

最先端・次世代研究開発支援プログラム  
事後評価書

研究課題名	環境計測の基盤技術創成に向けた高機能テラヘルツ分光イメージング開発
研究機関・部局・職名	東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・准教授
氏名	河野 行雄

## 【研究目的】

物質・生体分析への利用が期待されている THz 波の計測技術は、他の周波数帯に比べて発展が後れており、これらの応用には、高分解能 THz 画像化技術や広帯域分光技術の開発が大きな課題になっていた。

そこで、本研究は、「固体ワンチップ型」をキーワードに、高性能なテラヘルツ (THz) 分光・イメージング素子の開発を目的とする。具体的な目標は以下のとおりである。

- ① 高分解能 THz 撮像素子の開発
- ② 広帯域 THz 分光素子の開発
- ③ 上記の応用研究

半導体やナノカーボン材料 (カーボンナノチューブやグラフェン) を利用して、高分解能画像計測・広帯域分光を可能にする THz 技術を創出する。

## 【総合評価】

<input type="radio"/>	特に優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	優れた成果が得られている
<input type="radio"/>	一定の成果が得られている
<input type="radio"/>	十分な成果が得られていない

## 【所見】

## ① 総合所見

本研究は、ナノカーボン材料を利用して高性能なテラヘルツ光の分光・イメージング技術の確立を目指した研究であるが、まず、イメージング技術に関しては、近接場光を利用した高感度、かつ超高分解能イメージング素子の実現、さらに単層カーボンナノチューブを用いたアレイ素子において、室温におけるテラヘルツ光の観測の成功、分光技術に関しては、グラフェンを用いたテラヘルツ光検出素子において、広帯域な感度域と磁場による周波数チューニングを実現するなど、優れた成果を挙げている。さらに、開発したテラヘルツ光のイメージング技術を応用して、半導体中を流れる電子の可視化など、今後の発展が期待できる成果を挙げており、当初の研究目的を十分に達成したと判断できる。さら

に、カーボンナノチューブアレイの温度を低減することにより観測されたホッピング伝導からアンダーソン局在への状態遷移に伴って観測されるテラヘルツ光の応答の巨大な増大は、特筆すべき成果であると共に今後の大きな発展も期待される興味深い成果である。

以上より、本研究では、十分高い成果を挙げたと評価できる。

## ② 目的の達成状況

・所期の目的が

(全て達成された ・ 一部達成された ・ 達成されなかった)

全体の目標として掲げたワンチップ THz 撮像分光素子の開発を実現するために①2次元電子ガスや量子ドットを用いた高感度検出 (ナノ構造の採用で 20 倍の信号補強)、②近接場を用いた高空間分解能イメージング ( $\mu\text{m}$  より優れた分解)、③広帯域チューナブル検出の 3 つの具体的な目標を設定している。それぞれの目標に対して所期の目的を達成したとみられる成果を達成し、論文として公表に至っており、十分当初の目的が達成されたと判断できる。

当該研究の主幹部分は、カメラや分光素子の要素技術開発であり、感度、空間分解能、周波数帯域など THz 波の検知技術に関しては、原理実証のレベルで大きな成果が上がっているが、汎用的な計測法としての完成度を高めること、実用に密着した応用を広げることが重要である。これらに対して、技術的な面では、半導体微細加工において専門技術者と協力するなど、産学協同取り組んでいることも評価できる。さらに、応用的な計測に関しては、主に試料提供を通じて、学内学外、外国の研究機関と連携関係があり、高分子の高次構造や、カーボンナノチューブなどへの応用を進めていることも評価できる。

## ③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が (ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が (創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

アパーチャーと金属製平面プローブを半導体 2 次元電子ガス検知器に集積した近接場イメージング素子は、波長の数百分の一の高い空間解像度を持ち、アクティブ計測 (外部 THz 光源を用いるもの)、パッシブ計測 (試料から自発的に放射される微弱な THz 波を対象とするもの) 両方の目的に使用可能な優れたものであり、他の技術に比べて明らかな優位性が認められる。

また、量子ドットにアンテナ構造を合体した素子では、アンテナを用いない場合に比較して 20 倍の感度を実現している。いずれも研究代表者の独自の発想によるものであり、極めて高い独創性と先進性が見られる。

特筆すべきは、単層グラフェン膜におけるランダウレベルを利用した波長可変検

知器を試作し、磁場とゲート電圧を変化させることにより、普通の半導体では実現不可能な高周波領域までの広帯域 (0.76~33THz) で検出周波数をチューニングできることを実証した。これは、素子そのものに分光機能を持たせたものであり、位置と波長を一度に選別できるワンチップ検知素子の原型として注目に値する。

グラフェンは発見されて間もない新素材であり、エレクトロニクスへの応用が期待されているが、未だ応用例は多くない。その中で、いち早くその特性に着目して応用に結びつけた意義は大きい。アレイ化による2次元分光撮像素子への展開も考えられる。炭素はシリコンにも勝る安価、安全な材料であるので、産業への利用にも大きな期待が持てる。

当初の目的の他の特筆事項としては、グラフェンにおける電子波の位相干渉効果を用いてTHz応答を観測したと報告されている。もし事実であれば、全く新しい原理に基づくTHz波の検出なども可能性があり、更なる発展が期待できる。

#### ④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が  
( 見込まれる ・ 見込まれない )

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が  
( 見込まれる ・ 見込まれない )

いくつかの先駆的な成果が上がっているため、関連分野への大きな寄与が期待される。アパーチャー付位置敏感検知素子、アンテナ付高感度検知素子、炭素ナノチューブによる近接場分光、チューニング機能を持つグラフェン検知素子など、いずれもユニークなもので、それぞれ発展の可能性を持っている。実用化に向けて産業界との適切な連携による展開が望まれる。

テラヘルツ技術は、研究計画の中でも述べられているように、化学、環境、安全管理など幅広い分野での利用が期待されている。実用を目指した技術開発が意識的に行われるようになってから日が浅いので、現在は幅広く基盤技術を育てていくフェーズにある。特に、光源技術に比べて検知技術は世界的に開発が遅れているので、このような状況の中で、いくつかの原理的に新規な提案を行って実証実験に成功している点は高く評価できる。「社会、経済」への直接的な貢献には未だ少し時間がかかるかもしれないが、日本発の世界に通用する新技術として完成されていくことに期待したい。

#### ⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが ( 行われた ・ 行われなかった )

ワンチップ THz 撮像分光素子の開発という最終目標に対して、3つの要素技術開発を具体的な個別目標として設定しており、それぞれの個別目標は着実に達成しているため、研究計画は適切であったと言える。技術開発や実験を中心とした研究の実施は、大学の研究センターという性格から、大学院生に負うところが多いと思われるが、研究代表者の基本的アイデアとリーダーシップのもとに、適正に行われ

たと見られる。

また研究代表者の所属機関の異動があったが、研究全体が円滑に推進できたことから研究のマネジメントは適切であったと考えられる。

さらに「今後の生産性やコストの課題解決、適切な連携」などの指摘事項に対しても真摯に対応している。ただし、未だ黎明期にあるこの分野において、コスト意識まで要求するのは、やや時期尚早であり、現在はむしろ原理的な立場から新規な技術を提案実証していくフェーズにあると考えられる。「開発のフェーズに応じて適切な連携を」という指摘に関しては、今回の補助事業期間終了後に、丁度フェーズが入れ替わるものと思われるので、本研究課題の中では、研究代表者が報告しているとおり、部分的な連携とその必要性の認識で十分と思われる。

発表論文 14 件、会議発表 44 件は、それぞれ内容が吟味された独創性の高い論文であり、成果の発表は十分適切に行われていると言える。招待講演や新聞雑誌報道の件数が多いのは、学界のみならず一般社会からも、この研究課題の研究成果が評価されていることを物語っている。

国民との科学・技術対話については、東京工業大学における一般向け公開講座や大学祭（工大祭）での公開講演会などで過大なエフォートを割かない範囲で実施している点で一定の評価ができる。