

**PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-27 - RICERCA DI SISTEMA
ELETTRICO NAZIONALE**

Progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

**AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO
ECONOMICO SOSTENIBILE**

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto integrato 1.1 – Fotovoltaico innovativo, efficiente e sostenibile

Durata: 36 mesi

Periodo attività: 01/01/2025 - 31/12/2025

ABSTRACT ATTIVITA' ANNUALE:

Il progetto si compone di 5 work package (WP): WP1 - Sviluppo di materiali e architetture di dispositivi FV ad alta efficienza, WP2 - Ottimizzazione delle prestazioni degli impianti fotovoltaici, WP3 - Massimizzazione della penetrazione del fotovoltaico nel sistema energetico nazionale, WP4 Aspetti di sostenibilità ambientale e WP5 - Coordinamento progetto e diffusione dei risultati. In questo primo anno di progetto sono state avviate attività in tutti i WP.

Nel WP1 la ricerca si concentra sulle celle solari a base di perovskite, silicio e celle tandem perovskite/Si. Per le celle in perovskite, si è lavorato utilizzando differenti materiali, architetture di dispositivo e tecniche di deposizione. Ad esempio, per la deposizione della perovskite è stato studiato il metodo ibrido a 2 step, dove si effettua l'evaporazione della parte inorganica e lo spin-coating della parte organica. Tale approccio è valido per la realizzazione di celle tandem su wafer di silicio testurizzato, consentendo la deposizione conforme su tali morfologie superficiali. In questo contesto è stato anche studiato il contatto semitrasparente per le celle tandem potendo contare su un nuovo sistema di deposizione per ALD di tipo termico dove è stata messa a punto la deposizione di SnO₂, tipicamente utilizzato come buffer per tale contatto. Inoltre, è stato avviato un lavoro focalizzato sullo studio di soluzioni scalabili per ottenere moduli tandem perovskite /Si a 4 terminali. Utilizzando un drogaggio a base di MXene e la passivazione superficiale per la perovskite sono stati realizzati moduli di perovskite semitrasparenti con efficienze superiori al 16% su un'area attiva di 60 cm².

Per le celle solari a eterogiunzione di silicio, è iniziato lo sviluppo di strati passivanti ultrasottili in ossido di silicio da ozonizzazione in alternativa ai film di silicio amorfo depositati mediante PECVD e generalmente utilizzati per passivare i wafer di silicio. È stato poi installato un nuovo sistema di deposizione a cluster costituito da due camere di processo, una per la crescita di materiali mediante sputtering e una per la deposizione via evaporazione termica; in tale sistema si è lavorato per definire i parametri di deposizione di alcuni dei materiali necessari alla realizzazione delle celle (metalli, TCO, strati buffer, etc.).

Per quanto riguarda il WP2, è stato progettato e realizzato sul tetto dell'edificio che ospita la sede Enea di Foggia un impianto FV da 19 kW, per il quale sono state utilizzate due tipologie di moduli FV della Longi di tipo TOPCon che adottano soluzioni tecnologiche differenti. È stata, poi, avviata la definizione degli interventi necessari al revamping dell'impianto FV di Lampedusa, un sito molto interessante per testare la resistenza e la resilienza dei moduli in condizioni climatiche estreme, caratterizzate da forte vento, alte temperature e salsedine.

Il WP3 è focalizzato principalmente sullo sviluppo di soluzioni tecnologiche da utilizzare nell'agrivoltaico. In questo contesto si è lavorato per individuare gli interventi necessari ad ottimizzare due impianti dimostratori già disponibili, uno agrivoltaico elevato fisso realizzato nello scorso triennio a Scalea e un impianto algovoltaiico presente nel centro dell'ENEA di Portici. Inoltre,

sempre a Portici è stata eseguita la progettazione di un impianto agrivoltaico verticale e sono state avviate le fasi esecutive necessarie alla realizzazione dello stesso impianto. È stato poi progettato un intervento di riammodernamento dell'eliostato Helioslab disponibile nel Centro ENEA di Portici, dove sarà realizzato un sito per il test di moduli FV di differenti tecnologie che potrà alloggiare anche i minimoduli in fase di sviluppo. Sempre nel WP3, si stanno anche studiando, a scala di laboratorio, celle solari organiche basate su nuovi polimeri da utilizzare sulle coperture di serre.

Nel WP4 si studiano materiali incapsulanti per i moduli FV. In particolare, si stanno valutando gli effetti sui diversi film incapsulanti generalmente utilizzati dall'industria FV (EVA, TPO, POE) di rivestimenti nanostrutturati a base di quantum dot di carbonio o di nanoparticelle di materiali ceramici con l'obiettivo di migliorare l'impermeabilità dei materiali incapsulanti e di valutare eventuali effetti ottici dei film incapsulanti così ottenuti.

Sono state portate avanti le attività relative alla gestione del progetto e alla comunicazione delle attività (WP5), utilizzando i convegni e le conferenze che si sono svolte nel periodo e partecipando alle azioni del Photovoltaic Power Systems Technology Collaboration Programme della IEA. Per la parte di coordinamento del progetto, accanto alle riunioni con gli altri affidatari per valutare il progresso delle attività avviate, sono state effettuate le necessarie interlocuzioni con i co-beneficiari per definire gli Accordi di collaborazione e si è valutato di spostare al mese 13 (gennaio 2026) l'inizio di tutte le LA previste in avvio al mese 10 del progetto (ottobre 2025) in considerazione dei ritardi nella fase di valutazione e successiva approvazione del PTR25-27.

ATTIVITA' SVOLTE

WP1: Sviluppo di materiali e architetture di dispositivi FV ad alta efficienza

<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 dal WP1 sono iniziate le sperimentazioni che riguardano lo sviluppo delle celle solari in perovskite (LA1.7), di celle a eterogiunzione di silicio (LA1.15) e di celle tandem perovskite/Si (LA1.18). In relazione alle attività sullo sviluppo di celle in perovskite, si è lavorato prevalentemente su architettura di dispositivo di tipo p-i-n utilizzando differenti strati trasportatori di carica. In particolare, come HTM è stato utilizzato PTAA e varie molecole SAM (2PACz, MeO-2PACz, MeO-4PACz), mentre come ETL sono stati utilizzati PCBM/BCP e nuove molecole fornite dal Dip. di Chimica di Napoli sviluppate nell'ambito delle attività svolte nello scorso triennio. I film di perovskite studiati sono realizzati utilizzando metodi da soluzione (spin-coating), co-evaporazione e metodo ibrido a 2 step (evaporazione della parte inorganica e spin-coating della parte organica). Inoltre, mentre nelle scorse attività era stata prevalentemente utilizzata la perovskite a triplo catione (MA, FA, Cs) l'attività ha previsto lo sviluppo di perovskite senza il catione metilammonio (MA) altamente volatile, quindi con prospettiva di stabilità termica e sotto luce migliorate. Le celle sono state realizzate con differenti gap e in differenti configurazioni in sinergia con le attività della LA1.18. In particolare, l'attività in questo periodo si è concentrata sullo sviluppo di perovskite col metodo a 2 step, mettendo a punto le varie fasi del processo:

	coevaporazione dei componenti inorganici (PbI₂ e CsI) e conversione del film in perovskite mediante lo spin-coating di una soluzione di FABr/FAI in etanolo e successivo annealing termico. Variando il rapporto FABr/FAI sono stati ottenuti film ad alogeno misto con diversi valori di bandgap, per poi stabilire le condizioni utili per l'applicazione in celle tandem. Il materiale così ottenuto è stato inserito in celle p-i-n che sono state poi caratterizzate, ottenendo risultati molto incoraggianti. Le attività sullo sviluppo di celle a eterogiunzione di silicio sono state portate avanti valutando alcuni materiali differenti per la realizzazione dei dispositivi. È stato installato un nuovo sistema di deposizione a cluster costituito da due camere di processo, una per la crescita di materiali mediante sputtering e una per la deposizione via evaporazione termica. Le due camere sono collegate mediante una camera di trasferimento, così da potere effettuare di seguito la deposizione di più strati con le due differenti tecniche senza interrompere il vuoto. In questo periodo, a valle dell'installazione del sistema, è iniziata la messa a punto di vari materiali: metalli, MoO_x e LiF mediante evaporazione termica e film di TCO (ITO e IZO) per sputtering, valutando per questi ultimi materiali regimi di crescita appropriati allo scopo di preservare la passivazione del wafer di Si. È poi iniziato lo sviluppo di processi di passivazione della superficie dei wafer di Si con strati ultrasottili in ossido di silicio da ozonizzazione in alternativa a passivanti in silicio amorfo da PECVD generalmente utilizzati nelle celle a eterogiunzione di silicio. È stato anche avviato lo sviluppo di film di ossido di indio da evaporazione termica con co-evaporazione di droganti (titanio, tantalio, niobio) da utilizzare come TCO nei dispositivi con potenzialità di costi ridotti e processi meno impattanti. Per quanto riguarda lo sviluppo di celle tandem perovskite/Si, è proseguito lo sviluppo del contatto semitrasparente della cella frontale in perovskite. In particolare, a valle dell'installazione di un sistema di deposizione per ALD di tipo termico, è iniziata la messa a punto di film di SnO₂ da utilizzare per proteggere perovskite/ETL dal danneggiamento indotto dal processo di sputtering del TCO. Sono state, quindi, in una prima fase confrontate le prestazioni di celle opache, realizzate cioè con contatto posteriore metallico, fabbricate con l'ETL già consolidato (PCBM/BCP) e con C₆₀/SnO₂ e successivamente sono state realizzate celle in perovskite semitrasparenti nelle quali il contatto posteriore è del tipo C₆₀/SnO₂/TCO. Sono state anche utilizzate simulazioni ottiche per valutare le perdite nei vari strati di supporto per il dispositivo e gli spessori di perovskite tali da assicurare condizioni di matching di corrente per le diverse tipologie di wafer di Si (testurizzato su entrambe le superfici o da un solo lato).
Università degli Studi di Roma Tor Vergata Dipartimento di Ingegneria Elettronica	L'attività della LA1.11 è focalizzata sullo studio di soluzioni scalabili per ottenere moduli tandem a 4 terminali. In particolare, si è lavorato allo sviluppo di celle in perovskite che possano poi essere utilizzate nelle celle tandem perovskite/Si e utili allo sviluppo di prototipi di moduli fotovoltaici. Questo studio ha utilizzato un approccio originale per indurre la formazione di una giunzione a effetto di campo all'interno dello strato attivo di perovskite, al fine di ottenere moduli frontali semitrasparenti efficienti da integrare in pannelli tandem perovskite/silicio a quattro terminali. La sinergia tra il drogaggio a base di MXene e la passivazione a

	gradiente superficiale ha permesso di realizzare moduli di perovskite semitrasparenti con efficienze superiori al 16% su un'area attiva di 60 cm². Questi sono stati integrati in un pannello tandem a quattro terminali (0,2 m²) che sarà testato in condizioni reali nei prossimi mesi per valutarne la stabilità. Questo lavoro può avere un significativo impatto dal punto di vista industriale, presentando una soluzione scalabile e ad alta efficienza per il fotovoltaico di prossima generazione con modifiche minime alle linee di produzione del silicio.
--	--

WP2: Ottimizzazione delle prestazioni degli impianti fotovoltaici

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	Le attività della LA2.6 (WP2) hanno riguardato la progettazione e la realizzazione di un nuovo impianto FV dimostratore da circa 19kW sul tetto dell'edificio che ospita la sede ENEA di Foggia e l'avvio del revamping dell'impianto FV presente presso la Stazione di Osservazioni Climatiche ENEA sull'isola di Lampedusa. Sul sito di Foggia sono stati installati due tipi di moduli FV forniti da LONGI per studiare il loro comportamento in condizioni operative reali. La prima tipologia di modulo (Hi-MO9) utilizza una tecnologia TOPCon back-contact che attraverso un meccanismo di "soft breakdown" mostra un comportamento anti-ombreggiamento intrinseco. L'altro modulo è formato da celle TOPCon con contatti frontali che presentano un elevato grado di bifaccialità (Hi-MO7). Per il revamping dell'impianto di Lampedusa sono stati individuati i moduli da utilizzare per testare le prestazioni e la resilienza delle due principali tecnologie FV, TOPCon ed eterogiunzione, in un sito in cui le condizioni meteo sono particolarmente aggressive (venti molto forti, elevata temperatura e alta concentrazione di salsedine).

WP3: Massimizzazione della penetrazione del fotovoltaico nel sistema energetico nazionale

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	Per quanto riguarda il WP3 sono state avviate le attività che riguardano lo sviluppo di un hub sperimentale diffuso di impianti agrivoltaici (LA3.9), la progettazione di un sito di test per la caratterizzazione di moduli FV (LA3.11) e lo studio di celle solari organiche per applicazione in coperture di serre (LA3.15). Per quanto riguarda la LA3.9 sono stati definiti i contenuti tecnici delle attività da affidare tramite contratti per servizi tecnico-scientifici a valle di discussioni specifiche con gli operatori individuati. Le attività riguardano

	l'ottimizzazione di due dimostratori già esistenti (l'impianto agrivoltaico elevato fisso realizzato nello scorso triennio a Scalea e l'impianto algovoltaico presente nel Centro di Portici) e la realizzazione di un nuovo impianto agrivoltaico verticale presso il Centro di Portici. Sono state espletate buona parte delle procedure amministrative relative alle tre procedure di affidamento e sono state avviate le prime fasi di realizzazione dell'impianto verticale. Nella LA3.11 è stata avviata la progettazione del revamping dell'eliostato Phocus dove verrà realizzato un sito per la caratterizzazione di moduli FV di varie tecnologie e che potrà ospitare anche minimoduli in fase di sviluppo. È stata avviata la progettazione della riqualificazione dell'eliostato e la progettazione del nuovo sistema di movimentazione a doppio asse. Inoltre, per il monitoraggio dei moduli FV si è identificata la Facoltà di Ingegneria Elettrica dell'Università di Lubiana (Slovenia) come possibile fornitore di un sistema customizzato che consenta di testare contemporaneamente fino a 12 moduli fotovoltaici di tipo commerciale e fino a 16 mini-moduli FV in condizioni outdoor. Sono state definite le specifiche del sistema ed espletate le procedure di affidamento dell'appalto. Le attività della LA3.15 hanno riguardato lo sviluppo e la caratterizzazione di materiali organici (polimeri semiconduttori e macromolecole) per la realizzazione di celle fotovoltaiche organiche per l'agrivoltaico. Sono state selezionate delle molecole promettenti e realizzate celle solari su piccola area per testarne le proprietà.
--	--

WP4: Aspetti di sostenibilità ambientale

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	Nell'ambito del WP4 (LA4.6), l'attività ha riguardato lo sviluppo di polimeri incapsulanti ingegnerizzati per il fotovoltaico, con un focus sull'influenza della morfologia superficiale dell'EVA e del processo di laminazione sull'efficacia di un coating nanostrutturato a base di quantum dot di carbonio (CQD). L'obiettivo primario è stato incentrato sulla comprensione delle dinamiche di interazione tra l'asimmetria topografica del polimero e i parametri termomeccanici di fabbricazione del dispositivo, al fine di ottimizzare l'effetto di conversione spettrale luminescente fornito dai CQD. L'attività sperimentale è iniziata con la sintesi idrotermica, assistita da microonde, di CQD dopati con azoto, a partire da precursori ecocompatibili. Sono state sviluppate e ottimizzate le ricette per l'ottenimento di sospensioni stabili di CQD in acqua e per la loro compatibilizzazione con la superficie idrofobica dell'EVA. Infine, per validare il sistema in condizioni operative reali, sono stati fabbricati alcuni mini-dispositivi fotovoltaici prototipali integrando le diverse combinazioni morfologiche dell'EVA funzionalizzato con CQD. In parallelo a questa attività, l'attenzione è stata focalizzata sul miglioramento delle proprietà impermeabili dei film incapsulanti mediante

	il rivestimento di diversi polimeri commerciali (EVA, TPO e POE) con nanoparticelle di materiali ceramici. In particolare, sono state impiegate nanoparticelle di ZnO, depositate tramite processo di dip-coating, per la realizzazione di compositi bi-strato e multi-strato incapsulante/nanoparticelle. I campioni che hanno mostrato le caratteristiche funzionali più promettenti sono stati avviati a processi di invecchiamento accelerato, al fine di valutarne la durabilità a lungo termine.
--	---

WP5: Coordinamento progetto e diffusione dei risultati

<i>AFFIDATARIO / COBENEFICIARIO</i>	<i>SINTESI DELLE ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTE, RISULTATI CONSEGUITI E RICADUTE SUL SETTORE PRODUTTIVO</i>
ENEA	Per quanto riguarda le azioni di coordinamento e disseminazione del progetto (WP5), 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 HOPV25 (Roma), Terza Conferenza Nazionale della Rete Italiana del FV (Napoli), PSCO-25 (Perugia), EUPVSEC 2025 (Bilbao), KEY 2025 (Rimini), AgriPV World Conference 2025 (Friburgo). 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. Ogni attività descritta ha ricadute importanti sul sistema produttivo nazionale e incide su più punti della catena del valore.