

# 1550 nm 帯域における真空スクイズド光発生のためのファイバ干渉計の最適化

## Optimization of fiber interferometer in order to generate squeezed vacuum at 1550 nm

伊東泰幸(M1), 佐々信介(B4)

Y. Ito and S. Sassa

### Abstract

Generation of squeezed vacuum light is very sensitive to alignment of squeezer optics. Sometimes the squeezing is unstable and not reproducible. Using a NOPI fiber squeezer, most critical and fine adjustments required to achieve high and stable squeezed vacuum generation is experimentally examined.

### 1 はじめに

量子情報処理の分野における量子コンピュータや量子通信などの技術の実現において、量子もつれ合い状態は不可欠である。量子もつれ合い状態を実現する方法はいくつも考案されているが、量子状態というのは非常に外乱を受けやすいため、まわりの影響を受けづらい光によるもつれ合い状態の実現は重要である。特に連続量のもつれ合い状態はそのなかでもとりわけ雑音に強く、通信などへの応用が期待される。この連続量のもつれ合い状態は真空スクイズド光(SV)を重ね合わせることで簡単に作成することができる。そこで我々は通信への応用を見据えて光ファイバを用いてSVを発生させる実験を行ってきた。

光ファイバを用いてSVを発生させる方法としては非線形偏光干渉計(NOPI: Nonlinear Optical Polarizing Interferometer)[1]を用いる方法とファイバ Sagnac 干渉計を用いるが知られているが、我々の実験では前者を用いた。また、通常 NOPI では同じ長さの偏頗保持(PM)ファイバを 90° ねじって接続したものが用いられるが、我々の実験ではねじっていない一本のファイバを用いることとした。これは色々な種類、長さのファイバで実験を行い比較したかったためである。

なお、SVはノイズに対して非常に敏感であるため、導波路型音響ブリルアン散乱(GAWBS)などのノイズによりスクイズングが簡単に劣化してしまう。そのため、我々はあえてファイバ長を短くすることで、

GAWBS の影響を抑えて大きなスクイズングを発生させてきた。けれど、ファイバ長を短くすると雑音が低減すると同時に、非線形効果も低減してしまい、ただ短くすればいいというわけではない。そこで我々は最適なファイバ長、入射光強度を探る実験に取り組んできた。しかし、実験を行うたびに得られる結果が異なり、データに一貫性がなくなってしまう現象に見まわれた。そこで我々は結果が不安定になる要素がどこにあるのかを確かめるためにいくつかの実験を行った。

### 2 実験

実験のセットアップは Fig.1 に示す。使用したレーザー光源は Ti:Sapphir 励起の 800nm パルスレーザーから OPO (Optical Parametric Oscillator) により中心波長 1550nm に波長変換した光である。繰り返し周波数は 79.2 MHz でパルス幅は 350 から 500 fs である。この OPO は内部のアライメントにより中心波長やパルス幅を若干変えることができるようになっている。

Squeezer である NOPI に用いた PM ファイバは Thorlabs 社製のポータビ構造をもつ HB1500G を使用した。NOPI へ光を入射させる際には、PM ファイバの fast 軸と slow 軸へ等しい強度の光を入射させる必要がある。

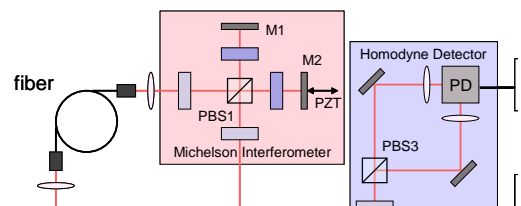


Fig.1. Experimental setup of polarization squeezing. HWP: half wave plate, QWP: quarter wave plate, PBS: polarizing beam splitter,

そのため、マイケルソン干渉計の M1 側の光路と M2 側の光路の光の強度が等しくなるように、マイケルソン干渉計直前の半波長板(HWP : Half Wavelength Plate)を調節し、一方の光路の光は一方の軸に、他方の光路の光はもう一方の軸に入射するようにマイケルソン干渉計直後の HWP を調節する。なお、PM ファイバは軸によって屈折率が異なるため、伝播するにつれて fast 軸と slow 軸のパルス間距離が広がってしまう。そこで、マイケルソン干渉計の M2 の位置をマイクロメータとピエゾを用いて調節することで、fast 軸と slow 軸の delay を補償してやり、出射口で二つのパルスが重なって干渉するように調整する。

出射口で二つのパルスは偏光干渉し、destructive な干渉をした光が SV となる。一方、constructive な干渉をした光は LO(local oscillator)光として用いる。発生した SV はフェイズシフターにより LO 光との相対位相差を調節され、平衡型ホモダイン測定により測定される。

測定に使用した PD は KYOSEMI 社製の InGaAs の PD(KPDE330SL)である。ホモダイン測定系からの信号は 21.4 MHz にカットオフ周波数を持つローパスフィルタで高周波数成分を除去した後、アンプで増幅して 10 MHz の帯域を RF スペクトラムアナライザにより測定した。

### 3 実験結果

初めに 1.5m のファイバで測定を行ったが、得られたスクイーミングは最大で 0.3dB であった。その結果を Fig.2 に示す。これまでファイバを短くすることによりノイズの影響を低減してきたため、ファイバ長が 1.5 m のときは 3 m のファイバを用いた時よりもノイ

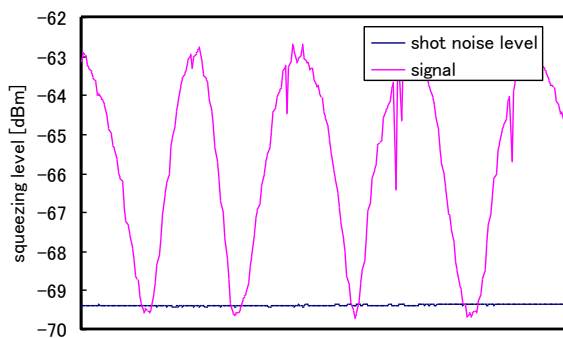


Fig.2 measurement result using 1.5m fiber when input power is 12mW.

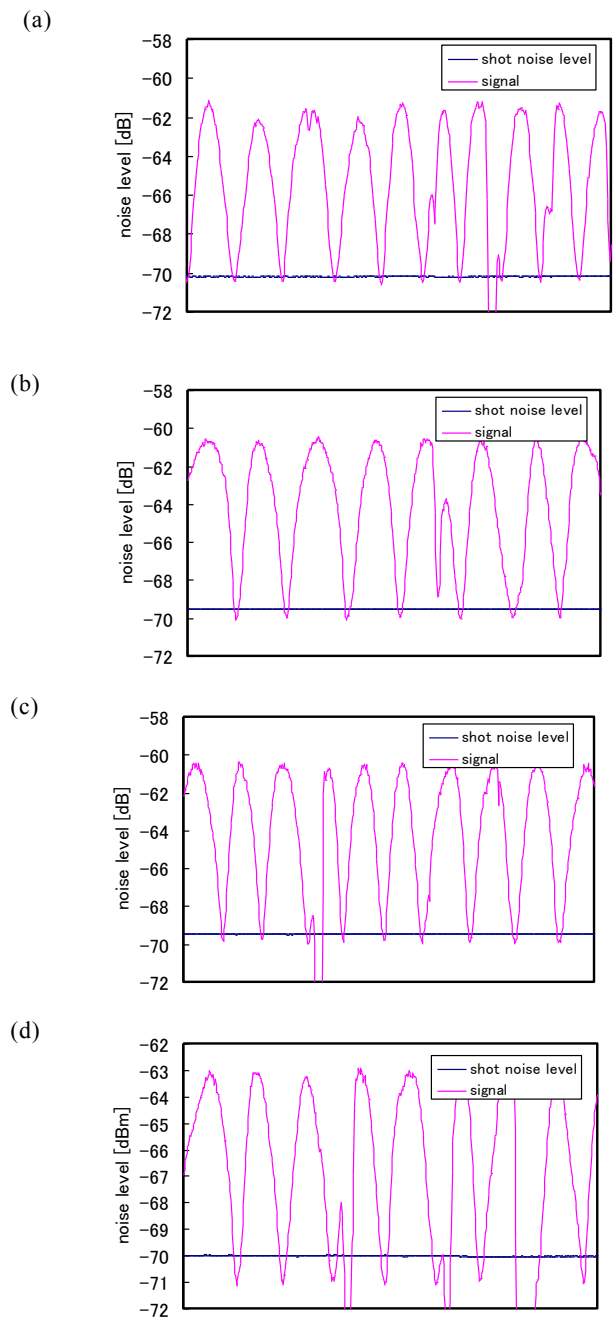


Fig.3 measurement result using 3m fiber when input power is 12mW. (a) before precise alignment, (b) after phase shifter alignment, (c) after pulse width alignment, (d) after incident light and HWP alignment

ズが低減されて、より shot noise level が signal の上下のピークを中心に近付くことが予想された。しかし、実際の結果はこの予想に反するものであった。そこで、確認のために再度 3m のファイバに戻って昨年度と同

様の実験を試みたところ、こちらでも得られたスキージングは最大で 0.3dB であった。その時の結果を Fig.3(a)に示す。なお、ファイバに入射した光の強度は 12mW である。同じ条件で、昨年度の実験では 2.4dB のスキージングが得られていたので、色々と調整を行いながらその都度スキージングの測定を行い、悪化の原因を調査した。

初めにフェイズシフターの微調整を行った。その時の結果は Fig.3(b)に示す。この時のスキージングは 0.5dB であった。しかし、これは入射光強度を 12 mW で統一しようとしたのだが、調整前の入射光強度が若干 12mW より弱くなってしまったことが主な原因で、フェイズシフターの改善がスキージングの大きさに与える影響は少ないと考えられる。一方で、図からわかるようにフェイズシフターを高い精度で調整すると、最大値、最小値が安定するということが確認できた。

次にスペクトルを拡げて再度スキージングを測定した。その時の結果は Fig.3(c)に示す。しかし、この時のスキージングの大きさはスペクトルを変える前、つまり Fig.3(b)とほとんど変化がなかった。そのため、わずかなスペクトルの違いであればスキージングの大きさに与える影響はほぼないと言っていいだろう。

最後にファイバへの入射効率とマイケルソン干渉計での二つの光路への 50:50 の分岐を誤差 1%程度から誤差 0.1%程度の精度になるまで調整した。その時の結果を Fig.3(d)に示す。この時は 1.1dB のスキージングを得ることができた。しかし、昨年度の結果まで回復させることはできなかった。これは NOPI によるスキージングが、入射光の強度比、入射効率に対して非常にシビアであり、極めて高い精度での調整が求められるためであると思われる。

また、1.5m のファイバを用いた SV の発生がうまくいかなかったのも同様の理由であると考えられる。

## 4 まとめ

NOPI を用いて SV を発生させる実験は調整が非常に難しく、なかなか安定してスキージングを得ることができなかった。そこで実験系のどこに問題があるのかを実験によって確かめた。

初めにフェイズシフターを微調整した。このときはスキージングに大きな変化は見られなかった。しかし、測定の際にしばしば見られていたスキージング

やアンチスキージングのピークがぶれる現象は解消され、ピークの大きさが安定した。

次にスペクトル幅を若干変更して再度測定した。このときもスキージングに大きな変化は見られなかった。

最後にファイバへの入射強度や、マイケルソン干渉計の PBS での分岐比、ファイバ前後の HWP を微調整した。さらにファイバの曲げ半径を大きくした。すると、スキージングに大きな改善が見られた。ショットノイズレベルは変化せず、測定した SV のゆらぎが全体的に 1dB ほど小さくなったのである。これらの微調整を行うことはファイバ射出後の PBS での消光比に影響してくる。

以上の結果から NOPI でのスキージング発生の実験ではファイバへの入射効率や HWP の角度を非常に厳密に調整しないといけないということがわかった。SV は非常に繊細な状態であるため、少しでも調整が甘く、消光比が悪化してしまうとすぐにゆらぎが大きくなり、スキージングが劣化してしまう。昨年度の 2.4dB というスキージングが得られた時は 120:1 程度の消光比のもとで実験を行っていた。しかし、これが 80:1 程度になるだけでスキージングは大きく悪化してしまうのだ。逆に言えば、さらに消光比を高め、正確な調整を行いやすいセットアップを組むことができれば NOPI を用いてさらに大きなスキージングを得ることが期待できると言える。

## References

- [1] N. Nishizawa, K. Sone, J. Higuchi, M. Mori, K. Yamane and T. Goto: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** (2002) L130