

PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-24 - RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE
Progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

ENEA/RSE/CNR

Tema 1.1 Titolo del progetto: Fotovoltaico ad alta efficienza

Durata: 36 mesi

Semestre n. 6 – Periodo attività: 01/07/2024 – 31/12/2024

ABSTRACT ATTIVITA' SEMESTRALE:

Il progetto si compone di 4 work package (WP): WP1 - Crescita del rapporto efficienza/costo di celle e moduli FV, WP2 - Nuove soluzioni per una maggiore penetrazione del FV nel sistema elettrico, WP3 - Metodologie e tecnologie avanzate per mappatura, monitoraggio e ottimizzazione dell'energia generata da FV e WP4 - Attività di coordinamento e gestione del progetto, Attività internazionali, Diffusione dei risultati e Collaborazione.

In relazione al WP1 sono state portate avanti le attività sullo sviluppo di celle in perovskite che prevedono anche l'utilizzo di metodi computazionali a supporto dello sviluppo sperimentale dei dispositivi. Sono state ottenute celle in perovskite con architettura di tipo p-i-n con efficienze di circa il 20%. Sono stati anche testati ETL non fullerenici sviluppati da co-beneficiari, ottenendo risultati promettenti. Per quanto riguarda lo sviluppo di tecniche da vuoto per la preparazione della perovskite, sono stati poi esplorati metodi ibridi a 2 step per modificare la composizione di film di MAPbI₃ co-evaporati; in particolare, è stato studiato un trattamento green a base di MABr per aumentare il bandgap di film di MAPbI₃ co-evaporati (~1.6 eV) verso valori appropriati per applicazioni tandem. Film di perovskite evaporata a base stagno ottenuti mediante deposizione sequenziale degli strati sono stati testati come strati assorbitori in celle che hanno mostrato efficienze inferiori all'1% a causa dell'elevato drogaggio intrinseco della perovskite ottenuta. In relazione alla realizzazione di prototipi di moduli FV in perovskite, ottimizzando il processo di laser patterning (P1-P2-P3) attraverso l'incisione laser minimizzata e discontinua, è stato raggiunto un fattore di riempimento geometrico (GFF) pari al 99,6%, superando notevolmente l'obiettivo iniziale del 95%.

Per quanto riguarda le celle solari ad eterogiunzione di silicio (SHJ), sono state realizzati dispositivi su area 2 x 2 cm² con i nuovi strati trasportatori a base di film di silicio drogato nanocristallino con i quali sono state misurate correnti fino a 40 mA/cm². Si è tuttavia resa evidente la necessità di ottimizzare l'interfaccia tra intrinseco passivante e film sottili di Si nanocristallini drogati, per migliorare, così, complessivamente le prestazioni elettriche dei dispositivi. Sono stati anche realizzati i primi prototipi di cella SHJ su wafer M2 (156 x 156 mm²). Sono poi continuati gli studi di materiali trasportatori innovativi per celle in Si non a base di film sottili di silicio drogati, alcuni dei quali sono stati testati proficuamente in celle SHJ. È stato, poi, completato e validato un modello semi-analitico per analizzare il comportamento dei dispositivi a base di Si.

Per quanto riguarda lo sviluppo di celle tandem perovskite/silicio, sono stati realizzati prototipi di celle monolitiche con efficienze che hanno superato il 25%. Inoltre si è lavorato per effettuare un upscaling in termini di area di dispositivo dei processi/materiali sviluppati, realizzando poi dei prototipi di celle tandem perovskite/Si su area di 20,25 cm², sui quali è stata valutata un'efficienza maggiore rispetto a quella della singola cella in silicio (18,5 %vs 17,4%). E' stato poi completato lo sviluppo di un modello circuitale per le celle tandem mediante Sentaurus TCAD.

Per quanto riguarda lo studio di materiali per moduli di nuova generazione, sono stati completati i test di invecchiamento accelerato per i prototipi di moduli realizzati con i materiali polimerici selezionati in precedenza e, a valle della caratterizzazione dei dispositivi, si sono valutate le potenzialità dei vari materiali in fase di studio.

In relazione al WP2, è stata completata la realizzazione dell'impianto agrivoltaico fisso e il riammodernamento di quello ad inseguimento presso il sito di Scalea e negli ultimi mesi del progetto sono stati raccolti ed elaborati i dati che riguardano la generazione elettrica e la crescita delle colture ombreggiate dai moduli FV. È, inoltre, continuata l'attività di monitoraggio della crescita di alcune tipologie di piante coltivate all'interno di una serra con copertura FV. E' continuato lo sviluppo di celle solari a film sottile di nuova generazione da utilizzare per la copertura di serre; in particolare sono state realizzate celle organiche semitrasparenti con efficienze di circa il 10%. È stata inoltre realizzata una serra prototipale da uso indoor, formata da due mini-serre (una di test e una di controllo), ognuna con una copertura di dimensioni di circa 40 x 40 cm² e un'opportuna zona di separazione che deve sopportare lo sviluppo di celle solari di nuova generazione.

È stata completata la stesura delle "Linee Guida per la localizzazione e l'integrazione paesaggistica degli impianti agrivoltaici". Inoltre, sono stati completati: le "Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici" e il tool sviluppato in ambiente Excel "EASY APV tool - Environmental Sustainability of AgriPhotoVoltaic".

Per quanto riguarda il WP3, in relazione alla mappa del potenziale agrivoltaico a livello regionale della Campania sviluppata in precedenza, sono state caratterizzate tramite apposite metriche di paesaggio le unità di paesaggio nella regione potenzialmente utilizzabili per lo sviluppo dell'agrivoltaico. Inoltre è stata sviluppata una metodologia integrata per valutare gli impatti che i sistemi agrivoltaici possono generare sul paesaggio e sui Servizi Ecosistemici.

Relativamente, poi, alle attività focalizzate sulla determinazione di anomalie di funzionamento di impianti FV, sono stati valutati gli indici prestazionali primari degli algoritmi analizzati per la valutazione del comportamento di predizione e detezione su dati reali provenienti dai dataset disponibili.

Per quanto riguarda le azioni di coordinamento del progetto (WP4), sono state condotte riunioni periodiche con RSE e CNR. Si sono effettuate le azioni di disseminazioni nei convegni/conferenze previste nel periodo di riferimento. Infine, sono state portate avanti, come già avvenuto nel passato, le attività del Photovoltaic Power Systems Technology Collaboration Programme della IEA nei vari task in cui l'ENEA è coinvolta.

ATTIVITA' SVOLTE	
AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO	SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO
ENEA	Nell'ambito delle attività previste del WP1 sono continuate le sperimentazioni che riguardano lo sviluppo di celle solari in perovskite (LA1.13), di celle a eterogiunzione di silicio (LA1.21), di celle tandem perovskite/Si (LA1.28) e lo sviluppo di polimeri da utilizzare come possibili incapsulanti (LA1.31). Nell'ambito della LA1.13, sono state sviluppate celle p-i-n con strati ultrasottili, i Self-Assembled Monolayers (SAM), per l'estrazione delle lacune (HTL). Utilizzando come SAM il 2PACz e come molecole passivanti all'interfaccia con l'ETL l'etilen-diammonio di-ioduro (EDAI) o il hexyl-trimetil-ammonio bromuro (HTMB) sono state ottenute celle p-i-n con efficienze prossime al 20%, dove è stata utilizzata una perovskite a triplo catione come materiale assorbitore. In celle ad architettura p-i-n, sono anche stati testati ETL non fullerenici sviluppati da co-beneficiari, ottenendo risultati promettenti. Per quanto riguarda lo sviluppo di tecniche da vuoto per la preparazione della perovskite, sono stati poi esplorati metodi ibridi a 2 step per modificare la composizione di film di MAPbI₃ co-evaporati; in particolare, è stato studiato un trattamento green a base di MABr per aumentare il bandgap di film di MAPbI₃ co-evaporati (~1.6 eV) verso valori appropriati per applicazioni tandem. Il materiale ottimizzato è stato testato come fotoassorbitore in celle solari p-i-n, dove l'allargamento della bandgap al valore di 1.68 eV è stato evidenziato dalla efficienza quantica esterna.

Per quanto riguarda lo studio di film di silicio nanocristallino (nc- Si) drogato di tipo n e di tipo p per celle ad eterogiunzione di Si (LA1.21), alcuni dei film sviluppati sono stati testati nei dispositivi. Sono state quindi realizzate celle SHJ (area $2 \times 2 \text{ cm}^2$) con i nuovi strati trasportatori di nc- Si con i quali sono state valutate sui dispositivi correnti fino a 40 mA/cm^2 . Tuttavia, le curve JV misurate con gli strati nc- Si hanno mostrato una riduzione del FF rispetto alle celle di riferimento, con la comparsa di un evidente contro-diodo nel caso di utilizzo del plasma di CO_2 prima della deposizione del film di silicio drogato. Ulteriore sperimentazione è, quindi, necessaria per migliorare l'interfaccia tra intrinseco passivante e film sottili di Si nanocristallini drogati, migliorando, così, complessivamente le prestazioni elettriche dei dispositivi. Sono stati anche realizzati i primi prototipi di cella SHJ su wafer M2 ($156 \times 156 \text{ mm}^2$).

In relazione allo sviluppo di celle tandem perovskite/silicio monolitiche (LA1.28), in collaborazione con l'Università di Tor Vergata, si è lavorato per ottimizzare le prestazioni di dispositivi tandem realizzati con wafer di Si di tipo p monolappati, caratterizzati cioè da una superficie flat e da superficie microrugosa, che può consentire un migliore utilizzo della radiazione solare. Sono stati quindi effettuati esperimenti sulla fabbricazione di celle tandem monolitiche perovskite/Si, ottenendo un'efficienza massima pari a 25,3% (efficienza ottenuta in precedenza circa 23%).

Si è, poi, proceduto a studiare possibili architetture e metodi per ottenere uno scale-up delle celle tandem. Si è deciso di optare per una cella tandem monolitica nella quale la componente frontale è realizzata con una configurazione n-i-p in considerazione della buona ripetibilità delle celle semitrasparenti realizzate secondo tale architettura sulla piccola area. Il primo step è stato la realizzazione di celle in silicio su area di $20,25 \text{ cm}^2$, realizzate a partire da wafer di 4" di c-Si di tipo n con superficie flat. Sono state progettate delle maschere metalliche per le griglie di raccolta, dimensionate opportunamente per massimizzare la raccolta delle cariche sul contatto frontale. Si è dapprima realizzato lo scale-up delle celle SHJ che ha confermato anche su area di 20 cm^2 valori di efficienza in linea con quelli tipicamente misurati sulle celle SHJ di piccola area (4 cm^2). Sono state quindi realizzate celle tandem monolitiche su area $20,25 \text{ cm}^2$, ottenendo un'efficienza maggiore rispetto a quella della singola cella in silicio (18,5 %vs 17,4%).

In relazione allo sviluppo di film polimerici da utilizzare come incapsulanti per moduli FV, sono stati completati i test di invecchiamento dei mini-dispositivi realizzati. Le caratterizzazioni hanno evidenziato che POE e TPO possono sostituire efficientemente l'EVA come incapsulante e che alcuni film polimerici a base di TPO hanno ottime prestazioni durante l'esercizio di dispositivi fotovoltaici in condizioni reali di stress ambientale. Nel caso dei mini-dispositivi realizzati con EVA, la diminuzione delle prestazioni è dovuta principalmente alla presenza del gruppo acetato nel polimero, assente nei POE e TPO, che porta alla produzione di acidi acetico e determina sia la corrosione dei metalli che la propagazione della degradazione. A parità di dose UV ricevuta, i mini-dispositivi realizzati con POE e TPO mantengono prestazioni confrontabili e in alcuni casi migliori, rispetto a quelle dei mini-dispositivi fatti con EVA, non solo perché non producono acido acetico ma anche perché sono termicamente più stabili. Inoltre, i risultati delle caratterizzazioni hanno evidenziato che la migliore stabilità chimica del TPO rende i dispositivi realizzati con questo materiale, più durevoli rispetto a quelli fatti con POE.

Nel WP2- LA2.5, è stata completata la realizzazione del sito sperimentale agrivoltaico presso Scalea. Il progetto ha incluso: la riqualificazione di un impianto preesistente a inseguimento; la costruzione ex novo di un impianto a struttura fissa, su supporti inclinati verso sud; il monitoraggio energetico e agronomico continuo; la messa a coltura di specie vegetali omogenee sotto entrambi i sistemi e in pieno campo per confronto.

Nella LA2.9 è continuato lo sviluppo di celle organiche con struttura del tipo VETRO/ITO/PEDOT:PSS/blend/PFN/Ag, dove PEDOT:PSS e PFN sono degli interlayer rispettivamente trasportatori di lacune ed elettroni, la blend è una miscela ad eterogiunzione diffusa del polimero PM6 e della macromolecola A-4Cl, ITO (ossido di indio e stagno) è l'elettrodo frontale trasparente e Ag è l'elettrodo posteriore. Si è lavorato allo sviluppo dell'architettura di cella semitrasparente, raggiungendo efficienze del 10%. È stata inoltre realizzata una serra prototipale da uso indoor, formata da due mini-serre (una di test e una di controllo), ognuna con una copertura di dimensioni di circa $40 \times 40 \text{ cm}^2$ e un'opportuna zona di separazione. La copertura delle mini-serre è stata predisposta per alloggiare matrici 3×3 di mini-moduli fotovoltaici da $10 \times 10 \text{ cm}^2$ o moduli da $30 \times 30 \text{ cm}^2$. Le due mini-serre sono state completamente automatizzate con possibilità di controllo remoto tramite interfaccia web e controllo sul posto tramite display touch e dashboard di monitoraggio.

	Sono continuate le attività della LA3.6 (WP3), dove è stato sviluppato un metodo basato sulla Geo-IA per la modellazione ex-ante del paesaggio agrivoltaico al fine di realizzare un agrivoltaico sostenibile sul territorio nazionale. In relazione alla mappa del potenziale agrivoltaico a livello regionale della Campania sviluppata in precedenza, sono state caratterizzate tramite apposite metriche di paesaggio le unità di paesaggio nella regione potenzialmente utilizzabili per lo sviluppo dell'agrivoltaico. Relativamente alle attività focalizzate sulla determinazione di anomalie di funzionamento di impianti FV, sono stati valutati gli indici prestazionali primari degli algoritmi analizzati per la valutazione del comportamento di predizione e detezione su dati reali provenienti dai dataset disponibili. Per quanto riguarda le azioni di coordinamento del progetto (WP4), sono state condotte riunioni periodiche con RSE e CNR. Si sono effettuate le azioni di disseminazioni nei convegni/conferenze individuati nel periodo, come ad esempio l'EUPVSEC 2024 (Vienna) e Zeroemission (ottobre2024, Roma). Infine, sono continuate le attività del Photovoltaic Power Systems Technology Collaboration Programme della IEA nei vari task in cui l'ENEA è coinvolta.
Università di Roma Tor Vergata – Dipartimento di Ingegneria Elettronica	In questa linea di attività (LA1.19) è continuato lo sviluppo di processi scalabili per la produzione di moduli fotovoltaici (FV) a film sottile di perovskite e dispositivi tandem perovskite/silicio, ottenendo risultati significativi. In questa fase si è lavorato per ottimizzare il processo di laser patterning (P1-P2-P3): attraverso l'incisione laser minimizzata e discontinua è stato raggiunto un fattore di riempimento geometrico (GFF) pari al 99,6%, superando notevolmente l'obiettivo iniziale del 95%. Questa tecnica ha migliorato ulteriormente la resa dei moduli. Sono stati realizzati moduli semitrasparenti con elettrodi metallici parzialmente rimossi tramite ablazione laser, ottenendo una trasmittanza visiva efficace, mantenendo elevata l'efficienza ottica (LUE). . In termini di stabilità operativa, moduli di dimensioni 15,6 x 15,6 cm² hanno dimostrato una durata T80 superiore a 1200 ore sotto illuminazione continua, attestandosi tra i migliori risultati attualmente ottenuti a livello internazionale per dispositivi di queste dimensioni. Un'ulteriore attività ha riguardato la deposizione e l'ottimizzazione di griglie di raccolta per celle solari di grande area (>50 cm²). Tra diverse tecniche testate (serigrafia, hard masking e litografia), la litografia laser si è dimostrata la più efficace, garantendo alta risoluzione e migliore prestazione elettrica rispetto ai dispositivi senza griglia
Università di Napoli – Dip. di Chimica	L'attività di ricerca della LA1.14 è incentrata sulla preparazione di semiconduttori organici da utilizzare come strati ETL di celle solari a base di perovskite. In questo semestre si è lavorato per migliorare la compatibilità tra i nuovi materiali, fortemente idrofobici, e lo strato di perovskite, altamente polare. È stata pertanto implementata una nuova variazione strutturale, introducendo nel <i>backbone</i> molecolare delle code ossietileniche con l'intento di migliorare le interazioni all'interfaccia perovskite-ETL. Nell'utilizzare tali materiali nella fabbricazione di nuovi dispositivi, a causa di una ridotta solubilità, si è anche deciso di ridurre la concentrazione della soluzione da utilizzare per lo spin-coating, ottenendo in questo modo film di ETL più sottili. Tale scelta ha fatto migliorare significativamente le performance dei dispositivi facendo emergere una dipendenza significativa dell'efficienza dallo spessore (misurato, attraverso ellissometria, essere intorno ai 15 nm). Anche l'effetto dell'introduzione di code polari nella struttura molecolare si è rivelato essere una scelta vincente, portando quasi a un valore di efficienza più che raddoppiato rispetto a quello osservata in assenza di tali code. È stata ottenuta, per uno dei materiali in fase di sviluppo, un'efficienza massima di dispositivo pari al 9.4 % e una ridotta isteresi. Rispetto alla cella di riferimento basata sul PCBM, la differenza più significativa è nel valore della V_{OC} che nel caso del materiale di nuova preparazione è inferiore; questa differenza è intrinsecamente legata ai valori di LUMO inferiori, nel caso del sistema sintetizzato, rispetto al fullerene. La buona performance per quanto riguarda gli altri parametri elettrici della cella (J_{sc} e FF) è da considerarsi un risultato molto promettente; attraverso un opportuno design molecolare, infatti, si può pensare di modulare il valore di LUMO molecolare in modo da aumentarlo, impattando in maniera positiva sui valori di V_{OC} e sulla prestazione complessiva della cella.
Università di Napoli – Dip. di Ing. Della Produzione	La Linea di Attività ha perseguito lo sviluppo di film sottili di perovskite a base di stagno del tipo CsSnI₃ depositati mediante evaporazione termica con l'obiettivo di sviluppare celle solari con efficienze maggiori dell'8% e a ridotto impatto ambientale.

	Dalle attività sperimentali è emerso che la deposizione sequenziale rappresenta l'approccio più promettente per la realizzazione di film di CsSnI_3 di elevata qualità. Sono state testate tre configurazioni di deposizione, doppio strato (DL), multistrato a 8 strati (ML8) e multistrato a 20 strati (ML20), individuando nella configurazione ML20, seguita da un trattamento termico a 170°C per 5 minuti, la soluzione più efficace per ottenere film compatti, uniformi e caratterizzati da una fase cristallina perovskitica β-γ CsSnI_3 ben definita, come confermato dalle analisi SEM, XRD e di fotoluminescenza. Tuttavia, la configurazione DL, sebbene morfologicamente meno omogenea, ha mostrato migliori proprietà optoelettroniche, con una mobilità dei portatori di carica fino a sei volte maggiore rispetto a ML20, suggerendo un potenziale vantaggio in termini di trasporto di carica. Le prestazioni dei dispositivi realizzati con gli assorbitori in perovskite sviluppati hanno evidenziato efficienze inferiori al target previsto ($>8\%$), con valori massimi pari a $0,86\%$ per ML20 e $0,13\%$ per DL. Le analisi hanno identificato l'elevato drogaggio intrinseco del materiale come principale fattore limitante. L'introduzione dell'additivo SnF_2 al 15% ha consentito di ridurre la densità dei portatori di un ordine di grandezza, migliorando la qualità elettronica del materiale. Parallelamente, la riduzione dello spessore del film attivo a 100 nm ha permesso di ottenere una fotocorrente misurabile, con un miglioramento nella generazione di fotocorrente, ma a scapito dell'efficienza complessiva del dispositivo.
Università di Torino – Dip. di Chimica	La LA1.15 prevede lo sviluppo di materiali trasportatori di elettroni per celle a base di perovskite. È stata completata la caratterizzazione dei composti basati su NDI prodotti in precedenza. L'UV-Vis non ha mostrato variazioni significative tra i composti dovuta alla modifica della posizione assiale mentre quelli sostituiti nella posizione di "core" hanno mostrato generalmente una variazione. Anche la voltammetria ciclica ha confermato questo trend con i livelli di LUMO stabili per il primo caso mentre quelli sostituiti nella posizione di core hanno confermato un abbassamento di questi. L'analisi con la termogravimetria ha evidenziato che tutti gli NDI possedevano una temperatura di decomposizione superiore a quella di operatività. Parallelamente, l'analisi con calorimetria differenziale a scansione (DSC) ha mostrato temperature di fusione compatibili con la loro processabilità anche mediante evaporazione. Nella fase successiva, la ricerca si è estesa a composti basati su azaceni. Per gli azaceni, la sintesi ha esplorato l'introduzione di gruppi elettron-donatori e accettori nelle specie di-amminiche per modulare i livelli energetici e la processabilità. Buona parte della ricerca è stata impiegata per l'ottimizzazione della sintesi che è partita da procedure di letteratura, tra il cicloesano-1,2,3,4,5,6-esanone e diammina equivalente. La modifica dei livelli energetici ha prodotto molecole compatibili con quelle della perovskite, con una buona stabilità termica e chimico-fisica. Anche in questo caso i composti finali sono stati analizzati con spettroscopia UV-Vis, voltammetria ciclica, termogravimetria (TGA) e calorimetria differenziale a scansione (DSC). Le molecole con livelli energetici compatibili con la perovskite sono state fornite all'Università di Roma "Tor Vergata" per test di deposizione su film di perovskite e valutazione nei dispositivi.
Università di Napoli "Federico II" – Dip di Fisica	In questo semestre la LA1.17 si è dedicata ad uno studio numerico delle interfacce tra la perovskite e gli strati trasportatori di carica. Nello studio delle interfacce tra perovskiti e trasportatori di buca (HTL), è stato approfondito il caso della TriLHP con lo Spiro-MeOTAD, evidenziando che le interfacce con terminazione PbX_2 offrono migliori proprietà di legame e trasferimento di carica rispetto a quelle AX. In particolare, l'interfaccia $\text{PbX}_2(\text{Cs})$ è risultata la più stabile e vantaggiosa dal punto di vista del trasferimento elettronico. Ulteriori analisi delle interfacce tra TriLHP e altri HTL alternativi (P3HT, PTAA, TPD) hanno dimostrato che la terminazione PbX_2 è sempre preferibile in termini di stabilità e allineamento energetico. Tra i materiali considerati, il P3HT presenta la migliore stabilità e i tempi più favorevoli per il trasferimento delle lacune. È stata inoltre esaminata l'interfaccia TriLHP con il self-assembled monolayer (SAM) MeO-2PACz, mostrando un favorevole allineamento delle bande HOMO della molecola con la banda di valenza della perovskite, garantendo ottimi tempi di trasferimento delle cariche. Infine, è stata esplorata l'interfaccia tra la perovskite MAPI e uno strato atomico di NaCl, rilevando una significativa ricostruzione strutturale che ottimizza l'allineamento energetico con vari trasportatori di carica. Questo strato sottile di NaCl inoltre riduce la formazione di difetti superficiali (vacanze di iodio) e aumenta la barriera energetica necessaria per la loro migrazione, migliorando la stabilità del materiale nel tempo.

	Nel complesso, questi risultati dimostrano l'importanza cruciale delle interfacce e della gestione dei difetti nella progettazione di celle solari basate su perovskiti, aprendo nuove prospettive per il miglioramento delle prestazioni e della stabilità dei dispositivi fotovoltaici a perovskite.
Università di Roma Sapienza – Dip Chimica	Le attività hanno l'obiettivo di studiare perovskiti solfuro di bario e zirconio/afnio da utilizzare in celle solari innovative. In questo semestre sono continuati gli studi volti alla deposizione mediante evaporazione delle polveri realizzate. Sono state sperimentate diverse strategie per la deposizione di film di BaZrS_3 mediante evaporazione termica. Inizialmente si è provato a evaporare la polvere stechiometrica, ma i film depositati sono risultati privi di zirconio. Quindi si è provato ad ottimizzare una tecnica di deposizione di Zr per reintegrare quello perso nei film, ma le differenti velocità di deposizione di metallo e perovskite hanno mostrato l'impossibilità di seguire questo approccio. Quindi si è passati ad evaporare in sequenza le polveri dei due solfuri componenti (BaS e ZrS_2) con successiva solforizzazione, ma i film depositati sono risultati ossidati e con una band gap troppo alta rispetto a quella del film stechiometrico. Infine è stata sperimentata la tecnica di evaporazione <i>flash</i> (a velocità molto alta) della polvere di BaZrS_3 seguita dalla copertura del film depositato da uno strato di SnS, per minimizzare l'esposizione del film a ossigeno residuo durante l'evaporazione e la solforizzazione. Anche in questo caso, però, il campione finale è risultato ossidato. Il problema della presenza di ossigeno residuo non può essere superato con gli apparati sperimentali a disposizione. Un risultato inaspettato e decisamente promettente è stato ottenuto durante una sintesi di BaHfS_3 con una polvere di Hf molto fine, quando la fiala di vetro borosilicato, contenuta in un crogiolo di porcellana, è esplosa per via della rapidità della reazione esotermica tra Hf ed S, lasciando sul crogiolo che la conteneva un film compatto che, analizzando tramite diffrazione di raggi X, è risultato costituito principalmente da BaHfS_3. Questo risultato serendipico permette di prevedere ragionevolmente che BaZrS_3 e BaHfS_3 e le loro soluzioni solide possano essere depositati come film sottili tramite processi nei quali i materiali vengano sottoposti ad irraggiamenti laser o fasci di elettroni di elevatissime potenze per brevissimi intervalli di tempo, quindi con tecniche quali la pulsed laser ablation deposition (PLAD o PLD) o la pulsed electron deposition (PED).
Università di Milano Bicocca	La Linea LA1.23 ha l'obiettivo di sviluppare strati trasportatori per celle in Si utilizzando la tecnica Atomic Layer Deposition. In questo semestre si è lavorato allo sviluppo di film di WOx. Dopo una prima valutazione del processo ALD termico, risultato inadeguato per la deposizione del materiale, è stato ottimizzato il processo via plasma, raggiungendo un elevato controllo dello spessore e dell'omogeneità dei film. Sono stati prodotti diversi strati di WOx variando il rapporto O_2/Ar nella miscela di gas di processo e la temperatura di deposizione, quest'ultima individuata come parametro chiave per le proprietà elettriche del WOx come strato trasportatore di buche (HTL). Tutti i materiali sono stati infatti testati come HTL all'interno di SHJ su wafer di c-Si n-type, con e senza passivazione in SiOx, e su wafer di tipo p. L'analisi dei dispositivi ha rivelato che l'aumento della temperatura di deposizione (così come l'annealing termico) genera un aumento della workfunction del WOx che migliora le prestazioni delle celle solari su wafer di c-Si di tipo n e il contatto ohmico su wafer di tipo p-. Sono state realizzate celle solari funzionanti con efficienza massime di 5.5% e 7.5%, rispettivamente per strutture con e senza SiOx, e sono stati identificati i fattori principali che limitano le prestazioni. In particolare nei dispositivi con SiOx è stata rilevata la formazione di una barriera indesiderata (che limita fortemente il FF), assente nelle HJ senza SiOx. Tutti i dispositivi risultano comunque limitati dalla bassa Voc, dovuta al basso valore del lifetime dei portatori sia nei wafer passivati che in quelli senza SiOx, (dove la passivazione è affidata all'ossido nativo). I risultati ottenuti evidenziano la necessità di ulteriori ottimizzazioni dei processi di deposizione ALD al fine di migliorare la qualità della passivazione, preservando il SiOx sottostante (nel caso di wafer già passivati) o promuovendo la crescita di un SiO_2 nativo più passivante (su substrati n-c-Si puliti).
Università di Genova – Dip di Fisica	La linea di attività LA1.24 ha l'obiettivo di studiare strati ad ampio gap, basati su materiali semiconduttori 2-dimensionali appartenenti alla classe dei Transition Metal Dichalcogenides (2D-TMD), per l'impiego come assorbitori e trasportatori di carica innovativi in celle solari innovative. Gli esperimenti realizzati in precedenza con MoS_2 sono stati estesi ad un TMD complementare, il WS_2, che presenta forti somiglianze in termini di struttura cristallina e proprietà opto-elettroniche. Si è quindi dimostrata la possibilità di accoppiare i due strati TMD a formare eterostrutture di van

	deer Waals con allineamento delle bande di tipo II evidenziato dalla fotocorrente e dal fotovoltaaggio misurati sotto condizioni di illuminazione. E' stato, quindi, affrontato il problema della amplificazione della cattura di luce che è risultato particolarmente critico a causa dello limitato spessore degli strati sottili TMD. Si è sviluppato un processo di nanostrutturazione mediante litografia interferenziale degli strati sottili 2D-TMD a formare un reticolo periodico, che consente di manipolare e reindirizzare il flusso luminoso in condizioni di evanescenza, amplificando la raccolta di luce in regime di flat-optics. Abbiamo quindi adattato il protocollo di deposizione dei 2D-TMD per la fabbricazione di strutture a multistrato del tipo TMD/a-Si:H/c-Si. Gli esperimenti condotti hanno evidenziato che il processo di deposizione del TMD mediante sputtering IBS riduce in modo sostanziale l'efficienza quantica delle celle SHJ, a causa del danno da impiantazione nel substrato cristallino. Nell'ultima fase del progetto è stato pertanto avviata la sperimentazione di strati buffer 2D a base di grafene e di film conduttivi trasparenti a bassissima rugosità per proteggere il substrato cristallino durante la deposizione dei materiali 2D. Si è infine iniziata a studiare la possibilità di modificare le proprietà elettroniche del TMD mediante band-gap e strain engineering indotto dalla nanostrutturazione del materiale 2D-TMD.
Politecnico di Bari	L'attività di ricerca della LA1.25 è continuata con l'obiettivo di migliorare le proprietà elettriche dei film di grafene ottenuti secondo le metodologie sviluppate in precedenza. Sono stati investigati trattamenti chimici post-crescita di film di grafene per aumentare la conduttività del materiale. In particolare, è stato impiegato un processo di trattamento termico con zolfo per la sanificazione dei difetti strutturali intrinseci del materiale che fungono da centri di scattering per i portatori di carica. Campioni di grafene multistrato drogati sono stati, quindi, trasferiti su substrati quali vetro/ITO e su celle solari ad eterogiunzioni in silicio per essere testati come possibile TCO in celle rispettivamente in perovskite e in Si. In particolare, l'integrazione di film di grafene in celle solari in silicio è stata realizzata come prosecuzione delle attività svolte in precedenza che avevano consentito di dimostrare il possibile utilizzo del grafene come strato TCO indium-free. Le problematiche evidenziate per ora su tale tipologia di dispositivo sono dovute ad una cattiva interfaccia tra grafene e strati sottostanti e ad un problema di tuning della workfunction del grafene. Riguardo alle indagini sul possibile utilizzo di film di grafene in celle in perovskite, è stato condotto uno studio sulla cristallizzazione di perovskite su strati di grafene depositati su substrati in vetro/ITO. Utilizzando una strategia multilayer di deposizione sequenziale di un film di PTAA seguito da uno strato di PFN-Br, si è ottenuta una bagnabilità della superficie tale da portare alla formazione di film di perovskite uniformi. Tuttavia, i dispositivi realizzati hanno mostrato un comportamento elettrico molto resistivo, indicativo della presenza di percorsi di shunt che compromettono la raccolta di carica. Questi risultati suggeriscono che, sebbene sia possibile ottenere una copertura omogenea della perovskite su substrati ITO/grafene, la dinamica di cristallizzazione risulta alterata dalla natura dell'interfaccia. Saranno quindi necessari ulteriori studi per ottimizzare la deposizione della perovskite, riducendo la formazione di difetti e migliorando la qualità dei film attivi.
Università di Roma Sapienza - Dip Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni	La Linea LA1.26 ha l'obiettivo di sviluppare un modello analitico o semi analitico per l'individuazione di barriere indesiderate al trasporto di carica in celle in Si. Dopo avere completato il codice Matlab che, basandosi sull'algoritmo genetico presente in Matlab, è in grado di ottenere un fitting della curva J-V sperimentale delle celle, si è proceduto alla validazione del codice su 2 caratteristiche J-V sperimentali di celle rettificanti con barriera di potenziale indesiderata. Le celle ad eterogiunzione di Si, realizzate da ENEA, sono state ottenute depositando per evaporazione termica su un wafer di silicio cristallino n-type 3Ωcm i seguenti strati: (1): In (100nm) – ZnS/In (2nm) – ZnS (1nm) – MgF2 (1nm) – a-SiOx:H (5nm) – n cSi (bulk), (2): InOx (60nm) – ZnS (1nm) – MgF2 (1nm) – a-SiOx:H (5nm) – n cSi (bulk). Questo lavoro ha consentito di individuare il modello circuitale più accurato nel descrivere la barriera di potenziale presente nelle curve J-V. Per le celle analizzate il modello migliore risulta essere quello costituito da due diodi in parallelo orientati nello stesso verso con resistenza serie e di shunt, con l'aggiunta di una resistenza in serie sul secondo diodo. Messe in relazione le grandezze misurate (corrente e tensione) con l'equazione del modello, l'algoritmo genetico ottimizza la funzione di fitness determinando le resistenze serie, quella parallela e le altezze di

	barriera dei due diodi. Dai codici è possibile ricavare inoltre l'errore percentuale e il contributo di ogni corrente nel modello equivalente. Il software sviluppato, combinato alla misura J-V, risulta quindi essere uno strumento utile per comprendere il trasporto di carica nei dispositivi, permettendo di migliorare materiali e condizioni di deposizione.
Università di Napoli "Federico II" – Dip. di Ingegneria	Nell'ultimo semestre è continuata l'attività della LA1.29 implementando in ambiente SPICE il modello circuitale compatto della cella tandem. La calibrazione del modello circuitale è avvenuta mediante l'estrazione dei parametri per i due sottocircuiti a partire dai dati sperimentali. In particolare, R_s, I_s e n sono stati estratti dalle curve I-V sperimentali, mentre R_{sh} e TT per la capacità di diffusione sono stati calibrati sui dati di IS. La definizione delle correnti fotogenerate ha richiesto un'analisi specifica. In particolare, la corrente fotogenerata dalla cella bottom è stata determinata mediante le simulazioni numeriche in ambiente TCAD. Allo scopo di dimostrare l'efficacia del modello circuitale compatto nell'interpretare anomalie nella curva I-V di celle tandem, riconducibili al mismatch nella corrente fotogenerata dalle sottocelle, sono stati messi in evidenza i risultati dell'analisi operata su due dei campioni studiati: il primo, nel quale, diversamente dagli altri campioni analizzati, si evidenzia una forma anomala della curva I-V e il secondo campione, rappresentativo della maggior parte dei campioni analizzati. Nel primo campione, il modello ha consentito di affermare che le correnti alle quali le sottocelle operano nel proprio punto di massima potenza sono nettamente diverse (current mismatch), generando l'andamento anomalo nella curva I-V della tandem. Nel secondo campione, grazie al modello circuitale è stato possibile affermare che le sottocelle operano in una condizione di sostanziale current match. Il risultato di tale attività consente di individuare, utilizzando l'analisi congiunta di curve I-V ed IS di una cella tandem ed il modello circuitale sviluppato, il contributo delle singole sottocelle sia statico che dinamico. In particolare, è possibile definire la bontà del "current matching" al punto di massima potenza, mettendo in luce eventuali criticità presenti in ciascuna sottocella.
Università di Roma Sapienza - Università di Roma Sapienza - Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni	Le attività della LA1,32 sono continuate confrontando le riflettanze totali dei vari modelli definiti e simulati in precedenza. Il confronto chiarisce in primo luogo quanto la presenza di un materiale ottico con alto indice di rifrazione riesca ad ovviare alla presenza delle texture sul silicio ed in secondo luogo quanto la presenza di testurizzazione sul vetro impatti nel diminuire ulteriormente la riflettanza totale del multistrato. I dati di riflettanza ottenuti dal modello con silicio testurizzato, in ottimo accordo con i dati sperimentali, costituiscono un solido riferimento con cui confrontare i dati successivi in presenza di polimero nano-caricato. I dati riferiti al modello con polimero caricato con diverse concentrazioni di TiO_2 partono dalla concentrazione minima di 0.025% (indice di rifrazione 1.6 a 800 nm) fino ad arrivare a concentrazione di 0.2% (indice di rifrazione 2.97 a 800 nm). Confrontando gli osservabili dei modelli per ogni caso studio, si ottiene il confronto diretto tra le curve rappresentative della riflettanza del multistrato con silicio testurizzato e quello con polimero caricato con nanoparticelle di titania. Si conclude che percentuali di TiO_2 superiori allo 0.1% sono necessarie per avvicinarsi alle performance ottiche ottenibili con la testurizzazione del silicio. I risultati migliori si ottengono al diminuire della lunghezza d'onda e all'aumentare dell'angolo di incidenza dei raggi. In conclusione, in questo studio è stato valutato che l'utilizzo di polimeri caricati con nanoparticelle funzionalizzate permette di ottenere performance ottiche simili o superiori a quelle ottenibili con la testurizzazione del silicio. L'eventuale presenza di testurizzazione sul vetro permette di migliorare ulteriormente questo comportamento solo nel caso di elevati angoli di incidenza dei raggi.
Università di Bari - Dip. Agraria	In questo semestre l'attività della LA2.6 è proseguita col monitoraggio della crescita di specie quali limone e vite, poste in condizioni di ombreggiamento realizzato con diverse tipologie di moduli fotovoltaici (fissi ed a inseguimento). I risultati scaturiti da questa sperimentazione hanno consentito di verificare alcune importanti informazioni tra cui: - Aumento della biodiversità floristica naturale, con un significativo aumento delle specie sotto i moduli FV rispetto al numero di specie presenti nell'area controllo in pieno sole.

	- Possibilità di creare, con la struttura agrivoltaica, situazioni di riparo per l'avifauna favorendone la nidificazione, soprattutto in ambienti dove la vegetazione arborea è molto limitata. - Incremento dell'umidità del suolo, aspetto importante in areali a clima caldo-arido e per coltivazioni gestite con limitate irrigazioni, soprattutto in un contesto di cambiamenti climatici. - Leggera diminuzione della temperatura del suolo che può stimolare una migliore e più prolungata attività radicale e dei microrganismi. - Riduzione della ventosità nell'impianto, con conseguente minori danni sulle piante e riduzione della evapotraspirazione. - Riduzione del VPD (Vapour Pressure Deficit) che determina in termini pratici una minore traspirazione da parte delle piante e quindi minor perdita di acqua. - Valore di SPAD (Soil and Plant Analyzer Development, misuratore di clorofilla ed indirettamente del contenuto di azoto) più elevato a significare un maggior contenuto di clorofilla e di azoto e quindi migliore stato nutrizionale delle piante ombreggiate. - Superficie fogliare superiore associata anche ad una maggiore conduttanza stomatica, suggerendo una migliore capacità di fissare la CO₂. - Stomi di dimensione maggiore per un miglior scambio gassoso e di vapor acqueo da parte delle piante. - Rapporto Fluorescenza variabile /Fluorescenza massima più elevato, sintomo di una migliore efficienza dei fotosistemi fogliari per l'attività fotosintetica.
Università di Napoli "Federico II" - Dip. Architettura	Le attività svolte hanno l'obiettivo di definire approcci e metodi finalizzati alla costruzione di strumenti di supporto alla fase di impostazione e di verifica dei livelli di sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici. Gli esiti delle attività sono confluiti in due prodotti: le "Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici" e il tool sviluppato in ambiente Excel "EASY APV tool - EnvironmentAI Sustainability of AgriPhotoVoltaic". Dopo avere completato l'elaborazione delle Linee Guida, in questo semestre è stato sviluppato il Tool di valutazione delle prestazioni ambientali di sistemi agrivoltaici "EASY APV Tool - EnvironmentAI Sustainability of AgriPhotoVoltaic". Tale tool è uno strumento sviluppato in ambiente Excel finalizzato a valutare il livello di rispondenza di un progetto ai sei Obiettivi di sostenibilità ambientale attraverso un quadro prestazionale integrato degli aspetti energetici, produttivi e ambientali. Ogni obiettivo è specificato nel tool attraverso un set di requisiti a cui corrispondono uno o più indicatori di tipo qualitativo o quantitativo per i quali sono fissati dei valori-soglia. Ogni indicatore rimanda a una scheda di approfondimento che definisce le finalità, il metodo di verifica, i riferimenti normativi e/o bibliografici e una sezione dedicata al calcolo. Per la definizione degli indicatori si è tenuto conto dei principali strumenti normativi e indirizzi di natura non cogente vigenti in Italia, della letteratura tecnico-scientifica di riferimento e degli indirizzi europei sul tema della sostenibilità ambientale (CICES - Common International Classification of Ecosystem Services). Per alcuni indicatori si è fatto riferimento ai punti di controllo contenuti nella Certificazione agrivoltaico sostenibile® redatta dall'Associazione Italiana Agrivoltaico Sostenibile (AIAS) in collaborazione con RINA.
Università della Campania – Dip. Architettura	In questo semestre è continuato il lavoro della LA2.8 finalizzato a delineare una metodologia atta a guidare sia la localizzazione degli impianti agrivoltaici (AV), sulla base delle diverse esigenze di tutela dei paesaggi, sia l'integrazione di tali impianti nelle eterogenee tipologie di paesaggi agricoli. La metodologia, testata sulla regione Campania, risulta agevolmente replicabile in altre regioni italiane. Il test sulla Regione Campania, sviluppato a partire dai quadri conoscitivi del Preliminare di Piano Paesaggistico Regionale (PPR) approvato nel 2019, ha consentito di testare i diversi step della metodologia e approfondire gli aspetti che riguardano l'applicazione dei criteri di integrazione degli impianti AV nelle diverse tipologie di paesaggi agricoli. La costruzione di un "Abaco dei Paesaggi Agricoli", per ogni ambito paesaggistico identificato dal Preliminare di PPR, ha consentito una chiara esemplificazione dei criteri da adottare in ciascuna tipologia di paesaggio, del loro diverso livello di obbligatorietà e dei criteri utili a valutare gli eventuali impatti cumulativi. La metodologia, documentata dalle Linee Guida elaborate, può costituire uno strumento utile per diverse categorie di end-users. In particolare, amministrazioni regionali e pianificatori potranno beneficiare sia dei criteri forniti per l'individuazione delle aree paesaggisticamente non idonee e delle aree di attenzione, sia dei criteri per la corretta integrazione degli impianti AV nei paesaggi agricoli e per la valutazione degli impatti cumulativi; progettisti e soggetti responsabili dei

	procedimenti autorizzativi potranno beneficiare, una volta che questi verranno stabiliti dai Piani Paesaggistici Regionali sulla base della metodologia delineate, di criteri di integrazione, dei relativi livelli di obbligatorietà e di criteri per la valutazione degli impatti cumulativi, rendendo in tal modo più agevoli e meno controverse le procedure autorizzative.
Università di Napoli "Federico II" - MUSA	Sono continuate le attività della LA2.10 che hanno l'obiettivo di studiare la crescita di colture in serra con copertura fotovoltaica semitrasparente. In particolare, sono state condotte sperimentazioni su specie legnose micorrizate con funghi del genere <i>Tuber</i>. Tali sperimentazioni hanno mostrato che l'applicazione di coperture fotovoltaiche semitrasparenti non incide in maniera significativa sulla crescita, sulla biometria o sulla micorrizzazione, confermando la possibilità di integrare la tecnologia agrivoltaica anche nella produzione vivaistica tartufigena senza compromettere le performance vegetative o simbiotiche delle piante. La calibrazione del modello di simulazione dell'attività fotosintetica, basato sui dati raccolti, ha riprodotto con buona fedeltà i flussi fotosintetici, offrendo uno strumento utile per il monitoraggio dello stato fisiologico delle piante coltivate. È stato, inoltre, fornito supporto alle attività di ENEA per la realizzazione di una serra prototipale di piccola area con copertura di dispositivi FV spettralmente selettivi, presso i laboratori dell'ENEA.
Università della Basilicata – Dip. Ing.	È continuata l'attività della LA3.7 che ha l'obiettivo di sviluppare una metodologia integrata per valutare gli impatti che i sistemi agrivoltaici possono generare sul paesaggio e sui Servizi Ecosistemici. Il lavoro ha portato al raggiungimento di questo obiettivo attraverso la creazione di un approccio innovativo in grado di fornire una valutazione complessiva degli impatti ambientali, tecnici e socio-economici derivanti dall'installazione di impianti agrivoltaici. In continuità con le attività iniziate in precedenza, è stato sviluppato un sistema di monitoraggio basato su GIS che supporta la pianificazione e la localizzazione degli impianti agrivoltaici in modo sostenibile, integrando tutti i risultati delle analisi spaziali in un modello decisionale. L'applicazione della metodologia a un caso studio in Basilicata ha confermato l'efficacia dell'approccio adottato, evidenziando i potenziali impatti sull'ambiente e suggerendo soluzioni per minimizzare tali effetti. I risultati mostrano che, sebbene l'installazione di impianti agrivoltaici possa influire sulla qualità degli habitat con un aumento delle aree a medio e alto degrado, l'adozione di strategie di mitigazione può ridurre tali impatti e favorire la biodiversità. La metodologia proposta offre un quadro di supporto decisionale basato su sistemi GIS per valutare la sostenibilità degli impianti agrivoltaici, con particolare attenzione agli impatti sugli ecosistemi e sul paesaggio. Grazie allo strumento InVEST, è stato possibile quantificare variazioni nella qualità dell'habitat, nello stock di carbonio, nell'impollinazione delle colture e nella produzione agricola, evidenziando sia i benefici che le sfide di queste installazioni. L'analisi degli indicatori spaziali, come l'indice di frammentazione e di visibilità, ha permesso di valutare le implicazioni paesaggistiche. Un approccio multi-criteriale, quale quello proposto, consente di supportare i decisori politici e gli stakeholder nell'ottimizzazione della diffusione degli impianti agrivoltaici, garantendo al contempo sostenibilità ecologica e sociale.