



二次元プラズモンの共鳴現象を用いた テラヘルツ光源・検出素子の先駆的研究



受賞者 尾辻泰一

電波と光波の遷移域に位置するテラヘルツ (THz) 波は、被ばく危険性のないイメージング・物質同定や次世代超高速無線通信：6G, 7G など, Society 5.0 の実現に必須の未開拓周波数資源である。しかしながら、従来

のデバイス技術には本質的な物理限界 (THz ギャップ) が存在し、その克服が焦点の課題であった。

受賞者は、独自の新材料・新原理・新構造の導入・考案によるブレイクスルーによって、室温動作が可能な集積型の高強度 THz 光源及び高速・高感度 THz 検出素子を開発し、上述の“THz ギャップ”の克服を果たした。第1に、トランジスタ内に凝集した二次元電子集団の荷電振動量子である二次元プラズモンが室温下でも THz 帯で共鳴することを、独自の赤外レーザ二光波混合法により、世界で初めて実証した⁽¹⁾。これは M. Dyakonov, M. Shur による理論発見⁽²⁾を実証したもので、本研究の礎を築いた成果として学術的価値が極めて高い。第2に、光学励起グラフェンの THz 利得発現・誘導放出の理論発見と実証^{(3),(4)}、及びグラフェンプラズモンの THz 巨大利得作用の理論発見と実証に成功した⁽⁵⁾ (図1)。更に、それらの成果を基に THz レーザ素

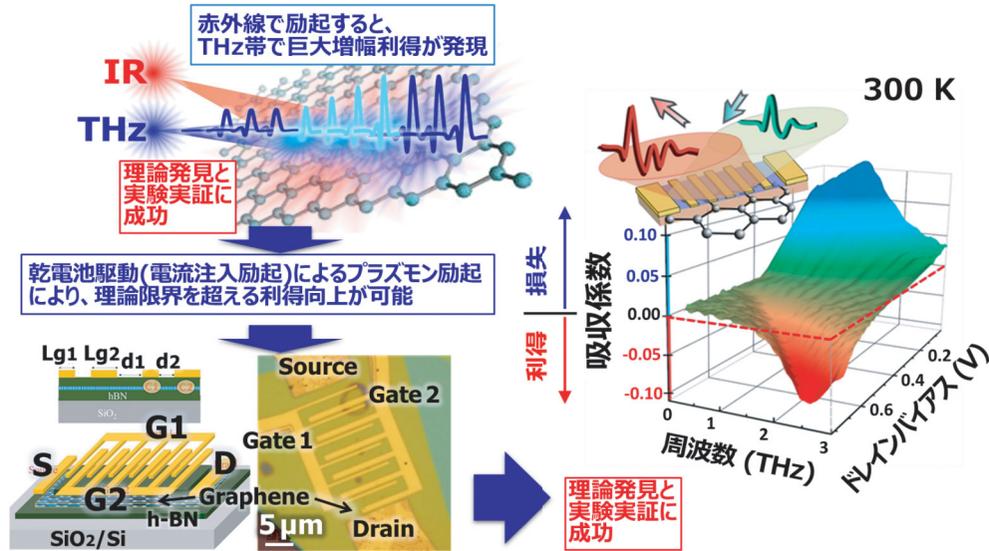


図1 グラフェンプラズモンの不安定性を利用した THz 増幅及びレーザトランジスタの実現

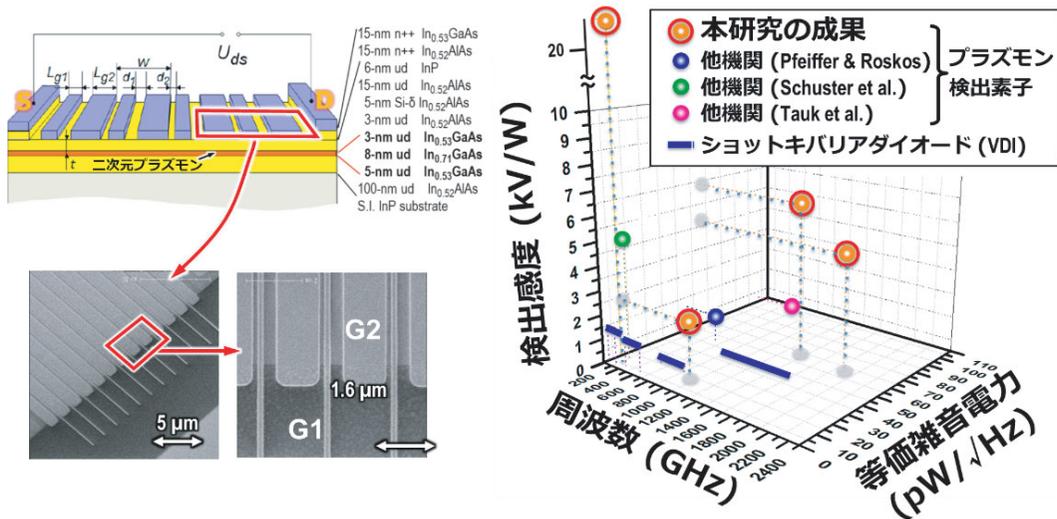


図2 化合物半導体ヘテロ接合量子井戸内二次元プラズモンの非線形整流作用を利用した高速高感度 THz 検出器の実現

子の創出に挑み、独自の分布帰還形デュアルゲート構造を有するグラフェントランジスタレーザ素子を試作し、100K 動作において電流注入による単一モード・コヒーレント THz 発光と広帯域 THz 増幅自然放出发光に成功した⁽⁶⁾。グラフェンの THz レーザ応用への道を開く画期的成果である。第3に、プラズモンの光整流作用と不安定性の高効率な発現に有効な非対称二重回折格子ゲート (ADGG) と呼ばれる新たな素子構造を考案し、InP 系ヘテロ接合量子井戸構造を用いたトランジスタ素子を試作し、ショットキーバリアダイオードによる従来の記録を一桁以上上回る高感度をより優れた低雑音性能で実現した⁽⁷⁾ (図2)。同素子の高速 THz 無線通信や安心安全用途の被接触非破壊イメージング等への有効性が

確認されている⁽⁸⁾。これらの先駆的業績により、受賞者は文部科学大臣表彰科学技術賞をはじめ関連する著名な学会や国際会議において数多くの賞を受賞している。第4に、上記 ADGG 構造をグラフェントランジスタに応用し、直流電圧を印加するだけでグラフェンプラズモン不安定性を励起し、室温動作においてもグラフェン内電子が THz フォトンと直接相互作用して得られる理論限界を4倍も上回る THz 利得増幅作用の実証に世界で初めて成功した^{(9),(10)} (図1)。これは、グラフェン THz レーザの発振しきい温度向上と高利得化のブレークスルーとして室温・高強度 THz レーザ実現に資する先駆的業績であり、次世代 6G, 7G 超高速無線通信用光源・検出デバイス技術の新たな地平を開く極めてインパクト

の高い成果である。

以上のように、受賞者の業績は極めて顕著であり、本会業績賞にふさわしいものである。

文 献

- (1) T. Otsuji, M. Hanabe, and O. Ogawara, "Terahertz plasma wave resonance of two-dimensional electrons in InGaP/InGaAs/GaAs high-electron-mobility transistors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 11, pp. 2119-2121, 2004.
- (2) M. Dyakonov and M. Shur, "Shallow water analogy for a ballistic field effect transistor: New mechanism of plasma wave generation by dc current," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, no. 15, pp. 2465-2468, 1993.
- (3) V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji, "Negative dynamic conductivity of graphene with optical pumping," *J. Appl. Phys.*, vol. 101, no. 7, pp. 083114-1-4, 2007.
- (4) 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, Appl. Phys.*, vol. 45, no. 30, pp. 303001-1-9, 2012. (invited)
- (5) 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, "The gain enhancement effect of surface plasmon polaritons on terahertz stimulated emission in optically pumped monolayer graphene," *New J. Phys.*, vol. 15, no. 7, pp. 075003-1-11, 2013.
- (6) D. Yadav, G. Tamamushi, T. Watanabe, J. Mitsuhashi, Y. Tobah, K. Sugawara, A.A. Dubinov, A. Satou, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji, "Terahertz light-emitting graphene-channel transistor toward single-mode lasing," *Nanophotonics*, vol. 7, no. 4, pp. 741-752, 2018.
- (7) T. Otsuji, T. Watanabe, S. Boubanga Tombet, A. Satou, W. Knap, V. Popov, M. Ryzhii, and V. Ryzhii, "Emission and detection of terahertz radiation using two-dimensional electrons in III-V semiconductors and graphene," *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 63-71, 2013.
- (8) W. Knap, M. Dyakonov, D. Coquillat, F. Teppe, N. Dyakonova, J. Lusakowski, K. Karpierz, M. Sakowicz, G. Valusis, D. Seliuta, I. Kasalynas, A. El Fatimy, Y.M. Meziani, and T. Otsuji, "Field effect transistors for terahertz detection: physics and first imaging applications," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 30, no. 12, pp. 1319-1337, 2009.
- (9) S. Boubanga-Tombet, W. Knap, D. Yadav, A. Satou, D.B. But, V.V. Popov, I.V. Gorbenko, V. Kachorovskii, and T. Otsuji, "Room temperature amplification of terahertz radiation by grating-gate graphene structures," *Phys. Rev. X*, vol. 10, no. 3, pp. 031004-1-19, 2020.
- (10) S.A. Boubanga-Tombet, A. Satou, D. Yadav, D.B. But, W. Knap, V.V. Popov, I.V. Gorbenko, V. Kachorovskii, and T. Otsuji, "Paving the way for tunable graphene plasmonic THz amplifiers," *Front. Phys.*, vol. 9, pp. 726806-1-10, 2021. (invited, review)

