



Ricerca di Sistema elettrico

## Light trapping per celle solari tandem su silicio

*P. Addabbo, M. Pisco, L.V. Mercaldo, P. Delli Veneri, A. Cusano*

## LIGHT TRAPPING PER CELLE SOLARI TANDEM SU SILICIO

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

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

<sup>2</sup>ENEA

Settembre 2017

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: B.1.2 "Ricerca su Tecnologie Fotovoltaiche Innovative"

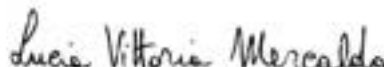
Obiettivo: Celle solari a base di film sottili innovativi di perovskiti e kesteriti – Subtask a.3: Sviluppo di architetture di dispositivo per celle tandem ad alta efficienza

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Light trapping per celle solari tandem su silicio"

Responsabile scientifico ENEA: Lucia V Mercaldo.



Responsabile scientifico Università del Sannio: Marco Pisco, Andrea Cusano

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 CONFIGURAZIONE TANDEM CON C-SI AD ELEVATA EFFICIENZA.....	6
2.1 CELLE SOLARI TANDEM BASATE SU CELLE INFERIORI DI C-SI A ELEVATA EFFICIENZA.....	6
2.2 MODELLO MATEMATICO PER IL CALCOLO DELL'EFFICIENZA.....	7
3 ANALISI DELLE PRESTAZIONI.....	10
3.1 REQUISITI DI EFFICIENZA PER LA CELLA FRONTALE AL VARIARE DEL BANDGAP.....	11
3.2 SPESSORE DELLA CELLA FRONTALE OTTIMO.....	12
3.3 EFFICIENZA AL VARIARE DEL BANDGAP E DELLA FOTOLUMINESCENZA.....	13
3.4 EFFICIENZA AL VARIARE DELLA FOTOLUMINESCENZA E DELLA LUNGHEZZA DI DIFFUSIONE.....	14
3.5 EFFICIENZA AL VARIARE DELL'INDICE DI RIFRAZIONE E DEL COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO DELLA CELLA SUPERIORE.....	15
4 CALCOLO DELL'EFFICIENZA PER CELLE FRONTALI DI A-SI:H, SB2S3 E CUINS2.....	17
5 CONCLUSIONI.....	19
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	20
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	21

## 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 "Light trapping per celle solari tandem su silicio".

Scopo di questa relazione tecnica è lo studio dei requisiti che devono avere le componenti frontali di una cella solare tandem nella quale la cella posteriore sia realizzata su wafer di silicio per raggiungere efficienze di almeno il 30%. A tal fine è stato sviluppato un tool SW che consente di calcolare l'efficienza della cella solare tandem (in funzione dei parametri caratteristici della cella frontale) in presenza di un opportuno riflettore intermedio per implementare un efficiente light management.

Dopo una breve introduzione sulle motivazioni scientifiche e sul contesto della collaborazione, nella sezione 2 viene descritta la configurazione di cella analizzata e il modello matematico implementato nel tool di simulazione. Nella sezione 3 vengono presentati i principali risultati ottenuti per la valutazione dell'efficienza di celle solari in configurazione tandem multigiunzione a due celle, al variare dei parametri caratteristici della cella frontale e con una cella c-Si ad elevata efficienza per lo strato inferiore. La relazione termina con una sezione di conclusioni.

## 1 Introduzione

Attualmente, le tecnologie basate sull'utilizzo di c-Si (crystalline-Silicon) sono quelle che dominano il mercato, grazie ai bassi costi di fabbricazione e alla elevata affidabilità dei processi di fabbricazione [1]. Le attuali efficienze di modulo raggiungibili sono di circa 17-18%, con un'efficienza massima di 22,2%. Inoltre, recenti miglioramenti in termini di efficienza sono riportati in letteratura, con un'efficienza massima di 26.6% [2], da cui segue che solo ulteriori miglioramenti marginali sono ancora possibili considerando che il limite teorico, tenuto conto delle ricombinazioni di Auger e delle perdite intrinseche, è del 29.4% per tali tipi di celle [1].

La soluzione più efficace per ridurre le perdite intrinseche, e quindi superare la soglia di efficienza del 30%, è quella di combinare diversi materiali assorbitori, caratterizzati da differenti bandgap in una cella solare multigiunzione.

La più semplice configurazione multigiunzione è la cosiddetta cella solare tandem che viene realizzata ponendo due celle in serie. Per tale tipologia, le celle solari c-Si sono utilizzate come celle posteriori per via del loro basso bandgap, del basso costo di realizzazione, e dell'elevata efficienza.

Scopo di questa relazione tecnica è proprio quello di illustrare i requisiti che devono avere le componenti frontali delle celle solari tandem su wafer di silicio per raggiungere efficienze di almeno il 30%. L'analisi effettuata consente di identificare i requisiti richiesti, in termini di parametri caratteristici, alla cella frontale, supponendo che la cella posteriore sia in silicio cristallino (c-Si).

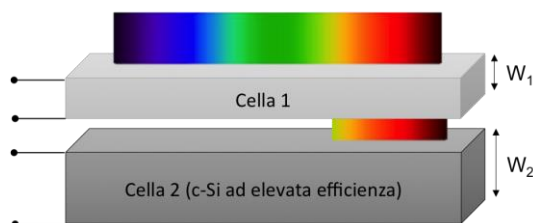
## 2 Configurazione tandem con c-Si ad elevata efficienza

Per eseguire la suddetta analisi è stato implementato numericamente un modello analitico per calcolare l'efficienza di conversione di potenza della cella tandem in termini di bandgap, coefficiente di assorbimento, lunghezza di diffusione dei portatori di carica e efficienza di luminescenza della cella frontale.

### 2.1 Celle solari tandem basate su celle inferiori di c-Si a elevata efficienza

Come già accennato, grazie alla combinazione di materiali sia a basso sia a elevato bandgap, le celle solari multigiunzione permettono di raggiungere efficienze teoriche anche superiori al 30% con solo due celle. In questo studio, analizziamo le prestazioni di celle solari tandem basate sull'utilizzo di c-Si ad elevata efficienza.

Per quanto riguarda le configurazioni dell'architettura di una cella tandem è possibile utilizzare diverse soluzioni. La più semplice, è quella che in inglese è detta *mechanically stacked*, in cui le due sotto-celle sono fabbricate in maniera indipendente e impilate una sull'altra. Questa soluzione ha l'indubbio vantaggio della semplicità di processo, permettendo l'utilizzo di condizioni di fabbricazione ottimali specifiche per ogni sotto-cella, come ad esempio riguardo alla polarità della cella, alla rugosità del substrato, e alla temperatura di processo. Tale configurazione di cella tandem è utilizzata in questo lavoro ed è schematizzata in Figura 1, poiché tale scelta consente maggiore flessibilità nella scelta del bandgap e della distribuzione dell'assorbimento tra le due celle.



**Figura 1: Configurazione tandem (*mechanically stacked*) per celle solari basate sull'utilizzo di c-Si a elevata efficienza.**

La struttura consiste in una cella frontale sottile di spessore  $W_1$  e una cella posteriore di c-Si ad elevata efficienza, di spessore  $W_2$ , con connessioni elettriche indipendenti.

La cella frontale è modellata come una cella p-i-n, configurazione tipicamente utilizzata nel caso di utilizzo di materiali a film sottile in quanto offre una maggiore efficienza di trasporto di carica rispetto alle celle equivalenti con una giunzione p-n.

Come sorgente di radiazione solare, si considera un'illuminazione in condizioni standard (AM1.5G) con una potenza media incidente di  $1 \text{ kW/m}^2$ .

In Figura 2 (a sinistra), sono riportati gli spettri di irradianza solari di riferimento, in particolare, in blu è riportato lo spettro solare extraterrestre, ovvero quello che si misurerebbe in assenza dell'atmosfera terrestre ed anche noto come AM0 e molto simile a quello che emetterebbe un corpo nero a 5777 K, mentre in rosso e giallo sono rappresentati gli spettri dopo il passaggio in

atmosfera per una superficie inclinata di 37° per la componente globale (diretta e diffusa) e la componente diretta più quella circumsolare, rispettivamente [3].

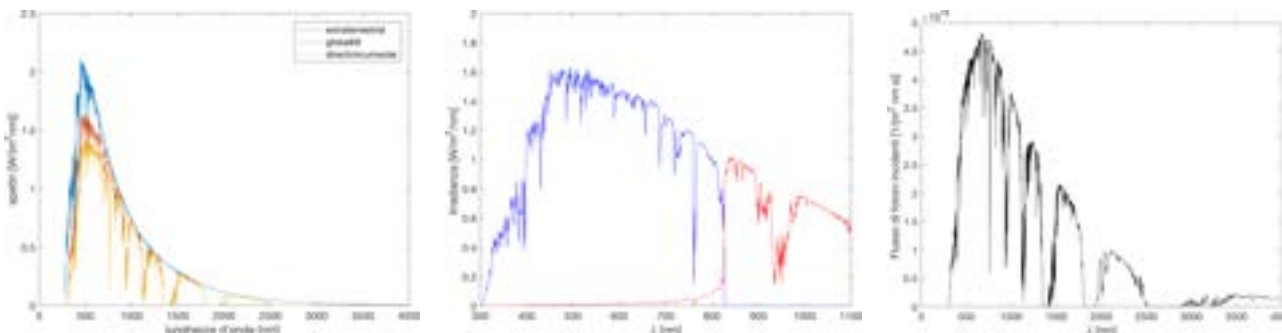


Figura 2: Spettri solari AM0 e AM1.5 (a sinistra), distribuzione della luce in una cella solare tandem (al centro), flusso di fotoni incidenti (a destra).

La distribuzione di luce, ovvero l'irradianza in  $W/(m^2nm)$ , in una cella solare tandem è illustrata in Figura 2 (al centro), in cui la parte assorbita dalla cella frontale è rappresentata in blu, mentre la parte che viene trasmessa alla cella posteriore in rosso.

Il flusso di fotoni incidente, che di seguito sarà indicato con il simbolo  $\phi_{AM1.5G}$  e che può essere ricavato dividendo l'irradianza per l'energia del fotone incidente, è mostrato sulla parte destra della Figura 2.

## 2.2 Modello matematico per il calcolo dell'efficienza

Al fine di ricavare un approccio più generale possibile, nella derivazione del modello matematico, si considera la potenza massima prodotta da ogni cella come il prodotto della corrente di corto circuito  $J_{sc}$  la tensione di circuito aperto  $V_{oc}$  e del fattore di riempimento  $FF$  [4]:

$$P = J_{sc}V_{oc}FF \quad (1)$$

Si utilizza quest'approccio, tralasciando un modello tensione-corrente più preciso proprio per non perdere di generalità, evitando di fare delle assunzioni su circuiti equivalenti, meccanismi di ricombinazione, e resistenze di cella. Eventuali altri contributi sono implicitamente inclusi nel fattore di riempimento.

Il coefficiente di assorbimento di uno strato assorbitore modellato come un semiconduttore a bandgap diretto può essere calcolato attraverso la seguente formulazione analitica:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_0 \sqrt{\frac{E_{\varphi}(\lambda) - E_g}{kT}} \quad (2)$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda,  $\alpha_0$  è il coefficiente di assorbimento caratteristico del materiale,  $E_{\varphi} = hc/\lambda$  è l'energia dei fotoni incidenti,  $k$  è la costante di Boltzmann, e  $T = 298 K$  è la temperatura della cella.

Per quanto riguarda l'assorbimento della cella, si considerano le due formulazioni

$$A = 1 - \exp(-\alpha W) \quad (3.a)$$

$$A = \frac{1 - \exp(-2\alpha W_{op})}{1 - \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \exp(-\alpha W_{op})}, \text{ con } W_{op} = W \frac{2 + a(\alpha W)^b}{2 + a(\alpha W)^b}, a = 0.935, b = 0.67 \quad (3.b)$$

in cui la prima equazione è valida in caso di assorbimento *single pass* e la seconda rappresenta il limite di *light trapping* in caso di scattering Lambertiano.

La corrente di corto circuito è espressa mediante la seguente espressione

$$J_{sc} = f_c q \int_0^\infty \Phi_{AM1.5G}(\lambda) A(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

dove  $q$  è la carica dell'elettrone e  $f_c$  è la probabilità di *carrier collection* che può essere valutata come

$$f_c = \frac{\exp\left(\frac{\lambda_2^0}{2}\right) - 1}{\frac{\lambda_2^0}{2}}, \quad (5)$$

e

$$\lambda_2^0 = \frac{qV_{bi}}{2kT} - \sqrt{\left(\frac{W}{L_d}\right)^2 + \left(\frac{qV_{bi}}{2kT}\right)^2}, \quad (6)$$

con  $L_d$  e  $V_{bi}$  che indicano la lunghezza di diffusione e la tensione di *built-in*, rispettivamente.

Per calcolare la tensione di circuito aperto, che dipende dalla ricombinazione dei portatori di carica, si considera l'efficienza di luminescenza  $\Phi$ , definita come il rapporto tra la ricombinazione radiativa e la ricombinazione totale. Quindi, dato che le proprietà radiative della cella solare sono strettamente legate alle performance elettriche, l'efficienza di radiazione dello strato assorbente può essere usata per stimare la tensione di circuito aperto massima, da cui [5]

$$V_{oc} \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) + \frac{kT}{q} \ln(\Phi) \quad (7)$$

dove la densità di corrente  $J_0$  è definita in termini di flusso di corpo nero alla temperatura ambiente:

$$J_0 = q \frac{2\pi n^2}{h^3 c^2} \int_0^\infty \frac{A E_\phi^2}{\exp\left(\frac{E_\phi}{kT}\right) - 1} dE_\phi. \quad (8)$$

Infine il fattore di riempimento  $FF$  è considerato un parametro per il calcolo delle performance della cella.

Il modello espresso tramite le Equazioni (1-8) può essere utilizzato per valutare la potenza massima in uscita per unità d'area proveniente dalla cella frontale, di seguito indicata con  $P_1$ , che è funzione dei parametri  $W_1, E_g, \alpha_0, L_d$  e  $\Phi$  che caratterizzano la cella [4].

Per quanto riguarda la cella posteriore, essa è modellata come una cella c-Si PERL [6] di spessore  $W_2$ , in cui il termine  $A(\lambda)$  dell'Equazione (4) deve essere sostituito con il prodotto della



trasmissione della cella frontale per l'assorbimento della cella posteriore, poiché, come già illustrato al centro in Figura 2, quest'ultima riceve soltanto una parte della radiazione solare. Inoltre, nel valutare la tensione di circuito aperto dell'Equazione (7), l'efficienza di luminescenza viene posta pari a 1, e viene considerato soltanto il primo termine dell'equazione, dove  $J_0 = 4.9 * 10^{-11} \text{ mA/cm}^2$  [7].

Infine, per il calcolo della potenza in uscita dalla cella posteriore  $P_2$  si assume che il fattore di riempimento della cella sia fisso e pari a 82.8%, e che la probabilità di carrier collection  $f_c$  nell'Equazione (4) sia pari a 0.978.

In definitiva, l'efficienza totale della configurazione tandem è pari alla somma delle potenze in uscita dalle due celle rapportata alla radiazione incidente ( $1000 \text{ W/m}^2$  corrispondente a 1-sun AM1.5):

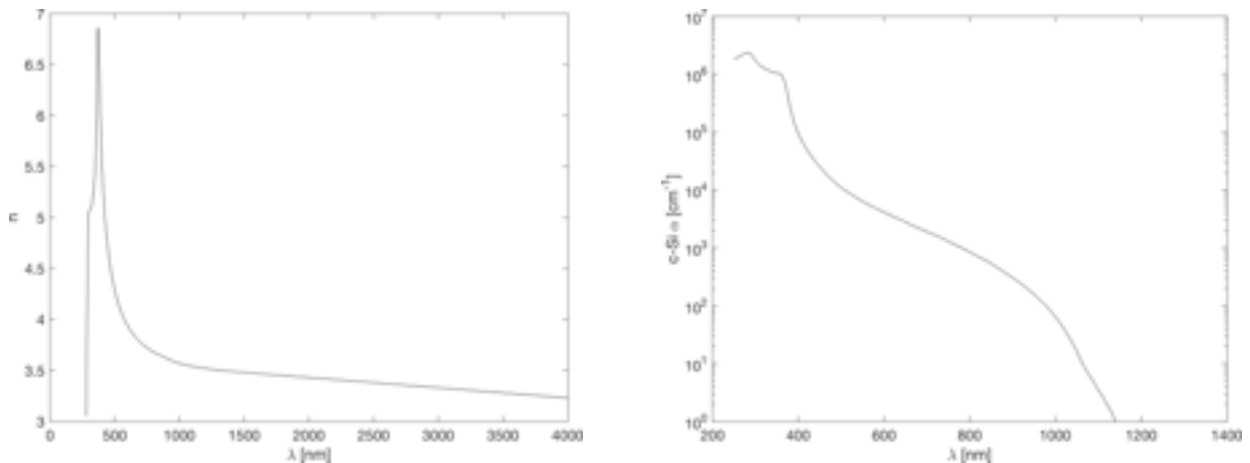
$$\eta = \frac{P_1 + P_2}{1000}. \quad (9)$$

### 3 Analisi delle prestazioni

Il modello matematico illustrato nella Sezione 2.2 è stato utilizzato per analizzare le prestazioni della configurazione tandem, al fine di definire le caratteristiche richieste alla cella frontale per ottenere efficienze totali almeno pari al 30%.

Per l'analisi, senza perdita di generalità, fisseremo inizialmente per la cella frontale un indice di rifrazione pari a 3, che rappresenta un valore di indice di rifrazione di un tipico strato assorbente a semiconduttore. Successivamente nella Sezione 3.5 verificheremo che i risultati dipendono debolmente da questa scelta (per un ampio intervallo di indici di rifrazione:  $2.5 < n < 3.5$  [4]). Anche il coefficiente di assorbimento caratteristico della cella frontale verrà inizialmente fissato a un valore, rappresentativo di materiali esistenti, relativamente elevato ( $\alpha_0 = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ) e in seguito si verificherà l'influenza di tale parametro sulle prestazioni di efficienza totale. Infine, per quanto riguarda il fattore di riempimento della cella frontale, esso sarà fissato a  $FF = 0.8$ , nonostante sia un valore piuttosto alto, esso è consistente con i limiti superiori per le celle singola giunzione [8].

Come già accennato, la cella posteriore è una c-Si PERL, di spessore  $W_2 = 400 \text{ }\mu\text{m}$ , a elevata efficienza (25% in condizioni di illuminazione standard) [6]. Per il calcolo del coefficiente di assorbimento di tale cella è stata utilizzata l'Equazione (2), considerando le proprietà ottiche del c-Si, che sono anche riportate in funzione della lunghezza d'onda nella Figura 3.



**Figura 3: Proprietà ottiche del c-Si: indice di rifrazione (a sinistra) e coefficiente di assorbimento caratteristico [ $\text{cm}^{-1}$ ] (a destra)**

### 3.1 Requisiti di efficienza per la cella frontale al variare del bandgap

La potenza in uscita della cella superiore è direttamente legata alla sua efficienza di conversione in condizioni di test standard, dato che essa è illuminata da tutto lo spettro solare. Per questo motivo, al fine di valutare i requisiti in termini di efficienza della cella frontale, si considera la potenza prodotta dalla cella posteriore.

Inizialmente, si suppone che la cella frontale sia capace di assorbire tutti i fotoni incidenti con energia superiore al suo bandgap. Il grafico della potenza in uscita dalla cella posteriore, per valori di bandgap della cella frontale che vanno da 1.5 a 2.5 eV, è riportato in Figura 4, da cui si vede che valori di potenza di circa 100-200 W/m<sup>2</sup> sono ottenuti. L'andamento crescente è dovuto al fatto che all'aumentare del bandgap, la cella frontale assorbe una parte dello spettro minore mentre quella posteriore produce una potenza più grande.

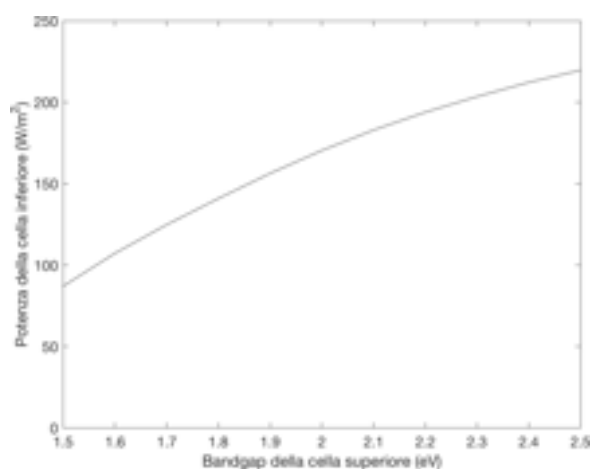


Figura 4: Potenza in uscita dalla cella posteriore in funzione del bandgap della cella frontale

In Figura 5, l'efficienza della cella frontale, richiesta per ottenere efficienze totali del 25, 30 e 35%, è valutata per valori di bandgap della cella frontale che vanno da 1.5 a 2.5 eV. Dalla figura si vede come valori di efficienza elevati siano richiesti per ottenere le prestazioni richieste nel caso di valori bassi di bandgap della cella frontale, mentre prestazioni inferiori sono richieste ad elevato bandgap: per ottenere un'efficienza totale del 30% è necessario avere un'efficienza per la cella frontale al 20% per bandgap pari a 1.5 eV e inferiore al 10% per bandgap di 2.5 eV.

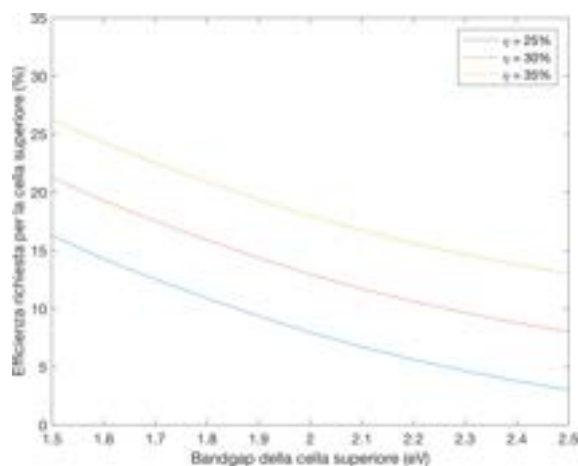


Figura 5: Efficienza richiesta per la cella frontale in funzione del bandgap della cella frontale per tre valori fissati di efficienza totale:  $\eta = 25\%$  (curva blu),  $\eta = 30\%$  (curva rossa) e  $\eta = 35\%$  (curva gialla).

### 3.2 Spessore della cella frontale ottimo

In questa sottosezione, viene valutato lo spessore ottimo per la cella frontale al variare sia dell'efficienza di fotoluminescenza che del bandgap. Tale analisi è presentata sia in caso di *single pass* che in caso di limite di *light trapping*, ed è mostrata in termini di efficienza totale, al variare dei suddetti parametri, in Figura 6 e in Figura 7, rispettivamente.

Dall'analisi si vede come spessori della cella frontale dell'ordine di 500 nm sono necessari per ottenere le prestazioni desiderate in caso di *single pass*, mentre in caso di *light trapping* spessori dell'ordine di 150 nm sono sufficienti.

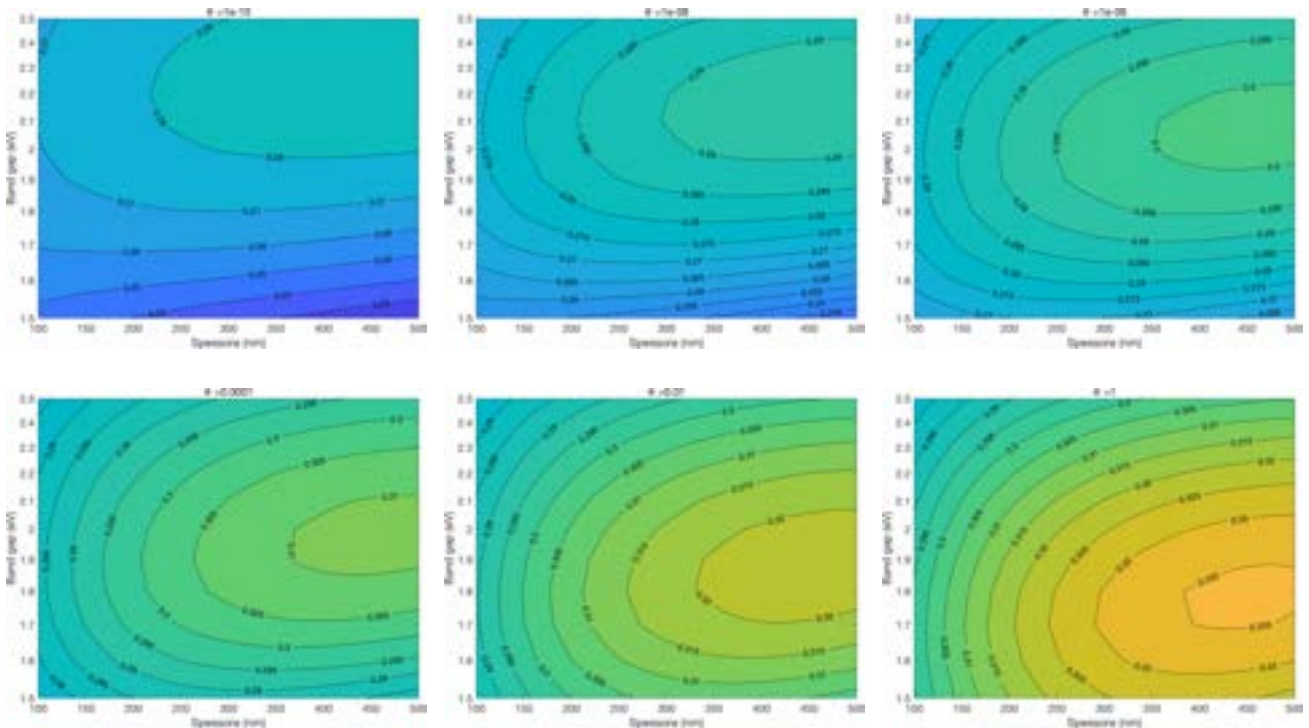


Figura 6: Spessore della cella frontale ottimo in caso di *single pass*

Gli spessori ottimi al variare dell'efficienza di luminescenza, che sono anche utilizzati per le analisi successive, sono riportati in Tabella 1, sia in caso di *single pass* che di *light trapping*.

Tabella 1: Spessori della cella frontale

$\Phi$	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	1
$W_{opt}$ ( <i>single pass</i> )	490	490	480	470	460	460
$W_{opt}$ ( <i>light trapping</i> )	170	170	170	160	160	160

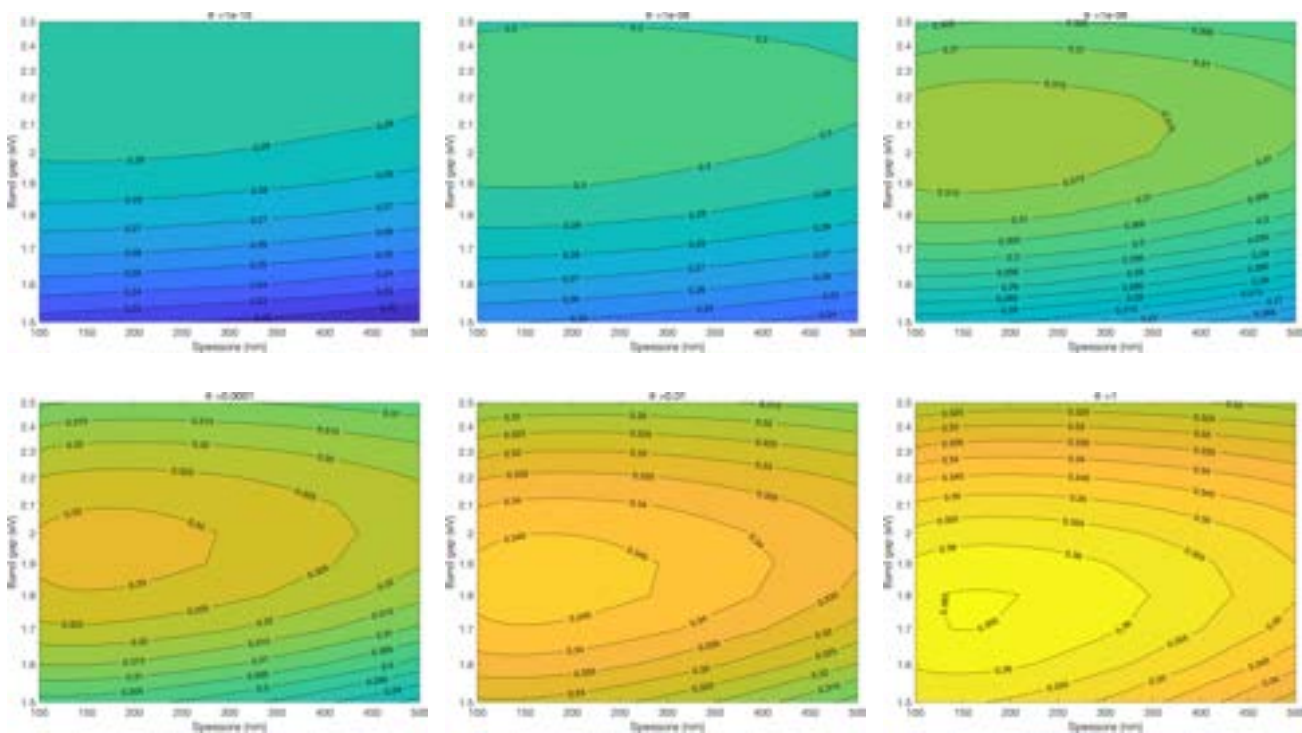


Figura 7: Spessore della cella frontale ottimo in caso di *light trapping*

### 3.3 Efficienza al variare del bandgap e della fotoluminescenza

A questo punto, è possibile valutare i requisiti per la cella frontale in termini di bandgap e efficienza di luminescenza, al fine di ottenere efficienze totali dell'ordine del 30%. Per questo, si valuterà l'efficienza massima della configurazione in funzione del bandgap e dell'efficienza di luminescenza della cella frontale. In questa analisi, oltre a considerare il coefficiente di assorbimento caratteristico  $\alpha_0 = 10^4 \text{ cm}^{-1}$ , come in precedenza, sono stati fissati i seguenti parametri:

- lo spessore della cella frontale è quello ottimo al variare dell'efficienza di luminescenza (valori riportati in Tabella 1);
- la lunghezza di diffusione della cella frontale è pari a 100 nm, poiché si suppone che il materiale sia caratterizzato da lunghezze di diffusione relativamente basse [4]; ulteriori considerazioni in merito sono riportate nella Sezione 3.4, in cui verrà analizzata la dipendenza delle prestazioni da tale parametro.

In Figura 8, è mostrata l'efficienza totale della configurazione tandem in funzione del bandgap e dell'efficienza di luminescenza della cella frontale, in caso di *single pass* a sinistra e in caso di limite di *light trapping* a destra. Innanzitutto, può essere osservato che il *light trapping* offre benefici in termini di performance, poiché in tal caso sono ottenibili efficienze del 36%.

Dalla figura, si può osservare come il bandgap ottimo della cella frontale aumenti al diminuire dell'efficienza di luminescenza. Ciò è dovuto al fatto che quando l'efficienza di luminescenza diminuisce, la caduta di tensione dovuta alla ricombinazione radiativa aumenta (si veda l'Equazione 7), e, quindi, il contributo di tensione dalla cella frontale è ridotto. Inoltre, l'aumento

del bandgap della cella frontale può compensare parzialmente questa perdita di tensione ma ciò avviene alle spese della corrente, per cui, il bandgap ottimo aumenta gradualmente.

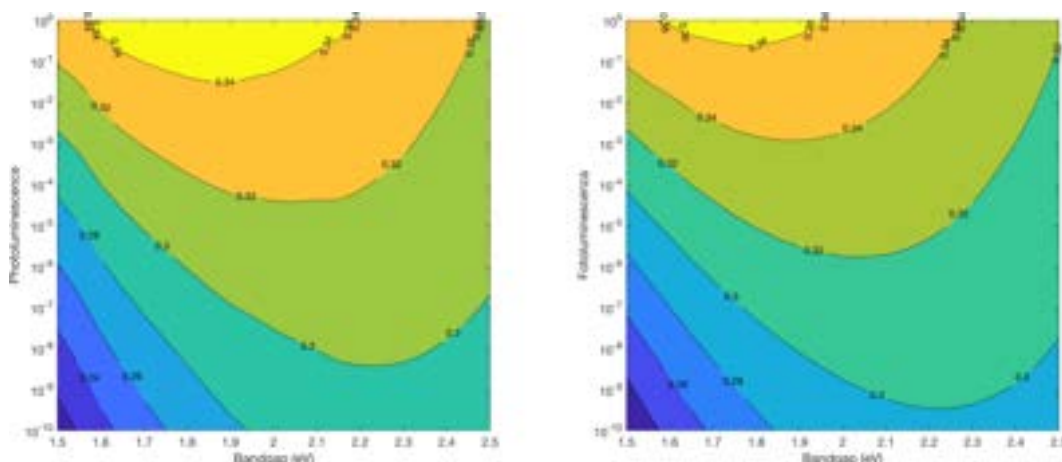


Figura 8: Efficienza totale al variare del bandgap e della fotoluminescenza della cella frontale: *single pass* a sinistra e limite di *light trapping* a destra

### 3.4 Efficienza al variare della fotoluminescenza e della lunghezza di diffusione

Si considera l’influenza della lunghezza di diffusione della cella frontale sulle prestazioni della cella tandem. Per far ciò, si valutano le efficienze totali per valori di  $L_d$  da 10 a 200 nm, mentre il bandgap è fissato a 1.95 eV, che corrisponde all’ottimo per efficienze di luminescenza di  $10^{-5}$ .

In Figura 9 si vede che l’efficienza aumenta con l’aumentare della lunghezza di diffusione, a seguito del miglioramento dell’efficienza di *collection*. Inoltre, nel caso del *light-trapping* (figura a destra), si nota un aumento dell’efficienza non più significativo per valori di lunghezza di diffusione maggiori di 100 nm. Invece, nel caso della figura a sinistra (*single pass*), l’aumento di efficienza è ancora significativo per valori di lunghezza di diffusione superiori a 150 nm.

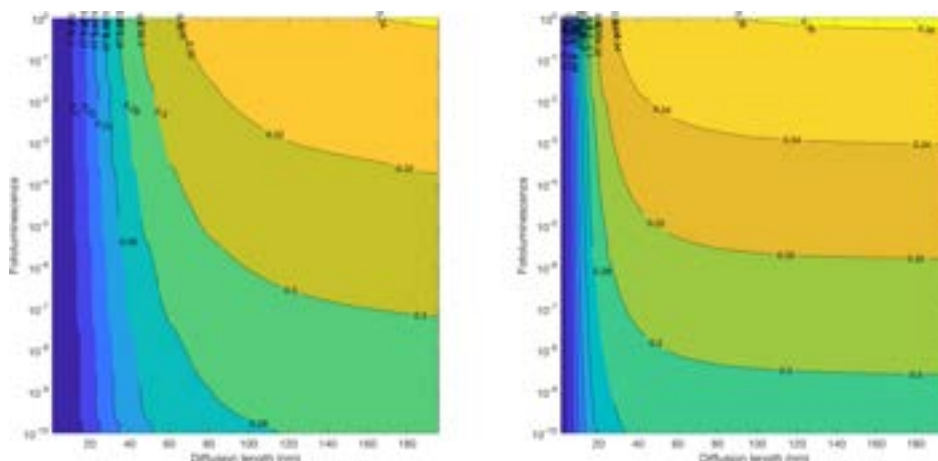


Figura 9: Efficienza totale al variare della lunghezza di diffusione e della fotoluminescenza della cella frontale: *single pass* a sinistra e limite di *light trapping* a destra



### 3.5 Efficienza al variare dell'indice di rifrazione e del coefficiente di assorbimento della cella superiore

In questa sezione si vuole valutare l'influenza dei parametri dell'indice di rifrazione e del coefficiente di assorbimento sulle analisi fatte in precedenza, ovvero in termini sia di bandgap che di lunghezza di diffusione e di efficienza di luminescenza. Si considerano due valori, diversi da quelli usati nelle sezioni precedenti, sia per l'indice di rifrazione ( $n = 2.5, 3.5$ ) che per il coefficiente di assorbimento ( $\alpha_0 = 10^3, 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ). Ricalcolando gli spessori ottimi per i quattro casi si ottengono le prestazioni riportate in Figura 10 e

Figura 11, per i due diversi valori dell'indice di rifrazione e del coefficiente di assorbimento, rispettivamente.

Dal confronto tra le colonne di tali figure è possibile notare come le prestazioni siano debolmente dipendenti da variazioni di tali parametri, soprattutto nel caso dell'indice di rifrazione.

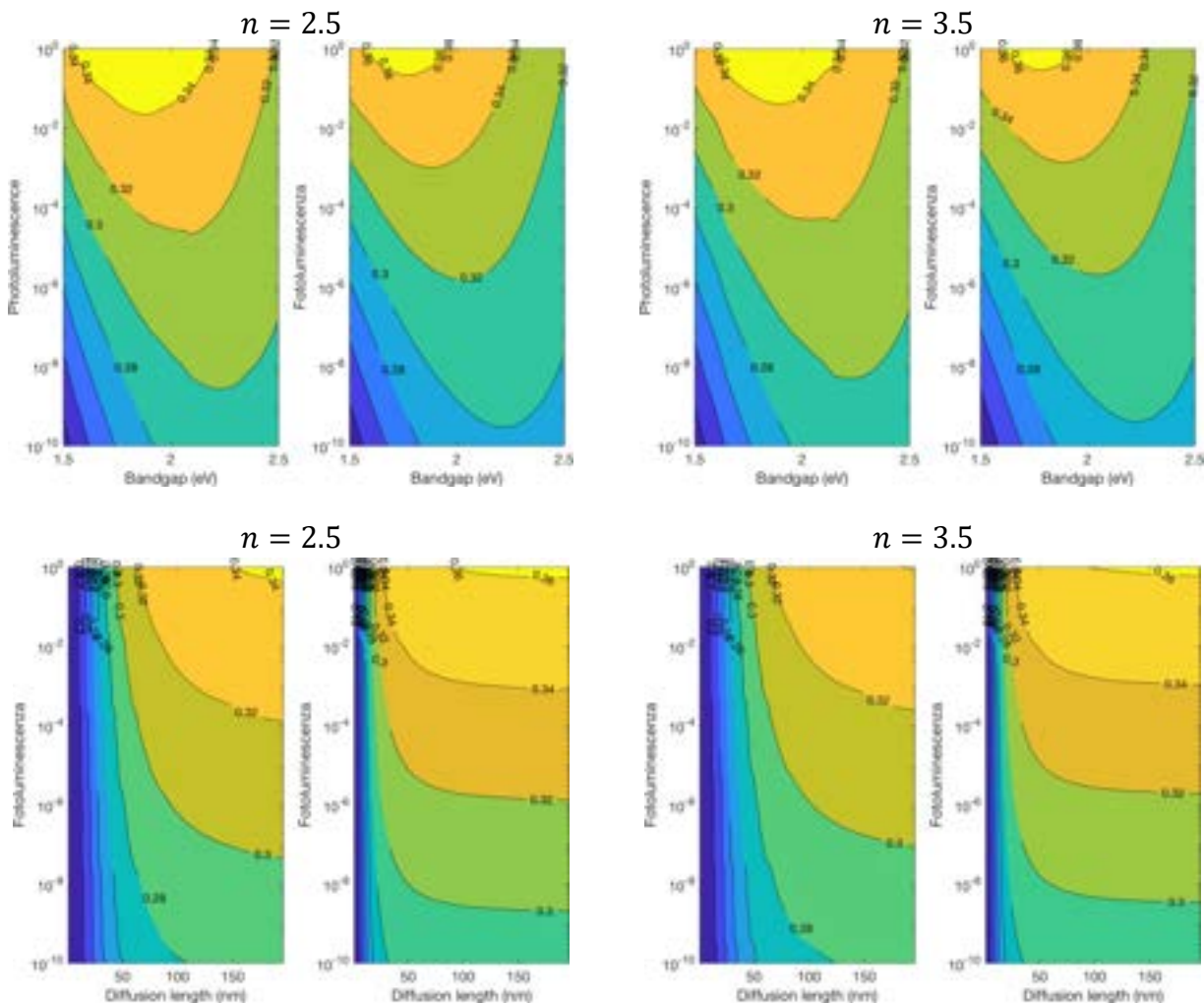


Figura 10: Efficienza totale al variare della efficienza di fotoluminescenza e del bandgap (prima riga) e della lunghezza di diffusione (seconda riga) per valori di  $n=2.5$  (prima colonna) e  $n=3.5$  (seconda colonna)

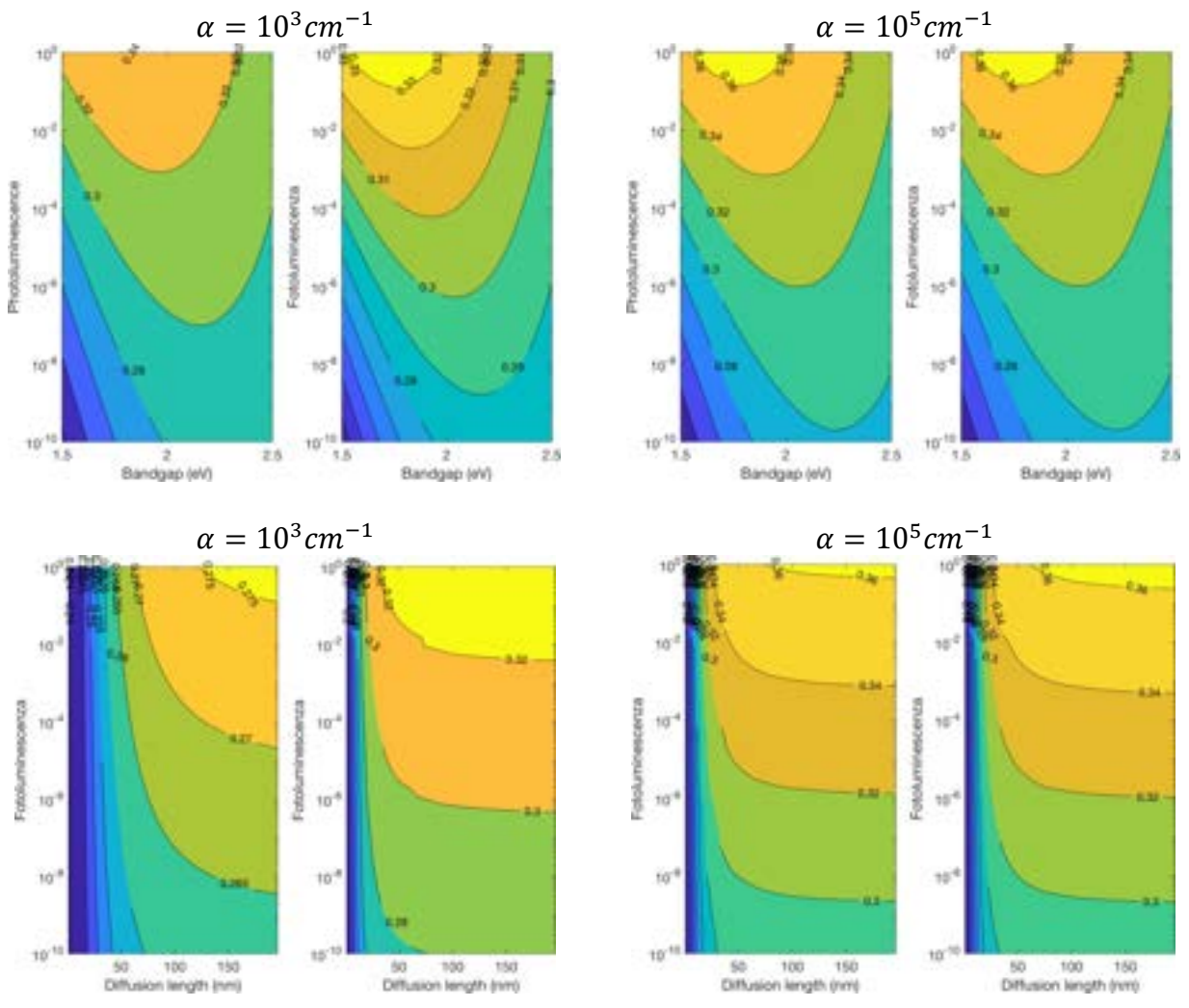


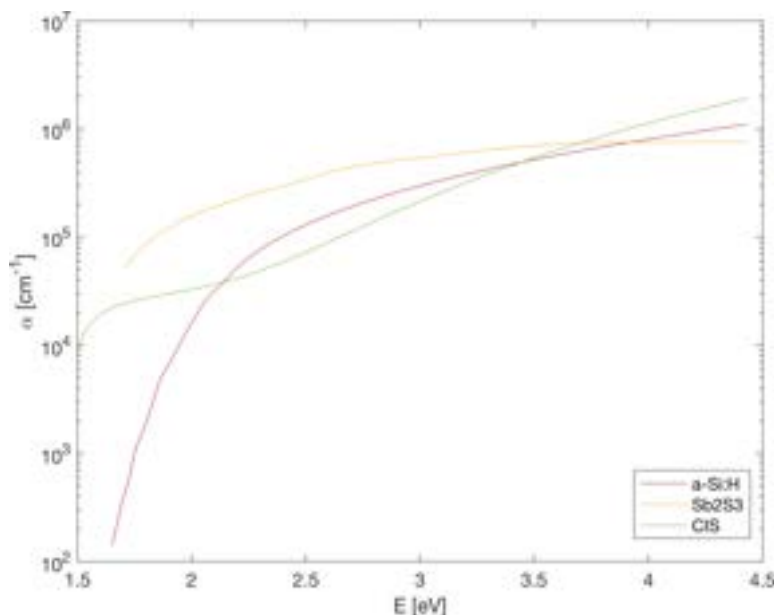
Figura 11: Efficienza totale al variare della fotoluminescenza e del bandgap (prima riga) e della lunghezza di diffusione (seconda riga) per valori di  $\alpha_0 = 10^3 \text{ cm}^{-1}$  (prima colonna) e  $\alpha_0 = 10^5 \text{ cm}^{-1}$  (seconda colonna)



## 4 Calcolo dell'efficienza per celle frontali di a-Si:H, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> e CuInS<sub>2</sub>

L'analisi presentata nella Sezione 3 fornisce le caratteristiche specifiche richieste alla cella frontale, nella configurazione tandem, al fine di raggiungere efficienze totali superiori al 30%. I risultati ottenuti possono, quindi, essere usati per individuare i migliori materiali, che possano essere potenzialmente utilizzati in una configurazione tandem per ottenere celle solari ad alte prestazioni. Abbiamo ad esempio selezionato 3 possibili materiali che sono già stati testati in celle solari a singola giunzione per valutarne le potenzialità nelle celle tandem in combinazione con il c-Si. I materiali considerati sono: il silicio amorfo idrogenato (a-Si:H), il trisolfuro di antimonio (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) e il disolfuro di rame ed indio (CuInS<sub>2</sub> o CIS), i cui coefficienti di assorbimento sono riportati in Figura 12. I dati per i coefficienti di assorbimento sono stati estrapolati dalla letteratura [9-11].

Per quanto riguarda i bandgap utilizzati sono quelli tipici dei materiali in analisi, ovvero 1.65 eV per a-Si:H, 1.7 eV per Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> e 1.5 eV per CuInS<sub>2</sub>, valori vicini all'ottimo trovato nelle precedenti analisi.



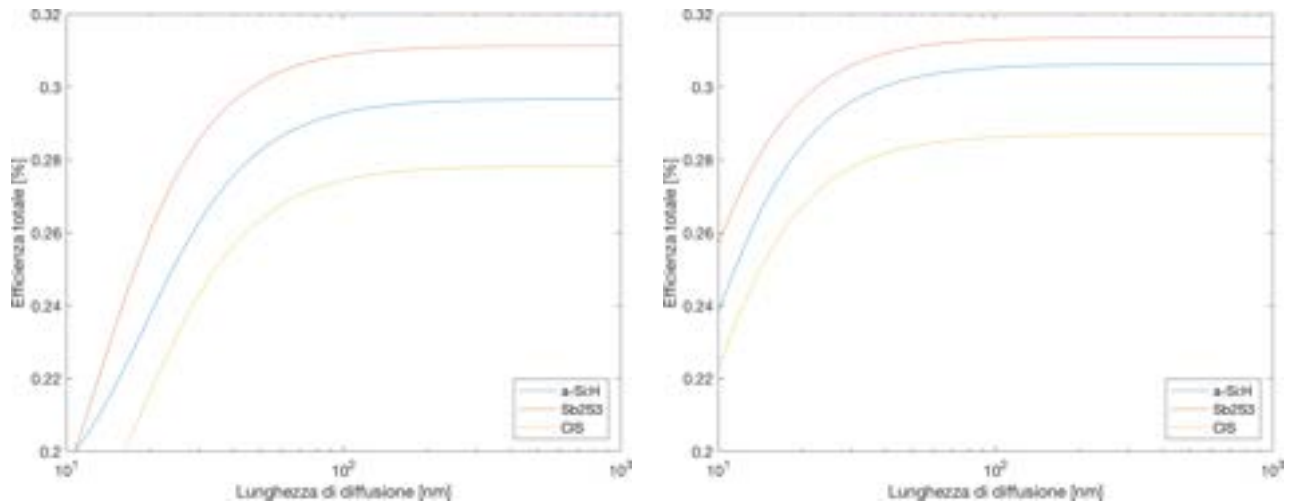
**Figura 12: Coefficienti di assorbimento in [cm<sup>-1</sup>] al variare dell'energia dei fotoni incidenti in [eV]: a-Si-H (curva rossa), Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> (curva gialla) e CuInS<sub>2</sub> (CIS) (curva verde).**

Il coefficiente di assorbimento del materiale è utilizzato, ai fini del calcolo dell'efficienza totale, al posto del modello dell'Equazione 2, ponendolo a zero in condizioni di sub-bandgap [4].

La Figura 13 mostra l'efficienza totale calcolata con il modello illustrato nella Sezione 2.2, in cui l'efficienza di luminescenza è fissata a 10<sup>-5</sup>, il fattore di riempimento è 0.8, e lo spessore è quello ottimo, in modo tale che le differenze in termini di efficienza siano attribuibili esclusivamente al bandgap e alle proprietà ottiche dei materiali. L'analisi delle prestazioni è effettuata al variare della lunghezza di diffusione. Dai risultati si può notare che nel caso di lunghezze di diffusione elevate (ovvero per efficienza di raccolta elevata/unitaria), l'efficienza è determinata dal bandgap della cella frontale. Infatti, l'efficienza massima raggiungibile impiegando il CIS è circa il 28%, mentre sia per il caso del a-Si:H che del Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, l'efficienza massima ottenibile è superiore al 30%. Inoltre, da quest'ultima analisi, i benefici del *light trapping* sono evidenti. In particolare, nel caso *single pass* (parte sinistra della Figura 12), una lunghezza di diffusione di 30 nm è sufficiente per

raggiungere un'efficienza del 30% con il Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, una lunghezza di circa 80 nm è invece necessaria per ottenere il 29% nel caso del a-Si:H.

In presenza di *light trapping*, lunghezze di diffusione di circa 20 nm e 40 nm sono necessarie per ottenere il 30% di efficienza nel caso di Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> e di a-Si:H, rispettivamente.



**Figura 13: Efficienza totale per la configurazione tandem con a-Si:H, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> e CIS per la cella frontale e c-Si per la cella posteriore: *single pass* (a sinistra) e limite di *light trapping* (a destra)**

## 5 Conclusioni

Abbiamo sviluppato uno strumento SW che consente di analizzare le prestazioni di celle tandem che combinano la tecnologia di celle solari c-Si ad elevata efficienza con celle frontali anche a basso costo. L'analisi ovviamente conferma che tali celle rappresentano un'ottima soluzione per produrre celle con efficienze superiori al 30%. In aggiunta tale analisi fornisce importanti indicazioni sulle caratteristiche che deve avere la cella frontale per migliorare le prestazioni complessive.

Ad esempio, si è visto che, per raggiungere le prestazioni desiderate, occorre che la cella frontale garantisca un'efficienza almeno pari al 22% per bandgap di 1.5 eV, e al 14% per bandgap di 2 eV.

È stato anche valutato il legame tra l'efficienza di luminescenza e il bandgap ottimo della cella frontale, riscontrando che quest'ultimo aumenta al diminuire dell'efficienza di luminescenza, ma limitatamente, poiché l'aumento del bandgap della cella frontale può compensare la perdita di tensione, ma ciò avviene alle spese della corrente.

Inoltre, un parametro molto importante ai fini dell'aumento dell'efficienza è la lunghezza di diffusione, e in particolare, l'efficienza aumenta con l'aumentare della lunghezza di diffusione.

Si è anche dimostrato che l'introduzione del *light trapping* sulla cella frontale può aumentare l'efficienza e allo stesso tempo ridurre sia lo spessore ottimo che la lunghezza di diffusione richiesta per la cella frontale.

L'utilizzo di materiali assorbitori per la cella frontale, con un'efficienza di luminescenza di  $10^{-5}$  e con lunghezze di diffusione inferiori a 100 nm, permettono di ottenere prestazioni totali con efficienze dell'ordine del 30%. In tal caso, l'introduzione del *light trapping* può aumentare l'efficienza anche oltre il 30% e ridurre sia lo spessore ottimo, che la lunghezza di diffusione della cella frontale a valori inferiori a 50 nm.

In definitiva il modello implementato fornisce indicazioni importanti sulle caratteristiche che dovrebbe avere una cella frontale per garantire determinate prestazioni a celle tandem basate su c-Si. Allo stesso tempo il modello può essere utilizzato per verificare il potenziale impatto che una cella frontale realizzata in uno specifico materiale potrebbe avere in termini di prestazioni raggiungibili dalla cella stessa.

## 6 Riferimenti bibliografici

- [1] J. Werner, B. Niesen, C. Ballif, "Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells: Marriage of Convenience or True Love Story? – An Overview" *Advanced Materials Interfaces* 2017, 1700731.
- [2] K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, T. Irie, K. Konishi, K. Nakano, T. Uto, D. Adachi, M. Kanematsu, H. Uzu, K. Yamamoto, "Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%", *Nat. Energy*, 2 (2017), p. 17032.
- [3] STM G173-03(2012), Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [4] T. P. White, N. N. Lal and K. R. Catchpole, "Tandem Solar Cells Based on High-Efficiency c-Si Bottom Cells: Top Cell Requirements for >30% Efficiency," in *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 4, no. 1, pp. 208-214, Jan. 2014.
- [5] G. Smestad and H. Ries, "Luminescence and current-voltage characteristics of solar cells and optoelectronic devices," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 25, pp. 51–71, 1992.
- [6] Z. Zhao, A. Wang, M. A. Green, and F. Ferrazza, "19.8% efficient "honeycomb" textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 14, pp. 1991–1993, 1998.
- [7] Shi D, Zeng Y, Shen W. Perovskite/c-Si tandem solar cell with inverted nanopylramids: realizing high efficiency by controllable light trapping. *Scientific Reports*. 2015.
- [8] F. Meillaud, A. Shah, C. Droz, E. Vallat-Sauvain, and C. Miazza, "Efficiency limits for single-junction and tandem solar cells," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, pp. 2952–2959, 2006.
- [9] O. Vetterl, F. Finger, R. Carius, P. Hapke, L. Houben, O. Kluth, A. Lambertz, A. Muck, B. Rech, and H. Wagner, "Intrinsic microcrystalline silicon: A new material for photovoltaics," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 62, pp. 97–108, 2000.
- [10] C. Ghosh and B. P. Varma, "Optical properties of amorphous and crystalline Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub> thin films," *Thin Solid Films*, vol. 60, pp. 61–65, 1979.
- [11] C. Guillén, "CuInS<sub>2</sub> thin films grown sequentially from binary sulfides as compared to layers evaporated directly from the elements," *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 709–712, 2006.

## 7 Abbreviazioni ed acronimi

PhotoVoltaic (PV)

Silicon (Si)

Crystalline-Silicon (c-Si)

Hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H)

Antimony Trisulfide (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)

Roquesite (CuInS<sub>2</sub> o CIS)

### **Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività**

**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.

**Pia Addabbo** was born in Benevento in 1983. She graduated in Telecommunications Engineering in 2008 and received a PhD in Information Engineering in 2012 at the University of Sannio. Currently, she is a Researcher in the Telecommunications (ING-INF/03) at the “Giustino Fortunato” University.

In these years of research she gained a deep knowledge of signal processing applied to remote sensing. At present, the main research interest concerns issues related to Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS-R) systems regarding the identification of a statistical-physical model for the signal received from such systems and the detection of data processing algorithms for the analysis of the characteristics of the observed surfaces, such as the estimate of the direction and wind velocity on the oceans.

From 2008 to 2015, she developed a research activity in the framework of the CMCC (Euro-Mediterranean Center on Climate Change) project for the creation of an algorithm capable of measuring trace gas concentrations in the atmosphere from hyperspectral satellite data in the UV band. She is also the author of publications in international journals, and she is a reviewer of both IEEE journals and international projects.