

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14661

研究課題名(和文)電流注入型グラフェンテラヘルツプラズモニックレーザーの創出

研究課題名(英文)Creation of current-injection graphene terahertz plasmonic lasers

研究代表者

渡辺 隆之(Watanabe, Takayuki)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80771807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：グラフェンを利得媒質とした室温動作可能な高効率テラヘルツ帯レーザーデバイスの実現に向けて、デバイスの動作温度と放射強度の向上に必要な高品質グラフェンの作製、ならびにそれをチャンネル材料とした二重格子ゲート構造トランジスタの作製に成功した。並行して、単層グラフェンに代わる利得媒質としてグラフェン二重層に着目し、グラフェン二重層を多重化した構造において大きな利得が得られることを理論的に明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の対象であるグラフェントランジスタレーザーデバイスでは、新規材料であるグラフェンにおけるテラヘルツ帯利得を、新規構造である二重格子ゲート構造におけるプラズモン励起を利用することで桁違いに増強することが期待でき、その物理機構を明らかにするための基盤を本研究で築くことができた。本デバイスによって室温動作可能な高効率テラヘルツ発振が実現すれば、超高速無線通信など種々の産業応用が実現し、将来の情報通信技術・産業を飛躍的に発展させることが予想される。また、グラフェンを利用したTHzレーザー発振の実現・体系化により、応用量子光学と電子光学の融合発展が期待でき、そのインパクトは計り知れない。

研究成果の概要(英文)：For the purpose to realize high quantum efficiency terahertz laser devices using graphene as a gain medium, high quality graphene, which is essential to improve operating temperature and radiation intensity, and its derived graphene channel transistors with dual grating gate structure were successfully fabricated. In parallel, as an alternative gain medium to monolayer graphene, double graphene layer structure was theoretically revealed to achieve large gain if it was cascaded.

研究分野：電子工学

キーワード：テラヘルツ波

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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。電波と光波の融合域に位置するテラヘルツ帯 (THz 帯) は、イメージングや超高速通信システム、医療用生体計測システムなど、多くの工学的応用が期待できる新たな周波数領域として大きな注目を集めている。しかし、電子輸送に立脚したトランジスタをはじめとする電子デバイスも、電子遷移に立脚したレーザーをはじめとするフォトニックデバイスも、本質的な動作限界によって開発が立ち遅れている。そこで本研究では、極限的な電子輸送特性で近年注目されている、グラフェンと呼ばれる炭素原子の  $sp^2$  結合からなる単層シート材料を光学励起した際に生じる反転分布と負性導電率を利用したグラフェンテラヘルツレーザーデバイスについての研究をおこない、室温動作かつ集積化が可能な従来にない新しい THz デバイスの開拓を目指している [D. Yadav, 2D Mater., 3, 045009 (2016).].

光学励起したグラフェンでは、ギャップレスで線形かつ完全対称な伝導帯・価電子帯構造によって THz 帯で反転分布・負性導電率が得られることを我々のグループが理論的に予測しており [V. Ryzhii et al., J. Appl. Phys., 101, 083114 (2007).]、また、THz 帯でのキャリアの反転分布・負性導電率による自然放射を確認している。励起法がより簡便で、より効率のよい電流注入型グラフェン THz レーザーデバイスを試作し、100K の低温下ながら単色テラヘルツ発振を観測するに至った [G. Tamamushi, CLEO OSA Tech. Dig. SM3L.7 (2016).]. しかし、その放射強度は  $1\mu\text{W}$  のオーダーに留まり、微弱なものである。一方、グラフェン表面プラズモンの励起によってグラフェンキャリアとテラヘルツフォtonsの相互作用を向上でき、結果として利得増強作用が得られることを実験的に検証している [T. Watanabe et al., New J. Phys., 15, 7, 075003 (2013).]. また、我々は、独自の二重格子状ゲート構造 (Dual-Grating-Gate; DGG 構造) を有する InP 系高電子移動度トランジスタによって、プラズモン共鳴に起因する極低温下での単色コヒーレント放射に成功している [T. Watanabe, DRC 2013, 129 (2013).]. これらを学術基盤として、本研究ではレーザー放射強度改善と動作温度向上を目的として、グラフェントランジスタに二重格子状ゲート構造を導入し、デバイス動作におけるキャリア注入効率の改善、グラフェンプラズモンポラリトンの巨大利得増強作用の発現に挑む。

DGG 構造では、周期的なゲートにそれぞれ正と負のバイアスを印加し、それらのゲート直下にあるグラフェンチャンネルを電氣的にドーピングすることで、近接する二重ゲートの中間にある Ungated な中性領域に電子と正孔が拡散・注入されたキャリア注入領域を作り出す。その状態でドレインバイアスを印加することで、電子と正孔の擬フェルミ準位が分裂し、キャリア注入領域内で反転分布が形成される (図 1)。これを周期的に並べることで、グラフェン面内における非放射モードの表面プラズモンと放射モードのテラヘルツ電磁波との結合量子である表面プラズモンポラリトン (Surface-Plasmon-Polariton; SPP) の励起を実現するとともに、ゲート構造の周期長によりプラズモンの基本共鳴周波数を規定し、チャンネル全域で集積作用より表面プラズモンポラリトン共鳴ならびにその超放射現象を発現せしめることで、反転分布グラフェンの利得と一致する周波数で初期利得を桁違いに増強することを目指す。最終的に、電流注入型グラフェンレーザーデバイスとプラズモン共鳴を利用した、室温動作可能な高効率コヒーレント THz レーザー光源の実現を図るものである。

### 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、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。低温下でレーザー発振に成功している二重ゲート型トランジスタ構造を出発点として、二重回折格子状の新規のゲート構造を導入することにより、単純なカスケード効果を超越し、二重回折格子構造で特徴づけられたグラフェン表面プラズモンポラリトンの共鳴利得増強作用ならびに超放射現象を発現せしめ、桁違いに高い量子効率と利得増強効果の獲得とともに、レーザー発振閾値の低減を目指す。同時に、より量子効率の高いテラヘルツ利得媒質として、絶縁薄膜と 2 枚のグラフェンから成るグラフェン二重層構造におけるフォトンアシスト共鳴トンネリングに着目し、グラフェン二重層構造を多重にカスケードした構造を検討する。

### 3. 研究の方法

低温下でレーザー発振に成功している二重ゲート型グラフェントランジスタ構造は、電子および正孔の電氣的な注入により、グラフェンチャンネルの中性領域においてキャリアの反転分布を起こし、そこからの自然放出あるいは誘導放出によりテラヘルツフォtonを取り出す動作原理である。この基本構造に DGG 構造を導入することにより、その構造長により規定された基本周波数における SPP を発生せしめ、その共鳴による利得増強作用により放射テラヘルツフォtonの強度増大を図る。また、同格子ゲート構造の導入により、放射モードのテラヘルツフォtonと SPP の共鳴との間の結合を可能とする。このとき、プラズモンは大気を伝搬する光の  $1/300$  倍程度の速度で伝搬するため、その分、プラズモンにおける利得増強作用は  $300$  倍程度に大きいことが期待でき、先のプラズモン共鳴による利得増強作用と併せて高いキャリア注入効率と巨大なテラヘルツフォton放射強度の実現を目指す。

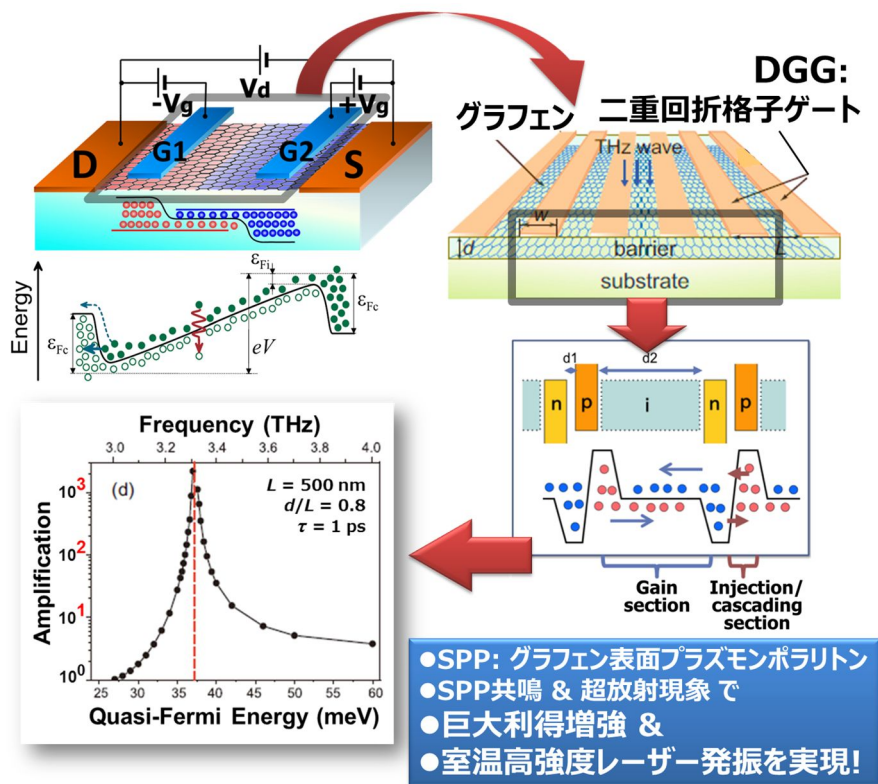


図 1 . 研究の目的と手段・ねらい .

本研究課題では、新規の DGG 構造を導入したグラフェントランジスタデバイスを試作し、極低温 (100K) での放射スペクトルを評価し、基本構造のデバイスの放射スペクトルと比較、新規構造による利得増強作用を評価する。その実験に際しては、デバイスの基本構造にあたる前世代のグラフェンレーザーデバイスについて、極低温におけるレーザー発振および単色コヒーレント放射の観測に成功しているフーリエ赤外分光計を用いる。ここでは、DGG 構造により規定されるプラズモン共鳴周波数における放射強度の増大を確認する。また、キャリア注入効率と SPP 共鳴特性 (Q 値, 周波数) を左右する DGG 構造の幾何学的パラメータ (非対称性) と放射スペクトル特性との相関を評価する。

また、DGG G-FET の試作・評価と並行して、より高効率なテラヘルツ利得発現の原理を模索する。具体的には、絶縁薄膜と 2 枚のグラフェンから成るグラフェン二重層構造 (Double Graphene Layer; DGL) における共鳴トンネリングに着目し (図 2) これを多層にした量子カスケード構造を検討する。DGL 構造においては、光子放出を介した電子共鳴トンネリングが起こり、光子エネルギーは適切なバイアス印加によって制御できる。また、放出される光子の電界強度は DGL 平面に対して垂直であるため、Drude 吸収損失がないという利点がある。

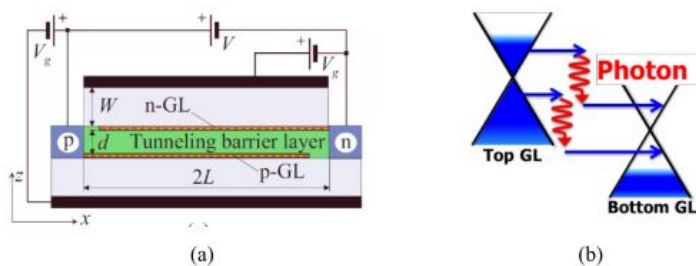


図 2. (a) グラフェン二重層構造, (b) フォトン放出アシスト共鳴トンネリングの模式図 .

#### 4 . 研究成果

DGG 構造を導入したグラフェントランジスタデバイスの試作に関しては、グラフェンチャンネルの品質が動作温度と放射強度に直結するため、第一に高品質グラフェンの成長技術、第二にグラフェンチャンネルの品質を損ねないデバイスプロセス技術の確立に注力した。

グラフェン膜は、SiC 基板を Ar ガス雰囲気中において加熱し、熱分解により表面をグラフェン化する手法を用いて作製した。従来の条件に比べて加熱温度を若干上昇させ、エピタキシャルグラフェン結晶化を促進させるとともに、それによって増加した SiC 基板上的 Si 原子を効果的に吹き払うために Ar ガス流量を増加させた。また、温度上昇によって Si 原子の脱離速度とグラフェン結晶化速度が同時に向上することから、一定のグラフェン層数を得るために加熱時間を短縮させた。成長させたグラフェン膜は顕微ラマン分光法および原子間力顕微鏡法によって観

察し、比較的大きい単結晶ドメインを持ち、ドメイン内では比較的欠陥が少ないことが確認できた。

次に、グラフェン膜をプロセス中に発生するダメージから保護するため、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  犠牲層をグラフェン上に形成するプロセスを採用した。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  犠牲層上に堆積させたレジストが有機洗浄によって除去できないという問題が発生したが、表面の凹凸が粗いことが原因であることを同定し、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  犠牲層形成に用いた電子ビーム蒸着のパラメータを最適化し、凹凸を低減させることで解決した。

上述のプロセス技術に加え、ゲート絶縁膜として SiN を PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) 法によって形成し、DGG 構造を電子ビーム露光によって形成した (図 3)。試作デバイスの I-V 特性を測定したところ、グラフェンの線形エネルギー分散に由来するアンバイポーラ特性を確認できた。一方、キャリアがニュートラルになる所謂ディラック電圧が  $-25\text{ V}$  であり、グラフェンが強く n ドープされている状態であることが確認された。本研究で提案する DGG 構造では片方のゲートに電圧を印加することにより p 型領域をチャンネルに形成する必要があるが、試作デバイスでは SiN 絶縁膜の厚さと絶縁電界から見積もられる絶縁破壊電圧を超えて電圧をかけなければ十分に p ドープすることができないことが分かった。そこで、バイアス電圧印加が可能な範囲でのプラズモン不安定性による発振動作を、フーリエ赤外分光計を用いた放射スペクトル測定によって評価した。I-V 特性の測定では電圧掃引の速度を速く設定したことで高電圧印加での絶縁破壊を防いだが、スペクトル測定においては長時間の電圧印加が必要であるため、 $-5\sim+5\text{ V}$  の範囲でゲート電圧を印加した。この範囲内では有意な放射スペクトルは確認できなかったが、これはプラズモン不安定性を発現させるためには 2 つのゲート直下チャンネル領域に十分な電子密度の差異を作り出す必要があることが理論的に予測されており、試作デバイスでは十分な電子密度の差異が作り出せなかったためと考えられる。試作デバイスのグラフェンチャンネルに生じた n ドープの原因究明が、DGG 構造グラフェンチャンネルトランジスタによる反転分布およびプラズモン不安定性を発振原理としたテラヘルツ波放射の実現に向け、今後解決すべき最重要課題であると言える。

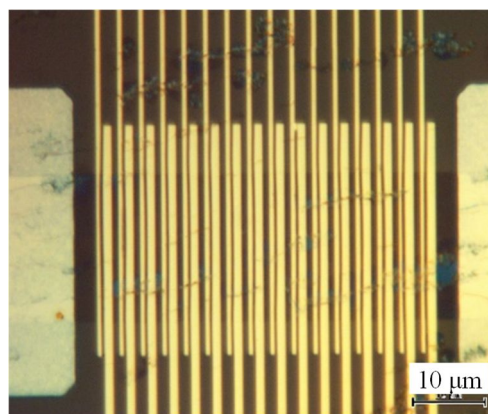


図 3. 試作 DGG-GFET の光学顕微鏡像 .

並行して、DGL 構造を多重化した量子カスケード構造 (図 4) を理論的に検討した。各 DGL が厚さ  $d$  のトンネル障壁で隔てられており、一方の GL にはドナー、もう一方の GL にはアクセプタドープされている。また、各 DGL は厚さ  $f$  の薄い誘電体層によって分離されており、金属柱型コンタクトが DGL の両端に配置されているとする。さらに、厚さ  $t$  の拡張誘電体層が DGL の上に配置されており、表面プラズモン導波路として動作する。デバイスの底部は、DGL とデバイス上部の誘電体層の間に THz の光子場を閉じ込めるように金属基板になっている。この構造における表面プラズモン導波路の TM モードを数値解析によって計算し、DGL 層数と周波数をパラメータとしたモード利得を算出した。第一に、図 5 に示すように THz 周波数帯で利得が発現することを示した。概ね DGL 層数が多いほど利得も大きくなるが、その分、利得が発現する周波数が高くなっている。これは、層数が多いと両端の金属柱も高くなり、導波路モードの電界分布の DGL に平行な成分が強くなるため、Drude 吸収が大きくなることに起因している。今後、導波路モードの電界の平行成分を抑制できる構造を検討する必要があるが、DGL 量子カスケード構造によってテラヘルツレーザーの量子効率が向上しうることを示した。

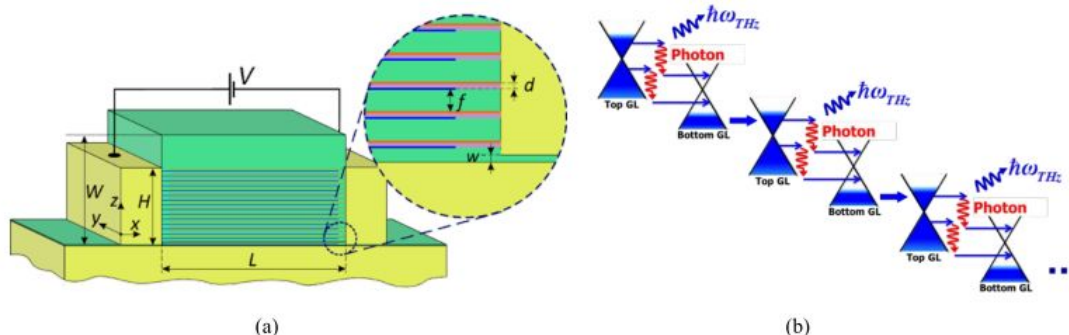


図 4. (a)DGL を多重化した量子カスケード構造の模式図, (b)動作時のバンド図 .

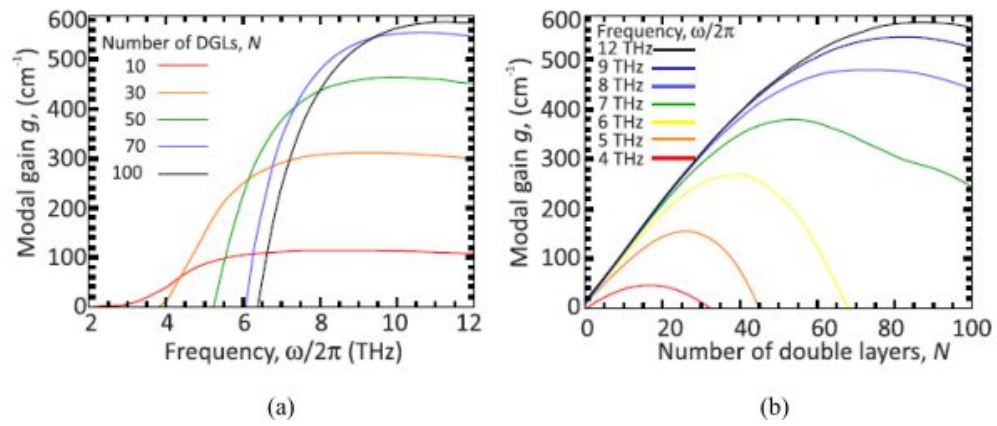


図 5. DGL 量子カスケード構造における表面プラズモン導波路の TM モード利得の(a)周波数依存性および(b)DGL 層数依存性 .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 込山貴大, 渡辺隆之, Sergey Morozov, Mikhail Fadeev, Vladimir Utochkin, 吹留博一, 佐藤昭, 尾辻泰一	4. 巻 119
2. 論文標題 光励起多層グラフェンにおける広帯域テラヘルツ光放射の観測	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 電子デバイス研究会 信学技報, vol. 119, no. 353, ED2019-80, pp.17-20, Dec. 2019.	6. 最初と最後の頁 17-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Watanabe, D. Yadav, S. Boubanga-Tombet, A. Satou, A. A. Dubinov, V. Ryzhii, and T. Otsuji	4. 巻 11124
2. 論文標題 Graphene-based van der Waals heterostructures towards a new type of terahertz quantum-cascade lasers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 11124, Terahertz Emitters, Receivers, and Applications X, 1112406, Sept. 2019.	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1117/12.2529016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Boubanga-Tombet, D. Yadav, T. Watanabe, A. Satou, W. Knap, V. V. Popov, V. Ryzhii, and T. Otsuji	4. 巻 10982
2. 論文標題 Terahertz light amplification of stimulated emission of radiation in current-injection graphene channel transistor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. SPIE 10982, Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications XI, 109822V, May 2019	6. 最初と最後の頁 109822V-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1117/12.2520092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 D. Yadav, G. Tamamushi Gen, T. Watanabe, J. Mitsushio, Y. Tobah, K. Sugawara, A. A. Dubinov, A. Satou, M. Ryzhii, V. Ryzhii, T. Otsuji	4. 巻 7
2. 論文標題 Terahertz light-emitting graphene-channel transistor toward single-mode lasing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 741-752
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) DOI: 10.1515/nanoph-2017-0106	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 菅原健太, 渡辺隆之, Deepika Yadav, 込山貴大, 布施吉貴, Maxim Ryzhii, Victor Ryzhii, 吹留博一, 末光真希, 尾辻泰一	4. 巻 117
2. 論文標題 デュアルゲートグラフェンFETの相互コンダクタンスの温度依存性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 73-76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計24件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 T. Komiyama, T. Watanabe, S. Morozov, M. Fadeev, V. Utochkin, H. Fukidome, A. Satou, and T. Otsuji
2. 発表標題 Realization of the high-performance graphene transistor by controlling the interface between graphene and gate dielectric
3. 学会等名 RPGR2019: Recent Progress on Graphene and 2D Materials Abstracts, 7P-40 (2 pages), Matsue, Shimane, Japan, Oct. 7-9, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Fuse, A. A. Dubinov, T. Watanabe, V. Ya. Aleshkin, S. V. Morozov, A. Satou, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2. 発表標題 Terahertz plasmonic graphene-channel transistor laser
3. 学会等名 MTSA2019: The 5th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications Abstracts, Ap2-4 (1 page), Hanwha Resorts Haeundae Tivoli, Busan, Korea, Sept. 30-Oct. 3, 2019. (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Hosotani, T. Watanabe, A. Satou, and T. Otsuji
2. 発表標題 Terahertz emission from an asymmetric dual-grating-gate InGaAs high-electron-mobility transistor stimulated by plasmonic boom instability
3. 学会等名 IRMMW-THz2019: International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves Abstracts Book, Th-AM-6-3 (3 pages), Paris, France, Sept. 2-6, 2019. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874584 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Otsuji, D. Yadav, S. Boubanga-Tombet, T. Watanabe, A.A. Dubinov, and V. Ryzhii
2 . 発表標題 Graphene-based van der Waals heterostructures towards a new type of terahertz quantum-cascade lasers
3 . 学会等名 RJUSE2019: 8th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies, & GDR-I FIR-LAB Workshop, Tu-1-1, Nizhny Novgorod, Russia, July 8-11, 2019. (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 V.V. Utochkin, S.V. Morozov, M.A. Fadeev, V.V. Rumyantsev, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, T. Komiyama, T. Watanabe, H. Fukidome, A. Satou, T. Otsuj
2 . 発表標題 Terahertz photoluminescence from narrow gap HgTe/CdHgTe heterostructures and multilayer graphene
3 . 学会等名 RJUSE2019: 8th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies, & GDR-I FIR-LAB Workshop, P-13, Nizhny Novgorod, Russia, July 8-11, 2019. (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Komiyama, T. Watanabe, S., Morozov, M. Fadeev, V. Utochkin, H. Fukidome, A. Satou, and T. Otsuji
2 . 発表標題 Observation of THz/Mid-IR Emission from Multilayer Graphene Pumped by Near-IR Pulsed Laser
3 . 学会等名 A3 foresight 2D materials, Sogang, Seoul, Korea, July 1-2, 2019 (ポスター発表) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Watanabe
2 . 発表標題 Terahertz light emitting and lasing operation in graphene-based heterostructure 2D material systems
3 . 学会等名 The 2nd International Workshop on 2D Materials A3 Foresight (国際学会)
4 . 発表年 2019年



1 . 発表者名 D. Yadav, S. Boubanga-Tombet, G. Tamamushi, T. Watanabe, A. Satou, A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2 . 発表標題 Terahertz current-driven plasmonic lasing and amplification
3 . 学会等名 WINDS 18: International Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 D. Yadav, T. Watanabe, S. Boubanga-Tombet, A. Satou, V. Ryzhii, M. Ryzhii, A.A. Dubinov, W. Knap, V.V. Popov, T. Otsuji
2 . 発表標題 Graphene-based 2D heterostructures for terahertz photonic and plasmonic light-sources applications
3 . 学会等名 ICMNE-2018: International Conference on Nano- and Micro-Electronics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Otsuji, D. Yadav, S. Boubanta-Tombet, T. Watanabe, A. Satou, A.A. Dubinov, M. Ryzhii, V.V. Popov, W. Knap, V. Mitin, M.S. Shur, and V. Ryzhii
2 . 発表標題 Emission and amplification of terahertz radiation using Dirac fermions and plasmons in graphene
3 . 学会等名 RJUSE: the 7th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kenta Sugawara, Norifumi Endo, Takayuki Watanabe, Takahiro Komiyama, Yoshiki Fuse, Hirokazu Fukidome, Maki Suemitsu, and Taiichi Otsuji
2 . 発表標題 Improved crystallographic high quality of thermally decomposed epitaxial graphene on 6H-SiC
3 . 学会等名 Graphene 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 D. Yadav, T. Watanabe, A. Satou, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2. 発表標題 Terahertz light emission and lasing in current-injection graphene-channel transistors
3. 学会等名 2nd Edition of Graphene & Semiconductors   Diamond, Graphite & Carbon Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原健太, 渡辺隆之, 込山貴大, 布施吉貴, Ryzhii Maxim, Ryzhii Victor, 遠藤則史, 吹留博一, 末光真希, 尾辻泰一
2. 発表標題 SiC 基板の熱分解法によるグラフェンの結晶品質向
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Sugawara, T. Watanabe, T. Komiyama, T. Fuse, M. Ryzhii, V. Ryzhii, H. Fukidome, M. Suemitsu, and T. Otsuji
2. 発表標題 Temperature dependence of the conductivity in dual gate graphene field effect transistors
3. 学会等名 RJUSE TeraTech 2017: Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sugawara, D. Yadav, Y. Tobah, J. Mitsushio, G. Tamamushi, T. Watanabe, A.A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2. 発表標題 Terahertz light emitting graphene-channel transistor operating under current-injection pumping
3. 学会等名 TWHM: Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 D. Yadav, Y. Tobah, K. Sugawara, J. Mitsushio, G. Tamamushi, T. Watanabe, A.A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2 . 発表標題 Terahertz LED based on current-injection dual-gate graphene-channel field effect transistors
3 . 学会等名 DRC: 75th Annual Device Research Conference ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 D. Yadav, Y. Tobah, J. Mitsushio, G. Tamamushi, T. Watanabe, A.A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2 . 発表標題 Broadband terahertz-light emission by current-injection distributed-feedback dual-gate graphene-channel field-effect transistor
3 . 学会等名 CLEO: Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 D. Yadav, Y. Tobah, G. Tamamushi, J.i Mitsushio, T. Watanabe, A.A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2 . 発表標題 Current-injection terahertz emission in distributed-feedback dual-gate graphene-channel field-effect transistor
3 . 学会等名 OTST'17: Int. Conf. Optical Terahertz Science and Technology ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 D. Yadav, T. Watanabe, S. boubanga-Tombet, A. Satou, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2 . 発表標題 Terahertz light emission and lasing in graphene-based van der Waals 2D heterostructures
3 . 学会等名 WINDS17: 16: 2017 International Workshop on Innovative Nanoscale Devices and Systems ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 D. Yadav, Y. Tobah, K. Sugawara, J. Mitsushio, G. Tamamushi, T. Watanabe, A.A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji
2 . 発表標題 Terahertz light emitting transistor based on current injection dual-gate graphene-channel FET
3 . 学会等名 IRMMW-THz: 42nd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Otsuji, D. Yadav, T. Watanabe, S.A. Boubanga-Tombet, V. Ryzhii, A.A. Dubinov, D. Svintsov, M. Ryzhii, V. Mitin, and M.S. Shur
2 . 発表標題 Broadband terahertz light emission and lasing in graphene-based van der Waals heterostructures
3 . 学会等名 EMN: Energy Materials Nanotechnology Lyon Meeting on 2D Materials (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Otsuji, T. Watanabe, A. Satou, D. Yadav, S. Boubanga-Tombet, T. Suemitsu, and V. Ryzhii
2 . 発表標題 Terahertz light emission in graphene-based active plasmonic metamaterial heterostructures
3 . 学会等名 META'17: the 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T. Otsuji, D. Yadav, T. Watanabe, S. Boubanga-Tombet, A. Satou, T. Suemitsu, V. Ryzhii, A.A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Mitin, and M.S. Shur
2 . 発表標題 Terahertz light emission and lasing in graphene transistors under current-injection pumping
3 . 学会等名 RJUSE TeraTech 2017: Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Hosotani, F. Kasuya, H. Taniguchi, T. Watanabe, T. Suemitsu, T. Otsuji, T. Ishibashi, M. Shimizu, and A. Satou
2. 発表標題 Lens-integrated asymmetric-dual-grating-gate high-electron-mobility-transistor for plasmonic terahertz detection
3. 学会等名 IEEE IMS: 2017 IEEE Int. Microwave Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----