

平成21年 5月29日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007年度～2008年度
 課題番号：19710086
 研究課題名（和文）
 2次元フォトニック結晶を用いた量子ドット励起子におけるデコヒーレンスの克服
 研究課題名（英文）
 Overcoming decoherence of quantum dot excitons using two-dimensional photonic crystals
 研究代表者
 早瀬 潤子（伊師 潤子）（HAYASE JUNKO (ISHI JUNKO)）
 電気通信大学・先端領域教育研究センター・特任助教
 研究者番号：50342746

研究成果の概要：

本研究では、歪補償法と呼ぶ特徴的な手法で作製した超多重積層量子ドットを用いて、通信波長帯での高精度フォトンエコー測定を可能にし、①現在世界最長の励起子デコヒーレンス時間を達成、②ラビ振動と呼ばれるコヒーレント振動の制御を通信波長帯において初めて成功させるなどの成果を挙げた。本研究成果は、次世代の情報通信技術である量子情報技術の発展に寄与することが期待される。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	330,000	3,430,000

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：量子ドット、デコヒーレンス、量子情報、フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータとは、量子力学的な“重ね合わせ状態”を演算単位（量子ビット）として超並列計算を行なう未来の計算機であり、現在世界中で開発競争が激化している。量子コンピュータを実現するためには、“重ね合わせ状態”が外界との相互作用により崩壊してしまう現象（デコヒーレンス）を克服することが最大の課題である。言い換えれば、“重ね合わせ状態”を保持できる時間（デコヒーレンス時間、 T_2 ）内に実行可能な量子演算回数 N をできるだけ大きくする必要がある。

量子ドット中の励起子は、離散的エネルギー

準位を形成することから、固体量子ビットの候補となっている。量子ドット励起子の場合、超短光パルスを用いることで、ピコ秒～サブピコ秒という非常に短い量子演算時間 t_s を達成できる点が優位である。しかし一方、デコヒーレンス時間 T_2 の短いことが、実用化に向けた最大の障害となっている。

2. 研究の目的

T_2 以内に実行可能な最大演算回数 N は、1回の量子演算に要する時間を t_s として、 $N = T_2 / t_s$ を目安に決定される。本研究では、量子ドット励起子の特長である短い t_s を保持し

たまま T_2 を長くすることで、量子演算回数 N を増大させることを目的とする。

量子ドット励起子におけるデコヒーレンス時間 T_2 は、

- ・ 輻射緩和
- ・ 非輻射緩和
- ・ 純位相緩和

で決定される。 T_2 を長くするためには、①非輻射緩和や純位相緩和の寄与をできるだけ小さくし、 T_2 が輻射緩和でのみ決定される状況をつくりだし、かつ②輻射寿命を制御することが必要である。本研究では、 t_s を保持したまま輻射寿命を長くするために、2次元フォトニック結晶スラブ構造を利用することを試みる。フォトニック結晶とは、屈折率の異なる2種類の物質を光の半波長程度で交互に並べた構造体である。フォトニック結晶を用いると特定の波長領域の光が存在できないフォトニックバンドギャップ (PBG) を作り出すことができる。量子ドット励起子の発光波長が PBG 内に含まれるようなフォトニック結晶で量子ドットを囲んでやれば、励起子の自然輻射は抑制される。このとき、デコヒーレンス時間が輻射寿命でのみ決定されているとするならば、 T_2 は増大することが期待される。

3. 研究の方法

(1) サンプル作製

本研究では歪補償法と呼ばれる特殊な自己形成量子ドット作製法を用いることで、通信波長帯に共鳴波長をもち、かつ150層という超積層構造を有する InAs 量子ドットを作製する。またこの量子ドットを内包した2次元フォトニック結晶スラブの作製も試みる。

(2) デコヒーレンス時間測定とその解析

試作したサンプルにおいて、超短パルス光を用いたフォトンエコー測定を行なうことによって、デコヒーレンス時間 T_2 の測定を行なう。発光スペクトル及び自然輻射寿命測定も同時に行ない、デコヒーレンスにおける輻射緩和・非輻射緩和・純位相緩和の寄与を精密に評価することを試みる。またフォトニックバンドギャップによる自然輻射抑制効果が現れているかどうか、それに伴うデコヒーレンス時間の延長が見られるかどうか確認する。輻射寿命はピコ秒ポンププローブ法による過渡吸収測定および時間分解発光の結果から見積もる。

(3) ラビ振動測定

量子演算の一つである回転ゲートを実行する場合、量子演算に要する時間を t_s はラビ周波数によって決まる。ラビ周波数は、光と2準位系とのコヒーレントな相互作用によって起こるラビ振動を観測することによ

って評価できる。本研究では、フォトンエコー信号の励起強度 (パルス面積) 依存性を測定することによって、ラビ振動を観測することを試みる。

4. 研究成果

歪補償量子ドットを対象として、フォトンエコー信号を測定することに成功し、デコヒーレンス時間 T_2 の評価と位相緩和メカニズムの詳細な解析を行なった。その結果、得られたデコヒーレンス時間が3ナノ秒に及ぶ長いものであることが明らかとなった。フォトンエコー信号およびポンププローブ信号の励起強度・偏光・温度依存性の詳細な測定・解析を行ない、歪補償量子ドットにおいては非輻射緩和やフォノンによる純位相緩和が著しく抑制されており、特に温度が8 K以下の低温領域においては、位相緩和がほぼ輻射緩和でのみ引き起こされていることを明らかにした。この際量子ドットの積層数を150層にすることで、フォトンエコー信号及びポンププローブ信号を非常に高いS/N比で測定することに成功し、従来よりも2桁高い精度で純位相緩和を見積もることに成功した。これは純位相緩和のメカニズムを詳細に調べる上で、非常に重要な技術である。この成果は、文部科学大臣表彰や国際会議での受賞を受けるなど高い評価を受けた。研究機関の半ばに所属機関の移動などがあり、残念ながら本研究期間内にフォトニック結晶を用いたデコヒーレンス抑制までは観測できなかったが、引き続き挑戦したいと考えている。

また量子演算の一つであるラビ振動の観測に成功し、量子演算時間が1 THz程度であることを明らかにした。輻射寿命から別に求めた遷移双極子モーメントを用いることで、ラビ振動に関する理論解析を行ない、フィッティングパラメータを一切使わずに実験結果を良く再現できることを示した。得られたラビ振動は理想的2準位モデルでは説明できなかったが、パルス面積の不均一性を考慮した2準位モデルを用いた理論計算により、精度良く再現できることを見出した。またこの結果から、フォトンエコー法により励起子分極のラビ振動を観測した場合には、正負の分極が互いに干渉することでパルス面積のばらつき効果が低減され、不均一性のある量子ドット集合体を用いた場合でもラビ振動が明瞭に観測されることを明らかにした。このような観測結果は、これまでの報告にはない独創的なものであり、国際会議で受賞されるなどの高い評価を受けている。

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 8 件)

- ① J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Kujiraoka, K. Ema, and M. Sasaki, “Ensemble effect on Rabi oscillations of excitons in quantum dots”, *phys. status solidi (a)* **206**, 952-955 (2009). 査読有
- ② 早瀬潤子, “光-量子ドット相互量子制御-量子メモリの実現に向けて-” (解説論文), *レーザー研究* **37**, 38-42 (2009). 査読有
- ③ J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Kujiraoka, K. Ema, and M. Sasaki, “Exciton coherence in semiconductor quantum dots” (invited paper), *phys. status solidi (c)* **6**, 162-167 (2009). 査読有
- ④ 早瀬潤子, “量子ドットの基礎と量子情報分野への応用展開” (解説論文), *オプトロニクス* 6月号, 173-182 (2008). 査読有
- ⑤ J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Kujiraoka, K. Ema, and M. Sasaki, “Strain-compensated quantum dots emitting at 1.5 micron: resonant nonlinear optical properties and exciton dynamics” (Invited Paper), *Proc. SPIE 6779-2/1-8* (2007). 査読有
- ⑥ J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Kujiraoka, K. Ema, and M. Sasaki, “Correlation effect of Rabi oscillations of excitons in quantum dots”, *J. Lumin.* **128**, 1016-1018 (2008). 査読有
- ⑦ M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Radiative and non-radiative relaxation of excitons in strain-compensated quantum dots”, *J. Lumin.* **128**, 972-974 (2008). 査読有
- ⑧ J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Sasaki, M. Kujiraoka, and K. Ema, “Radiatively limited dephasing of quantum dot excitons in the telecommunications wavelength range”, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 103111/1-3 (2007). 査読有

[学会発表] (計 17 件)

(国際学会)

- ① M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Ensemble effect on Rabi

oscillations of exciton in quantum dots” (Poster Pater Prize), Third International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA08), 2008年7月22日, Lister Conference Centre, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.

- ② J. Ishi-Hayase, “Exciton coherence in semiconductor quantum dots” (plenary talk), The 8th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter (EXCON’08), 2008年6月25日, Kyoto University, Kyoto, Japan.
- ③ J. Ishi-Hayase, “Coherent dynamics of exciton qubits in strain-compensated quantum dots” (invited talk), First International Symposium on Interdisciplinary Materials Science (ISIMS-2008), 2008年3月13日, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan.
- ④ J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Kujiraoka, K. Ema, and M. Sasaki, “Strain-compensated quantum dots emitting at 1.5 micron: resonant nonlinear optical properties and exciton dynamics” (invited talk), *SPIE Optics East 2007*, 2007年9月10日, Seaport World Trade Center Boston, MA, USA.
- ⑤ J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Kujiraoka, K. Ema, and M. Sasaki, “Correlation effect on Rabi oscillations of excitons in quantum dots” (Poster prize), 16th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07), 2007年6月21日, Universidad SEK, Segovia, Spain.
- ⑥ M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Radiative and non-radiative relaxation of excitons in strain-compensated quantum dots” (Poster prize), 16th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC07), 2007年6月21日, Universidad SEK, Segovia, Spain.

(国内学会)

- ⑦ 早瀬(伊師)潤子, “量子ドットによるフォトンエコー量子メモリの実現に向けて”, 2009年春季第56回応用物理学

関係連合講演会, 2009年3月31日~4月1日, 筑波大学.

- ⑧ 鯨岡 真美子, 光武慧, 赤羽 浩一, 山本 直克, 江馬一弘, 佐々木 雅英, 早瀬(伊師)潤子, “集団量子ドットにおけるフォトンエコー信号の励起スペクトル幅依存性”, 2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会, 2009年3月31日, 筑波大学.
- ⑨ 早瀬(伊師)潤子, 鯨岡 真美子, 赤羽 浩一, 山本 直克, 江馬一弘, 佐々木 雅英, “量子ドットにおけるパルス面積の精密評価”, 日本物理学会2008年秋季大会, 2008年9月22日, 岩手大学上田キャンパス.
- ⑩ 鯨岡 真美子, 早瀬(伊師)潤子, 赤羽 浩一, 山本 直克, 江馬一弘, 佐々木 雅英, “量子ドットにおける励起子ラビ振動の減衰メカニズム”, 日本物理学会2008年秋季大会, 2008年9月21日, 岩手大学上田キャンパス.
- ⑪ 鯨岡 真美子, 早瀬(伊師)潤子, 赤羽 浩一, 山本 直克, 江馬一弘, 佐々木 雅英, “量子ドット集合体における励起子ラビ振動の減衰モデル”, 2008年9月4日, 2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会, 中部大学.
- ⑫ 早瀬(伊師)潤子, “歪補償量子ドットにおける励起子コヒーレンスと光波・量子通信への応用” (招待講演), 特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」第2回量子情報ミニ研究会, 2008年7月8日, 地方職員共済組合 有馬保養所 瑞宝園.
- ⑬ 鯨岡 真美子, 早瀬(伊師)潤子, 赤羽 浩一, 山本 直克, 江馬一弘, 佐々木 雅英, “歪補償量子ドットにおける励起子ポピュレーションのポンプ光強度依存性”, 2008年春季第55回応用物理学関係連合講演会, 2008年3月28日, 日本大学理工学部 船橋キャンパス.
- ⑭ 早瀬(伊師)潤子, “歪補償量子ドットにおける励起子コヒーレンスの評価と制御” (依頼講演), 電気通信大学 レーザー新世代研究センター セミナー, 2008年1月29日, 電気通信大学.
- ⑮ 早瀬(伊師)潤子, 赤羽浩一, 山本直克, 鯨岡真美子, 江馬一弘, 佐々木雅英, “フォトンエコー法による量子ドット励起子の位相緩和測定とラビ振動制御” (依頼講演), QDR セミナー, 2007年11月12日, 物質・材料機構.
- ⑯ 早瀬(伊師)潤子, 赤羽 浩一, 山本 直克, 鯨岡 真美子, 江馬一弘, 佐々木

雅英, “低歪積層量子ドットにおける励起子ラビ振動”, 日本物理学会 第62回年次大会, 2007年9月23日, 北海道大学札幌キャンパス.

- ⑰ 早瀬(伊師)潤子, “量子ドットにおける量子コヒーレンス” (依頼講演), 上智大学コロキウム, 2007年4月19日, 上智大学.

〔図書〕 (計1件)

- ① 早瀬潤子, オプトロニクス, 基礎からの量子光学, 2009年(予定), 第30章「量子ドットの基礎と量子情報分野への応用」

〔その他〕

ホームページ等

電気通信大学

http://www.ghrdp.uec.ac.jp/introduction/intro_hayase.html

JST さきがけ

<http://www.light.jst.go.jp/index.html>

情報通信研究機構

<http://www2.nict.go.jp/w/wl13/qit/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早瀬 潤子 (伊師 潤子)

(HAYASE JUNKO (ISHI JUNKO))

電気通信大学・先端領域教育研究センター・特任助教

研究者番号: 50342746

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: