

Ricerca di Sistema elettrico



REALIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI PROTOTIPI DI
MODULI FOTOFOLTAICI PROGETTATI CON NUOVI MATERIALI
POLIMERICI (LA1.31)

V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, A. De Maria, C. Diletto, A. Romano, G. Flaminio

REALIZZAZIONE E CRATTERIZZAZIONE DI PROTOTIPI DI MODULI FOTOFOLTAICI PROGETTATI
CON NUOVI MATERIALI POLIMERICI (LA1.31)

V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, A. De Maria, C. Diletto, A. Romano, G. Flaminio
ENEA-TERIN

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza"

Linea di attività: LA1.31

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 18

Mese inizio effettivo: 18

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Materiali e metodi	10
7.2	Proprietà ottiche	11
7.3	Foto-degradazione	13
7.4	Cristallinità.....	13
7.5	Prestazioni e durabilità di mini-dispositivi fotovoltaici.....	14
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	17
9	Pubblicazioni scientifiche	18
10	Eventi di disseminazione	19

Indice delle figure

Figura 1 – Variazione della Trasmittanza (ΔT) a 550 nm vs dose UV per differenti film incapsulanti laminati.	11
Figura 2 – Variazione nella lunghezza d'onda UV di cut-off al 10 % T vs dose UV per i diversi tipi di incapsulanti laminati.....	12
Figura 3 – Variazione dell'indice di ingiallimento (YI) per i film incapsulanti laminati durante l'invecchiamento UV.....	12
Figura 4 – Carbon index (CI) dei vari film incapsulanti, riferito alla variazione del gruppo funzionale C=O dell'acido carbossilico, in funzione della dose UV.....	13
Figura 5 – Variazione della cristallinità dei film incapsulanti laminati durante l'invecchiamento UV.....	13
Figura 6 – Mini-dispositivi fotovoltaici realizzati con tre diversi film incapsulanti dopo invecchiamento avvelerato.	14
Figura 7 – ISC vs UV dose per i mini-dispositivi fotovoltaici durante l'invecchiamento UV.....	14

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Trasmittanza totale a 550 nm e UV cut-off wavelength a 10 % T degli incapsulanti laminati.....	11
Tabella 2 – Variazioni percentuali di Eff., FF, PMPP, I _{pm} e I _{sc} per i diversi mini-dispositivi dopo invecchiamento UV.....	15

1 Risultati attesi

Invecchiamento e caratterizzazione dei materiali polimerici per testarne le proprietà in seguito ad esposizione a stress ambientale. Individuazione dei materiali polimerici più idonei all'utilizzo come incapsulanti. Realizzazione e caratterizzazione di prototipi di moduli fotovoltaici di dimensioni di circa 20 x 20 cm² con i nuovi materiali polimerici, realizzati con celle solari commerciali. Valutazione delle performances dei nuovi polimeri nella eco-progettazione di moduli fotovoltaici e confronto con quelle di moduli ottenuti con materiali standard.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono elencati di seguito e sono stati completamente raggiunti.

- Laminazione di film polimerici incapsulanti comunemente usati in ambito fotovoltaico e di film alternativi a base di poliolefine, elastomeriche e termoplastiche, secondo le ricette richieste per la fabbricazione di moduli fotovoltaici.
- Caratterizzazioni chimico-fisiche dei diversi incapsulanti polimerici, dopo la laminazione.
- Prove di invecchiamento accelerato degli incapsulanti, in camera climatica, in condizioni controllate di temperatura, umidità e radiazione UV.
- Caratterizzazioni chimico-fisiche dei diversi incapsulanti polimerici, durante e dopo il test di invecchiamento accelerato.
- Realizzazione di mini-dispositivi fotovoltaici, in scala di laboratorio, utilizzando diversi film incapsulanti a base di EVA, POE e TPO.
- Prove di invecchiamento accelerato dei mini-dispositivi fotovoltaici, in camera climatica, in condizioni controllate di temperatura, umidità e radiazione UV.
- Caratterizzazioni elettrica dei mini-dispositivi fotovoltaici, durante e dopo il test di invecchiamento accelerato.
- Valutazioni conclusive sulle prestazioni e la durabilità dei vari tipi di incapsulanti testati nei mini-dispositivi fotovoltaici.

3 Prodotti attesi

Report tecnico-scientifico dal titolo: "Realizzazione e caratterizzazione di prototipi di moduli fotovoltaici progettati con nuovi materiali polimerici".

4 Prodotti sviluppati

Il presente report: "Realizzazione e caratterizzazione di prototipi di moduli fotovoltaici progettati con nuovi materiali polimerici" - RdS_PTR 22-24_

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Il lavoro è proceduto secondo le previsioni e le attività pianificate hanno raggiunto gli obiettivi stabiliti. Non si segnalano, quindi, scostamenti tra i risultati attesi e quelli ottenuti.

6 Sintesi delle attività svolte

È stata investigata la variazione delle proprietà chimico/fisiche di nuovi materiali incapsulanti, alternativi all'EVA, a seguito di invecchiamento UV. Sono state analizzate due classi di polimeri: poliolefine termoplastiche (TPO) ed elastomeri poliolefinici (POE) e le loro proprietà sono state confrontate con quelle dell'EVA, comunemente utilizzato come incapsulante. Diversi film polimerici, previamente laminati, e mini-dispositivi fotovoltaici realizzati in laboratorio con tali film sono stati sottoposti ad invecchiamento accelerato in una camera climatica, in condizioni controllate di temperatura, umidità e radiazione UV. In seguito all'invecchiamento UV, è stata studiata la variazione delle proprietà degli incapsulanti e delle prestazioni dei mini-dispositivi. I risultati ottenuti hanno evidenziato che POE e TPO possono sostituire efficientemente l'EVA e che alcuni film polimerici a base di TPO hanno ottime prestazioni durante l'esercizio di dispositivi fotovoltaici.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Materiali e metodi

Sono stati testati film polimerici a base di poliolefine elastomeriche (POE) e termoplastiche (TPO) in alternativa all'incapsulante comunemente utilizzato (EVA) nella fabbricazione di moduli fotovoltaici. Alcuni film di poliolefine, le cui proprietà caratteristiche sono state analizzate nella precedente LA1.30, sono stati sottoposti a laminazione secondo le indicazioni fornite dalle aziende produttrici, nelle rispettive schede tecniche, per simulare le condizioni di fabbricazione del modulo. Per la laminazione è stato utilizzato un laminatore RISE Technology - CORE 1, dotato di un sistema di controllo dei cicli termici, un sistema di controllo del ciclo di pressione e un sistema refrigerante ad acqua. Le ricette di laminazione per i vari film differiscono per la temperatura massima e il tempo di permanenza e prevedono: 150°C e 700 sec per i film di EVA, 160°C e 900 sec per i film di POE, 160°C e 480 sec per i film di TPO.

Per valutare le prestazioni delle diverse tipologie di incapsulanti in un'applicazione reale, sono stati realizzati in laboratorio prototipi di mini-dispositivi fotovoltaici ed è stata studiata la variazione delle loro caratteristiche elettriche durante l'invecchiamento. I mini-dispositivi, di dimensioni 30x30 cm, sono stati realizzati con celle commerciali half-cut di Futura Sun, vetro sul lato anteriore, un film di PET sul lato posteriore e diversi polimeri come incapsulanti. Ogni prototipo è stato laminato secondo la ricetta indicata nelle specifiche tecniche dell'incapsulante con cui è stato realizzato.

I test di invecchiamento accelerato sono stati condotti sia sui mini-dispositivi, sia sui film polimerici laminati, alla temperatura di 60°C e al 60% di umidità relativa. Per i test è stata utilizzata una camera climatica tipo UV 3000 di Angelantoni Industries, dotata di 4 lampade ad arco a ioduri metallici tipo Ultramed 2000W OSRAM, per simulare la luce solare. Nella camera sono installati 4 filtri speciali per tagliare la radiazione UVC < 280 nm. Per misurare lo spettro della lampada è stato utilizzato uno spettroradiometro tipo SR9910 V7 di Macam Photometrics Ltd, l'intensità della lampada è stata registrata in funzione della lunghezza d'onda (240-800 nm). Per valutare la dose UV a cui sono stati esposti i campioni, è stata misurata l'irradianza spettrale delle lampade. È stata considerata la frazione di potenza radiante relativa alla radiazione UV nell'intervallo di lunghezza d'onda 300-400 nm, pari a 0,309 kW/m². I film laminati sono stati esposti alle dosi di 22, 74, 126 e 214 kWh/m² e i mini-dispositivi alle dosi di 22, 74, 126, 214, 600, 1200 e 1800 kWh/m².

Durante e dopo l'invecchiamento accelerato, sono state condotte varie determinazioni analitiche per valutare il cambiamento delle proprietà dei diversi materiali polimerici. Le proprietà ottiche degli incapsulanti sono state misurate mediante uno spettrometro Lambda 1050+ UV/Vis/NIR - PerkinElmer. Gli spettri sono stati registrati da 250 a 1250 nm, con una risoluzione di 1 nm e 8 scansioni, con una sfera di integrazione da 150 mm InGaAs. L'indice di ingiallimento è stato misurato mediante un colorimetro portatile PCE Instruments, modello: PCM-CSM 5, a 10° di angolo di osservazione, geometria della sfera 8°/d e sorgente luminosa D65. Gli spettri ATR-FTIR sono stati ottenuti utilizzando uno spettrometro Spectrum Two Universal ATR Diamond - Perkin Elmer, con un rilevatore DTGS MIR e sono stati registrati nell'intervallo da 4000 a 400 cm⁻¹, con 32 scansioni e una risoluzione spettrale di 4 cm⁻¹. L'analisi di diffrazione dei raggi X è stata eseguita utilizzando un diffrattometro a raggi X Smartlab - Rigaku, con radiazione Cu-K α ($\lambda = 1,54059$ nm), tensione di accelerazione 40 kV e la corrente elettrica 40 mA. I campioni sono stati scansionati nell'intervallo da 10° a 30° (2θ), con una velocità di scansione di 1,2°/min.

La caratterizzazione elettrica dei mini-dispositivi è stata effettuata tramite un simulatore solare pulsato PASAN IIIb, con un tempo di sweep nominale di 10 ms, irradianza totale di 1000

W/m², temperatura di 25,0 ± 0,1 °C, irradianza spettrale AM1,5g. Le misure della curva corrente-tensione sono state eseguite secondo la norma CEI EN 61215-1. Per costruire la curva I-V, sono stati presi 35-40 punti, applicando una tensione costante al mini-dispositivo ed esponendolo a un flash dal simulatore solare al livello di irradianza desiderato. La corrente di cortocircuito (I_{sc}), l'efficienza (Eff.), il fattore di riempimento (FF) e la potenza al punto di massima potenza (PMPP) sono stati calcolati dalle curve I-V misurate dopo ogni fase di invecchiamento UV.

7.2 Proprietà ottiche

Il processo di laminazione necessario all'assemblaggio di un modulo fotovoltaico influenza le proprietà dei film polimerici, quindi, la variazione delle loro proprietà ottiche, in seguito ad invecchiamento UV, è stata studiata per simulare e verificare le prestazioni e la durabilità dei materiali nell'applicazione reale. Mediante analisi UV-Vis sono state valutate la variazione della trasmittanza dei film nel range 250-800 nm, la presenza di additivi e la formazione di specie cromofore, responsabili dell'ingiallimento durante gli step di invecchiamento [1-3].

La variazione percentuale della trasmittanza a 550 nm in funzione della dose UV è mostrata in Fig. 1.

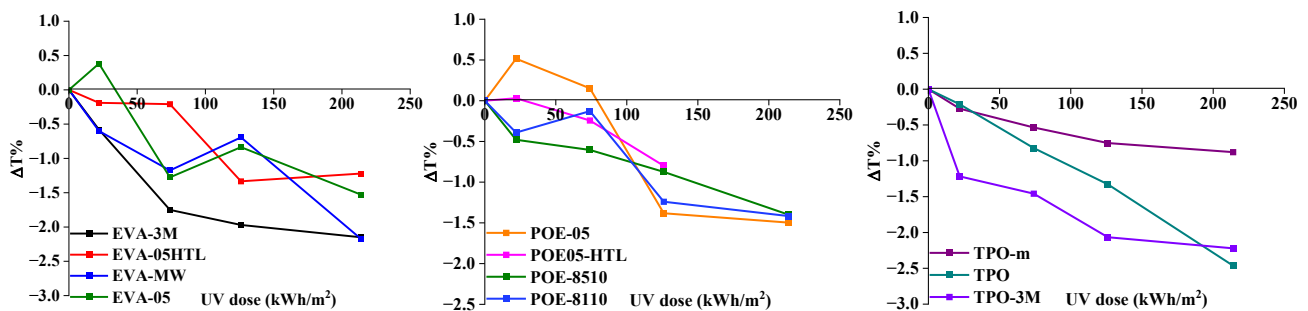


Figura 1 - Variazione della Trasmittanza (ΔT) a 550 nm vs dose UV per differenti film incapsulanti laminati.

Dopo l'invecchiamento, EVA-3M ed EVA-MW mostrano una diminuzione maggiore del valore di T%, rispettivamente 2.15% e 2.17%, dovuta probabilmente ad un più elevato contenuto di vinilacetato. Il leggero aumento del valore di T% che si osserva per EVA-05 nella regione tra 300 e 350 nm, è probabilmente dovuto al consumo degli assorbitori UV. Dei quattro POE investigati, il POE-05HTL è completamente degradato al quarto step di invecchiamento. POE-05, POE-8110 e POE-8510 mostrano una diminuzione del valore di T% confrontabile e pari rispettivamente a 1.49 %, 1.41 % e 1.40 %. TPO-3M e TPO mostrano una maggiore diminuzione di trasmittanza rispetto al TPO-m, pari rispettivamente a 2.2 %, 2.5 % e 0.9 %. TPO-m mostra la maggiore stabilità ottica rispetto a tutti gli altri campioni, probabilmente per la sua diversa formulazione in termini di additivi e antiossidanti.

In Tabella 1, sono riportati i valori di T% a 550 nm e i valori di UV cut-off al 10 % di T per tutti gli incapsulanti laminati prima dell'invecchiamento. Nella regione del visibile, EVA e POE hanno trasmittanza leggermente più elevata rispetto a TPO. Nella regione dell'ultravioletto, EVA-05HTL, POE-05HTL, POE-8110 e TPO mostrano un'elevata trasparenza e l'assenza di assorbitori UV, pertanto non presentano valori di lunghezza d'onda di cut-off al 10% di T. POE-8510 presenta tre lunghezze d'onda di cut-off (255, 272, 370 nm), dovute alla presenza di vari additivi nella formulazione del film.

Tabella 1. Trasmissanza totale a 550 nm e UV cut-off wavelength a 10 % T degli incapsulanti laminati.

Film incapsulante	% T a 550 nm (400 - 800 nm)	UV cut-off wavelength a 10 % T (nm)
EVA-MW	92	360
EVA05-HTL	91	N.D.
EVA-05	92	355
EVA-3M	91	367
POE-05	91	357
POE05-HTL	92	N.D.
POE-8510	91	255 - 272 - 370
POE-8110	92	N.D.
TPO	90	N.D.
TPO-m	89	366
TPO-3M	90	358

Lo spostamento del valore di cut-off dei film incapsulanti di sotto di 350 nm produce un aumento della risposta spettrale delle celle solari nel range della luce blu/UV [4]. La variazione della lunghezza d'onda di cut-off al 10% di T in funzione della dose UV è mostrata in Figura 2. Dopo l'invecchiamento, POE-8510, TPO-m e EVA-05 mostrano una diminuzione del cut-off più significativa rispetto agli altri film, probabilmente a causa del consumo o del degrado degli additivi UV adsorber, mentre per EVA-3M la variazione è trascurabile.

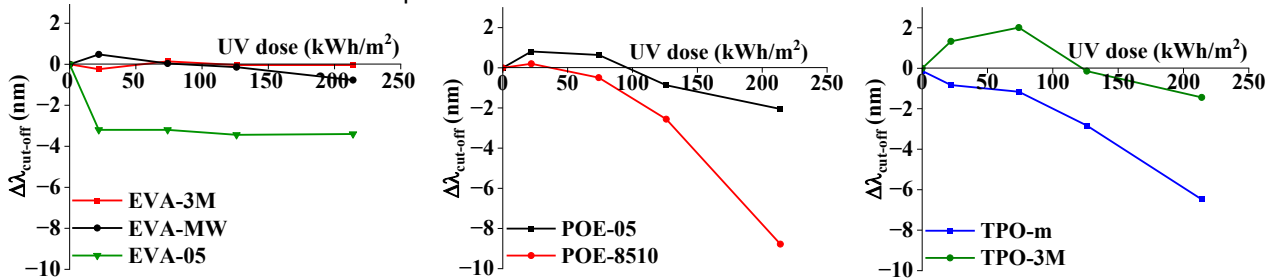


Figura 2. Variazione nella lunghezza d'onda di cut-off al 10 % T vs dose UV per i diversi tipi di incapsulanti laminati.

Uno dei principali effetti causati dall'invecchiamento UV è l'ingiallimento dei materiali incapsulanti causato dalla formazione di nuove specie cromofore e insature. La variazione dell'indice di ingiallimento dei materiali (ΔYI) è riportata in Figura 3. Per tutti gli 11 film incapsulanti, YI aumenta all'aumentare della dose UV.

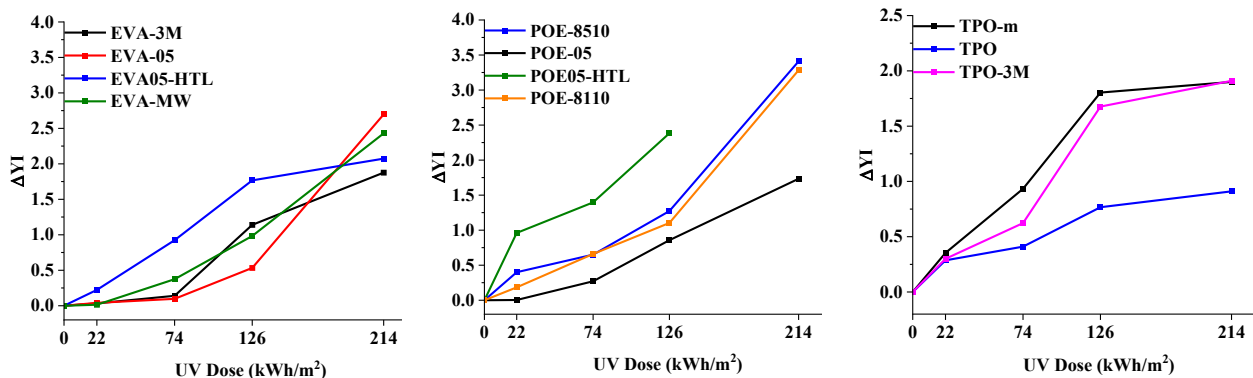


Figura 3. Variazione dell'indice di ingiallimento (YI) per i film incapsulanti laminati durante l'invecchiamento UV.

Tra i film a base di EVA, EVA-05 e EVA-MW presentano un maggiore incremento nella variazione di YI. L'ingiallimento dell'EVA è favorito dalla perdita della molecola di vinilacetato e dalla

produzione di acido acetico durante la prima fase di degradazione del film incapsulante [5]. I film a base di POE subiscono il maggiore ingiallimento a causa dell'invecchiamento UV rispetto agli altri film incapsulanti; solo POE-05 risulta leggermente più stabile. Il TPO è il film che subisce il minore aumento dell'indice di ingiallimento. L'ingiallimento più lento del TPO è probabilmente dovuto alla sua minore generazione di fluorofori [4].

7.3 Foto-degradazione

L'evoluzione della degradazione chimica e la formazione di prodotti di degradazione quali acidi carbossilici, chetoni, aldeidi e lattoni, in conseguenza dell'invecchiamento UV sono state valutate mediante analisi ATR-FTIR. Gli effetti dell'invecchiamento sono stati determinati mediante lo studio delle variazioni evidenziate nella regione spettrale corrispondente al gruppo carbonilico (C=O) [6]. Un'analisi semi-quantitativa è stata fatta sulle nuove funzioni carbossiliche formate in conseguenza della fotoossidazione. La quantità di acidi carbossilici formati è stata calcolata nella regione tra 1800 e 1600 cm^{-1} , integrando l'area dei picchi e normalizzando rispetto all'area del picco associato alle vibrazioni di stretching del metilene, a 2850 cm^{-1} [7]. La deconvoluzione del profilo della banda composta dalla sovrapposizione dei vari contributi carbonilici, ha permesso di ottenere l'area corrispondente al contributo di ciascun gruppo funzionale. Quindi, è stato calcolato l'indice carbonilico, $CI = A_{\text{carboxylic acid}} / A_{2850}$, dove A_{2850} è l'area del picco corrispondente al metilene a 2850 cm^{-1} , e $A_{\text{carboxylic acid}}$ è l'area del picco riferito alle vibrazioni di stretching C=O dell'acido carbossilico. L'andamento del CI, mostrato in Fig. 4, rivela che tutti i POE subiscono una degradazione chimica significativa in seguito all'invecchiamento, dovuta ad un'ossidazione nel segmento dell'etilene o del comonomero. In particolare, il POE-05HTL presenta la minore stabilità chimica. Tra i film di EVA, EVA-3M è il più instabile, probabilmente a causa della presenza di elevati livelli di specie fotoattive che contribuiscono alla degradazione del polimero.

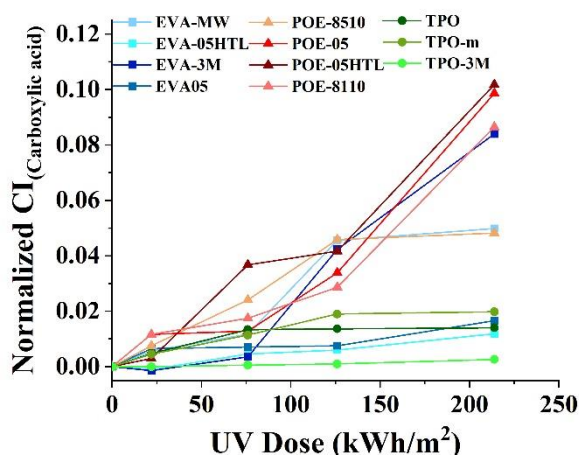


Figura 4. Carbon index (CI) dei vari film incapsulanti, riferito alla variazione del gruppo funzionale C=O dell'acido carbossilico, in funzione della dose UV.

L'invecchiamento dei film di TPO non provoca invece, cambiamenti significativi nell'indice carbonilico; ciò indica che la degradazione avviene in misura inferiore rispetto a EVA e POE. Il TPO-3M risulta il film incapsulante più stabile tra tutti.

7.4 Cristallinità

L'analisi XRD ha evidenziato che tutti i film sono sistemi semi-cristallini complessi. L'invecchiamento induce una riorganizzazione molecolare, un aumento della cristallinità e una diminuzione delle dimensioni del materiale, che causano un deterioramento delle proprietà

meccaniche e infragilimento [8]. La Figura 5 mostra la variazione della cristallinità dei film laminati, durante invecchiamento UV.

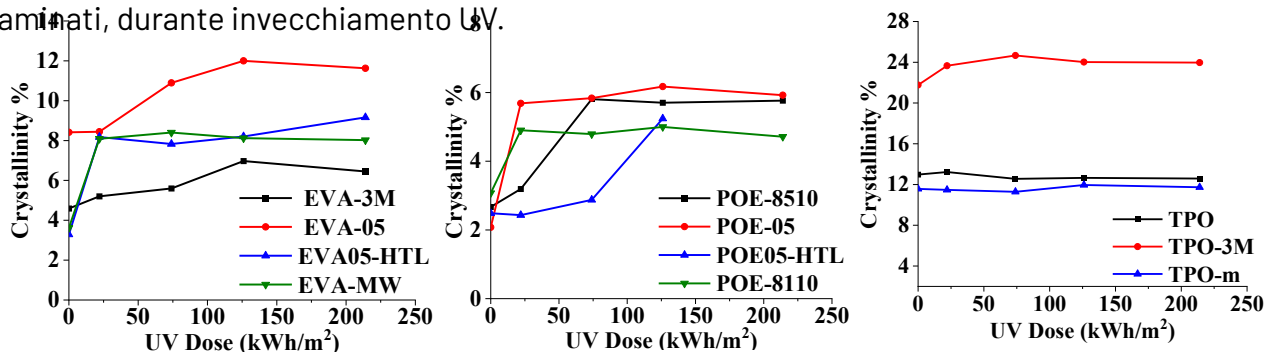


Figura 5. Variazione della cristallinità dei film incapsulanti laminati durante l'invecchiamento UV.

A differenza dei TPO, gli incapsulanti EVA e POE mostrano un aumento importante della cristallinità in funzione della dose UV ricevuta. La cristallinità di TPO e TPO-m non mostra invece, cambiamenti significativi.

7.5 Prestazioni e durabilità di mini-dispositivi fotovoltaici

Gli effetti dell'invecchiamento accelerato sul decadimento delle proprietà dei film incapsulanti si evidenziano più rapidamente rispetto a quelli degli stessi film racchiusi nella struttura dei mini-dispositivi, a causa della maggiore superficie esposta. Gli effetti dannosi delle radiazioni UV, insieme a quelli di temperatura e umidità, sui mini-dispositivi sono quindi, meno drammatici rispetto ai polimeri liberi, a parità di dose UV ricevuta. Per evidenziare il degrado nelle proprietà elettriche dei mini-dispositivi realizzati con i diversi incapsulanti, l'esposizione alle radiazioni UV è stata estesa fino alla dose di 1800 kWh/m² e ad ogni step di invecchiamento, sono stati analizzati i parametri elettrici che rappresentano le prestazioni delle celle. La Figura 6 mostra tre mini-dispositivi fotovoltaici realizzati in laboratorio, dopo i test di invecchiamento accelerato.

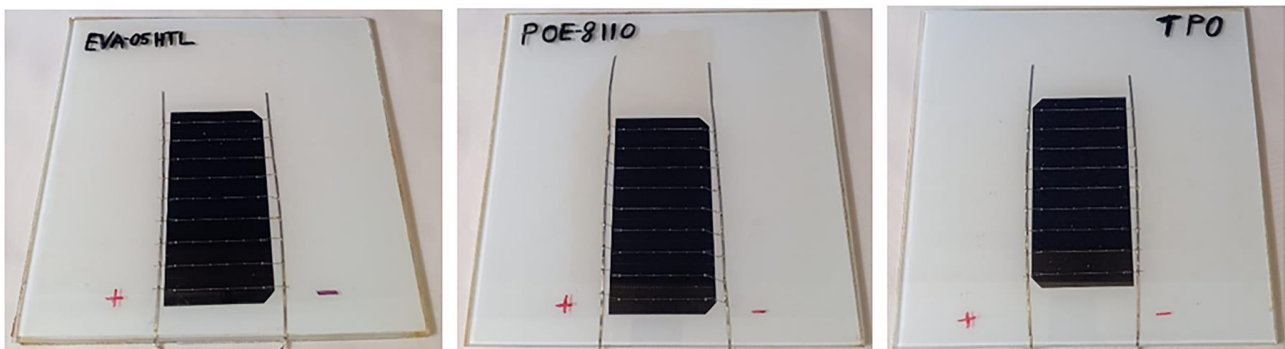


Figura 6. Mini-dispositivi fotovoltaici realizzati con tre diversi film incapsulanti dopo invecchiamento avvelerato.

L'analisi dei parametri fotovoltaici di un dispositivo consente di valutare il collegamento tra sollecitazione indotta dalla radiazione UV, proprietà del film incapsulante e prestazioni elettriche del dispositivo. I parametri FV della cella solare sono stati valutati dalle curve I-V misurate durante l'invecchiamento del modulo e le loro variazioni consentono di valutare se l'esposizione UV inneschi diversi livelli di degradazione nei dispositivi realizzati con diversi film incapsulanti. In particolare, l'evoluzione della fotocorrente durante l'invecchiamento UV, per i diversi mini-dispositivi, è mostrata in Figura 7.

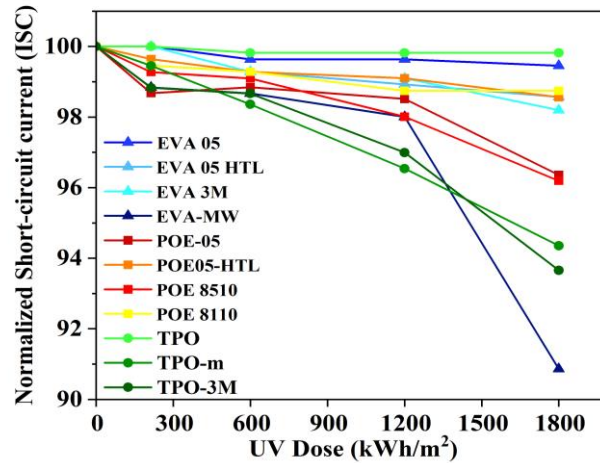


Figura 7. I_{sc} vs UV dose per i mini-dispositivi fotovoltaici durante l'invecchiamento UV.

L'andamento della corrente di cortocircuito dei mini-dispositivi indica come l'efficienza di conversione dell'energia solare in energia elettrica cambia con l'esposizione ai raggi UV. Alcuni mini-dispositivi mostrano una diminuzione della corrente di cortocircuito e quindi una riduzione dell'efficienza del dispositivo, significativamente più accentuata di altri. TPO ed EVA-05 mostrano una degradazione minima rispetto agli altri campioni, mantenendo una I_{sc} quasi costante anche a dosi UV elevate. Altri campioni, come EVA-MW e TPO-3M, mostrano invece, una degradazione più significativa, con una riduzione maggiore della I_{sc} . Le variazioni dei principali parametri caratteristici della cella solare: Eff., P_{MPP} , FF, I_{sc} e I_{pm} , per tutti i mini-dispositivi, dopo i test di invecchiamento accelerato, sono riassunte in Tabella 2.

PV mini-device/ encapsulant	Δ Eff. (%)	Δ FF (%)	Δ P_{MPP} (%)	Δ I_{pm} (%)	Δ I_{sc} (%)
EVA-3M	-6.32	-4.81	-6.25	-2.20	-1.80
EVA-05	-5.36	-4.57	-4.76	-2.63	-0.55
EVA-05HTL	-7.32	-6.31	-7.52	-1.64	-1.43
EVA-MW	-12.00	-3.44	-12.4	-8.65	-9.14
POE-8510	-8.12	-4.67	-8.14	-1.45	-3.80
POE-05	-12.28	-9.06	-12.29	-8.87	-3.64
POE-05HTL	-8.75	-5.15	-8.60	-2.85	-1.44
POE-8110	-6.06	-5.10	-6.17	-2.19	-0.90
TPO	-5.17	-5.41	-5.42	-0.39	0.00
TPO-m	-10.91	-5.20	-10.57	-4.34	-5.65
TPO-3M	-8.33	-2.86	-8.23	-5.65	-6.34

Tabella 2. Variazioni percentuali di Eff., FF, P_{MPP} , I_{pm} e I_{sc} per i diversi mini-dispositivi dopo invecchiamento UV.

Nel caso dei mini-dispositivi realizzati con EVA, la diminuzione delle prestazioni è dovuta principalmente alla presenza del gruppo acetato nel polimero, assente nei POE e TPO, che porta alla produzione di acidi acetico e determina sia la corrosione dei metalli che la propagazione della degradazione. A parità di dose UV ricevuta, i mini-dispositivi realizzati con POE e TPO mantengono prestazioni confrontabili e in alcuni casi migliori, rispetto a quelle dei mini-dispositivi fatti con EVA, non solo perché non producono acido acetico ma anche perché sono termicamente più stabili, come dimostrato nella LA1.30. Inoltre, la migliore stabilità chimica del TPO, evidenziata dalla variazione dell'indice carbonilico in seguito all'invecchiamento, rende i dispositivi realizzati con questo materiale più durevoli rispetto a quelli fatti con POE.

Bibliografia

- [1] L. Liu, Y. Cheng, X. Zhang, Y. Shan, X. Zhang, W. Wang, D. Li, Graphene-based transparent conductive films with enhanced transmittance and conductivity by introducing antireflection nanostructure, *Surf. Coatings Technol.* 325 (2017) 611-616. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.072>.
- [2] J. Eymard, R. Clerc, V. Duveiller, B. Commault, M. Hebert, Characterization of UV-Vis-NIR optical constants of encapsulant for accurate determination of absorption and backscattering losses in photovoltaics modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 240 (2022) 111717. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111717>.
- [3] D.C. Miller, K.C.E. and K.S.R. Miller D.C., Muller M.T., Kempe M.D., Araki K., Durability of polymeric encapsulation materials for concentrating photovoltaic systems, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 21 (2013) 631-651. <https://doi.org/10.1002/pip.1241>.
- [4] B. Adothu, P. Bhatt, S. Chattopadhyay, S. Zele, J. Oderkerk, H.P. Sagar, F. Reny, S. Mallick, Newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant – A potential candidate for crystalline silicon photovoltaic modules encapsulation, *Sol. Energy.* 194 (2019) 581-588. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.018>.
- [5] B. Adothu, F. Reny, S. Mallick, Solar Energy Materials and Solar Cells Damp heat resilient thermoplastic polyolefin encapsulant for photovoltaic module encapsulation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 224 (2021) 111024. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111024>.
- [6] K. Yamada, S. Kumagai, T. Shiratori, T. Kameda, Y. Saito, A. Watanabe, C. Watanabe, N. Teramae, T. Yoshioka, Combined UV-irradiation and pyrolysis-GC/MS approach for evaluating the deterioration behavior of ethylene vinyl acetate, *Polym. Degrad. Stab.* 190 (2021) 109623. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109623>.
- [7] B. Ottersböck, G. Oreski, G. Pinter, Comparison of different microclimate effects on the aging behavior of encapsulation materials used in photovoltaic modules, *Polym. Degrad. Stab.* 138 (2017) 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.010>.
- [8] K. Wang, Qibo Deng, WANG 2019 molecules-24-04353.pdf, *Polymers (Basel)*. 11 (2019) 1055. <https://doi.org/10.3390/polym11061055>.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non si è fatto ricorso a consulenze per le attività svolte

9 Pubblicazioni scientifiche

V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, G. Flaminio, M. Pellegrino, New PV encapsulants: assessment of change in optical and thermal properties and chemical degradation after UV aging, *Polymer Degradation and Stability* 220 (2024) 110643, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110643>

10 Eventi di disseminazione

- V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, L.V. Mercaldo, P. Delli Veneri. New PV encapsulants: optical and chemical properties after UV aging, Rete Italiana Fotovoltaico per la ricerca e l'innovazione, Bolzano (Italia); 11-12 Giugno 2024 (Presentazione poster).
- V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, M. Tucci, M. Izzi. New encapsulant materials for eco-design PV: thermochemical characterization, 41th European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition (EUPVSEC), Vienna (Austria); 23-27 Settembre 2024 (Presentazione poster).