

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656234

研究課題名(和文) グラフェンを材料とした新規超低消費電力デバイス制御機構の創出

研究課題名(英文) Creation of ultra low-power-consumption device operation mechanism based on graphene

研究代表者

相馬 聡文(Souma, Satofumi)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20432560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：グラフェンを材料とし、歪み、光照射、交流電界、スピン等を素子制御機構として用いた新規素子を提案し、そのシミュレーションによる特性解析を行った。中でも代表的成果として、グラフェンに局所歪みを印加した事によって歪み/無歪み界面に発生する擬似的な磁場を電界効果トランジスタ(FET)の制御に応用した素子を提案し、その特性の理論的予測を行った。その結果、実験的に印加可能な10%以下の小さな歪み印加によって、バンドギャップが存在しないにも関わらず従来のFETを超える急峻なスイッチング性能が得られ、それによる低消費電力化が可能である事を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have proposed new functional device based on graphene, where mechanical strain, light irradiation, dynamical electric field, and spin are used as key operation mechanism. The performance of these proposed device are clarified through the numerical simulations. In particular, we have numerically studied the performance of locally strained graphene based field effect transistors, where the pseudo magnetic field is induced at the interface between the strained/unstrained regions. We have predicted that the on/off ratio in such device can reach more than six orders of magnitude at the room temperature. This is in spite of the absence of the bandgap in the strained channel region. Steeper sub-threshold slope below 60 mV/decade is also predicted, suggesting the possibility to reduce power consumption in CMOS circuit significantly.

研究分野：物性理論

キーワード：グラフェン 歪み FET スピントロニクス 量子ポンプ効果 光照射

1. 研究開始当初の背景

現在の高度情報通信技術を支えている半導体技術の急速な発展は、シリコン MOS トランジスタを定電界スケール則に従って年々微細化し集積度を上げる事により実現されてきた。しかし近年はその進展に陰りが見えている。その理由の一つは、微細化に伴って顕著になる種々のリーク電流やそれに伴う発熱である。従って、従来のシリコン MOS 電界効果型トランジスタ(MOSFET)の原理的限界を克服していけるような新しい試みによって革新的なデバイス制御を提案、確立していく事が一刻を争う課題となっている。そのような背景の中、近年、シリコン MOSFET の限界を打破する可能性のある次世代半導体材料としてグラフェンに大きな注目が集まっている。

グラフェンはシリコンなど他の材料と比べて強度、熱伝導性、電気伝導性などの点で優れた物性を有しているが、単層のグラフェンそれ自体ではバンドギャップを持たず、従って明確な電流のスイッチングが期待出来ないという欠点がある。この困難を打開する方法として、グラフェンをナノスケールの幅を持ったリボン状の形状：グラフェンナノリボン(Graphene Nano Ribbon, GNR)に加工する事でバンドギャップを生成する方法、二層からなるグラフェン(Bi-layer Graphene, BLG)に層方向に電界を印加する事によりバンドギャップを生成する方法などが提案されている。しかし、グラフェンはその柔軟性や外部環境に対する顕著な応答特性などから従来のシリコン FET では考えられなかった様々な応用が期待される。例えば、歪みの制御や光照射、交流電界、スピン自由度の利用などが挙げられるが、これらの外部環境の下でのグラフェンの素子応用に関する詳細な研究はこれまで殆ど行われていない。特に、光照射や振動電界といった動的環境でのデバイス制御に関しては殆ど未開拓な状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、グラフェンを材料とする、従来のシリコン MOS トランジスタでは不可能であったような多彩な物理特性に基づく新規超低消費電力素子の制御機構を創出する事である。具体的なアイデアは、歪み、光照射、スピン自由度、の3つを柱とし、これらを素子制御機構として利用する素子を提案し、その特性をシミュレーションによって解明する。得られた知見を統合してグラフェンナノエレクトロニクス素子の戦略的なアーキテクチャを創出する。それを広く日本の産業界に提供し、未来の情報通信技術社会の更なる発展に貢献する事を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、計算機シミュレーションにより、新規素子の提案とその特性予測を行う。数値計算の手法としては、非平衡グリーン関数法、強束縛近似法、強束縛分子動力学法などを用いている。

4. 研究成果

研究の目的で述べた歪み、光照射、スピンの3つのアイデアについて、下記(1)~(4)に具体的成果を述べる。(1)はスピン、(2)~(4)は歪み、(3)は光照射をそれぞれ利用した素子提案となっている。

(1) 動的な外場制御を用いた新規素子の一つとして、グラフェンナノリボンにおける純粋スピン流生成素子の提案を行った(発表論文1番)

近年、スピン流を用いた磁化反転などの新たな素子制御機構に注目が集まっている。その

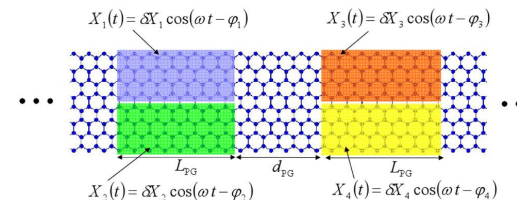


図1. ZGNR を用いた純粋スピン流生成素子の概念図

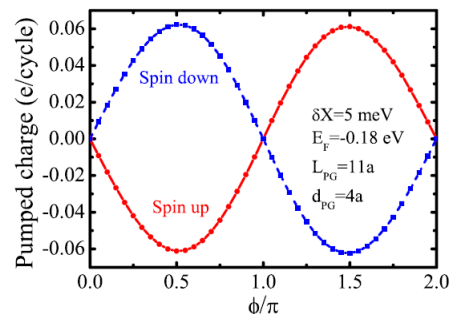


図2. スピン依存電流の量子ポンプ位相依存性。概念図における位相を $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$, $\varphi_3 = \varphi$, $\varphi_4 = -\varphi$ とし、 ϕ の値を変化させている。

ようなスピンを利用した新規素子の実現に向けては、如何にしてスピン偏極した電子の流れ、特に、電流を伴わない純粋なスピンの流れを作るかが重要な課題となっている。本研究では、ジグザグ端グラフェンナノリボン(ZGNR)におけるエッジスピン偏極を利用する事でそのようなスピン偏極電流を得る事を狙い、それを実現する新規素子の提案と理論計算を行った。具体的には、一般に位相の異なる二種類の振動電場を印加した場合に引き起こされる量子ポンプ効果に着目して、ZGNR に対して時間変化する電場を与えた場合の量子ポンプ効果に起因するスピン依存電気伝導特性を、スピン密度汎関数タイトバインディング法と非平衡グリーン関数法を用いる事により理論的に調べた。その結果、ZGNR の対向す

る端に位相の正負が逆の振動ゲート電圧を与える事により、電荷の流れを伴わないスピンの流れ（純粋スピン流）の生成が可能である事が明らかとなった(図1, 図2)。(発表論文1)

(2)歪みを利用した素子制御機構として、グラフェンに歪みを印加した事によって歪み/無歪み界面に発生する擬似的な磁場を電界効果トランジスタ(FET)に応用した場合の特性について研究を行った(発表論文2番)。

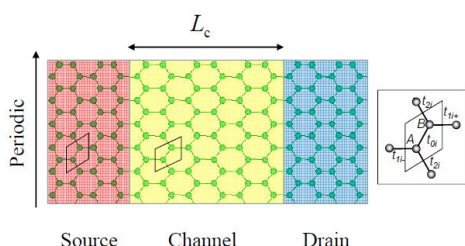


図3. 局所的に歪み印加したグラフェンにおける擬似磁場効果を利用したFET素子の概念図。

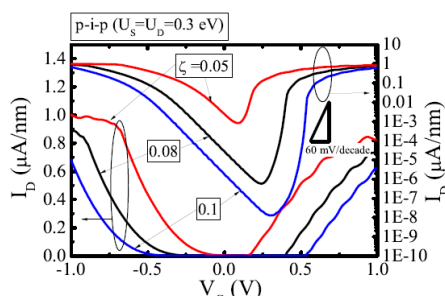


図4. 図1の構造において得られる電流のゲート電圧依存性の一例(ソース、ドレイン領域をp型にした場合)。

グラフェンのアームチェア方向にそって有限長のチャンネル部分にのみ局所的に引っ張り歪みを与え、そのチャンネル領域にゲート電圧を印加、その左右の無歪み領域はn型あるいはp型にドーピングされていると仮定した場合(図3)の電流のゲート電圧依存性を、強束縛近似法とグリーン関数法を用いて調べた(図4)。結果、10%以下の小さな歪み印加によって、界面での擬似磁場に起因するディラック点のずれにより、バンドギャップが存在しないにも関わらず4桁を超える電流のオン/オフ比が実現される事、スイッチング性能の指標の一つであるサブスレッシュホールド係数が、通常のFETの場合室温で60mV/decadeであるのに対し、提案構造の場合、20mV/decade程度の値が実現され、通常のFETと比較して優れたスイッチング性能を示す事も明らかとなった(図4)。(発表論文2)

(3) グラフェンに局所的に円偏光を照射する事による電流のスイッチング素子の提案を行

った(学会発表8番)。

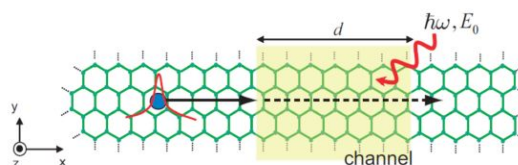
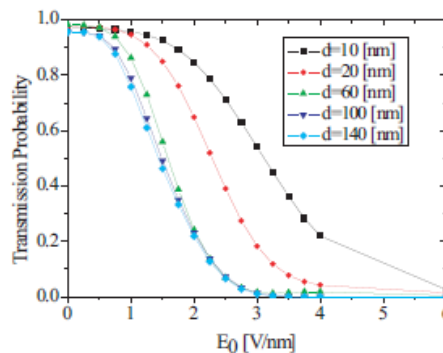


図5. グラフェンに局所的に光照射を行う事によるスイッチング素子の概念図。



(a) $\omega_0 = 6.28$ [rad/fs]

図6. 図4の素子構造において得られる、透過率の光電界強度依存性。光照射を行う領域の長さ(チャンネル長)を変えてプロットしている。

グラフェンのバンド構造においては、通常、伝導帯と価電子帯がディラック点において一点で接している(バンドギャップが存在しない)が、ここに円偏光を照射する事により、伝導帯と価電子帯の波動関数の混成が起こり、ディラック点におけるバンドの縮退が解け、動的バンド構造として見た時にバンドギャップが開いた効果が得られる事が先行研究によって示唆されていた。本研究では、この機構を素子制御に応用する事をもくろみ、グラフェンの有限領域(チャンネル部分)に局所的に光照射を行った場合(図5)の電子の透過率を、時間依存シュレディンガー方程式に基づく波束伝播法により計算した。その結果、光電界強度の制御により、動的バンドギャップの発生に対応した透過率のスイッチングが可能である事、光照射領域が短い場合、バンドギャップの効果が十分ではない事により、顕著なトンネル電流が発生する事などを明らかにした(図6)。

(4) 直線偏光を印加したグラフェンにおける光誘起電気伝導度の偏光方向依存性を利用した、歪み検知機構の提案(発表論文6番)

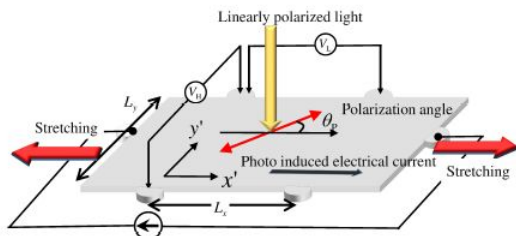


図7. 歪みグラフェンにおける光誘起伝導度測定概念図。

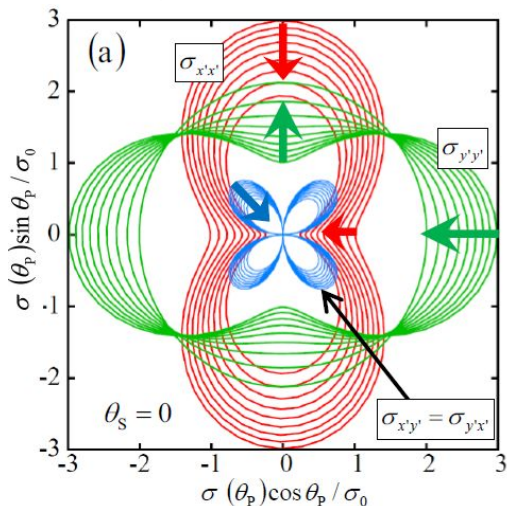


図8. 図7の素子構造において得られる光誘起電気伝導度の直線偏光方向依存性と、その歪み依存性。円形からのずれが異方性を意味し、矢印は、歪みゼロから徐々に歪みを印加した場合の変化を示す。

研究成果2において、歪みグラフェンをチャネルとするFETが優れたスイッチング性能を持ちうる事を明らかにしてきたが、その実験的実現のためには、印加された歪みの大きさとその方向を効率的に検出する方法の確立が重要である。本研究では、グラフェンに直線偏光を照射した時の光誘起伝導度(図7)の測定を行う事により、その偏光方向依存性から、グラフェンに歪み印加した際の歪みの方向と歪みの大きさを同時に検出出来る事を、強束縛近似法に基づく数値計算により理論的に明らかにした。具体的には、偏光方向を歪み印加方向と並行にした場合と垂直にした場合での光誘起電気伝導度の比を、電流方向を歪み方向及びそれに垂直な方向の二通りについて測定する事でこれが可能になる事を示した。

5. 主な発表論文等

{雑誌論文}(計 13 件)

1. Pure spin current induced by adiabatic quantum pumping in zigzag-edged

graphene nanoribbons, S. Souma and M. Ogawa, Appl. Phys. Lett., **104**, 183103, 4 pages (2014) (査読あり)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4873580>

2. Simulation-based design of a strained graphene field effect transistor incorporating the pseudo magnetic field effect, S. Souma, M. Ueyama, and M. Ogawa, Appl. Phys. Lett., **104**, 213505, 4 pages (2014) (査読あり)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4880579>

3. Numerical simulation of current noise caused by potential fluctuation in nanowire FET with an oxide trap, Y. Furubayashi, M. Ogawa, and S. Souma, Proc. of International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), pp. 201-204 (2014) (査読あり) doi: 10.1109/SISPAD.2014.6931598

4. Intermediate band electronic wave function localization effect on the efficiency limits of InAs/GaAs quantum dot solar cell, A. Mehdipour, M. Ogawa, and S. Souma, Memoirs of the Graduate School of Engineering and System Informatics Kobe University, No. 6, pp. 18-24 (2014). (査読あり) doi:10.5047/gseku.e.2014.003

5. Proposal of simplified model for absorption coefficients in quantum dot array based intermediate band solar cell structure, A. Mehdipour, K. Sasaoka, M. Ogawa, and S. Souma, IEICE Electronics Express, No. 17 pp. 1-11, (2014). (査読あり)
<http://doi.org/10.1587/elex.11.20140548>

6. Strain-induced modulation of anisotropic photoconductivity in graphene, A. Mehdipour, K. Sasaoka, M. Ogawa, and S. Souma, Jpn. J. Appl. Phys., **53**, 115103, 7 pages (2014). (査読あり)
 doi: 10.7567/JJAP.53.115103

7. 強結合分子動力学法を用いたグラフェンナノリボンの機械的変形と電子状態に関するシミュレーション, 相馬聡文*, 貝野昭造, 小川真人, シリコンテクノロジー, No. 162, pp. 30-35 (2013). (査読なし) doi 無し(冊子体のみ)

8. Effect of lateral strain on gate induced control of electrical conduction in single layer graphene device, S. Souma, Y.

- Ohmi, and M. Ogawa, J. Comput. Electron., **12**, 170, 5 pages (2013) (査読あり) doi: 10.1007/s10825-013-0451-1
9. Analysis of tunneling characteristics through hetero interface of InAs/Si nanowire tunneling field effect transistors, Y. Miyoshi, M. Ogawa, S. Souma, H. Nakamura, Proc. of Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Processes and Devices 2012 (SISPAD), 368, 4 pages (2012). (査読あり)
<http://www.sispad.org/sispad/browse-proceedings/sispad-2012.html>
 10. Numerical simulation of transport properties in InAs/Si heterojunction nanowire tunneling field effect transistors, Y. Miyoshi, M. Ogawa, S. Souma, H. Nakamura, Proc. of 2012 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), 108, 2 pages (2012). (査読あり)
doi: 10.1109/IMFEDK.2012.6218605
 11. Strain induced modulation of switching behavior in carbon nanotube tunneling field effect transistors, T. Nakano, M. Ogawa, S. Souma, Proc. of 2012 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (IMFEDK), 138, 2 pages (2012). (査読あり)
doi:10.1109/IMFEDK.2012.6218620
 12. Influence of geometrical deformation and electric field on transport characteristics through carbon nanotubes, M. Mouri, M. Ogawa, and S. Souma, J. Appl. Phys. **114**, 114328, 5 pages (2012). (査読あり)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4768449>
 13. Tight-binding molecular dynamics study of mechanical and electronic properties in twisted graphene nanoribbons, S. Souma, S. Kaino, and M. Ogawa, Proc. of Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Processes and Devices 2012, 133, 4 pages (2012). (査読あり)
<http://www.sispad.org/sispad/browse-proceedings/sispad-2012.html>
- [学会発表] (計 33 件)
1. “ディラック電子をキャリアとするFETの性能予測シミュレーション”, 田中 未来, 笹岡 健二, 小川 真人, 相馬 聡文, 第75回応用物理学会秋季学術講演会(北海道大学, 2014年9月)
 2. “擬似磁場効果を利用した歪みグラフェンFETの準解析的モデル提案”, 上山 真之, 笹岡 健二, 小川 真人, 相馬 聡文, 第75回応用物理学会秋季学術講演会(北海道大学, 2014年9月)
 3. “歪み誘起擬似磁場を利用したグラフェンFETのスイッチング機構における構造乱れの影響”, 堤 賢一郎, 笹岡 健二, 小川 真人, 相馬 聡文, 第75回応用物理学会秋季学術講演会(北海道大学, 2014年9月)
 4. ”サブ60mV/decadeスイッチングを実現する異なるFETゲート制御機構のシミュレーションによる比較解析”, 石田 智也, 福嶋 賢介, 笹岡 健二, 小川 真人, 相馬 聡文, 第75回応用物理学会秋季学術講演会(北海道大学, 2014年9月)
 5. “Numerical simulation of current noise caused by potential fluctuation in nanowire FET with an oxide trap”, Y. Furubayashi, M. Ogawa, and S. Souma, International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD) 2014 (Yokoyama, 2014年9月)
 6. “Photoconductivity-based strain sensing in graphene”, A. Mehdipour, K.Sasaoka, M. Ogawa, S. Souma, International Symposium on Recent Progress of Photonic Devices and Material (Kobe, 2014年11月)
 7. "Effect of Axial Strain on Switching Behavior of Carbon Nanotube Tunneling Field Effect Transistors", T. Nakano, H. Nagai, M. Ogawa, and S. Souma, International Workshop on Computational Electronics 2013 (Nara, Japan, June 6, 2013).
 8. “Quantum Dynamical Simulation of Photo-Induced Graphene Switch”, T. Akiyama, M. Ogawa, and S. Souma, International Workshop on Computational Electronics 2013 (Nara, Japan, June 6, 2013).
 9. “グラフェンの熱物性における面内歪みの影響”, 船谷 宜嗣, 山本 貴博, 小川 真人, 相馬 聡文, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (Tokushima, Japan, Sep. 26, 2013).
 10. “グラフェンにおける歪みの空間的变化を利用した FET の性能に関する研究”, 上山 真之, 小川 真人, 相馬 聡

- 文, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 (Kyoto, Japan, Sep. 16, 2013).
11. “歪み印加を利用したグラフェンの電気伝導制御に関する数値シミュレーション”, 相馬 聡文, 上山 真之, 小川 真人, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会 (Kyoto, Japan, Sep. 18, 2013)
12. “Effect of lateral strain on electronic transport in graphene: interplay between band gap formation and pseudo magnetic field effect”, S. Souma, M. Ueyama, and M. Ogawa, 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (Tokyo, Japan, Sep 10, 2013).
13. “Effect of in-plane strain on thermal properties of graphene”, T. Funatani, T. Yamamoto, K. Sasaoka, M. Ogawa, and S. Souma, 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (Tokyo, Japan, Sep 12, 2013).
14. “Wave-packet dynamics study of electronic transport in graphene irradiated by circularly polarized light”, T. Akiyama, K. Sasaoka, M. Ogawa, and S. Souma, 5th International Conference on Recent Progress in Graphene Research (Tokyo, Japan, Sep 12, 2013).
15. “Effect of Lateral Strain on the Performance of Single Layer Graphene Field Effect Transistors”, Satofumi Souma, Yusuke Ohmi, Matsuto Ogawa, International Conference on Superlattices, Nanostructures, and Nanodevices, (Dresden, Germany, July 24, 2012)
16. “A Theoretical Study of an Influence of a Time Dependent External Field on Electronic Transport in Graphene”, Takashi Akiyama, Matsuto Ogawa, and Satofumi Souma, 第 73 回応用物理学会学術講演会、(Ehime, Japan, September 12, 2012)
17. “半導体ナノワイヤ構造におけるポテンシャルゆらぎに起因する電流雑音の数値解析”, 古林優希, 小川真人, 相馬 聡文, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (Yokohama, Japan, September 20, 2012)
18. “レーザー光を照射したグラフェンの電子状態及び電子透過特性に関する理論的研究”, 秋山剛志, 小川真人, 相馬 聡文, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会 (Atsugi, Japan, , March 27, 2013)
19. “グラフェンの機械的変形が熱物性に与える影響”, 船谷宜嗣, 山本貴博, 小川真人, 相馬 聡文, 日本物理学会第 68 回年次大会、(Hiroshima, Japan, March 26, 2013)
20. “半導体ナノワイヤ構造におけるポテンシャルゆらぎに起因する電流雑音の数値解析 II”, 古林優希, 小川真人, 相馬 聡文, 日本物理学会第 68 回年次大会 (Hiroshima, Japan, March 28, 2013)
21. “歪み印加グラフェンの電気伝導に関する数値シミュレーション”, 相馬 聡文, 上山真之, 西村英之, 秋山隆志, 小川真人, 日本物理学会第 68 回年次大会、(Hiroshima, Japan, March 28, 2013)
- 〔図書〕(計 1 件)
1. Atomistic tight-binding simulation of spin-orbit coupled semiconductor device, S. Souma*, Chapter 5 in Spintronics in Nanoscale Devices, edited by E. R. Hedin and Y. S. Joe (Pan Stanford Publishing, ISBN: 9789814411691), 101 (2013)
- 〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
取得状況 (計 0 件)
- 〔その他〕 無し
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
相馬 聡文 (Satofumi Souma)
神戸大学・大学院工学研究科 准教授
研究者番号 : 20432560
- (2) 研究分担者 無し
(3) 連携研究者 無し