

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2008 ～ 2009
 課題番号：20760002
 研究課題名(和文) フーリエ分光法に基づく量子ドットで発生する単一光子の偏光状態測定装置の開発
 研究課題名(英文) Polarization analysis of single photon originating from quantum dot based on Fourier spectroscopy
 研究代表者
 笹倉 弘理 (SASAKURA HIROTAKA)
 北海道大学・電子科学研究所・助教
 研究者番号：90374595

研究成果の概要(和文)：

位相揺らぎの少ない単光子源及びもつれ合い光子対源の実現を目指し、量子ナノ構造を形成する核スピンの無秩序性による光子源の量子性の悪化を抑制することを目的として、単一量子ドット構造内の核スピンの制御に着手し、5 T にもおよぶ核磁場形成を確認した。核磁場は局所性及び双安定特性といった特異性を有しており、量子情報処理分野への応用が期待できる。またもつれ合い光子対発生に致命的となる異方性交換分裂を抑制できる量子ナノ構造を探索し、量子リング構造及び量子ナノワイヤー構造が有力な候補であることを、偏光測定及び光子相関測定により実証した。

研究成果の概要(英文)：

The control of nuclear spins in semiconductor nanostructure has been demonstrated by magneto-optical spectroscopy. The optically created nuclear field was up to 5 T and one of candidate for driving forces of quantum information processing due to the locality and nonlinearity. The polarization measurements and first order photon correlation measurements were performed to investigate optical properties of the the quantum ring and nanowire quantum dot structures in the view point of the single and entangled photon sources.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎/応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス・異方性交換相互作用

1. 研究開始当初の背景

情報セキュリティの脆弱性による犯罪が多発し報道メディアを賑わしている。情報の伝送を単一量子が担う量子暗号通信は完全な秘匿

性を有しているため、次世代の情報通信を担うものと期待されている。量子暗号通信の研究では減光した微弱光を擬単光子源として用いられているが、光子数分布のためビットレ

一トが低く、確率的発生であり、また複数光子同時生成のため安全性の問題等を抱えている。III/V 族自己集合量子ドットは作製が比較的容易で光との整合性が優れていることから理想的な光子数揺らぎのない個数状態光発生源の有力な候補として期待されている。しかしながら形状異方性やエピタキシャル成長中に混入する不純物による局所的な電界効果により、1. エネルギー差を伴った直交基底状態からの光子発生による情報漏えいと2. 非直交基底状態からの光子発生による単光子取り出し効率の低下が半導体量子ドットを用いたEPR 光子対発生源及び単光子源の実現に向けて解決すべき問題点として挙げられる。

2. 研究の目的

単光子及びEPR 光子対発生源として半導体量子ドットに束縛された励起子状態を利用する上で問題となるAEIの主な要因は、形状異方性と半導体中の不純物による異方性電界効果が挙げられ、その大きさは格子定数の異なる半導体のヘテロ界面に形成される自己集合型量子ドットでは数十～百 μeV 程度である。通常、異方性交換相互作用の測定には、高エネルギー分解能を有する分光器と高感度CCDカメラが用いられているが、量子ドット作製後のアニール処理による形状異方性の緩和、外部電界による内部電界補償等によってAEIに起因する問題点を克服する試みが盛んに行われおり、AEIによるエネルギー分裂は現行の分光装置によるエネルギー分解能の限界に近づいている。当該研究では、赤外分光分析法(FTIR)に代表される高いエネルギー分解能を、時間領域で実現するフーリエ分光法に改良を加え、光子の偏光基底も同時に検出できる測定装置の開発を行う。

3. 研究の方法

(1) フーリエ分光法の一つであり、光子の可

干渉時間の測定に用いられている発光の自己相関測定法に改良を加え、偏光ビームスプリッタを用いたMach-Zehnder 干渉計を用い、光子の均一幅に影響を受けない干渉計の時間原点における自己相関信号からAEIによるエネルギー分裂と偏光状態の混合度を同時に検出する。

(2) 成長後のアニール処理に加え、原子間の相互拡散が容易で、試料へのダメージも少ないと期待される量子ドット形成直後のチャンバー内アニール処理を併用して形状異方性を補償する。半導体量子ドット構造は、既にレーザー等に実用化が進んでいる量子井戸構造と比較してキャリアの閉じ込め効果が大きく、量子ドット成長時に混入した不純物の影響は小さいと考えられていたが、単光子源及びEPR 光子対源としての応用においては致命的であることがわかってきた。そこで半導体量子井戸構造を用いたレーザー等において、不純物除去による発光特性の改善に実績のある超格子バッファを導入する。また上記の対策でAEIの補償が不完全である場合には、当該研究の指針を形状異方性の影響が小さい量子リング構造等、他の量子構造へシフトさせ、最適な量子構造の探索を行う。

4. 研究成果

(1) 核スピン揺らぎによる光子源のデコヒーレンス

半導体量子構造を用いた位相揺らぎのない光子源の実現には、量子構造を形成している多数の核スピンによるランダムな磁場を制御する必要がある。理論的にはコヒーレンス時間は数百ミリ秒まで改善すると示唆されており、一般的な量子構造の発光再結合時間と比較して6桁程度長くなり、理想的な光子源を実現できる。当該研究者は自己集合InAlAs 量子ドット構造において円偏光照射により偏極した電子スピンを量子ドット構造へ注入し、超

微細構造相互作用を介した核スピン制御に着手した(雑誌論文2, 3, 5, 7, 8, 10, 11). 核偏極率は30 %程度に留まっており, デコヒーレンスの抑制といった観点からは不十分であるが, 核スピン偏極により発生する磁場の大きさは

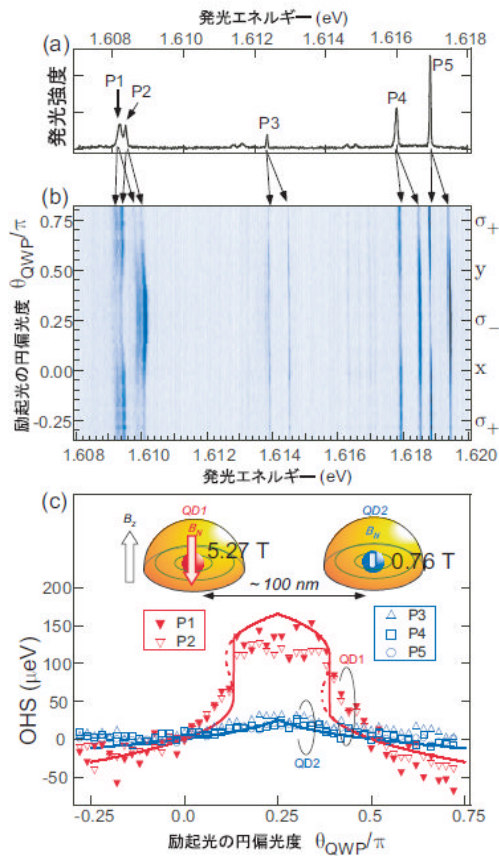


図 1: 二つの InAlAs 量子ドット (QD1, QD2) に対して同一の励起条件で核磁場を形成させた様子. 零磁場下で観測される 5 つの励起子複合体からの発光 (a) が 5 T の磁場印加によりそれぞれゼーマン分裂している. 励起偏光を変化させてオーバーハウザーシフト (OHS) を観測している. (b) は発光強度の等高線図. (c) は個々の量子ドットで異なる大きさの核磁場が生じている.

5 T にも達し, その局所性及び双安定性といった特異性から量子情報処理への応用が期待されている. 半導体量子構造内の核スピンを高精度で制御することは, 位相揺らぎのない光子源の実現には必要不可欠なものであり, 当該成果はその基盤技術を担うものである.

(2) 量子リング構造のコヒーレンス評価

半導体量子構造を用いた単光子源及び EPR 光子対源の実現に向けて, 最重要課題である異方性交換相互作用の抑制に関して, 新規な量子構造の探索を行い, 光子源としての光学的特性を評価した. 具体的には形状異方性の低減が見込める InAs/GaAs 量子リング構造を用いて光子源としてのコヒーレンスを評価した. 図 2 に量子リング構造のコヒーレンス評価と異方性交換分裂を評価した結果を示す. 当該研究で使用した試料には量子リング構造と量子ドット構造が混在しており, 両構造の違いを同時に評価できた. 量子ドット構造の励起子(分子)には異方性交換分裂が観測され, また Mach-Zehender 干渉計による 1 次の光子相関信号にも, 異方性交換エネルギーに起因するうなりが観測された. 一方で量子リング構造の励起子(分子)には異方性交換分裂が観測されなかつ

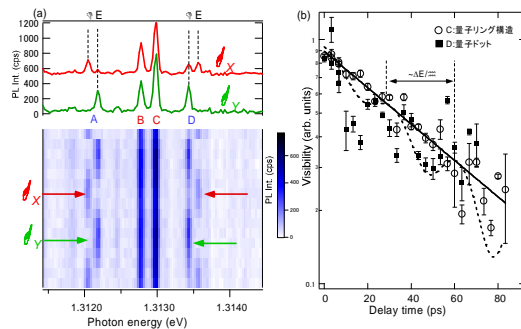


図 2: 量子リング(B,C)と量子ドット(A,D)構造からの励起子(分子)発光の偏光依存性(a)と 1 次の光子相関測定(b)

た. また両量子構造においてコヒーレンス時間の差は有意なものではなく, 同程度であった. これらの結果は量子リング構造が(単)光子(対)源として有力な候補であることを実証したものである(学会発表 3).

(3) ナノワイヤー量子ドットを用いた単光子源の評価

InP ナノワイヤー上に形成される InAsP 量子ドット構造からの単一光子発生を 2 次の光子相関信号に現れるアンチバンチング現象により確認し(学会発表 4, 5), コヒーレンスを 1 次の光子相関測定により評価した(雑誌論文 1). InP ナノワイヤー上に形成された InAsP 量子ドットは, 形状の対象性から異方性交換相互作用がゼロであるという理論的指摘があり, 理想的な光子対源の有力な候補として期待されている. 当該研究で用いた試料は SiO₂ マスクを用い, InP 基盤上に選択成長させたもので, 微細加工により作製された試料と比較して, 試料表面に付着する不純物及び結晶欠陥等の影響が少なく, 優れたコヒーレンスを有すると期待されている. また InP ナノワイヤーの上部は空間対象性に優れた六角形となっており, その上

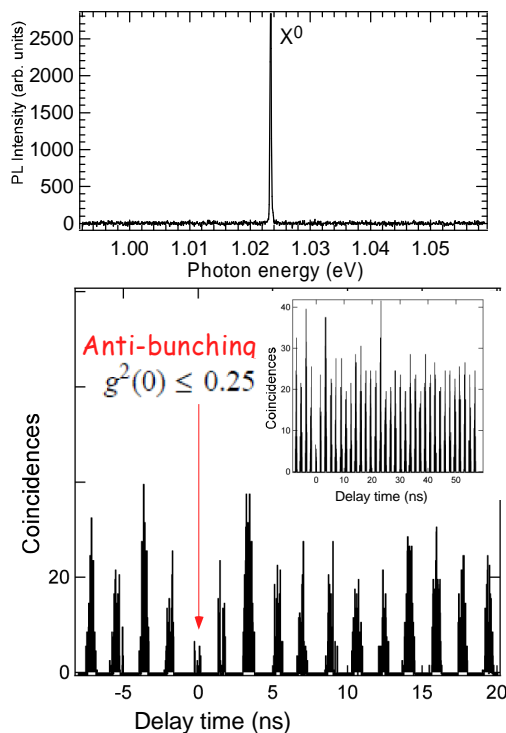


図 3: 発光スペクトル(上段)と 2 次の光子相関測定結果

に形成する InAsP 量子ドットも形状異方性がない(図 4(b)挿入図). 図 3 に InAsP ナノワイヤー量子ドットからの発光スペクトルと 2 次の光子相関測定結果を示す. 測定に用いた光学系は一般的な Hanbury Brown-Twiss 干渉計であり, 時間波高変換器(TAC)により同時計数(Coincidences)のヒストグラムを取得した. 干渉計の両アームに設置した二つの光子数測定間の時間遅延がゼロの点で同時計数が小さくなっているおり, 所謂アンチバンチング特性を確認した. 図 4 に 1 次の相関測定によりコヒーレンスを評価した結果を示す. 励起強度を下げ, 発光再結合に寄与しない余剰キャリア(電子, 正孔)数を減少させると, コヒーレンスが改善されている様子がわかる. 一般的にキャリア間の散乱によるデコヒーレンスは不均一性を誘発し, その光子源の発光スペクトルはガウシアンとなるが, ローレンツ型のままコヒーレンスが改善されていることが観測された(雑誌論文 1, 学会発表 4, 5). また本構造でも発光源のコヒーレンス時間は単光子源として研究が進められている他の量子構造で観測されているものと遜色の無いものであった.

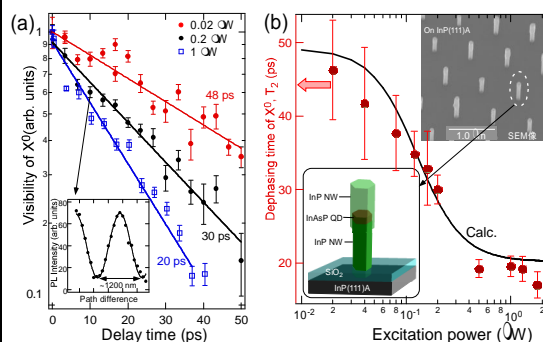


図 4: ナノワイヤー量子ドットからの励起子発光の 1 次の光子相関信号(a)とコヒーレンス時間の励起強度依存性(b). (b)の挿入図はナノワイヤー量子ドットの SEM 像と模式図.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

- ① 笹倉弘理, 鍛冶怜奈, 足立悟, 武藤俊一, 核スピンを光で見る・操作する-半導体量子ドットの動的核偏極, 日本物理学会誌, 平成 22 年 4 月号, 247-251, 査読無.
- ② H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune, J. Motohisa, Y. Kobayashi, M. van Kouwen, K. Tomioka, T. Fukui, N. Akopian, and V. Zwiller, Exciton coherence in clean single InP/InAsP/InP nanowire quantum dots emitting in infra-red measured by Fourier spectroscopy, Journal of Physics, 193, 012132 (2009), 査読有.
- ③ H. Sasakura, S. Adachi, R. Kaji, S. Muto, Formation of nanoscale magnetic field by nuclear spin polarization in individual quantum dots, physica status solidi (c), 6, 837 (2009). Also, Back Cover: Phys. Status Solidi (C) 6/4, 査読有.
- ④ H. Sasakura, S. Adachi, R. Kaji, K. Yamada, S. Muto, Zero effective electron g-factor of QD realized by optically induced nuclear field, physica status solidi (b), 256, 784 (2009), 査読有.
- ⑤ H. Kumano, S. Ekuni, H. Kobayashi, H. Sasakura, I. Suemune, S. Adachi, S. Muto, Spin-flip quenching in trion state mediated by optical phonons in a single quantum dot, physica status solidi (b), 246, 775, (2009), 査読有.
- ⑥ H. Sasakura, R. Kaji, S. Adachi, and S. Muto, Discrimination of quantum dots using optically created nuclear field, Applied Physics Letters 92, 041915 (2008), 査読有.
- ⑦ H. Kumano, H. Kobayashi, S. Ekuni, Y. Hayashi, M. Jo, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, and I. Suemune, Excitonic spin-state preservation mediated by optical-phonon resonant excitation in a single quantum dot, Physical Review B, 78, 081306 (2008), 査読有.
- ⑧ R. Kaji, S. Adachi, H. Sasakura, S. Muto, Hysteretic response of the electron-nuclear spin system in single In_{0.75}Al_{0.25}As quantum dots: Dependences on excitation power and polarization, Physical Review B 77, 115345 (2008), 査読有.
- ⑨ H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, S. Hirose, H. Z. Song, and M. Takatsu, Nuclear and excitonic spin polarization formed using cross-linearly polarized pulse pair

via half-localized state in a single self-assembled quantum dot, Journal of Applied Physics 103, 103530 (2008), 査読有.

- ⑩ S. Adachi, H. Sasakura, N. Yatsu, R. Kaji, K. Yamada, S. Muto, H. Kumano, I. Suemune, Fourier Spectroscopy of Decoherence of Exciton and Their Complexes in Single InAlAs Quantum Dots, phys. stat. sol. (c) 5, 351 (2008), 査読有.
- ⑪ R. Kaji, K. Yamada, H. Sasakura, and S. Adachi, Optical evaluation of electron and hole g-factor in single quantum dots, Phys. stat. sol. (b), 245, 2662 (2008), 査読有.
- ⑫ R. Kaji, H. Sasakura, S. Adachi, S. Muto, Excitation power dependence of optically pumped nuclear spin polarizations in single InAlAs QDs, phys. Stat. sol. (c), 5, 298 (2008), 査読有.
- ⑬ 武藤俊一, 足立智, 笹倉弘理, 量子ドットを用いた量子計算, 電子情報通信学会誌, 平成 20 年 11 月号, 931-939, 査読無.

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① 笹倉弘理, 足立智, 鍛冶怜奈, 武藤俊一, 熊野英和, 末宗幾夫 「InAlAs 量子ドットにおける核磁場による電子スピン偏極度の低下」, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 筑波大学 (2009/03/30-04/2).
- ② 和田雅樹, 笹倉弘理, 定昌文, 熊野英和, 末宗幾夫 「単一量子リング/ドット発光のコヒーレンス測定」, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 筑波大学 (2009/03/30-04/2).
- ③ 笹倉弘理, 熊野英和, 末宗幾夫, 本久順一, 小林靖典, 富岡克広, 福井孝志 「1.2 μ m 帯単光子源としての単一 InP/InAsP/InP ナノワイヤ量子ドット発光のコヒーレンス測定」, 秋季第 70 回応用物理学学会学術講演会, 富山大学 (2009/9/8-11)

- ④ H. Sasakura, H. Kumano, I. Suemune, J. Motohisa, Y. Kobayashi, K. Tomioka, T. Fukui, N. Akopian, M. van Kouwen, and V. Zwiller: “Exciton Coherence in Clean Single InP/InAsP/InP Nanowire Quantum Dots Emitting in Infra-red Measured by Fourier Spectroscopy”
16th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (Edison 16), Montpellier, August 24–28, 2009.
- ⑤ 笹倉 弘理、足立 智、鍛冶 怜奈、武藤 俊一「InAlAs 量子ドットにおける核磁場の局所性と双安定現象」、第 24 回応用物理学会 講演奨励賞受賞記念講演，中部大学 (2008/09/2-5)
- ⑥ H. Sasakura, S. Adachi, R. Kaji, K. Yamada, S. Muto, Zero effective electron g -factor of QD realized by optically induced nuclear field, The 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots (QD2008), Gyeongju, Korea, May 11-16 2008.
- ⑦ H. Sasakura, S. Adachi, R. Kaji, S. Muto, Formation of nanoscale magnetic field by nuclear spin polarization in individual quantum dots, The 5th International Conference on Semiconductor Quantum Dots (QD2008), Gyeongju, Korea, May 11-16 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹倉 弘理 (SASAKURA HIROTAKA)
北海道大学・電子科学研究所・助教
研究者番号：90374595