

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14243

研究課題名(和文)半導体二次元プラズモニックブームの発生とそのテラヘルツ応用

研究課題名(英文)Generation of the semiconductor two-dimensional plasmonic boom and its application to terahertz devices

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：単層グラフェン内二次元電子電荷の集団密度振動波(プラズマ波)に対する電子ドリフト流の超速度現象を利用したプラズモン不安定性の一種であるプラズモニックブームの発現とそのテラヘルツ電磁波発生・増幅への応用に挑戦した。グラフェンチャネル電界効果トランジスタに非対称二重回折格子ゲートを導入し、電子ドリフト速度がプラズマ波速度を交差して空間的に繰り返し変調される系を構成した。理論的には、ドリフト速度がプラズマ波速度を超越した瞬間に超音速のごとき衝撃波(プラズモニックブーム)の発生が期待される。素子試作評価の結果、室温下でプラズモン不安定性に起因するテラヘルツ波の巨大誘導増幅放出の実証に初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：We explored the generation of the plasmonic boom, a kind of plasmon instability utilizing the super velocity phenomenon of collective charge density waves of two-dimensional electrons in monolayer graphene and their application to the generation and amplification of terahertz electromagnetic wave radiations. An asymmetric dual-grating-gate structure was introduced into the graphene channel field-effect transistor to spatially and periodically modulate the electron drift velocity and the plasma wave velocity crossing over each other at the periodic boundaries. It is theoretically expected that intense shock waves (plasmonic boom) such as supersonic will occur at the moment the drift velocity exceeds the plasma wave velocity. We designed and fabricated the device and experimentally verified the occurrence of the plasmonic instability driven giant light amplification of stimulated emission of terahertz radiation at room temperature for the first time.

研究分野：テラヘルツ光電子工学

キーワード：テラヘルツ/赤外材料・素子 マイクロ・ナノデバイス 半導体プラズモニクス 量子エレクトロニクス 電子デバイス・機器

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。近年、半導体二次元量子井戸や二次元原子薄膜内の電荷密度集団振動波 (プラズマ波) の不安定性を利用した自励発振素子が提案され、実験検証が進んでいるが、単色性の高いコヒーレントな発振は本研究代表者らが低温環境下で実現した実証例のみに留まっている。

2. 研究の目的

本研究は、高強度コヒーレントテラヘルツ光源への応用を目的として、半導体二次元量子井戸や二次元原子薄膜内の電子電荷の集団密度振動波 (プラズマ波) に対する電子ドリフト流の超速度現象を利用した衝撃波 (プラズモニックブーム) の発生に他に先駆けて挑戦する。

3. 研究の方法

高電子移動度トランジスタのチャンネル寸法を周期的に変調し、電流連続式に従って電子ドリフト速度がプラズマ波速度を交差して空間的に繰り返し変調される系を構成する。理論的には、ドリフト速度がプラズマ波速度を超越した瞬間に超音速のごとき強烈な衝撃波 (プラズモニックブーム) の発生が見込まれる。これを周期的に重畳させることで、従来にない巨大なプラズマ不安定性を生じせしめ、かつ、素子の周期構造をアンテナおよび共振器として作用せしめ、コヒーレントなテラヘルツ波発生・放射、ならびにテラヘルツ波増幅を実現するものである。

時間領域有限差分法で電磁流体方程式と電荷連続 (Poisson) 方程式を自己無撞着に解析する手法をベースとしてグラフエンプラズモンの不安定性を数値解析できるツールを構築し、素子設計の拠り所とする。所属部局所有の半導体集積加工プロセス設備を駆使してプラズモニックブーム発生用の独自構造によるトランジスタを既存半導体に比して電子輸送特性に優れたグラフエンプラズモン系により試作し、実験実証に挑む。

4. 研究成果

(1) プラズモニックブームのモデリング

プラズマ波速度と電子ドリフト速度を相反的に変調し得る構造として、研究代表者らオリジナルの非対称二重回折格子ゲート (ADGG, Asymmetric Dual-Grating Gate) を有する InP 系高電子移動度トランジスタ (HEMT, High-Electron-Mobility Transis-

tor) およびグラフエンプラズモン電界効果型トランジスタ (GFET, Graphene-channel FET) 構造を基本素子構造として採用した。InGaAs チャンネル内二次元電子およびグラフエンプラズモン内ディラックフェルミオン電子における電子流体としての非線形波動の挙動を、準古典的 Boltzmann 輸送方程式によって定式化し、ENO (Essentially Non-Oscillatory) スキームによる時間領域有限差分法で電荷連続 (Poisson) 方程式を自己無撞着に解析する手法をベースとして、2.5 次元 (厚さ方向に自由度がない) でモデル化した。

InP 系 HEMT と GFET との電子輸送特性の比較から、よりプラズモニックブームの発現が期待できる GFET を検討対象として絞り込みを行った。室温下でゲートバイアスによって静電的に変調可能な電子濃度範囲 ($10^{12} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) では、プラズモニックブーム発生条件となるドリフト速度がプラズマ速度を超越する条件は得られず、電子濃度変調境界におけるドップラーシフト作用に起因する Dyakonov-Shur 型不安定性と電子濃度変調に伴う電子速度変調作用に起因する Ryzhii-Satou-Shur 型不安定性とが重畳して発生することを本数値解析によって明らかにした (図 1, 2)。

得られた結果から演繹して、電子濃度変調範囲の拡大が可能な低温環境下においては、プラズモニックブームの発現が可能であること、さらには、電子濃度変調境界で発現したプラズモニックブームに伴うプラズモン衝撃波の後退波成分がプラズモン減衰を受けにくい高電子濃度領域を往復伝搬するこ

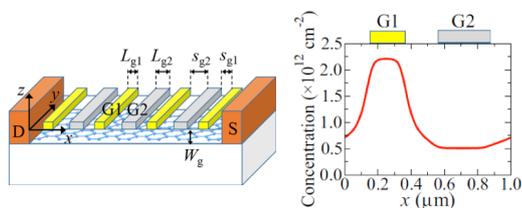


図 1. ADGG-GFET 素子とその相補的ゲートバイアス印加による電子濃度空間分布例。

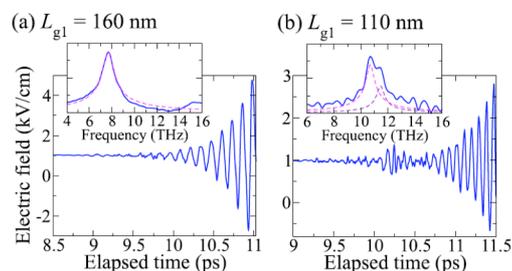


図 2. G1 ゲート長 2 水準におけるチャンネル面内電界強度の時間発展解. プラズモン不安定性の発現により、ゲート長 (共振器長) と電子濃度で定まるプラズモン共鳴周波数において自励発振が得られていることが見て取れる。

とによって、共鳴周波数成分のみが増長され、結果としてコヒーレント共鳴発振が得られるとの見通しを得た。

(2) プラズモニックブーム素子の設計・試作・評価

ADGG-GFET の第一ゲート G1 と第二ゲート G2 に相補的にバイアスを印加し、回折格子ゲート構造に対応して、周期的に電子濃度を空間変調する。高電子濃度域から低電子濃度域に遷移する境界域で電子速度は低速から高速に、プラズモン速度は高速から低速に遷移し、プラズモニックブームの発現が期待される。ゲートバイアスで変調可能な電子濃度範囲を仮定して、プラズモン共鳴周波数が 1 ~ 3 THz 付近に収まるように、G1, G2 のゲート長 Lg1, Lg2 を 100 nm, 800 nm, 両ゲート感覚 d1, d2 を 200 nm, 600 nm とそれぞれ非対称に設計した。

グラフェンチャネルはバルク結晶の機械的剥離・転写によって精製した h-BN で覆った。SiO₂/Si 基板上にまず、バルクグラファイトからの機械的剥離・転写によって h-BN 膜をバッファ層として製膜した。その直上にトランジスタチャネル材料となる単層グラフェンをバルクグラファイトからの機械的剥離・転写によって製膜した。さらに、ゲート絶縁膜として h-BN 層を転写し、ゲート金属を蒸着露光リフトオフによって形成した。ソース・ドレイン電極のオーミックコンタクトは Ti/Au の積層で形成した (図 3)。

試作素子の G1 に高バイアス印加してその直下のチャネル内を高電子濃度に保ち、G2 にディラック電位を印加してその直下のチャネル内を空乏化する。その状態でドレイン直流バイアスを 0V から徐々に上昇させながら、100 fs 半値全幅のテラヘルツパルスを素子に照射し、その透過光パルス時間応答波形をテラヘルツ時間分光計測装置を用いて測定し、フーリエ変換して周波数応答スペクトルを算出した。素子を除外した時の周波数応答スペクトルを予め測定しておき、それを除することによって、素子自身の吸収スペクトルを算出・プロットした。

その結果、ドレインバイアス 0V 時には G1 領域のプラズモン共鳴周波数に対応する単峰性の吸収スペクトルが観測され、ドレインバイアスの上昇とともに吸収ピークは低域にシフトしながら強度が低下し、やがて測定範囲内で吸収ゼロの完全透明となった。さらにドレインバイアスを上昇させると負の吸収スペクトル、すなわち利得スペクトルが発現し、ドレインバイアスの上昇とともに吸収ピークは高域にシフトしながら強度を増した (図 4)。

この現象は、プラズモニックブームを含む Cherenkov 型不安定性理論で記述される分散関係と完全な一致をみた (図 5)。この結果より、観測されたテラヘルツ波の吸収ならびに

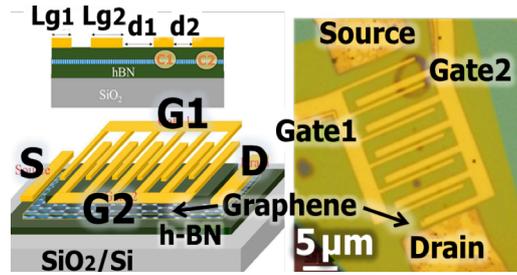


図 3. 試作した ADGG-GFET の断面および鳥瞰図と光学顕微鏡写真。

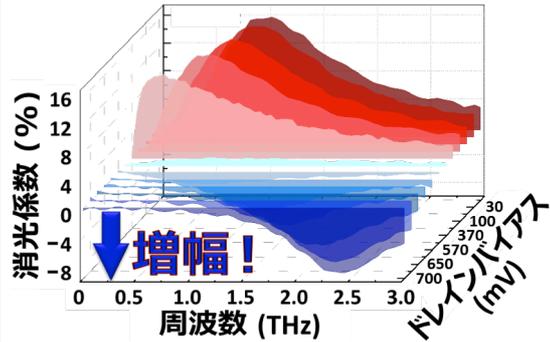


図 4. テラヘルツパルス透過光計測から得られた共鳴吸収・増幅スペクトルのドレインバイアス依存性。

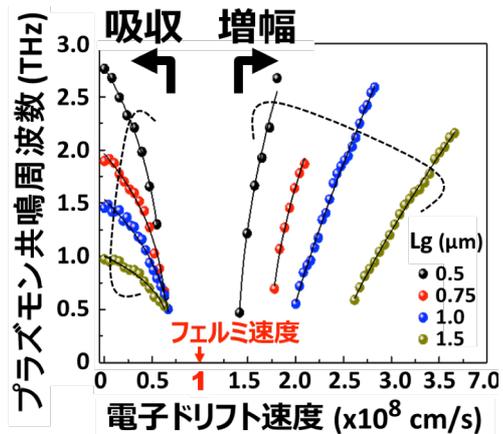


図 5. ゲート長 Lg の異なる 4 種の素子における共鳴周波数の電子ドリフト速度依存性に見えるプラズモン異常不安定性とそのテラヘルツ利得増幅特性。実線は理論曲線。増幅領域ではフェルミ速度を超越した電子ドリフト速度が同定された。

増幅はプラズモンの共鳴吸収および共鳴増幅によるものであることが明らかとなった。共鳴増幅とは、プラズモンが不安定状態となり、自励発振している状況下で入射テラヘルツパルスによって誘導放出された成分によるコヒーレントな増幅として理解できる。すなわち、プラズモン不安定性によって誘導放出されたテラヘルツ波の増幅 (Terahertz amplification of stimulated emission of

radiation via plasmon instabilities) である。

しかしながら、このフィッティングで同定した電子ドリフト速度は、グラフェンのバンド分散によって決定されるフェルミ速度（電子が取り得る最高速度、 1×10^8 cm/s）を3倍も超越する理論上不可能な超高速度を示した（図5）。この原因については、合理的に解釈し得る2つの仮説を想起しており、今後のさらなる解明が待たれるところである。

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19件）代表的成果を挙げる。

- ① D. Yadav, G. Tamamushi, T. Watanabe, J. Mitsushio, Y. Tobah, K. Sugawara, A.A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Terahertz light-emitting graphene-channel transistor toward single-mode lasing," *Nanophotonics*, vol. 7, pp. 741-752, Apr. 2018. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0106 (査読有)
- ② S. Boubanga-Tombet, D. Yadav, W. Knap, V.V. Popov, and T. Otsuji, "Plasmonic instabilities and terahertz waves amplification in graphene metamaterials," arXiv: 1801.04518, Jan. 2018. (査読無)
- ③ O.V. Polischuk, D. V. Fateev, T. Otsuji, and V.V. Popov, "Plasmonic amplification of terahertz radiation in a periodic graphene structure with the carrier injection," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, pp. 081110-1-4, Aug. 2017. DOI: 10.1063/1.4990620 (査読有)
- ④ A.A. Dubinov, A. Bylinkin, V. Ya Aleshkin, V. Ryzhii, T. Otsuji, and D. Svintsov, "Ultra-compact injection terahertz laser using the resonant inter-layer radiative transitions in multi-graphene-layer structure," *Opt. Exp.*, vol. 24, pp. 29603-29612, 2016. DOI:10.1364/OE.24.029603 (査読有)
- ⑤ V. Mitin, V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, and M.S. Shur, "Plasmonic enhancement of terahertz devices efficiency," *Int. J. High Speed Electron. Sys.*, vol. 25, pp. 1640019-1-7, Dec. 2016. DOI: 10.1142/S012915641640019X (査読有)
- ⑥ D. Svintsov, Zh. Devizorova, T. Otsuji, and V. Ryzhii, "Plasmons in tunnel-coupled graphene layers: Backward waves with quantum cascade gain," *Phys. Rev. B*, vol. 94, pp. 115301-1-12, 2016. DOI: 10.1103/PhysRevB.94.115301 (査読有)
- ⑦ 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*, vol. 93, pp. 245408-1-5, Jun. 2016. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.245408 (査読有)

〔学会発表〕（計19件）代表的成果を挙げる（全て査読有り）。

- ① S. Boubanga-Tombet, D. Yadav, W. Knap, V. V. Popov, and T. Otsuji, "Graphene-channel-transistor terahertz amplifier," *DRC: the 76th Annual Device Research Conference*, UCSB, CA, USA, June 24-27, 2018.
- ② S. Boubanga-Tombet, D. Yadav, W. Knap, V. V. Popov, and T. Otsuji, "Terahertz light amplification by current-driven plasmon instabilities in graphene," *CLEO: Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics, SW4D.4*, San Jose, CA, USA, May 13-18, 2018. DOI: 10.1364/CLEO_SI.2018.SW4D.4
- ③ T. Otsuji, "Terahertz light emission and lasing in graphene-based van der Waals 2D heterostructures," *XXII International Symposium on Nanophysics and Nanoelectronics*, Nizhny Novgorod, Russia, March 12-16, 2018. **(Invited)**
- ④ T. Otsuji, "Terahertz light emission and lasing in graphene transistors under current-injection pumping," *MTSA2017- CTOX-MAND-TeraNano-8*, Okayama, Japan, Nov. 19-23, 2017. **(Invited)**
- ⑤ T. Otsuji, "Terahertz light emission and lasing in graphene-based vdW 2D heterostructures," *RPGR2017: Int. Conf. Recent Progress in Graphene and 2D Materials Research*, Singapore, Sept. 19-22, 2017. **(Invited)**
- ⑥ T. Otsuji, "Terahertz light emission and lasing in graphene-based heterostructure 2D material systems -theory and experiments," *NANOP 2017: International Conference on Nanophotonics and Micro/Nano Optics Abstract Book*, pp. 115-116, Barcelona, Spain, Sept. 13-15, 2017. **(Invited)**
- ⑦ D. Yadav, Y. Tobah, K. Sugawara, J. Mitsushio, G. Tamamushi, T. Watanabe, A. A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Terahertz light emitting transistor based on current injection dual-gate graphene-channel FET," *IRMMW-THz: 42nd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, Cancun, Quintana Roo, Mexico, Aug. 30, 2017. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2017.8067215 **(Invited)**
- ⑧ T. Otsuji, T. Watanabe, A. Satou, D. Yadav, S. Boubanga-Tombet, T. Suemitsu, and V. Ryzhii, "Terahertz light emission in graphene-based active plasmonic metamaterial heterostructures," *META'17: the 8th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, Incheon, Korea, 25-28 July 2017. **(Invited)**
- ⑨ D. Yadav, Y. Tobah, K. Sugawara, J. Mitsushio, G. Tamamushi, T. Watanabe, A. A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Terahertz LED based on current-injection dual-gate

graphene-channel field effect transistors,"
DRC: 75th Annual Device Research Conference,
Notre Dame, IN, USA, May 26-28, 2017. DOI:
10.1109/DRC.2017.7999519

⑩ D. Yadav, Y. Tobah, J. Mitsushio, G. Tamamushi, T. Watanabe, A. A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Broadband terahertz-light emission by current-injection distributed-feedback dual-gate graphene-channel field-effect transistor," CLEO: Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics, San Jose, CA, USA, May 14-19, 2017. DOI: 10.1364/CLEO_AT.2017.AM2B.7

⑪ D. Yadav, Y. Tobah, G. Tamamushi, J. Mitsushio, T. Watanabe, A. A. Dubinov, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Current-injection terahertz emission in distributed-feedback dual-gate graphene-channel field-effect transistor," OTST'17: Int. Conf. Optical Terahertz Science and Technology, London, UK, April 2-7, 2017.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[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

なし

(3) 連携研究者

トンベット ステファン (TOMBET, Stephane)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号: 00726911

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

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

檜原 浩一 (NARAHARA, Koichi)
神奈川工科大学・工学部・教授
研究者番号: 00422171

(4) 研究協力者

リズイー ヴィクトール (RYZHII, Victor)
末光 哲也 (SUEMITSU, Tetsuya)
シュール ミハエル (SHUR, Michael S.)
アイジン グレゴリ (AIZIN, Gregory R.)
ポポフ ヴィチャスラフ (POPOV Vychaslav V.)