

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13267

研究課題名(和文) 光機能性タイプI量子構造におけるアハラノフボーム効果

研究課題名(英文) Aharonov-Bohm effect in optically functional Type-I semiconductor quantum structures

研究代表者

村山 明宏 (Murayama, Akihiro)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00333906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：光デバイス応用に優れたタイプI量子ドットにおける、電子・正孔波動関数のコヒーレントな位相差により生じる干渉現象であるアハラノフボーム(AB)効果について研究する。AB効果の光検出は、これまでコアシェル型タイプII量子ドットに限られてきた。そこで、タイプIのGaAs量子ドットを液滴エピタキシーにより複合させた量子リング試料を用いて、リング方向における波動関数の1次元性を利用したAB効果の発現に関する知見を得ることを目的とした。磁場中顕微発光分光により、単一量子リング試料からの発光スペクトルとその磁場依存性の測定を行い、磁場によるゼーマンシフトを考慮した検討を行った。

研究成果の概要(英文)：We study the Aharonov-Bohm (AB) effect, that is an interference phenomenon caused by coherent phase difference of electron- and hole-wavefunctions, in Type-I semiconductor quantum dots (QDs) suitable for optical device applications. Optical detection of the AB effect has been limited to core-shell type-II QDs so far. Therefore, we aimed to obtain knowledge about the AB effect in the Type-I QDs by using quantum ring samples combining type-I GaAs QDs grown by droplet epitaxy, utilizing the one-dimensional nature of the wavefunctions in the ring direction. Magnetic-field dependences of the emission spectrum from a single quantum ring are measured by micro-photoluminescence spectroscopy under magnetic fields up to 5 T, and investigations are conducted in consideration of the Zeeman shift induced by the magnetic field.

研究分野：光機能量子ドット

キーワード：半導体量子ドット アハラノフボーム効果 GaAs量子リング 発光スペクトル磁場依存性

1. 研究開始当初の背景

電子などキャリアの波動関数の位相差により生じるアハラノフボーム (AB) 効果は、主として電気伝導特性により研究されてきた。波動関数のコヒーレントな量子性である位相情報が検出できる点で、AB 効果は非常に重要である。最近では、コアシェル型タイプ II 量子ドットにおいて、コアとシェルに空間分離した電子と正孔の波動関数の位相差を反映した AB 効果が、磁気光学分光により検出されている。このタイプ II 量子ドットでは、コアとシェルのポテンシャル差を利用して電子と正孔の波動関数をドット円周方向に沿った形で 1 次元的に重ね合わせることが可能になり、両者の波動関数の位相差による干渉 (AB 効果) が生じる。

一方、電子と正孔が空間的に共存し、高輝度発光やレーザー発振などの光デバイス应用到に優れたタイプ I 量子ドットにおいては、電子・正孔波動関数の位相差により生じる AB 効果はこれまでほとんど知られていない。なぜなら、電子・正孔波動関数が 1 次元的に広がらないと、波動関数の位相差を反映する十分な干渉が生じないためである。

そこで、タイプ I 量子ドットが数個リング状に連結し、リング円周方向に 1 次元性を持つ量子リング (下図 1) に着目し、その AB 効果を研究できれば、量子リングの結晶成長条件を最適化しリング径をなるべく小さくすることにより、AB 効果を発現させつつ量子閉じ込め効果を高めていくというアプローチが可能になると着想した。このような、タイプ I 量子構造における AB 効果を研究することにより、これまで展望が開けなかった高輝度 LED 発光やレーザー発振などの光デバイス应用到に、波動関数のコヒーレントな位相情報の活用を提案することも将来的には視野に入ってくる。AB 効果は、半導体中のキャリアの波動性を直接反映するため、将来の量子情報処理の基盤構築に有用である。また、このような量子リング構造は、通常は液滴エピタキシー法により作製するが、その際に Ga 液滴の凝集による成長過程を反映して量子リング方向にポテンシャル揺らぎが生じるので、これまで十分には知られていなかった、光学的 AB 効果に対する 1 次元局在ポテンシャルの影響も研究できる。

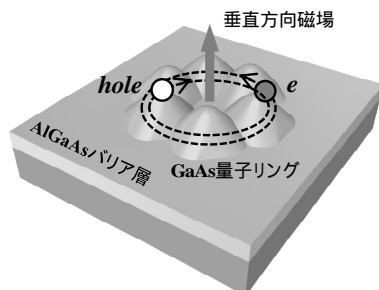


図 1 本研究で用いる GaAs 量子リングの構造と、AB 効果の起源となる電子・正孔軌道を表す模式図。AB 効果の観測には、膜面垂直方向に磁場を印加する。

2. 研究の目的

高輝度の発光や温度に依存しないレーザー発振など、光デバイスへの応用に優れたタイプ I 量子ドットにおける、電子・正孔波動関数のコヒーレントな位相差により生じる干渉現象である AB 効果について研究する。

本研究では、タイプ I 量子ドットを液滴エピタキシーにより複合させた量子リング構造の試料を用いて、リング方向におけるキャリア波動関数の 1 次元性を利用した AB 効果の発現に関する知見を得ることを目的としている。また、このような量子リングでは、Ga 液滴の凝集による成長過程を反映してリング方向に顕著なポテンシャル揺らぎが生じるので、光学的 AB 効果に対する局在ポテンシャルの影響も研究できる。これらにより、タイプ I 量子ドットの光デバイス应用到に、電子・正孔波動関数のコヒーレントな位相情報の活用を将来的に提案していく。

3. 研究の方法

本研究代表者は、韓国国立釜山大の研究グループと共同して、各種の半導体量子ドットにおける電子・正孔、あるいは励起子のダイナミクスに関する分光学的研究を行ってきた。そこで引き続き、両研究グループが協力して、量子ドット試料の作製と分光計測研究を行うことで本研究を実施する。

まず、光デバイス应用到に優れた GaAs のタイプ I 量子ドットを数個複合させた、直径数十 nm の量子リングを液滴エピタキシー法により成長させる。単一量子リング試料からの発光スペクトルを顕微発光分光により測定するとともに、図 1 に示したように膜面垂直方向に磁場を印加することにより、その発光エネルギーの磁場強度依存性を測定する。この発光エネルギーの磁場に対する振動現象の観測により、周期的な 1 次元リング方向における電子・正孔間の AB 効果の発現に関する議論を行うことができる。また、このリング方向には、結晶成長中の量子ドットの連結に伴い顕著なポテンシャル揺らぎが生じているはずなので、発光スペクトルやその時間応答の温度依存性や成長温度を変えた試料を測定することで、AB 効果に対する 1 次元ポテンシャル揺らぎの影響も研究していく。なお、磁場中の単一量子リングにおける発光測定には、独自に開発してきた磁場印加可能な顕微発光分光装置を使用する。得られた発光スペクトルエネルギーの磁場依存性に対しては、磁場強度に依存する反磁性シフトとゼーマン分裂を取り入れた解析を行う。

さらに、このようなタイプ I 量子ドットから成る GaAs 量子リング試料とは別に、これまで AB 効果の研究がなされてきた、コアシェル型タイプ II バンド構造を持つ CdSe/ZnS 系量子ドットの高密度集合体試料をコロイド法により作製し、同様の磁場中発光分光を行うことで AB 効果の研究を行う。このような、非常に高いドット密度を持つ集合体の試

料においては、電子や正孔の波動関数が多いドット間に広がるため、これまでほとんど議論がなされていなかった量子ドット集合体における AB 効果の発現に興味もたれる。

4. 研究成果

まず、研究方法に記載したように、分子線エピタキシー装置を用いた液滴エピタキシーにより、AlGaAs バリア中に埋め込んだ GaAs 量子リング試料の結晶成長を行った。量子リングの直径等の構造は基板温度に大きく依存する。そこで、Ga 液滴形成後に導入する As 分圧を含めた試料の成長条件を検討し、直径が 50 ~ 60 nm 程度の量子リング構造を作製した。

そして、最大磁場 5 T の印加が可能な磁場中顕微分光装置により、発光スペクトルとその磁場依存性の測定を行った。このような高磁場中において、単一量子リング試料からの発光スペクトルを精度良く測定するために、以下の工夫を行った。すなわち、顕微分光装置にこのような高磁場を印加する場合、試料の測定位置をマイクロメーターの精度で調整する機械式ステージや対物レンズの焦点調節保持機構に磁場の影響が生じ、測定位置や焦点位置に狂いが生じる。基本的にはアルミニウムや真鍮などの非磁性の機械部品を使用しているが、若干の機械部品は強度の必要性から剛性の高い鋼鉄製を用いているため、結果的に磁場の影響を受けていることが明らかになった。そのため、ステージを大型で安定した機種に変更し、各可動部品の機械的安定性を極力高めると共にクランプ機構による固定が行えるようにした。最終的には、5 T の磁場印加による観測位置のずれを 2 μm 以内に抑えることが可能になった。これにより、単一量子リング試料からの発光スペクトルの磁場依存性を精度良く測定することが可能になった。

6 K において磁場のない場合、発光エネルギーが 1.80 ~ 1.82 eV の領域に単一量子リングからのシャープな発光スペクトルを観測した。次にその詳細な磁場依存性を測定した。得られたスペクトルの磁場依存性は、通常の磁場による反磁性シフトやゼーマンシフトに加え、AB 効果の発現を示唆する磁場による振動的な変化を示している。しかしながら、測定した磁場領域においては、電子や正孔の g 値を反映するゼーマン効果によるシフト量が 0.7 meV 程度以上であったのに対し、この付加的な変化量は高々 0.2 meV 程度であった。そのため AB 効果の検証には、引き続き多くの試料での測定や、理論計算との定量的な比較などの詳細な検討が必要である。

また、併せてこのような GaAs 量子リングの集合体試料からの発光の時間変化をストリークカメラにより測定するし、励起子局在化の効果を研究するために温度依存性の測定も行った。6 K における量子リング集合体試料の発光減衰時定数は 0.4 ~ 0.5 ns であった。

さらに、コロイド法により作製したタイプ II バンド構造を持つ CdSe/ZnS 系量子ドットの高密度集合体からなる試料において、磁場に依存した発光スペクトルの振動的な変化を観測した。このような 10^{12}cm^{-2} にも及ぶ高密度のドット集合体の場合には、単一の量子ドットからの発光スペクトルを得ることは不可能である。そのため、実際のドット集合体からの発光スペクトルの半値幅は 50 meV 程度にもなる。したがって、1 meV 程度以下のエネルギー変化を議論することになるため、スペクトルの数値解析を試みているものの現状では明確な結論を得ることはできていない。このような、高密度ドット集合体におけるドット間に広がった電子・正孔波動関数の AB 効果についてはこれまで議論されておらず、基礎的な観点から興味を持たれる。そのため、このような量子ドット集合体に対して適用可能な理論モデルを考案するなどして、引き続き AB 効果としての妥当性を含めた検討を行っていく予定である。

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 0 件)

[学会発表](計 2 件)

“Optical spin-functional electronics utilizing semiconductor quantum dots; toward stable room-temperature operation”, A. Murayama, S.L. Chen, T. Kiba, J. Takayama, and K. Sueoka, JSPS workshop on Japan-Sweden frontiers in spin and photon functionalities of semiconductor nanostructures, p.4-5, August 30, 2016, Jyozankei Grand Hotel, Sapporo, Hokkaido, Japan.

A. Murayama, “Spin-Functional Photoelectric Conversion Utilizing III-V Compound Semiconductor Quantum Dots”, 6th Annual World Congress of Nano Science & Technology (Nano-S&T 2016), Session 102, October 27, 2016, Holiday Inn Singapore Atrium, Singapore.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：

国内外の別：
取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<https://www.ist.hokudai.ac.jp/labo/processing/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村山 明宏 (MURAYAMA Akihiro)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：00333906