

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成28年 6月13日現在

機関番号：11301

研究種目：特別推進研究

研究期間：2011～2015

課題番号：23000008

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

研究者番号：40315172

交付決定額(研究期間全体)(直接経費)：367,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、グラフェンを利得媒質とする新規なテラヘルツ (THz) レーザーの創出に挑んだものである。第一に、光学励起したグラフェンの過渡応答におけるTHz帯誘導放出の室温観測に成功し、自ら発見したレーザー理論を実証した。第二に、グラフェン表面プラズモンポラリトンの巨大利得増強作用を理論発見し、独自の光ポンプ・近接場THzプローブ分光法により初めて実証に成功した。第三に、独自開発した高品質エピタキシャルグラフェン製膜技術とレーザー素子加工技術を用いて電流注入型グラフェンレーザー素子を試作評価し、100Kの低温下ながら、5.2 THzの単一モード発振に初めて成功した。第四に、グラフェンTHzレーザー設計論を構築するとともに、より高利得化が可能な独自構造を理論実験両面から明らかにし、室温THzレーザー発振実現の見通しを得た。

研究成果の概要(英文)： We challenged the creation of graphene-based terahertz (THz) lasers. First, we succeeded in observing the stimulated emission of THz radiation at 300K in the transient response of optically pumped graphene, manifesting the proof of the laser operation principle that we had theoretically discovered. Second, we theoretically discovered a giant THz gain enhancement effect of the surface plasmon polaritons in pumped graphene and experimentally verified it by using our original optical-pump and near-field THz-probe spectroscopy. Third, we designed and fabricated the current injection-type graphene THz laser by using our originally developed graphene-synthesis and process technology, succeeding in single-mode lasing at 5.2 THz at 100K for the first time. Fourth, we built the design theory for graphene THz lasers. Furthermore, we proposed a novel device structure and revealed their extremely high THz gain properties. On the basis of these results obtained the feasibility of THz lasing at room temperature from graphene-based devices was quantitatively manifested.

研究分野：工学

キーワード：グラフェン テラヘルツ レーザー 電流注入 プラズモン ポラリトン 誘導放出 ボトムアップ

1. 研究開始当初の背景

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。電波と光波の融合するテラヘルツ(THz)領域は、電子デバイスとフォトニックデバイスのいずれもが本質的な動作限界を来す未開拓領域として取り残されてきた。

そのような中、2004年に炭素原子の単層シート：グラフェンが発見され、2010年度ノーベル物理学賞受賞対象となったのを契機に、

その特異な光電子物性がにわかに脚光を浴びてきた。我々は2007年に、光学励起したグラフェンがTHz領域で反転分布形成・誘導放出可能なことを他に先駆けて理論発見した。さらに、電流注入型レーザー発振動作が光学励起に比して発振閾値低減に極めて有利であることを理論解明し、基本素子構造を提案するに至った。しかし、THz領域で顕著な自由キャリア吸収に伴う損失を補って余りあ

る利得を確保するためには巨大利得獲得のための新たな原理・機構、極めて高品質なグラフェン製膜技術、共振器構造を含む電流注入レーザー素子構造とその作製技術の実現など、多くのブレークスルーが必要であった。

2. 研究の目的

本研究は、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って、従来成し得なかった電流注入型の室温THzレーザーを創出することを目的とする。

3. 研究の方法

THz帯レーザー共振器を構成して光ポンピングによるレーザー発振動作原理の検証実験からスタートし、共振器構造を導入して光学励起によるTHzレーザー発振の実現をめざす。平行して、ボトムアップ型高品質エピタキシャルグラフェン製膜法およびグラフェンレーザー素子加工技術を開発し、グラフェンをチャネルとし、独立した2つのゲート電極を有する電界効果トランジスタ(FET)構造を基本とする電流注入型レーザー素子を設計試作する。ゲート電極間隔を周期変調した分布帰還形共振器とアクティブメサ領域の端面反射で得られるFabry-Perot共振器の複合構造によって、レーザー発振周波数と発振モードを制御する。さらに、我々が理論発見したグラフェンの光吸収率(2.3%)で律速される微弱なTHz利得を桁違いに拡大し得るグラフェン表面プラズモンポラリトン(SPP)の巨大利得増強作用をはじめとする高利得・低閾値化に有効な動作機構の電流注入レーザー素子構造への実装方法を具体化し、室温動作の実証に挑む。

4. 研究成果

(1) 光学励起グラフェンのTHz帯負性導電率特性とそのTHzレーザーへの応用

①室温THz誘導放出の定量的検証

フェムト秒赤外レーザーで光学励起した単層剥離グラフェンの過渡応答におけるTHz帯誘導放出の観測に成功し、自ら理論発見したレーザー動作原理を他に先駆けて実証した。ポンピング閾値特性、利得スペクトルの正常分散と時間依存性(高域狭窄)を確認し、誘導放出の論拠を得た(図1)。また、ケルビンカ顕微分光及びRaman顕微分光(図2)により、試料の非ドープ・極低散乱特性(表面ポテンシャル分散4 mV(フォトン換算<1THz)、運動量緩和時間 $\tau = 3.3$ ps)を確認し、Si基板への転写では電子正孔溜りにより真性化は不可能との定説を覆し、誘導放出の論拠を得た。さらに、量子導電率律速の利得上限(2.3%)を1桁上回る一見不合理な高い利得は、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の発現によることを実証した(図3)。

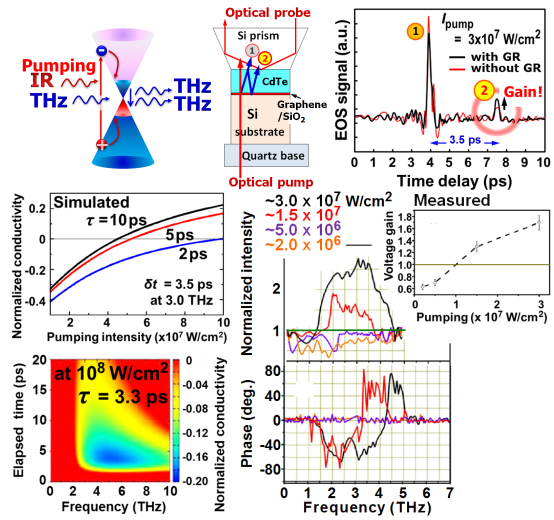


図1. 光学励起グラフェンの過渡応答におけるTHz帯誘導放出とその利得スペクトル。

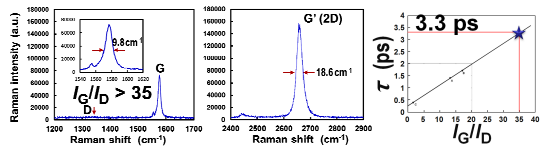


図2. 単層剥離グラフェンのRamanスペクトルとG/Dピーク強度比から同定した τ 値。

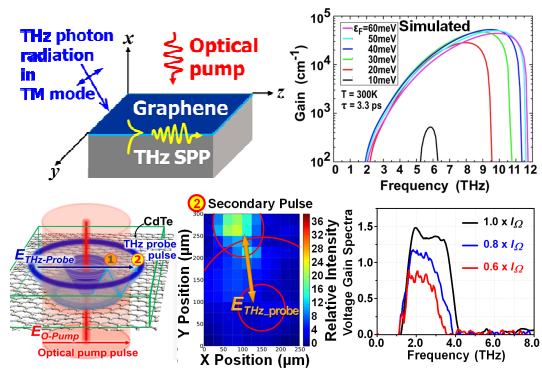


図3. 光学励起グラフェンのSPP励起に伴う巨大THz利得増強作用解析(上)と実験結果(下)。

②光学励起によるTHzレーザー発振への挑戦

CVD成長の単層エピタキシャルグラフェンをSi基板上に転写した試料を利得媒質とし、これをITOミラーコートした石英基板で挟んでFabry-Perotレーザー共振器を形成した。ピコ秒赤外レーザーで励起した際のTHz放射スペクトルをフーリエ遠赤外分光計で測定した結果、閾値以上の励起光強度においてTHz帯増幅自然放出の観測に成功した(図4)。得られた放射特性は、THz分光測定で同定した共振器Q値とキャリア運動量緩和時間を用いた数値解析結果とよく一致した。しかし、レーザー発振には至らず、改めて光学励起レーザー発振の困難性を実感した。閾値(図4の効率係数 $Q = 1$)を超えてレーザー発振に至る物性パラメータ条件(ミラー反射率 >99%、キャリア運動量緩和時間 $\tau > 4$ ps)を数値解析により明らかにし、今後の改良によるレーザー発振実現の見通しを得た。

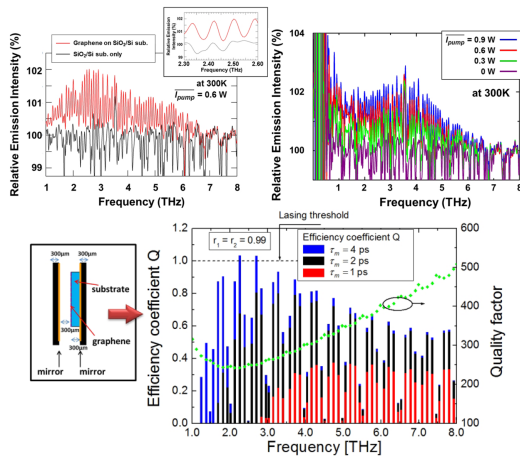


図4. 光学励起グラフェンのTHz増幅自然放出. 実験結果(上)と解析結果(下).

(2) ボトムアップ型高品質グラフェン成長技術の開発

① Si基板上エピタキシャルグラフェン製膜

Si(110)基板上3C-SiC(111)薄膜の配向成長条件を解明し、高速・高品質回転エピタキシャルグラフェン・オン・シリコン(GOS)成長法を開発した。Si基板上にGOS構造を局部的に微細加工形成し、面方位によるグラフェンの物性変調を同一基板上で初めて実現した。結晶品質はRaman G/Dピーク比で一桁以上向上した。SiC上エピタキシャルグラフェンに並ぶにはさらなる改良が必要である。

② SiC基板上エピタキシャルグラフェン製膜

クラス 10 以下の清浄な雰囲気下でSiC基板上に高品質グラフェンが製膜できることを発見し、C面SiC上グラフェンのドメインサイズを、従来の数百nmから数十 μm へと、二桁以上増大することに成功した(図5)。特筆すべき知見として、従来エピタキシャル成長しないとされてきたC面SiC上グラフェンが、実はエピタキシャル成長し得ることを初めて明らかにした。Raman分光およびTHz時間分解測定によって同定されたグラフェンのキャリア運動量緩和時間は室温下で2 psを上回る優れた特性が得られ、電流注入レーザー発振の実現が可能なレベルにまで到達した。

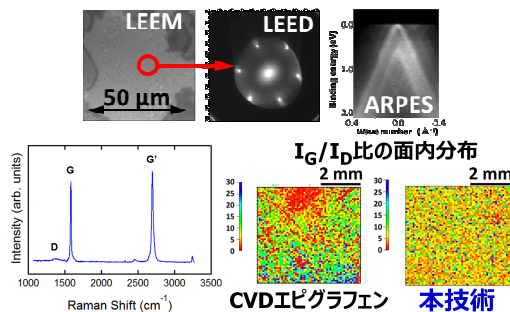


図5. SiC上高品質エピタキシャルグラフェン製膜技術の開発.

(3) 電流注入型グラフェンTHzレーザーの開発

① グラフェンレーザーデバイスプロセス技術

電流注入型THzレーザーは、ゲート電極を2つ独立に配置した独自のデュアルゲート

型グラフェン電界効果トランジスタ(DG-GFET)を基本素子構造とする(図6)。(2)②の手法でSiC基板に製膜したエピタキシャルグラフェン上に独自開発したSiNゲートスタック形成法によりGFETを作製した。その結果、ゲート電極直下の真性チャネル領域における電界効果移動度として、化合物半導体を一桁上回り電流注入レーザー実現が可能な100,000 cm^2/Vs 以上の秀逸なキャリア輸送特性の実現に初めて成功した(図7)。

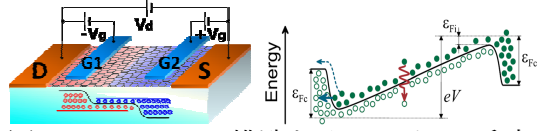


図6. DG-GFET構造とそのバイアス印加によるキャリア反転分布形成.

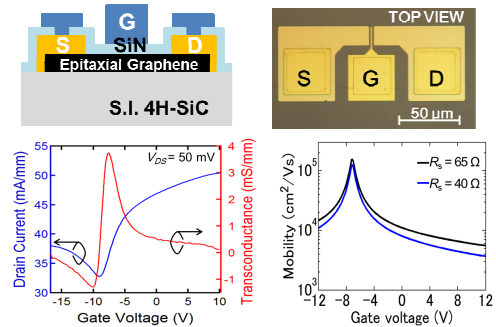


図7. SiNゲートスタックGFETのDC伝達特性(右)とゲート真性領域の電界効果移動度.

② 電流注入時のキャリア過冷却現象の発見

ポンピングで生成した熱いキャリアが光学フォノン散乱(OP)を介してエネルギー緩和する際に、OPで失ったエネルギーが最終的に熱として散逸する過程をフォノン減衰： η_o^{decay} としてモデル化し、キャリア温度の励起条件依存性を解析した。その結果、弱励起条件下ではキャリア温度が背景の格子温度を下回る‘過冷却現象’が生じ得ることを理論発見した(図8)。レーザー発振閾値の大幅な低減を可能とする重要な知見を得た。

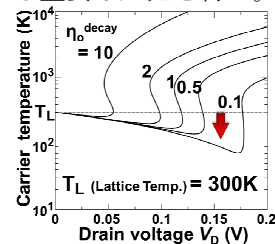


図8. グラフェンキャリアの過冷却現象.

③ 電流注入型グラフェンTHzレーザーの試作

ゲート絶縁膜にプラズマCVD成長SiNを導入し、独自の分布帰還(DFB)デュアルゲートを有するDFB-DG-GFETを試作した。ゲート間隔により利得係数を周期的に空間変調してDFB共振器を形成し、DFB共振器方向の能動領域メサ端面をミラーとしてFabry-Perot共振器を副次的に形成した。DFB基本モードを4.96 THzに設計した(図9、10)。試作素子の直流伝達特性にはグラフェン特有のアンバイポーラ特性が期待通り得られた。

本素子からのTHz帯放射をフーリエ遠赤外分光計で測定した結果、100Kの低温下において、キャリア反転分布が生じるバイアス条件下で 5.2 THz、最大~10μWの単一モード発振に成功した(図11)。バイアス印加とともに発振閾値が二重に現れる特異な発振閾値特性(図11)は、キャリア過冷却現象の発現によるものと考察され、本研究の最終目標として掲げた電流注入THzレーザー発振に初めて成功した。本課題最難関の目標を達成した。

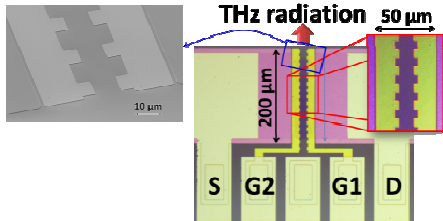


図9. DFB-DG-GFET 試作素子の顕微鏡像。

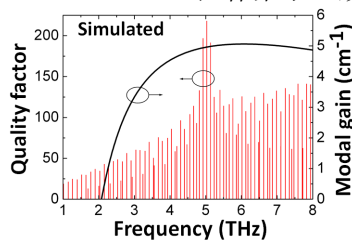


図10. Q値とモード利得係数の数値解析。

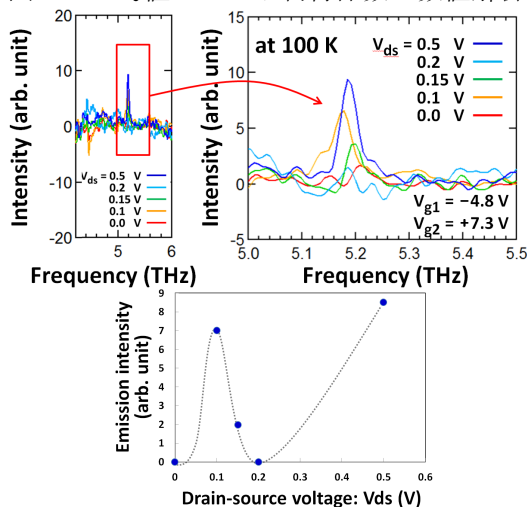


図11. DFB-DG-GFET 素子からの単一モード THz 発振スペクトルとその閾値特性。

(4)室温THzレーザー発振の実現に向けて

① グラフェンSPP巨大利得と超放射現象発見

ゲート電極を二重回折格子(DGG)構造として、グラフェンチャンネル内に周期的にp-i-nを形成した構造が、グラフェンSPP共振器を周期的に形成し、プラズモンモード周波数を負性導電率領域内に設計することで、各SPP共振器が協調してレーザー発振に至る‘超放射現象’が実現できることを理論発見した(図12)。室温発振THzレーザーの有力候補として、DFB-DGG-GFETの巨大利得増強効果を数値解析によって明らかにした。同様に、グラフェンに金属メッシュを近接したメタマテリアル構造においても、SPP利得増強作用が得られることを理論・実験両面で明らかにした。

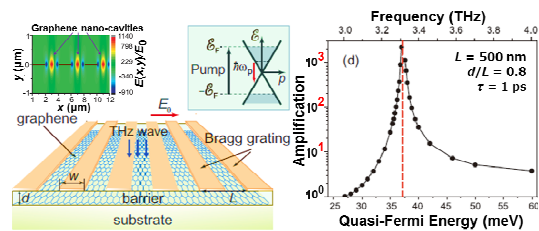


図12. グラフェンDGG構造のSPP巨大利得と超放射現象。

② グラフェン二重層ヘテロ接合構造の新奇物性とその電流注入THzレーザーへの応用

トンネルバリア層をグラフェンで挟んだグラフェン二重層(DGL)において、対峙するグラフェンのバンドオフセットと電子/正孔濃度をゲートバイアス制御することにより、n形グラフェン内の過剰電子全てがバンドオフセットに一致するTHzフォトン自然放出して共鳴トンネルできる(図13)。このフォトンアシスト共鳴トンネル現象によって巨大THz利得が獲得できることを理論発見するとともに、試作したゲート制御DGL素子(GL間回転角度偏差 $\delta\theta = 30^\circ$)において、140Kの低温下ながら、この現象由来のTHz自然放出スペクトルを観測し、原理検証に成功した(図13)。

これらの新たな知見により、悲願の室温高強度THzレーザー発振実現の見通しを得た。

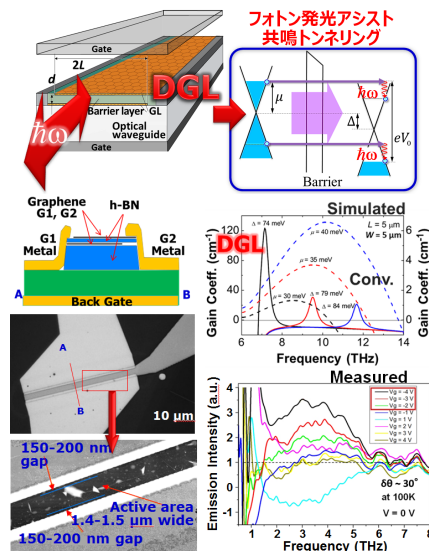


図13. DGLのフォトンアシスト共鳴トンネルによるTHz自然放出と巨大利得。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計330件) 代表的成果を挙げる。
(被引用数はWOSデータベースによる)

- ① A. Satou, G. Tamamushi, K. Sugawara, J. Mitsushio, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "A fitting model for asymmetric I-V characteristics of graphene field-effect transistors for extraction of intrinsic mobilities," IEEE Trans. Electron Dev., 査読有, accepted on June 6, 2016. DOI: 10.1109/TED.2016.2578325
- ② Y. Koseki, V. Ryzhii, T. Otsuji, V. V. Popov, and

- A. Satou, "Giant plasmon instability in dual-grating-gate graphene field-effect transistor," *Phys. Rev. B*, 査読有, Vol. 93, pp. 245408 1-5, 2016. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.245408
- ③ H. Fukidome(1番目), M. Suemitsu(12番目), "Microscopically-tuned band structure of epitaxial graphene through interface and stacking variations using Si substrate microfabrication," *Sci. Rep.*, 査読有, Vol. 4, pp. 5173-1-6, 2015. DOI: 10.1038/srep05173
- ④ D. Svintsov, V. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, V. Vyurkov, "Carrier-carrier-scattering and negative dynamic conductivity in pumped graphene," *Opt. Exp.*, 査読有, Vol. 22, pp. 19873-19886, 2014. DOI: 10.1364/OE.22.019873 [被引用: 4]
- ⑤ T. Otsuji, V. Popov, and V. Ryzhii, "Active graphene plasmonics for terahertz device applications," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 47, pp. 094006-1-10, 2014. DOI: 10.1088/0022-3727/47/9/094006 [被引用: 12]
- ⑥ V. Ryzhii, A.A. Dubinov, V.Ya. Aleshkin, M. Ryzhii, T. Otsuji, "Injection terahertz laser using the resonant inter-layer radiative transitions in double-graphene-layer structure," *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol. 103, pp. 163507-1-4, 2013. DOI: 10.1063/1.4826113 [被引用: 17]
- ⑦ T. Watanabe, T. Fukushima, Y. Yabe, S.A. Boubanga Tombet, A. Satou, A.A. Dubinov, V. Ya Aleshkin, V. Mitin, V. Ryzhii, T. Otsuji, "The gain enhancement effect of surface plasmon polaritons on terahertz stimulated emission in optically pumped monolayer graphene," *New J. Phys.*, 査読有, Vol. 15, pp. 075003-1-11, 2013. DOI: 10.1088/1367-2630/15/7/075003 [被引用: 19]
- ⑧ A. Satou, V. Ryzhii, Y. Kurita, T. Otsuji, "Threshold of terahertz population inversion and negative dynamic conductivity in graphene under pulse photoexcitation," *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 113, pp. 143108-1-7, 2013. DOI: 10.1063/1.4801916 [被引用: 21]
- ⑨ T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, W. Knap, V. Popov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, "Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in III-V semiconductors and graphene," *IEEE Trans. Thz. Sci. Technol.*, 査読有, Vol. 3, pp. 63-72, 2013. DOI: 10.1109/TTHZ.2012.2235911 [被引用: 25]
- ⑩ T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, A. Satou, M. Ryzhii, V. Ryzhii, "Terahertz-wave generation using graphene toward new types of terahertz lasers," *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 査読有, Vol. 19, pp. 8400209-1-9, 2013. DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2208734 (Invited) [被引用: 15]
- ⑪ V.V. Popov, O.V. Polischuk, A.R. Davoyan, V. Ryzhii, T. Otsuji, M.S. Shur, "Plasmonic terahertz lasing in an array of graphene nanocavities," *Phys. Rev. B*, 査読有, Vol. 86, pp. 195437-1-6, 2012. DOI: 10.1103/PhysRevB.86.195437 [被引用: 34]
- ⑫ T. Otsuji, S. A. Boubanga Tombet, A. Satou, H. Fukidome, M. Suemitsu, E. Sano, V. Popov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, "Graphene materials and devices in terahertz science and technology," *MRS Bulletin*, 査読有, Vol. 37, pp. 1235-1243, 2012. DOI: 10.1557/mrs.2012.241 (Invited) [被引用: 12]
- ⑬ T. Otsuji, S. A. Boubanga Tombet, A. Satou, H. Fukidome, M. Suemitsu, E. Sano, V. Popov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, "Graphene-based devices in terahertz science and technology," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 45, pp. 303001-1-10, 2012. DOI: 10.1088/0022-3727/45/30/303001 (Invited Topical Review) [被引用: 59]
- ⑭ D. Svintsov, V. Vyurkov, S. Yurchenko, T. Otsuji, V. Ryzhii, "Hydrodynamic model for electron-hole plasma in graphene," *J. Appl. Phys.* 査読有, Vol. 111, pp. 083715-1-10, 2012. DOI: 10.1063/1.4705382 [被引用: 44]
- ⑮ S. Boubanga-Tombet, S. Chan, T. Watanabe, A. Satou, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Ultrafast carrier dynamics and terahertz emission in optically pumped graphene at room temperature," *Phys. Rev. B*, 査読有, Vol. 85, pp. 035443-1-6, 2012. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.035443 [被引用: 74]
- ⑯ V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, T. Otsuji, "Toward the creation of terahertz graphene injection lasers," *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol. 110, pp. 094503-1-9, 2011. DOI: 10.1063/1.3657853 [被引用: 49]
- ⑰ H. Fukidome(1番目), T. Suemitsu(8番目), T. Otsuji(9番目), M. Suemitsu(16番目), "Control of epitaxy of graphene by crystallographic orientation of a Si substrate toward device applications," *J. Mater. Chem.*, 査読有, Vol. 21, pp. 17242-17248, 2011. DOI: 10.1039/C1JM12921J [被引用: 22]
- ⑱ A.A. Dubinov, Y.V. Aleshkin, V. Mitin, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Terahertz surface plasmons in optically pumped graphene structures," *J. Phys.: Condens. Matter*, 査読有, Vol. 23, pp. 145302-1-8, April 2011. DOI: 10.1088/0953-8984/23/14/145302 [被引用: 72]
- [学会発表] (計368件) 代表的成果を挙げる。
- ① G. Tamamushi, T. Watanabe, A. Dubinov, J. Mitsushio, H. Wako, A. Satou, T. Suemitsu, H. Fukidome, M. Suemitsu, M. Ryzhii, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Single-mode terahertz emission from current-injection graphene-channel transistor under population inversion," 74th Device Research Conf., VI-A.4, Delaware, Newark, DE, USA, 21 June 2016.
- ② G. Tamamushi, T. Watanabe, A. Dubinov, J. Mitsushio, H. Wako, A. Satou, T. Suemitsu, M. Ryzhii, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Current-injection terahertz lasing in distributed-feedback dual-gate graphene-channel field-effect transistor," CLEO: Conf. Lasers and Electro-Optics, SM3L.7, San Jose, CA, USA, 6 June 2016. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2016.SM3L.7
- ③ M. Suemitsu, "Recent progress in the epitaxial graphene formation on 3C-SiC/Si substrate," MRS Spring Meeting, Phoenix Conf. Center, Phoenix, AZ, USA, 31 March 2016. (Invited)
- ④ T. Otsuji, S.A. Boubanga Tombet, V. Ryzhii, "Double-graphene-layer van der Waals heterostructures for terahertz device applications," MRS Fall Meeting, Symposium Q: Nano Carbon Materials -1D to 3D, Boston Conv. Center, MA,

- USA, 1 Dec. 2015. **(Invited)**
- ⑤ S. Boubanga Tombet, D. Yadav, S. Arnold, T. Watanabe, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Emission and detection of terahertz radiation in double-graphene-layer van der Waals heterostructures," The 40th Int. Conf. on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, The Chinese Univ. Hong Kong, China, 27 Aug. 2015. **(Keynote, Invited)**
- ⑥ T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, V. Ryzhii, "Recent advances in graphene heterostructures toward the creation of terahertz lasers," Graphene 2015: 5th Edition of the European Conference in Graphene and 2D Materials, Imaginano, Bilbao, Spain, 13 March 2015. **(Invited)**
- ⑦ T. Itatsu, E. Sano, T. Otsuji, "Enhanced terahertz emission from monolayer graphene with metal mesh structure," Int. Conf. Diamond and Carbon Mat., Madrid, Spain, 9 Sept. 2014; Mat. Today: Proc., 査読有, Vol. 3S, pp. S221-S226 (2016). DOI: 10.1016/j.matpr.2016.02.037
- ⑧ H. Sugiyama, T. Watanabe, Y. Kurita, A. Satou, K. Kawahara, H. i Ago, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Observation of Spontaneous Terahertz Emission from Optically Pumped Graphene," Recent Progress on Graphene Research, Tokyo Tech Front, Tokyo, Japan, Sept. 12, 2013.
- ⑨ T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, A.A. Dubinov, V. Popov, V. Ryzhii, "Graphene active plasmonics for superradiant terahertz lasing," IRMMW-THz: International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Mainz, Germany, 5 Sept. 2013. **(Plenary, Invited)**
- ⑩ T. Otsuji, A. Satou, S.A. Boubanga Tombet, M. Ryzhii, V. Ryzhii, "Terahertz-wave generation using graphene -toward the creation of graphene injection lasers," OTST: Int. Conf. Opt. Thz. Sci. Technol., Kyoto, Japan, 5 April 2013. **(Invited)**
- ⑪ T. Otsuji, A. Satou, M. Ryzhii, V. Mitin, V. Ryzhii, "Graphene terahertz lasers -current injection versus optical pumping," MRS Fall Meeting, Boston, USA, 28 Nov. 2012. **(Invited)**
- ⑫ T. Otsuji, S. Boubanga-Tombet, S. Chan, T. Watanabe, A. Satou, V. Ryzhii, "Ultrafast carrier dynamics and terahertz amplified stimulated emission in optically pumped graphene at room temperature," Gordon Research Conference, Ultrafast Phenomena in Cooperative Systems, Hotel Galvez, Galveston, TX, USA, 20 Feb. 2012.
- ⑬ T. Otsuji, S. Boubanga Tombet, A. Satou, V. Ryzhii, "Amplified stimulated terahertz emission from optically pumped graphene," CLEO: Conference on Lasers and Electro-Optics, CMM3, Baltimore, ML, USA, 2 May 2011. **(Invited)**

〔図書〕(計15件) 代表的成果を挙げる。

- ① T. Otsuji, Springer, Frontiers of Graphene and Carbon Nanotubes, edited by K. Matsumoto (Chapt. 8, Graphene terahertz devices), 2015, 289 (105-122).
- ② 尾辻 泰一 編著、フロンティア出版、グラフェンの最先端技術と広がる応用—グラフェンの材料科学、成長・合成技術、各種デバイス応用—、2012、242。

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：グラフェン電界効果トランジスタおよびグラフェン半導体部材
 発明者：鷹林将、尾辻泰一、高桑雄二、小川修一、楊猛
 権利者：国立大学法人東北大学
 種類：特許
 番号：特願2012-031899
 出願年月日：平成24年2月16日
 国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾辻 泰一 (OTSUJI, Taiichi)
 東北大学・電気通信研究所・教授
 研究者番号：40315172

(2) 研究分担者

ヴィクトール リズィー (VICTOR, Ryzhii)
 会津大学・コンピュータ理工学部・教授
 研究者番号：90254078
 (平成24年度より連携研究者)

末光 眞希 (SUEMITSU, Maki)
 東北大学・電気通信研究所・教授
 研究者番号：00134057

末光 哲也 (SUEMITSU, Tetsuya)
 東北大学・電気通信研究所・准教授
 研究者番号：90447186

佐藤 昭 (SATOU, Akira)
 東北大学・電気通信研究所・助教
 研究者番号：70510410

佐野 栄一 (SANO, Eiichi)
 北海道大学・量子エレクトロニクス研究センター・教授
 研究者番号：10333650

マキシム リズィー (MAXIM, Ryzhii)
 会津大学・コンピュータ理工学部・准教授
 研究者番号：50254082
 (平成23年度は連携研究者)

(3) 連携研究者

吹留 博一 (FUKIDOME, Hirokazu)
 東北大学・電気通信研究所・准教授
 研究者番号：10342841

(4) 研究協力者

渡辺 隆之 (WATANABE, Takayuki)
 ボーバンガートンベット ステファン
 (BOUBANGA-TOMBET, Stephane)
 鷹林 将 (TAKABAYASHI, Susumu)
 高桑 雄二 (TAKAKUWA, Yuzi)
 吾郷 浩樹 (AGO, Hiroki)
 河原 憲治 (KAWAHARA, Kenji)
 ドゥビノフ アレクサンダー (DUBINOV, Alexander)
 ポポフ ヴィチェスラフ (POPOV Vyacheslav)
 スヴィンツォフ ディミトリ (SVINTSOV, Dmitry)
 ミティン ウラジミール (MITIN, Vladimir)
 シュール マイケル (SHUR, Michael)