RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di modelli circuitali analitici per celle tandem perovskite/silicio (LA1.29)

I. Matacena, P. Guerriero, E. Bobeico, M. F. Caso, I. Usatii, L. Lancellotti, S. Daliento

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

RdS_PTR22-24_PR1. 1_LA1.29_419

SVILUPPO DI MODELLI CIRCUITALI ANALITICI PER CELLE TANDEM PEROVSKITE/SILICIO (LA1.29)

I.Matacena[1], P.Guerriero[1], E. Bobeico[2], M. F. Caso[2], I. Usatii[2], L. Lancellotti[2], S.Daliento[1]

[1]Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione, Università degli Studi di Napoli "Federico II"

[2]ENEA – TERIN SPV DIN

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: 1.1 "Fotovoltaico ad alta efficienza"

Linea di attività: *LA1.29*

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: DIETI-UNINA

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo:19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di Collaborazione: "Sviluppo di modelli circuitali analitici per celle tandem perovskite/silicio"

Responsabile scientifico ENEA: Laura Lancellotti

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Pierluigi Guerriero

Indice

1 Risultati attesi 4
2 Risultati ottenuti 5
3 Prodotti attesi 6
4 Prodotti sviluppati 7
5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati 8
6 Sintesi delle attività svolte 9
7 Dettaglio delle attività svolte 10
7.1 Raccolta dei dati sperimentali 10
7.2 Modello numerico 13
7.3 Modello circuitale compatto 14
7.4 Analisi critica dei risultati 15
7.4.1 Campione T24 15
7.4.2 Campione T23 17
8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte 20
9 Pubblicazioni scientifiche 21
10 Eventi di disseminazione 22

Indice delle figure

Figura 1 – Struttura a strati delle celle solari analizzate. a) cella solare bottom con eterogiunzione aSi-cSi; b) cella solare top in perovskite; c) cella solare tandem monolitica in perovskite/silicio. 10

Figura 2 – Caratteristiche tensione-corrente dei campioni OCL28 (curva rossa), 389 (curva verde) e T23 (curva blu). 11

Figura 3 – Diagrammi di Nyquist ottenuti dal campione 389 (cella top) in dipendenza della frequenza(a) e nella rappresentazione di Nyquist (b). 12

Figura 4 – Diagrammi di Nyquist ottenuti dal campione T23 (cella solare tandem) in dipendenza della frequenza(a) e nella rappresentazione di Nyquist (b). 12

Figura 5 – Caratteristiche corrente-tensione ottenute in ambiente TCAD confrontate con quelle sperimentali per i campioni 389 (cella top) e OCL28 (cella bottom). 14

Figura 6 – Circuito equivalente di una cella solare tandem. 15

Figura 7 –Caratteristica I-V numerica della cella solare bottom ottenuta considerando lo spettro AM1.5G, curva gialla, e lo spettro AM1.5G epurato dalla componente assorbita dalla cella top, curva blu. 15

Figura 8 – Caso di cella tandem in *current mismatch*: curva corrente-tensione sperimentale del campione di cella tandem (cerchi azzurri) confrontato con l'andamento in simulazione della cella tandem (linea blu), e delle sottocelle top (puntini verdi) e bottom (puntini rossi). 16

Figura 9 – Caso di cella tandem in *current match*: curva corrente-tensione della cella tandem (curva blu) e delle sottocelle top (curva verde) e bottom (curva rossa) ottenuti dal modello circuitale calibrato. I marker segnano i punti di lavoro di ciascuna cella quando la tensione di polarizzazione varia tra 0.4V e 1.6V con passo 100mV. 17

Figura 10 – Diagrammi di Nyquist (a) sperimentali e (b) simulati. 18

Indice delle tabelle

Tabella 1 - VALORI DEI PARAMETRI FISICI IMPIEGATI NELLE SIMULAZIONI SENTAURUS 13

1 Risultati attesi

L'attività fornirà come risultato un modello analitico, rappresentabile anche in termini di circuito equivalente, atto a descrivere il comportamento statico e dinamico delle celle tandem. Il modello fornirà la base di interpretazione dei dati sperimentali acquisiti mediante le misure impedenziometriche. In particolare, la selettività rispetto all'andamento in frequenza consentirà di descrivere il comportamento delle differenti componenti della cella solare tandem, risultato non ottenibile con le caratteristiche I-V di tipo standard.

I risultati dell'attività potranno fornire delle indicazioni utili all'individuazione di eventuali criticità nel processo di fabbricazione, concorrendo, così, al miglioramento delle performance complessive.

Le conoscenze acquisite potranno essere anche applicate alle altre tipologia di celle tandem il cui sviluppo è previsto nel progetto integrato.

2 Risultati ottenuti

L'attività ha prodotto un modello circuitale compatto che descrive il comportamento statico e dinamico delle celle tandem monolitiche perovskite/silicio. Tale modello può essere facilmente calibrato mediante i dati sperimentali e consente di comprendere i meccanismi che dominano il funzionamento della cella tandem a partire dalle condizioni di funzionamento delle singole sottocelle. In particolare, esso consente di identificare il contributo che le singole sottocelle apportano nel determinare la forma della caratteristica corrente-tensione e dei diagrammi di Nyquist della cella tandem. Il modello sviluppato in questa attività si candida ad essere utilizzato come strumento per la progettazione e la realizzazione di celle solari tandem innovative.

3 Prodotti attesi

Report tecnico-scientifico dal titolo “Sviluppo di modelli circuitali analitici per celle tandem perovskite/silicio”

4 Prodotti sviluppati

Il presente report dal titolo "Sviluppo di modelli circuitali analitici per celle tandem perovskite/silicio - RdS_PTR 22-24_PR1.1_LA1.29_419

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Come previsto da capitolato, l'attività ha prodotto un modello circuitale compatto atto a descrivere il funzionamento della cella solare tandem monolitica perovskite/silicio. Il modello circuitale calibrato è stato utilizzato per l'analisi di campioni di celle solari tandem. L'attività è stata completata in sostanziale accordo con quanto stabilito nel capitolato.

6 Sintesi delle attività svolte

L'attività svolta ha definito un approccio innovativo per analizzare le celle tandem monolitiche in perovskite/silicio basato su un modello circuitale compatto. La calibrazione e la validazione di questo modello hanno richiesto un'ampia campagna sperimentale. Sono state effettuate misure di caratteristiche corrente-tensione e di spettroscopia d'impedenza sotto luce per numerosi campioni appartenenti a tre tipologie di celle: cella tandem monolitica perovskite/silicio e le singole celle componenti, cella ad eterogiunzione in silicio e cella in perovskite. Inoltre, è stato necessario implementare un modello numerico in ambiente Sentaurus TCAD per le celle top e bottom. Il modello circuitale calibrato è stato utilizzato per analizzare il comportamento di differenti campioni di celle tandem. In questo documento saranno presentate le analisi svolte su due tipologie di campioni caratterizzati da differenti condizioni operative in termini di *current match*.

7 Dettaglio delle attività svolte

Di seguito la descrizione delle fasi operative dell'attività: raccolta dei dati sperimentali, sviluppo del modello numerico in Sentaurus TCAD, sviluppo e calibrazione del modello circuitale compatto ed analisi critica dei risultati.

7.1 Raccolta dei dati sperimentali

È stata svolta una estensiva campagna di misure di caratteristica corrente-tensione (I-V) e di spettroscopia d'impedenza (IS). Le misure sono state fatte su tipologie di celle diverse. In una prima fase sono state caratterizzate celle solari ad eterogiunzione aSi-cSi la cui struttura (Fig. 1°a) è identica a quella della cella bottom del dispositivo tandem (campioni OCL 17, OCL182, OCL 19, OCL 28). Successivamente sono state caratterizzate celle monogiunzione in perovskite (Fig. 1b), identiche alla cella top utilizzata nella struttura tandem completa (campioni 2cat, 3cat, 382, 384, 385, 387, 389). Infine, sono state caratterizzate celle tandem monolitiche perovskite/silicio la cui struttura è presentata in Fig. 1c (campioni T9, T16, T17, T18, T19, T20, T22, T23, T26, T31). Per tutte le celle sono state rilevate le caratteristiche I-V e l'impedenza offerta al variare della frequenza e della tensione di polarizzazione.

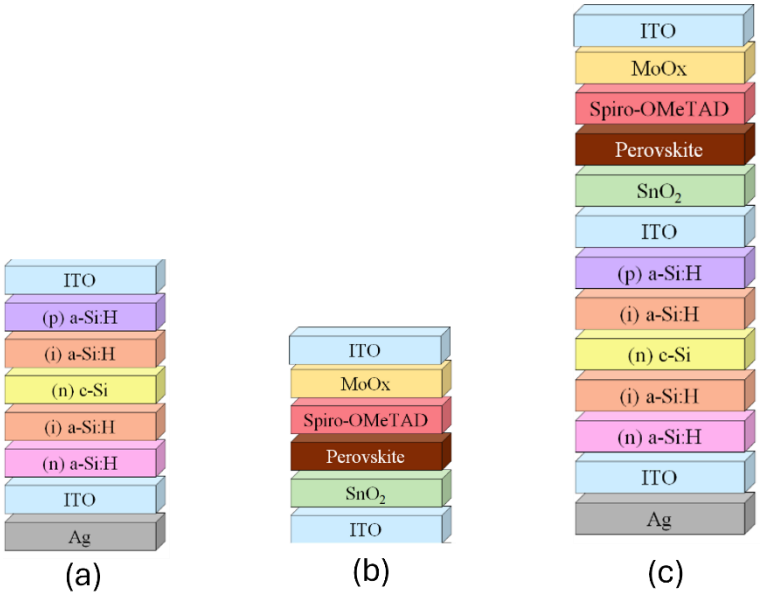

Figura 1 – Struttura a strati delle celle solari analizzate. a) cella solare bottom con eterogiunzione aSi-cSi; b) cella solare top in perovskite; c) cella solare tandem monolitica in perovskite/silicio.

Le misure I-V sono state effettuate utilizzando una sorgente luminosa calibrata con spettro AM1.5G e intensità controllata. A titolo esemplificativo, nella Fig. 2 sono riportate le curve I-V relative ad un campione per ogni tipologia di cella. La curva rossa è relativa al campione OCL 28 (cella bottom), mentre le curve verde e blu sono relative, rispettivamente, al campione 389 (cella top) e al campione T23 (cella tandem).

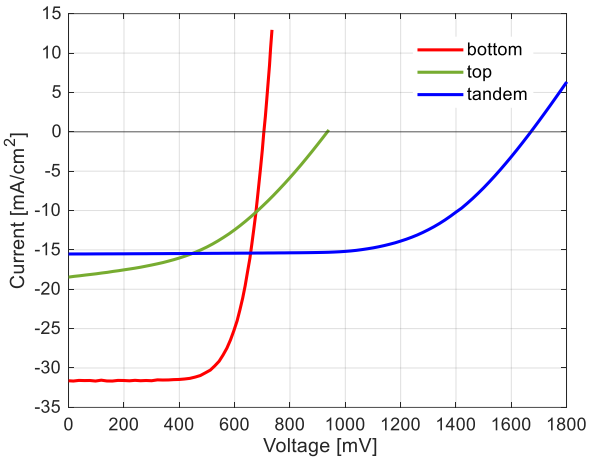

Figura 2 – Caratteristiche tensione-corrente dei campioni OCL28 (curva rossa), 389 (curva verde) e T23 (curva blu).

Le misure di spettroscopia d'impedenza (IS) sono state realizzate mediante l'utilizzo di un Impedance analyzer Solartron 1260A. La tecnica di spettroscopia consiste nell'analisi del funzionamento dinamico (AC) del dispositivo. Benché in questa sede non sia possibile fornire spiegazioni dettagliate sui meccanismi che dominano l'andamento dell'impedenza di una cella solare nel piano di Nyquist [1]-[3], si ricorda che:

- Idealmente l'impedenza di una cella solare a singola giunzione per un dato punto di polarizzazione è descritta sul piano di Nyquist da una semicirconferenza.
- Lo scostamento dall'origine di tale semicirconferenza è associato alla resistenza serie.
- L'ampiezza della semicirconferenza dipende dalla pendenza della caratteristica I-V nell'intorno del punto di polarizzazione; tipicamente la semicirconferenza assume ampiezza massima quando la cella è polarizzata in condizione di cortocircuito, convergendo al valore di resistenza shunt, mentre è minima quando è polarizzata alla tensione di circuito aperto.
- La frequenza alla quale la semicirconferenza presenta il massimo dipende dal prodotto tra la resistenza differenziale e la capacità di diffusione; tale frequenza non varia al variare della tensione di polarizzazione.

Le misure IS sono state condotte in vari punti di lavoro della curva I-V, forzando per ciascuno uno stimolo sinusoidale di ampiezza pari a 100 mV e frequenza variabile nell'intervallo compreso tra 0.1 Hz e 1 MHz. Le misure IS sono state effettuate utilizzando la medesima sorgente luminosa impiegata per le caratteristiche I-V. I risultati ottenuti dalle misure di spettroscopia per i campioni 389 (cella top) e T23 (cella tandem) sono mostrati rispettivamente in Fig 3 e Fig. 4.

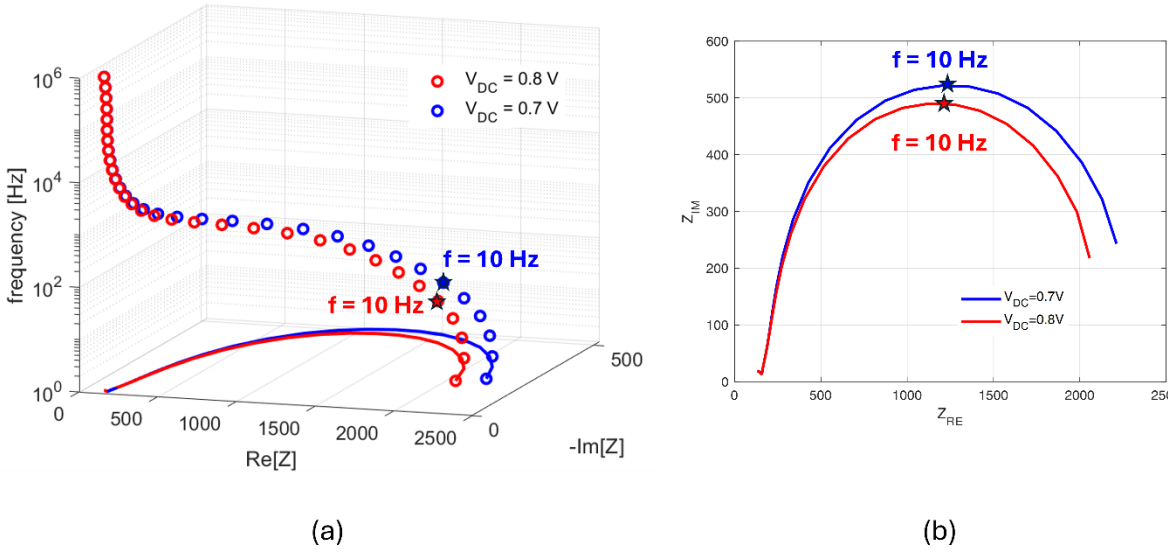

Figura 3 – Diagrammi di Nyquist ottenuti dal campione 389 (**cella top**) in dipendenza della frequenza(a) e nella rappresentazione di Nyquist (b).

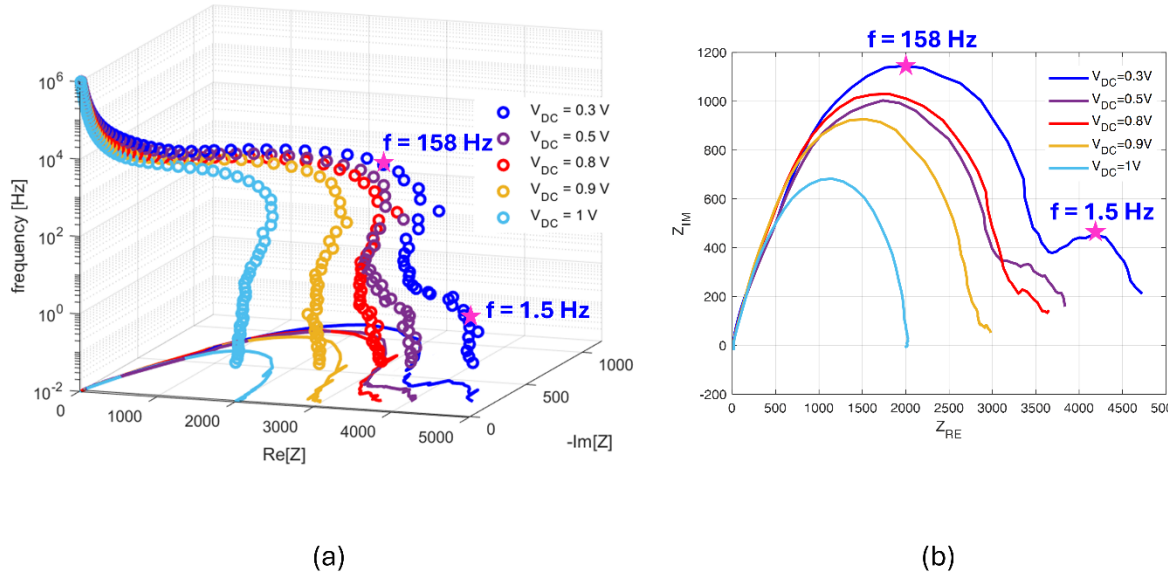

Figura 4 – Diagrammi di Nyquist ottenuti dal campione T23 (**cella solare tandem**) in dipendenza della frequenza(a) e nella rappresentazione di Nyquist (b).

Si vede dalle figure come la cella top e la cella tandem si comportino in maniera notevolmente diversa. In particolare, la cella top presenta un diagramma di Nyquist (Fig. 3b) costituito da un singolo lobo. Tale semicirconferenza presenta il massimo alla frequenza 10 Hz, indicando che la costante di tempo vale circa 16 ms. Questo valore verrà utilizzato nella calibrazione del modello circuitale. Nel caso della cella tandem si identificano due lobi, il primo nel range 0.1 Hz - 10 Hz] e il secondo nel range 10 Hz - 10 kHz (Fig.4). Il lobo dominante si colloca alle frequenze alte, mentre il lobo di ampiezza minore è situato alle basse frequenze. Il lobo minore è confrontabile con quello ottenuto per la cella top mostrato in Fig. 3b, suggerendo che questo lobo sia determinato dal funzionamento di tale cella, mentre il lobo dominante dipende verosimilmente da quella bottom. Nel range di tensioni di polarizzazione 0.3 V - 0.8 V i due lobi

di Fig. 4b presentano entrambi ampiezze nell'ordine dei kohm, indicando che entrambe le sottocelle operano nella regione della curva I-V in cui la corrente è pressoché costante.

7.2 Modello numerico

È stato sviluppato un modello numerico, calibrato sulle curve I-V sperimentali, finalizzato a rappresentare il comportamento elettrico della cella tandem. Il modello è stato sviluppato nell'ambiente di simulazione Sentaurus TCAD di Synopsys.

Sono state realizzate due strutture: una che replica la cella solare di Fig. 1a (cella bottom) e una che replica la cella solare di Fig. 1b (cella top). I parametri fisici inseriti in simulazione sono stati, in parte, ricavati dalla letteratura [4]-[5], ed in parte dalle misure effettuate. Tutti i parametri utilizzati sono presentati in Tab1.

Per quanto riguarda i modelli utilizzati per la descrizione della cella in silicio, sono stati integrati:

- il modello di mobilità dipendente dalla concentrazione di droganti e dal campo elettrico;
- il modello Shockley-Read-Hall (SRH) che descrive i fenomeni di ricombinazione non radiativa, per rappresentare le perdite dovute ai difetti intrinseci del silicio;
- il modello per la ricombinazione Auger, predominante ad alte concentrazioni di portatori;

Inoltre, per descrivere correttamente il comportamento del dispositivo sotto illuminazione, è stato incluso il modello di generazione ottica che tiene conto dell'assorbimento della luce solare e della successiva generazione di coppie elettrone-lacuna.

Definito il modello e realizzate le strutture per la simulazione numerica, sono state estratte le caratteristiche corrente-tensione in condizioni di irraggiamento standard al fine di validare il modello sui dati sperimentali. I risultati numerici sono confrontati con quelli sperimentali in Fig. 5, dove è possibile notare che il comportamento numerico descrive quello sperimentale con buona approssimazione.

TABELLA I
Valori dei parametri fisici impiegati nelle simulazioni Sentaurus.

	Doping concentration [cm^{-3}]	Thickness [nm]	Bandgap [eV]
HTL(Spiro)		100	
Absorber		300	1.64
ETL(SnO2)		20	
a-Si:H (P)	10^{18}	12	1.7
N c-Si	$5x10^{15}$	270000	1.14
a-Si:H (N)	10^{18}	6	1.7

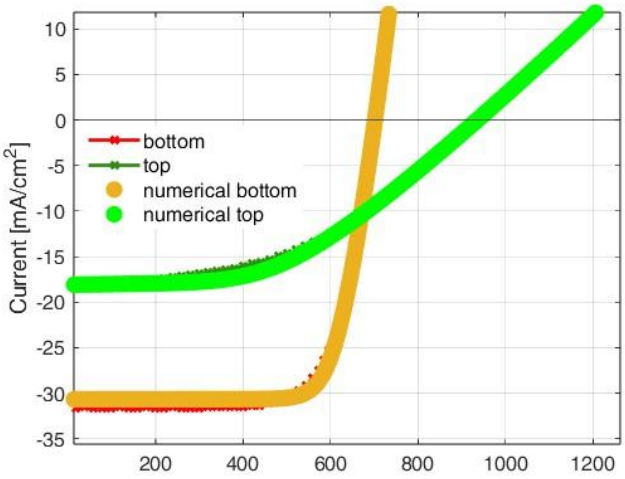

Figura 5 – Caratteristiche corrente-tensione ottenute in ambiente TCAD confrontate con quelle sperimentali per i campioni 389 (cella top) e OCL28 (cella bottom).

7.3 Modello circuitale compatto

Il modello numerico descritto nella sezione precedente è stato utilizzato per ricavare la corrente fotogenerata dalle due sottocelle, tenendo conto che la cella bottom viene irradiata con una porzione di spettro depurata dalle componenti assorbite dalla cella top.

L'attività in oggetto ha avuto l'obiettivo di sviluppare e validare un approccio basato su modelli circuitali compatti che possano essere facilmente calibrati mediante i dati sperimentali e che consentano di comprendere i meccanismi che dominano il funzionamento della cella tandem a partire dalle condizioni di funzionamento delle singole sottocelle. In particolare, si vedrà che come sia possibile identificare lo specifico contributo che le singole sottocelle apportano nel determinare la forma della caratteristica corrente-tensione e dei diagrammi di Nyquist della cella tandem.

Il modello circuitale compatto della cella tandem, implementato in ambiente SPICE, è costituito dalla serie di due sottocircuiti, uno per ciascuna sottocella (Fig.6). La cella bottom in silicio è descritta dall'equivalente circuitale del modello a 5 parametri dove la corrente fotogenerata viene descritta da un generatore di corrente costante. La cella top, invece, utilizza un generatore di corrente controllato in tensione, in modo da modellare la dipendenza della corrente fotogenerata dalla tensione, tipica delle celle in film sottile [6]. I diodi del modello contribuiscono al comportamento dinamico delle sottocelle attraverso la capacità di diffusione, definita dal parametro TT (tempo di transito), utilizzato come parametro di fitting nell'analisi svolta.

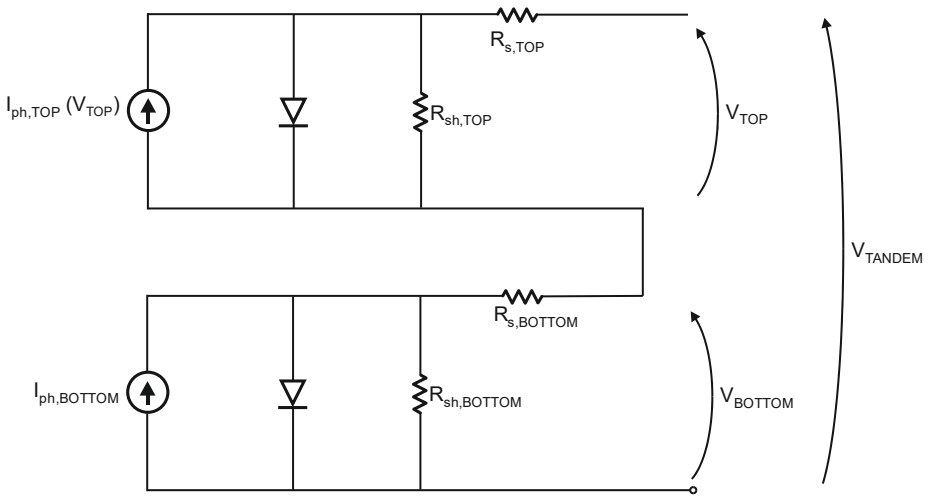

Figura 6 – Circuito equivalente di una cella solare tandem.

La calibrazione del modello avviene mediante l'estrazione dei parametri per i due sottocircuiti a partire dai dati sperimentali. In particolare, R_s, I_s e *n* sono stati estratti dalle curve I-V sperimentali, mentre R_{sh} e TT per la capacità di diffusione sono stati calibrati sui diagrammi di Nyquist. La definizione delle correnti fotogenerate ha richiesto un'analisi specifica. In particolare, la corrente fotogenerata dalla cella bottom è stata determinata mediante simulazioni numeriche realizzate in TCAD, sottoponendo la cella allo spettro solare AM1.5G depurato dalle componenti assorbite dalla cella top. In Fig.7 è mostrata in blu la caratteristica I-V così ottenuta (la curva I-V relativa alla cella top è riportata in Fig. 5). Per confronto la Fig.7 riporta anche, in giallo, la caratteristica ottenuta considerando l'intero spettro AM1.5G.

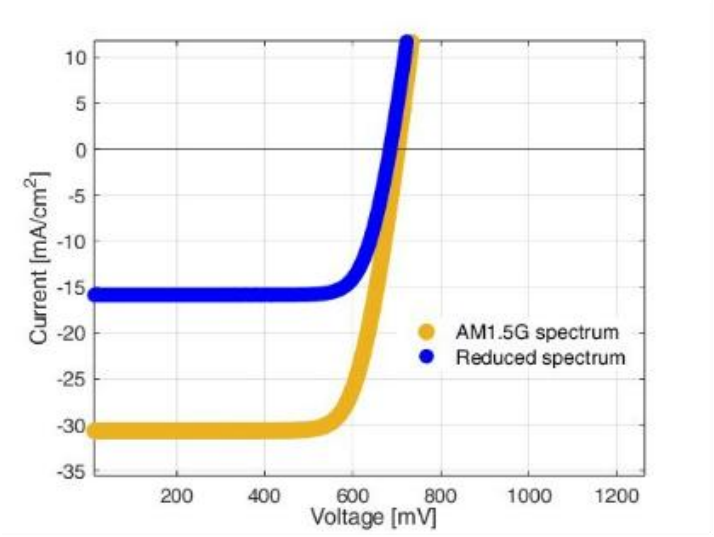

Figura 7 –Caratteristica I-V numerica della cella solare bottom ottenuta considerando lo spettro AM1.5G, curva gialla, e lo spettro AM1.5G epurato dalla componente assorbita dalla cella top, curva blu.

7.4 Analisi critica dei risultati

7.4.1 Campione T24

L'obiettivo di questa sezione è dimostrare l'efficacia del modello circuitale compatto nell'interpretare anomalie nella curva I-V di celle tandem, riconducibili al mismatch nella corrente fotogenerata dalle sottocelle. A tale scopo, verranno analizzati due campioni: il campione T24, nel quale, differentemente dagli altri campioni analizzati, si evidenzia una forma

anomala della curva I-V, e il campione T23, rappresentativo della maggior parte dei campioni analizzati.

In Fig. 8, la curva I-V sperimentale del campione T24 viene confrontata con la curva ottenuta dal modello circuitale calibrato. Sono riportate anche le curve I-V relative alle singole sottocelle.

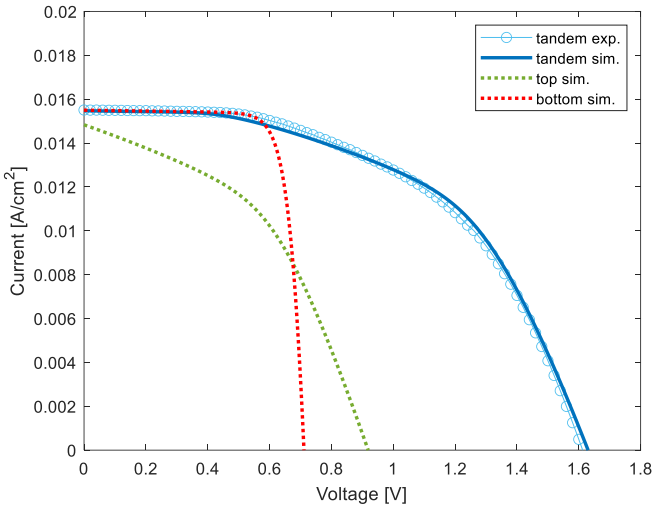

Figura 8 – Caso di cella tandem in *current mismatch*: curva corrente-tensione sperimentale del campione di cella tandem (cerchi azzurri) confrontato con l'andamento in simulazione della cella tandem (linea blu), e delle sottocelle top (puntini verdi) e bottom (puntini rossi).

La curva sperimentale mostra, per tensioni minori di 0.6 V, un andamento della corrente sostanzialmente costante. Alla tensione di 0.6V, la curva evidenzia un brusco cambiamento di pendenza, che comporta la degradazione del fill-factor (<55%) e il complessivo peggioramento delle prestazioni della cella. Le curve I-V ottenute dall'analisi circuitale mostrano che l'andamento complessivo della curva I-V relativa alla cella tandem è compatibile con una corrente di corto-circuito fornita dalla cella top minore di quella prodotta dalla cella bottom.

Immaginando di polarizzare la cella tandem in corrente e di seguire il punto di lavoro nel suo movimento lungo le curve relative alla cella tandem e alle sottocelle, è possibile giungere alla seguente interpretazione:

(1) per corrente nulla il punto di lavoro delle sottocelle si trova alla tensione di circuito aperto e la tensione operativa della cella tandem corrisponde alla somma delle due.
(2) incrementando la corrente, il punto di lavoro risale le curve I-V delle sottocelle, risultando nella cella tandem in una pendenza simile a quella della cella top. Infatti, la derivata della tensione rispetto alla corrente nella cella tandem è la somma dei contributi dovuti alla derivata delle curve tensione-corrente delle sottocelle allo stesso valore di corrente. Poiché la cella bottom esibisce un andamento pressoché verticale la derivata della cella tandem è dominata da quella della top.
(3) quando il punto di lavoro si avvicina alla corrente di corto-circuito della cella bottom, il valore della derivata cresce, diventando il contributo dominante e la curva I-V della tandem segue l'andamento della bottom, generando il brusco cambio di pendenza.

In conclusione, è evidente che, in corrispondenza del punto di massima potenza le due celle lavorano con correnti nettamente diverse (current mismatch) generando l'andamento anomalo della curva I-V.

7.4.2 Campione T23

Di seguito si riporta l'analisi effettuata sulla cella T23 (curva I-V di Fig.2) .

In questo caso, il modello circuitale compatto è stato calibrato impostando per la cella bottom il valore di corrente fotogenerata determinato in ambiente Sentaurus TCAD e variando adeguatamente la corrente di corto circuito della cella top fino ad ottenere l'andamento sperimentale. In Fig.9 sono riportate le curve ottenute dal modello circuitale implementato in ambiente SPICE; i cerchi blu rappresentano i punti di lavoro della cella tandem ottenuti variando la tensione di polarizzazione nel range 0.4V-1.6V con passo di 100mV. I cerchi rossi e verdi rappresentano i punti di lavoro corrispondenti delle due sottocelle.

La cella top presenta una corrente di corto circuito maggiore della cella bottom, che assume una funzione limitante a bassi valori della tensione di polarizzazione, donando alla curva della tandem un'ampia regione a corrente costante. Il cambio di perdenza ("ginocchio della caratteristica") avviene per le due sottocelle allo stesso valore di corrente risultando in un alto valore del fill-factor (65%) nella tandem. Le sottocelle risultano pertanto operare in *current match*.

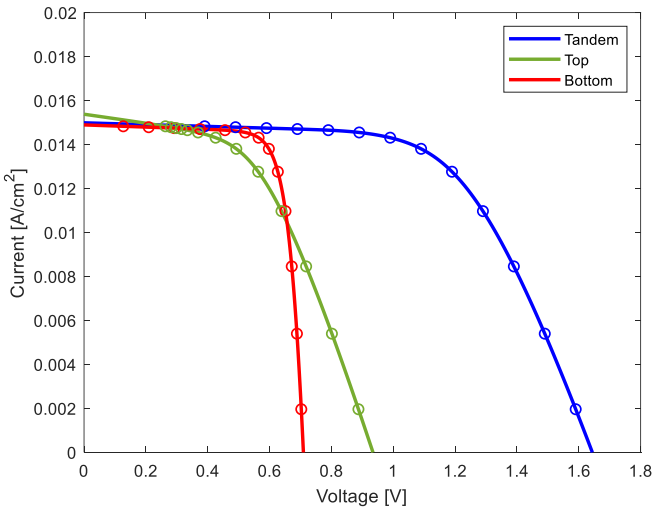

Figura 9 – Caso di cella tandem in *current match*: curva corrente-tensione della cella tandem (curva blu) e delle sottocelle top (curva verde) e bottom (curva rossa) ottenuti dal modello circuitale calibrato. I marker segnano i punti di lavoro di ciascuna cella quando la tensione di polarizzazione varia tra 0.4V e 1.6V con passo 100mV.

Lo studio si completa effettuando l'analisi mediante spettroscopia d'impedenza. I contributi delle sottocelle si presentano in maniera facilmente identificabile, poiché localizzati in range frequenziali distinti, consentendo una migliore comprensione dei meccanismi di interazione. In Fig.10 sono riportati gli andamenti dei diagrammi di Nyquist sperimentali (a) e quelli simulati (b) con il modello circuitale. Le curve si riferiscono allo spettro dell'impedenza per tensioni di polarizzazione comprese nel range 0.4 V – 1.2 V.

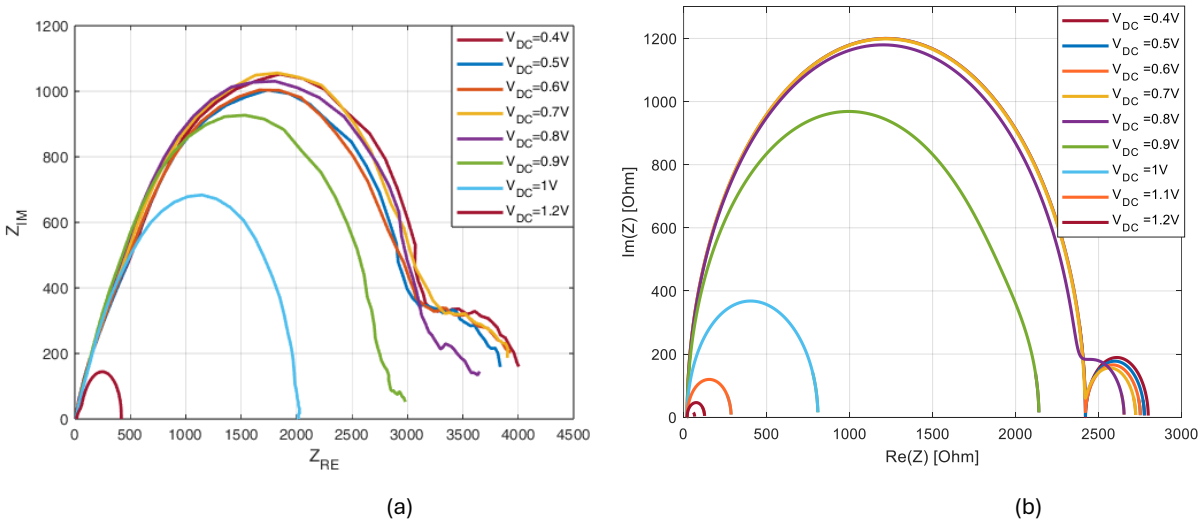

Figura 10 – Diagrammi di Nyquist (a) sperimentali e (b) simulati.

Nel range 0.4 V-0.8 V, i diagrammi sperimentali (Fig.10(a)) mostrano due lobi: il lobo principale, posizionato a frequenza più alte (circa 100 Hz) è riconducibile al contributo della cella bottom in silicio, l'altro, localizzato a frequenze basse (1-10 Hz), è dovuto alla dinamica della cella top (vedi Fig.3). L'ampiezza dei lobi (alcuni kΩ per la bottom e alcune centinaia di Ω per la top) suggerisce che entrambe le celle lavorano a sinistra dell'MPP.

Il modello circuitale calibrato è in grado di riprodurre in maniera accurata il comportamento dinamico della cella tandem; in Fig.10(b) si riporta l'andamento dei diagrammi di Nyquist ottenuti in ambiente SPICE nelle medesime condizioni di polarizzazione utilizzate nell'analisi sperimentale. L'analisi incrociata dei diagrammi di Nyquist e delle curve I-V consente l'interpretazione dei dati sperimentali. In particolare, osservando la posizione dei marker in Fig. 9, quando la tensione di polarizzazione ella tandem vale 0.4 V (primo marker a sinistra), la cella bottom lavora a circa a 100mV, mentre la top opera alla tensione di circa 300mV. All'aumentare della tensione di polarizzazione, il punto di lavoro della top rimane pressoché fermo, mentre il punto di lavoro della cella bottom si muove lungo la regione della curva dominata dalla resistenza shunt, generando sul piano di Nyquist lobi di ampiezza costante pari a R_{sh}. Solo per valori della tensione di polarizzazione superiori a 0.8 V, il punto di lavoro della bottom si approssima al "ginocchio" della caratteristica I-V, la pendenza della curva diminuisce diventando comparabile a quella della top. I lobi tendono quindi a ridurre la propria ampiezza fino a compenetrarsi e a generare un unico lobo allungato posizionato a frequenze intermedie rispetto ai lobi originali. Questo andamento rafforza quanto evinto dall'analisi della curva I-V e dimostra che le sottocelle operano in una condizione di sostanziale *current match*.

Bibliografia

[1] Macdonald, J. Ross. "Impedance spectroscopy." *Annals of biomedical engineering* 20 (1992): 289-305.

[2] Von Hauff, Elizabeth. "Impedance spectroscopy for emerging photovoltaics." *The Journal of Physical Chemistry C* 123.18 (2019): 11329-11346.

[3] Matacena, Ilaria. "Equivalent circuit extraction procedure from Nyquist plots for graphene-silicon solar cells." *2019 15th Conference on Ph. D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*. IEEE, 2019.

[4] Dahal, Biplav, et al. "Exploring the performance of perovskite solar cells with dual hole transport layers via SCAPS-1D simulation." *Materials Today Communications* 36 (2023): 106846.

[5] Alnuaimi, Aaesha, Ibraheem Almansouri, and Ammar Nayfeh. "Effect of mobility and band structure of hole transport layer in planar heterojunction perovskite solar cells using 2D TCAD simulation." *Journal of computational electronics* 15 (2016): 1110-1118.

[6] Kabir, M. Z. "AnalyticalModel for Current–Voltage Characteristics in Perovskite Solar Cells Incorporating Bulk and Surface Recombination". *Micromachines*, 15 (2024): 972

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Nella attività non sono state previste consulenze.

9 Pubblicazioni scientifiche

(1) Matacena, I., Lancellotti, L., Veneri, P.D., Daliento, S. and Guerriero, P., 2023, June. Determining the shunt resistance of individual subcell in Tandem Perovskite solar cells. In *2023 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*(pp. 924-928). IEEE.

10 Eventi di disseminazione

Presentazione del lavoro “Determining the shunt resistance of individual subcell in Tandem Perovskite solar cells” in occasione della IEEE *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*.