

800nmフェムト秒レーザーを用いた非ソリトン領域での対称Sagnacループによる直交位相スキューミング発生

Generation of squeezed vacuum using a femto-second laser at 800 nm with a Sagnac loop fiber interferometer in the region of non-soliton propagation

藤原悠二(M1), 中込久幸(B4)

Y. Fujiwara and H. Nakagome

Abstract

We experimentally demonstrated generation of squeezed vacuum at 800 nm. When we increase the amount of dispersion compensation, the level of squeezing is also improved and we observed -0.56dB squeezed vacuum at a dispersion of -0.019 ps^2 . Since squeezed vacuum is degraded by GAWBS, the noise level of squeezing was improved to -0.4dB at a liquid nitrogen temperature.

1 はじめに

次世代の情報通信技術として近年注目されているのが「量子情報通信」である。この量子情報通信において非常に重要な技術となるのが量子もつれ合い状態の生成である。

光ファイバー通信帯域 $1.5 \mu\text{m}$ 帯における量子もつれ光源は長距離にわたって量子状態を伝送できる点で単一光子、連続量共に盛んに開発が行われている。3次の非線形効果を用いたスキューミングの発生としては Sagnac ファイバー干渉系を用いた手法[1]、非線形編向干渉系(NOPI)[2]を用いた手法などがあげられる。 $1.5 \mu\text{m}$ の光源を用いた場合ファイバー中でソリトン伝搬するため、効率よく非線形効果を得ることができる一方、検出器側では未だ Si のフォトダイオードの量子効率が非常に高く、また原子との相互作用(Rb など)等の利点から 800 nm 付近の波長帯域を用いたスキューミングの発生の意義は高いと考える。

そこで本研究では、上に記した利点をもつ 800 nm 波長帯域において、3 次の非線形効果による直交位相スキューミングを発生させることができるかを実験的に検証した。

2 実験

Fig.1 に実験セットアップを示す。光源, Sagnac ファイバー干渉計, ホモダイン検出系から主に構成され

る。用いている光源は Spectra Physics 社製 Ti: Sapphire フェムト秒レーザー”MaiTai”で、中心波長 820 nm, 時間幅 100 fs, 繰り返し周波数 79.2 MHz である。Sagnac 干渉系には分岐比可変カプラ (Canadian Instrumentation & Research 社作製)を用いた。ループの長さは 1.2m であり、100 fs のパルス考えた場合 10 ソリトン長に相当する。

800 nm 付近においてはファイバー中では非ソリトン領域であるため、伝搬とともにパルス幅およびスペクトル幅は広がっていく。よってファイバーに入射するパルスに付加している分散量に注意しなくてはならない。干渉計の前には、干渉系に光を入れるためのファイバーと、戻り光を取り出すためのファラデーローテータを設けている。このためパルスに正常分散が付加されてしまい(入射前のファイバーの正常分散量: 0.008 ps^2 ,ファラデーローテータの正常分散量: 0.0013 ps^2)、干渉系に入射する前でパルス幅が広がってしまうため、効率よい非線形効果が得られない。そこで我々は、4-f系を非対称にすることで得られる異常分散を利用して、正常分散補償を行った。片方のグレーティングを動かすことによって得られる異常分散量の最大値はおおよそ -0.02 ps^2 である。

発生した SV 光は LO 光と PBS で合波させ、ホモダイン検出を行った。ここで重要なことは SV 光と LO 光の Visibility η_v である。この干渉量 η_v はロスと同様に SV の量を劣化させてしまう。この実験系で LO 光はファイバーの戻り光を利用しているのだが、戻ってくる際に FR を 1 回通っている。そのため LO 光と SV 光のパルス幅が一致せず、高い Visibility が得られなかった(66%)。そこで我々は LO 光と SV 光の受ける分散量をなるべく同じようにするために、SV の光路にも同様の FR を設置し Visibility の向上を試みたところ、Visibility の量を最大で 91% ($\eta_v=0.828$)に改善することができた。FR の透過率は 96% であるのでロスを考慮しても全体の量子効率は改善できたことになる。

ホモダイン系で検出した電流は電圧アンプ (NF 社

製 SA-230F5) を用いて増幅し、スペクトルアナライザー (ADVANTEST 社製 Q8384) で測定を行った。繰り返し周波数の成分(79.2 MHz)が電圧アンプを飽和させてしまうため、電圧アンプの前にローパスフィルタ (Mini-circuit 社製 BLP15) を設け、15 MHz 以下をカットした。

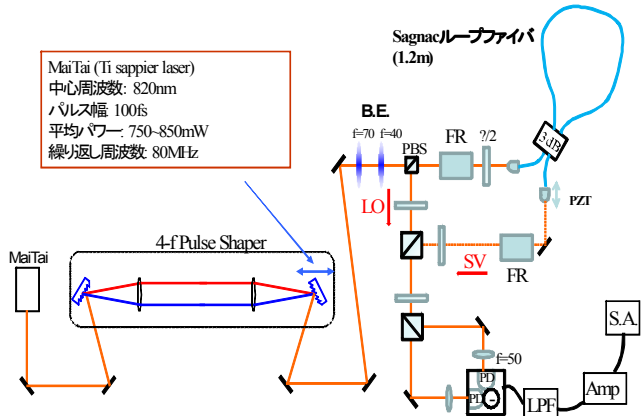


Fig.1 Experimental setup of squeezed vacuum: B.E.; Beam Expander, F. R.; Faraday Rotator, LPF; Low-Pass Filter and S. A.; Spectrum Analyzer.

3 直交位相スキュージング測定結果

前述したように 800 nm 付近では非ソリトン領域であるため、効率よく非線形効果を得るためには干渉系前に付加する正常分散の補償は不可欠である。また、干渉系内においてどこで TL(Transfer Limited)になるかによって受ける非線形の量が変わってくる。Fig.2 に入射パルスの分散量を変化させたときのスキュージング量とアンチスキュージング量のシミュレーション結果を示す。9500 fs² は FR とファイバーの腕の正常分散量を考慮した場合、-24000 fs² は干渉系の中心で TL になるような異常分散量を考慮した場合である。この結果からわかるように干渉系の最初で TL になる場合に比べ、ファイバーの中心で TL になる場合のほうが、より高い非線形効果を得ることができ結果として高いスキュージングを得ることができる。

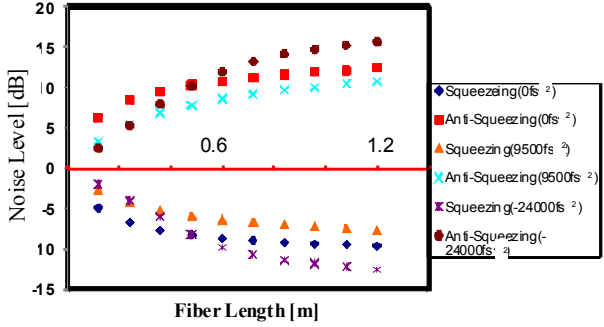


Fig.2 Calculation result of squeezing and anti-squeezing (The quantity of 9500 fs² corresponds to the a dispersion of FR and fiber arm and -24000 fs² makes pulses a TL at the center of the fiber loop)

以上の結果をふまえ、我々は FR と干渉系前のファイバーの腕だけでなく、干渉系内で TL になるように正常分散補償を行った。なお、4-f 系の片方のグレーティングを動かすことによる分散補償量の最大値はおよそ -0.02 ps² であり、ファイバーの中心で TL になる分散補償量 (-0.034 ps²) にはいたっていない。正常分散補償量を変えたときのアンチスキュージングとスキュージングの結果を Fig.3 に示す。分散補償量を増やすことによってアンチスキュージングは増加し、スキュージングは改善していることがわかり、シミュレーション結果の傾向と一致している。分散補償量 -0.019 ps²、パワー 16.1 mW において我々は -0.56 dB のスキュージング観測に成功した。その結果を Fig4 に示す。このとき、サイドバンドの 3 MHz においてシグナルを観測し、スペクトルアナライザの仕様は RBW が 100 kHz、VBW が 10 Hz、で 0span モードである。

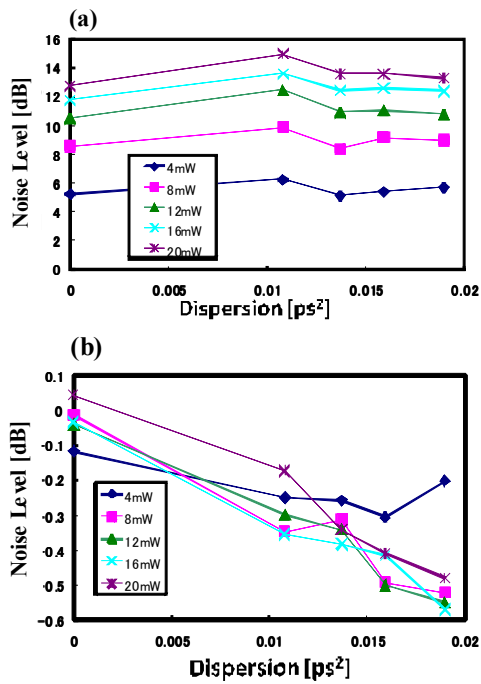


Fig.3 Measurements of squeezing and anti-squeezing, (a) shows noise level of anti-squeezing dependent on dispersion compensation. (b) shows noise level of squeezing dependent on dispersion compensation.

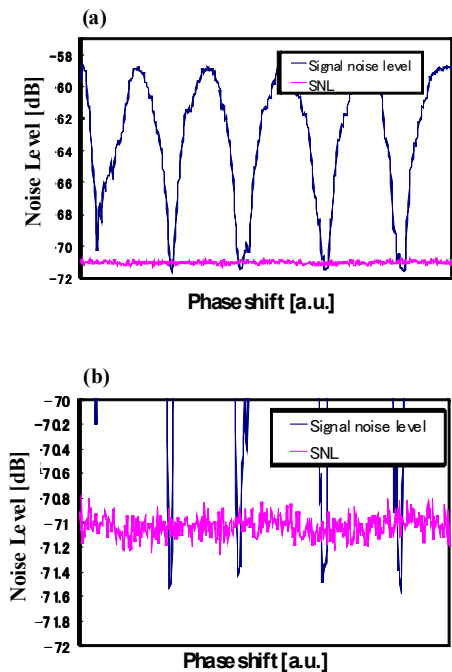


Fig.4 (a) Measurement of noise level of the signal when dispersion compensation at -0.019 ps^2 was applied. (b) was applied enlarged (a).

入射強度を強くすることでより高いスクイーミングを得ることができると予想できる。Fig.2 は $N=1$ ソリトン強度(100 fs のパルスにおけるソリトン強度、平均強度に直すと 16 mW に相当する)の入射強度でのシミュレーション結果であるが、伝搬において Raman 散乱の影響によるスクイーミング量の劣化は見られない。 $N=2$ ソリトン強度(平均強度で 256 mW)においても Raman 散乱の影響はないことから、平均強度が 0~250 mW においては、強度が増えるに従ってスクイーミング量が増えると考えられる。そこで入射強度を 0~30 mW(ファイバーカップリング効率が約 15%のため、最大入射パワーは 30mW 前後が限度)に変化させたときのスクイーミングの様子を Fig.5 に示す。このときの入射パルスの正常分散補償量は -0.019 ps^2 である。この結果からわかるとおりおよそ 15mW 以上からスクイーミング量は増えず、劣化していく様子が観測できる。スクイーミングはロスなどに弱いという欠点があるため、15 mW 以上では非線形効果によるスクイーミング量は頭打ちになり、GAWBS などの位相雑音が支配的になると考えられる。

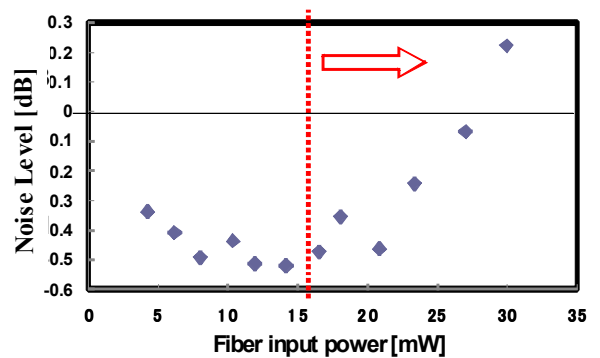


Fig.5 Measurement of dependence of squeezing on fiber input power

4 液体窒素の冷却による GAWBS 削減

スクイーミングを劣化させる原因として、導波モードブリュアン散乱(GAWBS)が考えられる。この GAWBS の削減方法としては、①1 GHz 以上の繰り返しレーザーを用いる手法[1]、②フォトニッククリスタルファイバーを用いることによる導波モードの制御[3]、③冷却によるノイズ削減、があげられる。それらのうち我々は液体窒素による冷却を試みた。1.2 m の

ファイバーループのうち 80 cm のファイバーを冷やした時のスクイーミング結果を Fig.6 に示す。どの強度においてもスクイーミング量の改善がみられている。とくに 14 mW の平均強度において 0.4dB のスクイーミング量の改善に成功した。劇的な改善がみられない理由としては 77 K の冷却温度がまだ高いという可能性、また 1.2m のファイバーループのうち 80 cm しか冷やせなかったため冷却が不十分ということが考えられる。

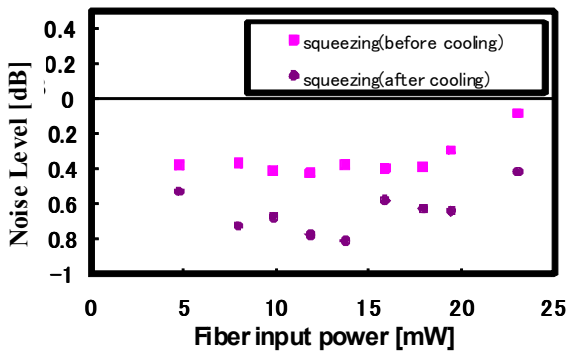


Fig.6 Measurement of squeezing when we cool down the fiber of interferometer.

5 まとめと今後の方針

我々は 800 nm のフェムト秒レーザーを用い、非ソリトン領域においても正常分散を補償することによって直交位相スクイーミングを発生することができることを実験的に示した。-0.56dB のスクイーミング量は少ない量ではあるが、この原因は GAWBS であり、液体窒素による冷却によってスクイーミングの量を改善することができた。

今後の方針としては、正常分散補償量をさらに増やし、ファイバーの中心で TL になるように調整することでスクイーミング量が改善できるかどうかの検証、さらにはフォトリソグラフィッククリスタルファイバーを用いて同じ干渉系を組み導波モードブリュアン散乱が削減できるかどうかを検証する。

References

[1] C.X. Yu, H.A. Haus, and E. P. Ippen, Opt. Lett. 26, 669(2001).
 [2] J. Higuchi, N. Nishizawa, M.Mori, R. Goto, D.

Maruhashi, T. Goto, J. Appl. Phys. 43, 160 (2004).
 [3] D. Elser, U. L. Andersen, A. Korn, O. Glockl, S.Lorenz, Ch. Marquardt, and G. Leuchs, Phys. Rev. Lett. 97, 133901(2006)