

研究課題別中間評価結果

1. 研究課題名：赤外－サブミリ波領域の光子検出器開発と走査型顕微鏡の開拓

2. 研究代表者名：小宮山 進（東京大学大学院総合文化研究科 教授）

3. 研究概要：

赤外光からサブミリ波にいたる電磁波領域は物質・生体系の研究一般にとって極めて重要なスペクトル領域であるにもかかわらず、周波数が光学領域とエレクトロニクスの中間領域にあるため従来技術が直接適用できず、測定を実行する上では最も困難な領域の一つである。本研究の目的の第一は、半導体量子構造の特性を積極的に利用して単一光子レベルの感度をもつ一連の検出器を開発し、従来の微弱信号検出技術に格段の進歩をもたらすことである。第二の狙いは、開発した検出器を近接場光学技術と組み合わせることによって、波長限界を越える空間分解能と超高感度を有する赤外光/サブミリ波領域の走査型顕微鏡を開拓し、そのことによって、実用に供し得る計測系を実現することである。それらをまとめて「テラヘルツ (THz) 単一光子分光学」という新たな研究分野を創出することを念頭に置いている。

第一の課題の検出器開発に関しては、既開発の遠赤外光子検出器を現時点で直ちに顕微鏡に活用するための改良と、より根本的な、新たな機構の開拓による新検出器創出という両面から研究を進めた。前者においては、電荷揺らぎの少ないGaAs/AlGaAsヘテロ構造基板（より高い2次元電子濃度と $100\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上の高移動度を持つ）で検出器を作成することにより、希釈冷凍機を使わずに、より簡便な ^3He クライオスタット(0.3K)中での動作に成功した。後者においては、2次元サブバンド間遷移を利用して、中赤外にいたる波長範囲の大幅な拡大を目指す複合型検出器の開拓を最終目標にすえて基本構想（特許出願、一部特許出願途上）を確立した。その中で、アルミニウム接合単電子トランジスタ (Al-SET) /ヘテロ構造量子ドットの複合検出器、2重量子井戸を用いた新規構造の複合検出器、InAsの自己組織化量子ドットによる光子検出器も構想し、一部開発に成功し、広い波長領域での単一光子検出の一手手前まで来ている。

第二の走査型顕微鏡開拓に関しては、既開発の走査型顕微鏡の光学系を改良することにより30倍の感度(10fW)と2倍の分解能(波長120ミクロンに対して50ミクロン)を達成した。さらに、改良した単一量子ドットによる光子検出器(波長120-150ミクロン)と組み合わせた新たな遠赤外走査型顕微鏡を開拓し、遠赤外光のフォトンカウンティング計測を初めて実現し、光子束10個/秒程度の今までにない極微弱光のイメージング画像を得ることに成功した。

4. 中間評価結果

4-1. 研究の進捗状況と今後の見込み

本研究は、CRESTの成果を継いで、(1) 赤外-サブミリ波全領域(テラヘルツ帯域)で高感度光子検出器を開拓し、(2) AFM技術と組み合わせて常温試料にも適用できる新しい走査型近接場赤外顕微鏡を開発することを目的として始められた。本研究の大きなねらいは、赤外からサブミリ波領域にかけての光子検出器の①波長範囲の拡大、②検出感度の向上、③検出器の動作温度の高温化④高分解能走査顕微鏡の開発、にある。このそれぞれのねらいについて、着実な進展が見られている。波長範囲、検出感度、顕微鏡分解能など、いずれをとってもトップレベルと思われる。いずれの実験も、独創性が高く、非常に良くデザインされ、かつ実験で出てきた現象に対して、鋭い洞察と慎重な考察が加えられている。例えば、量子Hall効果ブレイクダウン時の赤外光発光分布の実空間像など、基礎研究への非常に質の高い応用が展開されている。「当初の研究計画」の中の検出器のアイデアなどには、秀逸ではあるが、現実のfabrication技術を考えると実現にやや無理があった。しかし、そこを鋭い洞察と現実的な判断から、簡易な素子へと切り替えている点も、評価できる。また、開始当初は良質のGaAs/AlGaAsヘテロ構造の作製面にとまどっていたが、それによる遅れも現在は解消し、実験が順調に進んでいる。

研究推進の中で、研究プロジェクトから急遽離脱する博士研究員があったが、研究代表者は、適切にそれを補充して研究体制を維持し、研究を遂行している。良質のGaAs/AlGaAsヘテロ構造の作製という半導体の質向上のために、経験のある人物を自ら呼んできているが、そのようなことは、なかなかできることではなく、研究代表者としてのリーダーシップが良く発揮されている。

4-2. 研究成果の現状と今後の見込み

検出器の開発では、量子ドットとAl-SETの組み合わせ、新奇構造の2量子井戸構造検出器などを構想し、これらの動作確認をして、目標達成に向けて着実に成果を出している。特に後者の新奇2重量子井戸構造検出器は、製造プロセスが簡単で、検出器のアレイ化も比較的容易にできるので、バランスよく、波長範囲の拡大、検出感度の向上を図る極めて重要な新しい展開である。走査型近接場赤外顕微鏡の開発研究では、レンズ系の工夫と量子ドット光検出器の動作温度の高温化とによるテラヘルツ帯域での量子Hall電子系の微弱電流によるサイクロトロン発光をフォトンカウンティングイメージとして獲得したのは、世界初の成果である。

中赤外からサブミリ波の領域のテラヘルツ帯域で、このような超高感度の計測を次々と実現したばかりでなく、これを量子ホール系に応用して、これまでにないデータと知見を得た点は、高く評価される。世界的にもユニークな研究で、間違いなく世界のトップを走る研究である。

工業的に期待されるSi-SET系については進展が無いようだが、それ以外のところでは、計画通りか、計画を上回る成果を上げている。結晶成長の高品質化に一定の目処を付け、量子ドットとSETの組み合わせという基本概念による検出感度の向上、動作温度の拡大などが実証され、また、波長範囲の自由度の大きな量子井戸系には、新たな展開が期待できる。

これらは、本研究を、さらに発展させるための基礎として十分なものと思われる。テラヘルツ顕微鏡は実用化されれば強力な分析手段となる。この領域での分光・光学解析手段の飛躍に大きく貢献することが期待できる。

4-3. 総合的評価

本研究課題は研究代表者の発想により生まれ、成長してきた。我が国の内外に、類似研究が見られない独創的アイデアに基づくテラヘルツ帯域の研究である。独自に研究を進めているこの優れた基礎研究を、高く評価したい。

CREST研究において、磁場中では量子ドットの閉じこめポテンシャルが特徴的な分布を示すために、励起された電子とホールが空間的に分離され、励起状態が長時間持続する。研究代表者は、これを世界で初めて観測し、非常に高感度でサブミリ波を検出できるために、単一光子の観測が可能であることを実証した。この研究成果をベースにして、このSORSTプロジェクトの検出器の開発では、さまざまな超高感度な赤外・サブミリ波の検出器を実現することを目指している。そのため、微細加工で作製した量子ドットとその組み合わせ、自己組織化により形成されたInGaAs量子ドット、さらには新しく設計・製作した量子井戸構造を用いた検出器と、この研究は着実に発展している。

一方、走査型顕微鏡は、強電界下の量子ホール効果状態からのサイクロトロン発光を空間分解して観測した研究代表者の仕事を基礎に発展させている。現在は、遠赤外光の波長の限界まで解像度を上げることに成功している。この研究では、量子ホール効果の破壊、温度分布、電界分布等の情報を得ることも大きな目標と思われる。

また、生物系や分子などで問題となるテラヘルツ帯域の発光を空間分解して捉えることができれば、非常にインパクトのある研究になり得る。量子ホール効果などで、より着実に基礎研究の成果をあげる一方で、このような思い切った挑戦にも期待する。

けれども、現在、われわれは、本研究の応用について性急であってはならない。この独自性が高い基礎研究の成熟を待つべきである。本研究が成熟して後に、生体分子の研究、電波天文学など大きな応用研究が生まれると確信する。