

修士学位論文要約（令和3年3月）

テラヘルツ発振・検出デバイス実現に向けた グラフェンプラズモニックトランジスタデバイス・プロセス技術の研究

荻浦 大地

指導教員：尾辻 泰一

Study on Graphene-Plasmonic Transistor Device and Process Technology for Realization of Terahertz Oscillation and Detection Devices

Daichi Ogiura

Supervisor: Taiichi Otsuji

There exists no Terahertz (THz) emitter and detector that can be integrated and operate at room temperature with practically high output radiation power and high responsivity. However, an asymmetric dual-grating-gate Graphene-Channel FET (A-DGG G-FET), which utilizes hydrodynamic nonlinearities of two-dimensional (2D) plasmons in its channel, is promising as a high output power THz emitter and highly sensitive THz detector. In this study, the author fabricated an A-DGG G-FET and conducted THz emission and detection experiments to investigate the usefulness of the A-DGG G-FET for terahertz communications. First, for the THz emission experiments, the results showed amplified-spontaneous-emission-like broadband emission around 3~7 THz, not succeeded in the lasing. Second, for the THz detection experiments, the fabricated A-DGG G-FET exhibited a clear photoresponse having a pulse width of about 200 ps, preserving the envelop shape of the incident pulsed continuous-wave THz radiation. With increasing the drain voltage, the amplitude of photovoltage increased linearly while maintaining the response speed. This result showed that the A-DGG G-FET serves high-speed, highly sensitive THz detection function that can applicable to the ultrahigh-speed wireless communication systems.

1. はじめに

電波と光波の中間領域に位置するテラヘルツ波は、その両方の性質を併せ持つことから、非破壊検査、大容量高速無線通信などへの応用が期待されている。テラヘルツ波を情報通信分野へ実用化するためには、高出力・高感度、小型、室温動作可能であることが求められるが、これらの条件を同時に満たすテラヘルツデバイスは未だ実現しておらず発展途上にある。そこで我々は、新材料の導入によるテラヘルツデバイス実用化として、特異な電子物性を有する炭素の単原子材料：グラフェンに着目した。グラフェンは反転分布形成によるテラヘルツレーザー[1]としての応用が期待されているが、一方で、テラヘルツ帯で共鳴発振する二次元プラズモン不安定性と呼ばれる物理機構を内在しており、テラヘルツ発振デバイスとしての応用に適した性質も有している。プラズモン不安定性を発現する動作機構としては、DS不安定性[2]、RSS不安定性[3]などが知られており、より高効率なテラヘルツ発振デバイスとして非対称二重格子ゲート(Asymmetric Dual-Grating-Gate: A-DGG)構造を有するトランジスタの二次元プラズモンを応用する研究が行われている。

A-DGG 構造を有するグラフェントランジスタ：A-DGG G-FET はプラズモン不安定性によるテラヘルツ発振動作だけでなく、グラフェンの反転分布形成によるレーザー発振動作も可能であり、また、A-DGG 構造においてテラヘルツ波発生だけでなく、テラヘルツ波検出も行うことが可能であるため[4]、A-DGG G-FET はテラヘルツデバイスの実現に非常に有用であると考えられる。そこで本研究では、A-DGG G-FET の設計、試作を行い、DC 測定、およびテラヘルツ波放射・検出実験を通して、A-DGG G-FET のテラヘルツ帯機能応用への有用性を明らかにした。

2. テラヘルツ波放射実験

試作した A-DGG G-FET に対して、レーザー発振動作(図 1)、プラズモン発振動作(図 2)の二条件にてテラヘルツ波放射実験を行った。図 1 から、レーザー発振動作において、ドレインバイアスの印加と共にブロードな放射が確認されたが、放射強度面積と直流電力の値に比例関係が確認されたため、ジュール熱または熱励起プラズモンによる輻射であると考えられる。

図 2 のプラズモン発振動作において、ゲート印加電圧を変化させてプラズモンを誘起しても有意なテラヘ

ルツ放射は確認できなかった. この結果に対して, プラズモン不安定性の発現に寄与するデバイスのゲート長が適した値ではない可能性が考えられる. 今後デバイス構造の更なる改善及び最適化が求められる.

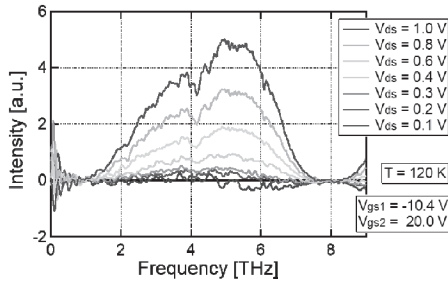


図1 レーザー発振動作におけるテラヘルツ波放射実験結果.

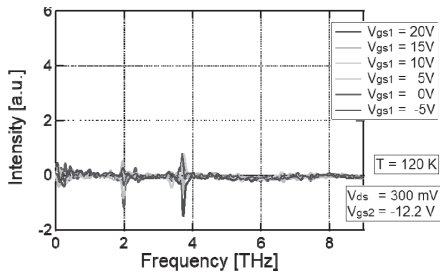


図2 プラズモン発振動作におけるテラヘルツ波放射実験結果.

3. テラヘルツ波検出実験

A-DGG G-FET に対してテラヘルツ波検出実験を行った. その出力概形を図3に示す. 入力したテラヘルツ波パルスは中心周波数 0.95 THz, パルス幅約 200 ps であり, ドレイン電極からの出力電圧をオシロスコープを用いて観測した. 図3より, 包絡線パルス形状を維持したパルス幅約 200 ps の出力波形が確認でき, A-DGG G-FET が高速応答でのテラヘルツ波検出に成功していることが確認出来た.

次に, ドレイン印加電圧を変化させた際の出力電圧の変化を図4, 図5に示す. 図4, 図5より, ドレイ

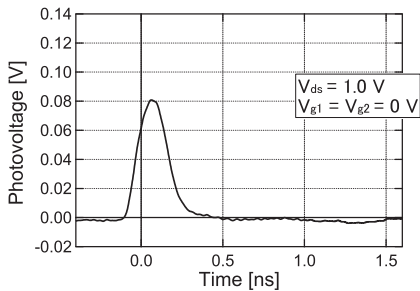


図3 A-DGG G-FET におけるテラヘルツ波検出実験の出力電圧概形.

ン印加電圧の増加に伴って, 応答速度を維持したまま出力電圧が線形的に増加することが確認できた.

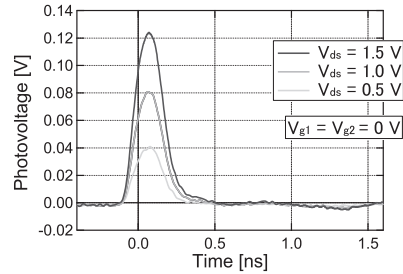


図4 $V_{ds} = 0.5, 1.0, 1.5$ V の時のオシロスコープの出力波形.

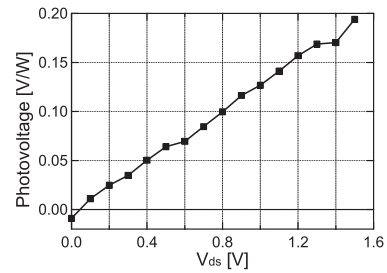


図5 出力電圧の V_{ds} 依存性.

5. まとめ

グラフェンプラズモンを用いた A-DGG G-FET の設計, 試作を行い, テラヘルツ波放射・検出実験を行った. テラヘルツ波放射実験ではブロードな放射が確認されたが, コヒーレント放射には至っていない. テラヘルツ波検出実験ではドレイン電極からの光起電力の検出に成功し, A-DGG G-FET のテラヘルツ帯機能応用への有用性を明らかにした.

文献

- 1) D. Yadav, G. Tamamushi, T. Watanabe, J. Mitsuho, and Y. Tobah, "Transistor Toward Single-Mode Lasing," *Nonophoton.*, vol. 7, pp. 741–752, 2018.
- 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, A. Satou, and M. S. Shur, "Plasma instability and terahertz generation in HEMTs due to electron transit-time effect," *IEICE Trans. Electron.*, vol. 89, no. 7, pp. 1012–1019, 2006.
- 4) M. Dyakonov and M. Shur, "Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 43, no. 3, pp. 380–387, 1996.