

論文の内容の要旨

論文題目 量子ドットのマイクロ波・遠赤外光分光

久津輪武史

1. 序論、目的

最近、強磁場中量子ドットを SET (Single Electron Transistor) としての性質を用いて遠赤外光単一光子検出が可能になった。

半導体量子ドットは GaAs/AlGaAs ヘテロ構造基板の界面にある 2 次元電子系 (2 DEG) を表面に蒸着した金属ゲートによって排斥して形成する。量子ドットに強磁場を印加するとランダウ準位に対応した領域 (Ring と Core) に分離する。ランダウ準位間に等しいエネルギーの光子 (ω) を吸収すると、サイクロトロン共鳴励起によって電子・ホール対を生成し、電子とホールが空間的に引き離された状態となり分極状態を形成する。光子吸収による分極状態はコンダクタンスに変化を及ぼし、光子検出が可能になった。

このような量子ドットによる高感度な光検出は、従来不可能であった単一量子ドットによる分光を可能にした。それは量子ドット自身の基礎物性を探ることに大きく貢献する。そしてより詳細な物性を探るために、また検出器としてより応用性の広いものにするために改良を行う必要がある。そこで本研究の目的は

- i) 量子ドットの高感度な光応答を用いて量子ドット自身の分光学的な基礎物性を探る。
 - a) サイクロトロン励起状態の緩和過程
 - b) プラズマ励起による光子検出機構
- ii) 単一光子検出器としての応用に必要な改良を行う
 - a) 磁場なし二重量子ドットによるマイクロ波単一光子検出
 - b) RF-SET を用いた高速単一光子検出

である。

また、要旨では紹介しないが (本論文では Appendix 中)、並列二重量子ドットのコヒーレンス結合をマイクロ波分光によって観測した。

2. 実験装置

量子ドット試料は希釈冷凍機に装着し、約 70 m K に冷却して測定した。

量子ドットに照射する遠赤外光・マイクロ波の発光源として、GaAs 量子ホール効果素子、InSb のサイクロトロン発光 ($\omega_{\text{emit}} = eB/m^*$) を用いており、印加する磁場の強さによって発光波長を変えることができる。エミッタから出た光はライトパイプを通して量子ドット試料まで導いた。エミッタと量

量子ドットに印加するために二つの超伝導マグネットを用意し、エミッタ用のマグネットは冷凍機内部に組み込まれている。

量子ドットの S-D 間のコンダクタンス測定は、S-D 間に AC 電圧 (25 μ V、1k Hz) をかけて電流アンプ、ロックインアンプを通して PC で取り込んだ。この測定系の時間分解能は 1ms 程度である。

3. 強磁場中量子ドットにおける遠赤外光分光

従来、半導体量子ドットの分光学的研究は多数の量子ドットを規則的に並べた量子ドットアレイの遠赤外光透過スペクトルを測定する方法がとられてきたが、多数の量子ドットの平均化されたスペクトルしか測定することができなかった。また、サイクロトロン励起状態の再結合寿命は量子ホール効果素子のエッジ状態間でその平衡長から寿命が見積もられてきたが、このような測定では多数の電子がいつせいに流れた結果を見ており、単電子による変化を見ることができなかった。

3-1 強磁場中量子ドットの遠赤外光スペクトラム

量子ドットに印加する磁場を固定し、入射光子のエネルギーを変えてフォトン計測したスペクトルを測定すると明確な共鳴を示す。Fig.1 は 3.4T ~ 4.2T の各磁場においてスペクトルを測定し、スペクトルのピークを示す光子エネルギーをプロットしたものである。得られたスペクトルはいずれもサイクロトロン周波数より 3 ~ 5% 大きなエネルギーをもつ光子を吸収していることを示していることがわかる。このスペクトルが何を意味するのかは 4 章で述べる。

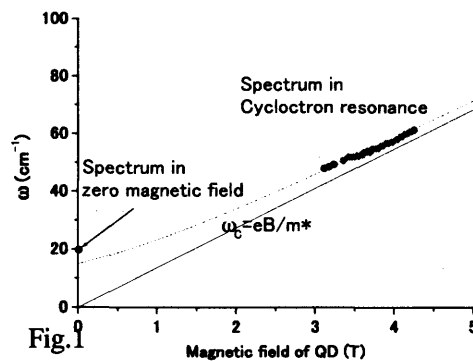


Fig.1

3-2 サイクロトロン励起状態の寿命の磁場依存性

コンダクタンススイッチングは量子ドットがサイクロトロン共鳴励起によって電子ホール対の分極状態を作ってから、緩和して再結合するまで寿命を現しており、再結合寿命を調べることによって量子ドット内の緩和過程を知ることができる。また、再結合寿命は光子検出器の動作速度を決める重要な要素である。

量子ドットに印加する磁場による再結合寿命の変化を調べた (Fig.2)。磁場の増加による寿命の振る舞いの特徴は二つある。一つは寿命は全体的に増加していき、 $B=4T$ で寿命は 1000 秒に達する。二つ目は寿命は単調増加ではなくノコギリ波構造をもっている。またノコギリ波構造はコンダクタンスにステップが現れる位置と関係があることがわかる。つまり、Core の電子数の変化と関係があることがわかる。

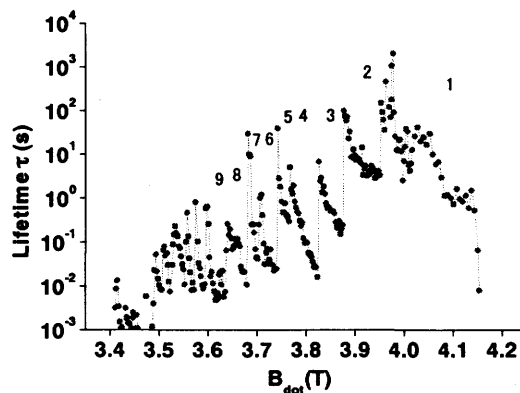


Fig.2

ここでは、再結合寿命のこのような振る舞いが何によって決まっているのかを考えた。

まず、長い再結合寿命が実現できるのは、量子ドット内で電子ホール対が空間的に大きく分離されているために、相互作用が弱く散乱確率が少ないからだと考えられる。そこで Core と Ring 間の距離 ΔX に着目し、電子の波動関数の重なりを考えた。

ノコギリ波構造は Core の電子数変化と対応していることから 励起状態になったときに量子ドット

トが基底状態に対してもつ余分なエネルギー $\Delta \varepsilon$ に着目した。磁場を印加していくと、次にステップが起こるまで $\Delta \varepsilon$ が増加していき、それを緩和するために非弾性散乱が起こると考えられる。その散乱過程として不純物を介した音響フォノン散乱を考えられる。これらを考慮して、再結合寿命を次のように描いた。

$$\frac{1}{\tau} = (A_{ac} \Delta \varepsilon^\tau + A_{im}) \exp\left(-\frac{1}{4} \left(\frac{\Delta X}{L_B}\right)^2\right) \dots 2)$$

ΔX は実験から得られた Core、Ring の電子数の磁場依存性とハートリー近似による数値計算から見積もった。また、不純物による効果は、Core 付近にある 70nm 程度の大きさの不純物を仮定して 2) 式を計算すると、ノコギリ波構造や寿命の増加をよく再現する (Fig??)。また、これらの結果から、測定系の時定数を短くすることによって大きく波長範囲を広げることができると考えられる。

4. 二重量子ドット

序論で述べたような単一光子検出は強磁場を必要とするという点で、光子検出器として実用化する場合に問題となる。そこで、磁場を必要としない二重量子ドットによる単一光子検出器を開発した。そして、ここで得られたスペクトルから量子ドットによるフォトンの検出機構を解明した。

二重量子ドット (Fig.3) は量子ドットを横に二つ並べたもので、一つ (Dot1) は S-D 電極と結合して SET として働き、もう一つ (Dot2) はアンテナとして

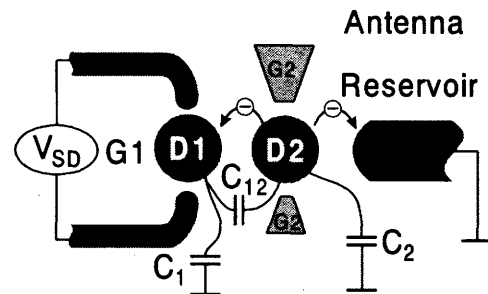


Fig.3

働くゲート電極と結合してマイクロ波領域の検出に使う。すなわち、Dot2 がマイクロ波光子を吸収すると、Dot2 から電子が一個逃げ出す。Dot2 の電子数変化を静電的に結合している SET のコンダクタンス変化として検出することで、マイクロ波領域の単一光子検出が可能になった。この磁場なし二重量子ドットによる単一光子検出器は、マイクロ波領域の波長 $\lambda \sim 500 \mu m$ ($\omega = 20 \text{cm}^{-1}$) にスペクトルピークを持ち、雑音等価電力 (NEP) は $10^{-19} \sim 10^{-21} \text{W/Hz}^{1/2}$ に達する。

また、二重量子ドットで得られたスペクトルピークは、3-1 で紹介した単一量子ドットの遠赤外光分光によるスペクトルのプラズマ振動とよく一致する。そこで量子ドットを形成している閉じ込めポテンシャルの形状を計算によって求めた。2 DEG を形成する正電荷と金属ゲートが作る閉じ込めポテンシャルの形状はほぼ放物型の形状をしていることがわかった。放物型の閉じ込めポテンシャルをもつ電子系は座標分離することができ、重心座標の特性振動数 (プラズマ振動数) は閉じ込めポテンシャルの形状と一致する (コーンの定理)。閉じ込めポテンシャルの特性振動数は $\omega_0 = 19.8 \text{cm}^{-1}$ となる。このことから、二重量子ドットによる励起過程はコーンモードプラズマ振動を介した一電子励起であることがわかった。

5. RF-SET

3章で得られたスペクトルの測定可能な波長範囲は測定系の時定数 1ms で制限されている。より短い寿命をもつスイッチングが測定できれば波長領域は大きく拡張することができる。これを実現するために、RF-SET (Radio Frequency-SET) による遠赤外光領域の単一光子検出を行った。

RF-SET 測定系は SET をつないだ LC 共振器 (タンク回路, Fig.4) からの反射波を測定することで、SET のインピーダンス変化を高速で観測することを可能にする。SET を LC 共振器と組み合わせることで SET の高インピーダンスから逃れ、時間分解能が向上することが期待される。

ここで、RF-SET 測定の時間分解能を制限するのは、マイクロ波ノイズと増幅器のノイズである。これらに配慮した RF-SET 測定系を用いてコンダクタンススイッチングの測定を行った結果、S/N 比=1となる帯域幅は $\Delta f \sim 50\text{kHz}$ ($\tau \sim 6\mu\text{s}$)であった。ここで得られた帯域幅は増幅器のノイズに起因しており、増幅器ノイズを十分に減らすことができれば2.5倍程度帯域幅を広げることができる。また、再結合寿命の測定を行い、従来の検出領域から波長 $30\mu\text{m}$ 長い遠赤外光領域 $\lambda = 244 \sim 273\mu\text{m}$ の単一光子検出に成功した。

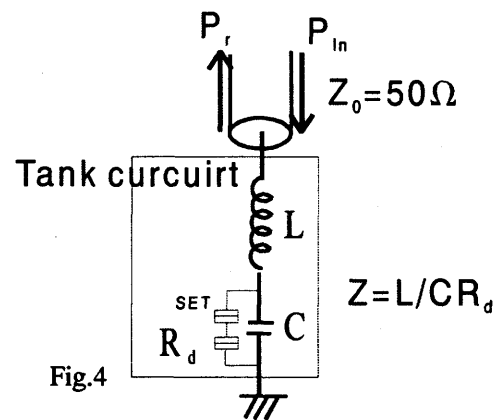


Fig.4

6. まとめ

単一量子ドットによるマイクロ波・遠赤外光領域のマイクロ波分光を行い、量子ドットのサイクロトロン励起の緩和過程は再結合寿命の振る舞いから波動関数の重なりと不純物を介した音響フォノン散乱であることがわかった。さらに、その励起過程はコーンモードのプラズマ振動を介した一電子励起であることがわかった。

また、光子検出器としての拡張も行い、二重量子ドットによるマイクロ波単一光子検出、RF-SET による高速光子検出に成功した。