

科学研究費助成事業（特別推進研究） 公表用資料  
〔研究進捗評価用〕

平成23年度採択分

平成26年5月30日現在

研究課題名（和文） **グラフェン・テラヘルツレーザーの創出**  
研究課題名（英文） **Creation of Graphene Terahertz Lasers**



研究代表者  
**尾辻 泰一** (OTSUJI TAIICHI)  
東北大学・電気通信研究所・教授

研究の概要：本研究では、炭素原子の単層シート：グラフェンの特異な光電子物性を積極的に活用し、申請者らが発見した新たな反転分布形成機構を導入することにより、従来成し得なかった電流注入型の室温テラヘルツ（THz）帯レーザーを実現しようとするものである。THz帯レーザー共振器を構成して光ポンピングによる室温レーザー発振の実現からスタートし、グラフェンの二次元電子系に励起されるプラズモンを利得増強手段として導入する申請者らオリジナルの素子構造・動作機構を用いて電流注入型 THz レーザーを試作し、室温動作の実証を果たす。

研究分野：光学、数物系科学  
科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器  
キーワード：レーザー、グラフェン、テラヘルツ、電子デバイス、量子デバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) 将来の情報通信技術の飛躍的な発展には新たな周波数資源の開拓が必須である。半導体デバイスの世界では、光波と電波の融合域であるテラヘルツ (THz) 領域は長らく未開拓領域として取り残されてきた。

(2) そのような中、バンドギャップおよび有効質量が消失した特異な電子物性を有する炭素原子の単層シート：グラフェンが、2004年に A. Geim と K. Novoselov によって生成・発見され、以来、夢の光電子材料として研究が進展している。研究代表者らは、グラフェン中に光学励起および電流注入で生じる過剰電子・正孔の非平衡キャリア緩和再結合過程を考察し、THz 領域での反転分布形成・誘導放出が実現できることをはじめて理論的に発見し、他に先駆けて実証している。

2. 研究の目的

(1) 本研究は、グラフェンの特異な光電子物性を積極的に活用し、研究代表者らが発見した新たな反転分布形成機構を導入することにより、従来成し得なかった電流注入型の室温 THz レーザーの創出を目的とする。

3. 研究の方法

(1) THz 帯レーザー共振器を構成し、光学励起による室温レーザー発振の実現に挑む。  
(2) グラフェンの二次元電子系に励起される巨大プラズモン不安定性を利得増強手段

とする申請者らオリジナルの素子構造・動作機構を明らかにし、その有効性を実証する。  
(3) 独自の新規デバイス構造にこれらの成果を組み込んで、電流注入型 THz レーザーを試作し、室温動作の実証に挑む。

4. これまでの成果

(1) 光学励起グラフェンの室温 THz 誘導放出実験検証を進め、ポンピング閾値特性に加え利得スペクトルの正常分散と継時依存性（高域狭窄）を確認し、誘導放出の論拠を得た。

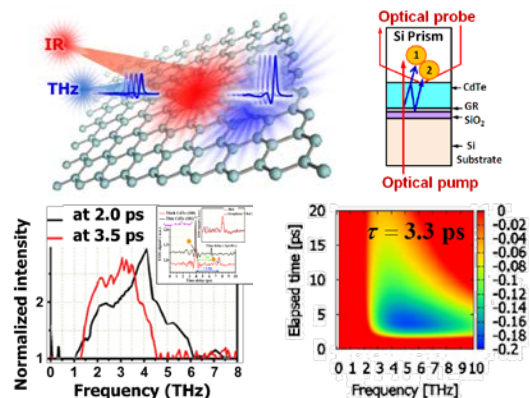


図1 光学励起グラフェンからの THz 誘導放出、実験(上)、利得スペクトルの時間推移、実験(右)と理論(左)。

(2) 量子伝導率律速の利得上限より 1 桁以上上回る一見不合理な利得は、代表者らが理論的に発見した表面プラズモンポラリトン (SPP) の励起に伴う巨大利得作用であること

〔4. これまでの成果 (続き)〕

を見出し、光ポンプ THz プロブ法を用いて他に先駆けて実験実証に成功した。

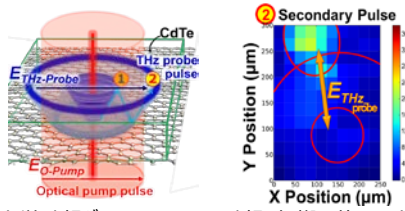


図2 光学励起グラフェンのSPP 励起・伝搬に伴う巨大利得作用の実験系とTHz プロブ光強度の空間分布。SPP 励起が可能な偏光条件領域のみに巨大利得が発現。

(3) CVD 成長による高品質単層エピグラフェン (Si 基板上に転写; 九大・吾郷准教授提供) をITO ミラーで挟んだFabry-Perot 共振器を製作し、ピコ秒高強度赤外レーザーポンピングによるTHz 帯放射スペクトルをフーリエ分光計で測定した結果、室温下でのTHz 帯増幅自然放出の観測に世界で初めて成功した。

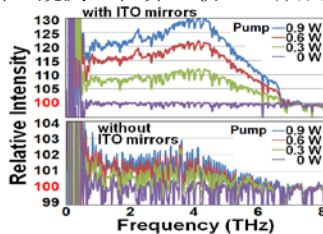


図3 光学励起グラフェンからの増幅自然放出スペクトル。

(4) 現在試作中のデュアルゲート構造の電流注入型レーザートランジスタ構造に応用可能なグラフェン・金属リボンアレイ構造体において、プラズモンモードに対応した $10^4$ に及ぶ巨大利得増強効果および超放射現象(プラズモニック誘導放出)がTHz 帯で得られることを理論的に発見した。

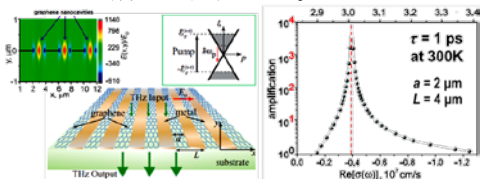


図4 グラフェン-金属リボンアレイのSPP 巨大利得と超放射。

(5) Si (110) 基板上 3C-SiC(111) 薄膜の配向成長条件を解明し、その特性を活用した高速回転エピ成長法を開発した。グラフェンの欠陥密度40%低減化に成功した。

(6) Si および SiC 基板上の微細加工により局所的にエピタキシャルグラフェンを成長するとともに、面方位によるグラフェン積層様式・物性を変調することに、同一基板上において初めて実現した。

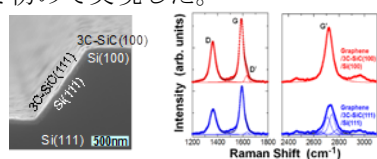


図5 3C-SiC/Si 上局所面方位グラフェンのラマン・スペクトル。

5. 今後の計画

(1) グラフェン品質とレーザー共振器 Q 値の向上により光学励起グラフェンにおける室温 THz レーザー発振を実現する。

(2) プラズモニックな利得増強に量子力学共振トンネル効果を重畳させ得るゲートスタック付グラフェン二重層構造をも導入し、電流注入型レーザーの室温発振実現に挑む。

(3) 領域限定によるグラフェン成長技術をより進化させ、室温レーザー発振に要求される結晶品質の実現を目指す。

(4) グラフェンレーザー理論を体系化し、新たな学問領域を拓くとともに、グラフェンレーザーの産業応用の端緒を拓く。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線)

(1) S. Boubanga-Tombet, S. Chan, T. Watanabe, A. Satou, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Ultrafast carrier dynamics and terahertz emission in optically pumped graphene at room temperature," *Phys. Rev. B*, Vol. 85, Iss. 3, pp. 035443-1-6, 2012.

(2) T. Otsuji, S. A. Boubanga Tombet, A. Satou, H. Fukidome, M. Suemitsu, E. Sano, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Graphene-based devices in terahertz science and technology," *J. Phys. D*, Vol. 45, No. 30, pp. 303001-1-10, 2012.

(3) V. V. Popov, O. V. Polischuk, A. R. Davoyan, V. Ryzhii, T. Otsuji, and M. S. Shur, "Plasmonic terahertz lasing in an array of graphene nanocavities," *Phys. Rev. B*, Vol. 86, Iss. 19, pp. 195437-1-6, 2012.

(4) T. Watanabe, T. Fukushima, Y. Yabe, S. A. Boubanga Tombet, A. Satou, A. A. Dubinov, V. Ya Aleshkin, V. Mitin, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Gain enhancement effect of surface plasmon polaritons on terahertz stimulated emission in optically pumped monolayer graphene," *New J. Phys.*, Vol. 15, Iss. 7, pp. 075003-1-11, July 2013.

(5) Maki Suemitsu, Sai Jiao, Hirokazu Fukidome, Yasunori Tatenno, Isao Makabe, and Takashi Nakabayashi, "Epitaxial graphene formation on 3C-SiC/Si thin films," *J. Phys. D*, Vol. 47, Iss. 09, pp. 094016-1-094016-11, 2014.

他、査読付学術論文 54編、  
査読付国際会議招待講演 50件、  
査読付国際会議一般講演 90件、  
査読無国内講演・研究会 81件。

ホームページ

<http://www.otsuji.riec.tohoku.ac.jp>