

**二次元原子薄膜ヘテロ接合の創製とその新原理テラヘルツ  
光電子デバイス応用**  
Creation of 2D-Atomically-Thin-Layered Heterojunctions  
and their Applications to Novel Terahertz Photonic Devices

課題番号：16H06361

尾辻 泰一（OTSUJI, TAIICHI）

東北大学・電気通信研究所・教授



**研究の概要** 本研究は、二次元原子薄膜ヘテロ接合をプラットフォームとして創製し、二次元原子薄膜ヘテロ接合系に特徴付けられた電子・フォトン・プラズモン・フォノン複合量子系に現れる新奇な物理現象を動作機構として導入し、THz波領域での増幅・発振・検出・非線形波動制御の各機能を、極めて高いエネルギー効率で実現し得るデバイスの創出を目的とする。当初目標に向けて順調に進展している。

**研究分野**：工学、総合理工

**キーワード**：電子・量子デバイス、ミリ波・テラヘルツ波、グラフェン、ナノ構造物性

**1. 研究開始当初の背景**

(1)テラヘルツ(THz)波帯は、多くの産業応用が期待される未開拓電磁波帯である。従来の各種光電子デバイスは本質的な物理限界に律速され、動作が困難である。そのような中、炭素原子の単層シート：グラフェンは、電子・正孔が極限的輸送特性を有する相対論的Dirac粒子として振る舞い、研究進展が著しい。  
(2)h-BN絶縁体や遷移金属ジカルコゲナイド(TMD)半導体等のvan der Waals (vdW)層状物質が、グラフェンと不活性なヘテロ接合材料として注目されている。我々は、h-BNトンネルバリア層をグラフェンで挟んだゲート制御グラフェン二重層(G-DGL)のフォトン・プラズモンアシスト共鳴トンネルのTHz機能応用を提案していた。

**2. 研究の目的**

(1)本研究では、二次元原子薄膜ヘテロ接合系に特徴付けられた電子・フォトン・プラズモン・フォノン複合量子系に現れる新奇な物理現象を動作機構として導入し、THz波領域での増幅・発振・検出・非線形波動制御の各機能を、従来よりも極めて高いエネルギー効率で実現し得るデバイスの創出を目的とする。

**3. 研究の方法(図1)**

(1)絶縁体や半導体もしくは両者の積層からなるトンネルバリア薄膜をグラフェンでサンドイッチしたDGLコアシェルと外部ゲートからなるG-DGL構造をプラットフォームとして創製する。  
(2)第一・第二の物理機構としてフォトン・プラズモンアシスト共鳴トンネル効果をG-DGLに導入し、THz波増幅・検出の各機能性能の従来素子に対する優位性を明らかにする。  
(3)第三の物理機構としてグラフェン表面プラ

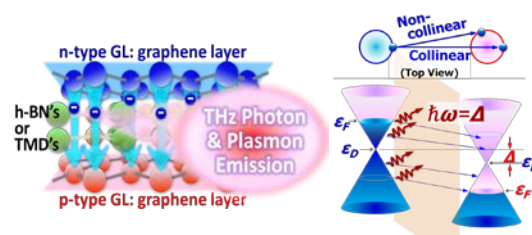


図1 研究の手段：G-DGLとそのフォトン・プラズモン発光アシスト共鳴トンネル現象。

ズモンポラリトン (SPP) とトンネル現象との二重共鳴を導入し、THz波増幅・検出・発振・非線形波動制御の各能力の格段の向上に挑む。

**4. これまでの成果**

**(1) G-DGL構造プラットフォームの創製**

- ・剥離・転写法の高度化：独自の二次元原子薄膜剥離・転写装置を開発した。結晶面方位と層数の安定制御が可能になり、半導体集積加工プロセスとの連携によるG-DGLデバイスプロセス技術を完成させた(研究協力：西・サラマンカ大)(図2左)。
- ・vdWヘテロエピ成長法：成膜装置の改良によって均一大面積h-BN原子薄膜の成膜に成功するとともに、下地を工夫することで、h-BNドメインを一方向にそろえることに成功した(図2右)。

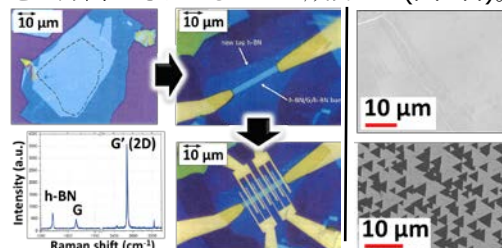


図2 剥離・転写法による成膜・加工プロセス(左)とCVD法による均一大面積・高配向h-BN製膜(右)。

・結晶品質・物性評価：独自のフェムト秒時間分解オペランド3次元局所場顕微分光法を用いて、SiC基板上ツイステッド2層グラフェンの超高速キャリア緩和過程が上層と下層とで大きく異なるという正に原子1層分以下の極限的時空間分解能によって観測することに成功した。

(2) フォトンアシスト共鳴トンネルのTHz素子応用

・デバイスモデリング：量子効率を律速するAuger過程をモデル化し、室温程度にキャリア温度を抑制すればAuger再結合時間をピコ秒オーダーまで延伸でき、グラフェンキャリアのTHz帯反転分布形成が可能であることを明らかにした。

・G-DGL素子の試作評価：独自開発の二次元原子薄膜剥離・転写積層装置を導入してG-DGL素子の試作に成功し、G-DGL素子からの自然放出[1]と電流注入グラフェントランジスタ(GFET)からのTHz増幅放出を相補的に観測し、動作機構と発光過程の相関を明らかにした。THz波の検出機能の検証にも成功した。

(3) フォトンアシスト共鳴トンネルのTHz素子応用

・音響モードSPPの理論・実験検証：まず、GL間角度偏差を伴うDGLの非線形複合量子系をモデル化し、試作G-DGL素子の特性評価実験得られたTHz帯利得の大半が音響モードSPP由来のプラズモンアシスト共鳴トンネルによるTHz発光に起因することを明らかにした。プラズモンアシストはフォトンアシストに比べて運動量保存則への位相空間上の制約が緩いことがその要因であることをつきとめた[2](図3)。

・新素子構造：G-DGL素子をカスケード積層した新しいTHz量子カスケードレーザーを考案し、そのTHz利得帯域特性、THz電磁波放射特性の既存素子に対する優位性を理論的に示した。

(4) プラズモン・トンネル二重共鳴のTHz素子応用

・素子試作検証：代表者が考案した非対称二重回折格子ゲート(ADGG: Asymmetric Dual-Grating Gate)の導入によって結合作用が得られること、ドレインバイアスが閾値以上ではグラフェンSPPの不安定性が発現し、最大9%の巨大共鳴増幅利得が得られることを発見した[3](図4)。

(5) 新たな展開

・グラフェンと黒燐との積層構造をチャンネルと

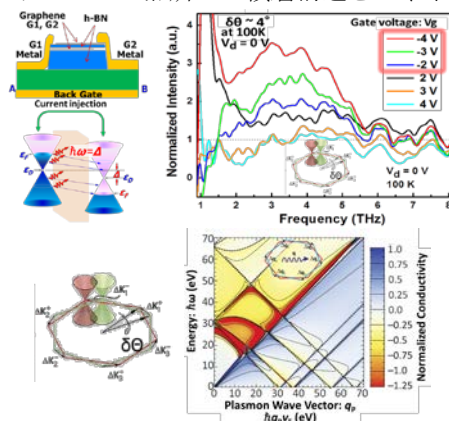


図3 試作G-DGL素子のTHz放射(上)とDGL音響モードSPPによるTHz帯利得の解析結果(下)。

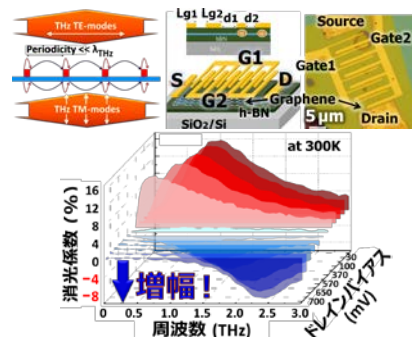


図4 試作G-DGL素子のTHz放射(上)とDGL音響モードSPPによるTHz帯利得解析結果(下)。

する新たなトランジスタ構造を考案し、グラフェン・黒燐間で生じる実空間キャリア遷移をもたらす負性微分導電率の発現を理論的に発見した[4]。安定した自励発振源や非線形波動伝搬を制御する機能素子としての応用が期待される。

5. 今後の計画

(1) フォトン・プラズモンアシスト共鳴トンネルによるG-DGL構造およびそのカスケード積層構造によるTHz光源および検出素子を試作し、素子構造・動作原理と量子効率との相関を理論・実験両面から明らかにする。

(2) プラズモン・トンネル二重共鳴によるTHz非線形波動制御素子の試作・検証を行う。

(3) グラフェン・黒燐vdWヘテロ接合による実空間遷移型THz光源素子の実現に挑む。

(4) 二次元原子薄膜ヘテロ接合THzデバイス設計論として体系化する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

[1] D. Yadav, S. Boubanga-Tombet, T. Watanabe, S. Arnold, V. Ryzhii, T. Otsuji, "Terahertz wave generation and detection in double-graphene layered van der Waals heterostructures," *2D Mater.* **3**, 045009 (2016).

[2] D. Svintsov, Zh. Devizorova, T. Otsuji, V. Ryzhii, "Plasmons in tunnel-coupled graphene layers: Backward waves with quantum cascade gain," *Phys. Rev. B* **94**, 115301 (2016)

[3] S. Boubanga-Tombet, D. Yadav, W. Knap, V.V. Papov, T. Otsuji, "Terahertz light amplification by current-driven plasmon instabilities in graphene," *CLEO: Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics*, pp. SW4D.4-1-2, San Jose, CA, USA, 2017.

[4] V. Ryzhii, M. Ryzhii, D. Svintsov, V.G. Leiman, P.P. Maltsev, D.S. Ponomarev, V. Mitin, M.S. Shur, T. Otsuji, "Real-space-transfer mechanism of negative differential conductivity in gated graphene-phosphorene hybrid structures: Phenomenological heating model," *J. Appl. Phys.* **124**, 114501 (2018).

他 査読付学術論文 40編,

査読付国際会議招待講演 45件,

査読付国際会議一般講演 23件.

受賞: 尾辻, Fellow表彰, OSA, 2019; JSAP, 2018.

7. ホームページ等

<http://www.otsuji.riec.tohoku.ac.jp>