

平成 30 年 8 月 22 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17679

研究課題名(和文) ナノカーボンスピントランジスタの実現と量子デバイスへの展開

研究課題名(英文) Realization of nanocarbon spintransistor and development of quantum dot devices

研究代表者

金井 康 (Kanai, Yasushi)

大阪大学・産業科学研究所・助教

研究者番号：30721310

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：微細化したグラフェンに大気下で大きな電流を流すことで加熱し、グラフェンを酸化させることで微細化し、容易にグラフェン量子ドットを作製することに成功した。極低温でクーロンブロックド領域において、トンネル結合が強い単一の量子ドットに見られる近藤効果によるものと思われるゼロバイアス異常を検出した。また、グラフェンの合成の研究に取り組み、グラフェンの核密度を局所的に制御し、グラフェンを任意の位置に合成することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We fabricated easily graphene quantum dot devices by current annealing of nano-fabricated CVD graphene. Zero-bias anomaly of fabricated graphene quantum dots due to Kondo effect was detected at a low temperature. We demonstrated position-controlled graphene synthesis by controlling the nuclear density of synthesized graphene in a CVD method.

研究分野：半導体

キーワード：グラフェン 量子ドット バイオセンサ

1. 研究開始当初の背景

半導体トランジスタは小型化が進み、高性能化の限界を迎えつつある。そこで、電荷を使わず省エネなスピントランジスタや量子計算といった、新しいデバイスや計算手法の実現が期待されている。最近では半導体量子ドット中においてスピン軌道相互作用の制御[1]やスピン軌道相互作用を利用した電子スピン共鳴[2]、クーパー対分離素子[3]など、スピンに関する研究が盛んに行われている。グラフェンはスピン状態を緩和に影響を与えるスピン軌道相互作用や核スピンの影響が小さいことからスピン状態を長時間保持することに優れた物質である。実際に室温でのスピン注入がグラフェンにおいて報告されている[3]。しかしながら、高品質なグラフェンの合成手法としては剥離法が行われているが、この手法では大面積化が難しく、将来的な応用には向いていない。そこで、本研究ではグラフェンの合成からグラフェン量子ドットの研究に取り組んだ。また、機能化したグラフェンを用いたバイオセンサ応用などにも取り組んだ。

2. 研究の目的

グラフェン量子ドットを容易に大量作製するための、新規なグラフェン量子ドット作製の作製し、その物理現象を調べることを目的とした。

3. 研究の方法

グラフェンの合成方法としては、大量合成するのに最も一般的な、通常の化学気相成長法以外に、図1示すようにレーザーを照射することによって、グラフェンを任意の位置に直接基板上に合成するという新しい手法に取り組んだ。化学気相成長法でのグラフェンの合成においては、合成されるグラフェンの核密度を局所的に制御することによって、銅箔上の任意の位置にグラフェンを合成することなども行った。また、グラフェン量子ドットを合成する手法としては予め細くエッチングした上で、大きな電流を流すことによってグラフェンを加熱して酸化することでさらに微細加工し、グラフェン量子ドット

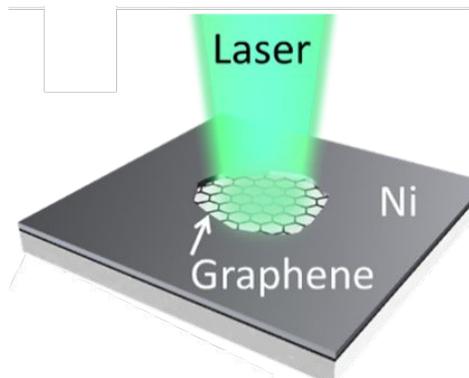


図1、レーザー照射によるグラフェン合成の模式図

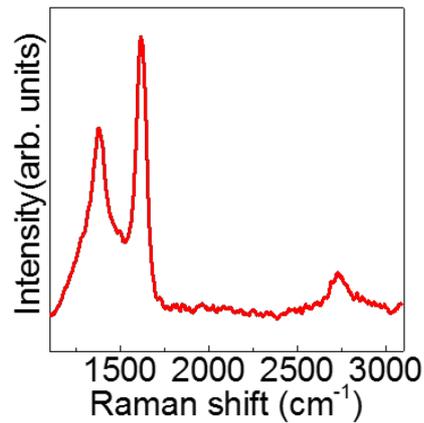


図2、レーザー照射後のラマンスペクトルを作製した。作製した量子ドットは希釈冷凍機を用いて局低温で測定を行った。

4. 研究成果

<レーザー照射によるグラフェンの合成>

ポリマー基板上にNiを蒸着した後にレーザーを照射したところ加熱されたことにより、Niに穴が生じた。その穴のラマンスペクトルを測定した結果を図2に示す。グラフェンの特徴である大きなDピーク、Gピーク、そして、小さく2Dのピークが見られる。これらのピークが生じていることからレーザー照射によって生じた穴にグラフェンが合成されていることがわかる。図3(a)は実際にレーザー照射によって作製したグラフェンFETの光学顕微鏡写真である。レーザー照射した箇所のNiが溶けて消えているのがわかる。図3(b)は50 mWと30 mWのレーザー強度で照射したことによって作製したグラフェンFETの伝達特性を示す。グラフェン特有の両極性伝導の特性が見えていることがわかる。また、50 mWの方が良いグラフェンが合成されている。このようにレーザー照射によってグラフェンを合成し、FETを作製可能であることを示した。また、フレキシブルな基板上に作ることができたことから、フレキシブルデバイスとしての応用も期待できる。

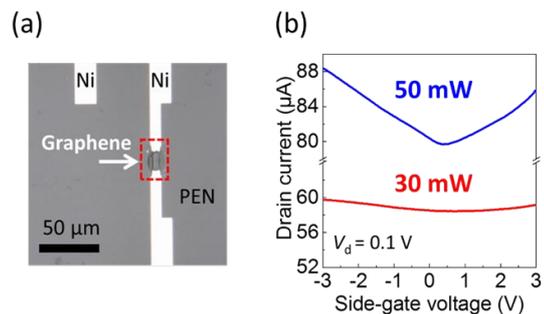


図3 (a)レーザー照射によって作製したグラフェンFETの光学顕微鏡写真 (b)グラフェンFETの伝達特性

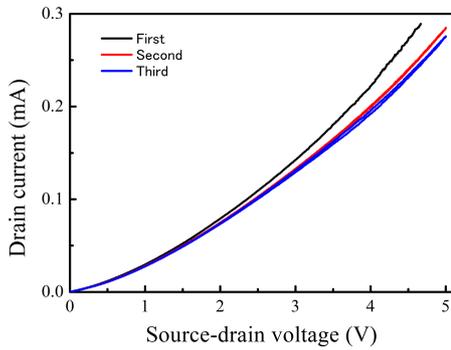


図4、室温大気下でのグラフェンの電流アニーリング

<電流アニーリングによるグラフェン量子ドットの作製と近藤効果の検出>

化学気相成長法によって銅箔上に合成したグラフェンを Si/SiO₂ 基板上に転写し、電子線リソグラフィとプラズマエッチングにより、グラフェンを 100 nm 程度の幅にエッチングした。図4にエッチングしたグラフェンに室温大気下で5 Vまでのソース・ドレイン電圧をかけたときの電流を表す。1回目と3回目を比較すると電流値が減少していることからグラフェンの抵抗が増加していることがわかる。これはグラフェンが電流によって加熱されたことで酸化して細くなったためである。これを何度も繰り返すことによってグラフェンの抵抗値を 100 kΩ程度まで増加させた。その後、極低温で測定を行った。図5に電流加熱によってエッチングしたグラフェンを 10 mK で測定したときのゲート電圧特定の結果を示す。ゲート電圧に対して流れる電流が振動していることから、これは量子ドット特有のクーロン振動であると考えられる。この結果からグラフェン量子ドットができていることがわかる。

図6は作製したグラフェン量子ドットの電気伝導度のソース・ドレイン電圧及びゲート電圧に対するカラーマップである。黒い点線は量子ドット特有のクーロンダイヤモンドを示す。ダイヤモンドの大きさから帯電エ

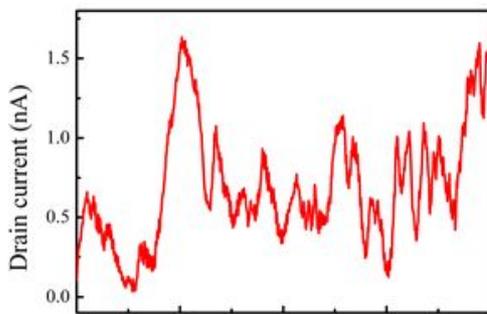


図5、電流アニールによって作製したグラフェン量子ドットのクーロン振動

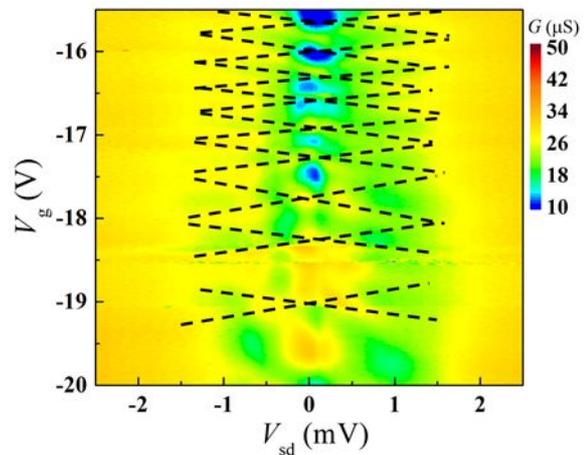


図6、グラフェン量子ドットのソース・ドレイン電圧 V_{sd} とゲート電圧 V_g に対するコンダクタンスカラープロット

ネルギーは 1.5 meV 程度である。一般的にはクーロンブロッケード領域ではコンダクタンスは低くなるが、ゲート電圧が -19.5 V 付近ではゼロバイアスのコンダクタンスが高くなっているのがわかる。図7は通常のクーロンブロッケード領域 ($V_g = -16$ V) とゼロバイアスのコンダクタンスが高くなっている領域 ($V_g = -19.56$ V) でのコンダクタンスである。ゼロバイアスコンダクタンスのピークが見られる。これはおそらく近藤効果によって引き起こされたものではないかと考えられる。近藤効果とはトンネル結合が強い単一の量子ドットに見られる現象で、リードの電子と量子ドット中の電子がスピン重項状態を形成する結果近藤共鳴順位が量子ドット中のフェルミエネルギーに生じる現象である。結果としてゼロコンダクタンスが上昇し、ピークになる。これら結果はトンネル結合が強いグラフェン量子ドットが形成されていることを示している。

以上から電流アニーリングによってグラ

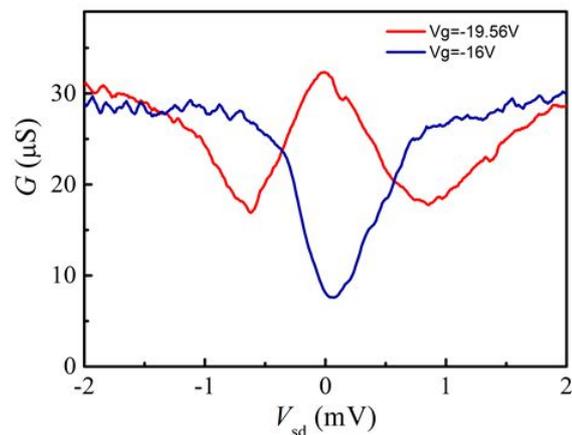


図7、クーロンブロッケード領域 ($V_g = -16$ V) とゼロバイアスのコンダクタンスが高くなっている領域 ($V_g = -19.56$ V) でのコンダクタンス

フェンの微細加工を行い、量子ドットが作製可能であることを示した。また、グラフェン量子ドットでは初めて近藤効果によるものと思われるゼロバイアスコンダクタンスピークを検出した。

<引用文献>

- [1] Y. Kanai et al., Nature Nanotech 6, 511(2011)
- [2] E. A. Laird, F. Pei and L. P. Kouwenhoven Nature Nanotech 8, 565 (2013)
- [3] Z. B. Tan et al., Phys. Rev. Lett. 114, 096602 (2015)
- [4] L. G. Herrmann et al., Phys. Rev. Lett. 104, 026801 (2010)

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 16 件)

Satoshi Okuda, Takashi Ikuta, Yasushi Kanai, Takao Ono, Shinpei Ogawa, Daisuke Fujisawa, Masaaki Shimatani, Koichi Inoue, Kenzo Maehashi and Kazuhiko Matsumoto, Acoustic carrier transportation induced by surface acoustic waves in graphene in solution, Applied Physics Express, 査読あり、9 巻、2016、045104-1 4、DOI: 0.7567/APEX.9.045104

□Yasushi Kanai, Takashi Ikuta, Takao Ono, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue and Kazuhiko Matsumoto, Detection Kondo effect in graphene quantum dots, 査読なし、2016、

□Yasushi Kanai, Yusuke Ishibashi, Takao Ono, Koichi Inoue, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi and Kazuhiko Matsumoto, Dynamical thermodiffusion model of graphene synthesis on polymer films by laser irradiation and application to strain sensors, Japanese Journal of Applied Physics 査読あり、56 巻、2017、075102-1-6 DOI: 10.7567/JJAP.56.075102

□Yasushi Kanai, Mohamed Almokhtar, Takao Ono, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Kouichi Inoue and Kazuhiko Matsumoto Zero-bias conductance anomaly in graphene dots, Japanese Journal of Applied Physics 査読あり、56 巻、2017、06GE07-1-3 DOI:10.7567/JJAP.56.06GE07

Okuda Satoshi, Ono Takao, Kanai Yasushi, Ikuta Takashi, Shimatani Masaaki, Ogawa Shinpei, Maehashi Kenzo, Inoue Koichi, Matsumoto Kazuhiko Graphene Surface Acoustic Wave Sensor for Simultaneous Detection of Charge and Mass ACS sensors, 査読あり、3 巻、2018、200 ~ 204

DOI:10.1021/acssensors.7b00851

他 10 件

〔学会発表〕(計 55 件)

金井 康, 生田 昂, 小野 堯生, 大野 恭秀, 前橋 兼三, 井上 恒一, 松本 和彦, 電流アニーリングによるグラフェン量子ドットの作製、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、2015 年

石橋 祐輔, 金井 康, 大野 恭秀, 前橋 兼三, 井上 恒一, 松本 和彦, ポリマーフィルム上のグラフェン直接合成とフレキシブルデバイス応用、第 76 回応用物理学会秋季学術講演会(招待講演) 2015 年

□Yasushi Kanai, Takashi Ikuta, Takao Ono, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto Detection Kondo effect in Graphene Quantum Dots, The 43rd International Symposium on Compound Semiconductor Week 2016 年

Yasushi Kanai, Takao Ono, Yasuhide Ohno, Kenzo Maehashi, Koichi Inoue, and Kazuhiko Matsumoto, Kondo Effect in Graphene Quantum Dots, 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2016 年

金井 康, アルモクタル モハメド、小野 堯生、大野 恭秀、前橋 兼三、井上 恒一、松本 和彦、グラフェン多重量子ドット 第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年

金井 康, 岡崎 凌、谷奥 正巳、生田 昂、小野 堯生、井上 恒一、松本 和彦 アルミナ保護膜を用いたグラフェンデバイス作製

第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 金井 康, モハメド アルモクタル, 小野 堯生, 井上 恒一, 松本 和彦

グラフェン量子ドットにおけるゼロバイアスアノマリーの観測

第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、2017 年 □金井 康, 大室 有紀, 小野 堯生, 井上 恒一, 上田 宏, 松本 和彦

グラフェン上でのオープンサンドイッチ免疫測定法による低分子ペプチドの検出 第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018 年

他 47 件

〔図書〕(計 0 件)

〔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://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/se/>

6．研究組織

(1)研究代表者

金井 康 (KANAI Yasushi)
大阪大学・産業科学研究所・助教
研究者番号：30721310