

フェムト秒パルス光源の強度 - 位相雑音特性とスクイーミング光発生への影響 Photon number and phase noise characteristics of a femtosecond pulsed EDFA fiber laser and their influence to photon number squeezed light generation.

近藤昇平(B4), 潮英岳(M2)

S. Kondo and H. Ushio

Abstract

We measure the photon number and phase noise characteristics of a femtosecond pulsed EDFA fiber laser and a femtosecond OPO at frequency and time domains. At time domain, we measure the noise using Allan variance. As a result, the photon number and phase noise of OPO are at SNL, whereas the noise of EDFA is much larger than SNL. We also investigate that their influence to photon number squeezed light generation. The OPO generates ~2 dB. But, that of EDFA exhibits the noise at 15 dB higher than SNL.

1 はじめに

光ファイバの量子情報処理技術への応用に対する期待は年々大きくなっている。特に、光ファイバにおける低損失波長領域である 1.5 μm 波長帯のスクイズド光発生は、量子情報処理において重要な位置を占める。さらに、小型化が可能で安定したレーザー発振を持つ EDFA ファイバレーザーを用いたスクイズド光発生は、量子情報処理技術の通信への応用を飛躍的に発展させるものと期待される。しかしながら、EDFA は ASE に起因した過剰ノイズを有しており、出射光の量子状態は最小不確定状態とはいえ、スクイーミング光生成の妨げとなっている。

本研究では、過剰ノイズを有する EDFA とコヒーレント光源である OPO のノイズをショットノイズレベルに対して計測して比較し、ファイバを用いた光子数スクイーミング光発生への影響を調べる。

2 実験および結果

今回、光子数ノイズと位相ノイズを周波数域と時間域で測定した。時間域で測定した場合には、Allan 分散という処理が必要となる。Allan 分散は次式で定義される。

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (f_{k+1,\tau} - f_{k,\tau})^2 \rangle \quad (1)$$

アラン分散は、あるパルスの面積分した値 f_{k+1} をパルスの値とし、一個前のパルス f_k との差の二乗をパルスの変動として計算する。この繰り返しによりノイズの分散がでる。

また、周波数域測定と Allan 分散を用いた時間域測定は対応することが式(2)からわかる。

$$\sigma_A^2(\tau) = 4\tau^2 \int_0^\infty S(\omega) \frac{\sin^4(\pi\omega\tau)}{(\pi\omega\tau)^2} d\omega \quad (2)$$

2.1 光子数ノイズ測定実験

過剰ノイズのある EDFA とコヒーレント光源である OPO の光子数ノイズを測定するために、Fig.1. のような実験セットアップを組んだ。光源の仕様は EDFA (femtolite 社製 “IMRA”) の場合、波長 1560 nm, 繰り返し周波数 47.54 MHz, パルス幅 150 fs である。OPO の場合、その光源として、Ti:Sapphire フェムト秒レーザー (Spectra Physics 社製 “MAITAI”) を使用し、OPO 後の仕様は、波長 1560 nm, 繰り返し周波数 79.5 MHz, パルス幅 270 fs である。

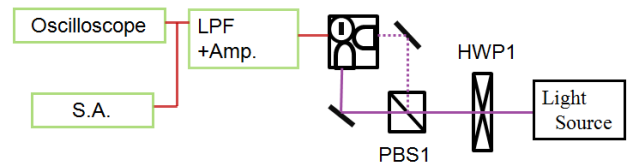


Fig.1. Scheme of photon number noise measurement

光子数ノイズの測定方法としては、半波長板 HWP1 と偏光ビームスプリッタ PBS1 で光源からのレーザーを全透過させ、腕の片方を遮断し、PD で光電流として検出し、LPF (~21.4MHz) +Amp.(NF 社製 SA-230F5)を通して、スペクトルアナライザ (ADVANTEST 社製 Q8384) とオシロスコープ (Tektronix 社製 DPO7054)で測定した。

その光子数ノイズの周波数域測定の結果を、Fig.2. に示す。

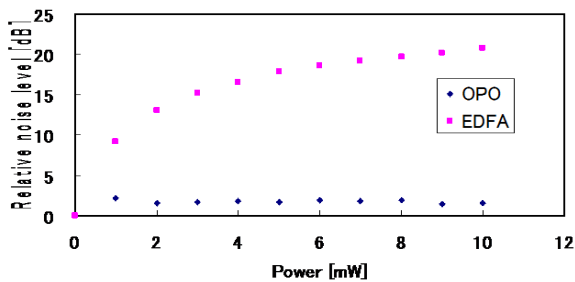


Fig.2. Photon number noise in various powers of the OPO and EDFA at frequency domain.

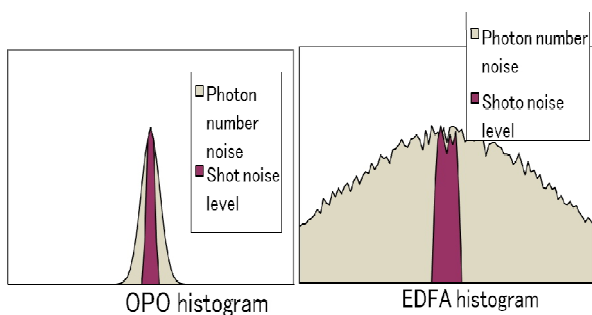


Fig.3. Histogram of photon number noise of the OPO(left) and EDFA (right) at time domain.

Fig.2 からわかるように、OPO の光子数ノイズはほぼ SNL 付近でパワーによる変化もないのに比べて、EDFA の光子数ノイズは各パワーにおいて 10 dB 以上上回っているのがわかる。つまり OPO に比べ EDFA の各パルスごとのパワーのばらつきが極めて大きい。また、Fig.3.からも OPO よりも EDFA の方が光子数ノイズが大きいことが分かる。これは、位相の揃わない ASE と信号光のビート雑音のためである。OPO については共振器で制御されたコヒーレント光であるため光子数ノイズはそもそもゼロなのだが、OPO を含む MAITAI 後の実験系のノイズが若干乗ってくるための光子数ノイズと考えることができる。

2.2 位相ノイズ測定実験

位相ノイズは、パルスごとの繰り返し周波数のずれである。その位相ノイズの測定セットアップを Fig.4.に示す。

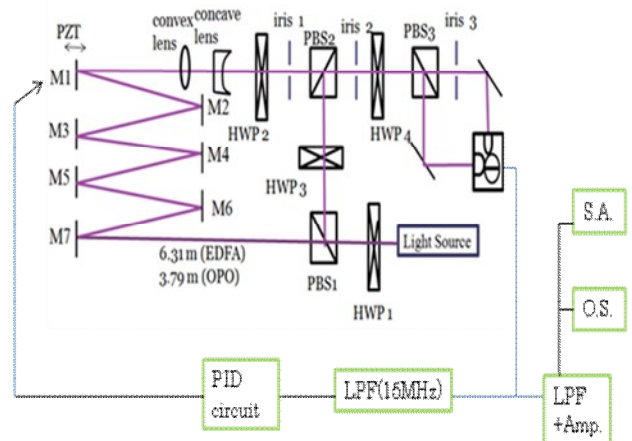


Fig.4. Phase measurement setup.

この位相ノイズ測定は Glöckl らの論文[1]を参考にして 1 つ前のパルスを LO として用いる方式で実験を行った。Fig.4.にあるように実験セットアップはマッハツェンダー干渉系とホモダイン検出器からなる。マッハツェンダー干渉系の長い腕の長さは光源の繰り返し周波数から決まる。今回の場合では、EDFA では 6.31 m、OPO では 3.79 m となる。S.A と O.S の前の LPF は、EDFA の場合では 32 MHz、OPO の場合では 70 MHz を使用した。

位相ノイズ測定を行う際に、パルス列で 1 つ前のパルスを LO として干渉させるわけだが、セットアップを見ると判るように光路が長い為に空気の揺らぎ等で干渉計としてのゆらぎは非常に大きなものとなる。測定時間にもよるが、数 100 ミリ秒以上の測定においては PID フィードバック等のロックが必要になる[Fig.5.]。

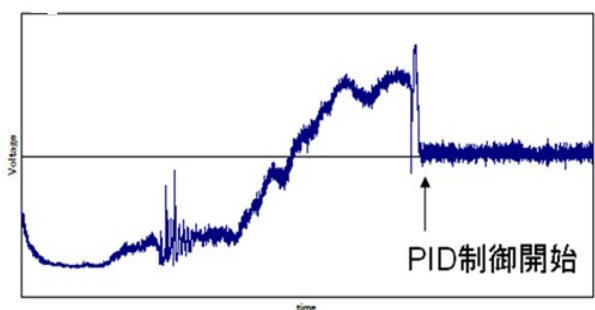


Fig.5. Output of the balanced homodyne measurement before and after the cavity stabilization. (Sweep time is about 30 sec.)

干渉計のロックは、ただ低周波の干渉計の揺らぎを消すだけで、位相ノイズが現れる周波数における揺らぎをフィードバック回路が補償することはない。今回 PID 制御に用いたのは、タートル工業社製 PID ボード T-PID01Z である。

このセットアップにおいて、PBS にて 50:50 に分かれた光は長い腕の方は 1 パルス遅れ、短い腕のパルスと干渉する。このとき長い腕の方が明らかにパワーが減衰するため PBS2 の直前でパワーを合わせた。干渉は PBS3 で起こり、それぞれがさらに 50:50 の分割を受けホモダイン検出器に入射する。この 2 つのパルスの干渉によるビジビリティを見ながら光路を調整するのだが、1 パルスずれる状態であるため（自身同士の干渉ではない）ビジビリティは 50% 程度である。この測定系は量子状態の計測をするのではなく、パルスの包絡線程度の干渉で良いためビジビリティにあまり固執する必要はない。しかし、フィードバックをかける際の参照信号となるため、ビジビリティの一番良い所に合わせることは重要であり、ある程度のビジビリティがないとフィードバックをかけることは出来なくなる。

位相ノイズの周波数域測定結果を光源が EDFA の場合 Fig.6, OPO の場合では Fig.7 に示す。

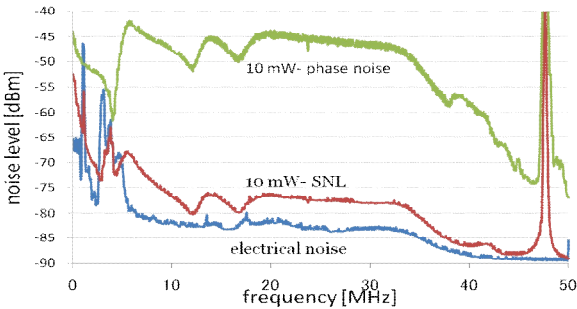


Fig.6. Phase noise of EDFA at frequency domain.

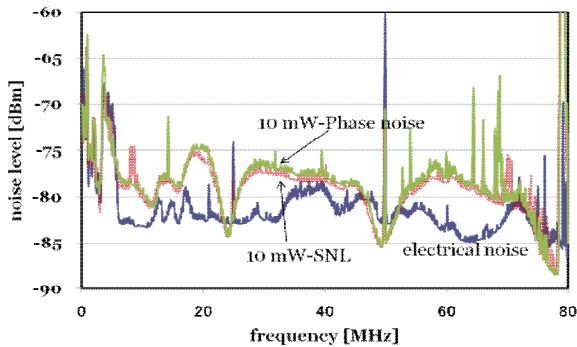


Fig.7. Phase noise of OPO at frequency domain.

位相ノイズを評価すべき周波数 f_m は、繰り返し周波数の $2n$ 分の 1 の周波数である[1]。

$$f_m = \frac{f_{rep}}{2n} \quad (3)$$

f_{rep} : 繰り返し周波数

EDFA では 23.8 MHz, OPO では 39.6 MHz である。測定結果から、EDFA は SNL と比較して位相ノイズが定量的に大きいことがわかり、OPO は SNL と位相ノイズが一致していることがわかる。また、この測定には 160 sec かかるがこの間フィードバックは安定しており、OPO の SNL と位相ノイズが一致していることから位相ノイズ測定ができていたことがわかる。

次に、位相ノイズを時間域測定から計算した結果を Fig.8.に示し、EDFA の位相ノイズを周波数域と時間域で計算した結果を Fig.8.に示す。

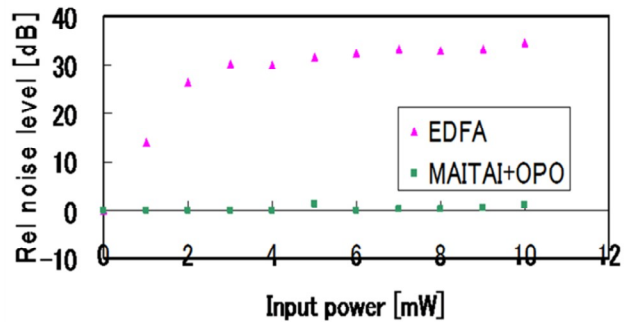


Fig.8. Phase noise of EDFA and OPO at time domain.

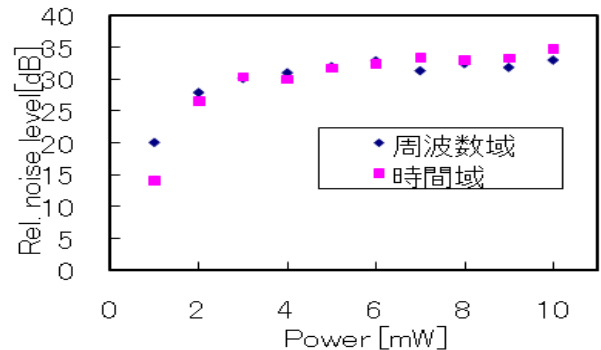


Fig.9. Relation of time and frequency result of phase noise measurement.

Fig.9より周波数域と時間域での EDFA の位相ノイズはほぼ一致した。(1 mW はフィードバックがう

まく掛からなかったために測定値がずれてしまった。) この結果から、位相ノイズ計測が正しく行えたといえる。よって、Fig.8.の各光源においての位相ノイズ測定も正確と考えられる。ただし、本手法では繰り返し周波数の半分の周波数成分以外の成分も含めてアラン分散を計算しているという課題は残る。

2.3 光子数スキュージング発生実験

2.1 で調べた光子数ノイズがどのような影響を光子数スキュージングに与えているのかを調べた。光子数スキュージング発生実験セットアップは、Fig.10.である。

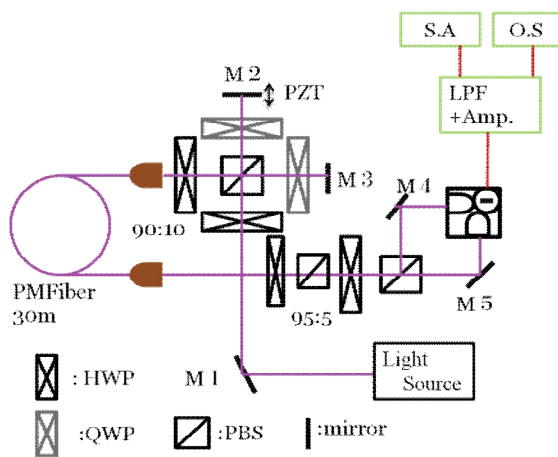


Fig.10. Experimental setup of photon number squeezing with NOPI.

光子数スキュージングを生成させるスキューザとして PM ファイバを用いた非線形偏光干渉系 NOPI を使用した。LO と SV の相対位相を変化させることにより、ノイズの最大からノイズの最小までを測定が可能だからである。この NOPI は 30 m の偏波保持ファイバであり、ビート長が 4 mm のため偏光方向によって出射パルスのタイミングが 2 cm 程度ずれる。そのため NOPI 入射前にマイケルソン干渉系を設置し、ディレイをつけることで出射パルスのタイミングを合わせた。

光子数スキュージング発生結果を光源が OPO の場合 Fig.11, EDFA の場合では Fig.12 に示す。

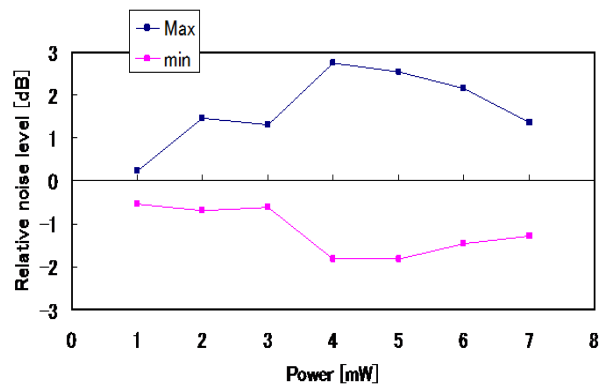


Fig.11 Photon number squeezing with OPO.

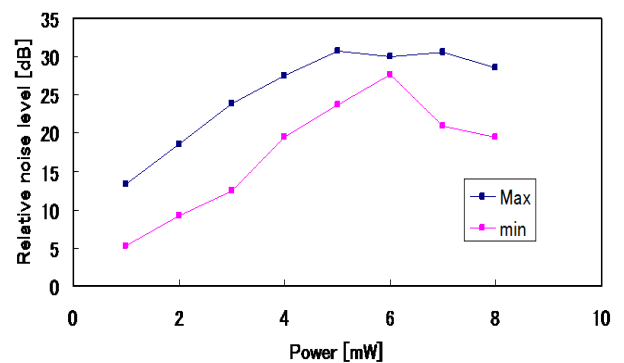


Fig.12 Photon number squeezing with EDFA.

値は全て SNL により規格化されている。OPO では、今回測定したパワーにおいてはすべてノイズが最小の時のプロットが SNL を下回っており、測定したすべてのパワーで光子数スキュージングが起こっていることがわかる。また、パワーが増えれば増えるほどスキュージング量が増えるわけではないというのは、パワーにより SPM の量に変化し、測定する方向が最適でない場合に起こる。

一方、EDFA の方では、雑音が抑制されている方向でも SNL を定量的に上まっております。スクイズド光は発生していないことが分かる。

4 まとめ

本研究から2つのことがいえる。まずは、EDFA の位相ノイズ計測がアラン分散を用いた時間域計測によってできたことから、パルス光に関しての位相ノイズ計測法が確立できた。よって、ポストセクション法によるコヒーレンス蒸留に応用する基盤ができた。

次にフェムト秒 EDFA レーザーの光子数ノイズおよび

び位相ノイズ計測から、コヒーレントな OPO に比べて極めてノイズ特性に劣ることが定量的に示され、光子数スクイーミングが得られない理由も明確にできた。

References

- [1] O. Glöckl, U. L. Andersen, S. Lorenz, Ch. Silberhorn, N. Korolkova, and G. Leuchs *Opt. Lett.* **29**, 1936(2004)