

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：32639

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760044

研究課題名（和文）導波路型の光パラメトリック増幅器を用いた連続波スクイズド光の高レベル化の研究

研究課題名（英文）Generation of continuous-wave highly squeezed light with optical parametric amplifier in waveguide

研究代表者

政田 元太 (MASADA GENTA)

玉川大学・量子情報科学研究所・准教授

研究者番号：80439538

研究成果の概要（和文）：スクイズド光を使った量子テレポーテーションの演算回路の光集積化を実現するための要素技術を研究した。光集積化のためには導波路素子を使いこなす技術の開発が重要である。本研究では導波路型のスクイザーを用いることにより、連続波スクイズド光の生成に成功した。また導波路型のビームスプリッターを用いた手法によりEPRビームを生成し、量子エンタングルメントの検証を行った。

研究成果の概要（英文）：We developed elemental technology for optical integration of quantum teleportation circuits which are utilizing squeezed state of light. It is important to develop a technology for operating waveguide devices for optical integration. We succeeded in generating continuous-wave squeezed light by using waveguide squeezer. We also succeeded in generating EPR beams and verifying quantum entanglement by utilizing waveguide beam-splitter.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：パラメトリック過程、量子エンタングルメント、導波路、スクイズド光、量子テレポーテーション

1. 研究開始当初の背景

スクイズド光の応用例のひとつは光の直交位相振幅を使った連続変量の量子情報処理技術である。量子テレポーテーションの技術を使った量子コンピューティングの実現は特に注目されており、スクイズド光を使った量子テレポーテーションの実証実験が既に報告されている(A. Furusawa *et al.*, *Science* **282**, 706 (1998).)。連続変量の量

子光学実験系は多数のスクイザーと多段に連結したビームスプリッターで構成された光回路である。例えば量子情報処理を実現するうえで重要となる量子エンタングルメントを生成するためには以下のような方法がとられている。まず光パラメトリック発振器で2つのスクイズド光を生成する。次にバルク状のハーフビームスプリッターを用いて2つのスクイズド光を合波させる。そ

の際にはスクイーズド光同士の相対的な光の位相差が 90 度となるように位相制御する必要がある。

このような従来の量子光学実験は自由空間で行う方式が主流であった。光学テーブル上に大規模で複雑な光回路を構築してきた。しかしながら従来の方法を拡張し、今後さらに複雑な量子情報処理を実現することは困難である。また光学系が大規模になるほど実験系を安定化させることが難しくなる。将来的には光の量子演算回路を光チップ上に集積化していくことが重要と考えられる。集積化された実験系においては微小な領域に複雑な光回路を構築していくことが可能である。また外乱による影響も軽減されるので、光学実験系の安定性は大きく改善されると期待される。またひとたび外部から光を入力すれば、チップ内部での光学調整は不要である。このように光集積化によるメリットは多大である。光集積化の実現のためには導波路素子を使った光の生成技術や操作技術の開発が極めて重要である。本研究では導波路素子を使ったスクイーズド光の生成実験および EPR ビームの生成実験を行った。

2. 研究の目的

本研究の長期定期的な目標は、量子演算処理の中でも特に重要な量子テレポーテーションの回路を光チップ上に集積化することである。量子テレポーテーションの有効な方法のひとつは、連続変数である光の直交位相振幅を使う方式である。スクイーズド光を使う方法が最も実現性が高いと言える。本研究においては量子テレポーテーションの演算回路の光集積化を実現するために必要となる要素技術を研究した。本課題は導波路型の光パラメトリック増幅器を用いて連続波スクイーズド光を生成することを当初の目的としていた。しかしながら量子演算回路を光集積化するためには、導波路スクイーズド光の開発だけでなく、導波路型のビームスプリッターを用いて光の状態を操作し、変換する技術も重要である。また導波路の基本的な特性についてより広く理解するためには、様々な素子を使いこなしながら実際に経験を積んでいくことが大切であると考えた。そこで本研究では導波路スクイーズド光の研究のみならず、導波路型のビームスプリッター素子を使うことにより、EPR ビームの生成及び量子エンタングルメントの検証実験も行った。

3. 研究の方法

(1) 導波路スクイーズド光

本研究では周期分極反転構造を持つニオブ酸リチウム (Periodically poled LiNbO_3 : PPLN) の導波路素子を光パラメトリック増幅器として用いた。ニオブ酸リチウム

は非線形光学係数が大きいために、有望な材料の一つである。図 1 に導波路スクイーズド光の概要を示す。導波路の断面サイズは数 μm である。入射光の反射が戻り光となることを防ぐために、素子の入出射面は斜め形状に加工されている。本研究では波長 860nm の連続波チタンサファイアレーザーを光源として用いた。導波路スクイーズド光のポンプ光(波長 430nm)は第 2 高調波の原理を使って生成した。スクイーズド光をポンプ光で励起すると、縮退光パラメトリック過程により波長 860nm のスクイーズド光が生成される。このとき波長 860nm のプローブ光も同時に入射させ、古典的なパラメトリック増幅も観測した。スクイーズド光の位相整合条件を保つために、このパラメトリック増幅率が最大となるように素子本体の温度制御を行った。

導波路スクイーズド光を効率よく励起するためには、ポンプ光をレンズにより数 μm に集光する必要がある。また導波路スクイーズド光から出射した光は大きな発散角度で広がりを持っている。そのため図 2 に示す PPLN 導波路素子の入力側、出力側にそれぞれ光結合用、平行光用の非球面レンズを設置した。

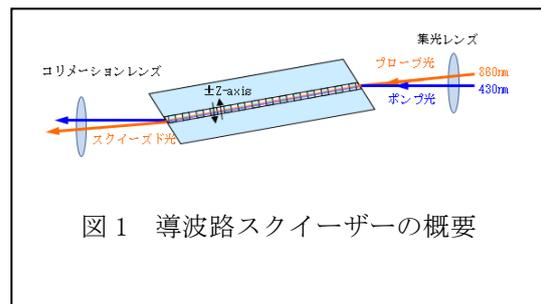


図 1 導波路スクイーズド光の概要

過去の研究では導波路端面に埃が付着している状態で高強度のポンプ光を入射してしまい、素子端面を損傷させてしまう例が多く報告されている。そのような実験上の問題点を改善するために、本研究ではスクイーズド光本体を高気密性の高い金属製のボックスに格納し、空気中に浮遊している埃の混入を防止した。空気の対流による外乱の影響を軽減するという目的からも、スクイーズド光本体をボックスに格納する方法は有効であると考えられる。実際にこのような手法を用いたことで、本研究では PPLN 導波路素子を損傷させることなく、安定した環境で実験を実施することができた。

スクイーズド光を測定するためにはホモダイン測定の手法が用いられる。このときスクイーズド光を局部発振光と合波させる必要がある。一般的に導波路素子で生成された出力の空間モードは複雑であり、多くの高次モードを含むマルチモードである。高効率な測定を行うためには局部発振光とスクイーズド光

ズド光の空間的なモードマッチが重要となる。本研究ではスクイーズド光と古典的なプローブ光が同じ空間モードを有する性質を利用して、セルフホモダイン測定の手法を用いた。これはプローブ光自身を局部発振光として用いる手法である。実際にセルフホモダイン測定の手法により連続波スクイーズド光の測定に成功した。現在は通常よく行われるバランス型ホモダイン測定によるスクイーズド光の観測を試みている。今後、セルフホモダイン測定を上回る結果が期待される。

(2) 導波路干渉計による EPR ビームの生成

本研究では導波路素子を利用することにより EPR ビームの生成実験も行った。図 2 に EPR ビームを生成する方法の概念図を示した。2つのスクイーズド光 SQ1 及び SQ2 を分岐比が 50/50 のビームスプリッター(ハーフビームスプリッターHBS)で合波することにより、EPR ビーム対である EPR1 及び EPR2 が生成される。ここで EPR1、EPR2 ビームは量子相関を持ったビーム対である。より具体的には光の直交位相振幅の間に $x_1=x_2$ 、 $p_1=-p_2$ となる相関が存在する。ここで x 及び p は直交位相振幅のコサイン、サイン成分に相当する。

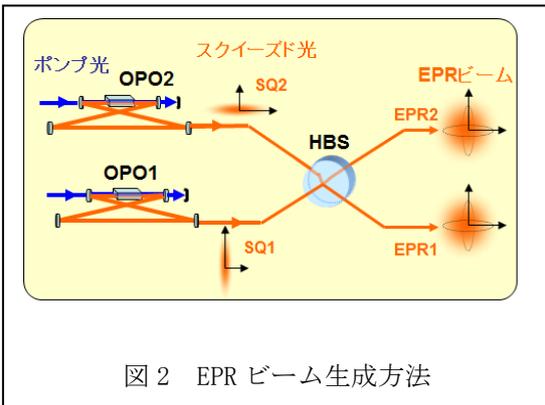


図 2 EPR ビーム生成方法

量子光学実験においては 50/50 のみならず、様々な分岐比を持ったビームスプリッターを多段に用いることにより、光の状態変換や操作を施す技術が重要である。そこで導波路素子を使っていかにして様々な分岐比を持ったビームスプリッターを実現するかが課題となる。通常、方向性結合器型の導波素子を使うことによりビームスプリッター機能を実現することができる。しかしながらこの方式では分岐比は方向性結合器の性能で決まってしまう、必要に応じ分岐比の値を調整するといった柔軟性のある使い方ができない。そこで本研究ではマッハツェンダー干渉計型の原理を用いて、分岐比を任意に変化させることのできる導波路型ビームスプリッ

ターを使用した。

図 3 にマッハツェンダー干渉計の概念図を示す。通常、干渉計は光入射用、2 光波を合波するためのビームスプリッター(BS)、全反射ミラー(HR)、位相シフターによって構成される。ここで位相シフターのシフト量を調整することにより、干渉計からの出力光である I_1 及び I_2 の強度の分岐比を変えることができる。つまり干渉計全体としてみた場合、分岐比を任意の値に変えることができるビームスプリッターとして機能することがわかる。以上の干渉計の一般的な性質である。

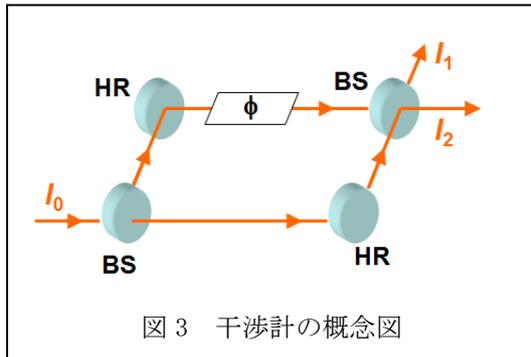


図 3 干渉計の概念図

図 4 に干渉計型の導波路素子の模式図を示す。2つの方向性結合器と金属製ヒーターによる位相シフターで構成される (J. C. F. Matthews *et. al*, Nature Photonics, vol. 3 (2009) 346-350)。実際の導波路素子はシリコン基板上にリソグラフィの技術を使って作製されている。ヒーターの電流量を変化させ、位相シフト量を制御することにより、干渉計からの 2つの出力の分岐比を変えることができる。その結果、干渉計全体を一つの素子としてみなした場合、分岐比を連続的に変化させることが可能なビームスプリッターとして用いることができる。

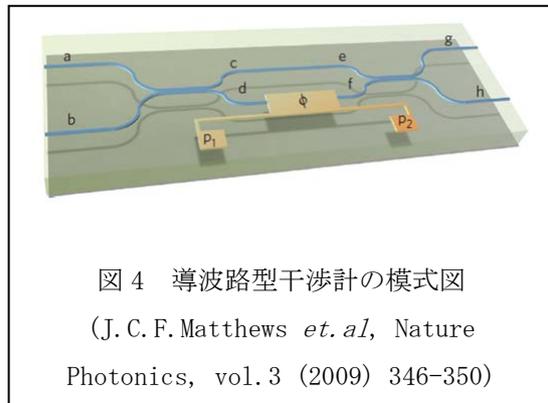


図 4 導波路型干渉計の模式図

(J. C. F. Matthews *et. al*, Nature Photonics, vol. 3 (2009) 346-350)

本実験では外部に設置された 2つの光パラメトリック発振器(OPO)でスクイーズド光を生成し、分岐比が 50/50 に調整されたビーム

スプリッターで合波した。この時、2つのスクイズド光の相対的な位相差を 90° に制御することにより EPR ビームを生成することができる。また本研究では生成された EPR ビーム対に対してホモダイン測定を行い、量子エンタングルメントの検証も行った。測定結果は非局所性のクライテリアを満たすものであった。

4. 研究成果

本研究はスクイズド光を使った量子テレポーテーションの演算回路の光集積化を目的とし、その実現のために必要となる要素技術を開発した。本研究では導波路型の光パラメトリック増幅器を使うことにより連続波スクイズドを生成した。また導波路型のビームスプリッターを使うことにより EPR ビームを生成し、量子エンタングルメントの検証を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 7 件)

【国際】

1. Genta Masada
“Optical integration of quantum information processing for continuous variable”
First International Conference on Entangled Coherent State and Its Application to Quantum Information Science (Towards Macroscopic Quantum Communications)
Tamagawa Univ., (Tokyo) (Nov, 28, 2012)
2. Genta Masada, Kazunori Miyata, Alberto Politi, Jeremy L. O’ Brien, Hiroshi Takahashi and Akira Furusawa
“Generation and characterization of EPR beams by using waveguide-interferometers integrated in a chip”
11th Intl. Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing, P2-78, Vienna University of Technology, (Wien, Austria) (July, 31, 2012)

【国内】

3. 政田元太、宮田一徳、Politi Alberto、O’ brien Jeremy、高橋 浩、古澤 明
“導波路干渉計を用いた EPR ビームの生成 III”

第 60 回 応用物理学関係連合講演会、30p-D1-5、神奈川工科大学、(神奈川県) (2013 年 3 月 30 日)

4. プリヤシールプラサッド、政田元太、古澤 明

“PPLN 導波路により生成された連続波スクイズド光の空間モードに関する研究”

第 59 回 応用物理学関係連合講演会、18a-E3-2、早稲田大学、(東京都) (2012 年 3 月 18 日)

5. 政田元太、宮田一徳、Politi Alberto、O’ brien Jeremy、古澤 明

“導波路干渉計を用いた EPR ビームの生成 III”

第 59 回 応用物理学関係連合講演会、18a-E3-1、早稲田大学、(東京都) (2012 年 3 月 18 日)

6. 政田元太、宮田一徳、Politi Alberto、O’ brien Jeremy、古澤 明

“導波路干渉計を用いた EPR ビームの生成 II”

第 72 回 応用物理学学術講演会、30a-ZR-5、山形大学、(山形県) (2011 年 8 月 30 日)

7. 政田元太、宮田一徳、Politi Alberto、O’ brien Jeremy、古澤 明

“導波路干渉計を用いた EPR ビームの生成”

第 58 回 応用物理学関係連合講演会、26a-KE-6、神奈川工科大学、(神奈川県) (2011 年 3 月 26 日)

[その他]

ホームページ等

<http://www.tamagawa.ac.jp/quantum/center/information.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

政田 元太 (MASADA GENTA)

玉川大学・量子情報科学研究所・准教授
研究者番号：80439538

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

古澤 明 (FURUSAWA AKIRA)

東京大学・工学研究科・教授
研究者番号：90332569