

博士論文（要約）

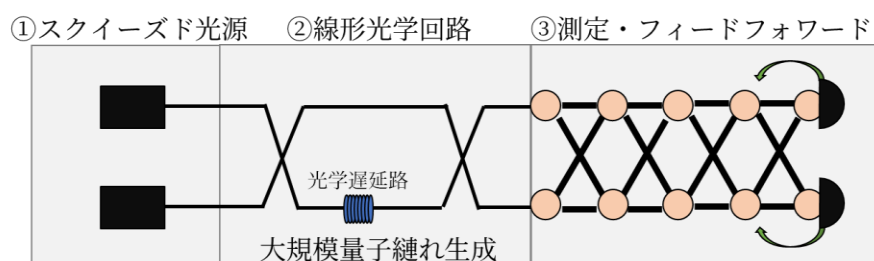
導波路上の高速量子計算のための
広帯域スクイーズド光の研究

高梨 直人

背景

量子情報処理を実現する光回路を、従来の大掛かりで制御の難しい空間光学系から、小型で扱いやすい光ファイバや光集積回路などの導波光学系に移植することは量子計算の実用化のために非常に重要である。線形光学素子の集積化技術は既に存在しているが、ここで課題となるのが波束の大きさを決める非線形素子や測定部分の帯域である。後述するように、線形光学素子部分は量子モードに対応する波束を複数格納できる寸法である必要があるから、波束が小さくならないことには集積回路に収まらないのである。

我々の研究室が取り扱う時間領域多重された測定誘起型連続量量子計算方式[1-3]においては、量子情報処理を実現する光回路は①非線形光学効果により量子的な光を生成するスクイーズド光源部と②それらの光を干渉させる線形工学部、そして③測定や測定に基づく操作を行う測定フィードフォワード部に分かれている。



1. 時間領域多重された測定誘起型量子計算の全体像

線形回路の集積化技術としては石英導波路を利用するPLC(平面光回路)技術が光通信における分配や波長分離用途で広く用いられており、2015年にはこのPLC技術を応用した離散量量子情報処理のための光回路がCarolanらブリストル大学のチームとNTTとの共同研究によって製造された[4]。一方でこの技術を前述の連続量量子情報処理方式に適用する上では、光損失と遅延路長という2つの課題が存在している。

当研究室では、従来光の波長として860nmを使用していたが、2014年と2017年にこの波長用に製造した光回路では十分な性能を得ることができなかった。この一因として、860nmという短波長では1.5 μm 帯用石英導波路の伝搬損が大きいことが考えられた。実のところ860nmはスクイーズド光発生にとっても最適な波長である訳ではなく、励起光誘起の信号光吸収(BLIRA)を避けたり、非線形光学結晶の周期分極反転構造を製造したりする上でも長波長が有利であり、今日得られている最大のスクイージングレベルは波長1064nmで達成されているものである[5]。

時間領域多重された連続量量子情報処理方式においては、線形光学回路内で遅延路を利用した大規模クラスタ状態の生成が行われる。遅延路は、生成したクラスタ状態のサイズにも依るが、状態がエンコードされた波束(波束モード)を数個から数百個格納できるサイズである必要がある。定義できる波束モードのサイズは原理的にはスクイーズド光の帯域で決まるものであるが、実験的にはさらにそこに測定器やフィードフォワード系の帯域(応答速度)で処理できるサイズであるという条件が加わる。すなわち光回路の小型化は、これらの帯域で制限されている。

したがって、導波路上での量子計算の実現に必要なことは、1.5 μm 帯での広帯域なスクイーズド

光源及び測定フィードフォワード技術の開発である。広帯域化により波束モードを小型化することは、(長さと同時間は光の速度によって結ばれているので)量子計算の高速にも貢献する。本研究では1.5 μm 帯スクイーズド光源の帯域並びに測定の帯域をテラヘルツオーダまで広げること成功した。テラヘルツオーダの帯域は、波束モードのサイズで言えばマイクロメートル程度に相当するものであるから、本研究によって大規模な量子纏れを小型なチップ上に格納する道が開かれたと言える。本研究で実施した個別の研究については以下の通りである。

導波路直結可能な広帯域OPO開発[A]

従来、スクイーズド光は自由空間光学系において合わせ鏡の中に非線形光学結晶を配置したOPO(光パラメトリック発振器)と呼ばれる装置で発生させられてきた。博士課程初年度はこの方式を踏襲しつつも、導波光学素子との結合性を高める新しい構造を採用した小型なスクイーズド光源を開発した。

導波光学素子の結合端面では波面は平面となっているため、これらの素子との結合性を高めるためにはOPOの出射端面でも波面が平面となっていることが重要である。そこで本研究では、非線形光学結晶の端面に薄膜の鏡面コーティングを施し、これを合わせ鏡の一端かつ出射端面として用いることでこの課題を解決した。

Briusselらの先行研究[6]では、ファイバとの直接結合が試みられたものの、ウェスト径をファイバのコア径に近づけようと小さく設計したため、ビームの広がりが著しくなり、十分な非線形光学効果が得られなかった。その上、先行研究では結局通常のファイバとは十分な結合が得られず、熱拡散されたテーパ型ファイバを最終的に使用することとなっていた。本研究では最初からテーパ型導波路の使用を想定し、ウェスト径に余裕を持たせることによってスクイージングレベルの向上を実現した。また、広帯域なホモダイン検出器を使用することで、広帯域なスクイーズド光のスクイージングレベルを共振器の帯域全体に渡ってよく測定することができた。

加えて、導波路との結合性を確認するため、数値計算により結合効率をシミュレーションした。シミュレーションによれば適切なサイズの導波路を用いることで、97.9%の結合効率が得られることが分かった。OPO自体の測定されたスクイージングレベルは6.2dBであるから、この場合導波路内で5.9dBのスクイージングが利用可能ということになる。

$\chi^{(2)}$ 導波路による超広帯域スクイーズド光発生[B]

OPOによるスクイーズド光発生には、鏡の構造に由来する帯域幅の制約や、鏡の位置の動的な制御が必要となり、これらは高速で大規模な回路の実用的な実装という導波光学導入の目的には少々相容れないものだった。そこで本研究では、合わせ鏡構造を持たないOPA(光パラメトリック増幅器)方式による導波光学系のスクイーズド光源の開発に取り組んだ。

開発した光源は周期反転分極ニオブ酸リチウム導波路(PPLN)をファイバ結合させたモジュールの形態を取っている。従来のマルチモード導波路型を用いた方式では高レベルのスクイーズド光を発生させることができなかったが[C]、本研究では共同研究先であるNTTの通信用の技術開

発で可能となった狭幅の加工方式[7]を活用することでこの課題を克服した。このモジュールから得られるスクイズド光のスクイーディングレベルを、ファイバカプラやコリメータ等を用いた自作のファイバ接続のホモダイン検出器により測定し、4dBのスクイーディングを実測した。ここで、市販のファイバビームスプリッタ(熔融型カプラ)やコリメータには大きな光損失があることから、このホモダイン検出系の効率は90%強に留まっていた。そこでこの実験以降、ファイバピグテイル型ホモダイン検出器の開発をNTTと共同で行っており、これについては98%程度の量子効率が期待されている。

$\chi^{(2)}$ 導波路を用いた超広帯域測定[D]

測定・フィードフォワードにおいては、通常ホモダイン検出器により直交位相振幅の情報を電気信号に変換し、その後光変調器を利用して情報を光にエンコードし直す手法が取られている。そしてこの電気信号への変換こそが帯域のボトルネックでもある。これを打破する方法として1999年にRalphによって全光テレポーテーションが提案された[8]。この中で、“被測定光”は光電変換を受ける代わりにパラメトリック増幅器を用いた光増幅を受け、フィードフォワードはこの増幅された光と対象となる光とを干渉させることによって行われる。2017年にはManceauらによってパラメトリック増幅を受けた直交位相振幅成分が光損失耐性を有していることが示され[9]、低効率広帯域のホモダイン検出器を利用した測定への期待が高まった。さらに2018年にはShakedらによってパラメトリック増幅と分光器による超広帯域なスクイズド光測定の方法が示され[10]、2019年にはFrascellaらによりBBO結晶での4dBのスクイーディングの測定が報告された[E]。

ところがこれらの先行研究では、バルク結晶や $\chi^{(3)}$ ファイバが利用されており、これは受信機としての実用性を大きく損なうものだった。バルク結晶でパラメトリック増幅が生じるモード(励起光の入射パスに応じたコーン状の空間モード)に入力光を合わせ込むのは実験上困難であり、また $\chi^{(3)}$ を利用する場合には励起光と信号光の波長が概ね一致してしまっているためにそもそもこれらの合分波が難しいという問題が発生する。

それに対し前項で製作したOPAモジュールは、励起光との合分波構造を内部に有している上、入力がファイバ結合されており、受信機として非常に使いやすい構成になっている。これに注目しOPAモジュール2機を用意し、一方を被測定光となるスクイズド光の生成に、他方をそのパラメトリック増幅用に用い、2台目の出力を光スペクトラムアナライザで測定した。これにより、3THzに渡ってスクイーディングレベルを実測することが可能となった。

加えてこの広帯域なスクイーディングレベル測定により、スクイズド光がファイバの分散の影響を大きく受けていることが明らかとなった。本研究ではファイバの分散を打ち消す分散補償ファイバを設計し、この分散補償にも取り組んだ。分散補償の結果はこの広帯域測定によって確かめられ、スクイズド光の位相が1THzに渡って保持されるようになったことを確認した。

総括

本研究ではまず導波路直結性を有する構造のOPPOの製作を行った。ここでは100MHz程度の帯域を

有するスクイーズド光が得られた。スクイーズド光の純度の点で後述するOPAに対して勝っているため、単一光子生成といった用途への応用が期待される。

次に非線形導波路を用いたスクイーズド光発生を行った。このスクイーズド光の帯域は1THz程度と見積もられたが、ホモダイン検出器の帯域の限界によりこれを実測することはできなかった。

そこでこの導波路を広帯域測定に応用し、広帯域スクイーズド光を実測することとした。その結果3THzもの広帯域に渡ってスクイージングレベルを測定することが可能となったが、一方でスクイーズド光がファイバ分散による影響を大きく受けていることも明らかとなった。そこでこれを分散補償ファイバによって解決し、その結果スクイーズド光の位相を1THzに渡って保持することに成功した。1THzに渡る位相制御と測定は波束モードの短縮に貢献し、光集積回路上での高速量子計算の道を開くものである。

参考文献・発表文献（英字は著者に自身を含むもの）

- [1] S. Yokoyama et al., *Phys. Rev. A* **92**, 032304 (2015).
- [2] J. Yoshikawa et al., *APL Photonics* **1**, 060801 (2016)
- [3] W. Asavanant et al., *arXiv:2006.11537* [quant-ph] (2020)
- [4] J. Carolan et al., *Science* **14**, 349, 6249, 711-716 (2015)
- [5] H. Vahlbruch et al., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 110801 (2016)
- [6] A. Brioussell et al., *Optics Letters* **43**, 6, 1267-1270 (2018)
- [7] T. Umeki et al., *IEEE J. of Quant. Electron.* **46**, 8, 1003-1008 (2010)
- [8] T. C. Ralph, *Opt. Lett.* **24**, 5, 348-350 (1999)
- [9] M. Manceau et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 22, 223604 (2017)
- [10] Y. Shaked et al., *Nature Communications* **9**, 609 (2018)
- [A] N. Takanashi et al., *Optics Express* **27**, 13, 18900-18909 (2019)
- [B] N. Takanashi et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics* **56**, 600100 (2020)
- [C] T. Kashiwazaki et al., *APL Photonics* **5**, 036104 (2020)
- [D] N. Takanashi et al., *Optics Express* **28**, 23, 34916-34926 (2020)
- [E] G. Frascella et al., *Optica* **6**, 9, 1233-1236 (2019)