

# Ultrafast detection of single-photon level femtosecond photon echoes from coherently controlled quantum dots

March 2026

Yuta Kochi

主 論 文 要 旨

No.1

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |       |   |     |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---|-----|-------|
| 報告番号                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | ㊦ 乙 第 | 号 | 氏 名 | 河内 優太 |
| 主 論 文 題 名 :<br>Ultrafast detection of single-photon level femtosecond photon echoes from coherently controlled quantum dots<br>(コヒーレント制御された量子ドットにおける単一光子レベルフェムト秒フォトンエコーの超高速検出)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |       |   |     |       |
| <p>(内容の要旨)</p> <p>秘匿性の高い通信や分散量子コンピューティングの実現に向けて、光を用いた量子通信技術の研究開発が急速に進展している。量子通信においては、量子ビットとして機能する単一光子源、量子中継に不可欠な量子メモリ、ならびに量子状態を最終的に評価する単一光子検出器の三要素が中核技術である。将来的な量子情報伝送密度の向上には、量子ビットを担う光パルスのさらなる短パルス化が不可欠であり、フェムト秒時間領域で動作する量子通信プラットフォームの構築が強く求められている。通信波長帯におけるフェムト秒単一光子源は既に実証されている一方で、THz 帯域の広いスペクトル幅を有するフェムト秒光パルスを保存可能な量子メモリはこれまで実現されていなかった。また、従来の単一光子検出器の時間分解能はピコ秒域に制限されており、フェムト秒領域の量子信号を直接評価することは困難であった。本研究では、THz 域の不均一幅を有する歪補償自己形成 InAs 量子ドット集合体とフォトンエコー法を組み合わせることで、フェムト秒量子信号の保存が可能な量子メモリを開発した。さらに、周波数上方変換を用いた単一光子検出器を開発し、フェムト秒時間分解能での量子状態測定を可能とした。これらの手法を統合することで、既存の量子通信プラットフォームをフェムト秒時間領域へと拡張するための基盤技術を確立した。</p> <p>本論文は全 9 章から構成される。第 1 章では、量子メモリおよび単一光子検出器の研究背景と本研究の目的を述べる。第 2 章では光の量子性および Time-bin 量子ビットに関する基礎事項を整理する。第 3 章では二準位系と光の相互作用、フォトンエコー法の原理および量子メモリへの応用について述べる。第 4 章では、本研究で用いた歪補償 InAs 量子ドット集合体の構造・物性、ならびにフォトンエコー生成における課題と、それを克服するための Adiabatic Rapid Passage (ARP) の原理を説明する。第 5 章では、量子ドット集合体におけるフォトンエコー生成実験およびシミュレーション結果を示し、ARP によるロバストな量子制御により THz 不均一集合体においても希土類イオン系に匹敵するフォトンエコー信号増強が可能であることを明らかにする。第 6 章では、フェムト秒フォトンエコー信号検出のための周波数上方変換単一光子検出器の原理と性能指標について述べる。第 7 章では同検出器の検出性能を定量的に評価し、時間分解検出における設計指針を示すとともに、フェムト秒 Time-bin 量子ビット評価のデモンストレーションを行う。第 8 章では前章までの技術を統合し、量子ドット集合体に保存した Time-bin 信号を周波数上方変換単一光子検出器によって測定、保存前の Time-bin 信号に付与された位相情報が保持されていることを示す。第 9 章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の研究展望について述べる。</p> |       |   |     |       |

# Thesis Abstract

No. \_\_\_\_\_

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                         |      |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------|
| Registration<br>Number                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU"<br>No. _____ *Office use only | Name | Yuta Kochi |
| Thesis Title<br><br>Ultrafast detection of single-photon level femtosecond photon echoes from coherently controlled quantum dots                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                         |      |            |
| Thesis Summary<br><p>In quantum communication, three core components are essential: single-photon sources that function as qubits, quantum memories that are indispensable for quantum repeaters, and single-photon detectors that enable the final evaluation of quantum states. To further increase the information transmission density, it is crucial to shorten the temporal width of optical pulses constituting qubits. Although femtosecond single-photon sources with THz-wide spectral bandwidths have not yet been realized. In addition, the temporal resolution of conventional single-photon detectors is typically limited to the picosecond range, making direct measurement of quantum signals in the femtosecond regime extremely challenging. In this study, a quantum memory capable of storing femtosecond quantum signals is developed by combining photon echo (PE) techniques with a strain compensated self-assembled InAs quantum dots (QDs). Furthermore, a single-photon detector based on frequency up-conversion is developed, enabling quantum state measurements with femtosecond temporal resolution.</p> <p>This thesis consists of nine chapters. Chapter 1 introduces the research background of quantum memories and single-photon detectors and outlines the objectives of this study. Chapter 2 reviews the fundamental concepts of the quantum nature of light and time-bin qubits. Chapter 3 describes the interaction between light and two-level systems, the principles of PE techniques, and their applications to quantum memories. Chapter 4 presents the structural and optical properties of the self-assembled InAs QDs used in this study, discusses challenges in PE generation, and explains the principle of adiabatic rapid passage (ARP) as a method for achieving robust coherent control. Chapter 5 reports experimental and numerical results on PE generation in the QDs and demonstrates that ARP-based robust quantum control enables PE signal enhancement comparable to that achieved in rare-earth-ion-doped systems, even in THz-inhomogeneous ensembles. Chapter 6 describes the principles and performance metrics of a frequency up-conversion single-photon detector (UCSPD) designed for measuring femtosecond PE signals. Chapter 7 quantitatively evaluates the detection performance of UCSPD, presents design guidelines for time-resolved detection, and demonstrates the evaluation of femtosecond time-bin qubits. Chapter 8 integrates the techniques developed in the preceding chapters to measure time-bin signals stored in the QDs using the UCSPD, demonstrating the preservation of phase information encoded in the time-bin signals prior to storage. Finally, Chapter 9 summarizes the results of this study and discusses future research perspectives.</p> |                                                                                                         |      |            |