura 11, dove sono riportate le statistiche di efficienze di celle tandem perovskite/Si connesse meccanicamente con differente drogaggio del PTAA.

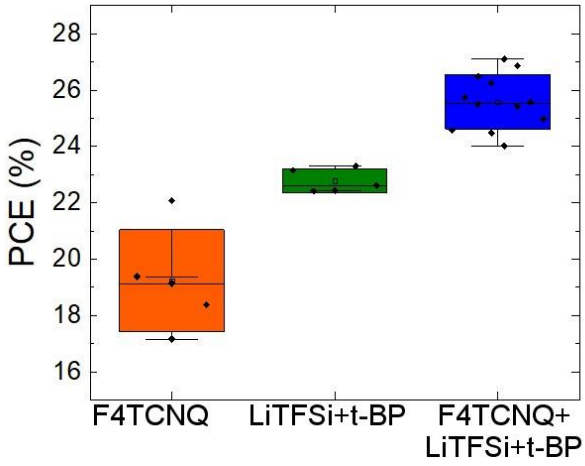


Figura 11. Studio statistico dell'impiego degli additivi F4TCNQ, t-BP, LiTFSI nelle celle in perovskite mesoscopiche. Il grafico mostra la variazione dell'efficienza di celle tandem con top in perovskite fabbricate utilizzando diversi droganti.

Una fase ulteriore di ottimizzazione ha previsto l'introduzione di un sottile strato di buffer di VO_x depositato per evaporazione termica tra l'HTL e il contatto frontale. Questo sottile strato (~3 nm) aiuta a prevenire il danneggiamento da sputtering dell'ITO che funge da elettrodo trasparente al di sopra del PTAA [4].

Tutti i miglioramenti esposti hanno consentito di ottenere un dispositivo tandem perovskite/Si con connessione meccanica con efficienza superiore al 28%. La cella top a valle del processo di ottimizzazione è composta dai seguenti strati: vetro/FTO/c-TiO_2/m-TiO_2/perovskite/PEABr/PTAA/VO_x/ITO, con perovskite del tipo $Cs_{0.17}(FA_{0.83})Pb(I_{0.75}Br_{0.25})_3$. In figura 12 sono riportate due curve J-V di celle tandem, insieme alla EQE. Le ottimizzazioni effettuate hanno consentito di migliorare Voc e FF delle celle tandem, i cui valori massimi sono stati 1.91 V e 81.4% rispettivamente. La massima efficienza misurata sulle celle tandem perovskite/silicio con connessione meccanica è stata pari al 28.44%, valore che migliora il risultato ottenuto nello scorso triennio quando era stata misurata per questa tipologia di cella tandem un'efficienza massima pari a 27.1%.

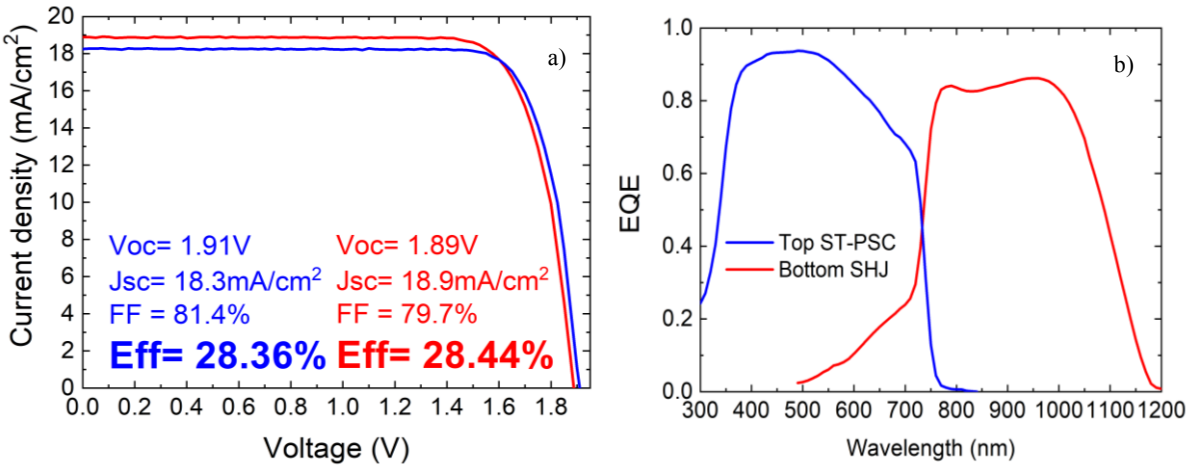


Figura **12. a) Caratteristiche J-V in illuminazione AM1.5G e b) EQE di celle tandem PK/HJ con efficienza maggiore del 28%.**

Per migliorare ulteriormente l'efficienza delle celle top si pensa di agire sull'interfaccia tra lo strato trasportatore di elettroni (ETL) e la perovskite. Uno degli aspetti critici riguarda la percolazione della soluzione di perovskite nella struttura mesoporosa del TiO_2 usato come ETL, al fine di raccogliere efficacemente gli elettroni. Si sta valutando la possibilità di sostituire l'attuale ETL, sostituendo lo strato mesoporoso di TiO_2 con un film planare di ossido di stagno SnO_2. I risultati preliminari mostrano un interessante miglioramento della trasmittanza dell'ETL (figura 13), utile ad incrementare il valore di corrente di corto circuito della cella tandem. La nuova struttura dell'ETL sarà testata nel prossimo futuro per migliorare le efficienze della cella tandem.

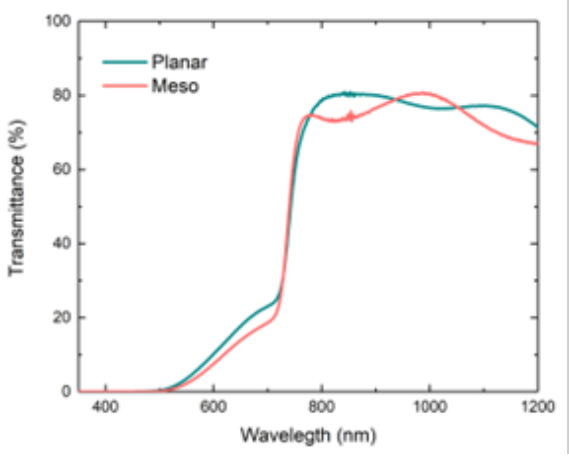


Fig. 13. Trasmittanze di una cella in perovskite con ETL in titania mesoporosa comparata con una cella con ETL planare.

Bibliografia

[1] L. Serenelli, L. V. Mercaldo, E. Bobeico, A. De Maria, M. Della Noce, M. Ferrara, V. La Ferrara, L. Lancellotti, G. Rametta, G. V. Sannino, A. Romano, I. Usatii, L. Martini, F. Menchini, E. Calabrò, E. Nonni, F. Matteocci, A. Di Carlo, M. Tucci, P. Delli Veneri, Definizione di materiali e architetture per la realizzazione di celle solari tandem perovskite/silicio, Report RdS/PTR(2021)/324

[2] Stefaan De Wolf and Erkan Aydin, Tandems have the power, Science, Volume 381, Issue 6653, (2023) 30 – 31.

[3] L. A. Castriotta, R. Fuentes Pineda, V. Babu, P. Spinelli, B. Taheri, F. Matteocci, F. Brunetti, K. Wojciechowski, A. Di Carlo, Light-Stable Methylammonium-Free Inverted Flexible Perovskite Solar Modules on PET Exceeding 10.5% on a 15.7 cm2 Active Area, ACS Appl. Mater. Interfaces 2021, 13, 29576.

[4] Erica Magliano, Paolo Mariani, Antonio Agresti, Sara Pescetelli, Fabio Matteocci, Babak Taheri, Antonio Cricenti, Marco Luce, and Aldo Di Carlo, Semitransparent Perovskite Solar Cells with Ultrathin Protective Buffer Layers, ACS Appl. Energy Mater. 2023, 6, 20, 10340–10353.

8 Eventi di disseminazione

- L.V. Mercaldo et al, “Monolithic perovskite/silicon heterojunction tandem solar cells with (p)nc-Si/(n)nc-SiOx tunnel junction”,
  Poster presentation at Tandem-PV International Workshop, May 30 – June 1, 2022, Freiburg (Germany).

- Elisa Nonni, Fabio Matteocci, Erica Magliano, Luca Serenelli, Luca Martini, Luigi Angelo Castriotta, Francesca Menchini, Aldo Di Carlo, Mario Tucci, “Two-terminal perovskite/silicon tandem based on double cation formulation”
  Oral Presentation at WCPEC-8, 26-30 Settembre 2022, Milano

- Elisa Nonni, Fabio Matteocci, Luca Serenelli, Luigi Angelo Castriotta, Jessica Barichello, Erica Magliano, Diego Di Girolamo, Luca Martini, Francesca Menchini, Massimo Izzi, Aldo Di Carlo, Mario Tucci, Mechanically Stacked Two Terminal Perovskite/Heterojunction-Silicon Tandem
  Oral Presentation at Conferenza 2023 della Rete Nazionale Fotovoltaica, 22-23 giugno 2023, Milano

- Eugenia Bobeico, Marco Della Noce, Laura Lancellotti, Lucia V. Mercaldo, Gennaro V. Sannino, Iurie Usatii, Luca Martini, Francesca Menchini, Luca Serenelli, Mario Tucci, Paola Delli Veneri, “Materials and device architectures for two-terminal perovskite/silicon tandem solar cells”,
  Oral Presentation at ICMAT23, June 26-30, 2023, Singapore