

## 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

研究代表 東京大学大学院総合文化研究科 小宮山 進

Exploration of far-infrared-radiation techniques using quantum structures and investigation of quantum phenomena

Susumu Komiyama, *Research Director of CREST*

Department of Basic Science, University of Tokyo

### 1. はじめに

電磁波の中で波長が数  $10\mu\text{m}$  から  $1\text{mm}$  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分光測定のための極めて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。その大きな理由の一つは、単一光子検出に迫るような感度の優れた検出器が存在しない点であった。本研究の第一の目標は、量子構造を用いて遠赤外・ミリ波帯域の単一光子検出を目指し、検出技術のブレークスルー的進展をもたらすこと。第二に、開拓した遠赤外光技術および従来のミリ波と遠赤外光技術を半導体量子構造の研究に応用して理解を格段に深める事である。

平成10年度末に第一の目標であった遠赤外単一光子検出に成功した後、本年度はその物理的機構の正確な理解を深めるとともに、さらに検出可能波長域の拡大を目指して新たな機構に基づく単一光子検出の試みを進めてきた。それに平行して、第二の応用研究に関して光学系の改良を行い、波長以下の空間分解能を実現した。

### 2. 研究態勢

研究チームの体制としては、小宮山グループ (JST 雇用の PD 研究員 3 名と技術員 1 名) と平川グループ (JST 雇用の PD 研究員 1 名) が密接に協力しつつ中心的研究課題を遂行し、それを白木、高柳各グループが技術面、試料作成のノウハウ等の側面から援助する形を取っている。

### 3. 進捗状況

#### 1) 遠赤外単一光子検出 (小宮山・平川グループ)

半導体量子ドットを強磁場中で単電子トランジスタ (SET) 動作させることによって、遠赤外領域での単一光子検出が実現する [図1]。<sup>1</sup> 機構は、量子ドットがサイクロトロン共鳴によって遠赤外光子を吸収することによって電子と正孔が異なるランダウ準位に生じ [図1 (b)]、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 [図1 (a)] 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ている。

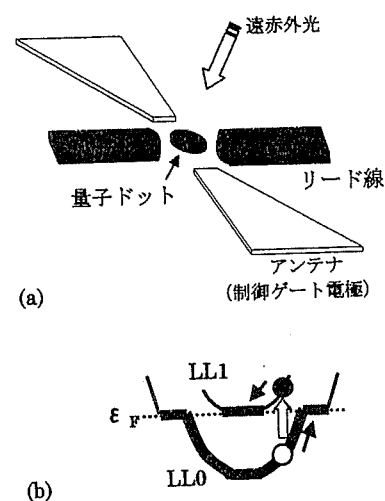


図1 (a) 磁場中で遠赤外光子検出器となる SET の概念図。  
(b) ランダウ準位間のサイクロトロン共鳴励起。

遠赤外単一光子検出について、本年度は上記機構をより深く理解するための実験結果の解析と、検出器としての応用可能性を広げるための新たな機構の探索を行なった。それぞれを、以下1a)と1b)に記す。

1a) 磁場中量子ドットの励起状態寿命と共鳴周波数 (ポスター 2-6-2 参照)

上記機構による単一光子検出に伴う単電子トランジスタ(SET)の伝導度遷移の例を図2の囲み欄に示す。図2は、このような測定を異なる磁場で行なうことによって得た、伝導度遮断状態の継続時間から導いた電子・正孔の量子ドット内での再結合寿命の磁場依存性である。磁場増大(3.4Tから4.2T)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、上位のラングム準位(ドットの芯に対応する領域)と下位のラングム準位(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。これらは、昨年度から定性的に予想していたが、本年度はモデル計算によりそれを確かめた。

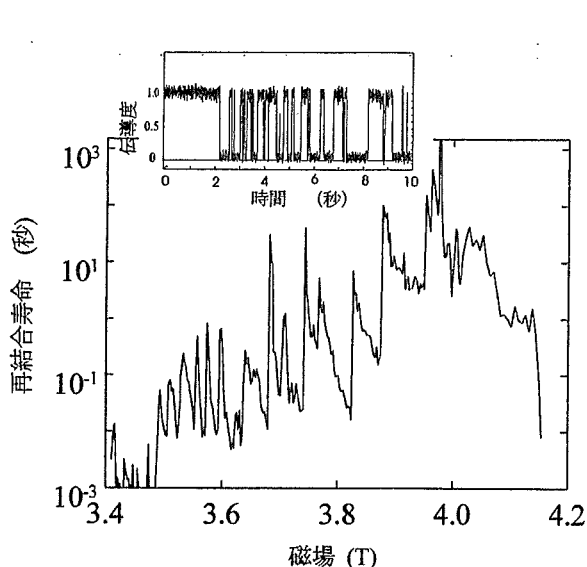


図2 量子ドット中に励起された電子・正孔の再結合寿命の磁場変化。囲み欄はSETの光子吸収による伝導度遷移の実測例。

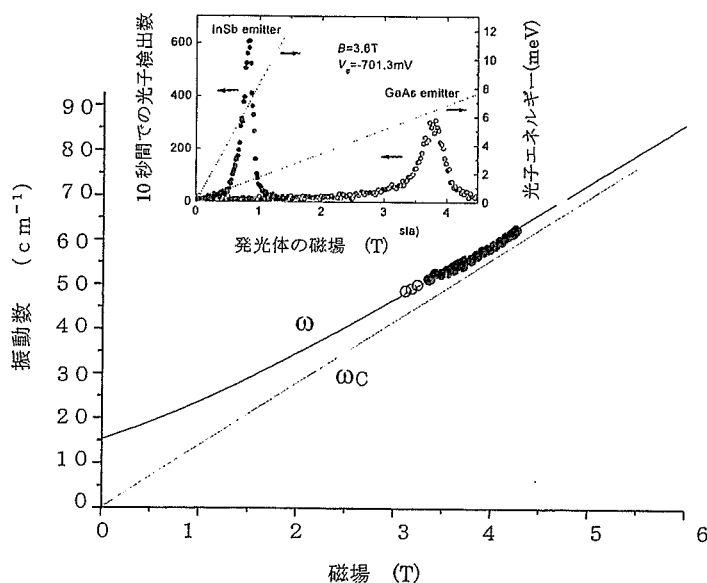


図3 共鳴光子エネルギーの磁場依存性。囲み欄は遠赤外光応答信号の励起スペクトル。

さらに、伝導度の遷移は入射光に対して共鳴的に起こる(図3の囲み欄)が、その共鳴エネルギーの磁場依存性を調べた(図3)。共鳴エネルギーは2次元電子系の単純なサイクロトロン共鳴(図3の直線)より数%高エネルギー側にずれている。これは、サイクロトロン振動がプラズマ振動と結合して磁気プラズマ共鳴を与えるためであることが、従来の多数の量子ドット配列による研究から解る。本研究では、量子ドットのパラメータ(電子濃度・ドットサイズ・基板の誘電率等)が確定しているために、共鳴振動数の理論予測値を任意パラメータ無しに計算でき、図3の曲線に示すようにデータとの極めて良い一致を得た。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。

1b) 新たな機構による単一光子検出の探索 (ポスター 2-6-1 参照)

上記の磁場中SETによる単一光子検出では0.1[光子/秒]程度の極微弱な光子束まで測定でき、従来の検出器と比べて一万倍以上の感度に対応するため、検出器としての様々な応用が考えられる。ただし、(i)検出光の波長が現在0.17—0.21mmと比較的狭い範囲に限られていること、

(ii)動作温度の上限が0.4Kに抑えられていること、さらに(iii)強い磁場を必要とすること、が応用範囲を若干限定するだろう。サイクロトロン共鳴という基本的検出機構を変えずに、素子構造の最適化によってこれら諸特性の改善を図ることは充分可能である。しかし、一挙の大幅な改善は難しい可能性がある。

そこで、連続的改善の努力はひとまずおき、本年度は、図4に示すように、零磁場における新たな機構による単一光子検出の可能性を探索した。図4(a)に示すように、並列2重量子ドット1, 2のうち量子ドット1のみがSETを形成する。量子ドット2は量子ドット1に静電的に結合しており、かつアンテナによって遠赤外光による振動電場が集中する。図4(b)に示すように、遠赤外光子が量子ドット2で吸収されるとポテンシャル障壁を越えて電子がリザーバーへ脱出し、量子ドット2が正にイオン化する。このイオン化による静電ポテンシャルの変化がSETに伝導度変化をもたらす。この機構による光子検出では、光子エネルギーの閾値がポテンシャル障壁の高さで決まる。そのため、(i)に関して、検出波長域を大幅に拡大することが可能である。(ii)に関しては、量子ドット1のサイズに制約がないために、充分小さなドットを用いてSET動作させることができ、検出の温度上限を1K以上にできる可能性がある。磁場はもちろん不要である。

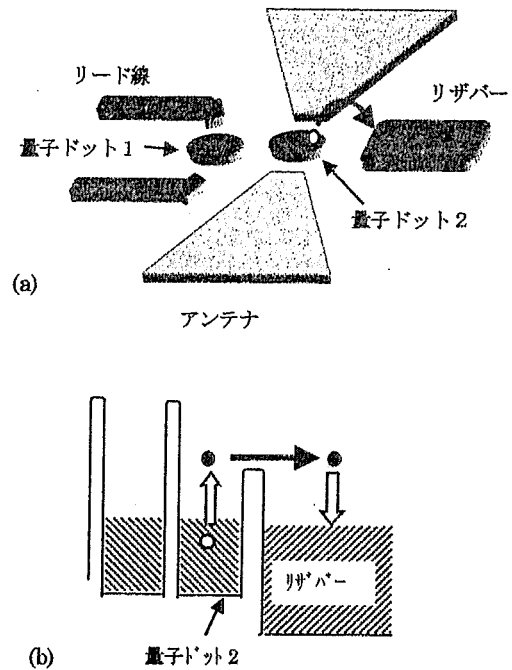


図4 零磁場で動作する並列2重量子ドットによる遠赤外光子検出器。

現在までGaAs/AlGaAs単一ヘテロ構造に金属ゲートにより平面状素子(ポスター2-6-1:図1)を作成して実験している。並列2重量子ドットに特徴的なSET動作が確認できた(ポスター2-6-1:図2)ので、今後、本格的に光子検出へ向けて実験を進めたい。

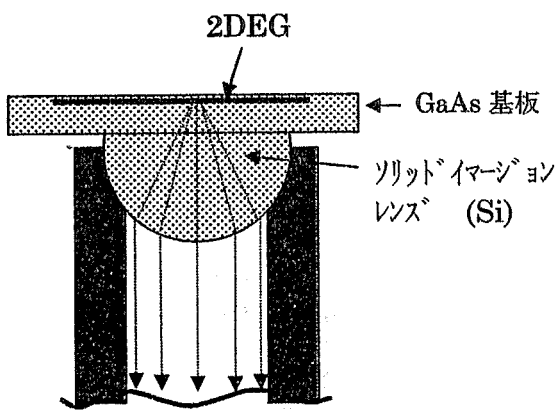


図5 走査型遠赤外光学顕微鏡:シリット・イメージングレンズと試料部。試料のGaAs基板をXYステージで移動。

## 2) 走査型遠赤外顕微鏡の開拓 (小宮山グループ:ポスター 2-6-3)

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、従来超高感度検出器が存在しなかった遠赤外領域では光学顕微鏡の開拓も遅れている。本研究プロジェクトでは本年度、図5に示すようにシリット・イメージングレンズを集光に用いて走査型の遠赤外光学顕微鏡を開発し、波長150ミクロンの遠赤外光に対して空間分解能60ミクロンを達成した。検出器には昨年度までに開発した量子ホール効果検出器を用い、0.01pW(時定数1秒)の遠赤外光の範囲1.5 x 4mm<sup>2</sup>にわたる画像を得ることに成功した。

## 3) 量子ドットによる中赤外光検出器の開拓 (平川グループ: 詳細は2-6-5)

昨年度までの研究によって、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が、波長10—数ミクロンの中赤外光域に対して高感度な検出機構を与えることを明らかに

している。本年度は、励起スペクトルと温度依存性の詳細な測定、および励起電子の寿命の測定から、励起にかかわる電子準位および検出機構をより明確にした。

#### 4) 強磁場中電子系の非弾性散乱の研究 (小宮山グループ : 詳細は2-6-4)

昨年度に引き続いて、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研究している。今年度は、分数量子ホール効果における端状態の非平衡分布、分数量子ホール効果における非弾性散乱の温度依存性・リトルトン電圧依存性を測定し、それらがともに整数量子ホール効果と極めて類似していることを明らかにした。

#### 4. まとめと今後の計画

3-1)に記したように遠赤外検出器の更なる開拓を行うとともに、3-2)に記したように、それを応用する際必要となる遠赤外光学系の開拓もあわせて行っている。応用としては、すでに量子ホール効果素子からの遠赤外発光に3-2)の系を適用し、従来得られなかった非平衡電子の空間分布を明らかにしている。今後、3-1b)に記した並列2重ドット素子による零磁場での単一光子検出を成功させるとともに、(本稿ではスペースのために触れなかったが)磁場中量子ドットのスピンの励起によるミリ波域での単一光子検出も実現させることによって、波長1mmから50ミクロンの全域で単一光子検出を目指したい。それと平行して光学系の更なる改善を行い、プロジェクト終結までに、遠赤外光全域においてフォトンカウンティングを可能にすることを目指して研究を進めたい。

#### [主な研究成果]

1. S.Komiyama, O.Astafiev, V.Antonov, H.Hirai and T.Kutsuwa, *A Single-Photon Detector in the Far-Infrared Range*, Nature 403, 405-407 (2000).
2. V.Antonov, O.Astafiev, T.Kutsuwa, H.Hirai and S.Komiyama, *Single FIR-Photon Detection Using a Quantum-Dot.*, Physica E6(1-4), 367-370 (2000).
3. Y.Kawano, Y.Hisanaga and S.Komiyama, *Cyclotron Emission from Quantized Hall Devices: Injection of Nonequilibrium Electrons from Contacts*. Phys. Rev. B59,12537-12546 (1999).
4. Y.Kawano and S.Komiyama, *Breakdown of the Quantized Hall Effect in the Vicinity of Current Contacts*, Phys. Rev. B61, 2931-2938 (2000).
5. Y.Kawano and S.Komiyama, *Local breakdown of the Quantum Hall Effect and the correlated cyclotron emission*, Physica E7(3-4), 799-803 (2000).
6. T.Machida, S.Ishizuka, K.Muraki, Y.Hirayama and S.Komiyama, *Resistance fluctuations in integer quantum-Hall transitions*. Physica E6(1-4),152-155 (2000).
7. T.Machida and S.Komiyama, *Anomalously Weak influence of Source-Drain Voltage on Inelastic-Scattering Process in Quantum Hall Systems*, Physical Review B62, 13004 (2000)
8. S.Komiyama and Y.Kawaguchi, *Heat Instability of Quantum Hall Conductors*. Phys. Rev.B61, 2014-2027, (2000).