



Ricerca di Sistema elettrico

## Realizzazione di celle tandem Perovskite/Silicio

E. Lamanna, E. Calabrò, F. Matteocci, N. Yaghoobinia,  
A. L. Palma, M. Tucci, A. Di Carlo

## REALIZZAZIONE DI CELLE TANDEM PEROVSKITE/SILICIO

E. Calabrò<sup>1</sup>, E. Lamanna<sup>1</sup>, N. Yaghoobinia<sup>1</sup>, F. Matteocci<sup>1</sup>, A. L. Palma<sup>1</sup>, M. Tucci<sup>2</sup>, A. Di Carlo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di ingegneria elettronica, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", <sup>2</sup> ENEA

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: B.1.2 "Ricerca su Tecnologie Fotovoltaiche Innovative"

Obiettivo: Celle solari a base di film sottili innovativi di perovskiti e kesteriti – Subtask a.3: Sviluppo di architetture di dispositivi per celle tandem ad alta efficienza.

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Celle solari a base di perovskite ibrida organico/inorganico ad alta efficienza per celle tandem perovskite/Si"



Responsabile scientifico ENEA: Vera La Ferrara

Responsabile scientifico Università di Tor Vergata: Aldo Di Carlo

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE (STILE TITOLO 1).....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 OTTIMIZZAZIONE STRATO TRASPORTATORE DI ELETTRONI A BASSA TEMPERATURA .....	5
2.1.1 <i>Ottimizzazione dell'<math>\text{SnO}_2</math> per celle tandem</i> .....	5
2.2 OTTIMIZZAZIONE CONTATTI TRASPARENTI CONDUTTIVI .....	11
2.3 CELLA TANDEM PEROVSKITE/SILICIO .....	17
3 CONCLUSIONI.....	19
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	20
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	20

## Sommario

In questo report viene mostrata la prosecuzione del lavoro svolto nell'ottimizzazione dei processi legati alla produzione di dispositivi tandem Silicio/Perovskite. In particolare, è stata studiata la deposizione dello strato di ossido di stagno ( $\text{SnO}_2$ ) al fine di evitare eventuali danneggiamenti agli strati conduttivi sottostanti, in particolare in ossido di zinco drogato con alluminio (AZO), introducendo una tecnica basata su nanoparticelle di  $\text{SnO}_2$ . Sono stati, inoltre, ottimizzati entrambi i contatti semitrasparenti di cui deve essere dotata la cella a perovskite per essere la cella frontale della tandem. Si è scelto un FTO meno conduttivo ma più trasmissivo nell'infrarosso ed uno spessore di ITO che minimizzi la riflettanza all'interfaccia.

Si sono, quindi, costruite celle tandem perovskite/silicio sia monolitiche sia accoppiate meccanicamente: con quest'ultima configurazione è stata misurata una efficienza massima del 21.19% su una cella tandem di area pari a  $1.2 \text{ cm}^2$ .

## 1 Introduzione

Lo sviluppo di dispositivi fotovoltaici in silicio cristallino ha consentito il raggiungimento di efficienze ragguardevoli, fino al record corrente ottenuto da Kaneka e pari a 26.7% [1,2] con una eterogiunzione di silicio. Questo risultato non differisce molto dal limite termodinamico di Shockley-Queisser che una cella a singola giunzione può assumere come massima efficienza teorica. Pertanto, appare conveniente la realizzazione di celle cosiddette “tandem”, nate dall’accoppiamento di tecnologie differenti come quella del silicio e quella basata su materiali ad *Ita* gap quali ad esempio le perovskiti.

In questo report è descritta l’attività effettuata nell’ottimizzazione dei processi per la produzione dei dispositivi a perovskite (Perovskite solar cell – PSC) al fine di renderli compatibili con i dispositivi in silicio per la realizzazione di celle fotovoltaiche tandem silicio/perovskite meccanicamente accoppiate e monolitiche.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 *Ottimizzazione strato trasportatore di elettroni a bassa temperatura*

#### 2.1.1 *Ottimizzazione dell’SnO<sub>2</sub> per celle tandem*

Come riportato nel corso del rapporto di collaborazione dello scorso anno, lo strato trasportatore di elettroni scelto per via del suo corretto funzionamento optoelettronico se trattato alle basse temperature è l’ossido di stagno (SnO<sub>2</sub>). L’ottimizzazione della deposizione per l’ottenimento delle alte efficienze è stata effettuata partendo da precursori a base di cloruri (SnCl<sub>2</sub>\*2H<sub>2</sub>O acquistato da Sigma-Aldrich) disciolto in etanolo. Depositando tale ETL su substrati di FTO si sono ottenuti elevate efficienze prossime al 20% utilizzando una perovskite triplo catione ad elevata band gap. Ma sostituendo tale TCO con uno utilizzato nella tecnologia tandem, come l’AZO, non si riesce ad ottenere un corretto comportamento fotovoltaico, con risultati migliori senza ETL rispetto alla struttura completa, come visibile in Figura 2.1.1.1.

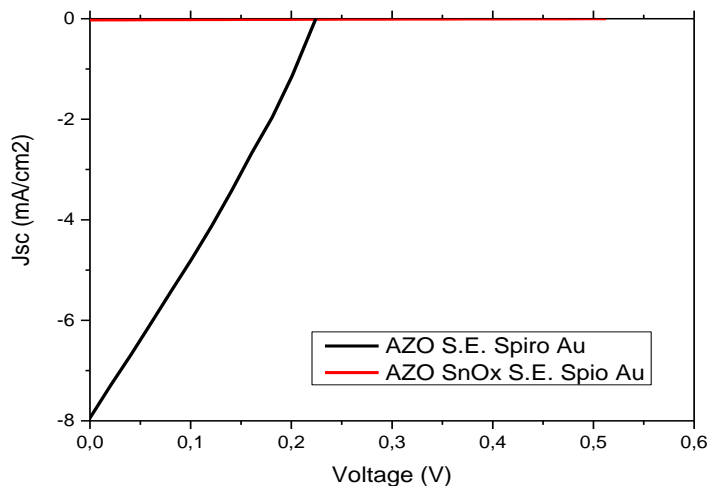


Figura 2.1.1.1: Curve J-V delle celle realizzate con e senza SnOx

Introducendo uno strato intermedio tra AZO e SnO<sub>2</sub> di ITO si sono riuscite ad ottenere efficienze prossime al 10%, come riportato lo scorso anno. Quindi la sostituzione del TCO in ITO permette un corretto funzionamento dei dispositivi fotovoltaici. Il problema dell'incompatibilità chimica tra AZO e SnO<sub>2</sub> con precursori da cloruri, si ripropone nel caso della cella tandem monolitica, in quanto tale ossido conduttivo trasparente viene utilizzato come back elettrodo. Infatti se durante la deposizione dell'ossido di stagno, una porzione del tale finisce sul back della cella, si compromette il contatto con conseguente impossibilità di misurare il dispositivo fotovoltaico, come visibile in Figura 2.1.1.2 dove si osserva la corrosione dell'AZO.



Figura 2.1.1.2: Effetto della deposizione dell'SnO<sub>2</sub> sull'AZO.

Per questo motivo si è cercato di utilizzare un diverso precursore rispetto al cloruro di stagno, andando a far ricadere la scelta sulle nanoparticelle (NP) di SnO<sub>2</sub>.

### Nanoparticelle di SnO<sub>2</sub>

Il precursore di partenza di questo nuovo ETL è una soluzione colloidale di Cloruro di Stagno (IV) al 15% in H<sub>2</sub>O prodotta dalla Alpha Aesar. Tale soluzione per essere utilizzata al fine di creare uno strato sottile (20-30 nm) viene diluita in acqua deionizzata in rapporto 1:5 rispetto al volume. A termine della deposizione il trattamento termico prevede 10 minuti a 100°C seguiti da 30 minuti a 150°C. il primo processo di ottimizzazione di deposizione viene effettuato su substrati di Fluorine Doped Tin Oxide (FTO). La scarsa bagnabilità e l'elevata rugosità del substrato di partenza (FTO TEC 7) ha necessitato un processo di ottimizzazione della tecnica di *spin coating*. Durante le prime deposizioni non avveniva una corretta distribuzione della soluzione sul substrato di partenza, lasciando solo la parte centrale del substrato coperta dallo strato di NP. Se subito prima di depositare la soluzione di partenza avviene una sensibilizzazione superficiale del solvente, si riesce a diminuire l'idrofobicità della superficie di FTO ottenendo uno strato omogeneo di NP. Lo spessore si mantiene sui 20 nm, prossimo a quello ottenuto dallo strato di Sol-Gel (SG). Come visibile dalla figura 2.1.1.3 mediante questa opportuna ottimizzazione si riesce ad ottenere un incremento della trasmittanza del substrato, come anche ottenuto dallo strato di SnO<sub>2</sub> convenzionale. Si può notare come la deposizione della soluzione a base di nanoparticelle risulti essere omogenea anche su substrati aventi area pari a 100 cm<sup>2</sup>, misurando i valori di T in diversi punti del campione in analisi.

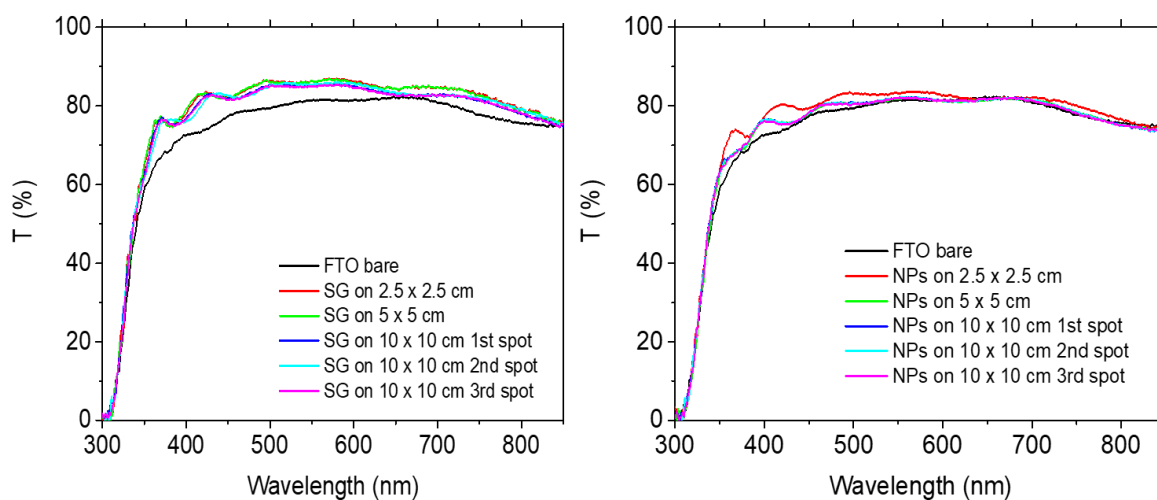


Figura 2.1.1.3: spettri di trasmittanza ottenuti tramite spettroscopia UV-Vis di substrati di FTO aventi lo strato di SnO<sub>2</sub> depositato mediante precursori clorati in soluzione alcolica (sinistra) e da nanoparticelle disperse in acqua (destra).

Le celle solari planari realizzate con questo ETL mostrano come, anche a livello di prestazioni, la corretta ottimizzazione di tale strato porti a valori paragonabili al riferimento. In Figura 2.1.1.4 sono riportate le curve J-V dei migliori dispositivi planari con la perovskite a singolo catione come materiale attivo. I valori di PCE raggiunti sono pari al 17.5%, completamente in linea con l'efficienza dell'SnO<sub>2</sub> depositato via SG, pari a 17.6%.

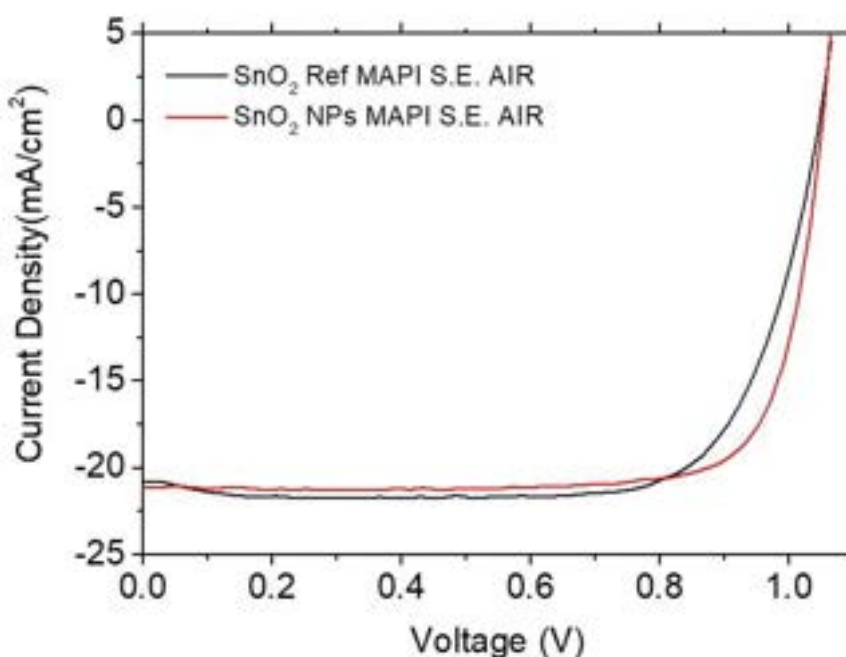


Figura 2.1.1.4: confronto delle curve I-V dei migliori dispositivi planari realizzati su SnO<sub>2</sub> mediante Sol-Gel (nero) e mediante nanoparticelle di ossido di stagno (Rosso).

Per incrementare le efficienze dei dispositivi così realizzati, si è andato a lavorare sostituendo la perovskite a singolo catione con una perovskite più innovativa e performante. La perovskite utilizzata è la triplo catione ( (CsFAMA)Pb(I Br)<sub>3</sub> ) la quale presenta una energy-gap di 1.63 eV ed è depositata per *single step*, dove viene utilizzato un antisolvente per favorire la corretta cristallizzazione. Le prestazioni raggiunte con questo materiale attivo su una struttura planare avente come l'ETL l'SnO<sub>2</sub> standard sono maggiori rispetto la MAPI, arrivando frequentemente ad efficienze superiori al 18%.

In Figura 2.1.1.5 vengono riportate delle curve I-V di dispositivi realizzati con perovskite multicatione su SnO<sub>2</sub> di differente natura. Generalmente tale perovskite se depositata su ossido di stagno ottenuto nel metodo convenzionale mostra una perdita di Voltaggio a circuito aperto (Voc) dell'ordine dei 100 mV



presente passando da misura in direzione reverse ad una misura nell'altra direzione, come anche ben visibile in Figura 2.1.1.5 osservando la curva nera. Cambiando precursore di ETL si riesce a rimediare a questo effetto, ottenendo dei dispositivi altamente performanti e con isteresi notevolmente ridotta.

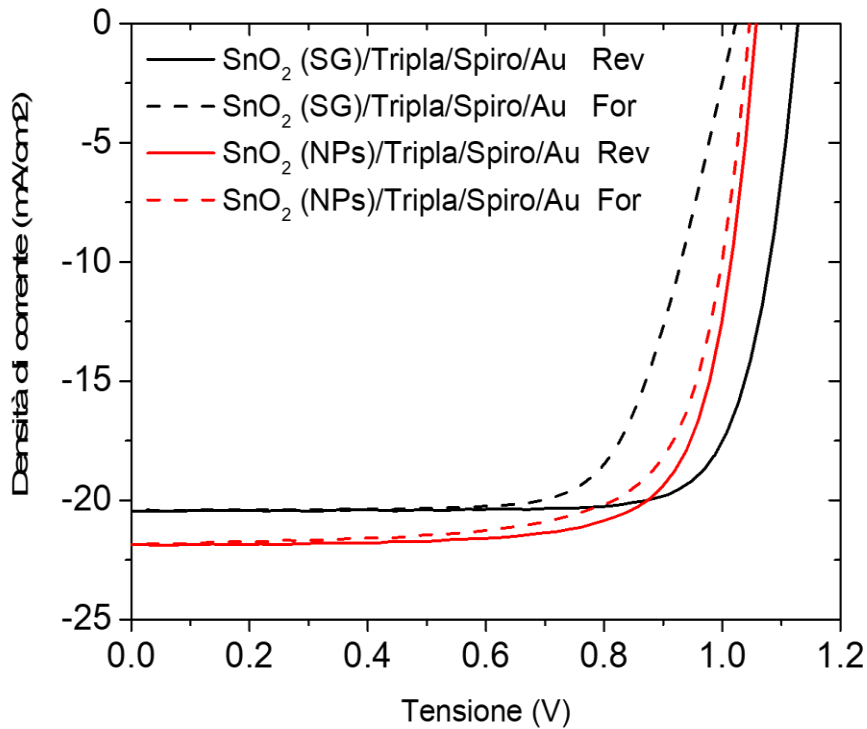


Figura 2.1.1.5: Curve I-V dei dispositivi con l'ETL a base di ossido di stagno ottenuto con differenti precursori.

Si osserva come si abbia una minore  $V_{oc}$  rispetto alla controparte del Sol Gel, ma andando a lavorare su substrati di ITO, ponendoci quindi nella condizione di deposizione AZO/ITO come nel caso della configurazione tandem monolitica, si osserva un incremento della tensione di circuito aperto, come mostrato nella Figura 2.1.1.6. In questa struttura si ottengono  $V_{oc}$  maggiori di 1.1 V, condizione ottimale per l'accoppiamento a due terminali con la cella sottostante in silicio, arrivando in linea teorica a valori finali di  $V_{oc}$  in configurazione Tandem maggiori di 1.8 V.

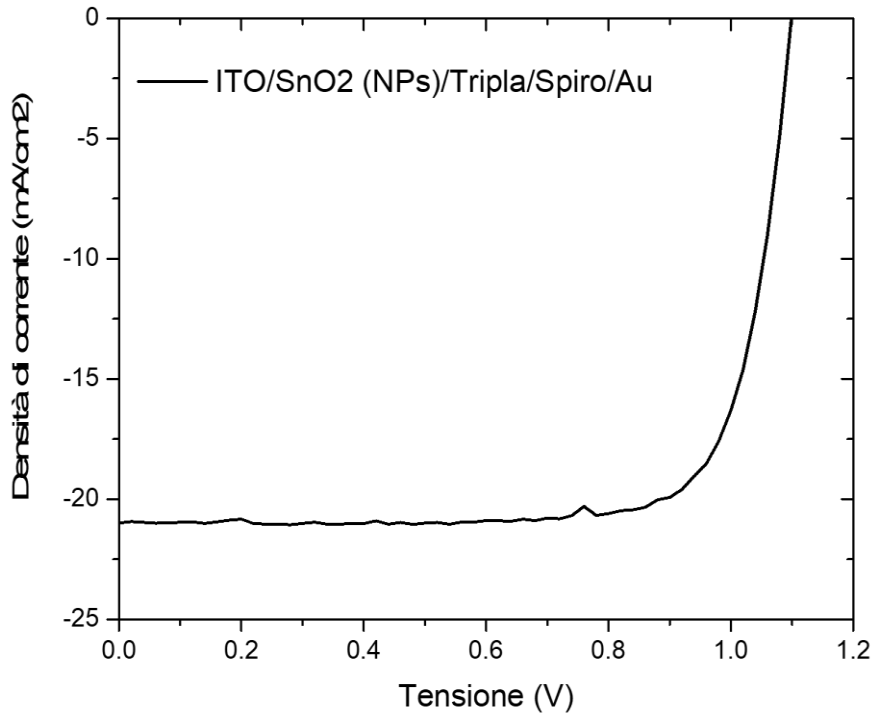


Figura 2.1.1.6: I-V del dispositivo planare a bassa temperatura realizzato su ITO con perovskite triplo catione, dove si ottengono valori di tensione a circuito aperto maggiori di 1.1 V.

## 2.2 Ottimizzazione contatti trasparenti conduttivi

La scelta di realizzare delle celle solari tandem meccanicamente accoppiate comporta l'impiego di due contatti trasparenti per la cella frontale, uno per il foto-anodo, l'altro come elettrodo posteriore. Oltre a lavorare sul contatto posteriore, è dunque essenziale che anche il primo introduca delle perdite ottiche minime in tutto lo spettro utile (300-1100 nm). Tenendo conto del fatto che per i dispositivi fotovoltaici a perovskite (PSC) il materiale più comunemente impiegato è l'FTO depositato direttamente su substrati di vetro, abbiamo comparato due diversi prodotti commerciali valutandone la loro trasmittanza e conducibilità. In Figura 2.2.1 è riportata la trasmittanza di entrambi i substrati presi in esame: quello di riferimento utilizzato per dispositivi PSC singola giunzione presenta una *sheet resistance* di  $7 \Omega/\square$  e una minore trasmittanza nel range di lunghezze d'onda compreso tra 700 nm e 1200 nm (Near-InfraRed – N-IR), il substrato scelto per la realizzazione della tandem, invece, risulta più trasparente nel N-IR a scapito della conducibilità elettrica (*sheet resistance*  $12 \Omega/\square$ ) per via del minor numero di portatori di carica liberi, i quali sono i maggiori responsabili dell'assorbimento parassitico di radiazioni con lunghezza d'onda superiore a 1000 nm.

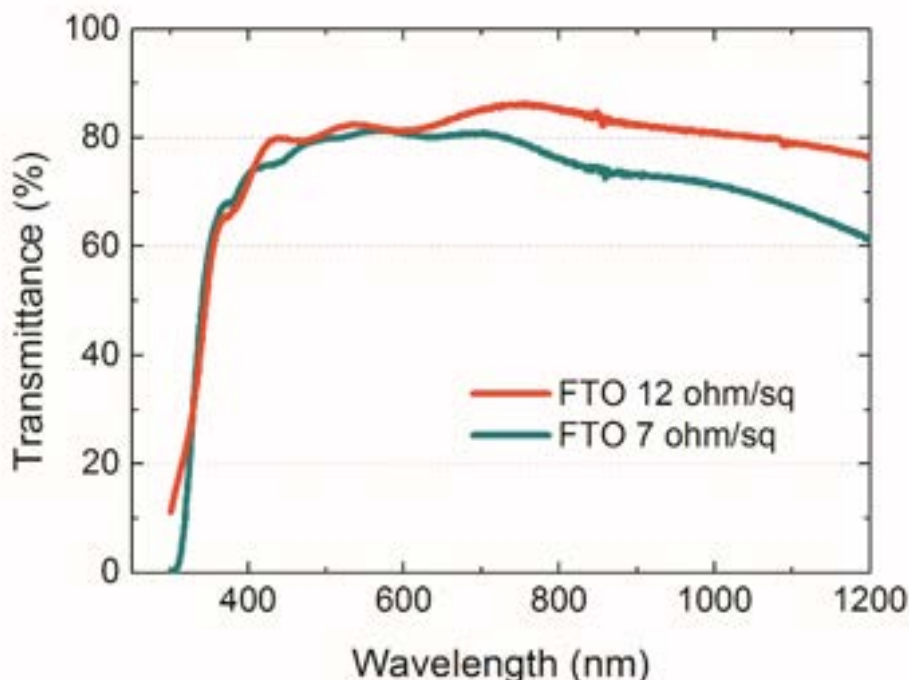


Figura 2.2.1: Trasmittanza di due substrati vetro/FTO commerciali misurata per lunghezze d'onda tra 350 nm e 1200 nm. La curva verde corrisponde al substrato di riferimento utilizzato per i dispositivi PSC, la curva rossa appartiene al substrato scelto per le tandem meccanicamente accoppiate.

Per poter ulteriormente diminuire l'assorbimento parassitico della PSC nel N-IR, risulta essenziale lavorare sul contatto posteriore. In base a quanto riportato nel report relativo alle attività del 2017, per poter ottenere una tandem funzionante è stato importante inserire un buffer layer tra lo strato organico adibito al trasporto delle lacune e il contatto semi-trasparente depositato mediante sputtering, per via della natura aggressiva di questo processo nei confronti degli strati sottostanti. Malgrado ciò, l'introduzione di un ulteriore strato comporta delle perdite ottiche e un aumento della complessità della struttura, perciò l'eliminazione del buffer layer è stato un punto fondamentale della nostra attività. Ciò è stato possibile mediante due passaggi: il cambio del tipo di sorgente dello sputter da DC a RF; la diminuzione della potenza di sputtering. Per quanto riguarda il primo, lo sputtering RF ha consentito di ottenere strati di ITO più conduttivi e più trasparenti in tutto lo spettro visibile e infrarosso, come evidenziato in Figura 2.2.2.

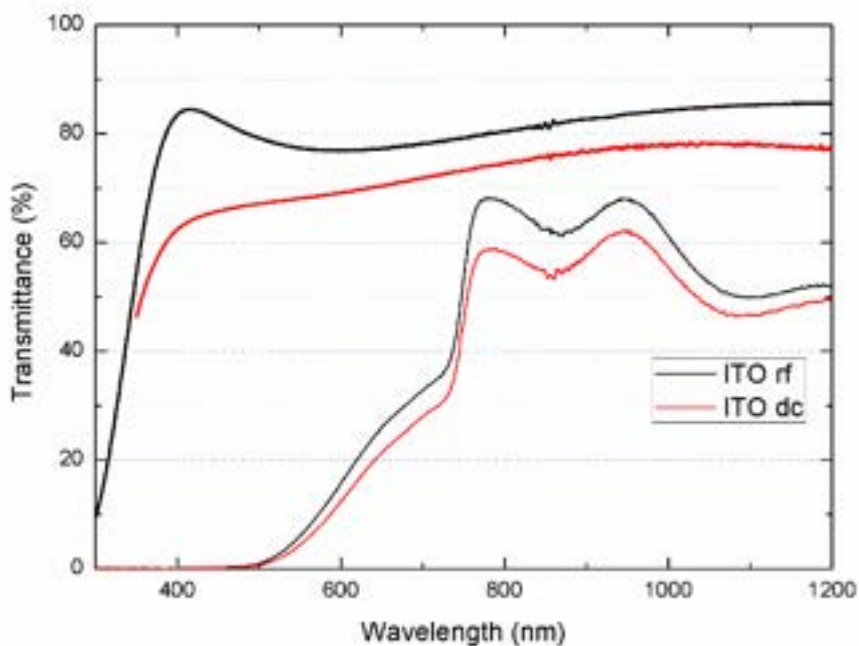


Figura 2.2.2: Trasmittanza da 300 nm a 1200 nm degli strati di ITO depositati mediante sputtering con sorgente DC (curva rossa) e RF (curva nera). Sono presenti anche le curve corrispondenti alla trasmittanza di due PSC semitrasparenti con contatto posteriore di ITO depositato per sputtering DC (curva rossa) e RF (curva nera).

In seguito, al fine di poter rimuovere il buffer layer tra HTL ed elettrodo, abbiamo ottimizzato la deposizione dell'ITO ad una potenza inferiore (60 W). Ciò ha consentito di non danneggiare lo strato organico sottostante durante il processo di sputtering. Quanto riportato è confermato dalle curve J-V mostrate in Figura 2.2.3, che mostrano come per lo sputtering a 100 W sia presente una "S-shape", indice

di una barriera all'estrazione di carica, problema non riscontrato abbassando la potenza a 60W. Il processo a bassa potenza consente, dunque, di non danneggiare l'HTM senza dover ricorrere ad un buffer layer.

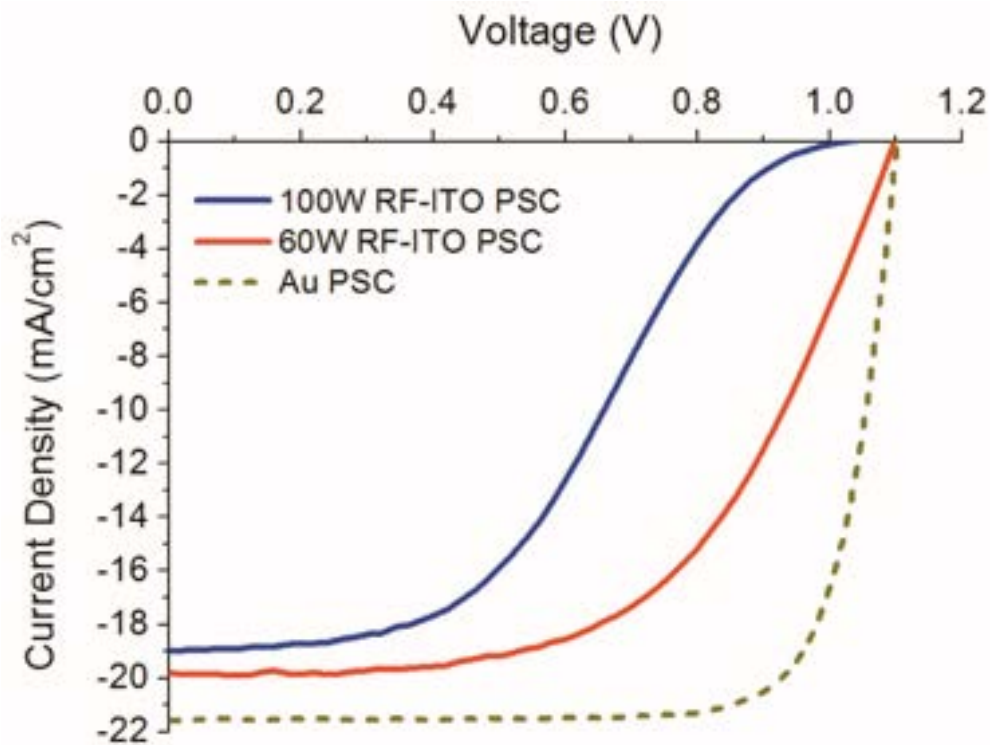


Figura 2.2.3: Curve J-V delle diverse PSC con contatto posteriore in oro per il riferimento (curva tratteggiata) e con contatto semi-trasparente in ITO depositato per sputtering RF a 100 W (curva blu) e a 60 W (curva rossa).

Un'ulteriore miglioramento della trasmittanza nel N-IR delle PSC deriva dall'ottimizzazione dello spessore di ITO depositato sul retro della cella a perovskite. Dalla Figura 2.2.4, è possibile notare che la maggior parte delle perdite ottiche, per i due spessori di ITO in esame, è dovuta alla riflessione della radiazione incidente.

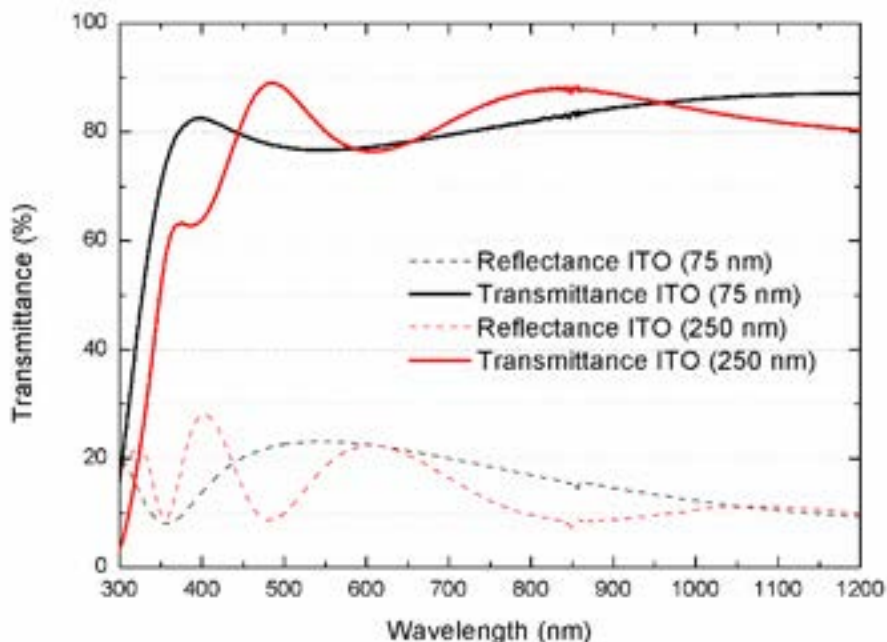


Figura 2.2.4: Trasmissione (curve solide) e riflettanza (curve tratteggiate) di strati di ITO spessi 75 nm (linee nere) e 250 nm (linee rosse).

Mediante delle simulazioni ottiche realizzate tramite il software XOP è stato possibile valutare lo spessore ottimale di ITO da depositare su due diversi HTM organici: il convenzionale spiro-OMeTAD e un polimero con prestazioni simili, il PTAA (Poly-triarylammine). In particolare, lo spessore dello strato di spiro-OMeTAD è stato fissato a 200 nm, mentre quello del PTAA a 50 nm. L'obiettivo di questa strategia è quello di limitare le perdite per riflessione dovute al passaggio della radiazione a due strati con indice di rifrazione diverso. Il risultato della simulazione è mostrato in Figura 2.2.5 e identifica in 80 nm lo spessore ottimale di ITO da depositare su PTAA per ottenere la minore perdita media dovuta alla riflessione per la radiazione con lunghezza d'onda compresa tra 800 nm e 1100 nm; in tal senso, non è possibile ottenere uno spessore ottimale per la deposizione di ITO su spiro-OMeTAD.

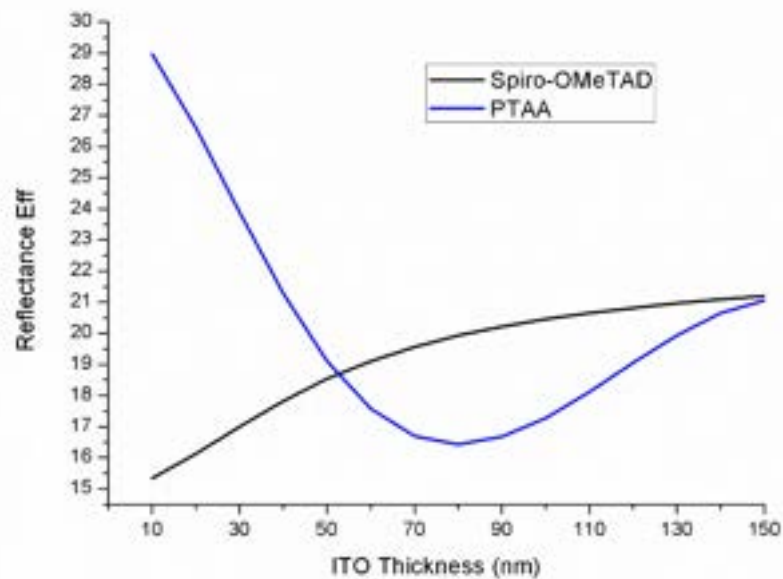


Figura 2.2.5: Risultato della simulazione in XOP: la curva blu (ITO su PTAA) presenta un minimo di riflettanza media nel range 800 – 1100 nm per uno spessore di ITO pari a 80 nm; la curva nera non presenta minimi per il range di spessori preso in esame.

Questo dimostra come l'uso del PTAA come HTM consenta l'ottimizzazione dello spessore di ITO per aumentare la trasmittanza delle celle a perovskite nel N-IR. I dati sperimentali sono in accordo con quanto dimostrato dalle simulazioni, come riscontrabile in Figura 2.2.6, nella quale è mostrata la trasmittanza del dispositivo PSC semi-trasparente completato con PTAA e spessore di ITO ottimizzato, rispetto al riferimento con spiro-OMeTAD e ITO. È importante sottolineare che la differenza in trasmittanza non è dovuta ad un diverso assorbimento parassitico dei due materiali, in quanto essi non presentano differenze così marcate nella trasmittanza quando depositati come strati singoli su micro-slide, come mostrato dalle curve tratteggiate in Figura 2.2.6.

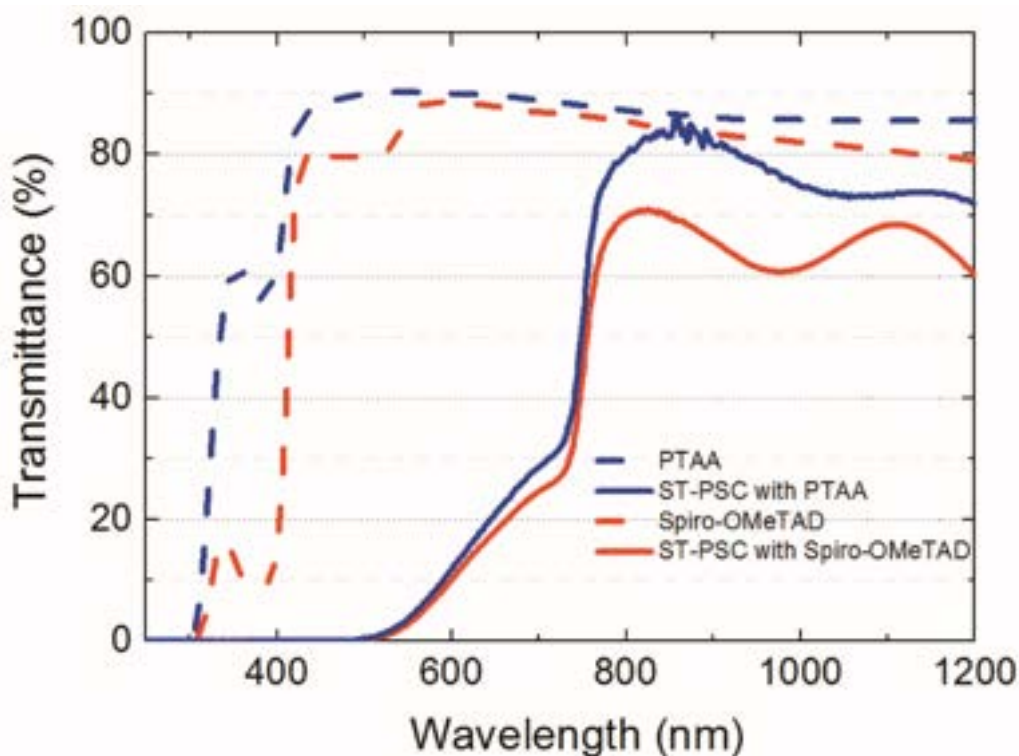


Figura 2.2.6: Trasmittanza del dispositivo PSC semi-trasparente con PTAA (curva blu) e curva della cella di riferimento con spiro-OMeTAD e ITO (curva rossa). Le curve tratteggiate rappresentano la trasmittanza dei singoli strati di spiro-OMeTAD e PTAA depositati su micro-slide.

Un ulteriore elemento a favore dell'impiego del PTAA come HTM è la migliore adesione dell'ITO su quest'ultimo, come mostrato dalle immagini al microscopio confocale (Figura 2.2.7) che evidenziano una sorta di esfoliazione dell'ITO su spiro-OMeTAD, elemento che potrebbe portare ad una diminuzione delle performance del dispositivo e ad una minore stabilità.

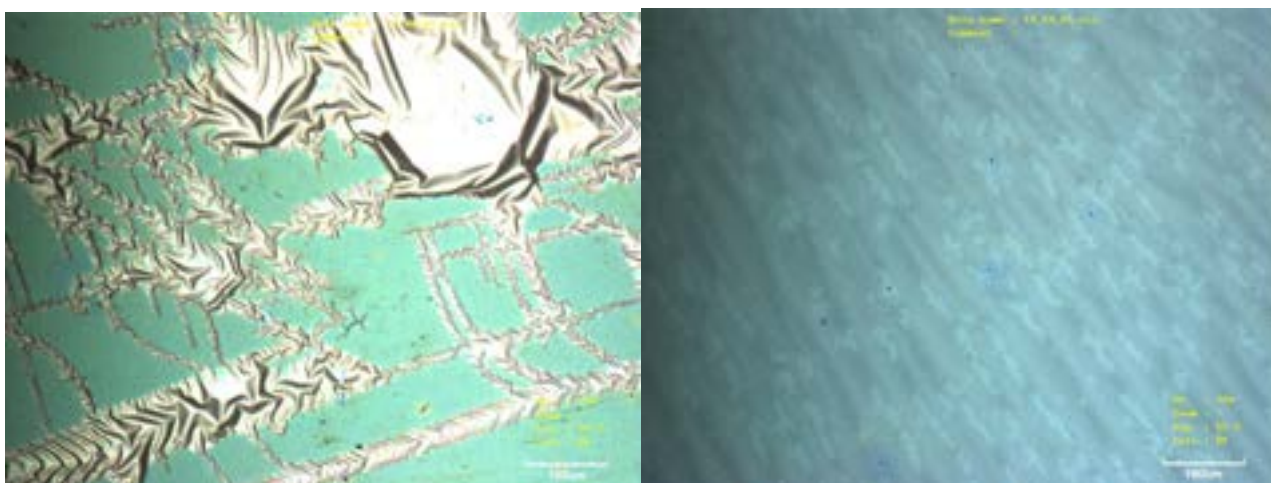


Figura 2.2.7: A sinistra immagine al microscopio dello strato di ITO depositato per sputtering su spiro-OMeTAD. A destra la stessa deposizione su PTAA.



Il risultato dell'ottimizzazione ha consentito di ottenere delle celle semi-trasparenti con efficienza del 12.3%. I cui parametri sono riassunti in Tabella 2.2.1.

Device	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
Semi-transp. PSC	1.1	19.8	56.5	12.3
Opaque PSC	1.1	21.5	78.2	18.6

Tabella 2.2.1: Parametri fotovoltaici per PSC semi trasparenti e opache

### 2.3 Cella tandem perovskite/silicio

Le celle semi-trasparenti precedentemente descritte sono state impiegate per realizzare delle tandem meccanicamente accoppiate a 2 terminali. L'obiettivo dell'accoppiamento è quello di ottenere un dispositivo con efficienza superiore a quella di entrambe le sotto-celle. La struttura è quella mostrata in Figura 2.3.1 e presentata anche nei report precedenti.

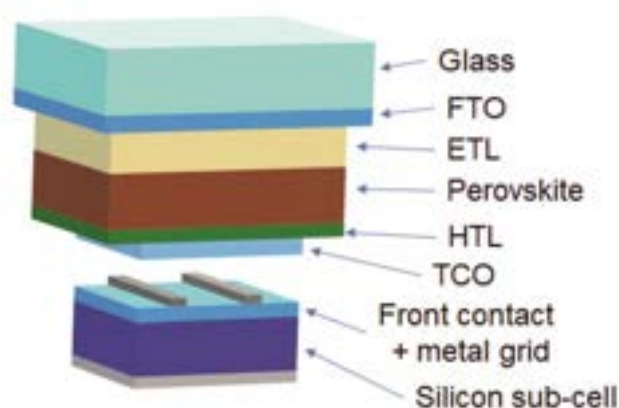


Figura 2.3.1: Struttura della tandem meccanicamente accoppiata a 2 terminali. La connessione in serie avviene tra il contatto posteriore della cella a perovskite e la griglia frontale del dispositivo in silicio.

La perovskite impiegata ha una energy-gap di 1.63 eV ed è una formulazione triplo catione (CsFAMA)Pb(I<sub>2</sub>Br)<sub>3</sub> ed è depositata per *single step* con l'aiuto di un antisolvente.

In figura 2.3.2 è mostrata la curva J-V della migliore cella tandem ottenuta accoppiando meccanicamente le due celle componenti. Come si vede è stata ottenuta un'efficienza pari a circa il 21.2% su area 1.2 cm<sup>2</sup>, quindi il target previsto per l'attività, e cioè lo sviluppo di celle tandem silicio/perovskite con efficienza di almeno il 21%, è stato pienamente raggiunto.

Tabella 2.3.1: Parametri fotovoltaici di celle con diversi tipi di silicio in configurazione singola o tandem con PSC.

Device	Voc (V)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF(%)	PCE (%)	Area (cm <sup>2</sup> )
c-Si	0.605	36.8	75.4	16.79	1.21
<b>Tandem PSC/c-Si</b>	<b>1.676</b>	<b>16.72</b>	<b>75.6</b>	<b>21.19</b>	<b>1.21</b>

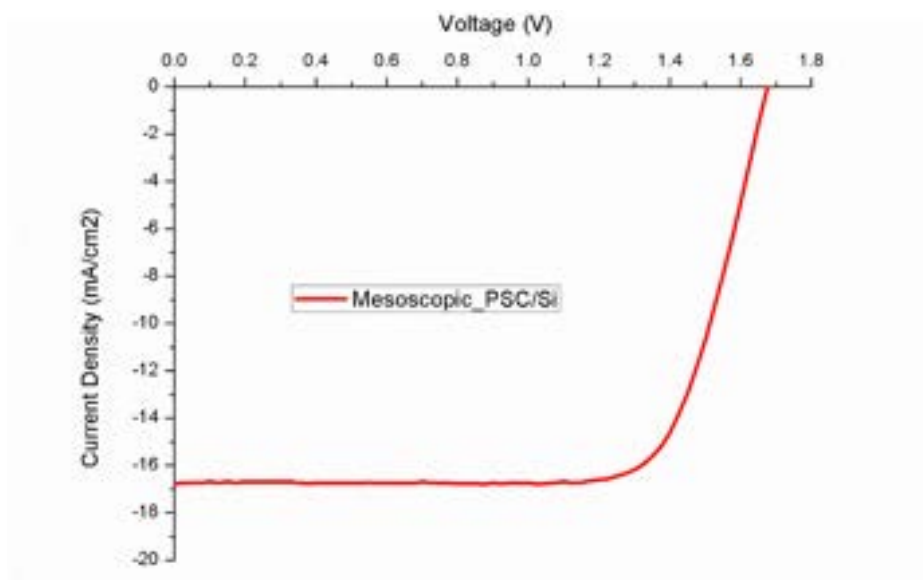


Figura 2.3.2: Curva J-V della migliore cella tandem ottenuta dall'accoppiamento meccanico della PSC semi-trasparente con una cella ad eterogiunzione di silicio.

Per quanto riguarda la tandem silicio/perovskite monolitica, è stata migliorata la deposizione dell'ossido di stagno su ITO frontale del dispositivo in silicio per diminuire i percorsi di *shunt* dovuti a delle imperfezioni nell'ETL. Tuttavia, il miglioramento è stato solo parziale rispetto ai risultati precedenti, con il miglior dispositivo che ha mostrato un'efficienza pari al 10.5% su 2 cm<sup>2</sup>. La curva J-V è mostrata in Figura 2.3.3. La tensione pari a 1.2 V è ancora troppo bassa a causa di imperfezioni nella deposizione via soluzione degli strati che compongono la PSC. La corrente, attualmente pari a 13.4 mA/cm<sup>2</sup> potrà essere migliorata ottimizzando lo spessore dello strato attivo di perovskite e riducendo l'assorbimento parassitico dovuto ai vari strati.

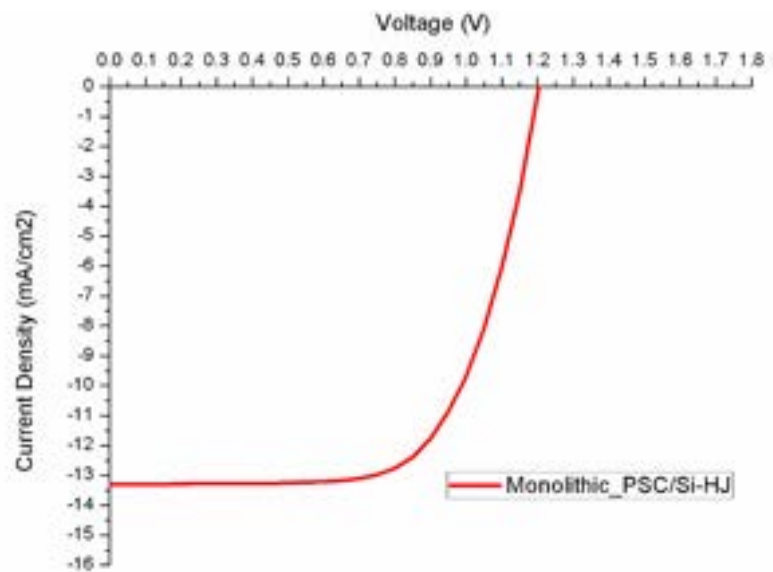


Figura 2.3.3: Curva J-V del dispositivo tandem silicio/perovskite monolitico.

### 3 Conclusioni

Il lavoro qui riportato ha riguardato l'ottimizzazione dei processi di produzione relativi a celle tandem c-Si/Perovskite. Il cloruro di stagno, precursore dell' $\text{SnO}_2$  depositato per sol-gel risulta danneggiare lo strato di AZO su cui si deve depositare tale ETL, pertanto si è introdotta una procedura per la deposizione di nanoparticelle di  $\text{SnO}_2$ , che non prevede il cloruro di stagno come precursore. Le celle così realizzate e basate su perovskite MAPI hanno mostrato una PCE del 17.5%, in linea con l'efficienza dell' $\text{SnO}_2$  depositato via SG, pari a 17.6%. Si sono, inoltre, iniziate a sperimentare le prime celle basate su perovskite a triplo catione che promettono di avere  $V_{oc}$  maggiori di 1.1 V per celle tandem con  $V_{oc}$  superiore a 1.8 V.

Per quanto riguarda i contatti semitrasparenti di cui deve essere dotata la cella a perovskite impilata sopra a quella al silicio cristallino nella configurazione tandem, si è scelto di impiegare un FTO con una *sheet resistance* di  $12 \Omega/\square$ , poiché dotato di migliore trasmittanza nell'infrarosso, porzione di spettro in cui principalmente assorbirà la cella in silicio, rispetto al più conduttivo FTO da  $7 \Omega/\square$ . Inoltre è stato ottimizzato lo spessore dell'ITO del contro-elettrodo mediante simulazioni ottiche, rilevando che la curva riflettanza/spessore-ITO mostra un minimo a 80 nm di spessore, se depositato su PTAA, mentre, se depositato su Spiro-OMeTAD, non mostra minimi. Pertanto l'utilizzo di PTAA consente di ottimizzare al meglio il dispositivo, anche per via di una migliore adesione dell'ITO depositato per sputtering rispetto alla deposizione su Spiro-OMeTAD. PSC semitrasparenti così composte hanno ottenuto una PCE del 12.3% confrontata con una PCE del 18.6% di celle opache.

Le ottimizzazioni implementate hanno portato alla realizzazione di una cella tandem PSC/Si-HJ meccanicamente accoppiata con una PCE = 21.19% su  $1.2 \text{ cm}^2$  di area attiva.

Per quanto riguarda le tandem monolitiche, si è ottenuta una efficienza pari al 10.5% su  $2 \text{ cm}^2$ .

## 4 Riferimenti bibliografici

[1] NREL Cell Efficiency Chart: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiencies-07-17-2018.pdf>

[2] M. A. Green et al., Prog Photovolt Res Appl. (2018),26, 427–436.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

PSC – Perovskite Solar Cell

ETL – Electron Transporting Layer

HTL – Hole Transporting Layer

EQE – External Quantum Efficiency

ITO – Indium Tin Oxide

FTO – Fluorine doped Tin Oxide

RF – Radio Frequency (alternate current)

DC – Direct Current

## CV breve del responsabile scientifico dell'attività, Prof. Aldo Di Carlo

Aldo Di Carlo riceve la laurea in fisica (con lode) all'Università di Roma "La Sapienza" e il grado di Dottore di Ricerca presso l'Università Tecnica di Monaco di Baviera. Nel 1996 è ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università di Roma "Tor Vergata" e nel 2001 Professore Associato. Dal dicembre 2012 è Professore Ordinario presso lo stesso dipartimento. Le sue ricerche vertono sullo studio e fabbricazione di dispositivi elettronici e optoelettronici, la loro analisi e la loro ottimizzazione. Negli ultimi anni le sue ricerche si sono particolarmente incentrate sullo sviluppo di celle fotovoltaiche organiche, in particolar modo Dye Solar Cell e Perovskite Solar Cells, e sullo scaling-up di tale tecnologia per applicazioni industriali. Di Carlo è Co-Direttore del Polo Solare Organico della Regione Lazio per la fabbricazione delle celle solari organiche ed ibride organiche/inorganiche, in cui operano più di 30 ricercatori e dal quale sono nati 5 spin-off e un consorzio pubblico-privato per l'industrializzazione delle celle DSC.

Aldo Di Carlo è coordinatore locale di tre progetti H2020 (MOSTOPHOS sulla simulazione di LED organici e CHEOPS sulle celle a perovskite, GRAPHENE Flagship) e tre progetti FP7 (NEWLED sullo sviluppo di LED al GaN, DESTINY sulle celle fotovoltaiche organiche, CHEETAH sul fotovoltaico). È stato Coordinatore Europeo del Progetto FP7 ULTRADSSC sulla caratterizzazione risolta in tempo delle celle solari DSSC, e del progetto EU FP7 OPTHER sugli Amplificatori per THz. È stato il coordinatore scientifico locale di diversi progetti di ricerca sia Italiani che Europei, tra cui: due progetti FP7 STREP (SMASH sui Led GaN e HYMEC su memorie organiche), due Progetti Europei Marie Curie (CLERMONT e CLERMONT II sulle microcavità), Progetto Europeo FP6 STREP (STIMSCAT su Laser a polaritoni), Progetto MADESS II, (Amplificatori ottici in semiconduttori), Progetto INFN-PRA (Experimental and theoretical investigation of optical and transport phenomena in superlattice long-wavelength infrared quantum cascade lasers), Progetto Finalizzato Nanoelettronica PF22 (Emettitori di Luce a Semiconduttore Organico)

Di Carlo è autore o coautore di più di 300 pubblicazioni scientifiche internazionali (H-factor=39, Citazioni=4875, fonte SCOPUS), di 13 brevetti, di diversi articoli di review sulle celle fotovoltaiche ibride e sui modelli atomistici per lo studio delle nanostrutture organiche e inorganiche, di diversi capitoli di libri e di due libri in italiano "Appunti di Optoelettronica: I materiali semiconduttori" e "Appunti di Optoelettronica: fibre ottiche e componenti a semiconduttore" entrambi editi dalla casa editrice Aracne.