

# Ricerca di Sistema elettrico



Fotovoltaico di terza generazione  
per Energy Harvesters ad alta efficienza (LA3.3)

Luigi Vesce, Aldo Di Carlo

## FOTOVOLTAICO DI TERZA GENERAZIONE PER ENERGY HARVESTERS AD ALTA EFFICIENZA (LA3.3)

L. Vesce, A. Di Carlo – Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”

Con il contributo di: C. Bettiol, M. Cirillo, P. Mariani, Y. Raoui – Dipartimento di Ingegneria Elettronica, Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”

Dicembre 2024

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: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 3.3

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Paolo Sdringola, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Università degli Studi di Roma “Tor Vergata” – Dipartimento di Ingegneria Elettronica (UNIRM2\_DIE\_1)

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all’interno dell’Accordo di Collaborazione “Fotovoltaico di terza generazione per Energy Harvesters ad alta efficienza”.

Responsabile scientifico ENEA: Alessandro Lorenzo Palma

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Aldo Di Carlo

## Indice

1	Risultati attesi .....	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi .....	6
4	Prodotti sviluppati .....	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte .....	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	19
9	Pubblicazioni scientifiche.....	20
10	Eventi di disseminazione .....	21

## Indice delle figure

Fig. 1 Alcuni dei prototipi di moduli PSC sviluppati per l'integrazione nel sistema di energy harvesting e rilevazione ambientale. ....	7
Fig. 2 Celle DSSC da 3.6 cm <sup>2</sup> e relativa prestazione massima a 1000 lux. ....	10
Fig. 3 Stack della cella PSC e relative prestazioni indoor. ....	11
Fig. 4 Stack della cella PSC con elettrodo in carbonio/grafite laminato. ....	12
Fig. 5 Step del processo di fabbricazione nel caso di elettrodi laminabili realizzati con il solvent exchange (10.1016/j.solmat.2020.110517). ....	12
Fig. 6 Prestazioni delle celle con elettrodo laminato. ....	12
Fig. 7 Macchina per la deposizione in aria ambiente dei materiali presenti nello stack della cella PSC. ....	13
Fig. 8 Stack della cella PSC completamente stampata con contro-elettrodo in carbonio/grafite. ....	13
Fig. 9 Dettaglio del processo di deposizione in aria ambiente della perovskite e relativa caratterizzazione XRD. ....	14
Fig. 10 Curve JV delle celle realizzate variando la temperatura di processo del carbonio e l'intensità di illuminazione. ....	15
Fig. 11 Test di stabilità indoor a 1000 lux. ....	16
Fig. 12 Spettro di assorbimento della perovskite in differenti punti della deposizione su 110 cm <sup>2</sup> e relativa immagine. ....	16
Fig. 13 Dettaglio dell'interconnessione serie con strategia P1-P2-P3 e immagini del prototipo realizzato e incapsulato. ....	17
Fig. 14 Curve IV dei prototipi di moduli PSC sviluppati. ....	18

# 1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente:

- Realizzazione di celle DSSC/PSC per illuminazione indoor con efficienze > 25%.
- Identificazione della relazione tra caratteristiche spettrali dell'illuminatore e il gap dell'assorbitore.
- Identificazione dei limiti di efficienza per illuminazione indoor per PSC e DSSC.
- Analisi della stabilità delle celle DSSC e PSC per fotovoltaico indoor.
- Definizione di un processo di scaling per moduli DSSC per applicazioni indoor.
- Definizione di un processo di scaling per moduli PSC per applicazioni indoor.
- Realizzazione di moduli fotovoltaici DSSC e PSC su specifiche concordate con ENEA (LA3.2) per l'integrazione in un sistema per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici.

## 2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti:

- La tecnologia PSC presenta migliori performance indoor rispetto alla tecnologia DSSC (28.4% vs 13.8% a 1000 lux).
- Il tipo di perovskite a stretto bandgap ottimizzata ha risposto positivamente se illuminata con luce indoor da 200 lux a 1000 lux con temperatura di colore di 2700K-3000K.
- Sostituzione dell'elettrodo d'oro, fonte di instabilità e di alto costo, con un elettrodo stampabile a base di carbonio/grafite senza impattare negativamente sulle prestazioni del dispositivo (*risultato non previsto dal capitolato*).
- Celle scalate sia a livello di stampa omogenea su larga area che di interconnessioni di tipo serie sullo stesso substrato.
- Dimostrazione della stabilità delle celle.
- Fabbricazione dei moduli su specifiche fornite da ENEA e consegna all'Università di Salerno (UNISA\_DF) per l'integrazione e l'alimentazione dei sensori (LA3.2 e LA3.6).

Di seguito sono elencati brevemente i risultati quantitativi raggiunti in accordo con i risultati attesi:

- Efficienza cella PSC di 28.5% con contro-elettrodo in oro (processo non scalabile in glovebox) e 24.2% con contro-elettrodo in carbonio/grafite (processo scalato con processi di stampa in aria ambiente).
- Stabilità cella con illuminazione indoor per più di 1000 ore.
- Moduli PSC fabbricati con tecniche di deposizione scalabili in aria ambiente. Efficienza massima 22% in accordo con le specifiche fornite da ENEA.

### 3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti attesi come da capitolato vigente:

- Rapporto tecnico sulle attività condotte, con riferimento a: realizzazione di celle DSSC e PSC per applicazioni indoor, identificazione della relazione tra caratteristiche spettrali dell'illuminatore e la gap dell'assorbitore; identificazione dei limiti di efficienza per illuminazione indoor per PSC e DSSC; analisi della stabilità delle celle DSSC e PSC per fotovoltaico indoor; scaling up per moduli DSSC e PSC per applicazioni indoor e sulla realizzazione di moduli fotovoltaici DSSC e PSC su specifiche concordate con ENEA (LA3.2).
- Celle di III generazione tipo DSSC e PSC per illuminazione indoor con efficienze  $\geq 25\%$ .
- Moduli fotovoltaici DSSC e PSC per integrazione in un sistema per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici (ENEA, LA3.2).

## 4 Prodotti sviluppati

Sono stati individuati tre obiettivi principali per lo sviluppo dei prodotti attesi. Il primo obiettivo è relativo all'individuazione della tecnologia fotovoltaica di terza generazione tra DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell) e PSC (Perovskite Solar Cell) più promettente per fabbricare nodi IoT energeticamente indipendenti in ambienti interni, liberamente posizionabili e svincolati dalla necessità di ricarica o sostituzione delle batterie. Successivamente, la tecnologia prescelta è stata testata a livello di stabilità per poter garantire un sufficiente tempo di vita dei dispositivi e del sistema integrato con i sensori. Infine, la tecnologia è stata scalata attraverso metodi di stampa che permettano un'uniformità della deposizione. Per poter ridurre le perdite di scaling, oltre all'uniformità della deposizione è stata prevista l'interconnessione verticale di più celle sullo stesso substrato utilizzando processi di patterning laser.

Sono qui riportati i prodotti sviluppati in linea con i prodotti attesi:

- Report tecnico, contenente la descrizione delle attività svolte e dei risultati conseguiti.
- Fabbricazione di celle di III generazione tipo PSC per illuminazione indoor con efficienze dal 24% al 28%.
- Moduli fotovoltaici PSC (12) per integrazione in un sistema per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici con perdite di scaling inferiori al 15% (Fig. 1). L'integrazione è stata realizzata in collaborazione con ENEA (LA3.2) l'Università di Salerno (UNISA\_DF, LA 3.6).



Fig. 1 Alcuni dei prototipi di moduli PSC sviluppati per l'integrazione nel sistema di energy harvesting e rilevazione ambientale.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la LA3.3 non vi sono stati scostamenti tecnici/economici rispetto al capitolato vigente.

## 6 Sintesi delle attività svolte

La tecnologia PSC si è confermata essere più efficiente e integrabile a livello indoor rispetto alle DSSC. Le PSC, realizzate con perovskite triplo catione CsMAFA e contro-elettrodo in oro e le DSSC, realizzate con colorante D35cpdt ed elettrolita iodio/ioduro, hanno mostrato efficienze del 28.4% e 13.8%, rispettivamente. La tecnologia più promettente in termini di prestazioni è stata la PSC. Dopo aver sostituito il contro-elettrodo in oro con uno in carbonio/grafite in modo da rendere il dispositivo completamente stampabile, migliorandone la stabilità e riducendone i costi, si è passati ad ottimizzare l'assorbitore in perovskite e l'interfaccia di trasporto tra perovskite ed elettrodo. Le celle con un'efficienza massima di 24.2% sono risultate stabili per più di 1000h. Il processo di scaling ha prodotto moduli incapsulati di dimensioni 110 cm<sup>2</sup> con un'efficienza di 22% (perdite minori del 15%) in accordo con le specifiche fornite da ENEA per alimentare il sistema sviluppato nella LA3.2.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

La prima parte della sperimentazione ha previsto l'ottenimento di una baseline per individuare quale tra le tecnologie DSSC e PSC allo stato dell'arte dell'unità di ricerca UNIRM2\_DIE\_1 fosse quella con prestazioni migliori in condizioni di bassa illuminazione.

Le celle solari DSSC con area attiva da 3.6 cm<sup>2</sup> sono state fabbricate con tecnica di stampa screen-printing. Due substrati di vetro con ossido di stagno drogato con fluoro (FTO) costituiscono il foto-elettrodo ed il contro-elettrodo. Tutti i materiali coinvolti vengono depositati tramite la tecnica della serigrafia in modo da definire anche l'area di deposizione. Inchiostri di biossido di titanio (TiO<sub>2</sub>) e platino (Pt) vengono depositati rispettivamente su foto- e contro-elettrodo. A seguito di un sintering a 500 °C per 30 minuti in cui vengono eliminati i composti organici e si realizza la matrice mesoporosa, i foto-elettrodi vengono immersi in un colorante di tipo D35cpdt Dyenamo per permetterne la sensibilizzazione. I contro-elettrodi vengono invece trattati termicamente a 480 °C per 15 minuti. La procedura di sigillatura e assemblaggio si basa su una guarnizione termoplastica in Bynel, sagomata in base alle celle e successivamente fusa mediante una pressa a caldo. Un elettrolita (HSE, GreatCell Solar) viene inserito tramite la tecnica di riempimento sottovuoto attraverso fori (uno per ogni cella) situati sul bordo del modulo e successivamente sigillato. In seguito, la camera tra i due vetri viene riempita di elettrolita Great Cell Solar HSE (Fig. 2) con la tecnica del vacuum back-filling. Le prestazioni hanno mostrato un'efficienza di 13.8% a 1000 lux di illuminazione (Fig. 2).



MP	Voc[V]	Isc[mA]	FF(%)	Eff[%]	Pmax[μW]
D35CPDT HSE	0.614866	-0.3505	73.8968	13.7922	159.4

Fig. 2 Celle DSSC da 3.6 cm<sup>2</sup> e relativa prestazione massima a 1000 lux.

Le celle solari PSC con un'area attiva di 0.5 cm<sup>2</sup> sono realizzate su un vetro conduttivo FTO depositando TiO<sub>2</sub> come ETL. Un layer compatto di TiO<sub>2</sub> è depositato con tecnica spray pirolisi a 450 °C, seguito da un layer mesoporoso di TiO<sub>2</sub> depositato con tecnica spin-coating seguito da un sintering a 500 °C. La perovskite di tipo CsMAFA è depositata con tecnica spin-coating one-step con clorobenzene come anti-solvente in glove box. Successivamente, nello stesso ambiente e con spin-coater, è depositato lo Spiro-MeOTAD come HTL ed evaporato oro come contro-elettrodo (Fig. 3). Le prestazioni indoor a 1000 lux hanno mostrato un'efficienza massima del 28.4% (Fig. 3).

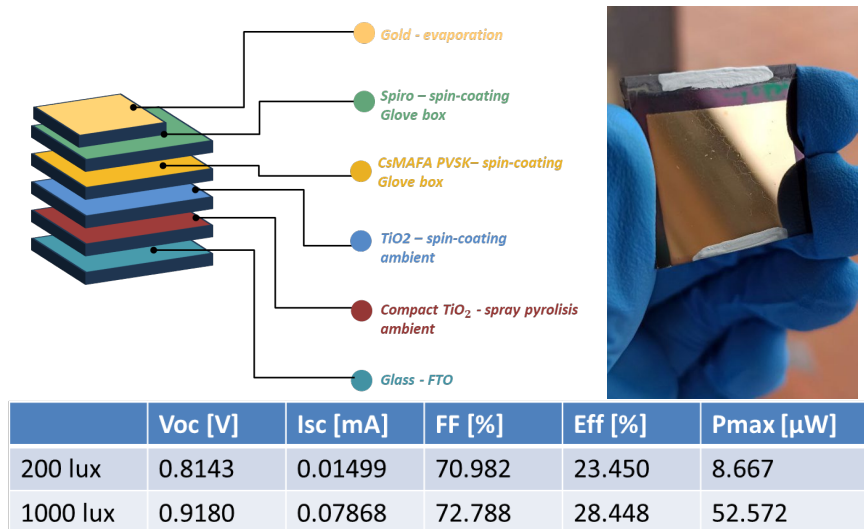


Fig. 3 Stack della cella PSC e relative prestazioni indoor.

Le celle DSSC hanno mostrato un'efficienza massima di 13.8% con  $44 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , mentre le celle PSC con un contro-elettrodo di riferimento in oro un'efficienza massima del 28.4% con  $105.2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Tra le due tecnologie, quella DSSC si è mostrata più pronta in termini di scaling dei dispositivi e di utilizzo di tecniche di stampa in aria ambiente, definendo quindi il processo di scaling come da capitolato. Le prestazioni maggiori della tecnologia PSC hanno portato però a scegliere quest'ultima come candidata per il prosieguo del progetto, in cui si è cercato di realizzare lo stack completamente stampato su aree maggiori in aria ambiente. A supporto di questa decisione, in letteratura è ampiamente dimostrato come la perovskite abbiano mostrato efficienze superiori in condizioni di illuminazione artificiale rispetto ai coloranti delle DSSC. Le PSC mostrano una Voc più elevata rispetto alle DSSC permettendo di ridurre il numero di celle interconnesse e quindi l'ingombro del modulo. La stessa considerazione vale per la densità di potenza.

Prima di passare all'ottimizzazione dell'assorbitore relativamente alle caratteristiche spettrali indoor si sono analizzati quali fossero gli step di processo non ancora pronti per ottenere un dispositivo scalabile in aria ambiente. Il primo passo per poter ottenere un dispositivo PSC completamente stampabile è stato quello di rimuovere l'oro evaporato come contro-elettrodo. Quest'ultimo oltre ad essere non stampabile e ad alto costo, comporta problemi come la diffusione ionica nella perovskite, l'ossidazione ed una bassa idrofobicità. Queste sono tra le principali cause di instabilità del dispositivo. È stato quindi sostituito il contro-elettrodo in oro con uno in carbonio/grafite con il triplice obiettivo di avere un dispositivo scalabile/stampabile, a basso costo e senza i problemi menzionati tipici di un elettrodo in metallo. L'elettrodo in carbonio/grafite può essere laminato o stampato a bassa temperatura. Rispetto all'architettura con questo tipo di elettrodo ad alta temperatura, in questo caso è possibile integrare un HTL ottimizzato, controllare la cristallizzazione della perovskite, utilizzare substrati flessibili e le relative tecniche di stampa roll-to-roll.

In un primo tentativo è stato utilizzato uno stack che prevede ancora la tecnica spin-coating per i layer ETL-PVSK-HTL (Fig. 4), ma in cui il contro-elettrodo in carbonio/grafite viene laminato con la tecnica del solvent-exchange. La pasta di carbonio/grafite Dyenamo viene depositata con blade su un vetrino che viene poi immerso in etanolo per rimuovere i solventi presenti nell'inchiostro. Il foglio di carbonio derivato viene laminato con una pressa sulla cella (Fig. 5).



Fig. 4 Stack della cella PSC con elettrodo in carbonio/grafite laminato.

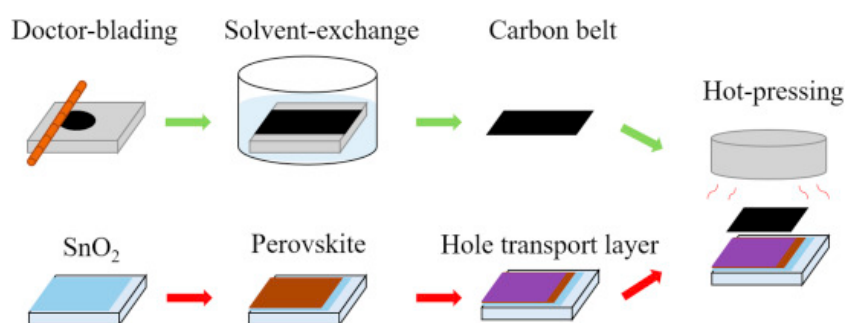


Fig. 5 Step del processo di fabbricazione nel caso di elettrodi laminabili realizzati con il solvent exchange (10.1016/j.solmat.2020.110517).

Le prestazioni hanno mostrato un'efficienza massima del 19.5% (densità di potenza di 65.89  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) con luce indoor a 1000 lux. I valori del fill factor dal 75% al 80% mostrano una bassa resistenza di contatto all'interfaccia, oltre che la densità di potenza risulta essere adatta per sensori IoT di bassa potenza (Fig. 6).

Cell	Voc [V]	Jsc [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]	Isc [ $\mu\text{A}$ ]	FF [%]	PCE [%]	Pmax [ $\mu\text{W}$ ]	Power density [ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ]
A	0.80	109.40	9.85	75.05	19.49	5.93	65.89
B	0.80	109.76	9.88	74.77	19.44	5.91	65.67
C	0.81	97.99	8.82	79.84	18.72	5.70	63.33
D	0.82	101.87	9.17	75.23	18.64	5.67	63.00
E	0.78	101.73	9.16	78.48	18.53	5.64	62.67
Mean	0.80±0.01	104.15±5.20	9.38±0.47	76.67±2.33	18.96±0.46	5.77±0.14	64.11±1.54

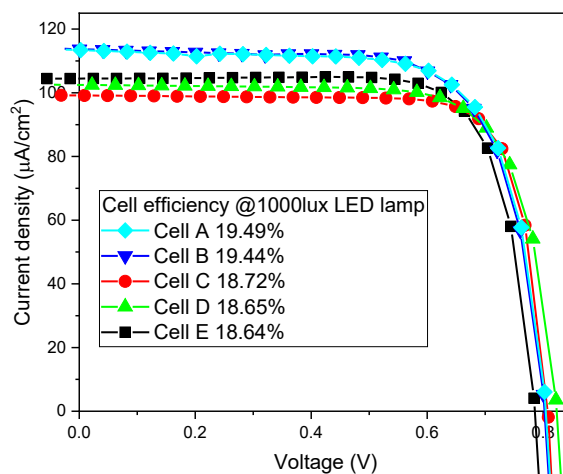


Fig. 6 Prestazioni delle celle con elettrodo laminato.

Successivamente, si è passati ad ottimizzare i singoli layer (composizione dei materiali e relativi parametri di processo) per poterli rendere stampabili tramite tecniche di deposizione scalabili in aria ambiente per poter rispondere alle richieste di progetto. In particolare si è scelta la tecnica blade-coating utilizzando la macchina semi-automatica presente nei laboratori in cui è possibile integrare differenti tecniche di deposizione (Fig. 7).

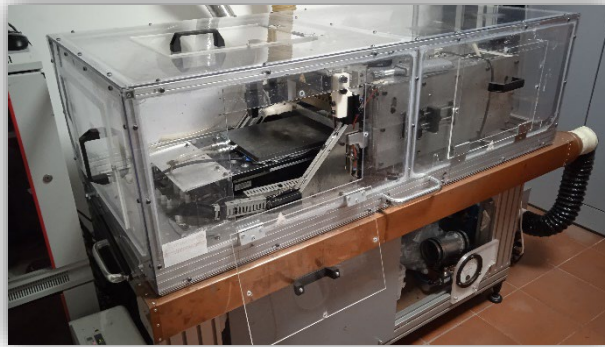


Fig. 7 Macchina per la deposizione in aria ambiente dei materiali presenti nello stack della cella PSC.

Lo stack utilizzato è di tipo nip ed è rappresentato in Fig. 8. L'ETL depositato per spin-coating è stato sostituito con un layer di SnO<sub>2</sub> depositato per blade-coating e trattato termicamente a bassa temperatura. Il layer di Perovskite di tipo FAPI è stato depositato con un processo one-step blade-coating. La stessa tecnica di deposizione è stata utilizzata anche per depositare passivante, HTL ed elettrodo di carbonio/grafite.

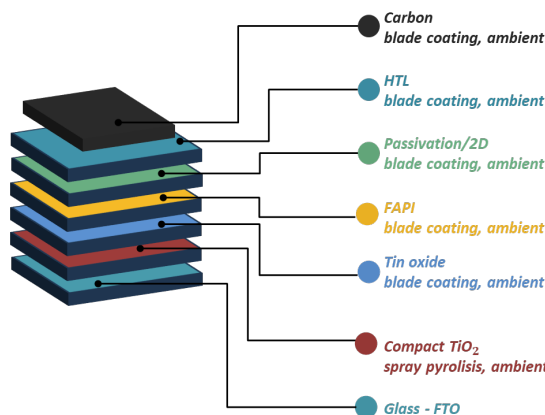


Fig. 8 Stack della cella PSC completamente stampata con contro-elettrodo in carbonio/grafite

Una soluzione di SnO<sub>2</sub> in acqua è depositata su un vetro conduttivo FTO e poi trattato termicamente a 150 °C per 30 minuti. La perovskite FA<sub>0.91</sub>Cs<sub>0.09</sub>PbI<sub>3</sub> con aggiunta di MACl in DMF/DMSO è depositata con tecnica one-step in cui si deposita prima la perovskite e successivamente antisolvente (IPA) per rimuovere il DMSO e favorire la cristallizzazione della perovskite che si completa nella fase di trattamento termico a 160 °C (Fig. 9). In particolare, la soluzione di perovskite è stata depositata tramite la tecnica di blade coating assistita da un flusso di aria calda. Il processo di deposizione prevede che la perovskite venga depositata sul substrato con una lama che spinge il materiale su tutta l'area, assistita da un flusso di aria calda che rimane in funzione anche durante la deposizione dell'anti-solvente. Il flusso d'aria calda applicato sulla parte superiore del substrato, subito dopo la deposizione della perovskite con blade coating, realizza una pre-essiccazione dello strato e ne uniforma la superficie.

Successivamente, viene applicato IPA (isopropanolo) per rimuovere l'eccesso di DMF/DMSO e favorire la cristallizzazione della perovskite, poiché ha un punto di ebollizione più basso e una viscosità elevata rispetto al DMSO. La presenza di solventi ad alto punto di ebollizione provoca la precipitazione di  $\text{PbI}_2$  durante la nucleazione dei cristalli di perovskite, causando un'incompleta conversione dello strato nel caso in cui il processo non sia ottimizzato. In un processo di fabbricazione scalabile come la tecnica di blade coating, la formazione del film bagnato è relativamente più lenta rispetto alla tecnica di spin-coating. In questo contesto, la nucleazione della perovskite, la crescita dei cristalli e l'evaporazione del solvente giocano un ruolo cruciale nella morfologia del film e nelle prestazioni del dispositivo. Durante il processo di nucleazione, alcuni nuclei o seeds fungono da template per la crescita dei cristalli. La concentrazione di queste specie deve essere superiore alla loro solubilità per raggiungere uno stato di sovrasaturazione. Nel metodo di deposizione esposto, lo stato iniziale della soluzione si porta in una fase di sovrasaturazione a causa del flusso d'aria e della concentrazione della soluzione di perovskite.

Dalla letteratura è chiaro che lo strato di perovskite depositato con blade-coating presenta domini cristallini più ampi rispetto a quello ottenuto con spin-coating, poiché durante il processo di asciugatura del solvente il metodo blade-coating consente un tempo di crescita dei grani più lungo. L'approccio proposto offre un chiaro vantaggio nella fabbricazione di celle riproducibili ed efficienti e permette una facile scalabilità alla dimensione dei moduli, riducendo le perdite di omogeneità. Inoltre, va sottolineato che il processo blade-coating ha un basso consumo di materiale (inferiore del 75% rispetto alla tecnica spin-coating) e un potenziale elevato di produttività.

La caratterizzazione XRD mostra la fase alfa (101), (012), (021), (202) e (211) della perovskite (Fig. 9).

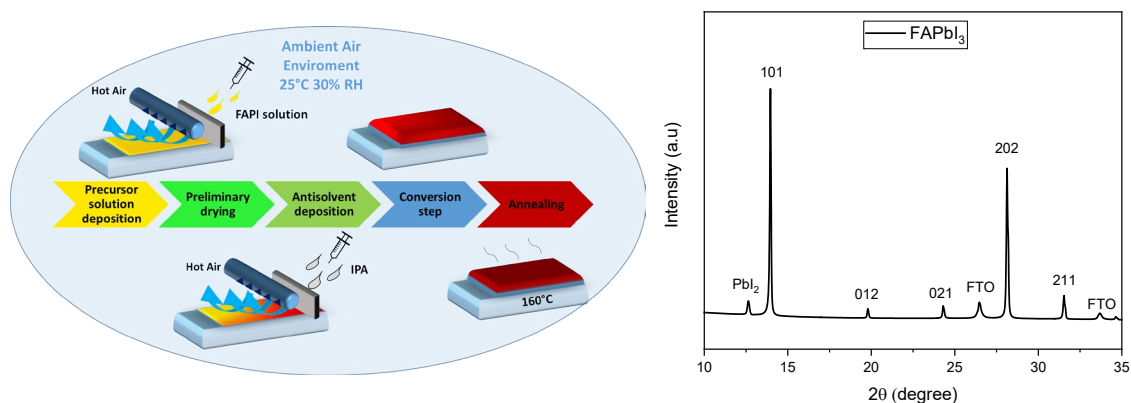
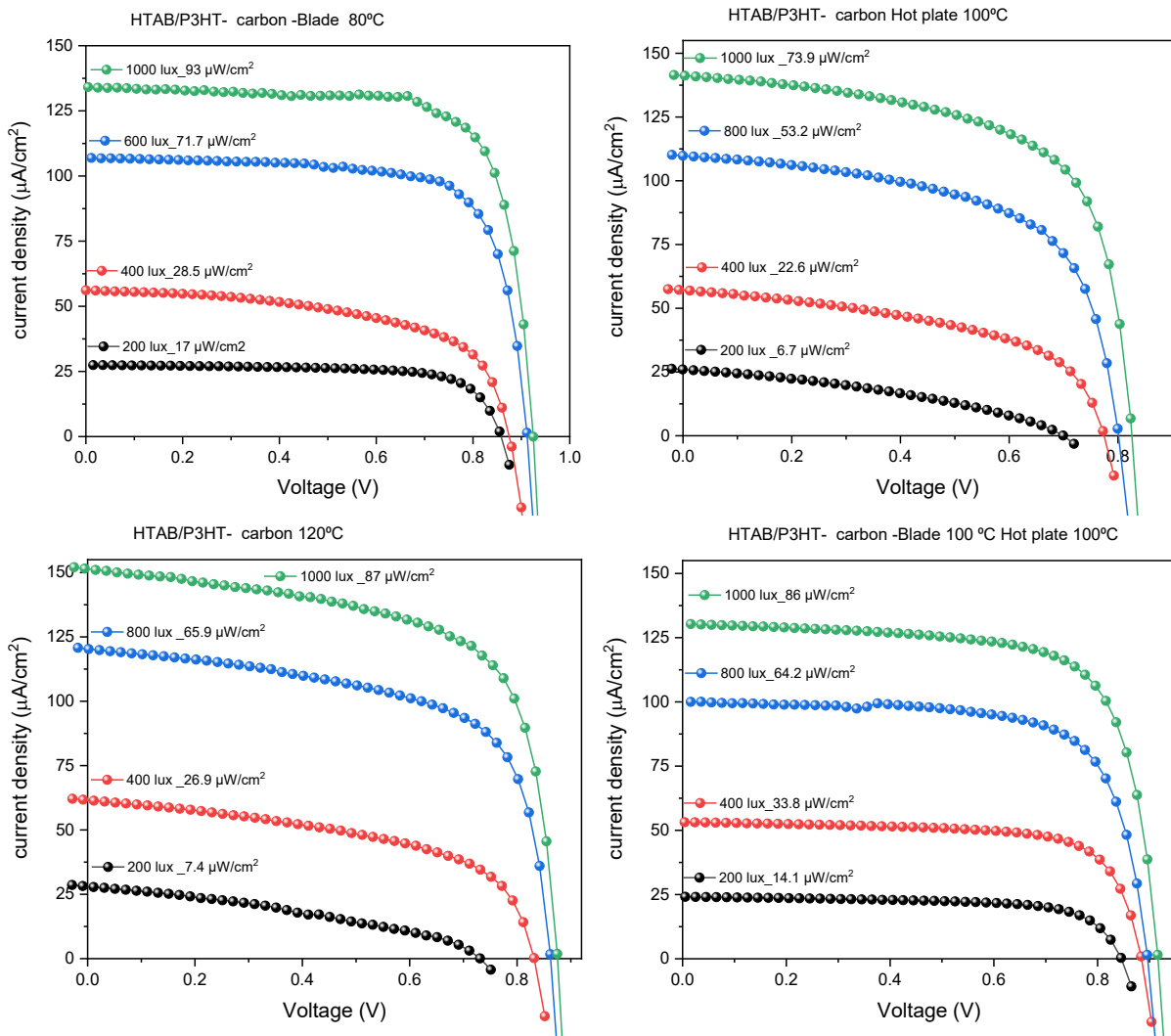


Fig. 9 Dettaglio del processo di deposizione in aria ambiente della perovskite e relativa caratterizzazione XRD.

La perovskite utilizzata ed il relativo gap presenta le prestazioni massime in presenza di illuminatori con caratteristiche spettrali relative alla temperatura di colore inferiore ai 3000 K pur conservando il funzionamento per valori superiori.

Il passivante utilizzato è HTAB (hexyl trimethylammonium bromide) che migliora l'interfaccia tra la perovskite e il P3HT utilizzato come HTL. Entrambi i materiali sono stati depositati con la stessa tecnica di deposizione di blade-coating assistita con un flusso di aria vista precedentemente. Un inchiostro a base di carbonio/grafite è stampato e poi riscaldato a 80-120 °C per realizzare il contro-elettrodo della cella. In Fig. 10 sono riportate le curve JV a differenti illuminazioni e temperature di processo del contro-elettrodo ed il dettaglio della

cella migliore. Le celle hanno mostrato un'efficienza massima di 22.1% (17.1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) e 24.2% (93  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) a 200 e 1000 lux, rispettivamente. I valori oltre il 70% di fill factor mostrano una bassa resistenza di contatto all'interfaccia.



Power irradiance (Lux)	Voc (V)	Isc ( $\mu\text{A}$ )	Jsc ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	FF (%)	Pmax ( $\mu\text{W}$ )	Max Power ensity ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )
200	0.85	35.58	27.37	72.86	22.16	17.05
400	0.89	74.18	57.06	74.00	37.09	28.53
800	0.91	138.71	106.70	74.00	93.00	71.54
1000	0.92	173.82	133.71	75.23	120.92	93.01

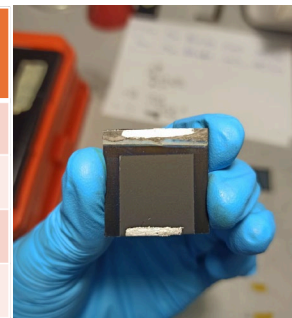


Fig. 10 Curve JV delle celle realizzate variando la temperatura di processo del carbonio e l'intensità di illuminazione.

Dopo aver definito la tecnologia più adatta alle condizioni di illuminazione indoor, ottimizzato i materiali presenti nello stack della cella PSC per illuminazione a bassa intensità, adottato processi di deposizione scalabili in aria ambiente si è passati a testare la stabilità della cella per verificare la possibilità di una reale applicazione. Il test di stabilità è stato condotto per 1500 ore mostrando prestazioni stabili non inferiori al 90% del valore iniziale (Fig. 11).

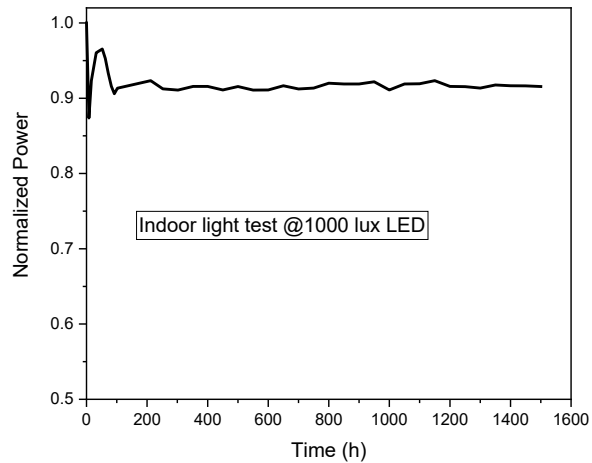


Fig. 11 Test di stabilità indoor a 1000 lux.

Nel passaggio da cella di laboratorio a modulo, si verificano alcune perdite di efficienza: la perdita dovuta alla resistenza del substrato conduttivo, la perdita nell'area inattiva delle interconnessioni e la perdita di resistenza delle interconnessioni. La progettazione del modulo e il patterning delle interconnessioni possono affrontare e limitare questi problemi. In particolare, l'impatto della perdita resistiva dei substrati è ridotto utilizzando substrati a bassa resistenza (inferiore a 10 ohm/sq) e ottimizzando la larghezza delle celle. L'area inattiva delle interconnessioni viene ridotta minimizzando la larghezza della linea di interconnessione e la distanza di separazione nel processo di patterning laser. Anche le perdite di resistenza delle interconnessioni sono correlate al processo di ablazione laser. Inoltre, sono presenti perdite dovute alla disuniformità degli strati depositati quando le dimensioni aumentano. Queste sono principalmente legate alle tecniche di deposizione, alla composizione del materiale e all'ambiente di deposizione. Un processo scalabile, ripetibile e ottimizzato è fondamentale per ottenere dispositivi con perdite ridotte nel passaggio da piccola a larga area.

Le deposizioni effettuate su substrato di dimensioni 2.5x2.5 cm<sup>2</sup> sono state scalate fino ad una dimensione di 110 cm<sup>2</sup>. In particolare, la perovskite si è confermata omogenea come è possibile verificare dalla Fig. 12 in cui è riportato lo spettro di assorbimento in differenti punti del substrato.

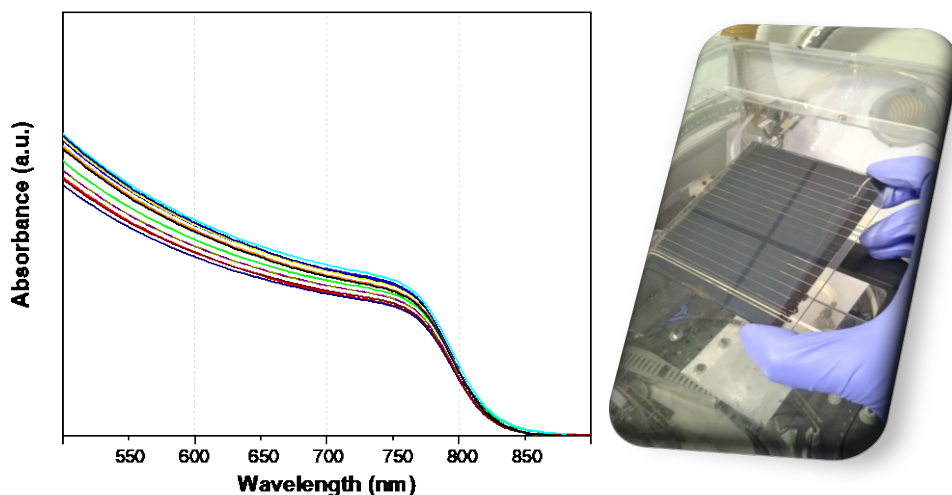


Fig. 12 Spettro di assorbimento della perovskite in differenti punti della deposizione su 110 cm<sup>2</sup> e relativa immagine.

Nel processo di scaling da cella a modulo giocano un ruolo fondamentale, oltre le eventuali disomogeneità dei layer, anche le resistenze dovute al substrato conduttivo e alle zone di interconnessione. Per ridurre la resistenza serie del substrato conduttivo è stato necessario interconnettere in serie più celle in modo da limitare le perdite dovute alle ricombinazioni di cariche generate. Nello schema di Fig. 13 è riportata la strategia di interconnessione P1-P2-P3 che mitiga questi problemi dividendo il campione in celle (P1) e rimuovendo selettivamente una porzione dello stack (P2) in modo da creare la zona di interconnessione verticale tra una cella e la seguente che sarà riempita dalla deposizione del contro-elettrodo. Questi due processi sono stati fatti con un'ablazione laser selettiva del FTO (P1) e dello stack ETL/PVSK/HTL (P2), mentre la rimozione del contro-elettrodo (P3) avviene durante la deposizione mascherata dello stesso. In particolare, il modulo fabbricato è composto da 8 celle connesse in serie.

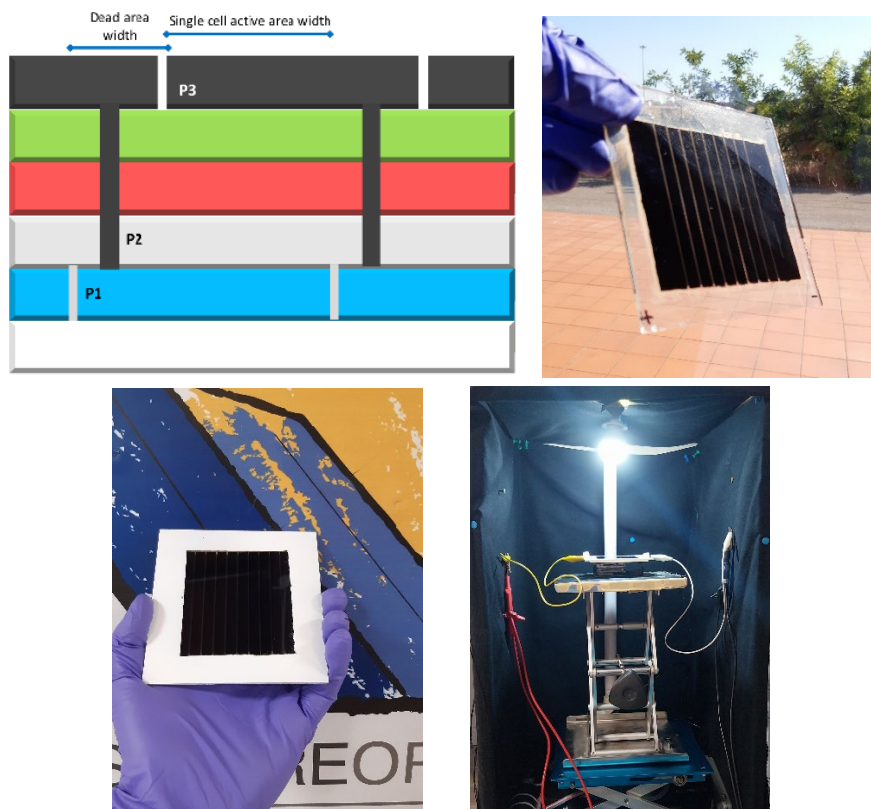


Fig. 13 Dettaglio dell'interconnessione serie con strategia P1-P2-P3 e immagini del prototipo realizzato e incapsulato.

In Fig. 14 sono riportate le curve di alcuni dei 12 prototipi realizzati per essere integrati nel sistema per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici. L'efficienza massima è stata del 24.6% a 200 lux e del 22% a 1000 lux con luce a 2700K (perdita di upscaling inferiore al 15%), in linea con quanto richiesto da specifiche ENEA.

I prototipi sviluppati sono stati incapsulati laminando con l'applicazione di vuoto, pressione e temperatura un adesivo PIB visco-elastico che non ha comportato alcun impatto sulle prestazioni dei dispositivi (Fig. 13). I moduli sono stati poi consegnati a ENEA per poter essere integrati con il sistema di sensori e supercapacitori (ENEA, LA3.2) e la scheda ibrida per il monitoraggio ambientale (UNISA\_DF, LA3.6). I prodotti sono attualmente in funzione nel sistema per il recupero e l'accumulo di energia e per il monitoraggio degli edifici sviluppato all'interno della LA3.2.

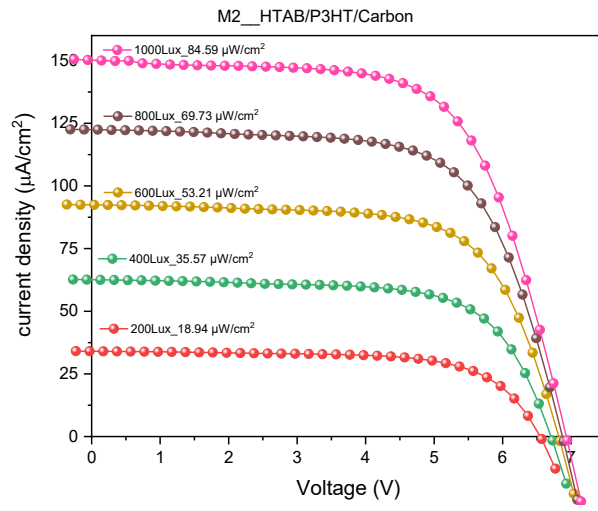


Fig. 14 Curve IV dei prototipi di moduli PSC sviluppati.

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA3.3 il capitolato di progetto non prevede consulenze, né sono state utilizzate nel corso dello svolgimento della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche risultanti dall'attività svolta nella LA3.3:

- F. D. Amico, B. de Jong, M. Bartolini, D. Franci, A. Dessì, L. Zani, X. Yseiri, E. Gatto, A. Santucci, A. Di Carlo, G. Reginato, L. Cinà, L. Vesce, Recent advances in organic dyes for application in dye-sensitized solar cells under indoor lighting conditions, *Materials* 2023, doi: 10.3390/ma16237338
- L. Vesce, Z. Abbas, M. Stefanelli, S. Podapangi, H. Nikbakht, A. Di Carlo, Low temperature carbonio electrodes for low light performing perovskite solar cells, 2024 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2024 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe Proceedings, doi: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope61470.2024.10750973

## 10 Eventi di disseminazione

Elenco degli eventi di disseminazione risultanti dall'attività svolta nella LA3.3:

- 24th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Roma (Italia), 17-20/06/2024, presentazione orale: "Low temperature carbonio electrodes for low light performing perovskite solar cells"
- 2nd International Conference on Carbonio Electrode-Based Perovskite Solar Cells (Carbonio Club 2024), online, 10-11/10/2024, presentazione orale: "Fully printable carbonio-based perovskite module for indoor application"
- Technologies and Innovative Solutions for Energy Efficiency Workshop, Salerno (Italy), 18/10/2024, presentazione orale invited: "Towards the fully printed perovskite solar technology"
- Convegno conclusivo del Progetto 1.5 del Piano Triennale di realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale (RdS) - Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica - Risultanze dei WP3 e WP4, Roma (Italia), 27/11/2024, presentazione orale invited "Fotovoltaico di terza generazione per Energy Harvesters ad alta efficienza"