

竹内 繁樹

北海道大学電子科学研究所・教授

モノサイクル量子もつれ光の実現と量子非線形光学の創成

§ 1. 研究実施の概要

本研究は、この「量子もつれ光」と「モノサイクル光」の概念を融合し、極限的な時間相関を有するもつれ光という全く新しい光源を創造、さらに、その光源を用いてこれまで実現不可能な「光」と物質の相互作用をナノフォトニクス技術により実現、新しい超高速現象の観測技術を切り開くとともに、量子メトロロジーへの応用により光計測分野へもイノベーションをもたらすものである。北海道大学(竹内グループ)が評価・計測・検証を、物質・材料研究機構(栗村グループ)がもつれ光を発生する新規非線形デバイス開発を、および広島大学(ホフマングループ)が理論解析を担当する。

今年度は、研究初年度であり、各研究グループにおいて、必要となる実験装置類の設計、購入手配ならびに博士研究員の雇用などの研究体制の整備に重点を置いた。また、各グループ間で平均2ヶ月に1度の頻度で研究ミーティングを行い、今後のより緊密な研究連携を目的に、テレビ会議システムのネットワークを構築した。

竹内グループは、モノサイクルもつれ光源用光学系の設計ならびに励起用光源の選定を完了した。また、2光子周波数スペクトルの評価系の設計も終え、必要な部品・装置を調達した。

栗村グループは、非線形光学材料の特性を検討し、可視光領域で非線形吸収の小さい Mg:SLT を光子対発生材料として選定、強誘電体 Mg:SLT において電子ビーム露光によるパターン形成条件を探索し、サブミクロンサイズの微細パターンを得た。電極形成を経て高電界印加によるデバイス作製に移行する。

ホフマングループは、極短パルスと多光子量子干渉を利用した、モノサイクルもつれ光のまったく新しい評価方法について検討、有望との結果を得ると共に、損失など実際の実験条件下におけるもつれ状態を用いた位相測定感度の定式化に成功、論文として発表した。

これらの準備、成果をもとに、来年度は数十フェムト秒の時間相関をもつもつれ光子対の生成と評価に取り組む予定である。

§ 2. 研究実施体制

(1) 竹内グループ

① 研究分担グループ長: 竹内 繁樹(北海道大学、教授)

② 研究項目

1. モノサイクルもつれ光源の開発
2. 量子非線形光学の研究
3. 量子メトロロジーの研究

(2) 栗村グループ

① 研究分担グループ長: 栗村 直(独立行政法人物質・材料研究機構、主幹研究員)

② 研究項目

1. モノサイクルもつれ光源の開発
(QPM デバイス設計試作)

(2) ホフマングループ

① 研究分担グループ長: Holger F. Hofmann(広島大学、准教授)

② 研究項目

1. モノサイクルもつれ光源の開発
2. 量子非線形光学の研究
3. 量子メトロロジーの研究

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する。)

今年度は、研究初年度であり、各研究グループにおいて、必要となる実験装置類の設計、購入手配ならびに博士研究員の雇用などの研究体制の整備に重点を置いた。特にチーム内の3グループが、大阪・筑波・広島と遠方に分散しているため、チーム内議論の効率化と出張旅費の節減をめざし、CREST 専用のテレビ会議システムを導入した。また、CREST の全体キックオフミーティングや説明会などの機会を活用し、チーム内ミーティングを2度にわたり行った。以下、研究実施内容の詳細を述べる。

竹内グループは、項目(1)のモノサイクルもつれ光源の開発に関し、QPM デバイスの評価系の設計、構築を行った。計画通り、1月にスタンフォード大学の S.E.Harris 研究室を訪問、そこでの議論の内容なども参考に励起様レーザーについて機種選定を完了、購入に必要な手続きを CREST の複数年度契約の特徴を利用して開始した。また、発生した光子の2光子周波数スペクトルの評価系について、必要な分光器や光子検出器の選定・購入を行った。項目(2)のモノサイクル量子も

つれ光を用いた非線形光学に関しては、非線形光学素子によるアップコンバージョンによる、巨大2光子吸収の発現とその相関時間依存性の評価実験を念頭に、アップコンバージョン後の光子を検出する光子検出器について検討を行った。

栗村グループは、項目(1)のモノサイクルもつれ光源の開発に関し、超広帯域擬似位相整合デバイスの研究を担当している。本研究では、異なる周期をもつ周期構造を同時に造り込むことから、サブミクロンパターンの電極構造が必要になる。21年度はまず非線形光学材料の選択から着手し、各材料の特性を検討した結果、可視光領域で非線形吸収の小さい Mg 添加定比組成タンタル酸リチウム(Mg:SLT)を光子対発生材料として選定した。Mg:SLT は栗村らにより可視領域の高出力波長変換が実現されており、低吸収、高排熱材料として注目されている。この強誘電体 Mg:SLT において電子ビーム露光によるパターンの形成条件を探索した。電子ビームの照射面積を小さくし将来のデバイス作製時間を短縮するために、ネガ型レジストにおいて露光条件の条件出しを行うこととした。誘電体材料への電子ビーム露光においてはチャージアップによるパターンの揺らぎが問題であり、レジストパターンの直線性および周期性を劣化させる。揺らぎを抑制するためにレジスト上に伝導層をトップコートしてチャージアップを抑えた。

ホフマングループは、(1)多光子干渉や微弱測定などの量子効果を利用した、時間的な量子状態トモグラフィの新しい方法の開発、(2)オフレゾナンス極短時間相互作用に関する物質応答の半古典的解析による、量子非線形性に関する方程式の拡張の理論研究を実施する。また、(3)モノサイクル量子もつれ光の量子メトロロジーへの適用に関し、現在の干渉法などに対する優位性を確立するための調査研究を実施した。

まず、(1)に関しては多光子量子干渉を利用した、モノサイクルもつれ光の評価の可能性を検討した。その初期的な結果として、極短パルスのリファレンスとして、線形光学素子と光子計数を用いる方法が有力であることが分かった。また、(2)に関しては、単一原子の光非線形性に関し、入力光子パルスと非線形システムの共鳴が離調している場合について研究を行った。その結果、離調により非線形位相シフトは減少する一方、出力光子の形状の非線形な変化をよりよく制御可能であることが分かった。この結果は、光子の時間・周波数コヒーレンスの制御が非常に重要であることを示している。また、(3)に関しては、位相測定感度に関する研究で重要な成果が得られた。2モード状態による位相測定感度に対する損失の影響の解析が完成し、論文とした。この論文で確立した定式化は、損失や限られた検出効率といった実際の実験における限界の検討に有用な基礎を与えると考えられる。位相測定感度と固有値を超えて得られる弱測定値(weak measurement values)の関係の研究を行った。その結果、弱測定値の虚数部分におけるゆらぎに、位相測定感度が対応していることが明らかになった。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

[1]Hisaki Oka, Hideki Fujiwara, Shigeki Takeuchi, and Keiji Sasaki, “Nonlinear optical phase shift obtained from two-level atoms confined in a planar microcavity”, J. Appl. Phys. Vol.107 No.5 pp. 054310/1-6 (2010/3/5), doi:10.1063/1.3327411

[2]Takafumi Ono and Holger F. Hofmann, “Effects of photon losses on phase estimation near the Heisenberg limit using coherent light and squeezed vacuum”, Phys. Rev. A Vol.81, 033 (2010/3/11), doi:10.1103/PhysRevA.81.033819

[3]T. Nagata, R. Okamoto, H. F. Hofmann, and S. Takeuchi, “Analysis of experimental error sources in a linear-optics quantum gate”, New J. Phys. (2010/3/18 掲載受理)