

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19510113
 研究課題名（和文） 自己形成量子リングを用いた励起子アハロノフ・ボーム効果の検証
 研究課題名（英文） Exciton AB effect in self-assembled quantum rings
 研究代表者
 黒田 隆 (KURODA TAKASHI)
 独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・主幹研究員
 研究者番号：00272659

研究成果の概要：液滴エピタキシー成長手法を用いることで回転対称性のよいガリウム砒素量子リング構造を作製できる。我々は孤立した1個の量子リングに対し、10テスラまでの磁気発光スペクトルを観測し、その結果、6テスラ程度の磁場領域で、顕著な発光強度の減衰が見出された。中性励起子状態のアハロノフ・ボーム効果に由来すると考えられる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：複合新領域

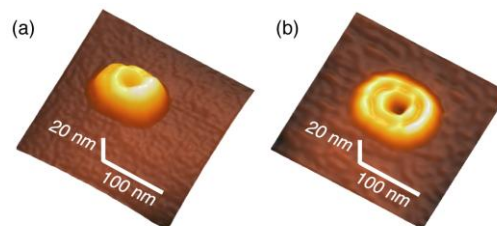
科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：ナノ構造物性

1. 研究開始当初の背景

アハロノフ・ボーム（AB）効果は、単連結な経路を電子が通過する際、ベクトル・ポテンシャルの周回積分に相当する位相項が波動関数に加わり、干渉を引き起こす現象である。電子線ホログラフィーの先駆的な実験以降、微細加工を施した金属リングや半導体2次元電子系を対象に研究が展開し、メゾスコピック系における典型的な量子伝導現象として認知されるに至った。これらの実験では、電子がリング経路をめぐって干渉する様子を、伝導度として観測する。一方、光学実験で取り扱うのは、電氣的に中性な状態であり、AB的な量子伝導・干渉現象が光学応答にどのように反映するかは、素朴な問題意識として興味深い。

1990年以降、リング内励起子のAB振動を主張する理論研究が発表された。文献3によれば、リング径が励起子サイズに比べて大きな場合には、AB的な磁場効果は現れない。一方、十分小さなリングにおいては、磁



図：液滴エピタキシー成長による自己形成量子リングの原子間力顕微鏡写真。(a)は1重リング、(b)は同心円の2重リングである。(文献1、2)

場印可の際に、電子および正孔がリング内を逆向きに周回し、励起子の結合エネルギーや遷移強度が、磁場に対して振動変化する。また、文献4によれば、励起子AB効果の表出には、電子および正孔の軌道に差異があることが鍵となる。この場合、AB振動の周期は、リング内部を貫く磁束ではなく、電子軌道および正孔軌道の差分を貫く磁束となる。すなわち、電子・正孔の周回運動が異なる場合には、差し引き分のループ電流が発生し、AB効果が現れることになる。

これらを検証するには、実験対象として、従来の微細加工では作製できない、100nm以下のサイズの量子リングを用いねばならない。文献5では、歪みヘテロ系でのナノ量子リングの作製を報告している。また、この量子リングにおける電子注入時の遠赤外応答を観測し、AB干渉を光学的に見出した。しかしながら、この結果は1電子のAB応答を検知したものであり、中性励起子を調べたわけではない。その後、文献6では、電子線リソグラフィで作製したリングを対象に磁気発光を観測し、荷電励起子のスペクトル線が磁気振動することを観測した。また文献7では、タイプII型のバンド構成を持つ量子ドットに対して磁場発光測定を行い、AB振動的なスペクトル変化を観測した。しかしながら、いずれの実験も中性励起子のAB効果を見出すには至っていなかった。

参考文献

1. 間野、黒田他、Nano Lett. B 5, 425 (2005)
2. 黒田、間野他、Phys. Rev. B 72, 205301(2005)
3. Roemer et al. Phys. Rev. B 62, 7045 (2000).
4. A. Govolov et al. Phys. Rev. B 66, 081309 (2002); 5. A. Lorke et al. Phys. Rev. Lett. 84, 2223 (2000); 6. M. Bayer et al., Phys. Rev. Lett. 90, 186801 (2003); 7. E. Ribeiro et al., Phys. Rev. Lett. 92, 126402 (2004)

2. 研究の目的

本研究では、最近申請者が作製方法を確立し、光学特性の評価を行った、半導体リング状ナノ結晶（量子リング、右図）を対象に、単一の量子リングにおける磁気光学応答を観測し、励起子AB効果の検証を行う。

AB効果は、ベクトル・ポテンシャルと電荷の結合に起因する量子伝導効果である。したがって、素朴に考えると、電気的に中性な励起子（電子・正孔対）は、AB的な磁場応答を示さない。しかし、大きさがナノメートル程度の微小な量子リングにおいては、励起子のコンポジットな特徴が表出し、光学スペクトル上にAB振動が表出することが期待できる。後述するように、励起子のAB振動は、リング内部への磁束侵入では単純にスケ

ール出来ない、大きな磁場で発現すると考えられる。励起子AB効果の存在を確認づけるため、10テスラ以上の磁場で動作する顕微分光装置を構築し、単一の自己形成量子リングから発する発光の磁場依存性を観測する。

3. 研究の方法

計画段階においては、物質・材料研究機構の共有施設である大型磁石を使い、強磁場環境で駆動する顕微分光システムを組み立てることを検討していたが、運良く、フランスの共同研究グループが所有する当該装置（磁場強度10T）を使用する機会を与えられたので、そちらで実験を遂行した。研究滞在の旅費は、所属機関の在外研究制度を利用した。

先方の分光装置が、インジウム砒素系試料をターゲットとしており、赤外域の光検出に最適化してあったところを、我々のガリウム砒素系試料のバンドギャップである可視域の実験に対応できるように、各種構成部品を交換し、組み立て直し、装置評価が終えるまでに3ヶ月を費やした。この装置は、英国クライオジェニック社の超伝導磁場クライオスタットをベースに、独アトキューブ社のピエゾモーター・ステージと短焦点の非球面レンズが組み込まれているものである。低温・磁場空間内に、試料と顕微レンズがコンパクトに置かれているのが特徴で、試料移動などの操作性は残念ながらよくないものの、一度焦点位置を定めればその後のドリフト等は全く無い、高い長時間安定性を持つ装置である。

更に、励起光および発光信号の偏光特性を調べるために、カルサイト偏光子および米国ミッドラック・オプティクス社製の液晶可変位相板を、励起光および検出光の光軸上に挿入した。試料表面に対して、磁場は垂直に印加し、光軸は磁場方向と平行なファラデー配置で発光計測を行う。この時、磁束はリングを貫く配置となる。発光信号の円偏光成分を区別することで、ゼーマン分裂した発光スペクトルの取得が可能となる。また励起偏光を円偏光に設定することで、核スピン由来のオーバーハウザー効果の観測も可能となる。励起光には波長635nmの半導体レーザーを用いた。発光信号はシングルモード・ファイバーを経由して、米国アクトン・リサーチ社製の焦点距離50cmのポリクロメーター分光器に入り、CCD検出器でスペクトルを取得する。エネルギー分解能は半値全幅が120マイクロeV程度である。全ての実験は6Kの温度で実施した。

4. 研究成果

図1にゼロ磁場における単一2重量子リングからの発光スペクトルを示す。異なる3個のリングからの信号を例示した。全ての発光スペクトルに共通して、短波長側に比較的狭線幅のピーク、長波長側に比較的広い線幅のピークが観測できる。2つのピークの間隔は4~6 meVである。このような2本のピークから構成される特徴的なスペクトル形状は我々の液滴エビ成長2重量子リング試料で一般的に観測できるものであり、2重リング構造を構成する、内側リングおよび外側リングに閉じ込められた励起子からの発光線と考えている。発光エネルギーは有効質量数値計算とよい一致を示す。

図2には、図1のQR3リングにおける円偏光発光スペクトルの磁場依存性を示した。左の系列および右の系列はそれぞれ σ^- 偏光、 σ^+ 偏光の成分を示す。ゼロ磁場では、2つの偏光成分は等しい。磁場を印加すると、 σ^- 偏光成分は短波長側にシフトし、 σ^+ 偏光成分はやや長波長側にシフトする。発光エネルギーが磁場の2次関数に従うと仮定し、近似の結果、励起子g因子が2.4、反磁性因子が $9.5 \mu\text{eV}/\text{T}^2$ と定めることが出来た。過去に報告したGaAs量子ドットの数値と比較すると、g因子の大きさは誤差範囲で同値であるが、反磁性因子は量子リングの方が2倍程度大きい。これは、量子リングが量子ドットに比べて、面内に広がった形状を持ち、キャリア磁場閉じ込めの影響が反磁性ピークシフトとして大きく現れるためである。

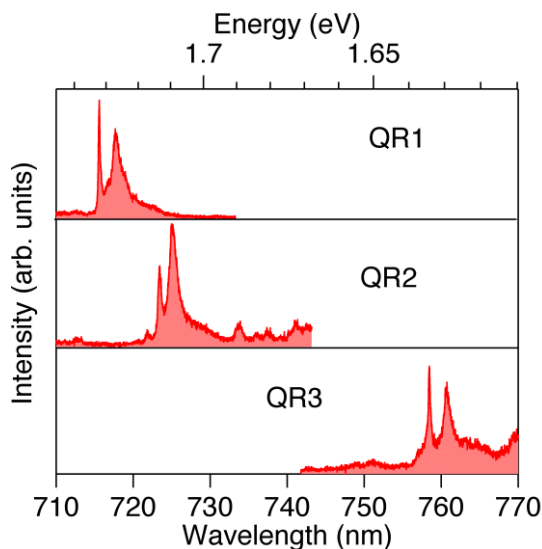


図1：ゼロ磁場における単一量子リングの発光スペクトル。QR1、QR2、QR3の3個の量子リングの例を示す。

この磁場依存性で顕著なことは、約6テスラの磁場を境に、 σ^+ 偏光の強度が σ^- 偏光の強度に比較して、約20%程度弱くなることである。この磁場誘起の発光減少は、このリングのみではなく、他のリングでも再現する現象であった。

強調すべきことは、発光強度が減衰する σ^+ 偏光が、ゼーマン下準位からの発光であり、従って、ゼーマン分裂した磁気副準位間の熱緩和（スピン緩和を伴う磁気副準位間の緩和）の影響では、この強度変化を説明出来ないことである。我々はこれが、励起子アハロノフ・ボーム効果に起因するものと考えている。

議論を始める前に、ブライト励起子・ダーク励起子間の準位交差の影響を考察する。よく知られているように、ゼロ磁場における最低エネルギーの励起子状態は、電子・正孔の合成スピンの $J=3$ となるダーク励起子であり、そのエネルギー位置から交換エネルギー分の上側に、合成スピンの $J=1$ のブライト励起子が存在する。 $J=3$ と $J=1$ の励起子はゼーマン分裂量が異なるため、特定磁場で準位交差を起こす。過去の報告では、この準位交差は磁場強度が3テスラ程度で起こることが報告されている。従って、今回の磁場強度の範囲で、 $J=3$ 準位と $J=1$ 準位の交差が起きていても不思議ではない。

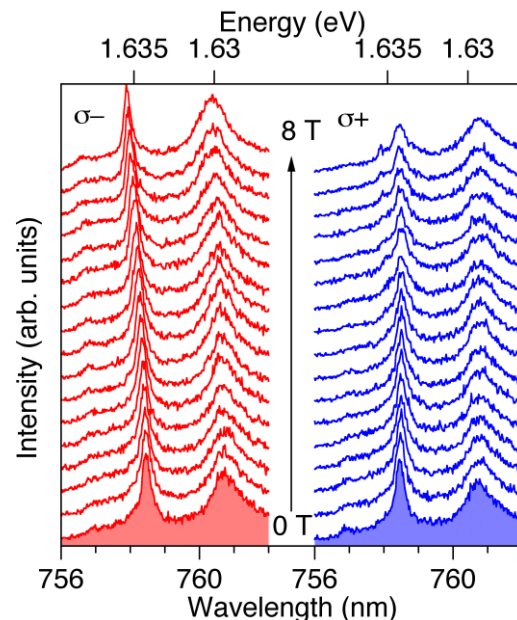


図2：単一量子リング円偏光発光スペクトルの磁場強度依存性。0.5テスラ・ステップで磁場強度を変化している。左が σ^- 偏光、右が σ^+ 偏光であり、各々、ゼーマン下準位およびゼーマン上準位からの発光を示す。

しかしながらこの場合は、弱磁場から強磁場に移行する時、最低エネルギー準位がダーク状態からブライツ状態に変化するものであり、発光強度は強磁場で増大することが予想される。実験データは、これとは異なり強磁場で発光強度が減少している。従って、単純なブライツ励起子・ダーク励起子間の交差では説明出来ない。

Govolov らの理論提案によれば、磁場印加による電子・正孔軌道の位相シフトに伴って発光遷移強度が変化する。この現象が中性励起子アハロノフ・ボーム効果に他ならない。すなわち、量子リングにおいては、電子・正孔間の相対的な軌道運動が、励起子角運動量として記述できる。磁場ゼロにおいては、相対角運動量ゼロの励起子が最低励起子であるが、ある特定磁場において、相対角運動量が1の励起子が最低エネルギー準位となるが、この準位は、電子正孔の回転運動が差し引き角運動量1、異なるために、電子・正孔の重なりが周回積分を経てキャンセルされる。すなわち、ある磁場強度において、最低エネルギー準位が光学遷移非許容なものになり。発光信号が減衰する。この軌道準位間の準位交差が起こる磁場は、電子軌道および正孔軌道の差分を貫く磁束を Φ とすると、 $\Delta\Phi/\Phi_0 = 1/2$ で与えられる。 Φ_0 は、量子磁束である。電子・正孔の軌道が異なることが鍵となるが、有効質量が異なり、リング面内の浸みだしが、電子・正孔で異なるために、この現象が引き起こされる。数値計算から我々の量子リング形状を仮定した波動関数を導出し、上述の準位交差の磁場強度を見積もると、おおむね10テスラ程度となる。実験結果をいい一致を示ことがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 黒田 隆, T. Belhadj, 間野 高明, B. Urbaszek, T. Amand, X. Marie, 迫田 和彰, 小口 信行, Magnetophotoluminescence in droplet epitaxial quantum rings, Physica Status Solidi B 246, 861-863 (2009), 査読有り
- ② M. Abbarchi, C. A. Mastrandrea, A. Vinattieri, S. Sanguinetti, 間野 高明, 黒田 隆, 迫田 和彰, 小口 信行, M. Gurioli: Photon antibunching in double quantum ring structures, Phys. Rev. B 79, 085308/1-5 (2009), 査読有り

- ③ T. Belhadj, 黒田 隆, C.-M. Simon, T. Amand, 間野 高明, 迫田 和彰, 小口 信行, X. Marie, and B. Urbaszek, Optically monitored nuclear spin dynamics in individual GaAs quantum dots grown by droplet epitaxy; Phys. Rev. B 78, 205325/1-4 (2008), 査読有り

- ④ M. Abbarchi, 黒田 隆, 間野 高明, 迫田 和彰, 木戸 義勇, 小口 信行, L. Cavigli, M. Gurioli, and S. Sanguinetti, Magneto-photoluminescence study in GaAs/AlGaAs self-assembled quantum dots; Physica E 40, 1982-1984 (2008), 査読有り

[学会発表] (計2件)

- ① 黒田 隆, 間野 高明, T. Belhadj, B. Urbaszek, T. Amand, X. Marie, 迫田 和彰, 小口 信行
単一 GaAs 量子リングの磁気発光
日本物理学会 2008 年秋季大会
2008 年 9 月 15 日、岩手大学
- ② 黒田 隆, T. Belhadj, 間野 高明, B. Urbaszek, T. Amand, X. Marie, 迫田 和彰, 小口 信行
Magnetophotoluminescence in droplet epitaxial quantum rings,
The 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots,
2008 年 5 月 15 日、Geongju, Korea

[その他]

ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/laser-kuroda>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

黒田 隆 (KURODA TAKASHI)

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・主幹研究員

研究者番号：00272659

(2) 研究分担者

間野 高明 (MANO TAKAAKI)

独立行政法人物質・材料研究機構・量子ドットセンター・主任研究員

研究者番号：60391215

(3) 連携研究者

なし