

**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. 4 – Periodo attività: 01/07/2023 – 31/12/2023

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. Sono svolte attività che riguardano tutti i WP, inoltre, in questo semestre sono state avviate tutte le attività previste per i co-beneficiari.

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. Presso i laboratori dell'ENEA è iniziato lo sviluppo di celle con architettura di tipo p-i-n da utilizzare anche per celle tandem. ENEA e Tor Vergata stanno anche testando anche nuovi strati trasportatori di elettroni sviluppati da co-beneficiari in celle a struttura p-i-n. È continuato, inoltre, lo sviluppo di perovskite MAPI co-evaporata ottenuta con approccio ibrido (evaporazione del solo precursore inorganico e applicazione della soluzione di MAI per spin-coating o con inkjet printing), valutando la ripetibilità dei processi sviluppati. È proseguito anche lo studio di perovskite evaporata a base stagno, esplorando sia la co-evaporazione che la deposizione sequenziale degli strati e sono state effettuate le prime prove di realizzazione di dispositivi con questa tipologia di perovskite. Migliorando il processo di taglio laser per la realizzazione di prototipi di moduli FV in perovskite si è ottenuto un Geometrical fill factor (GFF), che rappresenta il rapporto tra l'area attiva e l'area di apertura, record del 99,6%. Utilizzando questa interconnessione sono stati realizzati minimoduli da 2,6 cm² con un'efficienza su area di apertura del 20,7%.

Per quanto riguarda le celle solari ad eterogiunzione di silicio, è iniziato lo sviluppo di materiali trasportatori più trasparenti rispetto ai film di silicio amorfo drogati utilizzati nella prima fase. L'obiettivo è mettere a punto film di silicio nanocristallino (nc-Si:H) drogati di tipo n e, in prospettiva, anche di tipo p che possono potenzialmente ridurre l'assorbimento parassita della radiazione solare nei materiali trasportatori. Sono poi continuati gli studi di materiali trasportatori innovativi per celle in Si non a base di film sottili di silicio drogati ed è iniziato lo sviluppo di un modello semi-analitico per analizzare il comportamento dei dispositivi a base di Si.

È continuato lo sviluppo di celle tandem con i due differenti schemi di connessione (connessione meccanica e monolitica). In questo contesto è stato messo a punto un setup di misura sperimentale per effettuare la spettroscopia di impedenza su celle tandem in perovskite ed è iniziato lo 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, è stata avviata la realizzazione di prototipi di moduli con i materiali polimerici selezionati in precedenza ed è stato studiato numericamente l'effetto di una 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. Per quest'ultima attività è stata completata la procedura per l'affidamento dell'appalto per la realizzazione dell'impianto agrivoltaico presso 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 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 state condotte attività che hanno avuto lo scopo di definire lo stato dell'arte aggiornato sull'innovazione progettuale e tecnologica e sulla sostenibilità ambientale dei sistemi agrivoltaici, con raccolta di casi studio significativi nazionali.

Per quanto riguarda il WP3, è iniziato lo sviluppo di metodologie per la determinazione di anomalie di funzionamento di impianti FV, seguendo l'approccio individuato in precedenza ed è iniziato lo sviluppo di uno strumento GIS-based per la valutazione dei siti potenzialmente idonei ad ospitare impianti agrivoltaici, individuano l'insieme di indicatori da utilizzare per lo sviluppo della metodologia.

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

<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 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). In relazione alle attività sullo sviluppo di celle in perovskite, è iniziato lo sviluppo di celle in perovskite ad architettura p-i-n da soluzione, architettura finora non sviluppata nei laboratori ENEA di Portici e che appare essere molto promettente in particolare per l'accoppiamento col silicio. Sono state effettuate le prime sperimentazioni utilizzando gli strati trasportatori già disponibili e testando anche ETL sviluppati dal Dip. di Chimica di Napoli. È continuato, inoltre, lo sviluppo di perovskite MAPI co-evaporata o ottenuta con approccio ibrido (evaporazione del solo precursore inorganico e applicazione della soluzione di MAI per spin-coating). L'attività in questo periodo ha valutato la ripetibilità dei processi sviluppati nel periodo precedente che hanno consentito di ottenere dispositivi con prestazioni promettenti.

Per quanto riguarda le celle solari ad eterogiunzione di silicio, è iniziato lo sviluppo di materiali trasportatori più trasparenti rispetto ai film di silicio amorfo drogati utilizzati nella prima fase. L'obiettivo è mettere a punto film di silicio nanocristallino (nc-Si:H) drogati di tipo n e, in prospettiva, anche di tipo p che possono potenzialmente ridurre l'assorbimento parassita della radiazione solare nei materiali trasportatori. A partire dalle ricette sviluppate sul sistema di deposizione PECVD utilizzato in precedenza è iniziato lo sviluppo di film drogati di tipo n di nc-Si:H. I materiali sono stati depositati sia su vetro che su wafer di c-Si, interponendo anche film sottili di silicio amorfo intrinseco utilizzato per il processo di passivazione, in modo da valutare la crescita della fase nanocristallina nelle condizioni in cui vengono realizzati i dispositivi. I primi risultati appaiono promettenti in termini di conducibilità e anche di proprietà ottiche.

In relazione allo sviluppo di celle tandem perovskite/silicio si è lavorato all'ulteriore ottimizzazione della cella semi-trasparente in perovskite, sono stati effettuati diversi test di realizzazione di celle tandem monolitiche anche in collaborazione con Tor Vergata. Per la cella in perovskite sono stati utilizzati anche film di perovskite ibrida (evaporazione + spin-coating).

In relazione allo sviluppo di film polimerici da utilizzare come incapsulanti per moduli FV, sono iniziati i primi test di fabbricazione di mini-moduli con i polimeri selezionati in precedenza.

Le attività nel WP2 hanno previsto sperimentazioni sullo sviluppo di celle organiche o inorganiche per applicazione in agrivoltaico e attività collegate alla realizzazione di un impianto dimostratore agrivoltatico. Per quanto riguarda la prima attività, sono state realizzate celle organiche con differenti blend e sono state realizzate celle a film sottile di silicio utilizzando i layer sviluppati nel nuovo sistema PECVD Indeotec. È inoltre iniziata 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) e la selezione della sorgente luminosa che sarà utilizzata per simulare l'illuminazione solare. È stata, poi, finalizzata la procedura per l'affidamento dell'appalto per la realizzazione dell'impianto agrivoltaico elevato fisso presso Scalea.

Sono state avviate le attività della LA3.6 inserita nel WP3 con lo sviluppo di metodologie per la determinazione di anomalie di funzionamento di impianti FV, seguendo l'approccio individuato in precedenza ed è iniziato lo sviluppo di uno strumento GIS-based per la valutazione dei siti potenzialmente idonei ad ospitare impianti agrivoltaici, individuano l'insieme di indicatori da utilizzare per lo sviluppo della metodologia.

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 2023 (Lisbona).

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.

<p>Università di Roma Tor Vergata – Dipartimento di Ingegneria Elettronica</p>	<p>Lo sviluppo di un processo ibrido a doppio-step (composto da evaporazione termica dei precursori inorganici e processo in soluzione dei cationi organici) ha permesso il trasferimento di una parte di fabbricazione in aria secca o in ambienti a temperatura e umidità controllata. La completa traslazione del processo di deposizione dei cationi organici tramite blade-coating in ambiente a umidità controllata ha richiesto l'ottimizzazione della concentrazione dei precursori dei solventi utilizzati, ottenendo un'efficienza massima intorno a 17.3% ($V_{OC}=1.09$ V, $J_{SC}=20.4$ mA cm⁻², FF= 77.52%). La deposizione dei cationi organici può essere eseguita anche tramite spin-coating in aria secca. Con questa tecnica, sono state fabbricate delle tandem su substrati di silicio forniti da ENEA con un'area attiva di circa 0.32 cm². Al momento si sta ottimizzando il layout della cella per passare ad un'area di circa 1 cm². Sono state anche sviluppate celle nip per configurazione tandem mechanically stacked.</p> <p>Le small molecules con funzione di ETL sono state ricevute dall'Università di Torino e attualmente si sta testando il loro funzionamento nella struttura p-i-n.</p> <p>La scalabilità di queste celle a perovskite solitamente implica la fabbricazione di moduli con celle collegate in serie utilizzando un'interconnessione monolitica basata sullo schema P1-P2-P3, un approccio comune per i moduli PV a film sottile. Il Geometrical fill factor (GFF), che rappresenta il rapporto tra l'area attiva e l'area di apertura, varia tipicamente dal 90% al 95%. Abbiamo introdotto un processo avanzato di fabbricazione laser per ridurre al minimo l'area di interconnessione riducendo la larghezza delle incisioni e minimizzando le distanze tra di esse, ottenendo una larghezza di interconnessione di 45 μm con un GFF del 99,1%. Inoltre, un design discontinuo per P2 riduce ulteriormente l'area inattiva a una media di 19,5 μm, portando a un GFF record del 99,6%. Utilizzando questa interconnessione abbiamo realizzato minimoduli da 2,6 cm² con un'efficienza su area di apertura del 20,7%.</p>
<p>Università di Napoli – Dip. di Chimica</p>	<p>I materiali sintetizzati nel precedente semestre sono stati depositati come strati attivi nel processo di fabbricazione di OFET: la caratterizzazione elettrica dei transistor ha mostrato che tutti i materiali sono semiconduttori di tipo con mobilità di carica comprese tra 10⁻³ e 10⁻² cm² /V·s. Dal punto di vista sintetico è stata progettata una variazione strutturale volta ad aumentare la solubilità dei derivati tiofenici precedentemente sintetizzati inserendo sull'eterociclo una nuova coda alchilica. Si è quindi proceduto alla fabbricazione di celle solari ad architettura inversa (p-i-n) utilizzando come ETL il derivato furanico FID. Le celle solari sono state preparate attraverso deposizione successive di vari strati, con questa configurazione: ITO/PTAA(HTL)/Cs_{0.05}FA_{0.79}MA_{0.16}Pb₁I_{2.49}Br_{0.51}(<i>active layer</i>)/FID(ETL)/BCP/Ag. Sono state inoltre preparate, a titolo di confronto, celle p-i-n utilizzando il PCBM come strato ETL. Sono stati ottenuti dispositivi fotovoltaici funzionanti, con V_{OC} pari a 0.8 V ed efficienza vicina all'1 %. Si conta di migliorare l'efficienza del dispositivo ottimizzando il processo di fabbricazione delle celle, lavorando su spessori dell'ETL e tempo di ricottura. Si valuta inoltre di testare dispositivi che non presentino lo strato di BCP tra l'ETL e l'argento poiché potrebbe avere, nel caso dello specifico materiale utilizzato, un effetto elettron-bloccante.</p>

<p>Università di Napoli – Dip. di Ing. Della Produzione</p>	<p>Le attività si sono concentrate sulla ottimizzazione dei parametri di deposizione sequenziale con tecnica di evaporazione per realizzare film di cesio stagno ioduro. Tra i possibili cationi, metilammonio, formamidinio e cesio, ci si è focalizzati sul cesio poiché esso risulta difficile da processare da soluzione. La preparazione di celle solari in perovskite a base di cesio stagno ioduro da evaporazione è praticamente inesplorata in letteratura, ma rimane una delle vie più promettenti per realizzare celle solari stabili ed efficienti senza piombo. Sono stati variati sia gli spessori che la sequenza dei film di precursori, cesio ioduro e stagno ioduro. Si è partiti da una soluzione bilayer, con un solo strato di cesio ioduro e stagno ioduro, per poi aumentare il numero degli strati. È stato osservato che all'aumentare del numero degli strati migliora visivamente l'omogeneità del film. Analisi SEM, XRD e PL hanno permesso una valutazione quantitativa della qualità del film. È stato, quindi, esplorato uno step di annealing successivo alla deposizione, valutando che i film multilayer presentano già le caratteristiche della perovskite anche senza il trattamento di annealing. Nelle successive fasi del progetto, con la realizzazione dei dispositivi si potrà valutare più un dettaglio l'impatto dell'annealing sul funzionamento del dispositivo.</p>
<p>Università di Torino – Dip. di Chimica</p>	<p>L'attività svolta durante il secondo semestre riguarda una caratterizzazione approfondita dei composti sintetizzati nel primo semestre. Le molecole sono state caratterizzate con l'uso di UV-Vis, voltammetria ciclica, termogravimetria (TGA) e calorimetria differenziale a scansione (DSC). Gli assorbimenti UV-Vis come previsto non risentono della sostituzione in posizione assiale e tutti i cinque composti mostrano lo stesso andamento con nessun assorbimento nel visibile. La voltammetria ciclica è stata usata per stimare i livelli LUMO dei composti. Anche in questo caso, i livelli energetici rimangono praticamente inalterati al variare dei sostituenti. L'analisi termica fatta con TGA e DSC rivela invece un andamento diverso con le varie molecole che mostrano una temperatura di degradazione diversa al variare del sostituente. Gli NDI ottenuti con sostituzione in posizione assiale sono stati inviati all'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" per test di deposizione ed evaporazione su film di perovskite e per essere testati nei dispositivi.</p>
<p>Università di Napoli "Federico II" – Dip. di Fisica</p>	<p>Questa attività prevede l'utilizzo di metodi computazionali a supporto dello sviluppo sperimentale di celle in perovskite. Per quanto riguarda gli ETL, abbiamo studiato l'impatto delle vacanze superficiali di ossigeno sulle proprietà strutturali ed elettroniche dell'ossido stannico (SnO_2). Abbiamo considerato configurazioni difettive al 33%, contenenti diversi rapporti tra vacanze di tipo a ponte (V_{OB}) e vacanze nel piano (V_{OP}). I risultati evidenziano uno spostamento notevole del minimo della banda di conduzione (CBM) al variare del rapporto $V_{OP}:V_{OB}$, dimostrando un chiaro collegamento tra questi difetti e la struttura elettronica del materiale. In particolare, la posizione del CBM cade al di fuori dell'intervallo sperimentale nel caso del materiale puro e di tutte le altre configurazioni con difetti, eccetto le configurazioni 1:1 e 1:2. Queste ultime sono anche tra quelle con l'energia di formazione (E_{vac}) più bassa. L'analisi della carica di Bader dimostra che l'energia del sistema è influenzata non solo dalla riduzione degli atomi di Sn superficiali al momento della formazione dei difetti, ma anche dalla distribuzione della carica. Questi risultati spiegano</p>

	<p>da un punto di vista atomistico anche le evidenze sperimentali, dove sono state individuate superfici di SnO₂ contenenti una quantità simile di V_{OP} e V_{OB} oppure un eccesso di queste ultime. Questo studio sottolinea l'importanza di simulare entrambi i tipi di difetti superficiali nell'SnO₂ al fine di predire accuratamente le sue proprietà strutturali ed elettroniche, e di simulare correttamente l'interfaccia con altri materiali, come ad esempio la perovskite.</p>
<p>Università di Roma Sapienza – Dip. Chimica</p>	<p>Le attività svolte ed i risultati ottenuti nel periodo di riferimento hanno riguardato:</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'individuazione di alcuni materiali innovativi appartenenti alle classi prese in considerazione nella LA, con caratteristiche chimiche e fisiche idonee all'utilizzo in celle solari di nuova generazione; - lo sviluppo di migliori metodologie sintetiche di tali materiali rispetto a quanto presente in letteratura; - un accurato studio delle loro proprietà strutturali, ottiche e della loro reattività chimica. <p>I candidati presi finora in considerazione sono i solfuri a struttura perovskitica distorta BaZrS₃, BaHfS₃ e le loro soluzioni solide, in quanto dagli studi effettuati nell'ambito della presente LA, essi sono risultati essere mutualmente solubili in tutto l'intervallo di composizione. Tali materiali sono stati selezionati in quanto possiedono elevati coefficienti di assorbimento della luce uniti a valori del band gap utili per l'assorbimento dello spettro solare (1.78-2.11 eV), modulabili in maniera continua in funzione del rapporto atomico Zr/Hf; possiedono inoltre una elevatissima stabilità termica e buona resistenza all'ossidazione e all'idrolisi.</p> <p>È stata sviluppata una procedura sintetica più semplice e rapida rispetto a quanto riportato in precedenza in letteratura. La sintesi messa a punto avviene a temperature moderate (500 °C) e risulta completa in poche ore, rispetto agli oltre 1000 °C e i giorni di durata delle più note procedure sintetiche. Inoltre la sintesi sviluppata non comporta l'utilizzo di reattivi pericolosi quali H₂S e/o CS₂. I materiali sono stati caratterizzati in maniera approfondita con una ampia varietà di tecniche di indagine (TG-DTA, XRD, UV-Vis, PL, Raman) e studiati computazionalmente tramite calcoli DFT. Sono attualmente in corso studi di vaporizzazione e di deposizione dei materiali da fase vapore per lo sviluppo di procedure di deposizione di film sottili degli stessi nell'ottica della realizzazione di dispositivi fotovoltaici di piccole dimensioni per studi preliminari su scala di laboratorio.</p>
<p>Università di Milano Bicocca</p>	<p>Nel periodo di riferimento, oltre al processo ALD termico per la deposizione del TiO₂, è stato testato il processo ALD <i>plasma-assisted</i>, in quanto l'utilizzo del plasma permette di raggiungere temperature di deposizione più basse rispetto al processo termico e quindi di maggiore interesse per un applicazioni in celle solari. Per il processo ALD <i>plasma-assisted</i> si è utilizzato come per il processo termico il TDMATi come precursore, ma il co-reagente in questo caso è costituito da un plasma freddo, ossia una miscela gassosa di Ar/O₂ a bassa pressione, parzialmente ionizzata da un campo a radiofrequenza (RF).</p> <p>La deposizione del TiO₂ è stata dunque testata a tre diverse temperature: 90°C, 120°C e 150°C. La velocità di deposizione e l'omogeneità del processo a ciascuna temperatura sono state misurate effettuando delle</p>

	<p>deposizioni su 7 substrati di c-Si distribuiti sul portacampioni da 4" di diametro. Il processo a 90°C è risultato quello con la velocità maggiore, ossia 0.070 nm/ciclo. Seguono il processo a 120°C con 0.061 nm/ciclo e il processo a 150°C con 0.055 nm/ciclo. Tutti e tre i processi <i>plasma-assisted</i> testati hanno mostrato una omogeneità ottima, con deviazioni standard sullo spessore medio comprese tra 0.1 nm e 0.2 nm. Per poter confrontare le proprietà elettriche dei film di TiO₂ depositati a diverse temperature è utile fare il confronto tra film aventi lo stesso spessore, in modo tale da escludere l'influenza dello spessore sulla conducibilità. Stabilito lo spessore di circa 7 nm come obiettivo, le procedure e i protocolli di ciascun processo <i>plasma-assisted</i> sono stati quindi modificati per ottenere tale spessore. Dunque con 100 cicli a 90°C è stato ottenuto un film di TiO₂ spesso 7.1 nm, con 115 cicli a 120°C un film di 7.0 nm e con 128 cicli a 150°C il film ottenuto è di 7.1 nm. Tali deposizioni sono state effettuate sia su c-Si, che su substrati di FTO e vetro borosilicato e i campioni sono stati inviati ad ENEA per le caratterizzazioni, come richiesto.</p>
<p>Università di Genova – Dip di Fisica</p>	<p>L'attività ha lo scopo di valutare le potenzialità di materiali 2D per celle solari innovative. Le attività sono state incentrate su:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ottimizzazione del protocollo per la crescita su scala del cm² di film 2D-TMD amorfi a base di MoS₂ e WS₂ ultrasottili (regime dei few layer 2-20 nm) ricorrendo prevalentemente ad Ion Beam Sputtering deposition, a partire da target di TMD stechiometrico. - Sviluppo di un protocollo per la ricristallizzazione termica dei film TMD amorfi ricorrendo ad un forno tubolare ad atmosfera inerte controllata, dotato di una seconda zona di riscaldamento in cui è collocato una sorgente di zolfo molecolare per preservare la stechiometria. - Caratterizzazione del materiale TMD mediante spettroscopia ottica e spettroscopia Raman identificando la fase semiconduttrice 2H. Sviluppo del procedimento per deposizione di elettrodi trasparenti a base di grafene estesi su aree del cm², e deposizione sequenziale di strati TMD (grafene/WS₂/MoS₂) per formare eterostrutture semiconduttrici di van der Waals. Misure preliminari per caratterizzare il comportamento elettro-ottico della eterogiunzione. - Messa a punto della deposizione dei film di 2D-TMD amorfo su wafer di c-Si passivati con film di a-Si:H e su dispositivi SHJ su area > 1 cm² forniti da ENEA. Misure preliminari per verificare il comportamento elettro-ottico degli strati TMD amorfi come trasportatori selettivi di carica.
<p>Politecnico di Bari</p>	<p>L'attività di ricerca svolta, nel periodo di riferimento, ha riguardato (a) la ottimizzazione di procedure di crescita CVD di grafene drogato con eteroatomi e (b) la successiva messa a punto di procedure di trasferimento di grafene su substrati rigidi (silicio, vetro) da impiegare nella realizzazione di celle fotovoltaiche sia a base di silicio che a base di film sottili di perovskite. Il drogaggio del grafene effettuato sia con azoto durante la crescita CVD che con SOCl₂ è stato finalizzato a produrre sistemi multistrato con drogaggio di tipo p e con bassa "sheet resistance". Sono stati prodotti campioni di grafene multistrato (4-6 strati) su vetro con trasparenza al di sopra di 86 % e "sheet resistance" di circa 30 Ohm/□. L'indagine sul doping del grafene ha riguardato anche la possibilità di</p>

	<p>effettuare un drogaggio di tipo n, con l'obiettivo di realizzare strati con una funzione di lavoro inferiore a 4.5 eV, tipica del grafene non drogato, e quindi strati idonei per elettrodi trasparenti catodici. Per la valutazione della funzione di lavoro sui sistemi multistrato, attraverso misure di KPFM, sono stati prodotti campioni su substrati di silicio.</p>
<p>Università di Roma Sapienza - Dip Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni</p>	<p>L'attività di ricerca ha riguardato lo sviluppo di un modello semi-analitico per riprodurre le curve corrente-tensione di una giunzione a base Si. Partendo dalle equazioni di Shockley e Dushman, il modello include la presenza di una resistenza serie e di una resistenza shunt nel circuito equivalente del diodo. L'equazione ottenuta è di tipo trascendentale ed è stata risolta con un metodo di ricerca delle radici di una funzione non lineare in Matlab. Dapprima, è stata effettuata un'analisi di sensibilità in funzione dei diversi parametri del modello (altezza della barriera, resistenza serie, resistenza shunt e fattore di qualità). Successivamente, è stata implementata in Matlab una procedura di fitting basata sull'algoritmo genetico per riprodurre i risultati sperimentali di curve corrente-tensione di giunzioni.</p> <p>La procedura di fitting è stata applicata alle misure di corrente-tensione di due diverse strutture:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ti(100nm)/ n-type silicio cristallino/InGa; 2. In(100nm)/In drogato ZnS (3nm)/MgF2(1nm)/SiOx(5nm)/n-type silicio cristallino/InGa. <p>In ognuna di esse il silicio cristallino funge da substrato mentre lo strato di InGa costituisce il contatto ohmico posteriore. Le curve misurate presentano delle caratteristiche molto diverse tra loro.</p> <p>Per la prima delle due strutture, il modello riproduce i risultati sperimentali con un errore percentuale minore del 10%, mentre per la seconda l'errore percentuale arriva fino al 20% nella zona di polarizzazione inversa. I valori ottenuti di altezza di barriera risultano in entrambi i casi concordi con quelli che ci si attende da quelli di letteratura per i materiali utilizzati.</p>
<p>Università di Napoli "Federico II" – Dip. di Ingegneria</p>	<p>L'attività svolta ha riguardato sia l'aspetto sperimentale che quello numerico proposto nel progetto. Dal punto di vista sperimentale, è stato identificato e messo a punto un setup di misura sperimentale per effettuare la spettroscopia di impedenza su celle tandem in perovskite. Il setup citato consta di un impedenziometro, il Solartron 1260, un'interfaccia, Solartron 1296, atta ad ampliare il range di frequenze esplorabile e un computer dal quale è possibile avviare la misura e collezionare i dati sperimentali. La misura da effettuare con tale configurazione riguarda lo spettro in frequenza dell'impedenza. In particolare, al campione sotto esame viene applicato un segnale continuo (DC) con ampiezza fissa al quale è sovrapposto uno stimolo sinusoidale di ampiezza fissa (pari a 0.1 mV) e frequenza variabile. L'intervallo di frequenze di interesse per questo studio va da 1MHz a 100mHz. I valori citati sono stati selezionati dopo uno studio basato sulla letteratura disponibile. L'attività prevede la realizzazione di un modello numerico per le celle tandem mediante un simulatore avanzato, Sentaurus TCAD. Durante questo periodo è stata realizzata una struttura di test. Tale struttura consiste in una cella solare in perovskite, approssimabile al primo ordine alla cella top presente in una struttura tandem. La cella analizzata, partendo dal contatto superiore, ha uno strato di ossido trasparente conduttivo realizzato in ITO, uno strato di HTL (hole transport</p>

	<p>layer) realizzato in Spiro-OMetaD, uno strato in perovskite, uno strato ETL (electron transport layer) realizzato in TiO₂ e uno strato di ITO prima del contatto posteriore. Di tali strati sono state studiate e messe a punto le proprietà fisiche descrivendole nel simulatore menzionato. La caratteristica corrente-tensione sotto luce è stata realizzata in ambiente numerico considerando lo spettro d'incidenza AM1.5G.</p>
<p>Università di Roma Sapienza - Università di Roma Sapienza - Dip Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni</p>	<p>Per valutare le capacità di light-trapping di texture piramidali (angolo 54.7°) in modelli di moduli FV è stato utilizzato il software Comsol Multiphysics 5.6. In particolare, tramite il modulo geometrical-optics (gop) è possibile calcolare il percorso completo di onde elettromagnetiche nel limite delle alte frequenze. I fronti d'onda vengono dunque considerati come raggi che si propagano in strutture otticamente grandi e che si riflettono e si rifrangono ad ogni interfaccia presente nel modello.</p> <p>Tutte le simulazioni svolte hanno avuto lo scopo di studiare l'effetto di interfacce texturizzate sulla traiettoria dei raggi, ovvero di valutare fino a che punto i noti meccanismi di light-trapping di texture piramidali risultino efficaci nel massimizzare la trasmittanza dell'onda.</p> <p>La valutazione della efficienza della trasmissione ottica avviene considerando un modello semplificato di cella (aria-vetro, vetro-EVA, silicio, aria, in assenza ed in presenza di texture sul vetro) con tutte le condizioni al contorno disponibili nel modulo geometrical-optics (riflessione speculare, scomparsa dei raggi, congelamento dei raggi).</p> <p>Al fine del calcolo della riflettanza totale ($R=1-T$) solo i raggi che ritornano, dopo il loro percorso, sul contorno superiore (condizione di congelamento) sono collezionati e la loro intensità residua valutata. Le caratteristiche ottiche dei diversi mezzi attraversati dai raggi sono considerate in modo completo (parte reale e immaginaria).</p> <p>È noto come il meccanismo di light trapping funzioni tanto meglio quanto più è alto il salto d'indice tra i due materiali contigui in cui è presente la texture.</p> <p>Recentemente, è stata esplorata la possibilità di aumentare considerevolmente l'indice di rifrazione di materiali siliconici [RSC Advances Issue 76, 2015 DOI: 10.1039/c5ra09668e; Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 46 (2015) 168–175] con l'aggiunta di nanoparticelle funzionalizzate.</p> <p>L'effetto di tale funzionalizzazione è stato quindi valutato con tecniche simulative (utilizzando il modello di cella prima descritto): 10 fotoni, con angolo di incidenza variabile tra 0 (incidenza normale) e 10° sono emessi dal bordo superiore del modello (aria), le condizioni di interfaccia e al contorno sono tali da schematizzare un modulo di larghezza indefinita ma con spessore degli strati di:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vetro (BK7, $n=1.47$) 3.2 mm • Silicone+ TiO₂ 300 μm • Silicio 100 μm <p>Nessun coating è stato posto sulle piramidi. La potenza incidente è 1000 W/m², il fascio è considerato onda piana monocromatica con lunghezze d'onda 450, 550, 650, 750, 850 e 1000 nm. I valori di n e k del silicone funzionalizzato con particelle TiO₂ è stato esplicitamente considerato all'interno delle simulazioni.</p>

	<p>Le simulazioni hanno confermato che la presenza contemporanea del silicio funzionalizzato (con indice di rifrazione pari a 1.8 a tutte le lunghezze d'onda) e del vetro texturizzato provoca un efficiente light trapping.</p>
<p>Università di Bari - Dip. Agraria</p>	<p>L'attività è stata indirizzata essenzialmente alla selezione di specie frutticole idonee all'impiego in un sistema agrivoltaico. La scelta delle specie da impiegare in tale nuovo sistema misto agricolo-energetico è di fondamentale importanza per il successo di un impianto agrivoltaico negli anni. Le specie devono presentare una buona adattabilità alle condizioni di ombreggiamento determinate dai moduli fotovoltaici nelle diverse ore della giornata. Parametri fondamentali per la selezione della coltura sono quindi le caratteristiche salienti che la specie deve possedere: elevata capacità di intercettazione della radiazione incidente; elevata capacità di conversione della radiazione intercettata in sostanza secca ed infine elevata capacità di traslocazione e accumulo della sostanza secca verso i frutti (e/o altri organi). Sulla base di tali considerazioni sono state valutate possibili specie autoctone o comunque presenti da molto tempo sul territorio nazionale che possano rispondere a tali requisiti, con un chiaro un interesse di mercato, sia per il fresco sia per la trasformazione e una possibilità di reddito per l'agricoltore, anche nell'ottica di creare nuove filiere produttive. Gli effetti dell'ombreggiamento sono stati valutati, sulla base delle esperienze di ricerca condotte in precedenza e dei dati più recenti ottenuti dalla bibliografia, sugli aspetti fisiologici, fotosintetici, vegetativi, produttivi e qualitativi per diverse specie da frutto. Tale lavoro preliminare ha visto anche la pubblicazione di un articolo scientifico su tale argomento (Magarelli, A.; Mazzeo, A.; Ferrara, G. Fruit Crop Species with Agrivoltaic Systems: A Critical Review. Agronomy 2024, 14, 722. https://doi.org/10.3390/agronomy14040722), primo tangibile risultato dell'attività nel primo anno.</p>
<p>Università di Napoli "Federico II" - Dip. Architettura</p>	<p>Le attività di ricerca svolte dall'U.R. del Dipartimento di Architettura nell'ambito della LA2.7 nel periodo di riferimento hanno riguardato:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Studio dei principali documenti di letteratura tecnico-scientifica, della normativa nazionale e delle linee guida di riferimento nazionali e internazionali, al fine di definire lo stato dell'arte aggiornato sull'innovazione progettuale e tecnologica e sulla sostenibilità ambientale dei sistemi agrivoltaici. 2. Raccolta di casi studio significativi nazionali, selezionati sulla base dei dati disponibili ricavati da letteratura, da contatti diretti con progettisti e aziende e piattaforme open access. 3. Studio preliminare sull'attuale offerta industriale finalizzato alla costruzione del catalogo di prodotti, sistemi, componenti e soluzioni tecniche specifiche per la realizzazione di sistemi agrivoltaici sostenibili, individuando le modalità di integrazione fisica, funzionale e produttiva tra agricoltura, sistemi tecnologici per la produzione energetica e contesto ambientale.
<p>Università della Campania – Dip. Architettura</p>	<p>Le attività del secondo semestre, in continuità con quelle del primo semestre, hanno riguardato principalmente l'analisi dei contenuti dei Piani Paesaggistici Regionali, con particolare attenzione alle modalità di regolamentazione adottate per i paesaggi agricoli e per i paesaggi dell'energia. Come per gli approcci, anche per le modalità di</p>

	<p>regolamentazione dei paesaggi dell'agricoltura è possibile tracciare una linea comune: si passa da indicazioni d'area vasta per gli ambiti di paesaggio a specifiche indicazioni per preservare la riconoscibilità dei morfotipi (morfologia, trame, orientamenti, sistemi irrigui, etc.). Per i paesaggi delle energie rinnovabili, e in particolare per il fotovoltaico, in alcuni casi vengono forniti sia criteri per la definizione di aree non idonee che manuali e best practices per la loro corretta integrazione. A conclusione di questa fase di indagine, si sta attualmente procedendo alla definizione di modalità di approccio integrato per l'introduzione di sistemi agrivoltaici nei paesaggi agricoli e, specificamente, alla definizione dei criteri per la selezione dei paesaggi rurali a maggiore suscettività alla realizzazione di impianti agrivoltaici in ragione di caratteristiche connesse all'uso, alle tipologie di coltura, all'esposizione, alle pendenze, alla presenza di elementi di riconoscibilità, alle condizioni di visibilità e intervisibilità, di frammentazione ecosistemica e di pericolosità (soprattutto idraulica e da frana).</p>
<p>Università di Napoli "Federico II" - MUSA</p>	<p>Nel secondo semestre 2023 si è proceduto ad effettuare la semina delle specie vegetali designate in plateau di polistirene con alveoli di 3 cm (più semi per alveolo). Dopo la germinazione è stato effettuato un diradamento fino ad una pianta per alveolo e le plantule sono state travasate. Un totale di 200 plantule è stato travasato per la lattuga, 20 per radicchio, 20 per scarola riccia e 20 per basilico. Le plantule sono state suddivise su due cassoni di fertirrigazione per testare l'effetto di trattamenti biostimolanti sulla crescita. In dettaglio è stato utilizzato thè di compost derivato dalla macerazione della materia organica in acqua. Sono stati registrati altezza e stato di salute delle piante. Alla fine del ciclo è stato effettuato un campionamento distruttivo per ottenere dati di biomassa. I dati ottenuti saranno analizzati successivamente alla realizzazione di ulteriori cicli produttivi.</p> <p>È stata inoltre avviata la sperimentazione su piante micorrizzate. All'inizio della sperimentazione tutte le piante mostravano percentuali di micorrizzazione variabili, ma tutte con valori al di sopra del 40% sul totale degli apici radicali, rientrando per legge all'interno della dicitura di piante micorrizzate (valori registrati presso l'azienda di provenienza). La sperimentazione è ancora in corso e le misure di micorrizzazione saranno disponibili a fine sperimentazione. Si sta procedendo al monitoraggio delle altezze ed incidenza di patogeni fogliari su ogni pianta.</p>
<p>Università della Basilicata – Dip. Ingegneria.</p>	<p>Il passaggio alle fonti di energia sostenibile è essenziale per mitigare il cambiamento climatico e raggiungere obiettivi di sostenibilità ambientale a lungo termine. In tale scenario si collocano i sistemi agrivoltaici che rappresentano una soluzione sinergica tra attività agricole ed energetiche. Le attività svolte indagano l'influenza dei sistemi agrivoltaici in un contesto territoriale, utilizzando l'analisi della suitability come principale approccio metodologico. Il caso studio elaborato riguarda la valutazione dell'idoneità dell'intera regione Basilicata ad ospitare impianti agrivoltaici. Il metodo utilizzato combina l'Analytic Hierarchy Process (AHP) e i sistemi GIS. Vengono considerati differenti criteri ponendo particolare l'attenzione rispetto ai servizi ecosistemi (habitat quality, crop production, carbon stock) ed evidenziando come i sistemi agrivoltaici</p>

	<p>possano supportare habitat e biodiversità, creare ombreggiamenti per ridurre il calore e conservare l'acqua, facilitando la crescita delle piante. La particolare relazione con i servizi ecosistemici implica una valutazione sia dal lato dell'offerta (potenziale ecologico e produttivo del territorio), sia dal lato della domanda (bisogni sociali riferiti al cibo, energia e qualità ambientale). La land suitability ottenuta dall'elaborazione del caso studio mostra che la maggior parte della regione Basilicata è mediamente adatta per i sistemi agrivoltaici, con una significativa percentuale afferente alla classe di idoneità medio-alta.</p>
--	--