

修士学位論文要約（令和3年3月）

テラヘルツトランジスタレーザー実現に向けた  
高品質エピタキシャルグラフェン材料・プロセス技術の研究

諏訪 健斗

指導教員：尾辻 泰一

Study on High-Quality Epitaxial Graphene Material and Process Technology  
for Realizing Terahertz Transistor Lasers

Kento SUWA

Supervisor: Taiichi OTSUJI

We are developing compact, high-power, room-temperature operable, and integrated devices for the realization of terahertz (THz) wireless communications which is called DFB-DG-GFET (Distributed Feed-Back Dual-Gate Graphene-channel Field Effect Transistor). To realize and improve THz emission, extreme high crystal quality of graphene is needed. The author studied the material synthesis and process technology of high-quality epitaxial graphene and its device implementation. The result of Raman scattering spectroscopy measurement showed that high-quality few-layer graphene was fabricated in the condition of the ambient temperature of 1430~1450 °C, the Ar gas flow rate of 0.1~0.5 slm (standard litter per minute), and the heating time of 5 min. Next the surface morphology of the synthesized graphene was characterized by atomic force microscopy. The results showed that the graphene domain size and in-domain flatness were improved by optimizing the graphitization temperature and Ar gas flow rate. Finally, the DFB-DG-GFET was fabricated by using the epitaxial graphene. The result of Fourier-transform far-infrared spectroscopic measurement gave the manifestation of amplified spontaneous THz emission in the DFB-DG-GFET.

## 1. はじめに

スマートフォンなどの端末の普及により、無線通信の高速化・大容量化が求められている。テラヘルツ帯は電波と光波の中間周波数帯に位置する開発途上の周波数資源であり、大容量・高速無線通信への応用が期待されている。しかし、電子デバイス側と光デバイス側の両面から室温で動作する集積可能なテラヘルツコヒーレント光源デバイスを開発することは未だ困難である。我々は二次元材料であるグラフェンをチャンネル材料に用いたテラヘルツ光源の開発を進め、小型・高出力・室温動作可能な集積型テラヘルツデバイスの実現に向けて取り組んでいる。

グラフェンは炭素原子が六員環構造をなす二次元物質で、ギャップレスかつ線形分散型のバンド構造を有する。それにより、電子と正孔は有効質量を消失したディラック・フェルミオンとして振る舞うため、極めて高い電子移動度・電流密度が得られる。我々はそのグラフェンの特異な光電子物性を応用した、電流注入型デュアルゲートグラフェンチャンネル電界効果トランジスタ(DFB-DG-GFET)<sup>1)</sup>を提案し、開発を進めている。DFB-DG-GFETは、2つのゲートに相補的にバイアスを印加すると両ゲート電極直下のチャンネル領域に電子と正孔がそれぞれ静電的に誘起され、p-i-n接

合が形成される。さらに、ドレイン電圧を印加することで、i領域に反転分布が形成される。また、ゲート構造に分布帰還型(DFB)共振器構造を導入することで、単一モードレーザ発振を実現することができる。しかし、無線通信に要する十分なレーザ出力強度と300Kの閾値温度は未だ実現されていない<sup>2)</sup>。本研究では、グラフェンレーザートランジスタの性能向上に直接的に寄与するグラフェン結晶の品質向上に挑んだ。また、グラフェンの光学利得増幅効果を利用するためには多層グラフェンが望ましいが、本研究ではその足掛かりとして安定的かつ層数均一性の高い単層~数層グラフェンの製膜を目指して検討を行った。

## 2. エピタキシャルグラフェンの製膜

本研究ではエピタキシャルグラフェン法(SiC基板熱分解法)<sup>3)4)</sup>により、SiC基板C面上にグラフェンを製膜した。まず、SiC基板を800°Cの高真空中で加熱し、その後1300°C以上の高温Ar雰囲気下でSi原子を脱離させ、グラフェンを基板上に自己整合的に形成した。製膜したグラフェンの結晶品質は、ラマン分光測定と原子間力顕微鏡を用いて評価した。

ラマン分光測定の結果、加熱温度：1430 °C ~1450 °C、加熱時のチャンバー内 Ar ガス流量：0.1 slm~0.5 slm、加熱温度：5 分の条件にて高品質かつ

低層数が得られることを見出した(図1・図2)。原子間力顕微鏡(AFM)により表面状態を観察した結果、グラフェンのドメインサイズは Ar ガス流量に比例して拡大していった(図3)。両測定結果より、加熱温度と Ar ガス流量の最適化によって、グラフェン結晶を高品質に維持したままドメインサイズ拡大と、ドメイン内平坦性向上を実現できることがわかった。

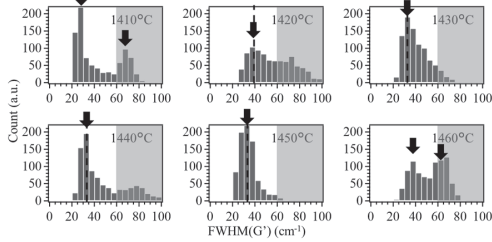


図1: 各加熱温度条件で作製したグラフェンの G<sup>+</sup>ピークヒストグラム。

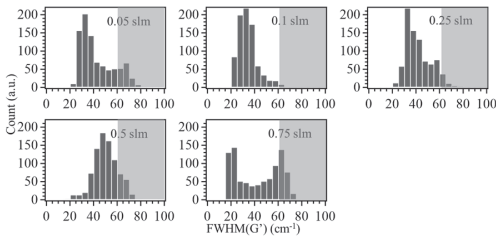


図2: 各 Ar ガス流量条件で作製したグラフェンの G<sup>+</sup>ピークヒストグラム。

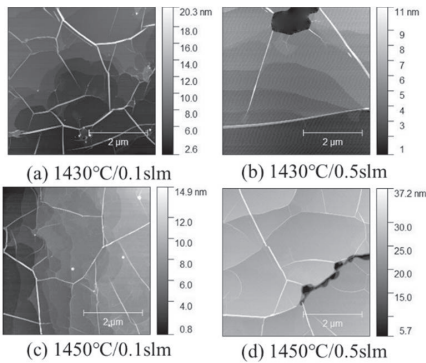


図3: エピタキシャルグラフェンの AFM 形状像。

### 3. DFB-DG-GFET の作製とテラヘルツ波放射実験

2.で述べた高品質エピタキシャルグラフェンを用いて DFB-DG-GFET を作製した。先行研究にて DFB 導波路構造の周期数を増やすことでレーザー発振スペクトルの Q 値が向上することが示されており、本研究では周期数 27 の DFB サンプルを作製した。この DFB-DG-GFET の DC トランスファー特性を測定したところ、グラフェン特有のアンバイポーラ特性が確認された。作製した DFB-DG-GFET をフーリエ変換

赤外分光計 (FTIR) と 4.2K 冷却 Si ボロメータによってテラヘルツ波放射特性を 100 K の温度条件下で測定評価した。その結果、先行研究<sup>2)</sup>をよく再現する DFB の基本周波数に相当する 5 THz 付近の増幅自然発光の観測に成功した(図4)。

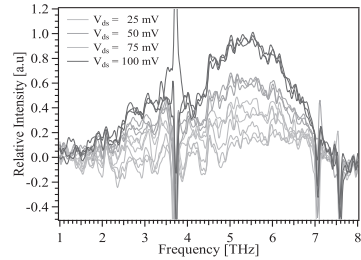


図4: 各ドレイン電圧における THz 放射スペクトル。

### 4. まとめ

SiC 基板 C 面上エピタキシャルグラフェンの製膜条件をラマン分光および AFM 評価に基づいて最適化した。その結果、グラフェン結晶品質の向上に成功した。さらに、高結晶品質グラフェンを用いて DFB-DG-GFET を作製し、FTIR によるテラヘルツ波放射を行ったところ、100 K にて 5 THz 付近の増幅自然発光を観測した。また、この放射は先行研究の実験結果を再現する結果となった。一方で、グラフェンプラズモンとテラヘルツ光子の相互作用による利得増強効果が得られることが示されている<sup>5)</sup>。グラフェンプラズモンの援用とデバイス構造のさらなる最適化によって、焦眉の課題である室温・高強度・単一モードレーザー発振の実現が期待される。

### 文献

- 1) M. Ryzhii, and V. Ryzhii, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **46** (2007) L151-L153.
- 2) D. Yadav, G. Tamamushi, T. Watanabe, J. Mitsushio, Y. Tobah, K. Sugawara, A. A. Dubinov, A. Satou, M. Ryzhii, V. Ryzhii, and T. Otsuji, *Nanophotonics* **7** (2018) 741–752.
- 3) H. Fukidome, Y. Kawai, F. Fromm, M. Kotsugi, H. Handa, T. Ide, T. Ohkouchi, H. Miyashita, Y. Enta, T. Kinoshita, T. Seyller, and M. Suemitsu, *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 041605-1-4.
- 4) N. Endoh, S. Akiyama, K. Tashima, K. Suwa, T. Kamogawa, R. Kohama, K. Funakubo, S. Konishi, H. Mogi, M. Kawahara, M. Kawai, Y. Kubota, T. Ohkochi, M. Kotsugi, K. Horiba, H. Kumigashira, M. Suemitsu, I. Watanabe, and H. Fukidome, *Nanomaterials* (2021, in press).
- 5) Y. Fuse, Tohoku Univ. Master's Degree Thesis (2020).