

ABSTRACT

GRAFENE E NANOTUBI DI CARBONIO IN TRANSISTOR, DIODI E DISPOSITIVI A EMISSIONE DI CAMPO

Autore: Laura Lemmo

Fin dalla loro scoperta, il grafene e i nanotubi di carbonio giocano un ruolo importante nel campo delle nanoscienze e delle nanotecnologie grazie alle loro straordinarie proprietà fisiche e chimiche.

Poiché l'elettronica basata sul silicio è vicina al suo limite dimensionale, l'industria dei semiconduttori sta cercando il modo di come poter sostituire il transistor a effetto di campo al silicio, e il grafene può essere una possibile alternativa al silicio. Lo sviluppo dell'elettronica basata sul grafene è però limitata dalla qualità dei contatti tra il grafene e gli elettrodi metallici; per tale ragione è di fondamentale importanza caratterizzare l'interfaccia metallo/grafene ai contatti. Inoltre, grazie al vantaggio di essere compatibile con i processi di film sottile, il grafene può facilmente essere integrato nelle tecnologie dei dispositivi a semiconduttori esistenti e l'eterogiunzione grafene-silicio (Gr/Si) è uno dei dispositivi più semplici concepibili in una tecnologia ibrida grafene-semiconduttore. Per il loro aspect ratio molto elevato, sia il grafene che i nanotubi di carbonio sono considerati elementi straordinari per la realizzazione di dispositivi a emissione di campo.

In questa tesi di dottorato, sono studiati i meccanismi di trasporto e le proprietà elettroniche di grafene e nanotubi di carbonio attraverso un'intensa caratterizzazione elettrica di transistor a effetto di campo, diodi e dispositivi a emissione di campo a base di questi materiali.

E' effettuata la caratterizzazione elettrica di transistor a effetto di campo al grafene (GFET) con contatti di Ti, Ni, Nb e Cr, nella configurazione a gate inferiore e a gate laterale, misurando le caratteristiche di trasferimento e di uscita. Nella curva di conduttanza si osserva chiaramente la presenza di un doppio avvallamento per transistor lunghi nella configurazione di gate inferiore che può essere spiegato in termini di trasferimento di carica e di drogaggio del grafene sotto i contatti metallici. Le caratteristiche di trasferimento mostrano un'isteresi che è attribuita all'intrappolamento di carica in gruppi di silani alla superficie dell'ossido di gate. E' studiata la resistenza di contatto tra gli elettrodi metallici e il grafene ottenendo valori maggiori di $30 \text{ k}\Omega\mu\text{m}^2$ per contatti di Ti ed si dimostra che la resistenza di contatto è modulata dalla tensione di back-gate. Sono analizzati anche gli effetti del degassamento in vuoto a temperatura ambiente e del bombardamento elettronico sulle proprietà elettriche di FET al grafene con contatti di Nb. Si riportano caratteristiche di trasferimento con un plateau della resistenza nel ramo n. Si mostra che il Nb debolmente chemisorbito agisce come drogante di tipo p per il grafene e le caratteristiche del transistor vengono spiegate dall'interazione Nb/grafene con il livello di Fermi non bloccato all'interfaccia. Si dimostra che l'irradiazione a bassa energia è deleteria sulla corrente del transistor, con conseguente aumento della resistenza di contatto e una riduzione della mobilità dei portatori anche a dosi di elettroni a partire da $30 \text{ e}^-/\text{nm}^2$. Si dimostra che i dispositivi irradiati ritornano al loro stato originario dopo poche misure elettriche. Inoltre, sono

caratterizzati transistor a effetto di campo tutti a base di grafene con gate laterale con una distanza gate-canale di 100 nm e larghezza di canale di 500 nm su substrati SiO₂/Si. Si dimostra che la gate laterale è molto più efficiente della back gate nella modulazione della conduttanza di canale. Viene misurata la perdita di corrente nella direzione planare attraverso il dielettrico di gate SiO₂/vuoto su un ampio intervallo di tensione, riportando una corrente che cresce rapidamente al di sopra di 15 V. Sono spiegati i meccanismi microscopici che portano alla perdita di corrente, come il trasporto di Frenkel-Poole attraverso l'SiO₂ fino all'attivazione del meccanismo di tunnel in vuoto di Fowler-Nordheim, che diventa dominante ad alte tensioni. Si riporta un'alta densità di corrente di emissione di campo di 1 $\mu A/\mu m$ tra fiocchi di grafene. Questi risultati sono fondamentali per la miniaturizzazione di dispositivi sottili in modo atomico.

L'attività di ricerca riguardante l'eterogiunzione grafene-silicio (Gr/Si) è focalizzata sullo studio di un fotodiodo Gr/Si di nuova concezione costituito da un singolo strato di grafene cresciuto per CVD e trasferito su una matrice di nanopunte patternate su un wafer di Si di tipo n. Il layout originale, con eterogiunzioni grafene/Si di dimensioni nanometriche alternate ad aree di grafene esposte al campo elettrico del substrato di Si, che agisce sia come catodo del diodo sia come gate del transistor, dà origine a un barristore a due terminali con controllo della barriera Schottky mediante una singola polarizzazione. Il pattern di nanopunte favorisce l'assorbimento di luce, e l'amplificazione del campo elettrico agli apici favorisce la separazione della foto-carica e genera un guadagno interno per ionizzazione ad impatto. Tali caratteristiche rendono il dispositivo un fotodiodo con responsivity ($3 A/W$ con la luce di LED bianchi di intensità di $3 mW/cm^2$) quasi un ordine di grandezza superiore rispetto ai fotodiodi in commercio. I parametri del dispositivo sono caratterizzati in modo intensivo in funzione della temperatura e della tensione, ed si dimostra che l'approccio a multi-giunzione non aggiunge ulteriore disomogeneità alla distribuzione dell'altezza della barriera Schottky. Tale studio rappresenta un salto in avanti verso l'integrazione del grafene nella tecnologia al Si esistente per dispositivi optoelettronici di nuova generazione.

L'attività di ricerca relativa ai nanotubi di carbonio riguarda una profonda caratterizzazione sperimentale delle proprietà di trasporto e di emissione di campo di buckypapers. Le caratteristiche di trasporto evidenziano un comportamento ohmico in un ampio range di temperatura, che appare non lineare solo vicino a 4.2 K. La dipendenza dalla temperatura della conduttanza mostra che il trasporto è principalmente dovuto a tunneling indotto da fluttuazioni termiche, sebbene per spiegare l'intero range di temperatura da 4.2 K a 430 K è necessario un ulteriore contributo non lineare. Le proprietà di emissione di campo sono analizzate usando una punta metallica nanocontrollata come elettrodo collettore per accedere a informazioni locali delle proprietà del buckypaper da aree minori di $1 \mu m^2$. Si registra una corrente emessa fino a $10^{-5} A$ e un campo di turn-on di circa $140 V/\mu m$. Si dimostra che i buckypapers analizzati sono emettitori estremamente stabili, con corrente emessa praticamente inalterata dopo un tempo di funzionamento di mezza giornata, e quindi possono essere considerati eccellenti candidati per la realizzazione di dispositivi a emissione di campo.