

**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. 5 – Periodo attività: 01/01/2024 – 30/06/2024

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. È proseguito lo sviluppo di celle con architettura di tipo p-i-n da utilizzare anche per celle tandem, testando possibili passivanti all'interfaccia perovskite/ETL e nuovi strati trasportatori di elettroni. È poi continuato lo sviluppo di perovskite evaporata e anche con tale perovskite è iniziato lo sviluppo di celle ad architettura p-i-n, raggiungendo valori di V_{OC} e FF analoghi a quelli di celle con perovskite da soluzione. È proseguito lo studio di perovskite evaporata a base stagno, esplorando ulteriormente sia la co-evaporazione che la deposizione sequenziale degli strati che appare essere l'approccio più promettenti. È proseguita la sperimentazione sullo sviluppo di prototipi di moduli FV: ottimizzando la formulazione della perovskite CsFAPbI₃ per la deposizione fuori da glove-box (in aria) del dispositivo, è stato possibile realizzare moduli FV su area superiore ai 300 cm² e con efficienza record del 18,06%.

Per quanto riguarda le celle solari ad eterogiunzione di silicio, è continuato lo sviluppo di film di silicio nanocristallino (nc-Si:H) drogati di tipo n di tipo p che possono potenzialmente ridurre l'assorbimento parassita della radiazione solare nei materiali trasportatori. Sono stati sperimentati trattamenti sulla superficie del film passivante che possano promuovere la crescita di fase cristallina dei film drogati. Sono poi continuati gli studi di materiali trasportatori innovativi per celle in Si non a base di film sottili di silicio drogati ed è continuato lo sviluppo di un modello semi-analitico per analizzare il comportamento dei dispositivi a base di Si.

È proseguito lo sviluppo di celle tandem perovskite/silicio con i due differenti schemi di connessione (connessione meccanica e monolitica). In questo periodo è stato consolidato il processo di realizzazione di celle tandem con connessione meccanica, misurando un'efficienza massima del 31%. Sono state effettuate misure di spettroscopia di impedenza su celle tandem e si è lavorato allo sviluppo di un modello numerico per le celle tandem mediante un simulatore avanzato, Sentaurus TCAD.

Per quanto riguarda lo studio di materiali e processi per moduli di nuova generazione, sono stati avviati test di invecchiamento accelerato per i prototipi di moduli realizzati con i materiali polimerici selezionati in precedenza ed è continuato lo studio numerico dell'effetto della testurizzazione del vetro sulle prestazioni ottiche di un dispositivo FV.

In relazione al WP2, gli studi hanno previsto sperimentazioni sullo sviluppo di celle organiche e inorganiche a base di film sottili di Si per applicazione in agrivoltaico e attività collegate alla

realizzazione di un impianto dimostratore agrivoltaico. Sono state realizzate celle organiche opache con efficienza del 15% mentre su celle spettralmente selettive a film sottile di silicio sono state misurate efficienze del 4%. Per quanto riguarda la realizzazione del dimostratore agrivoltaico, è stato completato il progetto esecutivo dell'impianto elevato fisso da circa 18 kW e sono iniziati i lavori per la realizzazione dello stesso impianto presso il sito definito a Scalea. Nella serra con copertura FV realizzata nello scorso triennio è iniziato lo studio della crescita delle tipologie di piante individuate e, più in generale, sono state anche individuate le colture potenzialmente più interessanti da integrare al fotovoltaico. Sono anche condotti studi sulla crescita in campo aperto di colture ombreggiate da moduli FV. Sono poi continuate le attività che hanno lo scopo di fornire indirizzi e criteri a supporto dei piani Paesaggistici e dei Piani Territoriali a valenza Paesaggistica per una localizzazione compatibile degli impianti agrivoltaici. Inoltre, sono continuate le attività che hanno l'obiettivo di definire linee Guida per la sostenibilità ambientale dei sistemi agrivoltaici fin dalla fase progettuale. Per quanto riguarda il WP3, sono stati sviluppati metodi e strumenti digitali spazialmente basati per la identificazione delle aree agricole adeguate all'installazione di sistemi agrivoltaici e la valutazione del relativo potenziale agrivoltaico a livello regionale. Tali studi hanno consentito di elaborare la mappa del potenziale agrivoltaico della Campania. Relativamente alle attività focalizzate sulla determinazione di anomalie di funzionamento di impianti FV, sono stati analizzati, sulla base di dataset pubblicamente disponibili, algoritmi di detezone anomalie testando tecniche di tipo deep learning, instance based e geograficamente caratterizzate. Per quanto riguarda le azioni di coordinamento del progetto (WP4), sono state condotte riunioni periodiche con RSE e CNR. Sono state effettuate le azioni di disseminazioni nei convegni/conferenze previste nel periodo di riferimento, come ad esempio la Seconda Conferenza Nazionale della ReteIFV (giugno 2024, Bolzano). 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

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	Nell’ambito delle attività previste nel 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). In relazione alle attività sullo sviluppo di celle in perovskite (LA1.13), è continuato lo sviluppo di celle in perovskite ad architettura p-i-n da soluzione, introducendo strategie di passivazione della superficie posteriore della perovskite (faccia a contatto con l’ETL, costituito da PCBM in questo studio) attraverso molecole come fenil-etil-ammonio ioduro (PEAI), hexyl-trimetil-ammonio bromuro (HTMB) ed etilen-diammonio di-ioduro (EDAI). Inoltre, sempre nell’architettura p-i-n sono continuati i test degli ETL sviluppati dal Dip. di Chimica di Napoli. Anche con la perovskite evaporata è iniziato lo sviluppo di celle ad architettura p-i-n, raggiungendo valori di V_{oc} e FF analoghi a quelli di celle con perovskite da soluzione, mentre le correnti risultano più basse probabilmente per difettosità in bulk che impattano la raccolta elettrica

sotto illuminazione elevata. In parallelo sono stati sviluppati processi di stampa inkjet (IJP) di inchiostri a base di MAI da impiegare nella realizzazione di strati di perovskite MAPbI₃ su substrati flessibili (PET o PEN) mediante procedura ibrida a 2 step in cui gli inchiostri sono stampati su film di PbI₂ prodotti per evaporazione del solo componente inorganico. I film presentano una morfologia caratterizzata da maggiore regolarità e minore rugosità rispetto a quella ottenuta precedentemente su vetro. Per quanto riguarda le celle solari ad eterogiunzione di silicio, è continuato lo sviluppo di film di silicio nanocristallino (nc-Si) drogato di tipo n e di tipo p. Per entrambe le tipologie di materiale è stata evidenziata una forte dipendenza della crescita di fase cristallina dal substrato nel caso in cui gli spessori dei film di silicio drogato siano dell'ordine di 20-30 nm. Infatti, avendo definito parametri di processo idonei per la crescita di film nc-Si su vetro, come evidenziato da misure Raman, con quegli stessi parametri di processo sono stati ottenuti film con struttura amorfa quando il materiale è stato cresciuto sul passivante, con una conseguente forte riduzione della conducibilità elettrica del materiale drogato. Si è quindi valutata la necessità di utilizzare dei pretrattamenti all'interfaccia passivante/ film di silicio drogato che possano favorire la crescita di fase cristallina. In particolare, sulla superficie del film passivante di a-Si:H sono stati sperimentati trattamenti quali plasma di H₂, plasma di CO₂, interruzione del vuoto tra la deposizione del passivante e quella dello strato drogato. Questi ultimi due trattamenti si sono mostrati efficaci per promuovere la crescita di fase ordinata sul passivante anche per spessori ridotti. In relazione allo sviluppo di celle tandem perovskite/silicio connesse meccanicamente, in collaborazione con l'Università di Tor Vergata, si è lavorato per ottimizzare l'interfaccia tra lo strato trasportatore di elettroni (ETL) e la perovskite della cella top. L'utilizzo dell'ETL planare ha consentito di migliorare la Voc delle celle in perovskite e di misurare sulle celle tandem, realizzate su area di circa 1 cm², un'efficienza di circa il 31% con V_{OC} di 1.94 V e FF pari a 81.2%. In relazione allo sviluppo di film polimerici da utilizzare come incapsulanti per moduli FV, sono continuati i test di fabbricazione di mini-moduli con i polimeri selezionati in precedenza. I dispositivi sono stati sottoposti ad invecchiamento accelerato con una dose UV di 1800 kWh/m², valutando la variazione delle loro caratteristiche elettriche a seguito del trattamento. Le attività nel WP2 hanno previsto sperimentazioni sullo sviluppo di celle a film sottile organiche o inorganiche per applicazione in agrivoltaico e attività collegate alla realizzazione di un impianto dimostratore agrivoltaico. Per quanto riguarda la prima attività, sono state realizzate celle organiche opache con differenti blend le cui efficienze hanno raggiunto valori fino al 15%. Su substrati di vetro da 10 x 10 cm² sono state realizzate matrici 4 x 4 di celle solari spettralmente selettive di piccola area (1 cm²) con giunzioni di tipo p-i-n a film sottile di silicio. Sono state ottenute efficienze intorno al 4%, coerentemente con la limitata quantità di luce assorbita dallo strato attivo per il design stesso del dispositivo. Le celle possiedono anche una bifaccialità intrinseca, con potenzialità quindi di migliori prestazioni in condizioni operative. Si è lavorato anche allo scale-up da cella a mini-modulo, riscontrando però problemi di delaminazione probabilmente legati a limiti delle facilities di fabbricazione. È inoltre continuata la realizzazione di una serra con copertura FV a scala di laboratorio (la

	copertura sarà realizzata con vetri FV di dimensioni 10 x 10 cm²). È stato, poi, definito il progetto esecutivo dell'impianto dimostratore agrivoltaico elevato fisso da circa 18 kW e sono iniziati i lavori per la realizzazione dello stesso impianto presso il sito definito a Scalea. Sono continuate le attività della LA3.6 (WP3), dove sono stati sviluppati metodi e strumenti digitali spazialmente basati per la identificazione delle aree agricole adeguate all'installazione di sistemi agrivoltaici e la valutazione del relativo potenziale agrivoltaico a livello regionale. Tali studi hanno consentito di elaborare la mappa del potenziale agrivoltaico della Campania. Relativamente alle attività focalizzate sulla determinazione di anomalie di funzionamento di impianti FV, sono stati analizzati, sulla base di dataset pubblicamente disponibili, algoritmi di detezone anomalie testando tecniche di tipo deep learning, instance based e geograficamente caratterizzate. La ricerca di dataset pubblicamente disponibili ha restituito un numero limitato di risultati con i dataset caratterizzati da un piccolo numero di reti di impianti interconnessi. Il passo successivo sarà quello di addestrare gli algoritmi di predizione. Per quanto riguarda le azioni di coordinamento del progetto (WP4), sono state condotte riunioni periodiche con RSE e CNR. In particolare ENEA ha organizzato un meeting in presenza presso il Centro Ricerche ENEA di Portici che si è svolto il 21 marzo 2024 dove hanno partecipato, insieme ai responsabili del progetto per gli Enti affidatati, tutti i responsabili degli Accordi con le Università nonché molti ricercatori provenienti da diversi Enti/Università. Si è, poi, lavorato all'organizzazione di eventi collaborando con l'associazione AIAS e la ReteIFV. In particolare si è partecipato all'organizzazione della Seconda Conferenza Nazionale della ReteIFV (giugno 2024, Bolzano). Infine, vengono 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.
Università di Roma Tor Vergata – Dipartimento di Ingegneria Elettronica	La linea di attività LA1.19 ha come principale obiettivo lo sviluppo di processi scalabili per la produzione di moduli fotovoltaici a film sottile di perovskite e dispositivi tandem perovskite/silicio (quest'ultima attività è svolta in collaborazione con ENEA). In particolare, in questo semestre è stata sviluppata una formulazione ottimizzata della perovskite CsFAPb per la deposizione fuori da glove-box (in aria), modificando il rapporto DMF/DMSO e aggiungendo MACl, per garantire film sottili uniformi e stabili ottenuti tramite blade coating. Questo ha permesso la fabbricazione di moduli FV su area superiore ai 300 cm² e un'efficienza record del 18,06%. Sono stati ottimizzati gli strati trasportatori ed estrattori di carica (ETL e HTL), utilizzando SnO₂ modificato con KOH come ETL per ridurre i fenomeni di ricombinazione non radiativa e 2-fenetilammia iodidato (PEAI) per la passivazione delle interfacce. Questo approccio ha portato a un aumento dell'efficienza delle celle fino al 20% e un miglioramento significativo della tensione a circuito aperto. È stata, inoltre, sviluppata una perovskite a doppio step ibrida, basata su evaporazione dei componenti inorganici seguita da spin-coating di componenti organici, utilizzata nella fabbricazione di celle tandem monolitiche perovskite/silicio nella LA1.28.

Università di Napoli – Dip. di Chimica	L'attività di ricerca (LA1.14) è stata incentrata sulla preparazione di una serie di semiconduttori organici, implementando alcune variazioni strutturali a partire da una struttura prototipo basata su un core centrale attrattore (isoindigo), legata in maniera simmetrica a degli eterocicli donatori e terminata con dei gruppi attrattori ausiliari. Le molecole sintetizzate sono state pienamente caratterizzate dal punto di vista chimico-fisico; si è inoltre proceduto ad una caratterizzazione elettrochimica che ha permesso di stimare i valori di HOMO e LUMO molecolare, valori che si sono mostrati ben allineati con i valori delle bande della perovskite triplo-catione in vista di una possibile applicazione dei materiali preparati come ETL in celle solari a perovskite. Le proprietà di trasporto di carica, misurate realizzando e caratterizzando transistor ad effetto di campo, hanno mostrato buoni valori di mobilità elettronica, con valori compresi tra 10^{-4} e 10^{-2} cm²/V·s. In collaborazione con ENEA e dopo avere messo a punto una cella solare a perovskite ad architettura inversa avente il PCBM come ETL, da considerarsi come cella di riferimento, si è proceduto a testare i materiali sintetizzati come possibili ETL. Sono state individuate innanzitutto le migliori condizioni del processo di spin-coating dei nuovi ETL organici, individuando anche la migliore miscela solvente in un mix cloroformio/clorobenzene 9/1. Pur essendo riusciti ad ottenere dei film omogenei e compatti, la risposta elettrica dei materiali non è risultata soddisfacente. Si è ipotizzato che uno dei principali problemi fosse da ricercarsi nella scarsa compatibilità tra i nuovi materiali, fortemente idrofobici, e lo strato di perovskite, altamente polare. Nella fase successiva si lavorerà per superare tale problematica.
Università di Napoli – Dip. di Ing. Della Produzione	La Linea di Attività LA1.16 ha l'obiettivo di studiare film sottili di perovskite a base di stagno del tipo CsSnI₃ depositati mediante evaporazione termica per realizzare celle solari con ridotto impatto ambientale. L'attività, svolta in collaborazione con ENEA, si è focalizzata sull'adozione di metodologie sostenibili, con particolare attenzione alla minimizzazione dell'uso di solventi tossici e alla riduzione del consumo energetico dei processi. L'evaporazione dei materiali è stata effettuata con due possibili approcci: la co-evaporazione dei precursori e la deposizione sequenziale, dove si alterna la deposizione di strati sottili dei singoli precursori. In questo semestre l'attività si è concentrata sulla preparazione dei materiali mediante co-evaporazione. La deposizione per co-evaporazione, nonostante un'accurata ottimizzazione dei parametri di processo (temperatura delle sorgenti, pressione della camera), ha prodotto film con bassa cristallinità e grani disomogenei, limitando la qualità dei materiali e portando all'esclusione di ulteriori sperimentazioni sulla variazione del componente reticolare A. Di conseguenza, si è deciso di concentrare la sperimentazione sulla deposizione sequenziale dei materiali, testando tre configurazioni di deposizione, doppio strato, multistrato a 8 strati e multistrato a 20 strati.
Università di Torino – Dip. di Chimica	La linea di ricerca LA1.15 ha proposto lo studio di alcune classi di molecole come possibili materiali estrattori di elettroni (ETM) per le celle a perovskite. Esse appartengono alle famiglie delle naftalendiimmidi (NDIs), benzobistiadiazoli (BTT), benzotiadiazoli (BTD) e azaceni. Sono state progettate le molecole, concentrandosi sulla modifica dei sostituenti sul core centrale per ottimizzare solubilità e formazione del film sottile e

	per ottenere livelli energetici compatibili con quelli della perovskite. La sintesi è stata focalizzata su NDI ed azaceni, ritenute le molecole più promettenti. In questo semestre si è proceduto con la sintesi delle NDI, condotta nelle due posizioni solitamente predisposte per la loro modifica. La prima è avvenuta nella parte assiale degli NDI una posizione generalmente usata per l'aggiunta di sostituenti che possono modificare le proprietà di solubilità e di formazione del film. Vari sostituenti assiali, aromatici e alifatici, sono stati introdotti con differenti gruppi funzionali e diverse catene alifatiche. Il secondo approccio invece ha interessato la posizione comunemente chiamata di "core" che è stata funzionalizzata per l'introduzione di gruppi di passivazione o per ottenere una variazione dei livelli energetici. Dopo la sintesi dei composti è iniziata la loro caratterizzazione mediante UV-Vis, voltammetria ciclica, termogravimetria (TGA) e calorimetria differenziale a scansione (DSC).
Università di Napoli "Federico II" – Dip. di Fisica	L'attività svolta in questo semestre nella LA1.17 ha analizzato dettagliatamente le proprietà elettroniche, ottiche e strutturali di due formulazioni di perovskiti: la perovskite a triplo catione (TriLHP) e la perovskite MAPI. Le strutture bulk, ottimizzate tramite calcoli DFT con l'approccio PBE-TS, mostrano un incremento significativo delle costanti reticolari e del bandgap nella TriLHP rispetto alla MAPI, a causa della presenza del cesio (Cs) e del catione FA. Analizzando la densità degli stati (DOS), si evidenzia che la banda di valenza è dominata dagli alogeni, mentre la banda di conduzione è caratterizzata prevalentemente da stati del piombo. Le proprietà ottiche, ottenute calcolando le funzioni dielettriche tramite l'approssimazione Random Phase (RPA), mostrano che MAPI presenta una risposta dielettrica maggiore rispetto alla TriLHP, con conseguente più alta intensità di assorbimento luminoso. Gli studi sulla struttura delle bande hanno rivelato transizioni elettroniche dirette e masse efficaci dei portatori di carica che suggeriscono un trasporto ambipolare in MAPI e un leggero favore per il trasporto elettronico in TriLHP. Le masse efficaci determinano bassi valori di energia di legame degli eccitoni, favorendo una rapida dissociazione in cariche libere sotto illuminazione solare. L'effetto di vacanze neutre nei siti A (FA, MA, Cs), B (Pb) e X (Br, I) indica che tali difetti agiscono come agenti di drogaggio piuttosto che creare stati profondi nel gap. Riguardo materiali ETL, è stata analizzata l'ossido di stagno (SnO₂), tra i più utilizzati come trasportatore di elettroni, con l'obiettivo di ottenere una predizione efficace delle posizioni assolute di banda (CBM). I risultati ottenuti hanno mostrato che la presenza di vacanze superficiali migliora significativamente la predizione delle proprietà elettroniche e l'allineamento energetico con i riferimenti sperimentali.
Università di Roma Sapienza – Dip. Chimica	Le attività delle LA1.22 si sono focalizzate sullo studio delle perovskiti solfuro di bario e zirconio/afnio da utilizzare in celle solari innovative. Durante questo semestre è continuata l'attività che ha l'obiettivo di mettere a punto una procedura sintetica più semplice di quanto presente in letteratura. La sintesi messa a punto in questa attività prevede il riscaldamento alla temperatura di 500 °C (minore rispetto alle attuali metodiche) per tempi relativamente brevi (12 ore) di miscele di BaS e

	Zr/Hf metallic in polvere in presenza di zolfo in eccesso in fiale di vetro borosilicato sigillate in vuoto. Sono stati preparati, oltre a BaZrS₃ e BaHfS₃ puri, anche campioni nei quali venivano utilizzate miscele Zr-Hf invece di Zr o Hf puri, verificando che i composti sono completamente miscibili in tutto l'intervallo di composizione, dando sempre e solo composti monofasici con caratteristiche strutturali ed optoelettroniche (band gap) intermedie tra i due estremi di composizione. Queste proprietà sono state verificate tramite misure di diffrazione di raggi X, spettrofotometria UV-visibile e misure di spettroscopia Raman affiancata da calcoli teorici. Sono state effettuate anche misure di fotoluminescenza, anche se soltanto su BaZrS₃ e BaHfS₃ puri, che hanno dimostrato le buone potenzialità di questi materiali in una prospettiva di applicazione in dispositivi fotovoltaici. Sono stati quindi investigati i processi di vaporizzazione ad elevate temperature tramite spettrometria di massa accoppiata a sorgente molecolare di Knudsen (Knudsen Effusion Mass Spectrometry, KEMS). Tale studio ha evidenziato che il BaZrS₃ a queste temperature perde solamente BaS in fase gassosa e ciò ha suggerito che i comuni metodi di evaporazione termica del materiale tal quale non sono idonei alla deposizione di film sottili dello stesso. Studi preliminari su BaHfS₃ tramite KEMS hanno evidenziato un comportamento del tutto simile a quello di BaZrS₃, come aspettato.
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 sono stati sviluppati protocolli per la deposizione di strati di TiO₂ mediante processi ALD termico e plasma, ottenendo in entrambi i casi un controllo elevato sia dello spessore che dell'omogeneità dei film. Sulla base delle caratterizzazioni elettro-ottiche, sono state individuate le condizioni del processo ALD ritenute più promettenti per l'impiego del TiO₂ come strato trasportatore di elettroni (ETL) nelle eterogiunzioni (HJ) su silicio. Sono stati realizzati i primi dispositivi su wafer di tipo n passivati con SiO_x depositato per PECVD (n-c-Si/SiO_x), consentendo un'ottimizzazione preliminare della struttura. In particolare sono stati valutati diversi spessori di TiO₂ ed è stato identificando il contatto metallico frontale più idoneo (considerando la sua resistenza ai trattamenti termici e la capacità di preservare la passivazione). Successivamente, sono stati prodotti dispositivi con strati di TiO₂ depositati tramite ALD termico e plasma, e sono state confrontate le proprietà dei materiali ottenuti con i due processi. In entrambi i casi, su wafer n-c-Si/SiO_x i dispositivi hanno mostrato un comportamento rettificante, suggerendo la formazione di una barriera indesiderata e la necessità di ulteriori ottimizzazioni delle condizioni di deposizione. Su wafer di di c-Si di tipo non passivati si è invece riusciti ad ottenere un contatto ohmico utilizzando il TiO₂ depositato via plasma-ALD, che sembra essere quindi quello più promettente per le applicazioni. Esperimenti preliminari suggeriscono, tuttavia, che rispetto al TiO₂ termico, il processo plasma non sembra promuovere una passivazione adeguata del wafer di silicio (affidata alla crescita spontanea di un SiO₂ nativo) e sarà dunque necessario ottimizzare le condizioni di processo per ottenere, oltre alle proprietà elettriche desiderate, anche le proprietà di

	passivazione necessarie a garantire successivamente una efficienza elevata dei dispositivi finali.
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. Per la realizzazione di dispositivi FV innovativi a base di Si di possibile interesse industriale è cruciale la messa a punto di tecniche di deposizione di 2D-TMD potenzialmente scalabili all'intero wafer. Infatti gli esperimenti allo stato dell'arte sui dispositivi ed eterostrutture a base di semiconduttori 2D-TMD sono basati sull'utilizzo di flake esfoliati meccanicamente con dimensioni attive limitate alla scala della decina di micrometri e sono caratterizzati da una bassissima resa. Si è sviluppato un nuovo approccio alla deposizione fisica di film 2D-TMD stechiometrici di MoS₂ e WS₂, supportati in modo conforme su substrati lisci e nanostrutturati estesi su scale dei cm². Si sono ottimizzati processi basati su ion beam sputtering (IBS) deposition e su RF magnetron sputtering, utilizzando target di di MoS₂ stechiometrico. La fattibilità di tali processi è stata dimostrata su un prototipo dimostratore di laboratorio (aree attive alla scala dei cm²) depositando i film di TMD su vari substrati, quali wafer di Si cristallino e SiO₂, sia lisci che nanostrutturati. Sono state effettuate varie caratterizzazioni dei materiali anche in collaborazione con ENEA. L'attività svolta ha evidenziato che il processo di deposizione messo a punto, è scalabile a livello dell'intero wafer di Si utilizzando strumentazione di tipo industriale. È stata esplorata la possibilità di migliorare le proprietà cristalline degli strati TMD che dopo la deposizione IBS o RF a temperature ambiente si presentano in fase amorfa o nanocristallina. A questo scopo si è ottimizzato un processo di ricristallizzazione termica in atmosfera controllata (Argon) arricchito con vapori di zolfo prodotti da una seconda regione scaldata differenzialmente. Gli esperimenti hanno dimostrato con successo che in questo modo è possibile ottenere la ricristallizzazione dei film TMD nella fase semiconduttrice 2H.
Politecnico di Bari	L'attività di ricerca (LA1.25) riguarda la messa a punto e l'ottimizzazione di metodologie innovative per la crescita CVD di grafene drogato e per il trattamento post-crescita per il controllo del tipo (buche o elettroni) e della densità dei portatori di carica maggioritari nel materiale. L'attività è finalizzata alla realizzazione di elettrodi in grafene con elevata trasparenza, bassa sheet resistance e funzione di lavoro modulabile da integrare in dispositivi fotovoltaici a base di silicio e a base di film di perovskiti. In questo periodo è stata ottimizzata una metodologia di crescita di grafene drogato con azoto che avviene in due fasi: la nitrurazione via plasma del foglio di rame (spessore 25 µm) e la crescita CVD catalitica. Il grafene singolo strato su rame viene trasferito su substrati di interesse utilizzando la procedura del thermal release tape. Per ottenere grafene multistrato (fino a 5 strati) è stata utilizzata la procedura di trasferimento strato per strato. La caratterizzazione chimica, effettuata con XPS e con spettroscopia Raman, ha confermato che il grafene incorpora atomi di N durante la crescita e contiene nuove funzionalità azotate (C-N) senza introdurre

	difetti significativi. Per quanto riguarda la crescita CVD del grafene drogato con N su foglio di rame, la sfida principale ha riguardato il controllo dell'inserimento delle diverse funzionalità N (grafitica, piridinica e pirrolica). Nello specifico, per realizzare un aumento del drogaggio di tipo p, bisogna minimizzare l'azoto grafitico a favore dell'azoto pirrolico e piridinico. La presenza di azoto piridinico assume importanza poiché, attraverso l'attivazione fotochimica selettiva dell'azoto piridinico a N-ossi piridina e piridone, è possibile aumentare la delocalizzazione di carica positiva. Infatti, dopo illuminazione con luce UV il grafene drogato con N presenta un forte aumento del drogaggio di tipo p, con valori di resistenza ridotti fino raggiungere $100 \Omega/\square$ per un grafene a tre strati.
Università di Roma Sapienza - 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. L'analisi della caratteristica J-V di un'eterostruttura può fornire informazioni sulle interfacce dei materiali che la costituiscono. Per interpretarle, si utilizza un circuito equivalente che descrive il comportamento delle interfacce, individuando eventuali barriere di potenziale (modellizzate come diodi). Per discernere fra vari modelli e parametri descrittivi disponibili della rappresentazione della struttura è stato utilizzato un algoritmo genetico (AG) che, partendo dalle equazioni analitiche del modello circuitale equivalente, genera una caratteristica estremamente simile alla J-V sperimentale, permettendo così di capire quale sia la migliore rappresentazione circuitale equivalente delle diverse interfacce del dispositivo. In questo periodo sono state sviluppate le equazioni di sei modelli circuitali equivalenti che descrivono il comportamento della etero-struttura basati sulla combinazione di uno o più diodi. In particolare, sono stati descritti in forma analitica i seguenti modelli: 1. diodo ideale, una resistenza in serie e una resistenza di shunt 2. due diodi in parallelo orientati nello stesso verso con resistenza serie e di shunt; 3. due diodi in parallelo orientati in verso opposto con resistenza serie e di shunt; 4. come quello descritto al punto 2, ma migliorato con l'aggiunta di una resistenza in serie sul secondo diodo; 5. due diodi in opposizione (vedi punto 3) con l'aggiunta di una resistenza in serie al primo diodo ma senza la resistenza di shunt; 6. come il modello descritto al punto 1 aggiungendo una resistenza direttamente in serie al diodo. È stato, quindi, implementato un codice Matlab che, basandosi sull'algoritmo genetico presente in Matlab, è in grado di ottenere un fitting della curva J-V sperimentale delle celle con i modelli circuitali equivalenti sviluppati.
Università di Napoli "Federico II" – Dip. di Ingegneria	L'attività svolta nella LA1.29 ha l'obiettivo di definire un approccio innovativo per analizzare le celle tandem monolitiche in perovskite/silicio basato su un modello circuitale compatto. La calibrazione e la validazione di questo modello ha richiesto un'ampia campagna sperimentale. Sono state effettuate misure di caratteristiche corrente-tensione (I-V) e di spettroscopia d'impedenza (IS). Le misure IS sono state condotte in vari

	punti di lavoro della curva I-V in un ampio range frequenziale. La campagna di misure è stata effettuata su numerosi campioni appartenenti a tre tipologie di celle: cella tandem monolitica perovskite/silicio e le singole celle componenti, cella ad eterogiunzione in silicio e cella in perovskite. Al fine di calibrare il modello circuitale compatto, è stato implementato un modello numerico in ambiente Sentaurus TCAD. Sono state realizzate due strutture: una che replica la cella bottom e una che replica la cella top. Definito il modello e realizzate le strutture per la simulazione numerica, sono state estratte le caratteristiche corrente-tensione in condizioni di irraggiamento standard al fine di validare il modello sui dati sperimentali. I risultati numerici confrontati con quelli sperimentali mostrano che il comportamento numerico descrive quello sperimentale con buona approssimazione. Il modello numerico descritto è stato utilizzato per ricavare la corrente fotogenerata dalle due sottocelle, tenendo conto che la cella bottom viene irradiata dalla porzione di spettro non assorbita dalla cella top.
Università di Roma Sapienza - Università di Roma Sapienza - Dip Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni	L'attività della LA1.32 ha l'obiettivo di valutare alternative economiche ed applicabili industrialmente all'uso delle interfacce testurizzate di silicio. L'analisi si è focalizzata sullo studio degli effetti di polimeri caricati con nano-particelle di TiO_2 sulla riflettanza del multistrato vetro+polimero+silicio. Si dimostra come l'uso di polimeri con indice di rifrazione elevato ($n \geq 1.8$) è cruciale per ridurre la riflettanza. Le simulazioni valutano trasmittanza e riflettanza dei raggi, considerando le condizioni al contorno del modulo ottico-geometrico. Il modello multistrato vetro-polimero nanocaricato-silicio viene analizzato sistematicamente, variando le caratteristiche ottiche dello strato polimerico per valutare quanto la presenza di materiali con indici ottici elevati possa ovviare alla mancanza di testurizzazione sullo strato di silicio. In ogni simulazione, 100 raggi vengono rilasciati dalla parte superiore del modello con angoli variabili tra 0° e 45° e lunghezze d'onda tra 400 nm e 1000 nm. I raggi vengono riflessi, rifratti o assorbiti a seconda del materiale ottico e dell'interfaccia incontrati. Alla fine di ogni simulazione, solo i raggi che terminano il loro percorso sul contorno superiore sono collezionati e la loro intensità valutata. Il rapporto tra questa intensità e quella iniziale determina il valore di R. Le caratteristiche ottiche dei diversi mezzi attraversati dai raggi sono considerate in modo completo (parte reale e immaginaria). Per quanto riguarda i differenti modelli simulati, sono stati considerati: il modello di silicio monocristallino in aria (usato come riferimento per confrontare gli output simulativi con misure note in letteratura); il modello di silicio con vetro; modello di silicio testurizzato su polimero non caricato e vetro; il modello di silicio non testurizzato su polimero caricato da particelle funzionalizzate di TiO_2 e vetro; il modello di silicio non testurizzato su polimero caricato da particelle funzionalizzate di TiO_2 e vetro testurizzato.

Università di Bari - Dip. Agraria	L'attività della LA2.6 si è articolata in due fasi, una prima di indagine sulle informazioni disponibili sulle colture e loro risposta a condizioni di ombreggiamento ed una seconda di sperimentazione di campo con raccolta ed elaborazione dei dati. Lo studio che è stato effettuato circa le informazioni disponibili in letteratura scientifica e tecnica sulla presenza di specie arboree e arbustive coltivate in condizioni di ombreggiamento da moduli FV ha portato alla raccolta di dati alquanto limitati ed ottenuti essenzialmente da elaborazioni modellistiche. Sono stati utilizzati anche altri studi che hanno considerato il comportamento fisiologico e produttivo in condizioni di ombreggiamento artificiale, ottenuto con reti ombreggianti, spesso utilizzate in frutticoltura come protezione dalle elevate radiazioni luminose al fine di ottimizzare la fotosintesi e migliorare la qualità del prodotto. Le informazioni raccolte sono state oggetto di una review pubblicata su rivista scientifica. Nella seconda fase, si è impostato una attività sperimentale di campo al fine di raccogliere informazioni puntuali, dettagliate e reali sulle risposte di specie quali limone e vite, poste in condizioni di ombreggiamento realizzato con diverse tipologie di pannelli fotovoltaici (fissi ed a inseguimento). È iniziato il monitoraggio dei parametri micro-climatici, fisiologici, produttivi, qualitativi e i risultati ottenuti hanno indicato in entrambe le colture risposte positive all'ombreggiamento con una migliore attività vegetativa ed anche produttiva e con un positivo effetto sul micro-clima e sul complessivo agro-ecosistema.
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. In questo semestre è iniziata la preparazione di uno dei prodotti attesi dalla LA2.7, "Linee guida per la sostenibilità ambientale del progetto di sistemi agrivoltaici". Le Linee guida per la sostenibilità ambientale nel progetto di sistemi agrivoltaici sono state elaborate al fine di fornire un quadro sistematizzato delle conoscenze nonché di proporre un set di strumenti di supporto per progettisti, imprenditori agricoli, aziende e decisori per l'impostazione di progetti di sistemi agrivoltaici orientati alla sostenibilità ambientale. In particolare, le Linee guida consentono di: - individuare chiaramente i principali obiettivi di sostenibilità ambientale e orientare il progetto dell'agrivoltaico verso la più efficace integrazione tra gli aspetti energetici, produttivi e ambientali; - diffondere la conoscenza dei sistemi agrivoltaici negli elementi costruttivi, tecnologici, funzionali-spaziali e ambientali per una migliore comprensione della loro potenzialità come sistema integrato; - veicolare in maniera più efficace e chiara l'informazione tecnica attraverso Cataloghi di prodotti e sistemi industrializzati per l'agrivoltaico; - incrementare la conoscenza dei fattori tecnico-costruttivi da considerare per una maggiore efficacia in termini di ottimizzazione della produzione energetica e agricola e controllo della qualità ecosistemica, attraverso schede di alternative tecnico-progettuali;

	- fornire indirizzi per l'impostazione e lo sviluppo del progetto nella sua fase istruttoria, di concept e nei successivi livelli di progettazione per orientare le scelte verso i principali Obiettivi di sostenibilità ambientale individuati (O1. Integrazione fra produzione agricola ed energetica, O2. Ecoefficienza della produzione agricola e zootecnica, O3. Efficienza della produzione energetica, O4. Resilienza climatica, O5. Salvaguardia e promozione della biodiversità, O6. Riduzione del consumo di risorse e degli impatti sul suolo); - definire requisiti e indicatori per la verifica rispetto a sei Obiettivi di sostenibilità ambientale; - facilitare la diffusione delle informazioni principali contenute nelle Linee guida attraverso un Booklet digitale in grado di orientare i diversi portatori di interesse nella costruzione di un iter decisionale coerente e consapevole con gli obiettivi di sostenibilità ambientale.
Università della Campania – Dip. Architettura	Il lavoro di ricerca svolto nella LA2.8 ha l'obiettivo di 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. L'esame delle modalità con cui i Piani Paesaggistici di ultima generazione hanno disciplinato la localizzazione e l'integrazione paesaggistica degli impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili, delle norme nazionali e regionali più recenti e della letteratura scientifica internazionale ha consentito l'individuazione di criteri utili a supportare i Piani Paesaggistici nella definizione sia delle aree non idonee alla localizzazione di impianti AV che di aree di attenzione nelle quali, pur non escludendo la possibilità di realizzare tali impianti, è indispensabile garantire il rispetto di criteri progettuali atti a garantirne una corretta integrazione nelle diverse tipologie di paesaggi rurali. La tutela del paesaggio rurale non richiede, infatti, solo vincoli volti ad ampliare le aree non idonee ma, soprattutto, la capacità di orientare la progettazione degli impianti AV verso una maggiore compatibilità con le caratteristiche degli eterogenei contesti rurali in cui si inseriscono. L'individuazione di criteri paesaggistici atti a guidare la progettazione degli impianti AV ha rappresentato l'aspetto di maggiore complessità del lavoro, sia a causa della limitata presenza di riferimenti scientifici sia per l'estrema eterogeneità dei paesaggi rurali che caratterizzano, in particolare, il contesto italiano. Si è quindi proceduto alla definizione di criteri per una tipizzazione dei paesaggi rurali e, per ciascuna delle tipologie identificate, sono stati definiti criteri per l'integrazione paesaggistica degli impianti AV e per la valutazione, da un punto di vista paesaggistico, degli impatti cumulativi. I criteri di integrazione sono caratterizzati, inoltre, da una differente "gerarchia" di obbligatorietà, in funzione della relazione tra paesaggi rurali e livelli di urbanizzazione dei contesti in cui vengono applicati.

Università di Napoli "Federico II" - MUSA	Le attività svolte in questa linea di attività (LA2.10) sono focalizzate sullo studio dell'effetto della copertura fotovoltaica semitrasparente sulle colture in serra. Questo studio sperimentale è ottenuto a partire da una serra realizzata nello scorso triennio con una copertura completata con moduli FV semitrasparenti. Nella sperimentazione su ortive da foglia sono stati testati quattro livelli di fertilizzazione azotata e tre condizioni ambientali per valutare la potenzialità delle serre agrivoltaiche di supportare produzioni con caratteristiche quali-quantitative paragonabili rispetto a quelle prodotte in serre classiche. I risultati hanno rivelato che le condizioni di crescita testate possono creare delle criticità in condizioni di temperature elevate e scarsa circolazione dell'aria. Tra le colture orticole testate, la rucola risulta meno adattabile accumulando nitrati in quantità elevate, seppur rimanendo entro i limiti normativi, mentre lo spinacio registra livelli di nitrati inferiori del 30% rispetto al limite di legge. In tali condizioni e con suoli ad alta fertilità, come nei trattamenti N100 e N150, si osserva un rischio maggiore di accumulo eccessivo di nitrati, che potrebbe compromettere la commerciabilità del prodotto. Al contrario, la lattuga si comporta in modo neutrale o leggermente favorevole, mantenendo rese costanti e bassi livelli di nitrati.
Università della Basilicata – Dip. Ing.	La Linea di attività LA3.7 ha l'obiettivo di sviluppare una metodologia integrata per valutare gli impatti che i sistemi agrivoltaici possono generare sul paesaggio e sui Servizi Ecosistemici, garantendo un equilibrio tra la produzione agricola e quella energetica. In questo periodo è stata sviluppata una metodologia che prende in input la mappa dei siti idonei all'installazione degli impianti agrivoltaici, elaborata da ENEA (LA 3.6). Questa metodologia, che si basa su un set di criteri definiti per ottimizzare sia la produzione agricola che quella energetica, vede l'utilizzo di strumenti in grado di mappare i Servizi Ecosistemici ed offrire un'analisi spaziale dettagliata. È stato possibile rilevare gli impatti derivanti dagli impianti agrivoltaici sulla visibilità e sugli ecosistemi, per poi integrarli in un modello ampio che stima le prestazioni tecniche, socio-economiche ed ambientali. È stato introdotto l'uso di indicatori spaziali come l'indice di frammentazione (lo Sprinkling Index) e l'indice di visibilità per quantificare gli impatti sul paesaggio e sui servizi ecosistemici, consentendo una valutazione precisa degli effetti sugli ecosistemi circostanti e sull'aspetto visivo del paesaggio. Sono state, quindi, prodotte mappe dei servizi ecosistemici prima e dopo l'installazione degli impianti agrivoltaici, analizzando gli effetti su qualità dell'habitat, carbonio, impollinazione e produzione agricola.