

周期分極反転 KTiOPO₄ 結晶を用いた波長 860 nm における直交位相スクイズド光の生成 Quadrature squeezing at 860 nm with periodically poled KTiOPO₄

鈴木 重成 (D3)
Shigenari Suzuki

Abstract

−7.5 ± 0.2 dB quadrature squeezing at 860 nm was observed by using a sub-threshold cw pumped optical parametric oscillator with a periodically poled KTiOPO₄ crystal as a nonlinear optical medium. The squeezing level was obtained as the local oscillator of the homodyne detection was locked in phase onto the squeezed quadrature. See also [Appl. Phys. Lett. **89**, 061116 (2006)] or e-print quant-ph/0602036.

1 はじめに

直交位相スクイズド状態 (以下スクイズド状態) は、光の連続変数を用いる量子情報処理を行う上で不可欠なリソースである。そして、量子テレポーテーションなどといった量子情報処理プロトコルの性能は、リソースとなる状態のスクイズングレベルにより制約される。こうした量子情報処理プロトコルをより効率的に行うため、高いスクイズングレベルの実現が望まれる。

一方、波長 860 nm 帯におけるスクイズド状態の生成には、非線形光学係数の大きな KNbO₃ 結晶が多く用いられてきた。特に Polzik らは、この結晶を用いた実験を行い −6.0 dB という比較的高いスクイズングレベルを得ることに成功している [1]。

しかしながら、KNbO₃ 結晶には BLIIRA (blue light induced infrared absorption) [2] と呼ばれる現象があり、より高いスクイズングレベルを得るうえでのネックとなってきた。つまり、より高いスクイズングレベルを得るためポンプ光 (青色) のパワーを増加させると、結晶によるスクイズド光 (赤外) の吸収も大きくなってしまい、結果として得られるスクイズングレベルは頭打ちになるという問題があった。

この問題を克服すべく、青木らは擬位相整合素子の一つである PPKTP (periodically poled KTiOPO₄) 結晶を用いて波長 946 nm におけるスクイズド光の生成実験を行った [3]。ここで得られたスクイズングレベルは −5.6 dB であったが、PPKTP 結晶を用いることにより BLIIRA を回避できることを実証した。

そこで、本研究では波長 860 nm 帯において PPKTP 結晶を用いることにより、より高いスクイズングレベルを得ることを目的とした。

2 セットアップ

ここでは、本研究における実験セットアップについて概説する。まず、Fig. 1 にその概略図を示す。

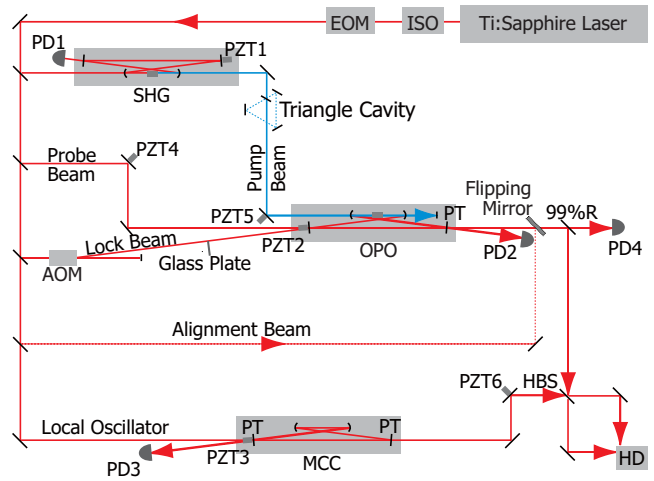


Fig. 1: Experimental setup. ISO: optical isolator, EOM: electro-optic modulator, AOM: acousto-optic modulator, SHG: second harmonic generator (frequency doubler), OPO: sub-threshold degenerate optical parametric oscillator, MCC: mode cleaning cavity, HBS: half (50:50) beam-splitter, PTs: partial transmittance mirrors, HD: homodyne detector, PDs: photo-detectors, PZTs: piezo-electric transducers.

図中の Ti:Sapphire は本実験の光源となるレーザーである。これから出力されたビームは、まず光アイソレーター (ISO) を通過し、続いて電気光学変調器 (EOM: electro-optic modulator) において 15.3 MHz で位相変調される。その後、基本波のまま用いられる分と第二高調波 (SH: second harmonic) に変換される分 (約 0.9 W) に分けられる。

前者のうち局所発振光 (LO: local oscillator) は、モードクリーニング共振器 (MCC: mode cleaning cavity) にお

いて空間モードを光パラメトリック発振器 (OPO: optical parametric oscillator) のそれと揃えられた後、ホモダイナミック検波の 50:50 ビームスプリッター (HBS: half beam-splitter) において OPO からのスクイーズド光と合波される。後者は第二高調波発生器 (SHG: second harmonic generator) において SH 光に変換され、さらにポンプ光として OPO に入力される。

OPO において生成されたスクイーズド光は、HBS において LO 光と合波された後、バランス型ホモダイナミック検出器 (HD: homodyne detector) により検出される。この HD 出力はスペクトラムアナライザーに取り込まれ、周波数 1 MHz におけるパワーが最終的に測定される。

2.1 各種ビーム

ポンプ光 (pump beam) パラメトリック増幅を行うための光で、本実験では SHG により生成された SH 光すなわち 430 nm の光を指す。

プローブ光 (probe beam) パラメトリックゲインの測定、スクイーズド光と LO 光の空間モード合わせや相対位相ロックに用いられる。これは、スクイーズド光と同じ向きに伝搬し、OPO のパラメトリックゲインによる増幅または減衰を受ける。

ロック光 (lock beam) OPO の共振周波数 (共振器長) をロックするために用いられる。また、これと同時に共振器内を周回するプローブ光との干渉を避けるために (1) プローブ光と逆方向に共振器内を周回、(2) 周波数を約 -120 MHz シフト、(3) 空間モードを TEM_{00} から TEM_{10} に変更、といった対策が講じられている。このうち 1 番目はメインの対策であるが、わずかながら結晶端面における反射があるため、両ビームの干渉を完全に防ぐことはできない。そこで、2 番目の対策として、音響光学変調器 (AOM: acousto-optic modulator) による周波数シフトが追加されている [1]。なお、周波数をシフトされたロック光は、そのままではプローブ光と同時に共振しなくなるため、3 番目の対策が採られている。この空間モードの変更は、OPO に入射する前のロック光に半分だけガラス板を挿入することにより実現している。

アラインメント光 (alignment beam) 共振器の構築に伴うアラインメントのためのガイド、共振器モードとポンプ光のモードマッチ、共振器内部ロス測定といった補助的な作業に用いられる。これは、出力カプラーから

OPO 共振器に入射され、プローブ光やスクイーズド光とは逆向きに伝搬する。

LO 光 (local oscillator) ホモダイナミック検波で量子ノイズを測定するために用いられる。

2.2 光源

レーザー Coherent 社製 MBR-110 (cw, Ti:Sapphire, 単一縦モード, 波長可変) を用いた。波長は 860 nm となるよう調整されており、その時の出力は約 1.6 W である。なお、MBR-110 の励起光源としては同社製の Verdi V10 (波長 532 nm, 出力約 10 W) を用いた。

第二高調波発生器 (SHG) OPO を駆動するためのポンプ光 (波長 430 nm の SH 光) を生成するものであり、ボウタイ型リング共振器と、その中に置かれた非線形光学結晶 ($KNbO_3$) により構成されている。約 0.9 W の基本波入力に対して、SH 出力は約 0.4 W である。

2.3 非線形光学結晶 (PPKTP)

Raicol Crystals 社製の特注品で、長さ方向に 10 mm、幅および高さ方向にそれぞれ 1 mm である。結晶端面は光の入射方向に対して垂直にカットされ、860 nm に対する反射防止 (AR: anti-reflection) コーティングが施されている。

2.4 光パラメトリック発振器 (OPO)

OPO は、ボウタイ型リング共振器とその中にセットされた非線形光学結晶 (PPKTP) により構成されている。共振器の折りたたみ角度は約 7° で、2 枚の凹面ミラーと 2 枚の平面ミラーにより構成されている。なお、機械的な安定化のため、これらミラーを保持するマウントはアルミのアンクル材に固定されている。

共振器の周回長は約 500 mm であり、曲率半径 50 mm の凹面ミラーが 58 mm 間隔で配置されている。さらに、それら凹面ミラー間には長さ 10 mm、屈折率 1.84 の PPKTP 結晶が配置されている。これにより、この共振器に立つモードのビームウエストは結晶の内部で約 $20 \mu\text{m}$ 、外部 (平面ミラーの間) で約 $200 \mu\text{m}$ となる。なお、折りたたみ角度がゼロでないことにより、その結果生じるビームウエストは若干楕円になる。

また、ミラー4枚のうち、平面ミラー1枚のみがPT(部分透過)、残りはHR(高反射)である。このPTミラーは出力カプラーで、透過率は $T = 0.123$ (実測値)である。なお、共振器内部ロス、主に結晶端面における反射に由来すると考えられ、その値は $L = 0.002$ である。本OPOの発振閾値 P_{th} は、 T, L ならびにシングルパスにおける非線形変換係数 $E_{NL} = 0.023 \text{ W}^{-1}$ から $P_{th} = (T + L)^2 / 4E_{NL}$ を用いて計算され、その値は170 mWである。

2.5 モードクリーニング共振器(MCC)

ホモダイン効率を向上させるため、本実験ではモードクリーニング共振器(MCC: mode cleaning cavity)によりLO光の空間モードを整えている。構成は非線形光学結晶が入っていないことを除けばOPOと基本的に同じで、OPOと同じ空間モードすなわちウエスト半径約200 μm のビームを生成する。

2.6 ホモダイン検波

HBSにおいてLO光と重ね合わされたスキューズド光は、ホモダイテクター(HD)により検出される。このHDは、特注のARコーティングを施されたフォトダイオード(Hamamatsu S3590-06)を2個搭載している。また、1 MHzにおける回路ノイズは、LO光パワー3 mWにおいてショットノイズ比 -18.5 dB であった。

また、HD出力を測定するためにAgilent社製E4402Bを用いた。この設定は、中心周波数1 MHz、ゼロスパン、分解能帯域幅30 kHz、ビデオ帯域幅300 Hz、掃引時間100 msとした。

なお、本波長におけるフォトダイオードの量子効率ほぼ100%とみなせるため、ホモダイ効率 η_{HD} はもっぱらHBSにおけるビームのモードマッチにより支配される。すると、プローブ光とLO光が作る干渉縞のビジュビリティ0.98から、ホモダイ効率は $\eta_{HD} = 0.96$ となる。これに、OPOからHDまでの伝搬効率 $\eta_P = 0.99$ を加味すると、トータルの検出効率は $\eta = \eta_P \eta_{HD} = 0.95$ である。

2.7 ロック機構

本実験におけるロックは、FMサイドバンド法(Drever-Hall法)[4]に基づくフィードバック制御により実現されている。

2.7.1 共振器の共振周波数

SHGにおいては漏れ光をPD1により、OPOにおいては透過したロック光をPD2により、MCCにおいては入力カプラーからの反射光をPD3によりそれぞれモニターし、フィードバック制御器によりピエゾ素子(SHGについてはPZT1、OPOについてはPZT2、MCCについてはPZT3)を駆動することで共振器長をロックする。

FMサイドバンド法による制御に必要な側帯波成分は、EOMにおける15.3 MHzの位相変調により生成される。

2.7.2 LO光とスキューズド光の相対位相

スキューズド光は古典的な振幅を持たないため、相対位相ロックのために補助的なコヒーレント光(プローブ光)を用いる。OPOから出力されるプローブ光のパワーが最小化(または最大化)されれば、その位相はスキューズド光の最もスキューズ(またはアンタイスキューズ)された直交位相成分に一致する。そこで、LO光とスキューズド光の相対位相をロックするためには、まずOPOのパラメトリックゲインをロックし、その後プローブ光とLO光の相対位相をロックする必要がある。

なお、制御のために必要となる側帯波成分は、PZT4における64 kHzの位相変調により生成される。

OPOのパラメトリックゲインをロック まず、OPO直後のビームスプリッターによりプローブ光を1%取り出し、PD4により検出することでパラメトリックゲインをモニターする。そして、フィードバック制御器によりPZT5を駆動することでロックを行う。こうして、プローブ光の位相とスキューズド光の直交位相成分が連動させる。

プローブ光とLO光の相対位相をロック プローブ光とLO光の干渉信号をモニターするためには、ホモダイテクター(HD)を用いる。そして、フィードバック制御器によりPZT6を駆動することでロックを行う。こうして、LO光とプローブ光(ひいてはスキューズド光)の相対位相がロックされる。

スキューズド光とLO光の相対位相揺らぎ これらのロックが不完全であることに起因するスキューズド光とLO光の相対位相揺らぎは、本セットアップにおいて $\tilde{\theta} = 3.9^\circ$ である。

3 実験結果

3.1 共振器内部ロス (BLIIRA の影響)

BLIIRA の影響について調査した結果を Table 1 に示す．ここで，比較のため KNbO_3 を搭載した他の OPO におけるデータも併記した．ポンプ光による共振器内部ロスの増加，すなわち BLIIRA の影響は，本波長においても KNbO_3 を PPKTP に置き換えることで大幅に低減できることが分かった．

なお，Wang らがパルス光を用いて行った調査では，やはり BLIIRA に類した現象が発生している [5]．こうしたことから，今回の実験において BLIIRA の影響がわずかだったのは，*cw* による比較的低いピークパワーのためだったと推測することができる．

Table 1: Increments in the intracavity loss induced by 100 mW pumping. (*L*: intracavity loss. The data in the second row was obtained using other OPO with a KNbO_3 crystal.)

Crystal	<i>L</i> with/without pumping	Incr. in <i>L</i>
PPKTP	0.002/0.004	0.002
(KNbO_3)	0.009/0.024	0.015)

3.2 最適なポンプパワーにおける量子ノイズレベル

スペクトラムアナライザで観測された量子ノイズレベルを Fig. 2 に示す．スクイーミングレベルはポンプ光パワー 110 mW において最高となり， -7.5 ± 0.2 dB が得られた．また，この時のアンタイスクイーミングレベルは $+12.5 \pm 0.2$ dB であった．

なお，仮に回路ノイズがなかったと仮定すると，測定されるスクイーミングレベルは -7.8 dB になると推定される．

3.3 量子ノイズレベルのポンプパワー依存

量子ノイズレベルのポンプ光パワー依存を Fig. 3 に示す．スクイーミングレベルはポンプ光パワーが大きくなるほどに飽和しており，実験的なパラメータ (パラメトリックゲイン，OPO 共振器出力カプラー透過率，共振器内部ロス，伝搬ロス，ホモダイン効率) から計算される値 (文献 [6] による) と乖離していく．

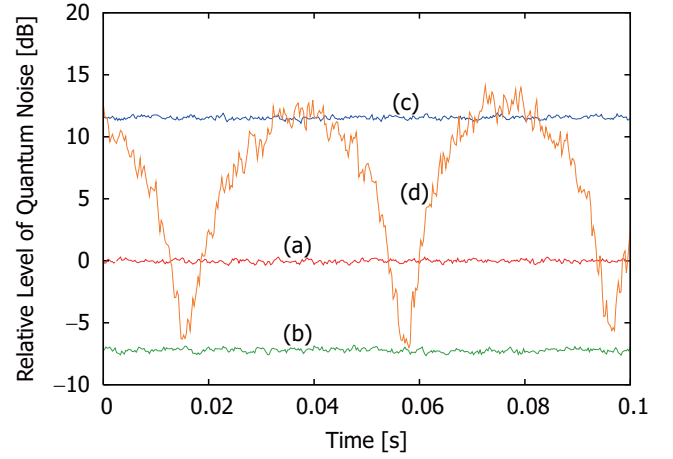


Fig. 2: Power levels of the quantum noise. (a) shot noise level, (b) LO phase is locked at the squeezed quadrature, (c) LO phase is locked at the anti-squeezed quadrature, (d) LO phase is scanned. These are normalized to make the shot noise level 0 dB. All traces except for (d) are averaged for 20 times.

しかしながら，さらに相対位相の揺らぎ $\tilde{\theta} = 3.9^\circ$ をも考慮に入れて計算したもの (文献 [7] による) は，実験的に得られたデータとよく一致している．これより，ここで見られるスクイーミングレベルの飽和は，スクィーズド光と LO 光の相対位相の揺らぎ，つまりはロックの不完全性に起因するものであると断言することができる．

なお，仮に $\tilde{\theta} = 0$ であったならば，ポンプ光パワーを 110 mW において得られるスクイーミングレベルは -9.7 dB と見積もられる．

4 まとめと今後の展望

非線形光学結晶として擬似位相整合素子である PPKTP (periodically poled KTiOPO_4) を用いて直交位相スクィーズド状態の生成実験を行い， -7.5 ± 0.2 dB のスクイーミングレベルを達成した．

この値は，ホモダイン検波における LO 光の位相を，スクィーズド光の持つ最もスクィーズされた直交位相成分にロックした状態で得られた．これは，このスクィーズド状態を量子情報処理プロトコルへ応用する際に欠くことのできない要素である．

また，波長 860 nm は Cs 原子の D_2 遷移波長 (852 nm) に近いので，スクィーズド状態のように非古典的な状態にある光を用いた原子の制御といった応用も期待される．

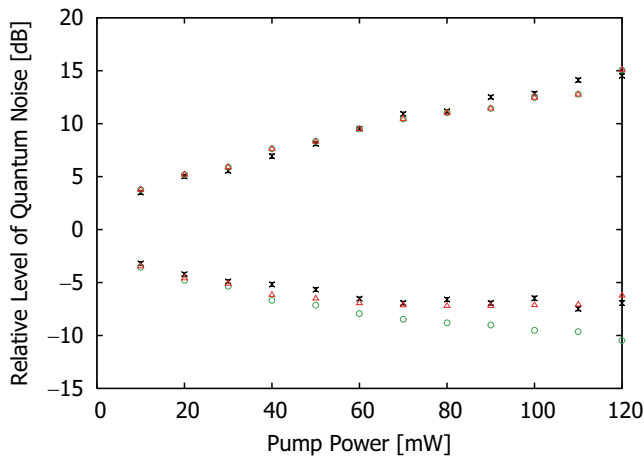


Fig. 3: Squeezing and anti-squeezing levels at several powers of the pump beam. Plots with \times indicate measured values while \circ and \triangle indicate theoretical ones which are calculated from measured classical parametric gains. The phase fluctuation of the LO is taken into account for the plots with \triangle while it is not done for those with \circ .

なお、本研究の続きとして竹野らが実験系を改良し、スクイーミングレベルは -9.0 dB まで改善された [8]。

謝辞

本研究は、共同研究先である東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻において、古澤明助教授の御指導のもと遂行されました。古澤研究室においては武井宣幸氏、米澤英宏氏、竹野唯志氏をはじめとする多くの方々にご協力頂きました。さらに、独立行政法人 情報通信研究機構 光波量子・ミリ波 ICT グループの佐々木雅英研究マネージャーには、東京大学との共同研究をアレンジして頂きました。この場を借りて深く感謝致します。

なお、本研究はMPHPTおよびMEXTによる補助を受けて行われました。

References

- [1] E. S. Polzik, J. Carri, and H. J. Kimble, *Appl. Phys. B* **55**, 279 (1992).
- [2] H. Mabuchi, E. S. Polzik, and H. J. Kimble, *J. Opt. Soc. B* **11**, 2023 (1994).
- [3] T. Aoki, G. Takahashi, and A. Furusawa, *Opt. Express*, **14**, 6930 (2006).
- [4] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward, *Appl. Phys. B* **31**, 97 (1983).
- [5] S. Wang, V. Pasiskevicius, and F. Laurell, *J. Appl. Phys.* **96**, 2023 (2004).
- [6] M. J. Collett and C. W. Gardiner, *Phys. Rev. A* **30**, 1386 (1984).
- [7] T. C. Zhang, K. W. Goh, C. W. Chou, P. Lodahl, and H. J. Kimble, *Phys. Rev. A* **67**, 033802 (2003).
- [8] Y. Takeno, M. Yukawa, H. Yonezawa, and A. Furusawa, *Opt. Express* **15**, in press; e-print [quant-ph/0702139](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0702139) (2006).