

「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とする。現在までに、半導体単一量子ドットを用いて磁場中で動作する遠赤外単一光子検出器を開発するとともに、半導体二重量子ドットを用いて磁場無しで動作するサブミリ波超高感度検出器の開発にも成功した。さらに、液体ヘリウム温度で動作する挿引型遠赤外顕微鏡を開発し、空間分解能 $60\mu\text{m}$ での超微弱な遠赤外光イメージングに成功した。これらの外、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。

今後、現在可能性の見えているいくつかの新たな光子検出器をさらに開発して適応波長範囲を拡大するとともに、現実的応用可能性を拡大するために、高周波動作 (RF-SET) による高速の光子検出を実現し、かつ室温で動作する遠赤外・ミリ波域の近接場光学顕微鏡の基本形の試作を行う。これらにより、遠赤外・サブミリ波領域に新たな分光測定技術を開花させたい。

2. 研究実施内容

1) 遠赤外・サブミリ波光子検出器の開拓

[磁場中で用いる検出器] 半導体量子ドットを強磁場中で単電子トランジスタ (SET) として動作させることによって、遠赤外領域での単一光子検出を実現した。波長範囲は 0.17mm から 0.21mm (磁場 3.4T から 4.2T により可変)。検出感度 ($EP=10^{-21}\text{W/Hz}^{1/2}$) は従来の検出器の一万倍以上に当たる。機構は、励起された電子・成功が二つの異なるランダウ準位に生じ、それぞれが量子ドット中心近傍の芯の領域と外側のリングの領域に緩和して電気分極を生じて単電子トランジスタに伝導 遮断状態間の遷移を引き起こす事による。実験では GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造中の 2 次元電子系に作成した量子ドットを用いた。

量子ドット自体の新たな物理的知見として、信号が入射光波長に対して共鳴的に起こり、その共鳴周波数がプラズマ振動と結合したサイクロトロン共鳴であることが解析から解った。これは、単一量子ドットによる初めての磁気プラズマ共鳴の観測である。また、励起された電子・正孔対の再結合寿命は、磁場増大 (3.4T

から4.2 T)とともに、寿命が鋸波状に激しく変化しつつ平均として急激に増大する。これは、上位のランダウ準位(ドットの芯に対応する領域)と下位のランダウ準位(ドットのリングに対応する領域)の空間的隔たりの磁場による変化と、励起状態のエネルギー変化の双方によってもたらされる。特に、鋸波状の構造は、ドットの「芯」から「リング」へ電子が一つ一つ移動する事によって生ずる。

[磁場を用いない検出器] 上記の磁場中SETによる単一光子検出では検出光の波長が比較的狭い範囲に限られていること、さらに強い磁場を必要とすること、が応用範囲を若干限定する。そこで、半導体の並列2重量子ドットをSETとして動作させることにより、磁場を要しない検出器をさらに開発した。第一の量子ドットがSETを形成し、その近傍に静電的に結合した第二の量子ドットを置く。機構は、微細なアンテナによって輻射の振動電場を第二の量子ドットに集中して光子を第二の量子ドットで吸収させ、励起電子を第二の量子ドットから脱出させてイオン化する。このイオン化によりSETの伝導度変化をもたらす。GaAs/AlGaAsヘテロ構造に作成した検出器により、共鳴波長約0.6 μmで単一光子検出に近い感度(NEP=10⁻¹⁷)を得た。

2) 中赤外光検出器の開拓

GaAsの量子井戸中に埋め込まれたInAsの自己組織化量子ドットからの励起(波長10 - 数ミクロン)を利用して、励起電子が量子井戸の面内方向に流れる素子設計とすることによって、従来の感度をしのぐ中赤外光域の高感度検出器を実現した。

3) 走査型遠赤外顕微鏡の開拓

近接場光学顕微鏡によってサブミクロンの空間分解能が実現されている可視・近赤外領域に比べ、遠赤外・サブミリ波領域では光学顕微鏡の開拓も遅れている。この状況を改善するために、純粋シリコン結晶によるソリッドイマージョンレンズを集光に用いて走査型遠赤外光学顕微鏡を開発した。量子ホール効果検出器を併用することにより、極微弱な遠赤外光(0.01 pW、波長0.15 mm)のイメージング画像を空間分解能60ミクロンで得ることに成功した。

4) 二重量子ドットの電荷状態および強磁場中電子系の非弾生散乱の研究

上記の各応用的研究の基盤とすべく、基礎的物性研究を平行して行った。まず、二重量子ドットによるSET動作の測定から、多電子による電荷状態を量子ビットに応用する可能性を見いだした。次に、量子ホール効果状態および分数量子ホール効果における端状態の非平衡分布にスピン偏極の影響が強く影響することを発見した。極めて長い時定数を持つ履歴特性から、母体結晶(GaSb)の核スピンの超微細構造を介して電子スピンの影響を与えていると考えられる。この実験は、核スピンの局所的な操作によって電子スピンの位相制御を行える可能性を示唆す

る。

3 . 主な研究成果の発表 (論文発表)

O. Astafiev, V. Antonov, T. Kutsuwa and S. Komiyama, "Electrostatics of Quantum Dots in High Magnetic Fields Studied by Single-Photon Detection" Phys. Rev. B62 pp. 16731-16743 (2000)

T. Machida and S. Komiyama, "Anomalously Weak influence of Source-Drain Voltage on Inelastic-Scattering Process in Quantum Hall Systems" Phys. Rev. B62 pp. 13004-13009 (2000)

S. Komiyama, O. Astafiev, V. Antonov, and T. Kutsuwa, "Detection of Single Sub-Millimeter-Wave Photons Using Quantum Dots" Acta Physica Plonica A 98, pp. 271-278 (2000)

Astafiev, O., Antonov, V., Kutsuwa, T., Hirai, H., Komiyama, S. Quantum dot in high magnetic field and far-infrared response. Izvestiya Akademii Nauk 64 pp. 220-226 (2000)

T. Machida, S. Ishizuka, K. Muraki, Y. Hirayama and S. Komiyama Resistance fluctuations in quantum-Hall transitions : Network of compressible/ incompressible regions Phys. Rev. B 63 045318 (1-6) (2001)

K. Hirakawa and K. Yamanaka, Y. Kawaguchi, M. Endo, M. Saeki and S. Komiyama Far-Infrared Photoresponse of the Magnetoresistance of the Two-Dimensional Electron Systems in the Integer Quantized Hall Regime. Phys. Rev. B 63 (8) 085320 (1-5) (2001)

Y. Kawano, Y. Hisanaga, H. Takenouchi, and S. Komiyama High-sensitive and Tunable Detection of Far-infrared Radiation by Quantum Hall Devices J. of Appl. Phys. 89 4037-4048 (2001)