

# 短尺ファイバ干渉計を用いた800 nm帯真空スクイズド光発生 Generation of squeezed vacuum light at 800 nm using an optical interferometer with short optical fibers

中込久幸 (M2)

H. Nakagome

## Abstract

Sufficient squeezing can be generated at 800 nm using a very short fiber interferometer, even if GAWBS (Guided Acoustic Wave Brillouin Scattering) noise reduces the amount of squeezing. In the experiment, a nonlinear polarization interferometer using a very short PM fiber, where GAWBS noise can be partially cancelled out between co-propagating two orthogonally polarized laser pulses, is used to verify the dependence of squeezed vacuum on the fiber length. The highest magnitude of squeezing at -2.1dB is obtained with a fiber length of 40 cm and dispersion compensation. It is a trade-off between the length of fiber and the incident laser power to achieve higher squeezing levels.

## 1 はじめに

次世代の情報処理技術として近年注目されているのが量子状態をビットに用いた量子情報処理である。この技術に欠かせない連続量のもつれ合い状態を生成するために必要な真空スクイズド (SV: Squeezed Vacuum) 光源の開発は、2次の非線形現象であるパラメトリック下方変換を用いた方法で研究が進められてきた。この方法では早い時期に量子テレポーテーションまで実現しており<sup>1</sup>、量子情報光源開発の研究には一日の長がある。一方で、光ファイバを代表とした3次の非線形現象によってもSV光を発生できることが知られており、光ファイバが光を低損失で伝送できることや、干渉などの光学操作を容易にすることを考えると、むしろ量子情報通信・処理の研究においては、本手法は非常に将来性があると考えられる。

しかしながら、光ファイバには導波路固有の様々な散乱ノイズがあり、これらが良質なSV光の発生を妨げている。特に導波路型ブリルアン散乱

( GAWBS: Guided Acoustic-Wave Brillouin Scattering )<sup>2</sup>の影響が顕著であり、光ファイバでのSV光発生を困難にしている。このGAWBSは熱起因の雑音であるため、ファイバ長や入射強度によって増加する。もともとソリトン伝播ができない800 nm帯の光源では、ファイバ長を長くしても非線形効果を長さに比例して増加できないことから、むしろ光ファイバを短くしてこの雑音の影響を低減させる方が、結果的に高いスクイズングが得られるのではないかという発案に至った。よって本報告において、実際に短尺光ファイバ干渉計を用いたスクイズング発生実験を行い、GAWBS対策におけるひとつの方法を提案する。

## 2 GAWBSのファイバ長・入射強度依存性

はじめに、GAWBSによる散乱ノイズがどれほどファイバ長に依存するかを実験的に確認した。Fig. 1にその実験セットアップを示す。

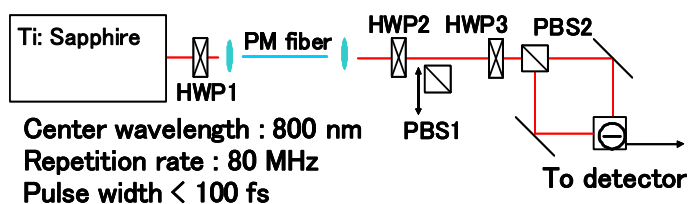


Fig. 1: Experimental setup of measurement polarization GAWBS noise. HWP: Half Wave Plate, PBS: Polarization Beam Splitter.

本研究で用いた光源は、Spectra Physics社製Ti:sapphireフェムト秒パルスレーザー”MaiTai”で、中心波長780-850 nm (実験では808nmを使用した)、スペクトル幅11 nm、時間幅<100 fs、及び繰り返し80 MHzである。本実験では光ファイバに高強度のパルスを入射しているので、その端面反射による戻り光によってモードロックが落ちることを防ぐため、光源直後にF.I. (Faraday Isolator, Electro-Optics Technology社製)を

設置した。光ファイバには、一般的なシングルモード偏波保持（PM: Polarization Maintain）ファイバ（PM780-HP NUFERN 社製）を用いている。光ファイバの偏波軸に入射パルスの偏光を合わせ、これを局部発振（LO: Local Oscillator）光として、直交する偏光側に散乱した光を平衡ホモダイン検出によって測定した。ショットノイズ（SNL: Shot Noise level）は PBS1 を挿入し、光ファイバの偏波軸と同じ LO 光だけを取り出して測定している。Fig. 2 に各入射強度と各ファイバ長における偏光散乱ノイズの特性を示す。

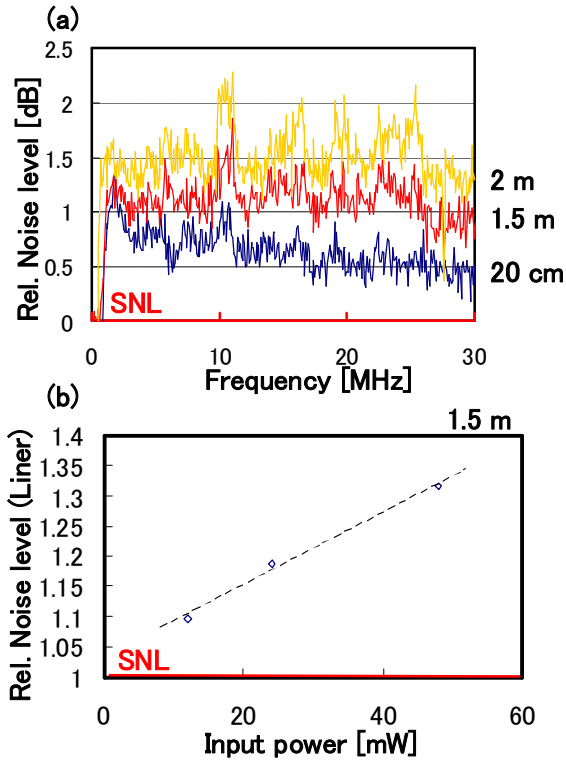


Fig. 2: Characteristic of polarization scattering noise: (a) Frequency characteristic of polarization scattering noise depending on fiber length at 24 mW. (b) Relative magnitude of polarization scattering noise depending on input power with a 1.5 m fiber at 21 MHz, at which squeezing noise is measured.

(a) では入射強度を 24 mW のときの各ファイバ長における周波数特性を示している。11,16,18,24 MHz 付近に GAWBS によるスパイクを確認することができる。側帯波もファイバ長によって伴って大きくなっており、短い光ファイバを用いる優位性が見て取れる。また(b) では、ファイバ長（1.5 m）を固定して入射強

度を上げたときのスクイジング測定周波数（21 MHz）におけるノイズ特性を示している。パルスの入射強度（ピークパワーではなく平均パワーである）に伴ってノイズが線形に大きくなっていることが伺える。これらから、ファイバ長と入射強度によってノイズ量が増加することを実験的に確認することができた。

### 3 短尺光ファイバによるスクイジング見積もり

光ファイバを短くすることで GAWBS の影響を抑えることができることは確認したが、短い光ファイバでもスクイジングに十分な非線形効果を得ることができるかどうかを、ファイバ伝搬の非線形シュレディンガー方程式<sup>3</sup> ((1)式) を Backpropagation 法<sup>4</sup> によって数値的に解析することで検討した。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \hat{A}(t, z) = & j \sum_{k \geq 2} \frac{j^k \beta_k}{k!} \frac{\partial^k}{\partial t^k} \hat{A}(t, z) \\ & + j(1 - f_R) \gamma \left| \hat{A}(t, z) \right|^2 \hat{A}(t, z) \quad (1) \\ & + j f_R \gamma \int_{-\infty}^t h_R(t - \tau) \left| \hat{A}(\tau, z) \right|^2 d\tau \hat{A}(t, z) \end{aligned}$$

Fig. 3 に数値解析の結果を示す。なお、本解析には GAWBS を考慮しておらず、非線形効果によるスクイジング量のみを純粹に見積もった。

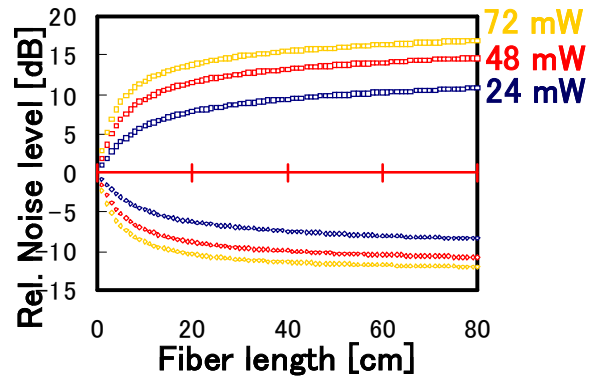


Fig. 3: Simulation of magnitude of squeezing during a fiber propagation. Squeezing level and anti squeezing level depended on an optical fiber length at various input power.

解析に用いた光ファイバのパラメータはそれぞれ、非線形係数 $\gamma=-8.51$  /W/km, 二次分散量 $\beta_2=-38.1$  ps<sup>2</sup>/km, 三次分散量 $\beta_3=-0.1$  ps<sup>2</sup>/km である。またラマン応答関数 $f_R=0.18$  として、これを考慮した。Fig. 3 から基本ソリトン伝搬のようにピークパワーを保ったままパルス

が光ファイバ内を伝搬しなくても、十分高い強度でパルスを入射すれば比較的高いスクイジング(概ね-10dB程度)を見積もることを確認できる。また予想されたように、800 nm 帯のような非ソリトン伝搬をする場合、パルスが光ファイバを伝搬するほど、またその入射強度が高いほどスクイジング量は純粋に増えていくことがわかる。これは伝搬によって時間幅がすぐに広がり、非線形過程を起こすためのピークパワーを維持しないために、高次ソリトンのような複雑な非線形過程を介さないことによると考えられる。逆に基本ソリトンのように伝搬し続けることでスクイジング量が増えるのではなく、ある程度の伝搬後にはスクイジング量が飽和する傾向があることがわかる。したがって、この飽和が始まる 20~40 cm 以上にファイバ長を伸ばしても得られるスクイジング量は大きく変わらない一方で、ファイバ長に線形に応答する GAWBS ノイズがスクイジングを劣化させ続けるだけということが予想される。そこで、実際に 20~80 cm 程度の光ファイバ干渉計によるスクイジングの発生実験を行い、これを実験的に検証した。

#### 4 短尺光ファイバ干渉計による SV 発生実験

実験セットアップを Fig. 4 に示す。

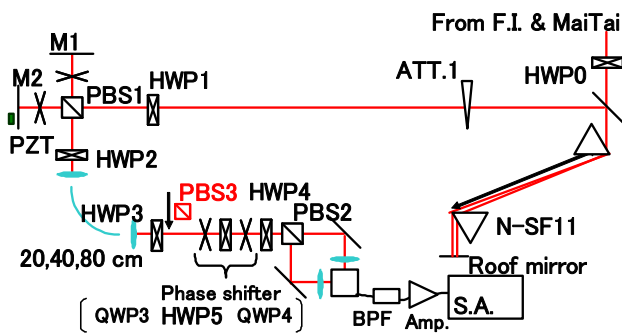


Fig. 4: Experimental setup of SV generation. ATT.: Attenuator, PZT: Piezoelectric transducer, QWP: Quarter Wave Plate, BPF.: Electrical Band Pass Filter, S.A.: Rf-Spectrum Analyzer.

本研究では、短い光ファイバでも比較的簡略なセットアップを構築でき、非常に短い遅延を持ったパルスの遅延干渉によって GAWBS の  $R_{0,m}$  モードをキャンセルさせる<sup>5</sup>ことも期待される線形偏光干渉計 (NOPI: Nonlinear polarization interferometer) をスクイザーに採用した。この NOPI 系では PM ファイバの Slow 軸

と Fast 軸による遅延差を、あらかじめ光ファイバ入射前のマイケルソン干渉計によって補償し、それぞれの偏光をファイバの出口で干渉させ SV と LO 光を同時に生成している。このときの微調整を M2 についている PZT によって行い、概ね 1:200 程度の SV:LO 比を確認した。また、800 nm 帯の光源を用いる場合、光学系の正常分散により光ファイバに入射する前にパルス幅が広がってしまいピークパワーが急激に減少するので、本実験ではこれらの分散を補償するために光ファイバ入射前にプリズム対を設けた。このプリズム間隔を調整することで光学系の分散補償だけでなく、光ファイバ内でパルス圧縮を行い、効率よく非線形効果を稼ぐこともできる<sup>6</sup>。測定では SV と LO 光の位相差を Phase sifter を用いて生じさせ、平衡ホモダイン検出によって位相ノイズの周波数特性を検出した。このホモダイン検出の際、二つの PD (Photo Diode) の差電流を S.A. で測定し、側帯波の微弱な信号を電圧増幅器 (エヌエフ社製 SA-230F5) で増幅させている。このとき繰り返しの信号と直流付近の信号によって電圧増幅器が飽和しないよう、また GAWBS ノイズのスパイクを避けるように 19.2-23.6 MHz の BPF (Mini circuit 社製) を挿入し、21 MHz における位相ノイズを測定した。

#### 5 SV 測定結果と考察

まず、光ファイバ内でのパルス圧縮を行わないときの、スクイジング測定結果を Fig. 5 に、これらと数値解析の結果を比較したものを Fig. 6 に示す。このとき、測定結果には(2)式で表される量子効率を考慮している。

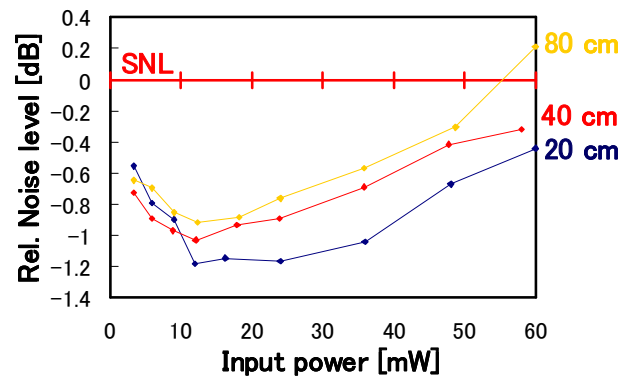


Fig. 5: Relative magnitude of noise depending on various fiber lengths of 20, 40 and 80 cm.

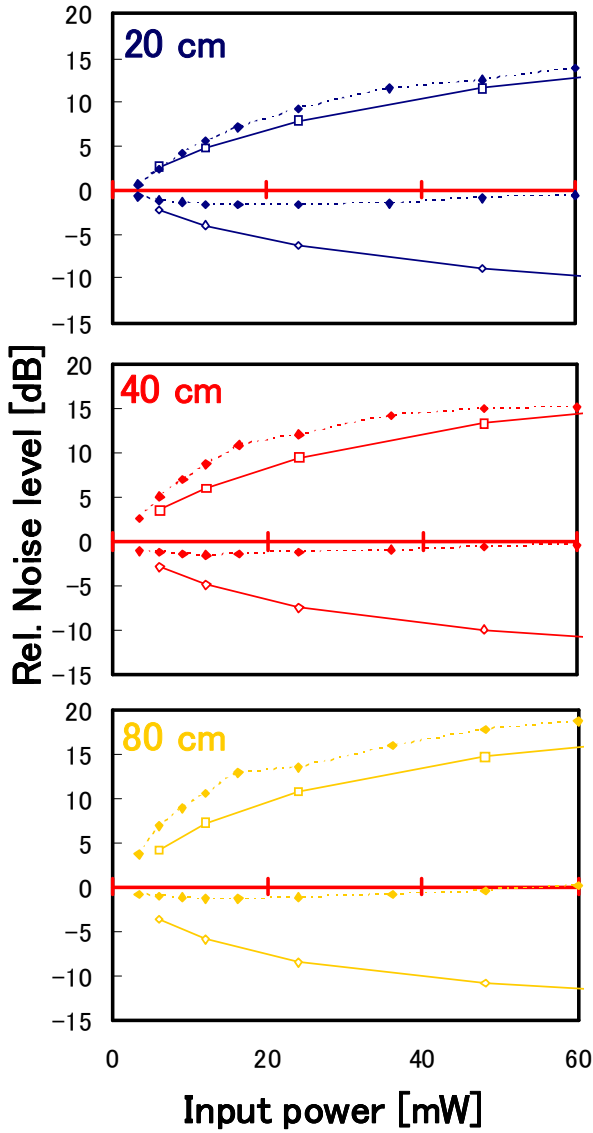


Fig. 6: Relative magnitude of squeezing depending on various fiber lengths of 20, 40 and 80 cm. Solid line and open plots, and dash line with solid plots show simulation result without GAWBS factor, and experimental result including quantum efficiency, respectively.

$$\eta = \eta_{\text{dark}} \eta_{\text{visibility}}^2 \eta_{\text{PD}} \eta_{\text{loss}} \leq 0.72 \quad (2)$$

各量子効率それぞれ、 $\eta_{\text{visibility}}=0.99$ , PD の量子効率  $\eta_{\text{PD}}=0.81$ , 光学系の伝送効率  $\eta_{\text{loss}}=0.91$  であり, 検出系の電気ノイズによる効率  $\eta_{\text{dark}}$  は入射強度毎に異なる値をとる<sup>7</sup>.

さて, このように Fig. 3 で示した数値解析の予想と異なり, 入射強度依存性においては, はじめは非線形

効果の影響を受けてスクイジング量が増加するが, 10-20 mW 付近を境にして高くなればなるほどスクイジングの劣化が見られ, ファイバ長依存性においてもむしろファイバ長が長くなればなるほどスクイジングが劣化することが確認された。Fig. 6 では, ファイバ長が長いほど入射強度が高いほど数値解析の結果と外れることわかり GAWBS による線形ノイズが顕著にスクイジングを劣化させている様子が伺える。つまり, 光ファイバ内の伝搬距離が長く, 入射強度が高いほど非線形効果によるスクイジングがより大きく起こるが, それ以上にファイバ長と入射強度 (この場合入射エネルギーであるが) に線形に効いてくる GAWBS ノイズの影響が大きく, 測定する際にスクイジングを著しく劣化させているということである。特にある程度の伝搬距離でスクイジング量が飽和してしまう非ソリトン領域では, この問題の影響は大きいといえよう。一方で, GAWBS の影響が同じであると考えた場合, 低い入射強度 (概ね 20 mW 以下) で基本ソリトンさせることができる 1.55  $\mu\text{m}$  帯 フェムト秒パルス光源を用いれば, 多少の改善が見られる可能性はある。ただし, Fig. 6 からわかるように, ファイバ長が 40 cm 程度でも 6 mW 入射ですでに数値解析結果から外れていることを考えると, ソリトン伝搬であっても伝搬による非線形効果の増加のメリットはあまり享受できず, 20 cm 程度の光ファイバで起こるわずかのスクイジング (といっても  $<-3\text{dB}$  はあるはずだが) をその他のノイズなく慎重に検出する必要があるだろう。

最後に本研究において得られた最良の結果を Fig. 7 に示す。このときのファイバ長は 40 cm であり, 光ファイバの中心で FTL (Fourier Transform Limited) パルスになるように光ファイバ内の二次の正常分散をプリズム対で補償をしたもので, 入射強度が 12 mW のとき最大で  $-2.10\text{dB}$  のスクイジングを観測することができた。これは量子効率を考慮すると  $-4.76\text{dB}$  のスクイジングが発生していることになり, 光ファイバを用いた 800 nm 帯のスクイジングでは最大量である (2010 年 3 月現在)。

## 6 まとめと今後の展望

ソリトン伝搬のようにファイバ伝搬によって効率的に非線形効果を受けられない中心波長 800 nm のフェムト秒パルス光であっても, 高ピークパワーを光フ

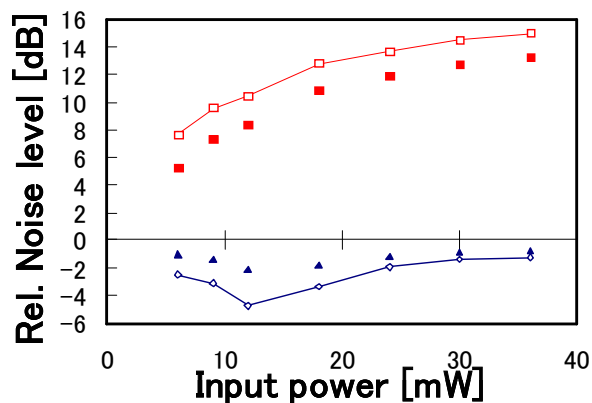


Fig. 7: Relative magnitude of squeezing with dispersion compensation depending on input power in the best condition. Solid plots, and solid line with open plots show bare experimental results, and results connected by quantum efficiency. Fiber length is 40 cm.

ファイバに入射することで大きな非線形効果を得ることができ、また光ファイバ干渉計を短尺光ファイバによって構築することで、線形に受ける GAWBS の影響を低減させ、最大で -2.1dB (量子効率を考慮すると -4.76dB) のスクイジングを観測することができた。一方で、非線形効果を稼ぐためにあまりに高い入射強度を確保したため、GAWBS の影響が顕著に大きくなりこれがスクイジング量を著しく劣化させていることがわかった。今後の対策としては、低い入射強度でも非線形効果を効率よく稼ぐよう、光ファイバ干渉計をフォトリソグラフィッククリスタルファイバ (PCF: Photonic Crystal Fiber) のような高い非線形性を持つ光ファイバで構築する方法が挙げられる。

また高過ぎる入射強度が逆にスクイジングの劣化の原因となることを考えると 800 nm 帯における高強度入射のメリットがなくなるので、同様の短尺光ファイバ干渉計を、1.55  $\mu\text{m}$  フェムト秒パルス光源を用いた低強度でのソリトン伝搬 (ただし高次ソリトンは遅延ラマン応答によりスクイジングが劣化するため不可) によるスクイジング発生へ適用することも考えられる。当然この場合も数十 cm の伝搬しか許されないため、より狭いパルス幅の光源を用いて (概ね <100 fs) 同じエネルギーでピークパワーを高くする、800 nm 帯と同様に高非線形ファイバを用いるなどといった工夫が必要となるだろう。

## References

- [1] A. Furusawa, J. L. Sorensen, S. L. Braunstein, C. A. Fuchs, H. J. Kimble, and E. S. Plozik, *Science* **282**, 706 (1998).
- [2] R. M. Shelby, M. D. Levenson, and P. W. Bayer, *Phys. Rev.* **31**, 5244 (1985).
- [3] G. P. Agrawal, 小田垣孝, 山田興一訳: 非線形ファイバ光学 (吉岡書店, 1997).
- [4] Y. Lai, and S. S. Yu, *Phys. Rev. A* **51**, 817 (1995).
- [5] P. D. Townsend and A. J. Poustie, *Opt. Lett.* **20**, 37 (1995).
- [6] Y. Fujiwara, H. Nakagome, K. Hirose, and F. Kannari, *Opt. Exp.* **17**, 11197 (2009).
- [7] J. Appel, D. Hoffman, E. Figueroa, and A. I. Lvovsky, *Phys. Rev. A* **75**, 035802 (2007).