

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21241038
 研究課題名（和文） 電界誘起バンドギャップによるグラフェン原子薄膜高速トランジスタ
 研究課題名（英文） Graphene atomic film transistor with gate-tunable band-gap
 研究代表者
 塚越 一仁 (TSUKAGOSHI KAZUHITO)
 独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点・主任研究者
 研究者番号：50322665

研究成果の概要（和文）：グラフェン素子を作製し、次世代エレクトロニクスを実現するための基礎電気伝導特性を調べた。グラフェン素子を作るための電界効果変調を制御するために、グラフェンにアルミニウムを直接蒸着して空気に曝すことで、グラフェンとアルミニウム界面に自己形成酸化絶縁膜ができることを見出した。2 層グラフェンに電界を印加して、バンドギャップを自在に制御して半導体的な伝導を実現できるようになった。さらに、半導体的特性を用いて、電界効果トンネル素子やロジック動作のための基礎素子を実現し、伝導を実証した。

研究成果の概要（英文）：We have realized a practical wide band gap in bilayer graphene. The gap was induced by an electric field applied by dual-gate sandwiching the bilayer graphene. A self-assembled gate insulator enabled us to apply a large electric field which enhanced the band gap. The wide band gap allowed for operation of a logic gate composed of bilayer graphene transistors. These results predict that graphene electronics will possibly be realized as emerging transistors with an atomically thin semiconductor.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2010 年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
2011 年度	11,100,000	3,330,000	14,430,000
年度			
年度			
総計	36,200,000	10,860,000	47,060,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：複合領域・ ナノ・マイクロ科学・ マイクロ・ナノデバイス

キーワード：グラフェン、電気伝導、電界効果、基礎物性、自己形成

1. 研究開始当初の背景

グラフェンは、ディラック電子系に起因した高い伝導性が理論的な研究によって見出され、実際に他の材料を大きく凌駕する特性が報告されていた。この伝導性を基に、次世代半導体素子のチャネル材料、IC 内の配線材料、透明電極材料などとしての応用可能性が期待されて、基本特性の正確な材料情報が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、将来の素子化のための基本特性の解明と検証のため、半導体的特性の基礎特性と制御を目指した。

3. 研究の方法

高品位 KISH グラファイトから剥離法にて作製した二層グラフェンを使って素子を作製した。現在、大面積グラフェンを作るために研究されている方法として、気相成長法 (CVD) や、SiC を熱アニールして Si 原子を脱離させて基板表面にグラフェンを析出させ

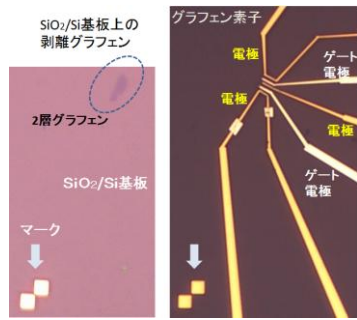


図 1. 剥離法で作製したグラフェン(左)と電極とゲート電極を作製したグラフェン素子(右)。285nm(もしくは90nm)厚の SiO₂ を用いることで、表面に剥離で付着した単層もしくは二層グラフェン等と基板との見かけのコントラストが大きくなり、グラフェンを簡単に見分けることができる。端子作製はグラフェン付近のマーカーを基準に作製する。

の方法が挙げることができる。将来的なエレクトロニクス展開には、これらの確立が欠かせないが、現時点での原理検証研究には大面積は特に必要ではなく、二層のグラフェンを最も簡単かつ確実にえられればよい。このため、剥離法にて得られる高品位グラフェン膜を用いた。なお、SiO₂/Si 基板上グラフェンの枚数判定には、CCD 観測で分離した緑光の光学反射強度を計測することで、グラフェン枚数を判定した。なお、グラフェンの枚数で変化するラマン散乱のピーク解析によって枚数を特性することも可能であるが、光学反射強度解析の方が安価な装置で圧倒的に効率よく枚数を特定可能である。

グラフェンの基板上的位置の特定には、基板上に予め形成したマークを使う。このマークは電子ビーム露光と金属薄膜蒸着で形成され、マークとグラフェンの相対位置を合わせることで、グラフェンに端子を取り付けることが出来る(図 1)。素子構造は 3 つのステップで作製した。まず、グラフェンの不要部位を取り除くために、電子ビーム露光でレジストをチャンネル形状にパターンニングして、酸素プラズマにて不要部位をエッチングした。エッチングマスクのレジストを除去後に、2 回目の電子ビーム露光と金属蒸着によってソース・ドレイン電極を形成した。3 回目の電子ビーム露光とアルミニウム蒸着によって、ゲート電極を形成した。通常、ゲート電極を形成するには、チャンネル材料と金属電極を電氣的に分離する絶縁膜を挟む。しかし、グラフェンではアルミニウムを蒸着すると、蒸着直後はアルミニウム/グラフェン間にて導通があるが、素子を数時間空気に曝すだけで絶縁化する(図 2)。これは、アルミニウム表面とグラフェン/アルミニウム界面が酸化することで、ゲート絶縁膜が自己形成的に作られる。ゲート電圧特性等を計測中に、誤って過電圧をゲート電極に印加してゲート絶縁膜を壊しゲートリークが大きくなった場合でも、再度空気に素子を曝すとゲートの絶

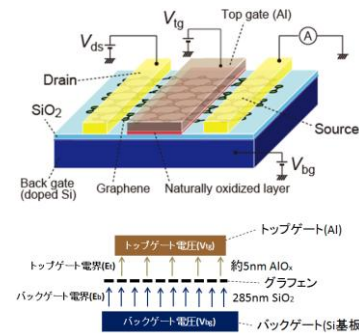


図 2. トップゲートとバックゲートを持つグラフェントランジスタの模式図と印加電界の模式図。グラフェンの上に蒸着したアルミニウム電極の表面と界面は、空気に曝されることで酸化する。グラフェン/アルミニウム界面にも酸素が拡散して酸化することで、電氣的に絶縁され、アルミニウム端子はゲート電極となる。

縁性が回復する。この現象から、グラフェンとアルミニウムの界面への酸素原子拡散がゲート絶縁膜を形成していると考えられる。なお、素子静電容量の見積もりから得られるゲート絶縁膜の厚さは 5nm 程度であり、多数の素子にてゲート電圧特性がほぼ同等であることから、高い再現性にて自己形成される。(この自己形成ゲート絶縁膜技術は、本研究にて確立した。) この系では、SiO₂ を介した基板ゲートをバックゲート(Vbg)とし、アルミニウム電極をトップゲート(Vtg)として、グラフェンの電気伝導を変調した。トップゲート絶縁膜とバックゲート絶縁膜の大きな非対称性によって、グラフェンに印加される電界は主にバックゲートによって変わる。電子密度はトップゲートとバックゲートの双方の作用によって変化するため、2 つのゲートを使って素子の特性を制御できる。

4. 研究成果

(1) 電界印加による半導体的特性

2 つのゲート電極を有する本素子にて印加出来る電界は、1.5~2 V/nm 程度であり、二層グラフェンにバンドギャップを導入出来る。二層のグラフェンは電界無しでは、等価の特性でありバンドギャップはない。この二層グラフェンに電界を印加すると、グラフェン層間 0.335nm 程度に従って電位差が生じ、電子状態の対称性が崩れ、バンドギャップが生じ

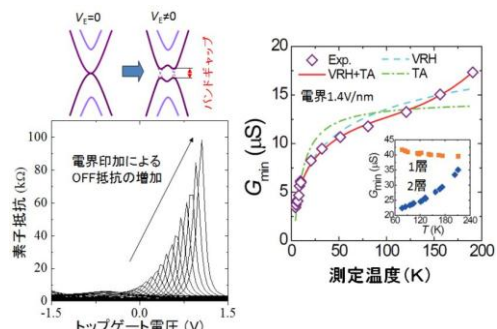


図 3. 二層グラフェンの電界印加による半導体化。電界を印加すると Off 抵抗が増大し、温度変化においても明確な半導体特性が得られるようになる。

る(図3)。このため、トップゲート電圧(V_{tg})印加で生じるグラフェンのアンバイポーラ型抵抗ピークは、グラフェンに印加するバックゲート電圧(V_{bg})によって増大する。つまり、印加電界が大きくなるに従って、バンドギャップが増大していくことを示唆している。これまでに最大抵抗変化比400程度まで観測した。なお、この様な抵抗値変調は、単層グラフェンでは全く観測されない。

この抵抗増大をバンドギャップ特性と直結するには、半導体としての特性を調べなければならない。パークレーグループは電界を印加した二層グラフェンにバンドギャップの大きさに相当するエネルギーの光を照射して、抵抗変化を観察してバンドギャップの存在を示した。我々は半導体特性を電気伝導にて示すために、温度特性を調べた。この結果、電界印加二層グラフェンの伝導度は、温度上昇に伴って大きくなり、バンドギャップを有する半導体に特有の熱活性型の典型的な温度特性が得られた。伝導度の温度依存性から、計測したすべての素子において100meV以上のバンドギャップが計測されたが、抵抗増大に素子間ばらつきがあり、個々の素子における乱れに拘わるホッピングサイトの密度に大きな差異があることが判明した。この乱れた状態は、バリアブルレンジホッピング(VRH)を生じさせ、バンドギャップが十分に生じていても、伝導が生じてしまってoff時の電流を十分に止められなくなる。なお、単層グラフェンの温度変化は、温度の低下に伴って伝導度が増大することから、二層グラフェンの特性はグラフェン本来の金属特性とは全く異なる伝導性となる。

(2) p-n型ダイオード

ゲート電界印加によって、グラフェンはp型とn型伝導を入れ替えるアンバイポーラ特性を示す。この特性を利用して、局所的にゲート電界を変えることができれば、ゲート電圧制御のpn接合をグラフェン平面内に作りこむことができる。実際に、トップゲートのゲート絶縁膜の半分域をアルミニウムの自己形成ゲート絶縁膜とし、他半分域には予め SiO_2 (5nm)を形成すると、電界の強い領域

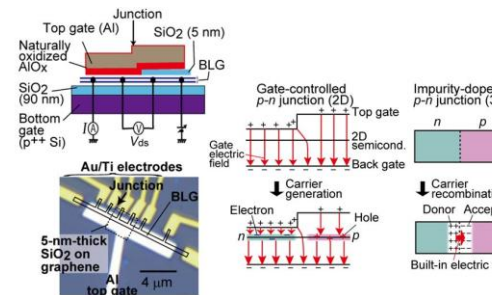


図4. 段差つきゲート絶縁膜素子におけるpn接合。バックゲート電極に電界を印加することで、p領域とn領域が分離され、トンネル接合となる。

と比較的弱い領域が連続したグラフェン面内接合となる。このp型とn型の接する領域に対して、バックゲートを印加することでp型とn型領域を絶縁領域で分離した(図4)。通常のバルク半導体では、p型とn型の境界領域でキャリアが再結合することで、空乏層が生じる。空乏層ではイオン化したドナーやアクセプターによる電荷が生じ、内蔵電界が現れる。内蔵電界によってp型とn型領域の電子の化学ポテンシャルが揃う。一方、グラフェンp-n接合においては、空間的に変化するゲート電界の一部を遮蔽するようにキャリアが誘起される。従って、p領域とn領域はそれぞれキャリアによって帯電し、境界の空乏層は電気的に中性である。これはバルク半導体と異なる電荷分布である。接合のバンドプロファイルは空間的に変化するゲート電界によってコントロールされるので、ゲート電圧およびゲート電極の形状によって接合の性質をコントロールできる。数値的な電界解析によって、トンネル領域は5nm程度の長さであることが推定された。また、バンドギャップがゲート電界によって変化するので、トンネルバリアの高さも変化する。

トンネル伝導が期待されるグラフェンp-n接合にて、トンネル伝導を最も感度よく計測するために微分抵抗を測定した。バックゲートに電圧を印加せずにバンドギャップを誘起しない場合には微分抵抗ピークは現れないが、バンドギャップを誘起すると明瞭な微分抵抗ピークが観測された。バックゲートに印加する電圧を大きくしてバンドギャップを大きくすると、ピークは大きくなる。ピークが観察されるソース・ドレイン電圧はバンドギャップを誘起するためのバックゲート電圧によらず+50mVであり、江崎ダイオード型の素子で期待される順方向のみのピーク出現となっている。

(3) 連結素子によるインバータ動作

複数のソース・ドレイン電極ならびにゲート

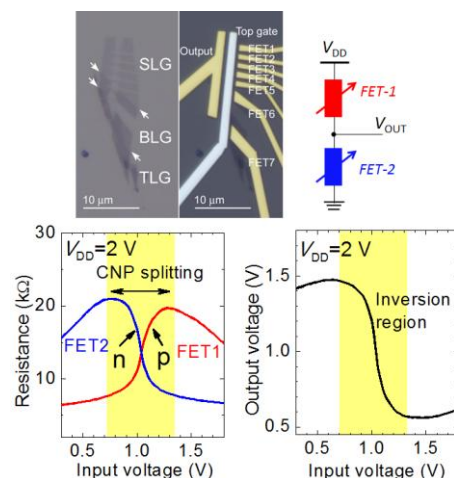


図5. グラフェンを用いて作製した多チャンネル電界効果素子。7つのグラフェンFETから2つを選び、直列に測定することで得られたインバータ特性。

電極を有する素子を一枚のグラフェンに形成した(図 5)。7つの素子が並列に連なり、任意に2素子を選ぶと直列のインバータ型の素子となる。このインバータ動作には、バックゲート電圧、各トップゲート電圧、ソース・ドレイン駆動電圧(V_{DD})が動作のためのパラメータとなる。それぞれのFETのトップゲートにて、p型とn型の組み合わせとなるように調整した。これに V_{DD} を印加すると、個々に測定すれば同一特性となるアンバイポーラ特性のピークを分離することが出来る。これは2つのトランジスタが直列に連なっているために、印加した V_{DD} が分割され、トップゲート電圧に印加した電圧をシフトさせることになる。このためp型とn型の連結素子となり、インバータとしての動作が得られた。出力電圧が入力電圧によって高電圧状態と低電圧状態が入れ替わっている。このインバータ動作は印加した V_{DD} に依存し、 V_{DD} の増加に伴ってゲインが大きくなっている。このゲインは最大7程度までに達し、本研究までに報告されていたゲインと比較して150倍以上の改善に成功した。従来は0.1よりも遥かに小さなゲインであったため、グラフェンシステムを用いたエレクトロニクスとしては全く可能性がないのではないかと疑問視されていたが、本研究によって、重要な疑問の1つは突破された。なお、同等のインバータを単層グラフェンと二層グラフェンで比較すると、二層グラフェンにてバンドギャップを導入することで、定電圧領域での動作安定性が大きく高まり、明瞭なインバータ動作を示すことも得られた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)

1. Unipolar transport in bilayer graphene controlled by multiple p-n interfaces, H.Miyazaki, S.-L.Li, S.Nakaharai, K.Tsukagoshi, Applied Physics Letters 100, in press (2012), 査読有.
2. Origin of the relatively low transport mobility of graphene grown through chemical vapor deposition, H.S.Song, S.-L.Li, H.Miyazaki, S.Sato, K.Hayashi, A.Yamada, N.Yokoyama, K.Tsukagoshi, Scientific Reports 2, 337/1-6 (2012), 査読有.
3. Role for Atomic Terraces and Steps of Epitaxial Graphene in Electron Transport Properties, H.Kuramochi, S.Odaka, K.Morita, S.Tanaka, H.Miyazaki, M.V.Lee, H.Hiura, K.Tsukagoshi, AIP advances 2 (1) 012115/1-10 (2012), 査読有.
4. Observation of tunneling current in semiconducting graphene p-n junctions, H.Miyazaki, S.-L.Li, H.Hiura, K.Tsukagoshi, A.Kanda, Journal of Physical Society of Japan 81 (1) 014708/1-7 (2012), 査読有.
5. Controllable Gallium Melt-Assisted Interfacial Graphene Growth on SiC, M.V.Lee, H.Hiura, A.Tyurnina, K.Tsukagoshi, Diamond and

Related Materials 24, 34-38 (2012), 査読有.

6. Introducing Non-Uniform Strain to Graphene Using Dielectric Nanopillars, H.Tomori, A.Kanda, H.Goto, Y.Ootuka, K.Tsukagoshi, S.Moriyama, E.Watanabe, D.Tsuya, Applied Physics Express 4 (7) 075102/1-3 (2011), 査読有.
7. Complementary-like Semiconducting Graphene Logic Gates Controlled by Electrostatic Doping, S.-L.Li, H.Miyazaki, M.V.Lee, C.Liu, A.Kanda, K.Tsukagoshi, Small 7 (11) 1552-1556 (2011), 査読有.
8. Enhanced Logic Performance with Semiconducting Bilayer Graphene Channels, S.-L.Li, H.Miyazaki, H.Hiura, C.Liu, K.Tsukagoshi, ACS nano 5 (1) 500-506 (2011), 査読有.
9. 2層グラフェン電気伝導の強電界効果, 塚越一仁, 宮崎久生, 神田晶申, 固体物理 45 (11) 93-102 (2010), 査読有.
10. グラフェン素子の作り方とゲート電界による伝導変調 (小特集「グラフェンの視点から見た炭素材料」), 塚越一仁, 宮崎久生, 炭素 243号 (6) 110-115 (2010), 査読有.
11. Influence of disorder on conductance in bilayer graphene under perpendicular electric field, H.Miyazaki, K.Tsukagoshi, A.Kanda, M.Otani, S.Okada, Nano Letters 10 (10) 3888-3892 (2010), 査読有.
12. Low operating bias and matched input-output characteristics in graphene inverters, S.-L.Li, H.Miyazaki, A.Kumatani, A.Kanda, K.Tsukagoshi, Nano Letters 10 (7) 2357-2362 (2010), 査読有.
13. Anisotropic transport in epitaxial graphene on SiC substrate with periodic nanofacets, S.Odaka, H.Miyazaki, S.-L. Li, A.Kanda, K.Morita, S.Tanaka, Y.Miyata, H.Kataura, K.Tsukagoshi, Y. Aoyagi, Applied Physics Letters 96 (6) 062111/1-3 (2010), 査読有.
14. Resistance modulation of graphite/graphene film controlled by gate electric field, H.Miyazaki, S.-Li, A.Kanda, K.Tsukagoshi, Semiconductor Science and Technology 25 (3) 034008/1-8 (2010), 査読有.

[学会発表](計42件)

1. Investigation to low transport mobility of graphene grown through chemical vapor deposition, H.S.Song, S.L.Li, H.Miyazaki, S.Sato, K.Hayashi, A.Yamada, N.Yokoyama, K.Tsukagoshi, International Symposium on "Development of Core Technologies for Green Nanoelectronics", Tokyo, Japan, March 13-14, 2012.
2. Gate-modulation of electric conduction for graphene device (Invited), K.Tsukagoshi, Carbon-Based Nano-Materials and Devices, Suzhou, China, October 17-22, 2011.
3. Complementary-like Graphene Logic Gates (Invited), S.-L.Li, H.Miyazaki, K. Tsukagoshi, 2011 A3 Symposium of Emerging Materials, Urumqi, XinJiang, China, October, 13-15, 2011.
4. Electron tunneling in bilayer graphene p-n

- junction controlled by gate electric field, H.Miyazaki, M.V.Lee, S.-L.Li, A.Kanda, K.Tsukagoshi, 2011 International Conference on Solid State Devices and Material (SSDM2011), Nagoya, September 28-30, 2011.
5. Gate-tunable transport in graphene (Invited), K.Tsukagoshi, SSDM2011 Short Course "Fundamental and applications of carbon nanotube and graphene", Nagoya, September 27, 2011.
6. Electric field induced p-n tunnel junction in bilayer graphene, H.Miyazaki, M.Lee, S.-L.Li, A.Kanda, K.Tsukagoshi, The 37th leading conference in Europe for Micro- and Nano Engineering (MNE2011), Berlin, Germany, September 19 - 23, 2011.
7. Band-gap engineering by electric field in bilayer graphene (Invited: Keynote Presentation), K.Tsukagoshi, 22nd European conference on Diamond, Garmish-Partenkirchen, Germany, September 4-8, 2011.
8. Geometric effect for electron transport in epitaxial graphene on 4H-SiC(0001), H.Kuramochi, S.Odaka, K.Morita, S.Tanaka, H.Miyazaki, H.Hiura, K.Tsukagoshi, International conference on new diamond and nano carbons 2011 (NDNC2011), Shimane, Japan, May 16-20 2011.
9. Characterization of Graphene Formed on SiC by Liquid Phase Epitaxy, M.V.Lee, H.Hiura, A.Tyurnina, K.Tsukagoshi, International conference on new diamond and nano carbons 2011 (NDNC2011), Shimane, Japan, May 16-20 2011.
10. Complementary-like semiconducting graphene logic inverters, S.-L.Li, H.Miyazaki, K.Tsukagoshi, American Physical Society March meeting 2011, Dallas, Texas, USA, March 21-25, 2011.
11. Bilayer graphene p-i-n tunnel junction controlled by modulated top gate, H.Miyazaki, S.-L.Li, K.Tsukagoshi, American Physical Society March meeting 2011, Dallas, Texas, USA, March 21-25, 2011.
12. Band-gap tunable operation of bilayer graphene device (Invited), K.Tsukagoshi, The 2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifchem 2010), Honolulu, Hawaii, USA, December 15-20, 2010.
13. Band-gap tunable operation of bilayer graphene device (Invited), K.Tsukagoshi, The 1st China, Japan and Korea Joint Symposium, Core-Riviera Hotel, Chonju, South Korea, November 7-11, 2010.
14. Thin film transistor from CVD graphene, A.V. Tyurnina, A.N. Obraztsov, H.Hiura, K.Tsukagoshi, 2nd Russian-Japanese Young Scientists Conference on Nanomaterials and Nanotechnology, Tokyo, Japan, September 21-22, 2010.
15. Gate-induced band gap for graphene device (Invited), K.Tsukagoshi, 40th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC 2010), Sevilla, Spain, September 13-17, 2010.
16. Anisotropic transport in graphene grown on vicinal SiC substrate, H.Miyazaki, S.Odaka, S.-L. Li, A.Kanda, K.Tsukagoshi, K.Morita, S.Tanaka, Engineering Conferences International: Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, August 1-6, 2010.
17. Complementary-like graphene logic inverters, Song-Lin Li, H.Miyazaki, K.Tsukagoshi, Engineering Conferences International: Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, August 1-6, 2010.
18. Band gap tuning for graphene transistor (Invited), K.Tsukagoshi, Engineering Conferences International: Recent Advances in Graphene and Related Materials, Singapore, August 1-6, 2010.
19. Anisotropic transport in graphene grown on SiC, H.Miyazaki, S.Odaka, M.-D.Yi, S.-L.Li, A.Kanda, K.Tsukagoshi, K.Morita, S.Tanaka, International Conference on Science and Technology of Synthetic Metals 2010 (ICSM2010), Kyoto, Japan, July 4-9, 2010.
20. Band gap tuning in graphene device (Invited), K.Tsukagoshi, 日中学術セミナー, Akihabara, Tokyo, Japan, June 27, 2010.
21. Bilayer graphene (Invited), K.Tsukagoshi, The 6th International Nanotechnology Conference on Communications and Cooperation (INC6), Minatec, Grenoble, France, May 17-20, 2010.
22. Low operating bias and enhanced voltage gain in graphene inverters with high capacitive-efficiency top gate, S.-L. Li, H.Miyazaki, H.Hiura, A.Kanda, K.Tsukagoshi, Graphene Week 2010, Maryland University, Maryland, USA, April 19-23, 2010.
23. Band gap tuning in graphene device, K.Tsukagoshi, NIMS-NUS/IMRE joint workshop, National University of Singapore, Singapore, April 19-20, 2010.
24. Temperature dependence of conductance in bilayer graphene with electric-field-induced band gap, H.Miyazaki, S.Li, A.Kanda, K.Tsukagoshi, American Physical Society March meeting 2010, Portland, OR, USA, March 15-19, 2010.
25. Gate-tunable band gap in bilayer graphene (Invited research lecture), K.Tsukagoshi, H.Miyazaki, S.Li, A.Kanda, 2010 International Winterschool on Electronic Properties of Novel Materials (IWEPNM 2010), Kirchberg, Austria, March 06-13, 2010.
26. Graphene p-n junction controlled by dielectric gate coupling, H.Miyazaki, Songlin Li, H.Hiura, A.Kanda, K.Tsukagoshi, The materials Nanoarchitectonics (MANA) international symposium 2010, Tsukuba, Japan, March 3-5, 2010.
27. Low operating bias and enhanced voltage gain in graphene inverters with high capacitive-efficiency top gate, S.Li, H.Miyazaki, K.Tsukagoshi, The materials Nanoarchitectonics (MANA) international symposium 2010, Tsukuba, Japan, March 3-5, 2010.
28. Tunable band gap in Graphene, K.Tsukagoshi, H.Miyazaki, Songlin Li, The

materials Nanoarchitectonics (MANA) international symposium 2010, Tsukuba, Japan, March 3-5, 2010.

29. Gate-voltage modulation of conductance in bilayer graphene, H.Miyazaki, A.Kanda, K.Tsukagoshi, Atomic Level Characterization (ALC'09), Maui, Hawaii, USA, Dec.6-11, 2009.

30. Electric transport in epitaxial graphene on vicinal SiC substrate with periodic atomic-scale facets, S.Odaka, H.Miyazaki, A.Kanda, K.Morita, S.Tanaka, Y.Miyata, H.Kataura, K.Tsukagoshi, Y.Aoyagi, Material Research Society (MRS) 2009 Fall Meeting, Boston, USA, Nov.30-Dec.4, 2009.

31. Electric field modulation of bilayer graphene channel, H.Miyazaki, K.Tsukagoshi, A.Kanda, The 4th international symposium on atomic technologies (ISAT-4), Kobe, Japan, November 18-19, 2009.

32. Graphene conduction controlled by gate-voltage (Invited), K.Tsukagoshi, DST-JSPS Workshop "Indo-Japan workshop on graphene", Bangarol, India, Nov.17-19, 2009.

33. Gate voltage induced band gap in bilayer graphene (Invited), K.Tsukagoshi, H.Miyazaki, A.Kanda, The 6th Korea-Japan symposium on carbon nanotube, Ginowan, Okinawa, Japan, Oct. 25-28, 2009.

34. Anisotropic transport in epitaxial graphene transistor on vicinal SiC substrate, S.Odaka, H.Miyazaki, A.Kanda, K.Morita, S.Tanaka, Y.Miyata, H.Kataura, K.Tsukagoshi, Y.Aoyagi, 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009), Sendai, Japan, October 7-9, 2009.

35. Band-gap modulation in gated bilayer graphene (Invited: Keynote talk), K.Tsukagoshi, H.Miyazaki, A.Kanda, Trends In Nanotechnology 2009 (TNT2009), Barcelona, Spain, September 07-11, 2009.

36. Band gap modulation in bilayer graphene (Invited), K.Tsukagoshi, H.Miyazaki, A.Kanda, The physics and new phenomena of pi-electronic interfaces (界面パイ電子系における新現象と物理), Kashiwa, University of Tokyo, August 10-12, 2009.

37. Effect of current annealing on electronic properties of multilayer graphene, S.Tanaka, H.Goto, H.Tomori, Y.Ootuka, K.Tsukagoshi, A.Kanda, Graphene Tokyo 2009, Tokyo, July 25-26, 2009.

38. Proximity-induced supercurrent in single-layer graphene, H.Goto, H.Tomori, S.Tanaka, Y.Ootuka, K.Tsukagoshi, A.Kanda, Graphene Tokyo 2009, Tokyo, July 25-26, 2009.

39. Electric field modulation of bilayer graphene (Invited), K.Tsukagoshi, H.Miyazaki, A.Kanda, Graphene Tokyo 2009, Tokyo, July 25-26, 2009.

40. Tunable semiconducting state in bilayer graphene, H.Miyazaki, K.Tsukagoshi, A.Kanda, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe, Japan, July 19-24, 2009.

41. Gate induced band gap for graphene device (Invited: Plenary Lecture), K.Tsukagoshi, H.Miyazaki, A.Kanda, 9th Biennial Workshop

in Russia, Fullerenes and Atomic Clusters (IWFAC2009), St Petersburg, Russia, July 6 - 10, 2009.

42. Electric field modulation of graphene channel, H.Miyazaki, K.Tsukagoshi, A.Kanda, International conference on materials for advanced technologies (ICMAT2009), Singapore, Singapore, June 28- July 3, 2009.

[図書] (計 5 件)

1. 炭素学, 担当 応用編 13-6-5 「磁気特性」 神田晶申、塚越一仁, 編集 田中一義、東原秀和、篠原久典、化学同人 2011年10月15日出版 (ISBN-13: 978-4759814118).

2. カーボンナノチューブ・グラフェンハンドブック, 担当 12章 グラフェンと薄層(薄膜)グラファイト、12-1節 作製方法, 「剥離グラフェンの作り方と判定方法」, 塚越一仁, 宮崎久生, 日浦英文, 黎松林, 監修 飯島澄男、遠藤守信、コロナ社, 2011年8月出版 (ISBN: 978-4-339-06621-0).

3. ナノカーボンの応用と実用化 - フラーレン、ナノチューブ、グラフェンを中心に - 担当 第4章3節 電子デバイス "SiC上グラフェンでの電界効果素子の試作と評価", 塚越一仁, 宮崎久生, 小高隼介, 監修 篠原久典、シーエムシー出版 2011年7月 (ISBN: 978-4-7813-0361-1).

4. Graphene and its Fascinating Attributes, 担当 Chapter 11 " Gate-Voltage Modulation in Graphene ", K.Tsukagoshi, H.Miyazaki, S.-L.Li, A. Kumatani, H. Hiura, A.Kanda, Edited by S.T.Pati, T.Enoki, C.N.R.Rao, World Scientific Publishing Company, 2011 (ISBN 978-981-4329-35-4).

[産業財産権]

○出願状況(計 1 件)

名称: 2次元薄膜原子構造の層数決定方法および2次元薄膜原子構造の層数決定装置

発明者: 塚越一仁, 宮崎久生, 日浦英文

権利者: 物質・材料研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2010-145314

出願年月日: 2010年6月25日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ:

http://www.nims.go.jp/pi-ele_g/

6. 研究組織

(1)研究代表者

塚越一仁(TSUKAGOSHI Kazuhito)

独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主任研究者

研究者番号: 50322665

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし