

光ファイバのブリルアン利得スペクトルの測定

電子工学科 植田研究室 山原 佳晃

1. 序論

光ファイバの非線形現象の1つである、誘導ブリルアン散乱(SBS)は、ファイバ中を伝搬する信号光の強度限界を決めてしまう現象であり、1972年に発見されて以来、光ファイバ通信、ファイバ増幅器、ファイバレーザの信号光の高強度化を進める上で大きな障害となっている。現在、我々が開発中の、レーザガイドスターとしての応用が期待される、波長 1178nm 単一周波数フォトニックバンドギャップファイバ(PBGF)増幅器(図 1)もその1つであり、SBSが高強度化(~50W)の大きな妨げとなっている。そのため、光ファイバの SBS 特性を評価することが急務となっている。ブリルアン利得スペクトル(BGS)は SBS に関する多くの情報を持っているため、光ファイバの SBS による影響を評価する上で、その測定が重要な課題となっている。このような背景のもと、本実験では、波長 1178nm における BGS 測定器を作製し、2種類の 1μm 帯のシングルモードファイバ(Germansilicate ファイバ、Phosphosilicate ファイバ)の BGS を測定し、それらの SBS 特性を評価したので報告する。

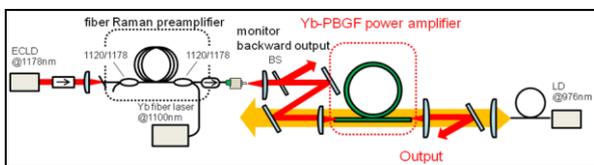


図 1. 波長 1178nm 単一周波数 PBGF 増幅器

2. 原理

最初に SBS と BGS の原理について示す。ファイバにコヒーレントな光が入射すると、これがポンプ光として働くため、密度揺らぎによる格子振動の音波(音響モード)が生じる。それがコアの屈折率の周期的な変調、すなわち回折格子を作り出し、この回折格子によって入射光がブラッグ回折され、後方散乱光(ストークス光)が生じる(図 2)。散乱

時、回折格子が音速で動くことに伴い、ストークス光は、ドップラシフトによって低周波数側にシフト(ブリルアンシフト)される。これがブリルアン散乱である。入射光パワーがある特定の閾値(SBS 閾値)を超えると、その大部分がストークス光パワーに変換されてしまうため、出射光が大きく制限されてしまう。この現象が SBS である。このとき、ストークス光の成長は

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B(\nu)I_p I_s \quad \dots(2.1)$$

で表される。ただし g_B はコア媒質のバルクのブリルアン利得係数、 I_p はポンプ光エネルギー、 I_s はストークス光エネルギーである。ここで、コア媒質のファイバ固有のブリルアン利得係数 $C_B(\nu)$ (以下、ブリルアン利得係数)として、ファイバの有効コア断面積 A_{eff} を用いて

$$C_B(\nu) = \frac{g_B(\nu)}{A_{eff}} \quad \dots(2.2)$$

とおくと、(2.1)式は

$$\frac{dI_s}{dz} = -C_B(\nu)P_p I_s \quad \dots(2.3)$$

と書き換えられる。ただし P_p はポンプ光パワーである。この式からわかるようにストークス光の成長は $C_B(\nu)$ によって特徴づけられている。この $C_B(\nu)$ は、ブリルアンシフト ($\nu = \nu_B$) にピーク値 $C_B(\nu_B)$ 、線幅 $\Delta\nu_B$ のファイバ固有のスペクトルをもつ。これが BGS である。

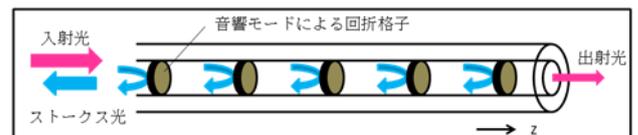


図 2. ブリルアン散乱

次に BGS 測定の原理を示す(図 3)。上記の原理に従い、ファイバにポンプ光としてコヒーレント光を入射すると、ファイバ中で SBS によるブリルアン利得が励起される。このとき反対側からプローブ光を入射すると、その光はブリ

ルアン利得帯域内で増幅される。そのときのプローブ光の成長は

$$I_{probe}(L) = I_{probe}(0)e^{C_B P_p L} \dots(2.4)$$

となる。ただし I_{probe} はプローブ光エネルギーである。ここでブリルアン利得 $G_B(\nu)$ として

$$G_B(\nu) = C_B(\nu)P_p \dots(2.5)$$

を用いると、(2.4)式は

$$I_{probe}(L) = I_{probe}(0)e^{G_B L} \dots(2.6)$$

となる。実験では、プローブ光の増加よりブリルアン利得 $G_B(\nu)$ スペクトルを求め、(2.5)式を用いて BGS を導出した。

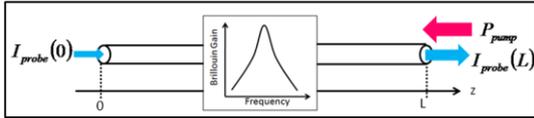


図 3. プローブ光の成長

3. 実験

3.1. 波長可変外部共振型半導体レーザ(Tunable ECLD)

後述の BGS 測定器のプローブ光源(図 9)を構成した。この光源は BGS 測定のために、狭線幅($\ll \Delta\nu_B$)かつ波長可変(連続波長掃引幅 $> \Delta\nu_B$)であることが必要とされる。この要求を実現させるため、外部共振器型半導体レーザ (ECLD)を用いた。

構成した ECLD(図 4)は、長さ 4mm の量子ドットゲインチップ側端面(3%AR コーティング)と回折格子により外部共振器を組んでおり、 piezo に電圧をかけ、回折格子を回転させることで波長を変えられる構造になっている。また、共振器長は 55mm であるため、縦モード間隔は 2.7GHz である。ウェッジウィンドウを挿入することで、ビームの崩りを調節できるよう構成した。次に構成した ECLD の特性評価を行った。

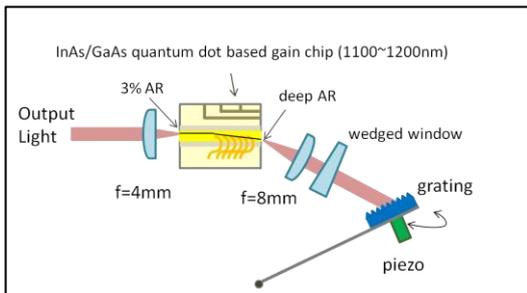


図 4. ECLD 構成図

初めに ECLD のパワー特性を測定した(図 5)。パワー特性にはプラトーが見られた。これは電流増加によるモードホップと考えられ、このことから ECLD の温度不安定性が確認された。また最大出力は電流 800mA 時で 23.6mW である。

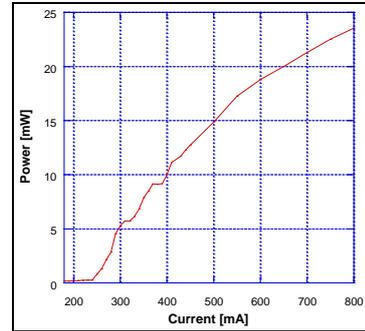


図 5. ECLD パワー特性

次に ECLD のモードホップ特性を測定した(図 6)。 piezo に電圧をかけ、回折格子を回転させ、そのときの波長を波長計(Anritsu MF9630A)により測定した。その結果、連続波長掃引幅は 4.11GHz(0.019nm)であった。これは予測されるブリルアン利得スペクトル幅(40MHz)よりも十分広い掃引幅であるため、実験の要求値を満たしていると言える。

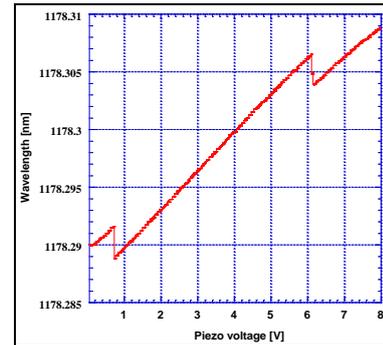


図 6. モードホップ特性

最後に ECLD の線幅を測定した。測定方法には遅延自己ヘテロダイナ測定法を用いた(図 7)。ECLD の出力光はカップラで 2 つに分けられ、一方は 4km 遅延ファイバへ入射し、もう一方は AOM で周波数シフト(80MHz)される。その後、両光を、ビームスプリッタ(BS)を用いて再度重ね合わせ、フォトダイオード($< 16\text{GHz}$)(サイエンストルメント DSC40S)で光電変換し、ビートを RF スペ

クトルアナライザ(RSA)(Anritsu MS2667C)で測定した。また、測定器の分解能は 4km の遅延ファイバを用いたため

$$\Delta\nu = \frac{c}{nL} = 51.7\text{kHz} \quad \dots(3.1)$$

である。ただし、c は光速、n はコアの屈折率、L は遅延ファイバ長である。

得られたビート信号(図 8)を、規格化しローレンツフィッティングを行うことで線幅を測定した(図 9)。その結果、電流値 270~300mA 時、線幅 190kHz であった。これは予測されるブリルアン利得スペクトル幅よりも十分狭い線幅であるため、実験の要求値を満たしていると言える。

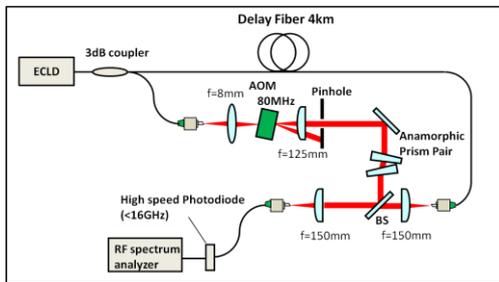


図 7. 遅延自己ヘテロダイン測定法実験図

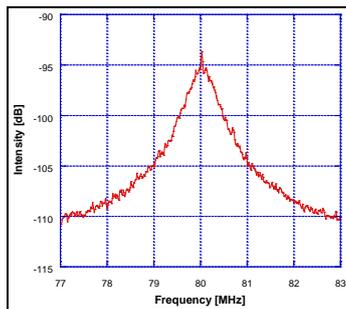


図 8. ビート信号

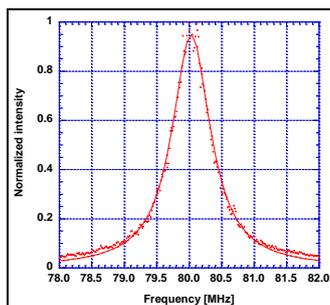


図 9. ローレンツフィッティング

3.2. BGS 測定

3.1 で構成した ECLD(中心波長 1178nm、線幅 190kHz)をプローブ光源(中心波長 1178nm)として用いて BGS 測定器を作製した(図 10)。ポンプ光源には本研究室で開発されたファイバラマン増幅器(FRA)(波長 1178nm、線幅 200kHz)を使用した。ポンプ光はカプラで 2 つに分けられ、一方はテストファイバ(FUT)で SBS によるブリルアン利得を励起し、もう一方は RSA へ入射する。プローブ光は、FUT でブリルアン利得帯域内において増幅された後、カプラで 2 つに分けられ、一方はパワーメータ (Tektronix TDS540S)へ、もう一方は RSA へ入射する。プローブ光の周波数を連続掃引しながら、パワーメータでブリルアン利得による増幅光を測定し、RSA で両光のビート周波数からブリルアンシフトを測定することで $G_B(\nu)$ スペクトルを求めた。また、各光源の直後にアイソレータを挿入した。これは、戻り光ならびに、もう一方の光源からの光の入射を阻止するためであり、プローブ光源に関しては、ポンプ光源からの強い入射光を阻止するために、1 段目にファラデー回転子を偏光子で挟んだ反射型アイソレータを、2 段目に吸収型アイソレータを挿入した。そして、偏光コントローラを用いて、FUT でのポンプ光とプローブ光の偏光状態を調節した。プローブ光パワー 0.4mW に対し、ポンプ光パワーを 57.3, 76.5, 107.7, 139.9, 205.1, 252.7mW と変化させ測定した。FUT には、コアの添加物が異なる 2 種類の SMF(Germosilicate ファイバ、Phosphosilicate ファイバ)(表 1)を用いた。

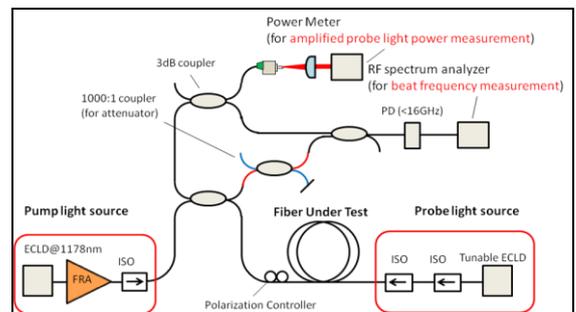


図 10. BGS 測定器

表 1. FUT の特性

Fiber	MFD[μm] (@1178nm)	Concentration [wt%]	NA	Cutoff [nm]
Germanosilicate	6.9	6	0.14	931
Phosphosilicate	6.7	20	1050	

実験から得られた $G_B(\nu)$ スペクトル(図 11(a)(b))と(2.5)式から各ポンプ光パワーに対する BGS を求めた。その結果、BGS はポンプ光パワーに依らないことが確認され、ここでは例としてポンプ光パワー139.9mW 時の BGS を示した(図 12(a)(b))。そして、各ファイバの BGS のパラメータを示した(表 2)。この結果から、BGS は Germanosilicate ファイバと Phosphosilicate ファイバで大きく異なることがわかり、コアの添加物によって SBS 特性は大きく異なることが分かった。コアへ P を添加した場合、Ge を添加した場合と比べ、i) $C_B(\nu_B)$ の低下、ii) $\Delta\nu_B$ の増大、iii) ν_B の低下が見られた。i, ii から、コアに P を添加することで SBS 抑制効果が期待できると判明した。また iii から、ファイバ中の音速が小さくなることが判明した。

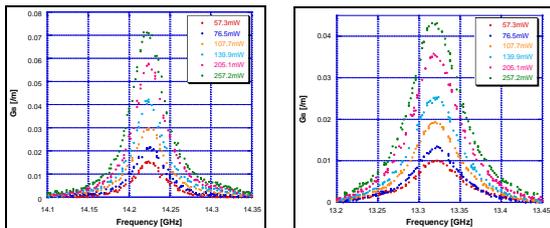


図 11. 利得スペクトル(a)Germanosilicate(b)Phosphosilicate

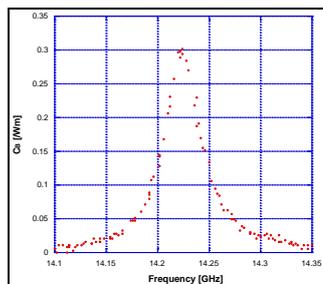


図 12(a). Germanosilicate ファイバの BGS

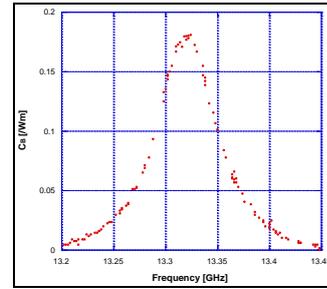


図 12(b). Phosphosilicate ファイバの BGS

表 2. BGS パラメータ

Fiber	$C_B(\nu_B)$ [1/Wm]	$\Delta\nu_B$ [MHz]	ν_B [GHz]
Germanosilicate	0.28	42	14.23
Phosphosilicate	0.18	61	13.32

4. 結論

本実験では、波長 1178nm における BGS 測定器を作製し、コアの添加物が異なる 2 種類の SMF(Germanosilicate ファイバ、Phosphosilicate ファイバ)の BGS 測定を行った。その結果、コアの添加物によって BGS は大きく異なることが確認され、P を添加した場合、Ge を添加した場合と比べ、SBS が抑制されるということが分かった。このことから、コアの添加物により、SBS を制御することが可能であると判明した。また、Phosphosilicate ファイバの BGS が測定されたのは、本実験が初めてである。

5. 展望

今後の課題としては、1 つ目は、より高精度で光源の波長調整不要な BGS 測定を行うことである。本実験ではポンプ光源、プローブ光源として別々の 2 つの光源を用いたため、各光源の周波数を安定化しなければならず、波長調整に時間がかかると同時に高精度測定を難しくしていた。これを解決するため、1 つの光源の光をカップラで 2 つに分け、一方をポンプ光、もう一方を変調しプローブ光とする方法が挙げられる。この方法を用いることで高精度かつ波長調整不要な BGS 測定を行う予定である。2 つ目は、本実験で作製した BGS 測定器を用いて、PBGF の BGS を測定し、その SBS 特性を評価することである。