

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13496

研究課題名(和文) グラフェンにおける電流注入型ランダウ準位発光の直接観測

研究課題名(英文) Direct observation of current-injected Landau-level emission in graphene

研究代表者

生嶋 健司 (Ikushima, Kenji)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20334302

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、これまで観測例の無い、電流注入型のグラフェン・ランダウ準位発光を検出することである。そこで、まず、超高感度な赤外フォトトランジスタを強磁場で動作させる最適条件を求めた。次に、金属アンテナ付の単層グラフェン素子を作製し、輻射シールドされたテラヘルツ集光系で測定した。検出器の感度波長帯から、単層グラフェンの $N=0$ と $N=+1$ のランダウ準位間隔に相当する波長のテラヘルツ光が観測された。また、フェルミ準位が $N=0$ と $N=+1$ ランダウ準位の間に位置するときに発光効率が增大する傾向が観測された。これらの結果は、 $N=+1 \rightarrow N=0$ のランダウ準位光学遷移による発光であることを強く示唆する。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this work is to observe current-induced Landau-level (LL) emission in graphene. First, we studied photoresponse of ultra-highly sensitive infrared phototransistor based on multi-quantum wells under magnetic field, and determined proper operation conditions of the infrared phototransistor. Next, we fabricated a monolayer graphene with a bow-tie antenna and set up a THz optical system in a cooled radiation shield box. We confirm the current-induced THz emission from graphene with a wavelength corresponding to energy spacing between the $N=0$ and $N=+1$ LL in monolayer graphene. Furthermore, we observe the enhancement of emissivity when the Fermi level is positioned between $N=0$ and $N=+1$ LL. These results strongly indicate that the $N=+1 \rightarrow N=0$ LL radiative transition in monolayer graphene.

研究分野：物性物理学

キーワード：グラフェン 量子ホール効果

1. 研究開始当初の背景

グラフェンはその特異なバンド構造ゆえに、従来の半導体 2 次元電子系 (2DES) とは異なる強磁場中量子輸送現象が観測されている。特に、磁場下での単層グラフェンはディラック粒子のランダウ準位を形成し、不等間隔でかつ磁場に比例しないランダウ分裂が生じる。ランダウ指数 $N = 0$ のゼロエネルギー・ランダウ準位 (ν_{LL}) では、磁場によるサブ格子の反転対称性の破れ、カイラルスピネッジ状態または量子ホール絶縁体など、ディラック粒子特有の興味深い問題が示唆されているが (引用文献) 一方で、現実のグラフェン素子は金属コンタクトからランダウ準位への電子・正孔注入過程が量子ホール効果特性を決めるという理論的指摘もある (引用文献)。さらに、ランダウ準位の不等間隔な性質を利用すると、準連続的な $N \neq 0$ 状態から $N = 0$ 状態へのサイクロトロン放射が増強されるため、ランダウ準位レーザーの可能性が示唆されている (引用文献)。

ランダウ準位 ν_{LL} への電子注入過程を理解し、さらにテラヘルツ (THz) 光源としての可能性を探るためには、電気抵抗測定に加えて非平衡電子の生成・緩和過程を調べる必要がある。その出発点は、まずランダウ準位間発光を直接観測することだろう。標準的な GaAs 系 2DES における量子ホール系では、量子ドット等を利用した超高感度な THz 検出器 (波長 100 μm 程度) により、ランダウ準位発光の研究が可能であった。その結果、(i) 金属 - 2DES 界面における非平衡電子注入・抽出過程、(ii) 量子ホール効果崩壊現象における熱力学的双安定性に伴う自己組織化パターン形成、(iii) エッジ状態の可視化と反転分布の可能性など、通常の電気抵抗測定では把握できなかった様々な非平衡電子ダイナミクスが明らかにされてきた (引用文献)。しかしながら、グラフェンではサイクロトロン共鳴分光は報告されているものの、対応する検出器 (波長 10-15 μm 程度) が未開拓なため、グラフェン・ランダウ準位発光 (サイクロトロン発光) はまだ観測されていない。本研究では、下記の二つの方法でグラフェン・ランダウ準位発光の直接観測を行い、ディラック粒子型分散における非平衡電子ダイナミクスの解明とテラヘルツ増幅の可能性を追求する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、グラフェンにおける電流注入型のランダウ準位発光 (サイクロトロン発光: 波長 10 - 15 μm 、周波数 20 THz 程度) を検出し、ディラック・ランダウ準位における非平衡電子注入および光学遷移過程を明らかにすることである。

3. 研究の方法

次の二つの方法でランダウ準位発光を検

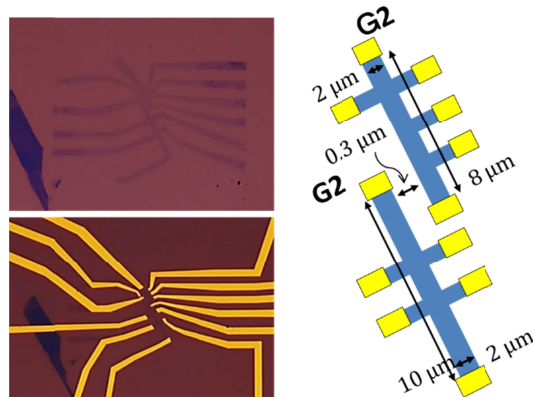


図1 隣接した単層グラフェン素子。

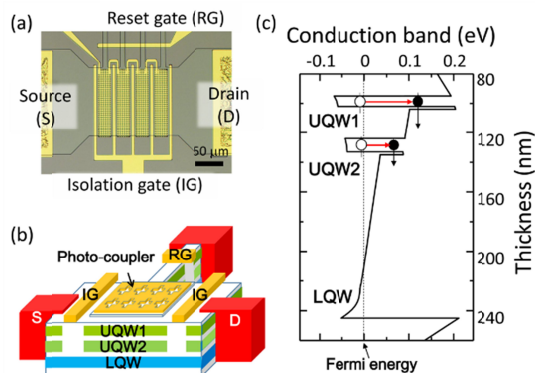


図2 多重量子井戸を利用した電荷敏感型赤外フォトトランジスタ (CSIP)。

出する。方法 (1): 同一基板上にサブミクロンスケールで隣接したグラフェンホール素子を作製し、一方を測定対象 (発光素子)、もう一方を検出素子とする。方法 (2): 超高感度な赤外フォトトランジスタ (CSIP) を強磁場下で動作させ、金属アンテナ付グラフェン素子と CSIP をテラヘルツ光学系に組み込み、ランダウ準位発光を検出する。

方法 (1) の場合、グラフェン素子構造の工夫により、発光箇所の特長、および静電結合を通じたグラフェン端状態の測定などが可能となるだろう。一方、方法 (2) の場合、電流注入型発光の分光や顕微画像化の拡張性がある。

4. 研究成果

本研究期間において、上記二つの方法を試みた。方法 (1) についてはまだ進捗中であるが、方法 (2) において単層グラフェンからのランダウ準位発光を示唆する結果が得られた。

まず、方法 (1) の結果を報告する。図1に示すような隣接した SiO₂/Si 上単層グラフェン素子の作製に成功し、両ホール素子とも明確な量子ホール効果が観測されている。隣接したホール素子間には n-Si 基板を介して静電結合があるため、一方のホール素子間のポテンシャル変調が片方のグラフェン素子に敏感に反応する。現在、隣接グラフェン間の静電結合評価と電子状態検知の可能性、およ

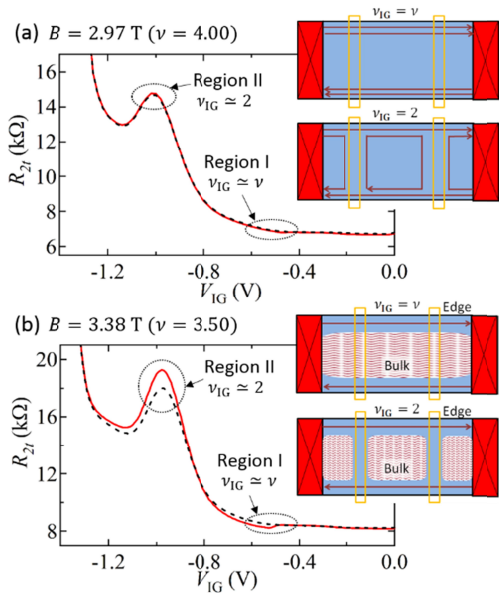


図3 強磁場下でのCSIPの光応答。赤実線が光アクティブ状態、黒破線はノンアクティブ状態。

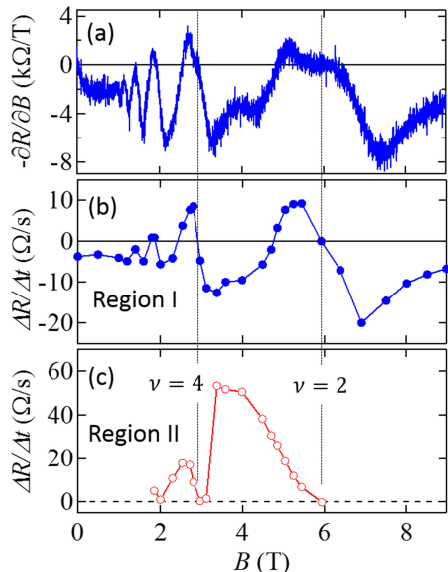


図4 CSIP感度の磁場依存性。

びテラヘルツ近接場の検出を試みている。

次に方法(2)について述べる。まず、多重量子井戸を利用した超高感度な電荷敏感型赤外フォトトランジスタ(CSIP)を強磁場中で動作させる必要がある。図2に示すように、CSIPは上側井戸(UQW)と下側井戸(LQW)で構成され、UQWは光吸収浮遊ゲートとして作用する。UQWのサブバンド間遷移により光吸収された電子は薄い障壁をトンネリングし、LQWへと移動する。その結果、浮遊ゲートであるUQWは正に帯電し、LQWの伝導度もしくは抵抗変化として検出される。強磁場中では、LQWが量子ホール効果を示すため、単純な光応答ではなくなる。図3にその典型例を示す。ランダウ占有率 $\nu = 4.0$ および $\nu = 3.5$ を比較すると、量子ホール遷移領域において光応答が検出される。さらに、ゲート依存性において、LQWにポテンシャル

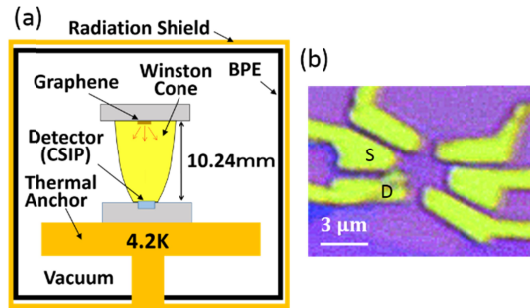


図5 THz発光測定セットアップ。

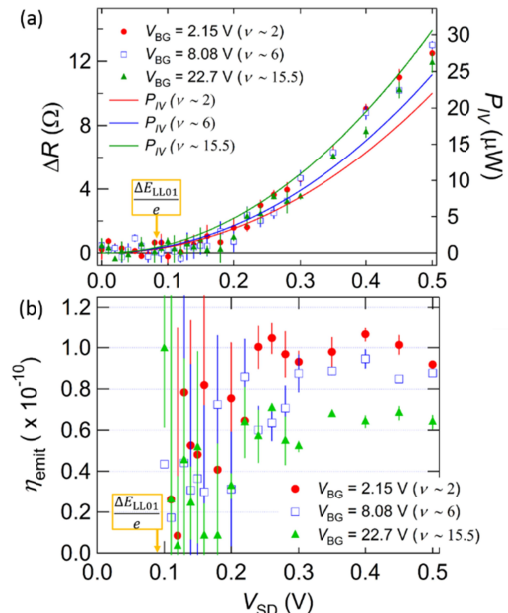


図6 グラフェンからのランダウ準位発光。

障壁がない領域(Region I)とLQWにポテンシャル障壁がある領域(Region II:ゲート下で占有率は整数)の異なる2種類の光応答が存在することが判明した。特に、Region IIにおいては、量子ホール電子系における端状態とバルク状態間の散乱が寄与していると考えられ、ゼロ磁場とは異質の光応答機構である。結局、各光応答に対する感度の磁場依存性の結果(図4)から、強磁場中でのCSIP動作条件が求まった。

本研究で用いたCSIPの感度波長は $14.5 \mu\text{m}$ である。単層グラフェンの $N = +1 \leftrightarrow N = 0$ LL間隔 ΔE_{LL01} は、磁場 4.43 T において検出器の感度波長と一致する。冷却された銅製の輻射シールドボックス内において、ウィンストンコーンを用いた集光セットアップを用いることにより(図5)、グラフェンからの極微弱なテラヘルツ発光が観測された(図6)。ゼロ磁場や磁場 6.9 T では発光が大きく減少することが確かめられており、予想した単層グラフェンのLL間隔相当の発光スペクトルでありことが確認されている。さらに、ソース・ドレイン電圧が対応するエネルギー差 $\Delta E_{LL01}/e$ より大きく、かつ、フェルミ準位が $N = 0$ LLと $N = +1$ LLの間に位置するとき、発光効率が増大する傾向が観測されてい

る。これらの結果から、 $N = +1 \rightarrow N = 0$ のランダウ準位間光学遷移であることはほぼ間違いないだろう。

まとめると、量子井戸ベースの超高感度赤外フォトトランジスタを利用して、単層グラフェンからの電流注入型テラヘルツ発光を観測した。スペクトルおよび発光条件から、当初目標としていたランダウ準位発光が観測されたと思われる。今後、グラフェン素子のクオリティ向上とアンテナ構造の最適化を行うことにより発光の効率化を目指し、金属グラフェン間の電子注入・抽出過程に対して新たな知見を見出すとともに、THz増幅の可能性を追及する。

<引用文献>

- A. F. Young *et al.*, Nature **505**, 528 (2014).
T. Kramer *et al.*, PRB **81**, 081410(R) (2010).
T. Morimoto *et al.*, PRB **78**, 073406 (2008).
K. Ikushima and S. Komiyama, C. R. Physique **11** 444 (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4件)

H. Yamada, K. Ikushima, and K. Watanabe
“Erratum: Magnetic hysteresis and magnetic flux patterns”
Japanese Journal of Applied Physics,
査読有, Vol. 55, 2016, 019201(1),
DOI: 10.7567/JJAP.55.019201

[学会発表](計7件)

中川 大輔、橘田 脩平、生嶋 健司、金 鮮美、パトラシン ミハイル、梶原 優介、小宮山 進
「電荷敏感型赤外光検出器とグラフェン研究への応用」
日本物理学会、2016年9月13日、金沢大学
(石川県金沢市)

K. Ikushima, S. Okano, A. Ito, and T. Kobayashi
“Converting Electrons to Photons in Highly Imbalanced Spin-Polarized Edge States --- On-Chip Terahertz Photon Counting Studies ---”
EP2DS-21, Jul. 28, 2015, Sendai International Center (Sendai-shi, Miyagi)

K. Ikushima
“Terahertz Photon-Counting Measurements for Landau-Level Physics in Two Dimensional Electron Systems”
TeraNano VI, July. 2, 2015, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (Kunigami-gun, Okinawa)

D. Nakagawa, S. Kitta, K. Akiba, K.

Ikushima, S. Kim, M. Patrashin, Y. Kajihara, and S. Komiyama

TeraNano VI, July. 1, 2015, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (Kunigami-gun, Okinawa)

[その他]

研究室ホームページ

http://web.tuat.ac.jp/~ikushima/index_j.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

生嶋 健司 (IKUSHIMA, Kenji)
東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：20334302

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

小宮山 進 (KOMIYAMA Susumu)
東京大学・大学院総合文化研究科・名誉教授
研究者番号：00153677

金 鮮美 (KIM Sonmi)

東京大学・生産技術研究所・特任助教
研究者番号：90585697

竇迫 巖 (HOSAKO Iwao)

国立研究開発法人情報通信研究機構・
未来 ICT 研究所・研究所長
研究者番号：00359069

パトラシン ミハイル (Patrashin Mikhail)

国立研究開発法人情報通信研究機構・
未来 ICT 研究所・研究員
研究者番号：90794595

(4)研究協力者

小林 貴司 (KOBAYASHI Takashi)
山並 弘輝 (YAMANAMI Hiroki)
中川 大輔 (NAKAGAWA Daisuke)
西村 明 (NISHIMURA Akira)
滝沢 和宏 (TAKIZAWA Kazuhiro)