

# 過剰雑音を示すファイバ増幅レーザー光源を用いた光子数スクイジングの実現

Photon number squeezing using a fiber amplifier laser source containing substantial excess noise

澤井 翔太 (M1)、河内 比花留 (B4)

Shota Sawai, and Hikaru Kawauchi

## Abstract

We achieved photon number squeezing at 1.55  $\mu\text{m}$  using a noisy erbium-doped fiber laser, making use of collinear balanced detection technique, where intensity noise at a specific radio-frequency is canceled between two pulses.

## 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。

今回我々は、能勢らによって実現された、遅延時間を設けたダブルパルスによる低雑音検出法(collinear balanced detection (CBD) technique)[1]を応用し、EDFA を光源にし波長 1.5  $\mu\text{m}$  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。すなわち、ショットノイズを 10 dB 以上上回る強度雑音を含んだ EDFA 光源から発生した 2 つの光パルスを各々別のファイバを伝播させることで自己位相変調させ、片方のパルスに時間遅延を与えて検出

することで、特定の RF 周波数において過剰ノイズを相殺し光子数スクイジングを確認した。

## 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をビームスプリッタで 2 つに分割し、一方のパルス列に遅延時間  $\tau$  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  $\tau$  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。

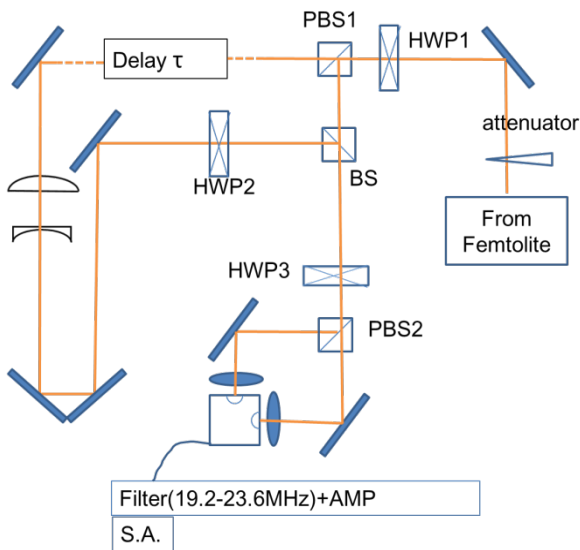


Fig. 1 Experiment setup of reducing of intensity noise by the CBD technique.

### 3. CBD 法による強度雑音削減実験

第一段階として我々は、CBD 法による強度雑音削減を試み、削減後の雑音とショットノイズレベル (SNL) との比較を行った。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。実験セットアップを Fig. 1 に示す。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。再び BS で合波される前に挿入されている平凸、平凹レンズは二ビームの空間プロファイルを一致させるために使用しており焦点距離はそれぞれ 125 mm、-50 mm である。検出器は 2 つのフォトダイード (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

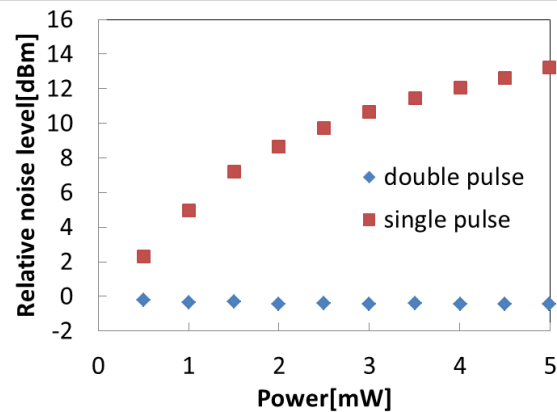


Fig. 2 Plots of noise relative to SNL as a function of laser power.

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。

実験結果を Fig.2 に示す。測定周波数は 23MHz であり、 $\Delta\tau=6.7$  psec である。Femtolite 本来の強度雑音を”single pulse”、CBD 法適用後の強度雑音を”double pulse”としている。Fig.2 から CBD 法を適用することにより光源に元々含まれている強度雑音を測定周波数 23 MHz において SNL まで削減できたことが分かる。なお、 $\Delta\tau\sim 2.5$  nsec において遅延時間に対する依存性がないことを確認している。また、光学的な干渉を行っていないためフィードバック制御による光路長の微調は行っていない。

この CBD 法による雑音削減実験においては、2 パルス目が 1 パルス目の完全なレプリカであることが重要である。そのため分岐前に存在する偏光依存性の雑音 (低消光比からくるものだと筆者は考えている) や戻り光の存在は雑音削減を阻害する。本実験では、HWP1 の直前に直線偏光子を、PBS1-BS 間にファラデー回転子を挿入し、これらの対策を行った。

### 4. CBD 法による光子数スクイジング測定

Fig.3 に実験セットアップを示す。用いたファイバはシングルモード偏波保持ファイバ

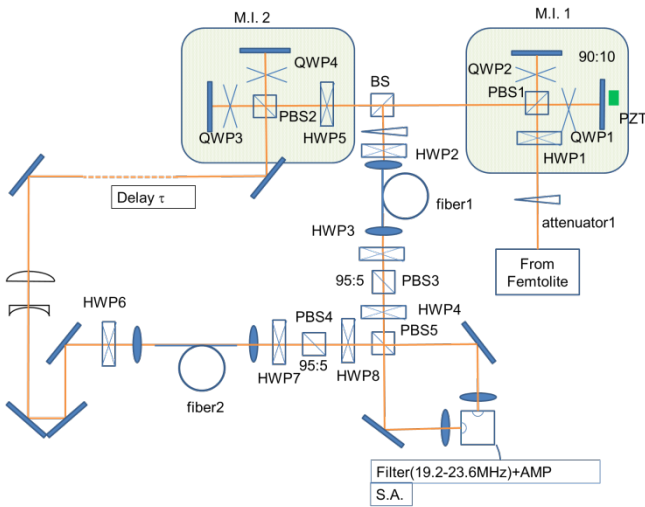


Fig. 3 Experiment setup of measurement of photon number squeezing by the CBD technique.

(FIBERCORE 社製 HB1500G)、ファイバ長 3 m である。本実験では 2 本のファイバを用意し、それぞれ 1 パルス目、2 パルス目を伝搬させた。なぜならば 2 つのパルス列を同一のファイバを伝搬させた場合、CBD 法を用いても十分な雑音削減を達成できなかったからである。スクイズド光生成には非線形偏光干渉計(NOPI)を用いた[2]。実験には 2 台の NOPI を使用したが、光子数スクイズングを測定する際、偏波間位相差を 2 台同時に掃引するために BS の前後に 1 台ずつマイケルソン干渉計を設置した。CBD に必要な 2 つのパルス列を生成には PBS ではなく BS を用いた。この場合、遅延時間

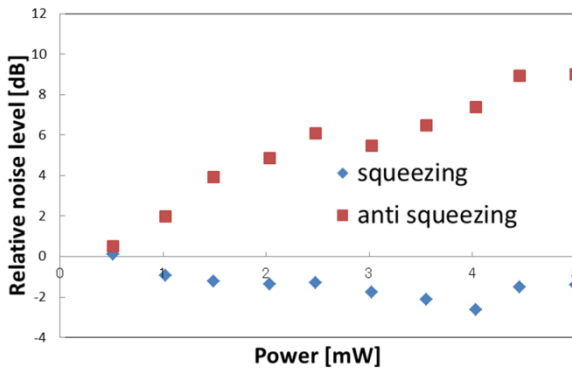


Fig. 4 Plots of noise relative to SNL as a function of coupled laser power into the fiber.

を与えた方のパルス列は回折、ミラー反射による損失のため、他方のパルス列よりもパワーが小さくなる。そのため、遅延時間を与えない側にアッテネータを挿入し 2 つのパルス列のパワーを一致させた。また、光子数スクイズング測定のため、PBS1 の分岐比は 90:10 に、PBS3,4 の分岐比は 95:5 とした。

測定結果を Fig.4 に示す。測定周波数は 22 MHz である。平均パワー 4 mW の際、最大で 2.6 dB の光子数スクイズングを確認した。この結果は、今回用いた実験スキームにより、光源に含まれる過剰雑音をある特定の周波数において打消し、位相変調された真空モードを観測できたことを示している。すなわち、2 つのパルス列を生成する BS において、高強度パルスが入射しない側のポートからは真空モードが入射する。この真空モードはファイバ伝搬中に高強度パルスとともに位相変調を受ける。検出の際、高強度パルスに元々備わっている古典雑音、量子雑音が減算されるのに対し、位相変調された真空雑音は加算されるため最終的に測定の対象となる。

## 5. まとめ

CBD 法を用いて光源に含まれる過剰雑音を特定のラジオ周波数において打ち消すことにより、通信波長帯の光子数スクイズングを達成した。高強度パルスの位相測定は困難であるため、エンタングルメントを生成した際、評価ができない。今後真空スクイズド光生成への応用が必要となる。

## 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]J. Higuchi, N. Nishizawa, M. Mori, K. Yamane, and T. Goto, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40**, L1220

(2001).