



Ricerca di Sistema elettrico

Perfezionamento della geometria dei moduli e dei processi di laser-patterning

N. Yaghoobi Nia, L. A. Castriotta, L. Vesce, A. Di Carlo

PERFEZIONAMENTO DELLA GEOMETRIA DEI MODULI E DEI PROCESSI DI LASER-PATTERNING

N. Yaghoobi Nia, L. A. Castriotta, L. Vesce, A. Di Carlo

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.1 Fotovoltaico ad alta efficienza

Work package: Studio e sviluppo di materiali innovativi per applicazioni fotovoltaiche

Linea di attività - LA 2.23 Moduli FV: perfezionamento della geometria dei moduli e dei processi di laser-patterning

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri ENEA

Responsabile del Work package: Paola Delli Veneri ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo e caratterizzazione di celle e moduli a perovskite alogenata"

Responsabile scientifico ENEA: Vera La Ferrara

Responsabile scientifico Università di Roma To Vergata: Aldo Di Carlo

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 OTTIMIZZAZIONE LASER PATTERNING	6
2.2.1 <i>Ottimizzazione Processo P1</i>	6
2.1.2 <i>Ottimizzazione Processo P2</i>	7
2.1.3 <i>Ottimizzazione processo P3</i>	9
2.2 OTTIMIZZAZIONE DEI MATERIALI DEI PROCESSI DI DEPOSIZIONE SU MODULI	10
2.2.1 <i>Ottimizzazione su Moduli opachi</i>	10
2.2.1.1 <i>Ottimizzazione del P3HT e suo utilizzo per la fabbricazione del modulo</i>	10
2.2.1.2 <i>Ottimizzazione PTAA e suo utilizzo per la fabbricazione del modulo</i>	14
2.2.1.3 <i>Modulo con SnO₂, PTAA e interlayer di perovskite 2D con processo a bassa temperatura.</i>	17
2.2.2 <i>Moduli semitrasparenti</i>	19
2.2.2.1 <i>Moduli semitrasparenti di piccola area con perovskite CsMAFAPb(I_xBr_{1-x})₃</i>	19
2.2.2.2 <i>Modulo semitraspernte su substrato di 10x10 cm².</i>	21
3 CONCLUSIONI.....	22
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	23
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	24

Sommario

In questo report sono descritte le attività di ricerca svolte sull'ottimizzazione della geometria del modulo e delle celle poste in connessione serie, per mettere a punto i processi di patterning mediante laser necessari per definire le celle componenti del modulo. Lo studio è partito da un'analisi teorica di design per ridurre al minimo le perdite resistive date dalla connessione in serie di celle. Successivamente si è passato ad un'ottimizzazione dei processi laser aggiuntivi in atto nella fabbricazione di moduli, quali la rimozione del foto-elettrodo (processo P1), dello strato attivo (processo P2) e del contro elettrodo (processo P3) al fine di massimizzare l'apertura ratio (o geometrical fill factor) del modulo e rimuovere efficacemente gli strati richiesti nei vari processi. Questa ottimizzazione è stata effettuata sia su dispositivi a perovskite con architettura n-i-p. L'ottimizzazione sul modulo è stata migliorata mediante l'uso di diverse perovskiti e strati trasportatori di lacune (HTL), passando dalla molecola organica SpiroMeOTAD ai polimeri organici P3HT e PTAA, dimostrando una migliorata stabilità termica e sotto luce solare. Infine, è stata avviata l'ottimizzazione del processo P3 di rimozione del contro elettrodo anche con materiali semitrasparenti come l'ITO. Questa duplice ottimizzazione dei materiali e del design ci ha permesso di raggiungere efficienze del 13.3% e 17.05% mediante l'uso di P3HT e PTAA usando l'oro come contatto opaco con substrati $10 \times 10 \text{ cm}^2$, 18.1% per moduli con area attiva di 10 cm^2 e del 12.6% utilizzando ITO come contatto semitrasparente su moduli.

1 Introduzione

La scalabilità di dispositivi da piccola area, inferiori al 0.1cm^2 , a moduli a Perovskite con area superiore di 1cm^2 comporta l'uso aggiuntivo di 3 processi, la maggior parte delle quali svolti tramite laser patterning. Mentre la resistività dello strato conduttivo trasparente (TCO) potrebbe essere trascurabile per dispositivi di piccola area ($<1\text{cm}^2$), questo non è il caso per quelli di grande area. Ci sono due opzioni per mitigare le perdite resistive: l'uso di una griglia metallica per la raccolta di corrente come per i wafer di Si o la divisione del modulo collegando le celle in serie. Una griglia metallica è adatta per i wafer di silicio, ma non sarà sufficiente per dispositivi molto grandi, di alcuni metri quadrati (un modulo di 2m^2 con un'uscita di densità di corrente di 25mA cm^{-2} genererebbe 500A di corrente). Poiché gli strati di un dispositivo a film sottile sono depositati su un substrato (vetro, polimeri, o fogli di metallo), questi possono essere patternati durante la loro deposizione o successivamente (mediante ablazione laser o tracciatura meccanica). Utilizzando uno di questi metodi, è possibile patternare gli strati per fabbricare un modulo composto da celle collegate in serie. In questa disposizione, la corrente di uscita del modulo è limitata a quello di una sottocella, diminuendo drasticamente le perdite resistive ed eliminando la necessità di reti di raccolta della corrente. Questo metodo è il più utilizzato per potenziare una cella solare a film sottile e la tecnologia a perovskite non fa eccezione[1]. La tensione del modulo sarà, idealmente, la somma delle tensioni delle celle, mentre la corrente del modulo sarà limitata dalla corrente più bassa prodotta da una delle celle. Pertanto, sviluppare un processo di deposizione omogeneo per gli strati funzionali è essenziale per massimizzare le prestazioni del modulo. Il metodo più comune impiegato per realizzare l'interconnessione di tale architettura è chiamato processo P1-P2-P3, rappresentati da 3 incisioni laser. Il processo P1 isola l'elettrodo inferiore delle celle vicine. Durante il P2 la fase di patterning rimuove selettivamente una porzione dell'intero stack dello strato attivo e di quelli trasportatori. Infine, il processo P3 viene utilizzato per separare lo strato di elettrodo superiore appena realizzato. La superficie del modulo risultante è, così, costituita da alcune zone attive che sono dedicate alla fotogenerazione di cariche elettriche e, quindi, alla conversione dell'energia fotovoltaica, e zone morte, dedicate alla interconnessione tra celle adiacenti. È possibile definire l'Area Attiva (AA) come quella parte del substrato dedicato alla conversione dell'energia fotovoltaica, e la Dead Area (DA), parte dove avviene l'interconnessione delle celle che non contribuisce alla conversione dell'energia. La DA è formata dalle zone P1, P2 e P3 e da due aree di sicurezza che si interpongono tra loro. Il rapporto tra l'area fotoattiva (AA) e l'area di apertura del modulo (AR, la somma dell'area attiva e morta) viene solitamente indicato come fattore di riempimento geometrico (GFF). Uno schema rappresentativo è mostrato in Figura 1. In questo report analizziamo teoricamente ed empiricamente il design da utilizzare per la realizzazione di un modulo fotovoltaico a perovskite, utilizzando l'architettura n-i-p. I tagli laser vengono effettuati mediante l'uso di un laser UV al nanosecondo con cristallo Nd:YVO₄, definendo con precisione i parametri di fluensa, potenza, velocità e distanza di scansione (RSD). Successivamente, vengono riportate le ottimizzazioni dei materiali ottenuti cambiando tipo di trasportatore di carica, passando dallo SpiroMeOTAD al P3HT e PTAA. Infine, abbiamo ottimizzato il processo P3 con un contatto semitrasparente come l'ITO, che ci permette di avere una maggiore trasmittanza media visibile e potenzialmente un miglior contatto per applicazioni tandem.

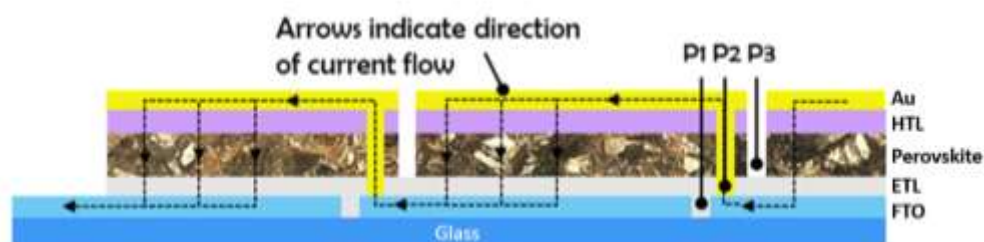


Figura 1 Schema del flusso di carica nel collegamento in serie tra le celle nel caso di struttura n-i-p.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Ottimizzazione Laser Patterning

2.2.1 Ottimizzazione Processo P1

Il processo P1 durante la fabbricazione dei moduli è il primo processo che coinvolge l'ablazione dello strato conduttivo del substrato in analisi, al fine di avere un pattern di celle in serie la cui corrente possa circolare unidirezionalmente. poca attenzione è prestata a questo processo in quanto l'obiettivo è quello di isolare la parte conduttiva e creare un pattern: quasi tutti i pannelli fotovoltaici a film sottile si basano sul vetro sodico calcico (SLG) che contiene ioni alcalini. Na^+ è il più probabile che si diffonda negli strati attivi a causa del suo raggio ridotto e della bassa carica. Ciò è particolarmente vero nei moduli che utilizzano l'interconnessione monolitica P1-P2-P3 perché nelle ablazioni fatte durante il processo P1 il contatto inferiore è in contatto con il vetro SLG. Precedenti studi sul drogaggio con Na dei dispositivi solari a perovskite hanno riscontrato effetti benefici ma anche dannosi quando la concentrazione di Na è troppo alta. Abbiamo studiato l'effetto del P1 per l'architettura n-i-p mappando l'ablazione mediante analisi ottica ed elementare, utilizzando STEM e EDX.

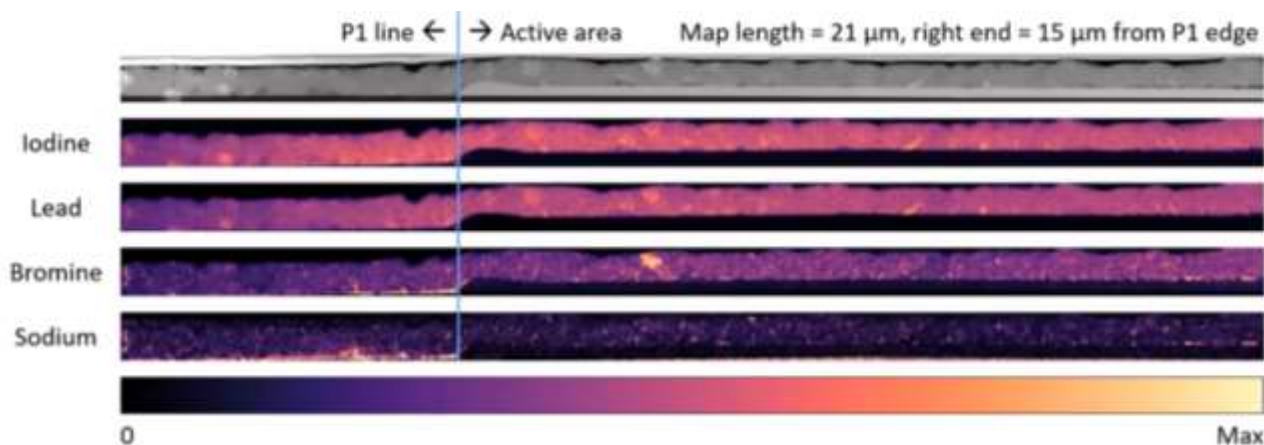


Figura 2 Analisi STEM/EDX in un campione senza il TCO (sinistra) e con il TCO (destra).

La diffusione del sodio è presente ed è marcata in concomitanza con l'ablazione del TCO, che corrisponde alla messa in contatto del vetro SLG direttamente con gli strati trasportatori di carica corrispondenti (Figura 2, parte sinistra). Questa diffusione si protrae fino allo strato attivo del dispositivo, dopandolo e cambiando le sue proprietà elettriche. Uno studio dettagliato sui cambiamenti elettronici dovuti alla presenza di sodio nella perovskite si sta concludendo, ma al momento queste informazioni restano confidenziali fino alla pubblicazione dei risultati e delle interpretazioni fatte. Quello che è certo è che queste diffusioni alterano il sistema e si diffondono maggiormente quando il dispositivo viene sottoposto a stress termico per lungo tempo. Per evitare ogni tipo di contaminazione, abbiamo analizzato e utilizzato 3 diversi tipi di fluenze per impulso, 8.5 , 10.2 e 12.5 J cm^{-2} . Abbiamo analizzato questi 3 tagli laser al microscopio e al profilometro per valorizzare l'effetto del laser sul vetro conduttivo, al fine di limitare al minimo effetti di diffusione termica e ionica durante l'ablazione. Come si evince dalla Figura 3, l'ablazione fatta a 10.2 J cm^{-2} risulta essere omogeneamente più pulita e soprattutto dal punto di vista profilometrico non presenta grandi avvallamenti che potrebbero causare buchi di deposizione, soprattutto quando si lavora in soluzione.

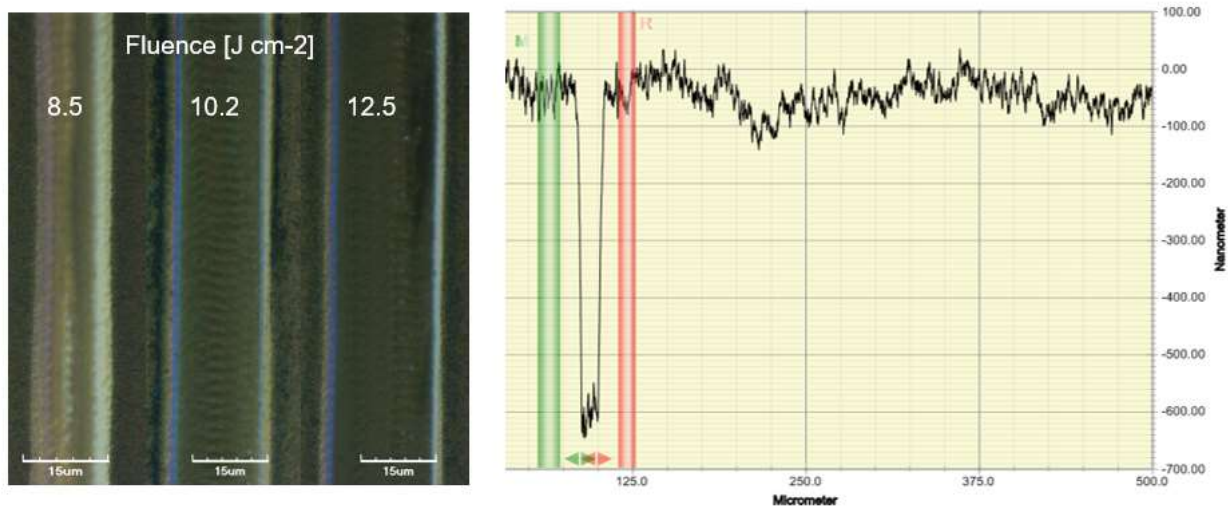


Figura 3 Immagini 100x al microscopio confocale delle 3 fluenze per impulso usate (sinistra); profilo della fluenza corrispondente a 10.2 J cm⁻². La profondità della rimozione risulta essere di circa 600nm.

2.1.2 Ottimizzazione Processo P2

Il processo di ottimizzazione del P2 è la parte del processo di ablazione più delicata e importante da ottimizzare. Affinché ci sia un buon passaggio di corrente, la carica deve attraversare la zona delimitata dal P2 per garantire un contatto verticale tra l'elettrodo superiore e quello inferiore. Il processo ha la funzione di rimuovere lo strato attivo, che nel nostro caso è la perovskite, e gli strati trasportatori di carica, che generalmente sono di tipo organico e/o inorganico.

Se nel caso dei processi P1 e P3, che avvengono rispettivamente all'inizio e alla fine del processo di fabbricazione, l'utilizzo del laser è utile ma non necessario, in quanto la finestra delle potenze in gioco da utilizzare per rimuovere gli strati corrispondenti sono ampie, nel caso del P2 è pressoché necessario, a meno che non si opti per una rimozione meccanica, aumentando in questo caso il rapporto tra area attiva e area totale del modulo.

Il P2 dovrebbe rimuovere tutti gli strati ad eccezione degli elettrodi, dallo strato di trasporto inferiore allo strato di trasporto superiore senza danneggiare l'elettrodo inferiore. La lunghezza d'onda UV utilizzata (355 nm) viene assorbita da tutti gli strati dello stack, compreso l'elettrodo. Ciò richiede un'attenta messa a punto della fluenza laser per ottimizzare il trade-off tra la rimozione incompleta degli strati a basse fluenze e il danno che potremmo causare sull'elettrodo ad alte fluenze.

È stato effettuato il processo di ottimizzazione P2 su architettura n-i-p, prendendo in considerazione l'ottimizzazione portata avanti nei precedenti studi [3].

Lo stack da rimuovere corrisponde a circa 800nm, considerando il TiO₂ compatto e mesoporoso, la perovskite e l'HTL organico, in questo caso ottimizzato per SpiroMeOTAD ma fluenze simili sono state ottimizzate anche mediante l'uso di polimeri organici come P3HT e PTAA (vedi Paragrafo 2.2.1).

Per strutture mesoporose, il laser UV al nanosecondo non è selettivo e l'ottimizzazione migliore non determina la pulizia completa dell'ossido, e anche qui la presenza di tracce di TiO₂ nello scribe P2 non intralcia il passaggio di carica, come vedremo in seguito.

Sono state dapprima eseguite diverse serie di ablazioni al variare della velocità di scansione e potenza in uscita del laser, avendo come parametro unico di variazione la fluenza. In Figura 4 sono state scansionate mediante microscopio confocale le 3 fluenze per impulso che visivamente mostrano un cambio di colore e intensità, lasciando presupporre che in questo range possa avvenire l'inizio della rimozione del TiO₂. Abbiamo misurato lo spessore di queste ablazioni, trovando il valore di 650nm per fluenze di 163mJ cm⁻² pulse⁻¹.

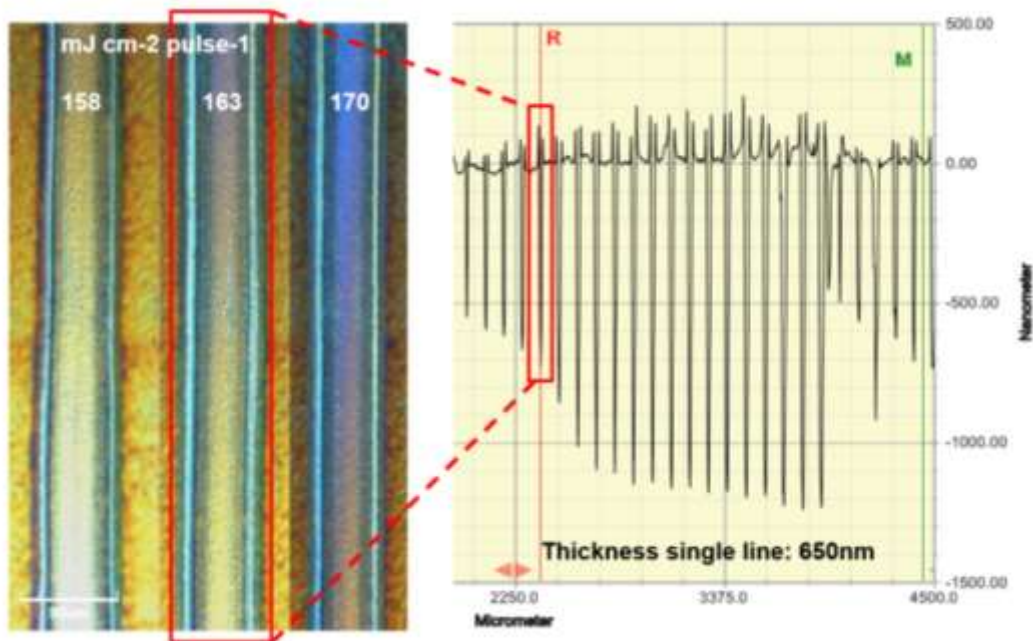


Figura 4 Singole linee a 158, 163 e 170mJ cm⁻² pulse⁻¹ (sinistra); misura dello spessore di un set di linee, con il valore calcolato di 650nm per la linea di ablazione fatta a 163mJ cm⁻² pulse⁻¹.

Se nel caso di architetture p-i-n la singola linea ci può dare un'idea chiara dell'inizio della rimozione dell'elettrodo [2], mediante formazione di crack, per strutture di tipo n-i-p la formazione di crack avviene a potenze molto alte, simile a quelle utilizzate per la rimozione totale dell'elettrodo usato per il processo P1. Per agire in maniera più delicata, si lavora infittendo le linee di ablazione (RSD) a 2µm, e, al fine di rimuovere più efficacemente lo strato interessato, abbiamo ripetuto questo passaggio 2 volte. In Figura 5 viene mostrata un'immagine del PAD formato utilizzando i parametri citati. Facendo ciò, lo spessore misurato dell'ablazione corrisponde a circa 800nm, spessore corrispondente agli strati da rimuovere.

Per capire se i parametri trovati rimuovono efficacemente il TiO₂, lo strato utilizzato per il trasporto di elettroni che corrisponde all'ultimo strato legato allo strato conduttivo da non rimuovere, è stata eseguita un'analisi XRD dei campioni trattati con 3 diversi parametri di rimozione P2, uno corrispondente al valore ottimizzato con fluensa di 163mJ cm⁻² pulse⁻¹ (linea blu Figura 5), uno corrispondente alla rimozione completa dell'elettrodo (linea rossa Figura 5) e l'altra rimuovendo solo 500nm dello stack totale (linea nera). Come si può notare, la rimozione del TiO₂ per i parametri ottimizzati è quasi totale ma si può comunque notare un picco accennato al valore 25 gradi. Questa lieve presenza non impedisce il passaggio della corrente nella misurazione del dispositivo finale, come vedremo in seguito.

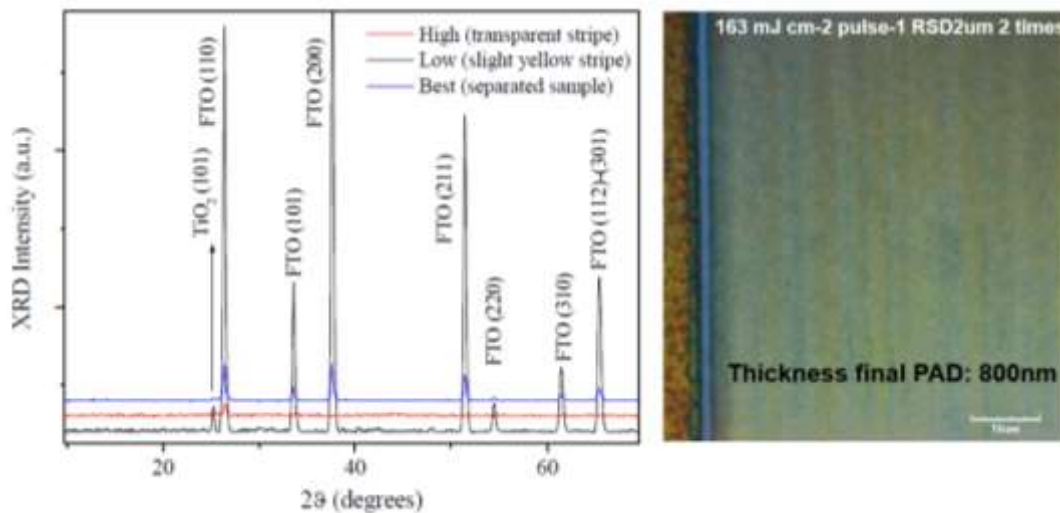


Figura 5 (sinistra) Analisi XRD misurata su campioni trattati con 3 parametri di rimozione laser: High (linea rossa), corrispondente alla rimozione completa dell'elettrodo FTO, Low (linea nera), corrispondente alla sola rimozione della perovskite e dell'HTL, Best (linea blu), corrispondente alla rimozione ottimizzata dello stack perovskite + strati trasportatori; (destra) immagine al microscopio confocale del PAD con 1 parametri ottimizzati per la rimozione P2, con relativo calcolo dello spessore di ablazione.

2.1.3 Ottimizzazione processo P3

Il processo P3 comporta la separazione del contro elettrodo al fine di separare orizzontalmente le celle in serie e permettere il passaggio della corrente attraverso il modulo seguendo un percorso denominato di tipo Z: l'ottimizzazione del contro elettrodo opaco utilizzato, che nel nostro caso per entrambe le configurazioni è l'Oro, è avvenuta attraverso l'utilizzo di parametri precedentemente ottimizzati[4]. Differente invece è l'approccio per quanto riguarda l'utilizzo di contro elettrodi semitrasparenti: in questo caso abbiamo utilizzato lo strato ITO mediante deposizione con sputter direttamente sopra lo strato trasportatore di lacune (SpiroMeOTAD) con uno spessore finale di 100nm. È stato ideato uno schema a griglia di 25x25mm², come mostrato in Figura 6, parte destra: l'incisione P1 è stata condotta seguendo lo schema delle linee nere prima della deposizione ETL-Perovskite-HTL; dopo la deposizione di ITO per sputtering, sono state eseguite diverse linee a diversa fluensa (modificando Power output, RSD e Velocità degli assi XY) all'interno della griglia nera (illustrata in Figura 6 con linee blu). La misura è stata eseguita con un tester standard, controllando la Resistenza tra le linee blu, posizionando le sonde all'interno di ogni quadrato nero per evitare ogni possibile contributo laterale. I Migliori parametri trovati per questo tipo di elettrodo sono stati i seguenti:

Rasted Scanning distance (RSD) : 3 μ m	}	Fluence : 181 mJ/cm ² P3 final width : 150 μ m
Velocity of the X-Y plate : 195 mm/s		
Power Out : 69mW		
Laser Spot size : 314 μ m ²		
Repetition Rate : 80KQ		
Single Pulse Energy : 568.34 μ J		

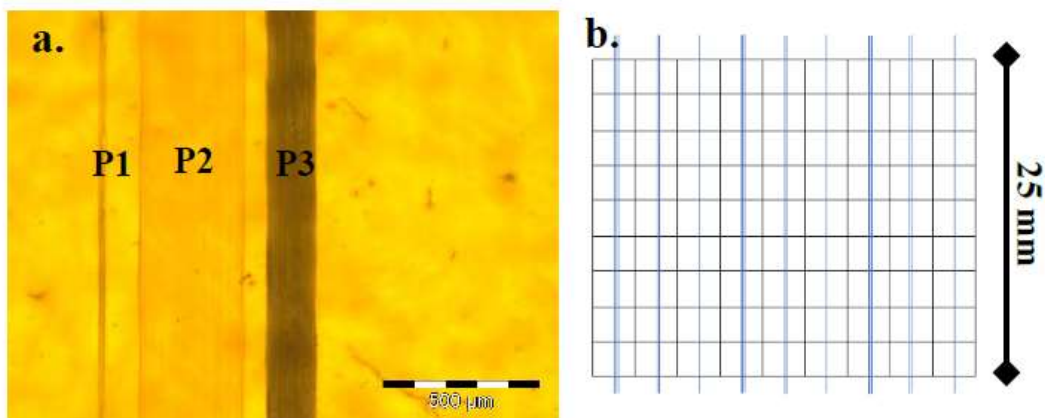


Figura 6 Immagine al microscopio della larghezza P1, P2 e P3. b. Schema a griglia dell'ottimizzazione P3 (linee blu=P3).

Infine in Figura 6, a sinistra, abbiamo riportato un'immagine al microscopio dei 3 processi laser ottimizzati. Abbiamo optato per una larghezza totale di interconnessione di circa 500 μ m. Il fattore di riempimento geometrico (GFF) per i moduli ottimizzati è di circa 91%. Per ulteriori informazioni sulla parte sperimentale utilizzata in questa sezione, si rimanda alla pubblicazione [5].

2.2 Ottimizzazione dei materiali dei processi di deposizione su moduli

Trovati i parametri migliori per l'ottimizzazione dei processi P1, P2 e P3 nella fabbricazione dei moduli, e definito il design migliore, scegliendo come larghezza di cella ottimale 4.5mm, qui di seguito vengono riportati i principali risultati ottenuti andando ad ottimizzare lo strato trasportatore di lacune utilizzando due possibili polimeri, Poly (3-hexylthiophene) (P3HT) e Poly[bis(4-phenyl)(2,4,6-trimethylphenyl)amine] (PTAA). Infine, sono presentati dei risultati preliminari utilizzando ITO come controlettrodo trasparente.

2.2.1 Moduli opachi

2.1.1.1 Ottimizzazione del P3HT e suo utilizzo per la realizzazione di moduli

Il P3HT ha suscitato grande interesse grazie al suo basso costo, stabilità termica, impermeabilità all'ossigeno e forte idrofobicità. In questa sezione riportiamo i principali risultati ottenuti sviluppando una nuova strategia di drogaggio per l'P3HT come strato trasportatore di lacune (HTL) in celle solari a perovskite (PSC) mesoscopiche a triplo catione/doppio alogenuro $(FA_{1-x-y}MA_xCs_y)Pb(I_{1-x}Br_x)_3$. Il processo di ottimizzazione sul drogaggio del P3HT è stato prima provato su cella di piccolissima area e su cella scalata ad 1 cm² e poi trasferito su modulo di area attiva 43 cm², dimostrando la validità e l'importanza del drogaggio con il cobalto del P3HT. [6]

Le prestazioni fotovoltaiche e la stabilità delle celle solari mostrano un notevole miglioramento utilizzando una composizione di tre droganti Li-TFSI, TBP e Co(III)-TFSI, raggiungendo efficienze del 19,25% su un'area attiva di 0.1 cm², del 16.29% su un'area attiva di 1 cm². L'efficienza stabilizzata delle celle di piccola area è del 18,4% mentre su 1 cm² è del 16% (Figura 7). Sulla base delle nostre conoscenze, le efficienze presentate sono le più alte efficienze riportate per una cella a perovskite mesoscopica che utilizza P3HT come HTM senza alcun interlayer all'interfaccia PSK/P3HT.

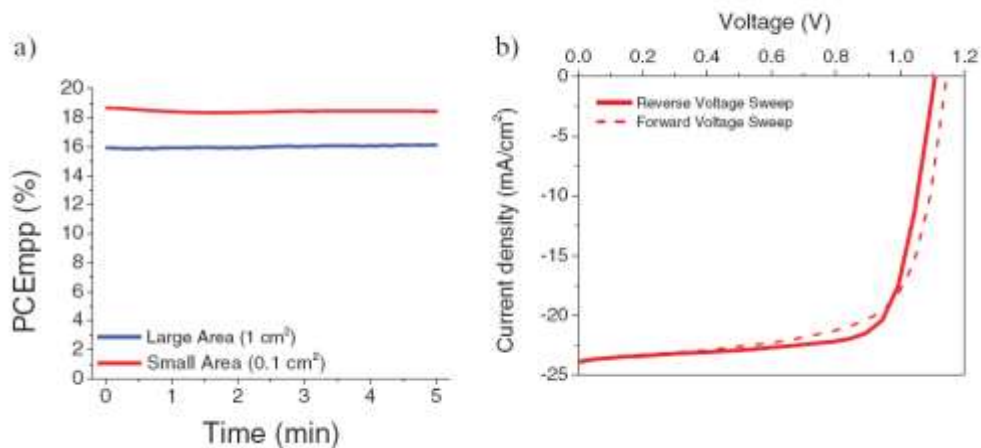


Figure 7: a) Andamento dell'efficienza della cella con inseguimento del punto di massima potenza per cella PSC di piccola e grande dimensione. b) Grafico J–V del migliore dispositivo di piccola area con scansione della tensione sia in scansione diretta che inversa.

I risultati statistici per le celle con area differente sono presentati nella Figura 8 che conferma l'effetto positivo del cobalto come additivo nell'HTM.

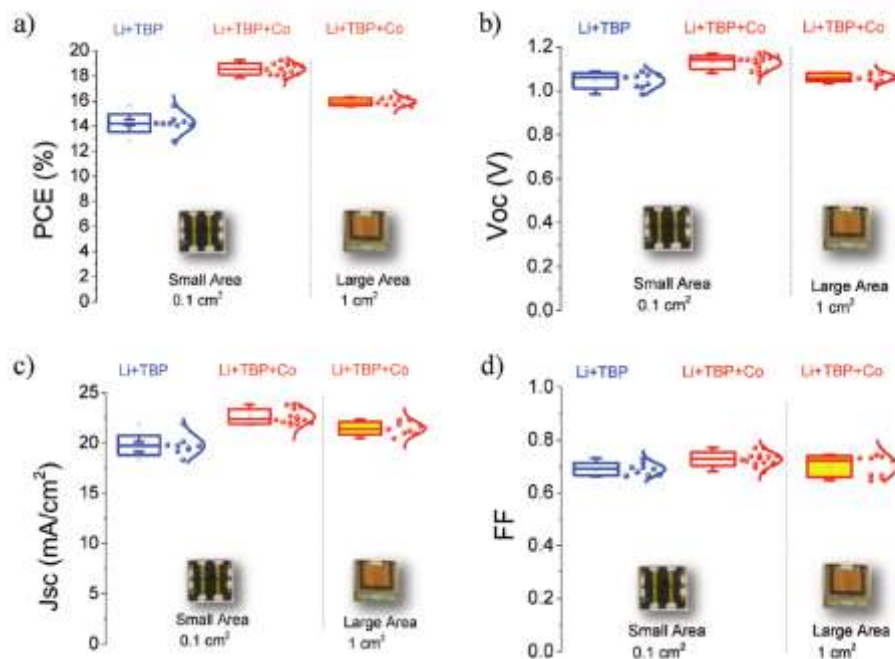


Figura 8: Parametri statistici fotovoltaici dei PSC di piccola e grande area contenenti P3HT come HTM con diverse miscele di droganti: a) PCE, b) Voc, c) Jsc, d) FF

I dispositivi di piccola e grande area mostrano, senza ulteriore incapsulamento, una stabilità all'aria molto promettente mantenendo più dell'80% dell'efficienza iniziale dopo 1500 h in condizioni atmosferiche (umidità relativa \approx 60%, temperatura ambiente), mentre i dispositivi incapsulati mostrano una stabilità termica superiore a 500 h a 85 °C (mantenimento dell'efficienza iniziale >80%) e 100 h di stabilità (mantenimento dell'efficienza iniziale >90%) per illuminazione continua (light soaking). L'aumento di efficienza e di stabilità rendono P3HT un buon candidato per PSC su larga scala e a basso costo.

L'analisi della stabilità temporale delle PSC su area attiva di 1,0 cm² e contenenti la combinazione di additivi (Li+TBP+Co) o (Li+TBP) è stata valutata mediante l'analisi della stabilità in aria (shelf-life, dispositivi non sigillati), dello stress termico e del test accelerato di illuminazione costante ad 1 sole (dispositivi incapsulati).

L'andamento della PCE del dispositivo per i vari test è riportato nella Figura 9. L'analisi della durata in aria viene eseguita su PSC non incapsulate mantenute in condizioni ambientali ad una temperatura di 25 °C e un'umidità relativa di ≈60%. I risultati mostrano che i dispositivi a base di Co conservano oltre l'80% della loro efficienza iniziale dopo 1500 h. L'analisi della stabilità termica delle PSC incapsulate viene eseguita mettendo i dispositivi a 85 °C in forno. I risultati dimostrano che i dispositivi co-drogati con Co mantengono l'80% della loro PCE iniziale dopo stress termico per più di 500 ore. Gli stessi dispositivi incapsulati sono stati testati per illuminazione continua (Figura 6c). I risultati mostrano che la PSC con P3HT drogato con Co mantiene circa il 90% dell'efficienza iniziale dopo 100 h di irradiazione continua. I risultati di stabilità accelerata dei dispositivi completamente drogati mostrano un miglioramento sorprendente della stabilità rispetto al dispositivo di controllo basato su P3HT senza Co ed anche rispetto ad altri droganti del P3HT come F4TCNQ e nanotubi di carbonio a parete singola. Questa alta stabilità termica e all'illuminazione continua è attribuibile alle caratteristiche intrinseche di P3HT come l'impermeabilità all'ossigeno, l'idrofobicità e all'elevata stabilità della perovskite triplo catione oltre che ad una migliore interfaccia tra perovskite e HTM che porta a facilitare il trasferimento delle cariche all'interfaccia stessa. In particolare, l'utilizzo del complesso Cobalto risulta sopprimere gli stati di trappola all'interfaccia perovskite/HTL, in modo che vi sia una minore degradazione del dispositivo.

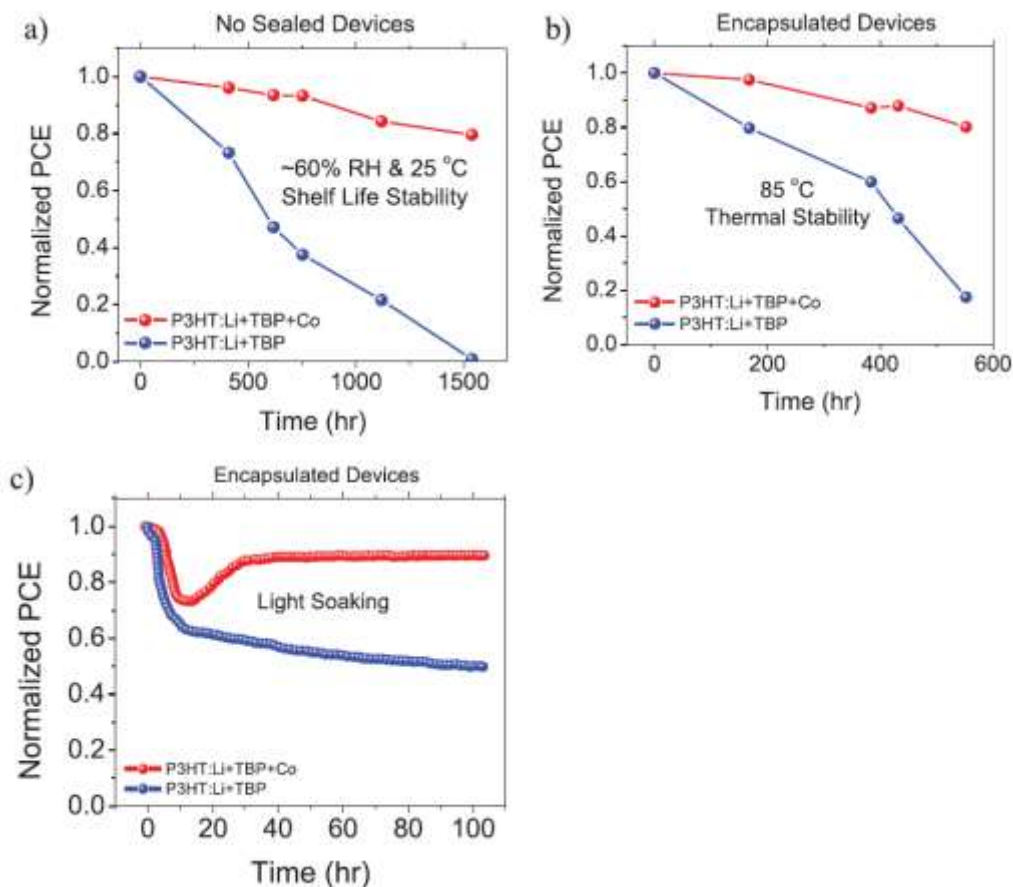


Figura 9: Confronto delle stabilità per vari test di PSC con e senza drogante al cobalto nel P3HT. a) analisi della stabilità in condizioni atmosferiche di PSC non sigillate; b) stabilità termica di PSC incapsulate; c) stabilità all'illuminazione continua (1 Sole) di PSC. Un confronto tra due composti additivi di P3HT

Il passaggio finale dopo ottimizzazione su piccola e grande area è stato quello di scalare il dispositivo a livello di modulo. E' stato realizzato un modulo in perovskite di 10 cm x 10 cm con una dimensione dell'area attiva di 43,0 cm², utilizzando perovskite a triplo catione come strato attivo e P3HT (completamente drogato con Li-TFSI, TBP e Co-TFSI) come HTL. I parametri fotovoltaici del modulo fabbricato valutati sotto irraggiamento

simulato AM1.5G sono presentati nella Figura 10 e nella Tabella 2. La struttura del modulo consiste di 14 celle separate collegate in serie. La tensione a circuito aperto e la densità di corrente di cortocircuito del modulo sono rispettivamente di 15,1 V e 17,7 mA/cm², mentre il filling-factor del modulo è del 69,8%. Il modulo può generare una potenza elettrica di 474 mW al punto di massima potenza, con un PCE del 13,3%. Per controllare la riproducibilità, sono stati realizzati 8 lotti di moduli con la stessa dimensione e i risultati statistici hanno mostrato una buona riproducibilità con una media PCE di 12,9 ± 0,67%.

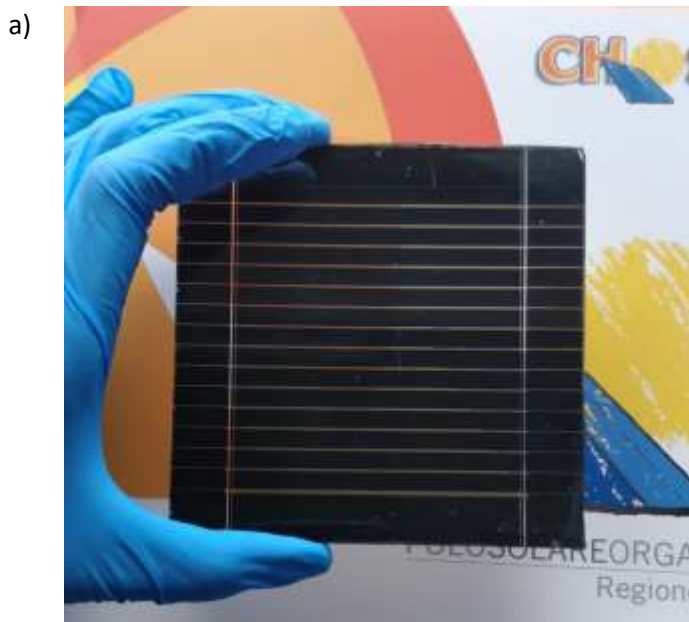


Tabella 1. Caratteristiche fotovoltaiche del modulo realizzato basato su P3HT co-drogato con Cobalto.

Module type	14 series cells
Active Area	43 cm ²
Pmax	574 mW
Vmp	11.9 V
Imp	48.3 mA
Voc	15.1 V
Jsc	17.7 mA/cm ²
FF	69.8 %
PCE	13.3 %

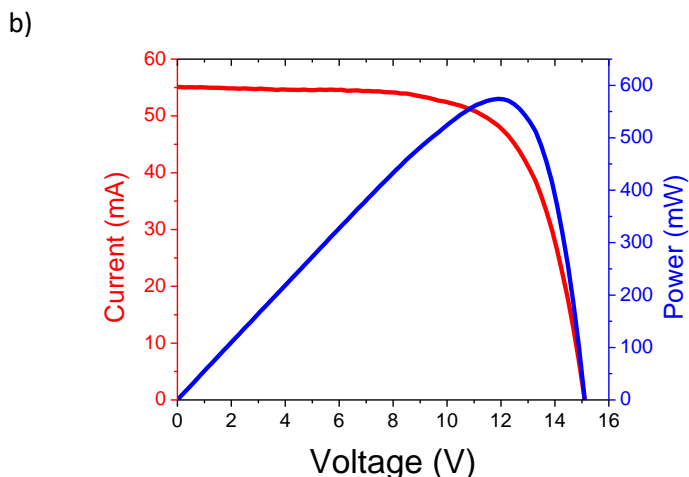


Figura 10 a) Fotografia del modulo realizzato. b) Caratteristica corrente-tensione del modulo sotto illuminazione AM1.5G ad 1-sole. Il modulo mostra una Pmax of 574 mW.

2.1.1.2 Ottimizzazione del PTAA e suo utilizzo per la realizzazione di moduli

Anche per le celle solari a perovskite con PTAA con trasportatore di lacune abbiamo innanzitutto ottimizzato le PSC di area piccola (0.04 cm²) e grande (1 cm²) area utilizzando diversi pesi molecolari (MW) di PTAA: 10KDa (LMW), 31kDa (MMW) e 115kDa (HMW), e ci siamo resi conto che un PTAA con MW alto di 115kDa mostra una maggiore efficienza e una maggiore stabilità. In Figura 11 sono riportati i risultati relativi alle prestazioni fotovoltaiche delle celle realizzate con i differenti MW; per un HMW PTAA con 115 kDa si ottiene una efficienza massima su piccola area sopra il 20% mentre per cella di grande area (area attiva di 1 cm²) si ottiene una efficienza maggiore del 18%, come riportato nella figura sottostante e in tabella 2.

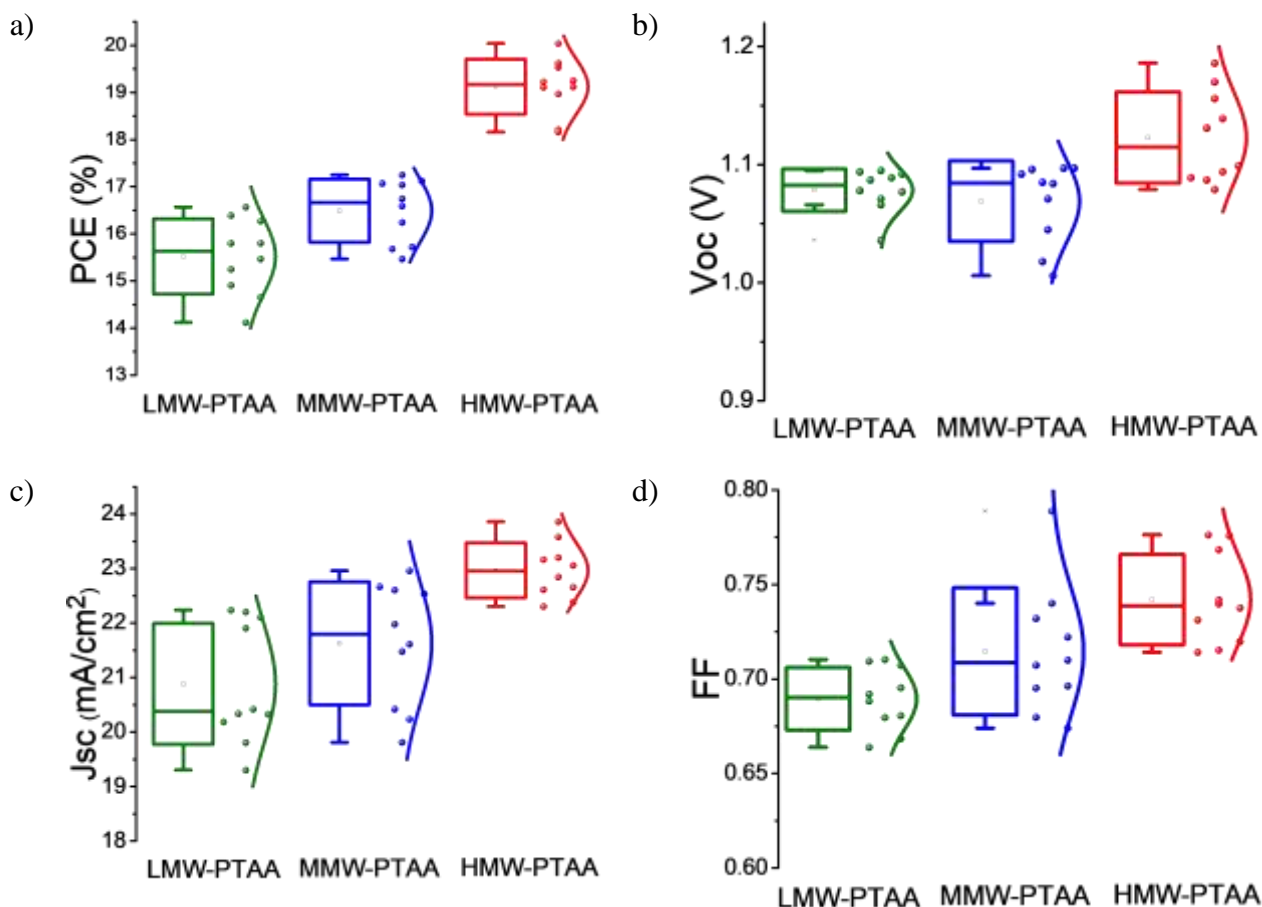


Figura 11: Parametri statistici fotovoltaici delle PSC di piccola area contenenti PTAA con diversi MW come HTM: a) PCE, b) Voc, c) Jsc, e d) fill factor.

Tabella 2. Caratteristiche fotovoltaiche del dispositivo più efficiente per ogni MW di PTAA. Tra parentesi sono riportati anche i valori medi del lotto \pm deviazione standard.

HTM	J_{sc} (mA cm^{-2})	V_{oc} (V)	FF	PCE(%)
HMW PTAA	23.86 (22.97 \pm 0.50)	1.19 (1.12 \pm 0.039)	0.78 (0.74 \pm 0.024)	20.04 (19.12 \pm 0.59)
MMW PTAA	22.96 (21.63 \pm 1.13)	1.10 (1.07 \pm 0.034)	0.79 (0.71 \pm 0.037)	17.25 (16.49 \pm 0.67)
LMW PTAA	22.24 (20.88 \pm 1.11)	1.095 (1.08 \pm 0.02)	0.71 (0.69 \pm 0.02)	16.57 (15.52 \pm 0.80)

Nella fase successiva abbiamo studiato l'effetto del peso molecolare del polimero PTAA sulla stabilità e abbiamo analizzato la stabilità termica dei dispositivi incapsulati. Come riportato nella figura 12, i risultati mostrano che MW più alti hanno una migliore stabilità termica: i risultati sono presentati di seguito.

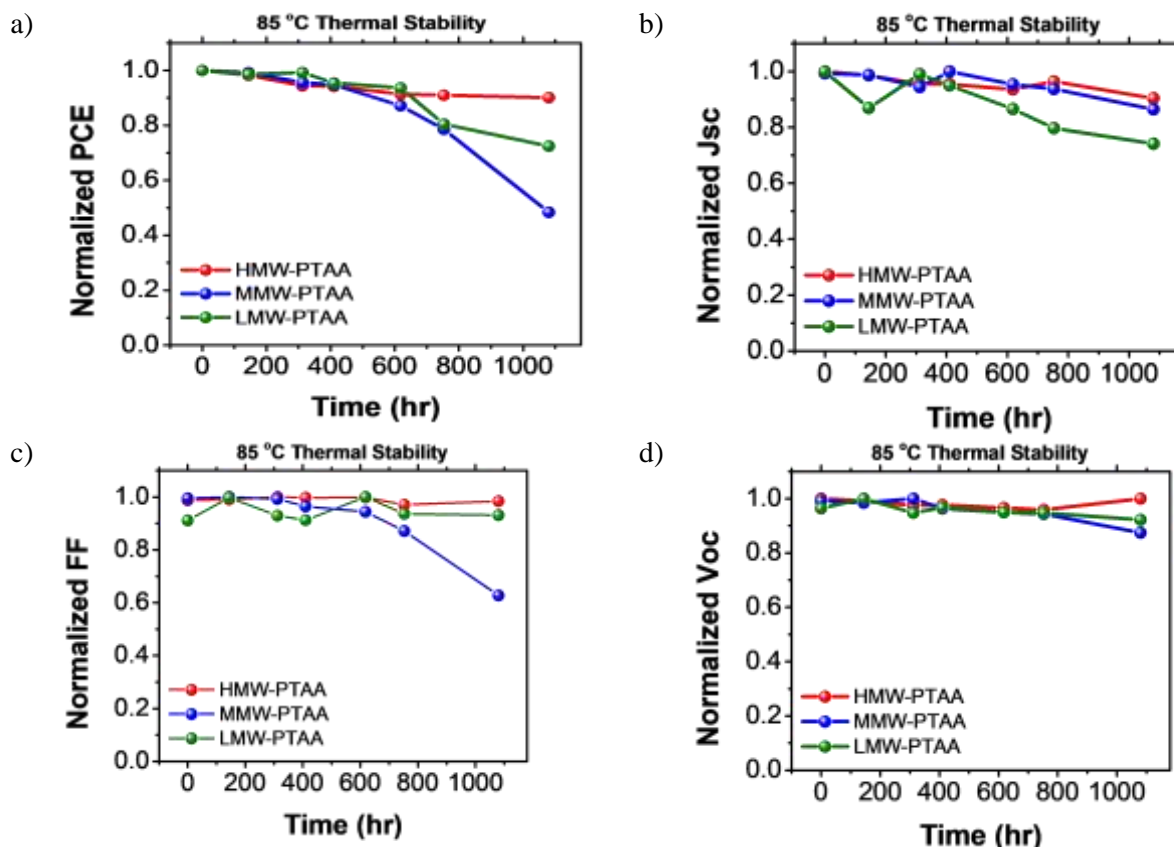


Figura 12. Risultati di stabilità termica delle celle solari perovskite di grande area con diversi MW di PTAA come HTL sotto stress termico continuo di 85 ° C. Grafici normalizzati si riferiscono alla variazione nel tempo di a) Efficienza, b) J_{sc} , c) FF e d) V_{oc}

Le celle solari con HMW-PTAA mantengono più del 90% dell'efficienza iniziale dopo 1080 ore di stress termico a 85 °C. I dispositivi di larga area e con PTAA di alto peso molecolare (HMW) sono stati anche analizzati sotto stress di luce continua (light-soaking) ad 1 sole. Come presentato nella Figura 13, questo dispositivo mantiene l'87% dell'efficienza iniziale dopo 160 ore di esposizione continua ad 1 sole.

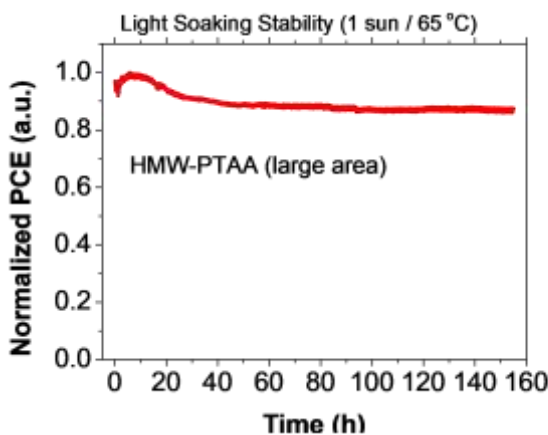


Figura 13: la stabilità alla luce del PSC incapsulato di ampia area contenente HMW PTAA

Il risultato di queste analisi mostrano chiaramente che per ottenere celle ad alta efficienza e stabili è necessario utilizzare PTAA ad alto peso molecolare di 115 kDa. Basandosi su questa analisi, sono stati fabbricati moduli di 10 cm*10 cm con un'area attiva di 42.8 cm² ottenendo una efficienza del 17% e raggiungendo 800 ore di stabilità termica a 85 °C. I parametri fotovoltaici dei moduli fabbricati sono presentati nella tabella 3, mentre la curva IV e la stabilità termica nella figura 14.

Tabella 3. Parametri fotovoltaici del modulo campione che utilizza PTAA ad alto MW come HTL.

Sample	Scan Direction	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	FF (%)	PCE (%)
Module (42.8 cm ² a.a.)	Reverse	16.05	64.13	70.89	17.05
	Forward	15.87	66.12	67.125	16.46

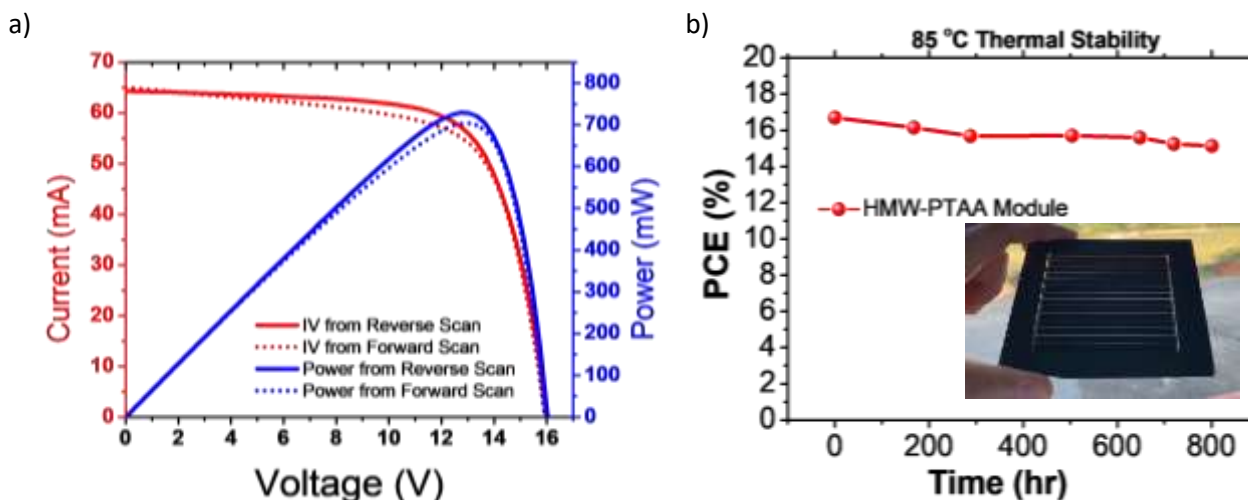


Figura 14 a) Grafico IV del modulo a piu' alta efficienza. Questo modulo genera 729.5 mW di potenza in uscita al punto di massima potenza. B) Stabilità termica per stress a 85°C e fotografia del modulo.

2.1.1.3 Modulo con SnO₂, PTAA e interlayer di perovskite 2D con processo a bassa temperatura.

E' stato fabbricato un modulo con dimensione dell'area del substrato di 5,6 x 5,6 cm² e con un'area attiva di 10 cm² utilizzando uno strato trasportatore di elettroni (ETM) depositato a bassa temperatura sul substrato vetro/ITO. Per la deposizione su larga area, la soluzione di SnO₂ (0,1 M in EtOH) è stata depositata in aria mediante tecnica blade coating (Charon - Cicci Research s.r.l.) a temperatura ambiente di 25°C e umidità relativa del 30%. L'altezza della lama è stata fissata a 100 µm sul substrato di vetro/ITO già ablatato con processo laser P1. La velocità di scorrimento della piastra sui cui vengono fissati i substrati applicando il vuoto, è stata fissata a 30 mm/s. Per ottenere uno strato omogeneo di SnO₂, 75 µl della soluzione precursore è stata depositata sul lato del substrato creando un menisco tra ITO e lama. A valle della deposizione, i substrati sono stati mantenuti a 100 ° C per 5 minuti e successivamente a 180 ° C per 3 ore. Subito dopo il raffreddamento, i substrati sono curati tramite lampada UV per 30 minuti (lampada Dymax EC-5000, con potenza di illuminazione di 225 mW/cm²) per garantire la corretta formazione di uno strato compatto di SnO₂. Successivamente il substrato è trasferito nella Golve-box dove viene depositata una soluzione di PCBM come strato di passivazione. Successivamente viene depositata la perovskite e l'HTM (PTAA). Sulla parte superiore della perovskite 3D abbiamo applicato anche una perovskite bidimensionale per passivare i difetti superficiali. Successivamente viene eseguito il processo laser P2, la deposizione dell'elettrodo superiore ed infine il processo laser P3.

Come mostrato in Figura 15 ed in tabella 4, l'efficienza massima ottenuta su modulo è di 15.2%.

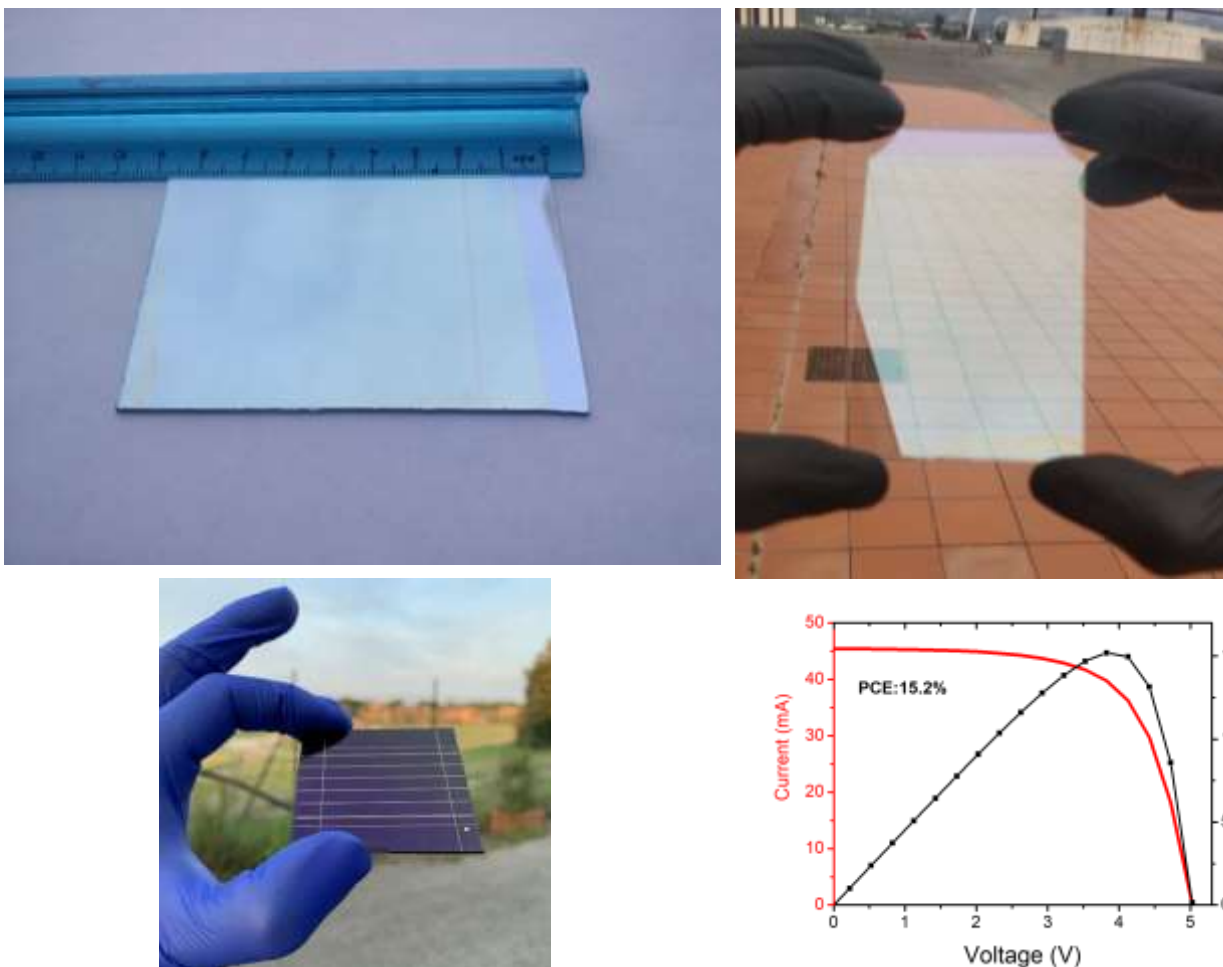


Figura 15: strato di SnO₂ depositato tramite il metodo di rivestimento della lama, immagine del modulo, IV e PV plot del mini modulo

Tabella 4. Parametri fotovoltaici del modulo mini utilizzando PTAA e perovskite 2D

Sample	Scan Direction	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	FF (%)	PCE (%)
Module (10 cm ² a.a.)	Reverse	5.024	45.406	66.64	15.2

Questo risultato è stato ulteriormente migliorato considerando come ETL il doppio layer TiO₂ compatto/ TiO₂ mesoporoso al posto dell’SnO₂. In questo caso ovviamente il processo non è più a bassa temperatura dovendo raggiungere 480 °C per sinterizzare lo strato di TiO₂. Con questo ETL e considerando sempre l’interlayer di perovskite 2D siamo stati in grado di fabbricare dispositivi di piccola area raggiungendo un’efficienza del 20,69% in reverse e 20,02% in forward, dunque con un grado di isteresi molto basso. Per quanto riguarda il mini modulo abbiamo ottenuto una efficienza di 18,1% su un’area attiva di 10 cm² con un fattore geometrico (area attiva/area totale) del 91%. I parametri fotovoltaici del dispositivo campione di piccola area e del modulo sono riportati rispettivamente nella tabella 5 e nella figura 16.

Tabella 5. Parametri fotovoltaici della cella campione di piccola area e del mini-modulo utilizzando TiO₂/perovskite 3D/perovskite 2D/PTAA.

Sample	Scan Direction	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
Small area (0.1 cm ² a.a.)	Reverse	1.1169	23.8946	77.54	20.69
	Forward	1.1153	23.931	75.01	20.02
Module (10 cm ² a.a.)	Reverse	5.511	45.274	72.55	18.104

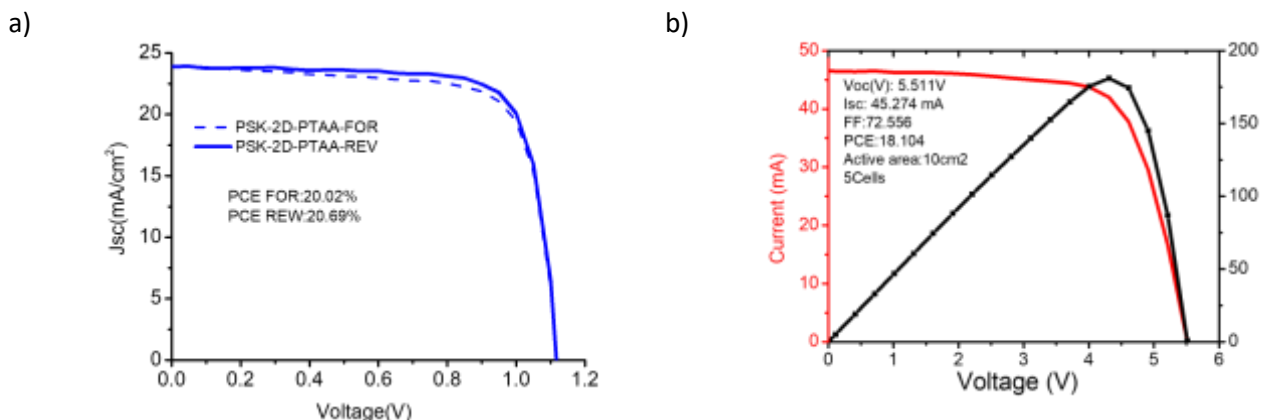


Figura 16: a) Grafico JV della cella con sweep della tensione in entrambe le scansioni avanti e indietro; b) Grafico IV e PV del mini modulo.

2.2.2 Moduli semitrasparenti

In questa sezione vengono analizzati i processi di ottimizzazione ottenuti utilizzando ITO come contro elettrodo trasparente, rendendo quindi il dispositivo semitrasparente. Vengono riportati i risultati ottenuti su perovskite standard triplo catione $\text{CsMAFAPb}(\text{I}_x\text{Br}_{1-x})_3$

2.2.2.1 Moduli semitrasparenti su area $5 \times 5 \text{ cm}^2$ con perovskite $\text{CsMAFAPb}(\text{I}_x\text{Br}_{1-x})_3$

Di seguito riportiamo la procedura di fabbricazione, le caratterizzazioni ottiche ed elettriche di un modulo CsMAFA semitrasparente.

Per la fabbricazione abbiamo adottato la struttura mesoscopica n-i-p in combinazione con una perovskite stabile triplo catione CsMAFA. I dispositivi sono composti da un vetro (Pilkington, $7\Omega/\text{sq.}$) ricoperto di FTO sul quale viene depositata la sequenza di strati: c-TiO₂/m-TiO₂/perovskite/PTAA/ITO. Il patterning laser (P1, P2, P3) sono stati ottenuti con un sistema laser raster Nd:YVO₄ UV (355 nm) pulsato a 15 ns. Come discusso nella sezione precedente, l'applicazione di un laser a impulsi ultracorti consente l'ablazione dei materiali mantenendo una diffusione del calore molto bassa. FTO viene prima inciso (P1) per formare 8 celle collegate in serie. La fluensa del processo P1 è pari a $10,2 \text{ J/cm}^2$, ottenendo una larghezza di $40\mu\text{m}$. I substrati vengono puliti con una soluzione di acqua e sapone e poi in un bagno ad ultrasuoni con acetone, etanolo e 2-propanolo per 10 minuti ciascuno. Un c-TiO₂ spesso 40 nm viene depositato mediante la tecnica della spray-pirolisi. Quindi, il TiO₂ mesoporoso viene depositato per spin e sinterizzato a 480°C per 30 minuti formando lo strato di trasporto degli elettroni. Il substrato viene quindi trattato con una lampada UV per migliorare la bagnabilità del substrato. La perovskite a triplo catione viene depositata tramite spin-coating e successivamente trattata a 100°C per 1 ora in Glove-box. Successivamente viene depositato il PTAA in clorobenzene e, tramite processo laser P2, viene rimosso dallo stack completo (ETL/mp-TiO₂/PSK/HTL) depositato su FTO dalle aree di connessione verticale al fine di connettere due celle adiacenti in serie con la successiva deposizione dell'elettrodo. Lo step P2 viene realizzato con una fluensa pari a 157mJ/cm^2 , ottenendo una larghezza di $300\mu\text{m}$. Successivamente, un contro elettrodo ITO spesso 90 nm con una resistenza (sheet-resistance) di 60 Ohm/sq viene depositato per sputtering adottando i parametri di processo sviluppati in precedenza. Successivamente lo strato depositato di ITO è patternato tramite laser (P3). La fluensa ottimale trovata è di 181 mJ/cm^2 con una larghezza P3 di $150\mu\text{m}$. In questo modo, la larghezza dell'area morta è di circa $750\mu\text{m}$ per ogni cella e $1,5 \text{ cm}^2$ per il modulo. Questo corrisponde ad un fattore geometrico di 88%.

Come mostrato in Figura 17, le efficienze ottenute sono superiori all'8% con un trasmittanza media visibile (AVT) dell'8% e inferiori al 13% con un AVT del 2%. Nel primo caso l'AVT è pari al 10% considerando l'intera area di apertura. L'elettrodo superiore ITO ha un AVT pari all'80% ed è depositato mediante tecnica sputtering. L'impatto della diluizione sullo spessore dello strato di perovskite è abbastanza chiaro dagli spettri di trasmittanza. Si può notare che oltre una lunghezza d'onda di 500 nm la soluzione più diluita (1.18 M) determina una trasmittanza del dispositivo maggiore rispetto alla soluzione di riferimento, poiché si ottiene uno strato di perovskite più sottile (250 nm di spessore) rispetto allo spessore di 550 nm ottenuto senza diluizione. L'AVT calcolato nell'intervallo 380-780 nm (Figura 9c) e le immagini mostrate in Fig. 15b sono in accordo con gli spettri di trasmittanza riportati. L'aumentato AVT per la Perovskite diluita influenza le prestazioni fotovoltaiche come mostrato in Figura 17d.

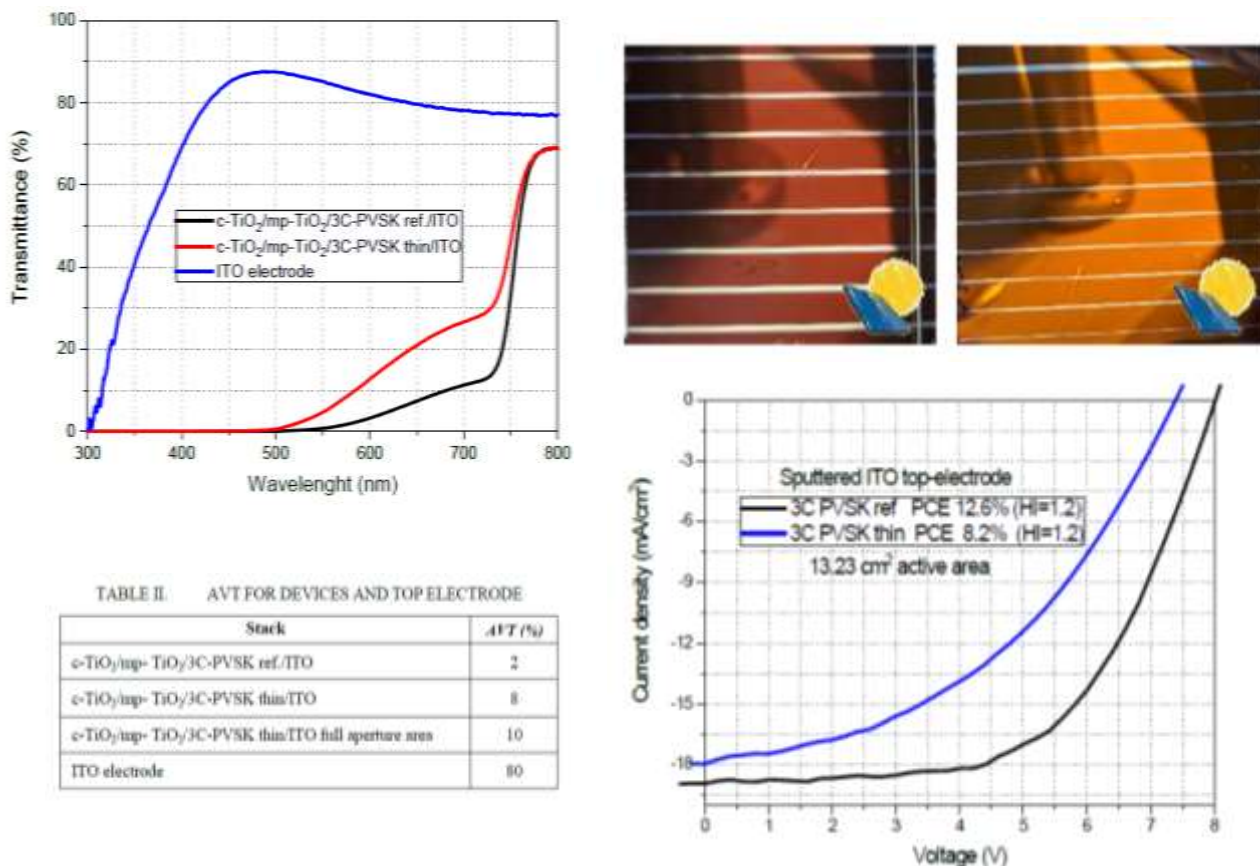


Figura 172 a) Spettri di trasmittanza dell'intero stack di dispositivi e dell'elettrodo ITO. b) Immagini dei moduli con il riferimento (a sinistra) e la Perovskite CsMAFA diluita (a destra). c) Tabella confronti AVT con diverse perovskiti e geometrie calcolate. d) Curve J-V dei dispositivi fabbricati con l'indicazione dell'Indice di Isteresi (HI).

La migliore efficienza dello strato di perovskite più sottile di 250 nm è dell'8.2% rispetto al 12.6% del dispositivo di riferimento con uno strato di perovskite più spesso di 550 nm. Le densità di corrente dei

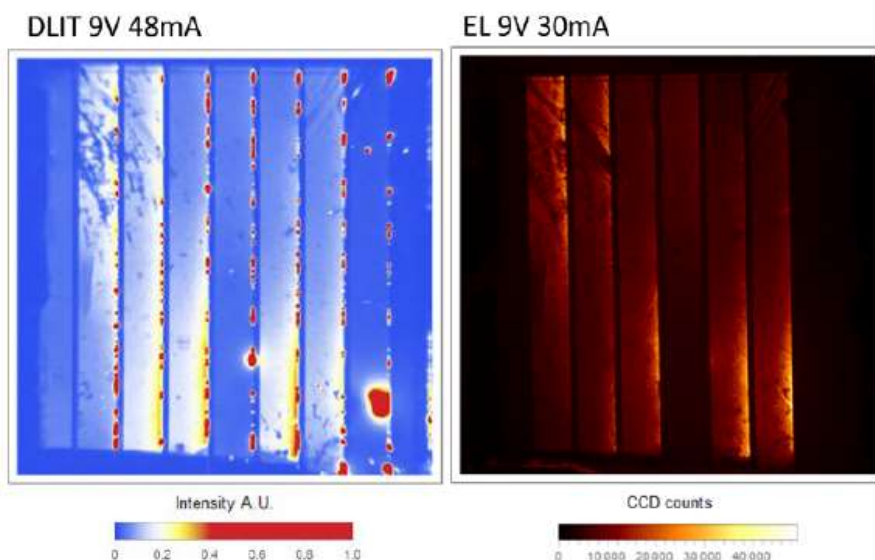


Figura 18 Termografia dark lock-in (DLIT) ed elettroluminescenza (EL) del modulo semitrasparente.

dispositivi sono in buon accordo con una perovskite standard CsMAFA. I parametri che presentano valori più bassi rispetto agli standard sono il FF e la V_{oc} del dispositivo.

Mostriamo anche un'analisi ottica attraverso il Dark Lock-In Thermography (DLIT) svolta in collaborazione con il Fraunhofer-ISE e l'elettroluminescenza (EL), tecniche molto utili per capire l'uniformità di deposizione e l'ottimizzazione dei processi laser di ablazione (Figura 18). L'analisi DLIT rivela grandi perdite alle interconnessioni. DLIT ed EL mostrano un'elevata corrente nella parte destra delle singole celle che potrebbe essere correlata al problema della resistenza in serie con l'ITO depositato per processo sputtering non ancora completamente ottimizzato. Sono presenti alcuni shunt alle interconnessioni a causa del processo P3. Questa analisi permetterà di ottimizzare ulteriormente il modulo

2.2.2.2 Modulo semitrasparente su substrato di 10x10 cm².

A valle dell'esperienza fatta su moduli di più piccola dimensione, abbiamo fabbricato un modulo fotovoltaico in perovskite semitrasparente di larga area su un substrato 10x10 cm² (area attiva di 39,6 cm², area di apertura 51,4 cm²). Il modulo contiene 15 celle collegate in serie. Per realizzare il modulo fotovoltaico, abbiamo adottato la procedura di patterning P1-P2-P3 mediante il laser Nd:YVO4 ($\lambda = 355$ nm) al nanosecondo. La procedura di fabbricazione è riassunta qui di seguito: i) P1 sul substrato FTO per isolare le celle, ii) processo di pulizia per il substrato FTO, iii) deposizione dello strato compatto tramite il metodo di spray-pirolisys iv) processo di sinterizzazione dello strato mesoporoso di TiO₂, v) trattamento UV del modulo vi) trasferimento nella glove-box per la deposizione di perovskite, vii) deposizione tramite spin-coating della perovskite triplo catione, viii) applicazione di uno strato di perovskite 2D sullo strato di perovskite 3D, ix) deposizione di PTAA come strato HTM, x) Patterning laser P2, xi) deposizione via sputtering di 100nm ITO xii) processo P3 eseguito sul modulo con ITO.

Nella figura 19 sono riportate le immagini del modulo ottenuto con ITO sputtered dal lato ITO (a) e dal lato FTO/vetro (b). Le caratteristiche elettriche del modulo sono riportate nella Figura 20 e i parametri fotovoltaici nella Tabella 6. E' stata ottenuta una efficienza massima del 10.39% anche se l'effetto dell'isteresi è alto con una efficienza in forward di 8.38%.

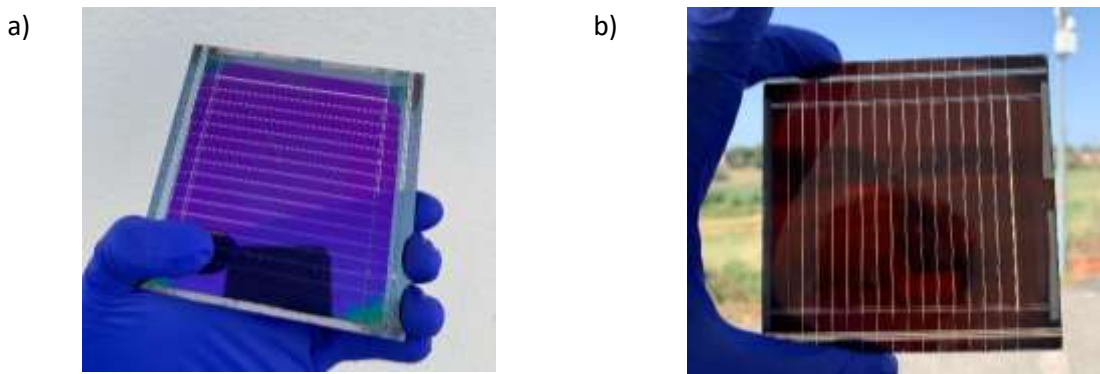


Figure 19: a) foto del modulo dal lato dell'ITO; b) foto del modulo dal lato del FTO/vetro.

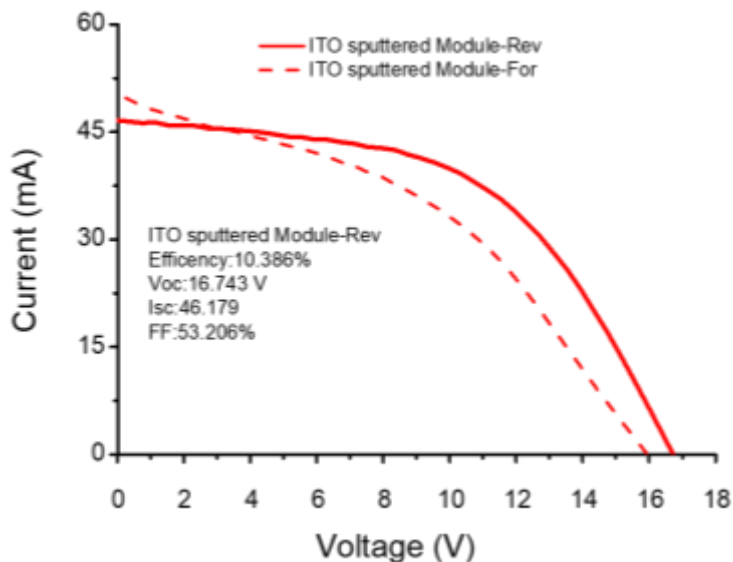


Figure 20: Curva caratteristica in scansione forward e reverse del modulo semi-trasparente su substrato 10 x 10 cm².

Tabella 6. Parametri fotovoltaici del modulo semi-trasparente.

Sample	Scan Direction	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA)	FF (%)	PCE (%)
Module (39.6 cm ² active area) 15 series cell	Reverse	16.743	46.179	53.206	10.386
	Forward	16.156	52.838	38.894	8.382

3 Conclusioni

In questo report sono stati mostrati e discussi i processi di design e ottimizzazione delle interconnessioni in serie di celle mediante processo laser per il perfezionamento di moduli FV a film sottile di perovskite. Il lavoro è stato condotto partendo da un'analisi teorica e simulativa di riferimento, analizzando e scorrendo le

principali fonti di perdite di efficienza dal passaggio da cella a modulo fotovoltaico di film sottile a perovskite. Sono stati analizzati e ottimizzati i 3 principali processi di interconnessione coinvolti, denominati P1, P2 e P3 su architettura n-i-p. L'ottimizzazione del processo P2 ha richiesto particolare attenzione, in quanto processo più importante e delicato per la riduzione di perdite resistive tra una cella e quella adiacente nei moduli con celle interconnesse in serie. Migliorando la conducibilità elettronica dei substrati di trasportatori di carica, che hanno visto la sostituzione dello strato a base di molecola organica SpiroMeOTAD con i polimeri P3HT e PTAA, sono state raggiunte efficienze del 13.3% e 17% rispettivamente, su substrati $10 \times 10 \text{ cm}^2$ e area attiva di 43 cm^2 con contatto opaco. Abbiamo dimostrato che utilizzando queste ottimizzazioni ed un interlayer di perovskite bidimensionale è possibile raggiungere efficienze maggiori del 18.1% su moduli di area attiva 10 cm^2 . Infine, sono stati avviati studi di ottimizzazione del processo P3 e della deposizione con sputter del contro elettrodo trasparente ITO. Risultati preliminari hanno ottenuto efficienze massime del 12.6% (13.2 cm^2) su moduli di piccola dimensione e 10.38% su moduli realizzati su substrati $10 \times 10 = 100 \text{ cm}^2$. Al fine di migliorare questa efficienza, verranno condotti ulteriori studi sull'interfaccia tra strati trasportatori di carica e contro elettrodi trasparenti, al fine di migliorare il processo di deposizione sputter che risulta invasivo, creando ulteriori difetti evidenziati su superfici più grandi. Inoltre, il processo P3 per i contatti trasparenti richiederà un'analisi più approfondita in modo da limitare ulteriori perdite resistive dovute a questa interconnessione.

4 Riferimenti bibliografici

1. Park, N.-G. and K. Zhu, *Scalable fabrication and coating methods for perovskite solar cells and solar modules*. Nature Reviews Materials, 2020. **5**(5): p. 333-350.
2. Di Giacomo, F., et al., *Upscaling Inverted Perovskite Solar Cells: Optimization of Laser Scribing for Highly Efficient Mini-Modules*. Micromachines, 2020. **11**(12).
3. Castriotta, L.A., et al., *Air-Processed Infrared-Annealed Printed Methylammonium-Free Perovskite Solar Cells and Modules Incorporating Potassium-Doped Graphene Oxide as an Interlayer*. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021. **13**(10): p. 11741-11754.
4. Pescetelli, S., et al. *Large area perovskite solar modules with improved efficiency and stability*. in *2019 International Symposium on Advanced Electrical and Communication Technologies (ISAECT)*. 2019.
5. Vesce, L., et al. *Semi-transparent triple cation Perovskite solar module exceeding 8% efficiency for BIPV applications*. in *2020 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2020.
6. Yaghoobi Nia, N., et al., *Doping Strategy for Efficient and Stable Triple Cation Hybrid Perovskite Solar Cells and Module Based on Poly(3-hexylthiophene) Hole Transport Layer*. Small, 2019. **15**(49): p. 1904399.
7. Yaghoobi Nia, N., et al., *Beyond 17% stable perovskite solar module via polaron arrangement of tuned polymeric hole transport layer*. Nano Energy, 2021. **82**: p. 105685.

5 Abbreviazioni ed acronimi

Acronimo	Significato
AA	Active Area
AR	Aspect Ratio
AVT	Average Visible Transmittance
BCP	Bathocuproine
DA	Dead Area
DLIT	Dark Lock-In Thermography
EDX	Energy-Dispersive X-ray spectroscopy
EL	Electroluminescence
ETL	Electron Transport Layer
ETM	Electron Transport Material
FTO	Fluorin Tin Oxide
GFF	Geometrical Fill Factor
ITO	Indium Tin Oxide
HAADF	High-Angle Annular Dark-Field
HTL	Hole Transport Layer
HTM	Hole Transport Material
MW	Molecular Weight
P1	Process 1
P2	Process 2
P3	Process 3
P3HT	Poly (3-hexylthiophene)
PCE	Power Conversion Efficiency
PTAA	Poli(triarylamine)
PCBM	[6,6]-Phenyl C61 butyric acid methyl ester
RSD	Rasted Scanning Distance
SLG	Soda-Lime Glass
STEM	Scanning Transmission Electron Microscopy
TCO	Transparent Conductive Oxide
UV	Ultraviolet
XRD	X-ray Diffraction analysis

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 40 ricercatori e dal quale sono nati 5 spin-off e un consorzio pubblico-privato per l'industrializzazione delle celle DSC. Dal settembre 2019 è direttore dell'Istituto di Struttura della Materia del CNR.

Aldo Di Carlo è/e' stato coordinatore locale di sei progetti H2020, ESPRESSO sulla deposizione di perovskiti su larga area, IMPRESSIVE per celle fotovoltaiche PSC/DSSC per integrazione architettonica, MOSTOPHOS sulla simulazione di LED organici, CHEOPS sulle celle a perovskite, MAESTRO per training su celle solari e GRAPHENE Flagship. E' 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. E' stato il coordinatore scientifico locale di diversi progetti di ricerca sia Italiani che Europei, tra cui: cinque progetti FP7 STREP, SMASH sui Led GaN e HYMEC su memorie organiche, NEWLED sullo sviluppo di LED al GaN, DESTINY sulle celle fotovoltaiche organiche, CHEETAH sul fotovoltaico, 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 650 pubblicazioni scientifiche internazionali (H-factor=61, Citazioni=15000, fonte SCOPUS), di 10 brevetti internazionali, di diversi articoli di review su i modelli atomistici per lo studio delle nanostrutture organiche e inorganiche e 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.