

「量子効果等の物理現象」
平成 8 年度採択研究代表者

小宮山 進

(東京大学大学院総合文化研究科 教授)

「量子構造を用いた遠赤外光技術の開拓と量子物性の解明」

1. 研究実施の概要

電磁波の中で波長が数 $10\mu\text{m}$ から 1mm にかけての遠赤外・ミリ波帯域は、固体の格子振動、半導体の不純物準位およびガス分子の振動・回転準位に対応する。そのため、固体物理・分子科学・電波天文学等の広い分野で重要なスペクトル領域をなしている。特に、半導体量子構造では、人工的に生成される電子準位の多くがこの領域に対応するため、その研究は極めて重要である。ところが、この領域での研究は、可視・近赤外光領域やマイクロ波領域に比べて実験技術的に難しい。

本研究では半導体量子構造を利用して遠赤外光技術を大きく進展させること、さらにそれに関連して半導体量子構造の微視的理解を深める事を目的にしている。具体的には(1)量子構造を用いた超高感度分光検出器の開発、とくに量子ドットを用いた単一遠赤外光子検を目指す研究。(2)開拓した遠赤外光技術を量子ドットや量子ホール系の研究に適用することによって、励起状態のスペクトルと緩和および非平衡状態にある電子系についての微視的な理解を深める研究。(3)量子ホール電子系の位相干渉性に着目した研究を行っている。特に、(1)に関しては平成10年度末に遠赤外単一光子の検出に成功したので、平成11年度はその基本的機構(励起電子の再結合寿命、励起スペクトル等)をより明確にする研究を中心に行った。今後、さらに異なる機構による検出機構を開拓する事によって波長範囲を格段に広げ、検出光学系の開拓とも合わせ、遠赤外・ミリ波検出技術の真のブレークスルーにつなげたい。

2. 研究実施内容

(1) - A 超高感度遠赤外光検出器の開発(遠赤外単一光子検出)

GaAs/AlGaAsヘテロ構造中の2次元電子系にラテラルに形成した量子ドットを強磁場中で単電子トランジスタ(SET)として動作させる。ごく微弱な遠赤外光が入射してドット中にサイクロトロン共鳴(CR)により電子・正孔が励起されると分極が発生してSETの導通/遮断状態間の遷移が起こる。この機構により1個の遠赤外光子吸収によって 10^6 から 10^{12} 個の電子の流れを制御する事ができ、単一光子の検出を可能にした。

[励起スペクトル] 遠赤外光源の波長を挿引する事によって、観測されるSET

伝導度のスイッチングが実際に量子ドット内部のサイクロトロン共鳴励起に起因し、鋭い波長選択制を持つことを確かめた。ドットに印可する磁場を3.4Tから4.2Tまで変化させることにより検出される光子のエネルギーを6.2meV（波長約0.21mm）から7.3meV（波長約0.17mm）まで挿引できる。

〔励起状態の寿命〕量子ドット内に励起された電子正孔の再結合寿命は1ms（ $B=3.4T$ ）から1000sec以上（ $B=4.1T$ ）に及ぶ。また、再結合寿命は磁場に対して短い周期でスパイク状に鋭く変化し、一つずつのスパイクが、基底状態での量子ドット中の異なるランダウ準位に分布する電子数が一つ一つ変化する事に対応する。

〔検出器としての特性〕検出限界はSETの誤動作頻度から、0.1photon/secと求まり、従来型のいかなる検出器に較べても約1万倍以上の感度に対応する：雑音等価出力で現すと $NEP = 10^{-22}W/Hz^{1/2}$ 程度。動作速度、動作温度の限界は、現状では測定系によりそれぞれ1ms、0.4Kが限界である。今後、測定系の改良により100ns程度までの計測は可能と考えている。また、新たな検出機構の探索によって波長範囲と動作温度の拡大を目指す。

(1) - B InAs量子ドットを用いた高感度中赤外光検出

自己組織化量子ドット中にできる電子準位を利用して、波長10 μm 程度に最高感度を持つ検出器を開発した。量子ドットが配列する面に沿う光伝導を利用する新たな機構により、従来の類似した検出器に比べて100～1000倍の感度を実現した。

(2) 遠赤外光技術の応用（遠赤外光学系の開発および量子ホール効果素子からのサイクロトロン発光）

遠赤外発光体試料の裏面にSiの半球レンズを対物レンズとして密着する構造を採用し、新たな挿引式遠赤外顕微鏡を開発した。この系により、4x4mmの挿引範囲において、遠赤外光の波長（0.15mm）を遙かに破る0.06mmの空間分解能をもつ遠赤外光像を得た。（空間分解能に関して、幾何光学の理論的限界値をほぼ達成した。また、遠赤外光の総出力は0.1pW程度とごく微弱である。）

平成11年度は、この系を量子ホール系の非平衡電子の空間分布のイメージングのために採用し、電極近傍の電子注入および、量子ホール効果の崩壊現象に関して新知見を得た。今後は、量子ドットによる光子検出器と組み合わせてさらに新たな光学系を作る。

(3) 量子ホール系の位相干渉性

新たな時代のエレクトロニクスを担うべく、電子の波としての性質を利用する新たなタイプの電子デバイスの原理が多数提案されている。それらに關係する最も基礎的な研究として、低温における強磁場中での電子波の位相干渉性の研究を

行っている。平成11年度は、量子ホール効果状態間の遷移領域および量子ホール効果状態下での位相干渉性について、2つの空間的に隔たった微少散乱領域に生ずる抵抗揺らぎの干渉による変化を調べ、静電ポテンシャルのパターン変動による効果が大きいことを示唆した。

3. 主な研究成果の発表（論文発表）

S.Komiyama and Y.Kawaguchi, "Avalanche Breakdown of the Quantum Hall Effects" Supplementary issue of the Journal of Korean Physical Society 34, S131-S137 (1999)

S.Komiyama and Y.Kawaguchi, "Heat Instability of Quantum Hall Conductors" Phys.Rev.B 61, 2014-2027 (2000).

V.Antonov, O.Astafiev, T.Kutsuwa, H.Hirai and S.Komiyama, "Single Fir-Photon Detection Using a Quantum-Dot", Physica E 6, 367-370 (2000).

T.Machida, S.Ishizuka, K.Muraki, Y.Hirayama and S.Komiyama, "Resistance fluctuations in integer quantum-Hall transitions" Physica E 6, 152-155 (2000).

Y.Kawano and S.Komiyama, "Breakdown of the Quantized Hall Effect in the Vicinity of Current Contacts" Phys. Rev. B 61, 2931-2938 (2000).

S.Komiyama, O.Astafiev, V.Antonov, T.Kutsuwa and H.Hirai, "Detection of Single Photons in the FIR-Range" Nature 403, 405-407 (2000).

Y.Kawano and S.Komiyama, "Local breakdown of the Quantum Hall Effect and the correlated cyclotron emission" Physica E 7, 502-506 (2000).

S.Komiyama, O.Astafiev, V.Antonov, H.Hirai and T.Kutsuwa, "Detection of Single FIR-Photon Absorption Using Quantum Dots" Physica E 7, 698-703 (2000).