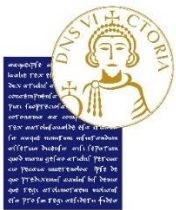




## Ricerca di Sistema elettrico

# Progettazione ottica di celle solari tandem perovskite/silicio

M. Giaquinto, A. Micco, L. V. Mercaldo, P. Delli Veneri,  
M. Pisco, A. Cusano



## PROGETTAZIONE OTTICA DI CELLE SOLARI TANDEM PEROVSKITE/SILICIO

M. Giaquinto<sup>1</sup>, A. Micco<sup>1</sup>, L. V. Mercaldo<sup>2</sup>, P. Delli Veneri<sup>2</sup>, M. Pisco<sup>1</sup>, A. Cusano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Università Del Sannio- Dipartimento di Ingegneria

<sup>2</sup>ENEA - DTE FSN DIN

Dicembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area "Generazione di Energia Elettrica con Basse Emissioni di Carbonio"

Progetto B.1.2 "Ricerca su Tecnologie Fotovoltaiche Innovative"

Obiettivo: Celle solari a base di film sottili innovativi di perovskiti e kesteriti – Subtask a.3: Sviluppo di architetture di dispositivo per celle tandem ad alta efficienza

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Progettazione ottica di celle solari tandem perovskite/silicio"

Responsabile scientifico ENEA: Lucia V Mercaldo.



Responsabile scientifico Università del Sannio: Marco Pisco

## Indice

Sommario .....	4
1. Introduzione.....	5
2. Definizione dei metodi utilizzati per lo studio della cella solare.....	6
3. Studio dell'effetto dello spessore del layer in perovskite.....	7
4. Studio parametrico per l'ottimizzazione della cella .....	9
4.1 <i>Ottimizzazione dei layer di trasporto (HTL e ETL)</i> .....	9
4.2 <i>Ottimizzazione della Tunnel Junction</i> .....	12
5. Scelta di materiali reali per la cella ottimizzata.....	12
6. Conclusione .....	15
7. Riferimenti.....	16

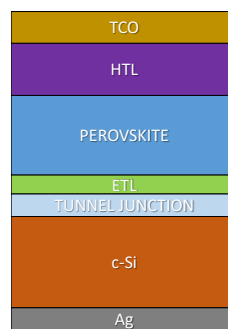
## Sommario

Lo studio presentato nel seguente lavoro è focalizzato sull'ottimizzazione delle caratteristiche di assorbimento di una cella tandem perovskite/silicio a 2 terminali tenendo in conto anche del collegamento elettrico in serie tra le due sub-celle. Nello specifico, agendo sulle caratteristiche dei layer trasportatori di cariche e sul layer di contatto tra le due sub-celle, si è massimizzata la potenza ottica assorbita e convertita in corrente, garantendo una condizione di equilibrio tra le correnti erogate dalle due sub-celle. Una volta determinati gli spessori e gli indici di rifrazione ottimali, tali da massimizzare la corrente effettivamente erogata dalla cella, sono stati identificati materiali reali le cui proprietà si avvicinino quanto più possibile a quelle individuate durante la fase numerica di ottimizzazione.

## 1. Introduzione

Le celle solari a più giunzioni stanno negli ultimi anni emergendo come tecnologia alternativa a quelle del silicio cristallino, che pur dominando il mercato del fotovoltaico [1], si avvicinano sempre di più al limite teorico del 29,4% [2]. Le celle solari in silicio e perovskite, in particolare, grazie alla loro semplice architettura, alla capacità di utilizzare processi a basse temperature, che garantiscono quindi un'elevata qualità dei materiali, oltre che alla possibilità di poter ingegnerizzare il bandgap in un range che va da 1.5 a 1.8eV [3-5], riescono a garantire efficienze che superano anche il 30% [6, 7].

Nella relazione tecnica relativa alla precedente annualità [8] si è dimostrato che un opportuno dimensionamento dei layer che compongono la cella (agendo in particolar modo sui layer di trasporto e sulla Tunnel Junction), consente di massimizzare l'assorbimento di potenza ottica da parte dei layer attivi (ossia quello in silicio e quello in perovskite), portando ad un miglioramento di circa il 20% della potenza assorbita e convertita in corrente rispetto alla configurazione standard utilizzata dall'ENEA, mostrata schematicamente in Figura 1.



**Figura 1:** schema della cella solare tandem

Nello specifico, per tale studio si è presa in considerazione la configurazione mostrata nello schematico in Figura 1, caratterizzata dall'Electron Transport Layer (ETL) depositato sulla Tunnel Junction, quindi prima del layer in perovskite. Questo tipo di configurazione è anche noto come p-i-n.

Aspetto cruciale delle celle tandem a 2 terminali è che la cella in silicio e quella in perovskite sono tra loro accoppiate sia elettricamente che otticamente, pertanto il comportamento dell'una dipende strettamente dal comportamento dell'altra. È chiaro quindi che un processo di ottimizzazione ottica non può prescindere dall'accoppiamento elettrico se si vuole garantire l'effettivo miglioramento delle prestazioni. Più dettagliatamente, le due sub-celle sono collegate elettricamente in serie, pertanto il valore di corrente che la cella riesce effettivamente ad erogare corrisponde al contributo più basso tra quello erogato dalle due sub-celle. Questo implica che oltre a massimizzare la potenza ottica assorbita e convertita in corrente da parte dei layer attivi, è necessario garantire anche l'equilibrio tra le correnti erogate dalle singole sub-celle.

L'analisi precedentemente effettuata [8], se da un lato ha mostrato che è possibile massimizzare l'assorbimento da parte dei layer in silicio e in perovskite mediante un'opportuna scelta di materiali e spessori per la realizzazione dei layer trasportatori di cariche (HTL e ETL) e Tunnel Junction, ha anche evidenziato uno sbilanciamento delle correnti di cortocircuito erogate dalle due sub-celle. Tale squilibrio, attribuibile ad un non ottimale dimensionamento del layer in perovskite della cella di partenza, non può essere compensato agendo soltanto sui layer trasportatori. Pertanto, nel presente lavoro la configurazione di partenza è stata ottimizzata agendo preliminarmente sul dimensionamento dello spessore del layer in perovskite. Più dettagliatamente, prima di procedere con l'ottimizzazione dei layer di trasporto e del layer di contatto si è individuato lo spessore di perovskite tale da garantire l'equilibrio tra le correnti erogate

dalle due sub-celle, per poi procedere con un'ottimizzazione finalizzata a massimizzare la corrente effettivamente erogata dalla cella.

Il presente documento è organizzato come segue. Nel paragrafo 2 sono descritti i metodi utilizzati per la modellazione numerica della cella, e vengono definiti gli osservabili per l'ottimizzazione delle prestazioni. Il paragrafo 3 è focalizzato sullo studio dell'effetto dello spessore della perovskite sui contributi di corrente erogati dai singoli layer, mentre nel paragrafo 4 si procede con uno studio parametrico seguendo l'approccio descritto in [8], finalizzato ad individuare i parametri ideali che massimizzano le prestazioni della cella. Nel paragrafo 5, quindi, si procede con l'introduzione di parametri reali, e sullo studio dell'impatto che hanno sulle prestazioni finali della cella. I risultati sono riassunti nelle conclusioni nel paragrafo 6.

## 2. Definizione dei metodi utilizzati per lo studio della cella solare

Lo studio descritto in questo lavoro è stato condotto modellando numericamente la cella con metodo a elementi finiti (FEM) [9], al fine di analizzarne il comportamento ottico. In questo paragrafo si richiamano gli aspetti principali della modellazione, rimandando al riferimento [8] per ulteriori dettagli. La cella è stata modellata utilizzando il software commerciale Comsol Multiphysics (RF module), il quale consente di calcolare la distribuzione di campo elettromagnetico all'interno di un dominio al variare della lunghezza d'onda, e ricavare quindi i parametri elettromagnetici di interesse, ossia l'assorbimento all'interno dei singoli layer e la riflettanza. Al fine di ridurre l'onere computazionale, senza perdita di generalità, la cella è stata modellata come un multistrato bidimensionale, la cui larghezza è stata fissata a 200nm, applicando alle pareti laterali delle condizioni al contorno periodiche di tipo Floquet. In questo modo si è simulata la condizione in cui ogni layer abbia solo una dimensione finita, ossia lo spessore, mentre le altre due sono infinite [10-14]. Sulla faccia superiore e su quella inferiore (ovvero sulle terminazioni dei domini che descrivono l'aria), sono state applicate delle condizioni di Porta, simulando quindi domini d'aria infinitamente estesi anche nella direzione longitudinale della cella. La porta sulla faccia superiore è stata settata come porta di eccitazione, ossia come porta da cui si origina il campo elettromagnetico (modellato come un'onda piana) che incide normalmente sulla cella e si propaga all'interno dei layer che la compongono. L'intero dominio è stato discretizzato con una mesh triangolare, fissando la dimensione massima degli elementi ad un valore pari ad un quarto di lunghezza d'onda avendo preliminarmente verificato che tale dimensione è sufficiente a rendere la soluzione stabile nei confronti di un ulteriore infittimento della mesh. L'informazione sul tipo di materiale è tenuta in conto mediante l'indice di rifrazione complesso, la cui parte reale ( $n_{materiale}$ ) e parte immaginaria ( $k_{materiale}$ ), in funzione della lunghezza d'onda, sono state ricavate da lavori presenti in letteratura (si rimanda al paragrafo 3 per maggiori dettagli).

L'output principale delle simulazioni numeriche è l'assorbimento di ogni layer in funzione della lunghezza d'onda, calcolato integrando le perdite ohmiche all'interno del dominio di interesse, considerando una potenza in ingresso costante e uguale ad 1W rispetto alla lunghezza d'onda. Noto lo spettro di irradianza solare  $S(\lambda)$  (AM 1.5) è possibile, mediante la (1), convertire la curva di assorbimento della cella in un valore equivalente di corrente di cortocircuito erogata dal singolo layer [12]:

$$J_{scL} = \frac{q}{c \cdot h} \int A_L(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda \quad (1)$$

dove  $q$  è la carica dell'elettrone,  $c$  la velocità della luce nel vuoto,  $h$  è la costante di Plank,  $A_L(\lambda)$  è lo spettro di assorbimento del layer "L" considerato.

Dalla (1) è chiaro che, nel calcolo della  $J_{scL}$ , l'assorbimento da parte di un layer è pesato per lo spettro solare, pertanto la  $J_{scL}$  costituisce un parametro di merito più completo rispetto al semplice integrale dello spettro di assorbimento per studiare la cella da un punto di vista ottico. Ovviamente, la corrente effettivamente erogata dalla cella nel complesso è legata ai contributi erogati dai layer attivi, ossia quello in

silicio e quello in perovskite, e deve tener conto del collegamento in serie tra i due. Pertanto, definiti  $J_{scP}$  e  $J_{scS}$  i contributi di corrente erogati rispettivamente dal layer in perovskite e dal layer in silicio mediante l'equazione (1), è facile verificare che la corrente effettivamente erogata da una cella tandem a 2 terminali, è descritta dalla seguente equazione:

$$J_{sc} = \frac{J_{scP} + J_{scS} - |J_{scP} - J_{scS}|}{2} \quad (2)$$

Quando i due contributi di corrente sono uguali, infatti, il modulo della differenza si annulla, e la cella riesce ad erogare un valore che è pari a  $J_{scP} = J_{scS}$ , cioè proprio al contributo erogato dalle singole sub-celle. Se uno dei due contributi prevale sull'altro, invece, la (2) fornirà un valore di corrente pari al contributo più basso, coerentemente con quanto previsto dal collegamento in serie tra le due sub-celle.

Nell'analisi seguente si terrà conto anche dello spettro di riflessione, che è essenzialmente una misura del contributo di potenza che "non" viene assorbito da parte della cella (assumendo una trasmittanza nulla). Lo spettro di riflessione è ottenuto numericamente andando a considerare il parametro  $S_{11}$  della matrice di scattering (dove il pedice 1 sta ad indicare la porta di eccitazione), secondo l'equazione seguente (3):

$$R(\lambda) = |S_{11}|^2 \quad (3)$$

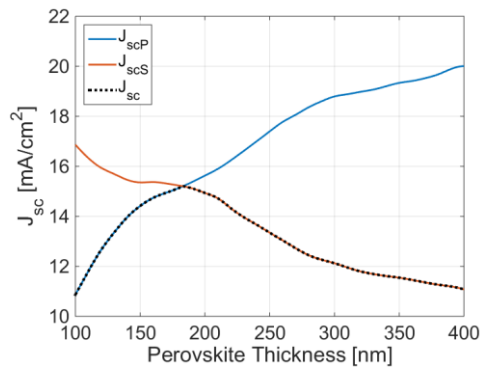
### 3. Studio dell'effetto dello spessore del layer in perovskite

La prima fase dello studio condotto consiste nel valutare l'influenza dello spessore dello strato in perovskite sulla corrente  $J_{sc}$  effettivamente erogata dalla cella tandem a 2 terminali nominale (ossia la configurazione fornita dall'ENEA), le cui caratteristiche sono riassunte nella Tabella 1 e nella Figura 1, con riferimento allo schematico in Figura 1. In questo studio, analogamente a quanto fatto nel lavoro precedente [8] la cella in silicio è descritta da un unico layer di 270 $\mu$ m (le cui proprietà ottiche sono ricavate da [15]) con un contatto in argento (Ag) di 100nm modellato come in [16]. Al di sopra del layer di silicio vi è depositato un layer conduttivo (la Tunnel Junction) di 65nm e costituito da Indium-Tin-Oxide (ITO) che pone in contatto la cella in silicio con quella in perovskite. Le proprietà ottiche dell'ITO sono state ricavate da [17]. Il materiale considerato per l'ETL è l' $\text{SnO}_2$  (proprietà ottiche ricavate da [18]) con spessore pari a 20nm, mentre per l'HTL (posto al di sopra dello strato in perovskite) si è considerato lo spiro-OMeTAD spesso 200nm modellato come in [19]. Per lo strato in perovskite si è invece utilizzato il Methylammonium Lead Iodide ( $\text{MAPbI}_3$ ), il cui indice di rifrazione è stato ricavato da [20]. Infine, al di sopra dell'HTL, si è considerato uno strato di ossido conduttivo (TCO) di spessore pari a 65nm, costituito da ITO.

	Spessore	Materiale
TCO	65nm	ITO
HTL	200nm	Spiro-OMeTAD
Perovskite	400nm	$\text{MAPbI}_3$
ETL	20nm	$\text{SnO}_2$
TUNNEL	65nm	ITO
SILICIO	270 $\mu$ m	C-Si
ARGENTO	100nm	Ag

**Tabella 1:** Parametri nominali della cella studiata.

Si è quindi valutato il contributo di corrente dato dallo strato dal layer in silicio ( $J_{scS}$ ) e quello dato invece dal layer in perovskite ( $J_{scP}$ ) per diversi spessori della perovskite in un range che va da 100nm 400nm. I risultati di questa analisi sono riportati nel grafico in Figura 2, in cui è plottato anche il valore di corrente effettivamente erogato, modellato dalla (2).



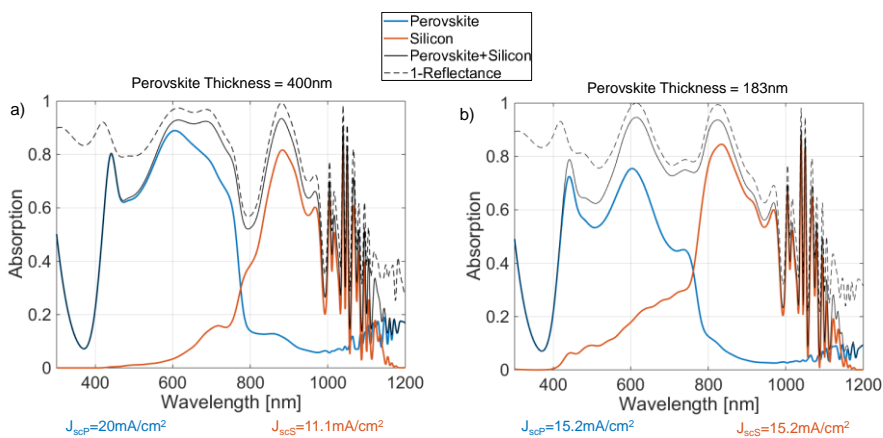
**Figura 2:** Andamento della  $J_{scP}$  e della  $J_{scS}$  in funzione dello spessore della perovskite nel caso in cui tutti gli altri layer abbiamo spessori e materiali nominali.

Come si può osservare la  $J_{scP}$  ha un andamento monotono crescente in funzione dello spessore della perovskite (curva blu), mentre la  $J_{scS}$  ha, al contrario, un andamento monotono decrescente (curva arancione), coerentemente con quanto atteso. Essenzialmente, la potenza ottica assorbita da parte della perovskite aumenta all’aumentare del suo spessore, a discapito della potenza assorbita dal silicio, e tutto ciò si riflette nel valore del contributo di corrente erogato dai singoli layer.

Si osservi che la  $J_{scS}$  e  $J_{scP}$  si intersecano in un punto (spessore pari a 183nm,  $t_{pOPT}$ ), che di fatto corrisponde allo spessore della perovskite per il quale le due sub-celle sono bilanciate. Per tutti i valori di spessore diversi da  $t_{pOPT}$  la cella riuscirà ad erogare una  $J_{sc}$  che è pari al contributo più basso tra la  $J_{scP}$ , e la  $J_{scS}$ .

La condizione in cui i due contributi sono identici è quindi anche quella per la quale la cella riesce ad erogare la massima corrente, come evidente anche dalla Figura 2. Questo vuol dire che per massimizzare le prestazioni della cella tandem a 2 terminali, tenendo in conto anche dell’accoppiamento elettrico in serie è sufficiente massimizzare la funzione descritta dalla (2).

Nei grafici in Figura 3 sono riportate le curve di assorbimento (in funzione della lunghezza d’onda) dei layer in silicio (curva arancione) e perovskite (curva blu), sia nel caso in cui lo spessore della perovskite sia uguale a quello nominale, cioè 400nm (Figura 2a), sia nel caso in cui lo spessore è pari a  $t_{pOPT}$ =183nm (Figura 2b).



**Figura 3:** Spettri di assorbimento nel caso in cui lo spessore della perovskite è quello nominale, cioè 400nm (a), e nel caso in cui lo spessore è quello tale da equilibrare la cella, cioè 183nm.



Negli stessi grafici si è riportata anche la curva data dalla somma degli assorbimenti (curva nera solida) e la curva (1-Reflectance), ovvero l'aliquota di potenza che viene effettivamente trasmessa all'interno della cella. In entrambi i casi si è inoltre indicato il valore delle correnti di cortocircuito associate ai singoli layer, calcolati a partire dalle curve di assorbimento mostrate, mediante la (3).

Nel caso nominale, ossia con uno spessore di perovskite pari a 400nm, la cella è completamente sbilanciata. Infatti, come era già evidente dal grafico in Figura 2, la perovskite eroga un contributo di corrente che circa 1.8 volte maggiore rispetto a quello del silicio. La cella quindi sarà in grado di erogare una corrente  $J_{sc}$  che è pari a  $11.1\text{mA}/\text{cm}^2$ , cioè il valore erogato dal layer in silicio. Riducendo lo spessore della perovskite a 183nm l'assorbimento da parte del layer in perovskite si riduce, a vantaggio di quello del silicio, ed entrambi i layer erogano  $15.2\text{mA}/\text{cm}^2$ , valore corrispondente a quello effettivamente erogato dall'intera cella, come discusso precedentemente. In altri termini, agendo semplicemente sullo spessore della perovskite, si riesce ad ottenere un miglioramento delle prestazioni della cella di circa il 37%.

Dal grafico in Figura 3b si può osservare che non tutta la potenza trasmessa all'interno della cella viene assorbita dai layer attivi, a causa dell'assorbimento da parte degli altri layer che costituiscono la cella. Tale assorbimento indesiderato è legato alle perdite dei materiali, soprattutto dell'HTL, come già discusso ampiamente nel lavoro precedente [8], dove si è dimostrato che rimuovendo banalmente le perdite dei materiali che costituiscono l'ETL, l'HTL e la Tunnel Junction si ottiene già un miglioramento delle prestazioni di circa l'11%. Ovviamente, una diminuzione dello spessore dei layer contribuisce a limitare l'effetto delle perdite legate ai materiali, e tale aspetto verrà tenuto in conto durante la fase di ottimizzazione.

Contestualmente, i fenomeni di interferenza tra le diverse componenti di luce trasmesse e riflesse ad ogni interfaccia tra materiali differenti, inducono una riduzione del contributo di potenza che effettivamente si propaga all'interno della cella e che quindi può essere assorbito dai layer attivi e convertito in corrente. Come discusso in [8], tali meccanismi sono fortemente influenzati dallo spessore e dall'indice di rifrazione dei materiali che costituiscono la cella, pertanto si può agire su di essi per massimizzare l'assorbimento da parte del silicio e della perovskite, e quindi la corrente erogata dalla cella.

Sulla base di queste osservazioni, nel paragrafo successivo quindi sono presentati i risultati di un processo di ottimizzazione finalizzato a massimizzare la corrente  $J_{sc}$  effettivamente erogata dalla cella, tenendo in conto del fatto che le due sub-celle sono elettricamente connesse in serie.

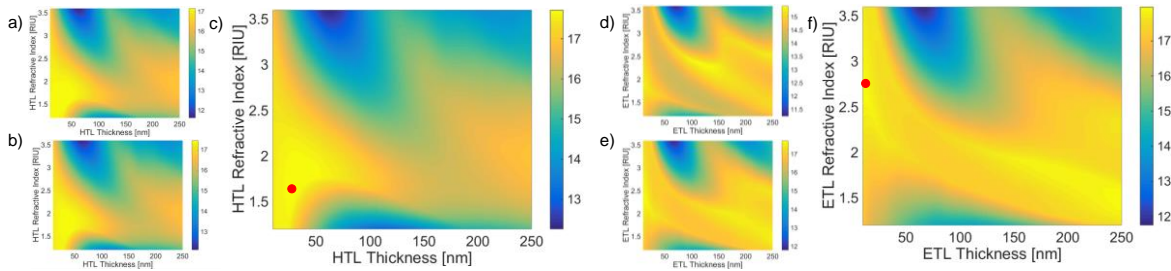
## 4. Studio parametrico per l'ottimizzazione della cella

### 4.1 Ottimizzazione dei layer di trasporto (HTL e ETL)

Al fine di individuare gli spessori e gli indici di rifrazione dell'ETL, dell'HTL e della Tunnel Junction, tali da massimizzare la corrente di cortocircuito effettivamente erogata dalla cella tandem a 2 terminali si è partiti dall'ottimizzazione dei due layer di trasporto in esame, rimandando ad una seconda fase l'ottimizzazione della Tunnel Junction.

In particolare, sono stati individuati gli indici di rifrazione e gli spessori dell'ETL e dell'HTL tali da massimizzare la  $J_{sc}$  definita dalla (2). Dovendo individuare 4 parametri ottimi, ossia l'indice di rifrazione e lo spessore dell'ETL (rispettivamente  $n_{ETLopt}$  e  $t_{ETLopt}$ ), e l'indice di rifrazione e lo spessore dell'HTL (rispettivamente  $n_{HTLopt}$  e  $t_{HTLopt}$ ), si è seguito un procedimento iterativo simulando la cella al variare di due parametri alla volta, ossia quelli riferiti ad un singolo layer. Per tutte le simulazioni si è considerato il range 1.2-3.6 per gli indici di rifrazione, e 10-250nm per gli spessori. Il valore della parte immaginaria dell'indice di rifrazione dei materiali che costituiscono i vari layer da ottimizzare è stato considerato nullo, simulando quindi un layer idealizzato, ossia senza perdite. Tutti gli altri parametri della cella sono costanti e uguali ai valori nominali (se non diversamente specificato).

Per tale studio sono state considerate tre iterazioni, i cui risultati sono riportati in Figura 4 e sintetizzati in Tabella 2 e Tabella 3. Nello specifico nei grafici delle Figure 4a, 4b e 4c è riportato il valore della  $J_{sc}$  definita dalla (2) al variare dell'indice di rifrazione e dello spessore dell'HTL, rispettivamente ottenuti all'iterazione 1, 2 e 3. Analogamente, nei grafici delle Figure 4d, 4e e 4f è riportato il valore della  $J_{sc}$  definita dalla (2) al variare dell'indice di rifrazione e dello spessore dell'ETL, ottenuti alla prima, seconda e terza iterazione rispettivamente.



**Figura 4:**  $J_{sc}$  in funzione dell'indice di rifrazione e dello spessore dell'HTL (a, b, c) e dell'ETL (d, e, f). In (a) e (d) i risultati sono relativi al primo run di simulazioni, in (b) e in (e) al secondo run, in (c) e (f) al terzo.

Per quanto riguarda l'ottimizzazione dell'HTL, alla prima iterazione si è considerato in ingresso l'ETL nominale, ossia costituito da  $\text{SnO}_2$  con spessore 20nm. Nel caso dell'ottimizzazione dell'ETL, invece, al primo run si è considerando in ingresso l'HTL nominale, e cioè costituito da spiro-OMeTAD di spessore pari a 200nm.

Le coppie indice-spessore corrispondenti al massimo della  $J_{sc}$  individuate in Figura 4a e Figura 4d sono dei parametri sub-ottimi, che sono stati poi considerati come parametri di ingresso per una seconda fase di ottimizzazione, rispettivamente dell'ETL (risultati in Figura 4e) e dell'HTL (risultati in Figura 4d). Analogamente si è proceduto per la terza iterazione, ottenendo i risultati riportati sinteticamente in Tabella 2 e Tabella 3, dove sono mostrate le soluzioni individuate ad ogni run, ossia le coppie indice-spessore corrispondenti al massimo della  $J_{sc}$ . Tale procedimento può essere chiaramente iterato fino a che non si converga verso una soluzione con la precisione desiderata, intesa come differenza tra il risultato di un'iterazione e quello dell'iterazione precedente. Nel caso specifico si osserva che sia per l'HTL che per l'ETL i grafici in Figura 4 mostrano che essenzialmente la corrente  $J_{sc}$  assume la stessa configurazione ad ogni run in funzione dell'indice e dello spessore dei layer in esame, con una leggera variazione solo della scala. Questo aspetto è ancora più evidente se si osservano nella Tabella 2 e Tabella 3 le coppie indice-spessore individuate ad ogni run, e il corrispettivo valore di corrente. Per ogni run, nelle due tabelle, è anche mostrato il valore massimo di corrente che si otterrebbe andando a considerare, nel grafico corrispondente al run in esame, la coppia indice-spessore individuata al run precedente. È evidente che di fatto nel passaggio da un run all'altro le soluzioni individuate sono stabili, sia se si osservano i valori di corrente raggiunti, sia se si osservano i valori di indice di rifrazione o di spessore individuati.

Va sottolineato che, con riferimento alla Figura 4, sia per l'HTL che per l'ETL è evidente che, indipendentemente dal run di simulazione considerato, si possono individuare diverse regioni (ossia diverse coppie spessore-indice) che massimizzano la corrente. Dal lavoro precedente [8], però, è emerso che le perdite dei materiali utilizzati per la realizzazione dei layer trasportatori incidono fortemente sulla quantità di potenza assorbita dai layer attivi (silicio e perovskite) e di conseguenza sui contributi di corrente dei singoli layer. Pertanto, anche in questo caso nell'insieme di soluzioni che massimizzano la corrente effettivamente erogata, sono state scelte quelle a spessore minimo, in maniera tale da ridurre quanto più possibile l'effetto delle perdite una volta introdotti i materiali reali.

RUN	ETL			HTL <sub>opt</sub>			
	Dati in ingresso			Soluzione individuata			
	Soluzione in ingresso	n	t [nm]	n	t [nm]	J <sub>sc</sub> (run) [mA/cm <sup>2</sup> ]	J <sub>sc</sub> (run-1) [mA/cm <sup>2</sup> ]
1	Valori Nominali	SnO <sub>2</sub> (1.84)	20	1.72	40	17.16	
2	ETLopt Soluzione run1	1.83	10	1.8	32	17.45	17.43
3	ETLopt Soluzione run2	2.23	10	1.73	32	17.71	17.71

**Tabella 2:** Risultati del processo di ottimizzazione dell'HTL.

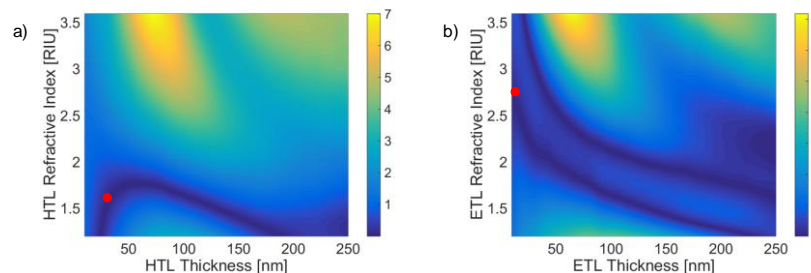
RUN	HTL			ETL <sub>opt</sub>			
	Dati in ingresso			Soluzione individuata			
	Soluzione in ingresso	n	t [nm]	n	t [nm]	J <sub>sc</sub> (run) [mA/cm <sup>2</sup> ]	J <sub>sc</sub> (run-1) [mA/cm <sup>2</sup> ]
1	Valori Nominali	Spiro (1.65)	200	1.83	10	15.31	
2	HTLopt Soluzione run1	1.72	40	2.23	10	17.72	17.43
3	HTLopt Soluzione run2	1.8	32	2.68	10	17.96	17.67

**Tabella 3:** Risultati del processo di ottimizzazione dell'ETL.

Per entrambi i layer le soluzioni individuate al run 2 mostrano un valori di corrente superiori rispetto a quelle individuate al run 1. Questo è dovuto sia al fatto che nel secondo run i layer sono ideali (cioè senza perdite) sia al fatto che le simulazioni del run 2 prendono in ingresso i risultati del run 1, e quindi si parte da una condizione in cui spessore e indice del layer fisso sono già ottimizzati rispetto al caso nominale, come già discusso precedentemente.

Sulla base della discussione precedente, i valori ottimi presi in considerazione per la successiva analisi sono quelli relativi al run 3 di simulazioni, e pertanto per il layer di HTL considereremo spessore e indice rispettivamente uguali a  $t_{HTLopt}=32nm$ ,  $n_{HTLopt}=1.73$ , mentre per l'ETL i valori individuati sono:  $t_{ETLopt}=10nm$ ,  $n_{ETLopt}=2.68$ . In corrispondenza di tali valori si ottiene un valore di  $J_{sc}$  pari a circa  $17.8mA/cm^2$ .

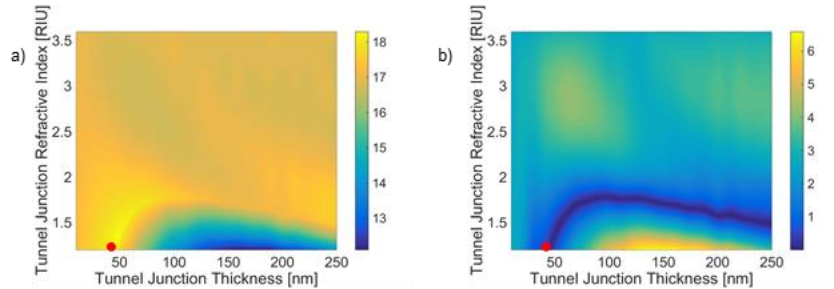
In Figura 5, solo per il caso corrispondente all'ultimo run di simulazioni, si è mostrato l'andamento della differenza (in valore assoluto) tra le correnti erogate dal silicio e dalla perovskite in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'HTL (Figura 5a) e dell'ETL (Figura 5b). I grafici dimostrano che in corrispondenza delle coppie spessore-indice individuate la differenza tra le correnti erogate dai singoli layer è nulla, pertanto il matching tra le correnti è mantenuto, coerentemente con quanto atteso.



**Figura 5:** Modulo della differenza tra le correnti erogate dal silicio e dalla perovskite ( $|J_{scP} - J_{scS}|$ ) in funzione dell'indice di rifrazione e dello spessore dell'HTL (a) e dell'ETL (b). Risultati relativi al terzo run di simulazioni.

## 4.2 Ottimizzazione della Tunnel Junction

A valle dell'ottimizzazione dei layer di trasporto, seguendo lo stesso approccio, sono state individuate le caratteristiche ottimali per la realizzazione della Tunnel Junction. In questa fase, quindi, si è calcolata la  $J_{sc}$  in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione della Tunnel Junction considerando in ingresso i valori ottimali per HTL e ETL precedentemente individuati. I risultati sono mostrati in Figura 6a. Nella Figura 6b, invece, è mostrata la differenza (in valore assoluto) tra le correnti erogate dai singoli layer attivi.



**Figura 6:** (a)  $J_{sc}$  in funzione dell'indice di rifrazione e dello spessore della Tunnel Junction. (b) Modulo della differenza tra le correnti erogate dal silicio e dalla perovskite ( $|J_{scP} - J_{scS}|$ ) in funzione dell'indice di rifrazione e dello spessore della Tunnel Junction. I parametri utilizzati per modellare HTL e ETL sono quelli ottenuti dal processo di ottimizzazione.

Dalla Figura 6a si individua una regione piuttosto vasta in cui la corrente  $J_{sc}$  è praticamente maggiore rispetto al valore individuato durante la fase di ottimizzazione dell'HTL e dell'ETL. Ovviamente bisogna tener conto del fatto che questi risultati non tengono conto delle perdite della Tunnel Junction, pertanto una piccola percentuale di miglioramento delle prestazioni è dovuta alla semplice idealizzazione del layer in esame [8]. Il valore massimo della  $J_{sc}$ , che è pari a  $18.3 \text{ mA/cm}^2$  lo si ottiene in corrispondenza di un indice pari a  $n_{\text{TunnelOPT}}=1.2$  (il minimo valore considerato per queste simulazioni) e uno spessore pari a  $t_{\text{TunnelOPT}}=45 \text{ nm}$ . Dalla Figura 6b si può osservare che in corrispondenza della coppia spessore-indice ottimale per la Tunnel Junction la differenza tra le correnti erogate dai singoli layer è praticamente nulla, pertanto la cella tandem a 2 terminali continua ad essere equilibrata.

## 5. Scelta di materiali reali per la cella ottimizzata

I materiali considerati adatti alla realizzazione dell'HTL sono il triossido di molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ), il poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate (PEDOT:PSS), l'anidride vanadica ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ), lo Spiro-OMeTAD, il triossido di tungsteno ( $\text{WO}_3$ ) e l'ossido di Nichel ( $\text{NiO}$ ) [21, 22]. Tra questi, quello con la parte reale dell'indice di rifrazione più vicina a quello ottimo ( $n_{\text{HTLopt}}=1.73$ ) è lo Spiro-OMeTAD, cioè il materiale utilizzato nominalmente dall'ENEA per la fabbricazione delle celle tandem. Tuttavia, vale la pena considerare che questo materiale presenta perdite elevate a basse lunghezze d'onda, pertanto il suo utilizzo potrebbe limitare il valore di corrente erogato dalla cella tandem a 2 terminali, nonostante l'ottimizzazione abbia portato ad una drastica riduzione dello spessore dell'HTL rispetto al caso nominale. Per tali motivi si analizzerà anche la possibilità di utilizzare un materiale il cui indice di rifrazione si discosti leggermente dalla soluzione ottimale, ma le cui perdite possono ritenersi trascurabili. Il materiale che viene incontro a tali esigenze è l'ossido di Nichel ( $\text{NiO}$ ), il cui indice varia da circa 2.5 a circa 1.8, mentre il  $k$  assume valori al di sotto di 0.04 in tutto il range di lunghezze d'onda considerato.

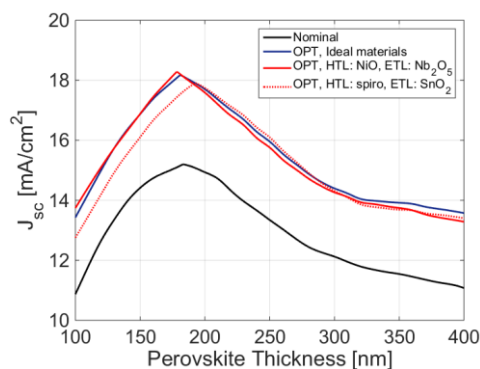
Per quanto riguarda i materiali adatti alla realizzazione dell'ETL, quelli considerati sono l'ossido di niobio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), il phenyl-C61-butyric acid methyl ester (PCBM), il diossido di stagno ( $\text{SnO}_2$ ), il biossido di stagno ( $\text{TiO}_2$ ), l'ossido di zinco ( $\text{ZnO}$ ) [18, 23-26]. Quelli con l'indice di rifrazione più elevato tra questi considerati

sono due, ovvero il biossido di Titanio ( $\text{TiO}_2$ ), il cui valore di  $n$  varia da 3.4 a 2.3, e l'ossido di Niobio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), il cui valore di  $n$  varia invece da 3.1 a 2.2. Sebbene il  $\text{TiO}_2$  abbia un valore di  $n$  maggiore, potrebbe essere più favorevole lavorare con l' $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , in quanto il suo valore di  $k$  è inferiore, soprattutto a basse lunghezze d'onda. È interessante osservare che se si scegliesse di utilizzare il materiale nominalmente utilizzato dall'ENEA per i processi di fabbricazione, ossia l' $\text{SiO}_2$ , il cui valore medio della parte reale dell'indice di rifrazione è 1.83, si ricadrebbe in una regione in cui la corrente  $J_{sc}$  assume valori prossimi a quello massimo, pertanto anche per l'ETL si valuterà la possibilità di utilizzare il materiale nominale.

Infine, per quanto riguarda la Tunnel Junction, considerando che la soluzione ottima è stata individuata in corrispondenza dell'indice di rifrazione più basso tra quelli considerati, prenderemo in considerazione la possibilità di utilizzare il materiale nominale, ossia l'ITO.

Ricapitolando, a valle dell'ottimizzazione dei layer di trasporto e della Tunnel Junction, dopo aver individuato i materiali ideali (e i relativi spessori) da utilizzare per la realizzazione dei layer di trasporto e della Tunnel Junction al fine di massimizzare la corrente effettivamente erogata dalla cella tandem a 2 terminali, sono stati individuati materiali le cui caratteristiche si avvicinino quanto più possibile a quelli ideali. Nello specifico abbiamo individuato due possibili scenari: il primo prevede l'utilizzo dei materiali nominalmente utilizzati dai processi di fabbricazione ENEA (Spiro-OMeTAD per l'HTL,  $\text{SnO}_2$  per l'ETL, ITO per la Tunnel Junction), mentre il secondo prevede l'introduzione di nuovi materiali per la realizzazione dell'HTL e dell'ETL (rispettivamente NiO e  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), lasciando invece il materiale nominale per la realizzazione della Tunnel Junction.

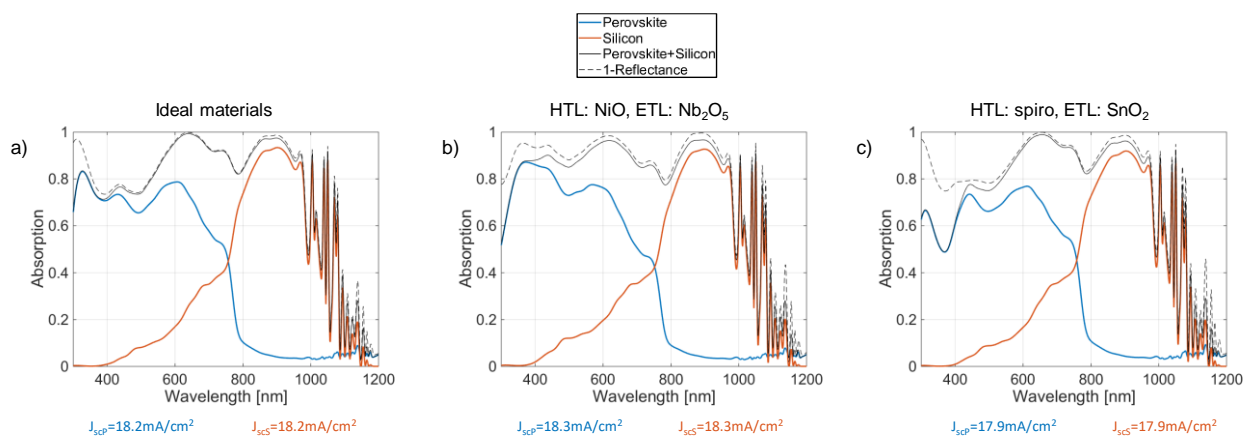
È chiaro che l'introduzione di materiali reali tende a modificare le caratteristiche di assorbimento della cella, e di conseguenza anche il valore della  $J_{sc}$ . Ciò è dovuto al fatto che gli indici di rifrazione dei materiali individuati non corrispondono perfettamente ai valori ottimali, e in aggiunta il valore non è costante in funzione della lunghezza d'onda. Per tale motivo, seguendo un approccio che di fatto è analogo a quello seguito per l'ottimizzazione dell'HTL e dell'ETL, una volta introdotti i materiali individuati mediante il processo di ottimizzazione è stata rivalutata la corrente  $J_{sc}$  in funzione dello spessore di perovskite, al fine di correggere, se necessario, il valore ottimale della perovskite precedentemente individuato riportando la cella nella condizione di equilibrio. I risultati sono riportati in Figura 7, dove è mostrato l'andamento della  $J_{sc}$  in funzione dello spessore della perovskite nel caso in cui sono utilizzati i materiali ideali (curva blu), nel caso in cui sono utilizzati i materiali Nominali (con spessori ottimizzati) per l'HTL e l'ETL (curva rossa tratteggiata), e nel caso in cui sono utilizzati materiali nuovi (curva rossa solida). Al fine di facilitare il confronto con la situazione di partenza, nello stesso grafico è anche riportata la  $J_{sc}$  nel caso in cui i layer in esame non sono ottimizzati (ossia la stessa mostrata in Figura 2).



**Figura 7:** Andamento della  $J_{sc}$  in funzione dello spessore della perovskite nei diversi casi studio analizzati.

Dai grafici in Figura 7 risulta evidente che il processo di ottimizzazione ha portato ad un netto aumento della corrente erogata dalla cella in corrispondenza di tutti i valori di spessore della perovskite considerati. Nel caso di materiali ideali, la corrente  $J_{sc}$  assume il valore massimo di  $18.2 \text{ mA/cm}^2$  in corrispondenza di uno spessore di perovskite pari a  $181 \text{ nm}$ . Utilizzando l'NiO per l'HTL e l'Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per l'ETL, la corrente  $J_{sc}$  è massima in corrispondenza di uno spessore di perovskite pari a  $178 \text{ nm}$  (quindi solo pochi nanometri di differenza rispetto alla cella non ottimizzata), assumendo un valore pari a  $18.3 \text{ mA/cm}^2$ . Infine, volendo utilizzare gli stessi materiali utilizzati nominalmente dall'ENEA, bisogna aumentare leggermente lo spessore della perovskite, portandolo a  $193 \text{ nm}$ , ottenendo il massimo valore di  $J_{sc}$  uguale a  $17.9 \text{ mA/cm}^2$ .

In Figura 8 sono riportati gli spettri di assorbimento nei tre casi analizzati a valle dell'ottimizzazione, ossia il caso in cui si utilizzano i materiali ideali (Figura 8a), il caso in cui si introducono nuovi materiali per HTL e ETL (Figura 8b), e il caso in cui si utilizzano i materiali nominali con spessori ottimizzati (Figura 8c).



**Figura 8:** Spettri di assorbimento nei tre casi analizzati a valle dell'ottimizzazione: (a) materiali ideali, (b) materiali nuovi per ETL e HTL, (c) materiali nominali con spessori ottimizzati.

Confrontando il grafico in Figura 8a con quello in Figura 3b (relativo al caso nominale con la sola perovskite ottimizzata), la prima cosa che si osserva è che a valle dell'ottimizzazione la potenza trasmessa all'interno della cella tende a coincidere con quella effettivamente assorbita dai layer attivi. Questo ovviamente è dovuto alla rimozione delle perdite dei layer di trasporto e della Tunnel Junction, ed è particolarmente evidente a basse lunghezze d'onda, dove la rimozione dello Spiro-OMeTAD (Figura 8a) ha portato ad un aumento della potenza assorbita soprattutto da parte del silicio (cfr. le curve blu delle Figure 8a e 3b) [8]. Il processo di ottimizzazione ha di fatto modificato la curva di assorbimento totale, portando ad un aumento soprattutto nel range di lunghezze d'onda in cui è principalmente coinvolto l'assorbimento da parte del silicio. Si osservi che l'introduzione di materiali reali (Figura 8b) diversi da quelli nominali, non comporta una sostanziale differenziazione tra potenza trasmessa e potenza assorbita dai layer attivi (curva nera solida e curva nera tratteggiata). Ciò è dovuto al fatto che tra le possibili soluzioni per l'ottimizzazione sono state scelte quelle a spessori minimi, pertanto le perdite introdotte hanno peso trascurabile. È interessante osservare che rispetto al caso ideale (in Figura 8a), l'introduzione di materiali reali (Figura 8b) comporta un ulteriore aumento della potenza trasmessa (e quindi di quella assorbita da parte dei layer attivi) in corrispondenza di lunghezze d'onda basse (intorno a  $500 \text{ nm}$ ). Tale risultato potrebbe essere spiegato considerando che l'indice di rifrazione dei materiali reali varia in funzione della lunghezza d'onda, pertanto ci sono dei range per i quali si possono determinare delle condizioni più favorevoli all'aumento dell'assorbimento. Infine, l'utilizzo dei materiali nominali, con spessori ottimizzati (Figura 8c), non stravolge di molto gli spettri di assorbimento rispetto al caso in cui i materiali utilizzati sono quelli ideali (Figura 8a), se non per una leggera differenza tra la potenza trasmessa (curva nera tratteggiata) e quella assorbita (curva nera solida) a basse lunghezze d'onda, a causa delle perdite dello Spiro-OMeTAD (Figura 8c).

## 6. Conclusione

Mediante uno studio delle caratteristiche di assorbimento della potenza ottica da parte dei layer che compongono una cella solare tandem in silicio e perovskite a 2 terminali, si è massimizzata la corrente di cortocircuito effettivamente erogata dalla cella, mediante un'opportuna scelta di materiali e spessori per la realizzazione dei layer trasportatori di cariche (HTL e ETL) e Tunnel Junction. Partendo da una configurazione nominale, i cui parametri corrispondono a quelli dei processi standard utilizzati dall'ENEA, si è preliminarmente studiato l'effetto dello spessore della perovskite sui contributi di corrente erogati dai singoli layer attivi, verificando che all'aumentare di tale spessore il contributo erogato dalla perovskite aumenta a discapito di quello erogato dal silicio. I due contributi si eguagliano in corrispondenza di uno spessore di perovskite pari a 183nm, considerato per gli studi successivi come spessore ottimale che garantisce l'equilibrio delle correnti erogate dalle due sub-celle, e di conseguenza la massima corrente erogata effettivamente dalla cella, pari a 15.2mA/cm<sup>2</sup>. Quindi, sono state ottimizzate le caratteristiche di assorbimento della cella agendo sui layer di trasporto (HTL e ETL) e sulla Tunnel Junction. In particolare sono stati individuati gli spessori e gli indici di rifrazione ottimali, tali da massimizzare i contributi di potenza ottica assorbita dai due layer attivi e convertita in corrente, mantenendo sempre sempre l'equilibrio tra le correnti erogate dalle due sub-celle. Infine, dopo aver simulato la cella nelle condizioni ideali, sono stati individuati dei materiali con caratteristiche ottiche prossime a quelle ideali, con perdite basse ma non idealmente nulle. In questa fase si è valutata sia la possibilità di utilizzare gli stessi materiali della cella nominale, agendo quindi solo sugli spessori, sia la possibilità di introdurre nuovi materiali con perdite ridotte rispetto a quelli nominali. A valle dell'ottimizzazione, e dell'individuazione di materiali reali, si è rivalutato lo spessore ottimale della perovskite al fine di compensare il leggero squilibrio dovuto sia alle approssimazioni numeriche, sia all'introduzione di materiali reali, le cui caratteristiche non corrispondono perfettamente a quelle ideali. I risultati principali dello studio descritto nel presente lavoro sono riassunti nella Tabella 4.

Caso	Perovskite	HTL		ETL		Tunnel		J <sub>sc</sub> [mA/cm <sup>2</sup> ]
	t[nm]	t[nm]	n	t[nm]	n	t[nm]	n	
Ideale	181	32	1.73	10	2.68	45	1.2	18.2
Materiali Nuovi	178	32	NiO	10	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	45	ITO	18.3
Materiali Nominali	193	32	Spiro-OMeTAD	10	SnO <sub>2</sub>	45	ITO	17.9

**Tabella 4: Parametri ottimali.**

Introducendo dei materiali reali diversi da quelli utilizzati nei processi standard dell'ENEA, e cioè l'NiO per l'HTL, l'Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per l'ETL, e cambiando solo lo spessore per la Tunnel Junction, si ottiene un valore di J<sub>sc</sub> pari a 18.3mA/cm<sup>2</sup>, con un miglioramento del 65% rispetto alla configurazione di partenza, e del 20% rispetto alla configurazione iniziale con spessore della perovskite ottimizzata. In tal caso lo spessore di perovskite da utilizzare è 178nm. Volendo continuare ad utilizzare i materiali nominali, invece, lo spessore ottimale della perovskite è 193nm, e si riesce ad ottenere una corrente massima pari a 17.9mA/cm<sup>2</sup>, che è quindi il 61% maggiore rispetto alla cella di partenza, e 17% maggiore rispetto alla cella nominale con la sola perovskite ottimizzata.

## 7. Riferimenti

- [1] C. Battaglia, A. Cuevas, and S. De Wolf, "High-efficiency crystalline silicon solar cells: status and perspectives," *Energy & Environmental Science*, vol. 9, pp. 1552-1576, 2016.
- [2] K. Yoshikawa, W. Yoshida, T. Irie, H. Kawasaki, K. Konishi, H. Ishibashi, *et al.*, "Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 173, pp. 37-42, 2017.
- [3] M. Saliba, T. Matsui, J.-Y. Seo, K. Domanski, J.-P. Correa-Baena, M. K. Nazeeruddin, *et al.*, "Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency," *Energy & environmental science*, vol. 9, pp. 1989-1997, 2016.
- [4] E. H. Anaraki, A. Kermanpur, L. Steier, K. Domanski, T. Matsui, W. Tress, *et al.*, "Highly efficient and stable planar perovskite solar cells by solution-processed tin oxide," *Energy & Environmental Science*, vol. 9, pp. 3128-3134, 2016.
- [5] G. E. Eperon, S. D. Stranks, C. Menelaou, M. B. Johnston, L. M. Herz, and H. J. Snaith, "Formamidinium lead trihalide: a broadly tunable perovskite for efficient planar heterojunction solar cells," *Energy & Environmental Science*, vol. 7, pp. 982-988, 2014.
- [6] P. Löper, S.-J. Moon, S. M. De Nicolas, B. Niesen, M. Ledinsky, S. Nicolay, *et al.*, "Organic–inorganic halide perovskite/crystalline silicon four-terminal tandem solar cells," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 17, pp. 1619-1629, 2015.
- [7] N. N. Lal, T. P. White, and K. R. Catchpole, "Optics and light trapping for tandem solar cells on silicon," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 4, pp. 1380-1386, 2014.
- [8] M. Giaquinto, A. Micco, L. V. Mercaldo, P. Delli Veneri, M. Pisco, and A. Cusano, "Progettazione ottica di celle solari tandem perovskite/silicio," Relazione tecnica (Settembre 2018).
- [9] *Comsol Multiphysics*, <https://www.comsol.com/rf-module>.
- [10] A. Aliberti, A. Ricciardi, M. Giaquinto, A. Micco, E. Bobeico, V. La Ferrara, *et al.*, "Microgel assisted Lab-on-Fiber Optrode," *Scientific Reports*, vol. 7, 2017.
- [11] M. Giaquinto, A. Ricciardi, A. Cutolo, and A. Cusano, "Lab-on-Fiber Plasmonic Probes for Ultrasound Detection: A Comparative Study," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, pp. 5189-5198, Nov 15 2016.
- [12] A. Micco, M. Pisco, A. Ricciardi, L. V. Mercaldo, I. Usatii, V. L. Ferrara, *et al.*, "Plasmonic light trapping in thin-film solar cells: Impact of modeling on performance prediction," *Materials*, vol. 8, pp. 3648-3670, 2015.
- [13] A. Micco, A. Ricciardi, M. Pisco, V. La Ferrara, L. V. Mercaldo, P. D. Veneri, *et al.*, "Light trapping efficiency of periodic and quasiperiodic back-reflectors for thin film solar cells: A comparative study," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, Aug 14 2013.
- [14] M. Giaquinto, A. Ricciardi, A. Aliberti, A. Micco, E. Bobeico, M. Ruvo, *et al.*, "Light-microgel interaction in resonant nanostructures," *Scientific Reports*, vol. 8, Jun 19 2018.
- [15] C. Schinke, P. Christian Peest, J. Schmidt, R. Brendel, K. Bothe, M. R. Vogt, *et al.*, "Uncertainty analysis for the coefficient of band-to-band absorption of crystalline silicon," *AIP Advances*, vol. 5, p. 067168, 2015.
- [16] P. B. Johnson and R.-W. Christy, "Optical constants of the noble metals," *Physical review B*, vol. 6, p. 4370, 1972.
- [17] T. A. König, P. A. Ledin, J. Kerszulis, M. A. Mahmoud, M. A. El-Sayed, J. R. Reynolds, *et al.*, "Electrically tunable plasmonic behavior of nanocube–polymer nanomaterials induced by a redox-active electrochromic polymer," *ACS nano*, vol. 8, pp. 6182-6192, 2014.
- [18] R. Alvarez, J. C. González, J. P. Espinós, A. R. González-Elipe, A. Cueva, and F. Villuendas, "Growth of silver on ZnO and SnO<sub>2</sub> thin films intended for low emissivity applications," *Applied Surface Science*, vol. 268, pp. 507-515, 2013.
- [19] M. Filipič, P. Löper, B. Niesen, S. De Wolf, J. Krč, C. Ballif, *et al.*, "CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> perovskite/silicon tandem solar cells: characterization based optical simulations," *Optics express*, vol. 23, pp. A263-A278, 2015.



- [20] L. J. Phillips, A. M. Rashed, R. E. Treharne, J. Kay, P. Yates, I. Z. Mitrovic, *et al.*, "Dispersion relation data for methylammonium lead triiodide perovskite deposited on a (100) silicon wafer using a two-step vapour-phase reaction process," *Data in brief*, vol. 5, pp. 926-928, 2015.
- [21] D. Grant, K. Catchpole, K. Weber, and T. White, "Design guidelines for perovskite/silicon 2-terminal tandem solar cells: an optical study," *Optics Express*, vol. 24, pp. A1454-A1470, 2016.
- [22] S. Lattante, "Electron and hole transport layers: their use in inverted bulk heterojunction polymer solar cells," *Electronics*, vol. 3, pp. 132-164, 2014.
- [23] L. H. Gao, F. Lemarchand, and M. Lequime, "Exploitation of multiple incidences spectrometric measurements for thin film reverse engineering," *Optics Express*, vol. 20, pp. 15734-15751, Jul 2 2012.
- [24] C. Stelling, C. R. Singh, M. Karg, T. A. F. König, M. Thelakkat, and M. Retsch, "Plasmonic nanomeshes: their ambivalent role as transparent electrodes in organic solar cells," *Scientific Reports*, vol. 7, Feb 15 2017.
- [25] J. R. DeVore, "Refractive indices of rutile and sphalerite," *JOSA*, vol. 41, pp. 416-419, 1951.
- [26] W. Bond, "Measurement of the refractive indices of several crystals," *Journal of Applied Physics*, vol. 36, pp. 1674-1677, 1965.

*Nel caso di Partner esterni ad ENEA, in appendice al rapporto inserire un breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività (max 2 pagine).*

**Andrea Cusano** was born on May 31, 1971, in Caserta. He received his Master degree cum Laude in Electronic Engineering on November 27, 1998 from University of Naples "Federico II", Italy and his Ph.D. in "Information Engineering" from the same university, with tutor Professor Antonello Cutolo. He is actually Associate Professor at the University of Sannio, Benevento. From 1999 his activity is focused in the field of optoelectronic devices for sensing and telecommunication applications. He was cofounder in 2005 of the spin-off company "OptoSmart S.r.l." and in 2007 of the spin-off company "MDTech". He published over 100 papers on prestigious international journals and more than 150 communications in well-known international conferences worldwide; he has 4 international patents currently in charge of prestigious industrial companies (Ansaldo STS, Alenia WASS, Optosmart and MdTEch) and more than 10 national patents. He is also referee of several scientific international journals. He is associate editor of Sensors and Transducers Journal, Journal of Sensors (Hindawi), The Open Optics Journal (Bentham), The Open Environmental & Biological Monitoring Journal (Bentham) and the International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems. He is a member of the technical committee of several international conferences such as IEEE Sensors, ICST, EWSHM, EWOFs. Andrea Cusano was principal investigator and scientific responsible of several national and international research projects. He is coauthor of more than 10 chapters published in international books and invited papers in prestigious scientific international journals. He is coeditor of 2 Special Issues (Special Issue on Optical Fiber Sensors, IEEE Sensors 2008, and Special Issue on "Fiber Optic Chemical and Biochemical Sensors: Perspectives and Challenges approaching the Nano-Era", Current Analytical Chemistry, Bentham, 2008. and of 3 scientific international books. He is also consultant for big companies of the Finmeccanica group such as Ansaldo STS and Alenia WASS. He has also collaborations with CERN in Geneva where he is working on the development of innovative sensors for high energy physics applications.

**Marco Pisco** was born in Naples, Italy in 1977. He received a Master's Degree in Information and telecommunication engineering (110/110 magna cum laude) in 2003 from the University of Naples Federico II, Italy. In 2007, he received an international Ph.D. Degree in Information Engineering at the University of Sannio, Italy, jointly with the Faculty of Electrical Engineering (FER) at the University of Zagreb, defending the thesis "Optoelectronic Devices based on 1-D and 2-D Photonic Bandgap Structures for Sensing and Communication Applications". He is currently a postdoctoral research fellow at the Optoelectronic Division - Engineering Department of the University of Sannio. He received the National Scientific Habilitation to be Associate Professor. His field of interest is in the area of optoelectronics and photonics. Specifically, he addresses research and development of optical fiber sensors and photonic bandgap-based materials and devices for sensing and communication applications. He is currently a member of the International Program Committee of the International Conference on Sensors and Electronic Instrumental Advances (SEIA) and of the Technical Program Committee of the European Workshop of Optical Fiber Sensors. He is the author and co-author of several publications, including books, international journals, national and international conferences and book chapters as well as a reviewer for IEEE, OSA and Elsevier journals.

**Alberto Micco** (March 7, 1985) received the Master Degree with honors in Telecommunications Engineering at the University of Sannio in 2011. In December 2015 he received the PhD degree in Information Engineering from University of Sannio after three years of research made in collaboration with

ENEA research center of Portici (NA) with a final thesis on “Photonic-plasmonic crystals: applications to energy harvesting and Lab-on-Fiber technology”.

Since 2015 he wins a post-doc fellow to Optoelectronic Division of University of Sannio and working principally on design, fabrication and characterization of optical fiber sensors for industrial, biomedical and research applications.

Since 2012, he has stipulated several collaborations and teaching contracts with the Regional Information Communication Technology Center (CeRICT) for projects involving sensor development for industrial environments, such as Bragg's model for railway tracking and aerospace, as well as biomedical sensors application. He participated in the design and implementation of a vibration measurement system for rotating axes with wireless data transmission within the research project SCYPRI - Smart Cylinders for flexographic printing industry.

He is co-author of 12 papers in international scientific journals, different works presented on national and international conferences, and 2 patents on a fiber optic guidance system for epidural anesthesia.

**Martino Giaquinto** (March 12th, 1990) received his Master Degree cum laudae in Electronic Engineering in July 2014 from Università degli Studi di Napoli Federico II (Italy). In April 2018 he received his PhD from Università degli Studi del Sannio (Italy), with a final dissertation concerning the development of Lab-on-Fiber devices integrated with stimuli-responsive microgels. Currently Martino Giaquinto is a Post Doctoral research fellow at Optoelectronics Group of Università degli Studi del Sannio (Department of Engineering), and his research interests include the development of multifunctional optical fiber devices based on Lab-on-Fiber Technology, with a particular focus on bio-medical applications.