

修士学位論文要約（令和2年3月）

グラフェンプラズモンによるテラヘルツトランジスタレーザの研究

布施 吉貴

指導教員：尾辻 泰一

Study on Terahertz Transistor Laser by Using Graphene Plasmons

Yoshiki FUSE

Supervisor: Taiichi Otsuji

A distributed feedback dual-gate graphene-channel transistor (DFB-DG-GFET) is a promising way to realize the THz single-mode lasing. In the previous studies, it was found that graphene and the electric field distribution of THz photons were not well overlapped, thus the DFB structure must be modified for better luminous efficiency. In order to solve this problem, the author re-designed the DFB cavity as 'plasmonic' DFB (PDFB) cavity and reconsider the device fabrication process based on exfoliated graphene and transfer method for 2-dimensional atomically thin films. The quality (Q) factor for the PDFB cavity increased by two orders of magnitude compared to that for the photonic DFB cavity with the same DFB periods. The fabricated device could not modulate drain current enough accidentally. Instead an asymmetric dual-grating-gate (ADGG) GFET was fabricated and used for the THz emission experiment. Several sharp emission peaks were observed in a wide THz frequency range, and their intensity grew as the drain bias increased at 300 and 150 K. Although the emission spectra are yet to be fully understood, one needs to elucidate it by further experiments.

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、超高速大容量無線通信などへの応用が期待されている。しかし、小型・高出力・室温動作可能な三要素を兼ね備えたテラヘルツ光源は未だ実現されていない。そこで、線形かつギャップレスなバンド構造に起因した、特異な光物性を有する炭素系材料であるグラフェンが注目されている。グラフェンをチャネル材料とした電流注入型レーザとして提案されている、分布帰還形導波路構造を有するデュアルゲートグラフェンFET (DFB-DG-GFET) は、2つの独立したゲート電極を有しており、電子・正孔をそれぞれ誘起でき、ドレイン電圧の印加によりゲート間隙直下に反転分布を形成できる。また DFB 構造によって単一モード発振が実現できる。先行研究[1]では、DFB-DG-GFETからのテラヘルツ帯域におけるブロードな増幅自然放出($\sim 80 \mu\text{W}$)や 100 K での単一モード発振($\sim 0.1 \mu\text{W}$)が観測されている。このような異なる放射スペクトルや低い出力強度はグラフェンと THz フォトンとのオーバーラップが不十分であることに起因するものであり、現行の DFB 構造を改良する必要があることを示唆する。そこで、本研究では電集群の振動量子であるプラズモンに対する DFB 構造(PDFB)を導入し、デバイスの製作プロセス技術についても新たに検討した。またデバイスの試作に必要な二次元原子薄膜材料転写・ヘテロ積層プロセスについても新たに開発した。

2. グラフェンチャネルトランジスタ製作プロセス技術

先行研究において、グラフェンは SiC 熱分解法によって製膜され、Al の犠牲層を保護膜として堆積させたプロセスによってデバイスの製作がなされていた。しかし、SiC 熱分解法は、装置の状況によっては膜質が大きく変化し、格子欠陥が著しく増加する可能性があることが分かった。また Al 犠牲層プロセスについても、Al の蒸着条件によっては密着露光方式で用いるフォトレジストの除去が出来なくなることでも分かった。プラズモニクデバイスはフォトリソグラフィよりもアクティブエリアが小さくて済むことや、光よりもグラフェンとの相互作用が強くなることから、デバイスの試作にあたっては、グレインサイズが数十 μm と小さいながらも高品質かつ均一なグラフェンが確保できる見通しである。グラファイトからの機械的剥離法を採用した。また絶縁膜材料としては、グラフェンと同様の六員環構造を有する二次元原子薄膜材料である六方晶窒化ホウ素(h-BN)を採用し、グラフェン特有の輸送特性を損なわない h-BN/グラフェン/h-BN のヘテロ構造の形成に必要となる、二次元原子薄膜材料転写・ヘテロ積層プロセス系についても新たに構築した。

3. PDFB 共振器構造の設計

前述の機械的剥離法によって得られるグラフェンのグレインサイズを 40 μm と仮定し、その面積内に収まるようにデバイスの設計パラメータを考案した。図 1 に、新たに設計した PDFB 共振器構造の Q 値周波数依存性の解析結果を示す。計算はロシア科学アカ

デミーの Alexander Dubinov 氏に依頼した。DFB 周期長に対応した基本プラズモンモード以外にも複数のモードが存在することが分かる。Q 値に着目すると、先行研究におけるフォトニック DFB と比して 16 周期では Q 値が 2 桁向上していることが分かった。

実際のデバイスの試作にあたっては、放射スペクトル測定に用いる分光計の測定帯域(検出器として用いる Si ボロメータの S/N を決定する帯域通過フィルタの通過帯域によって~7 THz 付近が測定上限周波数となる。)を考慮して、7 THz 以下の周波数帯で高い Q 値が得られる、周期長 $L = 0.6 \mu\text{m}$ 、周期数 24 のものを採用した。

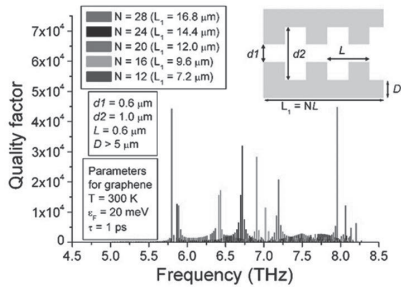


図 1 PDFB の Q 値解析結果.

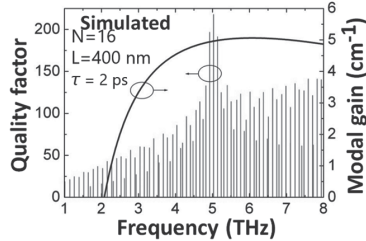


図 2 先行研究における Q 値解析結果[1].

4. テラヘルツ波放射観測実験

試作した PDFB-DG-GFET からはドレイン電流変調効果が確認できなかったため、非対称二重格子ゲート(ADGG: Asymmetric Dual-Grating Gate)を有する GFET(ADGG-GFET)を放射実験に用いることとした。デバイス化までのプロセスはサラマンカ大学の Yahya Meziani 教授ら協力の下で行った。ADGG-GFET による THz 波放射原理について述べる。DFB-DG-GFET と同様に反転分布を形成するとキャリア再結合によるフォトンの自然放出と、格子ゲートのアンテナ作用によるプラズモンの励起が起きる。ゲート直下の領域は共振器として機能し、プラズモンポラリトンの増幅と、ゲートのアンテナ作用による THz フォトンの再変換・放射が起きる。今回の設計値では共振周波数は 1 THz および 0.25 THz と見積もられる。図 3 に各温度にて観測されたスペクトルを示す。共振周波

数付近での明瞭なピークは確認できなかったが、300 K および 150 K においてドレインバイアスに依存した複数のピーク(図 4)が観測された。ドレイン電流が流れたことによってデバイスに生じた熱による熱輻射による影響が考えられるが、熱輻射だけではこれらの急峻なピークの説明は出来ない。プラズモン不安定性が生じていた可能性も考慮されるが、不安定性の発現にはドリフト速度、チャネル電流やドレイン電圧などの閾値特性が存在し、今回の実験条件が不安定性を誘起するのに十分であるかは不明である。いずれの場合も、詳細な考察には再現実験も含めて更なる検証を必要とする。

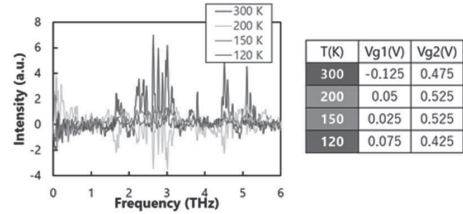


図 3 放射スペクトルの温度依存性($V_d=10 \text{ mV}$).

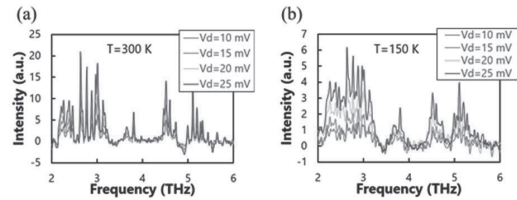


図 4 放射スペクトルのドレイン電圧依存性. (a): $T = 300 \text{ K}$, (b): $T = 150 \text{ K}$.

5. まとめ

グラフェンプラズモンを用いた PDFB-DG-GFET の設計を行い、フォトニック DFB に比して 2 桁の Q 値向上を確認した。またその試作に必要なプロセス系についても新たに構築した。しかし、試作したデバイスからはドレイン電流変調効果が確認できなかったため、ADGG-GFET を試作しテラヘルツ波放射実験に挑んだ。300 K と 150 K でドレインバイアスに依存した複数のピークが観測され、熱輻射やプラズモン不安定性が原因として考えられるが、詳細な原因については更なる検証を必要とする。

文献

- 1) D. Yadav, G. Tamamushi, T. Watanabe, J. Mitsushio, and Y. Tobah, "Transistor Toward Single-Mode Lasing," Nonophoton., vol. 7, pp. 741–752, 2018.