

通信波長帯ファイバレーザによる真空スクイズド光の 同軸平衡検出を用いた検出

Detection of fiber-laser-based squeezed vacuum at communication wavelength with a collinear balanced detection technique

澤井 翔太 (M2), 保坂 有杜 (B4)

Shota Sawai, and Aruto Hosaka

Abstract

We conducted an experiment to achieve squeezed vacuum at 1.55 μm using a noisy erbium-doped fiber laser, following successful realization of photon number squeezing with the collinear balanced detection (CBD) technique. However, noise reduction below the SNL was not obtained even with the CBD technique presumably due to mismatching of imperfection between two fiber interferometers.

1. はじめに

光通信波長帯におけるスクイズド光の発生は、連続量を用いた量子もつれ合い状態の生成と量子情報処理のための重要な要素技術のひとつである。しかし、古典的光通信に用いられている Er ドープファイバ増幅器(EDFA)は増幅自然光のビート雑音により雑音特性が極めて悪く、ショットノイズを遙かに超えた過剰ノイズを有する。そのため、スクイズド光の発生にはほとんど用いられず、代わって光パラメトリック発振器やCr:YAG レーザが用いられてきた。

これに対して昨年度我々は、能勢らによって実現された CBD 法[1]を応用し、EDFA を光源にした波長 1.5 μm において光子数スクイジングを達成することに成功した[2]。光子数と直交する物理量は位相であるが、高強度パルスの位相測定には高い強度の参照光を用いた干渉計測が必要となり、量子もつ

れとして用いるには簡便ではない。そこで、我々は光子数スクイズド光の実現に続き、真空スクイズド光の生成を試みた。ファイバ干渉計による真空スクイズド光の生成は原理的には光源に含まれる古典雑音は影響しないが、ファイバ増幅光源を用いた場合干渉の不完全性から真空スクイズド光に過剰雑音が混入することが問題とされてきた。今回我々は過剰雑音を含むファイバ増幅レーザを光源とした真空スクイズド光生成に CBD 法を適用し、真空スクイズド光に混入した過剰雑音を相殺して古典限界を下回る雑音圧搾を目指した。

2. CBD 法による強度雑音削減の原理

CBD 法は、過剰雑音を含んだ光パルス beams プリッタで 2 つに分割し、一方のパルス列に遅延時間 τ を与えた後再び合波し検出することで、ある特定のラジオ周波数において強度雑音を打ち消すというものである。パルス列検出に伴う出力電流 $I(t)$ は次式で表すことができる。

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) = I_1(t) + I_1(t-\tau) \quad (1)$$

ここで、 $I_1(t)$ 、 $I_2(t)$ はそれぞれ 1 つ目のパルス、それに対して τ 遅延した 2 つ目のパルスによる出力電流である。式(1)には干渉を表す項が存在しない。その理由は、パルス同士の時間的な重なりはなく光学的干渉が起こらないためである。式(1)をフーリエ変換すると次式を得る。

$$I(\omega) = I_1(\omega) + I_2(\omega) = I_1(\omega) + I_1(\omega)\exp(i\omega\tau) \quad (2)$$

$I(\omega)$, $I_1(\omega)$, $I_2(\omega)$ はそれぞれ $I(t)$, $I_1(t)$, $I_2(t)$ のフーリエ変換である。式(2)から分かるように、時間域での遅延は周波数域での位相に対応し、 $\omega = \pi/\tau$ において強度信号は完全に打ち消しあう。

3. 実験セットアップ

光源にはフェムト秒ファイバレーザ(IMRA 社製 Femtolite)を用いた。中心波長 1560 nm, 繰り返し周波数 47.5 MHz である。予備実験として, CBD により光源に含まれる過剰雑音がある特定のラジオ周波数において平衡ホモダイン検出により測定した SNL と等しい値まで削減できることを確認している。また, ファイバ伝搬後も異なる二つのファイバを用いた場合, ファイバ入射前同様 SNL までの雑音削減を達成している。真空スクイズド光検出の実験セットアップを Fig. 1 に示す。厳密にはセットアップ簡便さから偏光スクイズド光検出の配

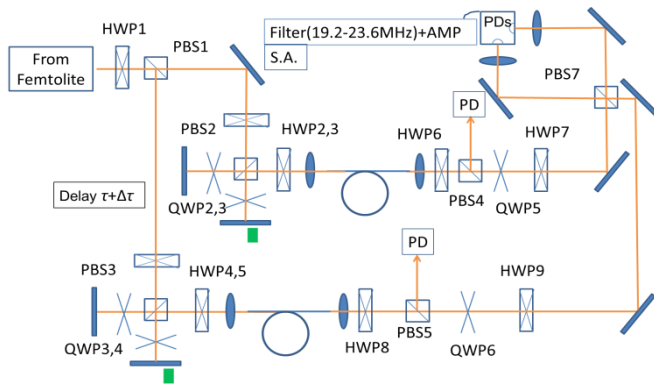


Fig.1 Experimental setup of polarization squeezing using fiber interferometers. ATT: attenuator, HWP: half wave plate, PBS: polarization beam splitter, QWP: quarter wave plate; BS: 50:50 beam splitter; PZT: piezoelectric transducer; AMP: RF amplifier; S.A.: RF spectrum analyzer; PDs: photodiodes.

置となっている。Femtolite からの出射光は PBS1 によって分岐され, そのうち一方のパルス列には繰り返し周波数 f_{rep} に対応する時間遅延 $\tau=1/f_{rep}$ に加え, さらに光学的干渉を防ぐ時間遅延 $\Delta\tau$ を分波した片方のパルスに与えた。繰り返し周波数の半分で強度雑音が削減される設定となっている。用いたファイバはシングルモード偏波保持ファイバ (FIBERCORE 社製 HB1500G), ファイバ長 3 m である。スクイズド光生成には非線形偏光干渉計 (NOPI) を用いた [3]。検出器は 2 つのフォトダイオード (PD) (KYOSEMI 社製 KPDE030) から成り差信号が出力されるよう構成されている。出力信号はバンドパスフィルタ (Mini-Circuit 社製 SBP-21.4+), 増幅器 (NF 社製 SA-230F5) を経て RF スペクトルアナライザ (Advantest 社製 Q8384) で計測される。設定は RBW 100 kHz, VBW 10 Hz である。強度雑音の測定は一方の PD に全入射させることで行った。SNL 測定時は 2 つのパルス列のうち一方を用いており, CMRR30~40 dB, ~25 mW までの線形性を確認している。二つのファイバ干渉計のうち光路長が短い方を NOPI1, 長い方を NOPI2 と呼ぶことにする。干渉精度を表す visibility は NOPI1,2 においてそれぞれ PBS4,5 の反射光を PD で受光して測定した。

4. 実験結果

Figure 2,3 はそれぞれ, 検出した最小雑音値と最大雑音値である。緑プロットで表されるのは二つの NOPI の出射光を同時に検出したもので, 横軸のパワーは実際には 2 倍である。これは CBD 適用後の測定値と言える。測定周波数は 22 MHz である。また, NOPI1,2 の visibility 測定値を Fig.4 に示す。Figure 2 にあるように CBD 適用後も古典雑音を明らかに下回る雑音削減を得ることができなかった。しかしながら, Fig.3 に示されるようアンチスクイジングレベルは CBD 適用により大幅に減少し, CBD が確かに機能していることが分かる。

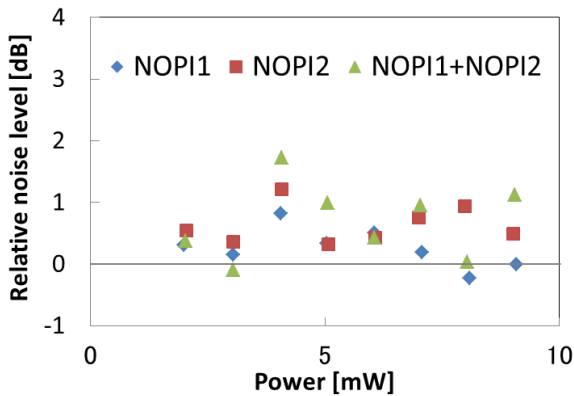


Fig. 2 Plots of minimum noise level as a function of optical power.

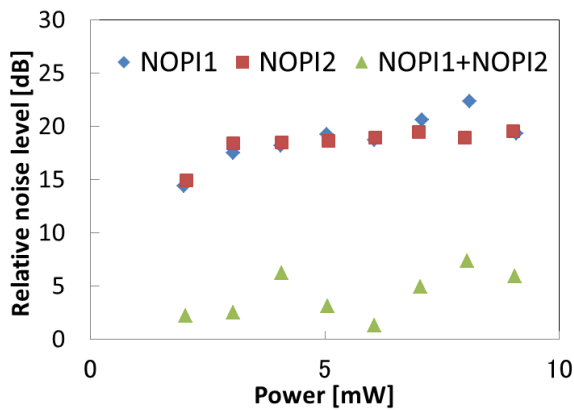


Fig. 3 Plots of maximum noise level as a function of optical power.

古典限界を下回る雑音削減が達成できなかった原因として、a) 古典雑音がとりきれてない、b) 古典雑音がとりきれているが、非線形効果が GAWBS やラマンノイズに打ち勝てずそもそもスクイジングしない、c) 増幅自然光による位相雑音が存在することが考えられる。

この中で特に a) が大きな要因であると考えられる。なぜならば、CBD 法による雑音削減には二つのパルス列が完全なレプリカであることが必要であり、そのため本手法では visibility が同じでない完全に古典雑音を相殺できない。Fig.4 にあるように二つの NOPI の visibility は必ずしも同じとは言えない。したがって、古典限界を下回る雑音削減

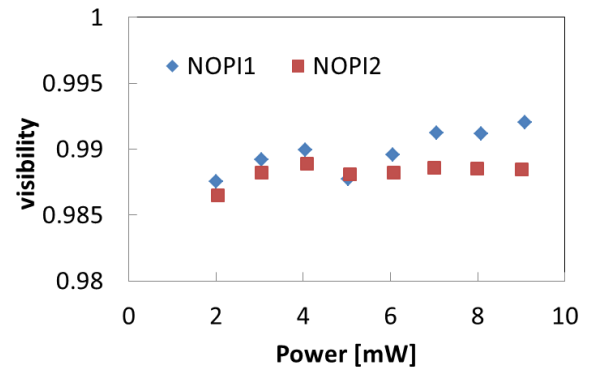


Fig.4 Plots of measured interference visibility of each NOPI.

が得られなかった大きな要因として、visibility が等しくないため古典雑音が完全に相殺されていないことが考えられる。

一方原因 b) について議論するため、伊東らが行った同じ偏波保持ファイバを使ったコヒーレント光源による実験と比較する。伊東らの報告[4]では、ファイバ長 3 m, 7.5 m, 15 m, でそれぞれ最大 -2.7dB(180-pJ/pulse/fiber axis), -1.8dB(130 pJ/pulse/fiber axis), -3.8dB(100 pJ/pulse/fiber axis)の偏光スクイジングが得られている。一方今回行った実験ではファイバレーザの最大出力~50 mW に対し結合効率 40%程度であり、最大 95 pJ/pulse/fiber axis までファイバに結合できた。伊東らの結果と比べると、より入射強度を大きくする、あるいはファイバ長を 15 m にすることでより 3 次非線形効果を利用したスクイジングは線形雑音 GAWBS を凌駕し観測しやすい条件を作ることができると考えられる。しかしながら、伊東らの実験においてファイバ長 3 m 時に、-1dB(76 pJ/pulse/fiber axis)の偏光スクイジングを得ており、本実験でもスクイジングを観測するのに最低限の非線形性は得られていると判断できる。

原因 c) に関しては、原理的には光源に含まれる雑音が強度雑音だろうが位相雑音だろうが同じ雑音であれば相殺されるはずである。

5. まとめ

EDFA 光源による真空スクイズド光の生成に CBD 法を適用したが、SNL を下回る雑音削減は達成できなかった。真空スクイズド光生成に CBD を適用する場合、信号成分に混入した古典雑音を相殺する必要がある。しかしながら、2つの異なる NOPI でのパルス列における干渉性を SNL 程度に完璧に一致させることは困難であり、CBD が完全に機能しなかったと考えられる。

本実験では CBD に加え平衡ホモダイン検出も機能しているため、CBD に用いる二つのパルス列の強度が等しくなくとも LO 光に含まれる過剰雑音は相殺される。したがって、ファイバ干渉計をフィードバック制御した状態であれば、CBD に必要な二つのパルス列の強度を非対称にする代わりに真空スクイズド光に混入した古典雑音量を対称にすることで古典限界を下回る雑音削減が達成できるのではないかと考えられる。

References

- [1]K. Nose, Y. Ozeki, T. Kishi, K. Sumimura, N. Nishizawa, K. Fukui, Y. Kanematsu, and K. Itoh, *Opt. Express* **20**, 13958 (2012).
- [2]S. Sawai, H. Kawauchi, K. Hirose, and F. Kannari, *Opt. Express*, **21**, 25099 (2013).
- [3]J. Higuchi, N. Nishizawa, M. Mori, K. Yamane, and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L1220 (2001).
- [4]伊東泰幸：光ファイバにより発生させた 1550nm 帯域での真空スクイズド光と偏光スクイズド光の比較 慶應義塾大学修士論文 (2010).