

最先端・次世代研究開発支援プログラム
事後評価書

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（伊師）潤子

【研究目的】

近年、重ね合わせ状態や不確定性原理、量子もつれなどの量子力学的効果を積極的に利用することで、革新的な情報処理・情報通信・高感度センシングが可能となる量子情報技術に大きな注目が集まっている。量子情報技術の実現のためには、光子と物質との間で量子情報をやり取りする量子インターフェースの実現が必要不可欠であるが、要求される性能を有する量子インターフェースの実現には至っていない。

本研究では、これまで量子情報技術にあまり活用されてこなかった半導体量子ドットの集団励起状態を用いて、単一光子に対する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を第1の目的とする。具体的には、不均一性の大きな量子ドット集合体を対象として、フォトンエコー法を用いた量子インターフェースのスキームを適用し、今までにない広帯域・高時間帯域幅積かつ通信波長帯光子の直接転写が可能である量子インターフェースを構築することを目指す。そのために重要な、単一光子レベルの極微弱光と半導体量子ドット集合体間のコヒーレントな相互作用を解明していく。さらに、近年注目されているダイヤモンド中の窒素-空孔中心を対象として、電子スピン状態を量子センサーとして用いる量子センシング技術を開発することを第2の目的とする。具体的には、窒素-空孔中心の生成技術および電子スピン状態制御技術を開発し、量子センシングのデモンストレーションを行う。

具体的な研究項目を以下に示す。

(1) 量子ドット集合体によるフォトンエコー量子インターフェースの開発

- ① 量子インターフェース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
- ② 高感度光検出技術の開発による極微弱光と量子ドット集合体とのコヒーレントな相互作用の解明
- ③ フォトンエコー法による量子ドット集合体への単一光子 Time-bin 量子ビット転写・再生実験のデモンストレーション

(2) ダイヤモンド中窒素-空孔中心による量子センシング技術の開発

- ① 量子センシングに適した高性能窒素-空孔中心の生成技術開発と物性評価
- ② 窒素-空孔中心電子スピン状態の量子制御と磁場センシングのデモンストレーション

【総合評価】	
	特に優れた成果が得られている
○	優れた成果が得られている
	一定の成果が得られている
	十分な成果が得られていない

【所見】
① 総合所見
<p>量子ドットの集合体への量子情報の記録と再生を、フォトンエコー法を用いて実現することを目的とし、優れた研究成果をあげている。概ね順調に計画を遂行し、具体的成果を示した。また、途中からテーマに加えたダイヤモンド中窒素－空孔中心による量子センシング技術の開発のテーマにおいて、窒素ドーピング同位体制御化学気相成長による窒素－空孔中心生成技術の新規開発と物性評価を進め、量子センシング応用において重要な特性（生成位置、生成密度、配向軸、コヒーレンス時間）を全て制御可能とする新たな生成技術を開発することに成功し、同時に、光検出磁気共鳴測定装置の開発を進め、生成した窒素－空孔中心を量子センサーとして用いた微小磁場センシングのデモンストレーションに成功している。高く評価できる。</p> <p>評価の高い雑誌への投稿を含め研究成果の発信に、より一層、取り組んでいただきたい。世界初の素晴らしい成果を上げているので、読者の多い雑誌への論文発表を心がけていただきたい。また、研究期間内に目に見える成果を求められる現状では、会議発表と論文に注力することになり、特許に関しては後手に回ってしまう事情はある程度は理解できるが、本研究内容と成果は、量子情報処理の基盤技術となりうるのであるから、特許申請の可能性も是非検討していただきたい。</p>

② 目的の達成状況
<p>・ 所期の目的が <input checked="" type="checkbox"/> 全て達成された <input type="checkbox"/> 一部達成された <input type="checkbox"/> 達成されなかった)</p> <p>研究計画書によれば、明確な目標値が設定されており、ラマン型フォトンエコー過程を用いて、帯域 1THz、コヒーレンス時間 $1 \mu\text{s}$、時間帯域幅積 10^6、効率 1%で、通信波長帯の光子により、直接転写可能な量子インターフェースの実現可能性を示すところがある。これに対し、報告書によれば、帯域 1THz、時間帯域幅積 10^3、効率 0.02%で転写可能な量子インターフェースを実現したとあることから、順調に研究が進展しており、目標値もほぼ達成していることがわかる。</p> <p>設定されている数値目標で達成できていないのは、時間帯域幅積 10^6、効率 1%であり、表記されていないのがコヒーレンス時間 $1 \mu\text{s}$ である。このうち、時間帯域幅積については、1桁の改善を試みるとしているが、その手法については明記されていない。効率については、ビーム径最適化及び量子ドットの試料への光共振器付加により信号増強を行うとしているが、どの程度の改善が見込まれるかは明確でない。</p>

ただし、細かな数値でなく、革新的インターフェースの確立自体が本研究課題の中心と考えれば、全体のパフォーマンスの改善に取り組むことは重要である。

③ 研究の成果

・これまでの研究成果により判明した事実や開発した技術等に先進性・優位性が
(ある ・ ない)

・ブレークスルーと呼べるような特筆すべき研究成果が
(創出された ・ 創出されなかった)

・当初の目的の他に得られた成果が (ある ・ ない)

試料と検出系双方の改良により、単一光子レベルの微弱光でフォトンエコーの測定を成功させた点は、世界初であり、先進性のある結果であると言える。また、途中から採用したダイヤモンド薄膜を用いた試料は、コヒーレント時間を長くできる可能性があるが、他の研究グループでは取り組んでいないため、先進性・優位性を有する。

既存のフォトンエコー量子インターフェースの帯域は 5GHz であるのに対し、本研究課題では 1THz を達成している。特に、不均質であるためこれまで使われていなかった量子ドット集合体を試料として用いた点が、新たな展開につながる可能性を秘めている。

当初の研究計画にはなかったが、途中から、今後の発展が期待できるダイヤモンド薄膜の窒素・空孔中心に着目し、その試料作製技術を確立した。当初の目的の他の成果として、今後の進展が期待される。

④ 研究成果の効果

・研究成果は、関連する研究分野への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

・社会的・経済的な課題の解決への波及効果が
(見込まれる ・ 見込まれない)

量子信号処理は、通信・情報処理分野に革新的な進歩をもたらすと期待されている。本研究は、光の量子状態を固体試料に記録し必要に応じて再生する道を開くものであり、同分野の進展に寄与が見込まれる。また、通信・情報処理の進展の社会・経済への寄与は明白であり、その更なる進歩は、社会的・経済的に好影響を与えると考えられる。

⑤ 研究実施マネジメントの状況

・適切なマネジメントが (行われた ・ 行われなかった)

試料作製から測定まで、着実な研究計画がされており、成果も上がっている。試料作製は外部研究機関との共同研究であるが、外部に丸投げすることなく、学生を派遣して技術を共有する等、全体の進捗が把握できるよう心がけている点は評価できる。また、試料作製から測定までのバランスをうまく保って成果につながっていると評価できる。助成金の利活用については、主要設備は本研究に不可欠の物であり、適切に執

行されたと思われる。

会議発表については精力的に行われていると評価できる。論文発表も、会議のプロシーディングを中心に十分行われた。しかし、それらの多くは一般には公開されておらず、成果の公表としての意味は不十分であると考ええる。