



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

Martino Giaquinto<sup>1</sup>, Alberto Micco<sup>1</sup>, L. V. Mercaldo<sup>2</sup>, P. Delli Veneri<sup>2</sup>, Marco Pisco<sup>1</sup>, Andrea Cusano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Università Del Sannio- Dipartimento di Ingegneria <sup>2</sup>ENEA

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

Progetto B.1.2 "Ricerca su Tecnologie Fotovoltaiche Innovative"

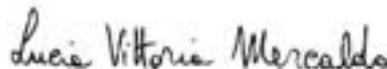
Obiettivo: Celle solari a base di film sottili innovativi di perovskiti e kesteriti – Subtask a.3: Sviluppo di architetture di dispositivo per celle tandem ad alta efficienza

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

<u>SOMMARIO</u> .....	4
<u>1. INTRODUZIONE</u> .....	5
<u>2. DEFINIZIONE DEI METODI UTILIZZATI PER LO STUDIO DELLA CELLA SOLARE</u> .....	6
<u>2.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO</u> .....	6
<u>2.2 DEFINIZIONE DEGLI OSSERVABILI</u> .....	7
<u>3. SIMULAZIONE DELLA CELLA IN CONDIZIONI NOMINALI</u> .....	9
<u>4. STUDIO PARAMETRICO PER L'OTTIMIZZAZIONE DELLA CELLA</u> .....	12
<u>4.1 PRIMO RUN: OTTIMIZZAZIONE DELL'HTL (ETL) CONSIDERANDO L'ETL (HTL) NOMINALE</u> .....	13
<u>4.2 SECONDO RUN: OTTIMIZZAZIONE DELL'HTL (ETL) CONSIDERANDO L'ETL (HTL) OTTIMIZZATO</u> .....	14
<u>4.3 SCELTA DEI PARAMETRI OTTIMALI PER ETL E HTL</u> .....	18
<u>4.4 OTTIMIZZAZIONE DELLA TUNNEL JUNCTION</u> .....	19
<u>5. SCELTA DI MATERIALI REALI PER LA CELLA OTTIMIZZATA</u> .....	21
<u>6. CONCLUSIONE</u> .....	23
<u>7. RIFERIMENTI</u> .....	24

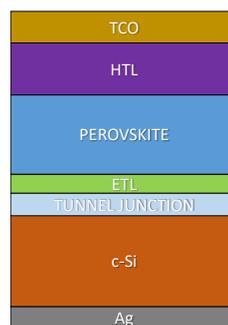
## Sommario

Questo documento descrive le attività svolte nell'ambito dell'Accordo di collaborazione tra il centro ricerche ENEA e l'Università degli Studi del Sannio avente per oggetto "Progettazione ottica di celle solari tandem perovskite/silicio". Scopo della ricerca è stato lo studio dell'effetto delle proprietà ottiche dei materiali che compongono celle solari tandem perovskite/silicio sulle prestazioni della cella stessa. In particolare, lo studio è stato focalizzato sull'individuazione delle caratteristiche ottiche che massimizzano l'assorbimento negli strati attivi e quindi l'efficienza complessiva della cella. I risultati di seguito riportati evidenziano come un'opportuna scelta di materiali e spessori per la realizzazione dei layer trasportatori di cariche (HTL e ETL) e Tunnel Junction consentano un incremento dell'assorbimento da parte dei layer in silicio e in perovskite. L'ultima fase di questo studio prevede l'identificazione di materiali, adatti a realizzare gli strati HTL, ETL e Tunnel Junction, con perdite basse ma non idealmente nulle, le cui proprietà si avvicinino quanto più possibile a quelle individuate durante la fase numerica di ottimizzazione.

## 1. Introduzione

Il mercato del fotovoltaico è dominato dalla tecnologia del silicio cristallino, che garantisce efficienze elevate a basso costo [1]. Grazie alla continua ricerca, infatti, le celle solari in silicio si stanno avvicinando al limite teorico di efficienza del 29,4% [2]. Un approccio per superare tale limite consiste nel raggruppare in un unico dispositivo a più giunzioni diversi assorbitori caratterizzati da bandgap differenti. Le celle solari a più giunzioni sono note come celle tandem. In questo contesto, di recente le celle solari in perovskite sono state identificate come promettenti candidate per la realizzazione della cella top in dispositivo a due celle che prevede l'utilizzo del silicio per la cella bottom. Infatti, l'elevata efficienza di conversione e al bandgap tunabile nel range 1.5-1.8 eV [3-5], fanno sì che le celle tandem in perovskite e silicio possano raggiungere efficienze ben al di sopra del 30% a bassi costi di produzione [6, 7].

Bisogna però considerare che nel caso delle celle tandem a 2 terminali 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. Per questo motivo, per ottenere prestazioni elevate, una scelta opportuna dei materiali da utilizzare come trasportatori di cariche diventa di cruciale importanza, in quanto tali materiali devono essere allo stesso tempo trasparenti e conduttivi, in maniera tale da assicurare sia l'assorbimento dei fotoni, sia l'estrazione dei portatori di carica. Un metodo valido che consente di scegliere in maniera opportuna sia i materiali da utilizzare, sia gli spessori, per la realizzazione dei diversi layer che costituiscono la cella, consiste nel modellare otticamente la struttura multilayer della cella al fine di studiare la distribuzione della luce all'interno di essa [8]. In questo modo si ha la possibilità di massimizzare l'assorbimento della luce da parte dei layer assorbenti e di conseguenza l'efficienza della cella. Seguendo questo approccio, in questo lavoro si è focalizzata l'attenzione sull'effetto dei layer trasportatori di carica, identificando il loro impatto sulle prestazioni delle celle tandem in silicio e perovskite, ed individuando i parametri ottimali (in termini di spessore e indice di rifrazione) che consentano di ottimizzare le prestazioni. 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 prima del layer in perovskite. Questo tipo di configurazione è anche noto come p-i-n.



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

Nel paragrafo successivo viene descritto l'ambiente di simulazione utilizzato per modellare otticamente la struttura in esame, e vengono definiti i parametri che caratterizzano il comportamento della cella. Successivamente, nel paragrafo 3, si simula il comportamento della cella nelle condizioni nominali, ovvero considerando i materiali e gli spessori tipicamente utilizzati dall'ENEA di Portici per la fabbricazione di celle in perovskite. Il risultato di questa simulazione è considerato come riferimento per gli studi di ottimizzazione descritti nei paragrafi successivi. Nel paragrafo 4, quindi, si procede con uno studio parametrico finalizzato all'individuazione degli spessori e degli indici di rifrazioni ideali tali da massimizzare le prestazioni della cella, mentre nel paragrafo 5 si studiando le caratteristiche di assorbimento della cella

solare ottimizzata reale, costituita cioè da materiali reali le cui caratteristiche ottiche sono prossime a quelle ideali individuate con la simulazione parametrica. Il paragrafo 6 è infine dedicato alle conclusioni.

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

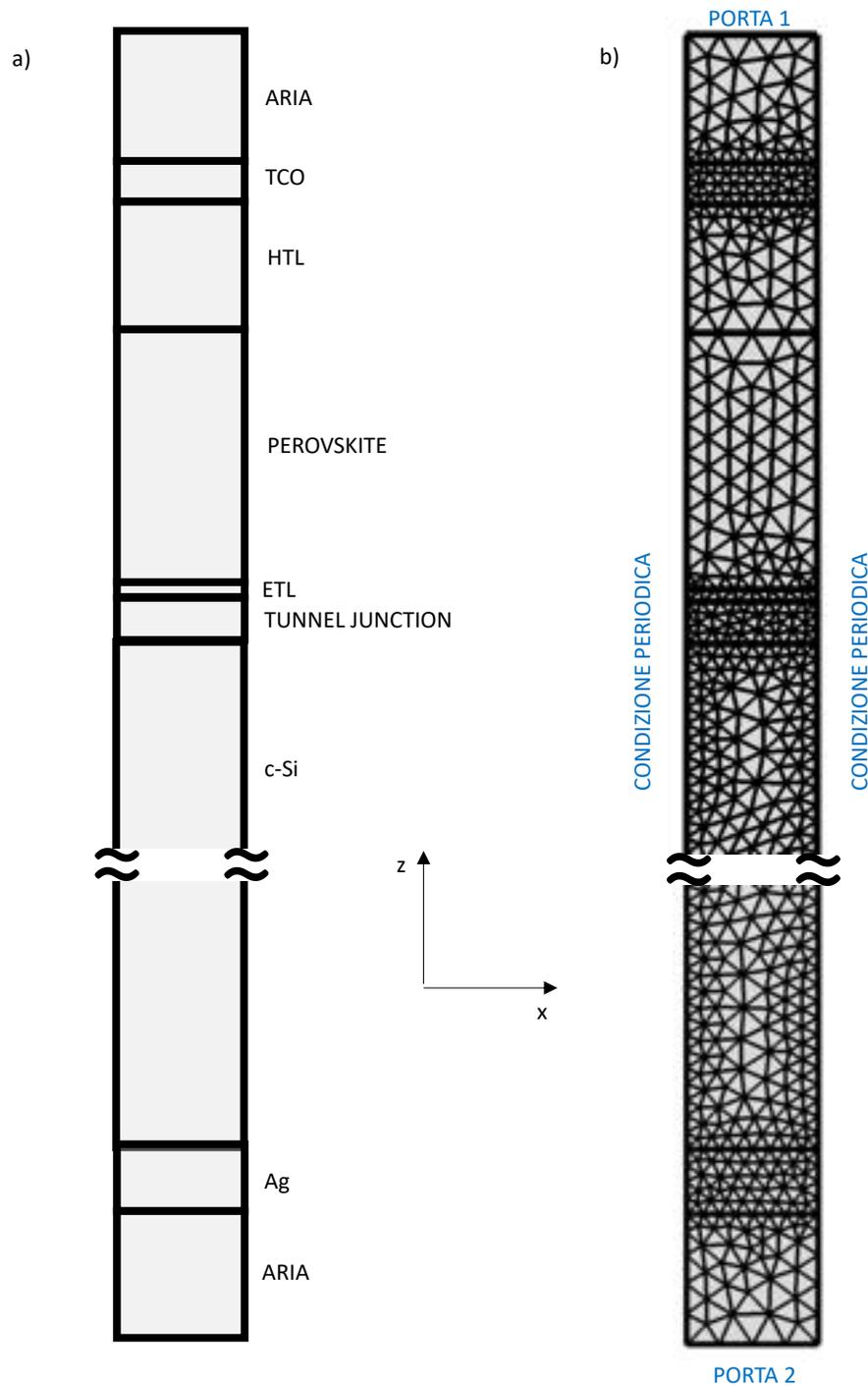
### 2.1 Descrizione del modello

Per simulare il comportamento della cella solare, e procedere quindi con l'ottimizzazione dei layer ETL, HTL e Tunnel Junction, sono state effettuate delle simulazioni numeriche utilizzando il software commerciale Comsol Multiphysics (RF module), che si basa sul metodo a elementi finiti (FEM) [9]. Il modello, seguendo l'approccio descritto in lavori precedentemente pubblicati [10-14], schematizza la cella solare come un stack bidimensionale, finito nella direzione di propagazione della luce solare incidente e infinito nella direzione trasversa. L'analisi numerica consente sia di analizzare accuratamente la propagazione negli strati intermedi che di calcolare parametri ottici globali quali l'assorbimento o la riflettanza.

Il dominio computazionale è riportato in Figura 2(a). Ogni layer è rappresentato da un rettangolo la cui base, senza perdita di generalità, è stata fissata con una lunghezza di 200 nm. Sulle facce laterali dell'intero dominio simulato sono state applicate delle condizioni al contorno periodiche di tipo Floquet. Così facendo, la soluzione individuata descrive la situazione in cui i rettangoli sono infinitamente estesi lungo la direzione orizzontale. L'altezza di ciascuno strato evidentemente corrisponde allo spessore del layer che esso rappresenta [11]. I domini di aria al di sopra e al di sotto della cella sono stati rappresentati con dei rettangoli di altezza pari a 200 nm, dopo aver verificato che tale lunghezza fosse sufficiente a garantire la stabilità della soluzione. 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 la condizione in cui i domini aria sono infinitamente estesi anche nella direzione longitudinale della cella (ovvero lungo la direzione  $z$ , facendo riferimento allo schematico in Figura 2). La porta sulla faccia superiore è stata settata come porta di eccitazione, considerando un campo elettrico polarizzato lungo la direzione  $x$  (con riferimento alla Figura 2), con potenza pari ad 1W, che si propaga lungo la direzione  $z$  (incidenza normale).

L'intero dominio è stato discretizzato con una mesh triangolare, come riportato nella Figura 2(b), fissando la dimensione massima degli elementi ad un valore pari ad un quarto di lunghezza d'onda, in maniera tale da soddisfare il criterio di Nyquist e allo stesso tempo non appesantire il calcolo computazionale (avendo preliminarmente verificato che tale dimensione è sufficiente a rendere la soluzione stabile nei confronti di un ulteriore infittimento della mesh).

Ogni materiale è stato infine caratterizzato con il suo indice di rifrazione complesso, la cui parte reale ( $n_{\text{materiale}}$ ) e parte immaginaria ( $k_{\text{materiale}}$ ), in funzione della lunghezza d'onda, sono stati ricavati da lavori presenti in letteratura (si rimanda al paragrafo 3 per maggiori dettagli).



**Figura 2:** (a) Dominio computazionale e (b) discretizzazione della geometria simulata in Comsol Multiphysics (RF Module).

### 2.2 Definizione degli osservabili

Le simulazioni condotte consentono di calcolare la distribuzione del campo elettromagnetico all'interno del dominio, e calcolare quindi i parametri fondamentali per lo studio del comportamento della cella solare, e in particolare l'assorbimento di potenza nei vari layer.

La luce assorbita all'interno dei singoli layer è stata calcolata come integrale delle perdite esteso al dominio di interesse, considerando una potenza in ingresso pari ad 1W [12]:

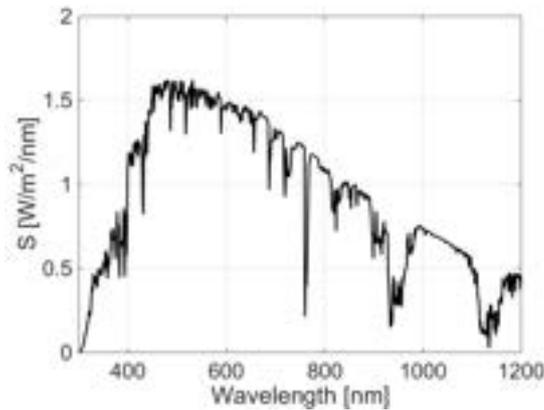
$$A(\lambda) = \int_S Q_{loss} dS \quad (1)$$

Nella (1) il termine  $Q_{loss}$  in generale rappresenta la somma delle perdite resistive e magnetiche, ma il secondo contributo può essere considerato nullo nel nostro caso. Pertanto l'assorbimento in un layer lo si è ottenuto integrando le perdite resistive all'interno del layer stesso. Si osservi che poiché le simulazioni verranno condotte modellando la cella con uno stack bidimensionale, l'integrale è esteso ad una superficie piuttosto che ad un volume.

Noto lo spettro di assorbimento, effettuandone un integrale rispetto alla lunghezza d'onda si otterrebbe la quantità di potenza totale assorbita da parte dei singoli layer in un certo range di lunghezze d'onda. Bisogna però considerare che la valutazione dello spettro di assorbimento da parte dei singoli layer, e quindi il suo valore integrale, non costituisce uno strumento sufficiente per determinare il comportamento ottico della cella. Questo perché lo spettro della radiazione solare non è una funzione costante della lunghezza d'onda, ma, come si può osservare in Figura 3, presenta un massimo in corrispondenza di circa 500nm. Per questo motivo il comportamento della cella verrà valutato sulla base della corrente di corto circuito  $J_{sc}$  valutata secondo la formula (2) supponendo che il 100% della potenza assorbita venga trasformato in corrente elettrica [12].

$$J_{sc} = \frac{q}{c \cdot h} \int A(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \lambda \cdot d\lambda \quad (2)$$

dove  $q$  è la carica dell'elettrone,  $c$  la velocità della luce nel vuoto,  $h$  è la costante di Plank. Con  $S(\lambda)$  si indica lo spettro solare AM 1.5, mostrato nel grafico in Figura 4, mentre  $A(\lambda)$  è lo spettro di assorbimento calcolato mediante la (1). Dalla (2) è chiaro che nel calcolo della corrente  $J_{sc}$  l'assorbimento ad una certa lunghezza d'onda è pesato per il valore che lo spettro solare assume in corrispondenza della stessa lunghezza d'onda, pertanto la  $J_{sc}$  costituisce un parametro di merito del comportamento della cella più affidabile rispetto all'integrale dello spettro di assorbimento.



**Figura 3:** Spettro di irradianza solare standard (AM 1.5).

Infine, andando a considerare il parametro  $S_{11}$  della matrice di scattering (considerando che, con riferimento alla Figura 2, si è denominata "Porta 1" la porta di eccitazione), si determinerà lo spettro di riflessione come:

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

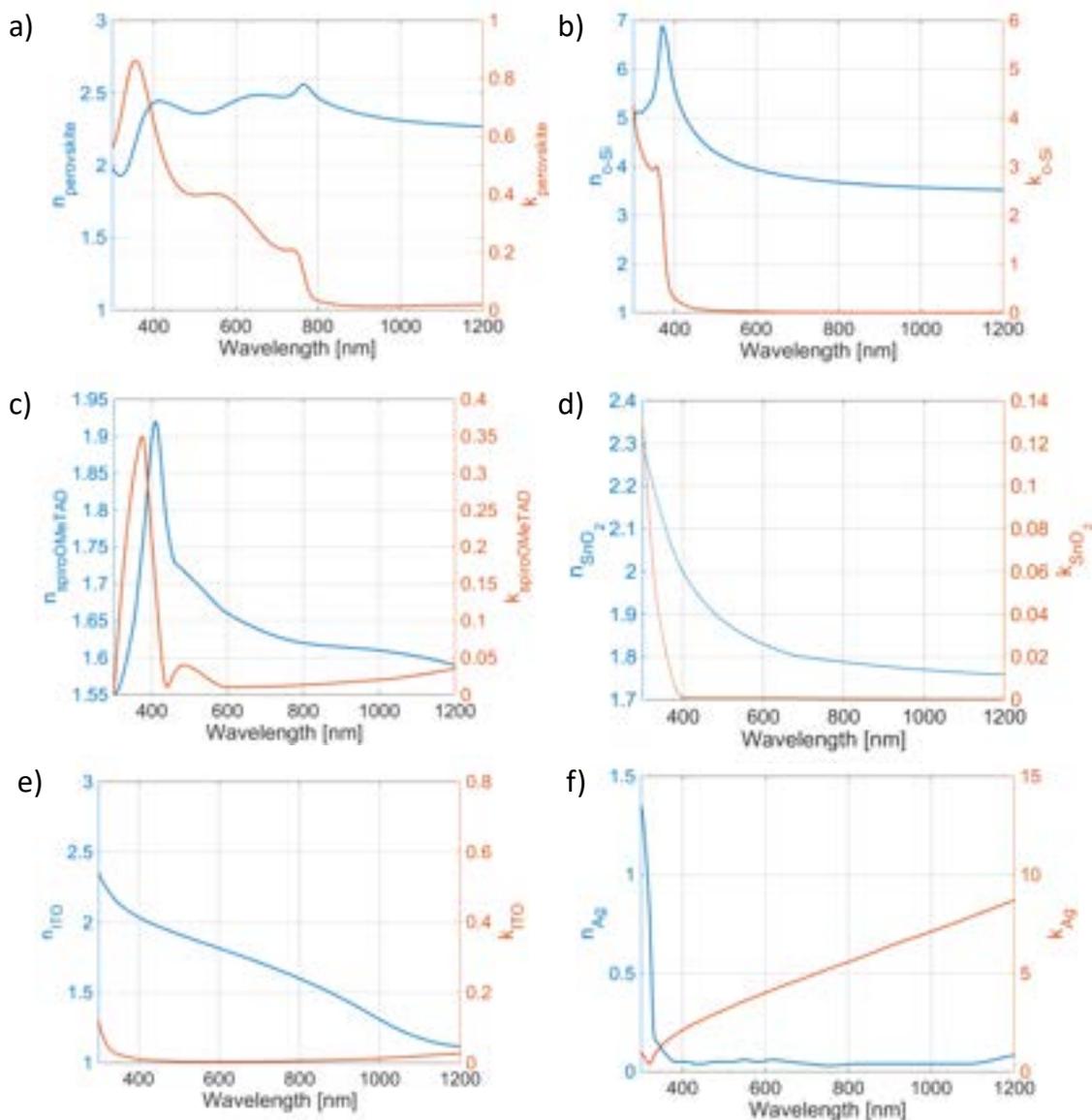
Una volta definiti gli osservabili, quindi si procede con lo studio delle prestazioni della cella solare in esame, avendo come obiettivo la massimizzazione della  $J_{sc}$  nei layer di perovskite e di silicio.

### 3. Simulazione della cella in condizioni nominali

Prima di procedere con gli studi finalizzati all'ottimizzazione degli spessori e dei materiali da utilizzare come ETL, HTL e Tunnel Junction, si è studiato il comportamento della cella nelle condizioni nominali, riassunte nella Tabella 1 e nella Figura 3, con riferimento allo schematico in Figura 1. Si osservi che la cella in silicio prevede nella realtà anche delle regioni drogate di tipo n e di tipo p, ma dal momento in cui queste regioni non hanno alcuna influenza da un punto di vista ottico [8], in questo studio la cella in silicio è descritta da un unico layer (le cui proprietà ottiche sono quelle relative al silicio intrinseco, ricavate da [15] e graficate in Figura 4b) con un contatto in argento (Ag). Le proprietà ottiche dell'argento sono state ricavate da [16] e riportate in Figura 4f. Per quanto riguarda il layer di silicio si è considerato uno spessore pari a  $270\mu\text{m}$ , mentre lo spessore del layer di argento è di  $100\text{nm}$ . Al di sopra del layer di silicio vi è depositato un layer conduttivo che pone in contatto la cella in silicio con quella in perovskite. Si è considerato che tale layer, indicato nello schematico di Figura 1 come "Tunnel Junction" sia costituito da Indium-Tin-Oxide (ITO), con spessore nominale pari a  $65\text{nm}$ . Le proprietà ottiche dell'ITO sono state ricavate da [17] e riportate nel grafico in Figura 4e. Il materiale considerato per l'ETL è  $\text{SnO}_2$  (proprietà ottiche ricavate da [18] e riportate in Figura 4d), con spessore pari a  $20\text{nm}$ , mentre per l'HTL (posto al di sopra dello strato in perovskite) si è considerato lo spiro-OMeTAD spesso  $200\text{nm}$ , le cui proprietà ottiche sono state ricavate da [19] e graficate in Figura 4c. Per lo strato in perovskite si è invece utilizzato il Methylammonium Lead Iodide ( $\text{MAPbI}_3$ ), il cui indice di rifrazione (ricavato da [20]) è riportato in Figura 4a. Infine, al di sopra dell'HTL, si è considerato uno strato di ossido conduttivo (TCO) di spessore pari a  $65\text{nm}$ , costituito da ITO.

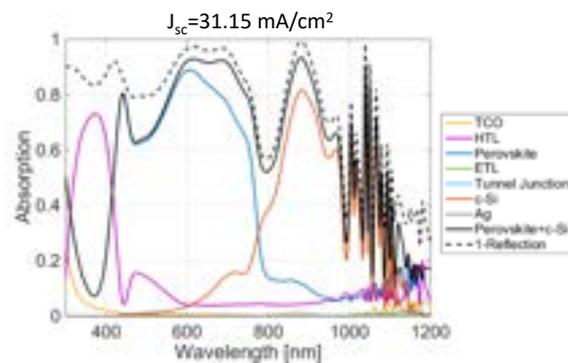
	Spessore	Materiale
TCO	65nm	ITO
HTL	200nm	Spiro-OMeTAD
Perovskite	400nm	$\text{MAPbI}_3$
ETL	20nm	$\text{SnO}_2$
TUNNEL	65nm	ITO
SILICIO	$270\mu\text{m}$	C-Si
ARGENTO	100nm	Ag

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



**Figura 4:** Indici di rifrazione dei materiali che costituiscono la cella. (a) perovskite, (b) Silicio, (c) Spiro-OMeTAD, (d)  $\text{SnO}_2$ , (e) ITO, (f) Ag.

Al fine di analizzare i fattori che limitano la massimizzazione dell'assorbimento nei layer di perovskite e silicio, nel grafico mostrato in Figura 5 sono riportati gli spettri di assorbimento in tutti i layer che costituiscono la cella (calcolati mediante la (3), a partire da  $Q_{\text{loss}}$  ricavata numericamente) esplicitando, con la curva nera, anche la somma degli assorbimenti nei due layer assorbenti (silicio e perovskite). Nello stesso grafico è inoltre riportato il valore (1-Reflection), ovvero l'aliquota di potenza che non viene riflessa all'interfaccia aria/TCO (curva nera tratteggiata), e che quindi è trasmessa all'interno della cella.

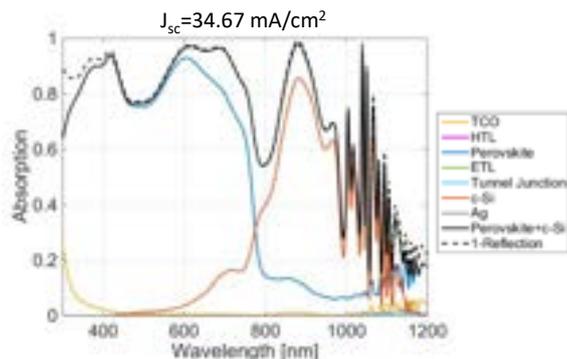


**Figura 5:** Spettri di assorbimento dei layer che costituiscono la cella in condizioni nominali.

Dal grafico in Figura 5 si può osservare che non tutta la potenza trasmessa all'interno della cella viene assorbita dai layer in silicio e in perovskite, causando quindi una perdita di efficienza. Il fatto che le due curve non coincidano vuol dire essenzialmente che parte della potenza viene assorbita dagli altri layer che costituiscono la cella. Tale assorbimento indesiderato è legato alle perdite nei materiali, pertanto l'unico modo per limitare il loro contributo consiste nella progettazione di una cella con materiali le cui perdite (e quindi la parte immaginaria dell'indice di rifrazione) siano quanto più basse possibile. Ovviamente, una diminuzione dello spessore dei layer contribuisce a limitare l'effetto delle perdite legate ai materiali. Si osservi che uno dei layer che assorbe di più è l'HTL: dal grafico infatti si evince un picco di assorbimento di circa 0.74 intorno a 370nm. La luce trasmessa nella cella nell'intorno di questa lunghezza d'onda dà quindi un basso contributo all'assorbimento nei layer attivi.

Il valore della  $J_{sc}$  riportato in alto nel grafico di Figura 5 è dato dalla somma dei contributi di assorbimento dello strato di perovskite e di silicio. Andando a valutare i contributi dei due layer considerati singolarmente si osserva che allo strato di perovskite è associata una  $J_{sc-p}=20.07 \text{ mA/cm}^2$  mentre allo strato in silicio corrisponde una corrente pari a  $J_{sc-s}=11.08 \text{ mA/cm}^2$ . Vale la pena osservare che per una cella tandem a 2 terminali lo squilibrio di corrente evinto tra i due strati attivi (che sono elettricamente in serie) non è una condizione ottimale, in quanto la corrente totale generata sarebbe limitata dal contributo più basso. Lo squilibrio tra le correnti, invece, non limiterebbe le prestazioni di una cella tandem a 4 terminali, in quanto in tal caso le due sub-celle che compongono la cella tandem sono accoppiate solo otticamente. Per riequilibrare i contributi, e porre quindi la cella a 2 terminali nelle condizioni ottimali anche da un punto di vista elettrico, è necessario agire sullo strato di perovskite, scegliendo un materiale con bandgap differente, e/o agendo sul suo spessore, in maniera tale da ridurre il contributo di assorbimento da parte del layer in perovskite, e di conseguenza aumentare quello del silicio. Va considerato, infatti, che non è ovvio riuscire ad ottenere un matching tra le correnti agendo solo sugli strati trasportatori e sulla Tunnel Junction, che sono oggetto di questo studio. D'altro canto, una variazione delle proprietà e dello spessore della perovskite, al fine di garantire un bilanciamento tra le correnti, richiederebbe una modifica della configurazione attualmente utilizzati dall'ENEA e della relativa fabbricazione di celle in perovskite. Pertanto, in accordo con l'ENEA, si è proceduto con lo studio nonostante lo sbilanciamento di correnti al fine di comprendere l'impatto della variazione delle proprietà ottiche degli strati trasportatori e Tunnel Junction sull'assorbimento totale. Per le considerazioni fatte precedentemente, tale approccio risulta essere più rigoroso anche da un punto di vista elettrico per una cella tandem a 4 terminali. Lo studio a partire da una cella bilanciata lo si rimanda ad una successiva fase, a valle dell'individuazione delle caratteristiche dello strato di perovskite compatibili con il processo di fabbricazione dell'ENEA.

Prima di procedere con l'ottimizzazione, al fine di valutare più approfonditamente l'effetto delle perdite dei layer oggetto di studio (ETL, HTL e Tunnel Junction), si è effettuata la stessa simulazione considerando idealmente nulle le perdite dei tre layer (lasciandone inalterato l'indice di rifrazione). I risultati, riportati in Figura 6, mostrano che rimuovendo banalmente le perdite dell'ETL, dell'HTL e della Tunnel Junction quasi tutta la potenza trasmessa all'interfaccia aria/TCO viene assorbita dai layer di silicio e di perovskite. Si osservi che le differenze tra la curva nera solida e la curva nera tratteggiata sono più accentuate a basse lunghezze d'onda, dove l'assorbimento del layer TCO è maggiore.



**Figura 6:** Spettri di assorbimento dei layer che costituiscono la cella in condizioni nominali eliminando le perdite di HTL, ETL e Tunnel.

In ogni caso si osservi che la potenza trasmessa all'interno della cella (e quindi quella assorbita dai layer di silicio e di perovskite) non ha un andamento piatto in lunghezza d'onda (anche nel caso in cui la cella è stata simulata senza considerare le perdite dell'HTL, dell'ETL e della Tunnel Junction). Questo fenomeno è dovuto all'interferenza tra le diverse componenti di luce trasmesse e riflesse ad ogni interfaccia tra materiali differenti, tali da ridurre il contributo di potenza che effettivamente si propaga all'interno della cella e che quindi può essere assorbito dal silicio e dalla perovskite. Tali meccanismi di interferenza sono essenzialmente determinati dalla parte reale dell'indice di rifrazione dei vari layer e dal loro spessore. Questo implica che ogni layer può essere dimensionato in maniera tale da massimizzare il contributo assorbito dal layer di perovskite e da quello di silicio. Nel paragrafo successivo quindi sono presentati i risultati di una simulazione volta ad individuare i valori di spessore e indice di rifrazione per l'HTL, per l'ETL e per la Tunnel Junction tali da massimizzare le prestazioni della cella tandem.

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

Per calcolare gli spessori e gli indici di rifrazione ottimali dell'ETL, dell'HTL e della Tunnel Junction, si è effettuato uno studio parametrico analizzando le caratteristiche di assorbimento al variare dello spessore e dell'indice di rifrazione 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  $J_{sc}$  complessiva nel silicio e nella perovskite, seguendo l'approccio riportato in [8]. Vale la pena ricordare, infatti, che il parametro che fornisce in maniera sintetica informazioni sulle prestazioni ottiche della cella è la corrente di cortocircuito definita dalla (2), in quanto tiene in conto dell'assorbimento, dello spettro solare, e dell'energia dei fotoni.

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 calcolando il comportamento della cella facendo variare 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

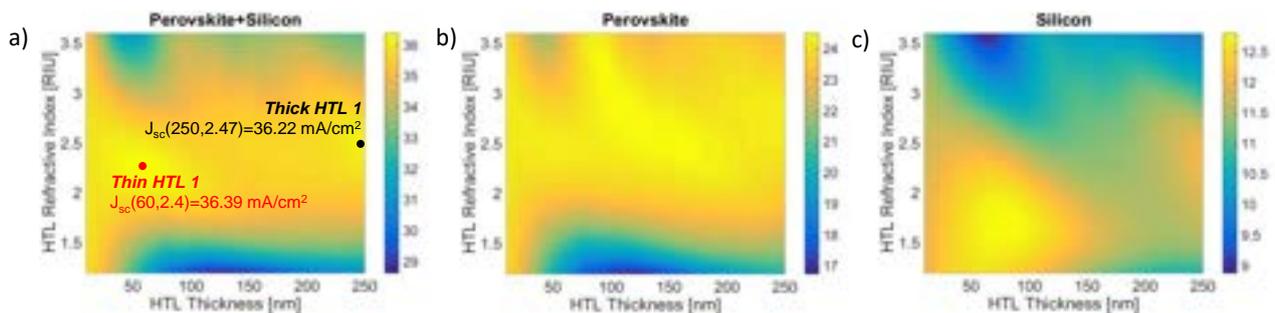
di rifrazione, e 10-250nm per gli spessori. Il valore di  $k$  del layer da ottimizzare è stato considerato nullo, simulando quindi un layer idealizzato, ossia senza perdite. Tutti gli altri parametri della cella sono costanti e uguali ai valori nominali (se non diversamente specificato).

Con un primo run di simulazioni sono quindi state valutate le caratteristiche di assorbimento della cella al variare dell'indice di rifrazione dell'ETL, considerando in ingresso l'HTL nominale (incluse le perdite), e viceversa. Una volta determinati dei parametri sub-ottimi con il primo run di simulazione, essi sono stati considerati come parametri di ingresso per un secondo run di simulazioni, finalizzate ad ottenere i parametri ottimi. Tale procedimento può essere chiaramente iterato fino a che non si converge verso una soluzione con la precisione desiderata, intesa come differenza tra il risultato di un'iterazione e quello dell'iterazione precedente.

#### 4.1 Primo run: ottimizzazione dell'HTL (ETL) considerando l'ETL (HTL) nominale

In Figura 7a è riportato il valore della  $J_{sc}$  nel silicio e nella perovskite al variare dell'indice di rifrazione e dello spessore dell'HTL, considerando in ingresso l'ETL nominale, ossia costituito da  $\text{SnO}_2$  (le cui proprietà ottiche sono riportate in Figura 4d) con spessore 20nm.

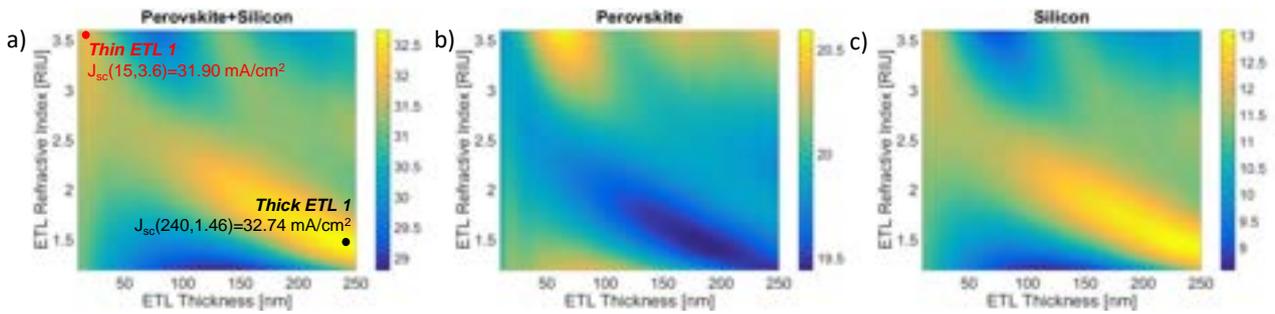
Dalla Figura 7a, tenendo in considerazione la scala di colore che va dal blu (bassi valori della  $J_{sc}$ ) al giallo (alti valori della  $J_{sc}$ ), si individuano facilmente due coppie di indici e spessori tali da massimizzare la corrente nei range considerati. Le due soluzioni sono state evidenziate nel grafico con due punti di colorazione differente: rosso, corrispondente alla soluzione denominata "Thin HTL 1" (spessore di 60nm e indice di rifrazione pari a 2.4), per la quale si ottiene una corrente pari a circa 36.4  $\text{mA}/\text{cm}^2$ , e nero corrispondente alla soluzione denominata "Thick HTL 1" (spessore di 250nm e indice di rifrazione pari a 2.47), per cui si ottiene una corrente pari a circa 36.2  $\text{mA}/\text{cm}^2$ . La denominazione assegnata alle due soluzioni fa chiaramente riferimento al valore di spessore  $t_{HTL}$  individuato, e al run di simulazione considerato. È interessante osservare che la corrente assume valori elevati (al di sopra di 35 $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) in tutta la fascia di indici di rifrazione compresa tra circa 1.8 e circa 3, il che fornisce abbastanza gradi di libertà nella scelta del materiale e dello spessore da depositare.



**Figura 7:** Andamento della corrente  $J_{sc}$  in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'HTL, in presenza dell'ETL nominale. (a) Corrente totale nel silicio e nella perovskite, (b) contributo di corrente del layer di perovskite, (c) contributo di corrente del layer di silicio.

Mentre in Figura 7a è riportata la  $J_{sc}$  totale nel silicio e nella perovskite, in Figura 7b e 7c sono riportate invece le  $J_{sc}$  calcolate rispettivamente nel layer in perovskite e in quello in silicio considerati singolarmente. Confrontando i grafici in Figura 7b e 7c con quello in Figura 7a ci si accorge subito che le soluzioni individuate sono tali da massimizzare l'assorbimento in entrambi i layer.

Seguendo lo stesso procedimento, si è valutata la  $J_{sc}$  nel silicio e nella perovskite facendo variare indice di rifrazione dell'ETL, considerando in ingresso l'HTL nominale, e cioè costituito da spiro-OMeTAD (proprietà ottiche in Figura 4c) di spessore pari a 200nm. I risultati sono mostrati in Figura 8a, e, come si può osservare, anche in questo caso sono state individuate due soluzioni, denominate "Thin ETL 1" (spessore di 15nm e indice di rifrazione pari a 3.6), con valore di corrente di circa 32.7 mA/cm<sup>2</sup> e "Thick ETL 1" (spessore di 240nm e indice di rifrazione pari a 1.46), a cui corrisponde una corrente di 31.9 mA/cm<sup>2</sup>.



**Figura 8:** Andamento della corrente  $J_{sc}$  in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'ETL, in presenza dell'HTL nominale. (a) Corrente totale nel silicio e nella perovskite, (b) contributo di corrente del layer di perovskite, (c) contributo di corrente del layer di silicio.

Le due soluzioni non corrispondono ai massimi della corrente che si ottengono nei singoli layer di silicio e di perovskite presi singolarmente. Da Figura 8b e 8c, infatti, si osserva che le soluzioni ottime tendono a ridurre il contributo di assorbimento nella perovskite e a massimizzare quello nel silicio tendendo verso un equilibrio tra i due strati. Questo risultato può essere spiegato considerando che, rispetto al percorso della luce, l'ETL è posizionato dopo lo strato di perovskite e prima del silicio, avendo quindi un maggiore effetto su quest'ultimo.

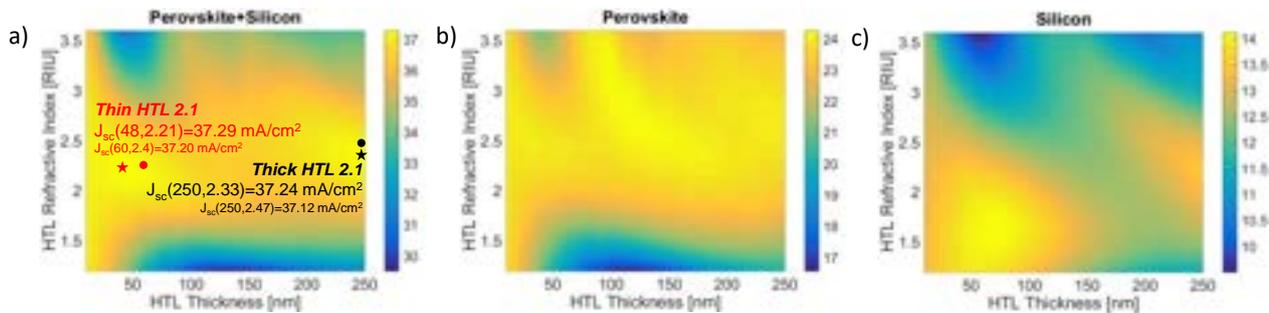
Si osservi, inoltre, che i contour plot della Figura 8 appaiono molto differenti da quelli della Figura 7 e il massimo della corrente ottenuto ottimizzando l'ETL, in presenza dell'HTL nominale (32.7 mA/cm<sup>2</sup>), è inferiore rispetto al massimo della corrente che invece si è ottenuto ottimizzando l'HTL considerando in ingresso l'ETL nominale (36.4 mA/cm<sup>2</sup>). Questo risultato è dovuto al fatto che l'HTL nominale, essendo costituito da spiro OMeTAD, ha delle perdite maggiori rispetto a quelle dell'SnO<sub>2</sub> che invece costituisce l'ETL, come si evince confrontando i valori di  $k$  della Figura 4c con quelli della Figura 4d. Questo aspetto è chiaramente evidente anche dalla Figura 5, in cui, come discusso precedentemente, si osserva un pronunciato assorbimento a basse lunghezze d'onda da parte dell'HTL, favorito anche dal fatto che esso precede gli altri layer che costituiscono la cella (tranne che per il TCO) rispetto al percorso della luce.

#### 4.2 Secondo Run: ottimizzazione dell'HTL (ETL) considerando l'ETL (HTL) ottimizzato

Una volta ottenuti i valori di spessore e di indice di rifrazione ottimali per l'HTL e per l'ETL, si è proceduto quindi con una seconda iterazione, al fine di verificare di quanto cambiano le soluzioni se si vanno a considerare come parametri di ingresso le soluzioni ottimali ottenute con il primo run. In altri termini, se prima abbiamo ottimizzato l'HTL considerando l'ETL nominale e viceversa, adesso andremo ad ottimizzare l'HTL (ETL) in presenza dell'ETL (HTL) ottimizzato. Ricordiamo che per ogni layer abbiamo individuato due soluzioni, denominate "Thin HTL 1", "Thick HTL 1", "Thin ETL 1", "Thick HTL 1". In totale quindi sono state

effettuate altre quattro simulazioni parametriche, ossia una per ogni soluzione precedentemente individuata.

In Figura 9 sono riportate le  $J_{sc}$  al variare dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'HTL considerando in ingresso un ETL ideale il cui spessore e il cui indice di rifrazione sono dati dalla soluzione "Thin ETL 1" (rispettivamente 15nm e 3.6).

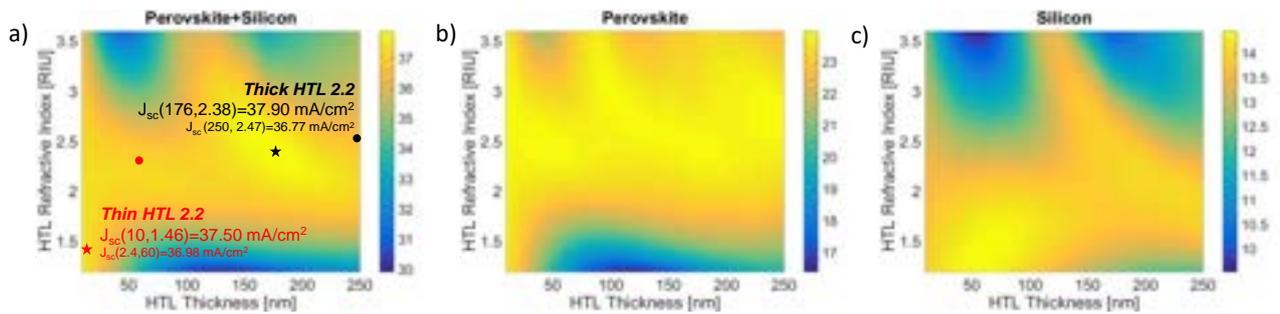


**Figura 9:** Andamento della corrente  $J_{sc}$  in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'HTL, in presenza dell'ETL ottimizzato (soluzione Thin ETL 1 della Figura 7a). (a) Corrente totale nel silicio e nella perovskite, (b) contributo di corrente del layer di perovskite, (c) contributo di corrente del layer di silicio.

Si osservi che il contour plot mostrato in Figura 9a non differisce in maniera sostanziale da quello mostrato in Figura 7a. Dalla Figura 9a emergono, infatti, ancora una volta due massimi locali (denominate Thin HTL 2.1 e Thick HTL 2.1 e messi in evidenza rispettivamente da una stella rossa e una nera), che sono molto vicini a quelli ottenuti con il run precedente. Il valore della  $J_{sc}$ , risulta leggermente più alto rispetto a quello ottenuto con il run precedente ( $37.29 \text{ mA/cm}^2$  per la soluzione "Thin HTL 2.1" e  $37.24 \text{ mA/cm}^2$  per la soluzione "Thick HTL 2.1"). L'aumento dell'assorbimento totale è da imputare anche al fatto che, a differenza del caso precedente, in questo caso non sono contemplate le perdite dell'ETL. È interessante osservare che se si calcola la  $J_{sc}$  in corrispondenza dei valori di indice di rifrazione e spessore individuati al run precedente, si ottengono dei valori molto prossimi a quelli corrispondenti alle nuove soluzioni ottime, il che indica di fatto che la soluzione individuata è stabile.

Confrontando la Figura 9b con la 7b e la Figura 9c con la 7c ci si rende conto che passando dal run 1 al run 2, essenzialmente il contributo di corrente che migliora è quello relativo allo strato di silicio. Anche in tal caso il risultato può essere spiegato considerando che l'ETL è posizionato dopo la perovskite, pertanto l'annullamento delle perdite (e una prima ottimizzazione) comporta un aumento del contributo assorbito da parte del layer successivo, ovvero quello di silicio. Come per il run 1, le soluzioni ottime tendono comunque a massimizzare i contributi di assorbimento di entrambi i layer attivi, e lo strato in perovskite continua ad essere quello che dà contributo maggiore.

Andiamo a vedere adesso come cambiano le soluzioni se in ingresso si considera l'ETL ottimizzato con spessore maggiore, ovvero la soluzione denominata "Thick ETL 1" (Figura 10). In questo caso il contour plot che mostra l'andamento della corrente  $J_{sc}$  in funzione dell'indice di rifrazione e dello spessore dell'HTL (Figura 10a) appare differente rispetto a quello ottenuto al primo run (Figura 7a).



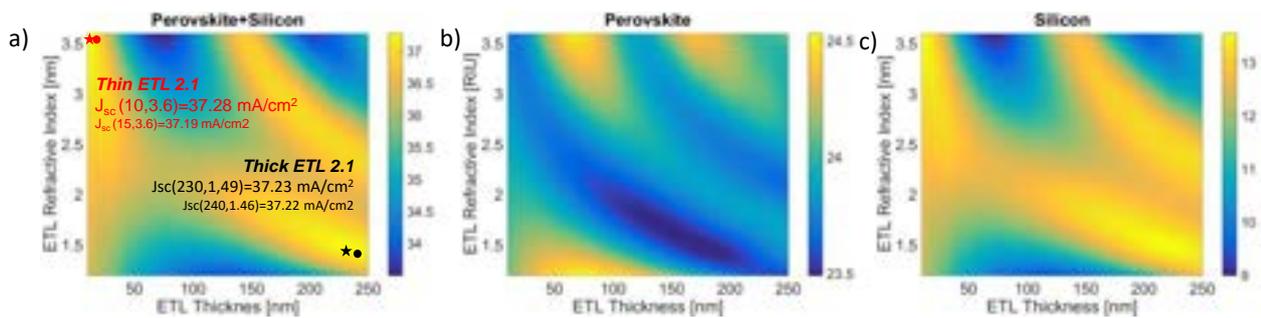
**Figura 10:** Andamento della corrente  $J_{sc}$  in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'HTL, in presenza dell'ETL ottimizzato (soluzione Thick ETL 1 della Figura 7a). (a) Corrente totale nel silicio e nella perovskite, (b) contributo di corrente del layer di perovskite, (c) contributo di corrente del layer di silicio.

Il massimo locale individuato nella regione ad alti spessori (soluzione “Thick HTL 2.2”) lo si ottiene in corrispondenza di uno spessore pari a 176nm (e indice di rifrazione pari a 2.38), ed è quindi abbastanza distante dalla soluzione precedente (250nm e 2.47). Il valore della  $J_{sc}$  ottenuto in corrispondenza della soluzione “Thick HTL 2.2” è pari a 37.90 mA/cm<sup>2</sup>, e risulta più elevata rispetto al valore di corrente di 36.22 mA/cm<sup>2</sup> individuato al run precedente. È interessante inoltre osservare che, nel contour plot in Figura 10a, il valore di corrente corrispondente a spessore di 250nm e indice di rifrazione di 2.47 è pari a 36.77 mA/cm<sup>2</sup>. Questo valore è prossimo al valore di corrente massimo (36.22 mA/cm<sup>2</sup>) ottenuto con il run precedente in corrispondenza della stessa coppia spessore-indice (soluzione “Thick HTL 1”).

La soluzione a bassi spessori (“Thin HTL 2.2”) invece la si ottiene in corrispondenza di uno spessore di 10nm e indice di rifrazione pari a 1.46. La corrente corrispondente a questa soluzione è 37.5 mA/cm<sup>2</sup>. Anche in questo caso, se andiamo a considerare i valori di spessore e indice di rifrazione individuati al primo run (rispettivamente 60nm e 2.4) si ottiene un valore di corrente (pari a 36.98 mA/cm<sup>2</sup>) che è più basso rispetto a quello della soluzione ottima “Thin HTL 2.2” ma non differisce molto rispetto ai 36.66 mA/cm<sup>2</sup> ottenuti con il primo run (“Thin HTL 1”).

Confrontando la Figura 10b (run 2) con la Figura 7b (run 1) si può osservare che la corrente nella perovskite in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'HTL rimane pressoché inalterata se si considera in ingresso l'ETL nominale o quello ottimizzato. Invece, per quanto riguarda la corrente nel silicio, da un confronto tra Figura 10c e 7c si può notare che in presenza dell'ETL ottimizzato (con spessore alto) compare un massimo locale per la corrente nella regione individuata da spessori di HTL nell'intorno di 150nm. Anche in tal caso le soluzioni ottime tendono a massimizzare i contributi di assorbimento di entrambi i layer attivi.

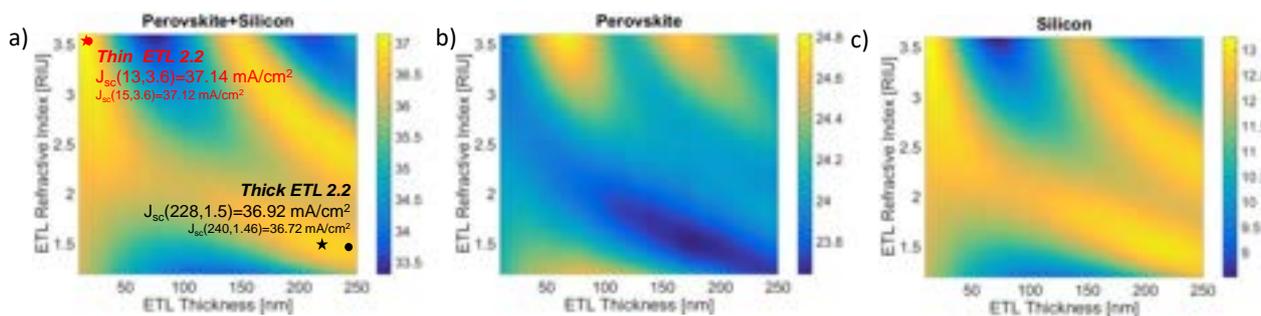
Allo stesso modo di quanto descritto per l'HTL, si è proceduto con un secondo run di simulazioni per ottimizzare ulteriormente l'ETL, considerando in ingresso le soluzioni ottimali per l'HTL individuate al primo run. In Figura 11 sono riportati i risultati ottenuti considerando in ingresso la soluzione “Thin HTL 1”. Da un confronto tra Figura 11a e Figura 8a si nota che con il secondo run di simulazioni il massimo locale nella regione a bassi spessori risulta più enfatizzato. Inoltre, nella regione ad alti spessori si enfatizza un altro massimo locale, per indici di rifrazione superiori a 2, che risultava solo leggermente accennato nel contour plot di Figura 8a. Le soluzioni Thin ETL 2.1 e Thick ETL 2.1 risultano essere molto prossime alle corrispondenti ottenute con il primo run di simulazioni.



**Figura 11:** Andamento della corrente  $J_{sc}$  in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'ETL, in presenza dell'HTL ottimizzato (soluzione Thin HTL 1 della Figura 8a). (a) Corrente totale nel silicio e nella perovskite, (b) contributo si corrente del layer di perovskite, (c) contributo di corrente del layer di silicio.

Più dettagliatamente la soluzione “Thin ETL 2.1” corrisponde ad uno spessore di 10nm (al primo run si era ottenuto 15nm) e indice di rifrazione di 3.6 (identico a quello del primo run), con una corrente di 37.28 mA/cm<sup>2</sup>. Tale valore di corrente è circa il 17% maggiore rispetto a quello ottenuto al primo run (con l’HTL nominale in ingresso), ma molto simile ai 37.19 mA/cm<sup>2</sup> che si otterrebbero considerando spessore e indice di rifrazione ottenuti al primo run (soluzione “Thin ETL 1”, spessore 15nm e indice di rifrazione 3.6) considerando in ingresso la soluzione “Thin HTL 1” piuttosto che i valori nominali dell’HTL. La differenza tra il massimo di corrente calcolato a bassi spessori con il secondo run e quella calcolata al primo run è da imputare principalmente al fatto che il layer di HTL nominale assorbe molta potenza, soprattutto a basse lunghezze d’onda.

Da un confronto tra Figura 11b (run2) e 8b (run 1) e tra Figura 11c (run 2) e 8c (run 1) è possibile osservare che la presenza di un massimo locale più accentuato nella regione ad alti spessori e ad alti indici è dovuta principalmente allo strato di silicio. Nello strato di perovskite invece si può osservare un aumento quasi uniforme della corrente di circa 4 mA/cm<sup>2</sup>.



**Figura 12:** Andamento della corrente  $J_{sc}$  in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'ETL, in presenza dell'HTL ottimizzato (soluzione Thick HTL 1 della Figura 8a). (a) Corrente totale nel silicio e nella perovskite, (b) contributo si corrente del layer di perovskite, (c) contributo di corrente del layer di silicio.

Infine, si è calcolata la corrente in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione dell'ETL, considerando in ingresso l’HTL ottimizzato al primo run per alti spessori (soluzione “Thick HTL 1”). Dalla Figura 12 si può osservare un risultato che è qualitativamente analogo a quello mostrato in Figura 11 (ottenuto considerando in ingresso la soluzione “Thin HTL 1”). Questo vuol dire che lo spessore e l'indice di rifrazione dell’HTL ideale (senza perdite) non influenza la scelta dell’ETL, e che valgono tutte le considerazioni fatte precedentemente, nel caso dell’ottimizzazione dell’ETL considerando in ingresso la soluzione “Thin ETL 1”.

Per bassi spessori si individua un massimo in corrispondenza di uno spessore di 15nm e indice di rifrazione di 3.6, a cui corrisponde una corrente di 37.14 mA/cm<sup>2</sup> (soluzione “Thin ETL 2.2”), mentre per alti spessori il massimo di corrente (pari a 36.92 mA/cm<sup>2</sup>) lo si ottiene in corrispondenza di uno spessore di 228nm e di un indice di rifrazione pari a 1.5.

### 4.3 Scelta dei parametri ottimali per ETL e HTL

Nel paragrafo precedente si è mostrato l’andamento della corrente di cortocircuito J<sub>sc</sub> in funzione dell’indice di rifrazione e dello spessore dei due layer (HTL e ETL) che sono parte integrante della cella in perovskite, con particolare attenzione alle coppie spessore-indice di rifrazione in corrispondenza delle quali il valore della corrente è massimizzato. In particolare per ogni layer sono state individuate due possibili coppie, valutando la loro evoluzione in funzione di diversi run di simulazione. I risultati principali delle simulazioni sono riassunti nelle Tabelle 2 e 3 relative all’ottimizzazione dell’HTL e dell’ETL, rispettivamente .

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.

Per determinare i valori di spessore e di indice di rifrazione dell’HTL e dell’ETL tali da massimizzare l’assorbimento nei layer attivi un criterio valido potrebbe essere quello di scegliere le combinazioni tali da ottenere il valore massimo della J<sub>sc</sub> tra quelli riportati nelle Tabelle 2 e 3. In tal caso la soluzione ottima corrisponde a t<sub>ETLopt</sub>=240nm, n<sub>ETLopt</sub>=1.46, t<sub>HTLopt</sub>=176nm, n<sub>HTLopt</sub>=2.38, a cui corrisponde un valore di corrente pari a 37.9 mA/cm<sup>2</sup>. Tuttavia, bisogna considerare che tale valore è ideale, in quanto calcolato considerando dei materiali senza perdite. Al momento in cui verranno introdotti dei materiali reali per la realizzazione della cella tandem ottimizzata, ci sarà un contributo di assorbimento perso a causa dell’assorbimento da parte dei due layer in esame. Ovviamente, come discusso precedentemente, il peso delle perdite dei materiali introdotti sarà tanto più grande quanto più saranno spessi i layer [8]. Per tale motivo per procedere con l’ottimizzazione della cella, in questo studio, si è preferito scegliere le soluzioni per ETL e HTL tali da massimizzare la J<sub>sc</sub> e allo stesso tempo minimizzare lo spessore dei layer.

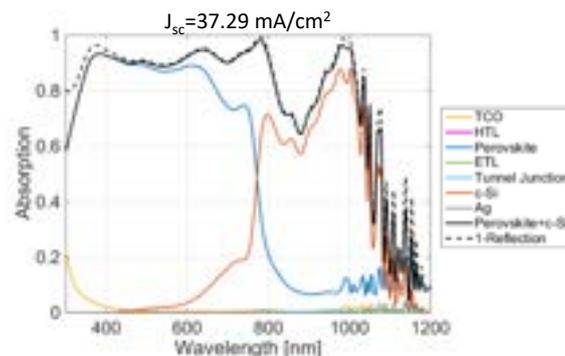
RUN	ETL			HTL <sub>opt</sub>							
	Dati in ingresso			Thin HTL				Thick HTL			
	Soluzione in ingresso	n	t [nm]	n	t [nm]	J <sub>sc</sub> (run) [mA/cm <sup>2</sup> ]	J <sub>sc</sub> (run-1) [mA/cm <sup>2</sup> ]	n	t [nm]	J <sub>sc</sub> (run) [mA/cm <sup>2</sup> ]	J <sub>sc</sub> (run-1) [mA/cm <sup>2</sup> ]
1	Valori Nominali	SnO <sub>2</sub> (1.84)	20	2.4	60	36.39		2.47	250	36.22	
2	Thin ETL 1	3.6	15	2.21	48	37.29	37.20	2.33	250	37.24	37.12
	Thick ETL 1	1.46	240	1.46	10	37.50	36.98	2.38	176	37.90	36.77

**Tabella 2:** Risultati delle simulazioni parametriche per l’ottimizzazione dell’HTL

RUN	HTL			ETL <sub>opt</sub>							
	Dati in ingresso			Thin ETL				Thick ETL			
	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> ]	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 OMeTAD (1.65)	200	3.6	15	31.90		1.46	240	32.74	
2	Thin HTL 1	2.4	60	3.6	10	37.28	37.19	1.49	230	37.23	37.22
	Thick HTL 1	2.47	250	3.6	13	37.14	37.12	1.5	228	36.92	36.72

**Tabella 3:** Risultati delle simulazioni parametriche per l’ottimizzazione dell’ETL

Confrontando le Tabelle 2 e 3 si osserva che il valore della corrente individuato al run 2 in corrispondenza dell'ETL sottile (Tabella 2), o dell'HTL sottile (Tabella 3) è praticamente lo stesso e pari a circa  $37.3 \text{ mA/cm}^2$ . Questo suggerisce anche una stabilità molto forte della soluzione in funzione dei diversi run di simulazione. I valori di spessore e indice per i due layer scelti per proseguire con l'ottimizzazione della cella sono quelli evidenziati in rosso nelle due tabelle, e cioè:  $t_{\text{ETLopt}}=10\text{nm}$ ,  $n_{\text{ETLopt}}=3.6$ ,  $t_{\text{HTLopt}}=48\text{nm}$ ,  $n_{\text{HTLopt}}=2.21$ . Ovviamente, data la stabilità della soluzione, per queste combinazioni di spessori e indici ci si aspetta ancora un valore della corrente prossimo ai  $37.3\text{mA/cm}^2$ , come dimostrato nella Figura 13, in cui è riportato l'assorbimento nei diversi layer per la cella ottimizzata ideale.



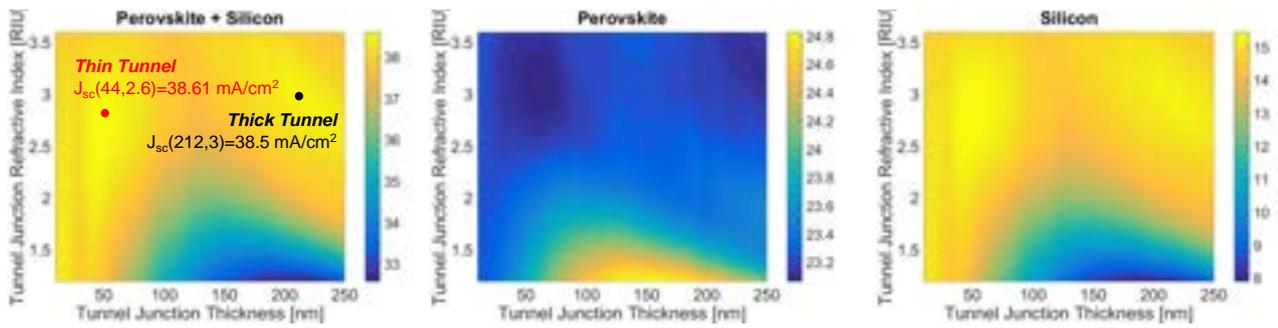
**Figura 13:** Spettri di assorbimento dei layer che costituiscono la cella, con HTL e ETL ottimizzati

Confrontando le curve in Figura 13 con quelle in Figura 5 la prima considerazione importante da fare è che, a valle dell'ottimizzazione, cambia in maniera sostanziale l'andamento della curva nera tratteggiata, che mostra il contributo di potenza trasmessa all'interno della cella, all'interfaccia aria/TCO. I picchi in corrispondenza di circa 300nm e circa 500nm nelle condizioni nominali, sono fortemente mitigati nella Figura 13. Il picco presente in Figura 5 in corrispondenza di circa 800nm trasla verso lunghezze d'onda più alte in seguito all'ottimizzazione e la sua ampiezza appare ridotta. Infine, La potenza trasmessa all'interno della cella ottimizzata appare mediamente più alta anche per lunghezze d'onda al di sopra di 1000nm rispetto alla cella nominale. Tutti questi aspetti contribuiscono ad un aumento della  $J_{sc}$  totale di circa il 20%, da  $31.15$  a  $37.29 \text{ mA/cm}^2$ .

#### 4.4 Ottimizzazione della Tunnel Junction

Una volta determinati i valori ottimali per spessori e indici di rifrazione dell'ETL e dell'HTL, si è proceduto con l'ottimizzazione della Tunnel Junction. Analogamente a quanto descritto precedentemente, si è calcolata la  $J_{sc}$  totale nel silicio e nella perovskite considerando fissi i parametri dell'ETL e dell'HTL, e facendo variare spessore e indice di rifrazione della Tunnel Junction. In particolare per ETL e HTL abbiamo considerato i parametri ottimi determinati precedentemente.

In Figura 14a è riportata la  $J_{sc}$  data dalla somma dei contributi dei layer di silicio e di perovskite. Si può osservare che, così come avveniva per HTL e ETL, anche in questo caso possiamo distinguere due massimi, uno a bassi spessori e uno ad alti spessori, pertanto, seguendo lo stesso formalismo già descritto precedentemente, distinguiamo le due soluzioni denominandole "Thin Tunnel" (spessore 44nm, indice 2.6,  $J_{sc}=38.61 \text{ mA/cm}^2$ ) e "Thick Tunnel" (spessore 212nm, indice 3,  $J_{sc}=38.5 \text{ mA/cm}^2$ ).

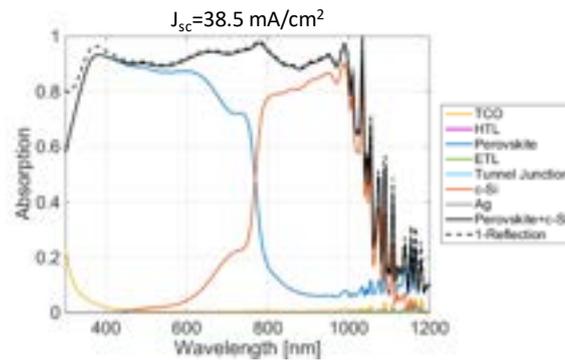


**Figura 14:** Andamento della corrente  $J_{sc}$  in funzione dello spessore e dell'indice di rifrazione della Tunnel Junction, in presenza dell'HTL e dell'ETL ottimizzati (soluzioni Thin HTL 2.1 della Figura 9a e Thin ETL 2.1 della Figura 11a). (a) Corrente totale nel silicio e nella perovskite, (b) contributo di corrente del layer di perovskite, (c) contributo di corrente del layer di silicio.

Dai contour plot in Figura 14b e 14c, in cui sono rappresentate rispettivamente i contributi di corrente  $J_{sc}$  dati dalla perovskite e dal silicio presi singolarmente, è possibile osservare che la dipendenza della  $J_{sc}$  totale dallo spessore e dall'indice di rifrazione della Tunnel Junction è dovuta principalmente al contributo dato dal silicio. Il contributo di corrente dato dalla perovskite è infatti pressoché costante, anche se maggiore rispetto al contributo massimo dato dal silicio. Analogamente a quanto avviene per l'ETL, infatti, la Tunnel Junction è posizionata al di sotto dello strato di perovskite e prima dello strato di silicio, influenzando quindi maggiormente quest'ultimo.

Anche in tal caso, per minimizzare l'effetto di eventuali perdite che inevitabilmente saranno presenti nel materiale che verrà realmente utilizzato, è preferibile utilizzare la soluzione con spessore più basso, pertanto la Tunnel Junction ottimizzata avrà spessore  $t_{TunnelOPT}=44\text{nm}$  e indice di rifrazione  $n_{TunnelOPT}=2.6$ .

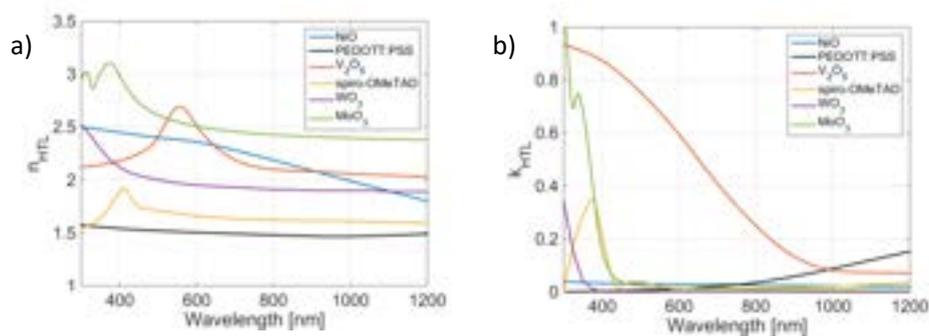
In Figura 15 sono riportate le curve di assorbimento nei diversi layer della cella a valle dell'ottimizzazione della Tunnel Junction. Appare evidente, da un confronto tra il grafico in Figura 15 e quello in Figura 13 che con una scelta opportuna dello spessore e dell'indice di rifrazione per la Tunnel Junction viene fortemente ridotta l'ampiezza del picco presente a 900nm, il che porta ad un ulteriore incremento della  $J_{sc}$ , che raggiunge un valore pari a  $38.5\text{ mA/cm}^2$ , di cui  $23.17\text{ mA/cm}^2$  corrispondono allo strato di perovskite, mentre  $15.33\text{ mA/cm}^2$  corrispondono allo strato di silicio. Quindi, in definitiva, la cella ottimizzata, nelle condizioni ideali, ovvero senza considerare le perdite per i layer ETL, HTL e Tunnel Junction, mostra un miglioramento delle caratteristiche di assorbimento totali di circa il 24% rispetto al comportamento della cella nelle condizioni nominali. Vale la pena osservare che, considerando i contributi dei layer attivi presi singolarmente, per la perovskite si è giunti ad un miglioramento del 15%, mentre per il silicio, che è lo strato che già di partenza assorbiva meno, il miglioramento rispetto al caso nominale è stato del 38%. In altri termini l'ottimizzazione tende anche a riequilibrare le  $J_{sc}$  nei singoli strati, ma agire solo sui tre layer in esame non è sufficiente a raggiungere l'equilibrio vero e proprio, confermando che è necessario agire preliminarmente sul layer in perovskite al fine di ottenere una cella ottimizzata anche da un punto di vista elettrico. È chiaro che se si modificassero le caratteristiche della perovskite, in termini di spessore e bandgap, anche i valori ottimali individuati per gli strati trasportatori e per la Tunnel Junction cambierebbero, ma l'effetto sull'assorbimento totale rimarrebbe lo stesso.



**Figura 15:** Spettri di assorbimento dei layer che costituiscono la cella, con HTL e ETL e Tunnel Junction ottimizzati.

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

L'ultima fase di questo studio prevede l'identificazione di materiali, adatti a realizzare gli strati HTL, ETL e Tunnel Junction, le cui proprietà si avvicinino quanto più possibile a quelle individuate durante la fase di ottimizzazione. Sulla base delle considerazioni fatte nel paragrafo precedente, per la scelta dei materiali per l'HTL e per l'ETL faremo riferimento ai contour plot delle Figure 9a e 11a rispettivamente. Per la Tunnel Junction invece considereremo i risultati riportati nel contour plot di Figura 14a.

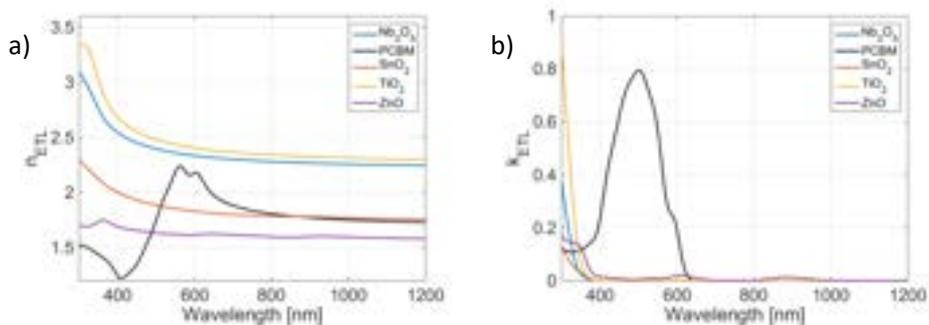


**Figura 16:** Indici di rifrazione di alcuni materiali adatti per la realizzazione dell'HTL. (a) parte reale, (b) parte immaginaria.

In Figura 16 sono riportate le proprietà ottiche, ovvero parte reale (Figura 16a) e parte immaginaria (Figura 16b) in funzione della lunghezza d'onda di alcuni materiali considerati in lavori precedenti per la realizzazione dello strato HTL [8, 21]. Tra i materiali è stato considerato anche lo spiro-OMeTAD, cioè il materiale utilizzato nella cella nominale. Le curve mostrate sono state ricavate dai seguenti riferimenti [19, 22-26]. Il materiale con la parte reale dell'indice di rifrazione più vicina a quello ottimale ( $n_{HTLopt}=2.21$ ) è l'ossido di Nichel (NiO). Il valore di  $n$  per l'NiO infatti varia da circa 2.5 a circa 1.8 nel range di lunghezze d'onda che va da 300nm a 1200nm. Andando ad osservare il contour plot in Figura 9a notiamo che questo range di valori ricade ampiamente nella regione in cui la corrente assume i valori massimi. È interessante osservare anche che il valore di  $k$  dell'NiO (Figura 16b) assume valori al di sotto di 0.04 in tutto il range di lunghezze d'onda considerato, il che assicura un assorbimento limitato da parte dello strato di HTL realizzato con questo materiale. Si osservi che il  $k$  dell'NiO è di gran lunga inferiore rispetto a quello dello spiro-OMeTAD per lunghezze d'onda al di sotto di 450nm.

Analogamente, nella Figura 17 sono riportate le curve relative alla parte reale (Figura 16a) e parte immaginaria (Figura 17b) di materiali adatti alla realizzazione dell'ETL [8, 21]. Tali curve sono state ricavate dai seguenti riferimenti [18, 27-30]. Dalla Figura 17a si evince che nessuno dei materiali considerati ha un

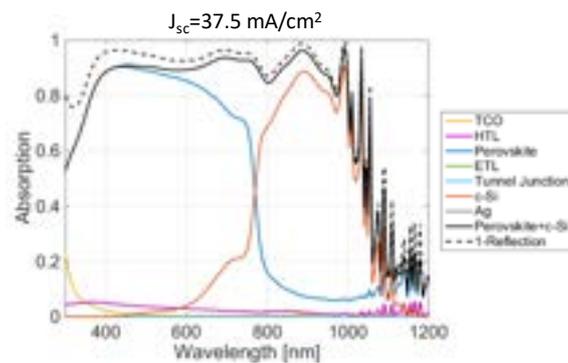
indice di rifrazione la cui parte reale sia sufficientemente grande da avvicinarsi al valore  $n_{ETLopt}=3.6$ . Tuttavia, dal contour plot di Figura 11a si evince che la regione in cui la corrente è massima (per spessori al di sotto di 50nm) si estende anche verso valori di  $n_{HTL}$  più bassi, pertanto basterà scegliere il materiale con l'indice di rifrazione più alto per cercare di rientrare in quella regione. Dalla Figura 17a si evince che i materiali più interessanti sono due, ovvero il biossido di Titanio ( $TiO_2$ ), il cui valore di  $n$  varia da 3.4 a 2.3, e l'ossido di Niobio ( $Nb_2O_5$ ), il cui valore di  $n$  varia invece da 3.1 a 2.2. Sebbene il  $TiO_2$  abbia un valore di  $n$  maggiore, potrebbe essere più favorevole lavorare con l' $Nb_2O_5$ , in quanto il suo valore di  $k$  è inferiore, soprattutto a basse lunghezze d'onda (Figura 17b). In corrispondenza della lunghezza d'onda di 300nm il valore di  $k$  del  $TiO_2$  assume un valore pari a 0.89, quasi 2.5 volte maggiore rispetto al valore (di 0.37 circa) che caratterizza invece l' $Nb_2O_5$ .



**Figura 17:** Indici di rifrazione di alcuni materiali adatti per la realizzazione dell'ETL. (a) parte reale, (b) parte immaginaria.

Per quanto riguarda la Tunnel Junction, dal contour plot in Figura 14a si evince che di fatto non vi sono grossi vincoli per quanto riguarda la scelta del materiale. La regione all'interno della quale la corrente è massima, infatti, è estesa su tutto il range di  $n_{Tunnel}$  considerati. Sulla scia dei lavori recentemente pubblicati da F. Sahli et al. [31, 32] per la realizzazione della Tunnel Junction della cella ottimizzata si è focalizzata l'attenzione sul Silicio, le cui caratteristiche ottiche sono mostrate nella Figura 4b.

Una volta individuati i materiali per i 3 layer in esame, si è proceduto quindi con il calcolo delle caratteristiche di assorbimento, e quindi della corrente di cortocircuito  $J_{sc}$  della cella ottimizzata reale. I risultati sono mostrati nel grafico in Figura 18, dove si può subito evincere che l'introduzione di materiali reali ha portato ad una perdita della corrente  $J_{sc}$  di  $1\text{mA}/\text{cm}^2$  (cioè il 2.6%) rispetto al caso ideale. Tale perdita è dovuta principalmente all'introduzione delle perdite, infatti nel grafico in Figura 18 la curva nera solida (che rappresenta l'assorbimento nei layer di silicio e perovskite) è visibilmente distante dalla curva nera tratteggiata (che rappresenta invece la potenza trasmessa all'interno della cella). È interessante osservare che anche in questo caso, così come avveniva nella cella nominale, buona parte della potenza non assorbita dai layer in silicio e in perovskite è assorbita dall'HTL. Nonostante l'effetto inevitabile delle perdite, la cella ottimizzata reale è comunque caratterizzata da una corrente  $J_{sc}$  di  $37.5\text{ mA}/\text{cm}^2$ , di cui  $22.91\text{ mA}/\text{cm}^2$  associati alla perovskite e  $14.59\text{ mA}/\text{cm}^2$  associati al silicio. Questo equivale ad un miglioramento delle caratteristiche di assorbimento totale del 20% rispetto alle prestazioni della cella nominale, e continua ad essere valida la considerazione precedente riguardo il comportamento nei singoli layer. Le caratteristiche di assorbimento nel silicio, infatti, migliorano del 32% rispetto al caso nominale, mentre per la perovskite si è raggiunto un miglioramento del 14%.



**Figura 18:** Spettri di assorbimento dei layer che costituiscono la cella ottimizzata con materiali reali (NiO per l'HTL,  $Nb_2O_5$  per l'ETL e Silicio per la Tunnel Junction).

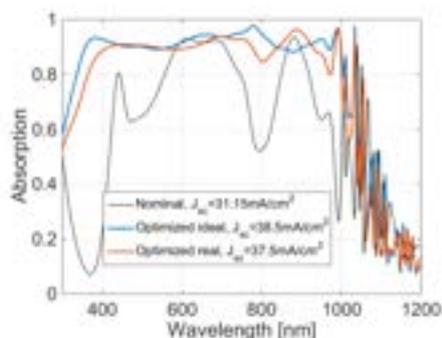
## 6. Conclusione

In conclusione, modellando otticamente una cella solare tandem in silicio e perovskite, si è studiato l'assorbimento della luce all'interno dei diversi strati che la compongono, dimostrando 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. Come studio preliminare si è simulata la cella nelle condizioni nominali, ovvero utilizzando materiali e spessori tipici nei processi di fabbricazione, calcolando l'assorbimento totale nei layer attivi, a cui corrisponde un valore di  $J_{sc}$  pari a  $31.15 \text{ mA/cm}^2$ , di cui  $11.08 \text{ mA/cm}^2$  dati dallo strato in silicio e  $20.07 \text{ mA/cm}^2$  dallo strato in perovskite. La corrente di cortocircuito  $J_{sc}$  totale è definita in modo da fornire le prestazioni ottiche della cella, in quanto essa tiene conto sia dello spettro di assorbimento da parte dei layer assorbenti della cella, sia dello spettro di irradianza solare, che non ha un andamento piatto in lunghezza d'onda. Da un punto di vista elettrico, tuttavia, in una cella tandem a 2 terminali lo squilibrio tra le  $J_{sc}$  corrispondenti ai due strati presi singolarmente limiterebbe la corrente totale generata al contributo più basso, pertanto uno studio finalizzato alla massimizzazione delle performance globali di una cella tandem a 2 terminali richiederebbe un corretto dimensionamento preliminare del layer in perovskite per equilibrare le correnti. Lo sbilanciamento delle due celle potrebbe essere sfruttato alternativamente in una configurazione a 4 terminali, nelle quali le due sub-celle sono accoppiate solo otticamente e non elettricamente. In ogni caso, lo squilibrio di corrente, non influenza in maniera sostanziale lo studio finalizzato a comprendere l'effetto degli strati trasportatori e della Tunnel Junction sulle caratteristiche di assorbimento totali della cella, pertanto si è proceduto con lo studio rimandando ad una fase successiva l'ottimizzazione della cella a partire da una condizione di equilibrio tra le correnti.

Il valore di  $31.15 \text{ mA/cm}^2$  è stato considerato quindi come riferimento per gli studi successivi finalizzati a massimizzare l'assorbimento totale.

Prima di procedere con il calcolo dei parametri ottimali per la realizzazione dell'HTL, dell'ETL e della Tunnel Junction, è stato stimato l'effetto delle perdite dovuto all'assorbimento di tali layer nella configurazione nominale, calcolando il valore della  $J_{sc}$  totale nel caso ideale in cui i tre layer studiati avessero la parte immaginaria dell'indice di rifrazione nulla. Il risultato dimostra che eliminando banalmente le perdite parassite si otterrebbe un miglioramento della  $J_{sc}$  pari all'11%, sottolineando l'importanza di lavorare con materiali con perdite più basse possibile al fine di massimizzare le prestazioni. Successivamente si è proceduto con uno studio parametrico finalizzato ad individuare i parametri ottici ottimali per i tre layer studiati, al fine di eliminare gli effetti interferometrici che limitano il contributo di potenza trasmesso all'interno della cella e quindi assorbito dai layer in silicio e in perovskite. La strategia utilizzata consiste nel

calcolare la  $J_{sc}$  in funzione dell'indice di rifrazione e dello spessore dei diversi layer, individuando la coppia di parametri tale da massimizzarne il valore. Poiché per ogni layer si possono individuare diverse coppie di parametri che massimizzano la  $J_{sc}$ , per ridurre l'effetto delle perdite precedentemente discusso, sono state scelte le soluzioni che prevedono la realizzazione di uno spessore basso (48nm per l'HTL, 10nm per l'ETL e 44nm per la Tunnel Junction). Dopo aver simulato la cella nelle condizioni ideali, infatti, sono stati individuati dei materiali con caratteristiche ottiche prossime a quelle ideali, con perdite basse ma non idealmente nulle. I risultati principali dello studio descritto nel presente lavoro sono riassunti nel grafico in Figura 19, in cui sono riportati gli spettri di assorbimento totale nei layer di silicio e di perovskite nel caso non ottimizzato (curva nera), nel caso ottimizzato ideale (curva blu), e nel caso ottimizzato reale (curva arancione).



**Figura 19:** Spettri di assorbimento nei layer di silicio e perovskite della solare nei diversi casi studio (condizione nominale, condizione ottimizzata ideale, condizione ottimizzata con materiali reali).

Nella legenda della Figura 19 sono riportati inoltre i valori di  $J_{sc}$  corrispondenti ad ogni curva. Come si può osservare, nel caso nominale lo spettro di assorbimento non è piatto in funzione della lunghezza d'onda, ma presenta delle bande in cui l'assorbimento diminuisce drasticamente, sia a causa delle perdite parassite (è questo il caso del picco al di sotto dei 400nm) sia a causa delle interferenze distruttive tra le componenti di luce riflesse alle diverse interfacce. Simulando la cella utilizzando i parametri ottimi individuati con la simulazione parametrica si ottiene uno spettro di assorbimento praticamente piatto nell'intorno di 0.9, fino ad una lunghezza d'onda di circa 1000nm. Il corrispondente valore della  $J_{sc}$  è pari a 38.5mA/cm<sup>2</sup>, cioè il 24% superiore rispetto al caso nominale. Introducendo dei materiali reali, e cioè l'NiO per l'HTL, l'Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per l'ETL e il silicio per la Tunnel Junction, si ottiene un valore di  $J_{sc}$  pari a 37. 5mA/cm<sup>2</sup>, cioè solo 1mA/cm<sup>2</sup> più basso rispetto al caso ideale, con un miglioramento del 20% rispetto al caso nominale. È interessante osservare che il processo di ottimizzazione, seguito da una scelta dei materiali reali, ha comportato un miglioramento del 32% del contributo di  $J_{sc}$  dato dal silicio e del 14% del contributo dato dalla perovskite. In altri termini il processo di ottimizzazione tende ad equilibrare i contributi di corrente dovuti ai singoli layer.

## 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] 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.
- [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] S. Lattante, "Electron and hole transport layers: their use in inverted bulk heterojunction polymer solar cells," *Electronics*, vol. 3, pp. 132-164, 2014.
- [22] V. Gowthami, M. Meenakshi, P. Perumal, R. Sivakumar, and C. Sanjeeviraja, "Optical dispersion characterization of NiO thin films prepared by nebulized spray technique," *Int J ChemTech Res*, vol. 6, pp. 5196-202, 2014.

- [23] C.-W. Chen, S.-Y. Hsiao, C.-Y. Chen, H.-W. Kang, Z.-Y. Huang, and H.-W. Lin, "Optical properties of organometal halide perovskite thin films and general device structure design rules for perovskite single and tandem solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 3, pp. 9152-9159, 2015.
- [24] A. Ashour and N. Z. El-Sayed, "Physical properties of V2O5 sprayed films," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 11, pp. 251-256, Mar 2009.
- [25] K. vonRottkay, M. Rubin, and N. Ozer, "Optical indices of tin-doped indium oxide and tungsten oxide electrochromic coatings," *Polycrystalline Thin Films: Structure, Texture, Properties, and Applications li*, vol. 403, pp. 551-556, 1996.
- [26] L. Lajaunie, F. Boucher, R. Dessapt, and P. Moreau, "Strong anisotropic influence of local-field effects on the dielectric response of alpha-MoO3," *Physical Review B*, vol. 88, Sep 25 2013.
- [27] 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.
- [28] C. Stelling, C. R. Singh, M. Karg, T. A. F. Konig, M. Thelakkat, and M. Retsch, "Plasmonic nanomeshes: their ambivalent role as transparent electrodes in organic solar cells," *Scientific Reports*, vol. 7, Feb 15 2017.
- [29] J. R. DeVore, "Refractive indices of rutile and sphalerite," *JOSA*, vol. 41, pp. 416-419, 1951.
- [30] W. Bond, "Measurement of the refractive indices of several crystals," *Journal of Applied Physics*, vol. 36, pp. 1674-1677, 1965.
- [31] F. Sahli, B. A. Kamino, J. Werner, M. Brauninger, B. Paviet-Salomon, L. Barraud, *et al.*, "Improved Optics in Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells with a Nanocrystalline Silicon Recombination Junction," *Advanced Energy Materials*, vol. 8, Feb 26 2018.
- [32] F. Sahli, J. Werner, B. A. Kamino, M. Bräuninger, R. Monnard, B. Paviet-Salomon, *et al.*, "Fully textured monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with 25.2% power conversion efficiency," *Nature materials*, p. 1, 2018.

## Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

**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.