

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 13 日現在

機関番号: 92704

研究種目: 基盤研究(A)

研究期間: 2009~2011

課題番号: 21246006

研究課題名(和文) ウェハスケール表面構造制御を用いた単結晶グラフェン基板創製

研究課題名(英文) Creation of single-crystal graphene substrate through surface structure control on a wafer scale

研究代表者

日比野 浩樹(HIBINO HIROKI)

日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・主幹研究員

研究者番号: 60393740

研究成果の概要(和文):

SiC 基板を加熱して熱分解させると、基板上にグラフェンがエピタキシャル成長する。この現象を利用して、加熱雰囲気と温度の制御によって、均一性の高い 1 層から 3 層のグラフェンを作製した。高均一な 1 層および 2 層グラフェンを用いてトップゲートを有するホールバー素子を作製し、その特性評価から、1 層および 2 層グラフェンが、電子構造の違いを反映して、顕著に異なる電気伝導特性を示すことを明らかにした。

研究成果の概要(英文):

When SiC is thermally decomposed by annealing, graphene epitaxially grows on the substrate. Based on this phenomenon, we produced highly-uniform monolayer, bilayer, and trilayer graphene by controlling the annealing environment and temperature. We fabricated top-gated Hall bar devices using the monolayer and bilayer graphene, and measured their characteristics. We clarified that monolayer and bilayer graphene exhibit distinctly different electronic transport properties, reflecting their electronic structures.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	28,300,000	8,490,000	36,790,000
平成 22 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
平成 23 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	35,400,000	10,620,000	46,020,000

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・ナノ構造科学

キーワード: ナノ構造物性

1. 研究開始当初の背景

炭素原子が蜂の巣状に配列した二次元シートであるグラフェンは、2004 年に初めて、バルクのグラファイトから粘着テープで剥離することにより、実験的に単離された。以来、グラフェンは、その優れた電気伝導特性から、次世代エレクトロニクスの基幹材料として注目を集めている。

剥離グラフェンは、バルク材料を起源とするた

め高品質で、グラフェンの電気伝導特性解明やデバイス動作確認に有用であるが、サイズや収率の面で産業的でない。そこで、グラフェンデバイスの実用化に、大面積で高品質のグラフェンを基板上に成長させる技術が求められている。

SiC 基板を真空やガス中で加熱することにより SiC を熱分解し、グラフェンをエピタキシャル成長させる SiC 熱分解法は、スケールアップが容

易で、半導体基板上にグラフェンを形成できる利点がある。しかし、研究開始当時のエピタキシャルグラフェンは、電気伝導特性において、剥離グラフェンに比べ劣っており、(1)グラフェンの原子構造や層数分布等の構造評価から、グラフェン成長機構を解明し、所望の層数を有する大面積のグラフェンを成長すること、(2)得られた高品質なサンプルからエピタキシャルグラフェンの本質的な電気伝導特性を解明することが求められていた。

2. 研究の目的

最終目標は、SiC 熱分解法により、グラフェンエレクトロニクスの実用化に不可欠な単結晶グラフェン基板を創製することである。この目標に向け、成長制御の基本となるグラフェン成長機構の解明を目指す。成長機構の理解に基づき、大面積で層数の均一なグラフェンの作製条件を見出す。また、得られた高均一グラフェンの品質を電気伝導特性からデモンストレーションする。

3. 研究の方法

SiC 熱分解法による単結晶グラフェン基板創製を達成するための基盤的な知識・技術の確立に取り組む。具体的には、(1)低エネルギー電子顕微鏡(LEEM)による層数同定技術を用い、グラフェンの成長条件と層数分布の関係を詳細に調べ、グラフェンの成長機構を解明する。(2)グラフェン成長機構に基づく成長制御から、大面積で層数が均一なグラフェンを成長させる。(3)得られた高均一グラフェンから、トップゲートを有するホールパー素子を作製し、電気伝導特性を評価する。

4. 研究成果

(1)グラフェン成長機構

超高真空(UHV)中での SiC(0001)基板上のグラフェン成長における様々な段階で、層数分布と表面形状を、LEEM と原子間力顕微鏡により調べた。その結果、SiC 表面はグラフェン成長初期に極めてラフになり、その後、平坦化することが示された。以下に理由を考察する。

SiC(0001)表面上に最初に形成されたグラフェンシートは、SiC 基板の Si 原子との化学結合のため、グラフェンの電子構造を持たず、バッファ層と呼ばれる。このバッファ層形成中に表面がラフになる。その大きな要因が、グラフェン1層分の炭素原子数がほぼ SiC の3分子層分に相当することである。このため、グラフェンシートの形成中に基板が深くエッチングされる。ところが、バッファ層で覆われた SiC 表面は極めて安定なため、部分的にバッファ層が形成された表面では、エッチングは SiC が露出した領域に限定される。この不均一なエッチングが、表面がラフになる原因である。

表面がバッファ層で覆われた後、2層目のグラフェンシートは、古いバッファ層と SiC 基

板の界面に形成される。これにより、古いバッファ層は基板との結合を失い、理想的なグラフェンに近い電子構造を獲得する。これが、SiC 上のエピタキシャル1層グラフェンで、以後、繰り返し新しいバッファ層が界面に挿入されることにより、グラフェンが多層化する。

グラフェン成長に必要な C 原子は基板から供給される。界面でのグラフェン成長は、C 原子がグラフェンシートを容易に通過できないことと深く関わっている。同様に、バッファ層形成後に SiC 基板が平坦性を回復する理由も、グラフェンシートの非透過性にある。グラフェンが成長するためには、Si 原子が SiC 基板からグラフェン表面へ拡散し、表面から昇華する必要があるが、成長したグラフェン自身が、Si 原子が表面へ拡散する際の障壁となる。このため、グラフェン層数の成長時間依存性を求めると、グラフェンの成長速度が層数の増加に伴い急速に低下する(図1)。グラフェンによって Si 原子の基板から表面への拡散が妨げられると、バッファ層/SiC 基板の界面には、Si と C の吸着子と SiC 基板とで熱平衡に近い状態が実現される。これにより、エネルギーの低い規則的なステップ/テラス表面への変化が促進される。

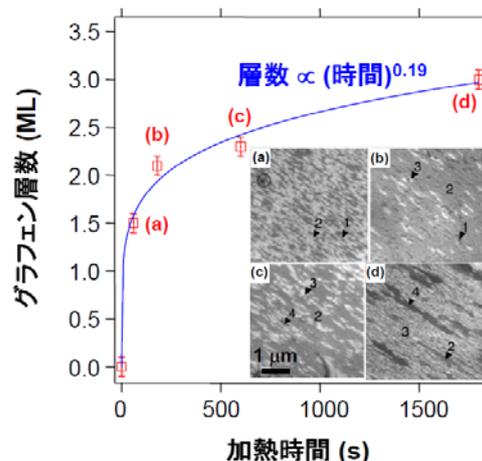


図1: グラフェン層数の加熱時間依存性。加熱温度は 1400°C。挿入図は(a)から(d)の時間での LEEM 像。

(2)高均一グラフェン成長

グラフェン成長過程の理解に基づき、加熱雰囲気と温度を制御することによって、図2に示されるような、 μm スケールで均一な1層から3層のエピタキシャルグラフェンを得た。以下に成長条件のポイントを述べる。

UHV 中のグラフェン成長では、グラフェン成長とともに表面平坦性が変化する。新しいグラフェンシートはステップに優先的に発生するため、表面のラフネスは層数分布の原因となる。

バッファ層成長後の表面ではステップ密度が高いため、1層グラフェンの成長核の密度も高くなる。このため2層グラフェンも頻繁に発生し、1層グラフェンを均一に成長させることが難しい。

ところが、図 1 に示されるように、1 層と 2 層のグラフェンの成長速度には大きな差があり、2 層グラフェン成長中に、基板の平坦性が大幅に回復する。従って、3 層グラフェンの発生率は低く、UHV 中では 2 層が比較的均一に形成される。

2 層成長後に更に加熱を続けると、基板が十分に平坦なため、新たなグラフェンはしばしば、偶然できたピットでのみ繰り返し発生する。このため、3 層グラフェンの成長にはピットの発生を抑制することが重要である。比較的低温での長時間の加熱によって、ピットの発生を抑えた結果、図 2 に示した 3 層グラフェンが得られた。

一方、均一な 1 層グラフェンの成長にはバッファ層形成時の表面のラフネスを低減する必要がある。この目的を達する最も単純な手法は成長温度を上昇することである。現実的には、Ar 雰囲気中で SiC 基板を加熱すると、Ar 原子が Si 原子の昇華をブロックするため、グラフェン成長温度を高めることができる。図 2 の高均一 1 層グラフェンは Ar 雰囲気中で成長したものである。

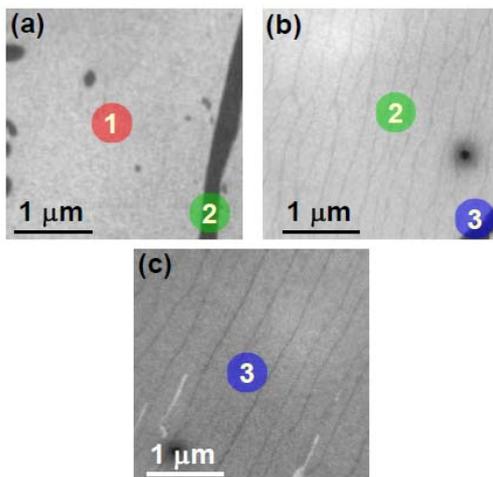


図 2: SiC 上に成長させた高均一な(a)1 層、(b)2 層、(c)3 層グラフェンの LEEM 像。(a)は Ar 雰囲気中、(b)と(c)は UHV 中で成長させた。

(3)グラフェンの電気伝導特性評価

Ar 雰囲気および UHV 中で成長させた高均一な 1 層および 2 層グラフェンを用いてトップゲート有するホールバー素子を作製し、それぞれの層数に特有な、顕著に異なる電気伝導特性を観測した。

①1 層グラフェン

図 3 は 1 層グラフェンから作製したホールバー素子の縦抵抗とホール抵抗の磁場依存性である。測定温度は 2 K である。磁場の絶対値が 8 T 以上で縦抵抗が消失しており、量子ホール状態が確認できる。量子ホール状態でのホール抵抗は 1 層グラフェンに対して予測される値に一致している。また、エピタキシャル 1 層グラフェンのキャリア移動度のキャリア密度依存性を、様々な温度で測定すると、移動度は、キャリア密度が低い

ほど、低温であるほど、高くなった。低温での値は、グラファイトから剥離して SiO₂ 上に転写したグラフェンと同等であり、エピタキシャルグラフェンの高い品質が示された。

また、エピタキシャルグラフェンでは、SiO₂ 上に転写した剥離グラフェンに比べ、グラフェン内のポテンシャル揺らぎに起因する電子/ホール溜り中のキャリア密度が低いことが示された。このため、エピタキシャル 1 層グラフェンは、到達できる最小のキャリア密度が低く、低キャリア密度の物理現象の探索に有望である。

ただし、エピタキシャルグラフェンの移動度は、剥離グラフェンに比べ、温度上昇に伴う減少幅が大きく、室温では大きな差が生じる。我々は、移動度の温度依存性の詳細な解析から、その原因がグラフェン/SiC 界面層に存在する低エネルギーのフォノンによるキャリア散乱であると推定した。室温での移動度の向上には界面構造の制御が不可欠である。

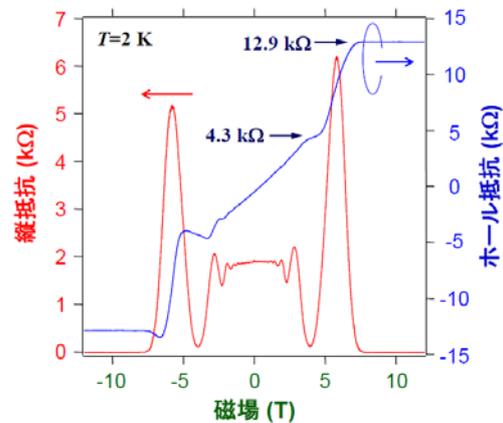


図 3: エピタキシャル 1 層グラフェンの量子ホール効果。

②2 層グラフェン

AB 型に積層した 2 層グラフェンは、シートに垂直に電界を印加することにより、値を制御してバンドギャップを形成できるため、応用上重要な材料である。光電子分光による実験から、エピタキシャル 2 層グラフェンには、基板の影響により、バンドギャップが現われることが報告されているが、それを電気伝導から検証することは実用上重要である。我々は、2 層グラフェンのトランジスタ特性を様々な温度で測定し、フェルミレベルがギャップ中にあるときの最小電気伝導度の温度依存性から、バンドギャップの値を 100 meV 程度と見積もった。

2 層グラフェンについても、ホール測定からキャリア移動度を評価した。キャリア移動度はキャリア密度の減少とともに減少し、1 層とは逆の傾向となった。1 層および 2 層のエピタキシャルグラフェンのキャリア密度と移動度の相関は、剥離グラフェンと同様で、1 層と 2 層グラフェンの電子構造の違いを反映したものである。ただし、これまで、エピタキシャル 2 層グラフェンには量子ホー

ル効果は観測できておらず、移動度も剥離グラフェンに比べ低い。我々は LEEM による解析から、エピタキシャル 2 層グラフェンが、AB 型と AC 型に積層した二種類のドメインが共存した多結晶状態にあることを示しており、積層ドメインの制御が高移動度化への課題である。

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 29 件)

- ① H. Hibino, S. Tanabe, S. Mizuno, and H. Kageshima, Growth and electronic transport properties of epitaxial graphene on SiC(0001), J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, 45, 2012, 154008-1-12, DOI:10.1088/0022-3727/45/15/154008
- ② S. Tanabe, Y. Sekine, H. Kageshima, and H. Hibino, Electrical characterization of bilayer graphene formed by hydrogen intercalation of monolayer graphene on SiC(0001), Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 51, 2012, 02BN02-1-3, DOI: 10.1143/JJAP.51.02BN02
- ③ F. Maeda and H. Hibino, Molecular beam epitaxial growth of graphene and ridge-structure networks of graphene, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, 44, 2011, 435305-1-9, DOI:10.1088/0022-3727/44/43/435305
- ④ H. Kageshima, H. Hibino, M. Nagase, Y. Sekine and H. Yamaguchi, Atomic structure of epitaxial graphene islands on SiC(0001) surfaces and their magnetoelectric effects, AIP Conf. Proc., 査読有, 1399, 2011, 755-756, DOI: 10.1063/1.3666596
- ⑤ S. Tanabe, Y. Sekine, H. Kageshima, M. Nagase, and H. Hibino, Carrier transport mechanism in graphene on SiC(0001), Phys. Rev. B, 査読有, 94, 2011, 115458-1-5, DOI: 10.1103/PhysRevB.84.115458
- ⑥ H. Kageshima, H. Hibino, H. Yamaguchi, and M. Nagase, Theoretical study on epitaxial graphene growth by Si sublimation from SiC(0001) surface, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 50, 2011, 95601-1-6, DOI: 10.1143/JJAP.50.095601
- ⑦ F. Maeda and H. Hibino, Study of graphene growth by gas-source molecular beam epitaxy using cracked ethanol: influence of gas flow rate on graphitic material deposition, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 50, 2011, 06GE12-1-4, DOI: 10.1143/JJAP.50.06GE12
- ⑧ H. Kageshima, H. Hibino, M. Nagase, Y. Sekine, and H. Yamaguchi, Theoretical study on magnetoelectric and thermoelectric properties for graphene devices, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 50, 2011, 070115-1-5, DOI: 10.1143/JJAP.50.070115
- ⑨ S. Tanabe, Y. Sekine, H. Kageshima, M. Nagase, and H. Hibino, Observation of bandgap in epitaxial bilayer graphene field effect transistor, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 50, 2011, 04DN04-1-4, DOI: 10.1143/JJAP.50.04DN04
- ⑩ S. Tanabe, Y. Sekine, H. Kageshima, M. Nagase, and H. Hibino, Electronic transport properties of top-gated monolayer and bilayer graphene devices on SiC, MRS Proc., 査読有, 1283, 2011, mrsf10-1283-b09-02, DOI: http://dx.doi.org/10.1557/opl.2011.675
- ⑪ F. Maeda and H. Hibino, I. Hirose, and Y. Watanabe, Evaluation of few-layer graphene grown by gas-source molecular beam epitaxy using cracked ethanol, e-J. Surf. Sci. Nanotech., 査読有, 9, 2011, 58-62, DOI: 10.1380/ejssnt.2011.58
- ⑫ H. Kageshima, H. Hibino, M. Nagase, Y. Sekine, and H. Yamaguchi, Atomic structure and physical properties of epitaxial graphene islands embedded in SiC(0001) surfaces, Appl. Phys. Exp., 査読有, 3, 2010, 115103-1-3, DOI: 10.1143/APEX.3.115103
- ⑬ H. Hibino, H. Kageshima, and M. Nagase, Epitaxial few-layer graphene: toward single crystal growth, J. Phys. D: Appl. Phys., 査読有, 43, 2010, 374005-1-14, DOI: 1088/0022-3727/43/37/374005
- ⑭ S. Tanabe, Y. Sekine, H. Kageshima, M. Nagase, and H. Hibino, Half-integer quantum Hall effect in gate-controlled epitaxial graphene devices, Appl. Phys. Exp., 査読有, 3, 2010, 075102-1-3, DOI: 10.1143/APEX.3.075102
- ⑮ M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, Contact conductance measurement of locally suspended graphene on SiC, Appl. Phys. Exp., 査読有, 3, 2010, 045101-1-3, DOI: 10.1143/APEX.3.045101
- ⑯ H. Kageshima, H. Hibino, and M. Nagase, Epitaxial graphene growth studied by low-energy electron microscopy and first-principles, Mater. Sci. Forum, 査読有, 645-648, 2011, 597-602, DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.645-648.597
- ⑰ S. Tanaka, K. Morita, and H. Hibino, Anisotropic layer-by-layer growth of graphene on vicinal SiC(0001) surfaces, Phys. Rev. B, 査読有, 81, 2011,

041406(R)-1-4,
DOI:10.1103/PhysRevB.81.041406

- ⑱ M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, Local conductance measurements of double-layer graphene on SiC substrate, *Nanotechnology*, 査読有, 20, 2009, 445704-1-6,
DOI:10.1088/0957-4484/20/44/445704

[学会発表] (計128件)

- ① H. Hibino, S. Tanabe, and H. Kageshima, Carrier transport in epitaxial graphene grown on SiC(0001), The Third International Symposium on the Surface and Technology of Epitaxial Graphene (STEG3) [invited], 2011/10/25, Saint Augustine, USA
- ② 田中悟, SiC 上グラフェンナノ構造の形成と電子物性、第 72 回応用物理学学術講演 (招待講演)、2011/8/29、山形
- ③ 日比野浩樹、エピタキシャルグラフェンの成長とLEEMによる評価、第72回応用物理学学術講演 (招待講演)、2011/8/29、山形
- ④ H. Hibino, S. Tanabe, and H. Kageshima, Growth and transport properties of monolayer and bilayer graphene on SiC, XX International Materials Research Congress (IMRC-XX) [invited], 2011/8/17, Cancun, Mexico
- ⑤ H. Hibino, S. Tanabe, and H. Kageshima, Growth, structure, and transport properties of epitaxial graphene on SiC, 8th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '11 (ALC'11) [invited], 2011.5.24, Seoul, South Korea
- ⑥ H. Hibino, S. Tanabe, and H. Kageshima, Growth and characterization of graphene on SiC, Graphene Workshop in Tsukuba [invited], 2011/1/17, Tsukuba, Japan
- ⑦ H. Kageshima, H. Hibino, M. Nagase, Y. Sekine, and H. Yamaguchi, Theoretical study on functions of graphene, International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling (ISGD 2010) [invited], 2010/10/29, Sendai, Japan
- ⑧ M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, Electrical contact properties of few-layer epitaxial on SiC substrate, International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling (ISGD 2010) [invited], 2010/10/28, Sendai, Japan
- ⑨ H. Hibino, S. Tanabe, H. Kageshima, and M. Nagase, Growth, structure, and transport properties of epitaxial graphene on SiC, International Symposium on Graphene Devices: Technology, Physics, and Modeling (ISGD 2010) [invited], 2010/10/27, Sendai, Japan
- ⑩ H. Hibino, Surface electron microscopy of epitaxial graphene, 2nd International Symposium on the Surface and Technology of Epitaxial Graphene (STEG2) [invited], 2010/9/14, Amelia Island, USA
- ⑪ H. Hibino, Dynamics of Si surface morphology/Epitaxial graphene growth on SiC surfaces, The 14th International Summer School on Crystal Growth (ISSCG-14) [invited], 2010/8/6, Dalian, China
- ⑫ H. Hibino, H. Kageshima, and M. Nagase, In-situ surface electron microscopy observations of growth and etching of epitaxial few-layer graphene on SiC, International Workshop on in situ characterization of near surface processes 2010 [invited], 2010/5/31, Eisenzerg, Austria
- ⑬ 影島博之、SiC 上エピタキシャルグラフェンの原子構造と電子状態、日本物理学会 2010 年春第 65 回年次大会 (招待講演)、2010/3/22、岡山
- ⑭ 日比野浩樹、SiC 上に成長したエピタキシャルグラフェンの構造と電子特性の表面電子顕微鏡による解析、日本物理学会 2010 年春第 65 回年次大会 (招待講演)、2010/3/21、岡山
- ⑮ 日比野浩樹、LEEM/PEEMによるグラフェンの構造と電子物性、2010 年春季・第 57 回応用物理学関係連合講演会 (招待講演)、2010/3/17、平塚
- ⑯ M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, Microscopic characterization of few-layer graphene on SiC using an integrated nanogap probe, 17th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM17) [invited], 2009/12/12, Izu, Japan
- ⑰ H. Hibino, H. Kageshima, and M. Nagase, Microscopic evaluations of structure and electronic properties of epitaxial graphene, 7th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (ALC'09) [invited], 2009/12/9, Hawaii, USA
- ⑱ M. Nagase, H. Hibino, H. Kageshima, and H. Yamaguchi, Microscopic characterization of few-layer graphene on SiC, International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology (ISANN2009) [invited], 2009/12/3, Hawaii, USA
- ⑲ H. Hibino, H. Kageshima, and M. Nagase, Structure and electronic properties of epitaxial graphene grown on SiC studied by surface electron microscopy, 22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2009)

- [invited], 2009/11/18, Sapporo, Japan
- ② H. Kageshima, H. Hibino, and M. Nagase, Study of Epitaxial Graphene Growth using LEEM and First-principles, 13th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM2009) [invited], 2009/10/11, Nurnberg, Germany

[図書] (計3件)

- ① 日比野浩樹、永瀬雅夫、他、エヌ・ティー・エス、グラフェンが拓く材料の新領域ー物性・作製法から実用化までー、2012、90-98
- ② 永瀬雅夫、他、シーエムシー出版、ナノカーボンの応用と実用化ーフラーレン・ナノチューブ・グラフェンを中心にー、2011、174-184
- ③ 日経エレクトロニクス編、日経 BP 社、グラフェン・イノベーション 電子デバイスを変えるナノカーボン材料革命、2011、146-153

[産業財産権]

○出願状況 (計5件)

名称: 電界効果トランジスタ、製造用基板、およびその製造方法
発明者: 前田文彦、日比野浩樹
権利者: 日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2012-079785
出願年月日: 平成 24 年 3 月 30 日
国内外の別: 国内

名称: グラファイト薄膜の製造方法
発明者: 前田文彦、日比野浩樹
権利者: 日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2012-025925
出願年月日: 平成 24 年 2 月 9 日
国内外の別: 国内

名称: グラフェンpn接合の製造方法
発明者: 田邊真一、日比野浩樹
権利者: 日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2012-019839
出願年月日: 平成 24 年 2 月 1 日
国内外の別: 国内

名称: 電界効果トランジスタ、製造用基板、およびその製造方法
発明者: 前田文彦、日比野浩樹
権利者: 日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2011-085106
出願年月日: 平成 23 年 4 月 7 日
国内外の別: 国内

名称: グラフェントランジスタおよびその製造方法
発明者: 田邊真一、日比野浩樹、永瀬雅夫、関根佳明
権利者: 日本電信電話株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2010-037004
出願年月日: 平成 22 年 2 月 23 日
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

- ① <http://www.brl.ntt.co.jp/people/hibino/>
- ② 日経産業新聞、「薄くて透明 炭素材料に新顔壁に張るパソコンなど期待」、2010 年 7 月 18 日
- ③ 日本経済産業新聞、「富士通やNTT、新型炭素材料技術、丸められる端末・携帯スパコンに道」、2010 年 7 月 17 日
- ④ 日刊工業新聞、「グラフェントランジスタ 次世代素子実用化競う」、2009 年 12 月 7 日
- ⑤ 日本経済新聞、「高機能の新炭素材料「グラフェン」」、2009 年 9 月 7 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日比野 浩樹 (HIBINO HIROKI)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・主幹研究員
研究者番号: 60393740

(2) 研究分担者

永瀬 雅夫 (NAGASE MASAO)
徳島大学・大学院シオテクノサイエンス研究部・教授
研究者番号: 20393762

影島 博之 (KAGESHIMA HIROYUKI)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・主任研究員
研究者番号: 70374072

蟹澤 聖 (KANISAWA KIYOSHI)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・主任研究員
研究者番号: 70393767

山口 徹 (YAMAGUCHI TORU)
日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・主任研究員
研究者番号: 30393763

田中 悟 (TANAKA SATORU)
九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号: 80281640

水野 清義 (MIZUNO SEIGI)
九州大学・総合理工学研究科(研究院)・教授
研究者番号: 60229705