

課題番号	GR084
------	-------

**先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発支援プログラム)
実施状況報告書(平成24年度)**

本様式の内容は一般に公表されます

研究課題名	単一光子-半導体量子ドット電子スピン集団励起間の 革新的量子インターフェースの実現
研究機関・ 部局・職名	慶應義塾大学・理工学部・准教授
氏名	早瀬 潤子(伊師 潤子)

1. 当該年度の研究目的

<p>本研究の目的は、フォトンエコー法及び単一光子検出技術を駆使して、単一光子レベルの極微弱な光と半導体量子ドットとのコヒーレントな相互作用を明らかにし、量子情報技術の実現に必要な不可欠な量子インターフェースを実現するための新しい技術を開拓することである。</p> <p>本研究の目的達成のために、具体的な研究項目を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> 量子インターフェース形成に適した良質な半導体量子ドットサンプルの作製・物性評価、新規材料の探索 フォトンエコー測定の高感度化、極微弱光と量子ドットサンプルとのコヒーレントな相互作用の解明 フォトンエコー法による光子量子ビットの量子ドットサンプルへの転写・再生実験
--

2. 研究の実施状況

<p>サンプル作製については、積層歪補償量子ドットサンプルの高品質化を進め、従来よりもフォトンエコー信号強度が増強されたサンプルの作製に成功した。またヘテロダイン検出技術の導入によるフォトンエコー測定の高感度化を進め、1パルス当たりの光子数が 10^5 程度の極微弱光を、1ピコ秒の時間分解能で検出することに成功した。この結果、通信波長帯擬似的単一光子パルスを入射光として量子ドット集合体へ転写し、フォトンエコー信号として再生することに初めて成功した。また再生されたフォトンエコー信号の時間幅は、入射光の時間幅(約1ピコ秒)とほぼ同程度であり、単一光子が多数の量子ドットの集団励起状態にコヒーレントに転写されたことが示された。単一光子パルスと不均一な量子ドットサンプルとのコヒーレントな相互作用を観測した例は他にはなく、独創的な成果と言える。さらにフォトンエコー法を用いて、通信波長帯単一光子の重ね合わせ状態(Time-bin 量子ビット)を高い忠実度で量子ドット集合体へ転写・再生することに初めて成功した。適用可能な単一光子パルスの帯域は1テラヘルツ以上であり、これまで報告されている世界最高帯域5GHzを大きく上回る結果が得られた。また時間帯域幅積は 10^3 と高い値を得ることに成功した。</p> <p>ダイヤモンド窒素-空孔中心については、窒素ドーピング同位体制御化学気相成長法で作製したサンプルの詳細な光学測定を進めた。その結果、表面近傍での窒素-空孔中心の安定な形成において、表面修飾やドーピングによる表面エネルギーバンド制御が重要であることを示した。また磁気共鳴</p>

様式19 別紙1

測定を行ない、表面から 5 nm に位置する窒素－空孔中心の電子スピン状態が数十 μ s 程度のコヒーレンス時間を持つこと、表面からの深さによってコヒーレンス時間が劇的に変化することを示した。さらに窒素－空孔中心を用いた微小磁場計測に成功した。

3. 研究発表等

<p>雑誌論文 計 5 件</p>	<p>(掲載済み－査読有り) 計 0 件 (掲載済み－査読無し) 計 0 件 (未掲載) 計 5 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. T. Gomi, S. Tomizawa, H. Watanabe, H. Umezawa, S. Shikata, K.M. Itoh, and J. Ishi-Hayase, “Optical and spin properties of nitrogen-vacancy centers in diamond fabricated using nitrogen-doped isotopically-enriched chemical vapor deposition”, IEICE Technical Report, 113, 53 (2013). 2. K. Suzuki, K. Konishi, K. Akahane, and J. Ishi-Hayase, “Transfer and retrieval of telecom-wavelength picoseconds single-photon qubits to quantum dots”, IEICE Technical Report, 113, 45 (2013). 3. K. Suzuki, K. Akahane, N. Yamamoto, and J. Ishi-Hayase, “Transfer and Retrieval of Optical Coherence to Strain-compensated Quantum Dots using a Heterodyne Photon-echo Technique”, Proceedings of 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (in press). 4. R. Suemori, K. Akahane, N. Yamamoto, and J. Ishi-Hayase, “Anomalous Decay of Photon Echo in a Quantum Dot Ensemble in the Strong Excitation Regime” Proceedings of 31st International Conference on the Physics of Semiconductors (in press). 5. 早瀬潤子, 「量子ドットの量子情報分野への応用」, 応用物理 2013 年 9 月号 (掲載決定) .
<p>会議発表 計 17 件</p>	<p>専門家向け 計 16 件</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. (invited) J. Ishi-Hayase, “Quantum measurement of magnetic field using NV centers in isotopically enriched diamond”, Topical workshop on semiconductor spintronics, Yokohama, Kanagawa, Japan, Jan. 24, 2013. 2. S. Tomizawa, H. Watanabe, T. Ishikawa, H. Umezawa, S. Shikata, K.M. Itoh, and J. Ishi-Hayase, “Effective and Position-Controlled Doping of Nitrogen-Vacancy Centers Using Chemical Vapor Deposition”, International Union of Materials Research Societies-International Conference on Electronic Materials 2012, Yokohama, Kanagawa, Japan, Sep. 23-28, 2012. 3. K. Ohashi, S. Tomizawa, T. Ishikawa, H. Watanabe., S. Shikata, J. Ishi-Hayase, and K.M. Itoh, “Nitrogen-Vacancy Centers Introduced during CVD Growth in Isotopically Controlled ^{12}C Diamond Films”, International Union of Materials Research Societies-International Conference on Electronic Materials 2012, Yokohama, Kanagawa, Japan, Sep. 23-28, 2012. 4. S. Tomizawa, K. Ohashi, H. Watanabe, T. Ishikawa, K.M. Itoh, H. Umezawa, S. Shikata, K.M. Itoh, and J. Ishi-Hayase, “Three-dimensional Position Control of Nitrogen-vacancy Centers in Single Crystalline Diamond through Chemical Vapor Deposition on Etched Substrate”, International Conference on Diamond and Carbon Materials, Granada, Spain, Sep. 3-6, 2012. 5. K. Suzuki, K. Akahane, N. Yamamoto, and J. Ishi-Hayase, “Transfer and Retrieval of Optical Coherence to Strain-compensated Quantum Dots using a Heterodyne Photon-echo Technique”, 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Swiss, Jul. 29 – Aug. 3, 2012. 6. R. Suemori, K. Akahane, N. Yamamoto, and J. Ishi-Hayase, “Anomalous Decay of

様式19 別紙1

	<p>Photon Echo in a Quantum Dot Ensemble in the Strong Excitation Regime” 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, Zurich, Swiss, Jul. 29 – Aug. 3, 2012.</p> <p>7. K. Ohashi, S. Tomizawa, T. Ishikawa, K.-M. C. Fu, C. Santori, V. M. Acosta, R. G. Beausoleil, H. Watanabe, S. Shikata, J. Ishi-Hayase, and K.M. Itoh, “Properties of NV centers in isotopically enriched ¹²C diamond films”, NanoMRI conference 2012, Ascona, Switzerland, Jul. 22-27, 2012.</p> <p>8. 富澤周平, 大橋康平, 伊藤公平, 早瀬潤子, 渡邊幸志, 梅澤仁, 鹿田真一, 「同位体制御 CVD ダイヤモンド超薄膜中の窒素空孔欠陥の特性評価」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学 (神奈川), 2013 年 3 月 27 日-30 日.</p> <p>9. 鈴木一将, 赤羽浩一, 山本直克, 早瀬潤子, 「量子ドット集合体への通信波長帯ピコ秒単一光子パルスのコヒーレントな転写・再生」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学 (神奈川), 2013 年 3 月 27 日-30 日.</p> <p>10. 渡邊幸志, 梅澤仁, 鹿田真一, 富澤周平, 大橋康平, 石川豊史, 早瀬潤子, 伊藤公平, 「マイクロ波プラズマにより成長したホモエピタキシャルダイヤモンド薄膜中の表面近傍窒素-空孔中心の形成」, 第 26 回ダイヤモンドシンポジウム, 青山学院大学青山キャンパス (東京), 2012 年 11 月 19 日.</p> <p>11. (招待講演) 早瀬潤子, 「ダイヤモンド超薄膜中窒素空孔中心の光学特性」, 分子研究会「新しい光の創成と物質科学ー精密計測と操作への展開」, 岡崎コンファレンスセンター (愛知), 2012 年 10 月 12 日.</p> <p>12. (招待講演) 早瀬潤子, 「半導体人工原子の光物性と量子光学」, 日本光学会年次学術講演会, タワーホール船堀 (東京都), 2012 年 9 月 25 日.</p> <p>13. 富澤周平, 大橋康平, 渡邊幸志, 鹿田真一, 梅澤仁, C. Santori, V.M. Acosta, 伊藤公平, 早瀬潤子, 「同位体制御 CVD ダイヤモンド超薄膜中の窒素空孔欠陥の特性評価」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学 (神奈川), 2012 年 9 月 18 日-9 月 21 日.</p> <p>14. 末森亮介, 赤羽浩一, 山本直克, 早瀬潤子, 「強励起下における集団量子ドットフォトンエコー信号の横モード」, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学 (神奈川), 2012 年 9 月 18 日-9 月 21 日.</p> <p>15. 鈴木一将, 赤羽浩一, 山本直克, 早瀬潤子, 「ヘテロダイイン検出フォトンエコー法を用いた歪補償量子ドット集合体への光コヒーレンスの転写・再生」, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学城北キャンパス・松山大学文京キャンパス (愛媛), 2012 年 9 月 11 日-9 月 14 日.</p> <p>16. 大橋康平, 富澤周平, 早瀬潤子, 伊藤公平, 石川豊史, 渡邊幸志, 鹿田真一, 「窒素-空孔中心がドーブされた同位体制御 ¹²C ダイヤモンド超薄膜の作製と光学特性評価」, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛大学城北キャンパス・松山大学文京キャンパス (愛媛), 2012 年 9 月 11 日-9 月 14 日.</p> <p>一般向け 計 1 件</p> <p>1. (自ら企画) 早瀬潤子, 【初心者向けセミナー】「人工ナノ構造の光物性の基礎と量子光学への応用」, 第 18 回先端光量子科学アライアンスセミナー「人工ナノ構造の基礎と光・物質制御への展開」, 慶應義塾大学日吉キャンパス (神奈川), 2013 年 3 月 11 日.</p>
<p>図書</p> <p>計 0 件</p>	<p>特になし</p>
<p>産業財産権 出願・取得状 況</p> <p>計 0 件</p>	<p>特になし</p>

様式19 別紙1

Webページ (URL)	<ul style="list-style-type: none"> ・新版窮理図解（日本語版）、早瀬研究室の研究紹介（日本語版） http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai/07_hayase/pdf/hayase06_j.pdf ・新版窮理図解（英語版）、早瀬研究室の研究紹介（英語版） http://www.st.keio.ac.jp/kyurizukai/07_hayase/pdf/hayase07_e.pdf ・早瀬研究室研究紹介ビデオ（日本語版） http://www.youtube.com/watch?v=D3wvAgDzPQc ・早瀬研究室研究紹介ビデオ（英語版） http://www.youtube.com/watch?v=JwZKzpiuvyE
国民との科学・技術対話の実施状況	<ul style="list-style-type: none"> ・NPO 法人「学びの支援コンソーシアム」主催・学び体験フェア「マナビゲート 2012」へのブース出展、実施日：平成 24 年 8 月 18 日～8 月 19 日、場所：国際フォーラム、対象者：一般市民（小・中・高生）、参加者数：約 29,100 名（会場来場者数）・約 300 名（ブース来場者数）、内容：「マナビゲート 2012」に於いて、展示・体験型ブース「光を分解してみよう！」を出展。 ・一般向け研究室見学会の実施、実施日：平成 24 年 8 月 21 日、場所：慶應義塾大学 矢上キャンパス、対象者：一般人、参加者数：60 名、内容：実験室見学と研究内容一般向け紹介。 ・高校生向け夏休み研究体験の実施、実施日：平成 24 年 8 月 27 日、場所：慶應義塾大学 矢上キャンパス、対象者：高校生、参加者数 5 名、内容：分光器を自作させ様々な光を観察する。研究室見学及び研究紹介を行なった。 ・一般向け慶應科学技術展「KEIO TECHNO-MALL」への参加、実施日：平成 24 年 12 月 4 日、場所：国際フォーラム、対象者：一般市民来場者、参加者数：約 1,000 名（来場者総計）、内容：慶應科学技術展「KEIO TECHNO-MALL」に於いて、展示ブース「ダイヤモンド超高感度ナノ磁場センサーの開発」を出展。 ・ホームページ上での研究紹介・研究成果発信 ・インターネット上の無料動画サイト YouTube での研究成果ビデオ（日本語版および英語版）の配信
新聞・一般雑誌等掲載計 0 件	特になし
その他	特になし

4. その他特記事項

第 34 回（2013 年春季） 応用物理学会講演奨励賞 受賞（所属学生）
「量子ドット集合体への通信波長帯ピコ秒単一光子パルスのコヒーレントな転写・再生」
（慶大理工¹，情報通信研究機構²：鈴木一将¹，赤羽浩一²，山本直克²，早瀬潤子¹）
<https://www.jsap.or.jp/activities/award/lecture/dai34kai.html>

実施状況報告書(平成24年度) 助成金の執行状況

本様式の内容は一般に公表されません

1. 助成金の受領状況(累計)

(単位:円)

	①交付決定額	②既受領額 (前年度迄の 累計)	③当該年度受 領額	④(=①-②- ③)未受領額	既返還額(前 年度迄の累 計)
直接経費	124,000,000	75,300,000	27,400,000	21,300,000	0
間接経費	37,200,000	22,590,000	8,220,000	6,390,000	0
合計	161,200,000	97,890,000	35,620,000	27,690,000	0

2. 当該年度の収支状況

(単位:円)

	①前年度未執 行額	②当該年度受 領額	③当該年度受 取利息等額 (未収利息を除 く)	④(=①+②+ ③)当該年度 合計収入	⑤当該年度執 行額	⑥(=④-⑤) 当該年度未執 行額	当該年度返還 額
直接経費	9,741,326	27,400,000	0	37,141,326	37,126,047	15,279	0
間接経費	0	8,220,000	0	8,220,000	8,220,000	0	0
合計	9,741,326	35,620,000	0	45,361,326	45,346,047	15,279	0

3. 当該年度の執行額内訳

(単位:円)

	金額	備考
物品費	34,083,424	広域チューナブルレーザー ほか
旅費	792,268	応用物理学会 ほか
謝金・人件費等	307,411	研究開発協力者への謝金
その他	1,942,944	研究場所賃料
直接経費計	37,126,047	
間接経費計	8,220,000	
合計	45,346,047	

4. 当該年度の主な購入物品(1品又は1組若しくは1式の価格が50万円以上のもの)

物品名	仕様・型・性能 等	数量	単価 (単位:円)	金額 (単位:円)	納入 年月日	設置研究機関 名
広域チューナブルレーザー	TLB-6304	1	2,950,000	2,950,000	2012/6/14	慶應義塾大学
信号発生器	SMB100A/02型	1	1,310,400	1,310,400	2012/8/1	慶應義塾大学
コントローラ	NV40/3CLE	1	630,000	630,000	2012/8/28	慶應義塾大学
磁気光学測定用電 導マグネットシステム	Spectromag	1	14,486,850	14,486,850	2012/11/2	慶應義塾大学
3chコントローラー	ANC300/3	1	1,039,500	1,039,500	2012/9/25	慶應義塾大学
低温3軸用ポジショ ナー	独 attocube sy stemus社製	1	2,152,500	2,152,500	2012/9/25	慶應義塾大学
75cm焦点距離分 光器	SP-2758-IR	1	2,933,700	2,933,700	2013/1/15	慶應義塾大学