

低次元量子バリアによる高速テラヘルツ検出

High-Speed THz detection based on low-dimensional quantum barrier



唐 超 (Chao TANG, Ph. D.)

東北大学 学際科学フロンティア研究所 助教

(Assistant Professor, Tohoku University, FRIS)

IEEE 日本応用物理学会 他

著書: Fundamental and Applied Problems in Terahertz-related Devices

and Technologies, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.出版 (2026 年)

研究専門分野: テラヘルツ光学 結晶工学

あらまし

IoT 社会や次世代 6G 通信に向けたテラヘルツ (THz) 帯の開拓において、室温動作と高感度・超高速応答を両立する検出器の開発が急務となっている。本研究は、グラフェン等の二次元材料を用い、従来の均一なチャネルに依存するのではなく、周期的な欠陥構造や異種材料積層を用いて「ナノ局在化^{*1}による量子バリア」を導入した革新的な電界効果トランジスタ型 THz 検出器の創出を目的とした。本研究では、独自の転写技術によるデバイス作製や、放射光施設を用いた界面バンド構造の実験的解明を通じて、予測的なデバイス設計指針を確立した。

その結果、試作したアンテナ一体型グラフェン FET や、トポロジカル絶縁体 (セレン化ビスマス、グラフェン等) を用いたレクテナ構造^{*4}において、プラズモン整流効果^{*4}等を利用することで、室温かつゼロバイアスの条件下で約 200 ピコ秒の超高速応答と極めて高い検出感度を実証した。さらに、バリアの構造パラメータを制御するだけで、0.1~2.5 THz の広範囲にわたって応答周波数帯域を自在に調整可能であることも理論的に考察され、これらの成果は、次世代通信や非破壊検査、医療診断など、Society 5.0 の基盤となる高機能 THz デバイスの実用化に向けた重要な道を拓くものである。

1. 研究の目的

本研究は、グラフェンチャネル FET に量子バリア構造を導入することにより、既存の素子と比べ様々な入射周波数や偏向方向へと容易に対応できる機能的かつ高速な THz 検出を創出することである。また、非破壊検査、医療診断、防災などの場面に開発した THz 検出デバイスを実用化し、来たる Society5.0 へと貢献する。

2. 研究の背景

あらゆるモノがインターネットに繋がる IoT 社会の進展に伴い、現行の 5G 通信を 100 倍以上上回る超高速・大容量な次世代 6G 無線通信の実現が切望されており、その鍵を握る未利用周波数帯としてテラヘルツ帯の開拓が世界的な課題となっている。THz 波は電波の透過性と光波の直進性を併せ持つ特異な電磁波であるが、電子工学と光学の境界に位置する物理的な制約から、効率的な光源や検出器の開発が困難を極める「テラヘルツ・ギャップ」が生じており、既存の化合物半導体素子では室温下での感度や応答速度に限界がある (Figure 1)。

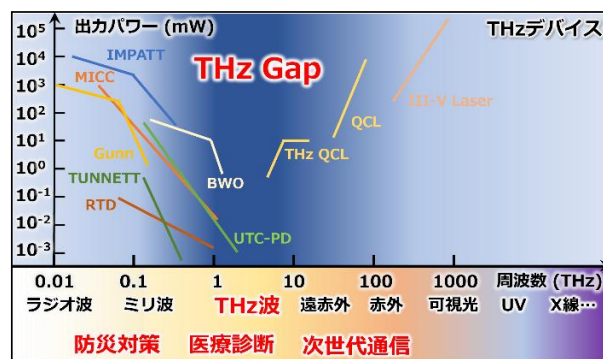


Figure 1 THz の応用と THz デバイスの現状

この技術的峡谷を克服する新たなルートとして、国内外ではグラフェンに代表される二次元材料の優れた光電子物性やプラズモニック物性を利用した検出器の研究が盛んに行われてきた。これまでに、グラフェン、黒リン、セレン化ビスマスなどの単一材料を用いた検出器や、それらを積層したヘテロ構造^{*2}の研究が進展してきたが、その多くは均一な材料チャネルに依存した構造に留まっており、既存素子の感度を劇的に凌駕

低次元量子バリアによる高速テラヘルツ検出

High-Speed THz detection based on low-dimensional quantum barrier

するまでには至っていなかった。

このような状況を打破するため、研究の潮流は単一の均一材料から、異なる材料を組み合わせたヘテロ構造やメタサーフェス構造^{*3}の導入へと向かっている。例えば、グラフェンマイクロリボンやグラフェンナノリボンや黒リン・ヒ素などのナノブリッジで接続したメタサーフェス構造や、厚さによってバンドギャップを調整できる黒リンを利用したグラフェン/黒リン (Gr/b-P) ヘテロ構造などが提案されている。これらの構造を利用して熱電子放出の変調やボロメトリック^{*5}ゲインを得るためには、界面のバンドアライメント^{*2}やエネルギー障壁を正確に制御することが不可欠であるが、予測的なデバイス設計に必要となる実験的に検証されたバンドアライメントのデータは長らく不足していた。また、セレン化ビスマスのような非対称なディラック分散を持つ材料を用いたヘテロ構造 (セレン化ビスマス/絶縁体など) も、新たな高感度 THz 検出の機会を提供するものとして期待されているが、サブ THz 帯域に留まるなど未開拓の領域が多い[1]。

一方で本研究グループは、均一チャンネルとは異なる構造的アプローチにより、THz 検出の分野で先行する成果を上げてきた。独自の非対称二重格子ゲートを持つグラフェン電界効果トランジスタを用いてプラズモン整流効果と光熱電効果^{*5}の協働による超高速検出を実証したほか、チャンネル自身に周期的な欠陥構造を人為的に導入して運動量空間に量子バリアを形成すれば、THz 波の周波数可変的な検出が可能になると理論的に提案している。

本研究は、これら国内外の理論的・実験的な研究動向を踏まえ、従来のように均一材料に対して外部から構造や原理を導入する思考を打破するものである。グラフェンチャンネルに周期性欠陥構造によるナノ局在化量子バリアを導入することや、ヘテロ構造における界面バンドアライメントを解明してデバイス設計の根幹に組み込むことで、既存の素子と比べて多様な入射周波数や偏光方向に容易に対応できる革新的な THz 検出器の創出を目指している。そして、開発した高機能な THz 検出デバイスを非破壊検査や医療診断などに実用化し、来たる Society 5.0 の実現に貢献することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

研究方法、現在までに得られた研究成果、研究の意義、および研究者自身の見解について説明する。

研究の方法として、本研究はグラフェンや黒リン、セレン化ビスマスといった二次元材料を用い、均一なチャンネルではなく、周期的な欠陥構造や異種材料の積層による局在量子バリアを人為的に導入する手法を採用している。デバイス作製においては、独自の「Hot Transfer 法」^{*6}や改良された金スタンプ法^{*6}を駆使して大面積かつ高品質な二次元材料を剥離・転写し、六方晶窒化ホウ素などとのヘテロ構造を構築している。さらに、電子線描画リソグラフィと金属蒸着を用いて、グラフェンチャンネルにアンテナ一体型の電極や周期的なゲート構造を形成している。異種材料間の界面におけるエネルギー障壁を正確に評価するため、大型放射光施設 (SPring-8 や NanoTerasu) を利用した硬 X 線光電子分光 (XPS) 測定を実施している[2]。特性評価にあたっては、He-Ne レーザーから THz 波までをカバーする光学顕微シシステムや、パルス連続波 THz 光源を用いた測定系を構築し、室温での光電圧応答や動的な応答速度を高周波 RF プロブ^{*7}でリアルタイムに観測している。理論面では、有限要素法や第一原理計算に特化した高性能計算機を導入し、プラズモン共鳴特性やボロメトリック輸送モデルの詳細なシミュレーションを行っている (Figure 2)。

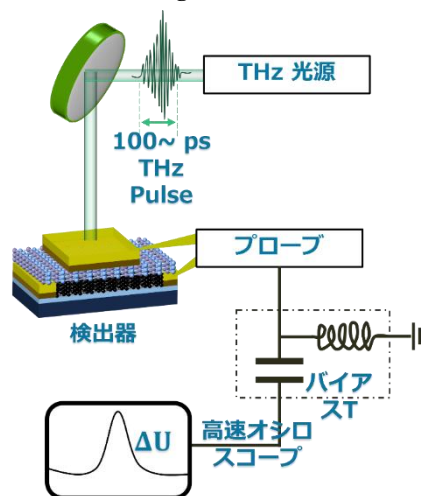


Figure 2 量子バリアテラヘルツ検出器デバイス
概念と実証のテラヘルツ検出システム

低次元量子バリアによる高速テラヘルツ検出

High-Speed THz detection based on low-dimensional quantum barrier

現在までに得られた研究成果として、理論と実験の両面から多くの画期的な進展があった。XPS 測定による界面バンドアライメントの解析から、グラフェンと黒リンの界面に形成される量子バリアの高さが約 85 meV であることが実験的に特定され、この値を組み込んだ輸送モデルにより、室温かつバイアスで約 10 V/W 桁に迫る極めて高い電圧応答性が予測された。[2] また、トポロジカル絶縁体であるセレン化ビスマスと h-BN を用いたレクテナ構造デバイスの作製に成功し、室温かつゼロバイアスという条件下で、200 ps の高速応答と 40 mV/W の感度を実証した。さらに、非対称な周期ゲート構造を持つグラフェン電界効果トランジスタにおいて、プラズモン整流効果単独の寄与により、室温・ゼロバイアスで 185 ps の高速応答と 48 mV/W の高感度検出が達成された。デバイスの構造最適化に関しても、アンテナ一体型のグラフェン FET を試作し、アンテナ効果による THz 波の集光効率向上に伴って応答電圧が大幅に増加することが確認されている。

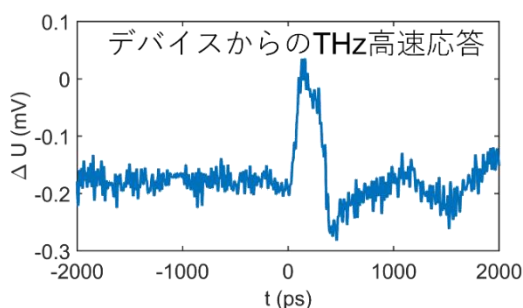


Figure 3 Hot Transfer による量子バリアディラック半金属 THz レクテナ作製及びその 100ps 級高速テラヘルツ応答

さらに理論研究[3]では、グラフェンマイクロリボン等を用いたメタサーフェス構造において、キャリア加熱と熱電子放出電流のポジティブフィードバックによる「熱的ホットキャリア・ブレイクダウン」*8 という新現象が発見され、S 字型の電流・電圧特性による高速スイッチング機能への応用可能性が示された。加えて、チャネル長や量子局在構造のパラメータを制御することで、プラズモン共鳴周波数を 0.1 から 2.5 THz の範囲で柔軟にチューニングできることも明らかになっている (Figure 3)。

本研究の意義は、非破壊検査や医療診断、次世代の超高速 6G 無線通信などに極めて有用でありながら、効率的な光源や検出器の開発が困難であった「テラヘルツ・ギャップ」を克服するための重要な足掛かりとなる点にある。既存の化合物半導体素子では実現が難しかった室温・無冷却での超高速かつ高感度な検出を、二次元材料の独自の光電子物性とプラズモニクスを生かして可能にしたことは、学術的にも応用的にも大きな価値を持つ。さらに、単一の均一な材料に依存する従来の枠組みを打ち破り、チャネル内に人為的な周期欠陥や積層による量子バリアを導入する「バンドエンジニアリング」の手法を確立したことで、構造の寸法や材料の組み合わせを変えるだけで応答周波数帯を自在に制御できる全く新しいスマートなデバイス設計のパラダイムを切り拓いた。このような革新的な検出器の実用化は、IoT 社会の急激な進展や Society 5.0 の実現に向けた次世代インフラの基盤技術として、多大な波及効果をもたらすことが期待されている。

研究者自身の見解として、XPS 測定により特定された約 85 meV というバリア高さについて、これが室温の熱エネルギーに対して熱的なアクセス性を保ちつつも漏れ電流を防ぐ「ボロメトリックゲインにとって極めて有利な領域」であると判断しており、極低温冷却を必要としない高性能な THz 検出器の実現に強い確信を抱いている。また、非対称ゲートグラフェン FET の実験結果から、キャリアの空乏領域と注入領域を周期的に配置することによる「プラズモン整流効果」こそが、従来の光熱電効果などの検出メカニズムよりもテラヘルツ波の超高速応答を支配する極めて重要なメカニズムであると推論している。さらに、ゼロバイア

低次元量子バリアによる高速テラヘルツ検出

High-Speed THz detection based on low-dimensional quantum barrier

ス条件下でも十分な光電圧応答が得られるという事実に基づいて、エネルギー消費を最小限に抑えたパッシブなテラヘルツ検出システムを構築できると考えている。今後の展望として、アンテナや共振器との結合をさらに最適化し、新しく改良した金スタンプ法などの大面積転写技術を活用することで、ウェハーレベルでのアレイ化やテラヘルツカメラ、医療用 CT といった大規模集積化機能デバイスの量産化へと展開できるとの見解を示している。

4. 将来展望

本研究の目標である革新的な周波数可変 THz 検出器は、電波の透過性と光波の直進性を併せ持つテラヘルツ波の特性を活かし、将来的に多岐にわたる分野での応用が期待されている。具体的には、透過性を利用した構造物や材料の非破壊検査、および防災・減災分野への応用が挙げられる。また、X 線よりも安全な数 meV のフォトンエネルギーを用いるため、ガン組織を識別可能な医療用 THz コンピュータ断層撮影 (CT) などの医療診断分野への展開も極めて有望である。さらに、あらゆるモノがインターネットに繋がる IoT 社会の進展に伴い、現行の 5G を 100 倍以上上回る超高速・大容量な次世代 6G 無線通信のインフラとして、未利用の THz 帯を開拓する中核的な役割を果たすと考えられる。これに加えて、ゼロバイアス下でも動作する特性を活かし、エネルギー消費を最小限に抑えたパッシブ THz 検出システム[1]や、高速な電圧制御電流スイッチ、各種センサー、熱的テラヘルツおよび赤外線白熱光源としての応用も可能である。

実用化の見通しと時間的な展望については、短期・中期・長期の段階的なプロセスとして描くことができる。短期的には、デバイス構造の最適化と設計指針の確立が進められている。現在は、カプセル化やコンタクト、ゲート制御などによる異種材料間の界面バリアの安定化や、アンテナおよび共振器との結合の最適化が進められている段階である。実験的に特定されたバンドアライメントのデータを輸送モデルに組み込むことで、黒リンの膜厚や幾何学的なパラメータとデバイス性能を直接関連付ける確固たる設計指針が確立されつつある。これにより、パターニングとエッチングと

いう簡易な手法で応答周波数帯域を自在に制御できるスマートなデバイス製造の基盤が整う。

中期的な展望としては、量産化プロセスの確立とウェハーレベルでのアレイ化が挙げられる。本研究において新たに導入された金スタンプ法などの大面積転写技術を活用することで、ミリメートルサイズのグラフェンや二硫化モリブデンといった二次元材料を効率よく剥離・転写できることが実証されており、量産化に向けた技術的な道筋はすでに拓かれている。この技術をさらにスケールアップさせ、ウェハーレベルでのアレイ化を実現することが実用化への重要なマイルストーンとなる。長期的には、大規模集積化デバイスの創出と Society 5.0 への実装が見込まれる。大面積の二次元材料結晶成長技術と高度な半導体集積化プロセス技術が融合することで、単一の検出素子から、THz カメラや医療用 THz-CT といった大規模集積化機能デバイスへの飛躍的な展開が期待される。最終的にこれらのデバイスは、次世代インフラである 6G 超高速通信や高度なセンシングネットワークに実装され、非破壊検査、医療診断、防災などの場面において、来たる Society 5.0 の実現に多大な貢献をもたらす実用的な基盤技術として社会に普及していく見通しである。

おわりに

本研究では、均一なチャネル材料に依存する従来の手法を打破し、「ナノ局在化による量子バリア」を導入した革新的な周波数可変 THz 検出器の創出を目指し、理論と実験の両面から研究を推進した。独自の転写技術 (Hot Transfer 法や改良された金スタンプ法) を駆使することで、グラフェンや黒リン、トポロジカル絶縁体といった二次元材料を用いた高品質なヘテロ構造デバイスの作製に成功した。

さらに、大型放射光施設を用いた硬 X 線光電子分光 (XPS) 測定によって異種材料間の界面バンドアライメントを実験的に解明し、確固たる予測的デバイス設計指針を確立した。その結果、試作した非対称ゲートグラフェン FET やセレン化ビスマスレクテナ構造において、プラズモン整流効果等を活用し、室温かつゼロバイアス下で 200 ピコ秒以下の超高速応答と極めて高い検出感度を実証した。これは、長年の技術的課題

低次元量子バリアによる高速テラヘルツ検出

High-Speed THz detection based on low-dimensional quantum barrier

であった「テラヘルツ・ギャップ」を克服し、エネルギー消費を最小限に抑えたパッシブセンシングを可能にする重要なブレイクスルーである。

今後の展望として、高性能計算機を用いたシミュレーションと実験との連携により、アンテナ構造や量子バリアのさらなる最適化を進めるとともに、実証された大面積転写技術を活用してウェハーレベルでのアレイ化へと展開していく。本研究で開拓されたスマートなデバイス設計のパラダイムは、THz カメラや医療用 THz-CT といった大規模集積化デバイスへの発展を見据えており、次世代の 6G 超高速無線通信や非破壊検査など、来たる Society 5.0 の実現を支える強力な基盤技術として多大な貢献をもたらすことが期待される。

用語解説

- *1 **ナノ局在化** 均一に広がるチャンネルではなく、ナノメートルスケールの微細な領域に意図的にエネルギー障壁（量子バリア）を局所的に形成すること
- *2 **ヘテロ構造** グラフェンと黒リン、あるいは Bi₂Se₃ と六方晶窒化ホウ素（h-BN）のように、異なる種類の二次元材料を積層させた複合構造をヘテロ構造と呼ぶ。バンドアライメントとは、これら異種材料を接合した界面において、電子が感じるエネルギーの壁の高さや形状がどのように配置されるか（界面のエネルギー障壁）を示すものである
- *3 **メタサーフェス構造** 表面に光の波長よりも小さい人工的な微細構造を周期的に配置し、特異な電磁気的特性を持たせた構造
- *4 **プラズモン整流効果** プラズモン整流効果は、非対称なゲート電極構造などを用いてチャンネル内のキャリア濃度を空間的に変調させることで、入射した高周波の THz 波（交流信号）を直流電圧に変換（整流）する現象であり、極めて高速な応答を可能にする。レクテナ構造は、電磁波を捉える「アンテナ」と直流に変換する「整流器（Rectifier）」を一体化したもので、外部からの電圧印加がない状態（ゼロバイアス）でも THz 波を検出できる。
- *5 **光熱電効果** PTE 効果は、THz 波の照射による局所的な加熱で生じた温度勾配が電圧に変換される検出メカニズムである。一方ボロメトリック効果は、

THz 波の吸収に伴って材料内の電子が加熱され、その変化を熱電子放出や抵抗変化などの電気信号として読み取るメカニズムである。

- *6 **Hot Transfer 法** 化学薬品によるダメージや汚染を避けながら、高品質な二次元材料を機械的に剥離し、目的の場所にミクロン単位の精度で積層する独自の面積転写技術。理想的なヘテロ構造を構築するプロセス技術。

参考文献

- [1] C. Tang, Ultrafast THz detection based on low-dimensional Dirac semimetals, in: The 4th International Symposium on Frontiers in Terahertz Technology (FTT 2025), Tohokushima, Japan, 2025.
- [2] C. Tang, Y. Shuang, V. Ryzhii, Band alignment engineering of graphene/black-phosphorus heterostructure for bolometric and plasmonic resonance terahertz detection, in: 2026 International Conference on Mobile and Miniaturized Terahertz Systems (ICM2TS2026), Skukuza, South Africa, 2026.
- [3] V. Ryzhii, M. Ryzhii, M. S. Shur, T. Otsuji, C. Tang; Thermal hot-carrier breakdown in metasurface structures based on coplanar arrays of graphene microribbons connected with wide-gap bridges. *J. Appl. Phys.* 7 March 2026; 139 (9): 094301. <https://doi.org/10.1063/5.0311222>

関連文献

- V. Ryzhii, C. Tang, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. Mitin, M. S. Shur; Dynamic characteristics of terahertz hot-electron graphene FET bolometers: Effect of electron cooling in channel and at side contacts. *J. Appl. Phys.* 21 May 2024; 135 (19): 194502. <https://doi.org/10.1063/5.0211116>
- V. Ryzhii, C. Tang, T. Otsuji, M. Ryzhii, V. Mitin, M. S. Shur; Resonant plasmonic detection of terahertz radiation in field-effect transistors with the graphene channel and the black-AsxP1-x gate layer.

低次元量子バリアによる高速テラヘルツ検出

High-Speed THz detection based on low-dimensional quantum barrier

Scientific Reports. 14 June 2023; 13: 9665 .
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-36802-0>

この研究は、令和5年度S C A T研究助成の対象として採用され、令和6～8年度に実施されたものです。