

戦略的創造研究推進事業 CREST  
研究領域  
「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」  
研究課題  
「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」

研究終了報告書

研究期間 平成21年10月～平成27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

モノサイクルもつれ光とは、光が1周期振動する程度の極短時間内に、同時に2つの光子が存在する状態である。本研究では、擬似位相整合技術を駆使した素子を開発、モノサイクルもつれ光の実現をめざすと共に、新しい量子非線形光学を拓き、また従来の光の限界を突破する量子メトロロジーへの応用を図った。量子もつれ光源生成用の分極反転デバイスの開発を担当する、物質・材料研究機構の栗村グループ(以下栗村G)、ならびに理論構築・解析を担当する広島大学のホフマングループ(以下ホフマンG)の協力を得ながら、量子もつれ光源の構築およびその量子メトロロジー、量子非線形光学への応用を、北海道大学の竹内グループ(以下竹内G、研究開始時より大阪大学に常駐、2014年に京都大学に移動)が担当した。

まず、鍵となる光源に関しては、栗村Gが作成した10%QPMデバイスを用い、竹内Gは世界最大の超広帯域(820nm, 周波数換算 200 THz)でもつれ光発生に成功した。非同軸条件での発生という、当初予定しなかった新規アイデアにより、適切な群速度分散補正した場合、計算では4.4フェムト秒というモノサイクルに近い相関時間を達成できる。その後、200THzという超広帯域における周波数相関スペクトルの取得(世界初)、ならびに超広帯域量子ビート測定による、その周波数帯域全域における量子もつれの実証(世界初)にも成功した。

また、栗村Gは電子ビーム露光による幅400nmのナノ細線電極を用いた分極反転素子形成に成功(LN系で世界初)し、その技術により、3 $\mu$ mの微細周期構造において連続的な周期チャープを実現、波長405nmという紫外域のポンプ光を用いた可視域(800nm)超広帯域もつれ光源用の分極反転素子の実現にも成功し、竹内Gで行われた超広帯域光子対発生に大きく貢献した。この技術で得られた均一な分極反転構造により、全スペクトル領域で高い効率を達成することができた。また本プロジェクトでの飛躍は、光子対のスペクトル制御はもちろんのこと、位相制御も可能な作製精度を量子非線形光学にもたらした。さらに、大光量化にむけ追加計画として認めていただいたMg:SLTスラブ導波路に関しても、世界で初めての試作に成功した。

次に、量子メトロロジーに関しては、名古屋大学西澤教授の協力を得つつ、高分解能域での量子OCTの分解能劣化要因について理論的に明らかにするとともに、古典・量子ハイブリッドコヒーレンストモグラフィ装置を実現、高分解能域(分解能3 $\mu$ m)での、群速度分散耐性の実証に初めて成功した。さらに、栗村Gの開発した素子を用い、近赤外域での超広帯域量子もつれ光を初めて実現、超高分解能(0.54 $\mu$ m)の量子OCTおよび、群速度分散耐性の実証に成功した。従来のOCTの世界最高分解能(0.75 $\mu$ m)や、量子OCTの世界最高分解能(0.85 $\mu$ m)を大きく凌ぐだけでなく、これまで全く行われていなかった群速度分散耐性の実証にも成功した。

また、量子非線形光学に関しては、鍵となる直径300nmのナノ光ファイバ(透過率90%以上)を実現、単一半導體量子ドットおよび単一ダイヤモンド窒素欠陥中心との高効率結合に成功した。また、和周波発生実験に必須の低ノイズ光子検出器も、南京大学との共同研究で開発、量子効率(30%)を維持しながら0.0015cpsの超低ダークカウントを達成した。さらに、6.8サイクル(相関時間24fs)の量子もつれ光子対間の和周波光子発生の観測に成功した。また、発生する蛍光光子対の量を変化させた場合、光子対数(パワー)と和周波光子の発生レートが比例するという、量子もつれ光子対に特徴的な振る舞いの確認に成功した。

さらに、理論グループにおいても、モノサイクルもつれ光から生成可能である、「単一光子周波数コム状態」について研究を進めた。その結果、これらの単一光子周波数コム状態を使うことで、極めて狭い2光子量子干渉信号を、時間遅延と周波数変調の双方に対して得られることが明らかとなるなどの成果を得た。

以上の様に、モノサイクルもつれ光の実現とその量子計測、量子非線形光学への応用、さらには新しい研究領域の創出というプロジェクトの目標を想定以上に達成することができた。

## (2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Subashchandran, M. Okano, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. H. Wu, T. Hirohata, S. Kurimura and S. Takeuchi, "Noncollinear parametric fluorescence by chirped quasi-phase matching for monocycle temporal entanglement", *Optics Express*, 10, 25228-25238(2012) (IF=3.6)

被引用件数: 10 件

開発した 10%チャープ位相整合素子を用い、非同軸条件でパラメトリック蛍光対を 790nm-1610nm という超広帯域(820nm, 周波数換算 200 THz)で発生させることに成功した。従来の報告(帯域幅 300nm, 141THz)を、大きく上回り、適切な群速度分散補正した場合、計算上は 4.4 fs というモノサイクルに迫る相関時間を達成できる。

元々の Harris らの理論提案は同軸発生した光子対を、周波数別に分離する必要があったが、今回実現した非同軸発生ではその必要がなく、結果として、もつれ光子の帯域が2倍以上に増大、より短い時間相関を実現しうる。研究目標である、モノサイクルもつれ光の実現に大きなステップとなった。

2. M. Fujiwara, K. Toubaru, T. Noda, H. Q. Zhao, and S. Takeuchi, "Highly Efficient Coupling of Photons from Nanoemitters into Single-Mode Optical Fibers", *Nano Letters*, 11, 4362-4365 (2011). (IF=13.2)

被引用件数: 29 件

直径を 300nm にまで引き延ばした、ナノ光ファイバを実現、そのナノ光ファイバ上の単一量子ドットからの発光を 7.4%という非常に高い効率でシングルモードファイバに結合することに成功した。これは、従来の共焦点顕微鏡+固体イメージングレンズ(SIL)を併用した場合(2~3%)を凌駕する値である。モノサイクルもつれ光子対は、その進行方向には波長程度に2光子が束縛されている。本研究で確立した 300nm のナノ光ファイバを用いる事で、さらに進行方向に直交した方向についても波長程度の領域に束縛することが可能となる。モノサイクルもつれ光子対による新規量子非線形光学の実現に重大な一歩である。

3. C. Ren and H. F. Hofmann, "Time-resolved measurement of the quantum states of photons using two-photon interference with short-time reference pulses.", *Phys. Rev. A* 84, 032108 (2011) (IF=3.0)

被引用件数: 3 件

ホフマンGは、2光子干渉を利用した、2光子波動関数の量子トモグラフィ法を初めて発案した。本方法では、対象となる2モード2光子状態のそれぞれのモードで、コヒーレントな短パルスレーザー列と光子対の間で2光子干渉を行い、その結果から位相情報と振幅情報を得ることができる。本プロジェクトでは、さらに、時間領域でのトモグラフィ方法をさらに発展させ、周波数領域での量子トモグラフィ法など様々な理論提案に発展させた。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 世界最高の分解能(0.54 $\mu$ m)と分散耐性を合わせもつ、量子光コヒーレンストモグラフィの実現。

光コヒーレンストモグラフィ(OCT)は非侵襲な断層イメージング法として、その発案からこの 20 年の間に急激に発展した技術である。眼科の診断をはじめ、様々な分野で応用されている。しかし、OCT には媒質中の分散による分解能低下という問題があった。たとえば網膜の測定では、眼球中の水の分散の影響で、深さ方向分解能は 10 $\mu$ m 程度に制限されていた。

本研究では、モノサイクルもつれ光の2光子量子干渉を利用した量子光コヒーレンストモグラフィについて研究を進めた。まず、高分解能域での量子 OCT の分解能劣化要因について理論的に明らかにするとともに、古典・量子ハイブリッドコヒーレンストモグラフィ装置を実現、高分解能域(分解能 3 $\mu$ m)での、群速度分散耐性の実証に初めて成功した[Okano et. al., Phys.

Rev. A (2013)】。さらに、800nm 超広帯域量子もつれ光を用いて、超高分解能(0.54 $\mu\text{m}$ )の量子 OCT の実証に成功した。従来の OCT の世界最高分解能(0.75 $\mu\text{m}$ )や、量子 OCT の世界最高分解能(0.85 $\mu\text{m}$ )を大きく凌ぐだけでなく、これまで全く実現されてこなかった、分散耐性についても実証することができた(論文準備中)。これにより、現在の OCT の深さ方向分解能を 10 倍以上向上させることができ、将来的には、網膜厚の変化を利用した緑内障の予測診断をはじめ、さまざまな分野でイノベーションを引き起こすことが期待できる。

### 2. 電子ビーム露光によるナノ細線電極を用いた、分極反転素子形成に成功。

栗村グループは電子ビーム露光による幅 400nm のナノ細線電極を用いて分極反転素子形成に成功した。吸収の少ない Mg:SLT 結晶に 3 $\mu\text{m}$  の微細周期構造を実現して 400nm 帯励起で安定的な光子対発生を可能にした。さらに周期にチャープをかけた電極構造を設計して均一な分極反転比を実現して発生光子対の広帯域化に成功した。また排熱を改善したモジュールを開発して高密度励起を実現して、光子対の安定化を行っている。この排熱技術は高出力波長変換モジュールとして、産業界へ技術移転されている。加えて、追加計画として高効率光子対をめざし、ナノ微細電極技術をスラブ導波路分極反転素子へも展開、世界で初めてナノ電極による導波路デバイスを実現して非線形デバイスの発展に大きく弾みをつけた。今後ナノ微細電極技術により、量子光子対の位相制御も可能になり、振幅・周波数につづく光子対の位相が新たな制御空間として開けてくる。

### 3. ノイズが毎秒 0.0015 カウントの超低ノイズ広帯域光子検出器を、南京大学と共同で実現。

もつれ光子対間の和周波光子発生を観測や、超広帯域量子相関の検証実験を目的に、中国南京大学と共同で、可視から赤外までの広帯域に感度を持つ超伝導光子検出(SSPD)システムを開発した。南京大学から、窒化ニオブ(NbN)のナノ細線からなる SSPD 素子の供給を受け、冷凍機付き極低温クライオスタット、制御系、電子回路系などの実装と綿密な最適化を竹内Gで行った。その結果、波長 532nm 域において、検出効率 30%を保ったまま、毎秒 0.0015 カウント(毎時 5 カウント)という超低ノイズを実現することができた[S. Subashchandran et. al., Jpn. J. Appl. Phys.(2013)]。この超低ノイズ検出器は、本研究のみならず、量子暗号通信の長距離化や、生体中単一分子の高感度測定など広い応用が期待できる。また、精密な量子効率の波長依存性の決定にも成功している。

## § 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

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
竹内 繁樹	京都大学大学院工学研究科	教授	H21.10～
岡本 亮	北海道大学電子科学研究所	助教	H21.10～
藤原 正澄	北海道大学電子科学研究所	助教	H21.10～
趙 洪泉	北海道大学電子科学研究所	博士研究員	H21.10～H25.3
岡野 真之	北海道大学電子科学研究所	研究員	H22.4～
Subashchandran Shanthi	北海道大学電子科学研究所	学術研究員	H22.4～H24.9

小野 貴文	北海道大学電子科学研究 研究所	博士研究員	H26.4～
高島 秀聡	北海道大学電子科学研究 研究所	研究員	H26.3～

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

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
栗村 直	(独)物質・材料研究機構	主幹研究員	H21.10～
Jianhong Shi	同上	博士研究員	H21.10～ H21.11
Lim Hwan Hong	同上	博士研究員	H22.7～
矢口 一夫	同上	研究補助	H21.10～H23.4
藤井 一史	同上	研究補助	H21.10～

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

研究参加者

氏名	所属	役職	参加時期
Holger F. Hofmann	広島大学大学院先端物 質科学研究科	准教授	H21.10～
任 昌亮	広島大学大学院先端物 質科学研究科	博士研究員	H22.9～H26.3

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)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  
本プロジェクトは、下記に具体的に述べるように、研究チーム外のさまざまな共同研究者との連携、協働によって行われた。共同研究者関係各位に深謝する。また、プロジェクトの目的の一つとして、「量子もつれ光とその応用に関する新しい研究・学問領域の創出」を目指した。その観点から、2013年に、国際ワークショップ“New Science and Technologies using Entangled Photons (NSTEP2013)”を、竹内Gが常駐する、大阪大学産業科学研究所において開催した。基調講演を行っていただいたTeich教授をはじめとする世界をリードする研究を進めている研究者からの15件の講演、28件のポスター発表、世界9ヶ国から60人の参加者により、本CRESTプロジェクトで得られた成果をアピールするだけでなく、本研究分野の国内外の若手研究者の育成・交流、今後の研究の将来を深く議論する場となった。

#### 【竹内グループ】

- ・名古屋大学 西澤典彦教授
- ・浜松ホトニクス株式会社
- ・中国南京大学 呉教授、陳教授
- ・新潟大学 岡寿樹准教授
- ・米国 Stanford 大学 S. Harris 教授、S. Sensarn 博士
- ・ドイツ Humboldt 大学 Berlin, O. Benson 教授、T. Schröder 氏(当時)
- ・九州大学 横山士吉教授
- ・北海道大学名誉教授 山下幹雄先生
- ・大阪大学 芦田昌明教授
- ・北海道大学 山根啓作博士
- ・北海道大学 根本知己教授
- ・イタリア Pavia 大学、L. Maccone 教授
- ・スイス Bern 大学、A. Stefanov 教授
- ・米国 Boston 大学、M. C. Teich 教授、A. Sergienko 教授
- ・カナダ Waterloo 大学 K. Resch 教授

#### 【栗村グループ】

- ・早稲田大学 中島啓幾教授
- ・東洋ガラス株式会社 鈴木太郎研究員
- ・中央大学 庄司一郎教授
- ・オキサイド社古川保典社長
- ・マサチューセッツ工科大学 Franco Wong 上級科学研究員
- ・ブルガリア ソフィア大学 Ivan Buchvarov 教授

#### 【ホフマングループ】

- ・イタリア Pavia 大学、Lorenzo Maccone 教授

### § 3 研究実施内容及び成果

本プロジェクトでは、光が1周期振動する程度の極短時間内に、同時に2つの光子が存在する「モノサイクルもつれ光」を、擬似位相整合技術を駆使した素子を開発し、その実現をめざすと共に、新しい量子非線形光学を拓き、また従来の光の限界を突破する量子メトロロジーへの応用を図った。「項目1. モノサイクルもつれ光源の開発」、「項目2. 量子非線形光学の研究」、「項目3. 量子メトロロジーの研究」の3つの項目に関して、項目1～3の実験については全体的に北海道大学の竹内グループが担当、項目1のうち、もつれ光源用の分極反転デバイスの開発は、物質・材料研究機構の栗村グループが担当した。また、項目1から3に関して理論構築・解析は、広島大学のホフマングループがそれぞれ担当した。これら3グループ間で非常に密に連携をおこなったため、グループごとの記述にそぐわない部分もあるが、これらの一連の研究のうち、分極反転デバイスの開発に関して栗村グループとして、またモノサイクルもつれ光の評価・応用に関する理論研究に関してホフマングループとして、残りは竹内グループとして仮に整理した。

#### 【竹内グループ】

##### 3.1 モノサイクルもつれ光源の構築と評価（京都大学 竹内グループ）

###### (1) 研究実施内容及び成果

光子対間の時間相関をできるだけ高めるには、光子対源の広帯域化が必要になる。本プロジェクトでは、その実現方法として、チャープ擬似位相整合(QPM)デバイスを用いる S. Harris の提案に着目した。しかし提案にある 100%チャープ QPM デバイスは、従来法の延長では実現できない

という問題があった。研究開始後の統括・アドバイザーの助言を受け、項目 1-A 従来法を応用したチャープ量 10%の QPM デバイスの作成とその量子もつれ光源としての評価を行った。

### 3.1.1 超広帯域パラメトリック蛍光対の観測に成功

まず、H22 年度、栗村Gの作製した 10%チャープ QPM デバイスにより、同軸条件で、790nm～1620nm、帯域幅 830nm(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することができた。この非常に広い帯域をカバーする光子検出器は市販品としては存しなかった。そのため、Si-冷却 CCD(可視域)、冷却 InGaAs-APD アレイ(赤外域)という2種の素子を、帯域ごとに用いることで観測をおこなった。

しかし、周波数相関スペクトルを取得するためには、個々の光子の検出にともない電気パルスを出力する、超広帯域の光子検出器による測定が不可欠である。この問題を解決するため、可視から赤外まで広帯域に感度を持つ超伝導光子検出(SSPD)システムの開発を行った(後述)。

### 3.1.2 少ないチャープ量でより高い時間相関を達成する方法を提案

我々は、チャープ QPM デバイスから非同軸発生させた蛍光対を利用することで、少ないチャープ量でより高い時間相関を達成する方法を提案した。Harris らの理論提案では、100%チャープ QPM デバイスにより同軸発生させた光子対を、短波長側(460～750nm)と長波長側(1000nm～4500nm)の2つに分離していた。そのためそれぞれの蛍光対は全体域(460nm～4500nm)の半分以下しか利用できず、そのため巨大なチャープを必要としていた。一方、非同軸発生では、蛍光対の両方も全帯域を利用可能であり、結果として少ないチャープ量でより高い時間相関を達成しうる。そして、開発した超伝導光子検出器を用い、10%チャープ QPM デバイスからの、非同軸発生超広帯域(790nm～1610nm)の、周波数依存光子計数実験に成功した(図 1) [Tanaka et. al., Opt. Exp. (2012)]。この帯域の光源を用いる事で、4.4fs(1.2cycle)の相関時間を得ることが可能である。実験では、本プロジェクトで導入した、500nm から 1800nm までの波長掃引が可能な特殊波長フィルタを活用した。

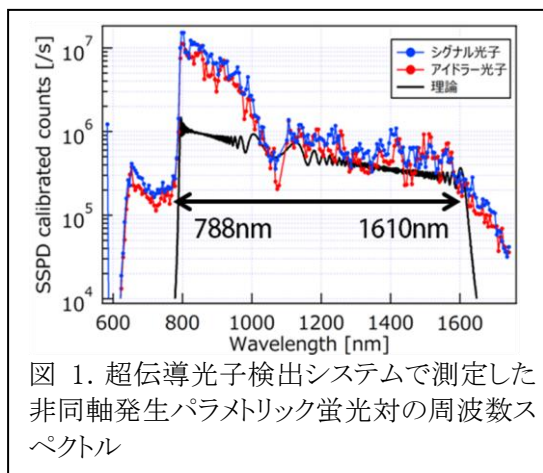


図 1. 超伝導光子検出システムで測定した非同軸発生パラメトリック蛍光対の周波数スペクトル

### 3.1.3 超広帯域量子もつれの実証に成功

我々は、知る限り前例の無い、超広帯域の周波数相関測定、ならびに量子ビート測定により、シグナル光子とアイドラ光子が、191.6 THz 以上の超広帯域で、極めて高い量子もつれ状態にあることを、実証した。測定は、波長に応じて、アバランシェフォトダイオード光子検出器、浜松ホトニクスのご協力で使用させて頂いた近赤外用光電子増倍管と狭帯域干渉フィルタおよび波長可変狭帯域フィルタを適切に組み合わせて行った。また、1オクターブにおよぶ広い波長域にわたり、単一モード光ファイバの結合効率を一定に保つため、フォトニック結晶ファイバを利用するなど工夫した。横軸をシグナル光子周波数、縦軸をアイドラ光子周波数としたときに、191.6 THz という超広帯域にわたり、対角線上に限り、同時計数が観測されたことから、この超広帯域に渡って周波数の和が一定になっていることが分かった。

さらに、超広帯域光源の各周波数間の量子干渉(量子ビート)の観測に成功した。波長 1064 nm で、エネルギーが縮退、すなわち差周波数  $\Omega$  が 0 の光子対間で、Hong-Ou-Mandel (HOM) 型 2光子量子干渉を行った結果、2つの光子の半透鏡への到着時刻が 0 のところで、同時計数が最小になる、いわゆる HOM-dip が観測された。差周波数  $\Omega$  が 7.4 THz になるような光子対間での HOM 干渉結果においては、2光子量子干渉結果に振動(量子ビート)が生じたが、その周期は、その差周波数(7.4 THz)からの理論予測との一致を確認した。同様に、差周波数  $\Omega$  が、84 THz、

120 THz、177 THz のいずれにおいても、理論予測と一致する周期の量子ビートの観測に成功した。また、これらの量子ビートの明瞭度(信号強度に占める振幅の大きさ)から、この超広帯域周波数の全域で、最大もつれ状態に対して 89%以上の高い忠実度で、量子もつれ状態にあることを確認した。これにより、**周波数相関測定だけでは分からなかった、各周波数間での量子もつれの存在を実証することができた。**このような超広帯域な光源に対する量子干渉測定の実現は世界初の成果である。

#### 3.1.4 可視-近赤外超広帯域量子もつれ光源の実現

量子 OCT のさらなる分解能向上を目指し、光源の広帯域化に取り組んだ。この目的のために、栗村Gが、励起波長 405nm 帯(蛍光中心波長 810nm)用の 6.7%チャープの QPM デバイスを、本 CREST プロジェクトで開発したナノ電極法を用いて実現した。竹内 G で評価を行った結果、同軸発生条件により**中心波長 810nm、帯域幅 163 THz(波長幅 360 nm)に渡る超広帯域もつれ光の発生を確認した。**また非同軸発生条件の下でも 163 THz のもつれ光子対の発生を確認できた。

#### 3.1.5 広帯域・低ノイズ超伝導光子検出器の実現

本プロジェクトの開始後、モノサイクル量子もつれ光の量子非線形光学に関する研究、とくに和周波光子発生実験において、暗計数の少ない光子検出器の重要性が明らかになった。和周波光子の発生数は数十カウントが予想される一方、一般に用いられているアバランシェフォトダイオード光子検出器も、シグナルと同程度の数十カウントの暗計数を持ってしまう。この状況の中で、我々は新たな光子検出器として、超伝導光子検出器(SSPD)に着目、中国南京大学の協力を得て、共同研究を開始した。SSPD は、可視から赤外までの広帯域に感度を持つため、極めて広い帯域をもつモノサイクルもつれ光の評価への応用も期待した。南京大学から、窒化ニオブ(NbN)のナノ細線からなる SSPD 素子の供給を受け、冷凍機付き極低温クライオスタット、制御系、電子回路系などの実装と綿密な最適化を竹内Gで行った結果(図2)、波長 532nm 域において、検出効率 30%を保ったまま、**毎秒 0.0015 カウント(毎時 5 カウント)という超低ノイズを実現することができた** [S. Subashchandran et. al., Jpn. J. Appl. Phys.(2013)]。この値は知る限り世界最小であり、本研究のみならず、**量子暗号通信の長距離化や、生体中単一分子の高感度測定など広い応用が期待できる。**また、精密な量子効率の波長依存性の決定にも成功している。また、精密な量子効率測定系を構築、検出システムの量子効率の詳細な波長依存性、バイアス電圧依存性の測定も実施した。実現した光子検出器は、モノサイクルもつれ光の評価実験に大いに活用した。



図2. 開発した超伝導光子検出システム。極低温(4K)クライオスタットチャンバー内部に、ナノ細線超伝導光子検出デバイスを設置している。

### 3.2 モノサイクルもつれ光による量子メトロロジーの研究 (京都大学 竹内グループ)

#### 3.2.1 量子 OCT に関する基礎理論の構築と高分解能域での量子 OCT の分散耐性の実証に成功



平成 23 年度に、従来の古典 OCT と量子 OCT とで比較対照実験を行なったが、異なる光源を用いたため厳密な比較が困難であった。そこで、古典・量子 OCT ハイブリッド装置の開発、これにより同一の光源を用いて、量子 OCT の分解能向上と分散耐性という優位性を、高分解能で実証することに成功した[M. Okano et. al., Phys. Rev. A(2013)]。実験結果を図 3 に示す。中心波長 808nm、帯域約 80nm のガウス型スペクトルを持つパラメトリック蛍光対をバルク非線形結晶で発生させ、量子もつれ光子対光源として用いた。OCT 分解能(4.4 $\mu\text{m}$ 、図

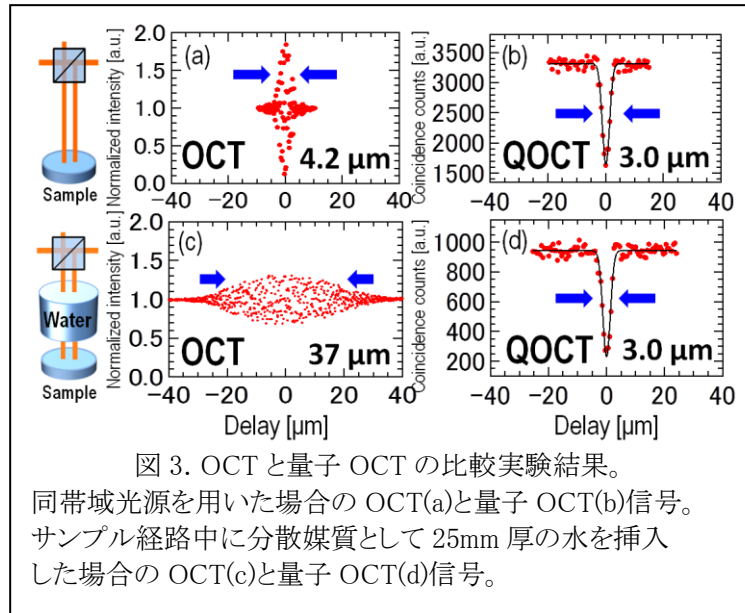


図 3. OCT と量子 OCT の比較実験結果。  
同帯域光源を用いた場合の OCT(a)と量子 OCT(b)信号。  
サンプル経路中に分散媒質として 25mm 厚の水を挿入  
した場合の OCT(c)と量子 OCT(d)信号。

3(a))に対して、量子 OCT 分解能(3.0 $\mu\text{m}$ 、図 3(b))が約 1.4 倍向上しており、同帯域光源における分解能優位性を実証した。この分解能向上は、我々の理論的考察により得られた、ガウス型スペクトルに対する $\sqrt{2}$ 倍という理論値と一致しており、この比較実験はハイブリッド装置により初めて可能となった。さらに、量子 OCT の重要な利点である「分散耐性」を、高分解能域で初めて実証した。実験では、眼球と同等の厚みを持つ水をサンプル用経路に挿入、OCT では 37 $\mu\text{m}$  と分解能が 10 倍近く低下している(図 3(c))のに対し、量子 OCT では分解能低下が全く見られない(図 3(d))。また、平成 23 年度の予備実験の報告では、群速度分散耐性は完全では無かったが、理論的考察から、ポンプ用レーザー光の有限な線幅が原因と判明、今回、狭線幅のポンプ用レーザー光源を導入することで、まったく線幅が変化しない、完全な分散耐性を実現することができた。

### 3.2.2 高分解能域での量子 OCT 2次元画像の取得と分散耐性の実証に初めて成功。

上記の成果を受け、3 $\mu\text{m}$  の高分解能域での 2 次元量子 OCT の画像化を行い、従来の OCT 画像と比較した。サンプルとして、表面に深さ 30 $\mu\text{m}$ 、幅 6mm の溝を形成したガラス板の表面を、アルミでコートしたものを用いた。比較の為、光源の中心波長、帯域はほぼ同じものを用いた。従来の OCT の画像から得られた分解能は 4.6 $\mu\text{m}$  であり、光源の帯域から推定される分解能にほぼ一致した。次に、光路中に 1mm 厚の ZnSe 板を挿入した。2 次の位相分散の量では、40mm(眼球の約 1.5 倍)厚の水に相当する。この場合、画像から得られた分解能は 63 $\mu\text{m}$  と、10 倍以上、著しく劣化した。そして、同じサンプルを量子 OCT で画像を取得した。画像から得られる分解能は 3.0 $\mu\text{m}$  であった。これまで報告されている、量子 OCT の 2次元画像の分解能は、20 $\mu\text{m}$  程度に留まっており、この実験は、知る限り初めて高分解能域で得られた量子 OCT 画像になる。次に、光路中に 1mm 厚の ZnSe 板を挿入した。量子 OCT の場合、その画像が殆ど変化せず、画像から得られた分解能も、3.0 $\mu\text{m}$  と、全く変化しなかった。この様に、量子 OCT 画像の完全な分散耐性を確認することができた。本研究では、知る限り初めて、高分解能(3.0 $\mu\text{m}$ )域での、量子 OCT 画像の取得に成功するとともに、その分散耐性の取得に成功した。

### 3.2.3 古典 OCT の分解能記録を大きく超える、世界最高の分解能(0.54 $\mu\text{m}$ )をもつ量子 OCT とその分散耐性の実証に成功

古典 OCT の記録をも打ち破る、量子 OCT の世界最高分解能 0.54 $\mu\text{m}$  に相当する 2 光子量子干渉信号を得るとともに、その分散耐性の実証にも成功した。実験では、本プロジェクトで実現した、ナノ電極により作成した分極反転デバイスによって発生させた超広帯域もつれ光を、2 光子量子干

渉計に導入、市販の可視・近赤外用光子検出器を組み合わせた広帯域光子検出システムで検出した。さらに、光路中に分散媒質として厚さ 1mm の水を挿入した場合の実験も実施、分解能は 0.54 $\mu\text{m}$  が 0.56 $\mu\text{m}$  と、殆ど劣化せず、超高分解能(0.54 $\mu\text{m}$ )域での分散耐性も実証できた。

これまでに、超伝導光子検出器を用いて、0.85  $\mu\text{m}$  の分解能に相当する2光子量子干渉が報告されていたが、分散耐性に関する実証実験は無かった。また、古典 OCT の分解能世界記録 0.75  $\mu\text{m}$  であったが、古典 OCT の場合分散耐性はない。今回の成果は、これらの記録を大きく超えた分解能と、分散耐性を実現した世界初の成果である。また、眼球などに対しては、同じ程度の分散をもつ媒質(ファントム)を参照光光路に挿入することで解消できるが、本実験結果から、量子 OCT では、たとえファントムの厚みに 1mm 程度の誤差があっても 0.56 $\mu\text{m}$  の超高分解能を維持出来ることが分かる。一方、古典 OCT の場合には、同じ分散で分解能は 3 $\mu\text{m}$  以上に劣化してしまう。このように、応用面からも非常に重要な成果である。

### 3.3 モノサイクルもつれ光による量子非線形光学の研究(京都大学 竹内グループ)

モノサイクル量子もつれ光は、超広帯域な周波数相関と極短時間の時間相関というこれまでにない全く新しい特性をもつ光である。本研究ではその特性を生かした、量子非線形光学の研究を目指した。

#### 3.3.1 ナノ光ファイバと単一発光体の結合に関する研究

モノサイクル量子もつれ光は、2つの光子が数フェムト秒の相関時間をもつ。すなわち、進行方向には波長程度の領域に2光子が存在する。さらに、それを進行方向と垂直の方向においても波長程度に収束することで、発光体と大きな相互作用を行うことが期待できる。このための方法として、光ファイバを光の波長以下の直径にまで引き延ばした、ナノ光ファイバを利用、**ナノ光ファイバと結合した単一発光体と量子もつれ光の相互作用を目指した**。単一発光体としては、量子ドット、ダイヤモンド窒素欠陥(NV)中心、中性原子などについて検討を進めた。

まず、実験のキーデバイスとなる、**直径 300nm のナノ光ファイバを実現した**(図 4) [M. Fujiwara et. al., **Opt. Exp.**(2011)]。真空中での光の波長の半分以下という、直径 300nm のテーパ部を通過する光子は、回折限界程度までに集光された状態でナノファイバからしみ出すため、発光体の存在するナノ光ファイバ表面で電場強度が非常に大きくなる。

次に、実現した直径 300nm のナノ光ファイバを用い、**ナノ光ファイバ上の単一量子ドットからの発光を 7.4%という非常に高い効率でシングルモードファイバに結合することに成功した**(図 5) [M. Fujiwara et. al., **Nano Lett.** 2011]。これは、従来の共焦点顕微鏡+固体イメージングレンズ(SIL)を併用した場合(2~3%)を凌駕する値である。

さらに、**ナノ光ファイバと単一ダイヤモンド窒素欠陥中心との高効率結合にも成功した**[T. Schröder et. al., **Opt. Exp.** 2012]。これらは、モノサイクル量子もつれ光の2光子吸収に向けて、重要な成果である。さらに、**ナノ光ファイバの極低温冷却にも成功、極低温での2光子吸収実験の可能性も示した** [M. Fujiwara et. al., **Opt. Exp.** (2012)]。

また、ナノ光ファイバと単一発光体、特にナノダイヤモンド中の窒素欠陥中心の結合効率の向上方法について、FDTD 法を用いた数値計算により検討をおこなった。その結果、**ナノ光ファイバの中心にナノ**

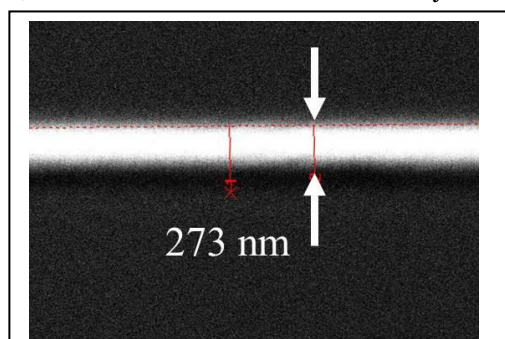


図 4. 光ファイバの一部を延伸して作成したナノ光ファイバの操作型電子顕微鏡像。延伸部直径は推定 273nm。

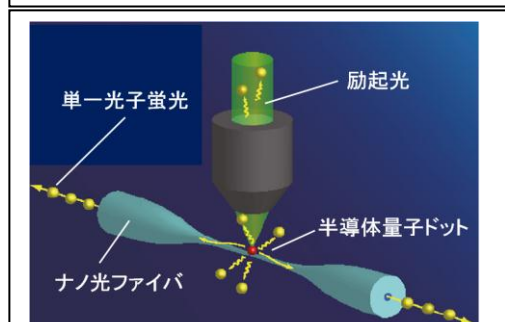


図 5. ナノ光ファイバ表面の半導体量子ドットからの単一光子蛍光の高効率結合

ダイヤモンドを設置することで、最大 53.4%の結合効率を得られる事を明らかにした [M. Almkhtar et. al., *Opt. Exp.* (2014)]. この成果に関連し、直径 300nm のナノファイバのイオンビームを用いて微細加工にも着手、成功している。

### 3.3.2 モノサイクル量子もつれ光による和周波光子発生、ならびにその量子性(線形な2光子吸収)の観測に成功

和周波光子発生は、2つの光子が同時に非線形光学結晶に入射した際に、そのエネルギーが入射した2つの光子のエネルギーの和に等しい、1つの光子(和周波光子)へと変換される過程である。「中間準位状態をもたない、理想的な2光子吸収過程」ととらえることができ、モノサイクルもつれ光子対の量子非線形光学への応用にあたって、最も基本となるプロセスと考えられる。

我々は、栗村Gの作製した励起波長 532nm 用 QPM デバイスを用い、もつれ光子対間の和周波光子発生の観測に成功した。波長 532nm、パワー5W の CW レーザーをポンプ光として QPM デバイスに入射し、中心波長 1064nm、帯域幅 32 nm(8 THz)、パワー130 nW のもつれ光子対を同軸条件で発生させた。この光子対をもう一つの QPM デバイスに入射することで、約 50 カウント毎秒のレートで和周波光子を発生することに成功した。次に和周波光子生成レートの入力光子対パワー依存性を測定した。ポンプ光パワーを調整し、発生する蛍光光子対の量を変化させた場合、光子対数(パワー)と和周波光子の発生レートが比例した。これは、(古典的な)普通の光を用いた場合に和周波光の発生量が入力光強度の自乗に比例するのと際だって異なる、量子もつれ光子対に特徴的な振る舞いである。一方、発生した光子対を減光素子で減衰させた場合には、古典光と同じ2乗の依存性を示した。この様に、もつれ光子対間の和周波光子発生を観測することができた。

### 3.3.3 モノサイクル量子もつれ光による和周波光子発生の分散制御に成功

モノサイクル量子もつれ光による和周波発生では、光子対に加わる群速度分散の影響を受ける。この分散量に対する和周波発生光子依存性の数値計算を行った結果が、分散が 0 のところで、和周波光子数が増大することが分かった。これは、モノサイクル量子もつれ光による巨大2光子吸収現象の一例である。

我々は、発生した相関光子対に対し、プリズムペアを用いた分散補償光学系(負の分散)と、ZnSe やガラスなどの分散媒質基板(正の分散)を組み合わせることで、分散補償をおこないながら和周波発生光子数の変化を観測した。その結果、和周波光子発生量は最大4倍に達し、また理論から予測されるピーク構造を再現することができた。

以上のように、6.8 サイクル(時間相関 24 fs)の量子もつれ光子対による和周波光子発生、および分散の制御による和周波光子生成量変化の観測にも成功した。

#### 【栗村グループ】

### 3.4 モノサイクルもつれ光源用擬似位相整合素子の開発(物質・材料研究機構 栗村グループ)

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(QPM)デバイスの研究を担当した。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、短波長励起に

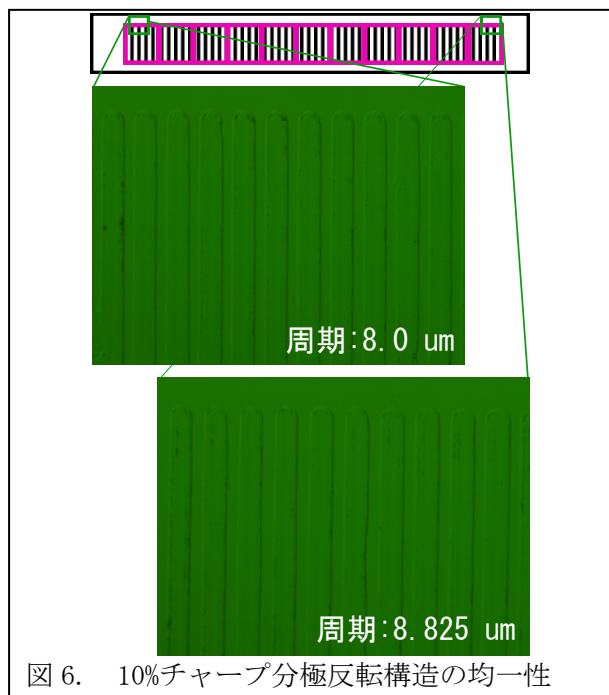


図 6. 10%チャープ分極反転構造の均一性

対応した微細周期が要求されることから、ナノスケールの電極構造が必要になる。ここでは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。これを用いて後述する電界印加分極反転プロセスを行い、分極反転構造の微細制御を行った。

ナノスケールの電極形成条件の探索に平行して、従来のフォトリソグラフィによる電極パターンも用いてデバイス作製を行った。ミドルマイルストーンとしてもつれ光発生に寄与する 10%チャープ分極反転構造を先行させた。ここでは励起光波長として緑色の 532nm を採用し、高輝度連続発振光による励起を前提とした。周期を 8 $\mu$ m から最大 8.825 $\mu$ m 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(8章国内出願特許 2)。チャーププレートの異なるデバイスを竹内グループに複数供給して、帯域と輝度の評価に供した。図 6 は 10%のチャープのデバイスにおけるそれぞれ 8 $\mu$ m と 8.825 $\mu$ m 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、2000 を越えるドメイン全体にわたって $\pm$ 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。

チャープデバイスにおいては、帯域拡大に伴い効率が犠牲になるため、単位波長中のスペクトル輝度の低下が起こる。これを補償するため励起光パワーを向上させて高密度励起とすれば光子対の輝度低下を抑制しながら広い帯域が確保できる。そこで高密度励起時に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開発を進めた。数Wの緑色光で Mg:SLT デバイスを励起する場合には微小吸収による発熱が無視できず、熱的な屈折率の変動が発生スペクトルの不安定要因になる。そこで栗村グループでは、Mg:SLT デバイスの側面四面から排熱を行う高排熱モジュールを開発し(図 7)、独自に開発した位相整合カロリメトリ(PMC)法で排熱の定量評価を行った。実効熱容量  $C_a$  (温度上昇のしにくさを表す)を評価指標として導入し、排熱モジュールを定量的に計測することで作製手法の定評的な比較を可能にした。結果高排熱モジュールを実現してデバイス内の温度上昇を大きく低減でき、8W 励起においても 2 度以下の温度上昇に抑制することができた。これ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 が実現された。均一な広帯域チャープ構造と安定な高密度励起が可能にした記録と言える。この手法では排熱モジュールの境界条件を改善することでさらに  $C_a$  が 50% 改善できることが示されており、デバイス幅を 0.5mm から 0.3mm に細線化を行うことでさらなる排熱改善が可能である(図 8)。もつれ光子対のさらなる熱的安定性を向上させるものと期待できる。

電子ビーム露光による Al ナノ微細電極では安定的な電極形成が可能になり、電界印加分極反転へ移行した。竹内グループと光学系や検出器感度などを検討した結果、532nm 励起用周期 8 $\mu$ m デバイスから波長

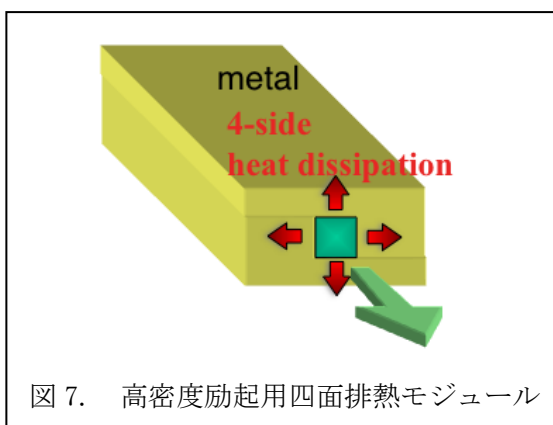


図 7. 高密度励起用四面排熱モジュール

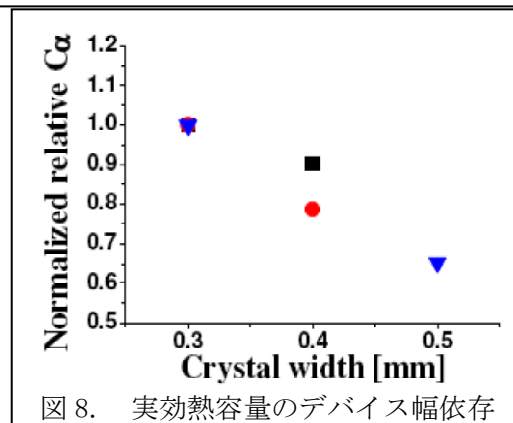


図 8. 実効熱容量のデバイス幅依存

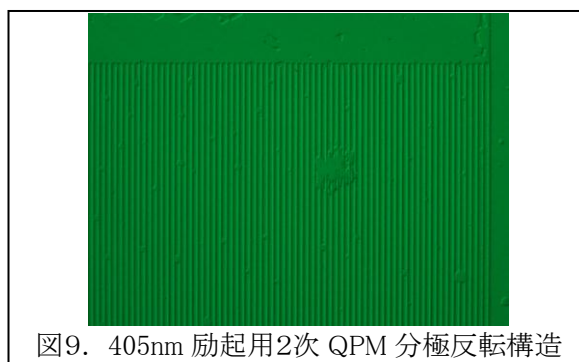


図 9. 405nm 励起用 2 次 QPM 分極反転構造

405nm 励起の短周期への微細化をはかった。同一電界では周期 8 $\mu\text{m}$ と分極反転比が大きく異なるため、電界印加条件の再検討を行った。波長 405nm 励起のデバイスに対しては、1次QPMで分極反転周期 3.2 $\mu\text{m}$ が求められる。竹内研で 405nm 励起光学系の構築を迅速に行うためにまずデバイスが必要と判断し、周期 3.2 $\mu\text{m}$ の最適化の前に周期 6.3 $\mu\text{m}$ の2次QPMデバイスを作製した。

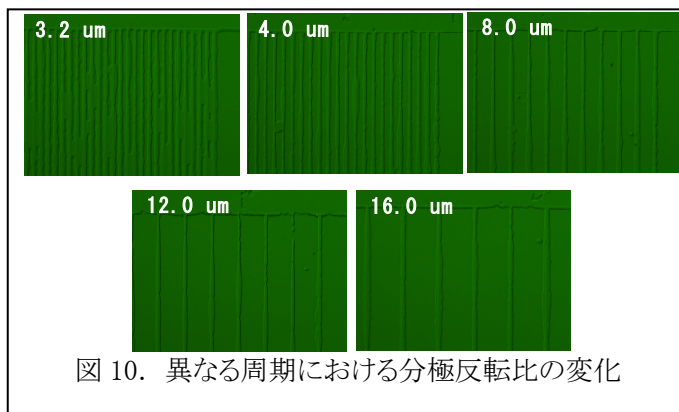


図 10. 異なる周期における分極反転比の変化

分極反転後のエッチング写真を図

9 に示す。反転構造には良好な均一性がみられデバイス長 20mm が確保できている。効率は 1次QPMの 1/4 であるものの、竹内研に供給して光学系の構築、動作確認に貢献した。従来 404nm 帯励起の光子対発生は試みられているが BBO では光子対の空間的な重なりが低下し効率に限界があった。QPM では同軸上に光子対を発生できるため効率を高くとることができるが、LN(吸収端 315nm)の QPM デバイスでは、材料の励起光の吸収のため良好な特性が得られていない。他方、吸収端が 260nm と短く可視領域の吸収の小さい SLT は良好なもつれ光子対発生が実現できた。

最終的な 1次 QPM デバイスにむけて微細化に伴い作製許容度が低下したため、制御パラメータを再検討した。電界印加条件を精査することにより、微細周期においても高い作製許容度をもつパラメータを選択し、周期 3.2 $\mu\text{m}$ の均一な反転構造を実現した(図 10)。周期 3.2 $\mu\text{m}$ で長さ 20mm にわたり分極反転比 0.5 が確保できている。青紫 405nm 励起用 1次 QPM デバイスとして、竹内研へ供給され 800nm 帯光子対発生が実現されている。

また本プロジェクトの当初課題であった周期が 2 倍程度大きく異なる周期が混在するチャープ構造については、竹内グループでの「少ないチャープ量でより高い時間相関を達成する方法」の発案により緊急性が薄れたため、分極反転の基礎データをおさえて作製できる環境を整えておき、将来のさら

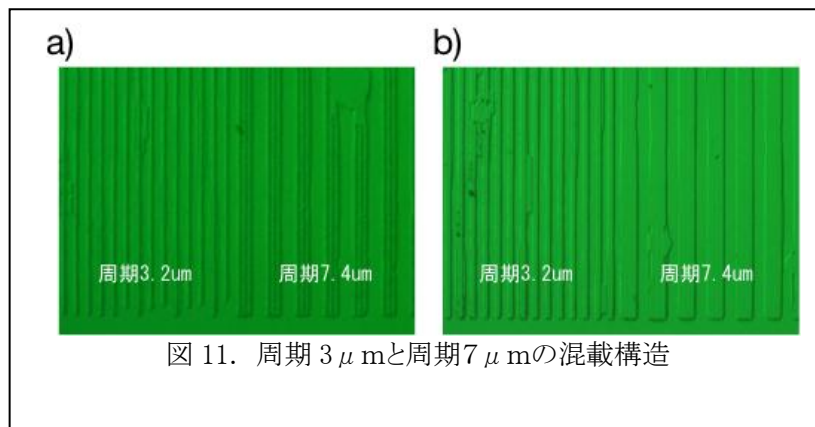
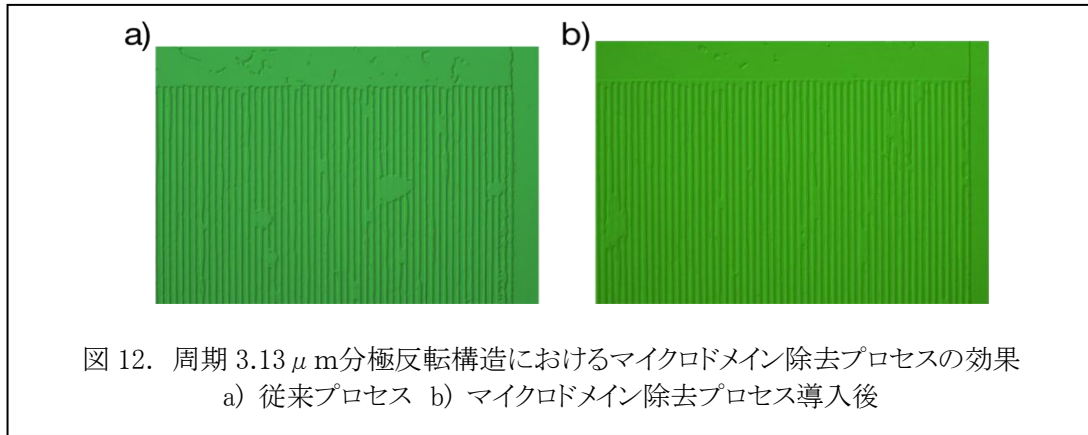


図 11. 周期 3  $\mu\text{m}$  と周期 7  $\mu\text{m}$  の混載構造

なる広帯域化に備えることとした。図 11 には異なる周期における分極反転比の変化を示す。これらの結果からドメインの挙動を解析し周期が 2 倍程度異なる場合には、長周期側を 3 分割電極にすることで同じデバイス内に同じ分極反転比で混載できることがわかった。周期 3.2 $\mu\text{m}$ と周期 7.4 $\mu\text{m}$ をナノ微細電極により混載させた例を示す。図 11 では 7.4 $\mu\text{m}$ 電極内をナノ微細電極により 3 分割して電界印加を行っている。印加電界を適切に選択することで両周期がほぼ同じ効率で共存できることがわかる。このように、2 倍に達する大きな周期差を持つチャープ構造のデバイス作成のための技術は確立できた。また、中間評価コメントを踏まえ、ナノ微細電極の技術を、量子 OCT の超高分解能化に不可欠な 405nm 励起用 1次 QPM デバイスへ活用することとした。

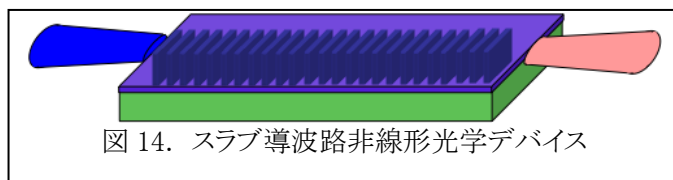
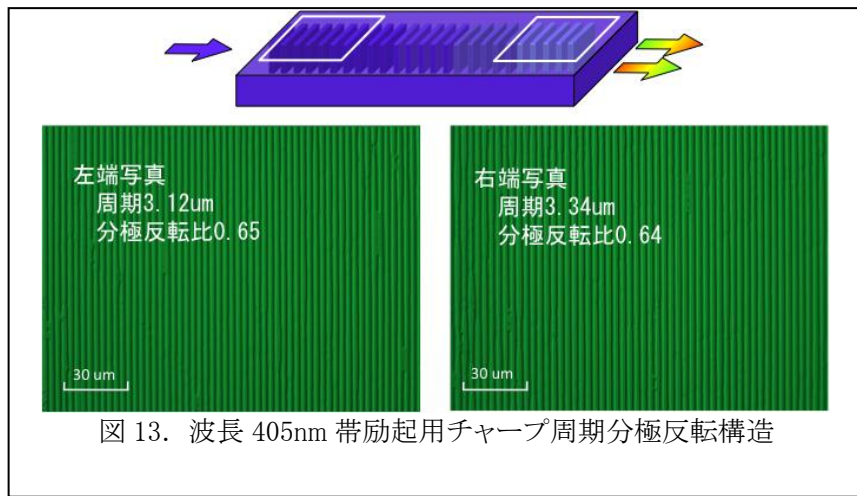
405nm 励起チャープ周期デバイスにおいて、帯域拡大のためには各周期において分極反転比を均一に作製する必要がある。微細周期においては特に熱処理時の焦電効果により発生するマイクロドメインが特性を悪化させる要因となるため、この除去に新たなプロセスを導入してその効



果を確認した(図 12)。

分極反転条件が安定しマイクロドメイン除去にめどがついたことから、帯域拡大のためのチャープ構造の作製に移行した。周期  $3.13\text{--}3.24\ \mu\text{m}$  まで  $6.7\%$  のチャープをもつ電極パターンを設計し、最大作製許容度を有する電界印加条件で、均一な分極反転比  $0.64$  をもつチャープ構造を実現した(図 13)。

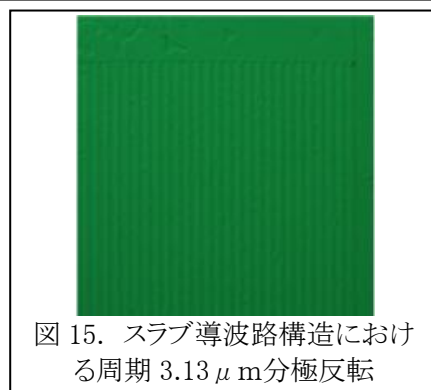
上記単一周期およびチャープデバイスを竹内グループに供給、量子 OCT の分解能  $0.56\ \mu\text{m}$  に相当する



2光子量子干渉信号の実現に至った。またこれらのデバイスのSHG特性評価を行い、その位相整合特性から従来の Mg:SLT の屈折率分散式に修正が必要であることを発見、新たな修正式の提案にもつながった。

量子 OCT などの光子対の応用を考えると、光子対の発生効率は重要であり、励起光源の小型化・低出力化はその応用分野を大きく広げる。可搬な光子対光源が得られたときに、量子計測や量子情報に与えるインパクトは極めて大きい。そのためには、光子対発生を担う非線形光学デバイス内で、より高い光密度を保って長い相互作用長を実現することが重要である。栗村グループは高い閉じ込めを実現する導波路非線形光学デバイスの技術を有しており、LN を用いた通信波長帯の非線形光学デバイスでは効率の最高記録を有している。この様な背景から、スラブ導波路型デバイス(図 14)の実現を追加研究計画として中間評価以降に提案した。

このスラブ導波路デバイスの開発に関し、Mg:SLT のサブミクロン精度の研磨および接着プロセスの調査研究を実施し、焦電効果による絶縁破壊などの問題の解決に取り組み、プロセス時の加熱・冷却プロセスを再検討することでこれらの問題を解決した。



もう一つの課題が、スラブ導波路に対するナノ分極反転という、全く新しい技術の実現であった。従来の分極反転法で実績のある Mg:LN のスラブ導波路に対してナノ微細分極反転を行い、条件は大きく異なるものの、真空電界印加技術との組み合わせで周期  $3\mu\text{m}$  の分極反転構造を実現できることがわかった。これを踏まえてバルクの Mg:SLT の分極反転条件を大幅に見直し、周期  $3\mu\text{m}$  の分極反転に成功した。作製した Mg:SLT スラブ導波路構造における周期  $3.13\mu\text{m}$  の分極反転構造を図 15 に示す。このスラブ導波路デバイスを光子対発生用の縮退波長にあたる SHG 波長で波長変換を行った写真が図 16 である。800nm の赤外光入力に対して 400nm 帯青紫色の SH 光で擬似位相整合が実現されている(強度分布が色の分布に対応)。上下方向には約  $4\mu\text{m}$  のモードサイズで強く閉じ込められていることが確認できた。研究期間終了前に、竹内グループへの供給を予定している。

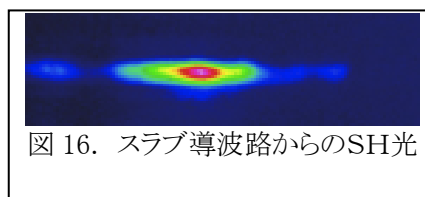


図 16. スラブ導波路からのSH光

本技術での分極反転構造の微細化は周期  $720\text{nm}$  まで進行しており、当初想定以上の成果が得られた。周期  $720\mu\text{m}$  は本プロジェクトで開発してきた技術の高い制御精度を示す好例といえる。

## 【ホフマングループ】

### 3.5 モノサイクルもつれ光に関する理論研究 (広島大学 ホフマングループ)

ホフマングループは、グループリーダーのホフマン准教授、ならびに CREST 博士研究員の任昌亮(C. H. Ren) 博士を中心に、広島大学の大学院生を加えたグループで、本プロジェクトの理論・解析に関する研究を、竹内グループ、栗村グループと密に連携しつつ実施した。以下、「モノサイクル量子もつれ光の開発・評価に関する理論研究」、「モノサイクル量子もつれ光を用いた量子非線形光学に関する理論研究」、「モノサイクルもつれ光を用いた量子メトロロジーに関する理論研究」の3項目について成果を述べる。

#### 3.5.1 モノサイクル量子もつれ光の開発・評価に関する理論研究

まず、時間分解量子トモグラフィーの方法として、時間遅延をもった極短参照パルスによる2光子干渉を用いて光子の時間相関及び時間コヒーレンスの詳細な情報を得られる方法を理論的に考案した[C. Ren et. al., Phys. Rev. A (2011)] (図 17)。これにより数サイクルもつれ光子対の時間もつれあいを極短の時間スケールで評価可能することが可能になる、まったく新しい方法である。

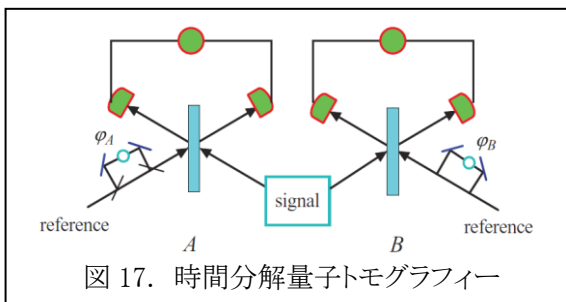


図 17. 時間分解量子トモグラフィー

次に、この時間領域での量子トモグラフィー法をさらに発展させ、周波数領域でのまったく新しい時空間量子トモグラフィー法を考案した[C. Ren et. al., Phys. Rev. A (2012)]。この方法では、もつれ光子発生用ポンプレーザー光に位相ロックした微弱レーザー光を用い、もつれ光子対のそれぞれに対して光子干渉させることで、2光子波動関数を直接的に測定することが可能である。微弱レーザー光の周波数を掃引しながら、もつれ光子対と量子干渉させることで、もつれ光子対の波動関数の「位相」を読み出すことができる。これは、2011年に提案した、4光子同時計数を必要とする2光子干渉を用いた方法と相補的に用いる事ができ、モノサイクルもつれ光の時間・周波数相関評価に向けた重要な進展と考えられる。

さらなる展開として、モノサイクルもつれ光と光周波数コム状態との2光子量子干渉で観測される量子効果に着目して研究を行った。光周波数コムは単一の波形に高い時間分解能と周波数分解能を同時に有している。モノサイクルもつれ光子対と2つの光周波数コム状態との間の2光子量子干渉を理論的に研究した結果、この量子干渉は、光源の時間・周波数もつれに敏感であることが

分かった。この方法が、モノサイクルもつれ光源で実現される量子もつれを直接評価することに適用できるのではないかと期待される。

### 3.5.2 モノサイクル量子もつれ光を用いた量子非線形光学に関する理論研究

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、光と原子系の相互作用の解析を進めた。平成 23 年度に、光と単一原子系との相互作用を量子力学的に記述し、効率的にコヒーレントな 2 光子の効果を記述できる新しいモデルを開発した。この結果は原子系での数サイクルもつれ光子対とコヒーレント光の相互作用の解析に応用できると考えられる。

平成 24 年度は、そのモデルに基づき、原子の共鳴から十分離れた周波数を持つ光を入射した場合の非線形効果について、理論的な解析を行なった。その結果、単一原子系によって、コヒーレント光に対して、そのショットノイズ雑音よりも十分おおきな、量子的に制御された振幅変調をひき起こすことができることが分かった。最低次の非線形効果は四光波混合であり、入力された2光子に対して、エネルギー保存則を満たすように、原子の共鳴周波数と残りの周波数を持つ、周波数変換された2光子が出力される。この時間反転過程は、モノサイクル光のような広帯域な周波数相関を持つ光と、原子の相互作用にとり重要であり、たとえば、通常の広帯域光と原子の相互作用とは大きく異なる周波数特性などを引き起こすと期待できる。

平成 25 年度には、その研究をさらに発展させ、時間領域での非線形効果の研究を進めた。その結果、2光子散乱が単一原子のファノ共鳴の非線形性に大きな役割を示していること示唆され、ここでは半古典論的な解析から得られる結果が、完全な量子論的な理論から得られる結果と大きく違っていることが分かった [A. Yamaguchi et. al., Phys. Rev. A (2012)]。

### 3.5.3 モノサイクルもつれ光を用いた量子メトロロジーに関する理論研究

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、まず弱測定とモノサイクルもつれ合いの関係について研究を行った。それら一連の研究により、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。

その研究を元に、簡単な量子回路を用いて、光子の到着時間とエネルギーを連続測定する方法を提案した。特に、光子の到着時間を測定するための、もつれ光子と短パルスレーザー光との相互作用の強さを、偏光自由度を使うことで可変にできることを示した。この到着時間測定では光子は吸収されないため、続いて光子のエネルギーを測定でき、2光子の結合確率を得ることができる[H. F. Hofmann et. al., Phys. Rev. A (2013)]。これにより、光子の量子状態の完全な記述を与える Kirkwood 関数[H. F. Hofmann, New J. Phys. (2012), Phys. Rev. Lett. (2012)]を決定できる。また、弱測定の量子メトロロジーへの応用についても研究を行った [H. F. Hofmann, Phys. Rev. A (R) (2013)]。また、モノサイクル量子もつれ光の応用の一つとして、時刻合わせプロトコルについて研究を行った結果、多粒子もつれ状態を用いた、新しい時刻合わせプロトコルを提案した[C. Ren et. al., Phys. Rev. A (2012)]。

また光周波数コムを2光子量子干渉を使って同期する際に、時間・周波数もつれ合いが有用であるとの感触を得たため、平成 25 年度は、モノサイクルもつれ光から生成可能である、「単一光子周波数コム状態」について研究を進めた。その結果、これらの単一光子周波数コム状態を使うことで、極めて狭い2光子量子干渉信号を、時間遅延と周波数変調の双方に対して得られることが明らかとなった [C. Ren et. al., Phys. Rev. A (2014)] (図 18)。このような伝令付き単一光子周波数コム状態は、モノサイクルもつれ光源から発生する光子を適切にフィルタリングすることで実現しうる。モノサイクル量子もつれ光子対の新たな応用分野を切り開く理論研究成果である。

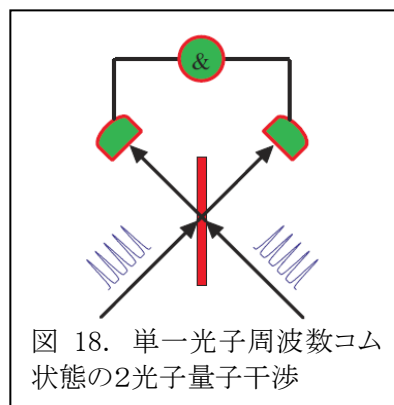


図 18. 単一光子周波数コム状態の2光子量子干渉



## § 4 成果発表等

(1)原著論文発表 (国内(和文)誌 2 件、国際(欧文)誌 64 件)

### ■原著論文 国内(和文)誌

#### 【栗村グループ】

1. 栗村直, “波長変換材料の進展”, THE REVIEW OF LASER ENGINEERING(レーザー研究), vol. 39, No. 5, pp.319-325, 2011
2. 栗村直, “高出力波長変換デバイス・材料の開発”, 機能材料, vol.31, No.3, pp.5-10, 2011

### ■原著論文 国際(欧文)誌

#### 【竹内グループ】

1. H. Oka, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. 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 (DOI:10.1063/1.3327411)
2. 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)
3. 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)
4. 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)
5. 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”, Opt. Exp., vol.19, No.3, pp.2278-2285, 2011 (DOI: 10.1364/OE.19.002278 )
6. 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”, J. Opt. Soc. Am. B, vol.28, No.3, pp.422-431, 2011 (DOI:10.1364/JOSAB.28.000422 )
7. M. Fujiwara, K. Toubaru and S. Takeuchi, “Optical transmittance degradation in tapered fibers”, Opt. Exp., vol. 19, No.9, pp.8596-8601, 2011 (DOI: 10.1364/OE.19.008596)
8. Y. Miyamoto, D. Kawase, M. Takeda, K. Sasaki and S. Takeuchi, “Detection of superposition in the orbital angular momentum of photons without excess components and its application in the verification of non-classical correlation”, J. Opt., vol.13, No.6, 064027, 2011 (DOI:10.1088/2040-8978/13/6/064027 )
9. R. Okamoto, J. L. O’Brien, H. F. Hofmann and S. Takeuchi, “Realization of a Knill-Laflamme-Milburn controlled-NOT photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities”, Proc. Natl. Acad. Sci, vol.108, No.25, pp.10067-10071, 2011 (DOI: 10.1073/pnas.1018839108 )
10. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Subashchandra, S. Ishida, N. Nishizawa and S. Takeuchi, “Generation of broadband spontaneous parametric fluorescence and its application to quantum optical coherence tomography”, Proc. SPIE, vol.8163, 2011 (DOI: 10.1117/12.893213)
11. M. Furuhashi, M. Fujiwara, T. Ohshiro, M. Tsutsui, K. Matsubara, M. Taniguchi, S. Takeuchi and T. Kawai, “Development of microfabricated TiO<sub>2</sub> channel waveguides”, AIP Advances, vol.1, No.3, 032102, 2011 (DOI:10.1063/1.3615716 )
12. M. Fujiwara, K. Toubaru, T. Noda, H. Q. Zhao and S. Takeuchi, “Highly Efficient

- Coupling of Photons from Nanoemitters into Single-Mode Optical Fibers”, *Nano Lett.*, vol.11, No.10, pp.4362-4365, 2011 (DOI: 10.1021/n120248687)
13. T. Schröder, M. Fujiwara, T. Noda, H.Q. Zhao, O. Benson and S. Takeuchi , “A nanodiamond - tapered fiber system with high single-mode coupling efficiency as key element for integrated quantum technology and nanophotonics”, *Opt. Exp.*, vol.20, No.10, pp.10490-10497, 2012 (DOI: 10.1364/OE.20.010490 )
  14. T. Chiba, H. Fujiwara, J. Hotta, S. Takeuchi and K. Sasaki, “Experimental evaluation of diffusion constant in a thin polymer film by triplet lifetime analysis of single molecules”, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol.238, pp.24-28, 2012 (DOI: 10.1016/j.jphotochem.2012.04.013 )
  15. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Subashchandran and S. Takeuchi, “Generation of broadband spontaneous parametric fluorescence using multiple bulk nonlinear crystals”, *Opt. Exp.*, vol.20, No.13, pp.13977-13987, 2012 (DOI: 10.1364/OE.20.013977 )
  16. M. Tanida, R. Okamoto and S. Takeuchi, “Highly indistinguishable heralded single-photon sources using parametric down conversion”, *Opt. Exp.*, vol.20, No.14, pp.15275-15285, 2012 (DOI:10.1364/OE.20.015275)
  17. H. Q. Zhao, M. Fujiwara and S. Takeuchi, “Suppression of fluorescence phonon sideband from nitrogen vacancy centers in diamond nanocrystals by substrate effect”, *Opt. Exp.*, vol.20, No.14, pp.15628-15635, 2012 (DOI:10.1364/OE.20.015628)
  18. M. Fujiwara, T. Noda, A. Tanaka, K. Toubaru, H. Q. Zhao and S. Takeuchi, “Coupling of ultrathin tapered fibers with high-Q microsphere resonators at cryogenic temperatures and observation of phase-shift transition from undercoupling to overcoupling”, *Opt. Exp.*, vol.20, No.17, pp.19545-19553, 2012 (DOI:10.1364/OE.20.019545)
  19. S. Subashchandran, R. Okamoto, A. Tanaka, M. Okano, L. Zhang, L. Kang, P. Wu and S. Takeuchi, “Spectral dependence of ultra-low dark count superconducting single photon detector for the evaluation of broadband parametric fluorescence”, *Proc. SPIE*, vol.8268, 2012
  20. R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai, A. Fujiwara and S. Takeuchi, “Experimental Demonstration of Adaptive Quantum State Estimation”, *Phys.Rev.Lett.*, vol.109, No.13, 130404/1-5, 2012 (DOI:10.1103/PhysLett.109.130404)
  21. H. Q. Zhao, M. Fujiwara and S. Takeuchi, “Effect of Substrates on the Temperature Dependence of Fluorescence Spectra of Nitrogen Vacancy Centers in Diamond Nanocrystals”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.51, No.9, 090110/1-5, 2012 (DOI:10.1143/JJAP.51.090110)
  22. A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Subashchandran, M. Okano, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, T. Hirohata, S. Kurimura and S. Takeuchi, “Noncollinear parametric fluorescence by chirped quasi-phase matching for monocycle temporal entanglement”, *Opt. Exp.*, vol.20, No.23, pp.25228-25238, 2012 (DOI:10.1364/OE.20.025228)
  23. T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi, “An Entanglement-Enhanced Microscope”, *Nature Communications*, 3426, 2013 (DOI: 10.1038 /ncomms3426)
  24. S. Subashchandran, R. Okamoto, L. Zhang, A. Tanaka, M. Okano, L. Kang, J. Chen, P. Wu and S. Takeuchi, “Investigation of the Performance of an Ultralow-Dark-Count Superconducting Nanowire Single-Photon Detector”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.52, No.10, 102801, 2013 (DOI:10.7567/JJAP.52.102801 )
  25. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Ishida, N. Nishizawa and S. Takeuchi, “Dispersion cancellation in high-resolution two-photon interference”, *Phys. Rev. A*, vol.88, 43845, 2013 (DOI:10.1103/PhysRevA.88.043845 )
  26. H. Q. Zhao, M. Fujiwara, M. Okano and S. Takeuchi, “Observation of 1.2-GHz linewidth of zero-photon-line in photoluminescence spectra of nitrogen vacancy

- centers in nanodiamonds using a Fabry-Perot interferometer”, *Opt. Exp.*, vol.21, No.24, pp.29679-29686, 2013 (DOI:10.1364/OE.21.029679 )
27. S. Hara, T. Ono, R. Okamoto, T. Washio and S. Takeuchi, “Anomaly detection in reconstructed quantum states using a machine-learning technique”, *Phys. Rev. A*, vol.89, No.2, 022104/1-5, 2014 (DOI:10.1103/PhysRevA.89.022104 )
  28. S. Takeuchi, “Recent progress in single-photon and entangled-photon generation and applications”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.23, 30101/1-11, 2014 (DOI:10.7567/JJAP.53.030101)
  29. S. Takeuchi, “Quantum Information Science Using Photons”, *AAPPS Bulletin*, vol.24, No.1, pp.19-25, 2014
  30. M Almokhtar, M Fujiwara, H.Takashima and S.Takeuchi, “Numerical simulations of nanodiamond nitrogen-vacancy centers coupled with tapered optical fibers as hybrid quantum nanophotonic devices”, *Opt. Exp.*, vol.22, no.17, 20045-20059, 2014 (DOI: 10.1364/OE.22.020045 )
  31. A. Schell, H. Takashima, S. Kamioka, Y. Oe, M. Fujiwara, O. Benson and S. Takeuchi, “Highly efficient coupling of nanolight emitters to an Ultra-Wide tunable nanofiber cavity”, to be published in *Scientific Reports*, 2015

#### 【栗村グループ】

1. L. K. Oxenløwe, F. G. Agis, C. Ware, S. Kurimura, H. C. H. Mulvad, M. Galili, H. Nakajima, J. Ichikawa, D. Erasme, A. T. Clausen and P. Jeppesen, “640-Gbit/s Data Transmission and Clock Recovery Using an Ultrafast Periodically Poled Lithium Niobate Device”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, No. 3, pp.205-213, 2010 (DOI: 10.1109/JLT.2008.2009322)
2. H. Iliev, I. Buchvarov, S. Kurimura and V. Petrov, “High-power picosecond Nd:GdVO<sub>4</sub> laser mode locked by SHG in periodically poled stoichiometric lithium tantalite”, *OPTICS LETTERS*, vol. 37, No. 7, pp.1016-1018, 2010
3. N. Namekata, Y. Takahashi, G. Fujii, D. Fukuda, S. Kurimura and S. Inoue, “Non-Gaussian operation based on photon subtraction using a photon-number-resolving detector at a telecommunications wavelength”, *Nature Photonics*, vol. 4, No. 9, pp.655-660, 2010 (DOI: 10.1038/nphoton.2010.158)
4. H. H. Lim, T. Katagai, S. Kurimura, T. Shimizu, K. Noguchi, N. Ohmae, N. Mio and I. Shoji, “Thermal performance in high power SHG characterized by phase-matched calorimetry”, *Opt. Express*, Vol. 19, No. 23, pp.22588-22593, 2011 (DOI:10.1364/OE.19.022588)
5. H. Iliev, I. Buchvarov, S. Kurimura and V. Petrov, “1.34- $\mu$ m Nd:YVO<sub>4</sub> laser mode-locked by SHG-lens formation in periodically-poled stoichiometric lithium tantalate”, *Opt. Exp.*, vol. 19, No. 22, pp.21754-21759, 2011 (DOI: 10.1364/OE.19.021754)
6. T. Suzuki and S. Kurimura, “Low-Dispersion Characteristics of Silica-Based Graded Refractive Index Lens for Laser Display Optical System”, *OPTICAL REVIEW*, vol. 19, No. 6, pp.419-421, 2012 (DOI: 10.1007/s10043-012-0070-2)
7. K. Tanizawa, K. Kikuchi, K. Sugiura, S. Kurimura, H. Kuwatsuka, H. Nakajima and J. Ichikawa, “Parametric Tunable Dispersion Compensation With Spectrally Noninverting Wavelength Conversion Using Quasi-Phase-Matched Adhered Ridge Waveguide”, *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, vol. 18, No. 2, pp.593-599, 2013 (DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2112755)
8. H. H. Lim, S. Kurimura, T. Katagai and I. Shoji, “Temperature-Dependent Sellmeier Equation for Refractive Index of 1.0 mol% Mg-Doped Stoichiometric Lithium Tantalate”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 52, pp.32601-32604, 2013 (DOI: 10.7567/JJAP.52.032601)
9. H. H. Lim, S. Kurimura and N. E. Yu, “Parasitic-light-suppressed

- quasi-phase-matched optical parametric oscillation device”, *Opt. Exp.*, vol. 22, No. 5, pp.369-375, 2014 (DOI: 10.1364/OE.22.005209)
10. H. H. Lim, S. Kurimura, K. Noguchi and I. Shoji, “Thermal characteristics of second harmonic generation by phase matched calorimeter”, *Opt. Exp.*, Vol. 22, No. 15, pp. 18268-18277, 2014 (DOI:10.1364/OE.22.018268)
  11. S. Kato, S. Kurimura, H. H. Lim, N. Mio, “Induced heating by nonlinear absorption in LiNbO<sub>3</sub>-type crystals under continuous-wave laser irradiation”, *OPTICS MATERIALS*, vol.40, pp.10-13, 2015 (DOI:10.1016/j.optmat.2014.11.029)

**【ホフマングループ】**

1. H. F. Hofmann, “Complete characterization of post-selected quantum statistics using weak measurement tomography,” *Phys. Rev. A* 81, 012103 (2010)
2. T. Ono and H. 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 (DOI:10.1103/PhysRevA.81.033819)
3. T. Kosako, Y. Kadoya, and H. F. Hofmann, “Directional control of light by a nano-optical Yagi-Uda antenna”, *Nature Photonics* 4, 312 (2010)
4. H. F. Hofmann, “Uncertainty limits for quantum metrology obtained from the statistics of weak measurements”, *Phys. Rev. A* 83, 022106 (2011)
5. 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)
6. C. Ren and H. F. Hofmann, “Time-resolved measurement of the quantum states of photons using two-photon interference with short-time reference pulses”, *Phys. Rev. A* 84, 032108 (2011)
7. H. F. Hofmann, “On the role of complex phases in the quantum statistics of weak measurements”, *New J. Phys.* 13, 103009 (2011).
8. H. F. Hofmann, “On the estimation of interaction parameters in weak measurements”, *AIP Conf. Proc.* vol.1363, 125, 2011 (DOI: 10.1063/1.3630162)
9. H. F. Hofmann, “Complex joint probabilities as expressions of reversible transformations in quantum mechanics”, *New J. Phys.*, vol.14, 043031, 2012 (DOI:10.1088/1367-2630/14/4/043031)
10. C. Ren and H. F. Hofmann, “Clock synchronization using maximal multipartite entanglement”, *Phys. Rev. A*, vol.86, 014301, 2012 (DOI:10.1103/PhysRevA.86.014301)
11. H. F. Hofmann, “How weak values emerge in joint measurements on cloned quantum systems”, *Phys. Rev. Lett.*, vol.109, 020408, 2012 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.020408)
12. C. Ren and H. F. Hofmann, “Analysis of the time-energy entanglement of down-converted photon pairs by correlated single-photon interference”, *Phys. Rev. A*, vol.86, 043823, 2012 (DOI:10.1103/PhysRevA.86.043823)
13. Y. Suzuki, M. Iinuma, and H. F. Hofmann, “Violation of Leggett-Garg inequalities in quantum measurements with variable resolution and back-action”, *New J. Phys.*, vol.14, 103022, 2012 (DOI:10.1088/1367-2630/14/10/103022)
14. H. F. Hofmann, M. E. Goggin, M. P. Almeida and M. Barbieri, “Estimation of a quantum interaction parameter using weak measurements: Theory and experiment”, *Phys. Rev. A*, vol.86, 040102(R), 2012 (DOI:10.1103/PhysRevA.86.040102)
15. M. Hiroishi and H.F. Hofmann, “An investigation of the transfer dynamics of quantum teleportation by weak measurement statistics”, *J. Phys. A: Math. Theor.*, vol. 46, Art. no. 245302, 2013 (DOI: 10.1088/1751-8113/46/24/245302)
16. H. F. Hofmann and C. Ren, “Direct observation of temporal coherence by weak projective measurements of photon arrival time”, *Phys. Rev. A*, vol. 87, Art. no.

- 062109, 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevA.87.062109)
17. A. Yamaguchi and H. F. Hofmann, “Quantum effects in the interaction of off-resonant coherent light with a single atom”, Phys. Rev. A, vol. 88, Art. no. 013809, 2013 (DOI: 10.1103/PhysRevA.88.013809)
  18. G. Y. Xiang, H. F. Hofmann, and G. J. Pryde, “Optimal multi-photon phase sensing with a single interference fringe”, Scientific Reports, vol. 3, Art. no. 2684, 2013 (DOI: 10.1038/srep02684)
  19. H. F. Hofmann, “Derivation of quantum mechanics from a single fundamental modification of the relations between physical properties,” Phys. Rev. A, vol. 89, Art. No. 042115, 2014 (DOI: 10.1103/PhysRevA.89.042115)
  20. C. Ren and H. F. Hofmann, “Simultaneous suppression of time and energy uncertainties in a single-photon frequency-comb state,” Phys. Rev. A vol. 89, Art. no. 053823, 2014 (DOI: 10.1103/PhysRevA.89.053823)
  21. H. F. Hofmann, “Sequential measurements of non-commuting observables with quantum controlled interactions,” New J. Phys. vol. 16, 063056, 2014 (DOI: 10.1088/1367-2630/16/6/063056)
  22. H. F. Hofmann, “Reasonable conditions for joint probabilities of non-commuting observables,” Quantum Stud.: Math. Found., 2014 (published online) (DOI: 10.1007/s40509-014-0010-x)

(2)その他の著作物(総説、書籍など)

**【竹内グループ】**

1. 竹内繁樹、“光量子回路の現状と展望”、光科学研究の最前線 2 (Frontiers in Optical Science)、p.14, 2009
2. 竹内繁樹、“光量子回路の現状と展望 =光子を用いた量子コンピュータ、量子メトロロジーの実現に向けて=”、光アライアンス vol.20 no.10 pp15-20 ,2009
3. 竹内繁樹、“専門外の学問を学ぶコツ -情報系で物理が必要になったとき-”、電子情報通信学会誌、92 巻、12 号、p.1076-1078, 2009
4. 竹内繁樹、“第 8 章 線形光学素子を用いた量子計算—そのしくみと最新情報—”、基礎からの量子光学 pp386-397 ,2009
5. 竹内繁樹、岡本亮、“光量子回路の実現—量子もつれ合いフィルター”、応用物理 vol.79 no.2 pp125-129,2010
6. 竹内繁樹、“第 2 編応用編 第 1 節 量子情報通信・処理の実現に向けた高効率固体量子位相ゲート”量子ドットエレクトロニクス最前線、p.331-339, 2011
7. 竹内繁樹、“光子を用いた量子情報科学と表面科学”、表面科学、32 巻、12 号、p.773-778, 2011
8. 藤原秀樹、高島秀聡、竹内繁樹、笹木敬司、“超高 Q 値微小光共振器の高周波数分解分光測定”、分光研究、60 巻 6 号、p.236-237, 2011
9. 竹内繁樹(翻訳者)、“光コムを用いて、大規模な量子もつれ状態を実現”、パリティ、27 巻 6 号、p.48-50、 2012
10. 藤原正澄、竹内繁樹、“ナノテーパー光ファイバを駆使した光量子デバイス”、化学工業、vol.63, No.9, pp.25-30, 2012
11. 竹内繁樹、岡本亮、岡野真之、Shanthi Subashchandran, 田中陽、“分極反転光デバイスによる新しい光量子科学・モノサイクル量子もつれ光の実現に向けて”、オプトロニクス、vol.31, no.371, pp. 121-125, 2012

12. 岡本亮、竹内繁樹、“量子もつれ光子を用いた光位相計測技術”、光学、500-505、2013
13. 竹内繁樹、“先端機能性材料と光技術 XII. ナノ光ファイバーを用いた単一光子源-量子情報科学の視点から”、CERAMICS JAPAN、vol.49, no.8, pp.694-698, 2014

#### 【栗村グループ】

1. 栗村直、“分極反転による波長変換デバイス”、光アライアンス、vol.21, No.6, pp.6-9, 2010
2. 栗村直、“波長変換機能材料”、セラミックス機能化ハンドブック、pp.101-107, 2011
3. 栗村直、“総説 分極反転デバイス-過去、現在、そして未来-”、OPTRONICS、vol.371, No.11, pp. 106-109, 2012
4. 原田昌樹、足立宗之、栗村直、“真空紫外波長変換を実現する極性反転水晶”、OPTRONICS、vol.371, No. 11, pp.131-134.2012

#### (3)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 (国内会議 47 件、国際会議 60 件)

(主要な国際会議への招待講演の前に\*を付記してください)

#### ■招待講演 国内会議発表

##### 【竹内グループ】

1. 竹内 繁樹、“光子を用いた量子回路の実現と展望”、連続講演会「ナノフォトニクスと量子情報」東京都調布市、12月17日、2009年
2. S. Takeuchi, “Linear Optics Quantum Computer”, Symposium on Physical Realizations of Quantum Information Processing and Quantum Computation 21, 大阪府東大阪市、12月22日、2009年
3. 竹内繁樹、“光量子計算・量子リソグラフィ”、応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会、長野県北佐久郡、1月8日、2010年
4. 竹内繁樹、“量子もつれ光による新しい計測の可能性について”、第2回超高速時間分解光計測研究会～量子ダイナミクスと制御～、浜松名鉄ホテル、3月5日、2010年
5. 竹内繁樹、“古典限界をうち破るー量子もつれ合いの計測への応用ー”、電子情報通信学会2010年総合大会、宮城県仙台市、3月16日、2010年
6. 岡本亮、“2光子量子干渉に基づく光量子ゲートの実現と光量子回路への展開”、日本物理学会 第65回年次大会、岡山県岡山市、3月20日、2010年
7. 竹内繁樹、“光子を操るー光量子回路の実現とその未来”、第71回応用物理学会学術講演会、長崎大学文教キャンパス、9月14日、2010年
8. 竹内繁樹、“光子を用いた量子回路の実現と展望”、フロンティア研究センター講演会、徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部、11月4日、2010年
9. 竹内繁樹、“光量子回路の実現とその応用”、文部科学省「物質・デバイス領域共同研究拠点」複雑系数理とその応用に関するシンポジウム、北海道大学北キャンパス電子科学研究所、11月9日、2010年
10. 竹内繁樹、“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”、CREST「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」領域 研究状況報告会、JSTホール JST東京本部、12月19日、2010年
11. 竹内繁樹、“光量子回路の実現とその応用”、レーザー学会学術講演会第31回年次大会、電気通信大学、1月9日、2011年
12. 竹内繁樹、“量子情報光学とその応用”、2011年春季第58回応用物理学関係連合講演会、神奈川工科大学、3月24-27日 2011年
13. 竹内繁樹、“光子を用いた量子回路の実現と展望”、日本物理学会 2011年秋季大会、富山大学、9月21-24日 2011年
14. S. Takeuchi, “Photonic quantum circuits and their application”、第11回田村記念シンポジウム、大阪府立大学、12月3-5日 2011年

15. 竹内繁樹, “分極反転光デバイスで拓く、新しい光量子科学”, 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, 3 月 15-18 日, 2012 年
16. 岡野真之、西澤典彦、栗村直、竹内繁樹, “量子光コヒーレンストモグラフィがよせる分極反転デバイスへの期待”, 2013 年第 60 回応用物理学学会春季学術講演会、神奈川工科大学、3 月 27-30 日 2013 年
17. 岡本亮、家藤美奈子、大山悟史、山形浩一、今井寛、藤原彰夫、竹内繁樹, “光子を用いた適応量子状態推定”, 第 1 回アライアンス若手研究交流会, 東京大学, 11 月 25-26 日, 2013 年
18. 岡本亮, “光量子回路の大規模化に向けて”, 基礎物理学研究所研究会 量子情報の新展開、京都大学、3 月 23-25 日、2014 年
19. 竹内繁樹, “光量子情報に向けたナノフォトニクス”, 高分子・ハイブリッド材料研究センター 2014PHyM シンポジウム, 東北大学, 6 月 6 日, 2014 年
20. 竹内繁樹, “光子を用いた量子計測”, 応用物理学学会シンポジウム S.4 フォトニクスと量子情報技術の融合へ向けて, 東海大学湘南キャンパス, 3 月 11-14 日, 2015 年
21. 竹内繁樹, “光子を用いた量子計測”, 2015 年度精密工学会春季大会シンポジウム「量子光工学の現状」, 東洋大学白山キャンパス, 3 月 17 日, 2015 年

#### 【栗村グループ】

1. 栗村直, “ディスプレイ応用のためのレーザー光源”, Optics & Photonics Japan 2009, 朱鷺メッセ, 11 月 25 日, 2009 年
2. 栗村直, “非線形光学デバイスのフロンティア”, 第 119 委員会 光・量子デバイス技術委員会, 北大東京オフィス, 東京都千代田区, 12 月 11 日, 2009 年
3. 栗村直, “波長変換による可視域光源”, 第 4 回レーザー学会「レーザーディスプレイ技術」専門委員会, 大阪大学吹田キャンパス, 2 月 10 日, 2010 年
4. 栗村直, “ディスプレイ用波長変換の進展”, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 東海大学湘南キャンパス, 3 月 17-20 日, 2010 年
5. 栗村直, “多極展開する分極反転非線形光学”, 日本学術会議公開シンポジウム「先端フォトニクスの展望」, はーといん乃木坂, 4 月 9 日, 2010 年
6. 栗村直, “緑色 SHG レーザー”, レーザー EXPO2010, パシフィコ横浜, 4 月 21-23 日, 2010 年
7. 栗村直, “ディスプレイ用可視光波長変換結晶の進展”, 日本学術振興会第 161 委員会, 東京大学駒場キャンパス, 東京都, 9 月 28 日, 2010 年
8. 栗村直, “ディスプレイに向けた波長変換グリーンレーザー”, 日本学術振興会第 162 委員会, 京都・烟河, 510 月 8 日, 2010 年
9. 栗村直, “レーザーディスプレイ用光源 ～波長変換を中心に～”, レーザー学会学術講演会第 31 回年次大会, 電気通信大学, 1 月 9-10 日, 2011 年
10. 行方直人、栗村直、井上修一郎, “分極反転デバイスの量子光学への展開”, 第 58 回応用物理学学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 3 月 24-27 日, 2011 年
11. 大前宣昭、三尾典克、栗村直, “分極反転デバイスによる高出力可視光発生”, 第 58 回応用物理学学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 3 月 24-27 日, 2011 年
12. 栗村直, “非線形光学の 50 年、分極反転の 20 年”, 第 58 回応用物理学学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 3 月 24-27 日, 2011 年
13. 栗村直, “レーザーディスプレイ関連安全法に関する最新状況”, 第 8 回レーザーディスプレイ技術研究会, パシフィコ横浜, 4 月 22 日, 2011 年
14. 栗村直, “レーザーディスプレイの安全性”, 第 1 回レーザーディスプレイ技術セミナー, 東京大学生産技術研究所, 10 月 7 日, 2011 年
15. 栗村直, “超高速高効率波長変換の描く未来”, Symposium on Innovations of Photonics & Optical Componen, 品川プリンスホテル, 4 月 23 日, 2012 年
16. 村中勇介、杉浦かおり、栗村直、菊池清史、高磊、中島 啓幾、市川 潤一, “QPM 接着リッジ

導波路を用いた CW 励起光パラメトリック増幅”, 2012 年秋季 第 73 回 応用物理学会学術講演会, 愛媛大学, 9 月 11-14 日 2012 年

17. 栗村直, “分極反転デバイスが拓く光技術の最先端”, 未来を切り開く最先端フォトニクス研究, 秋保グランドホテル会議室:芙蓉の間, 2 月 28 日-3 月 1 日, 2013 年
18. 行方直人、呉青林、栗村直、井上修一郎, “分極反転デバイスを用いた量子鍵配送へ向けた量子もつれ配送と交換技術”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 3 月 27-30 日, 2013 年
19. H. H. Lim、栗村直、野口慶介、長島亘、庄司一郎, “Thermal effects in single pass SHG with focused beams”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 3 月 27-30 日, 2013 年
20. 栗村直, “分極反転の 20 年”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 3 月 27-30 日, 2013 年
21. 栗村直, “波長変換材料・デバイスの進展”, レーザー学会学術講演会第 34 回年次大会, 北九州国際会議場, 1 月 20-22 日, 2014 年
22. 栗村直, “クロージングトーク”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 3 月 17-20 日, 2014 年
23. 谷澤健、菊池清史、杉浦かおり、栗村直、中島啓幾、市川潤一郎、鍛塚治彦、並木周, “分極反転デバイスのパラメトリック可変分散補償への適用”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 3 月 17-20 日, 2014 年
24. 栗村直, “量子光学応用をめざす分極反転非線形光学デバイス”, 光エレクトロニクス第 130 委員会 第 292 回研究会, 東京理科大学 森戸記念館, 5 月 12 日, 2014 年
25. 栗村 直, “レーザーディスプレイへの期待”, レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会, 東海大学高輪校舎, 1 月 12 日, 2015 年

#### 【ホフマングループ】

1. H. F. Hofmann, “The law of quantum ergodicity: complex probabilities as fundamental physics”, QMKEK 5, 高エネルギー加速器研究機構, 3 月 10-11 日, 2014 年

#### ■招待講演 国際会議発表

##### 【竹内グループ】

1. S. Takeuchi (Hokkaido Univ.), “Linear Optics Quantum Computer”, Symposium on Physical Realizations Quantum Information Processing and Quantum Computation, Kinki Univ., Dec., 21-22, 2009.
- \*2. S. Takeuchi, “Photonic Quantum Circuits and its application”, SPIE Photonics West, San Francisco, USA, 23-28, Jan., 2010
- \*3. S. Takeuchi, “Photonic quantum circuits and its application”, Quantum2010 5th Workshop ad memoriam of Carlo Novero Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons / 3rd Italian Quantum information Science Conference IQIS 2010, I.N.R.I.M.Conference Hall (formerly IEN Galileo Ferraris) Torino, Italy, 23-29, May , 2010
4. S. Takeuchi, “Photonic quantum circuits and its application”, SONDERSEMINAR, Fakultät für Physik/LMU(Ludwig-Maximilians-Universität) Schellingstraße, München, Germany, 28, May, 2010
- \*5. S. Takeuchi, “How can we minimize errors in a linear-optics quantum gate?”, SPIE Optics+Photonics 2010, San Diego Convention Center, USA, 1-5, Aug., 2010
- \*6. R. Okamoto, “Linear optics quantum circuits”, International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/Lasers, Applications, and Technologies 2010, Hotel Korston, Russia, 23-27, Aug., 2010
- \*7. S. Takeuchi, “Optical quantum circuit combining tailored optical nonlinearities”, SPIE Photonics west 2011, The Moscone Center, USA, 22-27, Jan., 2011



8. S. Subashchandran, "Superconducting Nanowire Single Photon Detector System: Evaluation and Applications with Entangled Photon Pairs", International Workshop on Advanced Functional Nanomaterials, Anna University, India, 21-24, Feb., 2011
- \*9. M. Fujiwara, "Solid-state photonic quantum phase gates by using fiber-microsphere cavity and diamond NV centers", 20th International Laser Physics Workshop, Hotel Hollywood, Bosnia and Herzegovina, 11-15, Jul., 2011
- \*10. S. Takeuchi, "Photonic quantum circuits and their application", Conference on Quantum Information & Quantum Control, the Fields Institute, Toronto, Canada, 8-12, Aug., 2011
- \*11. S. Takeuchi, "Toward single photon optical nonlinearities for quantum information and quantum metrology", SPIE Optics + photonics 2011, San Diego Convention Center, USA, 21-25, Aug., 2011
- \*12. S. Takeuchi, "Photonic quantum circuits and their application", 11th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS'11), Busan, Korea, 5-9, Sep., 2011
- \*13. S. Takeuchi, "Realization of ultra-broadband entangled photons and application to quantum sensing", LASE SPIE Photonics west, The Moscone Center San Francisco, USA, 21-26, Jan., 2012
- \*14. S. Subashchandran, "Spectral dependence of ultra-low dark count Superconducting single photon detector for the evaluation of broadband parametric fluorescence", LASE SPIE Photonics west, The Moscone Center San Francisco, USA, 21-26, Jan., 2012
- \*15. S. Takeuchi, "Nano Optical Fibers for Photonic Quantum Information", Quantum Information and Measurement (QIM), Laser Optics Berlin, Germany, 19-21, Mar., 2012
- \*16. M. Okano, "Realization of ultra-broadband entangled photons and application to quantum sensing", Quantum2012, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica Conference Hall, Italy, 20-26, May, 2012
- \*17. S. Takeuchi, "Realization of ultra-broadband entangled photons and application to quantum sensing", 21th International Laser Physics Workshop, University of Calgary, Canada, 23-27, Jul., 2012
- \*18. R. Okamoto, "Demonstration of adaptive quantum estimation with photons", SPIE Optics + Photonics "Quantum Communications and Quantum Imaging X", San Diego Convention Center, USA, 12-16, Aug., 2012
19. M. Fujiwara, T. Noda, A. Tanaka, K. Toubaru, H.Q. Zhao and S. Takeuchi, "Efficient coupling of ultrathin tapered fibers with nanomitters and microsphere resonators", Photon 12: Institute of Physics'premier event in optics and photonics, Durham University, UK, 3-6, Sep.,2012
20. S. Takeuchi, "Nano photonics for quantum information science", RIES-CIS Symposium, Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University, Japan, 25, Oct., 2012
- \*21. R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai, A. Fujiwara and S. Takeuchi, "Experimental demonstration of adaptive quantum state estimation", SPIE Photonics West 2013, The Moscone Center, USA, 2-7, Feb.,2013
22. S. Takeuchi, "Photonic quantum circuits and single photon sources", The 11th US-Japan Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy "Ultimate Quantum Systems of Light and Matter-Control and Applications, Nara Prefectural New Public Hall, Japan, 8-12, Apr., 2013
23. S. Takeuchi, "Nano optical fibers for photonic quantum information", Optical Nanofiber Applications : From Quantum to Bio Technologies ONNA 2013, Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Japan, 27-29, May, 2013
- \*24. S. Takeuchi, R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai and A.

- Fujiwara, "Experimental demonstration of adaptive quantum state estimation", 20th Central European Workshop on Quantum Optics, The Royal Institute of Technology(KTH), Sweden, 16-20, Jun., 2013
- \*25. S. Takeuchi, "Toward the realization of monocycle entangled photons", New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Aug., 2013
  - 26. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Ishida, N. Nishizawa and S. Takeuchi, "High resolution quantum optical coherence tomography by broadband entangled photon pairs", New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Aug., 2013
  - \*27. T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi, "Application of quantum metrology using photons", 22nd International Laser Physics Workshop, Hotel Krystal Prague, Czech Republic, 14-19, Jul., 2013
  - \*28. S. Takeuchi, "Quantum measurements and sensings", SPIE Optics + Photonics, San Diego Convention Center, USA, 25-29, Aug., 2013
  - \*29. S. Takeuchi, "Photonic quantum circuits and quantum metrologies", OSA'S97th Annual meeting Frontiers in Optics 2013, Hilton Bonnet Creek, USA, 6-10, Oct., 2013
  - 30. S. Takeuchi, "Photonic quantum circuits and quantum metrologies", Quantum Science Symposium Asia-2013, University of Tokyo, 25-26, Nov., 2013
  - \*31. S. Takeuchi, "An entanglement-enhanced microscope", Photonics West (SPIE), The Moscone Center San Francisco, USA, 1-6, Feb., 2014
  - \*32. S. Takeuchi, "Quantum metrologies using entangled photons", Quantum 2014, I. N. Ri. M. Strada delle Cacce 91, Torino, Italy, 25-31, May, 2014
  - 33. S. Takeuchi, "Photonic quantum circuits and their applications", The 2nd Kyoto University & National Taiwan University Symposium, Kyoto University, Japan, 1-2, Sep., 2014
  - 34. S. Takeuchi, "Photonic Quantum Information and Metrology", Okinawa School in Physics : Coherent Quantum Dynamics, OIST Seaside House, Okinawa, Japan, 16-25, Sep., 2014
  - 35. S. Takeuchi, "Quantum entangled photon sources and their application to quantum metrology", 2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics/The 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (MWP/APMP2014), Sapporo Convention Center, Hokkaido, Japan, 20-23, Oct., 2014
  - 36. S. Takeuchi, "Quantum metrologies using entangled photons", 2015 IMCE International Symposium, Chikushi Hall, Chikushi Campus, Kyusyu University, Japan, 28, Jan., 2015
  - 37. S. Takeuchi, M. Okano, S. Kurimura and N. Nishizawa, "An ultrahigh-resolution quantum optical coherence tomography with dispersion-tolerance", SPIE Photonics West 2015, The Moscone Center, San Francisco, USA, 7-12, Feb., 2015

**【栗村グループ】**

- \*1. S. Kurimura, "New generation in nonlinear optical device", OSK 20th anniversary special meeting, Kimdaejung Convention Center, Gwangju, Korea, 20, Oct., 2009
- \*2. S. Kurimura, "Green Laser Technology for Display Application", IDW '09, World Convention Center Summit, Japan, 9-11, Dec., 2009
- \*3. S. Kurimura, "Bulk Quasi-Phase-Matched Nonlinear Optical Devices", APLS 2010, Seogwipo KAL Hotel, Korea, 11-15, May, 2010
- \*4. S. Kurimura, "Nonlinear photonic devices by patterned polarity", ICCG-16, Beijing International Convention Center, China, 8-13, Aug., 2010
- 5. H. H. Lim, S. Kurimura, K. Noguchi, N. Ohmae, N. Mio, and I. Shoji, "Thermal performance in CW high power SHG with PPMgSLT", ALTA2012, Seogwipo KAL Hotel, Korea, 16-20, May, 2012

6. S. Kurimura, "Laser Display - technologies and applications", ISOM12 (International Symposium on Optical Memory 2012), National Museum of Emerging Science and Innovation, Japan, 30, Sep., -4, Oct., 2012
7. S. Kurimura, M. Harada, K. Muramatsu, M. Ueda, M. Adachi, T. Yamada and T. Ueno, "Mechanically twinned quartz for UV QPM", NLO50 (50 Years of Nonlinear Optics International Symposium), ICFO, Spain, 7-10, Oct., 2012
- \*8. S. Kurimura, "Designable nonlinear optical devices for quantum optics", New Science and Technologies Using Entangled Photons (NSTEP), Osaka University, Japan, 8-9, July, 2013
- \*9. S. Kurimura, "Polarization-reversed nonlinear optical waveguides in lithium niobate", JSAP-OSA Joint Symposia 2013, Doshisha University Kyotanabe Campus, Japan, 16-20, Sep., 2013
- \*10. S. Kurimura, "Designable nonlinear optical devices for ultrafast laser pulses", International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2014, National Chiao Tung University, Taiwan, 2-6, Sep., 2014
11. S. Kurimura, M. Shimizu, T. Utsugida, S. Horikawa, K. Fujii, H. Nakajima, "Bandwidth of backward second harmonic generation in ultrafine-structured LiNbO<sub>3</sub> waveguide", Advanced Solid State Lasers (ASSL2014), Hilton Shanghai Hongqiao, Shanghai, China, 16-21, Nov., 2014
12. S. Kurimura, "Nonlinear optical devices in intelligent ferroelectric oxides", 1st International Conference on Opto-Electronics and Photonic Materials (ICOPMA-2015), School of Electrical & Electronics Engineering, SASTRA University, Tamilnadu, INDIA, 27-28, Feb., 2015(plenary talk)

**【ホフマングループ】**

1. H. F. Hofmann, "Resolution of pure state uncertainties by weak measurement tomography", Nagoya Winter Workshop, Nagoya, 18, Feb., 2010
2. H. F. Hofmann, "Causality and completeness in weak measurement statistics", Nagoya Winter Workshop, Nagoya, 17, Feb., 2011
3. H. F. Hofmann, "Weak measurements and quasi-realities: explaining the paradoxical statistics", Workshop on Weak Measurement, Tokyo Institute of Technology, Japan, 8, May, 2012
4. H. F. Hofmann, "Complex probabilities as fundamental physics: how Hilbert space unifies dynamics and statistics", Nagoya Winter Workshop, Nagoya University, Japan, 18-22, Feb., 2013
- \*5. H. F. Hofmann, "Quantum evidence in classical data: How recent experiments in optics inspire a new look at fundamental physics", CQO-X/QIM-2, Rochester University, Rochester, NY, USA, 17-20, Jun., 2013
- \*6. H. F. Hofmann, Changliang Ren, "A closer look at photons: how to map the quantum statistics of energy and time", NSTEP, Osaka University, Osaka, Japan, 8-9, Jul., 2013
7. H. F. Hofmann, "Fundamental laws of quantum physics: On the meaning of weak measurement statistics", IMS workshop on quantum optics and quantum information, Institute for Molecular Science, IMS, Higashi Okazaki, Japan, 21, Aug., 2013
- \*8. H. F. Hofmann, "Weak valued statistics and physical reality in quantum mechanics", APCWQIS 2013, Korea Institute of Advanced Study, Seoul, South Korea, 15-18, Dec., 2013
- \*9. H. F. Hofmann, "Why complex probabilities make sense: New insights into the relations between weak measurements, paradoxical correlations, and causality in quantum systems", AQIS 2014, Shirankaikan, Kyoto, Japan, 21-24, Aug., 2014
10. H. F. Hofmann, "From experimental evidence to quantum physics: What measurement reveals about the dynamical structure of reality", Nagoya Winter

Workshop 2015: Reality and Measurement in Algebraic Quantum Theory,  
Higashiyama Campus, Nagoya University, Japan, 9- 13, Mar., 2015

11. H. F. Hofmann, “How to uncover the physics of quantum correlations through combinations of weak and strong measurements, International Workshop on Weak Value and Weak Measurement”, Oh-okayama Campus, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 19-20, Mar., 2015

② 口頭発表 (国内会議 87 件、国際会議 45 件)

#### ■口頭発表 国内会議

##### 【竹内グループ】

1. 岡本 亮、竹内繁樹, “光量子回路の実現”, ポストシリコン物質・デバイス創製基盤技術アライアンス「新機能ナノエレクトロニクス」研究グループ 2009 年度分科会, 北海道札幌市, 10 月 9 日, 2009 年
2. 高島秀聡、高橋雅英、藤原英樹、笹木敬司、竹内繁樹, “ファイバ結合微小球レーザーの光入出力特性の解析”, 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2009, 新潟県新潟市, 11 月 24 日, 2009 年
3. 岡本亮, “2 光子量子干渉に基づく光量子ゲート”, 第 7 回関西若手量子情報セミナー, 京都大学, 12 月 17 日, 2009 年
4. 藤原正澄, “光合成色素蛋白複合体のエネルギー散逸構造解明に向けたコヒーレント分光研究”, 北海道大学電子科学研究所平成 21 年度研究交流会, 北海道大学, 1 月 8-9 日, 2010 年
5. 永田智久、岡本亮、Holger F. Hofmann、竹内繁樹, “高忠実度線形光学量子ゲートの実現に向けて—エラー原因の深刻さと相乗効果—”, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山県岡山市, 3 月 20 日, 2010 年
6. 田中陽、桃原清太、藤原正澄、岡本亮、竹内繁樹, “ファイバ結合微小球共振器の単一光子レベルでのプロセスモグラフィ”, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 岡山県岡山市, 3 月 20 日, 2010 年
7. 藤原正澄、桃原清太、田中陽、趙洪泉、高島秀聡、竹内繁樹, “極低温下におけるテーパファイバ・微小球結合系の実現と制御”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学 中百下鳥キャンパス, 9 月 23 日-26 日, 2010 年
8. 藤原正澄, “分子の輻射場制御を利用した新しい単一分子分光法とそのカロテノイドへの応用可能性”, 2010 年カロテノイド若手の会, 箱根路開雲ホテル, 神奈川県, 12 月 19-20 日, 2010 年
9. 古橋匡幸、大城敬人、筒井真楠、松原一喜、谷口正輝、川合知二、藤原正澄、竹内繁樹, “単生体粒子認識を目前とした TiO<sub>2</sub> 導波路の作製”, 2011 年春季 第 58 回 応用物理学関係連合講演会, 神奈川工科大学, 3 月 24-27 日, 2011 年
10. 竹内繁樹, “モノサイクル量子もつれ光源の実現にむけて”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 3 月 25-28 日, 2011 年
11. 岡本亮、岡野真之、田中陽、Subashchandran Shanthi、竹内繁樹, “BBO 結晶からのパラメトリック蛍光対の広帯域化”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 3 月 25-28 日, 2011 年
12. 藤原正澄、野田哲矢、桃原清太、趙洪泉、竹内繁樹, “テーパ光ファイバによる単一発行体の蛍光検出とそのテーパ部直径依存性”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 3 月 25-28 日, 2011 年
13. 岡野真之、岡本亮、田中陽、Shanthi Subashchandran、石田周太郎、西澤典彦、竹内繁樹, “広帯域パラメトリック蛍光対の量子光断層撮影への応用”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 3 月 25-28 日, 2011 年

14. 田中陽、岡本亮、岡野真之、Subashchandran Shanthi、Hwan Hong LIM、栗村直、竹内繁樹、“チャープ PPSLT 素子から発生する広帯域パラメトリック蛍光対の特性評価”, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 3 月 25-28 日, 2011 年
15. 岡本亮、Jeremy L.O'Brien, Holger F .Hofmann, 竹内繁樹、“Knill-Laflamme-Milburn 制御ノットゲートの実現”, 第 24 回量子情報技術研究会 (QIT24), 東京工業大学, 5 月 12-13 日, 2011 年
16. 岡野真之、岡本亮、田中陽、S.Subashchandran, 石田周太郎、西澤典彦、竹内繁樹、“量子光断層撮影に向けた広帯域パラメトリック蛍光対による二光子量子干渉実験”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
17. 小野貴史、岡本亮、竹内繁樹、“標準量子限界を超える光位相測定感度実現方法の比較”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
18. S. Subashchandran, R. Okamoto, A. Tanaka, M. Okano, L.Zhang, L.Kang, J.Chen, P.Wu and S. Takeuchi, “Development of superconducting nanowire single photon detection system for evaluation of ultra broadband parametric fluorescence”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
19. 岡本亮、J.O'Brien, H.F.Hofmann, 竹内繁樹、“Knill-Laflamme-Milburn 制御ノットゲートの実現”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
20. 藤原正澄、野田哲矢、桃原清太、趙洪泉、竹内繁樹、“ナノテーパ光ファイバによる単一発光体の蛍光検出定量評価”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
21. 谷田真人、岡本亮、竹内繁樹、“光量子回路を用いた量子制御スワップ操作の実現”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
22. 家藤美奈子、岡本亮、山形浩一、今井寛、藤原彰夫、竹内繁樹、“光子の位相パラメータの Adaptive な量子推定実験”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年  
田中陽、岡本亮、Hwan Hong Lim、岡野真之、Shanthi Subashchandran、栗村直、Labao Zhang, Lin Kang, Jian Chen, Peiheng Wu, 廣畑徹、竹内繁樹、“チャープ PPSLT 素子から発生する広帯域パラメトリック蛍光対の特性評価 II”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
23. 野田哲矢、藤原正澄、趙洪泉、高島秀聡、竹内繁樹、“ファイバ結合微小球共振器の光量子デバイスへの応用-極低温での共鳴周波数制御-”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
24. H.Q.Zhao, M.Fujiwara, T.Noda and S.Takeuchi, “Phonon side band suppression in NV-fluorescence spectrum by use of substrate effect”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 9 月 21-24 日, 2011 年
25. 千葉孝志、藤原英樹、堀田純一、竹内繁樹、笹木敬司、“高分子薄膜中単一分子の三重項状態寿命解析による局所領域酸素濃度測定法の開発”, 第 47 回応用物理学会北海道支部/第 8 回日本光学会北海道地区合同学術講演会, 北海道大学, 1 月 6-7 日, 2012 年
26. 藤原正澄、野田哲矢、桃原清太、趙洪泉、竹内繁樹、“7k 極低温下における極細テーパ光ファイバと微小球共振器の結合と距離制御”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 3 月 24-27 日, 2012 年
27. 小野貴史、岡本亮、竹内繁樹、“もつれ合い顕微鏡の実現-標準量子限界を超える位相測定感度の応用-“, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 9 月 18-21 日, 2012 年
28. 大山悟史、家藤美奈子、岡本亮、山形浩一、今井寛、藤原彰夫、竹内繁樹、“光子の位相パラメータの適応量子推定実験 II”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 9 月 18-21 日, 2012 年
29. 岡野真之、岡本亮、田中陽、Shanthi Subashchandran、石田周太郎、西澤典彦、竹内繁樹、“量子光断層撮影に向けた二光子量子干渉信号幅の狭窄化と高次分散の影響”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 9 月 18-21 日, 2012 年

30. 田中陽、岡本亮、Hwan Hong Lim、岡野真之、Shanthi Subashchandran、栗村直、Labao Zang、Lin Kang、Jian Chen、Peiheng Wu、廣畑徹、竹内繁樹、“チャープ PPSLT 素子から発生する広帯域パラメトリック蛍光対の周波数相関測定”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 9 月 18-21 日, 2012 年
31. 宮本洋子、尾崎雄亮、竹内繁樹、武田光夫、笹木敬司、“ホログラムシフト法による光子の軌道角運動量もつれ合い状態の検出”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学, 9 月 18-21 日, 2012 年
32. 小野貴史、岡本亮、竹内繁樹、“量子もつれ光子を用いた高感度微分干渉装置の実現”, 大阪大学産業科学研究所第 68 回学術講演会, 大阪大学, 11 月 22 日, 2012 年
33. 岡本亮、家藤美奈子、大山悟史、山形浩一、今井寛、藤原彰夫、竹内繁樹、“適応的な量子状態推定の実証実験”, 第 27 回量子情報技術研究会(QIT27), 慶應義塾大学, 11 月 27-28 日, 2012 年
34. 田中陽、岡本亮、Hwan Hong Lim, 岡野真之、江藤祐、Shanthi Subashchandran、栗村直、Labao Zang、Lin Kang、Jian Chen、Peiheng Wu、廣畑徹、竹内繁樹、“近赤外波長帯における超広帯域周波数相関光子対の実現と観測”, 第 28 回量子情報技術研究会(QIT28), 北海道大学, 5 月 27-29 日, 2013 年
35. M. Fujiwara, H-Q. Zhao, M. Okano, T. Noda, K. Ikeda, H. Sumiya and S. Takeuchi, “Coupling diamond nitrogen vacancy centers with ultrathin optical tapered fibers at cryogenic temperatures toward efficient indistinguishable single photon sources”, The 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 同志社大学, 9 月 16-20 日, 2013 年
36. 岡野真之、横井宇慧、田中陽、岡本亮、竹内繁樹、“量子もつれ光子対生成レートの 2 光子量子干渉への影響”, 日本物理学界 2013 年秋季大会, 徳島大学, 9 月 25-28 日, 2013 年
37. 小野貴史、岡本亮、竹内繁樹、原聡、鷲尾隆、“量子状態データマイニング”, 日本物理学界 2013 年秋季大会, 徳島大学, 9 月 25-28 日, 2013 年
38. 藤原正澄、趙洪泉、岡野真之、野田哲矢、池田和寛、角谷均、竹内繁樹、“狭帯域単一光子源へ向けたダイヤモンド窒素欠陥中心とテーパー光ファイバの結合”, 日本物理学界 2013 年秋季大会, 徳島大学, 9 月 25-28 日, 2013 年
39. A. Mohamed, 藤原正澄、竹内繁樹、“ダイヤモンドナノ結晶とテーパー光ファイバの結合に関する数値解析”, 日本物理学界 2013 年秋季大会, 徳島大学, 9 月 25-28 日, 2013 年
40. 田中陽、岡本亮、岡野真之、Shanthi Subashchandran、江藤祐、Labao Zang、Lin Kang、Jian Chen、Peiheng Wu、廣畑徹、Hwan Hong Lim、栗村直、竹内繁樹、“チャープ PPSLT 素子から発生する広帯域パラメトリック蛍光対の周波数相関測定 II”, 日本物理学界 2013 年秋季大会, 徳島大学, 9 月 25-28 日, 2013 年
41. 江藤祐、岡野真之、田中陽、岡本亮、Hwan Hong Lim、栗村直、竹内繁樹、“パラメトリック蛍光光子対からの和周波光子発生実験”, 日本物理学界 2013 年秋季大会, 徳島大学, 9 月 25-28 日, 2013 年
42. 竹内繁樹、“光子を用いた量子計測”, 量子 ICT フォーラム・第 2 回会合, (独)情報通信研究機構, 10 月 23-25 日, 2013 年
43. 竹内繁樹、“光量子情報科学の現在とその未来”, 大阪大学産業科学研究所第 69 回学術講演会 シンポジウム「産業科学の未来戦略」, 大阪大学, 11 月 15 日, 2013 年
44. 高島秀聡、“ダイヤモンドナノ結晶中の単一窒素欠陥(NV)中心を用いたナノフォトニクスデバイスの実現に向けて”, 大阪大学産業科学研究所第 69 回学術講演会 シンポジウム「産業科学の未来戦略」, 大阪大学, 11 月 15 日, 2013 年
45. 岡本亮、竹内繁樹、“量子的なシャッターで複数スリットを同時に閉じる”, 第 3 回 QUATUO 研究会, 高知工科大学, 1 月 21-22 日, 2014 年
46. 大山悟史、岡本亮、小野貴史、竹内繁樹、山形浩一、藤原彰夫、“光子量子ビットの適応的な量子状態推定”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 3 月 27-30 日, 2014 年
47. 上岡俊也、藤原正澄、高島秀聡、竹内繁樹、“光量子デバイスへの応用を目指したナノ微細加工テーパー光ファイバの作製とその評価”, 日本物理学会第 69 回年次大会, 東海大学, 3

月 27-30 日, 2014 年

48. 岡野真之、永松優一、田中陽、Hwan Hong Lim、岡本亮、西澤典彦、栗村直、竹内繁樹，“広帯域周波数相関光子対による高分解能量子光コヒーレンストモグラフィの実証実験”，第 30 回量子情報技術研究会(QIT)，名古屋大学，5 月 12-13 日，2014 年
49. 竹内繁樹，“量子もつれ光子の計測への応用”，ナノ量子機構シンポジウム，東京大学，5 月 19-20 日，2014 年
50. 岡野真之、岡本亮、西澤典彦、H. H. Lim、栗村直、竹内繁樹，“チャープ PPSLT 素子から発生する広帯域パラメトリック蛍光対による狭線幅二光子量子干渉”，日本物理学会 2014 年秋季大会，中部大学，9 月 7-10 日，2014 年
51. 紙谷和彦、田中歌子、藤原正澄、竹内繁樹、占部伸二，“リニアトラップ中の微粒子を用いたテーパー光ファイバー表面における帯電量測定”，日本物理学会 2014 年秋季大会，中部大学，9 月 7-10 日，2014 年
52. 岡本亮、竹内繁樹，“量子もつれ光を用いた標準量子限界を超える光位相計測技術”，2014 年電子情報通信学会 ソサイエティ大会，徳島大学 常三島キャンパス，9 月 23-26 日，2014 年
53. 佐川達郎、岡本亮、岡野真之、高島秀聡、石野正章、D.Feng Qiu、横山士吉、竹内繁樹，“Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光導波路 On-chip 光子対源の実現に向けて”，日本物理学会第 70 回年次大会，早稲田大学早稲田キャンパス，東京都，3 月 21-24 日，2015 年
54. 小野貴史、谷田真人、岡本亮、H.F.Hofmann、竹内繁樹，“光量子回路を用いた制御スワップゲートの実現”，日本物理学会第 70 回年次大会，早稲田大学早稲田キャンパス，東京都，3 月 21-24 日，2015 年
55. 大江康子、A.Shell、高島秀聡、上岡俊也、藤原正澄、O.Benson、竹内繁樹，“共振器内臓 ナノ光ファイバと量子ドットの結合実験”，日本物理学会第 70 回年次大会，早稲田大学早稲田キャンパス，東京都，3 月 21-24 日，2015 年

#### 【栗村グループ】

1. 片貝年男、Liu Youwen、Shi Jianhong、庄司一郎、中村優、栗村直，“Mg 添加定比組成 LiTaO<sub>3</sub> の温度依存性を含む屈折率分散式の検討”，Optics & Photonics Japan 2009，朱鷺メッセ，11 月 22-24 日，2009 年
2. 片貝年男、Shi Jianhong、庄司一郎、栗村直，“PPMg:SLT における SHG 変換効率の線幅依存性”，レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会，千里ライフサイエンスセンター，2 月 2-4 日，2010 年
3. 片貝年男、Shi Jianhong、庄司一郎、栗村直、大前宣昭、三尾典克，“高出力波長変換時の廃熱評価”，第 57 回応用物理学関係連合講演会，東海大学湘南キャンパス，3 月 17-20 日，2010 年
4. 吉村真勝、野中章裕、菅谷俊夫、平野琢也、菊池清史、杉浦かおり、栗村直、中島啓幾，“高効率周期分極反転光導波路を用いた通信波長帯パルス光のスクイーミング”，日本物理学会 2010 年秋季大会，大阪府立大学中百舌鳥キャンパス，9 月 23-26 日，2010 年
5. 杉浦かおり、菊池清史、谷澤健、栗村直、鋤塚治彦、並木周、中島啓幾、市川潤一郎，“高効率 QPM-ARW による広帯域 SFG-DFG 波長変換とパラメトリック可変分散補償への適用”，第 71 回 応用物理学学会学術講演会，長崎大学文教キャンパス，9 月 14-17 日，2010 年
6. 河野太一、行方直人、栗村直、井上修一郎，“1GHz 正弦電圧ゲート動作型 InGaAs/InP APD を用いた偏光量子もつれ光子対の検出”，第 71 回 応用物理学学会学術講演会，長崎大学文教キャンパス，9 月 14-17 日，2010 年
7. 河野太一、行方直人、栗村直、井上修一郎，“正弦電圧ゲート動作型 InGaAs/InP APD を用いた偏光量子もつれ配送”，第 23 回量子情報技術研究会(QIT23)，東京大学小柴ホール，11 月 15-16 日，2010 年
8. 村中勇介、杉浦かおり、栗村直、菊池清史、高磊、中島 啓幾、市川 潤一郎，“QPM 接着リッジ導波路を用いた CW 励起高効率差周波発生”，2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連

- 合講演会, 早稲田大学 早稲田キャンパス, 3月15-18日, 2012年
9. 望月英気、村中勇介、樫田拓也、栗村直、中島 啓幾、菊池清史、寺崎章宏, “センシングに向けたクラッドレス非線形導波路”, 2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学 早稲田キャンパス, 3月15-18日, 2012年
  10. 杉浦かおり、栗村直、村中勇介、菊池清史、鈴木 太郎、中島 啓幾、市川 潤一郎, “SILICAGRIN®レンズを用いた QPM 波長変換モジュールの色収差抑制”, 2012年春季 第59回 応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学 早稲田キャンパス, 3月15-18日, 2012年
  11. 野口慶介、長島亘、Hwan Hong Lim、庄司 一郎、栗村直、加藤 進, “位相整合カロリトリによる SHG 結晶中の温度上昇の評価”, レーザー学会学術講演会第33回年次大会, 姫路商工会議所・イーグレ姫路, 1月28-30日, 2013年
  12. 長島亘、野口慶介、Hwan Hong Lim、栗村直、庄司一郎, “シングルパス SHG における実効熱容量の集光パラメータ依存性”, 第60回応用物理学学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 3月27-30日, 2013年
  13. H. H. Lim、栗村直、Nan Ei Yu, “Suppression of parasitic green light in quasi-phase-matched optical parametric oscillation”, レーザー学会学術講演会第34回年次大会, 北九州国際会議場, 1月20-22日, 2014年
  14. 清水正樹、堀川聡志、樫田拓也、藤井一史、栗村直, “720 nm 周期 QPM 接着リッジ導波路による逆結合第二高調波発生”, 2014年第61回応用物理学学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 3月17-20日, 2014年
  15. 堀川聡志、樫田拓也、清水正樹、岡田大地、栗村直、中島 啓幾, “低閾値光パラメトリック発振をめざすブラッググレーティング付接着リッジ導波路”, 2014年第75回応用物理学学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 9月17-20日, 2014年
  16. 清水正樹、樫田拓也、堀川聡志、岡田大地、藤井一史、栗村直、中島 啓幾, “Mg:LN を用いた 540 nm 周期分極反転構造”, 2014年第75回応用物理学学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 9月17-20日, 2014年
  17. 野中幹修、長島亘、林桓弘、栗村直、庄司一郎, “高出力 SHG 用排熱モジュールの特性改善”, レーザー学会学術講演会第35回年次大会, 東海大学高輪校舎, 1月11日, 2015年
  18. LIM Hwan Hong、栗村直、藤井一史、岡野真之、竹内繁樹, “Violet second harmonic generation in PPMgSLT adhered slab waveguide”, レーザー学会学術講演会第35回年次大会, 東海大学高輪校舎, 1月11日, 2015年

#### 【ホフマングループ】

1. H. F. Hofmann, “Quantum determinism of weak measurement statistics: Laplace's demon's quantum cousin”, QIT22, Osaka, 11, May, 2010
2. H. F. Hofmann, “On the relation between transformation dynamics and quantum statistics in weak measurements”, QIT24, Tokyo, 12, May, 2011
3. C. Ren, “Multiparty clock synchronization with GHZ states”, QIT26, Fukui, 21, May, 2012
4. H. F. Hofmann, “Measurement uncertainties in the quantum formalism: quasi-realities of individual systems”, QIT26, Fukui, 22, May, 2012
5. M. Hiroishi and H. F. Hofmann, “弱測定統計を用いた量子テレポーテーションの解析”, 第26回量子情報技術研究会(QIT26), 福井大学, 5月21-22日, 2012年
6. H. F. Hofmann, “Measurement uncertainties in the quantum formalism: quasi-realities of individual systems”, 第26回量子情報技術研究会(QIT26), 福井大学, 5月21-22日, 2012年
7. M. Iinuma, Y. Suzuki and H. F. Hofmann, “偏光の連続測定による結合確率分布の導出” 量子論における統計的推測の理論と応用, 京都大学数理解析研究所, 10月30日-11月1日, 2012年
8. Y. Suzuki, M. Iinuma and H. F. Hofmann, “偏光の連続測定にみる測定の不確定性がな



い結合量子統計”,第27回量子情報技術研究会(QIT27),慶應義塾大学,11月27-28日  
2012年

9. T. Okazaki, M. Iinuma, Y. Suzuki, A. Shahana and H. F. Hofmann, “Sagnac 干渉計を用いた偏光の弱測定”, JPS, 広島大学, 3月26-29日, 2013年
10. H. F. Hofmann, “Weak valued statistics as fundamental explanation of quantum physics”, QIT 28, 北海道大学, 5月27-28日, 2013年
11. 飯沼昌隆, 鈴木佑太朗, 木下竜二, H. F. Hofmann, “二準位系での Ozawa 不等式の誤差と擾乱の実験的評価”, QIT 29, 早稲田大学, 11月18-19日, 2013年
12. 鈴木佑太朗, 飯沼昌隆, 木下竜二, H. F. Hofmann, “偏光の連続測定で得られる複素結合確率の実験的検証”, QIT 29, 早稲田大学, 11月18-19日, 2013年
13. 鈴木佑太朗, 飯沼昌隆, 木下竜二, H. F. Hofmann, “偏光の連続測定による複素結合確率分布の再構築”, 日本物理学会, 東海大学, 3月27-30日, 2014年
14. H. F. Hofmann, “The quantum laws of physics - a new description of dynamics and causality”, QIT 30, 名古屋大学, 12-13, May, 2014

#### ■口頭発表 国際会議

##### 【竹内グループ】

1. R. Okamoto, J. O'Brien, H. F. Hofmann, T. Nagata, K. Sasaki and S. Takeuchi, “Experimental Realization of An Optical Entanglement Filter”, International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics, Tokyo, 18, Nov., 2009
2. M. Fujiwara, A. Tanaka, K. Tobaru, H. Q. Zhao, H. Takashima and S. Takeuchi, “Polarization-purity spectra of a tapered-fiber-coupled microsphere cavity system at cryogenic temperatures”, SPIE Photonics west 2011, The Moscone Center, USA, 22-27, Jan., 2011
3. H. Q. Zhao, M. Fujiwara, S. Takeuchi, “Suppression of photon sidebands in the spectrum of nitrogen vacancy centers in diamond nano-crystals”, LASE SPIE Photonics west, The Moscone Center San Francisco, USA, 21-26, Jan., 2012
4. T. Schröder, M. Fujiwara, T. Noda, H. Q. Zhao, O. Benson, S. Takeuchi, “Near-field coupling of a single NV center to a tapered fiber”, LASE SPIE Photonics west, The Moscone Center San Francisco, USA, 21-26, Jan., 2012
5. H. Q. Zhao, M. Fujiwara, T. Schröder, O. Benson and S. Takeuchi, “Toward the realization of efficient indistinguishable single photon sources using diamond NV centers on optical nanofibers”, 12th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2012), Suzhou University, China, 23-26, Aug., 2012
6. A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Subashchandra, M. Okano, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, T. Hirohata, S. Kurimura and S. Takeuchi, “Spectral properties of ultra-broadband entangled photons generated from chirped-MgSLT crystal towards monocycle entanglement generation”, SPIE Photonics West 2013, The Moscone Center, USA, 2-7, Feb., 2013
7. S. Takeuchi, R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai and A. Fujiwara, “Experimental demonstration of adaptive quantum state estimation”, CLEO/EUROPE-IQEC 2013, ICM Center of the New Munich Trade Fair Center, 12-16, May, 2013
8. M. Fujiwara, H. Q. Zhao, M. Okano, T. Noda, K. Ikeda, H. Sumiya and S. Takeuchi, “Coupling diamond nitrogen vacancy centers with ultrathin optical tapered fibers at cryogenic temperatures toward efficient indistinguishable single photon sources”, International Conference on Diamond and Carbon Materials, Riva del Garda, 2-5, Sep., 2013
9. M. Fujiwara, M. Almokhtar, H. Takashima and S. Takeuchi, “Nanodiamond nitrogen vacancy centers coupled with tapered optical fibers as hybrid quantum nanophotonic devices”, 78th Annual Meeting of the DPG and DPG Spring Meeting, Humboldt University, 17-21, Mar., 2014

10. M. Okano, H. H. Lim, R. Okamoto, A. Tanaka, Y. Nagamatsu, N. Nishizawa, S. Kurimura and S. Takeuchi, "Ultrabroadband spontaneous parametric fluorescence in 800 nm region toward ultrahigh-resolution quantum optical coherence tomography", Frontiers in Optics (FiO) / Laser Science (LS) 2014 conference, JW Marriott Tucson Starr Pass Resort, 19-23, Oct., 2014

【栗村グループ】

1. A. Terasaki, K. Kikuchi, Y. Ogiso, S. Kurimura, R. Kou, H. Nakajima, "Non-destructive uniformity characterization in waveguide-type wavelength converters", MOC 2009, National Museum of Emerging Science and Innovation, Japan, 27, Oct., 2009
2. H. Iliev, D. Chuchumishev, I. Buchvarov, S. Kurimura, V. Petrov and U. Griebner, "Passive mode-locking of a Nd:GdVO<sub>4</sub> laser by intracavity SHG in periodically-poled stoichiometric lithium tantalite", Advanced Solid-State Photonics (ASSP) 2010, The Westin San Diego, USA, 31, Jan., -3, Feb., 2010
3. S. Kurimura, A. Terasaki, K. Kikuchi, Y. Ogiso, R. Kou, H. Nakajima, K. Kondou and J. Ichikawa, "Opto-fluidic characterization of nonlinear-optical waveguide", CLEO 2010, San Jose McEnery Convention Center, USA, 17-23, May, 2010
4. K. Kikuchi, S. Kurimura, R. Kou, A. Terasaki, H. Nakajima, K. Kondou and J. Ichikawa, "Efficient Lithium Niobate Waveguide for Wide-Dynamic-Range Wavelength Conversion", CLEO 2010, San Jose McEnery Convention Center, USA, 17-23, May, 2010
5. H. Iliev, D. Popmintchev, I. Buchvarov, S. Kurimura, U. Griebner and V. Petrov, "Nd:GdVO<sub>4</sub> Laser Passively Mode-Locked by Cascaded Nonlinearity in Periodically-Poled Lithium Tantalate", CLEO 2010, San Jose McEnery Convention Center, USA, 17-23, May, 2010
6. K. Tanizawa, K. Kikuchi, K. Sugiura, H. Kuwatsuka, S. Kurimura, H. Nakajima, J. Ichikawa and S. Namiki, "Parametric Tunable Dispersion Compensator Using Cascaded Sum- and Difference-Frequency Generation of PPLN Waveguide", ECOC 2010, Centro Congressi Lingotto, Italy, 19-23, Sep., 2010
7. K. Sugiura, K. Kikuchi, K. Tanizawa, S. Kurimura, H. Nakajima, H. Kuwatsuka, J. Ichikawa and S. Namiki, "Wide-band Tunable SFG-DFG Wavelength Conversion in Efficient LN-QPM Adhered Ridge Waveguide", CLEO 2011, Baltimore Convention Center, USA, 1-6, May, 2011
8. M. Yoshimura, T. Sugaya, K. Kikuchi, K. Sugiura, S. Kurimura and H. Nakajima, "Generation of Pulsed Squeezed Light at Telecommunication Wavelength Using a High Efficiency PPLN Optical Waveguide", CLEO/Europe-EQEC2011, International Congress Centre, Germany, 22-26, May, 2011
9. H. H. Lim, T. Katagai, S. Kurimura, N. Ohmae, N. Mio, T. Shimizu and I. Shoji, "Thermal Management in High Power CW SHG Characterized by PMC", Nonlinear Optics (NLO), Marriott Kauai Beach Resort, USA, 17-22, July, 2011
10. H. H. Lim, T. Katagai, T. Shimizu, S. Kurimura, N. Ohmae, N. Mio and I. Shoji, "Optimal Pump Linewidth for Conversion Efficiency in cw single-pass QPM SHG", IQEC/CLEO Pacific Rim, Sydney Convention and Exhibition Centre, Australia, 28, Aug. -1, Sep., 2011
11. Y. Muranaka, K. Sugiura, S. Kurimura, R. Kou, K. Kikuchi, H. Nakajima, J. Ichikawa, "CW-pumped +11.6 dB gain in DFG using an efficient QPM adhered-ridge waveguide", CLEO2012, the San Jose McEnery Convention Center, USA, 6-11, May, 2012
12. H. H. Lim, S. Kurimura, T. Shimizu, K. Noguchi, N. Ohmae, N. Mio and I. Shoji, "Phase-Matched Calorimetry for Thermal Performance Determination in CW High Power SHG", The 8th Asia Pacific Laser Symposium(APLS), XiangMing Hotel, China, 27-31, May, 2012

13. H. H. Lim, S. Kurimura, K. Noguchi, W. Nagashima and I. Shoji, "Study on Thermal Lensing Effect for high power Green SHG Laser", Laser Display Conference 2013, OPTICS & PHOTONICS International Exhibition 2013(OPIE13), Pacifico Yokohama, Japan, 23-26, Apr., 2013
14. T. Utsugida, S. Kurimura, Y. Muranaka, E. Mochizuki and H. Nakajima, "Silicon-platformed nonlinear waveguide in lithium niobate membrane", CLEO2013, San Jose Convention Center, USA, 9-14, Jun., 2013
15. S. Kurimura, H. H. Lim, W. Nagashima, K. Noguchi and I. Shoji, "Thermal management for high-power wavelength conversion", CLEO-PR& OECC/PS 2013, Kyoto International Conference Center, Japan, 30, Jun. -4, July, 2013
16. H. H. Lim, S. Kurimura, W. Nagashima, K. Noguchi and I. Shoji, "Dephasing and lensing in high power wavelength conversion", Nonlinear Optics (NLO), The Fairmont Orchid, USA, 21-26, July, 2013
17. H. H. Lim, S. Kurimura, W. Nagashima, K. Noguchi and I. Shoji, "Photo-thermal Effects in High-Power QPM Wavelength Conversion", JSAP-OSA Joint Symposia 2013, Doshisha University Kyotanabe Campus, Japan, 16-20, Sep., 2013
18. S. Kurimura, H. H. Lim and N. E. Yu, "Green-Suppressed Quasi-Phase-Matched Optical Parametric Oscillation", Advanced Solid-State Lasers (ASSL) 2013, Paris Marriott Rive Gauche Hotel and Convention Center, France, 27, Oct., -1, Nov., 2013.
19. H. H. Lim, S. Kurimura and N. E. Yu, "Suppression of parasitic green light in optical parametric oscillator by engineered quasi-phase-matching structures", Optics & Photonics International Congress 2014 (OPIC'14), Pacifico Yokohama, Japan, 22-25, Apr., 2014

#### 【ホフマングループ】

1. H. F. Hofmann, "On the estimation of interaction parameters in weak measurements", 10th international conference on Quantum Communication, Measurement and Communication, Brisbane, Australia, 19-23, July, 2010
2. H. F. Hofmann, "On the relation between quantum parameter estimation and weak values", 10th Asian Conference on Quantum Information Science, Tokyo, Japan, 27-31, Aug., 2010
3. C. Ren, "Quantum tomography of photonic time-energy entanglement by photon bunching with short-time reference pulses", CQIQC IV, Toronto, Canada, 11, Aug., 2011
4. H. F. Hofmann, "Characterization of decoherence in a quantum channel using weak measurement", CLEO pacific rim/IQEC 2011, Sydney, Australia, 30, Aug., 2011
5. H. F. Hofmann, "Weak joint probabilities as informationally complete representations of quantum statistics", QIPC 2011, Zurich, Switzerland, 6, Sep., 2011
6. H. F. Hofmann, "Weak measurements and quasi-realities: explaining the paradoxical statistics of quantum systems", Workshop on weak measurement, Tokyo, 8, May, 2012
7. H. F. Hofmann, "Evaluation of joint probabilities for non-commuting observables from correlations between quantum clones", DAMOP, Hyatt Regency Orange County, Anaheim, California, USA, 4-8, June, 2012
8. H. F. Hofmann, "Evaluation of joint probabilities for non-commuting observables from correlations between quantum clones", DAMOP 2012, Los Angeles, USA, 7, Jun., 2012
9. H. F. Hofmann, "What the complex joint probabilities observed in weak measurements tell us about quantum physics", QCMC 2012, Wien, Austria, 30, Jul., 2012
10. H. F. Hofmann, "Optimal cloning as a universal quantum measurement: resolution, back-action, and joint probabilities", QCMC 2012, Wien, Austria, 30, Jul., 2012

11. C. Ren, "How to make optimal use of multipartite entanglement in clock synchronization", QCMC 2012, Wien, Austria, 31, Jul., 2012
12. C. Ren, "Analysis of time-energy entanglement by correlated single photon interference", AQIS 2012, Suzhou, China, 23, Aug., 2012
13. C. Ren and H. F. Hofmann, "Measuring time-energy entanglement at ultrashort timescales", CSICQM, CAS, Beijing, China, 27 June-1 July 2013
14. H. F. Hofmann, "Fundamental laws for quantum physics: How inequality violations originate from weak value statistics", CQIQC, University of Toronto, Toronto, Canada, 12-16 August 2013
15. H. F. Hofmann, "How photons get from A to B: quantum measurements of motion", CEWQO, Palace of the Royal Academies, Bruxelles, Belgium, 6/23-6/27, 2014
16. Y. Suzuki, Masataka Inuma, Ryuji Kinoshita and Holger F. Hofmann, "Reconstruction of the complex joint probabilities for sequential measurements of photon polarization", CEWQO, Palace of the Royal Academies, Bruxelles, Belgium, 23-27, Jun., 2014

③ ポスター発表 (国内会議 61 件、国際会議 66 件)

#### ■ポスター発表 国内会議

##### 【竹内グループ】

1. 尾崎雄亮、川瀬大輔、青木俊介、宮本洋子、竹内繁樹、武田光夫、笹木敬司、"パラメトリック蛍光光子対の軌道角運動量もつれ合い状態の検出", 第21回量子情報技術研究会(QIT21), 電気通信大学, 11月4-5日, 2009年
2. 藤原正澄、高島秀聡、桃原清太、趙洪泉、笹木敬司、竹内繁樹、"テーパファイバ・微小球結合系における強結合状態の実現に向けて", 第21回量子情報技術研究会、東京都調布市, 11月4日, 2009年
3. 竹内 繁樹、"光子を操る—量子情報フォトニクスの展開—", 大阪大学産業科学研究所創立70周年記念講演会(第65回学術講演会), 大阪府吹田市, 12月3日, 2009年
4. 岡本亮、藤原正澄、竹内繁樹、"量子情報フォトニクス 2009", 北海道大学電子科学研究所平成21年度研究交流会, 北海道大学, 1月8日, 2010年
5. R. Okamoto, "Realization of a quantum entanglement filter", 共同研究拠点発足記念シンポジウム, 大阪府茨木市, 3月24日, 2010年
6. 藤原正澄、"量子情報フォトニクスの展開", 日本学術会議 主催 公開シンポジウム 先端フォトニクスの展望, 日本学術会議講義堂, 東京, 4月9日, 2010年
7. 藤原正澄、桃原清太、趙洪泉、竹内繁樹、"テーパファイバ・微小球結合系における強結合状態の実現に向けて2", 第22回量子情報技術研究会(QIT22), 大阪大学銀杏会館, 5月10-11日, 2010年
8. 田中陽、桃原清太、藤原正澄、岡本亮、竹内繁樹、"ファイバ結合微小球共振器の単一光子レベルにおけるコヒーレントな位相シフトスペクトル測定", 第22回量子情報技術研究会(QIT22), 大阪大学銀杏会館, 5月10-11日, 2010年
9. 桃原清太、藤原正澄、竹内繁樹、"光ナノファイバの透過率減少に関する研究", 第22回量子情報技術研究会(QIT22), 大阪大学銀杏会館, 5月10-11日, 2010年
10. M.Okano, R.Okamoto, A.Tanaka, S.Subashchandran, H.F.Hofmann, S.Kurimura, N.Nishizawa and S.Takeuchi, "Toward the Realization of Monocycle Entangled Photon Sources and its Application to Quantum Optical Coherence Tomography", 最先端研究開発支援プログラム量子情報プロジェクト第1回夏期研修会, ホテルサンライズ知念, 沖縄市, 8月18-28日, 2010年
11. H.Q.Zhao, M.Fujiwara and S.Takeuchi, "Investigation of NV centers in diamond nano-crystals by laser Scanning Confocal microscopy", 日本物理学会 2010年秋季大会, 大阪府立大学 中百下鳥キャンパス, 9月23-26日, 2010年

12. A.Tanaka, K.Toubaru, H.Takashima, M.Fujiwara, R.Okamoto and S.Takeuchi, "Coherent Phase Shift Spectra of Fiber-Microsphere System at the Single Photon Level", Updating Quantum Cryptography and Communications 2010, ANA インターコンチネンタルホテル東京, 10月18-20日, 2010年
13. M.Fujiwara, K.Toubaru, A.Tanaka, H.Q.Zhao, H.Takashima, K.Sasaki and S.Takeuchi, "Fiber-coupled Microsphere at Cryogenic Temperatures for Cavity QED Experiments Using Single Diamond NV Centers", Updating Quantum Cryptography and Communications 2010, ANA インターコンチネンタルホテル東京, 10月18-20日, 2010年
14. H.Q.Zhao, M.Fujiwara and S.Takeuchi, "Investigation of NV centers in diamond nano-crystals by laser Scanning Confocal microscopy", Updating Quantum Cryptography and Communications 2010, ANA インターコンチネンタルホテル東京, 10月18-20日, 2010年
15. 岡本亮, "Knill-Laflamme-Milburn 制御ノットゲートの実現—高効率な光非線形性に基づく光量子回路", G-COE「物質の量子機能解明と未来型機能材料創出」平成 22 年度 G-COE 若手秋の学校「量子物性の解明と新機能」, 岡山いこいの村, 10月28-30日, 2010年
16. 谷田真人, "光量子回路を用いた量子制御スワップ操作の実現に向けて", G-COE「物質の量子機能解明と未来型機能材料創出」平成 22 年度 G-COE 若手秋の学校「量子物性の解明と新機能」, 岡山いこいの村, 10月28-30日, 2010年
17. 岡本亮, Jeremy L.O'Brien, Holger F.Hofmann, 竹内繁樹, "高効率な人工非線形性に基づく量子制御ノットゲートの実現", 大阪大学産業科学研究所 第 66 回学術講演会, 大阪大学産業科学研究所 講堂, 11月22日, 2010年
18. 岡本亮, 谷田真人, 家藤美奈子, Jeremy L.O'Brien, Holger F.Hofmann, 竹内繁樹, "光子を用いた量子回路とその量子制御に関する研究", 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010, ホテルニューフジヤ熱海, 12月8-11日, 2010年
19. 藤原正澄, 趙洪泉, 桃原清太, 野田哲矢, 田中陽, 竹内繁樹, "テーパーファイバ・微小球結合系を用いた量子位相ゲートの実現に向けて", 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010, ホテルニューフジヤ熱海, 12月8-11日, 2010年
20. 小野貴史, 岡本亮, 竹内繁樹, "Besting the standard quantum limit with advanced photon manipulation in optical phase measurement", 量子情報処理プロジェクト全体会議 2010, ホテルニューフジヤ熱海, 12月8-11日, 2010年
21. 藤原正澄, 趙洪泉, 桃原清太, 野田哲矢, 田中陽, 竹内繁樹, "テーパーファイバ・微小球結合系を用いた量子位相ゲートの実現に向けて", 公開シンポジウム「ナノ量子情報エレクトロニクスの進展」, 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構, 12月22日, 2010年
22. 岡本亮, Jeremy L.O'Brien, Holger F.Hofmann, 竹内繁樹, "Knill-Laflamme-Milburn 制御ノットゲートの実現—高効率な光非線形性に基づく光量子回路", 公開シンポジウム「ナノ量子情報エレクトロニクスの進展」, 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構, 12月22日, 2010年
23. 岡本亮, 竹内繁樹, "複数光路間の非局所的な 2 光子干渉の実証実験", 北海道大学電子科学研究所平成 22 年度研究交流会, 北海道大学電子科学研究所, 1月7日, 2011年
24. 岡野真之, 小野貴史, "量子もつれ光子対の量子計測・量子光断層撮影への応用", 北海道大学電子科学研究所平成 22 年度研究交流会, 北海道大学電子科学研究所, 1月7日, 2011年
25. 小野貴史, 岡本亮, 竹内繁樹, "標準量子限界を破る光学的位相差測定—微分干渉顕微鏡への応用—", 北海道大学電子科学研究所平成 22 年度研究交流会, 北海道大学電子科学研究所, 1月7日, 2011年
26. 岡野真之, 岡本亮, Shanthi Subashchandran, 石田周太郎, 西澤典彦, 竹内繁樹, "広帯域パラメトリック蛍光対の量子光断層撮影への応用", 第 24 回量子情報技術研究会

- (QIT24), 東京工業大学, 5月12-13日, 2011年
27. 小野貴史、岡本亮、竹内繁樹、“もつれ合い光子の微分干渉顕微鏡への応用”, 第24回量子情報技術研究会 (QIT24), 東京工業大学, 5月12-13日, 2011年
  28. 家藤美奈子、岡本亮、山形浩一、今井寛、藤原彰夫、竹内繁樹、“光子の位相パラメータの Adaptive な量子推定実験”, 第24回量子情報技術研究会 (QIT24), 東京工業大学, 5月12-13日, 2011年
  29. 田中陽、岡本亮、Hwan Hong Lim、岡野真之、Shanthi Subashchandran、栗村直、竹内繁樹、“チャープ疑似位相整合素子による広帯域パラメトリック蛍光対のスペクトル特性”, 第24回量子情報技術研究会 (QIT24), 東京工業大学, 5月12-13日, 2011年
  30. 野田哲矢、藤原正澄、趙洪泉、高島秀聡、竹内繁樹、“微小球の共鳴周波数温度特性の材質依存性”, 第24回量子情報技術研究会 (QIT24), 東京工業大学, 5月12-13日, 2011年
  31. 谷田真人、岡本亮、竹内繁樹、“光量子回路を用いた量子制御スワップ操作の実現に向けて”, 第24回量子情報技術研究会 (QIT24), 東京工業大学, 5月12-13日, 2011年
  32. 藤原正澄、須貝祐子、藤井律子、野田哲矢、桃原清太、趙洪泉、橋本秀樹、竹内繁樹、“ナノ光ファイバーによる単一分子分光とその光合成色素蛋白複合体への応用”, 日本物理学会 2011年秋季大会, 富山大学, 9月21-24日, 2011年
  33. 岡本亮, “光子レベルの非線形素子を組み合わせた光量子回路の実現”, 第二回「先端フォトニクスシンポジウム」, 日本学術会議講堂, 10月7日, 2011年
  34. 岡野真之、岡本亮、田中陽、Shanthi Subashchandran、石田周太郎、西澤典彦、竹内繁樹、“広帯域パラメトリック蛍光対の生成および量子光断層撮影への応用”, CREST「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」領域 研究状況報告会, 大田区産業プラザ(PiO), 10月26-27日, 2011年
  35. 小野貴史、岡本亮、竹内繁樹、“標準量子限界を超える光位相測定感度実現方法の比較”, 第25回量子情報技術研究会(QIT25), 大阪大学, 11月21-22日, 2011年
  36. S.Subashchandran, R.Okamoto, A.Tanaka, M.Okano, L.Zhang, L.Kang, J.Chen, P.Wu, S.Takeuchi, “Ultra-low dark count Superconducting single photon detectors: Spectral dependence of detection efficiency”, 第25回量子情報技術研究会(QIT25), 大阪大学, 11月21-22日, 2011年
  37. 岡野真之, “広帯域量子もつれ光子対光源による量子光断層撮影”, 大阪大学産業科学研究所第67回産研学術講演会, 大阪大学, 11月22日, 2011年
  38. 小野貴文、岡本亮、竹内繁樹、“もつれ合い光子対の微分干渉顕微鏡への応用”, 電子科学研究所平成23年度研究交流会, 北海道大学, 1月6日, 2012年
  39. 岡本亮、竹内繁樹、“経路もつれ合いの付与による伝令付き光量子ゲート”, 第26回量子情報技術研究会(QIT26), 福井大学, 5月21-22日, 2012年
  40. 上岡俊也、藤原正澄、竹内繁樹, “高効率単一光子源応用を目指したナノ微細加工テーパ光ファイバの作成”, 日本物理学会 2012年秋季大会, 横浜国立大学, 9月18-21日, 2012年
  41. 岡野真之、岡本亮、田中陽、Shanthi Subashchandran、石田周太郎、西澤典彦、竹内繁樹, “広帯域パラメトリック蛍光対による量子光断層撮影の分散耐性実証実験”, 第27回量子情報技術研究会(QIT27), 慶應義塾大学, 11月27-28日, 2012年
  42. 江藤祐、岡野真之、田中陽、Shanthi Subashchandran、岡本亮、Hwan Hong Lim、栗村直、竹内繁樹, “和周波発生によるパラメトリック蛍光対の時間相関幅測定に向けて”, 第27回量子情報技術研究会(QIT27), 慶應義塾大学, 11月27-28日 2012年
  43. 横井宇慧、岡野真之、岡本亮、竹内繁樹, “Hong-Ou-Mandel 干渉の入射光子レートの影響”, 第27回量子情報技術研究会(QIT27), 慶應義塾大学, 11月27-28日 2012年
  44. 谷田真人、小野貴史、岡本亮、竹内繁樹, “複数の量子ゲートからなる光量子回路のエラー解析”, 第27回量子情報技術研究会(QIT27), 慶應義塾大学, 11月27-28日 2012年
  45. 岡野真之、岡本亮、竹内繁樹, “量子もつれ光子対による高分解能量子光断層撮影”, 北海

道大学電子科学研究所平成 24 年度研究交流会, 北海道大学電子科学研究所, 1 月 11 日, 2013 年

46. 小野貴史、原聡、鷺尾隆、岡本亮、竹内繁樹, “光計測とその応用”, 平成 24 年度アライアンス成果報告会, 北海道大学, 4 月 23 日, 2013 年
47. 岡野真之, “量子情報フォトンクスの展開と光断層撮影への応用”, 日本学術会議主催公開シンポジウム第 3 回先端フォトンクスシンポジウム, 日本学術会議, 4 月 26 日, 2013 年
48. 高島秀聡、任芳、田中嘉人、藤原英樹、笹木敬司, “ファイバー微小球共振器に結合した金属ナノ構造体からの二光子発光”, 第 28 回量子情報技術研究会 (QIT28), 北海道大学, 5 月 27-29 日, 2013 年
49. M. Almokhtar, M. Fujiwara and S. Takeuchi, “The effect of diamond nanocrystal structures to the coupling of single nitrogen vacancy centers with tapered nanofibers”, 第 28 回量子情報技術研究会 (QIT28), 北海道大学, 5 月 27-29 日, 2013 年
50. 小野貴史、岡本亮、竹内繁樹、原聡、鷺尾隆, “量子情報データマイニング”, 第 29 回量子情報技術研究会 (QIT29), 早稲田大学, 11 月 18-19 日, 2013 年
51. 上岡俊也、藤原正澄、竹内繁樹, “高効率単一光子源への応用を目指したナノ微細加工テーパー光ファイバの作成”, 第 29 回量子情報技術研究会 (QIT29), 早稲田大学, 11 月 18-19 日, 2013 年
52. 高島秀聡、上岡俊也、藤原正澄、竹内繁樹, “ダイヤモンドナノ結晶中の単一窒素欠陥中心を用いたナノフォトンクスデバイスの実現に向けて”, 平成 25 年度北大電子科学研究所研究交流会, 北海道大学, 1 月 10 日, 2014 年
53. 竹内繁樹、岡本亮、藤原正澄, “量子のふしぎな性質を追求し、まったく新しい科学・技術の芽を育てます”, 大阪大学未来戦略機構シンポジウム Opt OSAKA 2014 in Tokyo, サンケイプラザ, 3 月 6 日, 2014 年
54. 岡野真之, “量子もつれ光子対による超高分解能量子光コヒーレンストモグラフィに向けて”, 基礎物理学研究所研究会 量子情報の新展開, 京都大学, 3 月 23-25 日, 2014 年
55. 田中陽、岡本亮、Hwan Hong Lim, 岡野真之、江藤祐、Shanthi Subashchandran、栗村直、Labao Zang、Lin Kang、Jian Chen、Peiheng Wu、廣畑徹、竹内繁樹, “二色量子干渉による超広帯域エネルギー量子もつれ光子対検出”, 基礎物理学研究所研究会 量子情報の新展開, 京都大学, 3 月 23-25 日, 2014 年
56. 佐川達郎、岡本亮、岡野真之、石野正章、横山士吉、竹内繁樹, “光量子情報応用に向けた Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 光導波路の作成と評価”, 第 30 回量子情報技術研究会 (QIT), 名古屋大学, 5 月 12-13 日, 2014
57. 大江康子、上岡俊也、A.Shell, 高島秀聡、藤原正澄、O.Benson, 竹内繁樹, “共振器内臓ナノ光ファイバと量子ドットの結合実験”, 第 30 回量子情報技術研究会 (QIT)、名古屋大学、5 月 12-13 日、2014
58. 永松優一、岡野真之、田中陽、岡本亮、西澤典彦、竹内繁樹, “量子光コヒーレンストモグラフィの高分解能二次元画像実現と分散耐性の実証”, 第 30 回量子情報技術研究会 (QIT), 名古屋大学, 5 月 12-13 日, 2014

#### 【ホフマングループ】

1. C. Ren and H. F. Hofmann, “Multiparty clock synchronization with GHZ states”, 第 26 回量子情報技術研究会 (QIT26), 福井大学, 5 月 21-22 日, 2012 年
2. C. Ren and H.F. Hofmann, “Quantum properties of a coherent single-photon frequency comb”, QIT 28, 北海道大学, 5 月 27-28 日, 2013 年
3. 新居 大記, Holger F. Hofmann, “量子測定における誤差と擾乱の統計”, QIT 30, 名古屋大学, 5 月 12-13 日, 2014 年

#### ■ポスター発表 国際会議

##### 【竹内グループ】

1. M. Fujiwara, K. Toubaru, H. Takashima, T. Asai and S. Takeuchi, "Toward the realization of the strong coupling between a Diamond", International Symposium on Quantum Nanophotonics and Nanoelectronics, Tokyo, 18, Nov., 2009
2. M. Fujiwara, H. Takashima, K. Toubaru, H. Q. Zhao, K. Sasaki and S. Takeuchi, "Toward the realization of the strong coupling between a Diamond NV center and a microsphere resonator with a tapered fiber", 13th SANKEN International Symposium 2010, Osaka, 18-19, Jan., 2010
3. M. Tanida, T. Nagata, R. Okamoto, K. Sasaki and S. Takeuchi, "Highly-pure heralding single-photon sources for linear optical quantum computation", 13th SANKEN International Symposium 2010, Osaka, 18-19, Jan., 2010
4. H. Q. Zhao, M. Fujiwara, H. Takashima, K. Sasaki and S. Takeuchi, "NV-center investigation in diamond nano granules by laserscanning confocal microscopy", International Symposium of Joint Research Network on Advanced Materials and Devices "Chou", Hokkaido, 25, Mar., 2010
5. M. Tanida, T. Nagata, R. Okamoto, K. Sasaki and S. Takeuchi, "Highly-pure heralding single-photon sources for linear optical quantum computation", International Symposium of Joint Research Network on Advanced Materials and Devices "Chou", Hokkaido, 25, Mar., 2010
6. A. Tanaka, K. Toubaru, M. Fujiwara, R. Okamoto and S. Takeuchi, "Quantum Process Tomography of Microsphere Cavity-Coupled Tapered Fiber System", CREST 2010 International Symposium on Physics of Quantum Technology, National Institute of Informatics Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, 6-9, Apr., 2010
7. A. Tanaka, K. Toubaru, H. Takashima, M. Fujiwara, R. Okamoto and S. Takeuchi, "Coherent Phase Shift Spectra of Fiber-Microsphere System at the Single Photon Level", Updating Quantum Cryptography and Communications 2010, ANA インターコンチネンタルホテル東京, 18-20, Oct., 2010
8. M. Fujiwara, K. Toubaru, A. Tanaka, H. Q. Zhao, H. Takashima, K. Sasaki and S. Takeuchi, "Fiber-coupled Microsphere at Cryogenic Temperatures for Cavity QED Experiments Using Single Diamond NV Centers", Updating Quantum Cryptography and Communication 2010, ANA インターコンチネンタルホテル東京, 18-20, Oct., 2010
9. H. Q. Zhao, M. Fujiwara and S. Takeuchi, "Investigation of NV centers in diamond nano-crystals by laser Scanning Confocal microscopy", Updating Quantum Cryptography and Communication 2010, ANA インターコンチネンタルホテル東京, 18-20, Oct., 2010
10. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Subashchandran, N. Nishizawa and S. Takeuchi, "Generation of broadband spontaneous parametric fluorescence and its application to quantum optical coherence tomography", The 14th SANKEN international Symposium 2011, The 9th SANKEN Nanotechnology Symposium, Royal Oak Hotel Otsu, 25-26, Jan., 2011
11. Hong-Quan Zhao, Masazumi Fujiwara and Shieki Takeuchi, "Cryogenic Spectrum Investigation on NV-Centers in Nano-Diamond Crystals", The 14th SANKEN international Symposium 2011, The 9th SANKEN Nanotechnology Symposium, Royal Oak Hotel, Otsu, 25-26, Jan., 2011
12. S. Subashchandran, Ryo Okamoto, Labao Zhang, Akira Tanaka, Masayuki Okano, Lin Kang, Jian Chen, Peiheng Wu and Shigeki Takeuchi, "Superconducting Nanowire Single Photon Detector System: Quantum Efficiency Measurement using Correlated Photons", The 14th SANKEN international Symposium 2011, The 9th SANKEN Nanotechnology Symposium, Royal Oak Hotel, Otsu, 25-26, Jan., 2011
13. S. Takeuchi, R. Okamoto, M. Fujiwara, H. Q. Zhao, H. F. Hofmann and J. L. O'Brien, "Optical Quantum Circuit Combining Tailored Optical Nonlinearities", CLEO Europe-EQEC2011, International Congress Centre, Germany, 22-26, May, 2011



14. A.Tanaka, R.Okamoto, H.H.Lim, S.Subashchandran, M.Okano, S.Kurimura and S.Takeuchi, "Collinear Ultra-broadband Parametric Fluorescence Generated from 10 % -chirped Quasi Phase Matched Device", CLEO Europe-EQEC2011, International Congress Centre, Germany, 22-26, May, 2011
15. M.Okano, R.Okamoto, A.Tanaka, S.Subashchandran, S.Ishida, N.Nishizawa and S.Takeuchi, "Broadband spontaneous parametric fluorescence toward high-resolution quantum optical coherence tomography", International Conference on Quantum Information (ICQI), University of Ottawa, Canada, 6-8, Jun., 2011
16. M.Okano, R.Okamoto, A.Tanaka, S.Subashchandran, S.Ishida, N.Nishizawa and S.Takeuchi, "Generation of broadband spontaneous parametric fluorescence and its application to quantum optical coherence tomography", SPIE Optics + photonics 2011, San Diego Convention Center, USA, 21-25, Aug., 2011
17. M.Fujiwara, T.Noda, K.Toubaru, A.Tanaka, H.Q Zhao and S.Takeuchi, "Solid-state photonic quantum phase gates by using fiber-microsphere cavity and diamond NV centers", 電子研国際シンポジウム, シャトレーゼガトーキングダムサッポロ, 11月21日, 2011年
18. A.Tanaka, R.Okamoto, H.H.Lim, S.Subashchandran, M.Okano, S.Kurimura, L.Zhang, L.Kang, J.Chen, P.Wu, T.Hirohata and S.Takeuchi, "Single-shot broadband photon spectroscopy of parametric fluorescence generated from chirped MgSLT crystal towards realization of mono-cycle photonic entanglement", The 15th SANKEN International Symposium 2012/The 10th SANKEN Nanotechnology Symposium, Osaka University, 12-13, Jan., 2012
19. M. Fujiwara, K. Toubaru, T. Noda, H. Q. Zhao and S. Takeuchi, "Highly Efficient Coupling of Photons from Single CdSe/ZnS Nanocrystals into Single-Mode Optical Fibers", CLEO-QELS 2012 (Conference on Lasers and Electro-Optics and Quantum Electronics and Laser Science Conference), San Jose Convention Center, USA, 6-11, May, 2012
20. T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi, "Experimental realization of an entanglement microscope", SPIE Optics+Photonics "Quantum Communications and Quantum Imaging X", San Diego Convention Center, 12-16, Aug., 2012
21. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Subashchandran, S. Ishida, N. Nishizawa and S. Takeuchi, "Dispersion-tolerant quantum optical coherence tomography by broadband spontaneous parametric fluorescence", The 13th RIES-Hokudai International Symposium "律"[ritsu] joined with The 1st International Symposium of Nano-Macro Materials, Devices, and System Research Alliance Project, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Japan, 13-14, Dec.,2012
22. M. Tanida, T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi, "Implementation of quantum controlled-SWAP operation using a photonic quantum circuit", The 13th RIES-Hokudai International Symposium "律"[ritsu] joined with The 1st International Symposium of Nano-Macro Materials, Devices, and System Research Alliance Project, Chateraise Gateaux Kingdom Sapporo, Japan, 13-14, Dec.,2012
23. A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Subashchandran, Y. Eto, M. Okano, L. Zhang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, T. Hirohata, S. Kurimura and S. Takeuchi, "Ultra-broadband correlated photon spectroscopy towards realization of mono-cycle photonic entanglement", The 16th SANKEN International Symposium 2013, Osaka University, Japan, 22-23, Jan., 2013
24. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Ishida, N. Nishizawa and S. Takeuchi, "Dispersion-tolerant quantum optical coherence tomography by broadband parametric fluorescence", The 21st International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS2013), CA, USA, 6-14, Jun., 2013
25. A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Subashchandran, M. Okano, L. Zang, L. Kang, J. Chen, P. Wu, T. Hirohata, S. Kurimura and S. Takeuchi, "Broadband

- Frequency Correlated Photon Pairs Using a Chirped-QPM Device”, CLEO-PR & OECC/PS 2013, Kyoto International Conference Center, Jun., 30-Jul., 4, 2013
26. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Ishida, N. Nishizawa and S. Takeuchi, “High-resolution quantum optical coherence tomography by broadband parametric fluorescence”, CLEO-PR & OECC/PS 2013, Kyoto International Conference Center, Jun., 30-Jul., 4, 2013
  27. S. Oyama, M. Iefuji, R. Okamoto, K. Yamagata, A. Fujiwara and S. Takeuchi, “Adaptive quantum state estimation of mixed states using photons”, CLEO-PR & OECC/PS 2013, Kyoto International Conference Center, Jun., 30-Jul., 4, 2013
  28. Y. Eto, M. Okano, A. Tanaka, S. Subashchandran, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Kurimura and S. Takeuchi, “Sum-frequency-photon generation from an entangled photon pair”, CLEO-PR & OECC/PS 2013, Kyoto International Conference Center, Jun., 30-Jul., 4, 2013
  29. H. Takashima, H. Q. Zhao, M. Okano, M. Fujiwara and S. Takeuchi, “Photoluminescence measurement of zero-phonon line from NV center in diamond nanocrystals at cryogenic temperatures”, New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Jul., 2013
  30. A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Subashchandran, M. Okano, Y. Eto, L. Zhang, L. Chen, P. Wu, T. Hirohata, S. Kurimura and S. Takeuchi, “Direct Observation of 150 THz-Frequency Correlation of Photon Pairs Generated from Chirped Quasi-Phase Matched Crystal”, New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Jul., 2013
  31. M. Fujiwara, H. Q. Zhao, M. Okano, T. Noda and S. Takeuchi, “Coupling diamond nitrogen vacancy centers with optical tapered fibers for single photon sources”, New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Jul., 2013
  32. S. Oyama, M. Iefuji, R. Okamoto, K. Yamagata, A. Fujiwara and S. Takeuchi, “Adaptive quantum state estimation of mixed states using photons”, New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Jul., 2013
  33. M. Almokhtar, M. Fujiwara and S. Takeuchi, “The effect of diamond nanocrystal structures on the coupling of single nitrogen vacancy centers with tapered nanofibers”, New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Jul., 2013
  34. Y. Eto, M. Okano, A. Tanaka, R. Okamoto, H. H. Lim, S. Kurimura and S. Takeuchi, “Sum-frequency-photon generation from an entangled photon pair”, New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Jul., 2013
  35. T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi, “Experimental demonstration of an entanglement-enhanced microscope”, New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Jul., 2013
  36. S. Kamioka, M. Fujiwara and S. Takeuchi, “Fabrication of nanostructured tapered fibers for highly efficient single photon sources”, New science and technologies using entangled photons (NSTEP), Osaka University, 8-9, Jul., 2013
  37. R. Okamoto and S. Takeuchi, “A quantum shutter closing N slits”, 北大電子研国際シンポジウム「綱」, シャトレーゼガトーキングダムサッポロ, 12月11-12日, 2013
  38. S. Oyama, R. Okamoto, K. Yamagata, A. Fujiwara and S. Takeuchi, “Adaptive quantum state estimation for single quantum bit”, 北大電子研国際シンポジウム「綱」, シャトレーゼガトーキングダムサッポロ, 12月11-12日, 2013
  39. M. Okano, R. Okamoto, A. Tanaka, S. Ishida, N. Nishizawa and S. Takeuchi, “High-resolution quantum optical coherence tomography by broadband entangled photon pairs”, The 17th SANKEN International Symposium, Osaka University,

21-22, Jan., 2014

40. T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi, "Experimental demonstration of An Entanglement-Enhanced Microscope", The 17th SANKEN International Symposium, Osaka University, 21-22, Jan., 2014
41. H. Takashima, A. W. Schell, S. Kamioka, Y. Oe, M. Fujiwara, O. Benson and S. Takeuchi, "Ultra-wide tuning of a nanofiber Bragg grating cavity", SPIE Photonics West 2015, The Moscone Center, San Francisco, USA, 7-12, Feb., 2015

**【栗村グループ】**

1. K. Kikuchi, S. Kurimura, R. Kou, A. Terasaki, H. Nakajima, K. Kondou and J. Ichikawa, "Parametric amplification in LiNbO<sub>3</sub> waveguide for photonic network", MOC 2009, National Museum of Emerging Science and Innovation, Japan, 27, Oct., 2009
2. M. Yoshimura, T. Sugaya, T. Hirano, K. Kikuchi, K. Sugiura, S. Kurimura and H. Nakajima, "Generation of Pulsed Squeezed Light at Telecommunication Wavelength Using a High Efficiency PPLN Optical Waveguide", CLEO/Europe-EQEC 2011, International Congress Centre, Germany, 22-26, May, 2011
3. H. H. Lim, T. Katagai, T. Shimizu, S. Kurimura, N. Ohmae, N. Mio and I. Shoji, "Optimal Pump Linewidth for Conversion Efficiency in cw single-pass QPM SHG", IQEC/CLEO Pacific Rim, Sydney Convention and Exhibition Centre, Australia, 28, Aug. -1, Sep., 2011
4. S. Kurimura, H. H. Lim, I. Shoji, N. Mio and S. Takeuchi, "Recent progress in Stoichiometric Lithium Tantalate", NLO50 (50 Years of Nonlinear Optics International Symposium), ICFO, Spain, 7-10, Oct., 2012
5. S. Kurimura, Y. Muranaka, K. Sugiura, R. Kou and H. Nakajima, "High efficiency nonlinear waveguide in lithium niobate", NLO50(50 Years of Nonlinear Optics International Symposium), ICFO, Spain, 7-10, Oct., 2012
6. H. H. Lim, S. Kurimura, K. Noguchi and I. Shoji, "Photo-Thermal Performance of QPM Wavelength Converter", CLEO2013, San Jose Convention Center, USA, 9-14, Jun., 2013.
7. H. H. Lim, S. Kurimura, K. Noguchi and I. Shoji, "Photo-Thermal Performance of QPM Wavelength Converter", New Science and Technologies Using Entangled Photons (NSTEP), Osaka University, Japan, 8-9, July, 2013
8. H. H. Lim, S. Kurimura, W. Nagashima, M. Nonaka and I. Shoji, "Study on Thermal Lensing for High Power CW Green SHG Laser", Laser Display Conference 2014, National Chung Hsing University, Taiwan, 19-20, Jun., 2014

**【ホフマングループ】**

1. M. Goggin, H. F. Hofmann, M. Almeida and M. Barbieri, "Estimation of a quantum interaction parameter using weak quantum measurement", DAMOP, Hyatt Regency Orange County, Anaheim, California, USA, 4-8, June, 2012
2. H. F. Hofmann, "What the complex joint probabilities observed in weak measurements can tell us about quantum physics", QCMC, Vienna Technical University, Vienna, Austria, July 30-August 3, 2012
3. H. F. Hofmann, "Optimal cloning as a universal quantum measurement: resolution, back-action, and joint probabilities", QCMC, Vienna Technical University, Vienna, Austria, July 30-August 3, 2012
4. C. Ren and H. F. Hofmann, "How to make optimal use of maximal multipartite entanglement in clock synchronization", QCMC, Vienna Technical University, Vienna, Austria, July 30-August 3, 2012
5. M. Hiroishi and H. F. Hofmann, "Weak measurement statistics of correlations between input and output in quantum teleportation", QCMC, Vienna Technical

- University, Vienna, Austria, July 30-August 3, 2012
6. Y. Suzuki, M. Iinuma and H. F. Hofmann, “Experimental demonstration of Leggett-Garg inequality violations by measurement with high resolution and back-action”, QCMC, Vienna Technical University, Vienna, Austria, July 30-August 3, 2012
  7. C. Ren and H. F. Hofmann, “Analysis of time-energy entanglement by correlated single photon interference”, AQIS, Suzhou, China, 25-26, Aug., 2012
  8. M. Iinuma, Y. Suzuki and H. F. Hofmann, “Experimental observation of paradoxical correlations in sequential measurements of photon polarization”, AQIS, Suzhou, China, 25-26, Aug., 2012
  9. H. F. Hofmann, “Weak measurement characteristics of entanglement”, QIPC 2013, Florence University, Florence, Italy, June 30 - July 5 2013
  10. C. Ren and H. F. Hofmann, “Measurement of time-energy entanglement by frequency comb states”, NSTEP, Osaka University, Osaka, Japan, 8-9 July 2013
  11. Y. Suzuki and M. Iinuma, H. F. Hofmann, “Joint quantum statistics with negative probability observed in a sequential measurement of photon polarization”, NSTEP, Osaka University, Osaka, Japan, 8-9 July 2013
  12. H. F. Hofmann, “Negative probabilities as deterministic relations between observable properties”, Quantum [Un]Speakables 2, University of Vienna, Vienna, Austria, June 19-22, 2014
  13. Y. Suzuki, Masataka Iinuma, Ryuji Kinoshita and H. F. Hofmann, “Experimental reconstruction of complex joint probabilities for arbitrary photon polarization via sequential measurements of non-commuting observables”, Quantum [Un]Speakables 2, University of Vienna, Vienna, Austria, June 19-22, 2014
  14. M. Iinuma, Yutaro Suzuki, Ryuji Kinoshita and H. F. Hofmann, “Experimental evaluation of error and disturbance of Ozawa's inequality in two level systems”, Quantum [Un]Speakables 2, University of Vienna, Vienna, Austria, June 19-22, 2014
  15. S. Kino, H. F. Hofmann, “Characterization of measurement uncertainties using the correlations of local outcomes for maximally entangled pairs”, CEWQO 2014, Palace of the Royal Academies, Bruxelles, Belgium, June 23-27, 2014
  16. T. Nii, H. F. Hofmann, “Analysis of Errors and Disturbance in Quantum Measurements”, CEWQO 2014, Palace of the Royal Academies, Bruxelles, Belgium, June 23-27, 2014
  17. M. Iinuma, Yutaro Suzuki, Ryuji Kinoshita and H. F. Hofmann, “Experimental evaluation of measurement error and disturbance in a two-level system”, CEWQO 2014, Palace of the Royal Academies, Bruxelles, Belgium, June 23-27, 2014

#### (4)知財出願

##### ①国内出願 (2件)

1. テーパ光ファイバ、竹内繁樹、国立大学法人北海道大学、2010年1月27日、2010-015814
2. 分極反転領域を形成する装置、栗村直、物質・材料研究機構、2010年8月31日、2010-193460

#### (5)受賞・報道等

##### ①受賞

- \* 第4回(2010年)日本物理学会若手奨励賞、“Demonstration of an optical quantum controlled-NOT gate without path interference”、岡本亮、2010年

- \*1. 第6回(平成 21 年度)日本学術振興会賞、“光子を用いた量子情報通信処理の創成”、竹内繁樹、2010 年 3 月 1 日
- \*2. 第 7 回大和エイドリアン賞、“光子を用いた量子情報科学技術—マイクロな領域を支配する基本物理原理である量子力を利学用した新技術”、竹内繁樹、2010 年 12 月 2 日
- 3. LDC Award, 鈴木太郎, 2012 年 4 月 27 日
- 4. 応用物理学会 第 59 回 講演奨励賞, 村中勇介, 2012 年 5 月
- \*5. レーザー学会 レーザー学会業績賞(論文賞), 栗村直, 2013 年 5 月
- 6. The 9th Asia Pacific Laser Symposium Young Resercher Presentation Award, Hwan Hong Lim, 2014 年 4 月 24 日

#### ②マスコミ(新聞・TV等)報道

1. “若手向け振興会賞受賞者 五十嵐氏ら 25 人に”、日刊工業新聞、2 月 6 日 2010 年
2. “第 6 回日本学術振興会賞に 25 氏”、科学新聞、2 月 12 日 2010 年
3. “荣誉に輝く「日本の若き宝」”、科学新聞、2 月 12 日・3 月 12 日 2010 年
4. “光の不思議にビックリ 園部小で出前授業”、京都新聞、2 月 26 日 2011 年
5. “光子 1 個で動作 北大、光量子回路を開発”、日刊工業新聞、6 月 7 日 2011 年
6. “北大、光子 1 個で動作するスイッチの集積化に成功—量子ゲート操作を実現”、マイコミジャーナル、6 月 16 日 2011 年
7. “光子 1 個で動作する非線形スイッチ実現”、科学新聞、6 月 17 日 2011 年
8. “All-optical quantum computation, step1:A controlled-NOT photonic gate”、PHYSORG、6 月 24 日 2011 年
9. “ダンスや科学 子ら体感”、京都新聞、11 月 29 日 2012 年
10. “1 個の光子で他の光子を制御”、日経エレクトロニクス、2 月 18 日 2013 年

#### ③その他

1. SJN, “北大、光学顕微鏡の測定限界を超えた「量子もつれ顕微鏡」を開発。生物・医学への応用期待”、9 月 13 日 2013 年
2. 日経エレクトロニクス, “北海道大学が「量子もつれ顕微鏡」を実現、従来の顕微鏡の測定限界を超える”、9 月 14 日 2013 年
3. エキサイトニュース, “北大、古典理論限界を超えた感度を有する「量子もつれ顕微鏡」を実現”、9 月 18 日 2013 年
4. マイナビニュース, “北大、古典理論限界を超えた感度を有する「量子もつれ顕微鏡」を実現”、9 月 18 日 2013 年
5. OPTRONICS ONLINE, “北大、古典理論限界を超えた感度をもつ光学顕微鏡を実現”、9 月 30 日 2013 年
6. MIT Technology Review, “World's First Entanglement-Enhanced Microscope”, Feb., 10, 2014
7. POPULAR SCIENCE, “Quantum Microscope Uses Spooky Entangled Photons To See Better”, Feb., 10, 2014
8. PHYS ORG, “Researchers use quantum entanglement to improve differential interference contrast microscopy”, Feb., 11, 2014
9. Physicsworld.com, “Microscope exploits spooky action at a distance”, Feb., 19, 2014
10. 2Physics, “Entangled Photons are Used to Enhance the Sensitivity of Microscope”, 6, Apr., 2014

#### (6)成果展開事例

##### ①実用化に向けての展開

- 産業界への貢献として、民間企業へ CREST で開発した排熱モジュールに関する技術・ノウハウの移管を行った。ノウハウ供与契約を締結し、研究員を受け入れてモジュールの作製技術およびその評価技術を移管した。

## ②社会還元的な展開活動

- 本プロジェクトにおける各種研究成果を広く、国内外の研究者で共有し、また併せて若手育成を行う目的で、2013年に、国際ワークショップ“**New Science and Technologies using Entangled Photons (NSTEP2013)**”を開催した。基調講演を行っていただいた Teich 教授をはじめとする世界をリードする研究を進めている研究者からの15件の講演、28件のポスター発表、世界9ヶ国から60人の参加者を得た。また、若手研究者や学生による、30件近くのポスター発表もなされた。このように、本研究分野の国内外の若手研究者の育成・交流、今後の研究の将来を深く議論する場となった。このほかに、国内研究者むけの公開ワークショップを3回、応用物理学会等におけるシンポジウムを6回開催するなど、研究者コミュニティへの成果還元を積極的に実施した。
- 本プロジェクトに関連して、小学校(学年全3クラス80名に対し終日実施)を2回、高校に3回(約10~40名)の出張授業、高校からの実際の実験見学の受け入れ(23名)、6回の一般向け公開など、積極的にアウトリーチ活動を実施した。

### ②社会還元的な展開活動 続き

- 青紫光励起の光子対発生デバイスを開発したことで、これまであまり研究されてこなかった波長域に踏み込むことになり、Mg:SLT の屈折率分散を再検討することになった。従来栗村 G のもつ屈折率分散式から計算した位相整合波長とずれがみられ、これを修正することとなった。結果、同分野の研究・開発においてより正しい設計が可能になり、他の研究機関、開発機関において研究・開発資源の無駄を省くことができ、広く社会に還元される成果となった。

## §5 最後に

### 【竹内繁樹チームリーダー】

本プロジェクトでは、これまで実現されていなかった、「モノサイクルもつれ光」の実現と応用を目指した。我々のグループでは、これまで、パラメトリック蛍光対をもちいた量子情報通信、処理の研究を行ってきており、たとえば偏光に関する量子もつれ合いの制御は経験していた。しかし、今回とりくんだ、超広帯域の周波数に関するもつれの実現に関する研究は、非常に魅力的ではあるが、経験はなかった。いわば、「モノサイクルもつれ光」とそれに関連する研究領域を、ゼロから立ち上げようとするプロジェクトであった。

まず成果につて、可視から赤外まで、1 オクターブを超える 200THz の広帯域もつれ光発生に成功、まったく前例の無いこの超広帯域にわたる周波数相関と量子ビート測定にも成功し、量子もつれを完全に実証することができた。また、栗村グループでは、さまざまな困難を乗り越え、電子ビーム露光ナノ電極による分極反転素子作成に LN 系で初めて成功した。その技術を活用して作成した素子で、可視域(800nm)超広帯域もつれ光の発生、さらに 0.54 $\mu\text{m}$  という世界最高の分解能と分散耐性をも有する量子 OCT の実証に成功という、大きな成果を得ることが出来た。また、量子非線形光学の創成に関しても、6.8 サイクル(相関時間 24fs)の量子もつれ光子対間の和周波光子発生を観測に成功するとともに、ナノ光ファイバの実現、単一発光体と、光ファイバ中の光子の高効率結合に初めて成功するなど、多くの成果を得ることができた。

ほかに、プロジェクト開始時に想定していなかった成果としても、従来提案の半分の帯域でモノサイクルもつれ光を実現する方法の発案、毎時で数千カウントという世界最小の低ノイズ超伝導光子検出システムの実現、またホフマングループによる量子もつれ光の理論提案を生み出すことができた。さらに、中間評価以降に追加で開始した、スラブ導波路素子による高効率広帯域もつれ光源の実現に関しても、栗村グループはナノ電極を駆使したスラブ導波路を世界で初めて実現、その高調波発生に成功するなどの成果を得た。

次に、今後の研究展開について述べる。この「モノサイクルもつれ光」の研究領域は、本 CREST プロジェクトにより、まさに立ち上がりつつあると考えている。今後、計測応用に関しては、従来の OCT より一桁高い、0.54 $\mu\text{m}$  という量子 OCT の分散耐性・高分解能を利用したアプリケーションの開拓ならびにそのニーズに応じたイメージング装置開発が非常に期待される。量子非線形光学に関しては、本プロジェクトでは 24fs の時間相関をもつ量子もつれ光子対による和周波発生という、重要なマイルストーンを達成した。これを元に、今後、時間相関のさらなる短縮や、他の2光子吸収プロセスへの応用が期待できる。また、プロジェクトとして取捨選択の中で、ホフマングループにより提案された理論に基づく、モノサイクルもつれ光の評価に、あまりリソースを割くことができなかった。今後、ぜひそれらにも取り組んでいきたい。

チーム内研究体制に関しては、栗村グループ、ホフマングループとの、本当に実質的で密な連携の元、目的や喜びを共有しながら研究が進められたことが、プロジェクトを成功に導いた要因だと認識している。学生や博士研究員を、チーム内インターンとして栗村グループで定期的に受け入れて頂いたことや、テレビ会議システムを活用した頻回の研究打ち合わせも、共同研究を円滑に進める上で非常に有効であった。栗村先生、ホフマン先生の最大限のご協力に心より感謝する。また CREST チーム外でも、名古屋大学の西澤教授グループ、中国南京大学の呉教授グループ、浜松ホトニクスをはじめ、多数の多大なご協力をいただき、そのおかげで研究を進めることが出来た。

以上のように、本プロジェクトで当初期待した以上の、さまざまな成果を得ることができ、まさに、「モノサイクルもつれ光」による新しい研究領域の創出のための基盤が整えることができた。これも、ひとえに、CREST で採択いただき、またその後も様々な形での、伊藤領域総括をはじめ、アドバイザーの先生方、前野技術参事、藤田事務参事をはじめJSTの皆様のご支援、ご協力に、心より、深く感謝申し上げます。

### 【栗村直グループリーダー】

本プロジェクトで得られた広帯域光子対発生の結果は大変誇らしく、興味深いものであった。デ

バイスを作製する観点から学び直すことも多く、電極の構造をナノ化することがこれほど大きく他の作製条件に影響するとは、想像を超えていた。20年以上デバイスを研究してきて、作製に関わる物理を理解して制御しているつもりであったが、自然はまだ奥深く、我々が知る空間はそのほんの一部にしか過ぎないことを痛感した。と同時に、世界の他のグループが見落とした、もしくは配慮しきれなかった物理現象が、世界記録の壁を破るために必要であることは示唆的であった。光子対帯域の記録と関係性の薄く見える屈折率分散式や、デバイスからの排熱などが、記録更新に必要であることが判明し、一見遠回りな広く物理を理解するということが眼前の成果にブレークスルーをもたらすことが再認識された。排熱の技術は、産業界にも技術移管という形で貢献でき、今後自然科学分野のみならず光学分野でも貢献できる意義深い技術となった。突き抜けたものづくりは、自然科学においてもブレークスルーをもたらす。今後ナノ電極技術と組み合わせることで、安定した位相制御光子対など革新的な成果が期待できる。

東日本大震災にてつくば地域は震度6の地震に見舞われ、栗村の実験室でも評価用レーザーや分光計が破損した。多くの落下、破損物品があり、CREST で利用しているファイバーレーザーや電子ビーム露光装置に関しては被害が甚大であった。電子ビーム露光装置においては損傷があり長尺デバイスの作製が不可能になった。機関所属の共通装置であったにもかかわらず柔軟に予算措置を施して下さった、伊藤統括、藤田アドバイザー、前野様はじめ、皆様の御厚意に深く感謝したい。これだけの震災にもかかわらず当初スケジュールを維持できたのは、ここでの御英断の賜と考える。心から感謝を申し上げます。

代表者の竹内先生の細やかな配慮、および JST 関係者の御尽力によりプロジェクトを大変順調に進めることができた。Mg:SLTの導波路デバイス成功など当初想定していなかった領域まで踏み込むことができ、多くの方の支えを頂いてかけがえのない時間を過ごすことができた。深く御礼申し上げます。

国際会議 NSTEP2013 集合写真

