



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	通信波長帯量子中継器の実現に向けた光量子メモリおよびもつれ光子対源の研究
Author(s)	安井, 翔一郎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16830号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16830
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99675
Type	doctoral thesis
File Information	Shoichiro_Yasui_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 安井 翔一郎

学 位 論 文 題 名

通信波長帯量子中継器の実現に向けた光量子メモリおよびもつれ光子対源の研究
(Studies on Optical Quantum Memories and Entangled Photon-Pair Sources for the Realization of
Telecommunication-Band Quantum Repeaters)

インターネット社会の持続的発展に向け、高効率・高機能な量子インターネットの研究が盛んである。その実現の鍵を握るのが、量子メモリ (QM) ともつれ光子対源 (EPS) である。光量子ビットの長距離伝送を可能にする量子中継器の中核素子として、前者は量子状態の一時的保存を、後者はもつれ光子対の生成を担う。高効率で量子中継を行うには、長いメモリ時間と高い書き込み・読み出し効率 (メモリ効率) を備える QM、および高生成レート (高 PGR) でメモリ帯域と整合する EPS が不可欠である。通信波長帯の光増幅に用いられるエルビウム (Er) の同位体を、低電子スピンバス結晶 Y_2SiO_5 に添加した $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 結晶は、近年、秒オーダーのコヒーレンス時間が報告される有力な QM 材料である。また、Si 導波路で構成されるマイクロリング共振器 (Si-MRR) は、高 PGR・低ノイズでもつれ光子対生成が可能で、シリコンフォトンクスとの親和性も高い。SOI 基板上で両要素を統合する光量子ネットワーク互換型集積量子中継デバイスを見据え、これらの材料・プラットフォームを用いた高効率通信波長帯 QM と高輝度 EPS の実現を本研究の目的とした。

QM の実現には、電子集団に周波数コム (AFC) を作製し、フォトンエコーでもつれ光子を書き込み・読み出しする AFC プロトコルを採用した。まず、 $^{167}\text{Er}^{3+}$ の超微細構造準位へ安定・高精度にアクセスし高品質 AFC を作製するため、光周波数コムに分光用レーザを位相同期し、広帯域 (~ 2 THz) かつ長時間 (アラン偏差 < 2 Hz) の周波数安定化光源を実現した。次に、時間・周波数の両領域から $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ の物性を評価し、QM としての適合性を明らかにした。更に、 $^{167}\text{Er}^{3+}$ の超微細準位に AFC を作製し、時間ビン量子ビットの書き込み・読み出し過程を観測することで、通信波長帯での QM 動作を実証した。最後に、光周波数コムを用いた新規 AFC 作製法と電子/核スピン偏極を併用してメモリ効率を改善し、保持時間 $0.25\ \mu\text{s}$ でメモリ効率 16.7% を達成した。本研究では、実証実験とメモリ効率・メモリ時間に関する解析計算に加え、AFC を応用した新たな QM 方式を導入することで、 $^{167}\text{Er}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ を用いた高効率 ($> 67\%$) かつ長時間 (> 1.3 s) の通信波長帯 QM が実現可能であることを示した。これにより、新規光周波数安定化手法および新規 AFC 作製手法が確立され、高効率通信波長帯 QM 実現への道筋が明らかとなった。

次いで、高輝度 EPS の実現に向けて Si-MRR の Q 値の向上に取り組んだ。伝搬モード計算によってラフネス散乱損失抑制に向けた最適構造を設計したところ、無負荷 Q 値が 10^6 を超える共振器の作製に成功した。このことから構造最適化の有効性が示された。作製した高 Q 値 Si-MRR では、光子対帯域幅 < 300 MHz が得られ、Brightness 係数 3.9×10^9 Hz/GHz/mW²、最大 Brightness 22.0 MHz/GHz (最大 PGR 9.19 MHz) を観測した。さらに、Franson 型二光子干渉により明瞭度 $98 \pm 0.2\%$ を観測し、時間-エネルギーもつれの形成を実証した。これらは CMOS 互換プラットフォームとして記録的水準であり、更なる狭帯域と高 PGR を両立する EPS の実現可能性が示された。

以上より、通信波長帯 QM の実証・効率改善と、高 Q 値 Si-MRR を用いた高輝度・狭帯域 EPS の達成を通じて、光量子ネットワークと高い互換性を有する集積量子中継デバイスへの道が拓かれた。