

Ricerca di Sistema elettrico



**Sviluppo ed ottimizzazione di materiali ed additivi per
celle solari a film sottile di perovskite o per celle
tandem perovskite/silicio (LA1.18)**

A. L. A. Castriotta, L. Vesce, D. Takellambam, E. Nonni,
E. Magliano, M. Stefanelli, F. Matteocci, A. Di Carlo



SVILUPPO ED OTTIMIZZAZIONE DI MATERIALI ED ADDITIVI PER CELLE SOLARI A FILM SOTTILE DI PEROVSKITE O PER CELLE TANDEM PEROVSKITE/SILICIO (LA1.18)

Luigi Angelo Castriotta, Luigi Vesce, Daimiota Takellambam, Elisa Nonni, Erica Magliano, Maurizio Stefanelli, Fabio Matteocci, Aldo Di Carlo

Dipartimento di Ingegneria Elettronica Università di Roma "Tor Vergata"

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.1 "Fotovoltaico ad alta Efficienza"

Linea di attività: LA1.18

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Università di Tor Vergata

Mese inizio previsto: 01

Mese inizio effettivo: 01

Mese fine previsto: 18

Mese fine effettivo: 18

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Sviluppo, fabbricazione e caratterizzazioni di celle solari e moduli fotovoltaici a perovskite per applicazioni a singola giunzione e tandem*"

Responsabile scientifico ENEA: Vera La Ferrara

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Aldo Di Carlo

Indice

1	RISULTATI ATTESI	3
2	RISULTATI OTTENUTI.....	3
3	PRODOTTI ATTESI.....	3
4	PRODOTTI SVILUPPATI	3
5	ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI	3
6	SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE	4
7	DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	5
8	PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE.....	14
9	EVENTI DI DISSEMINAZIONE	15

1 Risultati attesi

Le attività consentiranno lo sviluppo di differenti formulazioni di perovskite adatte ad essere utilizzate nella tecnologia thin-film o in combinazione col silicio per le celle solari tandem e di strategie per migliorare la stabilità dei dispositivi mediante l'identificazione ed ottimizzazione di opportuni additivi. Saranno, inoltre, analizzate le caratteristiche di scalabilità dei materiali ed additivi studiati a livello di modulo FV.

Le attività forniranno i seguenti risultati:

- Celle solari in perovskite con stabilità T80 per illuminazione continua e per stress termico a 85 °C maggiore 1000 h;
- Celle semitrasparenti di area $\geq 1\text{cm}^2$ con efficienza $> 15\%$
- Celle solari ottimizzate con Self-Assembled Monolayers con efficienza $> 20\%$ su area inferiore al cm^2 .

2 Risultati ottenuti

- Celle solari in perovskite con stabilità T90 e T80 per illuminazione continua e per stress termico a 85 °C maggiore 1500 h e 8000h, rispettivamente;
- Celle semitrasparenti di area $\geq 1\text{cm}^2$ con efficienza $> 15.5\%$;
- Celle solari ottimizzate con Self-Assembled Monolayers con efficienza $> 20.5\%$ su area inferiore al cm^2 ;
- Moduli con area $> 165\text{cm}^2$ con efficienza $> 16\%$;
- Celle solari semitrasparenti da utilizzare per la realizzazione di celle tandem perovskite/Si nella LA1.27.

Sulla base dei risultati ottenuti si può affermare che le attività di ricerca hanno raggiunto tutti gli obiettivi stabiliti.

3 Prodotti attesi

Rapporto tecnico dal titolo "Sviluppo ed ottimizzazione di materiali ed additivi per celle solari a film sottile di perovskite o per celle tandem perovskite/silicio"

4 Prodotti sviluppati

Il presente rapporto tecnico "Sviluppo ed ottimizzazione di materiali ed additivi per celle solari a film sottile di perovskite o per celle tandem perovskite/silicio" - Report RdS_PTR22-24_PR1.1_LA1.18_047

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nell'ambito dell'analisi degli scostamenti su attività e risultati, si conferma che, al momento, non sono stati rilevati scostamenti dalle attività previste. Il lavoro è proceduto secondo le previsioni e le attività pianificate hanno raggiunto gli obiettivi stabiliti. L'assenza di scostamenti evidenzia una gestione efficace e una congruenza tra le fasi di pianificazione e di esecuzione del progetto nella LA1.18.

6 Sintesi delle attività svolte

L'attività ha studiato possibili additivi per la perovskite per migliorare prestazioni e stabilità delle celle in perovskite (PSC): la combinazione di liquidi ionici BMIM-BF₄, OAm e BHC ha consentito di raggiungere efficienze del 21,3% e oltre 1000 ore di stabilità sotto illuminazione continua e stress termico. Un migliore trasferimento di carica nelle celle è stato dimostrato con molecola C10-BTBT in combinazione con Self-assembling monolayer (MeO-2PACz): si è, infatti, ottenuto un FF di circa 86% e un aumento dell'efficienza dal 18,0% al 20,5%. Si è, poi, lavorato all'ottimizzazione della cella in perovskite semitrasparente da utilizzare per la realizzazione di celle tandem perovskite/Si. È stato realizzato un prototipo di modulo PV (architettura n-i-p) utilizzando una fabbricazione scalabile in aria e bassa temperatura. Il modulo raggiunge un'efficienza del 16.1% su un'area attiva di 186cm². Il test di stabilità ISOS-D-1 per 1000 ore conferma l'elevata stabilità del dispositivo.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Additivi nella perovskite

La scelta dei liquidi ionici (IL) BMIMBF₄, del Benzylhydrazine hydrochloride (BHC) e dell'oleilamina (OAm) come additivi per la perovskite (Figura 1a) mira a migliorare la qualità dell'assorbitore di perovskite nella soluzione. IL migliora J_{sc} e FF, OAm migliora Voc e BHC potenzia sia J_{sc} che Voc, riducendo la formazione di difetti. Per dimostrare l'efficacia degli additivi nella perovskite, abbiamo testato due formulazioni con differenti band-gap in dispositivi solari. Utilizzando la struttura invertita[1], i precursori con additivi mostrano un aumento significativo dell'efficienza fino al 20,31% e 20,30%. I parametri fotovoltaici migliorano del 25% e 37% rispettivamente, con densità di corrente, fill factor e tensione a circuito aperto migliori. Anche con diverse configurazioni di strati trasportatori di carica, si ottiene un'efficienza record del 20,61%.

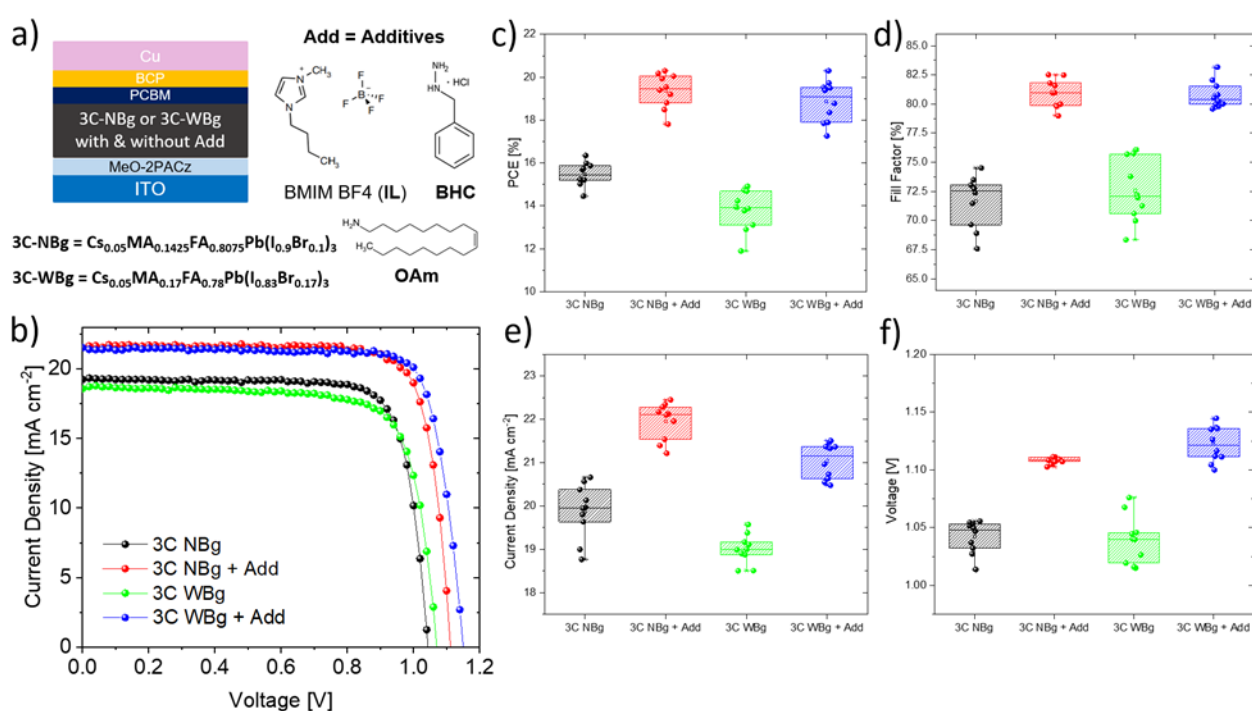


Figura 1. (a) Schema dell'architettura del dispositivo utilizzato in questo lavoro, insieme alla composizione completa del dispositivo per le perovskiti a band gap stretta (NBg) e ampia (WBg), e i tre additivi adottati, denominati Add, che includono 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate (BMIM BF₄ o IL), Benzylhydrazine hydrochloride (BHC) e Oleylamine (OAm); (b) curva della densità di corrente in funzione della tensione del miglior dispositivo fabbricato per tipo; statistiche sulle prestazioni elettriche di 10 dispositivi per tipo fabbricati, efficienza o PCE (c), fill factor (d), densità di corrente (e) e confronto della tensione ottenuta (f). Estratto dall'articolo L. Castriotta et al. Nano Energy 109 (2023) 108268 (i)

Tabella 1. I parametri elettrici per i dispositivi migliori e la media su 10 campioni \pm deviazione standard per ciascun tipo di dispositivo a perovskite, estratti dalla curva corrente-tensione (J-V) acquisita con un'irradiazione equivalente a 1 Sole. Al fine di dimostrare la trasferibilità dell'approccio, sono state considerate 2 tipi di perovskite una a gap piccola (NBg) e una a gap grande (WBg).

Perovskite		PCE [%]	J_{sc} [mA cm ⁻²]	V_{oc} [V]	FF [%]	J_{sc} integrata [mA cm ⁻²] ^a
NBg	Best	16.35	20.66	1.05	78.47	
	Average	15.45 \pm 0.55	19.95 \pm 0.62	1.04 \pm 0.01	72.56 \pm 4.53	20.48
NBg + Add	Best	20.31	22.45	1.11	82.52	22.31
	Average	19.47 \pm 0.81	22.11 \pm 0.61	1.10 \pm 0.01	80.97 \pm 7.24	
WBg	Best	14.91	19.57	1.08	76.08	
	Average	13.90 \pm 0.94	18.99 \pm 0.55	1.04 \pm 0.02	72.07 \pm 4.85	19.86
WBg + Add	Best	20.30	21.51	1.14	83.17	21.74
	Average	19.08 \pm 0.98	21.14 \pm 0.72	1.12 \pm 0.02	80.39 \pm 2.39	

a) Densità di corrente integrata ottenuta dalle misure di IPCE per i migliori dispositivi per tipo.

È stato studiato l'impatto degli additivi sulla morfologia del film e sulle proprietà optoelettroniche per comprendere il miglioramento delle prestazioni. Abbiamo verificato se tali additivi influenzano la cristallizzazione o se essi agiscono sulla passivazione dei difetti, riducendo le perdite da ricombinazioni non radiative. Dal punto di vista delle proprietà ottiche dei film, l'introduzione dei tre additivi nell'inchiostro di perovskite 3C ha solo un effetto marginale. Se si osserva la trasmittanza dei film di perovskite depositati su vetro/ITO/MeO-2PACz (vedi Figura 2a), gli additivi sembrano aumentare leggermente la trasmittanza al di sotto della band-gap.

Riteniamo che l'effetto degli additivi sulla perovskite sia principalmente quello di modificare la rugosità del film, come evidenziato dall'analisi AFM, e di ridurre lo spessore. Gli additivi hanno un impatto trascurabile sulla band gap, ma prevengono la formazione di grani di ioduro di piombo, come mostrato dalle immagini SEM[2]. Questo indica un miglioramento della purezza di fase. L'analisi XRD suggerisce che gli additivi non alterano la struttura reticolare della perovskite ma sono principalmente localizzati ai confini dei grani. L'effetto benefico degli additivi si estende alla riduzione dei picchi associati alle fasi di perovskite idratate, migliorando la stabilità ambientale dei film. L'AFM indica una diminuzione della rugosità del film, favorendo una migliore copertura dei grani di perovskite. In conclusione, la miscela di additivi agisce positivamente sulla purezza di fase e sulla passivazione, giustificando il notevole miglioramento delle prestazioni del dispositivo.

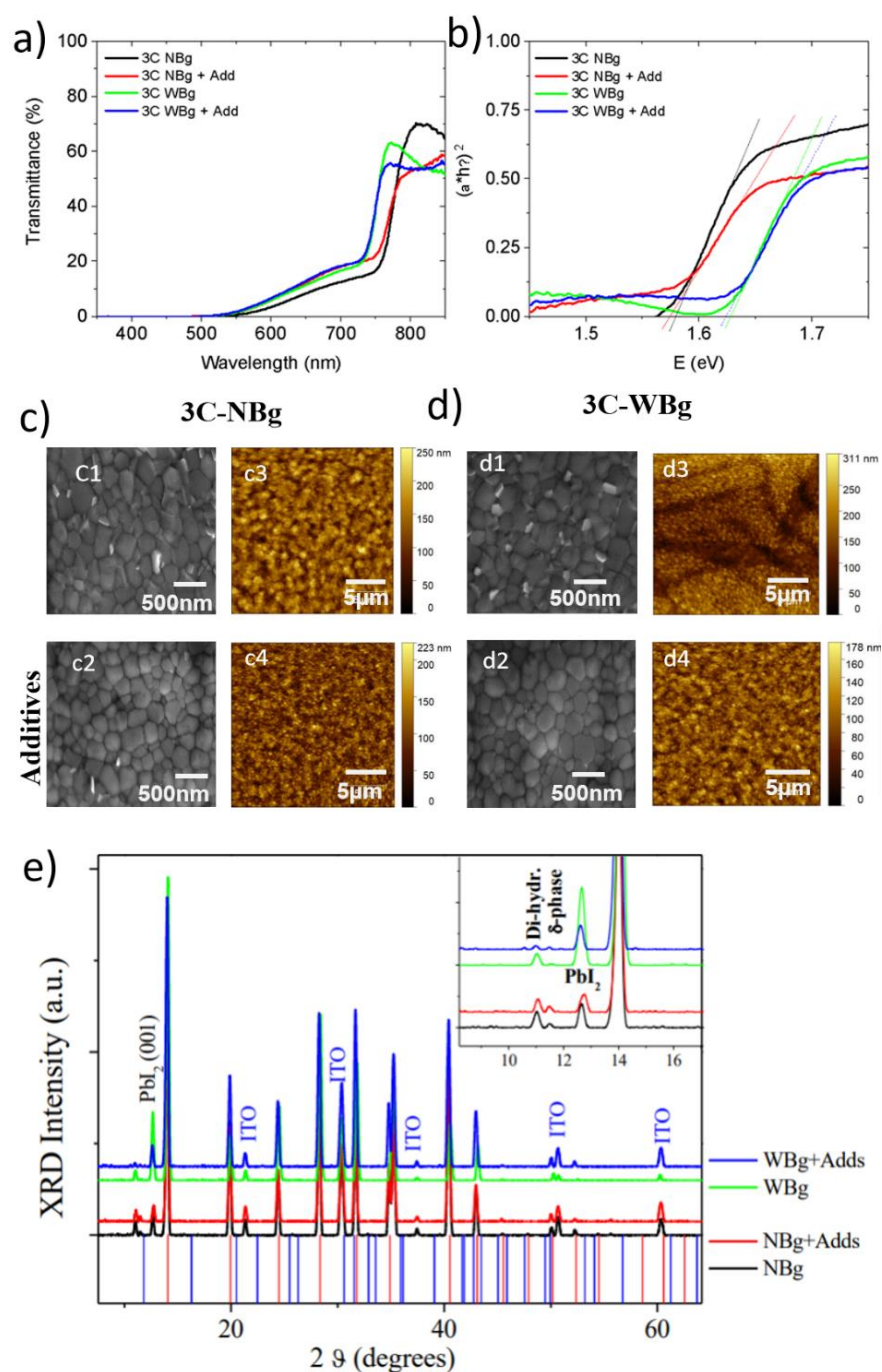


Figura 2. I risultati analitici sui film di perovskite a triplo catione (3C). L'etichetta NBg indica la formulazione $\text{Cs}_{0.05}\text{MA}_{0.14}\text{FA}_{0.81}\text{Pb}(\text{I}_{0.9}\text{Br}_{0.1})_3$, mentre WBg indica la formulazione $\text{Cs}_{0.05}\text{MA}_{0.17}\text{FA}_{0.77}\text{Pb}(\text{I}_{0.83}\text{Br}_{0.17})_3$. Tutti i film sono depositati su substrati di vetro/ITO/MeO-2PACz; (a) Trasmittanza (con sfera integratrice) dei film di perovskite 3C con e senza miscela di additivi; (b) Grafico di Tauc dei film di perovskite 3C con e senza additivi utilizzati per identificare la band-gap dei film; (c) Analisi SEM e AFM della perovskite NBg con (c2 e c4) e senza additivi (c1 e c3); (d) Analisi SEM e AFM della perovskite WBg con (d2 e d4) e senza additivi (d1 e d3); (e) Pattern XRD dei film di perovskite 3C con e senza additivi. Le colonne rosse e blu si riferiscono rispettivamente alle fasi teoriche di perovskite alfa e delta. Estratto dall'articolo L. Castriotta et al. *Nano Energy* 109 (2023) 108268 (i)

Per valutare l'efficacia degli additivi nelle celle solari a perovskite, abbiamo esaminato la stabilità dei dispositivi sotto illuminazione continua e stress termico[3,4]. L'aggiunta degli additivi ha migliorato notevolmente la durata dei dispositivi, con aumenti del T₈₀ fino al 500% rispetto alla perovskite senza additivi. L'analisi dettagliata mostra che la combinazione degli additivi induce la maggiore stabilità. Il miglioramento della stabilità termica è altrettanto significativo, con un T₈₀ aumentato fino al 428% con l'uso degli additivi. Il dispositivo migliore ha dimostrato una straordinaria durata, superando le 8658 ore, indicando il notevole potenziale di questi additivi nel migliorare la stabilità delle celle solari a perovskite sotto stress luminoso e termico.

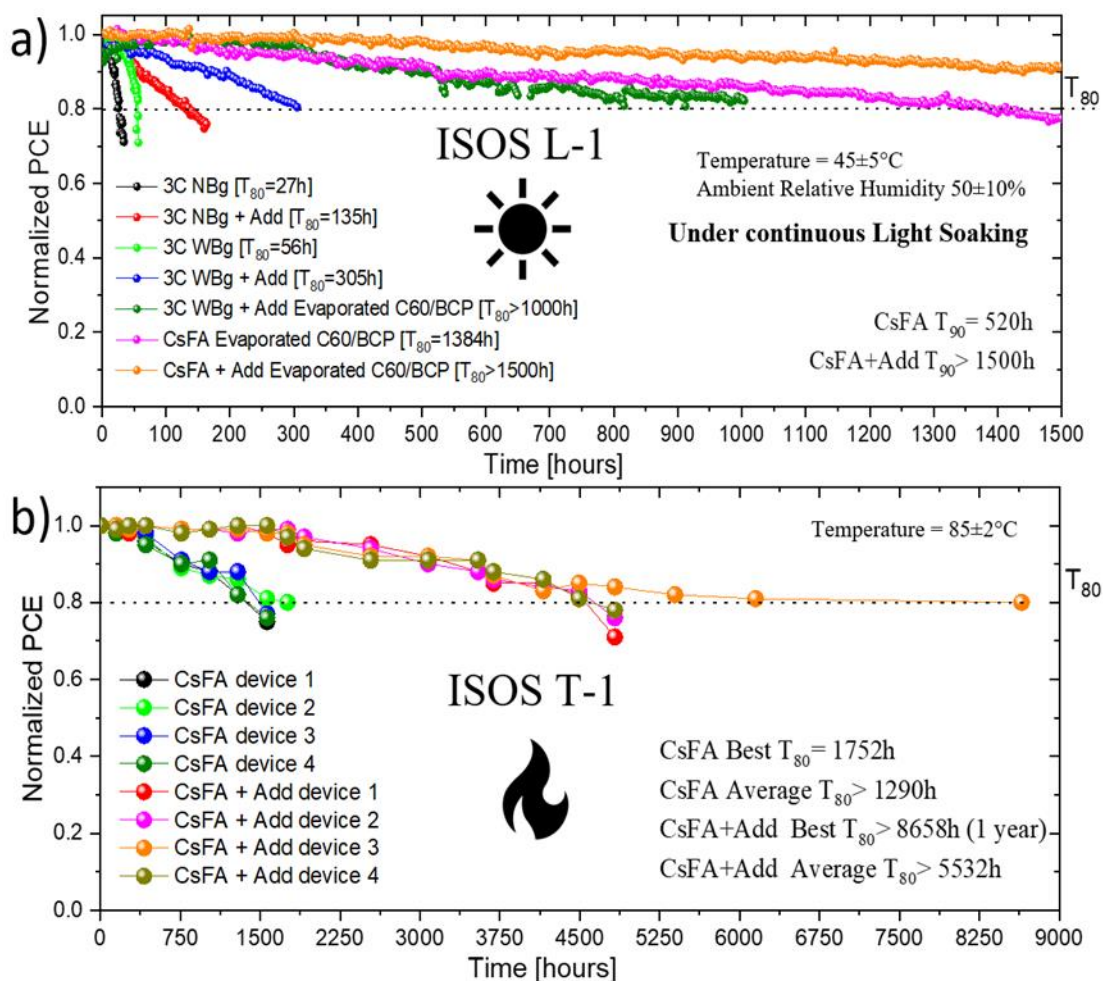


Figura 3. Misure dei test di stabilità seguendo due dei test standard più comuni: ISOS L-1 (a), in cui il test è stato eseguito sotto illuminazione continua in condizioni atmosferiche; ISOS T-1 (b), in cui i dispositivi sono stati conservati a 85°C in un ambiente atmosferico e rimossi solo per misurare la tendenza nel tempo. I dati statistici sono stati mostrati per ISOS T-1 (b), con fino a 8 dispositivi su perovskite CsFA con e senza additivi. Tutti i dispositivi monitorati durante lo stress luminoso e termico sono stati sigillati solo applicando nastro di kapton. Estratto dall'articolo L. Castriotta et al. Nano Energy 109 (2023) 108268 (i).

7.2 Cella top n-i-p con gap > 1.65 eV per applicazioni tandem

Per migliorare l'efficienza della cella solare, è stata ottimizzata la formulazione $\text{Cs}_{0.17}(\text{FA}_{0.83}\text{Pb}(\text{IO}_{0.75}\text{Br}_{0.25}))_3$ con una band-gap di 1.67 eV. Il PEABr è stato depositato sopra la perovskite per ridurre gli stati trappola dovuti all'elevata concentrazione di bromo. Per migliorare il trasporto delle lacune, è stato introdotto il F4TCNQ nel PTAA, insieme a LiTFSI e t-BP.

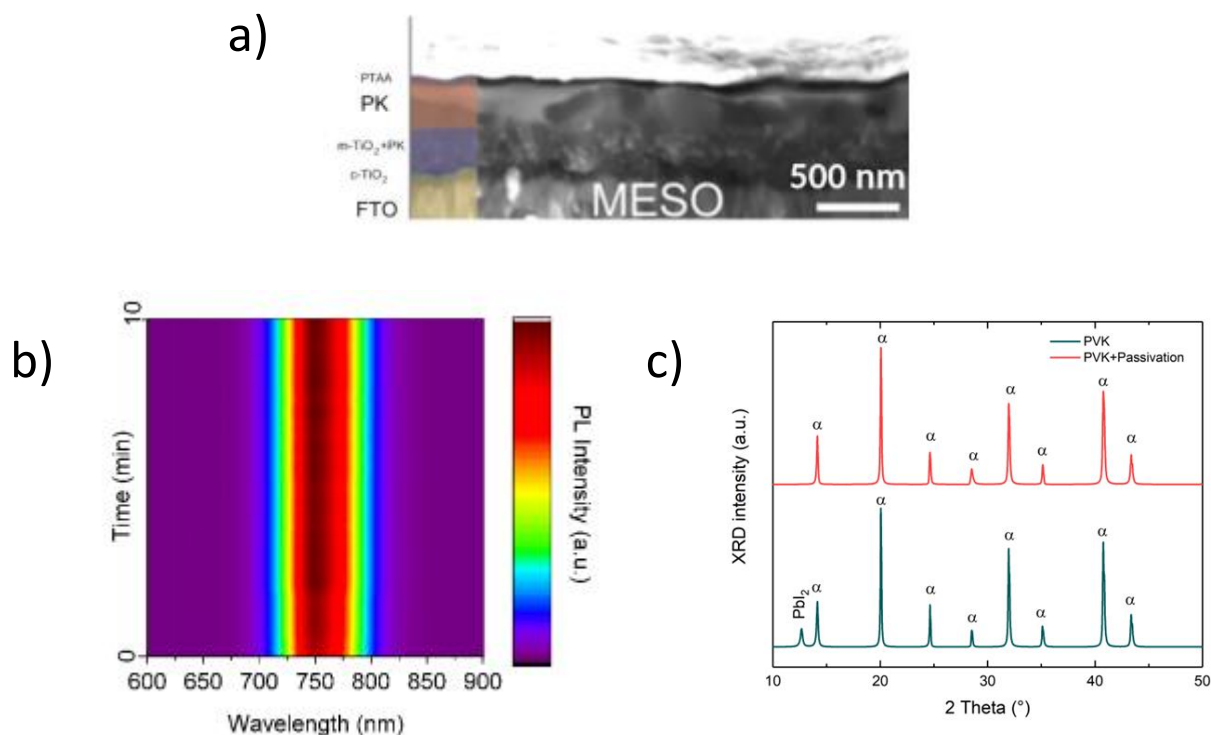


Figura 4. Sezione trasversale SEM della struttura ottimizzata (a); evoluzione temporale del segnale di PL sotto illuminazione laser UV per 10 minuti (b); Spettroscopia XRD per il film di perovskite non trattato (rosso) e il film di perovskite passivato con PEABr (verde) su vetro (c).

Lo strato di perovskite è stato esaminato attraverso il monitoraggio del segnale PL, evidenziando un aumento dell'intensità durante l'illuminazione UV senza variazioni significative nel picco di emissione. Tuttavia, la presenza di bromuro può generare vuoti nell'assorbitore, causando una caduta di tensione. Sono stati introdotti sali organici di alogenuri per mitigare questo effetto dannoso, con il PEABr che si è dimostrato efficace nel ridurre le lacune intrinseche di bromo. L'analisi XRD ha confermato il benefico effetto sulla segregazione di fase. Il dispositivo realizzato con la perovskite sviluppata è stato fornito ad ENEA per la realizzazione di dispositivi tandem perovskite/Si con connessione meccanica (RdS_PTR 22-24_PR 1.1_LA1.27_049).

7.3 Buffer layer per celle semitrasparenti

Nella produzione di celle semitrasparenti, lo sputtering dell'elettrodo trasparente rappresenta una sfida. Per proteggere i substrati, è stato introdotto un Transition Metal Oxide (TMO) come Buffer Layer di Protezione (PBL) prima dello sputtering di Indium Tin Oxide (ITO). I TMOs rappresentano degli ottimi candidati per la protezione da sputtering grazie alla presenza del metallo pesante, alta trasmissibilità e elevata funzione lavoro [5, 6, 7]. MoO_x e V_2O_x sono stati testati come PBL, variando lo spessore da 0 a 10 nm. L' MoO_x ha migliorato le prestazioni dei dispositivi, mentre il V_2O_x ha mostrato una diminuzione dell'efficienza per spessori di 10 nm. I dispositivi con MoO_x hanno raggiunto un'efficienza massima del 16.44% con 7.5 nm di spessore, mentre quelli con V_2O_x hanno mostrato una maggiore stabilità. La soluzione è stata implementata con successo su celle di larga area, ottenendo un FF del 70%. Durante il test di stabilità ISOS-L1, i dispositivi con V_2O_x hanno dimostrato una maggiore stabilità rispetto a quelli con MoO_x e senza PBL. La degradazione osservata nei dispositivi con MoO_x può essere attribuita alla riduzione del Mo e possibile delaminazione.

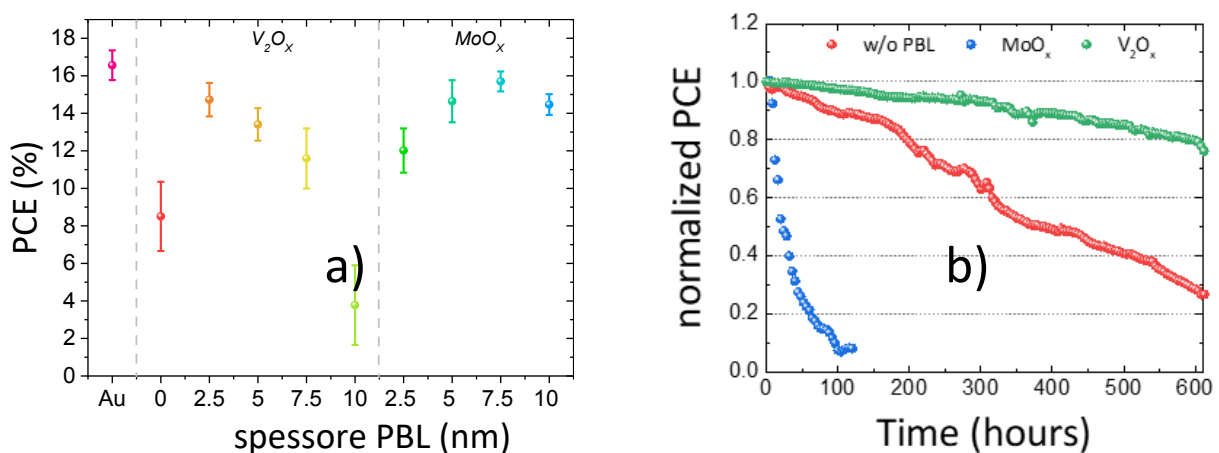


Figura 5. Efficienza delle celle semitrasparenti con diverso spessore di V_2O_x o MoO_x a confronto con celle opache (Au) (a); efficienza normalizzata in funzione del tempo delle celle semitrasparenti (senza protective buffer layer, PBL, con MoO_x e con V_2O_x) sottoposte a light-soaking (b).

7.4 Trasportatori di carica di tipo Self-Assembled Monolayers (SAM) con interlayer di benzotiofene

Il [1]benzotieno[3,2-b][1]benzotiofene (BTBT) è un materiale organico all'avanguardia, noto per la sua stabilità elettronica e chimica, e ampiamente impiegato in dispositivi quali Transistor ad Effetto di Campo Organico (OFET), Transistor a Film Sottile Organico (OTFT) e Concentratori Solari Luminescenti (LSCs)[8]. I BTBT alchilati, in particolare, hanno dimostrato elevata mobilità delle lacune e stabilità, tuttavia, sono stati scarsamente utilizzati nelle nuove fotovoltaiche di ultima generazione, nonostante le loro eccezionali proprietà[9].

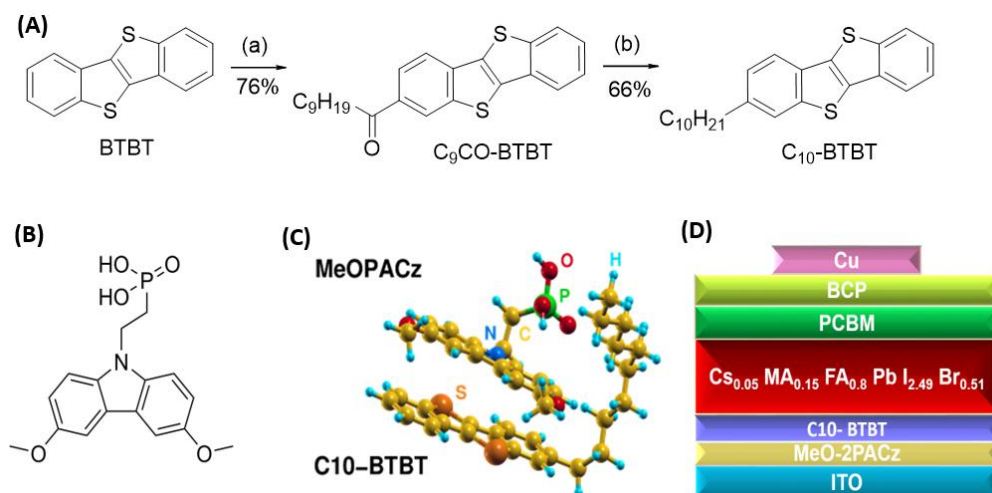


Figura 6. (A) Sintesi di C10-BTBT (a) cloruro di decanoile, tricloruro di alluminio (AlCl_3), diclorometano anidro (DCM), $-80^\circ\text{C} \rightarrow \text{rt}$; (b) boroidruo di sodio (NaBH_4), AlCl_3 , tetraidrofurano anidro (THF), $-10^\circ\text{C} \rightarrow 66^\circ\text{C}$ (B) Struttura molecolare di MeO-2PACz (C) Geometria di equilibrio di una coppia MeOPACz/C10-BTBT, calcolata mediante simulazioni DFT (D) Rappresentazione schematica dell'architettura planare p-i-n di un PSC modificato con C10-BTBT.

Abbiamo introdotto il 2-Decil-[1]benzotieno[3,2-b][1]benzotiofene (C10-BTBT) come strato intermedio nelle nostre celle solari a perovskite, migliorando l'estrazione dei portatori di carica senza alterare la morfologia o la struttura cristallina della perovskite. Con il C10-BTBT, abbiamo registrato un FF dell'85,89% e un aumento del $\sim 2,5\%$ (media del 2%) dell'efficienza fotovoltaica, raggiungendo un'efficienza del 20,5%. Le celle hanno dimostrato una robusta durata, con un T80 di 803 ore sotto illuminazione solare e oltre 1608 ore di stabilità ambientale.

Nella fabbricazione dei dispositivi, abbiamo utilizzato la perovskite $\text{Cs}_{0.05}\text{MA}_{0.15}\text{FA}_{0.8}\text{PbI}_{2.49}\text{Br}_{0.51}$ con uno spessore di circa 490 nm sono stati incorporati gli additivi IL, OAM e BHH nella soluzione di perovskite come descritto in sezione 7.1 ed è stato utilizzando il metodo di spin coating per tutti gli strati e l'evaporazione termica del rame. La figura 7 mostra le caratterizzazioni delle celle. Rispetto ai dispositivi di controllo, quelli con lo strato intermedio di C10-BTBT hanno mostrato un miglioramento delle prestazioni con una PCE del 20.51% (contro il 18% del controllo). Gli spettri EQE hanno confermato una maggiore corrente con C10-BTBT, suggerendo un trasferimento di carica più efficiente. Analizzando il rapporto τ_e/τ_h , abbiamo osservato una maggiore efficienza nell'estrazione dei portatori nei dispositivi modificati rispetto ai controlli.

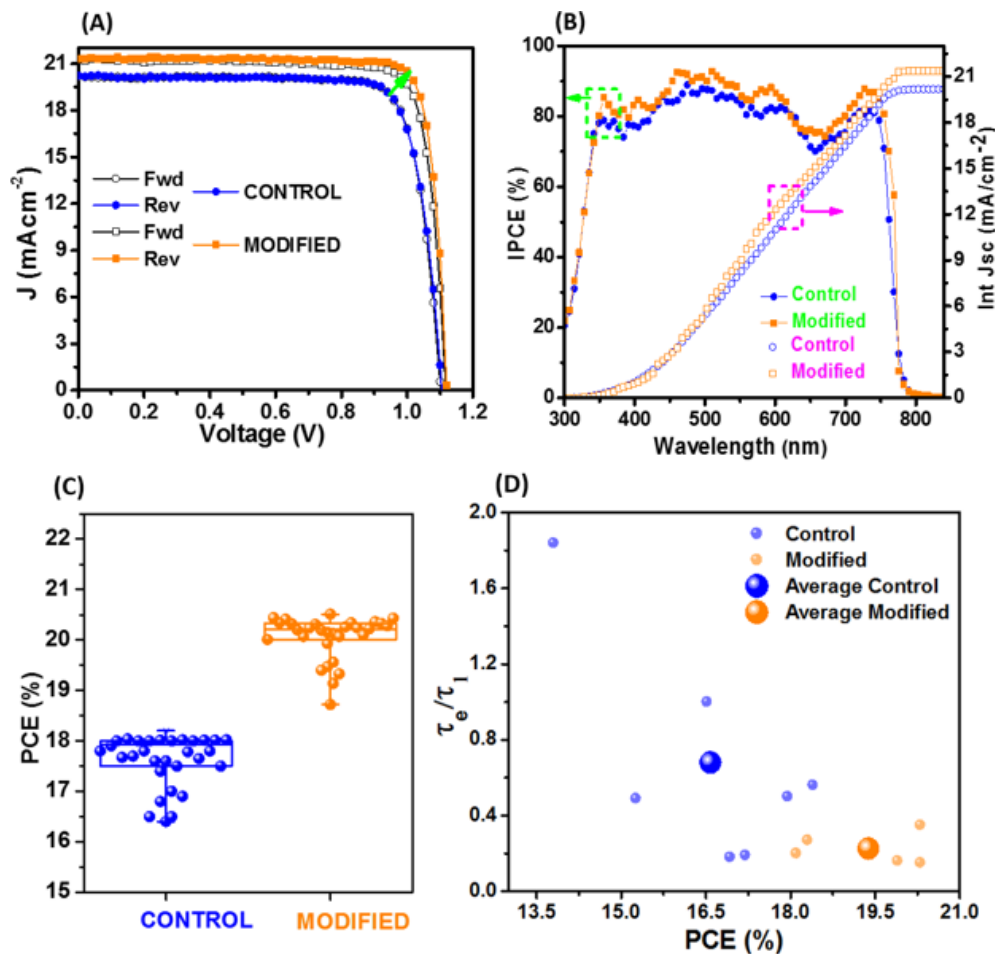


Figure 7. (A) Curva J-V dei dispositivi di controllo e modificati; (B) Spettri di efficienza quantica esterna (EQE) per entrambi i dispositivi di controllo e modificati; (C) Box plot della riproducibilità dei dispositivi sia di controllo che modificati; (D) Decadimento temporale dell'intensità di luminescenza fotovoltaica.

7.5 Moduli a perovskite su area di almeno 100 cm² utilizzando interconnessione con patterning laser

In questa ultima sezione riportiamo il lavoro sviluppato per la fabbricazione di moduli di area superiore ai 100cm², partendo dalle ottimizzazioni ottenute per celle di area piccola descritte e utilizzando i risultati conseguiti nel precedente triennio. Il modulo è stato realizzato in configurazione n-i-p planare con processi di deposizione scalabili in aria ambiente e a bassa temperatura. I substrati di vetro conduttivi FTO (Fluorine-doped Tin Oxide) sono stati patternati (P1) per realizzare 16 celle connesse in serie con un laser UV al nanosecondo. Una soluzione colloidale acquosa di ossido di stagno è stata depositata con uno slot-die coater per formare l'ETL (Electron Transporting Layer). Il film è stato poi trattato termicamente a 150 °C per 30 minuti. Una soluzione di perovskite triplo catione (CS_{0.05}(MA_{0.17}FA_{0.83})_{0.95}Pb(I_{0.83}Br_{0.17})₃) in DMF/DMSO è stata depositata con una tecnica di deposizione ibrida blade/slot-die in aria ambiente ed umidità controllata al 30%. Il processo prevede la deposizione della soluzione di perovskite con il balde-coater assistito da un flusso di aria riscaldata. Successivamente, l'antisolvente isopropanolo viene depositato ottenendo un menisco costante lungo tutto il substrato con lo slot-die coater prima di trattare termicamente il substrato a 100 °C per 20 minuti. In sequenza, vengono depositati il passivante PEAI (Phenethyl ammonium iodide) e l'HTM

(Hole Transporting Material) Spiro-OMeTAD con tecnica slot-die coating assistita da un flusso di aria. Lo step successivo è la rimozione (P2) con un laser UV al nanosecondo dello stack completo depositato su FTO dalle aree destinate alle connessioni verticali per poter collegare in serie due celle adiacenti grazie alla seguente deposizione del controlettrodo. Quest'ultima avviene con l'evaporazione termica dell'oro in alto vuoto. Infine, il controlettrodo viene rimosso (P3) con il laser per ottenere l'isolamento elettrico tra i contro-elettrodi di celle adiacenti. Nel processo di upscaling gli step laser P2-P3 sono cruciali per ridurre le perdite dovute alle interconnessioni tra le celle. Il P2 deve garantire la rimozione dello stack senza danneggiare lo strato di ossido conduttivo FTO limitando la resistenza di contatto tra FTO e oro. In seguito all'ottimizzazione del processo, abbiamo ottenuto una sheet resistance di $7 \Omega/\square$ che è uguale al valore nominale dello strato conduttivo.

Sono state seguite due strategie per migliorare le prestazioni ed ottenere una deposizione omogenea su un'area superiore ai 100cm^2 . La passivazione dei difetti superficiali del layer di perovskite con il PEAI è uno dei metodi più efficaci per ridurre le ricombinazioni non radiative e migliorare estrazione di carica e tensione. Inoltre, la soluzione di perovskite è stata ottimizzata con l'aggiunta di un solvente ad alta pressione vapore come l'ACN (Acetonitrile) che ha reso possibile una velocità di evaporazione uniforme così da controllare la fase supersaturata del film su larga area. I vantaggi ottenuti in seguito alla fabbricazione del dispositivo, all'ottimizzazione delle procedure di deposizione, all'ingegnerizzazione della soluzione di perovskite e all'utilizzo della passivazione hanno portato ad un modulo con area attiva di 186.1 cm^2 e aperture area di 201 cm^2 (ed area totale del substrato di 320 cm^2) avente un'efficienza massima del 16.1%, una Voc di 18.2 V, una Isc di 263.4 mA e un FF di 62.8% (Figura 8). Inoltre, il modulo è stato sottoposto al test di stabilità in accordo a ISOS-D-1 per 1000 ore.

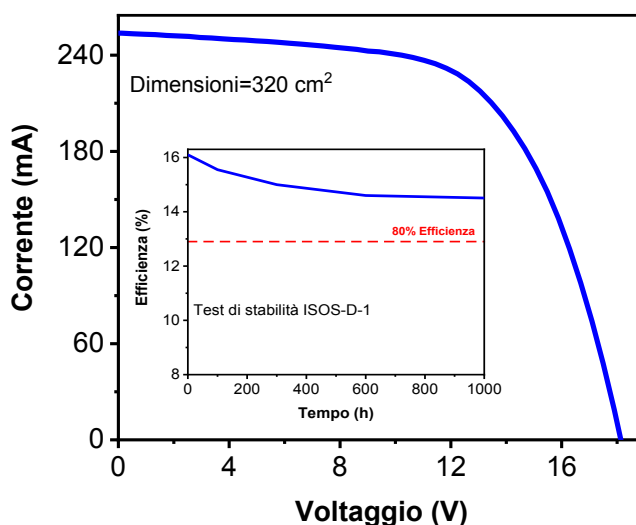
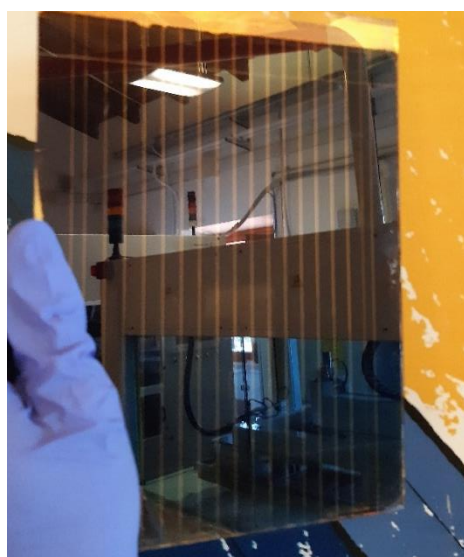


Figura 8. Modulo di 320 cm^2 (area attiva 186.1 cm^2) a perovskite (sinistra). Caratteristica IV e test di stabilità (destra).

Riferimenti bibliografici

- [1] H. Raza *et al.*, "Potential-Induced Degradation: A Challenge to Perovskite Solar Cells for their Commercialization," *Energy & Environmental Science*, 10.1039/D3EE03317A 2024.
- [2] B. Roose, K. Dey, Y.-H. Chiang, R. H. Friend, and S. D. Stranks, "Critical Assessment of the Use of Excess Lead Iodide in Lead Halide Perovskite Solar Cells," *The Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 11, no. 16, pp. 6505-6512, 2020/08/20 2020.
- [3] M. V. Khenkin *et al.*, "Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures," *Nature Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 35-49, 2020/01/01 2020.

- [4] L. A. Castriotta *et al.*, "Stable Methylammonium-Free p-i-n Perovskite Solar Cells and Mini-Modules with Phenothiazine Dimers as Hole-Transporting Materials," *ENERGY & ENVIRONMENTAL MATERIALS*, vol. 6, no. 6, p. e12455, 2023/11/01 2023.
- [5] R. Saive, "S-Shaped Current–Voltage Characteristics in Solar Cells: A Review," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, pp. 1477-1484, 2019.
- [6] J. Ibarra Michel, J. Dréon, M. Boccard, J. Bullock, and B. Macco, "Carrier-selective contacts using metal compounds for crystalline silicon solar cells," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 31, no. 4, pp. 380-413, 2023/04/01 2023.
- [7] G. S. Jeong *et al.*, "Stoichiometry and Morphology Analysis of Thermally Deposited V₂O₅−x Thin Films for Si/V₂O₅−x Heterojunction Solar Cell Applications," *Materials*, vol. 15, no. 15. doi: 10.3390/ma15155243
- [8] M. Alkan and I. Yavuz, "Intrinsic charge-mobility in benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene (BTBT) organic semiconductors is enhanced with long alkyl side-chains," *Physical Chemistry Chemical Physics*, 10.1039/C8CP01640B vol. 20, no. 23, pp. 15970-15979, 2018.
- [9] H. Ebata *et al.*, "Highly Soluble [1]Benzothieno[3,2-b]benzothiophene (BTBT) Derivatives for High-Performance, Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 129, no. 51, pp. 15732-15733, 2007/12/01 2007.

8 Pubblicazioni scientifiche

- i. L. A. Castriotta, E. Calabrò, F. Di Giacomo, S. Harshavardhan Reddy, D. Takhellambam, B. Paci, A. Generosi, L. Serenelli, F. Menchini, L. Martini, M. Tucci, Aldo Di Carlo, "A universal multi-additive strategy to enhance efficiency and stability in inverted perovskite solar cells", *Nano Energy* 109 (2023) 108268.
- ii. F. Matteocci, D. Rossi, L. A. Castriotta, D. Ory, S. Mejaouri, M. Auf der Maur, F. Sauvage, S. Cacovich, A. Di Carlo, "Wide bandgap halide perovskite absorbers for semi-transparent photovoltaics: From theoretical design to modules", *Nano Energy* 101 (2022) 107560.
- iii. C. Teixeira, P. Spinelli, L. A. Castriotta, D. Müller, S. Öz, L. Andrade, A. Mendes, A. Di Carlo, U. Würfel, K. Wojciechowski, and D. Forgács, "Charge Extraction in Flexible Perovskite Solar Cell Architectures for Indoor Applications – with up to 31% Efficiency", *Adv. Funct. Mater.* 2022, 32, 2206761.
- iv. L. A. Castriotta, M. Zendejdel, N. Yaghoobi Nia, E. Leonardi, M. Löffler, B. Paci, A. Generosi, B. Rellinghaus, and A Di Carlo, "Reducing Losses in Perovskite Large Area Solar Technology: Laser Design Optimization for Highly Efficient Modules and Minipanel", *Adv. Energy Mater.* 2022, 12, 2103420.
- v. F. Jafarzadeh, L. A. Castriotta, F. De Rossi, J. Ali, F. Di Giacomo, A. Di Carlo, F. Matteocci and Francesca Brunetti, "All-blade-coated flexible perovskite solar cells &modules processed in air from a sustainable dimethyl sulfoxide (DMSO)-based solvent system", *Sustainable Energy Fuels*, 2023, 7, 2219–2228.
- vi. Luigi Angelo Castriotta, and Enrico Leonardi, "How to (Not) Make a Perovskite Solar Panel: A Step-by-Step Process", *Processes* 2022, 10, 1980. <https://doi.org/10.3390/pr10101980>.

- vii. V. Campanari, F. Martelli, A. Agresti, S. Pescetelli, N. Yaghoobi Nia, F. Di Giacomo, D. Catone, P. O’Keeffe, S. Turchini, B. Yang, J. Suo, A. Hagfeldt, and A. Di Carlo, “Reevaluation of Photoluminescence Intensity as an Indicator of Efficiency in Perovskite Solar Cells”, Sol. RRL 2022, 6, 2200049

9 Eventi di disseminazione

[1] Luigi Angelo Castriotta, Francesco Di Giacomo, Fabio Matteocci, Luigi Vesce, Maurizio Stefanelli, Vivek Babu, Rosinda Fuentes Pineda, Narges Yaghoobi Nia, Mahmoud Zendehtdel, Francesca Brunetti, Konrad Wojciechowski, Aldo Di Carlo; “Stable Perovskite Solar Modules: strategy and optimization route from n-i-p to p-i-n architecture on rigid & flexible substrate”, AIV XXV, 2022, oral contribution (Naples, Italy, May 10th-12th, 2022)

[2] Maurizio Stefanelli, Luigi Vesce, Luigi Angelo Castriotta, Francesco Di Giacomo, Aldo Di Carlo; “Perovskite Technology Scaling Up From 32 cm² to 320 cm² Module by Fully Ambient Air Meniscus Coating Processes”, HOPV 2022, poster contribution (Valencia, Spain, May 19th- 25th, 2022)

[3] Luigi Vesce, Maurizio Stefanelli, Luigi Angelo Castriotta, Bowen Yang, Afshin Hadipour, Stijn Lammar, Jiajia Suo, Tom Aernouts, Anders Hagfeldt, Aldo Di Carlo; “Interfacial Defects Passivation of High Efficiency Perovskite Solar Modules”, HOPV 2022, oral contribution (Valencia, Spain, May 19- 25, 2022)

[4] Daimiota Takhellambam, Luigi Angelo Castriotta, Gloria Zanotti, Laura Mancini, Aldo di Carlo; “Introducing Organic Interlayer over Self Assembled Monolayers: Boosting Stability of Solution Processable P-I-N based Perovskite Solar Cells with nearly 20% efficiency”, HOPV 2022, oral contribution (Valencia, Spain, May 19th-25th, 2022)

[5] E. Nonni, F. Matteocci, E. Magliano, L. Serenelli, M. Tucci, A. Di Carlo, “Improved 2 terminal perovskite/Si tandem cell stack for high efficiencies”, Tandem PV, 2022, poster contribution (Freiburg, Germany, May 30th-June 1st 2022)

[6] Erica Magliano, Paolo Mariani, Antonio Agresti, Sara Pescetelli, Fabio Matteocci, Babak Taheri, Antonio Cricenti, Marco Luce, and Aldo Di Carlo; “Semi-transparent perovskite solar cells with ultrathin protective buffer layers for tandem applications”, Tandem PV, 2022, poster contribution (Freiburg, Germany, May 30th-June 1st 2022)

[7] E. Nonni, F. Matteocci, E. Magliano, L. Serenelli, L. Martini, F. Menchini, M. Tucci, A. Di Carlo, “Two-terminal perovskite/silicon tandem based on double cation formulation”, WC-PEC 8, 2022, oral contribution (Milan, Italy, September 26th-30th)

[8] Erica Magliano, Paolo Mariani, Antonio Agresti, Sara Pescetelli, Fabio Matteocci, Babak Taheri, Antonio Cricenti, Marco Luce, and Aldo Di Carlo; “Semi-transparent perovskite solar cells with ultrathin protective buffer layers for tandem applications”, WC-PEC 8, 2022, poster contribution (Milan, Italy, September 26th-30th)