

「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

半導体量子構造を利用して遠赤外光技術を進展させ、その事により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出を目指す研究。(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。(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。

平成10年度末に、量子ドットによって波長範囲 0.15mm から 0.18mm (光子エネルギー - 6.8meV から 7.8meV) にわたる遠赤外単一光子の検出に世界で初めて成功した。従来、単一光子検出は光子エネルギー - 約 1eV 以上の光に限られており、今回の成功はその限界を一挙に100倍程うち破ったものである。この領域の従来の最高感度をもつ検出器に比べて、 $10^6$ 倍程度以上の感度に匹敵する。今後、この機構による検出器としての最適化設計を進めて応用により適した形を求めるとともに、さらに異なる機構による検出機構を探求して波長範囲を格段に広げることを目指したい。それらによって、遠赤外・ミリ波検出の技術にブレークスルーをもたらして基礎物性研究に新分野を切り開くとともに、天文や生体等、他分野との交流を図って有用な応用の可能性も考えたい。

### 2. 研究実施内容

#### (1) 超高感度遠赤外光検出器の開発 (遠赤外単一光子検出)

強磁場中の2次元電子系はサイクロトロン共鳴によって遠赤外光を強く吸収し、それが伝導度の変化をもたらす。この効果を移用して、縦横比の極めて大きなホール・バー型伝導体を作成し、超高感度の遠赤外光検出器として以下(2)で記す研究を進めている。

上に記した超高感度遠赤外光検出器とは別に、半導体量子ドットによる単一電子帯電効果を利用して、以下のように単一光子の検出に初めて成功した。具体的な検出器の構造として、(i) GaAs/AlGaAs ヘテロ構造試料中にゲート電極によって平面上

の量子ドットを作成し、(ii)ゲート電極およびリード線を平面ゲート・アンテナを兼ねるように形成して入射する遠赤外光を量子ドットに結合し、(iii)量子ドットをソース・ドレイン電極にトンネル障壁を介して弱く結合させることによって、制御ゲート電極とともに単一電子トランジスタ（SET）を形成させた。量子ドットの機械的大きさは0.7ミクロン角程度である。上記の2次元電子系量子ドットに数テスラの磁場を印可して2つのランダウ準位（スピン up/down の最低ランダウ準位とスピン up の第一励起ランダウ準位）に電子が分布する状況を作り、そこに極めて微弱な遠赤外光を照射してドット内にサイクロトロン共鳴（CR）により電子と正孔を励起した。この時ドット内に誘起される分極が SET の導通状態を遮断状態に遷移させ、このことによって、光子吸収の一回の出来事をドットの抵抗変化として直接検知する事ができた。

上記単一光子検出の波長範囲は0.15mm から0.18mm(光子エネルギー 6.8meV から7.8meV)である。これは使用した GaAs/AlGaAs 基板中の2次元電子濃度で決まっており、今後、裏面ゲート電極を併用する事によって検出波長範囲を制御可能である。また現在は時定数 1msec 程度の低速測定系を用いているが、より高速の測定を行うことによって波長範囲を拡大することが期待できる。動作可能温度は現在0.4K までである。これは量子ドットの幾何学的大きさと構造で決まっており、今後の最適化によって0.8K 程度まで拡大が可能である。検出光子数と入射光子束との比（量子効率）は現在1%程度またはそれ以下である。これは集光のレンズ系、量子ドットと一体化したアンテナの幾何学構造の最適設計によって一桁程度は改善できるであろう。

## (2) 基礎物性研究への応用

最初に記した超高感度の遠赤外検出器を量子ホール効果素子に応用し、量子ホール効果が崩壊することによって生成する非平衡電子からのサイクロトロン発光を検出した。その発光の空間分布の測定にも成功し、従来不可能だった崩壊の空間分布について直接的情報を得た。

上記、量子ドットによる遠赤外光子検出の研究過程で、サイクロトロン共鳴によって第一励起ランダウ準位に励起された電子の寿命が、1msec 程度以上と極めて長く、かつ磁場変化によって特徴的变化をする事を見出した。この寿命の変化が、量子ドット内励起状態やダイナミクスに関して直接的な情報をもたらすことが明らかとなった。今後、単一光子検出器としての応用へむけた研究を行うとともに、この現象を量子ドット自身の基礎物性研究のための強力な手段として役立てて行くつもりである。

## (3) 量子ホール電子系における位相干渉効果の研究

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。それらに関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。昨年度は、巨視的に離れた複数の領域にわたって生ずる電子波の局在効果(アンダーソン局在)を調べることによって、電子波が5mm程度の驚くほど長距離にわたって干渉による効果を起こすことを明らかにしたが、平成10年度は、伝導度揺らぎを示す2つの微少領域を強磁場中の端状態で接続することによって干渉効果を制御する研究を行っている。

### 3. 主な研究成果の発表(論文発表)

- T.Machida, H.Hirai, S.Komiyama and Y.Shiraki, "Phase coherence of Edge States over Macroscopic Length Scales", *Physica B*, 249-251, 128-131 (1998).
- T.Machida, H.Hirai, S.Komiyama and Y.Shiraki, "Geometry-Dependent Transition between Integer Quantum-Hall States", *Solid State Electronics*, 42, 1155-1158 (1998).
- S.Komiyama, H.Hirai, O.Astafiev, Y.Kawano and T.Sawada, "Ultrahigh-sensitive far-infrared detection based on quantum Hall devices", *Proc. of 6th Int. Symp. "Nanostructures:Physics and Technology"*(St.Petersbur, Russia, June 1998) 140-147 (1998).
- S.Fukatsu, H.Sunamura, Y.Shiraki, and S.Komiyama, "Suppression of phonon replica in the radiative recombination of an MBE-grown type-II Ge/Si quantum dot", *Thin Solid Films*, 321, 65-69 (1998).
- Y.Kawano, Y.Hisanaga and S.Komiyama, "Cyclotron Emission from Quantized Hall Devices: Injection of Nonequilibrium Electrons from Contacts", *Phys.Rev.B*, 59, 12537-12546 (1999).
- H.Hirai, O.Astafiev, V.Antonov, T.Kutsuwa, S.Komiyama and T.Sakamoto, "Ultra-high Sensitive Detection of Far-infrared Radiation in Quantum-Dot Devices at High Magnetic Fields", *Proc. of The 4th Int. Symp. on Advanced Physical Fields: Quantum Phenomena in Advanced Materials at High Magnetic Fields* (Tsukuba, March 1999) pp.13-16(1999).
- O.Astafiev, V.Antonov, T.Kutsuwa, H.Hirai and S.Komiyama, "Quantum dot in high magnetic field and far-infrared response", *Proc. of Workshop on Nanophotonics* (Nizhny Novgorod, Russia, March 1999) pp.31-38 (1999).
- 河野行雄、小宮山進, "量子ホール効果状態における電子系からのサイクロトロン発光", *固体物理*, 34(5), 142-152 (1999).

他 16 件