



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di processi di deposizione con
tecnica PECVD ad alta frequenza per la
realizzazione di film drogati p di silicio
microcristallino e a base di ossido di silicio

*P. Delli Veneri, L. V. Mercaldo, A. Agati,
F. Formisano, I. Nasti*

SVILUPPO DI PROCESSI DI DEPOSIZIONE CON TECNICA PECVD AD ALTA FREQUENZA PER LA REALIZZAZIONE DI FILM DROGATI P DI SILICIO MICROCRISTALLINO E A BASE DI OSSIDO DI SILICIO

P. Delli Veneri, L. V. Mercaldo, A. Agati, F. Formisano, I. Nasti (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

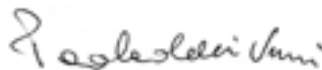
Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente

Progetto: Energia Elettrica da Fonte Solare – Ricerca su Celle Fotovoltaiche Innovative

Obiettivo : Sviluppo di materiali e architetture di dispositivo per celle solari tandem micromorfe

Responsabile del Progetto: Paola Delli Veneri, ENEA



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 COLLAUDO DELLA CAMERA DI DEPOSIZIONE.....	6
2.2 SVILUPPO DI FILM DI SILICIO MICROCRISTALLINO DI TIPO P CON TECNICA VHF PECVD.....	7
2.3 SVILUPPO DI FILM DI OSSIDO DI SILICIO MICROCRISTALLINO DI TIPO P CON TECNICA VHF PECVD	9
3 CONCLUSIONI.....	13
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	14

Sommario

Questo rapporto descrive il lavoro che ha riguardato la messa a punto di film di silicio e ossido di silicio microcristallini di tipo p cresciuti utilizzando la tecnica Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition ad alta frequenza (VHF PECVD). A tale scopo è stata inizialmente collaudata la nuova camera di processo inserita nel sistema di deposizione a multicamera utilizzato per la fabbricazione dei dispositivi. Tale camera era stata precedentemente dotata di un nuovo elettrodo e di un generatore ad alta frequenza. Sono stati, quindi, depositati film di silicio e ossido di silicio microcristallini drogati p in vari regimi di crescita. I materiali sono stati caratterizzati attraverso spettroscopia Raman, misure di ellissometria e di conducibilità elettrica trasversale. I materiali più promettenti sono stati inseriti in dispositivi a singola giunzione p-i-n di silicio microcristallino. I dispositivi sono stati caratterizzati misurando la caratteristica I-V e l'efficienza quantica esterna. Utilizzando il nuovo strato drogato p a base di ossido di silicio i dispositivi hanno presentato un incremento della risposta spettrale nella regione a bassa lunghezza d'onda rispetto a analoghi dispositivi depositati con uno strato p di tipo standard. Ciò si traduce in un corrispondente guadagno della corrente di corto circuito di circa 1 mA/cm^2 . Questo risultato è ottenuto grazie alla riduzione delle perdite per assorbimento e riflessione nello strato drogato p.

1 Introduzione

Nell'ambito delle attività relative all'obiettivo A della ricerca su "Celle fotovoltaiche innovative" è previsto lo studio di materiali che consentano di migliorare l'efficienza delle celle di silicio micromorfe. La giunzione tandem micromorfa, realizzata con una cella anteriore in silicio amorfo e una posteriore in silicio microcristallino, è ritenuta una tra le strutture più promettenti nell'ambito della tecnologia a film sottile di silicio. Tale struttura presenta, infatti, i vantaggi di una multigiunzione in termini di stabilità e di utilizzo dello spettro solare e al contempo una complessità non troppo elevata che la rendono di grande interesse per l'industria. Per migliorare l'utilizzo della radiazione solare all'interno del dispositivo si possono studiare vari accorgimenti, tra cui ridurre le perdite per assorbimento associate agli strati drogati del dispositivo che non contribuiscono al processo di fotogenerazione di coppie elettrone-lacuna. In questo contesto le proprietà ottiche ed elettriche dello strato p risultano particolarmente critiche. Infatti la radiazione solare entra nel dispositivo proprio attraverso tale strato che quindi deve essere il più possibile trasparente ad essa; per questo motivo lo strato p viene comunemente indicato con il termine *window layer*. La proprietà di alta trasparenza deve essere accompagnata da un'adeguata conducibilità elettrica e le due richieste possono essere tra di loro conflittuali, dato che il drogaggio può influenzare indirettamente altre proprietà del materiale.

In questo contesto lo sviluppo di strati drogati di ossido di silicio microcristallino (SiOx) ha interessato diversi gruppi di ricerca negli ultimi anni grazie alla possibilità di tuning indipendentemente le proprietà elettriche e quelle ottiche [1-5]. Questa tipologia di materiale è costituito da una fase mista in cui nanocristalli di silicio sono inglobati in una matrice amorfa di ossido di silicio. Il SiOx si realizza aggiungendo alla miscela dei gas precursori usati per la crescita di film di silicio microcristallino, il biossido di carbonio (CO₂), precursore dell'ossigeno. La sostituzione di atomi di silicio con atomi di ossigeno modifica le proprietà ottiche del materiale determinandone una maggiore trasparenza. Per realizzare film drogati, alla miscela di gas è aggiunto il precursore di un drogante (in genere fosforo per il drogaggio n e trimetilboro per il drogaggio p) che riesce a drogare la fase cristallina del materiale. In questo modo si riesce a conferire al SiOx una conducibilità sufficiente per essere utilizzato nelle celle fotovoltaiche. Si può sostanzialmente dire che è possibile effettuare una sorta di aggiustamento delle proprietà elettriche ed ottiche del materiale intervenendo sui parametri di deposizione.

Nell'ambito delle attività di ricerca svolte nel corso delle precedenti annualità sono stati sviluppati strati di ossido di silicio drogato n. Essi sono stati applicati con risultati molto soddisfacenti in sostituzione dello strato n standard in silicio microcristallino sia nella giunzione tunnel presente nelle strutture tandem che nella componente posteriore della cella micromorfa [3,4,6]. Si è deciso quest'anno di estendere tale studio, depositando film di ossido di silicio di tipo p (p-SiOx), anche sulla base di interessanti lavori presenti in letteratura [7-9]. Per fare ciò è stata modificata una camera del sistema di deposizione precedentemente utilizzata con altre finalità, per dedicarla allo sviluppo dei nuovi strati drogati di tipo p.

Il lavoro viene presentato nelle due fasi in cui è stato svolto: nella prima fase è stata collaudata la camera di deposizione, valutandone inizialmente la possibilità di depositare in essa materiali di proprietà analoghe rispetto a quelli già in uso. Nella seconda fase sono stati depositati e caratterizzati film di p-SiOx che sono poi stati inseriti nei dispositivi a singola giunzione p-i-n di silicio microcristallino.

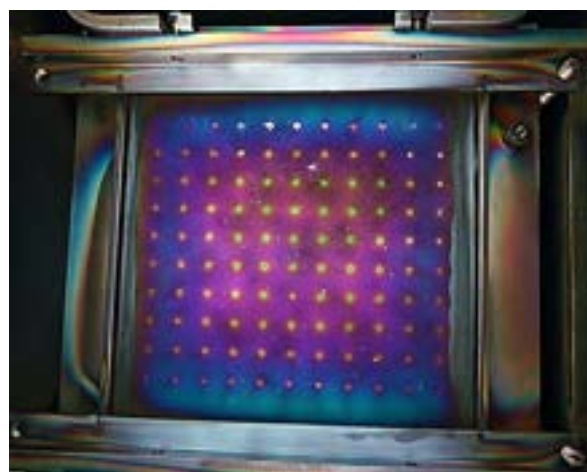
2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Collaudo della camera di deposizione

Una prima fase del lavoro ha avuto come obiettivo la messa a punto della camera di deposizione. E' utile, infatti ricordare che nell'apparato multicamera di deposizione utilizzato per la realizzazione delle celle solari (fig. 1a), solo due delle cinque camere erano disponibili fino alla scorsa annualità per le attività in oggetto: una per depositare materiali drogati (PL3) ed una per il silicio intrinseco (PL4). Si era deciso allora di modificare la camera PL5 del sistema e di dedicarla alla deposizione dei soli film drogati di tipo p. Questo con lo scopo sia di migliorare la riproducibilità delle deposizioni, separando la deposizione dei materiali di tipo p da quella di film di tipo n, che di sperimentare una diversa tipologia di elettrodo ed una diversa frequenza di alimentazione. In particolare, è stato installato un elettrodo forellato (fig. 1b) che sostituisce il classico elettrodo piano in uso nelle altre due camere. Con questa modifica i gas utilizzati per la deposizione dei materiali vengono fatti penetrare nella regione in cui avviene la loro decomposizione attraverso i fori dell'elettrodo. Il flusso dei gas dunque, non arriva lateralmente come nelle altre camere e ciò garantisce un apporto diretto ed omogeneo di essi su tutta la superficie del substrato che si affaccia all'elettrodo. Questo elettrodo quindi consente in linea di principio di migliorare l'uniformità di deposizione sia in termini di spessore che in termini di struttura sull'intera area del substrato (10 x 10 cm²), soprattutto nel caso in cui si utilizzino regimi ad alta pressione particolarmente interessanti per ottenere alte velocità di crescita dei materiali. L'elettrodo è collegato ad un generatore RF a 40.68 MHz. Per collaudare la nuova geometria dell'elettrodo si è cercato di riprodurre materiali di analoghe proprietà rispetto a quelli depositati nella camera PL3. Il confronto è stato fatto dunque a parità di ricetta e utilizzando la frequenza di alimentazione standard (13.56 MHz) usata normalmente nella camera PL3. I materiali sono stati depositati utilizzando una miscela di idrogeno (H₂), silano (SiH₄) e trimetilboro (B(CH₃)₃, indicato nel seguito con la sigla TMB). La temperatura è fissata a 150°C, la pressione del gas in camera è pari a 1Torr, mentre la potenza della scarica a bagliore è impostata a 240 mW/cm². Dalle caratterizzazioni eseguite sui due campioni è risultato che il campione realizzato nella nuova camera presenta una conducibilità leggermente migliore rispetto all'analogo film depositato nella camera PL3 (7.1x10⁻³ S/cm vs 3.5x10⁻³ S/cm) e una frazione cristallina equivalente come mostrato dall'analisi Raman (fig. 2a).



(a)



(b)

Figura 1: Impianto multicamera utilizzato per la fabbricazione di materiali e celle solari a film sottile (a), elettrodo forellato utilizzato nella camera di deposizione dei film di silicio di tipo p (b).

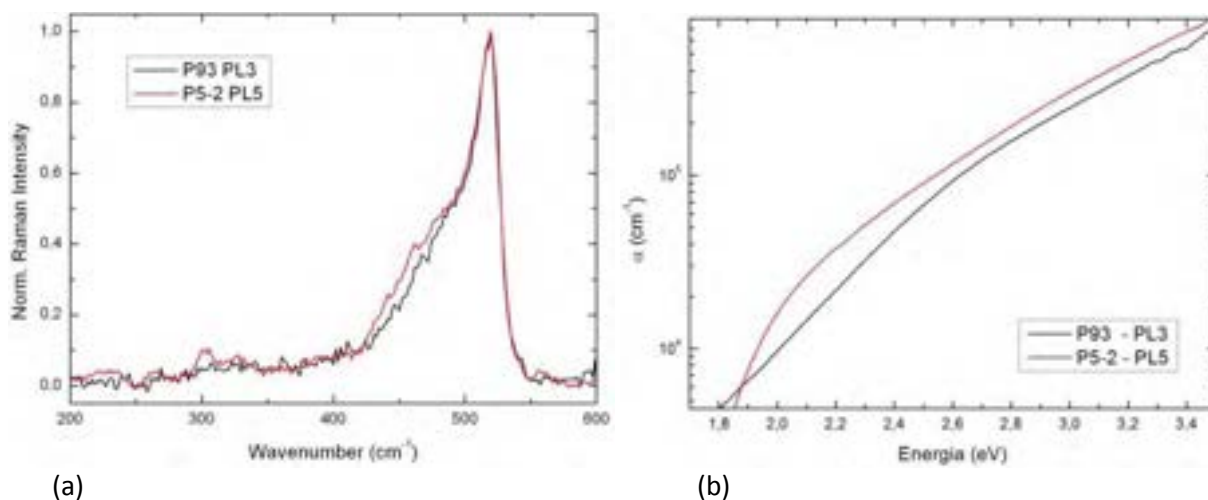


Figura 2: Confronto tra gli spettri Raman (a) e di coefficiente di assorbimento (b) misurato sui due campioni depositati utilizzando gli stessi parametri nella vecchia (PL3) e nuova (PL5) camera di deposizione.

In figura 2b è riportato l'andamento del coefficiente di assorbimento ottico α dei due film. Gli spettri sono ricavati da misure di riflettanza e trasmittanza, eseguite con spettrofotometro UV/Vis/NIR. Dal confronto si osserva che il film ottenuto nella PL5 è più assorbente di quello ottenuto nella PL3. Questo risultato, insieme al valore di conducibilità leggermente più alto (circa il doppio), potrebbe essere legato ad una maggior facilità di incorporare atomi droganti nel materiale nella nuova configurazione della camera. Al di là di questa considerazione, comunque, i risultati hanno confermato il buon funzionamento della camera PL5.

2.2 Sviluppo di film di silicio microcristallino di tipo p con tecnica VHF PECVD

Il passo successivo è stato quello di valutare l'effetto dell'alta frequenza, 40.68 MHz, sulle proprietà del materiale. Lasciando invariate le condizioni di deposizione precedentemente utilizzate ad eccezione della frequenza di eccitazione, i film hanno mostrato caratteristiche strutturali ed elettriche del tutto differenti da quelle ottenute a frequenza standard. La conducibilità dei film depositati a 40.68 MHz si riduce di ben sei ordini rispetto ai film depositati a frequenza standard. Per quanto riguarda la struttura dei materiali (figura 3), lo spettro Raman ottenuto sul materiale cresciuto ad alta frequenza mostra la presenza della sola banda ampia centrata a 480 cm^{-1} , caratteristica del silicio amorfo, mentre il film depositato a frequenza standard, presenta, oltre a questa componente, il picco stretto a 520 cm^{-1} tipico del silicio cristallino. Questi risultati, osservati in letteratura per film di p- $\mu\text{-Si:H}$ depositati sia con la tecnica Very High Frequency Glow Discharge (VHF-GD) [10] sia tramite Hot Wire CVD [11], possono essere spiegati ipotizzando che l'utilizzo del regime VHF favorisca l'incorporazione di atomi droganti (in questo caso boro) nel materiale. È infatti noto dalla letteratura che il boro tende a sfavorire la cristallinità [12] e ciò genera ripercussioni sulle proprietà elettriche del materiale. Infatti sono proprio i volumi di frazione cristallina presenti nel materiale che vengono drogati in maniera efficace. Si è allora provato a ridurre il drogaggio che viene quantificato dal rapporto TMB/SiH_4 . Dagli spettri Raman mostrati in figura 4a è evidente che riducendo tale rapporto, aumenta il contributo del picco a 520 cm^{-1} legato alla fase cristallina. La variazione strutturale al crescere del drogaggio è evidente anche negli spettri di assorbimento α (figura 4b) ed in particolare nella variazione della forma delle curve. Infatti, al crescere della frazione amorfa si assiste dal punto di vista dell'assorbimento ottico alla transizione da un materiale a gap diretta ($E_g=1.75 \text{ eV}$) a uno a gap indiretta ($E_g=1.1 \text{ eV}$).

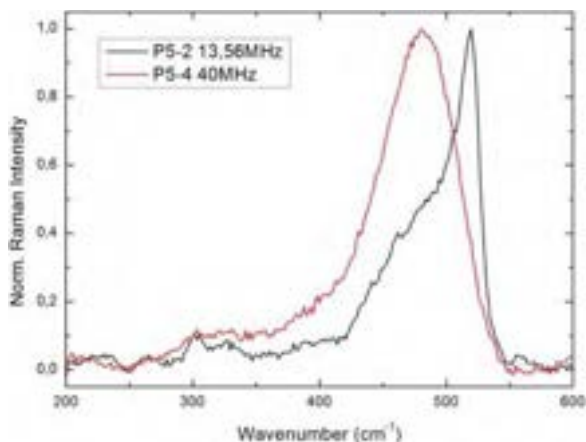


Figura 3: Confronto tra spettri Raman ottenuti a parità di drogaggio variando la frequenza di eccitazione.

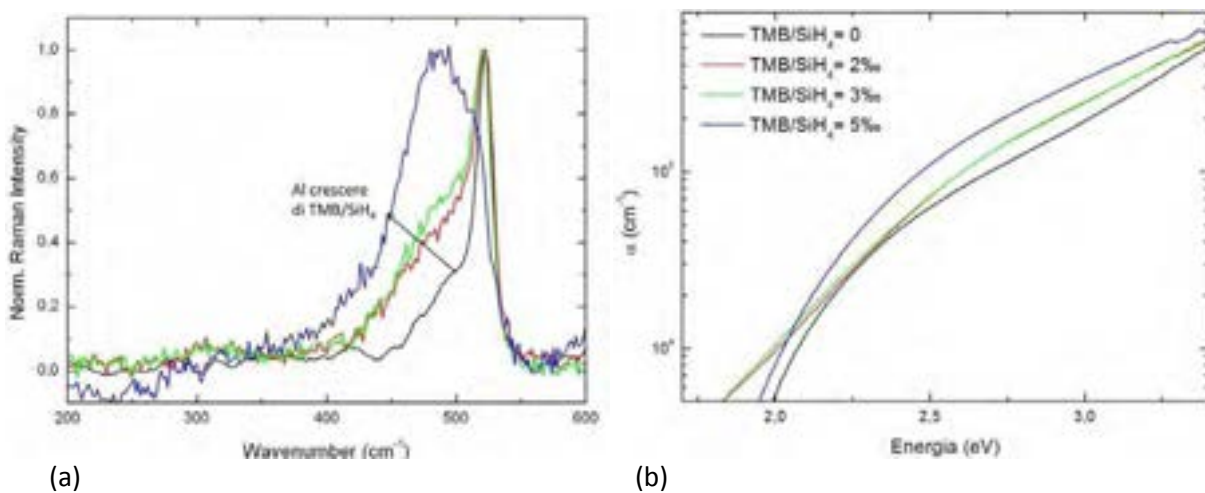


Figura 4: Evoluzione degli spettri Raman (a) e del coefficiente di assorbimento α (b) al variare del rapporto TMB/SiH4.

In figura 5 è poi mostrato l'andamento della conducibilità in funzione del rapporto di drogaggio utilizzato. Incrementando il rapporto TMB/SiH4 da 0 a 2% la conducibilità passa da $2.2 \cdot 10^{-8}$ S/cm a $7.1 \cdot 10^{-2}$ S/cm. Per valori di TMB/SiH4 > 3%, la conducibilità decresce a causa dell'aumento della fase amorfa nel materiale. Una ulteriore ottimizzazione delle proprietà elettriche può essere ottenuta variando sia la diluizione di idrogeno, che favorisce la crescita di fase ordinata, che la potenza della scarica a bagliore. E', infatti, atteso che la dissociazione del TMB e di conseguenza la capacità di incorporare boro aumentino con la potenza della scarica a bagliore. Queste considerazioni hanno portato a modificare i parametri di deposizione, aumentando la diluizione di idrogeno (da 200 sccm si è passati a 250 sccm) e riducendo la densità di potenza da 240 mW/cm² a 100 mW/cm². In queste condizioni è stato ottenuto un materiale che presenta un'adeguata cristallinità ed un'ottima conducibilità ($\sigma = 0.15$ S/cm).

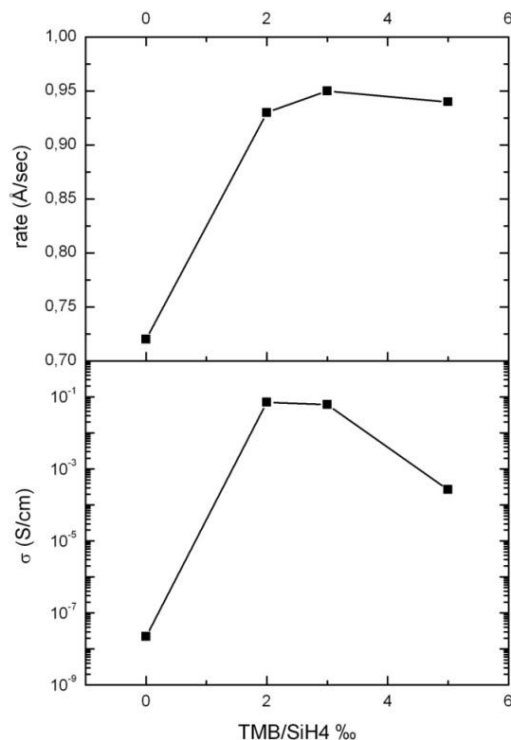


Figura 5: Evoluzione della velocità di crescita e della conducibilità dei film di silicio al variare del rapporto di drogaggio in fase gassosa TMB/SiH₄.

2.3 Sviluppo di film di ossido di silicio microcristallino di tipo p con tecnica VHF PECVD

Dopo aver ottimizzato il processo di fabbricazione di film di silicio microcristallino in regime di alta frequenza, si è dato inizio all'attività di sperimentazione per la realizzazione di film di ossido di silicio drogati p a fase mista (p-SiO_x). Per ottenere questi materiali alla miscela di gas inizialmente utilizzata (H₂, SiH₄ e TMB) è stata aggiunta una sorgente gassosa di atomi di ossigeno, l'anidride carbonica (CO₂). È stata quindi studiata l'influenza del contenuto di ossigeno sulle proprietà strutturali, ottiche ed elettriche, variando il flusso della CO₂. Sono state fabbricate tre serie campioni a tre differenti valori della densità di potenza (55, 100 e 170 mW/cm²). Per tutti i campioni la temperatura del substrato è fissata a 150 °C e la pressione in camera è pari a 1 Torr.

Sebbene siano le proprietà elettriche ed ottiche dei materiali a determinarne il loro potenziale utilizzo nei dispositivi, non si può tralasciare la valutazione della velocità di crescita. Tale parametro risulta infatti di interesse industriale perchè a valori troppo bassi di velocità di crescita corrispondono tempi di processo molto lunghi che possono comportare una drastica riduzione della resa di produzione. Questo problema è particolarmente sentito quando si ha a che fare con la crescita di materiali microcristallini in cui è necessario generalmente modificare i parametri di processo per consentire la crescita di fasi ordinate. Nel caso in esame abbiamo determinato le velocità di crescita ottenute per le tre serie realizzate (figura 6). I film mostrano, come ci si attendeva, una forte dipendenza della velocità di crescita dalla potenza del campo eccitante: come è evidente nell'insero della figura tale velocità aumenta linearmente con la potenza nel caso dei film microcristallini standard. Per tutte le serie in esame si è poi osservato che, aggiungendo la CO₂ nella miscela si osserva un'iniziale riduzione del rate di crescita oltre il quale essa rimane pressoché costante.

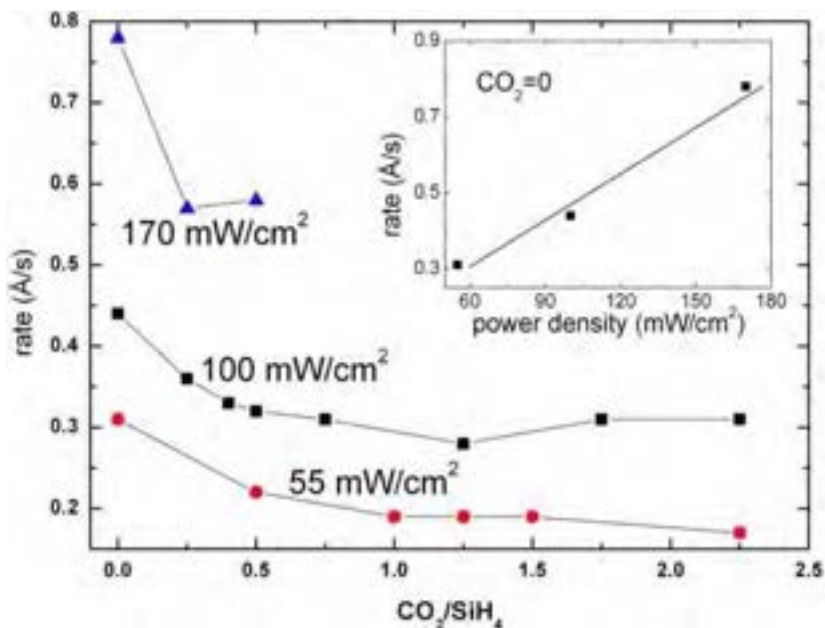


Figura 6: Velocità di deposizione per le tre serie di campioni cresciute a tre differenti densità di potenza.

La correlazione tra le proprietà ottiche e elettriche è cruciale nello sviluppo di un materiale a base di ossido di silicio che possa essere utilizzato nelle celle solari in sostituzione del convenzionale strato p in silicio microcristallino. In particolare, come già accennato in precedenza, è necessario che il materiale sia il più trasparente possibile compatibilmente con l'esigenza di un'appropriata conducibilità. La figura 7 riporta l'andamento della conducibilità elettrica per le tre serie di campioni. Aggiungendo CO₂ alla miscela di gas, il materiale inizia a incorporare ossigeno al suo interno e ciò ha come conseguenza una riduzione della conducibilità di vari ordini di grandezza. L'andamento di σ risulta abbastanza simile nel caso delle serie a 55 e 100 mW/cm² (i valori sono leggermente maggiori alla minore densità di potenza), mentre si osserva una rapida riduzione della conducibilità alla più alta potenza utilizzata in questo studio (170 mW/cm²). Questa differenza di comportamento è presumibilmente legata ad una diversa transizione strutturale del materiale cresciuto utilizzando valori differenti di potenza. Ciò è, infatti confermato dalle misure di spettroscopia Raman (figura 8). Tali misure mostrano che, come riportato in letteratura [2] e già riscontrato nel corso

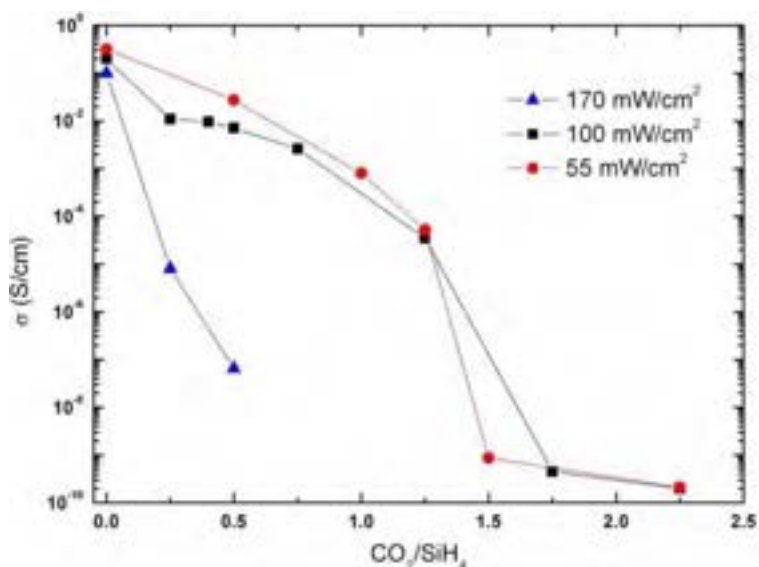


Figura 7: Conducibilità elettrica in funzione del rapporto CO₂/SiH₄ per le tre serie di campioni realizzate.

del lavoro eseguito per la messa a punto dei film di tipo n [3,4], l'aggiunta di CO_2 comporta un riduzione della frazione cristallina nel materiale fino alla definitiva transizione verso una struttura completamente amorfa. Tuttavia mentre ad alta potenza, a causa della più elevata velocità di deposizione che non favorisce la crescita di fase ordinata, il materiale si presenta amorfo già a bassi valori della velocità del flusso di CO_2 , negli altri casi la fase cristallina è preservata in un ampio intervallo del rapporto CO_2/SiH_4 . Tali regimi sono quindi compatibili con la crescita di un materiale a fase mista.

Come già osservato per i film di tipo n [3,4], è proprio questa struttura a fase mista del il p-SiOx che consente di aggiustare opportunamente le proprietà ottiche grazie alla presenza di ossigeno nella matrice amorfa e di mantenere una conducibilità sufficientemente elevata mediante il drogaggio della fase nanocristallina.

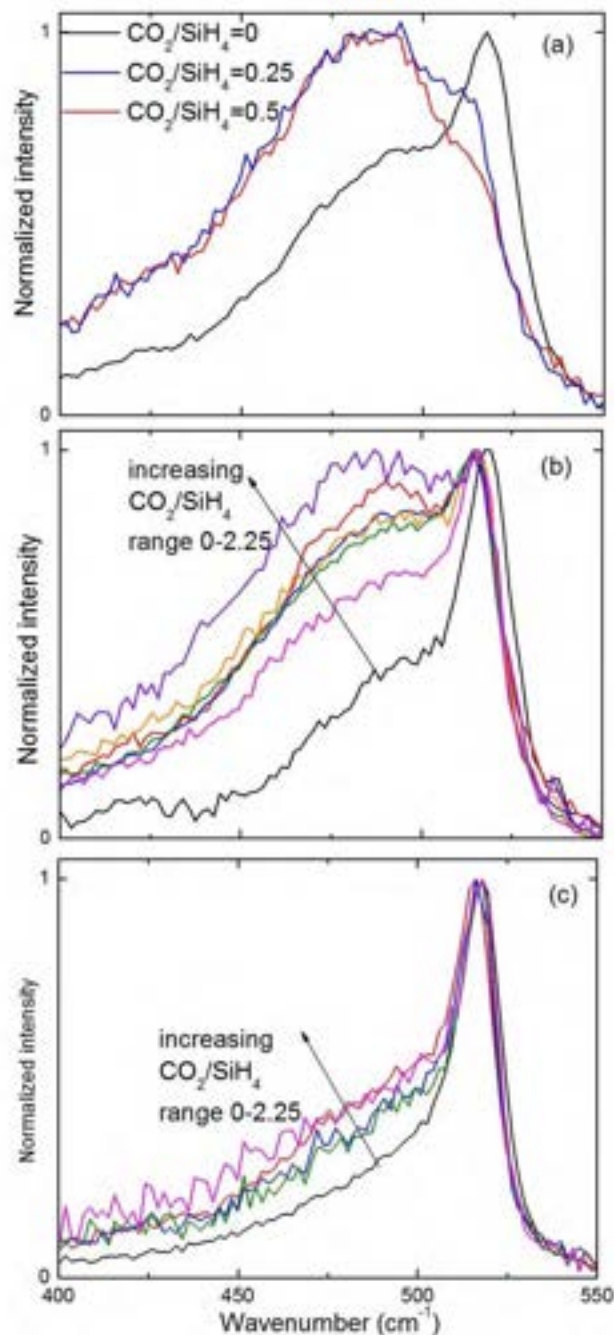


Figura 8: Evoluzione degli spettri Raman con il rapporto CO_2/SiH_4 per le tre serie di campioni realizzate.

Le proprietà ottiche dei materiali sono state indagate attraverso misure di ellissometria. Il fit dei dati è stato ottenuto utilizzando l'approssimazione del mezzo efficace di Bruggeman, descrivendo il materiale come miscela di silicio in fase nanocristallina e ossido di silicio non stechiometrico. La figura 9 mostra per le serie più promettenti i valori stimati per l'indice di rifrazione n a 635 nm e per E_{04} (valore indicativo della gap di energia dei materiali in quanto definito come energia alla quale il coefficiente di assorbimento si riduce a 10^4 cm^{-1}). Il progressivo aumento di atomi di ossigeno nei film, ottenuto incrementando il rapporto CO_2/SiH_4 , ha l'effetto di ridurre l'indice di rifrazione fino a valori inferiori a 2.4 e di allargare la gap del materiale fino a valori di E_{04} superiori a 2.3 eV. Entrambe le modifiche alle proprietà del materiale possono avere ripercussioni positive sulle prestazioni dei dispositivi: la riduzione dell'indice di rifrazione può infatti determinare una riduzione della perdita per riflessione all'interfaccia tra l'elettrodo frontale (TCO) e il silicio grazie ad un miglior matching degli indici di rifrazione, mentre l'allargamento della gap di energia determina una riduzione delle perdite dovute ad assorbimenti parassiti, assorbimenti cioè che non contribuiscono al processo di fotogenerazione quali sono quelli che avvengono negli strati drogati. Vale la pena notare che le due serie depositate a 55 e 100 mW/cm^2 mostrano simili proprietà ottiche ed elettriche, cosa che rende più interessante la serie ottenuta a più alta potenza grazie alle maggiori velocità di crescita ottenibili in questo caso.

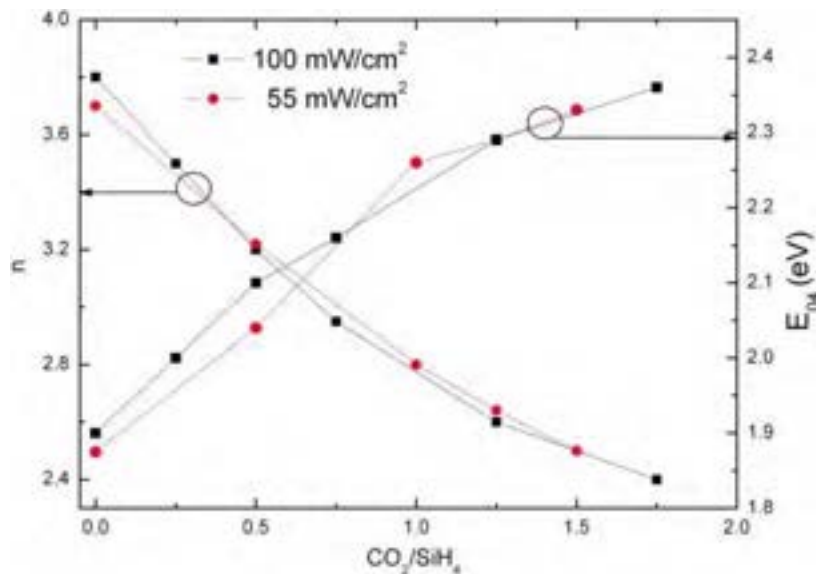


Figura 9: Indice di rifrazione a 635 nm e E_{04} valutati per le serie cresciute a 55 e 100 mW/cm^2 .

Le interessanti proprietà degli strati di p-SiOx sono state quindi testate in dispositivi a singola giunzione p-i-n di silicio microcristallino. Sono state fabbricate due celle solari che differivano tra loro solo per lo strato p utilizzato: una cella è stata depositata con un classico strato drogato p in silicio microcristallino, mentre l'altra è stata realizzata con il p-SiOx. Lo strato di ossido di silicio è stato cresciuto a 100 mW/cm^2 fissando il rapporto CO_2/SiH_4 a 0.75. Le misure di caratteristica IV sotto illuminazione in condizioni AM1.5 hanno confermato l'adeguatezza delle proprietà elettriche del nuovo strato p, in quanto sono stati misurati valori simili di resistenza serie e Fill Factor sulle due celle. Nella figura 10a è riportato il confronto tra le misure di efficienza quantica esterne effettuate sui due dispositivi. La figura evidenzia un miglioramento della risposta spettrale alle basse lunghezze d'onda (fino a $\sim 500 \text{ nm}$), che si traduce in un incremento della corrente di corto circuito pari a 1 mA/cm^2 . Si osserva, inoltre, che la risposta spettrale nella regione alle alte lunghezze d'onda è simile per i due dispositivi: questa è una ulteriore indicazione positiva sulla qualità dello strato p. Infatti, nel caso di celle in silicio microcristallino le proprietà strutturali dello strato p influenzano anche la struttura dello strato assorbitore intrinseco, costituendo lo strato di nucleazione sul quale poi avviene la crescita di quest'ultimo. Il risultato ottenuto, quindi, conferma che lo strato p consente una nucleazione

allo strato intrinseco simile a quella ottenuta con lo strato p in silicio microcristallino. Un'ulteriore studio del comportamento ottico delle celle è stato eseguito misurando la luce riflessa da esse mediante spettrofotometro (figura 10b). Da tale misura è stata riscontrata una riduzione della riflessione nel caso della cella ottenuta con il nuovo strato p. Ciò conferma che il miglioramento della corrente ottenuto sul dispositivo è dovuto in parte alla riduzione di assorbimento parassita nello strato p e in parte ad un miglior raccordo degli strati in termini di indici di rifrazione (interfaccia TCO/silicio).

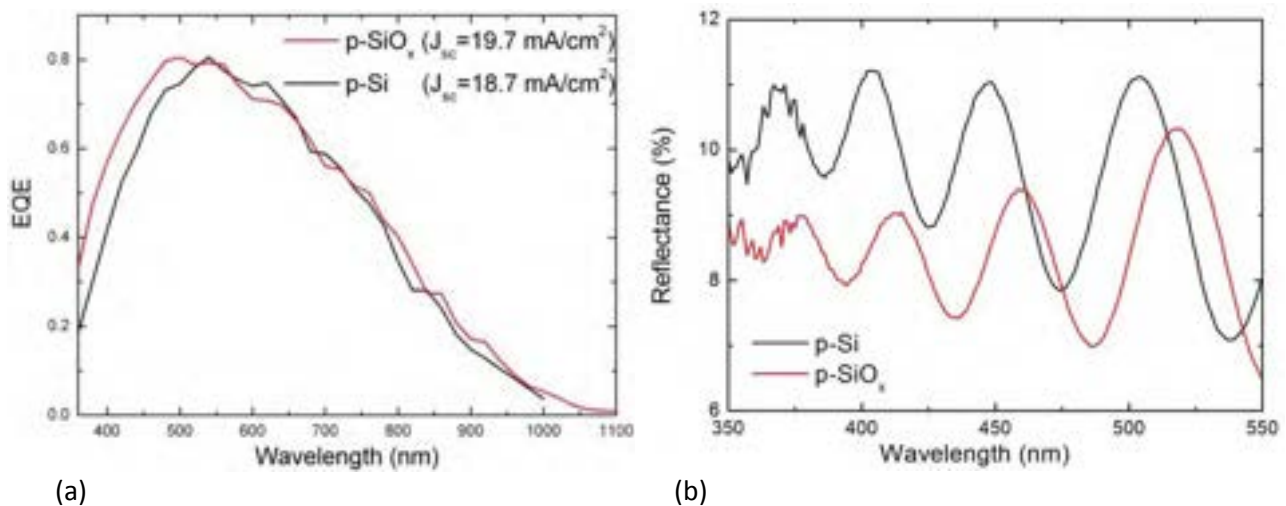


Figura 10: Spettri di efficienza quantica (a) e di riflettanza (b) misurati su dispositivi identici che differiscono per il tipo di strato p utilizzato.

3 Conclusioni

Il lavoro ha riguardato la sintesi e la caratterizzazione di nuovi strati di tipo p a base di ossido di silicio da inserire in celle solari a film sottile di silicio. È stata collaudata la camera allestita nella scorsa annualità con un nuovo generatore ad alta frequenza (40.68 MHz) ed un elettrodo di nuova concezione. Sono state quindi depositate 3 serie di campioni a differente densità di potenza del campo eccitante (55, 100, e 170 mW/cm²). Ognuna delle serie di campioni è stata ottenuta variando il rapporto CO₂/SiH₄ in modo da cambiare il contenuto di ossigeno all'interno del materiale. Grazie alla possibilità di disaccoppiare almeno in parte la funzionalità elettronica e ottica del materiale, è stato possibile ottenere materiali con valori più bassi di indice di rifrazione e del coefficiente assorbimento rispetto ai convenzionali film di tipo p microcristallini, ottenendo simili valori per la conducibilità elettrica. Questi nuovi strati di tipo p sono stati inseriti in celle a singola giunzione p-i-n di silicio microcristallino, ottenendo un significativo miglioramento della risposta spettrale nell'intervallo di lunghezze d'onda nel blu-verde che si traduce in un incremento della corrente di corto circuito del dispositivo di circa 1 mA/cm². Nel futuro il risultato sarà esteso alle giunzioni tandem micromorfe, dove questo strato potrà essere testato sia come strato finestra nella cella top che nella giunzione tunnel del dispositivo. Grazie all'attuale sistema di distribuzione dei gas, sarà inoltre interessante studiare regimi di crescita ad alte pressioni di lavoro (fino a 10 Torr) che potrebbero offrire la possibilità di aumentare la velocità di deposizione del materiale preservandone al contempo le proprietà che lo rendono idoneo per l'utilizzo nei dispositivi. Attualmente si stanno apportando piccole modifiche alla geometria della camera proprio per poter operare ad alte pressioni.

4 Riferimenti bibliografici

1. P. Buehlmann, J. Bailat, D. Domine, A. Billet, F. Meillaud, A. Feltrin, C. Ballif, In situ silicon oxide based intermediate reflector for thin-film silicon micromorph solar cells, *Applied Physics Letters*, 91 (2007), p. 143505
2. A. Lambertz, T. Grundler, and F. Finger, Hydrogenated amorphous silicon oxide containing a microcrystalline silicon phase and usage as an intermediate reflector in thin-film silicon solar cells. *J. Appl. Phys.* 109, 113109 (2011).
3. Paola Delli Veneri, Lucia V. Mercaldo, and Iurie Usatii, Silicon oxide based n-doped layer for improved performance of thin film silicon solar cells. *Applied Physics Letters* 97, 023512 (2010).
4. Paola Delli Veneri, Lucia V. Mercaldo and Iurie Usatii, Improved micromorph solar cells by means of mixed-phase n-doped silicon oxide layers. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 21 (2013), pp. 148-155
5. B. Yan, G. Yue, L. Sivec, J. Yang, S. Guha, C.-S. Jiang, Innovative dual function nc-SiO_x:H layer leading to a >16% efficient multi-junction thin-film silicon solar cell *Applied Physics Letters*, 99 (2011), p. 113512
6. L. V. Mercaldo, P. Delli Veneri.... Properties of mixed phase n-doped silicon oxide layers and application in micromorph solar cells, *SolarEnergyMaterialsandSolarCells*(2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2013.05.030> Sol mat
7. A. Lambertz, et al., Boron-doped hydrogenated microcrystalline silicon oxide ($\mu\text{c-SiO}_x\text{:H}$) for application in thin-film silicon solar cells, *J. Non-Cryst. Solids* (2012).
8. P. Cuony, M. Marending, D. T. L. Alexander, M. Boccard, G. Bugnon, M. Despeisse, and C. Ballif, Mixed-phase p-type silicon oxide containing silicon nanocrystals and its role in thin-film silicon solar cells. *Applied Physics Letters* 97, 213502 (2010).
9. P. Cuony, T. L. Alexander Duncan, I. Perez-Wurfl., Silicon Filaments in Silicon Oxide for Next-Generation Photovoltaics, *Advanced Materials* (2012).
10. R. Fluckiger, J. Meier, A. Shah, A. Catana, M. Brunel, H.Y. Nguyen, R.W. Collins, R. Carius, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 336 (1994) 511.
11. P. Brogueira, V. Chu, A.C. Ferr o, J.P. Conde, *J. Vac. Sci. Technol. Part A* 15 (1997) 2968.
12. R. Saleh, N.H. Nickel, Raman spectroscopy of B-doped microcrystalline silicon films. *Thin Solid Films* 427 266–269 (2003).