慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	不均一量子ドット集合体におけるラビ振動ダイナミクスの解明と集団コヒーレンスの生成
Sub Title	Dynamics of Rabi oscillations and generation of quantum macroscopic coherence in an inhomogeneous quantum dot ensemble
Author	早瀬, 潤子 (伊師, 潤子)(Hayase, Junko (Ishi, Junko))
Publisher	
Publication year	2011
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2010.)
JaLC DOI	
Abstract	歪補償法により作製した半導体量子ドット中の励起子を対象として、通信波長帯超短パルスを用いた量子力学的重ね合わせ状態の高速制御(ラビ振動制御)に成功した。また量子ドットに特有の様々な不均一性が、ラビ振動ダイナミクスに与える影響について明らかにした。この結果は、光と固体2準位系とのコヒーレントな相互作用を理解する上で重要な成果であると言える。
Notes	研究種目：若手研究(A) 研究期間：2009～2010 課題番号：21684017 研究分野：数物系科学 科研費の分科・細目：物理学・物性I
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_21684017seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様式Ｃ-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２３年3月３１日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：若手研究（Ａ）
研究期間：2009～2010
課題番号：２１６８４０１７

研究課題名（和文）

不均一量子ドット集合体におけるラビ振動ダイナミクスの解明と集団コヒーレンスの生成

研究課題名（英文）

Dynamics of Rabi oscillations and generation of quantum macroscopic coherence in an inhomogeneous quantum dot ensemble

研究代表者

早瀬 潤子（伊師 潤子）（HAYASE JUNKO）（ISHI JUNKO）

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：50342746

研究成果の概要（和文）：

歪補償法により作製した半導体量子ドット中の励起子を対象として、通信波長帯超短パルスを用いた量子力学的重ね合わせ状態の高速制御（ラビ振動制御）に成功した。また量子ドットに特有の様々な不均一性が、ラビ振動ダイナミクスに与える影響について明らかにした。この結果は、光と固体 2 準位系とのコヒーレントな相互作用を理解する上で重要な成果であると言える。

研究成果の概要（英文）：

We successfully manipulated the quantum superposition states of excitons (i.e., manipulated Rabi oscillations) in semiconductor quantum dots fabricated using strain compensation at the telecommunication wavelengths. We investigated the effects of inhomogeneities inherent to quantum dots on the dynamics of Rabi oscillations. These results lead to understanding coherent interactions between light and solid-state two-level system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2009 年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2010 年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
年度			
年度			
年度			
総　計	20,400,000	6,120,000	26,520,000

研究分野：数物系科学
科研費の分科・細目：物理学・物性Ｉ
キーワード：光物性、量子情報

１．研究開始当初の背景

量子ドット（Quantum Dot; QD）中の励起子は、量子閉じ込め効果により離散的なエネルギー準位を形成し、固体としては比較的長い時間量子コヒーレンスを保つことができる。従って QD 中の励起子は、量子コヒーレンスを利用した量子情報処理や量子情報通信、量子制御へ応用することが期待されている。しかしながら QD 集合体では、個々の QD ごとに励起子の遷移エネルギーや遷移双極子モーメントの値が異なるため、集合体全体の量子コヒーレンスが瞬時に消失してしまい、量子現象の観測や制御を行なうことが困難となっている。もし不均一な QD 集合体においても、不均一性による量子コヒーレンス緩和の影響を除去し、集団コヒーレンスを有する励起子の生成・制御ができれば、集合体特有の量子現象を観測したり、量子制御を実現したりすることができると期待される。

本研究代表者はここ数年、QD 密度が高く、かつ高品質な歪補償 QD 集合体について研究を行なってきた。歪補償 QD は、世界最長の励起子コヒーレンス緩和時間を示すことが研究代表者により明らかとなっており、QD 集合体における励起子の量子制御を研究する上で格好の良質なモデル物質となることが期待される。

この様な背景から、本研究代表者は歪補償 QD 集合体を対象として、不均一性の効果を除去できる新しい量子制御法を開拓するという本研究課題を着想するに至った。

２．研究の目的

半導体量子ドット（QD）では、個々の QD における物理パラメタが不均一であるために、QD 集合体で量子現象を観測・制御することは困難である。本研究の最終目的は、不均一な QD 集合体において集団コヒーレンスを有する励起子を生成・制御する、新しい量子制御技術を開拓することにある。その達成のための最初の具体的目標として、QD 集合体特有の励起子ラビ振動ダイナミクスを解明し、不均一性がラビ振動ダイナミクスに与える影響を明らかにしていく。

３．研究の方法

ラビ振動の観測・制御には、複数の超短パルスを用いた非線形分光法を利用する。ラビ振動には、励起子ポピュレーションのラビ振動と、励起子分極のラビ振動（の２種類があるが、前者はポンプ－プローブ法にて、後者はフォトンエコー法にて観測することができる。これら２つの測定法を駆使することにより、歪補償 InAs QD 集合体におけるラビ振動ダイナミクスの解明と制御を行なっていく。具体的な内容を次に挙げる。

1. QD 集合体におけるラビ振動ダイナミクスの解明、特にラビ振動減衰メカニズムにおける不均一性の影響の定量的評価
2. デコヒーレンスがラビ振動へ及ぼす影響の解明
3. 電場空間分布の制御されたパルス列によるラビ振動制御
4. パルス面積を精密制御したパルス列によるラビ振動制御

４．研究成果

歪補償 InAs QD において、フォトンエコー強度およびポンプ－プローブ法による透過光強度変化の励起強度依存性を測定することにより、励起子分極および励起子ポピュレーションのラビ振動を調べた。その結果、励起強度すなわちパルス面積を増加させると、非単調な振動構造が見られること、励起子分極と励起子ポピュレーションでラビ振動の挙動が大きく異なることを見出した。これらの結果は、単一 QD には見られない集合体特有の結果である。我々は、入射光電場、遷移双極子モーメント、離調の不均一分布を考慮した理想 2 準位モデルによる計算を行い、振幅以外のフィッティングパラメタを用いていないにも関わらず、ラビ振動周期を非常に良く再現することを明らかにした。このことは、実験で観測された振動構造が励起子ラビ振動によるものであることを証明するものであるが、非単調な振る舞いについては、信号の発生過程にのみ不均一性を取り入れた単純な 2 準位モデルで説明することができなかった。そこで我々は、信号発生に関与する QD サンプル面上における不均一性だけではなく、信号が検出器に到達するまでの伝搬効果を取りいれた新たなモデルを用いて詳細な解析を行なった。理論計算の結果、入射光電場がガウシアン分布をしている場合、サンプル面上から離れた検出器直前でのフォトンエコー信号電場分布が、平均パルス面積の大きさによって大きく変化することを見出した。検出器直前における信号電場分布は平均パルス面積が大きくなる程空間的に大きく広がり、したがって、検出器前に設置されたアパーチャーのサイズや位置によって、観測されるラビ振動のマクロな応答が大きく変化することを明らかにした。また伝搬

効果を取り入れたモデル計算により、ラビ振動の非単調な振る舞いも説明することができた。フォトンエコー信号の伝搬効果まで取り入れてラビ振動を解析した報告は他になく、2 準位系集団におけるラビ振動の基本的な振る舞いを理解する上で、重要な成果であると言える。このような詳細なラビ振動解析が可能となったのは、遷移双極子モーメントなど解析に必要な物理量をラビ振動実験とは独立に高い精度で実験的に見積もったことにより、フィッティングパラメタを用いずにラビ振動の理論解析が可能になったためであり、本研究の独創的な点であると言える。

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 4 件）

1.S. Mitsutake, M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Macroscopic response of Rabi oscillations in a quantum dot ensemble”, physica status solidi (c) (in press.)

2.M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Optical Rabi oscillations in a quantum dot ensemble”, Applied Physics Express **3**, 092801(2010).

3.M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “A new method for coherent control in a quantum dot ensemble”, Journal of Physics: Conference Series **193** , 012125-8 (2009).

4.M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Ensemble effect on Rabi oscillations of excitons in quantum dots”, physica status solidi (a) **206**, 952-955 (2009).

〔学会発表〕（計 29 件）

1.光武慧, 中尾陽象, 早瀬（伊師）潤子, 赤羽浩一, 山本直克, 江馬一弘, 佐々木雅英, “集団量子ドットの巨視的非線形信号の空間分布”, 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学（神奈川）, 2011.3.26.

2.早瀬潤子, “量子ドットによる光・量子メモリの創出”, 2011 年春季第 58 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学（神奈川）, 2011.3.25.

3.早瀬潤子, 光武慧, 赤羽浩一, 山本 直克, 江馬一弘, 佐々木雅英, “量子ドット集合体からのフォトンエコー信号の干渉明瞭度”, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 電気通信大学（東京）, 2011.1.10.

4.光武慧, 中尾陽象, 早瀬潤子, 赤羽浩一, 山本 直克, 江馬一弘, 佐々木雅英, “量子ドット集合体フォトンエコー信号の横モード: 伝搬効果”, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 電気通信大学（東京）, 2010.12.7.

5.早瀬潤子, 光武慧, 赤羽 浩一, 山本 直克, 江馬一弘, 佐々木 雅英, “フォトンエコー量子メモリ実現に向けた量子ドット集合体への光位相の転写・再生実験”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2010, 中央大学駿河台記念館（東京）, 2010.11.10.

6.早瀬潤子, “半導体量子ドット集合体の励起子コヒーレンスの物理・制御・応用”, 早稲田大学　第 91 回ＱＭＳセミナー, 早稲田大学（東京）, 2010.11.9.

7.早瀬潤子, “歪補償量子ドット集合体の励起子コヒーレンス”, 奈良先端科学技術大学院大学　特別講演, 奈良先端科学技術大学院大学（奈良）, 2010.10.27.

8.早瀬潤子, 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, , “フォトンエコー法による量子ドット集合体への光コヒーレンスの転写・再生”, 2010 年秋季第 71 回応用物理学会学術講演会, 長崎大学（長崎）, 2010.9.16.

9.早瀬潤子, “フォトンエコー法を用いた歪補償量子ドット集合体の励起子コヒーレンスの研究”, 神戸大学「ナノ・フォトニクス技術セミナー　半導体量子ドットの光機能とその制御」, 神戸大学（神戸）, 2010.9.3 .

10.S. Mitsutake, M. Kujiraoka,J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Control of macroscopic response of Rabi oscillations in a quantum dot ensemble”, Fourth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA10), Brisbane, Budapest, Hungary,16 August 2010.

11.J. Ishi-Hayase, M. Kujiraoka, S. Mitsutake, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Excitonic Rabi oscillations in a strain-compensated quantum dot ensemble”, 30th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2010), COEX, Seoul, Korea ,14 July 2010.

12.J. Ishi-Hayase, M. Kujiraoka, S. Mitsutake, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M.

Sasaki, “Effect of Inhomogeneity on excitonic Rabi oscillations in a quantum dot ensemble”, The 9th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON’10), Novotel Hotel, Brisbane, QLD, Australia, 14 July 2010.

13.Y. Nakao, C. Matsui, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Kujiraoka, K. Ema, M. Sasaki, and J. Ishi-Hayase, “Dependence of dephasing on inter-dot distance in strain-compensated quantum dots”, The 9th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed and Nano Materials (EXCON’10), Novotel Hotel, Brisbane, QLD, Australia ,14 July 2010.

14.早瀬潤子, “歪補償超積層量子ドットの励起子コヒーレンス”, 日本学術会議公開シンポジウム”先端フォトニクスの展望”, 日本学術会議講堂(東京), 2010.4.9.

15.早瀬（伊師）潤子, “歪補償半導体量子ドットにおける励起子量子コヒーレンスの研究”, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学津島キャンパス（岡山）, 2010.3.20.

16.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”, 2010 年春季第 57 回 応用物理学関係連合講演会, 東海大学湘南キャンパス（神奈川）, 2010.3.19.

17.光武慧, 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, “入射光電場空間分布による集団量子ドットラビ振動の制御”, 2010 年春季第 57 回応用物理学関係連合講演会, 東海大学湘南キャンパス（神奈川）, 2010.3.17.

18.早瀬（伊師）潤子, 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, “集団量子ドットラビ振動における不均一パルス面積・励起子エネルギーの影響”, 2010 年春季第 57 回 応用物理学関係連合講演会, 東海大学湘南キャンパス(神奈川), 2010.3.17.

19.早瀬（伊師）潤子, “量子ドット集合体における励起子コヒーレンスの物理と制御”, 第 7 回先端光量子科学アライアンスセミナー, 慶應義塾大学日吉キャンパス（神奈川）, 2010.3.15.

20.早瀬（伊師）潤子, “量子ドット集合体における量子コヒーレンスの物理と制御” 電気通信大学・東京農工大学”, ナノ未来材料とコヒーレント光科学 第６回合同シンポジウム, 東京農工大学小金井キャンパス（東京）, 2009.12.5.

21.早瀬（伊師）潤子, 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, “光コヒーレンスの転写・再生に向けた量子ドット集合体における多光波混合測定”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2009, 朱鷺メッセ：新潟コンベンションセンター（新潟）, 2009.11.25.

22.J.Ishi-Hayase, S. Mitsutake, M. Kujiraoka, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Multi-Wave-Mixing Photon-Echo in Strain-Compensated Quantum Dots”, International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics (ISQNN2009), Kamaba Research Campus, The University of Tokyo, Japan, 19 Nov. 2009.

23.早瀬（伊師）潤子, 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, “不均一量子ドット集合体のコヒーレント制御と光コヒーレンス転写・再生の検討”, 第 21 回量子情報技術研究会 (QIT21), 電気通信大学（東京）, 2009.11.4.

24.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, “集団量子ドットにおける励起子ラビ振動の制御”, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学黒髪キャンパス（熊本）, 2009.9.25.

25.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, “歪補償量子ドットにおける多光波混合”, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 熊本大学黒髪キャンパス(熊本), 2009.9.25.

26.早瀬（伊師）潤子, 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, “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 年秋季第 70 回応用物理学会学術講演会, 富山大学(富山), 2009.9.8.

27.J. Ishi-Hayase, M. Kujiraoka, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Multi-wave mixing in strain-compensated quantum dots”, The 16th international conference on Electron Dynamics In Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 16), Le Corum de Montpellier, Montpellier , France, 25 August 2009.

28.M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “A new method for coherent control in a quantum dot ensemble”, The 16th international conference on Electron

Dynamics In Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON 16), Le Corum de Montpellier, Montpellier , France, 25 August 2009.

29.M. Kujiraoka, J. Ishi-Hayase, K. Akahane, N. Yamamoto, K. Ema, and M. Sasaki, “Control of ensemble effect of Rabi oscillations in quantum dot”, The 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, 21 July 2009.

〔図書〕（計 2 件）

1. **（分担執筆）早瀬潤子**, “**通信波長帯における歪補償量子ドットの励起子コヒーレンス**”,**「量子ドットエレクトロニクスの最前線」**, **株式会社エヌ・ティー・エス（**2011 **年 3 月出版）第 2 編第 3 章第 4 節**, pp.367-375.
2. **（分担執筆）早瀬（伊師）潤子**, “**量子ドットの基礎と量子情報分野への応用**”,**（社）応用物理学会　量子エレクトロニクス研究会 松岡正浩・平野琢也・岩本敏監修**, **「基礎からの量子光学」,オプトロニクス社（**2009 **年** 10 **月出版）. 第** 3 **部第** 14 **章**, pp. 485-501.

〔その他〕

ホームページ等

大学ホームページ

http://www.appi.keio.ac.jp/staff2010/hayase.html

研究紹介ビデオ

http://www.youtube.com/watch?v=D3wvAgDzPQc

６．研究組織

(1)**研究代表者**

早瀬 潤子（伊師 潤子）

（HAYASE　JUNKO）（ISHI　JUNKO）

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：50342746

(2)**研究分担者**

該当なし

(3)**連携研究者**

該当なし