



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102011902002268
Data Deposito	02/12/2011
Data Pubblicazione	02/06/2013

Classifiche IPC

Titolo

TRANSISTORI AD EFFETTO DI CAMPO CON CANALE BIDIMENSIONALE REALIZZATO CON
ETEROSTRUTTURE LATERALI BASATE SU GRAFENE IBRIDIZZATO.

GF
GA

**TITOLO: "TRANSISTORI AD EFFETTO DI CAMPO CON CANALE
BIDIMENSIONALE REALIZZATO CON ETEROSTRUTTURE LATERALI BASATE
SU GRAFENE IBRIDIZZATO"**

Invenzione depositata a nome di Giuseppe Iannaccone, di nazionalità italiana, residente in Via Giunta Pisano 22, 56126 Pisa, e Gianluca Fiori, di nazionalità italiana, residente in Viale Puccini 674C, 55100 Lucca, Lucca.

Inventori designati: GIUSEPPE IANNACCONE, GIANLUCA FIORI

DESCRIZIONE

Il grafene ha interessanti proprietà elettroniche, quali l'elevata mobilità e la relazione di dispersione simmetrica per elettroni e lacune. Ha però un gap di energia nullo, e quindi non è direttamente utilizzabile come canale di transistori ad effetto di campo. Infatti, il gap nullo non costituisce una barriera efficace al transito di elettroni e lacune, e quindi non è possibile condurre il transistor in interdizione. [Lemme, M.; Echtermeyer, T.; Baus, M.; Kurz, H. A graphene field-effect device. IEEE Electr. Dev. Lett. 2007, 28, 282-284.][Avouris, P.; Chen, Z.; Perebeinos, V. Carbon-based electronics. Nat. Nanotech. 2007, 2, 605- 615.]

Recenti esperimenti hanno dimostrato la possibilità di realizzare strutture ibride bidimensionali formate da domini intercalati di carbonio ed hBCN [hexagonal boron, carbon, nitrogen (boro, carbonio, azoto esagonale)]. Le proprietà di tali domini possono essere modificate variando le frazioni relative dei tre elementi. Il grafene ha gap di energia nullo, ma i domini hBCN possono avere un gap tra 1 e 5 electronVolt, come mostrato in [Ci, L.; Song, L.; Jin, C.; Jariwala, D.; Wu, D.; Li, Y.; Srivastava, A.; Wang, Z. F.; Storr, K.; L. Balicas, P. M. A., F. Liu Nat. Mater. 2001, 9, 430.]

Sulla base di questi valori, descriviamo l'invenzione di una nuova serie di dispositivi con canale perfettamente bidimensionale, basati sull'ingegnerizzazione di grafene ibridizzato.

GF 41

Tale approccio potrà aprire nuove strade per la nanoelettronica in grafene, poiché le strutture ibride hBCN consentono di sopprimere il comportamento ambipolare, bloccando il flusso di uno dei due tipi di portatori, e quindi modulare completamente la corrente usando portatori dell'altro tipo.

[Prima realizzazione]

Un prima realizzazione del transistor a effetto di campo (FET) proposto è illustrata in Figura 1 (la sua sezione longitudinale nel riquadro di Figura 1). Il canale è rappresentato dal piano con reticolo esagonale, e si estende dal contatto di source (S) al contatto di drain (D). Nel canale è presente uno dominio di lunghezza t_B di tipo hBCN. Sopra e sotto il canale sono presenti due strati di materiale dielettrico (dielectric) di spessore t_{ox} e due gate (gate) di lunghezza L . Le regioni del canale coperte dal gate non sono drogate, mentre le estensioni di source e drain sono drogate con frazione molare f .

La barriera nel canale è formata da composti di nitruro di boro esagonale (hBCN), quali ad esempio nitruro di boro (BN), diverse configurazioni con una concentrazione di carbonio del 50% (BC2N), una concentrazione di carbonio dell'75% (BC6N), oppure altri materiali bidimensionali con reticolo compatibile con il grafene.

Se si considera come potenziale di riferimento il livello di Fermi intrinseco del grafene, e $\chi_G = 4.248$ eV è l'affinità elettronica del grafene, le altezze delle barriere di energia viste da elettroni e lacune nel canale sono rispettivamente $BC = \chi_G - \chi$, and $BV = |\chi_G - \chi - E_{gap}|$, come mostrato in Fig. 2.

In Figura 3 mostriamo le caratteristiche di trasferimento calcolate con il pacchetto di simulazione di dispositivi NANOTCAD VIDES di un FET di tipo P con una barriera di BC2N (avente un gap di energia di circa 1.6 eV) per diversi valori della posizione y_m del punto centrale della barriera lungo la

CF
41

direzione longitudinale, ed una tensione di 0.6 V applicata tra drain e source.

Nella stessa figura, mostriamo come riferimento la caratteristica di trasferimento di un transistor con la stessa struttura ma con il canale solo in grafene, cioè senza la barriera. Il cosiddetto "rapporto I_{on}/I_{off} ", cioè il rapporto tra corrente di drain massima e minima per una variazione della tensione di gate pari alla tensione applicata tra drain e source (0.6 V nel nostro caso) è minore di 10 per il transistor in grafene, mentre è superiore a diecimila per un FET con canale BC2N, ed è poco dipendente rispetto alla posizione y_m della barriera. I gate metallici consentono di controllare bene la barriera nel canale, come si vede anche dalla pendenza sottoglia di circa 80 mV/decade.

Come indicato, nonostante la struttura a doppio gate, la pendenza sottosoglia è peggiore del valore ideale ottenibile a temperatura ambiente (60 mV/dec). L'effetto può essere spiegato dalla presenza di un'alta densità locale di stati nelle regioni di overlap tra strato di grafene e gate, che induce una significativa capacità quantistica del canale. D'altra parte, se si avesse un underlap, cioè se fosse $L < t_B$, si osserverebbe un deterioramento della pendenza sottosoglia per la presenza di interfacce di tipo Schottky tra la barriera e le estensioni di source e drain, che ridurrebbero il grado controllo del gate sul potenziale nel canale.

[Seconda realizzazione]

Una seconda realizzazione è un FET tunnel risonante (RTFET), dove due domini di hBCN di lunghezza t_B sono presenti nel canale e sotto il gate, separate da una regione di grafene di lunghezza w , come mostrato in Figura 4.

In questo caso le due barriere formano un risonatore Fabry-Perot per i portatori di carica, che può essere modulato in energia variando la tensione applicata al gate (gate). In questo modo si può ottenere una caratteristica di

trasferimento con una regione di transconduttanza negativa, che è uno dei caratteri distintivi di un RTFET. Più l'ossido è sottile, migliore è il controllo del potenziale del canale da parte del gate, più pronunciata è la regione a transconduttanza differenziale negativa. G1

L'RTFET qui descritto consente un controllo elettrostatico del canale da parte del gate molto migliore di altre precedenti proposte di transistori tunnel risonanti presenti in letteratura tecnica, e tipicamente basati su materiali del sistema III-V [Capasso, F.; Sen, S.; Gossard, A.; Hutchinson, A.; English, J. Quantum well resonant tunneling bipolar transistor operating at room temperature. Proc. of Intern. Electr. Dev. Meet. 1986, 282-285].

Il grafene ibridizzato con domini intercalati di carbonio e hBCN rappresenta una piattaforma eccezionale per esplorare dispositivi elettronici veramente bidimensionali. La possibilità di ingegnerizzare le proprietà elettroniche del canale con hBCN consente di ottenere un'ottima modulazione della corrente in transistori ad effetto di campo basati su grafene. Ulteriori funzionalità possono essere raggiunte introducendo strutture bidimensionali di domini differenti, come abbiamo visto nel caso del RTFET. Esperti nel settore potranno facilmente esplorare ulteriori vantaggi e modifiche. Per questo motivo, l'invenzione nei suoi aspetti più ampi non è limitata ai dettagli specifici e alle realizzazioni rappresentative mostrate qui. Di conseguenza, varie modificazioni possono essere fatte senza che ci si allontani dallo spirito e dalla portata del concetto generale, definito dalle successive rivendicazioni.

Giuseppe Iannace

Francesco Gatti

TITOLO: "TRANSISTORI AD EFFETTO DI CAMPO CON CANALE BIDIMENSIONALE REALIZZATO CON ETEROSTRUTTURE LATERALI BASATE SU GRAFENE IBRIDIZZATO" a nome di Giuseppe Iannaccone, di nazionalità italiana, residente in Via Giunta Pisano 22, 56126 Pisa, e Gianluca Fiori, di nazionalità italiana, residente in Viale Puccini 674C, 55100 Lucca, Lucca.
Inventori designati: GIUSEPPE IANNACCONE, GIANLUCA FIORI

RIVENDICAZIONI

1. Un transistor a effetto di campo con un canale bidimensionale comprendente un'eterostruttura laterale formata dall'intercalare di domini di grafene mono o multistrato atomico e domini di boro-carbonio-azoto esagonale (hBCN), e con uno o multipli gate.
2. Un dispositivo secondo la rivendicazione 1, in cui il canale è un mono o multi-strato atomico di grafene contenente un singolo dominio di hBCN sotto il gate che svolge la funzione di barriera per portatori di carica nel canale.
3. Un dispositivo secondo la rivendicazione 1, in cui il canale è un mono o multi-strato atomico di grafene contenente due domini di hBCN sotto il gate, separati a una sottile regione di grafene, funzionante come un transistor ad effetto di campo tunnel risonante.
4. Un dispositivo secondo la rivendicazione 1 in cui nel canale è presente un'eterostruttura laterale formata da domini di materiali differenti rispetto a quelli menzionati nella rivendicazione 1.
5. Un dispositivo secondo la rivendicazione 1 in cui i domini di hBCN sono sostituiti da domini di vacanze (assenza di atomi di carbonio) e quindi le barriere ai portatori di carica sono costituite dal vuoto o da materiale dielettrico.

Giuseppe Iannaccone

Gianluca Fiori

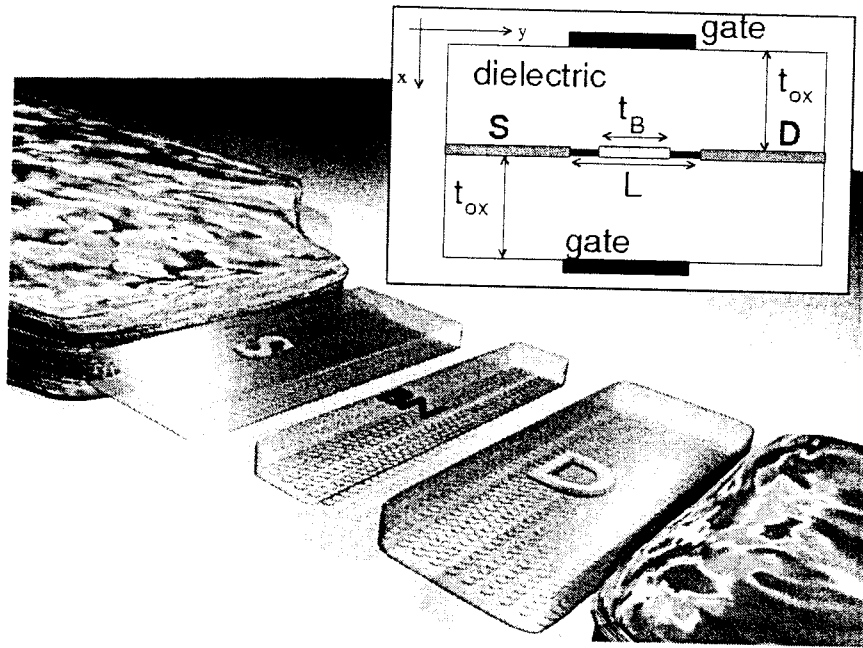


Fig. 1

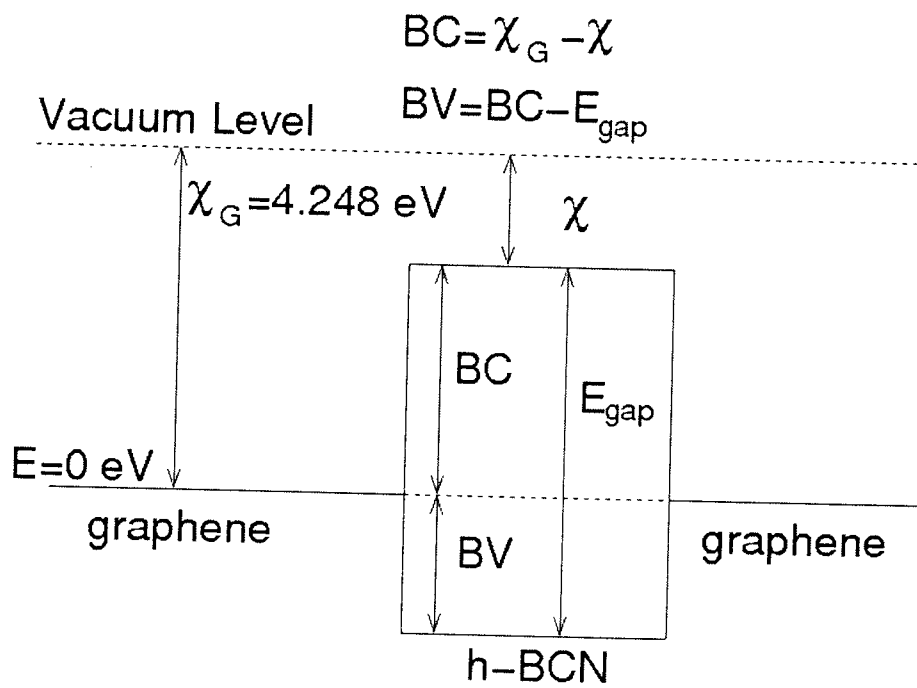


Fig. 2

George Vamvakas

Forat Alwan

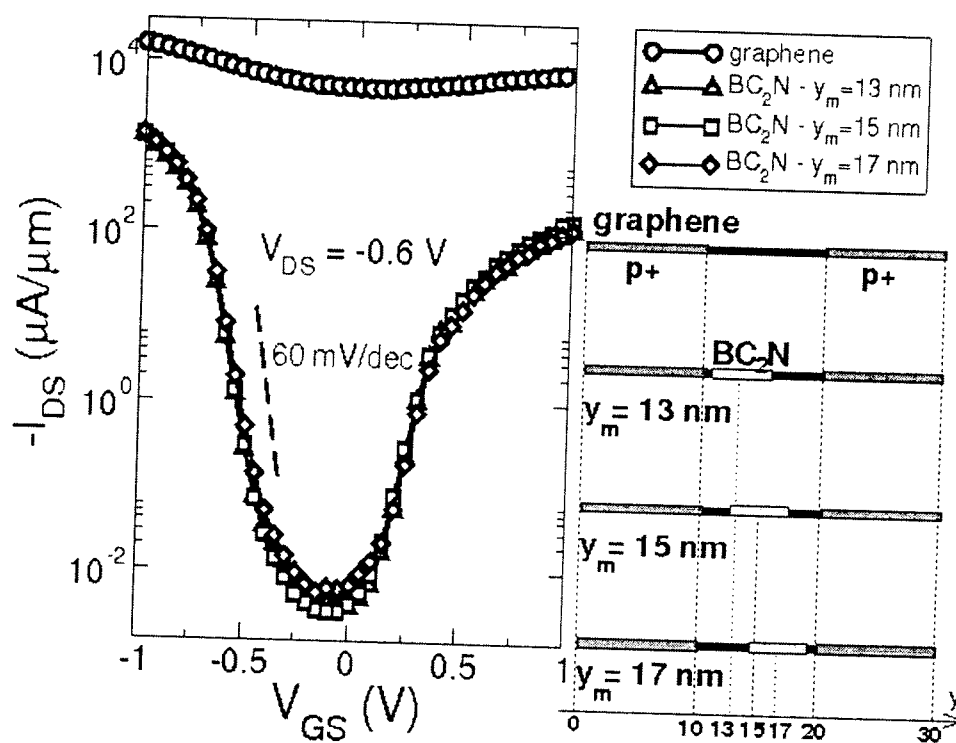


Fig. 3

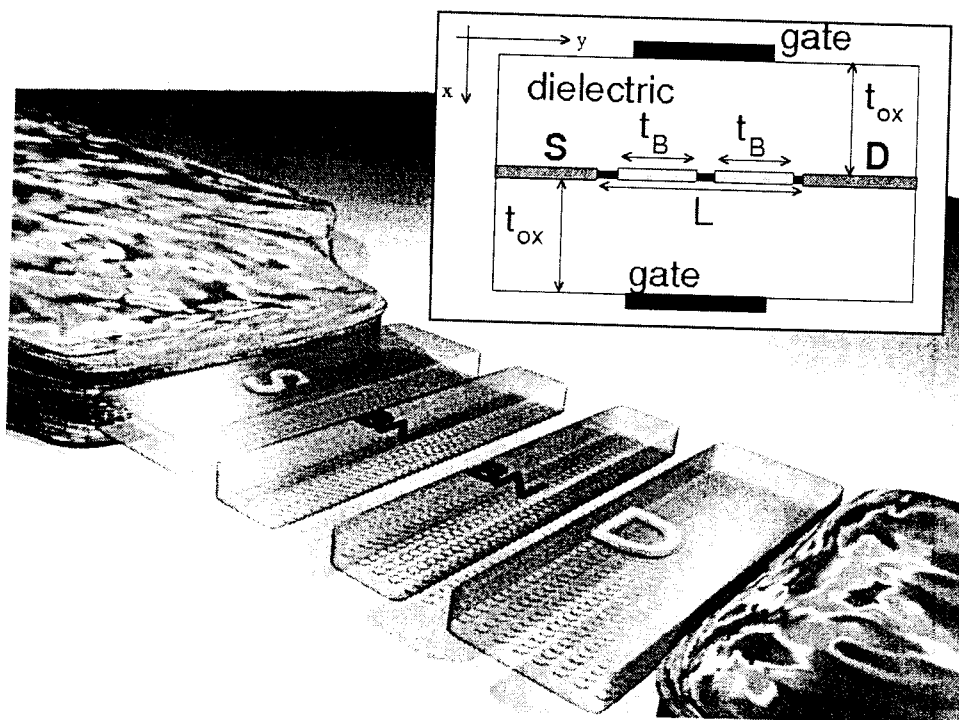


Fig. 4

Galaxy Research

Galaxy Research