

Beyond 5G 通信に向けたグラフェン量子バリア新原理高感度テラヘルツ検出器の開発

代表研究者
共同研究者

唐 超
林 宗澤

東北大学 学際科学フロンティア研究所 助教
東北大学 電気通信研究所 准教授

1 はじめに

第5世代移動通信システムの普及に伴い、無線通信における高速化・大容量化・低遅延化への要求は急速に高まっている。今後の Beyond 5G および 6G 通信では、現在利用されているミリ波帯を超え、より高い周波数を有するテラヘルツ帯の利用が重要になると考えられている。テラヘルツ波は、電波と光波の中間に位置する電磁波であり、電波の透過性と光波の直進性を併せ持つことから、超高速無線通信、非破壊検査、イメージング、材料評価、医療診断など多様な応用が期待されている。

一方で、テラヘルツ帯は従来の電子デバイスと光デバイスの間位置するため、発振器・検出器のいずれにおいても高効率化が難しい周波数領域である。このため、テラヘルツ帯は長年「テラヘルツギャップ」と呼ばれ、高感度・高速・低消費電力で動作する受信素子の開発が重要な課題となっている。特に、将来の無線通信応用では、単に高感度であるだけでなく、室温で動作し、外部バイアスや大きな消費電力を必要とせず、高速変調信号を検出できる素子が求められる[1]。

本研究では、この課題に対して、二次元材料であるグラフェンに着目した。グラフェンは、炭素原子が二次元平面上に蜂の巣状に配列した材料であり、高いキャリア移動度、広い周波数帯域にわたる光応答、ゲート電圧による電子状態制御性を有する。また、グラフェン中の電子は高速に応答するため、テラヘルツ帯の電磁波を電気信号へ変換する材料として有望である。しかし、従来のグラフェン検出器の多くは、均一なチャネルを用いる構造であり、テラヘルツ波と電子系の相互作用を十分に制御することが難しかった。

そこで本研究では、グラフェンチャネル中に人工的な量子バリア構造[2-4]を導入し、チャネル内部の電子状態、電位分布、電子密度分布を制御することで、高感度かつ高速なテラヘルツ波検出を実現することを目的とした。特に、Beyond 5G 通信における受信素子への応用を念頭に、設計、作製、電気特性評価、テラヘルツ波応答評価に関する基盤技術の構築を進めた。

2 研究目的

本研究の目的は、グラフェンを用いた新原理のテラヘルツ波検出器を開発し、Beyond 5G および 6G 通信に資する低消費電力・高速受信素子の基盤を構築することである。具体的には、グラフェンチャネルを有する電界効果トランジスタに量子バリア構造を導入し、従来の均一チャネル型デバイスでは得られにくい非線形応答および高速応答を引き出すことを目指した。

本研究で重視した点は、以下の三点である。

第一に、グラフェンチャネル内の電子状態を人工的に制御することである。グラフェンはゲート電圧によりキャリア密度を大きく変化させることができるが、均一チャネルでは電位分布も比較的単純である。本研究では、チャネル内に周期的または局所的なエネルギー障壁を導入することで、電子の輸送経路、局所電場、テラヘルツ波照射時の整流応答を制御することを狙った。

第二に、室温・低バイアスで高速に動作するテラヘルツ波検出器の実現である。将来の通信応用では、検出器そのものの消費電力を可能な限り抑える必要がある。そのため、外部バイアスを印加しない、または極めて小さなバイアスで動作する受動型検出器の実現が重要である。本研究では、グラフェンおよび関連する二次元ディラック材料を用いて、ゼロバイアスまたは低バイアスでの高速応答を検討した。

第三に、大面積化・集積化を見据えた展開である。機械剥離グラフェンは高品質な基礎実験に適している一方、実用化には大面積化や再現性の向上が不可欠である。そのため、本研究では、SiC 基板上に成長したエピタキシャルグラフェンを用いた短チャネル素子についても検討し、将来的な集積型テラヘルツデバイスへの展開を視野に入れた。

3 研究方法

3-1 デバイス設計

はじめに、量子バリア構造を導入したグラフェン電界効果トランジスタの設計を行った。デバイス設計では、グラフェンチャンネルの長さ、幅、層数、ゲート絶縁膜の厚み、ソース・ドレイン電極の配置、ゲート構造などを検討した。特に、テラヘルツ波照射時に電氣的応答を効率よく取り出すためには、チャンネル内の電子密度分布と電位分布を適切に制御する必要がある。本研究では、グラフェンチャンネルに微細構造または局所的なポテンシャル変調を導入することで、電子の移動を制御し、テラヘルツ波によって励起された電子運動を直流電圧または直流電流として取り出す構造を検討した。この考え方は、従来の均一な二次元材料チャンネルを用いる検出器とは異なり、チャンネルそのものに機能を持たせる点に特徴がある。

また、グラフェン微細リボンおよびナノブリッジからなるメタサーフェス構造についても理論的検討を行った。図1に示すように、この構造では、グラフェンチャンネルを微細リボン状に加工し、隣接する領域を狭いブリッジ構造で接続することで、チャンネル内に人工的なエネルギー障壁を形成する。このような構造では、隣接するグラフェン領域間に電圧を印加することにより電子および正孔が誘起され、ナノブリッジを介したキャリア輸送が生じる。さらに、テラヘルツ波照射または高周波変調によりキャリア温度と電流の間に正のフィードバックが形成され、非線形な電流応答やしきい値的な応答が得られることが理論的に示された[5]。図1右に示す計算結果では、変調周波数の増加に伴い利得帯域幅積が増大しており、構造パラメータを適切に設計することで、高速なテラヘルツ共鳴検出器として動作し得ることが示唆された。この知見は、グラフェン中に人工的なエネルギー障壁を設ける本研究の設計概念を支えるものである。

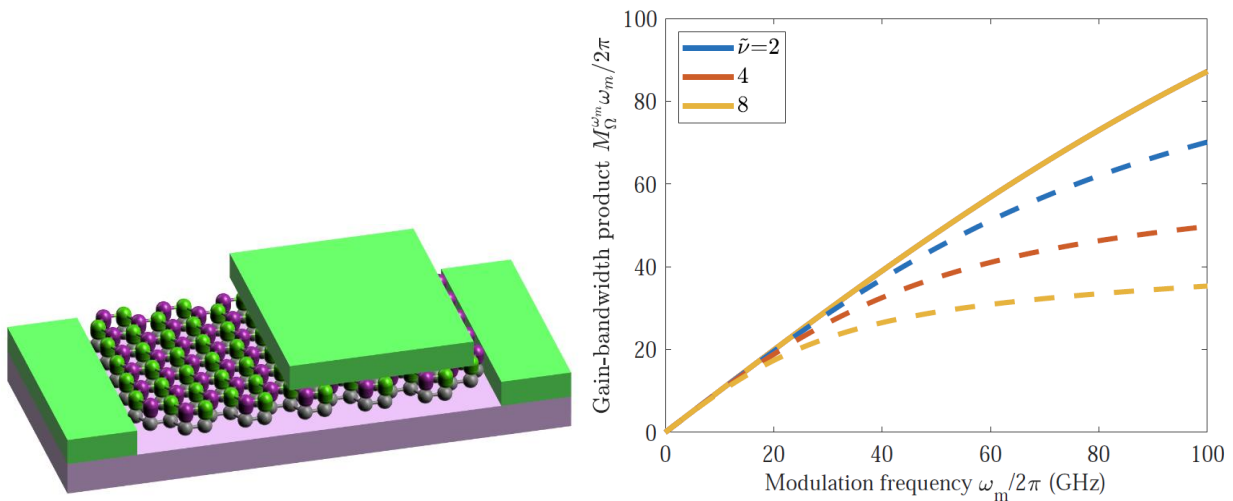


図1. グラフェン微細リボン・ナノブリッジ構造を用いたテラヘルツ共鳴検出器の設計概念と理論特性。左図は、グラフェンチャンネルに人工的なエネルギー障壁を導入した素子構造の模式図を示す。右図は、変調周波数に対する利得帯域幅積の計算結果を示しており、構造パラメータの最適化により高速テラヘルツ応答の増強が期待できることを示している。

3-2 デバイス作製

次に、設計指針に基づき、グラフェンをチャンネルとする電界効果トランジスタの試作を行った。試作作製では、グラファイト、窒化ホウ素、セレン化ガリウムなどの二次元材料を機械剥離により作製し、光学顕微鏡観察により適切な厚みと形状を有する薄片を選別した。その後、乾式転写法を用いて、酸化膜付き高濃度ドーパシリコン基板上に二次元材料を転写・積層した。

電極作製には、光リソグラフィおよび電子ビーム露光を用いた。ソース・ドレイン電極のパターンを形成した後、電子ビーム蒸着によりチタン・金電極を成膜し、リフトオフにより電極構造を完成させた。さらに、必要に応じて上部ゲート構造やアンテナ電極構造を導入し、テラヘルツ波照射時の電気信号を取り出せる構

成とした。図2に、グラフェンチャネルの形成から、金属電極の作製、二次元絶縁膜の転写、上部ゲート電極の形成までの代表的な作製プロセスを示す。各工程では、光学顕微鏡像を用いてグラフェン薄片、電極パターン、絶縁膜の位置合わせを確認しながら、テラヘルツ波検出に適したデバイス構造を形成した[6-8]。

作製したデバイスについては、チャネル抵抗、ソース・ドレイン電流電圧特性、ゲート電圧依存性を測定した。これにより、グラフェンと金属電極の接触状態、チャネルのドーピング状態、キャリア移動度、トランジスタ動作の有無を評価した。

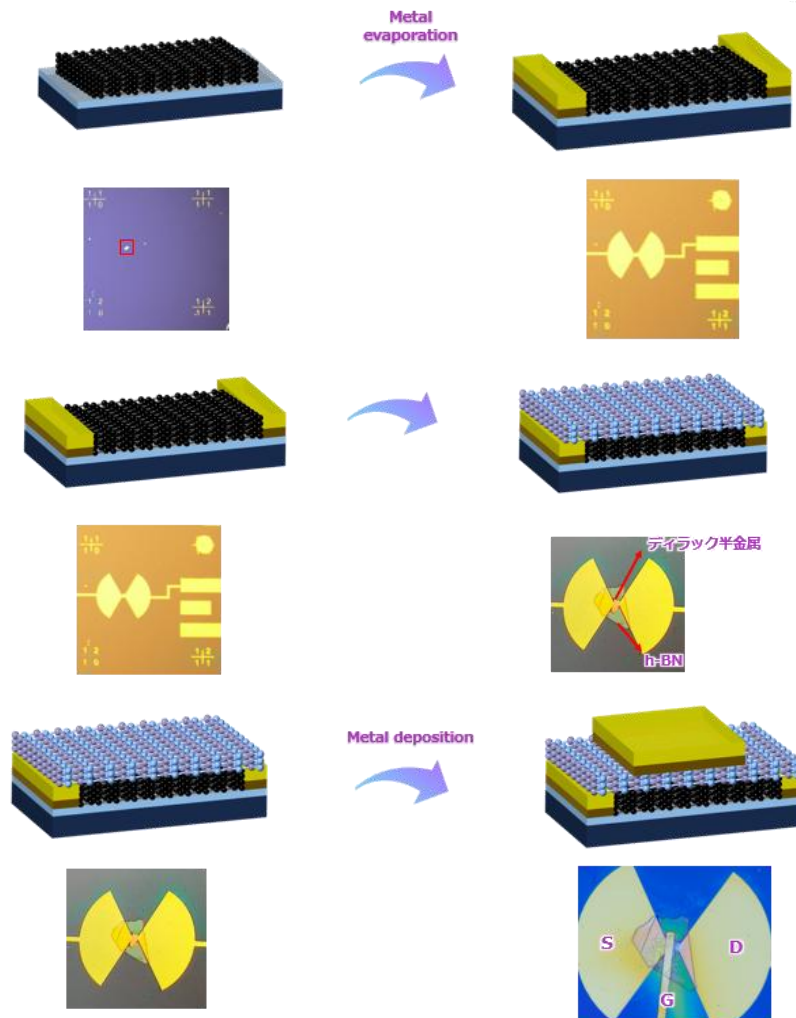


図2. グラフェン電界効果トランジスタ型テラヘルツ波検出器の作製プロセス。機械剥離により得られたグラフェン薄片を基板上に配置し、金属蒸着とリフトオフによりソース・ドレイン電極を形成した。その後、二次元絶縁膜を転写し、上部ゲート電極およびテラヘルツ波結合用の電極構造を作製した。各段階の光学顕微鏡像は、グラフェンチャネル、金属電極、絶縁膜、ゲート電極の位置合わせおよびデバイス構造の形成過程を示している。

3-3 デバイス特性評価

作製したグラフェン電界効果トランジスタに対して、室温での電気特性評価を行った。ソース・ドレイン電圧を印加した測定では、ほぼ線形の電流応答が得られ、グラフェンと金属電極の間に良好な電氣的接触が形成されていることを確認した。また、ゲート電圧を変化させた測定では、グラフェン特有の電荷中性点に

対応する電流変化を観測した。この結果から、作製プロセスに伴う軽度のドーピング状態を評価することができた。

代表的な試作デバイスでは、移動度が約 $900 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度と見積もられた。この値は、グラフェン電界効果トランジスタとしての基本動作を確認するには十分であり、量子バリア構造を導入したテラヘルツ波検出器の基礎となる作製・評価技術を構築できたことを示している。一方で、機械剥離および乾式転写工程に起因する残渣、不純物、局所的なひずみ、絶縁膜界面の均一性がデバイス性能に影響することも明らかとなった。

このため、研究期間後半では、転写温度、接触圧力、転写時の環境条件、電極形成条件を見直し、グラフェンチャネルの品質向上、接触抵抗の低減、絶縁膜転写条件の最適化を進めた。

4 研究成果

4-1 二次元ディラック材料ヘテロ構造による高速テラヘルツ波検出

本研究により、グラフェンチャネル内に人工的な量子バリア構造を導入するためのデバイス設計、作製、評価の基盤を構築した。従来の二次元材料テラヘルツ検出器では、チャネル材料の光起電力効果、熱電効果、ボロメトリック効果などが主に利用されてきた。一方、本研究では、チャネル内部の電子状態を人工的に制御し、テラヘルツ波によって生じる電子運動を効率的に電気信号へ変換することを目指した。このような設計概念に基づき、グラフェンチャネルの構造、電極配置、ゲート構造、絶縁膜構成を検討し、試作デバイスにおいて基本的な電界効果トランジスタ動作を確認した。特に、ゲート電圧によりチャネル電流を制御できることを確認したことは、今後、量子バリア構造をより精密に制御し、テラヘルツ波応答を高める上で重要な成果である。

さらに、本研究では、グラフェン以外の二次元ディラック材料である Bi_2Se_3 と窒化ホウ素からなるヘテロ構造を用いたテラヘルツ波検出も実施した。このデバイスでは、二次元材料と絶縁膜との界面に形成される非対称な電気特性を利用し、テラヘルツ波照射時の電圧応答を測定した。図 3 に、作製した二次元ディラック材料ヘテロ構造デバイスの光学顕微鏡像、テラヘルツ波照射測定概念図、および時間領域における光電圧応答を示す。0.95 THz のテラヘルツ波を用いた測定の結果、室温において約 200 ps の高速応答、および 40 mV/W 程度の感度を示すテラヘルツ波検出に成功した。さらに、印加バイアスの極性および大きさに応じて光電圧応答の振幅と符号が変化することを確認した。これは、二次元材料と絶縁膜界面に形成される非対称なエネルギー障壁を介したキャリア輸送が、テラヘルツ波検出に寄与していることを示している。加えて、この応答はゼロバイアス条件下でも確認され、外部電源をほとんど必要としない受動型テラヘルツ検出器の可能性を示した。この成果は、Beyond 5G および 6G 通信に向けた低消費電力受信素子の実現に向けて重要な知見である。さらに、非対称な周期ゲート構造を有するグラフェン電界効果トランジスタを用いて、室温・ゼロバイアスでの高速テラヘルツ波検出を検討した。この構造では、二組のゲート電極を非対称に配置することで、グラフェンチャネル中の電子密度を周期的に変調した。これにより、テラヘルツ波照射時の電子運動を直流電気信号へ変換しやすい状態を形成した。

実験の結果、ソース・ドレイン間にバイアスを印加しない条件においても、テラヘルツ波照射に対する明確な応答が得られた。室温において、応答時間は約 185 ps、感度は約 48 mV/W であった。この結果は、グラフェンチャネル内の電子密度分布を人工的に制御することにより、従来の熱的効果や光起電力効果だけでは説明しにくい高速応答を引き出せることを示している。

この成果は、本研究で提案する量子バリア構造導入型グラフェン検出器の設計概念を強く支持するものである。すなわち、グラフェンチャネル中に非対称性や周期性を導入することで、外部バイアスに依存しない高速テラヘルツ波検出が可能となることを示した。

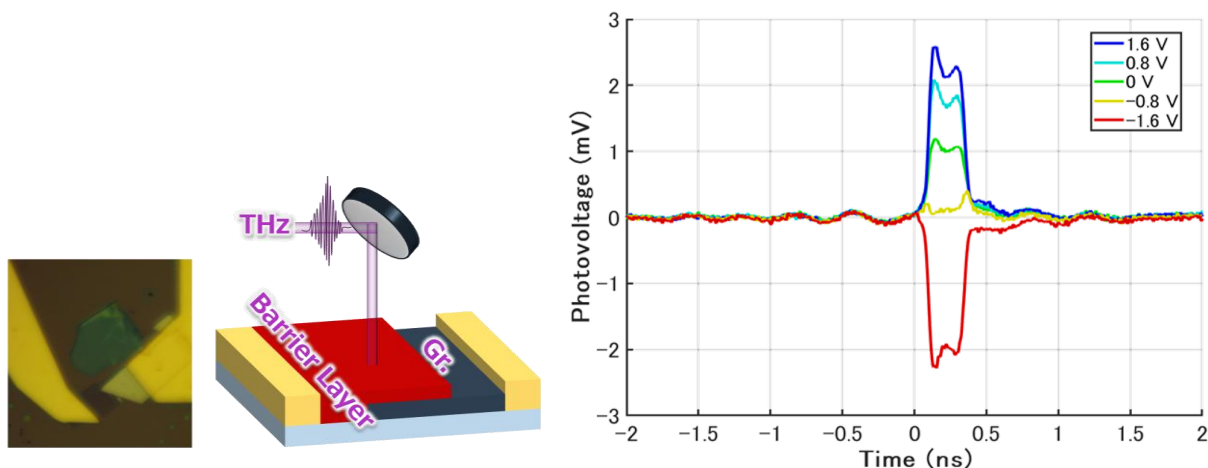


図3 二次元ディラック材料ヘテロ構造を用いた高速テラヘルツ波検出。左は作製した Bi_2Se_3 /窒化ホウ素ヘテロ構造デバイスの光学顕微鏡像、中央はテラヘルツ波照射下における光電圧測定の概念図、右は異なる印加バイアス条件における時間領域の光電圧応答を示す。0.95 THz のテラヘルツ波照射に対して、室温で約 200 ps の高速応答が得られ、二次元材料ヘテロ界面を用いた低消費電力テラヘルツ波検出の有効性が確認された。

4-2 非対称ゲート型グラフェン素子による室温・ゼロバイアス高速応答

実用化を見据えると、機械剥離グラフェンだけでなく、大面積化・集積化に適したグラフェン材料の利用が不可欠である。そこで本研究では、SiC 基板上に成長したエピタキシャルグラフェンを用いた短チャネル電界効果トランジスタの研究も進めた。

作製した短チャネル素子において、ゲート電圧およびドレイン電圧に依存する非線形な電流応答を観測した。特に、特定の電圧領域において、通常の線形伝導では説明できない電流変化が見られ、電荷の集団的相互作用に由来する不安定性が生じていることが示唆された。この現象は、グラフェン中の高速キャリア輸送と短チャネル構造に由来するものであり、テラヘルツ波検出器のみならず、将来的なテラヘルツ発振器や増幅器への応用にもつながる可能性がある。

本成果は、The 83rd Device Research Conference において発表し、SiC 上エピタキシャルグラフェン素子が、将来の大面積・集積型テラヘルツデバイスの有力なプラットフォームとなり得ることを示した。本研究では、グラフェンチャンネル中の人工的なエネルギー障壁をより一般化した構造として、グラフェン微細リボンと広バンドギャップナノブリッジからなるメタサーフェス構造についても理論解析を行った。この構造では、隣接するグラフェン微細リボン間に電圧を印加することで、電子と正孔が誘起され、それらがナノブリッジを介して輸送される。

解析の結果、ナノブリッジを介した熱励起電流によりキャリアが加熱され、キャリア温度の上昇がさらに電流を増加させる正のフィードバック機構が形成されることが分かった。この機構により、しきい値的な電流応答やS字型の電流電圧特性が生じ得ることを明らかにした。この成果は、Journal of Applied Physics に発表した。この知見は、本研究で進めるグラフェン量子バリア型テラヘルツ波検出器の動作原理を理解する上で重要である。すなわち、グラフェンチャンネル内に人工的なエネルギー障壁を形成することにより、ホットキャリア効果や非線形電気応答を積極的に利用できることを示している。これにより、テラヘルツ波検出器、赤外・テラヘルツ光源、高速スイッチング素子などへの展開が期待される。

5 成果の意義及び将来展望

本研究の意義は、グラフェンを単なる高移動度チャネル材料として用いるのではなく、チャネル内部の電

子状態を人工的に設計することで、テラヘルツ波応答を制御する新しいデバイス設計概念を示した点にある。従来の二次元材料検出器では、材料固有の光応答や熱応答を利用する場合が多かったが、本研究では、微細構造、量子バリア、非対称ゲート、短チャネル構造を組み合わせることで、電子輸送そのものをテラヘルツ波検出に適した状態へ導くことを目指した。

また、 Bi_2Se_3 ヘテロ構造および非対称ゲート型グラフェン素子において、100～200 ps 程度の高速応答を確認したことは、テラヘルツ通信応用にとって重要である。これは、将来の高速無線通信において、受信素子が高速変調信号に追従できる可能性を示すものである。さらに、ゼロバイアスまたは低バイアスで応答が得られたことは、低消費電力受信器の実現に向けて大きな利点である。

加えて、SiC 上エピタキシャルグラフェン短チャネル素子で非線形伝導を確認したことは、基礎物理と実用化の両面で重要である。SiC 上エピタキシャルグラフェンは、大面積化、ウェハスケール作製、集積化に適しており、将来的なテラヘルツ検出器アレイやオンチップ受信回路への展開が期待できる。

今後は、本研究で構築したグラフェン量子バリア型デバイスの設計・作製・評価技術をさらに発展させ、より高感度かつ高再現性のテラヘルツ波検出器の実現を目指す。具体的には、第一に、グラフェンチャネル中の量子バリア構造をより高精度に形成するプロセスを確立する必要がある。電子ビーム露光、反応性イオンエッチング、二次元材料転写技術を組み合わせ、構造寸法、周期、界面清浄性を制御する。第二に、アンテナ構造との集積化を進める。テラヘルツ波を効率よくグラフェンチャネルへ結合させるためには、ボウタイアンテナ、スロットアンテナ、グレーディングゲートなどの電磁設計が重要である。今後は、デバイス構造とアンテナ構造を一体的に最適化し、入射テラヘルツ波を効率よく電気信号へ変換する構造を検討する。第三に、SiC 上エピタキシャルグラフェンを用いた大面積化を進める。機械剥離グラフェンで得られた知見を、ウェハスケールのグラフェン素子へ展開することで、実用的なテラヘルツ検出器アレイや通信受信モジュールへの応用が期待できる。以上のように、本研究により、Beyond 5G および 6G 通信に資する高感度・高速・低消費電力テラヘルツ波検出器の実現に向けた重要な基盤を構築することができた。

【参考文献】

- [1] T. Otsuji, V.I. Ryzhii, S.A. Boubanga-Tombet, D. Yadav, A. Satou, T. Suemitsu, C. Tang, K. Tamura, H. Fukidome, M. Suemitsu, W. Knap, Y.M. Meziani, K. Narahara, M. Ryzhii, M.S. Shur, Recent advances in the physics of Dirac plasmons in graphene and related 2D materials and their THz device applications, *Applied Physics Express*, 19 (2026). <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ae3e37>
- [2] V. Ryzhii, C. Tang, M. Ryzhii, M.S. Shur, Graphene-Based Topological Structures for Terahertz Plasmonics, *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 0 2641003 (2026). <https://doi.org/10.1142/s012915642641003x>
- [3] V. Ryzhii, C. Tang, M. Ryzhii, T. Otsuji, M.S. Shur, Rectification and bolometric terahertz radiation detectors based on perforated graphene structures exhibiting plasmonic resonant response, *Journal of Applied Physics*, 137 244501 (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0274671>
- [4] V. Ryzhii, C. Tang, T. Otsuji, M. Ryzhii, M. Shur, Detection of terahertz radiation using topological graphene micro- nanoribbon structures with transverse plasmonic resonant cavities, *Journal of Applied Physics*, 136 (2024). <https://doi.org/10.1063/5.0239999>
- [5] M. Ryzhii, V. Ryzhii, C. Tang, T. Otsuji, V. Mitin, M.S. Shur, Temperature Dependence of Hot-Electron Graphene Fet Bolometric Detectors Response to Modulated Terahertz Radiation, *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 2440024 (2024). <https://doi.org/10.1142/S012915642440024X>
- [6] W. Wang, N. Clark, M. Hamer, A. Carl, E. Tovari, S. Sullivan-Allsop, E. Tillotson, Y. Gao, H. de Latour, F. Selles, J. Howarth, E.G. Castanon, M. Zhou, H. Bai, X. Li, A. Weston, K. Watanabe, T. Taniguchi, C. Mattevi, T.H. Bointon, P.V. Wiper, A.J. Strudwick, L.A. Ponomarenko, A.V. Kretinin, S.J. Haigh, A. Summerfield, R. Gorbachev, Clean assembly of van der Waals heterostructures

using silicon nitride membranes, Nature Electronics, 6 981 (2023).
<https://doi.org/10.1038/s41928-023-01075-y>

- [7] M. Onodera, Y. Wakafuji, T. Hashimoto, S. Masubuchi, R. Moriya, Y. Zhang, K. Watanabe, T. Taniguchi, T. Machida, All-dry flip-over stacking of van der Waals junctions of 2D materials using polyvinyl chloride, Sci Rep, 12 21963 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26193-z>
- [8] F. Pizzocchero, L. Gammelgaard, B.S. Jessen, J.M. Caridad, L. Wang, J. Hone, P. Boggild, T.J. Booth, The hot pick-up technique for batch assembly of van der Waals heterostructures, Nat Commun, 7 11894 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms11894>

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Thermal hot-carrier breakdown in metasurface structures based on coplanar arrays of graphene microribbons connected with wide-gap bridges	V. Ryzhii, M. Ryzhii, M. S. Shur, T. Otsuji, C. Tang, Journal of Applied Physics, 139 (2026).	2026.03
Ultrafast THz detection based on low-dimensional Dirac semimetals,	C. Tang, in: The 4th International Symposium on Frontiers in Terahertz Technology (FTT 2025), Tohokushima, Japan, 2025.	2025.10
Observation of Coulombic-Drag-Induced Instability in Short-Channel SiC Epitaxial Graphene Field-Effect Transistors	C. Tang, K. Tamura, H. Kudo, A. Satou, V. Ryzhii, T. Otsuji, in: The 83rd Device Research Conference (DRC2025), Durham, USA, 2025. https://doi.org/10.1109/DRC66027.2025.11105720	2025.06