

各種フェムト秒 EDFA レーザの量子ノイズ計測

Quantum Noise Measurement for some Femtosecond EDFA Laser Light Sources

百瀬嘉則(M2)

Y. Momose

When femtosecond pulse EDFA fiber lasers at wavelength of $1.5\mu\text{m}$ is used as a pump light for the generation of squeezed vacuum (SV), excessive noise in the EDFA source, which is thousands of times larger than that in coherent state, retards from generation of SV light.

In this paper we experimentally examine which EDFA femtosecond light sources, such as a commercial fs fiber laser, gain-switched amplified by EDFA, OPO amplified by EDFA, is more useful to generate SV. An experiment for generation of SV with a fs laser and a Sagnac fiber refrigerated by liquid nitrogen to reduce guided acoustic-wave Brillouin scattering (GAWBS) is performed.

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 $1.3\mu\text{m}$ および $1.5\mu\text{m}$ 波長帯のスクイズド光の発生は、連続変数の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発振を持つ EDFA ファイバレーザ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、この $1.5\mu\text{m}$ 波長帯フェムト秒パルス EDFA ファイバレーザをポンプ光に用いた真空スクイズド光 (SV: Squeezed Vacuum) においては、EDFA 光源は自然放出光によりコヒーレント状態よりも最大で数千倍の過剰量子雑音を有することが昨年までの我々の実験で確かめられており [1], SV 発生に妨げになっている。

そこで、本研究ではゲインスイッチレーザを EDFA 増幅した光源およびフェムト秒 OPO 光を EDFA 増幅した光源のもつ過剰量子雑音量を測定し、EDFA ファイバレーザ (IMRA 社製 Femtolite) の過剰量子雑音量 [2] と比較し、SV 発生に有効な光源であるかを検証することを目的として実験を行った。また、ファイバを使

った SV 発生においては GAWBS (Guided Acoustic-Wave Brillouin Scattering) が妨げとなることが知られているが [3], これは冷却することで抑えることができる。過去の本研究室の EDFA ファイバレーザ光源を用いた SV 発生実験においては、ファイバを冷却して行ったことがない [1]。そこでファイバを冷却して GAWBS を抑えた状態で SV 発生実験を行った場合、改めて EDFA 光源のもつ過剰量子雑音が問題となるのかどうかも実験検証した。

2 実験

2.1 各種フェムト秒 EDFA 光源の量子ノイズ計測

・EDFA 増幅ゲインスイッチレーザ

ゲインスイッチレーザ (PiLas: Pico Second Injection Laser) を EDFA (Er doped fiber amplifier) で増幅した光の過剰量子雑音量を測定するにあたり、Fig.1 のような実験セットアップを組んだ。光源のゲインスイッチレーザの使用は、パルス幅 22ps, 繰り返し周波数 100MHz, 中心波長 1545nm である。EDFA は電源電圧を 5V 供給し、コントロール電圧を 1.4V-2.0V で変えることにより、EDFA の LD 電流を 308mA から 390mA に変化させた。PiLas の光と EDFA とのカップリングを考慮してレンズは $F=22\text{mm}$ の対物レンズを用いた。出射側では光のコリメートを行った。HWP1 と PBS1 では、ファイバ出射後の消光比を改善している (12:1 \rightarrow 50:1)。今回は ATT で光のパワーを調整している。

まず、EDFA で増幅された光を PBS2 で 2 つに 50:50 に分割し、SNL (Shot Noise Level) を周波数域ホモダイン測定で計測した。次に、片側の PD のみに光を入力し、光子数ノイズを周波数域ホモダイン測定で計測した。スペクトルアナライザの設定は RBW100kHz, VBW10Hz, Average 20times, Center 3MHz, Span 0Hz で行った。LPF は 15MHz で 3dB 減衰するものを用いた。

・EDFA 増幅 Ti: Sapphire レーザ励起 OPO

次に Ti:Sapphire レーザ(Maitai)からの 810nm 波長帯のフェムト秒パルスレーザーを用いて PPLN 結晶を励起し、光パラメトリック発振器(OPO: Optical Parametric Oscillator)で 1530nm 波長帯のパルスレーザーに波長変換したものを光源として用いた。パルス幅は約 500-700fs, 繰り返し周波数 79.25MHz である。これを EDFA で増幅した。実験セットアップとしては Fig.1 の光源以外は同じである。ゲインスイッチレーザーを EDFA 増幅した過剰量子雑音量測定と同様に測定を行った。

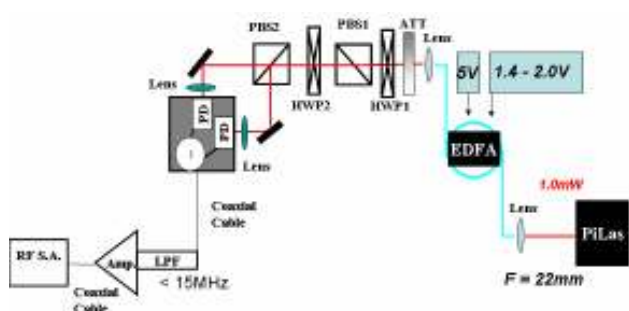


Fig.1: Experimental setup for measuring quantum noise of PiLas amplified by EDFA. HWP: half wave plate, PBS: polarizing beam splitter, FR: faraday rotator, PD: photo diode, BHD: balanced homodyne detector.

2.2 Femtolite による冷却 Sagnac ファイバ SV 発生

次にフェムト秒パルス発生する EDFA ファイバレーザー(IMRA 社製 Femtolite)を光源に用いて、SV 発生実験を行った。実験セットアップは Fig.2 に示したとおり、光源、Sagnac ファイバ干渉計、平衡ホモダイン検出系からなる。平衡ホモダイン検出器後の電気回路を Fig.3 に示す。PD で測定した信号を電気的に差分し、Amp. の飽和回避と高周波のノイズ削減のために 15MHz で 3dB 減衰する LPF を用いて繰り返し周波数成分(47.5MHz)を抑制している。この信号を Amp.(NF 社製広帯域ローノイズアンプ: SA230F5)で増幅し、RF スペクトルアナライザ(ADVANTEST 社製: R3131)で量子雑音を測定した。スペクトルアナライザの設定は RBW100kHz, VBW10Hz, Center 3MHz, Span 0Hz である。Sagnac ファイバの-3dB 結合器は SV と LO(Local Oscillator)の分岐比可変のタイプと不可変のタイプの 2 種類を用いた。接続されているファイバはそれぞれ、ファイバ長 30m, コア径 10.5 μm のシングルモードファイバ SM15P と SM15-PS-U25A である。ファイバは

液体窒素に 1 時間以上つけて冷却した。

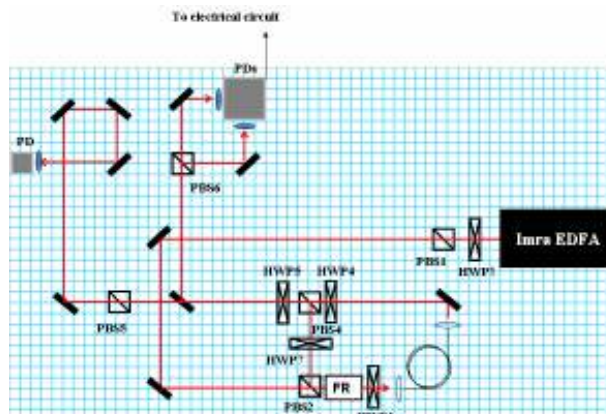


Fig.2: Experimental setup for measuring quantum noise of squeezed vacuum. HWP: half wave plate, PBS: polarizing beam splitter, FR: faraday rotator, PD: photo diode.

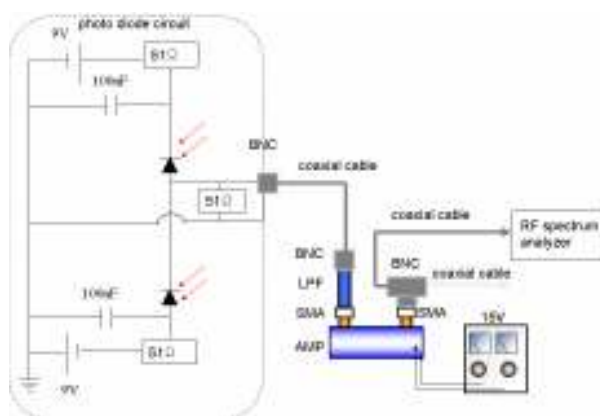


Fig.3: Electrical circuit of balanced homodyne detector. LPF: low pass filter, AMP: amplifier.

3 実験結果

3.1 各種 EDFA 光源の量子ノイズ計測結果

ゲインスイッチレーザー, ゲインスイッチレーザーを EDFA で増幅した光, Ti:Sapphire レーザ励起 OPO を EDFA で増幅した光の量子雑音 (光子数ノイズ) の測定結果を EDFA ファイバレーザー(femtolite)の測定結果 [1]と合わせて Fig.4 にまとめる。横軸は測定した光の強度, 縦軸は測定した量子ノイズを SNL(Shot Noise Level)で割った値をデシベル表示したものを示している。

光強度 500 μW のときの EDFA で増幅する前のゲインスイッチレーザーの量子雑音量は 15dB であり, すでに

EDFA ファイバレーザと同じ量の量子雑音を持っていることがわかる。ゲインスイッチレーザを EDFA で増幅したときには、光強度 2000 μ W において 45dB の量子雑音を持っていることが分かる。この光強度において EDFA ファイバレーザは約 20dB であることから極めて大きな量子雑音量を持っているといえる。本実験では LD 励起電流を 390mA, 358mA, 316mA, 308mA に変化させたが、いずれもほとんど量子雑音量が変わらなかったのが代表的な 390mA のときをのせた。参考までに、おのおのの LD 励起電流に関して EDFA 出射パワーはそれぞれ 50mW, 44mW, 38mW, 34mW であった。また、Ti: Sapphire レーザ励起 OPO を EDFA で増幅した量子雑音量は、光強度 500 μ W では約 12dB で EDFA ファイバレーザの量子雑音量より 3dB 程度低いが、2000 μ W ではどちらも約 20dB と同じくらいの量子雑音量を持っている。

以上をまとめると、ゲインスイッチレーザを EDFA 増幅した光が桁違いに量子雑音量が大きく、Ti: Sapphire レーザを EDFA 増幅した光と EDFA ファイバレーザの過剰量子雑音量は同程度であるといえる。ゲインスイッチレーザを EDFA 増幅した場合に極めて大きな量子雑音量になるのは、ゲインスイッチレーザそのものが、すでに EDFA ファイバレーザと同じくらいの量子雑音量を持つためである。

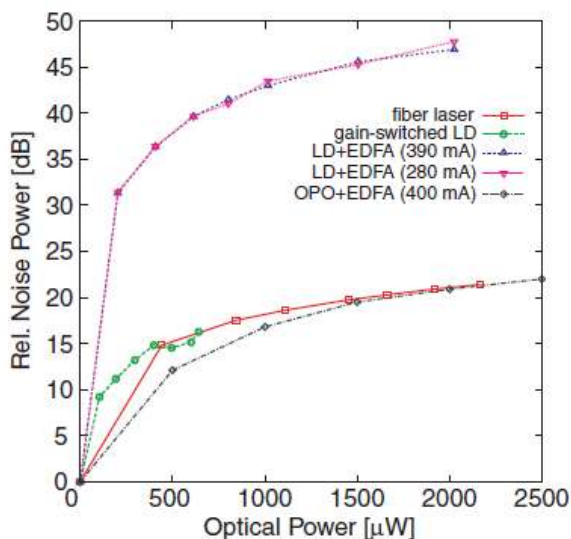


Fig.4: Summary of quantum noise measurements for gain switched LD, gain switched LD amplified by EDFA, Maitai OPO amplified by EDFA, and EDFA fiber laser (Femtolute).

3.2 冷却 Sagnac ファイバの SV 測定結果

EDFA ファイバレーザを光源にして可変型-3dB 結合器を用いた Sagnac ファイバを使って SV 発生を行った実験の量子雑音測定結果と不可変型-3dB 結合器を用いた Sagnac ファイバの場合の量子雑音の最大値(アンチスキューイング)と最小値(理想的にはスキューイング)の測定結果をそれぞれ Fig.5 と Fig.6 に示す。横軸はファイバ入射パワー、縦軸は測定した量子雑音を SNL で割った値をデシベル表示したものを表す。

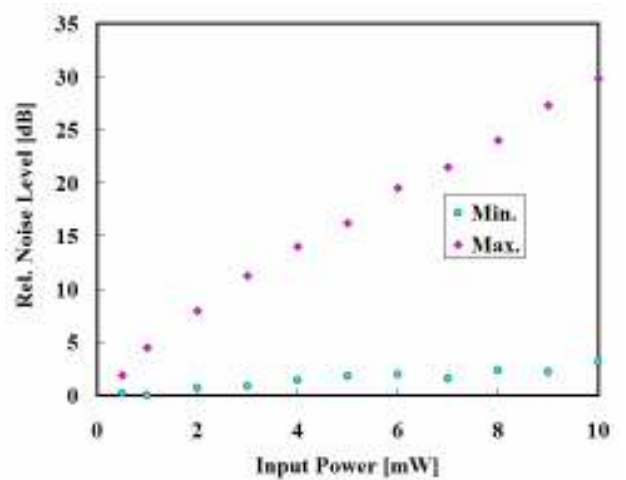


Fig.5: Noise level / SNL to input power into fiber (SM15P).

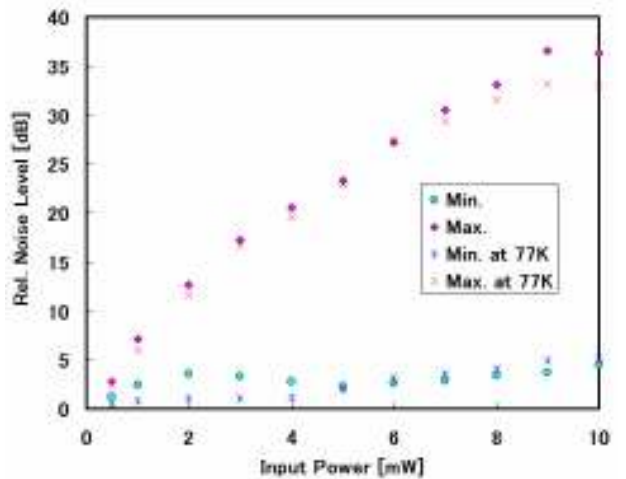


Fig.6: Fig.5: Noise level / SNL to input power into fiber (SM15-PS-U25A).

Fig.5 の可変タイプのファイバカップラを用いた場合、LO と SV の分岐比は 500:1(0.5mW, 1mW), 523:1(2mW),530:1(3mW),531:1(4mW),521:1(5mW),500:1 (6mW),476:1(7mW),441:1(8mW),398:1(9mW),335:1(10m

W)となった。Visibility は 84%である。このとき液体窒素でファイバを冷却したら、SV が直線偏光(消光比 100:1)から円偏光(1:1)になってしまい SV 測定を行うことができなかつたので Fig.5 には冷却していない場合の結果のみをのせた。ファイバ入力強度が増えるに従って、量子雑音量の最小値は SNL よりもより大きくなっている。EDFA ファイバレーザの光源がもつ過剰量子雑音は Fig.4 からわかるとおり、強度が大きくなるに従い大きくなるので、その影響で最小値が SNL から離れているということがよく分かる。

Fig.6 の不可変タイプのファイバカップラを用いた場合、LO と SV の分岐比は 121:1(0.5mW), 120:1(1mW), 111:1(2mW),100:1(3mW),90:1(4mW),81:1(5mW),61:1(6mW),46:1(7mW),38:1(8mW),26:1(9mW),27:1(10mW) となった。Visibility は 78%である。このとき液体窒素でファイバを冷却したときの結果と冷却する前の結果を合わせて載せた。4mW 付近までは、冷却により最小値が SNL に近づいているが、それ以上の強度では冷却による効果がほとんどないことが分かる。これは強度が強くなるに従い、光源の過剰量子雑音が大きくなり、さらに SV/LO の分岐精度が悪くなることから GAWBS よりも過剰量子雑音の影響が支配的になるためだと考えられる。いずれにせよ、過剰量子雑音をもつ Femtolite を光源に用いると、液体窒素で冷却した Sagnac ファイバを使っても SV を発生させることはできないことが明らかになった。

4 結論

Ti: Sapphire レーザ励起 OPO を EDFA 増幅させた光は、IMRA 社製の EDFA ファイバレーザ Femtolite と同じくらいの過剰量子雑音量をもつため、ファイバを使った SV 発生に使えないことが明らかになった。また、ゲインスイッチレーザを EDFA 増幅させた光は Femtolite よりさらに大きな(2mW において 25dB 大きい)過剰量子雑音量をもつため、こちらも SV 発生に使えないことが明らかになった。いずれも LD 励起電流の値の違いによる過剰量子雑音の変化は見られなかつた。

また、Femtolite を光源にして液体窒素により Sagnac ファイバを冷却して GAWBS を抑えた条件において SV 発生を試みたが、やはり最終的に光源のもつ過剰量子雑音のためスキージング発生には至らなかつた。

今後、EDFA 光源とファイバを使って SV 発生を行うには、さらに SV/LO の分岐精度をあげて過剰量子雑音を十分に下げた条件(ファイバ冷却しなくても SNL 程度まで最小値を下げた条件)で、ファイバ冷却により GAWBS を抑えて SV 発生を行う必要がある。

References

- [1] 田口修平, 廣澤賢一, 百瀬嘉則, 藤原悠二, 神成研究室 Annual Report 2006-2007, 65.
- [2] 百瀬嘉則, 田口修平, 廣澤賢一, 神成研究室 Annual Report 2005-2006, 62.
- [3] C. X. Yu, H. A. Haus, and E. P. Ippen, Opt. Lett. **26**, 669 (2001).