

1.5 μm 波長帯のフェムト秒 EDFA ファイバレーザと光ファイバ Sagnac 干渉計を用いた における真空スクイズド光の発生

Generation of Squeezed Vacuum by a Femto second EDFA Fiber Laser at 1.5 μm Wavelength with an Optical Fiber Interferometer

田口修平(M2), 廣澤賢一(D1), 百瀬嘉則(M1), 藤原悠二(B4)

S. Taguchi, K. Hirose, Y. Momose and Y. Fujiwara

Abstract

In recent years, the expectation for the application to the quantum information processing technology with optical fiber nonlinearity is growing. Generation of the squeezed light at wavelength of 1.5 μm corresponding to the low loss wavelength of the conventional optical glass fiber is paramount important for quantum information processing with continuous variables. The objective of this study is to generate the squeezed vacuum (SV), using femto second laser pulses at 1.5 μm wavelength generated from an EDFA fiber laser with a fiber Sagnac interferometer. To obtain large $\chi^{(3)}$ nonlinear optical effect, soliton squeezing, which maintains the initial pulses waveform through fiber propagation was experimentally studied.

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 1.5 μm 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。これまで OPO や OPA を用いた⁽²⁾非線形光学効果によって実現されてきた多くの量子情報処理のプロトコルを、⁽³⁾非線形光学効果を用いた、安定で系の長距離化が可能な全ファイバシステムによって構築する利点は多い。

本研究では市販の EDFA ファイバレーザからの 1.5 μm 波長帯のフェムト秒パルスを用いたポンプ光とした、ファイバ Sagnac 干渉計[1]を用いた真空スクイズド光 (SV: Squeezed Vacuum) の発生を目的とする。十分な⁽³⁾非線形光学効果を得るために、パルス幅やパワーなどの調節により、ファイバへの入射パルスの時間波

形をそのまま保ちながら伝播するソリトンスクイズングを目指した。

一方、この干渉計による手法は、ポンプ光と SV の分岐により、比較的ポンプ光の雑音の影響を受けにくい利点をもつ。しかし EDFA 光源は増幅されたシグナル光と ASE (Amplified Spontaneous Emission) による極めて大きな過剰雑音を持つことが知られており、干渉計の分岐がわずかでも不完全だと、ポンプ光の分岐が不十分になり過剰雑音が SV に混入して、スクイズングが悪化してしまう[2]。そこで、初期のレーザ状態や、波形整形あるいは EDFA の増幅調節などを行ったレーザ状態における過剰雑音量を、光子数成分および直交位相成分について平衡ホモダイン検出法により測定した。判明した過剰雑音特性に基づいて、EDFA のゲイン調節などにより、より SV 発生に適した光源状態を準備して SV 発生実験を行った。

2 EDFA ファイバレーザの過剰雑音測定

SV 発生実験に当たり、光源に用いるフェムト秒 EDFA ファイバレーザのノイズ状態を把握しておくことが重要であると考え、平衡ホモダイン検出により光源の光子数ノイズおよび直交位相ノイズを測定した。また、SV 発生実験に適した光源特性を用意するため、EDFA のゲイン調節を行うことでスペクトルや過剰雑音量を変化させて、その特性を調査した。

2.1 実験セットアップ

実験セットアップを Fig.1 に示す。光源、4-f 系、MZ (Mach-Zender) 干渉計、平衡ホモダイン検出系から構成される。以下に詳細を記す。

まず、本研究に用いた光源はフェムト秒パルスを発生する IMRA 社製 femtolite (モデル名: B-60-KS) である。Er ドープファイバによる受動モード同期ファイバレーザと EDFA による増幅器から構成される。本装

置の初期仕様は、レーザ本体から出力される増幅器光では、中心波長 1560 nm、波長幅 ~ 80 nm、繰り返し周波数 ~ 47.54 MHz、平均パワー ~ 77.4 mW、光源直後に設置してあるコリメート用レンズ直前のビーム径は ~ 1.5 mm (FWHM) である。光源直後の出力スペクトルを Fig.2.(a)に示す。また、本装置をレーザ側面から、後段の EDFA で増幅される前の発振器光を取り出せるように改造した。発振器光の仕様は中心波長 1558.2 nm、波長幅 6.6 nm、繰り返し周波数 ~ 47.54 MHz、平均パワー ~ 6.7 mW、ビーム径は上述の増幅器光と同様である。光源直後の出力スペクトルを Fig.2.(b)に示す。これらのスペクトル測定には ADVANTEST 社製の光スペクトルアナライザ (型番: Q8384) を用いた。

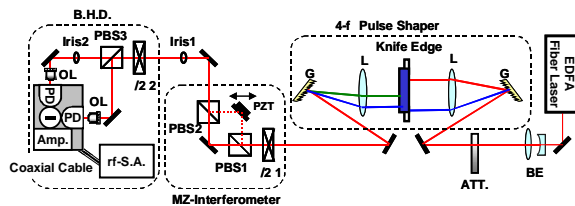


Fig.1. Experimental setup. BE: Beam expander, ATT: Attenuator, G: Grating, L: Lens, MZ: Mach-Zehnder, 1/2: Half Wave Plate, PBS: Polarizing Beam Splitter, PZT: Piezoelectric Transducer, BHD: Balanced Homodyne Detector, OL: Objective Lens, PD: Photodiode, Amp: Amplifier, S.A. Radio-Frequency-Spectrum Analyzer.

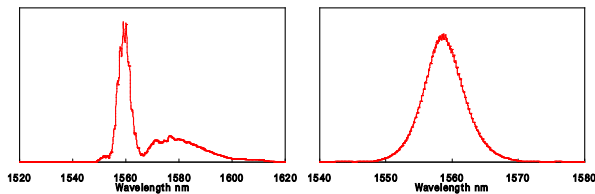


Fig.2. Spectrum of pulse (a) from EDFA in initial state and (b) from oscillator.

直交位相の量子ノイズは直接測定することができないため、平衡ホモダイン検出法を用いた。この手法は測定したい Signal と同じ古典モードをもち、かつパワーが Signal よりも十分大きい局部発振光 (LO: Local Oscillator) を必要とする。そこで、Signal と LO をそれぞれ用意して、それぞれの光路 (モード) を一致させて平衡ホモダイン検出系へ入射させるために、Fig.1. にあるような MZ 干渉計を構築した。図の MZ 干渉計のうち、上の光路を Signal、下の光路を LO として、

LO : Signal のパワー比が 100 : 1 になるように半波長板 1 を調節した。LO と Signal の干渉の Visibility ~ 97 % である。なお、Signal の光路をピエゾ素子 (印加電圧 0 ~ 150 V で伸長量 $9.1 \pm 1.5 \mu\text{m}$) によって光路長を掃引した。一方、Signal ポートをカットして光子数ノイズの測定も行っている。

平衡ホモダイン検出法では Fig.1. のように、2 つの PD からの差信号を、ADVANTEST 社製スペクトルアナライザ (型番: R3131) に入力し、信号光 (繰り返し周波数 47.54 MHz) のサイドバンドとして 3 MHz 帯域で計測している。PD (Photodiode) には浜松ホトニクス社製 InGaAs PIN-PD (G8370-81) を 2 つ用いており、1560 nm における受光感度は 1.12 A/W (量子効率 89.1%)、遮断周波数 35 MHz、最大逆電圧 5 V である。系全体の量子効率は最大で 75% である。また、2 つの PD からの差信号のサイドバンドは強度が弱すぎて測定できないため、Analog Devices 社製の高速・低ノイズオペアンプ (型番: AD829AR1) を用いて 1 ~ 5 MHz 周辺の信号を増幅している。

2.2 EDFA ファイバレーザ自体の過剰雑音測定

本 SV 発生実験の光源に用いたフェムト秒 EDFA ファイバレーザは、100 fs 程度のフェムト秒パルスを生じさせるために、EDFA の内部において SPM (Self Phase Modulation) や SRS (Stimulated Raman Scattering) による広帯域化によって、Fig.2.(a) のようなピークが 2 つある広いスペクトルをもつ。我々は波長幅およびパルス幅の選択を目的として、波長全域そのままの状態と、2 つのピークのうち短波長側のみを 4-f 系によって切り出した 1560 nm 中心の成分、これら 2 種類のポンプ光状態を用いて SV 実験を行った。そこで、ここでは 2 種類のパルス状態に対して、過剰量子ノイズの大きさを調べた。また、Si-PD の 2 光子吸収を利用した強度自己相関によるパルス幅計測法を用いて、ソリトン長などに大きく影響するパルス幅を調べた。

まず波長全域について、時間波形を sech^2 型と仮定したパルス幅は 160 fs と見積もられた。続いて、MZ 干渉計での Signal:LO のパワー分岐比 114:1、Visibility 76% という条件で、光子数ノイズ及び直交位相ノイズを計測した。LO として 3.46 mW を入射したときの背景ノイズ、SNL、光子数ノイズをプロットした様子を Fig.3.(a) に示す。横軸は 10 秒かけて Sweep した。ここ

から背景ノイズが無かった場合の SNL に対する光子数ノイズの大きさを補正計算し、このパワーにおける光子数ノイズ 23.2 dB を得た。また、直交位相ノイズを計測した様子を Fig.3.(b) に示す。(b)では(a)に見られるような背景ノイズを取り除いた補正データを表示している(以下、全て同様の補正データ)。横軸はピエゾ素子によって LO の位相を 2 強だけ Sweep した。手で電源を駆動しているので、横軸の Sweep 速度は必ずしも一定ではない。背景を補正した上で SNL に対する Signal のノイズとして表示している。

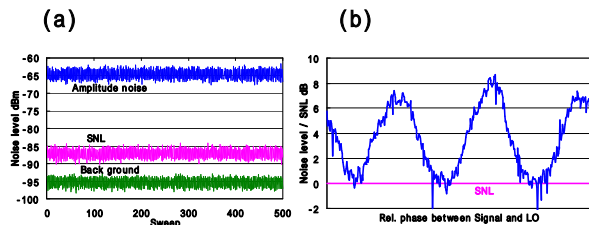


Fig.3. Noise level / SNL with whole wavelength. (a) Amplitude noise, (b) Quadrature noise.

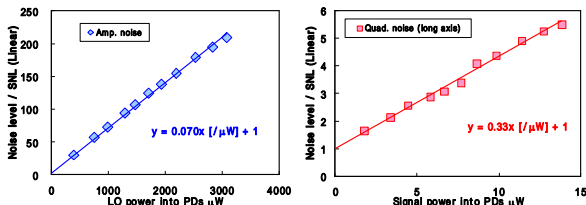


Fig.4. Noise level / SNL to input power with whole wavelength. (a) Amplitude noise, (b) Quadrature (long axis) noise.

続いて、SNL に対する Signal のノイズレベルは、Signal のパワーによって変化する様子を確認するため、入射パワーを弱めながらノイズデータをとった様子を Fig.4. に示す。横軸は B.H.D.への入射パワー((a)は Signal ,(b)は LO のパワー)に Visibility 76% の 2 乗および PD の量子効率 89% の 2 乗をかけて補正した値である。縦軸は SNL に対するノイズレベルであり、線形表示している。この図から、大きな过剩ノイズをもつ光は減光されるほど真空場が混ざり、パワーに比例して过剩ノイズ量が減ってゆく様子が確認された。また、Fig.4.(b)を見るとわかりやすいが、完全に光が消えるまで減光されると SNL (真空場)に一致する様子がわかる。なお、これら直線の傾きはあるパワーにおける SNL に対する相対ノイズ量を与えており、例えばこの光が 1 mW に減光されたときの光子数ノイズ量

は SNL よりも $0.070 \text{ mW}^{-1} \times 1 \text{ mW} = 70$ 倍大きい、という計算ができる。なお、直交位相の短軸方向のノイズは小さいために Fig.4.(b)のような図からは値が読み取れず、以下では全て、直交位相の長軸方向のノイズだけを表示している。

次に、短波長側の状態について述べる。4-f 系の空間フィルタを微調節してスペクトルの裾部分の削り方を少し変えた。波長を広めに取り出したとき、狭く取り出したときの 2 種類について、ノイズの状態が変化するかどうか調べた。取り出した 2 種類のスペクトルの様子を Fig.5. に示す。ノイズ計測は LO : Signal 分岐比 102 : 1, Visibility 99% という条件で行った。光子数ノイズおよび直交位相ノイズの様子を Fig.6. に示す。

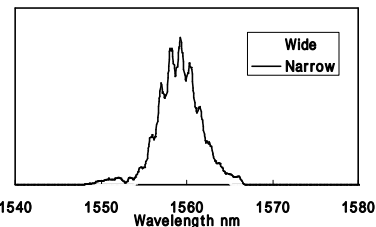


Fig. 5. Spectrum of short wavelength regime.

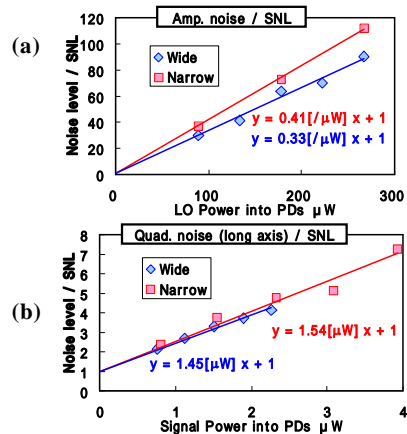


Fig.6. Noise level / SNL to input power. (a) Amplitude noise, (b) Quadrature (long axis) noise.

これらの結果をまとめると、波長全域では、SNL よりも光子数ノイズで **70 倍**、直交位相ノイズの長軸方向で **330 倍** 大きい过剩ノイズをもっていた。一方、短波長では波長帯域を広く取り出した場合それぞれ **330 倍** および **1420 倍**、狭く削った場合それぞれ **410 倍** および **1540 倍** となり、スペクトルを削ることによってパワーあたりのノイズ量が 4~5 倍に増えていることがわかる。これは、EDFA での増幅中に生じる SRS や

SPM によって周波数間に大きな量子相関が発生するため、不用意なスペクトルフィルタリングをかけるとノイズが増大してしまうという原因に基づいていると考えられる。また、直交位相ノイズは光子数ノイズよりも 3~5 倍程度大きい、これも EDFA 中の SPM による影響だと考えられる。

一方、パルス波形に関しては、スペクトルのピークを一つに削り落としたことで、時間域でもピークを一つに減らしている。時間波形を sech^2 型と仮定したパルス幅は、短波長の広い帯域で **633 fs**、狭い帯域で **847 fs** となった。

2.3 EDFA の増幅率調節による過剰雑音変化

次に、後段 EDFA へのポンプ LD の電流を調節することで、シード光の増幅率(いわゆる EDFA のゲイン)を変化させて、EDFA 増幅光のスペクトルや過剰雑音がどのように変化するか測定した。

先ほど調べたような初期状態のレーザ出力 77.4 mW から、EDFA のゲインを徐々に落としたときのスペクトルを Fig.7. に示す。EDFA ファイバレーザ出力 31 mW のときには EDFA 内での⁽³⁾非線形光学効果が弱いため、Fig.2.(b)のシード光に近いスペクトルをしている。

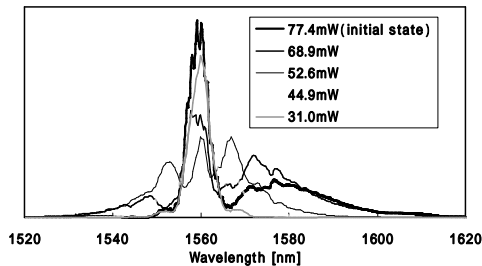


Fig.7. Spectrum with EDFA output 31.0 to 77.4mW.

このようなスペクトルを 4-f 系で削らずに、波長全域でノイズ計測した。測定に用いた EDFA ファイバレーザ出力は 49, 40, 31, 21, 12, 5.2, 1.5, 0.15 mW (つまり、初期の EDFA ファイバレーザ出力状態 77.4 mW をゲイン 1 として、それぞれゲイン 0.63, 0.51, 0.40, 0.27, 0.16, 0.067, 0.02, 0.002 倍)である。小さい増幅率では元のシード光のパワー(1 mW 程度)よりも小さくなっているが、これは EDFA で 1.55 mm 波長帯の吸収があるためである。これらの Fig.6. のような SNL に対するノイズ量の結果をそれぞれプロットした様子を Fig.8. にまとめる。Fig.8.(a)には EDFA のゲインを調節した際の、各レーザ出力のパワーにおける SNL に対

するノイズ量の大きさを、(b)には 1 mW あたりの SNL に対するノイズ量の大きさを示している。例えばレーザ出力を 40 mW に調節したときの、40 mW あたりの光子数ノイズ量は(a)の図から、SNL よりも 38.3 dB (6700 倍)大きく、1 mW あたりの光子数ノイズ量は(b)の図から、SNL よりも 22.3 dB (170 倍 6700 倍/40 mW) 大きいとわかる。

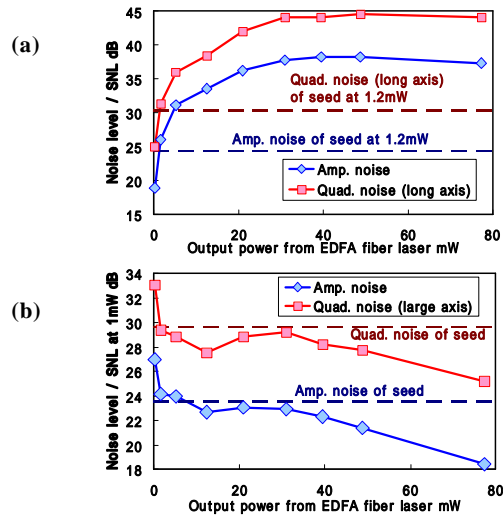


Fig.8.(a) Total noise level / SNL to gain of EDFA, (b) noise level / SNL at 1 mW to gain of EDFA.

2.4 発振器光の過剰雑音測定

最後に、後段の EDFA へ通す前の、ファイバレーザ自体のパルス(シード光)の過剰量子ノイズを測定した。LO: Signal 分岐比 103:1, Visibility 97.9% の条件の元測定した。1 mW あたりの光子数ノイズは **230 倍**、直交位相ノイズの長軸方向は **940 倍**という、パワーあたりでは増幅後よりも大きな過剰ノイズをもつことがわかった。このノイズの大きさを Fig.8.(a),(b)にそれぞれ直線で示す。EDFA のゲインを増やすにつれて、SNL に対するトータルノイズ量も増加する一方、SNL に対する 1 mW あたりのノイズ量は減少する様子が見られる。

2.5 EDFA 光源の過剰雑音測定のまとめ

本実験に用いたフェムト秒 EDFA ファイバレーザは極めて大きな過剰ノイズを持っており、その直交位相および光子数のノイズ量を測定により明らかにできた。SV 発生実験に向けて、この過剰ノイズを低減させることが求められることから、容易に行える EDFA の増幅率を低下させる調節により、増幅率 対 過剰ノイズ

量特性を調べた。その結果、増幅率が落ちると、レーザの出力パワーあたりのノイズ量は減少するが、パワーあたりの過剰ノイズ量自体は増加するという傾向がわかった。

一方、EDFA のゲインを増やすと Fig.7. のようにスペクトルは広帯域化してファイバ Sagnac 干渉計の干渉精度を落としてしまうため、SV 発生実験においては EDFA をどの程度のゲイン領域に調節して用いるかが重要となる。

3 SV 測定実験

前章に述べた EDFA 光源の過剰ノイズ特性に注目しながら、本研究の目的であるファイバ Sagnac 干渉計を用いた SV 発生実験を行った。

3.1 実験セットアップ

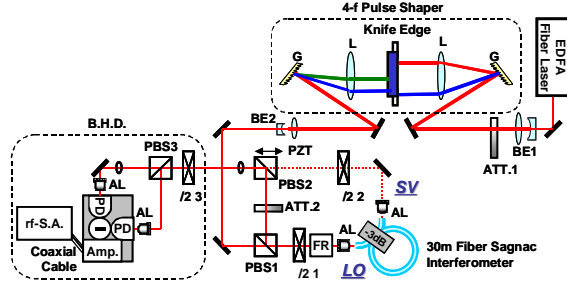


Fig.9. Experimental setup. BE: Beam expander, ATT: Attenuator, G: Grating, L: Lens, $\lambda/2$: Half Wave Plate, PBS: Polarizing Beam Splitter, AL: Aspheric Lens, PZT: Piezoelectric Transducer, BHD: Balanced Homodyne Detector, PD: Photodiode, Amp: Amplifier, S.A. Radio-Frequency-Spectrum Analyzer.

セットアップを Fig.9. に示す。光源、4-f 系、ファイバ Sagnac 干渉計、SV と LO の合波系、平衡ホモダイン検出系から構成される。ファイバ Sagnac 干渉計にポンプ光を入射し、ループを 1 週して反対ポートから出射した微弱パルス を SV、反射したポンプ光を LO として利用して、平衡ホモダイン検出により SV 測定を行っている。以下に詳細を記す。

本研究に用いたファイバ Sagnac 干渉計は Fujikura 社製 PANDA 型偏波保存ファイバ (型番: SM15P) を元に Canadian Instrumentation & Research 社が作成した分岐比可変カブラから構成されている。ファイバの特性

は、動作波長 1550 nm で、MFD (Mode Field Diameter) 10.5 ± 1.0 mm、伝送損失 0.5 dB/km、ビート長 3.0 ~ 5.0 mm、偏波クロストーク - 25 ~ - 30 dB/100m、遮断波長 1.29 ~ 1.45mm である。リング部分の長さは 30 m である (パルス幅 630 fs の入射光に対して 3 ソリトン長となる)。2 本ある腕の長さは SV と LO のモードマッチングのために SV 側と LO 側で同じになるように切りそろえて ~ 0.3 m にした。

また、この分岐比可変カブラはファイバのコア間の距離を $1 \mu\text{m}$ 以下の精度で微調節することにより、干渉計での反射/透過の比を調節し、ポンプ光の入射とは逆側のポート (SV ポート) から出射されるパワーを調節することができるようになっている。しかし、この調節によるカブラの - 3 dB 特性を一度に最適化できるのは、ある 1 点の波長だけである。つまり、入射するパルスの波長幅が広がるほど LO : SV の分岐比が悪化することになる。光源の広いスペクトルのうち、波長全域と短波長側だけを切り出した場合では、短波長側の分岐比の方が ~ 10 倍程度高い。また、ファイバ中の非線形効果によってスペクトルが広がった場合も、分岐比は悪化する。

検出系は前章と同様である。ただし、前章での MZ 干渉計とは違い、SV 側と LO 側での分散量などが異なるため、干渉明度は 87 ~ 92 % である。さらに、SV 側はファイバやオプティクスの端面反射によって、20 % の損失がある。PD の量子効率 89 % を考慮すると、系全体の量子効率は ~ 51 % である。

3.2 SV への過剰ノイズ混入

前述のようにファイバ Sagnac 干渉計における SV 発生では、干渉計の - 3 dB カブラの不完全性によってポンプ光の一部が SV 成分に混ざり、SV のパワーが大きくなってしまふ。(1 パルス当たり十万個程度もの光子が含まれる。) また、本研究で用いている光源が極めて大きな過剰ノイズを持つことを確認した。つまり、本実験では SV 成分には大きな過剰ノイズを持ったポンプ光の一部が必ず混入することがわかる。

一方、ソリトンスクイジングにおいてはパルス幅を変えても、基本ソリトン形成して対応するソリトン長だけ伝播させれば、SV 発生には大きな違いが出ないと言われている。そこで、基本ソリトン形成できる条件の元で、LO : SV 分岐比を上げるか、ポンプ光の過剰ノイズを抑えるかなどにより、SV に混入する

過剰ノイズを最小限に抑える条件を探することで、より高いスクイジングを得られると考えられる。そこで、最適なポンプ光の条件を定量的に探すために、スクイジングに支配的に影響すると考えられる、SV に混入する過剰ノイズ量を『ノイズ混入パラメータ』として、次のように定義する。

$$\frac{[\text{パワーあたりの直交位相ノイズ/SNL}] \times [N=1 \text{ となるパワー}]}{[\text{分岐比}]}$$

このパラメータの小さい方が、SV に与える過剰ノイズの影響が小さいと考えられる。よりパラメータの小さくなる条件を探すために、前章で調査した、波長選択や EDFA の増幅率の変化などによる様々な状態の光源のノイズを元に、このノイズ混入パラメータを Table.5.1 および Table.5.2 にまとめた。

Table.5.1. Noise mixing parameter to wavelength regime.

波長域	パルス幅 fs	ファイバ入射パワー (N=1) mW	ノイズ量 /SNL (N=1)	LO:SV 分岐比	ノイズ混入量
波長全域	160	18.5	6110	530	11.63
短波長域	847	3.5	5380	13700	0.39

Table.5.2. Noise mixing parameter to EDFA output power.

EDFA 出力パワー mW	パルス幅 fs	ファイバ入射パワー (N=1) mW	ノイズ量 /SNL (N=1)	LO:SV 分岐比	ノイズ混入量
77.4	160	18.5	6110	530	11.63
48.8	500	5.9	3490	1000	3.49
39.5	1080	2.7	1810	3400	0.53
31.0	1000	3.0	2430	7300	0.34
20.9	930	3.2	2420	10500	0.23

これらの表から、波長幅が狭いことで高い分岐比を得られる短波長側や EDFA からの出射パワーを 20.9 mW に調節したときが最適と考えられる。逆に、ソリトン長を短くすることで GAWBS を抑えられると期待される波長全域の短パルスは、波長幅が広く、N=1 となるパワーも大きいので、過剰ノイズ光源を用いる以上、SV 実験には期待できない。

3.3 最適条件における SV 発生

SV に混入する過剰ノイズ量が最も少なくなると考えられる、EDFA 出力を 20.9 mW にしたときの SV 測定結果を Fig.10 に示す。N=0.63 となるパワーを入射したときに高い LO : SV パワー分岐比 8640 : 1 となり、確かに他の条件よりも SNL に対してノイズ量を低減

できた。しかし、最も条件として最適なこの場合でも、SNL をはっきりと下回れていない。(ノイズの最小値付近でもプロットが SNL を上下している。ノイズのカーブをなめらかにフィッティングすれば、-0.16 dB 程度のスクイジングは見える。)

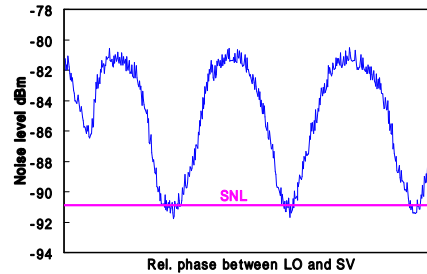


Fig.10. Measured SV with EDFA output 20.9 mW. N = 0.63, branching ratio 8640:1, visibility 89.5 %.

4 まとめ

光ファイバ Sagnac 干渉計および過剰ノイズの大きい EDFA ファイバレーザを用いた、N=1 付近、数ソリトン長伝播でのソリトンスクイジングを行った。SV に混入するノイズ量をパラメータ化して、より SV 発生に適したポンプ光の条件などを探して、簡単な波形整形や、EDFA 増幅率の調節によるポンプ光の調節を行ったが、あとわずかにスクイジング(はっきりとスクイジングしたという確信)を得ることができなかった。これにより、現在市販されているような、Q 値の低いファイバレーザ、を基にした EDFA 光源では、十分なスクイジングを達成するのは難しいと考えられる。

5 謝辞

本研究は、独立行政法人 情報通信研究機構 量子情報技術グループの佐々木雅英グループリーダー、ならびに武岡正裕博士、和久井健太郎修士に数々の提案ならびに指導を頂きました。この場をかりて深く感謝致します。

References

- [1] C. X. Yu, H. A. Haus, and E. P. Ippen, *Opt. Lett.* **26**, 669 (2001).
- [2] 田口修平, 神成研究室 Annual Report 2005-2006, 57.