

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「量子状態の高度な制御に基づく革新的
量子技術基盤の創成」
研究課題「大強度広帯域周波数もつれ状態の実現
と応用」

研究終了報告書

研究期間 2016年10月～2022年3月

研究代表者: 竹内 繁樹
(京都大学大学院工学研究科 教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

広帯域周波数量子もつれ光とは、2つの光子が、それぞれ広い周波数帯域にわたり存在し、かつそれら2つの光子の周波数(エネルギー)の和が確定した値をもつような状態である。その周波数相関は、2次元フーリエ変換により時間相関と関係づけられ、それぞれの光子の周波数帯域が広くなればなるほど、2つの光子は「同時刻に」存在することになる。本プロジェクト開始前に、我々は、素子内部で分極反転周期が線形に変化する擬似位相整合素子を用いて、世界最大の帯域をもつ周波数量子もつれ光の発生に成功、またそれを用いた、世界最高の分解能をもつ量子 OCT の原理検証実験に成功していた。しかし、利用したバルク擬似位相整合素子では、励起光から下方変換光への変換効率が低く、光量が少ないという問題があった。本プロジェクトでは、**導波路型チャープ擬似位相整合素子を実現、さらに高分解能量子光断層撮影や量子もつれ時間分解分光の実現を目指した。**また、さらなる大強度化にむけ、**オンチップ導波路リング共振器を用いた量子もつれ光源や光量子情報への応用の研究**も目標とした。研究チームは、京大竹内グループが中心となり、オンチップ導波路素子開発を九大横山グループが、量子もつれの解析的理論研究を廣大ホフマングループが、また量子もつれ光子対の数値解析理論研究を北里大岡グループが、また擬似位相整合素子の開発を島津製作所徳田グループが担当、さらにハイブリッド量子 OCT に関しサンテック(株)の協力を得た、産学共同研究として実施した。年2回以上の全体チームミーティングの他、機動的に相互訪問やテレビ会議等を活用、有機的に連携し研究を遂行した。

その結果、**徳田グループが開発したリッジ導波路型チャープ擬似位相整合(CQPM)素子**により、中心波長 810nm に対し FWHM で 325nm の超広帯域量子もつれ光子対生成を確認、バルク擬似位相整合素子と比較して **600 倍~1200 倍の量子もつれ光子対生成効率**を実現した。これは、当初目標としていた 100 倍を大きく上回る値である。また、**スラブ導波路型 CQPM 素子**においても、総帯域で 320nm の超広帯域量子もつれ光子対の生成を確認、生成効率もバルク擬似位相整合素子と比較して約 300 倍と、計画時にもくろんだ 10 倍程度を大きく上回った。さらに、リッジ導波路から出力される光子対の高効率な分離法についても2光子量子干渉を用いる方法を発案、90nm の広帯域量子もつれ光での実証実験に成功した。

また、量子 OCT の応用に関しては、開発した大強度超広帯域周波数量子もつれ光の利用と、光学系の改良や高速同時計数システムなどにより、プロジェクト申請時の目標であった、**1000 倍の高速化に相当する、積算時間 1ms の量子 OCT システムの実現に成功した。**また、計画時に目標に掲げた、分解能が低い高速スキャンを従来の古典 OCT で実施し、所望の部分を高分解能な量子 OCT で観察する**古典量子ハイブリッド OCT システムも実現した。**

さらに、オンチップ導波路リング共振器による量子もつれ光生成に関しては、香港城市大との共同研究により、高コントラストドープガラスのデバイスにより、**相関モード数(81)および帯域(32nm)の双方で我々の知る限り発表時世界最大の、広帯域もつれ光子対生成を確認した。**次いで横山グループの開発した SiN 素子を用い、**全帯域で 100nm と知る限り最大の帯域をもつ量子もつれ光子対生成に成功した。**さらにこれらのデバイスにより、自発的4光波混合を超える非線形な応答の観測も行っている。

また、量子もつれ時間分解分光法の実現に関しては、**量子もつれ光子間に時間遅延をつけた和周波発生過程による、ポンププローブシステムを構築、さらに、ポンププローブシステム内に、プリズムペアと空間位相変調器 (SLM) を組み合わせることで、量子もつれ光の任意の分散を制御可能な実験系を構築、光子対の時間相関幅の制御に成功した。**

横山グループは、低損失 SiN 光導波路デバイスの研究、広帯域・高効率 SiN 光結合素子の開発を実施すると共に、もつれ光子対生成にとり重要なプロセスである4光波混合発生を、**Si 系導波路デバイス、および同グループの開発した高い非線形性をもつ有機ポリマーとシリコンのハイブリッド型リング共振器を用いて実現した。**さらに、周波数もつれ光子対の制御に向け、**オンチップ光変調スイッチング素子の作製にも成功した。**

また、ホフマングループは、量子もつれ光子対によって生じる2光子吸収に関する解析的

な基礎理論を確立した。その中で、有名な Saleh らの論文(PRL 80, 3483(1998))で主張されていた終状態より大きな中間準位のスペクトロスコーピーは不可能であることも明らかにした。また、**多光子多モード状態間量子もつれを、従来のトモグラフィを用いる方法に比べて指数関数的に少ないステップで検証する方法を提案、竹内グループはその検証実験に成功した。**

また岡グループは、広帯域周波数量子もつれ光と、原子・分子の相互作用(2光子吸収)について数値解析的な手法により研究を進めた。その結果、**波形整形された広帯域周波数もつれ光による原子系巨大2光子吸収の詳細をあきらかにするとともに、さらに分子系の励起へと拡張した。**また、周波数広帯域量子もつれ光を用いることで、通常は分光が困難な禁制準位について分光することが可能であることを提案、理論的な検証も行った。

徳田グループは、高効率、広帯域周波数もつれ光源に適したスラブ導波路型およびリッジ導波路型の擬似位相整合素子の開発を進めた。その結果、**従来のバルク素子の効率を大きく上回る、超広帯域もつれ光子対の生成可能とするリッジ導波路素子とスラブ導波路素子の開発に成功した。**

以上のように、各サブグループの多大なご尽力・ご協力のもと、**本プロジェクトは概ね当初目標を達成し、またさらに目標を上回る成果を得ることができた。**

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 導波路型擬似位相整合素子により、超広帯域周波数もつれ光の高効率生成を実現

概要: 開発したリッジ導波路型チャープ擬似位相整合(CQPM)素子を用い、中心波長 810nm に対し FWHM で 325nm の超広帯域量子もつれ光子対生成を確認、バルク擬似位相整合素子と比較して 600 倍~1200 倍の量子もつれ光子対生成効率を実現した(Opt. Exp. 2021)。さらに、スラブ導波路型 CQPM 素子においても、総帯域で 320nm の超広帯域量子もつれ光子対の生成を確認、生成効率もバルク擬似位相整合素子と比較して約 300 倍の値を得た。超広帯域周波数量子もつれ光のさまざまな応用に革新をもたらす成果である。

2. 多光子多モードもつれ状態の、飛躍的に効率的な検証方法を実現

概要: 量子もつれ状態は、量子コンピュータ、量子センシングなどの量子技術の核となるリソースである。しかし、従来法では、量子の数が増えるにともない、その量子もつれの検証に必要な時間が指数関数的に増大するという問題があった。今回、光子の量子もつれ状態を、従来にくらべて著しく高い効率で検証する方法の実証に、6 つの光子間量子ゲートを含む光量子回路を用いて成功した(Optica, 2020)。今回実現した方法は、システムサイズが増大しても高い効率を保てることから、光量子技術に幅広くブレークスルーをもたらすものである。

3. 量子もつれ光子対によって生じる2光子吸収に関する解析的な基礎理論を確立

概要: 2光子共鳴を中間レベルのダイナミクスから分離することにより、2光子吸収の非常に単純化された理論を導き出した(Phys. Rev. A 2021)。この新しい理論により、中間共鳴の Kramers-Kronigs 関係の観点から、吸収断面積に対するエンタングルメントの影響を説明することができた。結果は、2光子吸収が最後の2光子励起状態を超えるレベルの共鳴周波数に敏感ではないことを示しており、Saleh et al., PRL 80,3483(1998)で行われた予測を修正している。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 量子光コヒーレンストモグラフィの高速化と古典量子ハイブリッド OCT の実現

概要: 今回開発した大強度超広帯域周波数量子もつれ光の利用、ならびに偏光自由度を活用した光学系の改良や高速同時計数システムなどにより、1000 倍の高速化に相当する、積算時間 1ms の量子 OCT システムの実現に成功した。また、分解能が低い高速スキャンを従来

の古典 OCT で実施し、所望の部分を高分解能な量子 OCT で観察する「古典量子ハイブリッド OCT システム」も実現した。この測定時間の大幅な短縮は、社会実装に向けた大きなステップとなる成果である。

2. オンチップ超広帯域周波数量子もつれ光源の実現と制御技術の開発

概要: 開発した SiN 素子を用い、全帯域で 100nm と知る限り最大の帯域をもつ量子もつれ光子対生成に成功した。またオンチップ型光集積化が可能な高速位相変調技術を開発し、70 GHz の広帯域周波数応答性を確認した (Nature Comm. 2020, Scientific Reports 2017)。位相変調を制御した高速光スイッチング技術や高速光信号生成が可能であり 100Gbit/s 以上のデータ伝送を示すことでその有用性を実証した。将来的には、量子もつれ光を用いた様々なアプリケーションを、オンチップ光集積デバイスでの実現に繋がるのが期待できる。

3. 周波数量子もつれ光を用いた新規分光法の発案と、状態制御の実現

概要: 周波数量子もつれ光を用いた分子系振動電子状態分光のための新しい量子もつれ分光法の提案 (Phys. Rev. A 2018) や、量子もつれ光による選択的 2 光子吸収を利用することで、一般的なレーザー光源では分光の難しい分子系振電状態の禁制準位分光が可能な事を明らかにした。また、量子もつれ光子間に時間遅延をつけたポンププローブシステムにおいて、プリズムペアと空間位相変調器 (SLM) を組み合わせることで、量子もつれ光の任意の分散を制御可能な実験系も実現した。これらは、広帯域量子もつれ光をもちいたあたらしい分光技術への道を拓く成果である。

< 代表的な論文 >

1. B.Cao, M.Hisamitsu, K.Tokuda, S.Kurimura, R.Okamoto and S.Takeuchi, “Efficient generation of ultra-broadband parametric fluorescence using chirped quasi-phase-matched waveguide devices”, Optics Express, vol.29, No.14, 21615-21628 (2021).

概要: 開発したリッジ導波路型チャープ擬似位相整合 (CQPM) 素子を用い、中心波長 810nm に対し FWHM で 325nm の超広帯域量子もつれ光子対生成を確認、バルク擬似位相整合素子と比較して 600 倍～1200 倍の量子もつれ光子対生成効率を実現した。徳田グループとの共同研究成果である。

2. Z. Yin, K. Sugiura, H. Takashima, R. Okamoto, F. Qiu, S. Yokoyama, and S. Takeuchi, “Frequency correlated photon generation at telecom band using silicon nitride ring cavities,” Optics Express, 29, 4821-4829 (2021).

概要: CMOS コンパチブルなプロセスで実現される周波数量子もつれ光源は、装置の著しい小型化やシステム集積化の鍵となる素子である。今回、窒化シリコンリング共振器を用いた周波数もつれ光子対源を実現、同種の素子における周波数もつれ光子対の帯域について、従来の最大を大きく上回る、全帯域で 100nm 以上 (片側 51nm) の帯域を実現した。横山グループとの共同研究成果である。

3. T. Kiyohara, N. Yamashiro, R. Okamoto, H. Araki, J Y. Wu, H. F. Hofmann and S. Takeuchi, “Direct and efficient verification of entanglement between two multimode-multiphoton systems”, Optica, vol.7, No.11, 1517-1523 (2020).

概要: 光子の量子もつれ状態を、従来にくらべて著しく高い効率で検証する方法の実証に、6 つの光子間量子ゲートを含む光量子回路を用いて成功した。今回実現した方法は、システムサイズが増大しても高い効率を保てることから、光量子技術に幅広くブレークスルーをもたらすものである。ホフマングループとの共同研究成果である。

§ 2 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

①「竹内」グループ

研究代表者: 竹内 繁樹 (京都大学大学院工学研究科、教授)

研究項目

- ・大強度広帯域周波数もつれ状態の実現と応用に関する研究

②「横山」グループ

主たる共同研究者: 横山 士吉 (九州大学先導物質化学研究所、教授)

研究項目

- ・広帯域周波数量子もつれ光生成にむけた導波路素子の研究

③「ホフマン」グループ

主たる共同研究者: Holger F. Hofmann (広島大学大学院先進理工系科学研究科先進理工系科学専攻、教授)

研究項目

- ・広帯域周波数量子もつれ光の評価・応用に関する理論研究

④「岡」グループ

主たる共同研究者: 岡 寿樹 (北里大学理学部、教授)

研究項目

- ・広帯域周波数量子もつれ光の評価・応用に関する理論研究

⑤「徳田」グループ

主たる共同研究者: 徳田 勝彦 (島津製作所基盤技術研究所光技術ユニット、主任研究員)

研究項目

- ・広帯域周波数量子もつれ光発生用擬似位相整合素子の研究

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

【竹内グループ】

- ・名古屋大学 西澤典彦教授
- ・京都大学医学研究科 辻川明孝教授
- ・サンテック株式会社
- ・中国南京大学 呉教授、陳教授
- ・中国(香港) 香港城市大学 Sai Tak Chu 教授
- ・ドイツ Humboldt 大学 Berlin, O. Benson 教授
- ・ドイツ University of Hamburg, F. Schlawin 教授

【横山グループ】

- ・武漢理工大学 Jianxun Hong 准教授

【岡グループ】

- ・カルフォルニア大学バークレー校 岡野真之博士(当時)