



Ricerca di Sistema elettrico

# Ottimizzazione delle proprietà ottiche e di trasporto di strati di grafene da impiegare in celle ad eterogiunzione a-Si:H/c-Si da impiegare in celle ad eterogiunzione a-Si:H/c-Si

A. D'Orazio, V. Petruzzelli, G. Bruno, L. Lancellotti,  
E. Bobeico, I. Usatii, P. Delli Veneri

OTTIMIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ OTTICHE E DI TRASPORTO DI STRATI DI GRAFENE DA IMPIEGARE IN CELLE AD ETEROGIUNZIONE A-Si:H/C-Si

A. D’Orazio, V. Petruzzelli, G. Bruno (Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell’Informazione, Politecnico di Bari)

L. Lancellotti, E. Bobeico, I. Usatii, P. Delli Veneri (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di energia elettrica con basse emissioni di carbonio

Progetto: Solare Fotovoltaico Piano Ricerca su Tecnologie Fotovoltaiche Innovative

Obiettivo: Celle solari ad eterogiunzione a-Si/c-Si - Ottimizzazione del guadagno ottico in celle ad eterogiunzione di silicio: texturing del silicio e sviluppo di TCO ad alta mobilità

Responsabile del Progetto ENEA:



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all’interno dell’Accordo di collaborazione “Ottimizzazione delle proprietà ottiche e di trasporto di strati di grafene da impiegare in celle ad etero giunzione a-Si:H/c-Si”

Responsabile scientifico ENEA: Laura Lancellotti



Responsabile scientifico Politecnico di Bari: Antonella D’Orazio

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
3 CONCLUSIONI.....	12
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	13
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	13

## Sommario

L'utilizzo di grafene quale alternativa agli ossidi conduttori trasparenti (TCO) è condizionato dalla possibilità di ottenere grafene con proprietà ottiche (trasparenza ottica nel visibile) e di trasporto (sheet resistance) confrontabili con quelle dei TCO. Lo studio affrontato in questa attività si pone come obiettivo quello di sostituire l'ossido di zinco drogato con alluminio (AZO) in celle ad eterogiunzione a-Si:H/c-Si. Il grafene è stato cresciuto su rame con tecnica CVD; il trasferimento del grafene sui substrati e sulle eterostrutture fotovoltaiche è stato effettuato con il metodo dry "thermal tape" dopo aver solubilizzato il rame con ammonio persolfato. La qualità del grafene è stata valutata con la spettroscopia Raman e con la microscopia ottica. Il controllo delle proprietà di trasporto è stato effettuato sia utilizzando multistrati di grafene (sino a 5 strati) che drogando il grafene con cloruro di tionile ( $\text{SOCl}_2$ ). L'uso combinato del doping con  $\text{SOCl}_2$  e dei multistrati ha permesso di ottenere grafene con sheet resistance di circa 30 Ohm/square e trasparenza ottica pari all' 87% a lunghezza d'onda di 550 nm.

Il trasferimento di multistrati di grafene su eterogiunzioni a-Si:H/c-Si, ha prodotto risultati che indicano la modulazione delle proprietà elettriche ed ottiche e il "tuning" della funzione di lavoro del grafene (a zero gap) con la gap del silicio quali parametri essenziali per l'ottimizzazione della giunzione fotovoltaica. A questo riguardo sono state individuate e si stanno sperimentando nuove strategie di funzionalizzazione del grafene in cui si integrano doping covalente e doping non-covalente.

## 1 Introduzione.

L'attività di ricerca svolta nell'ambito della collaborazione con il Politecnico di Bari fa riferimento alla possibilità di utilizzare film di grafene ad elevata conducibilità in sostituzione di strati di TCO (Transparent Conductive Oxides) e specificatamente di AZO (Ossido di Zinco drogato Alluminio) in celle fotovoltaiche ad eterogiunzione a-Si:H/c-Si.

Lo studio ha riguardato l'analisi delle proprietà ottiche ed elettriche di grafene cresciuto con tecnica CVD, sia come singolo strato che come multistrato (fino a 5 strati), idonee al suo utilizzo in strutture fotovoltaiche ad eterogiunzione per massimizzare la raccolta di portatori sia sul "front-contact" che sul "back-contact". A questo riguardo sono stati effettuati processi di funzionalizzazione covalente per il drogaggio del grafene allo scopo di ottimizzare i parametri di trasporto (sheet resistance) e di modulare opportunamente la funzione di lavoro del grafene. Inoltre, particolare attenzione è stata rivolta alla procedura di trasferimento e inserimento del grafene nella cella allo scopo di evitare il danneggiamento della struttura e dei contatti metallici predepositati con l'obiettivo di semplificarne le fasi a vantaggio della efficienza di conversione.

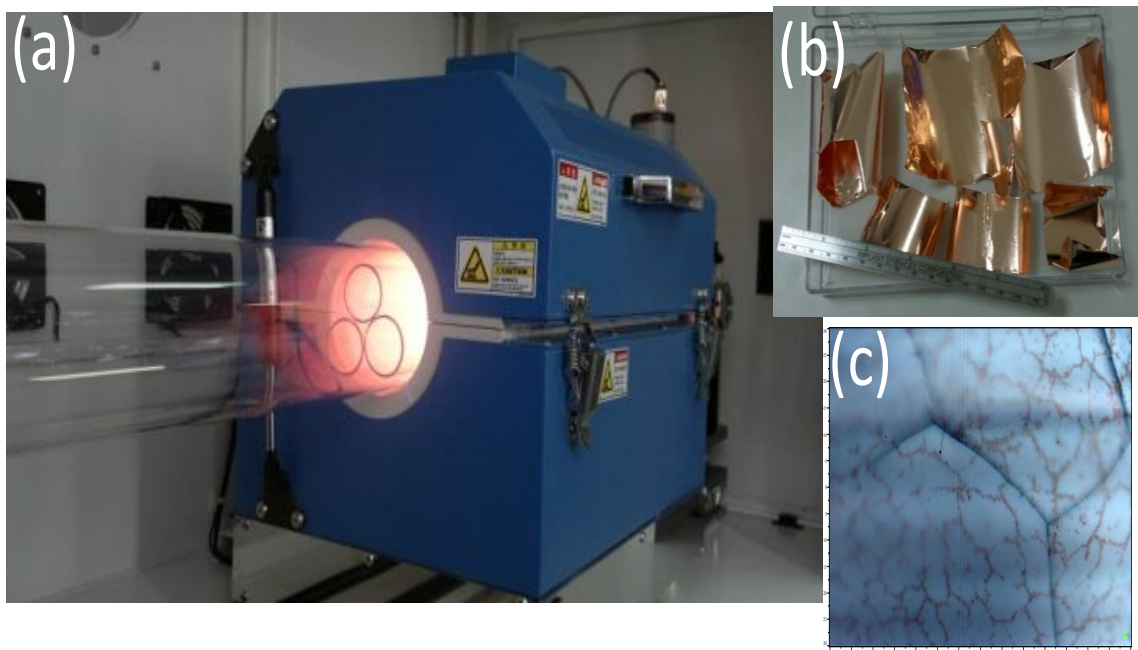
## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Sviluppo di film di grafene

Il lavoro di crescita e caratterizzazione del grafene è stato strutturato nelle seguenti fasi:

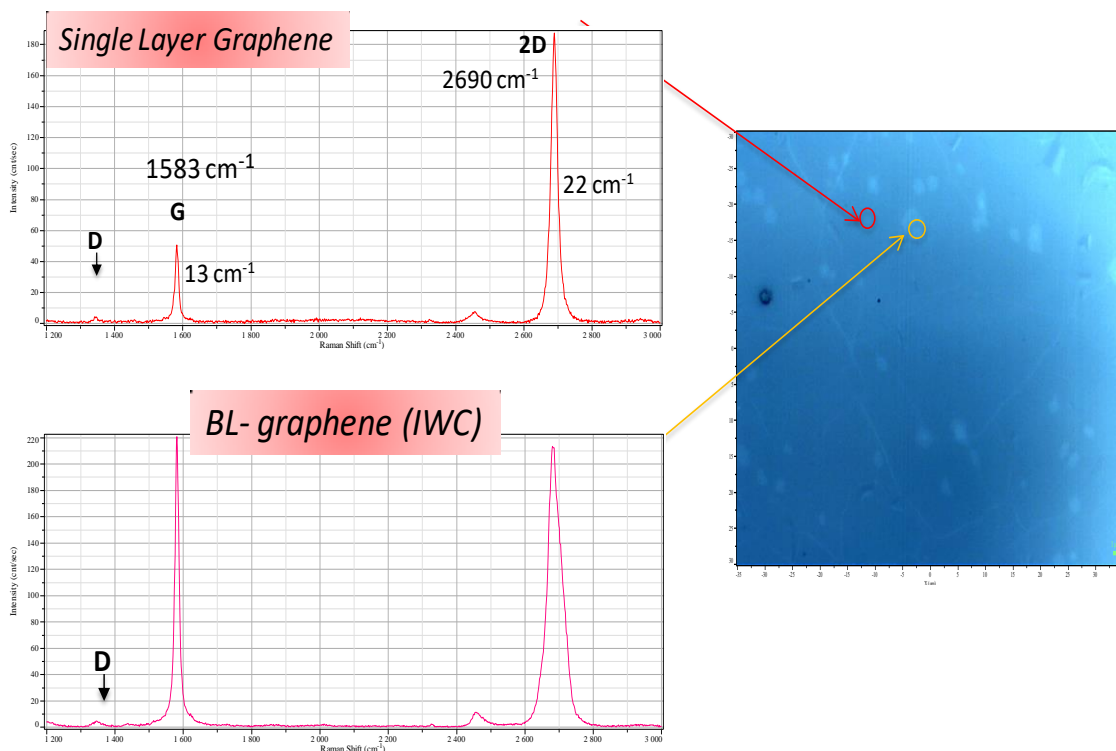
1) **Crescita di strati di grafene monolayer** su larga area con tecnica CVD.

La crescita è stata ottimizzata allo scopo di ottenere grafene ad alta mobilità. Il grafene è cresciuto mediante CVD su un foglio di rame da 25 micron in un reattore tubolare di quarzo (Fig. 1a) alla temperatura di 1000 °C utilizzando come precursore del carbonio una miscela di CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> nel rapporto 1:10.



**Figura 1.** (a) Reattore CVD utilizzato per la crescita di grafene su foglio di rame. La metodologia di crescita consiste di tre fasi: (i) un processo di annealing, alla temperatura di 1000°C in flusso di idrogeno per 30min, del foglio di rame per rimuovere l'ossido di rame e favorire la cristallizzazione del rame, (ii) un processo di crescita alla temperatura di 1000°C in flusso di CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> per 25min e (iii) un raffreddamento rapido fino a raggiungimento della temperatura ambiente. (b) Foto di fogli di rame (dimensione tipica 10cm x 8cm). (c) Foto di microscopia ottica di un foglio di rame dopo la crescita. Si evidenziano i bordi dei grani cristallini esagonali del rame e i bordi di grano del grafene policristallino (evidenziati per ossidazione per via umida del foglio di rame attraverso i bordi di grano).

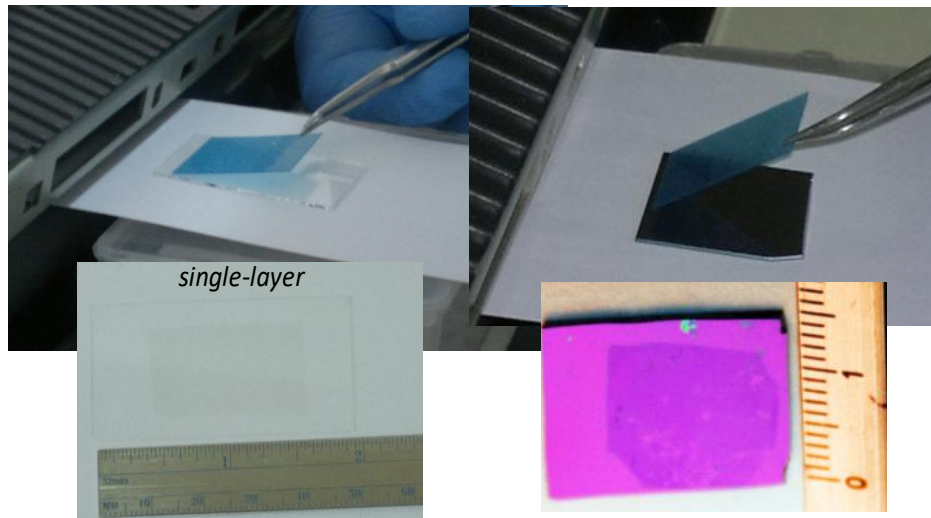
Il grafene viene trasferito sui substrati (vetro, silicio) con il metodo del “thermal tape” dopo aver solubilizzato il rame in una soluzione di ammonio persolfato. La qualità del grafene è stata valutata con misure di spettroscopia Raman (Fig. 2) in grado di valutare sia lo spessore dello strato attraverso il rapporto di intensità tra il picco 2D ed il picco G che la qualità del materiale sulla base della presenza/assenza del picco D a  $1350\text{cm}^{-1}$  associato alla presenza dei difetti dovuti al carbonio  $\text{sp}^3$  [1]. La contemporanea misura di microscopia ottica consente di valutare la densità di isole bilayer presenti (foto in Fig 2). La qualità dello strato viene confermata dalla misura della sheet resistance, effettuata con la tecnica a 4-punte (Metodo van der Pauw) il cui valore per un singolo strato è nell’intervallo  $800\text{-}1200\ \Omega/\text{sq}$ , a seconda del substrato.



**Figura 2. Spettri Raman registrati per un film di grafene in due diverse zone per il monolayer (in rosso) e per le isole bilayer (in verde) del campione come indicate nella foto di microscopia ottica. La densità di isole bilayer comporta un ricoprimento di circa il 3% di bilayer.**

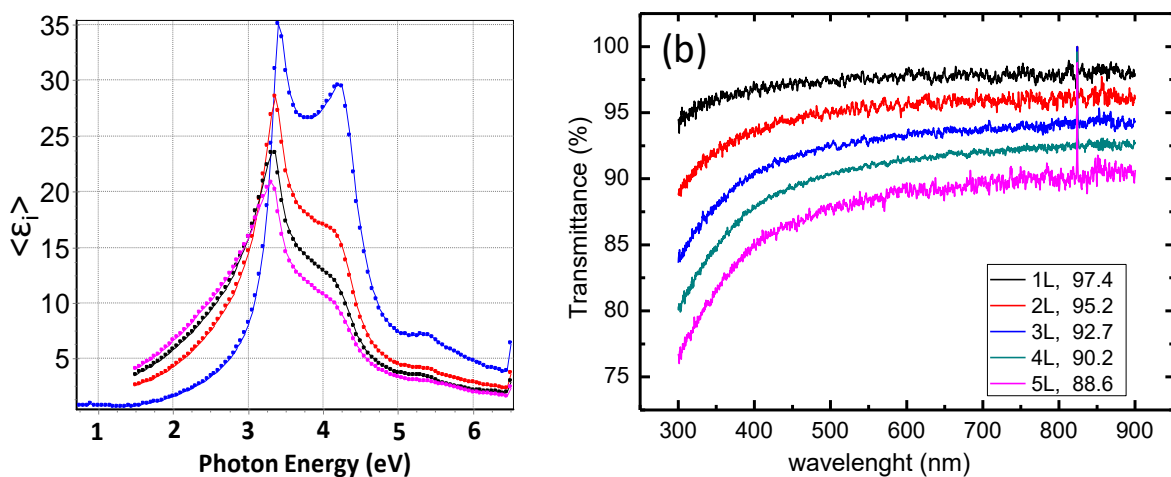
2) **Trasferimento di grafene su diversi substrati** sia nel caso di un film a singolo strato che di un film multistrato (fino a 5 strati). Strati di grafene vengono trasferiti su vetro Corning per valutare le proprietà ottiche (misure di trasmissione ottica nel visibile) ed elettriche (misura della sheet resistance con la tecnica Van der Pauw a quattro contatti) del materiale.

Sono state effettuate prove di trasferimento di un film a singolo strato e di film multistrato di grafene su silicio (100) per valutare l’adesione del grafene anche in relazione alla presenza di ossido nativo sulla superficie di silicio e per ridurre la sheet resistance dei film trasferiti.



**Figura 3. Laminazione del grafene/Thermal Tape su vetro e su SiO<sub>2</sub> (300nm)/Si. In basso i due substrati dopo trasferimento.**

In Fig. 4a sono riportate le misure di spettroscopia ellissometrica (SE) effettuate sugli strati di grafene trasferiti su wafer di silicio da cui è possibile valutare i dati ottici per i differenti campioni. Tali dati sono risultati consistenti con quelli ottenuti dalle misure di trasmittanza effettuate su campioni simili realizzati su substrato vetro (Fig. 4b). Le caratterizzazioni ottica ed elettrica (vedi figura 6) dei film di grafene sui diversi substrati consentono di avere anche una conferma indiretta della qualità del trasferimento, che significa avere realizzato film continui con struttura omogenea.



**Figura 4. (a) Funzione dielettrica  $\langle \epsilon_1 \rangle$  di multilayer di grafene su Si (100) ottenuta con spettroscopia ellissometrica, la curva blu è relativa al solo wafer di silicio mentre le curve rossa, nera e magenta si riferiscono a 2L, 3L e 4L di grafene rispettivamente. (b) Spettroscopia ottica in trasmissione effettuate per campioni di grafene trasferiti su Corning glass. I dati inseriti in figura sono le trasmittanze percentuali valutate alla lunghezza d'onda di 550nm.**

3) **Utilizzo di procedure di drogaggio** covalente per l'ottimizzazione delle proprietà elettriche (ridotta sheet resistance) e per la modulazione della funzione di lavoro del grafene. Per quest'ultimo parametro è previsto l'utilizzo di processi di trattamento via plasma (fluorurazione, idrogenazione) in grado di funzionalizzare il grafene in modo covalente e migliorare l'interfaccia grafene/silicio anche con altri sistemi ibridi.

In teoria, l'uso di più strati di grafene CVD, in quanto resistenze in parallelo, dovrebbe costituire un metodo semplice per abbassare la resistenza dello strato. Tuttavia, i valori che si raggiungono anche con 5 strati (trasparenza ottica di circa 87%) non sono confrontabili con quelli che si hanno con i convenzionali TCO. Attraverso il doping chimico è possibile ottenere in modo efficace un significativo aumento della conducibilità del grafene attraverso l'aumento sia di elettroni (doping di tipo n) che di buche (doping di tipo p). Una metodologia consolidata in letteratura è il doping di tipo p con acido nitrico ( $\text{HNO}_3$ ) ma che tuttavia presenta problemi di instabilità nel tempo, anche confermata da nostre misure. Un metodo alternativo di doping di tipo p prevede l'utilizzo di trattamenti con cloruro di tionile ( $\text{SOCl}_2$ ) ed è stato utilizzato con successo per l'hole-doping di grafene.

Il trattamento di doping chimico è stato effettuato esponendo ai vapori di  $\text{SOCl}_2$  i substrati con il grafene in una camera a  $105\text{ }^\circ\text{C}$  per 60 min. Il doping di campioni multistrato è stato effettuato ripetendo il trattamento  $\text{SOCl}_2$  dopo il trasferimento di ogni singolo strato di grafene. L'efficacia del processo di doping è stata valutata utilizzando sia la spettroscopia Raman che misurando la "sheet resistance" dei campioni. In Figura 5 sono riportati lo spettro Raman di un grafene singolo strato su vetro a confronto con lo spettro di un grafene non trattato. Lo spostamento del picco G di circa  $12\text{ cm}^{-1}$  (da  $1586\text{ cm}^{-1}$  a  $1598\text{ cm}^{-1}$ ), il restringimento della larghezza del picco da  $17\text{ cm}^{-1}$  a  $9\text{ cm}^{-1}$  e la diminuzione del rapporto 2D/G da 1.8 a 1.1, sono indicativi di un forte effetto doping [2] anche confermato da misure di sheet resistance.

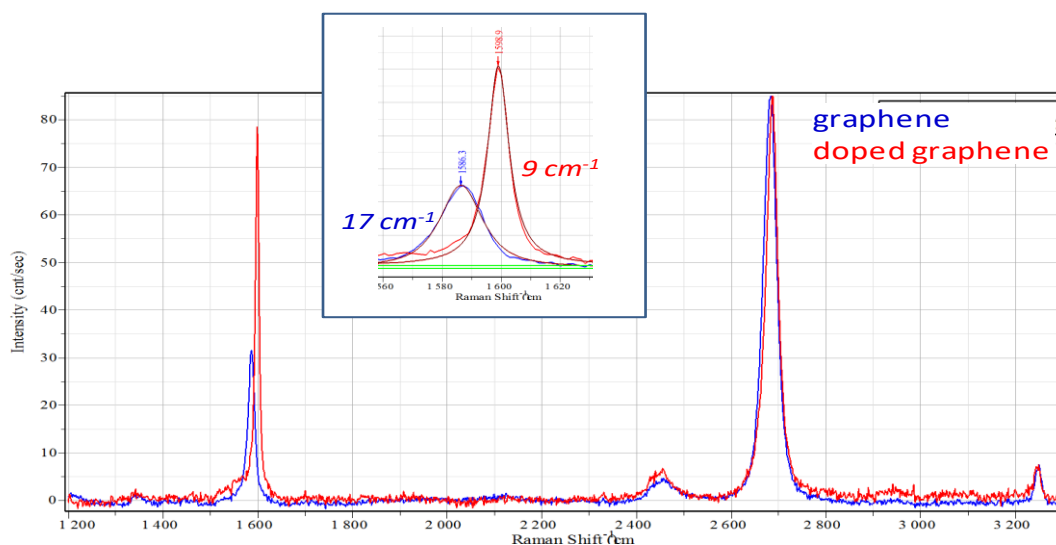
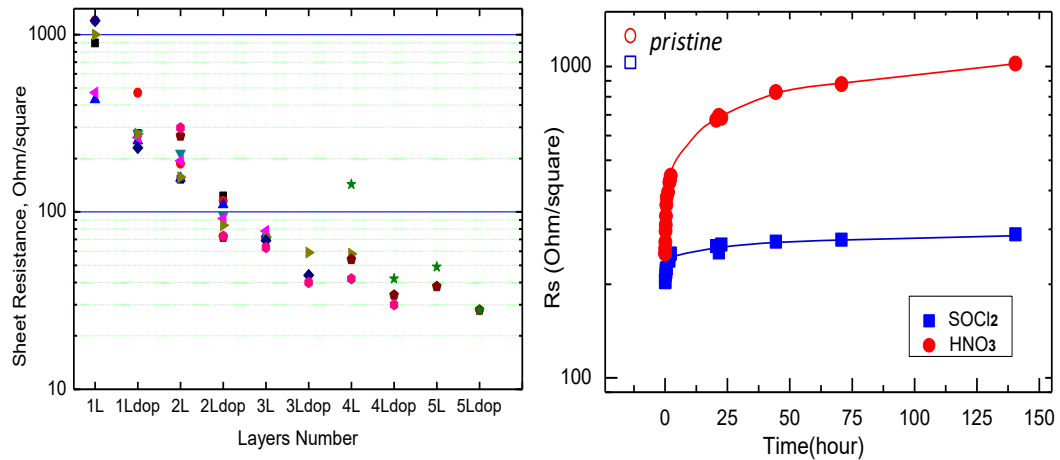


Figura 5. Spettri Raman di un singolo strato di grafene prima (in blu) e dopo doping con  $\text{SOCl}_2$  (in rosso). Lo "shift" di  $12.6\text{ cm}^{-1}$  del picco G, il suo restringimento (inset) e la variazione del rapporto di intensità 2D/G da 1.8 a 1.1 confermano il doping del grafene [2].

I risultati delle misure di sheet resistance sono mostrati in Fig. 6 unitamente a quelli dei campioni non drogati. Il valore di circa  $30\text{ Ohm/sq}$  rappresenta il più basso valore per campioni con una trasparenza migliore dell'85% [3]. Nella stessa figura è riportato il dato di stabilità del doping valutato per un singolo strato drogato con  $\text{SOCl}_2$  a confronto con un campione drogato con  $\text{HNO}_3$ : è evidente la elevata stabilità del doping con  $\text{SOCl}_2$  [3-5].





**Figura 6. Variazione della “sheet resistance” al cambiare del numero di strati e del doping con  $\text{SOCl}_2$ . Il grafico a destra mostra la stabilità del doping con  $\text{SOCl}_2$  a confronto con quello effettuato con  $\text{HNO}_3$  per un campione di grafene singolo strato su vetro Corning.**

## 2.2 Applicazione dei film di grafene sviluppati in celle solari

I film di grafene sviluppati sono stati testati in celle solari. In una prima fase sono state realizzate celle solari Schottky basate sulla giunzione grafene/silicio [6] allo scopo di testare l'utilizzo di film di grafene in una cella solare con struttura più semplice rispetto alla eterogiunzione a-Si/c-Si. In questa prima fase di sperimentazione si è deciso di valutare l'effetto del numero di strati di grafene sul dispositivo, senza utilizzare per essi uno specifico trattamento di drogaggio. Le proprietà dei film di grafene non intenzionalmente drogati descritti nella precedente sezione sono, infatti, già compatibili per un loro utilizzo nei dispositivi. Inoltre si è voluto evitare che eventuali problemi di compatibilità dei processi utilizzati per il drogaggio con gli altri strati del dispositivo potessero in qualche modo interferire con la sperimentazione in atto.

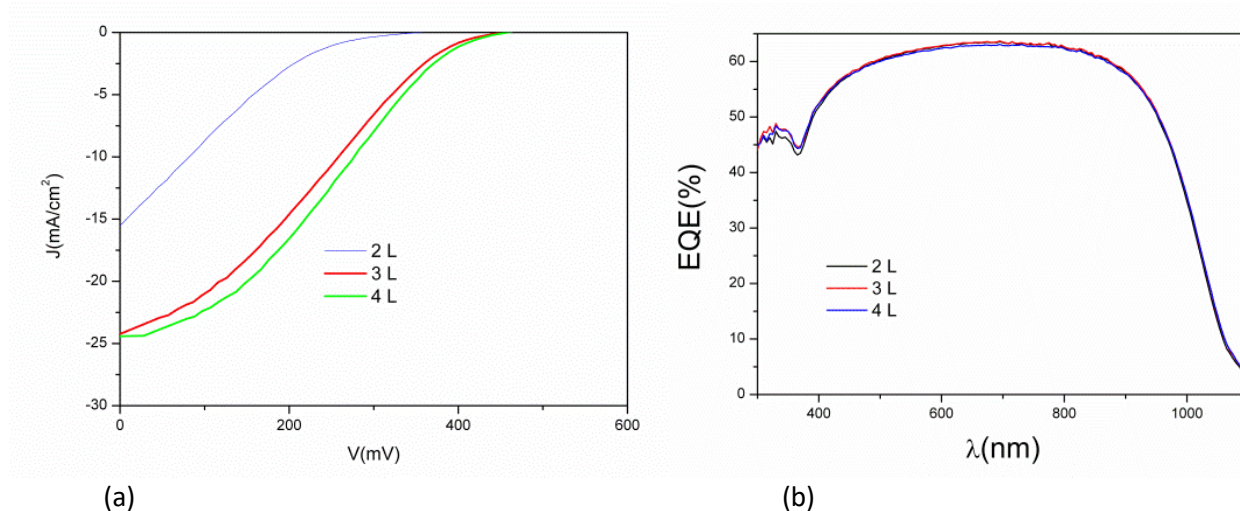
In Fig. 7 viene mostrata la struttura schematica dei dispositivi realizzati. Le geometrie definite sul wafer di silicio sono realizzate nei laboratori dell'ENEA mediante tecnica fotolitografica. La finestra centrale quadrata è l'area attiva ( $0.09\text{cm}^2$ ) del dispositivo, ossia la zona di interfaccia tra il grafene e il wafer di silicio.



**Figura 7. Schema della struttura di una cella solare Schottky basata sulla giunzione grafene/Si**

I film di grafene vengono trasferiti sui substrati in modo da ricoprire l'area attiva e da contattare il metallo depositato sul lato frontale. I dispositivi realizzati sono stati caratterizzati mediante l'acquisizione delle curve Corrente-Tensione,  $J(V)$ , in condizioni di illuminazione e le curve di efficienza quantica esterna, EQE. Per le caratterizzazioni  $J(V)$  sotto luce viene utilizzato un simulatore solare WACOM con una lampada a

1000W allo Xenon ed una lampada alogena a 400W e la misura viene effettuata in condizioni standard (25 °C, AM1.5G, 1000W/m<sup>2</sup>). L'acquisizione delle EQE avviene mediante un apparato sperimentale della Bentham. In Fig. 8a vengono mostrate le curve J(V) relative a dispositivi con film di grafene a 2L, 3L e 4L; la Fig. 8b mostra le efficienze quantiche relative agli stessi dispositivi. In Tab. 1 vengono indicati i parametri elettrici dei dispositivi ricavati dalle curve J(V).



**Figura 8. (a) Caratteristiche corrente tensione e (b) curve di efficienza quantica delle celle solari basate sulla giunzione Schottky grafene/Si**

**Tabella 1: parametri elettrici delle celle solari basate sulla giunzione grafene/n-Si**

N. layers di grafene	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Efficienza (%)
2 L	355	15.5	16.0	0.9
3 L	457	24.2	26.4	2.9
4 L	458	24.4	29.7	3.3

In generale le curve caratteristiche J-V evidenziano una forma ad “S” probabilmente dovuta a problemi all’interfaccia tra il grafene e il wafer di silicio. Dalla Tab. 1 si può notare che il dispositivo realizzato con 4 strati di grafene (4L) mostra un fill factor (FF) e quindi un’efficienza di conversione migliori rispetto a quelli relativi ai dispositivi realizzati con grafene di 2L e 3L. Ciò è da attribuirsi alla migliore sheet resistance del film di grafene a 4L, che si riflette in una resistenza serie del dispositivo più bassa e quindi in un FF e un’efficienza più elevati.

Dopo questi test preliminari sul dispositivo Schottky, si è dato inizio ad una sperimentazione sull’impiego del grafene nel front contact di celle ad eterogiunzione a-Si:H/c-Si fornite da ENEA. Per la realizzazione delle strutture, alla luce dei risultati ottenuti con le celle Schottky, è stato scelto un film digrafene formato da 4 strati. In figura 9 è schematizzata la struttura della eterogiunzione e la foto di un tipico campione su cui viene trasferito il grafene su un’area di circa 4 x 3 cm<sup>2</sup>. Le celle realizzate hanno strutture grafene/n-SiOx/a-Si/(p)c-Si/a-Si/MoO<sub>3</sub>/Ag (celle denominate A1, A2, B1, B2) oppure grafene/n-SiOx/aSi/(p)c-Si/aSi/p-aSi/Ag (celle denominate C1 e C2). Inoltre, per confronto, sono state realizzate e caratterizzate celle a eterogiunzioni di tipo standard, con struttura AZO/n-SiOx/aSi/(p)c-Si/aSi/MoO<sub>3</sub>/Ag (cella D), dove sul front è depositato il classico TCO utilizzato per questa tipologia di dispositivo e cioè un film di AZO spesso 70 nm. Sul TCO frontale viene poi depositata una griglia di Ag utilizzando una maschera metallica che consente di

definire l'area della cella finale pari a  $1\text{cm}^2$ . Per ulteriori dettagli sulle condizioni di realizzazione delle celle si può fare riferimento al report RdS/PAR2015/289.

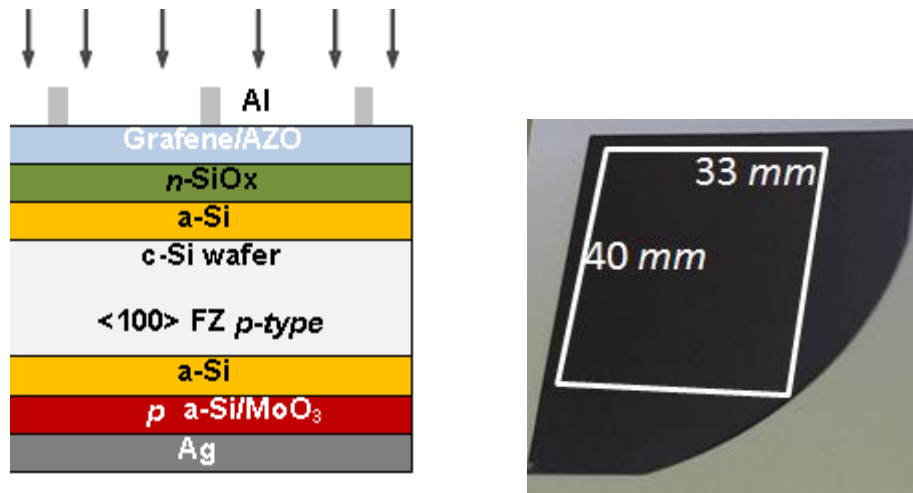


Figura 9. Schema della cella ad eterogiunzione completa con gli strati trasparenti di grafene e con i contatti metallici. La foto sulla destra mostra la tipica dimensione dell'area (tratteggiato in bianco) ricoperta di grafene.

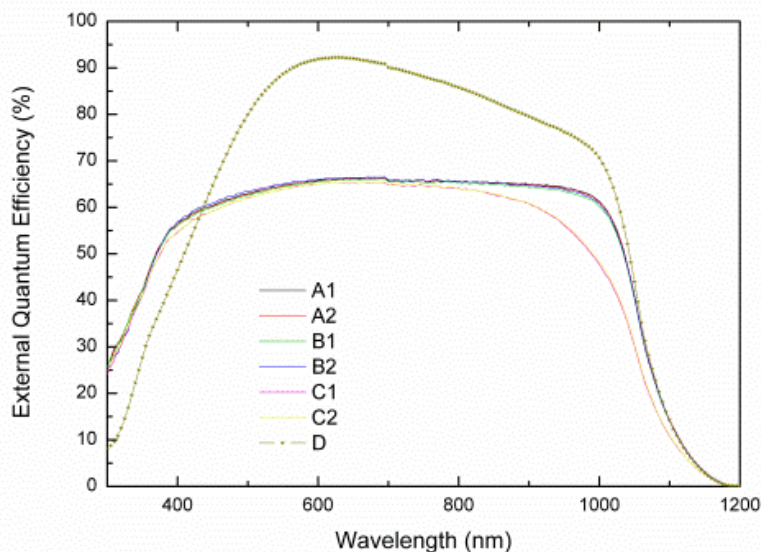


Figura 10. Curve di efficienza quantica esterna delle celle solari ad eterogiunzione, la cui struttura è descritta in Tab. 2.

In figura 10 vengono mostrate le curve di efficienza quantica esterna dei dispositivi realizzati. Le EQE valutate sui dispositivi ottenuti col grafene (A,B,C) sono confrontabili con quelle tipiche di una cella solare in silicio senza antiriflesso. La cella D, realizzata con un film di AZO frontalmente ottimizzato per ridurre le perdite ottiche per riflessione, presenta valori più alti di EQE per lunghezze d'onda maggiori di 400 nm. E' tuttavia importante notare che le celle completate con il film multistrato di grafene mostrano valori più alti di EQE rispetto alla cella con l'AZO alle basse lunghezze d'onda grazie alla migliore trasparenza del grafene. In Tab. 2 vengono indicati i parametri elettrici dei dispositivi ricavati dalle curve J(V). Come per le celle solari Schottky, anche nel caso dei dispositivi ad eterogiunzione a-Si/c-Si le caratteristiche tensione-corrente sotto illuminazione evidenziano una forma ad "S" dovuta probabilmente ancora a problemi all'interfaccia grafene silicio. Per migliorare la qualità di tale interfaccia la superficie del silicio è stata

trattata con plasma di O<sub>2</sub> prima del trasferimento del grafene (dispositivi A1 e A2). Per il momento, non sono state osservate variazioni dovute a tale trattamento che andrà ottimizzato in futuro. Accanto alla necessità di migliorare dal punto di vista chimico la qualità dell'interfaccia grafene-silicio, è necessario anche considerare che la forma ad "S" delle curve J-V può essere in parte dovuta ad un valore non ottimale della workfunction del grafene che può causare una barriera energetica all'interfaccia tra lo stesso film di grafene e l'emitter a base di silicio. Per migliorare le prestazioni dei dispositivi è, pertanto, fondamentale un'approfondita sperimentazione che ottimizzi sia la workfunction del grafene [5] che la qualità dell'interfaccia tra il grafene ed il silicio.

**Tabella 2: parametri elettrici delle celle solari ad eterogiunzione**

Struttura dispositivo	Sigla dispositivo	V <sub>oc</sub> (mV)	J <sub>sc</sub> (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	Eff (%)
Grafene/n-SiOx/aSi/(p)c-Si/aSi/MoO <sub>3</sub> /Ag	A1*	557	18.4	12.9	1.3
	A2*	562	17.1	12.3	1.2
	B1	557	18.2	12.3	1.2
	B2	565	16.2	12.0	1.1
Grafene/n-SiOx/aSi/(p)c-Si/aSi/p-aSi/Ag	C1	543	13.3	12.6	0.9
	C2	543	12.2	12.5	0.8
AZO/n-SiOx/aSi/(p)c-Si/aSi/MoO <sub>3</sub> /Ag	D	681	33.8	71.5	16.5

\*Nei campioni A1 e A2 la superficie del silicio è stata trattata con plasma di O<sub>2</sub> prima del trasferimento del grafene allo scopo di migliorare l'interfaccia grafene/silicio.

### 3 Conclusioni

Film di grafene depositato con tecnica CVD, singolo strato e multistrato, sono stati fabbricati e caratterizzati per l'integrazione in dispositivi fotovoltaici ad eterogiunzione basati su wafer di c-Si con l'obiettivo ultimo di sostituire lo strato finestra di TCO e specificatamente di ossido di zinco drogato alluminio (AZO). Le proprietà ottiche e di trasporto sono state modulate sia con l'integrazione di più strati (fino a 4 strati) che con il doping chimico covalente effettuato con cloruro di tionile (SOCl<sub>2</sub>). I risultati mostrano che il doping di un singolo strato porta ad una sheet resistance di circa 200 Ohm/sq ed è possibile ottenere valori fino a 30 Ohm/sq in campioni con 4 strati di grafene. I risultati finora ottenuti integrando il grafene nelle celle ad eterogiunzione indicano la necessità di controllare il "tuning" della funzione di lavoro del grafene in un intervallo più ampio mediante "nuove" strategie di funzionalizzazione. A questo riguardo si sta sviluppando una metodologia di doping in cui si integrano doping covalente e doping non-covalente. Inoltre sarà approfondito il trattamento con plasma di ossigeno per il controllo dell'interfaccia grafene/silicio, altro elemento fondamentale da ottimizzare per ottenere miglioramenti nelle prestazioni dei dispositivi.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. Li, X., Magnuson, C. W., Venugopal, A., Tromp, R. F., Hannon, J. B., Vogel, E. M., Colombo, L. & Ruoff, R. S. "Large-Area Graphene Single Crystals Grown by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition of Methane on Copper". *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 2816 (2011).
2. Wassei, J. K., Cha, K. C., Tung, V. C., Yang, Y. & Kaner, R. B. The effects of thionyl chloride on the properties of graphene and graphene-carbon nanotube composites, *J. Mater. Chem.* **21**, 3391 (2011).
3. S.Bae et al., " Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes " *Nature Nanotechnology*, 5,574-578 (2010)
4. M. Grande, G. V. Bianco, M. A. Vincenti, D.de Ceglia, P. Capezzuto, M. Scalora, A. D’Orazio, G. Bruno " Optically Transparent Microwave Polarizer Based On Quasi-Metallic Graphene" *Scientific Report*, 5, 17083 , 6 pags (2015).
5. Rajni Garg, Naba K. Dutta, and Namita Roy Choudhury, Work Function Engineering of Graphene *Nanomaterials*. 4, 267-300 (2014).
6. B.X. Li, H. Zhu, K. Wang, A. Cao, J. Wei, C. Li, Y. Jia, Z. Li, X. Li, D. Wu, *Adv. Mat.* 22 (2010) 2743.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

a-Si:H silicio amorfo idrogenato  
AZO ossido di zinco drogato alluminio, ZnO:Al  
c-Si silicio cristallino  
EQE External Quantum Efficiency  
 $J_{sc}$  densità di corrente di corto circuito  
c-Si silicio cristallino  
TCO Transparent Conductive Oxide  
 $V_{oc}$  Tensione di circuito aperto

## APPENDICE

### **Curriculum scientifico del gruppo di lavoro: *Politecnico di Bari, Ingegneria elettronica***

Il gruppo di ricerca guidato dalla Prof.ssa A.D’Orazio, opera all’interno del Dipartimento di Ingegneria Elettrica del Politecnico di Bari. L’attività di ricerca è incentrata nella: progettazione, fabbricazione e caratterizzazione ottica di dispositivi integrati, cristalli fotonici, optoelettronici e nano strutture plasmoniche che possono servire per lo sviluppo di dispositivi in una ampia gamma di applicazioni.

Recentemente, l’attività di ricerca è stata finalizzata allo studio di dispositivi ottici e fotonici che vedono come materiale di interesse il grafene. In particolar si affrontano i problemi correlati al controllo delle proprietà di trasporto degli strati grafenici trasparenti sia con comportamento quasi-metallico che con caratteristiche di quasi-semiconduttore.

I laboratori di ricerca sono dotati di Clean Room (Class 100-1000). Le metodologie a disposizione per la fabbricazione di materiali e dispositivi includono: la litografia elettronica fascio, foto-litografia, incisione a secco, evaporazione termica, sputtering e deposizione da fase vapore. Per la manipolazione e caratterizzazione dei materiali/dispositivi il laboratorio dispone di Spinner, 3D Profilometro, Ellissometro, sistema di polverizzazione, spettrometro ottico per VIS e NIR, microscopio confocale, laser sintonizzabili, OSA, VIS / NIR videocamera e un amplificatore EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifiers).