

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686039

研究課題名(和文)状態密度の大きく異なるグラフェン・金属界面での電流注入の理解と制御

研究課題名(英文)Current injection at the graphene/metal interface with the large difference in DOSs

## 研究代表者

長汐 晃輔(NAGASHIO, Kosuke)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20373441

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,200,000円

研究成果の概要(和文)：コンタクト抵抗の低減には、グラフェン側の状態密度を上げる手法が重要となる。本研究では、結合機構を正確に理解するために、金属が接触したときのグラフェンの状態密度を量子容量測定から抽出し、コンタクト抵抗率と状態密度の相関性を明確にした。金属種の違いによってグラフェンの状態密度変化は大きく異なることから、コンタクト金属の選択に明確な解を与えることができる。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the contact resistance at the metal/graphene interface, it is important to increase the density of states in graphene. In this study, the density of states of graphene underneath a metal is estimated through a quantum capacitance measurement of the metal/graphene/SiO<sub>2</sub>/n<sup>+</sup>-Si contact structure. The density of states of graphene in the contact structure is correlated with the contact resistivity measured using devices fabricated by the resist-free process.

研究分野：半導体デバイス工学

キーワード：グラフェン コンタクト抵抗 状態密度

1. 研究開始当初の背景

層状グラファイトから単層を取り出したグラフェンは、ギャップがなく  $I_{on}/I_{off}$  比がとれない短所があるが、直線の分散関係に起因して既存の半導体の中で最も高い移動度のため注目を集めている。しかしながら、トランジスタ利用を考えると話題先行と言わざる負えない。単層グラフェンにおいて 5nm 幅にナリボン化しギャップを開け  $10^6$  程度の  $I_{on}/I_{off}$  は得られるが、リソグラフィの過程で欠陥が導入され移動度は  $\sim 100\text{cm}^2/\text{Vs}$  程度で Ge や III-V と競合するレベルにないというのが、これまでのグラフェンに対する認識である。しかしながら、2011 年春の MRS において P. Kim らのグループが 2 層グラフェンにおいて、移動度  $300,000\text{cm}^2/\text{Vs}$  を維持したまま  $I_{on}/I_{off}=10^6$  を報告しており、トランジスタ特性の議論をスタートできるところまで来た。

申請者は、次世代電子デバイスの革新的材料として 2007 年秋以降グラフェンに着目してトランジスタ応用を目指して研究を進めてきた。特に、フェルミレベル近傍の状態密度が非常に小さいため、グラフェンチャネルの特性がいくら優れていてもコンタクト抵抗によって最終的なデバイス特性が律速されることを指摘した [IEDM2009]。1991 年のカーボンナノチューブの発見以来 20 年が経つが、電子デバイス応用のボトルネックはコンタクト抵抗であることを考えると問題の重要性が認識できる。最近注目を浴びる高周波応用においても、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。本申請課題は、コンタクト抵抗低減という難題に対する一つの解を与えるものである。

2. 研究の目的

コンタクト抵抗の目標値、及び現状の値は？

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。チャネル抵抗 ( $R_{ch}$ ) に対するコンタクト抵抗 ( $R_c$ ) の割合が 10% 以下であればコンタクトを無視できると仮定して計算した結果を図 1 左に示す。100nm のチャネル長において、 $10^{-9}\Omega\text{cm}^2$

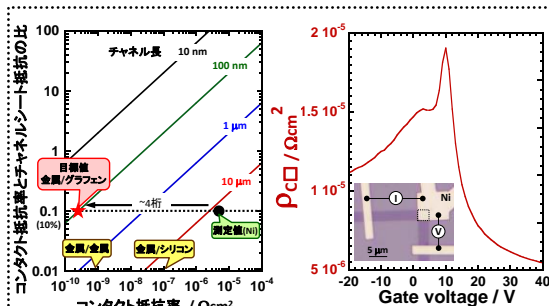


図 1. (左)コンタクト抵抗率における目標値及び実験値。(右)cross-bridge Kelvin 法(挿入図)により測定した面積規格のコンタクト抵抗率のバックゲート電圧依存性。

をきるコンタクト抵抗率 ( $\rho_{cs}$ )が必要となる。図 1 右に示すように精密測定により得た Ni における最低値が  $\sim 5 \times 10^{-6}\Omega\text{cm}^2$  程度であることを考えると 4 桁も低減する必要があり厳しい条件である。半導体/金属、金属/金属接合における典型値  $10^{-7}\Omega\text{cm}^2$ ,  $10^{-9}\Omega\text{cm}^2$  よりも低い値が必要となる。以上のように、申請者は物性値としての面積規格のコンタクト抵抗率を世界で初めて測定し、さらに要求されるコンタクト抵抗率に対する指針を示した。 [Nagashio et al., APL, 2010, 97, 143514].

状態密度向上への策は？-研究目標-

アイデアとしては、コンタクトの部分だけグラファイトにして、チャネルの部分は単層とする構造も考えられるが、既存の製膜手法とは適合しない。新たなコンセプトによる状態密度制御の提案には、コンタクト領域の理解が必要である。再度図 1 右に示した抵抗率のゲートバイアス依存性に着目すると、バックゲート FET 構造のため、メタル直下のグラフェンのキャリア密度がゲート変調していることを示唆している。しかしながら、バックゲートからの静電ポテンシャルは、状態密度の大きい金属によりスクリーニングされてしまうのではないかと直感的には考えられ、自明ではない。そこで、実際に金属直下のグラフェンが変調するかどうかを図 2(a)のようにチャネル上に様々な長さの金属を乗せたデバイスを測定した。図 2(c)はグラフェンと金属の 2 層構造 ( $R_{G+M}$ ) のバックゲート依存性である。金属は変調しないため、この結果は金属直下のグラフェンの変調を示しており、世界で初めて実験的に示した [IEDM2011 発表]。本申請では、金属直下のグラフェンが変調する理由を解明し、図 3 に示す埋込電極により電極直下のグラフェンの状態密度を向上させ、コンタクト抵抗を低下させることを試みる。

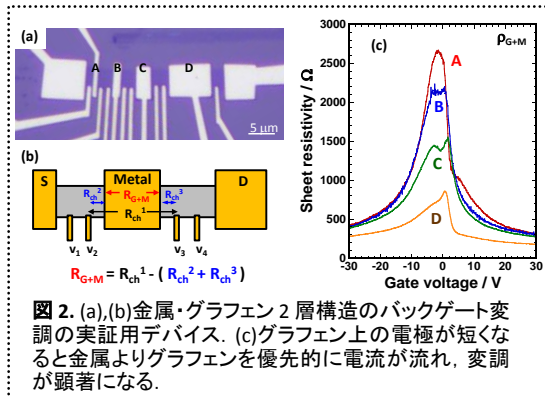


図 2. (a),(b)金属・グラフェン 2 層構造のバックゲート変調の実証用デバイス。(c)グラフェン上の電極が短くなると金属よりグラフェンを優先的に電流が流れ、変調が顕著になる。

3. 研究の方法

グラフェン/金属界面の清浄化及び極薄絶縁膜導入

大島らの実験 [C. Oshima, et al., J. Phys., 1997, 9, 1.] 及び理論計算 [G. Giovanetti, PRL, 2008, 101, 026803.] から金属 Ni 上グラフェンでは強い  $\pi$ -d 結合が報告されており、整合性が取れていない。

本実験において EB リソグラフィの欠点は、有機系のレジストを利用するため、レジスト残りを無視できない点である。そこで 24 年度は、図 3 に示すように SiN とカバーガラスを用いた透明ガラスマスクを作成し、レジストフリーで任意のグラフェン位置に電極作成できるシステムを構築する。逆に、原子層堆積装置により極薄絶縁膜層をグラフェン上に堆積させ、金属電極/グラフェン間距離を絶縁膜により変化させ、電気測定を行う。これにより金属/グラフェンの化学結合性に関する知見を得る。徹底的に清浄な界面を作り界面特性を議論する。

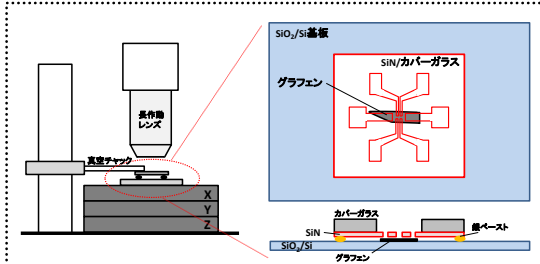


図 3.レジストフリー電極用マスク合わせシステム。光学顕微鏡下でグラフェンを観察しながら、ガラスマスクの位置合わせを行う。

#### 金属/グラフェン/絶縁膜基板 混合相互作用の理解

上記では、金属/グラフェン界面のみに着目して記述してきたが、グラフェンは単原子層膜であるが故、下地の絶縁膜基板との相互作用も含めた混合の相互作用を考える必要がある。コンタクトの論文において、同じ電極金属を使ってい

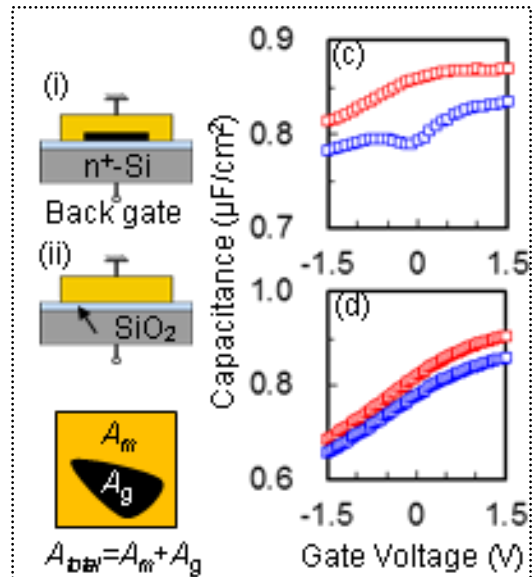


図 1 (a)デバイスの構造と(b)電極面積の定義。デバイス(i)(ii)の C-V測定結果(c)Auと(d)Niが接触している場合。

てもグラフェン・金属間で電荷移動の方向が異なる結果が多数報告されているのは、この絶縁膜を含めた相互作用によると考えており、金属種を変えて S ファクターの正確なデータを取り整理することで、半導体/金属と比較可能なデータにする。

#### 4. 研究成果

##### 金属直下のグラフェンの状態密度測定

【実験方法】  $C_q'$  を抽出するために図 1(a)に示す 2 つのデバイス構造を比較した。基板は高濃度 n 型ドープ Si を用い、酸化膜を約 4 nm に薄膜化することで全容量に対する量子容量の寄与を増加させた。グラフェンに接触する金属は、グラフェンの s 電子との相互作用という観点から非閉殻 s 軌道を持つ Au と非閉殻 d 軌道を持つ Ni を選択した。グラフェン/金属界面のレジスト残渣の影響を除くため、Si 基板貫通窓に作成した PMMA マスクを用いたレジストフリープロセスにより抵抗加熱蒸着で金属電極を堆積した。作製したデバイスに関して、室温にて 1 MHz で C-V 測定を行った。

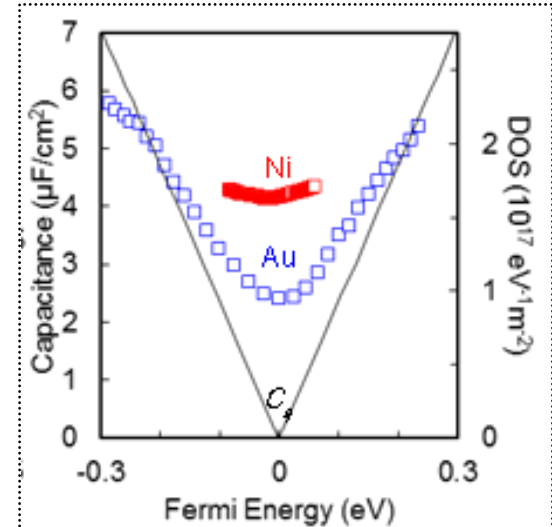


図 2 デバイス(ii)の等価回路と抽出した  $C_q'$ 。  $C_{sub}$  は Si と SiO<sub>2</sub> 由来の容量、  $V_{gr}$  はグラフェンの電位を表す。

【結果と考察】図 1(c)(d)に C-V 測定結果を示す。デバイス(ii)に見られる Si 空乏層形成由来の容量変調に加えて、デバイス(i)では Au, Ni 電極共

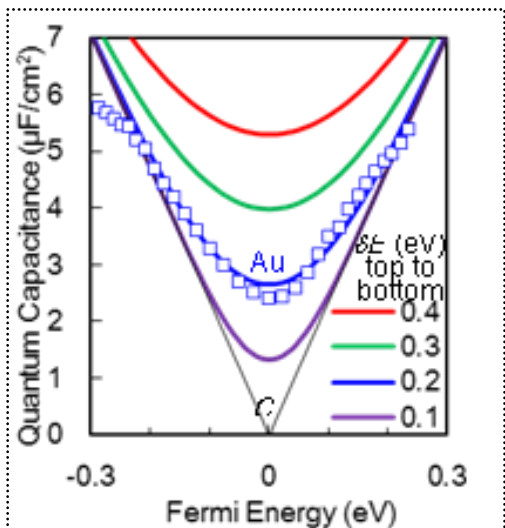


図 3 空間的なポテンシャル分布  $\delta E$  をもたせた場合のグラフェン量子容量の計算結果と実験結果の比較。

に  $C_q$  に起因する容量低下が見られ, Au 電極のデバイスでは特に 0 V 近傍で顕著な窪みを観測した. 等価回路をもとに  $C_q$  を抽出すると図 2 に示すように, Au が接触したグラフェンはゲートバイアスによって大きく変調し, Dirac point(DP)近傍を除いて理想的なグラフェンの量子容量  $C_q$  と概ね一致した. 一方, Ni が接触したグラフェンはゲートバイアスによる変調量が非常に限定されており (図 2), 線形の分散関係が崩れている. これはグラフェンの  $\pi$  電子が, Au の s 電子とは分子間力による物理的結合をしており, Ni の d 電子とは化学的な結合軌道を作るためと考えられる. Au 電極デバイスに見られる DP 近傍の有限な状態密度は, 金属との物理的結合による空間的なポテンシャル揺らぎに伴う状態密度の広がりから起因すると考えられる. 空間的なポテンシャル揺らぎを正規分布として取り込んだ計算結果と実験結果の比較から (図 3), Au-C 間距離の分布に起因する DP のばらつきは 1 eV 程度以下と見積もれる.

以上より, レジストフリー金属堆積により金属とグラフェンの相互作用の違いが明確となった. これまで Ni 直下のグラフェンの変調が観察されていた理由はレジストの影響であることがわかる.

#### レジストフリーでのコンタクト抵抗測定

**【実験方法】** 本実験において最も重要な点は, テープ法により転写したグラフェンの形状加工を必要としないデバイス構造でコンタクト抵抗率を測定できるかという点である. これまでのテープによる転写において細長い短冊状のグラフェンが得られる頻度が高いことがわかっているので, Transfer length Method (TLM) [3] が適応できるデバイス構造を選択した. 200  $\mu\text{m}$  の SiN メンブレンマスクにプローブ用コンタクトパッドを含む TLM 構造を FIB にて作製し,  $\text{SiO}_2/\text{n}^+\text{-Si}$  基板に転写した 50  $\mu\text{m}$  以上の長さの針状の単層グラフェンに対して位置合わせ及び金属電極の堆積を行った. SiN メンブレンマスク及び作製したデバイス写真を図 4 に示す.

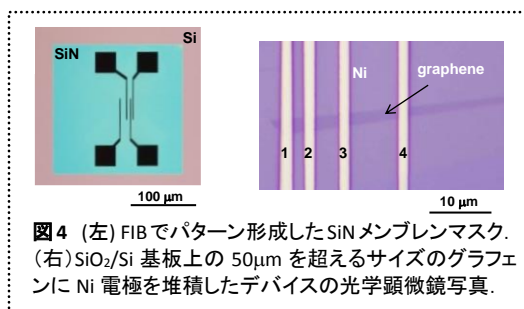


図 4 (左) FIB でパターン形成した SiN メンブレンマスク. (右)  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  基板上的 50  $\mu\text{m}$  を超えるサイズのグラフェンに Ni 電極を堆積したデバイスの光学顕微鏡写真.

**【結果及び考察】** 図 5 にレジストフリープロセス及び PMMA レジストを用いた従来の EB リソグラフィーにより作製した Ni 電極 TLM デバイスにおける 2 端子抵抗のゲート電圧依存性の結果を示す. レジストフリーで作製したデバイスの方が, Dirac point のシフト及び抵抗の  $V_G$  に対する非対称性が大きい. 清浄界面の達成により, Ni/グラ

フェン/ $\text{SiO}_2$  間の相互作用が強くなり, 電荷移動領域がチャンネル内に深く侵入し輸送特性にまで大きく影響を与えていることがわかる.

Ni 電極における Dirac point シフトの観察は, TLM 解析におけるチャンネルの輸送特性は全ての電極間で均一であるという測定条件に当てはまらない. それ故, 4 端子測定によりコンタクト抵抗率を見積もった. 得られたコンタクト抵抗率と図 2 において量子容量測定から見積もった状態密度の最大値との関係を図 6 に示す. レジストフリープロセスにより Ni/グラフェンの相互作用は強くなり, 状態密度はある程度増加したものの, 相互作用が弱いレジストプロセスではゲート変調が容易なため状態密度が幾分か大きくなる. このため, 期待したほどコンタクト抵抗率の改善が見られなかったものと考えられる. 一方, レジストフリー Au 電極では, 50  $\mu\text{m}$  程度と非常に低い値を示した. この値は, これまで IBM が報告しているコンタクト抵抗率に対する最低値 [4] よりも低い値である. 理想的な Au/グラフェン分子間力距離に近く相互作用も非常に弱いためゲート変調による状態密度増加が大きくコンタクト抵抗率が減少したのと考えられる.

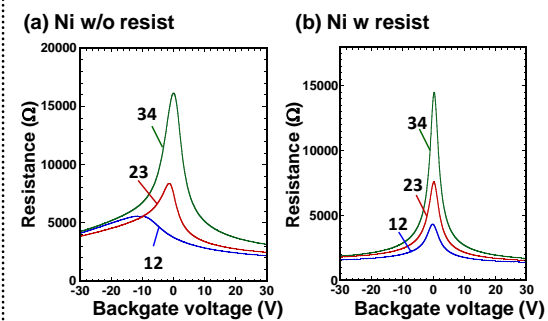


図 5 (a) レジストフリーで堆積した Ni 電極デバイスの IV 結果. (b) 通常のレジストプロセスを経た Ni 電極デバイスの IV 結果. 数字は, 図 4 (右) における電極と一致している. レジストフリーの方が Dirac point が大きく移動していることがわかる.

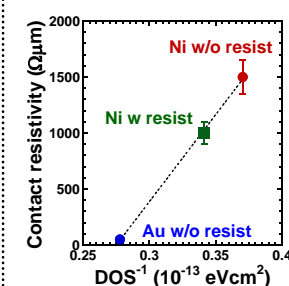


図 6 4 端子法により測定したコンタクト抵抗率と図 2 から得た最大状態密度の関係.

#### 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 10 件)

1. K. Nagashio, R. Ifuku, T. Moriyama, T. Nishimura,

- and A. Toriumi, "Intrinsic graphene/metal contact", IEEE International Electron device meeting (IEDM) Tech. Dig. 2012, 68.
2. R. Ifuku, K. Nagashio, T. Nishimura, and A. Toriumi, "The density of states of graphene underneath a metal electrode and its correlation with the contact resistivity", Appl. Phys. Lett. 2013, **103**, 033514.
  3. T. Moriyama, K. Nagashio, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Carrier density modulation in graphene underneath the Ni electrode", J. Appl. Phys. 2013, **114**, 024503.
  4. N. Nagamura, K. Horiba, S. Toyoda, S. Kurosumi, T. Shinohara, M. Oshima, H. Fukidome, M. Suemitsu, K. Nagashio, A. Toriumi, "Direct observation of charge transfer region at interfaces in graphene device", Appl. Phys. Lett. 2013, **102**, 241604.
  5. K. Nagashio, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Estimation of residual carrier density near the Dirac point in graphene through quantum capacitance measurement", Appl. Phys. Lett. 2013, **102**, 173507.
  6. K. Nagashio, K. Kanayama, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Carrier response in band gap and multiband transport in bilayer graphene under the ultra-high displacement", IEEE International Electron device meeting (IEDM) Tech. Dig. 2013, 503.
  7. K. Nagashio, K. Kanayama, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Quantum capacitance measurement of bilayer graphene", ECS Trans. 2014, **61(3)**, 75.
  8. H. Fukidome, K. Nagashio, N. Nagamura, K. Tashima, K. Funakubo, K. Horiba, M. Suemitsu, A. Toriumi, and M. Oshima, "Pinpoint operando analysis of the electronic states of a graphene transistor using photoelectron nanospectroscopy", Appl. Phys. Express 2014, **7**, 065101.
  9. J. L. Qi, K. Nagashio, T. Nishimura, A. Toriumi, "Crystal orientation and macroscopic surface roughness in hetero-epitaxially grown graphene on Cu/mica", Nanotechnology, 2014, **25**, 185602. [2] K. Kanayama, K. Nagashio, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Large Fermi level modulation in graphene transistors with high-pressure O<sub>2</sub>-annealed Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> topgate insulators", Appl. Phys. Lett. 2014, **104**, 083519.
  10. H. Fukidome, M. Kotsugi, K. Nagashio, R. Sato, T. Ohkochi, T. Itoh, A. Toriumi, M. Suemitsu, T. Kinoshita, "Orbital-specific tunability of many-body effects in bilayer graphene by gate bias and metal contact", Sci. Rep. 2014, **4**, 3713.
- [学会発表] (計 36 件)
1. 長汐晃輔, 鳥海明, 「グラフェンデバイスにおける界面の理解と制御」, 第 32 回表面科学学術講演会 シンポジウム講演(2012 年 11 月 21 日, 東北大学(仙台))[招待講演]
  2. 長汐晃輔, 西村知紀, 鳥海明, 「量子容量測定のための Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> トップゲート絶縁膜の形成」, 2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会, (2012 年 9 月 12 日, 愛媛大学(愛媛))
  3. 長汐晃輔, 「量子容量測定によるグラフェンの状態密度解析」, フラールンナノチューブグラフェン若手研究会, (2012 年 9 月 4 日, 東北大学(仙台))[招待講演]
  4. 長汐晃輔, 鳥海明, 「金属電極直下のグラフェンは本当にグラフェンか?」, 筑波大学プレ戦略イニシアティブ講演会, (2012 年 8 月 7 日, 筑波大学(つくば))[招待講演]
  5. 長汐晃輔, 「金属と接するグラフェンは本当にグラフェンか? —デバイス屋のラマンの使い方—」, 堀場製作所最先端分析技術セミナー, (2012, 8, 3, 東大(東京)).[招待講演]
  6. 長汐晃輔, 鳥海明, 「Is Graphene Contacting Metal Still Graphene?」, 新世代研究所ナノカーボン研究会, (2012 年 7 月 23 日, 蔵王(山形))[招待講演]
  7. 長汐晃輔, 「グラフェン/金属コンタクトの理解と制御」, グラフェンコンソーシアム第 2 回研究講演会, (2013 年 10 月 16 日, 秋葉原(東京))[招待講演]
  8. 長汐晃輔, 「Si 集積化の限界を超える—グラフェン FET 実現へ向けて—」, SEMI FORUM JAPAN 2013, (2013 年 5 月 21 日, グランキューブ大阪(大阪))[招待講演]
  9. K. Nagashio, R. Ifuku, T. Moriyama, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Intrinsic graphene/metal contact", 2012 IEEE International Electron Device Meeting (IEDM2012), pp.68-71, (Dec. 10, 2012, San Francisco).[Invited]
  10. K. Nagashio, T. Nishimura and A. Toriumi, "Top-gated graphene FET with Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for quantum capacitance estimation", 2012 International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM), pp.678-679., (Sep.26, 2012, Kyoto)
  11. 長汐晃輔, 「グラフェン/金属コンタクトの理解と制御」, グラフェンコンソーシアム第 2 回研究講演会, (2013 年 10 月 16 日, 秋葉原(東京))[招待講演]
  12. 長汐晃輔, 「Si 集積化の限界を超える—グラフェン FET 実現へ向けて—」, SEMI FORUM JAPAN 2013, (2013 年 5 月 21 日, グランキューブ大阪(大阪))[招待講演]
  13. 長汐晃輔, 井福亮太, 森山喬史, 西村知紀, 鳥海明, 「レジストフリーコンタクト形成プロセスに基づくグラフェン/金属界面の理解」, 2013 年第 60 回応用物理学会春季学術講演会, (2013 年 3 月 29 日, 神奈川工科大学(神奈川)).
  14. 長汐晃輔, 井福亮太, 森山喬史, 西村知紀, 鳥海明, 「グラフェン/金属コンタクト形成に対する理解と制御」, 応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会 第 158 回研究集会, (2013 年 3 月 7 日, 早稲田大学(東京)).[招待講演]
  15. 長汐晃輔, 井福亮太, 森山喬史, 西村知紀, 鳥海明, 「本質的なグラフェン/金属界面特性」, 応用物理学会分科会, 電子情報通信学会 (IEDM 特集), (2013 年 1 月 30 日, 東京)[招待講演]
  16. 長汐晃輔, 西村知紀, 鳥海明, 「量子容量測定によるグラフェンの状態密度抽出」, ゲートスタック研究会—材料・プロセス・評価の物理—(第 18 回研究会), pp115-118, (2013 年 1 月 26 日, 湯河原)
  17. 長汐晃輔, 「量子容量測定によるグラフェンの状

- 態密度解析, 新世代研究所 2012 年度第 3 回ナノカーボン研究会, (2013,1,25, 東京) [招待講演]
18. 長汐晃輔, 「グラフェントランジスタ技術」, JEITA 第 6 回ポスト Si スケーリング材料・デバイス技術分科会, (2013,1,10, 東京) [招待講演]
  19. K. Nagashio, "Metal/graphene contact", 4th A3 symposium on Emerging materials, (Nov. 12, 2013, Jeju, Korea). [Invited]
  20. K. Nagashio, K. Kanayama, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Quantum capacitance measurements in monolayer and bilayer graphene", 2013 JSAP-MRS joint symposia, (Sep. 19, 2013, Kyotanabe campus, Doshisha Univ., Kyoto).
  21. K. Nagashio, R. Ifuku, T. Nishimura, and A. Toriumi, "DOS estimation of graphene in the contact structure by quantum capacitance measurement", PRGR2013, (Sep. 12, 2013, Tokyo Tech Front, Tokyo).  
[6] A. Toriumi, T. Moriyama, R. Ifuku, and K. Nagashio, "Graphene in contact with metals", E-MRS 2013 Spring meeting, (May 30, 2013, Strasbourg, France).
  22. K. Nagashio, R. Ifuku, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Estimation of DOS in graphene in contact with metals by quantum capacitance measurement", The 40th int. symp. on compound semiconductors, (May 22, 2013, Kobe convention center, Hyogo).
  23. K. Nagashio, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Band gap estimation in bilayer graphene through quantum capacitance measurement", APS March meeting 2013, (March 18, 2013, Baltimore).
  24. K. Nagashio, and A. Toriumi, "Extraction of quantum capacitance in monolayer graphene", ISPlasma 2013, (Jan. 29, 2013, Nagoya univ., Aichi).
  25. 長汐晃輔, "グラフェン FET の実現へ向けて -コンダクタンス法によるギャップ内準位解析-", 第 9 回 ATI 合同研究会, 東京, 2014, 11, 26. [招待講演]
  26. 長汐晃輔, "h-BN 層状絶縁物質における電氣的絶縁破壊挙動", 新世代研究所 2014 年度第 2 回ナノカーボン研究会, 東京, 2014, 11, 17. [招待講演]
  27. 長汐晃輔, "2 層グラフェンにおけるギャップ内のキャリア応答と高キャリア密度下でのサブバンド散乱", 日本表面科学会, 第 82 回表面科学研究会 (2014 年 7 月 25 日, 東工大(東京)) [招待講演]
  28. 長汐晃輔, "電界印加による 2 層グラフェンのギャップ形成", 第 78 回半導体・集積回路技術シンポジウム, (2014 年 7 月 17 日, 東京理科大(東京)) [招待講演]
  29. 長汐晃輔, "2 層グラフェンの外部電界印加によるギャップ形成とギャップ内準位の評価", 学振専門委員会(2014,6,10 東大(東京)) [招待講演]
  30. 長汐晃輔, 金山薫, 西村知紀, 鳥海明, "2 層グラフェンにおけるギャップ内のキャリア応答と高電界でのサブバンド散乱", 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会, IEDM 特集, 機械振興会館, 東京, 2014, 1, 29. [招待講演]
  31. K. Nagashio, "Carrier response in electric-field-induced bandgap of bilayer graphene", 45th IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference, (December 2014, Bahia Resort Hotel, SaDiego). [Invited]
  32. K. Nagashio, "Energy gap formation & gap states analysis in bilayer graphene", Indo-Japan program on Graphene and related materials, (November, 5, 2014, JNCASR, Bangalore, India). [Invited]
  33. K. Nagashio, "Energy gap formation and gap states analysis in bilayer graphene under the ultra-high displacement", Japan-Korea Joint Symposium on Semiconductor Physics and Technology, (September 17, 2014, Sapporo). [Invited]
  34. K. Nagashio, "semiconducting properties in bilayer graphene under the ultra-high displacement", IEEE INEC2014, (July, Sapporo). [Invited]
  35. K. Nagashio, K. Kanayama, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Quantum capacitance measurement of bilayer graphene", 225rd ECS meeting, (May 12, 2014, Orlando). [Invited]
  36. K. Nagashio, K. Kanayama, T. Nishimura, and A. Toriumi, "Electrical quality improvement of thin  $Y_2O_3$  topgates in graphene FETs by high-pressure  $O_2$  post-deposition annealing", APS March meeting 2014, (March 6, 2014, Colorado).
- [図書] (計 2 件)
1. 長汐晃輔, 鳥海明, "グラフェン/金属コンタクトの理解と制御", グラフェンの最先端技術と広がる応用, フロンティア出版, 東京, 2012, 120.
  2. K. Nagashio, A. Toriumi, "Graphene/metal contact" in Frontiers of Graphene and Carbon Nanotubes, Springer, 2015, 53.
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件)  
○取得状況 (計 0 件)
- [その他]
- ホームページ等  
[http://webpark1753.sakura.ne.jp/nagashio\\_lab/](http://webpark1753.sakura.ne.jp/nagashio_lab/)
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・准教授
- 研究者番号 : 20373441