

ラマンファイバーレーザーによる超広帯域白色光発生の特性

電子工学専攻

植田研究室

廣瀬 祥史

1 はじめに

超広帯域白色光は、様々な応用が考えられている。近年インターネットの普及により情報通信量が飛躍的に増大しており、光通信システムの大容量化が望まれている。波長多重通信技術(WDM)は、波長領域で信号を多重することによって、大容量光通信システムを可能にすることができる。白色光を用い多数のチャンネルを作り出すことも可能である[2]。当研究室では、ラマンファイバー増幅器の励起用光源として P_2O_5 を添加したファイバーを用いたラマンファイバーレーザー(RFL)の研究が行われてきた。このラマンファイバーレーザーを用いて広帯域白色光を発生することができることが分かった。RFLに350mのシリカファイバー(Corning社製ファイバー Flexcor-1060)をつなげることにより2次ストークス光のスペクトルが広がり、中心波長1483.4nmで、約120nm(0dBm以上)の帯域を持つ白色光が発生した。この白色光は、広帯域なRFAの励起光源として利用できるほか、ファイバーの損失、分散測定にも応用できる。また一方で、この現象はWDMにとっては、チャンネル間のクロストークという悪影響を及ぼす。よって、この白色光発生の機構を理解することは非常に重要である。これまでの白色光発生は、自己位相変調(SPM)によるものがほとんどであるが、このラマンファイバーレーザーは、CW光であっても、スペクトルが広がる。フェムト秒レーザーなどの特殊な装置を必要としないのが、この白色光発生の利点でもある。本研究では、広帯域白色光発生の現象を理解するために、白色光の時間特性の評価、ファイバーレーザーを構成しているファイバーの分散測定を行い、どのようにスペクトルが広がっているのかを議論する。

2 RFLのスペクトル特性

まず、RFLの諸特性について述べる。実験図については、図1の通りである。中心波長1239nmに反射率100%の共振器を組み1次ストークス光を強制的に閉じこめ、中心波長1483.4nmのFBGを用いた共振器を用いることによって2次ストークス光におけるRFLを共振させている。出力側のFBGの反射率($R=50\%, 15\%$)や、PDFの長さ(300m,700m)を変えることによって、

2次ストークス光が高出力に発する値を実験から求めた。このときの出力側のFBGの反射率は15%でPDFの長さは700mであった。このとき入力8.55Wの時にスロープ効率42.7%、最大出力3.14W、パワー変換効率42%が得られた。次にP添加ファイバーの長さを

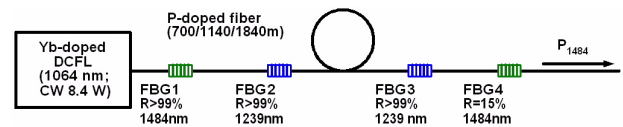


図1: P添加ファイバーラマンレーザー

変化させたときの1次ストークス光、2次ストークス光のスペクトル変化について述べる。P添加ファイバーの長さを伸ばしていくと、1次ストークス光、2次ストークス光のスペクトルが広がっていくことが分かった。1次ストークス光のみの共振器を組んでファイバー長を変化させても、スペクトルに変化は見られなかった。

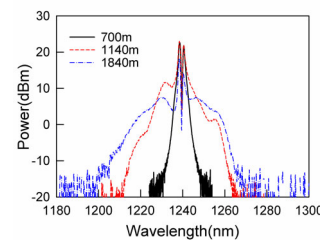


図2: P添加ファイバの長さを変化させた時の1次ストークス光スペクトル変化

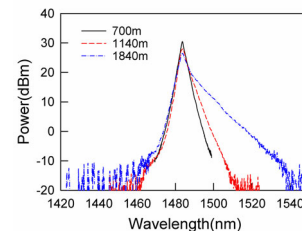


図3: P添加ファイバの長さを変化させた時の2次ストークス光スペクトル変化

1次ストークス光は、短波長、長波長ともにスペクト

ルは広がっていくが、2次ストークス光は長波長のみが広がっていった(図2、図3)。それぞれのスペクトル幅を表1に示す。2つの異なる波長のCW光より、こ

表 1: P 添加ファイバーの長さを変化させた時のスペクトル幅の変化

	1st stokes	2nd stokes
中心波長 [nm]	1239	1483.4
波長幅 (0dBm 以上) [nm]		
@700m	9	19
@1140m	33	23
@1840m	43	44
帯域幅 (0dBm 以上)[THz]		
@700m	1.7	2.5
@1140m	6.4	3.1
@1840m	8.4	6.0

のようなスペクトルが広がる現象としては、相互位相変調 (XPM) による変調不安定性が考えられる。これらの影響を定量的に評価するには、ファイバー中の分散、2波長間の群速度不整合、1次ストークス光、2次ストークス光のパワーがどれくらいかを測定する必要がある。そこで、まず時間特性特性として、RFLの出力光の自己相関波形を測定し、RFLを構成しているP添加ファイバーの分散、および群速度不整合を測定することにした。

3 超広帯域白色光発生の特

RFL にシリカファイバー (Corning 社製ファイバー Flexcor-1060、350m) を融着することで(図4)、2次ストークス光のスペクトルがさらに広がり、超広帯域白色光(SC)が発生した(図5)。1次ストークス光のスペクトルには変化が見られなかった。

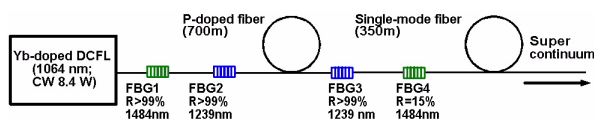


図 4: 2次ストークス光の超広帯域白色光発生

RFL からの2次ストークス光の出力が 3.14W のとき、SC 光の出力は 2.67W であった。スペクトルは、1426nm から 1546nm (0dBm 以上) と、波長幅にして

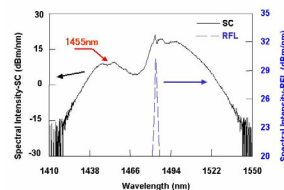


図 5: RFL と SC のスペクトル比較

120nm、帯域幅 16.3THz も広がることが分かった。次に異なる種類のシングルモードファイバー (Spectran 社製 SMT-A1310B) を融着し、スペクトルの変化を見た。図6のようになり、Flexcor-1060のみがSC光を発生した。超広帯域白色光の原因について考える。RFL

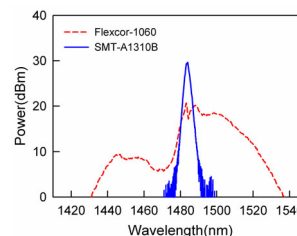


図 6: 異なるシングルモードファイバーによる違い

中で、1次ストークス光(1239nm)、2次ストークス光(1484nm)が相互位相変調を起こしながら、スペクトルを広げていき、パルスを形成して、さらに Flexcor-1060 ファイバー中で、1484nm 周辺の光が4光波混合とラマン散乱の効果により劇的にスペクトルを広げている可能性がある。4光波混合の効果を大きくし、広帯域な光を発生するには、1484nm がゼロ分散波長にあるとよい。これらを定量的に評価するために、SC光の時間特性(パルス幅)、Flexcor-1060ファイバー、SMT-A1310Bファイバーの分散を測定する必要がある。

4 超広帯域白色光の時間特性

白色光の現象を理解するために、まず時間特性について測定をした。この章では、SC光の時間特性について述べていく。

4.1 バックグラウンドフリーSHG強度自己相関計

ラマンファイバーレーザーによるスペクトル広がり、および広帯域白色光発生の原因を調べるためにバック

グラウンドフリー SHG 強度自己相関計を自作し、自己相関波形を測定した。入射してきた光は、ビームス

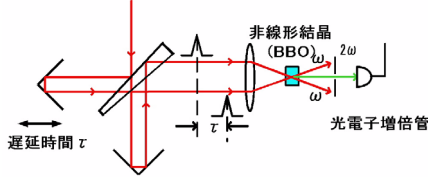


図 7: バックグラウンドフリー SHG 強度自己相関計

プリッターによって 2 つに分けられ、コーナーリフレクターによって 2 つの光が平行に取り出される。2 つのビームの相対的時間差 τ は、一方のアームを移動することで作られる。ビームはレンズによって SHG 結晶 ($\beta - \text{BaB}_2\text{O}_4$) 上に集光される。第 1 種位相整合条件 ($o + o \rightarrow e$) が満足されると第 2 高調波が発生し、 $\tau = 0$ 付近で特に強い信号が出る。得られた信号光強度 I_{SH} を τ の関数として測れば、SHG 強度自己相関関数 $G_0^{(2)}(\tau)$ が次のように求まる。

$$I_{SH}(\tau) \propto \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t-\tau)dt \equiv G_0^{(2)}(\tau) \quad (1)$$

ここで、 $I(t) \propto |E(t)|^2$ 、 $\int_{-\infty}^{\infty} I^2(t)dt = 1$ である。相関波形は対称関数であるため、非対称波形を検出できない。相関幅 $\Delta\tau$ (FWHM) とパルス幅 t_p (FWHM) との間にはパルス波形に依存した一定の関係がある。例えば、波形を $I(t) = \text{sech}^2(t/T)$ と仮定すれば、式 (1) から

$$G_0^{(2)}(\tau) = \frac{3}{\sinh^2(\tau/T)} \left[\left(\frac{\tau}{T} \right) \coth\left(\frac{\tau}{T} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

となる。これから $\Delta\tau/t_p = 1.55$ が求まる。同様に Gauss 波形では $\Delta\tau/t_p = \sqrt{2}$ となる。もし、パルスに構造があれば $\tau \approx 0$ 付近にコヒーレントスパイク (幅 τ_c) が現れる。

次に、装置の概要について述べる。第 2 高調波信号は、光電子増倍管 (浜松ホトニクス製 H957-08) で測定した。検出器の前にはフィルターを置き、基本波 ω を除去してある。遅延時間には、自動ステージ (駿河精機製 K101-30LMS) を使用した。時間分解能は、3.3fs、ストロークは $\pm 100\text{ps}$ である。GP-IB で、ステージを移動しながら AD 変換ボードで光電子増倍管の信号を取り込む。駆動プログラムは Labview で自作した。SHG 結晶は、大きさが $5 \times 5 \times 5\text{mm}$ で、 $\theta = 20.5[\text{deg}]$ $\varphi = 0[\text{deg}]$ の面にカットされている。結晶面は、1484nm の光が直入射したときに最大になるような面を出すようにした。結晶の厚さは、適切な設定をしないと、信頼性の高い測定を行うことができない。このとき、問題となるの

は、基本波と 2 倍波の群速度不整合 α である。2 倍波のスペクトル幅は結晶の厚さを L とすると、 $(\alpha L)^{-1}$ に制限されてしまう。群速度不整合 α は

$$\alpha = \frac{dk_s}{d\omega_s} - \frac{dk_f}{d\omega_f} \quad (3)$$

ただし、基本波の波動ベクトルを \mathbf{k}_f 、2 倍波の波動ベクトルを \mathbf{k}_s とする。 $\alpha @ 1484\text{nm}$ は、 $-1.96[\text{fs}/\text{mm}]$ である。今回、測定したい超広帯域白色光スペクトルの帯域幅は、1484nm で 20THz であるから $(\alpha L)^{-1} > 20\text{THz}$ であればよく、結晶は、25mm 以下であれば良い。よって、結晶の厚さは 5mm とした。また、1 次ストークス光 (1239nm) の自己相関波形を観測時は、結晶の厚さを 0.5mm とした。

4.2 超広帯域白色光の強度自己相関波形

超広帯域白色光の自己相関波形を測定した。実験のセットアップは図 8 の通りである。WDM カップラーにより、励起光 (1064nm)、1 次ストークス光 (1239nm) を除き、2 次ストークス光 (1484nm) のみが Flexcor-1060 ファイバーを透過していく。SC 光の出力が最大の

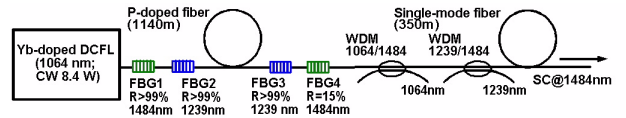


図 8: 実験図

時の自己相関波形は図 9 のようになった。バックグラウンドフリーであるにもかかわらず、裾に信号があるのは、CW 成分による信号である。この信号は、遅延時間を -50ps から 50ps まで動かしてみても一定であった。片アームを閉じるとこの裾の信号は検出されない。そうすると、この相関波形は、コヒーレントスパイクである可能性がある。しかし、コヒーレントスパイクの場合、ピークの信号と裾の信号の比は、2:1 になる。図 9 の場合、5:1 なのでパルス成分の強度相関波形を見ていることになる。パルス波形かどうかを確認するために、自己相関計に光を入れる前に、分散を与えパルス波形を変化させてみようとした。通常の石英基板等ではこの波長域では分散が小さいのでグレーティング対を使い分散を与えた。その時、パルス成分の相関幅は広がるが、コヒーレントスパイク成分は変わらず、コヒーレントスパイク成分と分離することができた。図 9 からコヒーレントスパイクを除きフィッティングをかけた結果を図 10 に示す。このとき、相関幅は 460fs、パ

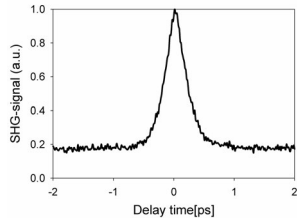


図 9: 超広帯域白色光の強度自己相関波形

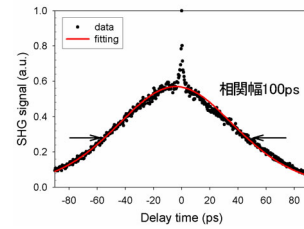


図 12: RFL 1 次ストークス光の自己相関波形

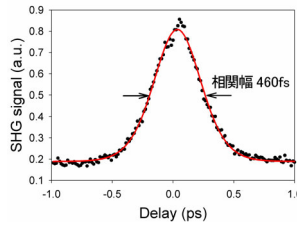


図 10: コヒーレントスパイクを除いた自己相関波形

ルス幅は 297fs であった。また、パワー依存性を見てみたが、相関幅に変化は見られなかった。

4.3 ラマンファイバーレーザーの強度自己相関波形

次に、ラマンファイバーレーザーにおける 1 次ストークス光、および 2 次ストークス光の自己相関波形を測定した。まずはじめに 1 次ストークス光の自己相関波形を測定した。実験のセットアップは図 11 の通りである。WDM カップラーにより、励起光 (1064nm) を除き、1 次ストークス光 (1239nm) と、2 次ストークス光 (1484nm) を分離している。まず、1 次ストークス光を取り出すために、FBG の反射率は、50%にして 1 次ストークス光の自己相関波形を見た。実験図を図 11 に、その時の自己相関波形を図 12 に示す。図 12 の裾の

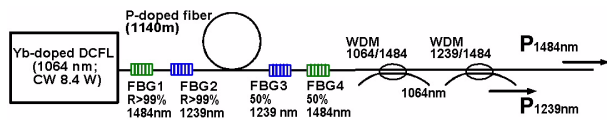


図 11: 実験図

部分は、ステージの可動範囲外であるので見えないが、可動ステージを移動したところ、裾の信号は 0 まで落ちていた。相関幅は 100ps、パルス幅は 64.5ps であった。ただし、パルス波形が $I(t) = \text{sech}^2(t/T)$ であると仮定している。次に、2 次ストークス光の自己相関

波形を測定した。実験のセットアップは図 13 の通りである。WDM カップラーにより、励起光 (1064nm)、1 次ストークス光 (1239nm) を除き、2 次ストークス光 (1484nm) のみが出力される。自己相関波形を図 14 に示す。相関幅は 1.2ps、パルス幅は 749fs であることがわかった。以上の結果より、RFL においてパルス成分

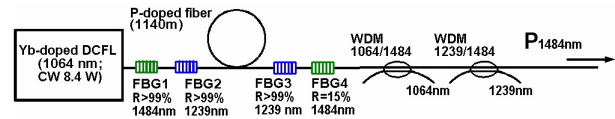


図 13: 実験図

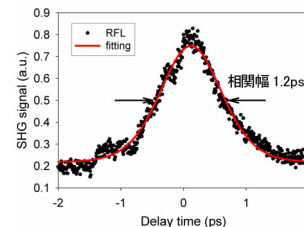


図 14: RFL 2 次ストークス光の自己相関波形

があることがわかった。高速オシロスコープを用いてパルスの繰り返し列を観測しようとしたが見ることはできなかった。自己相関計は、可動範囲は $\pm 100\text{ps}$ であるから 10GHz 以上の繰り返しであれば測定可能である。今回は、自己相関計でも繰り返しは見られなかった。これは、繰り返し列があるとしても、非常に不安定な場合、平均化されてしまい繰り返し周波数を測定することができないと思われる。パルス列は、非常に不安定である可能性がある。

5 ファイバーの分散特性

RFL 中でのスペクトル広がり、パルス成形を考察するために PDF の分散を測定した。また、図 6 のよう

に RFL に接続するシングルモードファイバーの種類によって、白色光が発生しないことがわかった。この違いを考察するために各々のファイバーの分散を測定した。超広帯域白色光発生現象を理解していく上で、ファイバーの分散特性を調べることは、非常に重要である。ここでは干渉法を用いた。干渉法では、得られたフリンジデータに波長分散の値が含まれているので、データより直接に分散を求めることができる。図 15 に分散特性の測定結果を示し、表 2 に 1239nm および 1483.4nm での分散値を示す。Flexcor-1060 ファイバーは 1483nm 付近がゼロ分散であるのが特徴である。図 16 は、各々

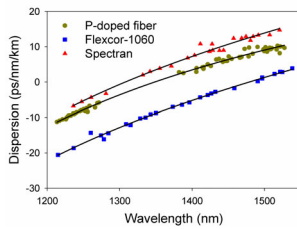


図 15: 各々のファイバーの分散特性

表 2: 各々のファイバーの分散特性

Fiber Parameter	Flexcor-1060	Spectran	PDF
D[ps/nm/km]			
@1239nm	-18	-6.4	-8.8
@1483.4nm	0.30	13	8.2

のファイバーの 1483.4nm との群速度不整合について示している。フィッティングは、分散特性の際に得た式を積分し、1483.4nm が基準となるように積分定数を定めた。P 添加ファイバーは、他のファイバーにくらべて 1 次ストークス光 (1239nm)、2 次ストークス光 (1483.4nm) 間の群速度不整合が小さいのが特徴である。その量は 0.13[ps/m] である。各々のファイバーの 1 次ストークス光、2 次ストークス光間の群速度不整合は、表 3 にまとめた。

表 3: 各々のファイバーの群速度不整合

Fiber Parameter	Flexcor-1060	Spectran	PDF
GVM[ps/m]	2.0	0.96	0.13

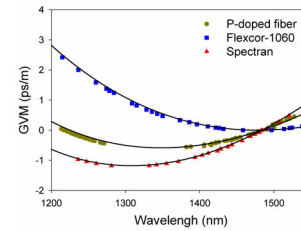


図 16: 各々のファイバーの群速度不整合

6 超広帯域白色光の定量的な解析

6.1 ラマンファイバーレーザー

RFL でのスペクトル広がりには、相互位相変調 (XPM) による影響があると考えられる。この時、特に考えなくてはいけなのが 1 次ストークス光、2 次ストークス光間の群速度不整合である。RFL 中では、1 次ストークス光、2 次ストークス光がパルス化しているということが自己相関波形の測定で分かった。正分散領域にある 1 次ストークス光の方がパルス幅が広く、64.5ps である。お互いのパルスが相互作用できる長さは、群速度不整合が 0.13[ps/m] より、496m である。相互作用長が非常に長く、P 添加ファイバーは、相互位相変調が起きやすいと思われる。相互位相変調により、連続光はパルス光へと変化していく。これを変調不安定性という。変調不安定性の利得を得られた分散値より計算してみた。計算した利得と、RFL の 1 次ストークス光スペクトルの比較を図 17 に示す。スペクトルには

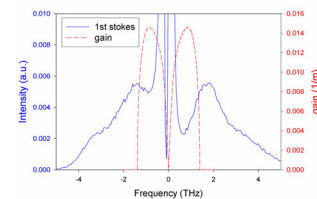


図 17: 変調不安定性の利得と、RFL1 次ストークス光スペクトル

1.6THz にサイドバンドのピークがあり、計算した利得では 0.85THz である。計算と若干異なっているのは、計算時に 2 つの光のエネルギーのやりとりが全くないと仮定しているからである。厳密に計算するには、ラマン散乱によるエネルギーのやりとりを含めなくてはならない。2 次ストークス光のスペクトル広がりには、長波長側のみ見られたが、これも XPM による影響が考えられる。というのも XPM は、互いのパルスが時間ずれを起こしながら位相変調を与えていくからである。

6.2 超広帯域白色光発生

白色光は、低分散な Flexcor-1060 のファイバーを接続したときのみ発生することがわかった。低分散であると、低ピークパワーのパルスであっても、容易にファイバー中にソリトンが伝搬する。というのも、基本ソリトンが伝搬するためのピークパワー P_1 は

$$P_1 \simeq \frac{3.11|\beta_2|}{\gamma T_{FWHM}^2} \quad (4)$$

である。Flexcor-1060 ファイバーの場合、1483.4nm で $P_1=0.99\text{W}$ となる。一方、SMT-A1301B ファイバーの場合、 $P_1=98.7\text{W}$ である。ゼロ分散波長に非常に近いということは、それだけ低ピークパワーでもソリトンが存在するということである。Flexcor-1060 ファイバーは、低ピークパワーのパルスを形成している RFL になくと、高次ソリトンが発生していると思われる。高次ソリトンは、ラマン効果と 3 次の分散によって赤方に周波数がシフトし、1 次ソリトンを形成（自己周波数シフト）していると考えられる。また、ゼロ分散付近の白色光発生においてアンチストークスパルスが長波長にシフトしたソリトンと同じ速度で伝搬するよう発生するという報告がある [4]。図 18 を見てみると、

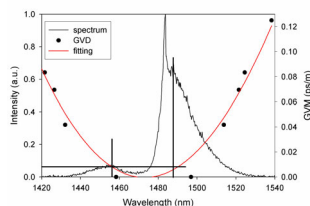


図 18: SC 光スペクトルと群速度不整合

短波長側のピークと、長波長側のピークにおける群速度不整合がほぼ同じである。長波長側の自己周波数シフトを理論的に見積もるには、ラマンファイバーレーザのパルス列の繰り返しを測定し、パルスのピークパワーを見積もる必要があると思われる。

7 結論

RFL でのスペクトル広がり、Flexcor-1060 ファイバーでの超広帯域白色光発生の機構を調べるために、自己相関波形を測定し、また各々のファイバーの分散特性を評価した。RFL でのスペクトルは、P 添加ファイバーの長さをのばすことで広がっていく。1 次ストークス光 (1239nm 中心) で最大 43nm、2 次ストークス光 (1483.4nm 中心) で最大 44nm の広がりをもつ。RFL に

Flexcor-1060 ファイバーを接続することで 2 次ストークス光のスペクトルがさらに広がり超広帯域白色光を発生した。120nm の広がりを持つ。SMT-A1310B ファイバーでは白色光を発生することができなかった。また、1 次ストークス光に変化は生じなかった。RFL、および超広帯域白色光の時間特性を調べるのに、バックグラウンドフリー自己相関計を用い、相関波形を観測した。RFL では、1 次ストークス光のパルス幅が 64.5ps、2 次ストークス光が 749fs であった。超広帯域白色光は、パルス幅が 297fs である。超広帯域白色光の自己相関波形については、コヒーレントスパイクではないことを回折格子対を用いて、パルス幅を広げることにより確認した。各々のファイバーの分散特性を測定した。P 添加ファイバーは、1 次ストークス光、2 次ストークス光間の群速度不整合が 0.13[ps/m] と小さく、2 つの光は 500m 伝搬しても相互作用することができる。このことから、RFL でのスペクトル広がりには相互位相変調によるものと考えられる。Flexcor-1060 ファイバー、SMT-A1310B ファイバーの違いは、1483.4nm での分散値が前者が 0.3[ps/nm/km]、後者が 13[ps/nm/km] である。Flexcor-1060 ファイバーは、1483.4nm がゼロ分散付近であるのが特徴である。RFL から、低ピークパワーのパルスが発生し、Flexcor-1060 ファイバーによって、高次ソリトンを形成し、自己周波数シフトによって、長波長側にソリトン、短波長側にソリトンと同じ速度で伝搬するアンチストークスソリトンを形成すると思われる。

参考文献

- [1] Govind P. Agrawal. "Nonlinear fiber optics-third edition". Academic Press, (2001).
- [2] K. Mori T. Morioka and M. Saruwatari. "more than 100-wavelength-channel picosecond optical pulse generation from single laser source using supercontinuum in optical fibres". *Electron. Lett.*, Vol. 29, pp. 862-864, (1993).
- [3] 堀内幸夫. "光ファイバ及び光伝送システムの波長分散測定法". *OPTRONICS*, Vol. 6, pp. 124-130, (2000).
- [4] Ryuji Okamura Norihiko Nishizawa and Toshio Goto. "widely wavelength tunable ultrashort soliton pulse and anti-stokes pulse generation for wavelengths of 1.32-1.75 μm ". *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 39, pp. L409-L411, (2000).