

# フェムト秒 1.5 $\mu\text{m}$ OPO を用いた対称 Sagnac ループによる直交位相スクイーミング発生と Post-selection 蒸留

## Generation of quadrature squeezing using a 1.5 $\mu\text{m}$ femto-second optical parametric oscillator with a symmetric Sagnac loop and post-selection distillation.

百瀬嘉則(M2), 潮英岳(B4), 廣澤賢一(D2)

Y. Momose, H. Ushio, and K. Hirose

We demonstrated distillation of squeezed vacuum (SV) light contaminated with guided acoustic-wave Brillouin scattering (GAWBS) noise generated in a symmetric Sagnac loop. This distillation method successfully reduces anti-squeezing level, however, no improvement is observed for squeezing level. Therefore, this scheme is useful only for improving SV toward a pure state.

### 1 はじめに

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 $\mu\text{m}$  波長帯の真空スクイズド光 (Squeezed Vacuum : SV) 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。このような光ファイバ系で SV を発生させる際、主な課題の一つは導波性音響ブリルアン散乱 (GAWBS : Guided Acoustic-Wave Brillouin Scattering) である[1]。GAWBS はファイバ内で熱的に励起された音響モードによる屈折率の揺らぎにより生じ、そのスペクトルは 20 MHz から離散的に存在している。ゆえにファイバにより発生したスクイズド光は、適切な繰り返し周波数のパルスレーザをポンプに用いて GAWBS の存在しない周波数間で観測する必要がある。GAWBS の強度はファイバ長に比例し、1 GHz を超えるとたいはなくなる[2]。

ファイバには特定の周波数領域で GAWBS が生じにくいものがあるが[3,4]、GAWBS を能動的に避けようという研究も行われている。例えば GAWBS の影響を避けるため短いファイバを使ったり、冷却したりするなどの工夫がされた[5-7]。また Ippen らは繰り返し周波数 1 GHz のパルス幅 1.2 ps のパルスをポンプ光にすることで GAWBS を避け、2001 年に Sagnac ファイバ干渉計で -6.1dB の真空スクイズド光発生に成功している[2]。

今回、我々は SV 発生を妨げとなるこの GAWBS を取り除く方法として、時間域パルスホモダイン検出器[8]を使っ

たポストセレクション蒸留法[9]に注目し、この技術の確立と、この手法により GAWBS を取り除き、発生した SV を蒸留する(スクイーミング度合いをあげる)ことができるかどうかを実験的に確かめることを本研究の目的とした。ポストセレクションとは、ノイズの付いた光を Signal 光と Tap 光に分け、Tap 光でノイズの大きいパルスを見つけ、そのノイズの大きいパルスと関連のある Signal 光のパルスを取り除き、Signal 光を蒸留する方法のことである。そのために、まず、広帯域でローノイズな回路を用いて、光源の繰り返し周波数(79.5 MHz)に応答する時間域パルスホモダイン検出器を構築した。この検出器を使って、SV 発生器(光ファイバ Sagnac 干渉計)で加わった GAWBS に埋もれた SV 光を用いて、ポストセレクションのデモンストレーションを行った。ただし、スクイーミングが GAWBS に埋もれて小さいことから、合わせて冷却することにより GAWBS を若干抑えた状態で行った。

### 2 実験

#### 2.1 SV 発生実験

Fig.1 に実験セットアップを示す。光源としては 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を用いて PPLN 結晶を励起し、光パラメトリック共振器で 1530nm 波長帯のパルスレーザに波長変換したものを用いた。パルス幅は約 500-700fs、出力は 13mW~18mW 程度である。

まず、この光を、液体窒素で 77K に冷却した Sagnac ファイバループに入射し SV を発生させ、Fig.1 で示す PDs1 で周波数域における平衡ホモダイン測定を行った。Sagnac ファイバの -3dB 結合器は SV と LO(Local Oscillator)の分岐比不可変のタイプ(300~500:1)で、ファイバ長 30m、コア径 10.5 $\mu\text{m}$  のシングルモードファイバ SM15 -PS-U25A が接続されている。平衡ホモダイン検出器後の電気回路を Fig.2 に示す。PD で測定した信号を電氣的に差分し、Amp.の飽和回避と高周波のノイ

ズ削減のために 60MHz で 3dB 減衰する LPF を用いて繰り返し周波数(79.5MHz)を減衰させている. 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.

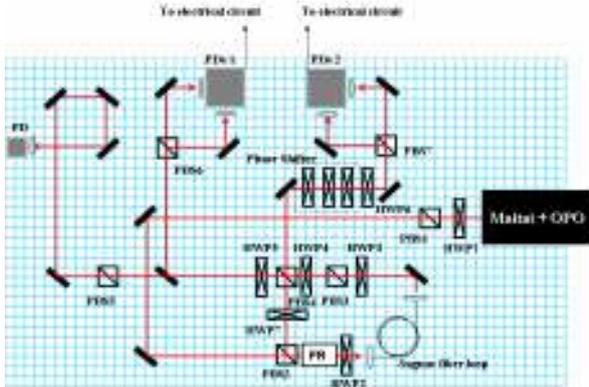


Fig.1: Experimental setup for measuring quantum noise of squeezed vacuum. HWP: half wave plate, PBS: polarizing beam splitter, FR: faraday rotator, PD: photo diode, BHD: balanced homodyne detector.

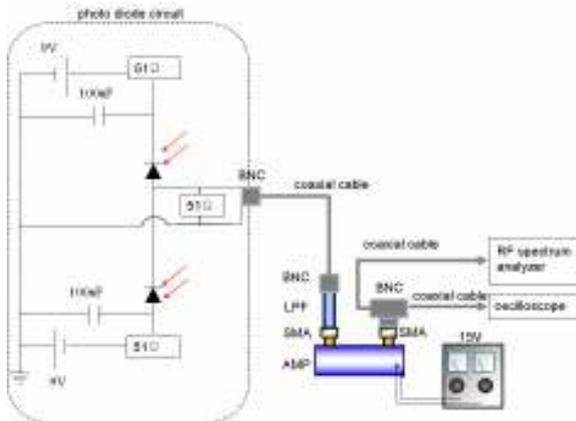


Fig.2: Electrical circuit of balanced homodyne detector. LPF: low pass filter, AMP: amplifier.

## 2.2 SV の Post-selection 蒸留実験

### ・Tap 光の位相をアンチスクイズド状態に固定した場合

次に, 発生した SV を PBS4 で Signal 光と Tap 光に 50 : 50 および 80 : 20 に分け, Tap 光のホモダイン系前にフェイズシフタ(Quarter wave plate 2 枚とその間に HWP がおいてある)を置き, SV と LO の位相差を 0° から 180°まで変化させる. フェイズシフタの HWP を 1°動かせば, SV と LO の位相差を 4°つけることができ

る.

今回は, フェイズシフタを 1°ずつ, 45°まで動かした. そのおのおのの角度について, Tap 光の周波数域ホモダイン測定値が常に最大になっている(アンチスクイージングしている)点で, Signal 光と Tap 光の時間域ホモダイン測定および周波数域ホモダイン測定を行った. つまり, Tap 光は常にアンチスクイージングを測定しており, Signal 光はフェイズシフタの角度によって 0°から 180°の位相方向について測定していることになる.

### ・Signal・Tap の位相を同相にした場合

今度は Tap 光のホモダイン系前のフェイズシフタをはずし, QWP 1 枚のみを置いて測定する. これは QWP によって Signal 光と Tap 光の位相を同期させるためである(QWP がないと逆位相になる).

PZT を少しずつ動かして, Signal の周波数域のデータの間隔が 1dB になるように時間域と周波数域について Signal と Tap のホモダイン測定を行った. この時, 開始点は Signal のアンチスクイージングが最大の点とし, 最小の値を通過して, 再び最大になる点で測定を終了した. つまり Signal 光と Tap 光を, 理想的には常に同じ位相で測定していることになる. ただし, 今回はファイバの冷却を行っていない.

## 3 実験結果

### 3.1 SV 発生実験結果

Fig.3 に各ファイバ入射パワーのスクイージングとアンチスクイージングの測定結果を示す.

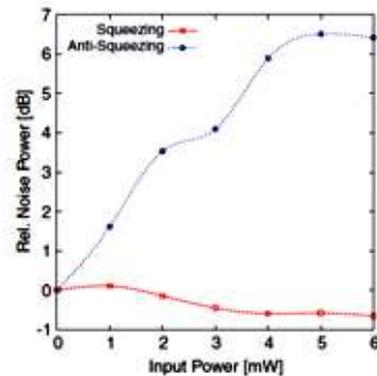


Fig.3: Squeezing and anti-squeezing levels at several powers of the pump power.

最大で-0.7dBのスクイージングを得ることができた.

6mW からアンチスキューイングレベルが下がっている  
るので、これ以上パワーを入射してもスキューイング  
の増加は見込めないと思われる。

### 3.2 SV の Post-selection 蒸留実験結果

#### ・Tap の位相をアンチスキューイング状態に固定した場合

Tap の位相をアンチスキューイング状態に固定した場  
合における各フェイズシフタの Signal と Tap の時間  
域・周波数域ホモダイン測定結果を Fig.4 に示す  
(Signal: Tap = 50: 50)。時間域・周波数域のどちらにお  
いてもフェイズシフタの角度ごとで Signal のスキュー  
イングからアンチスキューイングの変化が計測でき  
ていることが分かる。また Tap も 1~2dB の誤差があるも  
の、おおよそアンチスキューイングした位相で計測  
できていることが確認できる。

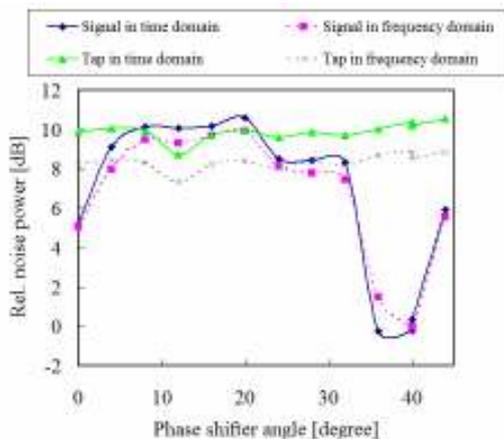


Fig.4: Measured signal and tap light in time and frequency domain at several phase shifter angles in case of signal: tap = 50: 50.

このデータをもとに Tap のヒストグラム(約 4 万パル  
ス)を取得し、ある閾値以上の平均からの揺れ幅をもつ  
パルスに対応する Signal のパルスを取り除いた。閾値  
は少しずつ小さくしていき、Signal の分散値が最小に  
なるときを最適なポストセレクションの条件とした  
(おおよそ 2 千パルスくらいになったときが最適条件  
だった)。このようにして Signal をポストセレクション  
により蒸留する前とした後の結果を Fig.5 に示した。  
これをみるとアンチスキューイングしている点では最  
大 7dB の蒸留ができているがスキューイングしている  
点ではほとんど蒸留できていないことが分かる

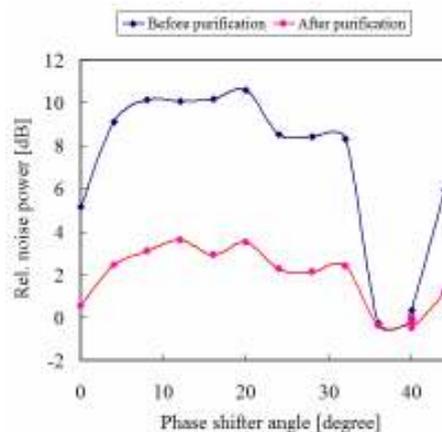


Fig.5: Measured signal light in time domain (before purification) and post-selected signal light (after purification) at several phase shifter angles in case of signal: tap = 50: 50.

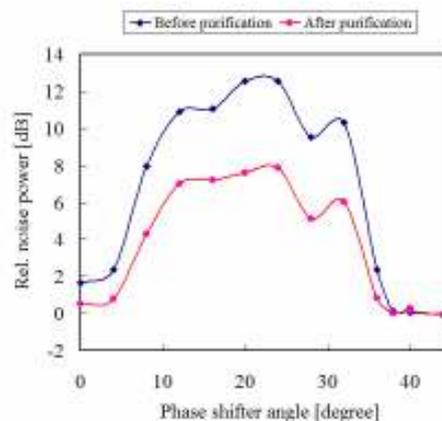


Fig.6: Measured signal light in time domain (before purification) and post-selected signal light (after purification) at several phase shifter angles in case of signal: tap = 80: 20.

同様に、Signal: Tap = 80: 20 にしたときの Signal を  
ポストセレクションにより蒸留する前とした後の結果  
を Fig.6 に示した。今度はアンチスキューイングして  
いる点では最大 4dB の蒸留ができているが、スキュー  
イングしている点では 50:50 のときと同様に、ほとん  
ど蒸留できていないことが分かる。

#### ・Signal・Tap の位相を同相にした場合

Signal・Tap の位相を同相にした場合における各フェ  
イズシフタの Signal と Tap の時間域・周波数域ホモダ  
イン測定結果を Fig.7 に示す。時間域・周波数域のど

ちらにおいても SV・LO の位相ごとで Signal・Tap のスクイーミングからアンチスクイーミングの変化が計測できていることが分かる(しかも, おおよそ同じ位相で変動している).

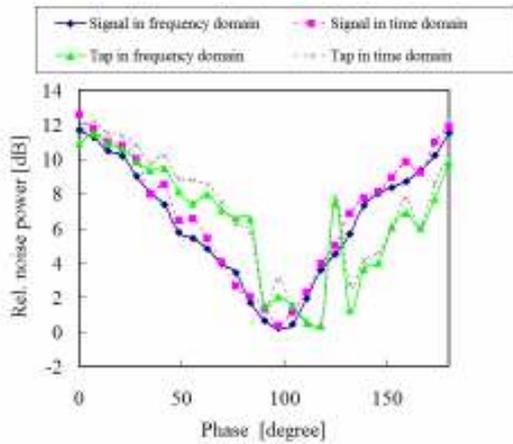


Fig.7: Measured signal and tap light in time and frequency domain at several phases between SV and LO in case of signal: tap = 50: 50.

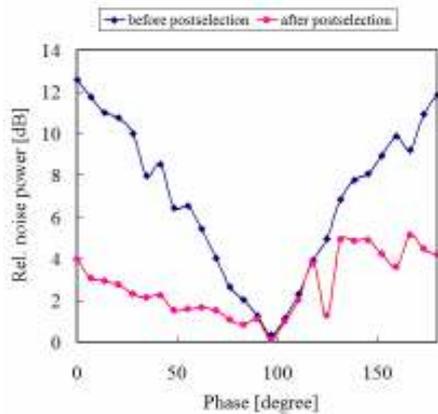


Fig.8: Measured signal light in time domain (before purification) and post-selected signal light (after purification) at several phases between SV and LO in case of signal: tap = 50: 50.

このデータをもとに先ほどと同様に, Signal をポストセレクションにより蒸留する前とした後の結果を Fig.8 に示した. これをみるとアンチスクイーミングしている点では最大 8dB の蒸留ができているが,SNL(Shot noise level)と同じ値の点ではやはりほとんど蒸留できていないことが分かる.

## 4 結論

Sagnac ファイバ干渉系のファイバ部分を液体窒素で 77K に冷却することで最大 -0.7dB のスクイーミングを得ることができた.

蒸留実験において, Tap の位相をアンチスクイーミングに固定した場合も Signal と同じ位相にしたときもアンチスクイーミングは蒸留できたが, SNL 以下の蒸留はできなかった. ゆえに, この手法では SNL 以下の蒸留は行えないと判断した. また Signal と Tap の分割比が 50 : 50 のときと 80 : 20 では前者の方がアンチスクイーミング部分を蒸留できる値が 3dB 大きかった. このポストセレクションでは SNL 以下の蒸留が行えないものの, 今後の応用として, もつれ合い状態に使えるような 3dB 以上のスクイーミングに対して, この手法でアンチスクイーミングを蒸留すれば, スクイーミングレベルとアンチスクイーミングレベルが同じ純粋度の高いスクイーミングに加工することができると思われる.

## References

- [1] R. Shelby, M. Levenson, and P. Bayer, Phys. Rev. B **31**, 5244 (1985).
- [2] C. X. Yu, H. A. Haus, E. P. Ippen, Opt. Lett. Vol. **26**, 669 (2001).
- [3] S. Schmitt, J. Ficker, M. Wolff, F. König, A. Sizmann, and G. Leuchs, Phys. Rev. Lett. **81**, 2446 (1998).
- [4] K. Bergman and H. A. Haus, Opt. Lett. **16**, 663 (1991).
- [5] M. Rosenbluh and R. Shelby, Phys. Rev. Lett. **66**, 153 (1991).
- [6] S. R. Friberg, S. Machida, M. J. Werner, A. Levanon, and T. Mukai, Phys. Rev. Lett. **77**, 3775 (1996).
- [7] D. Krylov and K. Bergman, Opt. Lett. **23**, 1390 (1998).
- [8] A. Zavatta, M. Bellini, P. L. Ramazza, F. Marin, and F. T. Arecchi, J. Opt. Soc. Am. B **19**, 1189 (2002).
- [9] J. Heersink, Ch. Marquardt, R. Dong, R. Fillip, S. Lorenz, G. Leuchs, and U. L. Anderson, Phys. Rev. Lett. **96**, 253601 (2006).