

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820122

研究課題名（和文）新規グラフェンTHzプラズモニックデバイスの理論的検証

研究課題名（英文）Theoretical Verification of Novel Graphene Terahertz Plasmonic Devices

研究代表者

佐藤 昭 (Satou, Akira)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：70510410

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、グラフェン中プラズモンを利用した室温動作テラヘルツ波プラズモニックデバイス実現のため、非対称二重格子ゲート構造グラフェントランジスタにおけるプラズモン不安定性を中心として、単層グラフェンにおけるバンド間反転分布形成やグラフェン二重層における共鳴トンネル効果など、デバイス動作原理の理論的検証を行なった。特に非対称二重格子ゲート構造グラフェントランジスタにおいては、Dyakonov-Shur不安定性とRyzhii-Satou-Shur不安定性が同時発現することによって巨大プラズモン不安定性が起ることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, for the realization of room-temperature operating terahertz plasmonic devices utilizing graphene plasmons, we theoretically verified device operation principles of plasmonic devices such as plasmon instabilities in asymmetric dual-grating-gate graphene transistors, interband population inversion in monolayer graphene, and resonant tunneling in double graphene layer. Especially, in the asymmetric dual-grating-gate graphene transistors, we demonstrated that a giant plasmon instability can take place due to the simultaneous occurrence of the so-called Dyakonov-Shur instability and Ryzhii-Satou-Shur instability.

研究分野：工学

キーワード：グラフェン テラヘルツ プラズモン

1. 研究開始当初の背景

無線通信の極限大容量高速化に必須である、周波数 1THz 付近で室温動作する高出力発生器・高感度検出器は未だに実現されていない。これらの要件を満たすデバイスとして、二次元結晶であるグラフェン中のプラズモンを活用した、THz プラズモニックデバイスの研究が注目を集めている。高品質なグラフェンにおいては、室温下でのプラズモン減衰レートが 10^{11} s^{-1} 程度と非常に小さく、化合物半導体ヘテロ構造二次元電子チャネルを用いた従来のプラズモニックデバイスよりも格段に優れた性能を持ちうる。理論的に示されている。特に、従来のデバイスでは未だ成功していない、無線通信に最も有用である 0.3-1THz 帯域における、室温下での単一周波数コヒーレント発生器および共鳴検出器の実現が期待される。

申請者は、化合物半導体プラズモニックデバイスにおいて、動作周波数の構造依存性 [Ryzhii, Satou *et al.*, JAP 2006]、検出原理である非線形性の解明と検出器性能の理論的評価 [Satou *et al.*, Int. J. High Speed Electron. Syst. 2007] など、プラズモニックデバイスの基礎理論を確立してきた。発生原理であるプラズマ不安定性の理論では、プラズモンの非対称境界条件に起因する Dyakonov-Shur (DS) 不安定性 [Dyakonov and Shur, PRL 1993] と、空乏チャネル領域での電子走行時間効果による Ryzhii-Satou-Shur (RSS) 不安定性の同時発現により、強い不安定性が得られることを明らかにした [Ryzhii, Satou, Shur, IEICE Trans. Electron. 2006]。グラフェン中プラズモンに関しては、格子ゲート構造におけるプラズモン周波数のゲート電圧による広帯域変調性とプラズモン閉じ込め効果を明らかにするなど [Satou *et al.*, Proc. SPIE 2013]、グラフェンを用いて従来より格段に優れたプラズモニックデバイスが実現できることを示してきた。

さらに、バンド間反転分布形成によるプラズモン巨大増幅効果 [Dubinov *et al.*, J. Phys.: Cond. Matt. 2012]、電子・ホール散乱による非常に強いプラズモン減衰 [Svintsov *et al.*, JAP 2011]、グラフェン二重層における共鳴トンネル効果を使ったプラズモン増幅 [Sensale-Rodriguez, APL 2013] など、グラフェン中プラズモン特有の現象が次々に明らかになってきている。グラフェン THz プラズモニックデバイスの実現に向けて、これらの先行研究で得られた知見に立脚し、新規デバイス構造の提案および動作原理の解明を行なう必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、グラフェン中プラズモンを利用した室温動作テラヘルツ (THz) 波プラズモニックデバイス実現のため、非対称二重格子ゲート構造グラフェン FET におけるプラズモン不安定性を中心として、単層グラフェン

におけるバンド間反転分布形成やグラフェン二重層における共鳴トンネル効果など、デバイス動作原理の理論的検証を行なうとともに、デバイスの基礎理論体系を構築した。

具体的には、以下の項目を主に行なった：

- (1) 非対称二重格子ゲート構造における巨大プラズモン不安定性の解明
- (2) キャリア間散乱を考慮した数値モデルの構築とキャリア間散乱がバンド間反転分布形成に及ぼす影響の解析
- (3) 電子間相互作用によるバンドブロードニングのオージェ再結合・衝突イオン化への影響の解析
- (4) グラフェン FET の測定 I-V 特性からゲート直下の真性移動度を抽出するフィッティングモデルの構築

3. 研究の方法

それぞれの項目における研究方法について以下に示す。

(1) 申請者が開発した、半古典ボルツマン方程式とポアソン方程式をセルフコンシステントに解くシミュレータ [Satou *et al.*, Proc. SPIE 8624, 862412 (2013)] を用い、非対称二重格子ゲート構造グラフェントランジスタ (図 1 (a)) に直流電流を注入したときのプラズモン不安定性を解析した。電流注入は、定常外部電界をかけて行なった。また、適切なゲート電圧印加と電子ドープにより定常電子密度分布が図 1 (b) のように、ゲート 1 下では高電子密度、ゲート 2 下では低電子密度にすることで、DS 不安定性と RSS 不安定性の同時発現を図った。電子散乱に関しては、室温の音響フォノン散乱を考慮した。

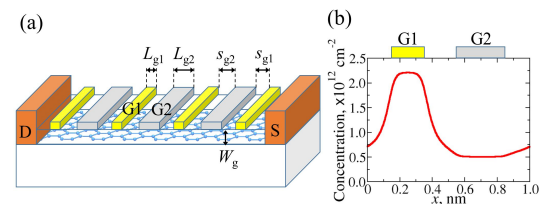


図 1 : (a)非対称二重格子ゲート構造グラフェントランジスタの模式図、(b)定常電子密度分布。

(2) 空間的に一様な系を仮定し、グラフェン内キャリア間散乱を考慮しボルツマン方程式を解くシミュレータ (申請者開発) を用い、 $1.55\mu\text{m}$ 波長フェムト秒パルスレーザー励起および CW レーザ励起によるバンド間反転分布形成のキャリア間散乱の影響を解析した。キャリア間散乱は散乱積分を直接評価するその他の散乱要因としては、バンド内・バンド間光学フォノン散乱を考慮した。

(3) 厳密な線形エネルギー分散が成り立つときは禁制されるオージェ再結合・衝突イオン化に関して、高品質グラフェンにおける電子間相互作用による線形分散の補正が及ぼす影響の定性的な解析のため、第一段階として、ドープされたグラフェンにおける線形分散の補正、特にバンド幅のブロードニングの

モデリングを行なった。

従来の絶対零度における電子間相互作用による電子自己エネルギーの計算法[Hwang & Das Sarma, Phys. Rev. B 77, 2 (2008)]を、実デバイスにおける光励起やキャリア注入を考慮し、有限温度の場合でも計算できるように拡張した。開発したシミュレータを用いて自己エネルギー虚部に比例するバンドブロードニング幅（準粒子寿命の逆数）を計算し、そのキャリア温度依存性を明らかにすることで、オージェ再結合・衝突イオン化への電子間相互作用の影響を議論した。

(4) 実プラズモニックデバイスの性能を決定する重要なデバイスパラメータである移動度を、測定されたI-V特性からフィッティングにより抽出するモデルの構築を目的とし、第一段階として単ゲート・グラフェンFET(図2(a))に関するフィッティングモデルを構築した。チャンネル全体が電子ドープされていると仮定し、ゲート直下のn-i-n, n-p-n接合(図2(b))におけるトンネル電流・熱放出電流を考慮するとともに、キャリア運動量緩和時間のフェルミ準位を介したゲート電圧依存性を考慮した。図2(c)のように全体のチャンネル抵抗はゲート下チャンネル抵抗、ゲート端接合抵抗、アクセス・コンタクト抵抗の和となる。各抵抗を含むフィッティングパラメータをI-V特性から求めることで、ゲート下の真性移動度を抽出することができる。

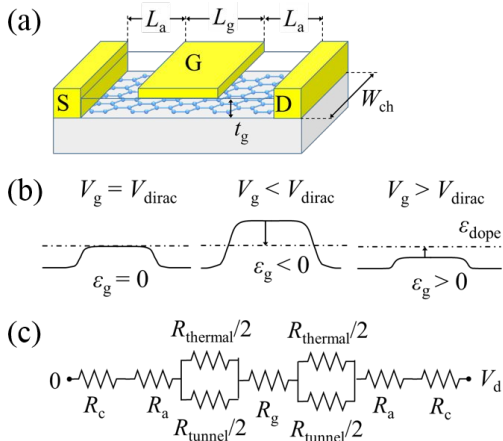


図2：(a)単ゲート・グラフェンFETの模式図、(b)ゲート直下のバンド構造、(c)チャンネル抵抗の等価回路。

4. 研究成果

それぞれの項目における研究成果について以下に示す。

(1) デバイスパラメータを以下の通り設定し、シミュレーションを行なった：定常外部電界 $E = 0.8 \text{ kV/cm}$ 、ゲート絶縁膜厚 $W_g = 50 \text{ nm}$ 、背景誘電率 $\epsilon = 4$ 、ゲート間隔 $s_{g1} = 200 \text{ nm}$ 、 $s_{g2} = 300 \text{ nm}$ 、ゲート長 $L_{g1} = 100\text{-}400 \text{ nm}$ 、 $L_{g2} = 300 \text{ nm}$ (図1(a)参照)。図3に、 $L_{g1} = 110, 160 \text{ nm}$ としたときのゲート2下チャンネル中央における電界の時間発展を示す。振動が起き、時間が経つにつれてその振

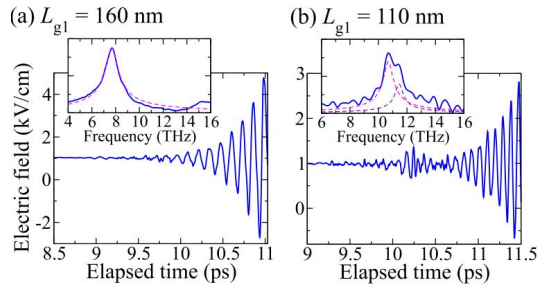


図3：(a) $L_{g1} = 160 \text{ nm}$ 、(b) $L_{g1} = 110 \text{ nm}$ のときのチャンネル中電界の時間発展。

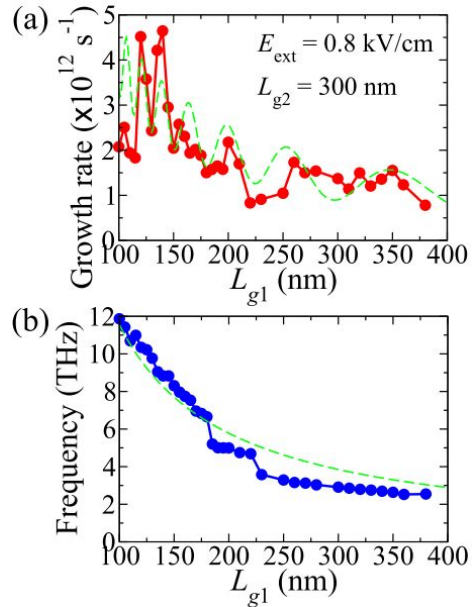


図4：基本プラズモンモードにおける(a)不安定性成長指数、(b)周波数のゲート長依存性。

幅が大きくなっていくことが確認できる。このことから、直流注入によってプラズモン不安定性が発現し、自励発振が起きていることが分かる。 $L_{g1} = 160 \text{ nm}$ (図3(a))のときは、波形は正弦波形状から若干歪んでいるものの、ほぼ単一周波数発振であると言える。図3(a)差込図のフーリエスペクトルからもそのことが分かる。一方、 $L_{g1} = 110 \text{ nm}$ (図3(b))のときは明瞭なうなりが確認でき、図3(b)差込図のフーリエスペクトルから主に2つのプラズモンモードが励起されていることが分かる。他のゲート長でもモードが1つないし2つ励起されることが確認された。

図4に自励発振した基本プラズモンモードにおける不安定性成長指数と周波数のゲート長依存性を示す。図4(a)より、最大で $4.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ を超える成長指数が得られたことが分かる。この値は、従来の半導体材料を用いたプラズモニックデバイスにおける室温下での成長指数と比べ、一桁大きい。この巨大不安定性は、電子散乱によるプラズモン減衰が弱いことと、電子ドリフト速度が大きいことに起因する。また、成長指数のゲート長依存性は振動的な振る舞いを示しており、RSS不安定性の特徴と一致する[Ryzhii, Satou, Shur, IEICE Trans. Electron. 2006]。同時に、振動成分を差し引いたとき、ゲート

長に反比例するような成分が残ることが分かる。これは DS 不安定性の特徴と一致する [Dyakonov and Shur, PRL 1993]。これらのことから、巨大不安定性は、二つの不安定性が同時に発現し、それらの協調的作用によって起こっていることが明らかになった。

(2) 1.55 μm 波長フェムト秒パルスレーザー励起によるバンド間反転分布形成のシミュレーションを行なった。時刻 $t = 0$ ではグラフェンはアンドープで室温下におかれており、フェムト秒光パルスはパルス半値半幅 80 fs のガウシアンパルスとし、 $t = 160$ fs に光パルスのピークが来るとした。

図 5 (a) - (d) に、誘電率 $\epsilon = 2.75$ 、光パルスエネルギー $6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ としたときの電子分布関数 (= キャリア分布関数) の時間発展を示す。図 5 (a) では光パルスがピークを迎えているが、すでに分布関数は広がっている。光パルスが過ぎてわずか数十 fs 後には、キャリアのエネルギー方向の分布はほぼ擬平衡化し (図 5 (b))、そこから 100 fs 程度後には角度方向でも擬平衡化が進む (図 5 (c))。その後はバンド内光学フォノン放出によって数 ps 後に低エネルギー領域にキャリアが集積して反転分布が形成される (図 5 (d))。一方、高誘電率にして誘電遮蔽によってキャリア間散乱を抑制した場合、キャリアの緩和過程は大きく異なる。図 5 (e) - (h) に、誘電率 $\epsilon = 40$ 、光パルスエネルギー $8 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ としたときのキャリア分布関数の時間発展を示す。パルス励起中の分布の広がりには抑制され、キャリアは光励起エネルギーを持ったまま長く留まる (図 5 (e) - (f))。同時に、光励起エネルギーから光学フォノンエネルギー (160, 200 meV) だけ低いところで分布関数が大きくなっていることが分かる (図 5 (f))。この効果によって、キャリア間散乱による擬平衡化が支配的である場合よりも反転分布形成がよ

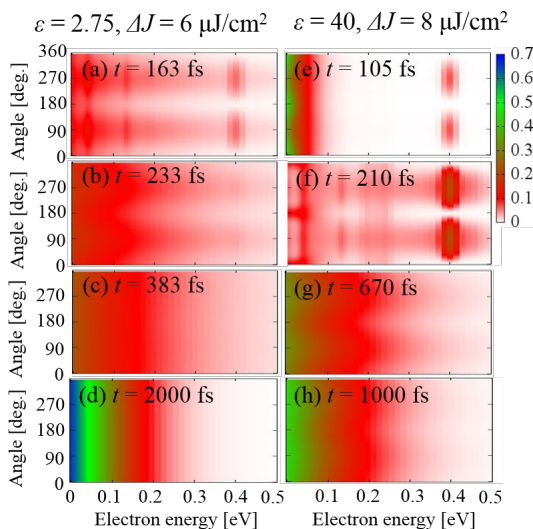


図 5 : 光パルス励起後のグラフェンにおける電子分布関数の時間発展 : (a) - (d) 誘電率 $\epsilon = 2.75$ 、光パルスエネルギー $6 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、(e) - (h) 誘電率 $\epsilon = 40$ 、光パルスエネルギー $8 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。

り強く起こることが示唆されている [Ryzhii et al., JJAP 2011]。

しかしながら、図 6 (a) に示す通り、同じパルスエネルギーで励起した場合には低誘電率の方が得られる反転分布形成は強くなっている。これは高誘電率の場合、図 5 (f) に見られるように光励起エネルギーを持ったままのキャリアが留まることで、パウリブロッキングによって光吸収を阻害する効果が強く、結果として反転分布形成を担うキャリア密度が低下してしまうためである。これは、フェムト秒光パルスでは光強度が非常に高く、吸収されるキャリアの数が多いからとも言える。逆に CW 励起にしてパウリブロッキングの効果を抑えた場合、図 6 (b) に示す通り高誘電率の方が反転分布は強くなる。

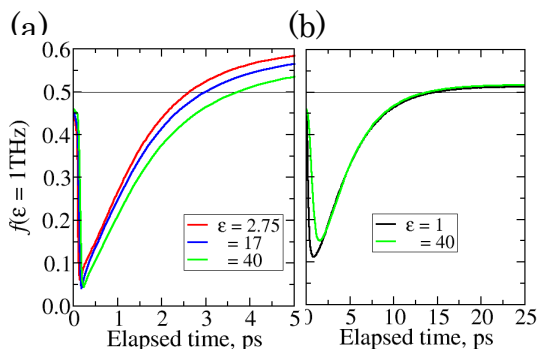


図 6 : (a) エネルギー 2.07 meV (1 THz 光子エネルギーの半分に対応) における電子分布関数の時間発展、(b) 電子密度の時間発展。

(3) 図 7 に、グラフェンを挟む材料の誘電率を $\epsilon = 2.5$ 、フェルミ準位を $E_F = 106.926 \text{ meV}$ (室温下で電子ドープ密度 10^{12} cm^{-2} に相当) としたときの、電子間相互作用による伝導帯電子のバンドブロードニング幅を示す (横軸は電子波数 q をフェルミ波数 $q_F = E_F / \hbar v_F$ で規格化した値)。極低温の場合、波数ゼロとフェルミ波数付近ではブロードニング幅はゼロに近くなり、フェルミ波数より大きくなるとほぼ線形に大きくなっていく。この傾向はキャリア温度が高くなってもある程度同じであるが、ブロードニング幅の大きさは急激に上昇していくことが分かる。これは、キャリア分布関数のフェルミ準位付近における広がりに関係しており、キャリア温度が上がるほど分布関数が広がって自己エネルギー虚部に寄与する電子状態遷移の確率が高くなるためである。

このバンドのブロードニングによって、線形分散では禁制されていたオージェ再結合・衝突イオン化の遷移条件が緩和され、これらの過程が起こる。ブロードニング幅が大きいほど遷移確率は増加するため、ドーピンググラフェンにおいてはキャリア温度が高くなるほどオージェ再結合・衝突イオン化確率が高くなると言える。このことから、反転分布状態であっても同様のことが起こると考えられ、キャリア温度が高いほど反転分布は阻

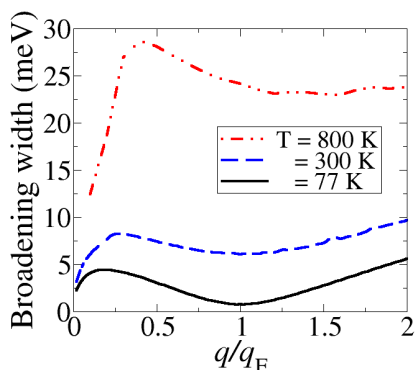


図7：背景誘電率 $\epsilon = 2.5$ 、フェルミ準位 $E_F = 106.926$ meV のときの伝導帯電子のバンドブロードニング幅 (q は電子波数、 $q_F = E_F / \hbar v_F$ はフェルミ波数)。

害され、ひいてはレーザー利得が低下する。逆に、キャリア温度の増加を抑制するようなキャリア励起機構が、グラフェンレーザーの実現には優位である。(2)で議論した光励起に関しては、励起光の光子エネルギーが低いほどキャリア温度は低く抑えられるため優位である。さらには、光励起よりも電流注入によって弱エネルギーキャリア励起を行なった方が、キャリア温度を低減することができるため、優位であるということが言える。

(4)構築したフィッティングモデルを使い、実デバイスのI-V特性をフィッティングした結果を以下に示す。デバイスは、4H-SiC基板のC面にエピタキシャル成長したグラフェンをチャンネルとし、SiNをゲート絶縁膜として用いた単ゲートFETであり、ゲート長4.4 μm 、ゲート幅11 μm 、絶縁膜厚45 nm、アクセス長100 nmである。誘電率は $\epsilon_{\text{SiC}} = 9.7$ 、 $\epsilon_{\text{SiN}} = 4.2$ とした。図8(a)に、同FETのゲート電圧依存チャンネル抵抗とそのフィッティングカーブを示す。図より、実デバイスの特性が非常に良くフィッティングできていることが確認できる。特に、抵抗が最大となる電圧を境とした非対称性が、トンネル抵抗・熱電子放出抵抗を考慮することにより再現されていることが分かる。図8(b)はフィッティングにより抽出されたゲート下の真性移動度および真性トランスコンダクタンスを示している。移動度は最大値が 10^5 cm^2/Vs 以上、真性トランスコンダクタンスが最大となる電圧でも 6×10^5 cm^2/Vs 程度と非常に高い。このデバイスで使用しているSiC基板上グラフェンは大面積で単結晶性を保っているため[玉虫他、信学技報2016]、このような高い真性移動度が得られたと考えられる。また、従来のフィッティングモデルでは単一の移動度値しか得られなかったが、本モデルでゲート電圧依存の移動度を抽出することが可能になった。特にプラズモニクデバイスでは、動作ゲート電圧における移動度(電子運動量緩和時間)が重要となるため、本モデルは実デバイス設計・性能評価のために非常に有用である。

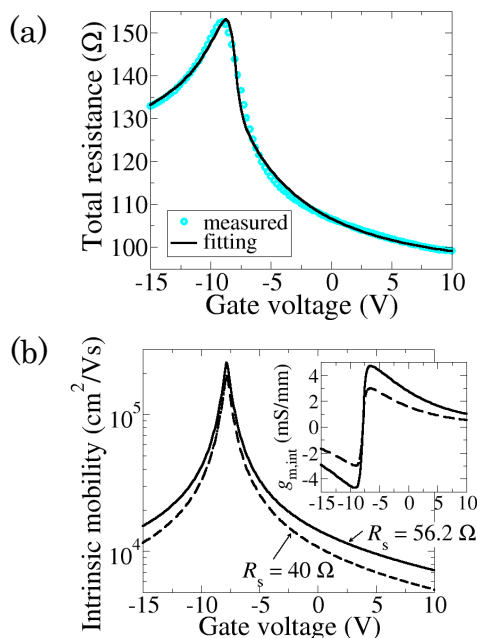


図8:(a) SiC上グラフェンFETのゲート電圧依存チャンネル抵抗(実線)とそのフィッティングカーブ(丸)。(b)フィッティングにより抽出されたゲート直下の真性移動度(差込図:真性トランスコンダクタンス)。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計10件)

- (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(査読有), IEEE Trans. Electron Devices, vol. 63, no. 8, pp. 3300-3306, Aug. 2016. DOI: 10.1109/TED.2016.2578325
- (2) 佐藤昭, 渡辺隆之, 末光哲也, ヴィクトール・リズィー, 尾辻泰一, トランジスタ構造内二次元プラズモンを用いたサブテラヘルツ/テラヘルツデバイス(査読無), 映情学技報, vol. 40, no. 24, pp. 25-32, Aug. 2016.
- (3) Y. Koseki, V. Ryzhii, T. Otsuji, V. V. Popov, and A. Satou, Giant plasmon instability in dual-grating-gate graphene transistor(査読有), Phys. Rev. B, vol. 93, no. 24, pp. 245408 1-5, Jun. 2016. DOI: 10.1103/PhysRevB.93.245408
- (4) A. Satou, Y. Koseki, T. Watanabe, V. V. Popov, V. Ryzhii, and T. Otsuji, Cooperative promotion of plasma instabilities for emission of terahertz radiation in an asymmetric dual-grating gate graphene-channel FET(査読無), Proc. SPIE, vol. 9856, pp. 98560F 1-7, 2016. DOI: 10.1117/12.2227438
- (5) 玉虫元, 菅原健太, 佐藤昭(他4名), グラフェンチャンネルFETにおける真性パラメータの抽出(査読無), 信学技報, vol. 114, no. 387, pp. 63-68, Dec. 2015.

- (6) A. Satou, Y. Koseki, V. Ryzhii, V. V. Popov, and T. Otsuji, Computational study of graphene plasmons: damping mechanisms and instabilities (査読有), Proceedings of the 4th Russia-Japan-USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies, vol.1, pp. 102-104, Jun. 2015.
- (7) A. Satou, Y. Koseki, V. Ryzhii, V. V. Popov, and T. Otsuji, Computational study of plasmon instabilities in dual-grating-gate graphene transistor(査読有), 19th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics, and Nanostructures Digest, Vol. 1, p. Mo.P-10, Jun. 2015.
- (8) M. Yu. Morozov, A. R. Davoyan, I. M. Moiseenko, A. Satou, T. Otsuji, and V. V. Popov, Active guiding of Dirac plasmons in graphene (査読有), Appl. Phys. Lett., vol. 106, no. 6, pp. 061105 1-5, Feb. 2015. DOI: 10.1063/1.4907644
- (9) A. Satou, V. Ryzhii, and T. Otsuji, Effects of carrier-carrier scattering on population inversion in graphene under pulse photoexcitation (査読無), J. Phys.: Conf. Ser., vol. 584, pp. 012018 1-6, Jan. 2015. DOI:10.1088/1742-6596/584/1/012018
- (10) V. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. Mitin, and M. S. Shur, Graphene vertical hot-electron terahertz detectors(査読有), J. Appl. Phys., vol. 116, no. 11, pp. 114504 1-9, Sep. 2014. DOI: 10.1063/1.4895738
- 〔学会発表〕計19件)代表的成果を挙げる。
- (1) T. Komatsu, T. Otsuji, V. Ryzhii, D. Svintsov, V. Vyurkov, and A. Satou, A numerical model for energy dispersion correction by electron-electron interaction in doped graphene at finite temperature, 5th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies, 2016年10月31日~11月4日, 仙台.
- (2) 佐藤昭, 渡辺隆之, 末光哲也, ヴィクトール・リズィー, 尾辻泰一, トランジスタ構造内二次元プラズモンを用いたサブテラヘルツ/テラヘルツデバイス, 電気通信情報学会2016年ICD/SDM/ITE-IST研究会(招待講演), 2016年8月1~3日, 大阪.
- (3) A. Satou, G. Tamamushi, K. Sugawara, J. Mitsushio, V. Ryzhii, and T. Otsuji, Extraction of intrinsic and extrinsic parameters of graphene field-effect transistor from its asymmetric I-V characteristic, 2016 Compound Semiconductor Week, 2016年6月26~30

- 日, 富山.
- (4) A. Satou (他6名), Plasmonic THz devices based on InP HEMTs and Graphene FETs, EMN Meeting on Terahertz(招待講演), 2016年5月14~18日, スペイン・サンセバスチャン.
- (5) A. Satou, Y. Koseki, T. Watanabe, V. V. Popov, V. Ryzhii, and T. Otsuji, Cooperative promotion of plasma instabilities for emission of terahertz radiation in an asymmetric dual-grating gate graphene-channel FET, SPIE Defence+Commercial Sensing, 2016年4月17~21日, アメリカ・ボルチモア.
- (6) A. Satou(他6名), THz devices based on plasmons in 2D electron systems, XX International Symposium "Nanophysics & Nanoelectronics"(招待講演), 2016年3月14日~18日, ロシア・ニジノブゴロド.
- (7) A. Satou, Y. Koseki, V. Ryzhii, V. V. Popov, and T. Otsuji, Computational study of plasmon instabilities in dual-grating-gate graphene transistor, 19th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics, and Nanostructures, 2015年6月29日~7月2日, スペイン・サラマンカ.
- (8) A. Satou, Y. Koseki, V. Ryzhii, V. V. Popov, and T. Otsuji, "Computational study of graphene plasmons: damping mechanisms and instabilities, The 4th Russia-Japan-USA Symposium: The Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies(招待講演), 2015年6月9~12日, ロシア・チェルノゴロフカ.
- (9) 佐藤昭, 尾辻泰一, 超高速テラヘルツ無線を支える光電子デバイス技術の動向, 2015年電子情報通信学会総合大会(招待講演), 2015年3月10~13日, 草津(滋賀).
- (10) A. Satou, V. Ryzhii, V. Mitin, F. T. Vasko, and T. Otsuji, Effects of carrier-carrier scattering on graphene terahertz/photonic devices, International Symposium on Physics of Semiconductors, 2014年8月10~15日, アメリカ・オースティン.

〔その他〕(計1件)

- (1) 3rd Russia-Japan-USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies, Outstanding Invited Talk 受賞, 2014年6月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 昭 (SATOU, AKIRA)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号: 70510410