



# Analisi del degrado di materiali e di celle fotovoltaiche organiche indotto da stress termico

*P. Maddalena, R. Rega, A. Grimaldi,  
M. G. Maglione, P. Tassini, P. Morvillo, C. Minarini*



## ANALISI DEL DEGRADO DI MATERIALI E DI CELLE FOTOVOLTAICHE ORGANICHE INDOTTO DA STRESS TERMICO

P. Maddalena, R. Rega, A. Grimaldi, (Università di Napoli "Federico II" – Dipartimento di Scienze Fisiche)  
M. G. Maglione, P. Tassini, P. Morvillo, C. Minarini (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia Elettrica da Fonte Solare – Ricerca su celle fotovoltaiche innovative

Obiettivo: Sviluppo di celle organiche

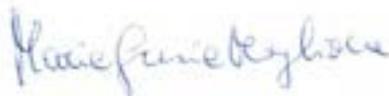
Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi del degrado di materiali e di celle fotovoltaiche organiche indotto da stress termici".

Responsabile scientifico ENEA: Maria Grazia Maglione

Responsabile scientifico Università di Napoli: Pasqualino Maddalena



## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 CELLE SOLARI ORGANICHE - GENERALITÀ.....	5
2.2 MATERIALI ORGANICI PER IMPIEGHI OPV.....	6
2.3 FABBRICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI DISPOSITIVI OPV .....	9
3 CONCLUSIONI.....	15
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	15
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	15
6 CURRICULUM VITAE.....	16

## Sommario

Il presente lavoro, condotto in collaborazione tra ENEA ed il Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università di Napoli "Federico II", è stato dedicato all'analisi del degrado di materiali e di celle fotovoltaiche organiche tramite indagini spettroscopiche e di efficienza.

Nel corso delle attività sono stati depositati e caratterizzati otticamente i film dei materiali impiegati nelle celle. Si è, inoltre, avviata la preparazione di un software per la simulazione del comportamento ottico ed elettromagnetico di multistrati, e sono state realizzate celle organiche con strato attivo una blend P3HT:PCBM, verificandone il comportamento spettrale ed il funzionamento sia nel tempo sia in condizioni di stress ambientale. Le attività sono state così suddivise: in ENEA sono stati fabbricate e caratterizzate le celle, mentre l'Università ha caratterizzato i materiali ed ha elaborato il software per le simulazioni.

Su tutti questi fronti, i risultati osservati sono promettenti, ed è ferma intenzione proseguire tali attività, sia per migliorare le prestazioni dei dispositivi sia per superare alcuni problemi di processo riscontrati.

## 1 Introduzione

Da ormai diversi anni, i semiconduttori organici, in forma sia polimerica sia di piccole molecole, sono oggetto di vasti studi, in virtù delle loro proprietà ottiche e soprattutto di conduzione elettrica.

Questi materiali sono dotati di ottime caratteristiche di flessibilità, leggerezza e trasparenza, oltre che di notevole facilità nell'essere processati per la realizzazione di film sottili.

Tra i vari campi di studio ed applicazione, uno molto attivo è quello fotovoltaico, dove i semiconduttori organici vengono proposti come una valida alternativa all'utilizzo del silicio. I sistemi fotovoltaici a base organica costituiscono ad oggi una promettente tecnologia per la generazione di energia elettrica a basso costo. Per permettere, però, uno sviluppo a livello commerciale ed una maggiore diffusione di tali sistemi è necessario aumentarne drasticamente la stabilità ambientale, che risulta essere ancora piuttosto ridotta.

In quest'ottica, le attività qui condotte si sono poste come obiettivo lo studio degli effetti del degrado in celle fotovoltaiche a base organica, allo scopo di verificarne i limiti di funzionamento, con la prospettiva di incrementarne la durabilità ambientale. L'attenzione si è rivolta a celle solari realizzate con blend di polimeri e materiali organici a basso peso molecolare.

Nel corso delle attività sono stati depositati e caratterizzati otticamente i film dei materiali impiegati nelle celle, si è avviata la preparazione di un software per la simulazione del comportamento ottico ed elettromagnetico di multistrati, e sono state realizzate semplici celle organiche con strato attivo una blend P3HT:PCBM, verificandone il comportamento spettrale ed il funzionamento sia nel tempo sia in condizioni di stress ambientale. Su tutti questi fronti, i risultati osservati sono promettenti, ed è ferma intenzione proseguire tali attività, sia per migliorare le prestazioni dei dispositivi sia per superare alcuni problemi di processo riscontrati.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 *Celle solari organiche - Generalità*

La disponibilità in commercio di semiconduttori organici con buone caratteristiche di assorbimento di luce, ha portato all'idea di utilizzarli per la realizzazione di celle fotovoltaiche (note come Organic PhotoVoltaic - OPV -, o come Organic Solar Cell - OSC -, od anche come Polymer Solar Cell - PSC -), cioè dispositivi che generano potenza elettrica convertendo direttamente l'energia dei fotoni in cariche elettriche. Il principio di funzionamento è analogo a quello delle controparti inorganiche, ma con i vantaggi già detti di basso costo e facile lavorazione.

Esistono però due problemi principali per la diffusione di questa tecnologia: il basso rendimento di questi dispositivi, in genere inferiore al 5%, ed il rapido degrado delle loro prestazioni per effetto della componente UV della radiazione solare.

Le modalità di conduzione delle cariche elettriche nei materiali organici danno luogo a mobilità dei portatori molto piccole: ciò limita fortemente il percorso verso gli elettrodi delle cariche generate dai fotoni in una cella solare organica. Quindi, questi materiali devono essere utilizzati in forma di film sottili, che però, generalmente, presentano bassi coefficienti di assorbimento. Tutto ciò provoca dei bassi rendimenti nei dispositivi.

La radiazione UV è costituita da fotoni con energie alte ( $> 3.0$  eV), che possono facilmente rompere i legami chimici delle molecole organiche. La lunga esposizione a tale radiazione, che è la modalità normale di funzionamento di una cella solare, provoca perciò il progressivo degrado delle prestazioni dei materiali e quindi dei dispositivi.

La ricerca è indirizzata a migliorare entrambi gli aspetti, anche se la maggior parte dei lavori che compaiono in letteratura focalizzano l'attenzione sul miglioramento dell'efficienza di conversione, mentre la stabilità dei materiali e le tecniche di realizzazione su larga scala ricevono minore attenzione. Un esempio di come si

possa sia migliorare l'efficienza sia ridurre la degradazione è mediante la dispersione di nanoparticelle nei materiali, cioè preparando dei nanocompositi [1].

Fondamentale però, per il successo di questi dispositivi, è il loro bassissimo costo, che ne permetterebbe la penetrazione in moltissimi mercati ed utilizzi [2].

## 2.2 Materiali organici per impieghi OPV

Per il corretto funzionamento delle celle fotovoltaiche è necessario che nel dispositivo siano presenti due funzioni, quella di donore e quella di accettore, in modo da raccogliere le cariche (elettroni e lacune) generate in esso dai fotoni incidenti. Queste due funzioni possono essere svolte o da un materiale drogato in maniera opposta (giunzione P-N), oppure da due materiali che presentano conduzione preferenziale uno di tipo P e l'altro di tipo N.

Nelle celle fotovoltaiche organiche, per aumentare il più possibile la superficie di contatto, in modo da compensare il basso coefficiente di assorbimento, vengono utilizzate molto frequentemente delle miscele (blend) di due materiali. La blend maggiormente analizzata nel corso degli anni è quella tra poli(3-esiltiofene) (P3HT), un polimero coniugato conduttore, ed il phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM), un derivato del fullerene C60 (fig. 1) [3][4]. In una cella fotovoltaica, il P3HT funge da donore di elettroni, ed il PCBM da accettore di elettroni.

Tali materiali sono stati impiegati anche per le celle realizzate in questo lavoro. Il rapporto in peso tra P3HT e PCBM è stato mantenuto costante ed uguale a 1:1.

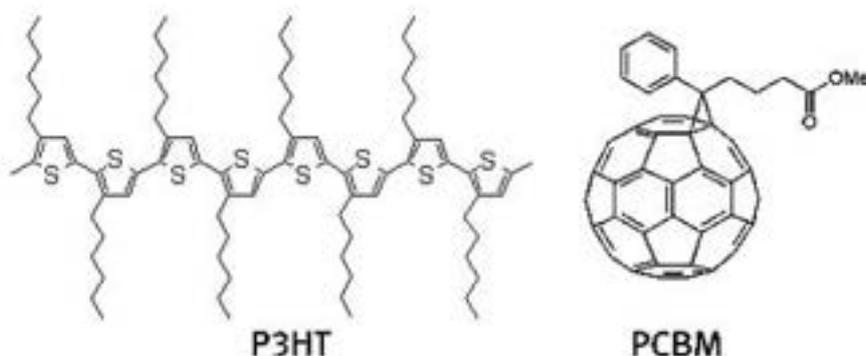


Figura 1. Struttura delle molecole di PH3T e di PCBM.

I singoli materiali organici che intervengono nella fabbricazione di una cella sono stati depositati come film sottili su quarzo, per essere caratterizzati tramite tecniche spettroscopiche UV-Vis-NIR, misurando gli spettri in riflessione e/o in trasmissione dei campioni. Tali misure sono state eseguite presso il Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università di Napoli "Federico II", utilizzando uno spettrofotometro Perkin Elmer LAMBDA900, equipaggiato con un banco ottico magnetico per consentire la necessaria capacità di configurazione e adattamento alle diverse geometrie dei campioni indagati.

L'analisi di queste misure permette di risalire alle caratteristiche optoelettroniche del materiale (indice di rifrazione, assorbimento, mobilità elettronica), che a loro volta dipendono dallo stato del materiale stesso, che può aver subito un invecchiamento od un degrado indotti da una qualsiasi causa (ad es.: dal tempo e dalle condizioni di stoccaggio del campione, dal normale funzionamento in un dispositivo, da uno stress intenzionale a cui è stato sottoposto il campione in esame, ecc.).

Tale analisi viene effettuata confrontando le misure con le previsioni di un idoneo modello teorico, per ricavare le informazioni relative alle modalità di comportamento e di degrado dei materiali (ad es.: formazione di stati trappola; alterazione dei materiali che inducono variazioni della mobilità, della conducibilità, del coefficiente di assorbimento, dell'indice di rifrazione, ecc.). Il modello, partendo da una opportuna schematizzazione del campione in esame (materiale o dispositivo) e da una assegnata geometria del sistema, può consentire di calcolare lo spettro teorico che meglio si adatta ai dati sperimentali,

determinando i valori o gli andamenti di una serie di parametri che descrivono il comportamento optoelettronico del campione stesso.

Tale procedura, detta di “best fit”, porta a determinare la curva di dispersione nell’intervallo UV-Vis-NIR per l’indice di rifrazione del materiale e per il coefficiente di assorbimento ottico. Nel caso di campione sottoposto a cicli di stress, ci si aspetta che il degrado apporti modifiche sostanziali e rilevabili nell’andamento delle curve di dispersione, consentendo una analisi approfondita del processo.

Presso il Dipartimento di Scienze Fisiche dell’Università di Napoli “Federico II” è stato quindi elaborato un modello teorico che simula il comportamento ottico di un sistema formato da una successione di strati di dato spessore e indice di rifrazione (quest’ultimo è considerato una grandezza complessa per tenere conto anche dell’assorbimento del materiale). Sfruttando un formalismo matriciale, che associa a ogni strato e ad ogni interfaccia una matrice di propagazione per i campi della radiazione elettromagnetica che si propaga nella struttura, è possibile determinare il coefficiente di riflessione e trasmissione dell’intero multistrato [5]. Il modello permette di determinare le componenti dei campi e.m. all’interno di uno qualunque degli strati. Ciò rappresenta un aspetto molto importante, perché dalla conoscenza dei valori di campo e.m., e quindi della intensità della radiazione nello strato, e dal coefficiente di assorbimento, è possibile stimare il numero di portatori di carica prodotti in un dispositivo che abbia la struttura simulata. L’applicazione di una opportuna equazione di diffusione per le cariche all’interno del multistrato, consente di determinare la fotocorrente prodotta e, quindi, di dare una stima della efficienza di conversione attesa per il dispositivo organico in esame.

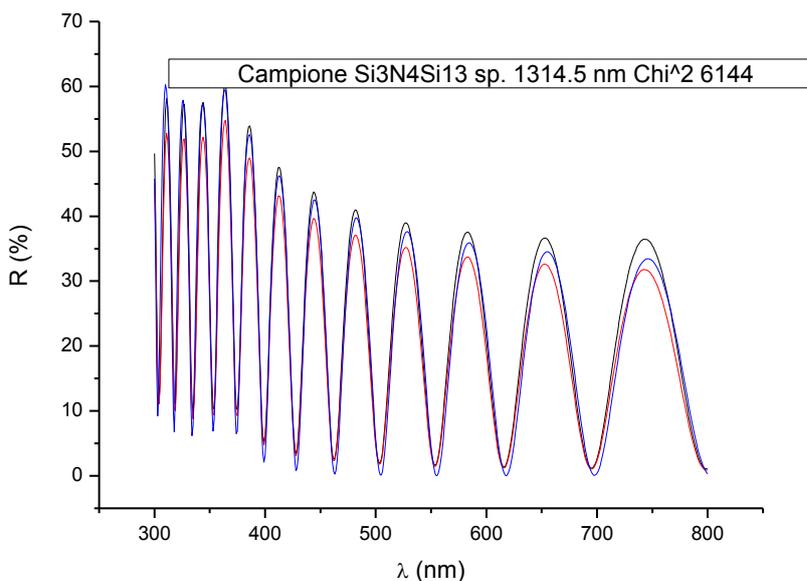
Per implementare il modello, è stato avviato lo sviluppo di un apposito software, basato sull’ambiente di calcolo Mathematica, che permette di determinare gli spettri di riflessione e trasmissione di multistrati. Il programma, una volta assegnati i materiali componenti del multistrato ed alcune loro caratteristiche (spessore, indice di rifrazione complesso), consente di determinare l’intensità luminosa riflessa e trasmessa per ogni lunghezza d’onda, ed inoltre può calcolare la distribuzione del campo elettromagnetico all’interno del generico strato, la cui stima è utile, come detto, per la determinazione dell’efficienza di conversione di un dispositivo fotovoltaico simulato.

Attraverso una procedura iterativa, il software, partendo da un file dal quale estrae i dati relativi alle curve di dispersione di tutti i materiali costituenti il multistrato, calcola lo spettro che meglio si adatta a quello misurato sperimentalmente. I parametri di fit sono rappresentati dagli spessori dei vari strati.

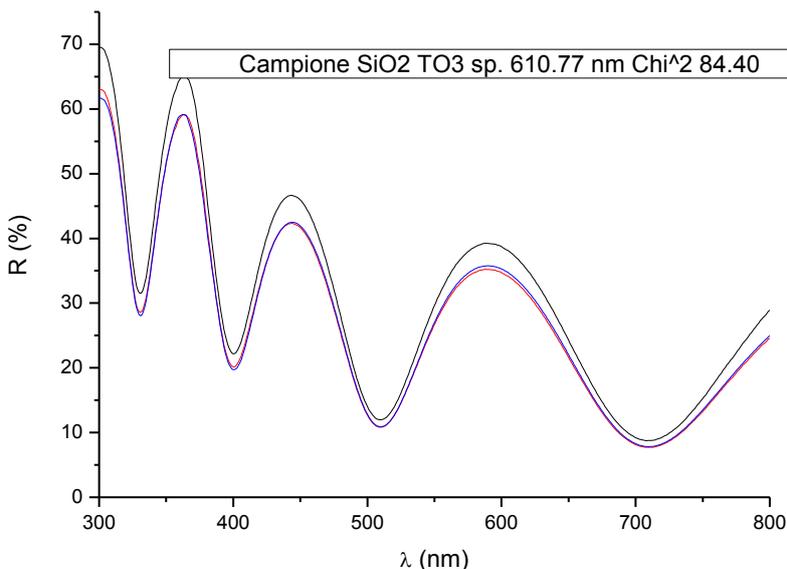
Se si vogliono indagare effetti di degrado su uno specifico strato della struttura, fissati gli spessori, la procedura di fit, in alternativa, si attua intervenendo a modificare la curva di dispersione dello strato stesso. Al termine della procedura, per il materiale costituente lo strato studiato, il programma restituisce la curva di dispersione che meglio approssima i dati sperimentali. Da un confronto della curva simulata con la curva di dispersione del materiale non degradato si possono ricavare le informazioni richieste.

La validazione del software è stata effettuata simulando l’andamento di spettri di film noti, confrontando i risultati delle elaborazioni con spettri misurati tramite spettrofotometro rispettivamente su un campione di nitruro di silicio su silicio cristallino (spessore nominale 1.300 nm) (figura 2) e un film di SiO<sub>2</sub> (spessore 600 nm) anch’esso su silicio (figura 3). Nelle figure sono riportate le simulazioni (in colore nero) degli spettri di riflessione dei film, confrontate con gli spettri misurati con uno spettrofotometro (in rosso gli spettri in riflessione confrontati con uno specchio di alluminio, e in blu gli spettri di riflessione assoluta).

Come primo passo della simulazione, si sono assegnati gli indici di rifrazione complessi dei materiali componenti il sistema e si è variato, come unico parametro della procedura di fit, lo spessore del film. Al termine del processo si giunge a una stima dello spessore con una incertezza di una parte su 10<sup>5</sup>, mettendo in evidenza la sensibilità del metodo.



**Figura 2. Andamento spettrale della riflettanza di film di nitruro di silicio posto su silicio cristallino, simulato (curva nera) e misurato con uno spettrofotometro.**



**Figura 3. Andamento spettrale della riflettanza di film di ossido di silicio posto su silicio cristallino, simulato (curva nera) e misurato con uno spettrofotometro.**

Il programma verrà poi applicato per simulare strati di materiali organici utilizzabili per dispositivi fotovoltaici. Tale passaggio risulta non banale, in quanto gli spessori da simulare sono molto piccoli (gli spessori degli strati in una PSC sono dell'ordine di poche decine di nanometri), e per la diversa struttura dei materiali stessi (in forma di blend, invece che come multistrato). Ciò potrebbe comportare una notevole modifica o una parziale riscrittura del programma, per permettere di ottenere una sufficiente confidenza dei dati ricavati nella simulazione.

Un esempio di misure di assorbimento spettrale dei film di P3HT, di PCBM, e della blend P3HT:PCBM, è mostrato in figura 4. Si osserva come nella curva della blend si possano riconoscere ancora alcune delle caratteristiche dei materiali che la compongono (picchi a circa 330 nm e 600 nm).

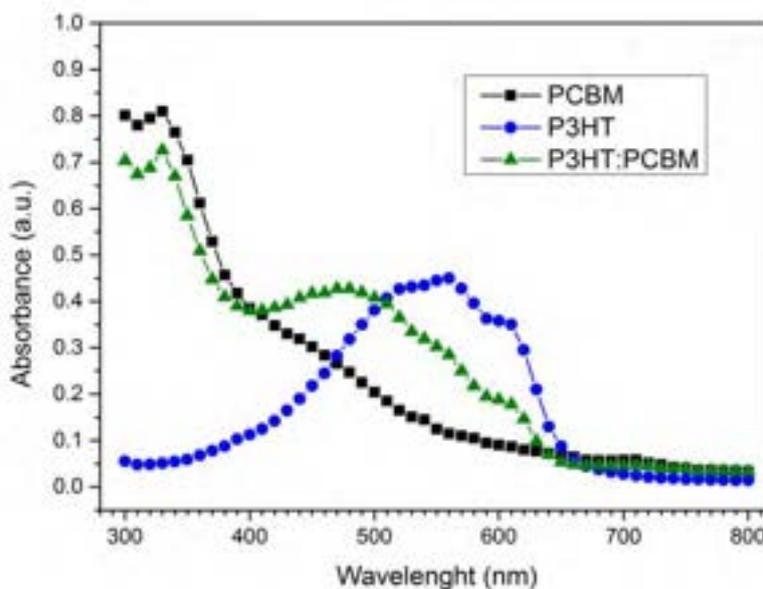


Figura 4. Spettro di assorbimento di film di P3HT, PCBM e P3HT:PCBM.

### 2.3 Fabbricazione e caratterizzazione di dispositivi OPV

I prototipi di celle solari organiche sono stati realizzati secondo la struttura riportata in figura 5. Sono stati utilizzati substrati di vetro, su cui è depositato per sputtering uno strato di ITO (Ossido di Stagno e di Indio), che viene patternato mediante fotolitografia ed etching in umido, secondo la geometria desiderata per l'elettrodo trasparente. Quindi, viene depositato per spin coating uno strato di PEDOT:PSS (poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)), che funge da layer trasportatore di lacune. Successivamente si deposita, ancora per spin coating, la blend di P3HT e PCBM. Infine, è realizzato per evaporazione termica il contatto superiore composto di due strati di Calcio ed Alluminio. L'area delle celle preparate è di circa 0.8 cm<sup>2</sup>.

Ca/Al
P3HT + PCBM
PEDOT:PSS
ITO
Vetro

Figura 5. Struttura delle celle fotovoltaiche preparate: vetro/ITO/PEDOT:PSS/blend/Ca/Al.

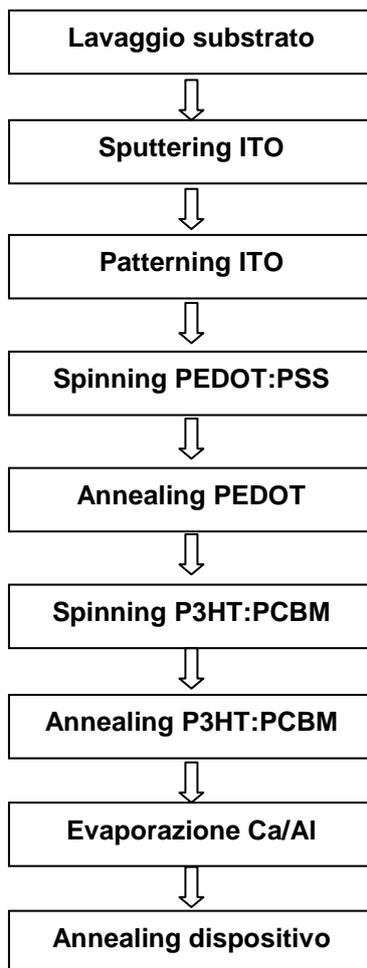
In figura 6 è schematizzato il flow-chart di processo applicato. Tutte le deposizioni da soluzione sono state realizzate in atmosfera inerte, ossia all'interno di una glovebox con monitoraggio costante dei livelli di ossigeno e di umidità (valori minori di 1 ppm). I suddetti materiali, infatti, degradano molto rapidamente se vengono a contatto con l'aria, quindi al termine della fabbricazione deve essere previsto un processo di incapsulamento, che preservi il dispositivo finito dall'azione di agenti degradanti.

I processi di deposizione degli elettrodi sono realizzati in ultra alto vuoto, con una pressione di partenza di circa 1.0\*10<sup>-7</sup> mbar ed un rate di deposizione di 1.0 Å/s. Il sistema da vuoto è integrato con una glovebox, a

sua volta collegata alla glovebox dedicata ai processi da soluzione. In tal modo, dopo il patterning dell'ITO, il dispositivo in lavorazione non viene mai esposto all'aria.

Per la blend P3HT:PCBM, che costituisce il materiale attivo del dispositivo, cioè quello in cui avviene la cattura dei fotoni e la generazione delle cariche, si è deciso di utilizzare come solvente il clorobenzene (CB), che conferisce ai film proprietà morfologiche migliori e conseguentemente efficienze migliori della cella.

Ultimato il dispositivo, è effettuato un post annealing a 110°C per un'ora in vuoto.



**Figura 6. Flow chart del processo di realizzazione delle celle fotovoltaiche organiche sperimentate.**

La caratterizzazione di una cella prevede la misura dell'efficienza quantica esterna, e delle caratteristiche corrente - tensione (I-V) al buio (dark) e sotto luce (light, spettro AM1.5G). In figura 7 è mostrata l'efficienza quantica esterna, ed in figura 8 la curva I-V light di una delle celle appena terminata. Si ricavano: efficienza ( $\eta$ )  $\approx$  3.0 %, fill factor (FF)  $\approx$  54.32 %, corrente di cortocircuito ( $J_{sc}$ )  $\approx$  -7.38613 mA/cm<sup>2</sup>, tensione di circuito aperto ( $V_{oc}$ )  $\approx$  0.6118 V. L'efficienza, il FF e la  $J_{sc}$  non sono molto elevati; la  $V_{oc}$  è invece in linea con quanto riportato in letteratura.

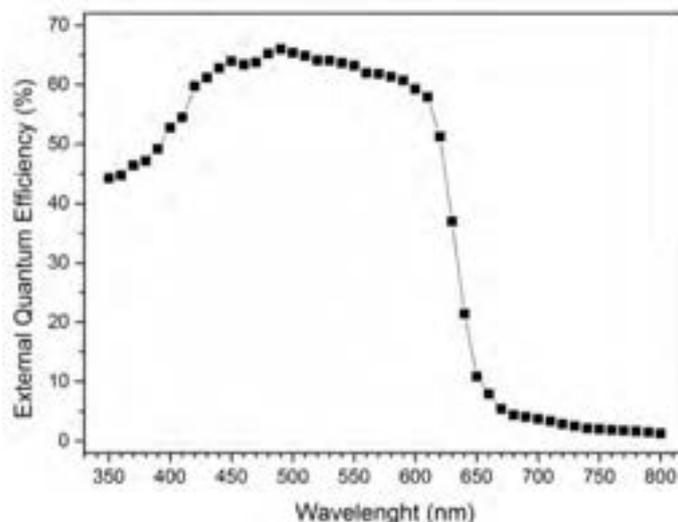


Figura 7. Efficienza quantica esterna di una cella con blend P3HT:PCBM appena terminata.

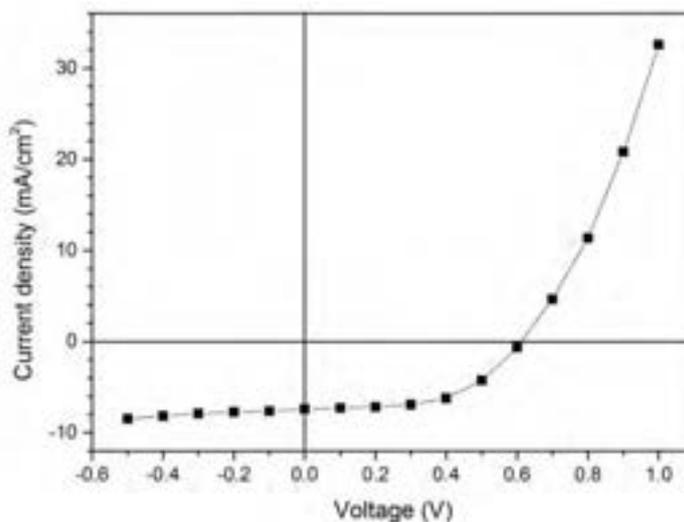


Figura 8. Curva I-V della cella appena terminata esposta alla luce (AM1.5G).

Nel corso delle varie prove effettuate per tali dispositivi, si è osservato che il tempo tra l'ultimo passo del processo di realizzazione e la caratterizzazione dei dispositivi è un parametro molto importante. Poiché i dispositivi non sono incapsulati, le caratterizzazioni elettriche devono essere effettuate immediatamente dopo la realizzazione, od al massimo entro poche ore.

Le misure di degrado sono state effettuate in aria e senza raffreddamento dei dispositivi, registrando la caratteristica corrente ÷ tensione sotto luce ( $J \div V$  light) ad intervalli regolari, con il campione illuminato costantemente in un simulatore solare (AM1.5G,  $100 \text{ mW/cm}^2$ ) per un tempo di circa 80 min. Gli andamenti dei principali parametri di uno dei dispositivi sono riportati nelle seguenti figure (da 9 a 13). L'aumento che si osserva nella  $J_{SC}$  è un effetto dovuto al riscaldamento del campione durante l'irraggiamento, ma le caratteristiche globali del dispositivo risultano degradare molto già durante i primi 10 min di esposizione.

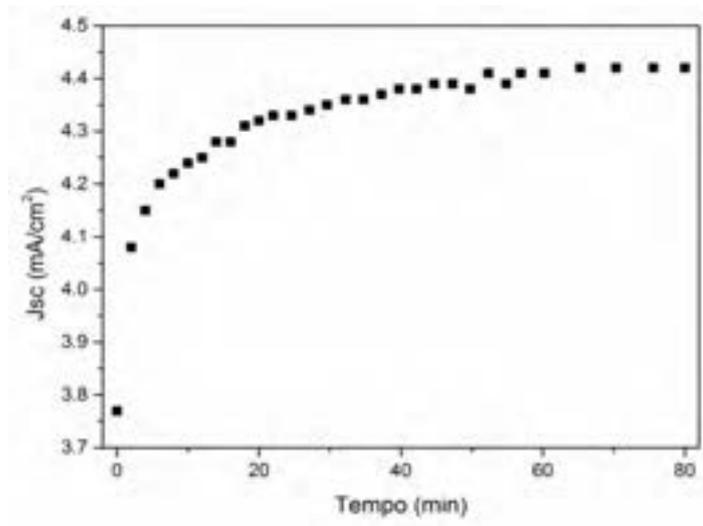


Figura 9.  $J_{sc}$  in funzione del tempo di illuminazione.

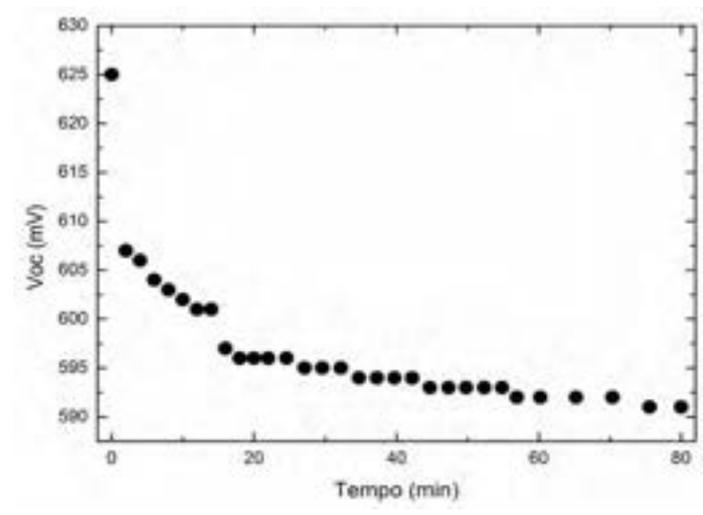


Figura 10.  $V_{oc}$  in funzione del tempo di illuminazione.

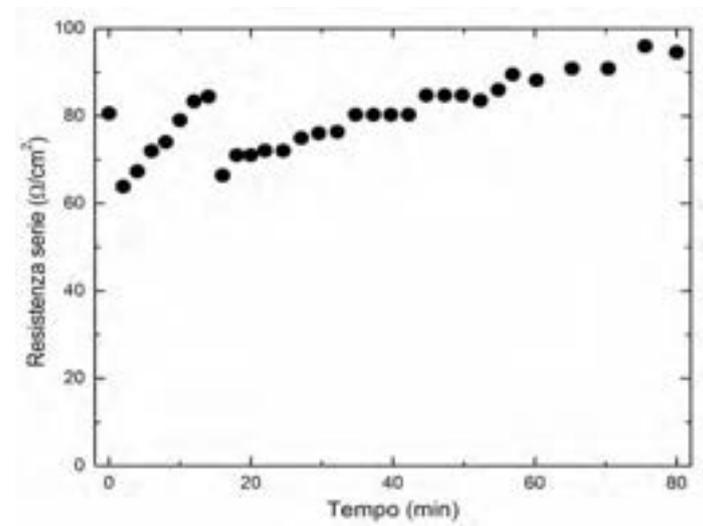


Figura 11.  $R_s$  (resistenza serie) in funzione del tempo di illuminazione.

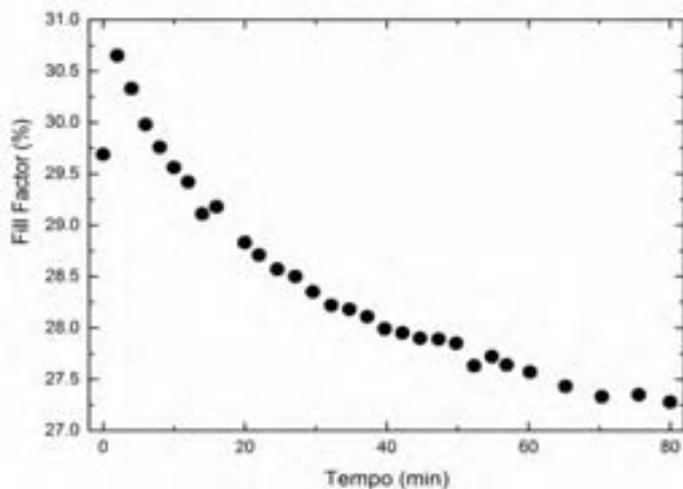


Figura 12. FF in funzione del tempo di illuminazione.

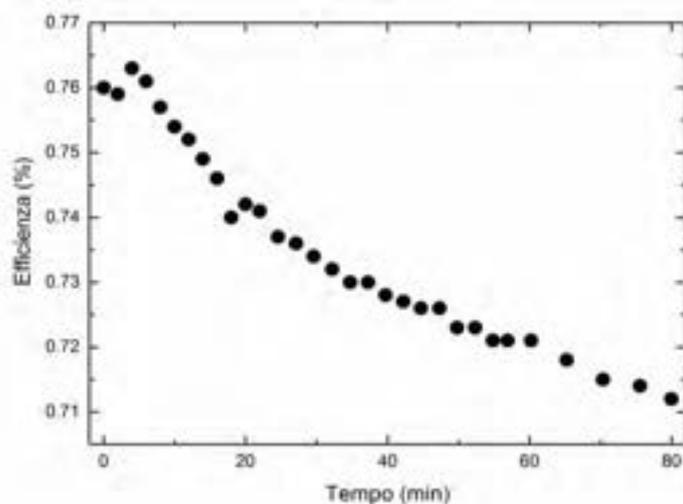


Figura 13. Efficienza di conversione in funzione del tempo di illuminazione.

È stato valutato anche il comportamento nel tempo dell'efficienza quantica esterna, misurandola dopo aver effettuato alcuni trattamenti sul dispositivo. In particolare, dopo l'esposizione alla luce del simulatore solare per 80 min, il campione è stato lasciato a riposo in aria per 3 giorni. Dopodiché è stato posto in alto vuoto per 60 min. In figura 14 vengono riportati gli andamenti misurati dell'efficienza quantica esterna.

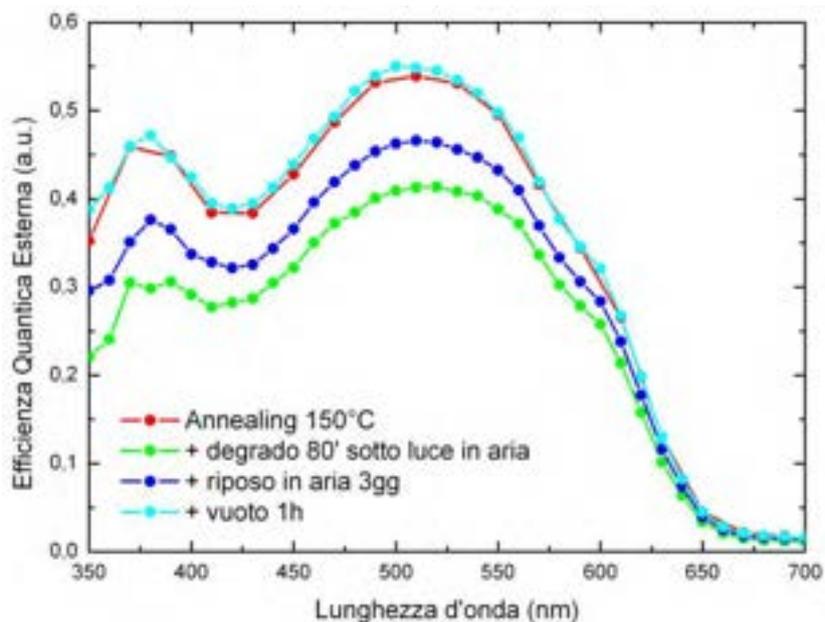


Figura 14. External Quantum Efficiency per la cella in P3HT:PCBM a seguito di diversi trattamenti.

Si può osservare che già l'illuminazione del campione comporta un forte abbassamento del segnale, ed il picco di efficienza quantica a circa 510 nm scende di circa il 25% dopo l'irraggiamento. Il dispositivo recupera parzialmente in assenza di illuminazione; mentre si ha un recupero completo dopo averlo sottoposto ad un ciclo di vuoto. Questo comportamento si può spiegare tenendo conto del fatto che il P3HT reagisce reversibilmente con l'ossigeno (Figura 15). Il trattamento in vuoto elimina l'ossigeno dal polimero, permettendo così al dispositivo di recuperare le prestazioni originali.

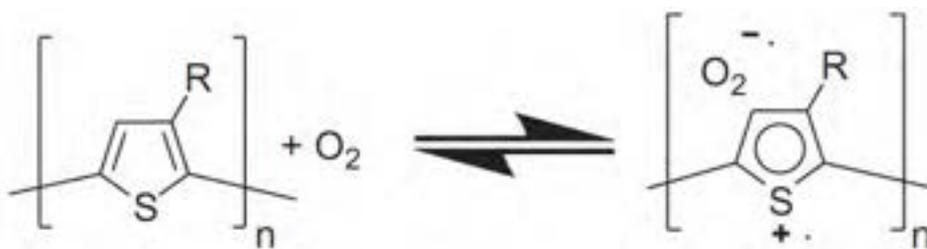


Figura 15. Schema della reazione reversibile tra ossigeno e politiofene.

Infatti, è noto che le prestazioni delle PSC in generale degradano rapidamente a causa dell'esposizione all'ossigeno o all'acqua. Tali sostanze, presenti nell'aria, diffondono nel dispositivo e, reagendo con i materiali dello strato attivo, causano una forte diminuzione delle sue caratteristiche fotovoltaiche.

L'incapsulamento dei dispositivi è un rimedio efficiente contro i processi legati all'ossigeno, ma non blocca il degrado complessivo dovuto ad altri meccanismi che agiscono a lungo termine. Infatti, occorre precisare che esistono altri meccanismi di degrado irreversibile, che comportano il progressivo peggioramento delle prestazioni nel medio e lungo termine. Comunque, per i dispositivi non incapsulati, come in questo caso, ossigeno ed acqua sono la causa principale del rapido degrado a cui vanno incontro le celle.

Alcuni altri dispositivi sono stati perciò incapsulati, e sottoposti ad invecchiamento accelerato, tramite esposizione in camera climatica a temperatura ed umidità relativa (relative humidity, RH) fissate. Si sono scelti i valori di 65°C e di 85% RH. Il programma di lavoro prevedeva di effettuare misure inizialmente ogni 24 ore, e successivamente ogni 3 o 4 giorni. Purtroppo, i dispositivi già dopo le prime 24 ore di invecchiamento sono degradati completamente, non permettendo di effettuare alcuna caratterizzazioni. Si

ritiene che ciò sia stato provocato da problemi nel processo di incapsulamento, che hanno comportato l'esposizione dei dispositivi all'aria, provocandone il rapidissimo degrado.

L'attività, però, è di estremo interesse per il gruppo di ricerca, e quindi ulteriori prove verranno condotte, per verificare la risposta nel tempo ed allo stress ambientale di tali dispositivi.

### 3 Conclusioni

Le attività condotte nel corso di questo progetto si sono poste come obiettivo lo studio degli effetti del degrado in celle fotovoltaiche a base organica, allo scopo di verificare i limiti di funzionamento di questi dispositivi, per individuare metodi che ne possano migliorare la durabilità ambientale.

L'attenzione si è rivolta a celle solari realizzate con strato attivo la blend P3HT:PCBM, un polimero (P3HT) ed un materiale organico a basso peso molecolare (PCBM).

Sono stati depositati e caratterizzati otticamente i film dei materiali impiegati nelle celle.

Si è avviata la preparazione di un software per la simulazione del comportamento ottico ed elettromagnetico di multistrati, che è stato validato tramite analisi di strati di materiali inorganici noti, e che è in corso di adattamento per la simulazione di materiali organici per fotovoltaico.

Sono state realizzate semplici celle organiche, verificandone il comportamento spettrale ed il funzionamento sia nel tempo sia in condizioni di stress ambientale.

Su tutti questi fronti, i risultati osservati sono promettenti, ed è ferma intenzione proseguire tali attività, sia per migliorare le prestazioni dei dispositivi sia per superare alcuni problemi di processo riscontrati.

### 4 Riferimenti bibliografici

1. <http://www.terraily.com/news/solarcell-05m.html>
2. Robert F. Service; "Organic Solar Cells Playing Catch-Up", Science, Vol. 306 (17 Dec 2004), 2034.
3. Frederik C. Krebs, "Polymeric Solar Cells: Materials, Design, Manufacture", DEStech Publications, Inc., Lancaster, Pennsylvania, 2010.
4. E. Klimov, W. Li, X. Yang, G.G.Hoffmann, and J. Loos, "Scanning near-field and confocal raman microscopic investigation of p3ht-pcbm systems for solar cell applications", Macromolecules, 39 (13), 4493-4496, 2006.
5. Leif A. A. Pettersson, Lucimara S. Roman, and Olle Inganäs, "Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films", J. Appl. Phys., 86, 487 (1999).

### 5 Abbreviazioni ed acronimi

OPV	Organic PhotoVoltaic
OSC	Organic Solar Cell
P3HT	poli(3-esiltiofene)
PCBM	phenyl-C61-butyric acid methyl ester
PSC	Polymer Solar Cell

## 6 Curriculum Vitae

Prof. Pasqualino Maddalena  
Department of Physical Sciences  
University "Federico II" Naples  
tel.: 0039 081 676126  
e-mail: pasmad@fisica.unina.it

Pasqualino Maddalena si è laureato in Fisica con lode nel 1979. Dal 1984 afferisce al Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università di Napoli Federico II (1984-1992 come ricercatore in Struttura della Materia; 1992-2002 come professore associato di Fisica Sperimentale; dal 2002 come professore ordinario).

I suoi principali interessi scientifici sono rappresentati dalla investigazione ottica delle proprietà di superfici e/o interfacce, delle interazioni gas-nanostrutture e fenomeni ottici non lineari. In passato si è occupato di plasmoni di superficie all'interfaccia metallo-dielettrico, ottica non-lineare di cristalli liquidi, proprietà termiche e ottiche del silicio poroso e fenomeni di trasporto in silicio amorfo. Attualmente si occupa di generazione di seconda armonica in cristalli fotonici unidimensionali, analisi di superfici mediante spettroscopia di seconda armonica, modifiche di proprietà di emissione di ossidi metallici nanostrutturati in presenza di gas, proprietà fotoconduttive di film di nanotubi di carbonio e applicazioni di microscopia ottica a scansione (confocale e SNOM).

Riveste, al momento, la carica di Direttore del Dipartimento di Scienze Fisiche.

E' autore o coautore di oltre 130 pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali.