

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21710136

研究課題名(和文) 外部電場バンドギャップエンジニアリングによる2層グラフェンの電気的オフの実現

研究課題名(英文) Increase in off current of bilayer graphene by band gap engineering caused by external electrostatic field

研究代表者

長汐 晃輔 (NAGASHIO KOSUKE)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号：20373441

研究成果の概要(和文)：

グラフェンは高い移動度を有するが、零ギャップ故に on/off 比が取れない問題がある。本研究では、2層グラフェンのギャップエンジニアリングを最終目標とし、まずは、それ以前に問題となる金属電極からの注入におけるコンタクト抵抗に着目して研究を進めた。cross-bridge Kelvin 法によりコンタクト抵抗率を $(V/I)dW$ として直接測定した結果、コンタクト抵抗率は、高ゲートバイアス下で $\sim 5 \times 10^{-6} \text{ Ohmcm}^2$ 程度であった。これは、ショットキー障壁を有する金属/半導体、金属/金属界面での値と比較して高い。グラフェンは一般には金属であると認識されるが、高いコンタクト抵抗は低い状態密度に起因すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：

Graphene-based devices are promising candidates for future high-speed field effect transistors (FETs). To make the best use of the high performance of graphene channel, achieving the low contact resistivity (ρ_C) between graphene and metal is most important. The purpose of this work is to determine the current flow path at the graphene/metal contact. The experimental results indicate that ρ_C is not characterized by A but by W . Since the resistivity of the metal is much smaller than the graphene resistivity, it can be considered that the current flows preferentially in the metal film, and enters from the metal to graphene at the edge of the contact.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学, マイクロ・ナノデバイス

キーワード：ナノ電子デバイス, グラフェン電界効果トランジスタ

1. 研究開始当初の背景

Si-CMOS 微細化の限界に対して、高移動度である単層カーボンナノチューブ(SWNT)の電界効果トランジスタ(FET)が次世代の候

補として挙げられている。しかしながら、電流密度は高いが 1nm 程度の直径のため実際に流せる電流は非常に小さく、デバイスの駆動電流を得るためには 1000 本程度配列する必要

があり、単純さが重要なプロセスにおいて複雑化が大きな問題となっている。SWNT の優れた特性は、すべて nm オーダーの直径に起因しており、駆動電流の問題は本質的に解決が困難である。そこで、SWNT の円筒を切って一枚の板状にした“グラフェン”に着目する。グラフェンのチャンネル幅は μm オーダーであり(加工可能である)、SWNT が本質的にもつ駆動電流に対して問題とならない。SiO₂ 上での移動度に関しては、単層の試料において室温にて 8250 cm²/Vs、50K にて 12500cm²/Vs と高い値を得ている。しかしながら、FET デバイスとして駆動するには、on 時の移動度及び電流量が大きいことが重要であるが、同時に電氣的に off が取れることが大前提である。上述のデバイスの on/off 比は現在 30 程度であり、必要とされる 10⁵ 程度には程遠い。これは、バンドギャップが存在しないことに起因している。

2. 研究の目的

2 層グラフェンの場合には、電場下で場合、バンドの非対称性に起因してバンドが開くことが理論計算から報告されている。本研究では、室温で 10000cm²/Vs を超える移動度を有するグラフェンにおいてバンドギャップエンジニアリングにより電氣的 off 状態を達成することを目的としている。

3. 研究の方法

テープを用いた転写法により Kish グラファイトからグラフェンを基板上に転写した。層数の確認はラマンにより行った。FET デバイス作製は、一般的な EB リソグラフィを用いた手法により行った。得られたデバイスにおいて真空中にて電気測定を行った。

4. 研究成果

本研究では、2 層グラフェンのギャップエンジニアリングを最終目標とし研究を進めたが、それ以前に金属電極からの注入におけるコンタクト抵抗が問題であることに気付いた。そこでまずコンタクトに着目して研究を進めた。

高移動度を有するグラフェンのトランジスタ応用を考えた場合、チャンネル移動度よりもコンタクト特性制御の方が最終的にはより重要となることが予想される。半導体/金属接合においては、半導体のバンドギャップのためにショットキー障壁が形成される。一方、グラフェンにはバンドギャップが存在しないため、金属/グラフェン接合界面においてエネルギー障壁は存在しない(図 1)。そのためオーミック接合は、見掛け上容易に達成され、コンタクトに対する研究者の意識は当初非

常に低かった。しかしながら、グラフェンはフェルミ準位近傍において状態密度が非常に小さいため、金属電極から電子の注入を考えた場合、グラフェンの状態密度が律速することが予想される。現在、FET 応用や最近注目を浴びる高周波応用において、潜在的に高いグラフェンのポテンシャルを最大限引き出すための低抵抗コンタクトの実現は最重要課題の一つという認識に至っている。

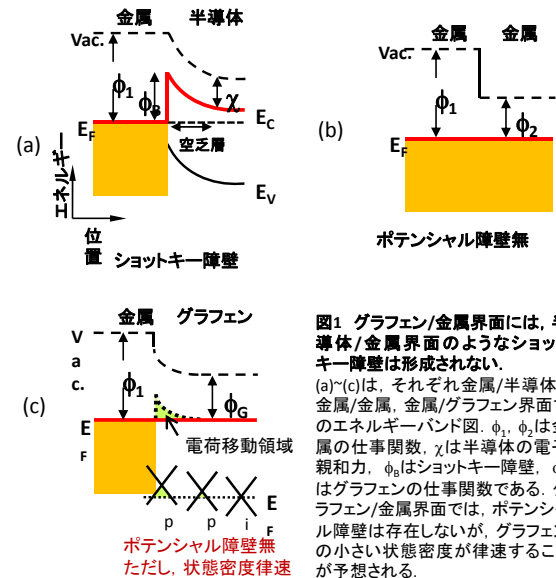


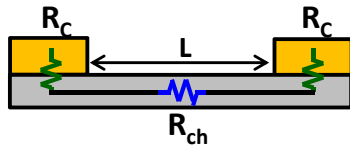
図1 グラフェン/金属界面には、半導体/金属界面のようなショットキー障壁は形成されない。(a)~(c)は、それぞれ金属/半導体、金属/金属、金属/グラフェン界面でのエネルギーバンド図。 ϕ_1 , ϕ_2 は金属の仕事関数。 χ は半導体の電子親和力。 ϕ_b はショットキー障壁。 ϕ_G はグラフェンの仕事関数である。グラフェン/金属界面では、ポテンシャル障壁は存在しないが、グラフェンの小さい状態密度が律速することが予想される。

まず、グラフェンを微細化した場合に将来的に必要なコンタクト抵抗率と現在の最高値をみておく。コンタクトを無視できる条件とは、チャンネル抵抗(R_{ch})に対するコンタクト抵抗(R_C)の割合が 10% 以下であれば良いと仮定する。この条件により計算した場合、100 nm のチャンネル長において、10⁻⁹ Ωcm^2 をきるコンタクト抵抗率が必要となる(図 2)。現在の最低値が~10⁻⁶ Ωcm^2 程度であることを考えると非常に厳しい条件である。半導体/金属接合における典型的な値 10⁻⁷ Ωcm^2 、さらには金属/金属接合における典型値 10⁻⁹ Ωcm^2 よりも低い値が必要となる。

コンタクト特性を議論する上で、グラフェン/金属界面における電流経路を知ることは重要である。一般に、電流は低抵抗経路を選択するため、金属電極の全面積がグラフェンへの電流注入に寄与するわけではない。金属とグラフェンのシート抵抗を比較した場合、グラフェンでは移動度は高いが低い状態密度のためキャリア数が小さくなり、金属の方が低い。このため、基本的には電流は金属を優先的に流れグラフェンに入る(図 3)。今回、我々はコンタクト面積の異なる 6 セットの 4 端子デバイスを含む多端子試料の電気測定から、コンタクトでの電流経路を評価した。

コンタクト抵抗率が面積で決まると仮定した場合とエッジで決まると仮定した場合の2種類の計算を行った(図4). コンタクト抵抗率は、形状に起因しないためすべてのデバイスで一定となることから、チャネル幅により決定され、キャリアはコンタクト金属のエッジで注入されることがわかる.

コンタクト抵抗を無視できる条件



$$\frac{R_c}{R_{ch}} = \sqrt{\frac{\rho_{c\Box}}{\rho_{ch}}} \frac{1}{L} < 10\%$$

$$\rho_{ch} = 250 \Omega @ 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

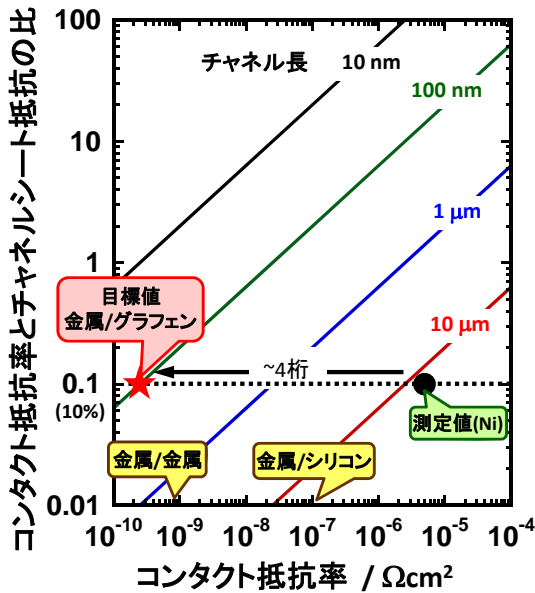


図2 4桁以上コンタクト抵抗を下げる必要性
コンタクト抵抗率とコンタクトとチャネルの抵抗比の関係. チャネル長が短くなると要求されるコンタクト抵抗率は小さくなる. 100nm程度のチャネル長では、 $10^{-9} \Omega\text{cm}^2$ 程度が目標値. R_c はコンタクト抵抗, R_{ch} はチャネル抵抗, $\rho_{c\Box}$ はコンタクト抵抗率, ρ_{ch} はチャネル抵抗率, L はチャネル長. 計算には、キャリア数が $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ の値 $\rho_{ch}=250 \Omega$ を用いた.

ただし、現実には、完全にエッジで電流が注入されるのではなく、伝達長(d_T)と呼ばれる実効的なコンタクト長が存在し(図3), コンタクト抵抗率($\rho_{c\Box}:\Omega\text{cm}^2$)とチャネルのシート抵抗($R_{ch}:\Omega$)を用いて、 $d_T = \sqrt{\rho_{c\Box}/R_{ch}}$ のように定義される. 今回、cross-bridge Kelvin法によりコンタクト抵抗率を $\rho_{c\Box}=(V/I)dW$ として

直接測定した. 本手法は、L字型のグラフェンの上部

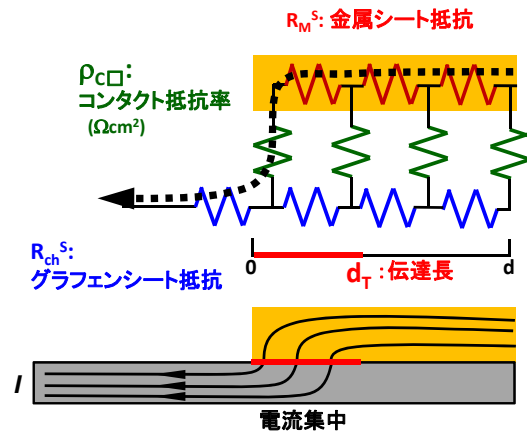
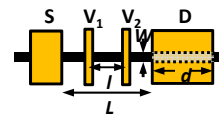
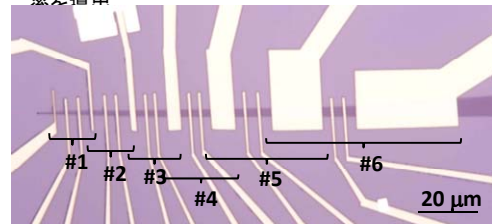


図3 グラフェン/金属界面では、エッジを流れる.
金属/グラフェン接合部を、金属のシート抵抗、コンタクト抵抗率、グラフェンのシート抵抗の3種類に分けたTransmission lineモデルの概念図. グラフェンは高移動度を有することから低抵抗と期待してしまいが、実際には金属と比較して、キャリア数が非常に小さいため抵抗は比較的高い. それ故、エッジ伝導となる.

(a) マルチ4端子デバイスの顕微鏡写真. 概念図で示す4端子デバイスが6つ並んでいる. これらからコンタクト抵抗率を導出



(b) 面積及びエッジで規格化したコンタクト抵抗率とコンタクト面積の関係.

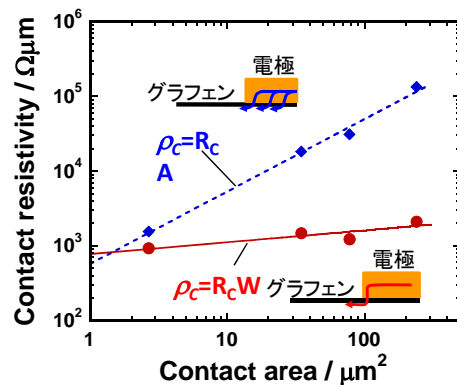


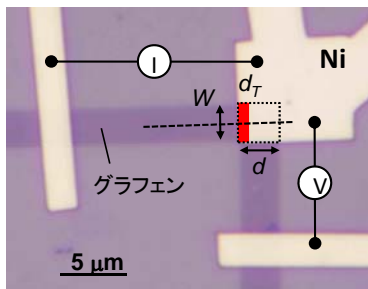
図4 エッジ伝導を確認した実験.

コンタクト面積を変えた6つのデバイスから面積で規格化した場合とエッジで規格化した場合のコンタクト抵抗率を計算した. 結果、コンタクト形状に依存しないコンタクト抵抗率は、エッジで規格化した場合であり、エッジからの注入を示唆している.

2つの電極に一定電流を流しながら、右側の

2つの電極の電圧を測定する擬4端子測定である。 ρ_{c0} は、高ゲートバイアス下で $\sim 5 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ 程度であった。これは、ショットキー障壁を有する金属/半導体界面での値や金属/金属界面での値と比較して高い。グラフェンは一般には金属であると認識されるが、高いコンタクト抵抗は低い状態密度に起因すると考えられる。また、図5(c)に示すように d_T はゲート依存性をもつが典型的には1 μm 程度の値であった。すなわち、図5(b)において4 μm のコンタクト長さに対し実際に電流注入に寄与している領域は1 μm 程度(赤領域)である。チャネル長が100 nm程度のもを考慮した場合、現時点では高移動度チャネルの特徴を十分に生かすことができず実際の出力動作を制限している。今後、グラフェン側の状態密度を上げる手法が重要となるが、グラフェンではC元素置換による不純物ドーピングが困難なため、Si系と異なり容易ではない。電極直下をグラファイト薄膜にして状態密度を上げる等のアイデアが必要となる。

(a) Cross-bridge Kelvin構造の光学顕微鏡写真。酸素プラズマによりグラフェンをL字型に加工。



(b) コンタクト抵抗及び伝達長のゲート電圧依存性.

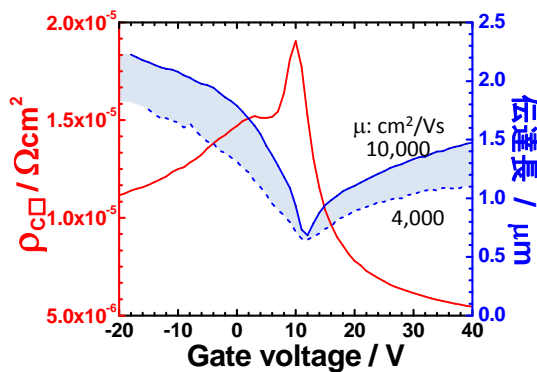


図5 グラフェン/金属コンタクトはばらつきが大きいいため単一電極のコンタクトを測定することが重要。

コンタクト抵抗の測定は様々な手法がある。例えば、多端子測定から平均的にコンタクト抵抗を求めるTransfer length法では、コンタクトの値として負の値が得られることがある。これは、現時点でのコンタクトにばらつきが大きいためである。現状理解には、単一電極のコンタクトを測定できるcross-bridge Kelvin法は有効である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件)

1. K. Nagashio and A. Toriumi, "DOS-limited contact resistance in graphene FETs", *Jpn. J. Appl. Phys.* (in press).
2. 長汐晃輔, 鳥海明, "グラフェントランジスタの接合/界面に対する理解と制御", グラフェン・イノベーション, 日経BP社, 東京, 2011, 66-79.
3. K. Nagashio, T. Yamashita, J. Fujita, T. Nishimura, K. Kita and A. Toriumi, "Impact of graphene/SiO₂ interaction on FET mobility and Raman spectra in mechanically exfoliated graphene films", IEEE International Electron Device Meeting (IEDM) Tech. Dig., 2010, 564-567.
4. K. Nagashio, T. Nishimura, K. Kita, and A. Toriumi, "Contact resistivity and current flow path at metal/graphene contact", *Appl. Phys. Lett.* 2010, **97**, 143514.
5. K. Nagashio, T. Nishimura, K. Kita, and A. Toriumi, "Systematic investigation of intrinsic channel properties and contact resistance on mono- and multilayered graphene FET" *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, **49**, 051304.
6. 相馬聡文, 小川真人, 山本貴博, 渡辺一之, 長汐晃輔, "グラフェンナノエレクトロニクス素子の開発に向けて-素子シュミレーションと素子作成・物性評価-", *固体物理*, 2010, **45**, 63.
7. K. Nagashio, T. Nishimura, K. Kita and A. Toriumi, "Metal/Graphene Contact as a Performance Killer of Ultra-high Mobility Graphene - Analysis of Intrinsic Mobility and Contact Resistance -", IEEE International Electron Device Meeting (IEDM) Tech. Dig., 2009, 565-568.
8. 長汐晃輔, 鳥海明, "グラファイトからグラフェンへバンドオーバーラップ減少に伴う電子輸送特性の連続的变化-", *応用電子物性分科会誌*, 2009, 15, 120-125.
9. K. Nagashio, T. Nishimura, K. Kita, and A. Toriumi, "Mobility Variations in Mono- and Multi-Layer Graphene Films" *Appl. Phys. Express*, 2009, **2**, 025003.

[学会発表] (計9件)

1. 長汐晃輔, 鳥海明, "グラフェン/SiO₂基板相互作用に対する理解と制御", 第58回応用物理学会, 神奈川, 神奈川工科大, 2011, 3(中止).
2. 長汐晃輔, 鳥海明, "グラフェンFETの接合/

- 界面に対する理解と制御”，電子情報通信学会，電子デバイス研究会特別ワークショップ，東京，首都大学東京，2011，3.
3. 長汐晃輔，鳥海明，“グラフェンデバイス-実験技術の観点から-”，International Mircoprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2010), Fukuoka, Kokura, 2010,11.
 4. 長汐晃輔，鳥海明，“金属/グラフェンコンタクトの基礎特性”，真空・表面科学会合同講演会，大阪，阪大，2010，11.
 5. K. Nagashio，T. Nishimura，K. Kita and A. Toriumi，"DOS bottleneck for contact resistance in Graphene FETs", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), Tokyo, 2010, 9.
 6. K. Nagashio and A. Toriumi，"Graphene/metal contact for graphene FET", International symposium on Graphene Devices (ISGD 2010), Sendai, 2010, 10.
 7. 長汐晃輔，西村知紀，喜多浩之，鳥海明，“グラフェン/金属界面での電荷移動”，2010 3，第57回応用物理学会，神奈川，東海大.
 8. 長汐晃輔，鳥海明，“グラファイトから単層グラフェンまでの系統的な電子輸送特性評価”，2009,12，日本学術振興会，ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会，静岡，熱海.
 9. 長汐晃輔，鳥海明，“グラファイトからグラフェンへ-バンドオーバーラップ減少に伴う電子輸送特性の連続的变化-”，応用物理学会応用電子物性分科会，2009，7，東京.

[その他]

ホームページ等

<http://www.adam.t.u-tokyo.ac.jp/top.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長汐 晃輔 (NAGASHIO KOSUKE)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号：20373441