



Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione di celle solari a singola giunzione a base di perovskite ibrida organico/inorganico e di celle tandem perovskite/c-Si

E. Lamanna, E. Calabrò, F. Matteocci, N. Yaghoobi Nia,
A. L. Palma, A. Agresti, S. Pescetelli, V. La Ferrara, M. Tucci,
P. Delli Veneri, A. Di Carlo

REALIZZAZIONE DI CELLE SOLARI A SINGOLA GIUNZIONE A BASE DI PEROVSKITE IBRIDA ORGANICO/INORGANICO E DI CELLE TANDEM PEROVSKITE/c-SI

E. Lamanna¹, E. Calabrò¹, N. Yaghoobi Nia¹, F. Matteocci¹, A. L. Palma¹, A. Agrest¹, S. Pescetelli¹, V. La Ferrara², M. Tucci², P. Delli Veneri², A. Di Carlo¹

¹Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

²ENEA

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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

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.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 CELLA SINGOLA GIUNZIONE.....	5
2.1.1 <i>Trasportatori di carica per lacune</i>	5
2.1.2 <i>Ottimizzazione tecnica Multi-catione</i>	10
2.2 CELLA TANDEM.....	11
2.2.1 <i>Cella tandem mechanically stacked</i>	11
2.2.2 <i>Ottimizzazione dell'SnO₂ per celle tandem</i>	14
2.2.3 <i>Ottimizzazione contatti trasparenti conduttivi</i>	Errore. Il segnalibro non è definito.
2.2.4 <i>Cella tandem monolitica</i>	15
3 CONCLUSIONI.....	17
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	17
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	17

Sommario

In questo report sono riportati i risultati ottenuti nello studio delle perovskiti multi-catione, ottenute utilizzando miscele di methylammonium e formamidinium, oppure miscele contenenti anche cesio. I materiali assorbitori realizzati mediante l'adozione di tali composizioni sono ritenuti dalla comunità scientifica essere dotati di una migliore stabilità termica ed ottica e con essi dispositivi ad alta efficienza. In particolare, dispositivi basati sulla perovskite $\text{Cs}_{0.15}\text{FA}_{0.85}\text{PbI}_3$ depositata con doppio step in aria hanno mostrato una efficienza del 14% su piccola area (0.09cm^2) e del 10.9% su larga area (1cm^2)

Si è portato avanti lo sviluppo di materiali trasportatori di elettroni (ETM), come si vedrà nella sezione relativa alle celle tandem e materiali trasportatori di lacune (HTM) alternativi a quelli attualmente impiegati.

È proseguita la sperimentazione sull'utilizzo del P3HT come strato HTM della cella a perovskite alternativi allo Spiro-OMeTAD. Dispositivi con P3HT dal peso molecolare di 338kDa hanno mostrato una efficienza del 17.60% ed una maggiore resistenza allo stress termico rispetto a celle standard basate su Spiro-OMeTAD.

Per quanto riguarda i dispositivi tandem silicio/perovskite, sono qui riportati i risultati relativi alle configurazioni con connessione meccanica tra i singoli dispositivi e monolitica, ovvero con crescita diretta della cella a perovskite frontale su quella in silicio. In particolare le celle connesse meccanicamente hanno mostrato un'efficienza del 23.3% mentre quelle monolitiche del 16.3%

1 Introduzione

Le celle solari a Perovskite permangono al centro dell'interesse della comunità scientifica. Di recente la PCE di celle di laboratorio di piccola area ha raggiunto il 23.7%, [1] un risultato impressionante, soprattutto considerando che lo sviluppo dell'applicazione di tale tecnologia nell'ambito fotovoltaico ha avuto inizio circa dieci anni fa. Appare evidente che la semplicità con cui le celle a perovskite, rispetto ad altre tecnologie fotovoltaiche, possano essere realizzate, sia stato uno dei motivi dell'ampia sperimentazione che ha riguardato tali dispositivi nel recente passato. Infatti, tali celle fotovoltaiche possono essere realizzate mediante tecniche di stampa a partire da soluzioni. Per quanto riguarda lo strato assorbitore, le recenti applicazioni hanno mostrato che impiegare perovskiti con due o tre cationi porti benefici sia in termini di prestazioni che di stabilità nel tempo dei dispositivi.

I trasportatori di elettroni maggiormente impiegati sono l'ossido di titanio (TiO_2), l'ossido di stagno (SnO_2), e l'ossido di zinco (ZnO_2), mentre come trasportatori di lacune possono essere impiegati materiali basati su *small molecules*, principalmente lo Spiro-OMeTAD, polimerici, come il P3HT e il PTAA, e inorganici, quali lo ioduro rameoso (CuI), il tiocianato rameoso (CuSCN) e l'ossido di nichel (NiO).

In questo report viene approfondito lo studio delle perovskiti a doppio catione e del P3HT come HTM per prestazioni e durata sotto stress termico superiori rispetto allo Spiro-OMeTAD.

Nel corso del PAR 2017 è stato possibile realizzare dispositivi solari tandem con efficienza maggiore del 21%, collegando meccanicamente le due celle componenti. I dispositivi cresciuti in configurazione monolitica hanno, d'altro canto, evidenziato efficienze più basse probabilmente dovute ad una non perfetta compatibilità di alcuni dei processi tecnologici utilizzati e/o alla necessità di migliorare la qualità delle varie interfacce tra i differenti strati delle celle.

In questo report vengono mostrate celle tandem accoppiate meccanicamente con un'efficienza del 23.3 %.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Cella singola giunzione

2.1.1 Trasportatori di carica per lacune

Ottimizzazione dei trasportatori di lacune Polimerici basati su P3HT

In questa attività abbiamo investigato il P3HT con quattro tipi diversi di peso molecolare (MW) PTF-004(223.430), PTF-006(338.963), FB-1-3(18.880), FB-1-14(124kDa) in qualità di trasportatore di lacune per Celle a Perovskite.

a) Realizzazione dei dispositivi

Uno strato compatto di TiO_2 (c- TiO_2) è stato depositato su substrati di vetro/FTO (Pilkington, $8\Omega\text{cm}^{-1}$, 25mm x 25mm) per mezzo della tecnica di Spray pyrolysis.[2] Uno strato mesoporoso nanocristallino TiO_2 (pasta Dyesol 30NRD), diluita con etanolo con rapporto in peso di 1:6, è stata depositata per spin coating sulla superficie di c- TiO_2 e sottoposta ad annealing per 10 minuti a 100°C . Dopo aver pulito le zone del substrato dedicate ai contatti, lo strato mesoporoso è stato sottoposto a sintering a 480°C per 30 minuti. Prima della deposizione della perovskite, i substrati sono stati mantenuti a 150°C per eliminare eventuali tracce di umidità e immediatamente spostati in glove-box. Quindi, una soluzione di perovskite triplo catione (FAPbI_3)_{0.83}(MAPbBr_3)_{0.17} (0.05 CsI) è stata depositata con la tecnica solvent engineering a singolo step, usando un programma a due rampe di rotazione. Sette secondi prima del termine della rotazione del chlorobenzene è stato versato sui substrati, i quali sono stati successivamente sottoposti ad annealing per 50 minuti a 100°C .

Come trasportatori di lacune sono state depositate in glove box per spin coating diverse soluzioni di P3HT con differenti MW, disciolto in clorobenzenze e dopato con tert-butyl pyridine (TBP), Lithium Bis(Trifluoromethanesulfonyl)Imide (Li-TFSI) solution [3] e cobalto K209.

Infine i substrati sono stati introdotti in una camera ad alto vuoto (10^{-5} mbar) per effettuare l'evaporazione termica di 100 nm di oro, come controelettrodo.

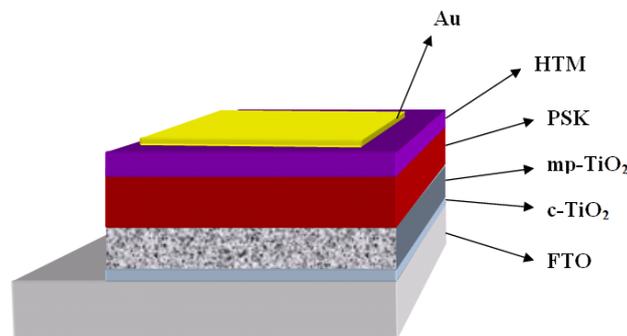


Figura 2.1.2.1: Figura schematica degli strati di un dispositivo completo.

Tavola 2.1.2.1: Caratteristiche dei diversi P3HT investigati.

Polimer	Regioregularity (%)	M_n^a (kDa)	M_w^b (kDa)	PDI ^c
PTF-004	79	54.957	223.430	4.06
PTF-006A	78	60.867	338.963	5.6
FB-1-3	95	8.190	18.880	2.30
FB-1-14	99-100	-	124	-

Qui di seguito sono rappresentate immagini al microscopio del P3HT depositato sullo strato di perovskite.

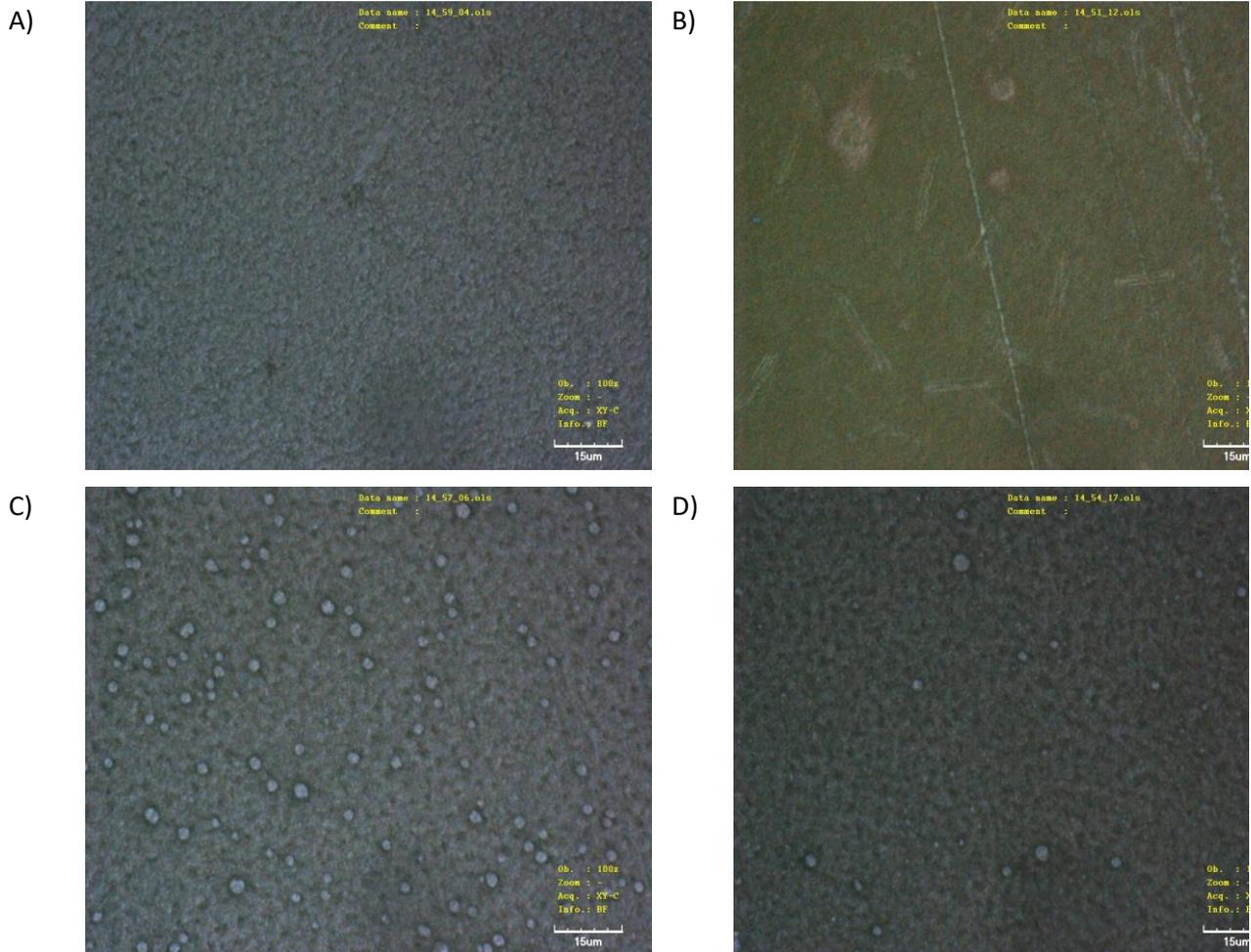


Figura 2.1.2.2: Immagini al microscopio dei P3HT con diversi MW. A: (FB-1-3(19 kDa), B: FB-1-14(124 kDa), C: PTF-004 (223.4) kDa, D: PTF 006A(338.9kDa)

b) Risultati

Aumentando il MW del polimero da 19kDa a 124kDa l'efficienza aumenta, mentre non sembra avere un impatto tangibile l'aumento da 124kDa a 223kDa. Un ulteriore aumento appare esistere passando 223kDa a 338kDa, con effetti principale su Voc e Fill Factor.

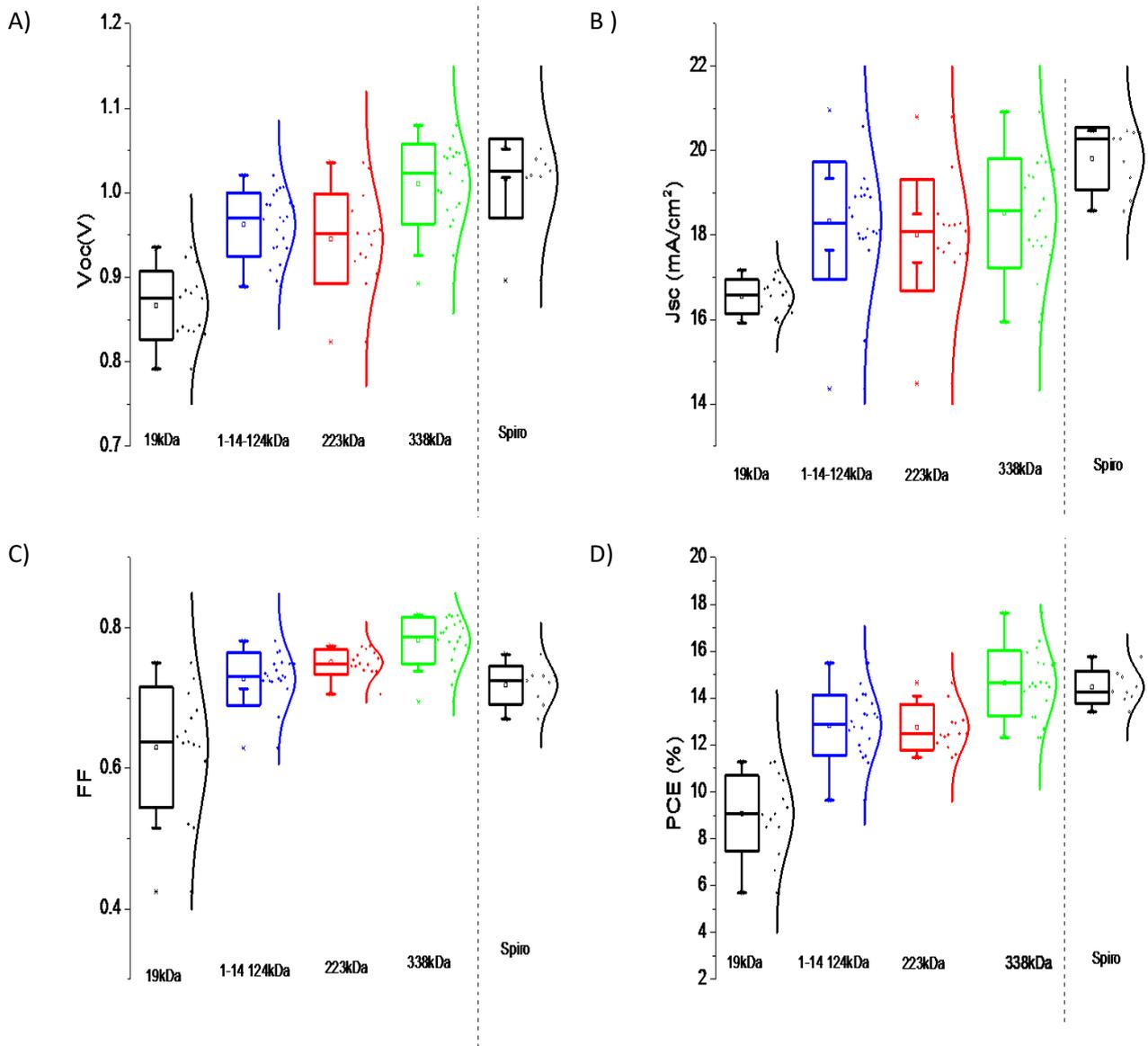


Figura 2.1.2.3: Statistiche dei parametri fotovoltaici delle PSC realizzate con perovskite triplo catione usando diversi P3HT (FB-1-3(19 kDa), FB-1-14(124 kDa), PTF-004 (223.4 kDa) e PTF 006A (338.9 kDa) come HTM e Spiro-OMeTAD per la cella di riferimento.

Tavola 2.1.2.2: Parametri fotovoltaici dei dispositivi con le migliori prestazioni tra quelli sperimentati con P3HT con diversi MW.

Campione	Voc	FF	Jsc	PCE
19kDa	0.924	0.72	16.76	11.27
1-14-124kDa	1.021	0.72	20.95	15.48
223kDa	0.978	0.75	19.60	14.51
338kDa	1.035	0.81	20.953	17.63
Spiro	1.047	0.76	19.74	15.7

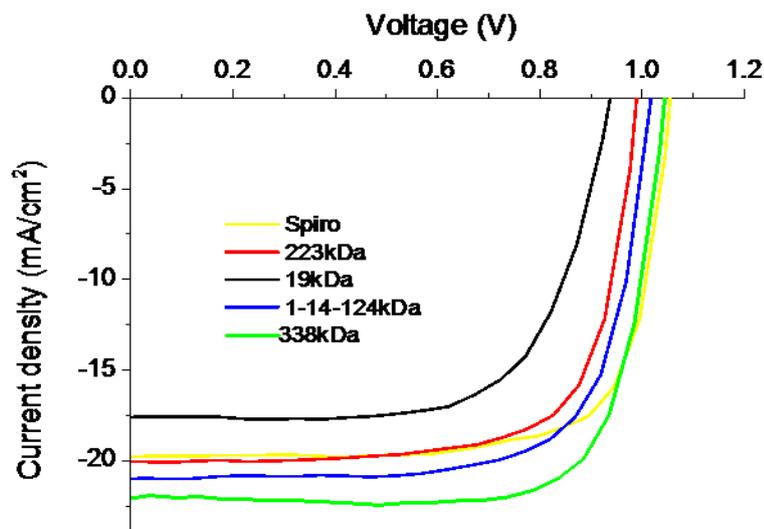


Figura 2.1.2.4: curve IV dei dispositivi con P3HT di diversi MW e con Spiro-OMeTAD.

c) Stabilità termica

I dispositivi, incapsulati, sono stati mantenuti in forno a 85 °C in condizioni ambientali per circa 250 ore. I risultati mostrano che i MW più alti (PTF-004 - 224kDa e PTF-006A - 338kDa) hanno una maggiore stabilità rispetto a quelli con basso MW. Il polimero P3HT mostra una migliore stabilità termica rispetto allo Spiro-OMeTAD (Small Molecule).[4] È interessante notare che dispositivi senza HTM, ovvero con contatto diretto tra Perovskite e oro, non perdono efficienza durante le 250 ore di stress termico.

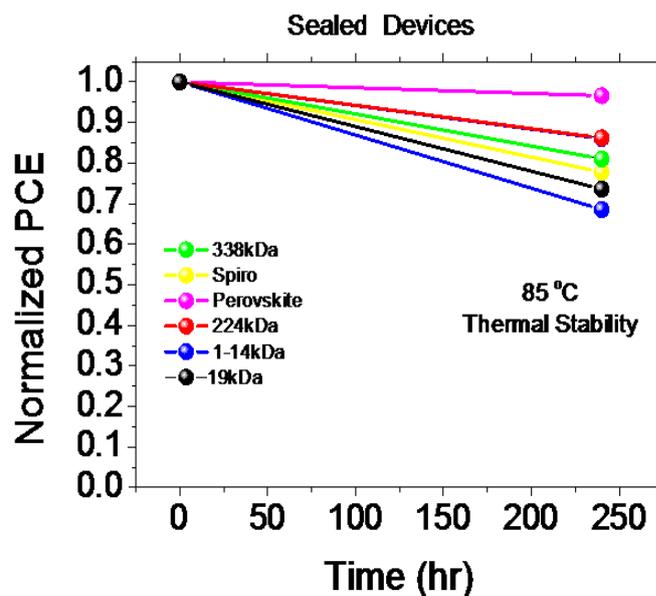


Figura 2.1.2.5: Misura di stabilità termica a 85°C nel tempo per PSC con P3HT di diversi MW e Spiro-OMeTAD come riferimento.

2.1.2 Ottimizzazione tecnica Multi-catione

Tecniche di deposizione doppio step di perovskite doppio catione in aria

Tale studio riguarda l'utilizzo di strati assorbitori di perovskite doppio-catione: questo tipo di perovskite può essere definita con il nome CsFA in quanto utilizza due tipi di catione, il Cesio (Cs^+) e il formamidinio (FA^+). Si è scelto di ottimizzare questo tipo di formulazione in quanto cationi come il Cesio e il Formamidinio favoriscono una perovskite più stabile rispetto alle formulazioni con Metil Ammonio (MA). [5] Il processo di deposizione è illustrato in Figura 2.1.3.1.

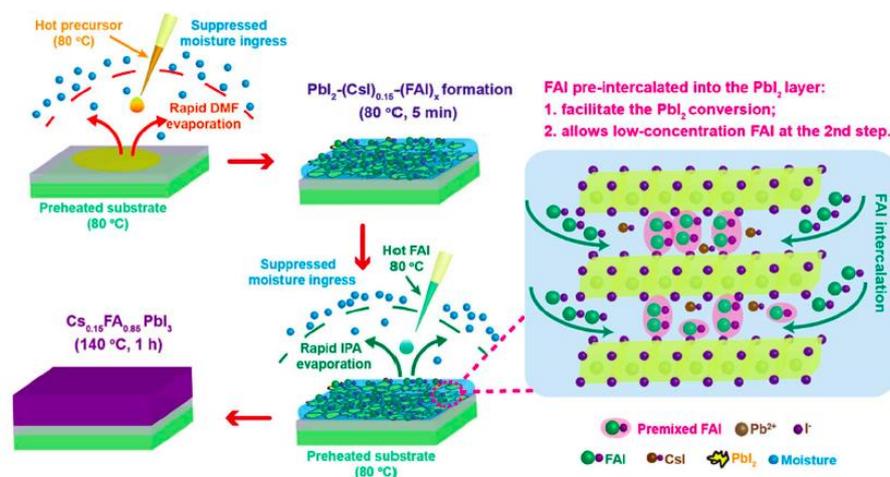


Figura 2.1.3.1: Schema illustrativo per la deposizione doppio step di perovskite $\text{Cs}_{0.15}\text{FA}_{0.85}\text{PbI}_3$ in aria.

L'ottimizzazione della deposizione è avvenuta mediante i seguenti passaggi:

- sono state preparate due Vials, la prima (Vial 1) con 461mg di PbI_2 , 39 mg di CsI e 52 mg di FAI in 1 mL di DMF e 79ul di DMSO , la seconda (Vial 2) con 30 mg di FAI in 1mL di IPA .
- La Vial 1 è stata messa in temperatura a 80°C , dopodiché la deposizione è avvenuta mediante spin e blade coater fino ad ottenere uno spessore di 200nm.
- Il substrato è stato lasciato in temperatura a 80°C per 5 minuti, al fine di formare il complesso intermedio $\text{PbI}_3 - \text{CsI} - \text{FAI}$.
- Passati i 5 minuti la deposizione della soluzione della Vial 2 è avvenuta mediante spin coater, lasciando successivamente il substrato in temperatura a 140°C per 1h.

La struttura del dispositivo allo studio della perovskite doppio-catione è quella mesoscopica diretta $\text{FTO}/\text{c-TiO}_2/\text{mp-TiO}_2/\text{CsFA}/\text{Spiro-OMeTAD}/\text{Au}$. Sono state fabbricate celle di piccola area (0.09cm^2) e larga area (1cm^2).

Tabella 2.1.3.1: Risultati migliori e mediati di celle solari doppio catione

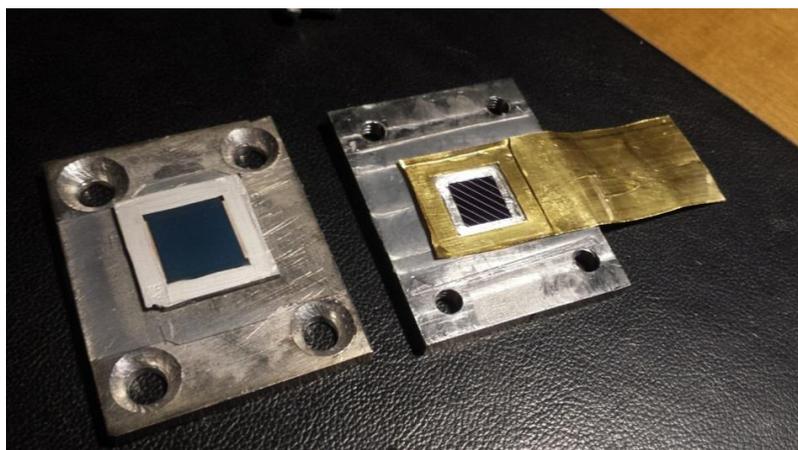
Variabile	Campione	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	Fill Factor (%)	PCE (%)
Piccola Area (0.09 cm ²)	Media	0.91	17.6	66	12.5
	Migliore	0.96	18.9	78	14.1
Larga Area (1 cm ²)	Media	0.97	15.8	67	10.3
	Migliore	0.98	21.6	70	13.8

I risultati statistici, mostrati in Tabella 2.1.3.1, riferiti alla piccola e larga area mostrano un valore medio delle efficienze calcolate in un campione di 18 celle pari a 12.5% per le celle di piccola area e 10.3% per le celle di larga area. Tali risultati sono promettenti in quanto la tecnica usata non prevede l'utilizzo del Solvent Engineering, rendendo il processo scalabile in aria.

2.2 Cella Tandem

2.2.1 Cella tandem mechanically stacked

La cella tandem meccanicamente accoppiata è stata ulteriormente migliorata mediante l'ottimizzazione del metodo di connessione delle due celle. È stato sviluppato presso il centro ricerche di ENEA "Casaccia" un porta-campioni che provvede a mantenere le due celle componenti, la cella in silicio e quella in perovskite, accoppiate diminuendo la resistenza di contatto mediante degli appositi elettrodi in lamina d'oro e argento. Il prototipo di suddetto porta-campioni è mostrato in Figura 2.2.1.1.



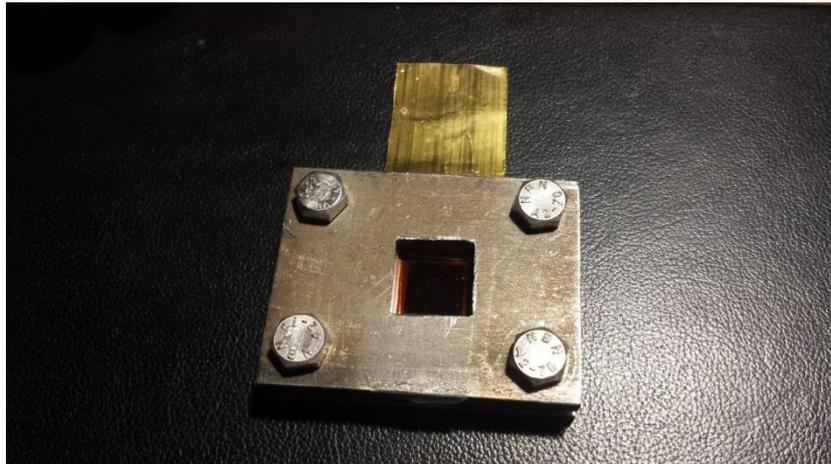


Figura 2.2.1.1: Prototipo del porta-campioni atto ad accoppiare meccanicamente le due celle componenti.

La perovskite impiegata ha una energy-gap di 1.63 eV ed è una formulazione triplo catione $(\text{CsFAMA})\text{Pb}(\text{IBr})_3$ ed è depositata per *single step* con l'aiuto di un antisolvente. Utilizzando una cella ad eterogiunzione di silicio sono state realizzate varie celle tandem, ottenendo un valore massimo di efficienza pari a 24.16% su area pari a 0.6 cm^2 . La Tabella 2.2.1.1 riporta i parametri FV delle migliori celle ottenute su area 0.6 cm^2 e 1 cm^2 , mentre nelle figure 2.2.1.2 e 2.2.1.3 sono riportate rispettivamente le curve JV e la risposta quantica esterna (EQE) della celle tandem record ottenuta nel progetto.

Tabella 2.2.1.1: Parametri fotovoltaici di celle con diversi tipi di silicio in configurazione singola o tandem con PSC.

Device	Voc (V)	Jsc (mA/cm^2)	FF(%)	PCE (%)	Area (cm^2)
Si-HJ	0.689	37.57	79.8	20.65	1.21
Tandem PSC/Si-HJ	1.722	18.67	73.6	23.67	1.21
	1.687	18.83	76.2	24.16	0.6

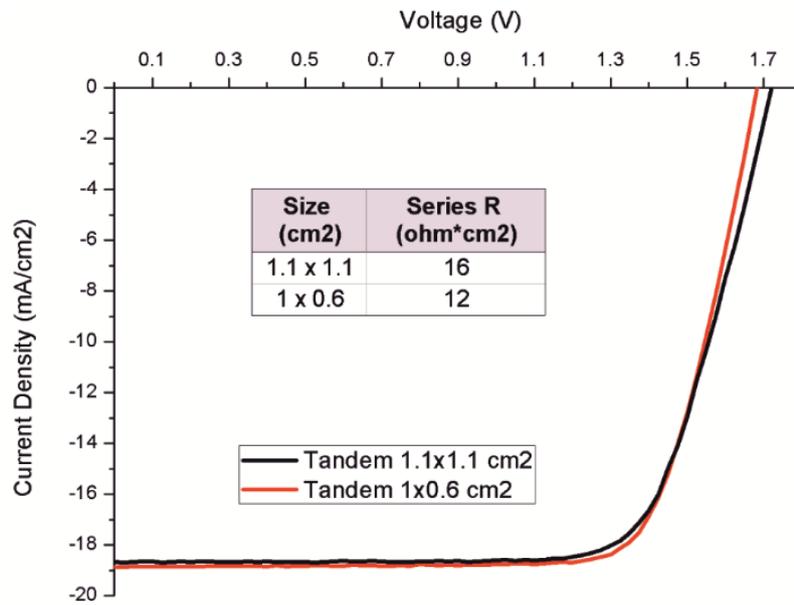


Figura 2.2.1.2: Curve J-V delle tandem ottenute dall'accoppiamento della PSC semi-trasparente con una cella ad eterogiunzione di silicio. La curva rossa mostra un dispositivo con area attiva di 0.6 cm², la curva nera corrisponde ad una tandem con area attiva di 1.2 cm².

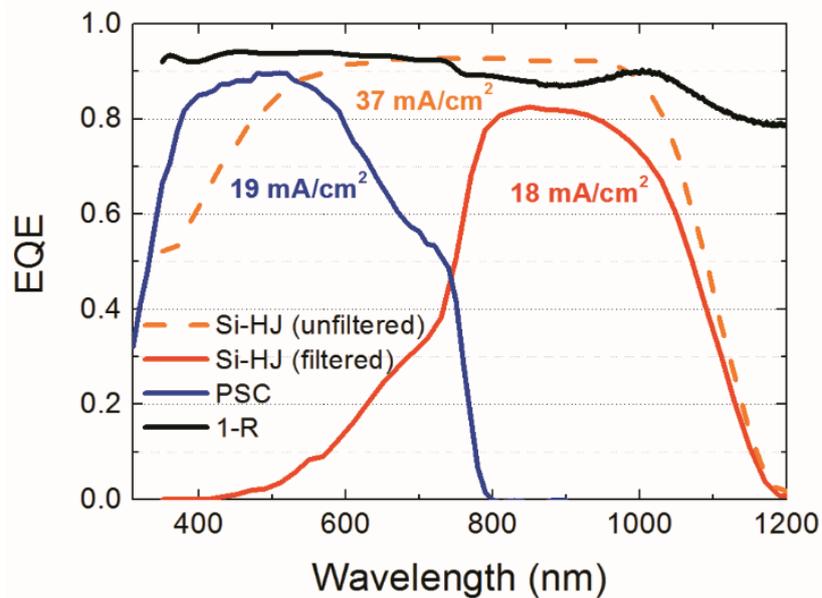


Figura 2.2.1.3: Curva JV del dispositivo tandem.

EQE delle celle PSC (curva blu), silicio eterogiunzione (curva gialla tratteggiata) e silicio eterogiunzione filtrato dalla PSC (curva rossa). La curva nera mostra l'andamento di 1-R (la porzione di radiazione persa per riflessione).

Per quanto riguarda la statistica dei dispositivi tandem accoppiati meccanicamente ottenuti nell'intero corso del triennio abbiamo una efficienza media pari a 21.9% ± 1.2% con una statistica basata su 21 celle tandem (PSC/Si-HJ). Il grafico della distribuzione è mostrato in Figura 2.2.1.4.

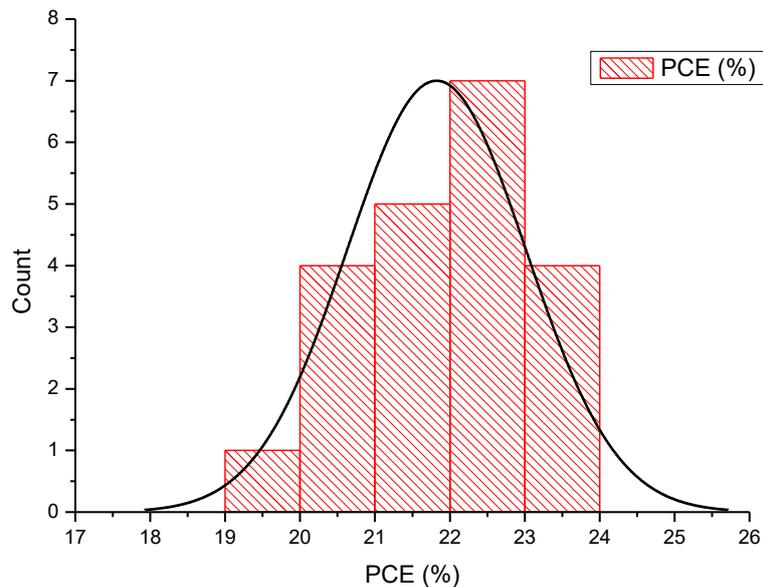


Figura 2.2.1.4: Distribuzione delle efficienze dei dispositivi tandem meccanicamente accoppiati.

2.2.2 Ottimizzazione dell'SnO₂ per celle tandem monolitiche

Sono state riscontrate delle difficoltà nel depositare lo strato di SnO₂ su AZO e su ITO: il processo sol-gel (con precursore di cloruro di stagno SnCl₂ disciolto in etanolo) causava la rimozione del primo e non ha portato buoni risultati su ITO a causa di una bassa tensione di circuito aperto (<1.3V); la deposizione a partire da una dispersione di nano-particelle di ossido di stagno in acqua deionizzata, invece, non ha avuto riscontri positivi per via della scarsa bagnabilità della soluzione sia su AZO che su ITO.

Basandosi sui risultati ottenuti in letteratura da altri gruppi di ricerca [6], è stato deciso di adottare come giunzione tunnel per la cella tandem una combinazione di due strati di ossido di silicio nanocristallino drogati di tipo p e n. Tali materiali sono stati sviluppati presso di laboratori dell'ENEA di Portici e sono utilizzati come strati trasportatori di carica nelle celle ad eterogiunzione di silicio. Questa scelta ha consentito di ottenere una buona compatibilità anche con la soluzione di nanoparticelle di ossido di stagno.

La problematica della bassa tensione di circuito aperto riscontrata sulle celle tandem monolitiche silicio/perovskite precedentemente realizzate è strettamente legata al basso spessore dello strato di SnO₂ impiegato come Electron Transporting Layer (ETL). Nello specifico, la presenza di *pinhole* e disuniformità nella deposizione del film di 20 nm di ossido di stagno su wafer di silicio ha portato al quasi totale corto circuito della *top cell* in perovskite. Tale problema è stato riscontrato sia nel caso della deposizione mediante tecnica sol-gel, che nel caso delle nanoparticelle di ossido di stagno. In aggiunta, nel caso

specifico del metodo sol-gel sembra esserci una incompatibilità con il substrato, derivante da un non ottimale allineamento dei livelli energetici. Ciò potrebbe essere causato da un danneggiamento della giunzione tunnel durante i processi di formazione del film. Il risultato di tale incompatibilità è la presenza di un'evidente barriera all'estrazione di carica, visibile nella curva JV finale della tandem, come mostrato in Figura 2.2.2.1.

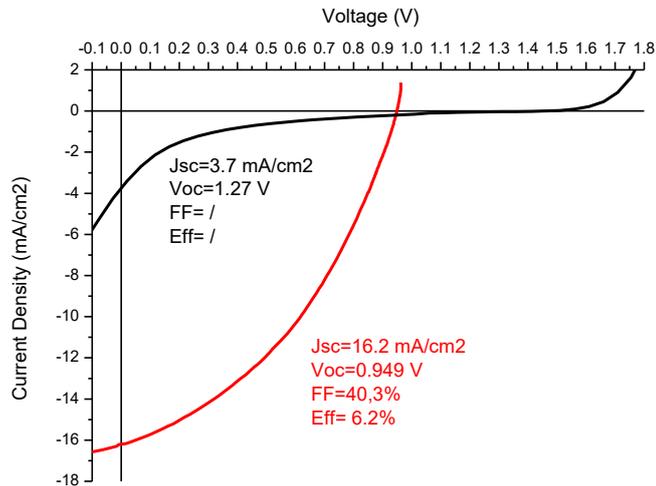


Figura 2.2.2.1: Curva JV del dispositivo tandem con SnO₂ depositato tramite solgel (Nera) e tramite nanoparticelle (Rossa).

La strategia per poter ovviare al problema della disuniformità dello strato, che causa la ridotta tensione di circuito aperto, consiste nell'effettuare una doppia deposizione delle particelle dell'ossido di stagno. Mediante ciò, è possibile rimediare alle eventuali imperfezioni della prima passata e ottenere, dunque, un film più uniforme. Altro elemento indispensabile consiste nell'assicurarsi che il substrato di silicio sia il più pulito possibile, senza la presenza di polvere o detriti che possano impedire una deposizione ottimale. I risultati ottenuti con i suddetti accorgimenti sono presentati nel paragrafo relativo alle tandem monolitiche.

2.2.3 Cella tandem monolitica

Le ottimizzazioni presentate nei paragrafi precedenti hanno consentito di migliorare il risultato ottenuto in termini di efficienza sulla cella tandem monolitica perovskite/silicio. Le celle tandem sono state realizzate presso i laboratori dell'ENEA di Portici, dove sono intervenuti i ricercatori del Dipartimento di Tor Vergata per mettere insieme i vari materiali sviluppati per entrambe le tecnologie, cella in silicio e cella in perovskite. In questa sperimentazione sono stati testati preliminarmente i film di AZO e ITO, utilizzati presso ENEA per la realizzazione delle celle in silicio, come contatto semitrasparente per le celle a perovskite a singola giunzione al fine di controllare eventuali danneggiamenti ad opera del processo di sputtering dell'HTM della cella in perovskite. Si è utilizzato come HTM un film di PTAA in quanto dalla

sperimentazione si è evidenziata una sua sufficiente resistenza al processo di sputtering per entrambi i TCO utilizzati.

L'adozione della giunzione tunnel a base di film di ossido di silicio e la scelta di effettuare una doppia deposizione di nano-particelle di ossido di stagno hanno consentito di ottenere sul dispositivo tandem monolitico delle tensioni di circuito aperto simili a quelle della cella meccanicamente accoppiata (1.74 V). Sono stati realizzati vari prototipi di dispositivo tandem monolitico sui quali l'efficienza massima misurata per la cella con contatto frontale in AZO è stata pari al 16.3%, mentre con ITO è stato ottenuto un valore di PCE pari a 14.5%. La maggiore efficienza ottenuta con il contatto semitrasparente in AZO è principalmente dovuta alla migliore corrente di corto circuito valutata su tale dispositivo. Ciò è probabilmente dovuto al miglior accoppiamento ottico tra AZO e PTTA che ha consentito di ridurre le perdite ottiche per riflessione della cella. Un ulteriore processo di ottimizzazione sia in termini di accoppiamento ottico tra TCO e HTM che in termini di ottimizzazione del processo di sputtering dello stesso TCO per ridurre eventuali danni sul film di PTTA, insieme ad un'ulteriore ottimizzazione dell'ETL consentiranno di migliorare ulteriormente le prestazioni delle celle tandem perovskite/silicio

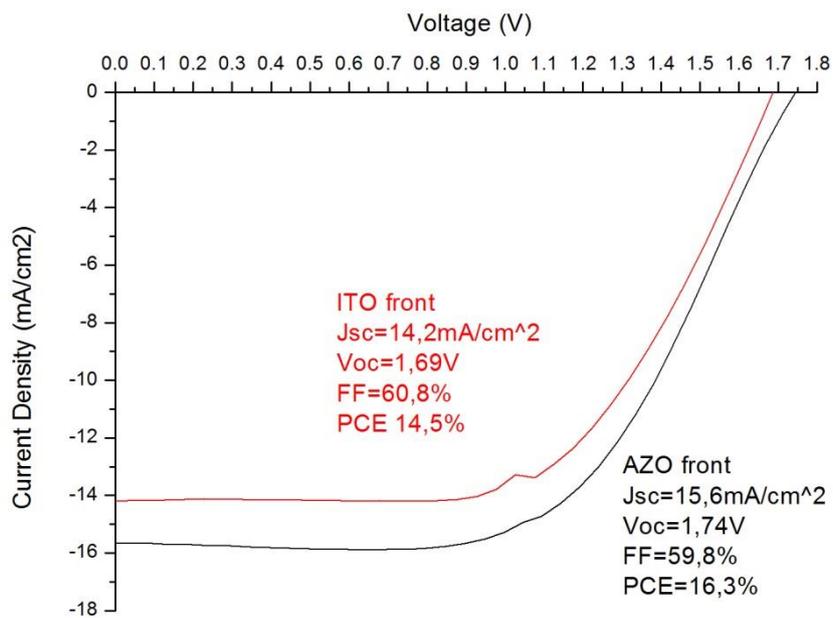


Figura 2.2.4.1: Curve JV delle celle tandem monolitiche realizzate con ITO e AZO.

3 Conclusioni

Al fine di migliorare la stabilità di celle a Perovskite, è stata sviluppata una perovskite doppio-catione Cesio Cs^+ e Formamidinio FA^+ , la più stabile presente in letteratura,[5] la cui deposizione è stata realizzata con tecnica doppio step in aria utilizzando tecniche di deposizione blade e spin coater. Ciò ha permesso di realizzare dispositivi di piccola area (0.1 cm^2) con PCE pari al 14.1% e di larga area (1 cm^2) con PCE pari al 13.8%. I risultati sono promettenti in quanto la tecnica usata non prevede l'utilizzo del Solvent Engineering, rendendo il processo scalabile in aria.

Per quanto riguarda lo sviluppo di HTM alternativi allo Spiro-OMeTAD, è proseguito lo studio del P3HT con pesi molecolari 19kDa, 124kDa, 223kDa e 338 kDa. Si è notato che aumentando il peso molecolare si ha un aumento dell'efficienza, il cui picco massimo è stato in questo frangente registrato essere 17.63%. La stabilità termica in aria a $85 \text{ }^\circ\text{C}$ per 250 ore ha mostrato risultati migliori nei casi di P3HT da 224kDa e 338kDa rispetto allo Spiro-OMeTAD.

Per quanto riguarda i dispositivi tandem silicio/perovskite, è stato realizzato un nuovo record per quanto riguarda gli esperimenti fin qui effettuati, con una efficienza del 24.12% nel caso di celle accoppiate meccanicamente e del 16.3% nel caso di celle monolitiche.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] N.R.E.L. Best Research-Cell Efficiencies [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/pv-efficiencies-07-17-2018.pdf>
- [2] N. Yaghoobi Nia, M. Zendejdel, L. Cinà, F. Matteocci, and A. Di Carlo, "A crystal engineering approach for scalable perovskite solar cells and module fabrication: a full out of glove box procedure," *Journal of Materials Chemistry A*, 10.1039/C7TA08038G vol. 6, no. 2, pp. 659-671, 2018.
- [3] N. Yaghoobi Nia, F. Matteocci, L. Cina, and A. Di Carlo, "High-Efficiency Perovskite Solar Cell Based on Poly(3-Hexylthiophene): Influence of Molecular Weight and Mesoscopic Scaffold Layer," *ChemSusChem*, vol. 10, no. 19, pp. 3854-3860, 2017/10/09 2017.
- [4] Y. Miyazawa *et al.*, "Tolerance of Perovskite Solar Cell to High-Energy Particle Irradiations in Space Environment," *iScience*, vol. 2, pp. 148-155, 2018/04/27/ 2018.
- [5] S.-H. Turren-Cruz, A. Hagfeldt, and M. Saliba, "Methylammonium-free, high-performance, and stable perovskite solar cells on a planar architecture," *Science*, vol. 362, no. 6413, p. 449, 2018.
- [6] F. Sahli *et al.*, "Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency," *Nature Materials*, vol. 17, no. 9, pp. 820-826, 2018/09/01 2018.

5 Abbreviazioni ed acronimi

PSC – Perovskite Solar Cell

ETL – Electron Transporting Layer

ETM – Electron Transporting Material

HTL – Hole Transporting Layer

HTM – Hole Transporting Material

EQE – External Quantum Efficiency

ITO – Indium Tin Oxide

FTO – Fluorine doped Tin Oxide