「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」
平成 21 年度採択研究代表者

H22 年度
実績報告

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、「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）が理論解析を担当し、(1)モノサイクルもつれ光源の開発、(2)モノサイクル量子もつれ光を用いた非線形光学、(3)モノサイクル量子もつれ光を用いた量子メトロロジーの3つのテーマについて研究を進める。中間目標に掲げる数サイクル（20～30フェムト秒程度）の極短時間相関のもつれ光子対光源の実現を目標に、プロジェクト前半は3項目のうち特に(1) モノサイクルもつれ光源の開発に関し重点的に進め、当初計画していた(1-A)ナノ加工電極による擬似位相整合(QPM)デバイスの開発　に加えて、従来技術の延長である(1-B) 変調光リソグラフィーを用いた QPM デバイスの開発、さらに(1-C)バルク非線形光学結晶を利用した発生方法の3通りについて、並列的に研究を進めている。
平成22年度は、項目(1-A)に関し、栗村グループは、強誘電体Mg:SLTにおいて、ナノ加工電極による擬似位相整合(QPM)デバイスの開発に必須となる、電子ビーム露光およびドライエッチングの手法を用いたナノスケールの Al 電極を実現した。また、項目(1-B)に関し、従来プロセスを用いて栗村グループによって作製された、分極反転比の均一性の高い 10%チャープ分極反転デバイスを用い、帯域幅 851nm（周波数換算約 200THz）という既報告を大きく上回る超広帯域パラメトリック蛍光発生を確認した。さらに項目(1-C)に関しても、バルク結晶を複数組み合わせる独自の方法により、帯域幅 160nm（周波数換算 74THz）というこれまでにない広帯域発生を実現した。理論面においてもホフマングループにより、時間分解量子トモグラフィーの方法として時間遅延をもった参照パルスにより生じる多光子干渉理論の定式化に成功している。また、項目(2)に関しても、必要となる超低ノイズ光子検出システムの立ち上げに南京大学の協力のもと成功、項目(3)に関し

ては、名古屋大学の協力を得て量子 OCT 光学系の構築を行った。

これらの成果をもとに、来年度は項目(1)に関しナノ加工電極構造を用いて高電界印加プロセス、蛍光光子対の2光子干渉実験、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系の構築、量子 OCT 実験などを行う予定である。

§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 電子科学研究所、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、光材料センター 光周波数変換グループ、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)

(3)「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 大学院先端物質科学研究科、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

(文中の引用番号等は(4－1)に対応する)

今年度は、研究2年度目であり、各研究グループにおいて、年度前半は引き続き博士研究員の雇用などの研究体制の整備、必要となる実験装置類の設計などが主であったが、後半では、後に述べるようないくつかの初期的な成果を得るに至っている。チーム全体としては、大阪・筑波・広島と遠方に分散しているが、第2回(2010 年 4 月 14 日、 阪大)、第3回 (2010 年 7 月 14 日、NIMS)、第4回(2010 年 10 月 15 日、広大)と、ほぼ終日を使ってのチームミーティングを開催する他、竹内グループから学生を栗村グループに短期(約1週間)派遣するなどし、連携に務めた。また、昨年度導入した CREST 専用のテレビ会議システム、CREST の全体キックオフミーティングや説明会などの機会も活用した。以下、それぞれのグループ別に、研究実施内容を詳述する。

竹内グループは、4月付けで CREST 雇用の岡野博士研究員が着任、また関連する研究者として Shanthi Subashchandran 研究員も協力を開始、体制を整えることが出来た。項目(1)のモノサイクルもつれ光源の開発に関して、平成 22 年度には項目(1-B)の、既存技術を用いた QPM デバイスし、栗村グループの作製した10%チャープしたデバイスにより、788nm～1639nm に至るまでの、帯域幅 851nm(周波数換算約 200THz)という超広帯域パラメトリック蛍光発生を確認した。これは、これまでのチャープ QPM デバイス光源の最大値(ボストン大学、帯域幅 300nm, 周波数換算 141THz)を大幅に上回る値である。また、項目(1-C)のバルク結晶を利用した光源においても、730nm～890nm、帯域幅 160nm(周波数換算 74THz)と、従来バルク結晶で得られていた最大のもの(ボストン大、148nm, 68THz)を超える広帯域発生に成功した。また、ポンプ用狭帯域レーザー光源に関しては平成 22 年度 11 月に導入を終えている。以上のように、予定以上の結果を得ることが出来た。

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、先行研究に関する情報収集により、非線形光学結晶に2つの「光子」をアップコンバージョンした際の検出される和周波光子数は、毎秒数十程度に留まる事が分かってきた。この場合、通常利用する APD では、ダークカウントが数十カウント毎秒存在するため、困難が予想される。また、同時期、南京大学超伝導科学研究所(呉教授および陳教授)らによって開発された超伝導光子検出器が、アップコンバージョン光子の波長(532nm)で 30%程度の量子効率を維持しつつ、ダークカウントを毎秒1以下に抑えられることを国際会議において知り、4月に南京大学を竹内、岡本が訪問し共同研究を開始した。その後、南京大学の作製した光子検出器を用い、研究室の冷凍機付き極低温クライオスタットを利活用しながら光子検出システムを構築、12 月に南京大学より来訪した Labao 講師らの支援を得て、ダークカウントが毎秒 1 以下の光子検出システムの竹内研究室における立ち上げに成功した。

また、モノサイクルもつれ光を用いた2光子吸収実験に関連し、ナノ光ファイバと微小球共振器の極低温下での結合実験に成功した [3)]。また、ナノ光ファイバの単一光子レベルの入力光による応答測定にも成功している [4)]。今後、この成果を元にダイヤモンド中の結晶欠陥や半導体量子ドットとナノ光ファイバを用いた2光子吸収実験について検討を進める。これに関連して、岡野博士研

究員らが九州大学横山教授を訪問し、ナノ光ファイバと2光子吸収有機材料を用いた予備実験を12月に実施した。

項目(3)のモノサイクル量子もつれ光を用いた量子メトロロジーに関しては、OCT 開発に実績のある、名古屋大学西澤准教授との協力を得て、量子 OCT の実験系の設計と構築を開始した。6月に竹内および岡野が名古屋大学を訪問、その後岡野が数日間滞在するなどしながら、量子 OCT 光学系の設計を実施した。この光学系は、同じ装置を用いて、古典 OCT と量子 OCT の性能を比較出来るように工夫した。現在、構築を進めており、SLD 光源を用いて 20μm 程度の低コヒーレント干渉の観測に成功している。今後、より広帯域な光源を用いた量子 OCT 実験に取り組む予定である。

また、2光子量子干渉の不完全性などのエラー要因が、光量子回路に与える影響[1](ホフマングループと共同)や、2光子吸収を利用した量子リソグラフィにあたえる影響[5]およびそのもつれ合い生成の新しいスキーム[2]について検討を行った。これらのエラー解析手法を元に、今後モノサイクル量子もつれ光を用いた量子プロトコルの事前評価を行う予定である。

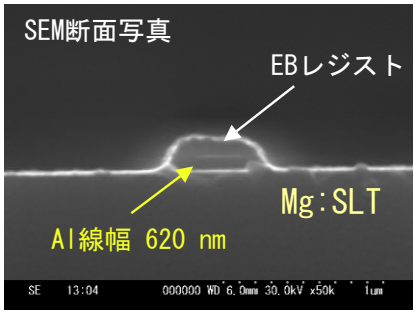

図1　強誘電体 Mg:SLT 上への Al ナノ電極

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、ナノスケールの電極構造が必要になる。22 年度は、21 年度に選定した低吸収高熱伝導材料 Mg:SLT 上に電子ビーム露光によりレジストパターンを作製し、ドライエッチングを用いてナノスケールの Al 電極を実現した。強誘電体である Mg:SLT 上にナノ電極を形成したのは初めての例である。しかしながらレジストパターン形成時の熱処理において、焦電効果による望まないマイクロドメインの発生が見られており、電界印加分極反転時に望まないパターンを発生させる原因になるものと思われる。今後マイクロドメインの抑制／除去プロセスを検討しつつ、電界印加分極反転プロセスに移行する。

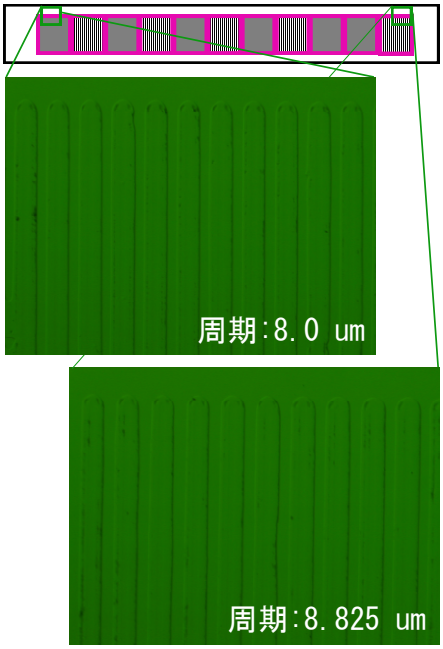

図2　10%チャープ分極反転構造の均一性

他方項目(1-B)に関し、ミドルマイルストーンである数サイクルもつれ光発生に寄与する低チャープ分極反転構造の形成を行った。周期を8μm から最大8．825μm まで変化させたチャープパターンを設計し(最大10%のチャープ)、同一デバイスに同一電界印加条件で均一性の高い分極反転構造を得ることができた(特許1)。図はそれぞれ8μm と8．825μm の分極反転写真を示している。効率を決定する分極反転比は、デバイス全体にわたって±10%の範囲に抑えられており、異なるすべての周期に対してほぼ等しい効率を得ることができる。このデバイスを用いて、竹内グループではパラメトリック蛍光発生を行い、従来報告を凌駕する帯域幅 851nm が実現されている。チャープデバイスにおいては、励起光パワーを向上させることでさらに広い光子対帯域が期待できるため、励起光の微小吸収による温度上昇を抑圧するべく排熱モジュールの研究も進めていく[6)]。このため継続的にテレビ会議および相互訪問を行い、デバイス／モジュールへの迅速なフィードバック体制を整える。

ホフマングループは、8月に任　昌亮博士研究員が着任し、体制が整った。項目(1)に関しては、時間分解量子トモグラフィーの方法として時間遅延をもった参照パルスにより生じる多光子干渉の理論を定式化を行った。また、項目(2)に関し、量子メトロロジーと弱測定に関する一連の研究[7-9)]により、測定感度と生成演算子オブザーバブルの詳細な量子統計に本質的な関係が存在することが分かってきた。この結果は、我々は、量子状態トモグラフィーの結果を、弱測定統計の立場で考察することが有用であることを示唆していると考えられる。また、項目(3)に関しては、離調された、もしくはチャープしたパルスによる量子非線形性に関する、平成 22 年度までの研究によって、異なるパルス形状のコヒーレントな重ね合わせの入力により、ポンプ―プローブ型実験の量子版が実現できる可能性を明らかにした。

§4. 成果発表等

(4－1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. T. Nagata, R. Okamoto, H F. Hofmann, and S. Takeuchi, “Analysis of experimental error sources in a linear-optics quantum gate”, New Journal of Physics, vol.12, pp.43053-1-43053-17, 2010 (DOI: 10.1088/1367-2630/12/4/043053)
2. P. Kalasuwan, G. Mendoza, A. Laing, T. Nagata, J. Coggins, Callaway, S. Takeuchi, A. Stefanov, and J. L. O’ Brien, “Simple scheme for expanding photonic cluster states for quantum information”, Journal of the Optical Society of America B, vol.27, No.6, pp.A181-A184, 2010 (DOI: 10.1364/JOSAB.27.00A181)
3. H. Takashima, T. Asai, K. Toubaru, M. Fujiwara, K. Sasaki, and S. Takeuchi, “Fiber-microsphere system at cryogenic temperatures toward cavity QED using diamond NV centers”, OPTICS EXPRESS(OSA), vol.18, No.14, pp.15169-15173,

2010 (DOI：10.1364/OE.18.015169)
4. A. Tanaka, T. Asai, K. Toubaru, H. Takashima, M. Fujiwara, R. Okamoto, and S. Takeuchi, “Phase shift spectra of a fiber-microsphere system at the single photon level”, OPTICS EXPRESS(OSA), vol.19,No.3, pp.2257-2265, 2011 (DOI:10.1364/OE.19.002278)
5. H. Fujiwara, Y. Kawabe, R. Okamoto, S. Takeuchi, and K. Sasaki, “Quantum lithography under imperfect conditions: effects of loss and dephasing on two-photon interference fringes”, Journal of the Optical Society of America B, vol.28, No.3, pp422-431, 2011 (DOI: 10.1364/JOSAB.28.000422)
6. H. Iliev, I. Buchvarov, S. Kurimura and V. Petrov, “High-power picosecond Nd:GdVO4 laser mode locked by SHG in periodically poled stoichiometric lithium tantalate”, OPTICS LETTERS(OSA), vol.35, No. 7, pp.1016-8, 2010 (DOI: 10.1364/OL.35.001016)
7. H. F. Hofmann, “On the estimation of interaction parameters in weak measurements”, Proceedings of QCMC 2010(AIP), (accepted)
8. H. F. Hofmann, “Uncertainty limits for quantum metrology obtained from the statistics of weak measurements”, Phys. Rev. A 83, 022106 (2011). (DOI: 10.1103/PhysRevA.83.022106)
9. M. Iinuma, Y. Suzuki, G. Taguchi, Y. Kadoya, and H. F. Hofmann, “Weak measurement of photon polarization by back-action-induced path interference”, New J. Phys. 13, 033041 (2011). (DOI: 10.1088/1367-2630/13/3/033041)

（4－2） 知財出願

① 平成22年度特許出願件数（国内 1 件）

② CREST 研究期間累積件数（国内 1 件）