

研究課題別 事後評価結果

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： 小宮山 進(東京大学 大学院総合文化研究科 教授)

3. 研究内容及び成果

本研究は、半導体量子構造の特性を積極的に利用して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を第一の目的とした。また、開発した検出器を用いて超高感度性と波長限界を越える空間分解能を有する赤外光-サブミリ波領域の走査型顕微鏡を開発することを第二の目的とした。これらによって物質・生体の新たな計測手法を創出することを目指した。

具体的には、GaAs/AlGaAs系量子構造結晶の特質をさらに活かして新たな検出機構を開発し、従来検出器の 10^3 倍から 10^4 倍の(単一光子レベルの)感度をもつ検出器の開発である。その際、単なるデモンストレーション実験で終わることなく、真の応用のために、波長領域の桁違いの拡大(赤外-サブミリ波全領域:光子エネルギー;100meVから1meV)、および検出器構造の単純さを求め、さらに動作温度を含めて取り扱いの容易さも重視した。顕微鏡開発は検出器開発に合わせて進める方針を取った。光子検出の新たな物理的機構と仕組みについて研究開始時点で多くの着想を得ていたが、それらの実現は超高品質のGaAs/AlGaAs量子構造結晶を成長させることが出来るかどうか大きく依存する。そこで、研究実施体制の構築に当たっては、分子線エピタキシーにより結晶成長を行うチームの補強を行い、結晶成長チームと検出器開発・顕微鏡開発チームとが一体となって協力する体制を心掛けた。

その結果、検出器については当初の構想通り波長域 $600\mu\text{m}$ (2meV)から $14\mu\text{m}$ (90meV)に亘って複数の超高感度検出器を開発することに成功した。いずれの検出器も従来の高感度検出器の改良では無く本研究独自の機構に基づいており、これまでに開発した磁場中で動作する単一量子ドット(SQD; Single Quantum Dot)検出器(波長; $100\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$)の動作温度を100mKから400mKへ上昇させ、動作速度を1msecから $10\mu\text{sec}$ へ改善して共焦点顕微鏡に応用する等、従来検出器に比べて桁違いの高感度を達成した(単一光子検出可能)。加えて、結合並列2重量子ドット(DQD; Double Quantum Dot)検出器(波長;約 $600\mu\text{m}$)、アルミニウム(Al)接合による単電子トランジスタ(SET; Single Electron Transistor)と量子ドット(QD; Quantum Dot)を組み合わせた複合検出器(QD+Al-SET(波長 $>600\mu\text{m}$))、および2重量子井戸(DQW; Double Quantum Well)による検出器(波長; $14\mu\text{m}$)を新たに開発した。さらに、自己組織化InAs量子ドットによる中赤外検出機構の検討を行った。これら一連の新型検出器開発により、赤外-ミリ波帯域の高感度光検出の常識を覆すことが出来た。

これら検出器の中で、研究期間の最後に開発したDQW検出器は応用上特に重要である。2次元電子系による高移動度トランジスタ(HEMT; High Electron Mobility Transistor)を用いるために

素子構造が極めて単純であり、4.2Kまたはそれ以上の温度(現在、30Kまで)で動作する。また、励起機構として量子井戸中の2次元サブバンド遷移を用いるため、今後、量子井戸幅の異なる(7nm~200nm)結晶を用いて波長8 μ m~60 μ mの範囲にわたって容易に帯域の異なる検出器を設計することが出来る。さらに、素子構造が単純で相補型金属酸化物半導体(C-MOS; Complementary-Metal Oxide Semiconductor)センサーに似た電荷蓄積型の動作特性を有するため、感度が優れているばかりでなく、素子作成が容易であり、使用にあたっての取り扱いも極めて単純である。そのため、今後汎用型の高感度検出器として従来型の多くの検出器に置き代わる可能性が高い。

本研究では、小規模のアレイ検出器素子(20x20画素)の作成も試み、DQW検出器を用いる常温試料用の顕微鏡も開発した。DQW以外の検出器(SQD、DQD、およびQD+AI-SET)は、SETを用いているため、微細な素子構造を有し、使用の動作条件を見出すために若干の経験を要する。また、熱エネルギーをSETの帯電エネルギーより十分小さくする必要上、動作温度を1K以下にしなければならないために冷却装置が若干複雑になるが、動作自体は安定しており、その圧倒的な感度は基礎研究に大きく寄与する。本研究では、専用顕微鏡を作成して量子ホール電子系の研究に活用した。

顕微鏡開発に関しては、これまでに開発した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 μ mに対して50 μ m)を達成した。また、改良したSQD検出器(波長:120 μ m~150 μ m)と組み合わせた新たな遠赤外走査型顕微鏡により、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。その顕微鏡を量子ホール電子系からのサイクロトロン発光イメージングに応用し、電極と無散逸電子系の間での電子のやり取りの機構、端状態の非平衡分布、ポテンシャル障壁によるランダウ準位間非平衡分布の生成、電流増大に伴う量子ホール効果崩壊、電子温度の双安定性に伴う非平衡電子分布の空間パターン自己生成等、数々の知見を得た。さらに、より汎用性のある測定法構築のために、常温試料を念頭にDQW検出器を用いる2種類の顕微鏡(高分解能を有する単一検出器用の共焦点顕微鏡と、高速イメージングを有する焦点面アレイ検出器用の顕微鏡)を試作した。今後、これらの応用によって、物質・生体計測に新たな可能性を示すことが出来ると考えている。

本研究の副産物として生まれた新たな計測技術として、超音波誘起の電磁波を用いたイメージング法があり、その研究を進めた。音波物質中の荷電粒子を振動させて発生する電磁波を検出することにより、物質に内在する荷電粒子の特性を測定する。音波集束ビームを走査すれば、その荷電粒子特性の空間分布を画像化出来る。本技術を用い、骨組織、植物繊維、プラスチック等、多くの物質で超音波誘起電磁波の発生を観察した。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

研究代表者の開発した遠赤外からサブミリ領域に亘る光子検出器群が実際に動作し、それぞれが従来の検出器の特性を大きく凌駕する性能を発揮している。特にDQWの独創性が高い。また、得られた検出器群の特性が非常に優れているだけでなく、実用化の可能性が大きいこと等も高く評価する。

これまでの研究で開発した検出器の改良、新たな動作原理の検出器を用いた走査型顕微鏡の開発等に関しては、ほぼ目標を達成しただけではなく、予想以上の発展があった。

赤外—サブミリ波領域での日本発の独自の技術が生まれ、応用のみならず、新たな学問領域が生まれることが予想される。論文の質・量とも全く問題なく、特許は、8件の国内出願、3件の海外出願を行っており十分評価出来る。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本研究は非常に独創的な研究であり、科学技術への貢献度は極めて高いと言える。SETおよび高移動度2次元電子系トランジスタを用いた検出器の研究・開発においては、赤外-サブミリ波領域に亘り、単一光子の検出を可能にする桁違いの検出感度に成功している。このような高感度の検出器の出現によって新しい研究領域が開拓されるであろう。例えば、研究代表者が提唱している生体や、あるいは分子系における遠赤外からサブミリ波までの領域での高感度、高速、高空間分解の分光や天文学への展開が期待される。また、アレイ化されたDQWの開発とそれを用いた顕微鏡等の開発が見込まれ、実用上も最も期待される場所である。本研究成果は、超高感度の検出器や顕微鏡の開発だけではなく、これらを用いた新計測領域あるいは新物性領域への道を開拓した。科学的・技術的には、DQW検出器が重要であり、アレイ化された素子の能力を早く示して欲しい。本研究で開発した検出器群、顕微鏡はここ数年で徐々に研究・開発の現場に広まっていくであろう。そこから何が生まれるかはまだ明確ではないが、大きな期待が持てる。日本発のスタンダード検出器になることも決して夢ではなく、費用対効果を考慮しても極めて高い評価となる。

さらに、研究開発中に発見した超音波誘導電磁波を用いた顕微鏡開発の試みは、物質評価方法の応用だけに止まらず、新たな医療計測器機の開発等への展開も期待される。

4-3. その他の特記事項(受賞歴等)

これまでの研究を実用化するためには工学的なセンスが必要であると思われ、そのようなセンスをもつ研究者との共同研究が重要である。