

誘導ブリルアン散乱を抑制した光ファイバ

株式会社フジクラ 光エレクトロニクス研究所 和田 朗
野沢 哲郎

Stimulated - Brillouin - Scattering - Suppressed Optical Fibers

Akira Wada, Tetsuo Nozawa
Opto-electronics Laboratory, FUJIKURA Ltd.

1. はじめに

光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering; SBS) はファイバ損失が低く、構造が均質なほど起こり易くなる。長尺のシングルモードファイバでは数 mW の入射光強度で誘導ブリルアン散乱が生じることが報告されている¹⁾。SBS によって光信号は後方に散乱され、その程度はしきい値を越えると急激に増加する。SBS しきい値を越えて入射光パワーを増加させても、後方散乱光として入射側に戻ってくる成分が増加するだけで、透過する光パワーはほとんど変化しなくなってしまうため、SBS は光通信にとって重大な障害を与える。

ブリルアンしきい値は信号光源の線幅にも依存しており、線幅が狭くなるとしきい値が低下する。このため、狭線幅の光源を必要とするコヒーレント光通信では SBS の抑制が重要である。さらに最近では Er ドープ光ファイバ増幅器の発展により、10 mW を越える光出力が容易に得られるようになってきている。こうした高光出力を十分に活かすためにも SBS 抑制技術が非常に重要になってきている。

これまで SBS 抑制に関しては、光源の線幅や変調方式といった観点からなり多くの議論がなされてきている^{2),3)}が、伝送路である光ファイバ自体

に SBS 抑制機能をもたせるという観点ではあまり検討が行なわれていない^{5),6),7)}。本稿では、光ファイバに残留する歪を制御することによって実効的にブリルアン利得を減少させ、SBS の発生しきい値を増大させた光ファイバの SBS 抑制特性を報告する⁴⁾。

2. 誘導ブリルアン散乱

誘導ブリルアン散乱は入射光 (pump 光) とファイバ中の音響フォノンとの間の非弾性散乱で、光ファイバ中では運動量保存則による制約から、pump 光から ν_B だけ周波数がシフトした後方散乱光 (Stokes 光) だけが生ずる。この Stokes 光の周波数遷移 (ブリルアン周波数シフト) は、

$$\nu_B = \frac{2nV_A}{\lambda_p} \quad (1)$$

で与えられる。Stokes 光は ν_B を中心とした半値全幅 $\Delta\nu_B$ のローレンツ型のプロファイルをしている。 $\Delta\nu_B$ は音響フォノンの寿命によって決まり、均質な石英系光ファイバでは 30 MHz 程度の幅となる¹⁵⁾。 n はファイバコアの屈折率、 λ_p は pump 光の波長である。また、 V_A は音響フォノンの伝搬速度で次式で与えられる⁸⁾。

$$V_A = \sqrt{\frac{E(1-\kappa)}{\rho(1+\kappa)(1-2\kappa)}} \quad (2)$$

ここで、 E, κ, ρ はそれぞれコア領域の、ヤング率、ポアソン比、密度を表す。式(1), (2)中のパラメータ n, E, κ, ρ がコア内の歪に依存するので、これらを通して ν_B もまたコア内の歪によって変化する。このことを利用して、意図的にコア領域に残留する歪を変化させれば、ブリルアン周波数シフト量を制御することが可能になる。

SBS の発生しきい値 pump 光パワー P_{th} は次式で与えられる⁹⁾。

$$P_{th} = \gamma_{th} \frac{A_{eff} m}{g_0 L_{eff}} \quad (3)$$

ここで γ_{th} は数値定数で、SBS しきい値を入射端において観測される Stokes 光強度が射出光強度の 10% に達した時の入射光強度と定義すると、ファイバ長 L と減衰定数 α の積が $\alpha L = 1$ 程度のファイバでは $\gamma_{th} = 16.5$ となる¹⁰⁾。 g_0 はブリルアン利得係数、 A_{eff} は有効コア断面積である。 m は偏光状態を表すための係数で pump 光、Stokes 光が完全に直線偏光で偏光面が一致しているとき 1、これらの偏光状態が完全にランダムなとき 2 となる¹¹⁾。 L_{eff} はファイバ有効長で次式で与えられる。

$$L_{eff} = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha} \quad (4)$$

式(3)より、ブリルアン利得係数 g_0 と SBS 発生しきい値 P_{th} は反比例の関係にあり、しきい値を増加させるためには g_0 を低くすればよいことがわかる。ブリルアン周波数シフト ν_B 、ブリルアン利得帯域 $\Delta\nu_B$ よりも十分大きな幅で光ファイバ軸方向に周期的に変動させれば、実効的なブリルアン利得が減少して SBS しきい値を増加させることができる。

例えば、異なる 2 種類の ν_B をもつ領域が適当な間隔で交互に配置され、それぞれの領域の ν_B が $\Delta\nu_B$ に比べて充分離れていて、ブリルアン利得プロファイルが光ファイバ全体で見ると 2 つに分離してみえるようなファイバでは、実効的にブリルアン利得は 1/2 になり、3 dB の SBS しきい値の向上が達成できる。

これが、以下で説明する周期的残留歪 (Intentionally Induced Periodically Residual Strain; IIPRS) による SBS 抑制原理となる。

3. IIPRS ファイバの設計と製作

ブリルアン周波数シフト量が残留歪によって変化することは前項で述べた。このファイバ中の残留歪はファイバの組成と線引条件によって変化する。コアの粘性がクラッドに比べて高いファイバでは、ファイバを線引する工程の冷却過程においてコアがクラッドよりも早く弾性的に振る舞うようになるため、線引中の張力は主としてコアに加わり、この張力によってコアは引き延ばされることになる。コアが引き伸ばされた状態で後から周囲に断面積の大きなクラッドが固化するので、線引が終了して張力を開放してもコアは引き伸ばされた状態のままになり、結果として引張歪がコアに残留する¹²⁾。従って、ブリルアン周波数シフト ν_B はコア残留歪を通して線引張力によって制御することが可能である。こうした目的には、シリカコア (>99% SiO₂)、フッ素添加クラッドファイバ (High Silica Core fiber; HSC fiber) が適している。Ge 添加コア、シリカクラッドファイバの場合には、コアの粘性がクラッドより低く、線引時の張力は主としてクラッドに加わる。クラッドの断面積がコアに比べて大きいため、クラッドにかかった張力は線引後には開放されてしまい、大きな歪は残留しない。従ってこの組成のファイバは今回の目的に適していない。

線引中にコア領域に加わる歪 ϵ_A は次式で表される。

$$\epsilon_{1A} = \frac{F}{A_1 E_1} \frac{1}{\left(1 + \frac{\eta_2 A_2}{\eta_1 A_1}\right)} \quad (5)$$

ここで、 A は断面積、 η は粘度、 F は線引張力である。下付添字の 1, 2 はそれぞれ、コア、クラッドを示す。線引き後に張力を開放したときの残留歪 ϵ_B は次式で示される。

$$\epsilon_{1B} = \frac{A_2 E_2}{A_1 E_1 + A_2 E_2} \epsilon_{1A} + \epsilon_T \quad (6)$$

ϵ_T は熱歪である。これらの式から、線引き張力の変動値 dF と、残留応力歪の変化量 $d\epsilon$ の間には次式が成立する。

$$d\epsilon = \frac{A_2 E_2}{A_1 E_1 + A_2 E_2} \frac{dF}{A_1 E_1} \frac{1}{\left(1 + \frac{\eta_2 A_2}{\eta_1 A_1}\right)} \quad (7)$$

Table 1 Parameters of tested fibers

	Fiber A (normal)	Fiber B (IIPRS)	Fiber C (IIPRS)
Material	SiO ₂ core /F-SiO ₂ cladding		
Core / Cladding diameter (μm)	9 / 125		
Index difference Δ (%)	0.38		
Mode field diameter (μm)	9.9		
Optical loss (dB/km)	0.178	0.180	0.180
Fiber length (km)	25.2	23.1	13.5
Deviation of drawing tension (g)	<1	16	16
		rectangular shape	triangular shape

上式から、線引き時に 16 g の周期的な張力変動を与えた場合、 $E_1=E_2=73$ GPa, $\eta_1/\eta_2=0.2$ を仮定して、約 0.084% の歪が残留することが予測される。

残留歪変化量 $d\varepsilon$ と規格化したブリルアン周波数シフト量の変化量 $d\nu_B(\varepsilon)/\nu_B(0)$ との間には次式が実験的に成り立つことが報告されている¹⁴⁾。

$$C \equiv \frac{1}{\nu_B(0)} \frac{d\nu_B(\varepsilon)}{d\varepsilon} = 4.70 \quad (8)$$

ここで、 $\nu_B(0)$ は無歪状態におけるブリルアン周波数シフト量である。式(8)および $\nu_B(0)=11.16$ GHz を用いて、16 g の張力変動が約 44 MHz のブリルアン周波数シフト変化量を生じさせることがわかる。

IIPRS の SBS 抑制効果を確認するために、3 種類のシングルモードファイバを試作した。ファイバ A は一定張力で線引した通常のファイバで、ファイバ B、ファイバ C が張力を周波数に変化させてファイバ軸方向の残留歪を変化させた IIPRS ファイバである。これらのファイバのパラメータを Table 1 に示す。線引張力のファイバ軸方向変化(時間変化)を Fig. 1 (a), (b), (c) に示す。ファイバ B、C では、ほぼ 5 km 周期でそれぞれステップ状及び三角波状に 16 g の張力変動を与えた。Table 1 に示すように、IIPRS による損失劣化は殆ど生じていない。

4. SBS スペクトル

IIPRS がブリルアン利得プロファイルに及ぼす変化を調査するため、Stokes 光の出射スペクトルを観測した。Fig. 2 に SBS スペクトルの測定系を示す。pump 光源には外部共振器型 1.55 μm 可

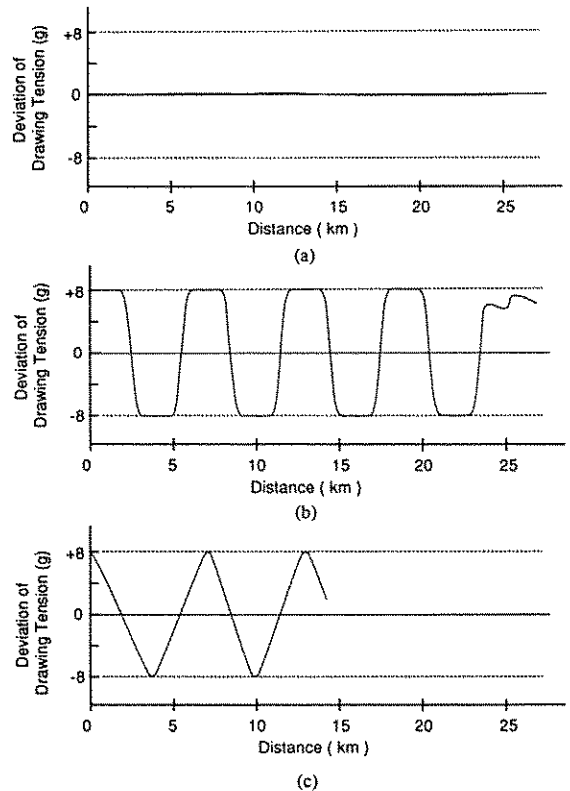


Fig. 1 Deviation of drawing tension; (a) fiber A, (b) fiber B, (c) fiber C.

変 LD を Er ドープ光ファイバ増幅器 (EDFA) で増幅したものを用いた。pump 光は光ファイバカプラで分岐し、一部を再び EDFA で増幅した後、アイソレーターを介して試験ファイバ中へ入射させた。他の一部は後方散乱光を観測する際のヘテロダイン局発光として使用した。この局発光と後方散乱 Stokes 光のビート信号を高速 PIN-PID によって検出しスペクトラムアナライザによって

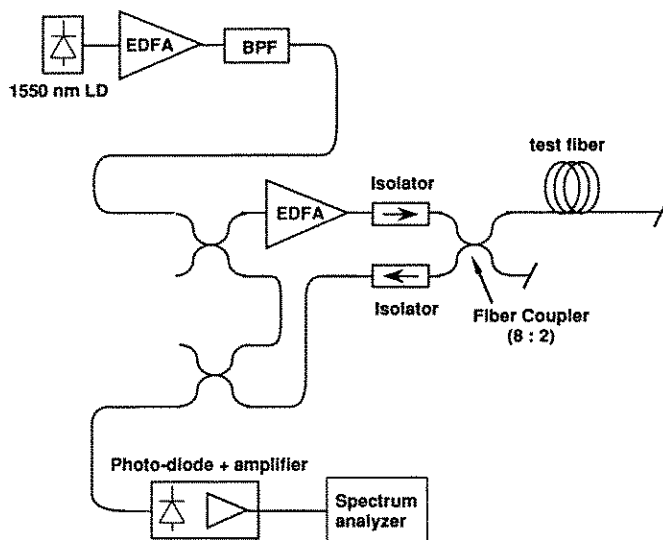


Fig. 2 Experimental setup for output spectrum measurement

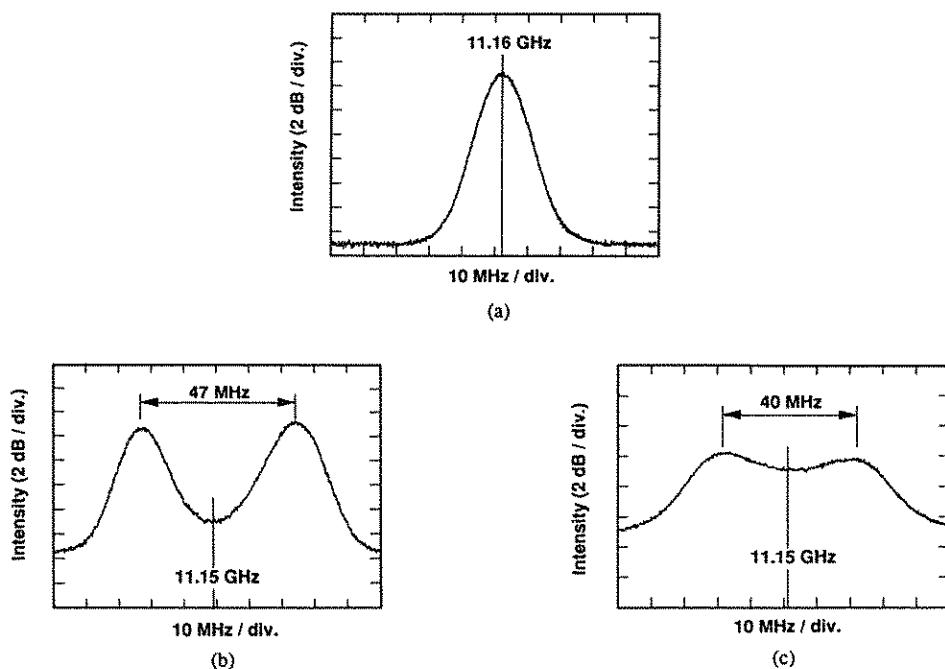


Fig. 3 The output spectra of Stokes waves; (a) fiber A, (b) fiber B, and (c) fiber C.

観測した。Fig. 3 (a), (b), (c)にそれぞれファイバ A, B, C で得られた SBS スペクトルを示す。ファイバ A では、中心周波数 11.16 GHz に単一ピークが得られた。信号強度を対数で表した場合、スペクトルの中心部分はローレンツ型プロファイル

で近似することができる¹⁰⁾。フィッティング計算から、半値幅は 28~32 MHz と見積られる。この値は文献 15) の値と良く一致している。

矩形波状の張力変動を与えたファイバ B では、分離した 2 つのピークが観測された。ピーク間の

周波数差は 47 MHz で、3 節で見積った 16 g の張力変動から期待される値 44 MHz と良く整合した値が得られた。ピーク値から求められる半値幅はファイバ A で求められた値とほぼ一致している。ここで半値幅を 30 MHz として、ファイバ B のファイバ A に対するスペクトルピークの強度比を求めると約 0.54 となる。この強度比に相当する分だけ SBS しきい値が改善されているはずである。

三角波状の連続的な張力変動を与えたファイバ C では、理論的には中心に最大値を持つ幅広い吊り鐘状のスペクトルが得られるはずであるが、実際 (Fig. 3(c)) には両サイドにピークのあるスペクトルが観測された。これは、線引張力の折り返

し位置が完全に三角波状になっていないことが原因と考えられる。ファイバ C はファイバ B に比べより分散したスペクトルになっているので、より大きな SBS 抑制効果が期待できる。ファイバ C のファイバ A に対するスペクトルピーク強度比は約 0.43 である。

5. SBS しきい値

IIPRS の SBS 抑制効果を検証するために、試作した 3 種類のファイバ出射光及び後方散乱光の入射光強度依存性を測定した。測定系を Fig. 4 に示す。pump 光源には線幅 200 kHz の外部共振器型 155 μm CW-LD を使用した。pump 光は EDFA で増幅され、分岐比 8 : 2 の光ファイバカ

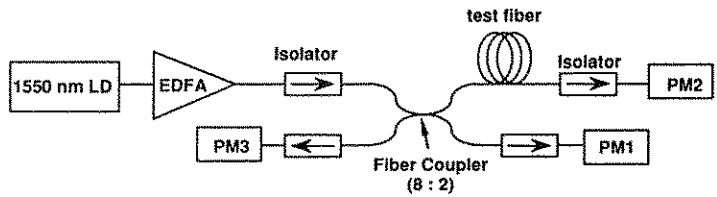


Table 4 Experimental setup for threshold measurement

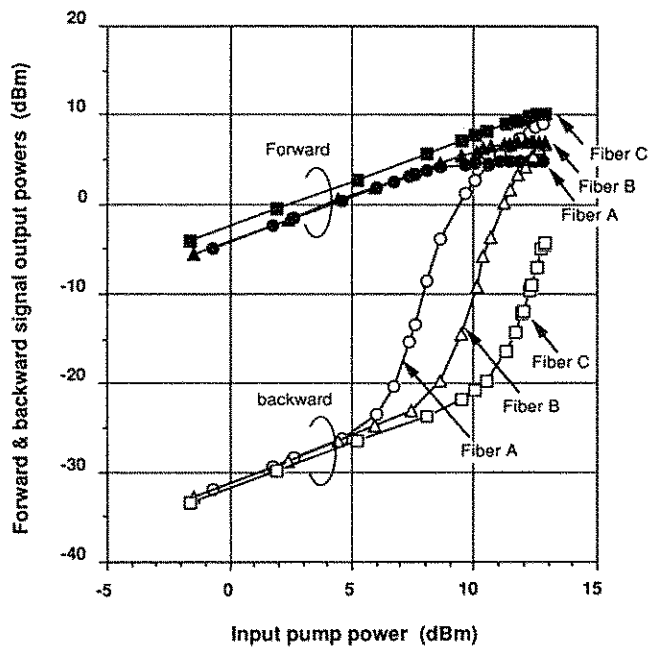


Fig. 5 The back scattered powers and thruout power versus input pump power for the fiber A, B and C.

ブラを介して試験ファイバ中に入射される。PM 1, PM 2, PM 3 は、それぞれ入射光, 出射光, 後方散乱光を観測するためのパワーメータである。反射光は光アイソレータによって -45 dB 以下に抑えられている。

Fig. 5 にファイバ A, B, C の測定結果を示す。前述の定義によるファイバ A, B および C の SBS しきい値は、それぞれ 8.3 dBm, 10.7 dBm および 13.4 dBm である。ファイバ A と比較して、矩形波状の IPRS を与えたファイバ B で 2.4 dB, 三角波状の IPRS を与えたファイバ C で 5.1 dB の SBS 抑制効果が得られている。

6. 考 察

式(4)を使用して、試作したそれぞれのファイバに対する SBS しきい値を 4 節で求めた SBS スペクトルピークの強度比データから見積った結果を Table 2 に示す。計算には、 $g_0=2.3 \times 10^{-11}$ m/W¹⁵⁾, $A_{eff}=7.85 \times 10^{-11}$ m², $m=2$ を使用した。SBS プロファイルから推定されるしきい値は 5 節の実測値と良く一致している。ファイバ C では 5 dB の SBS 抑制効が得られているが、これには試作ファイバが充分な条長を持っていなかったことによる効果が含まれている。SBS スペクトル強度比からの見積りでは、ファイバ長を無限大としたときの SBS 抑制効果は、ファイバ B, C でそれ

ぞれ 2.7 dB 及び 3.7 dB となる。

試作ファイバにおいては、ファイバ C における SBS 抑制効果はファイバ B に比べてそれほど大きくない。これは、張力変動量がまだ不十分で、ブリルアン周波数シフトに充分な分散が与えられなかったことが原因である。原理的に 3 dB の SBS 抑制効果しか与えられない矩形波状の IPRS ファイバとは異なり、ファイバ C に与えた三角波状の IPRS では理論的な限界は存在しない。しかし、残留歪の変化は光弾性効果を通して実効的な屈折率差の変化をもたらすので、極端な張力変動は曲げ損失の増加やカットオフ波長の変化などを引き起こし好ましくない。これらを考慮すると、線引き張力に伴い変化する実効的屈折率差の変化量の許容範囲は最大 0.05% 程度、線引き張力変動量で 36 g 程度が上限と考えられる。36 g の張力変動を与えた場合ブリルアン周波数シフト変化量は 100 MHz と見積られ、SBS しきい値を 12 dBm (5 dB の向上) まで増加させることが期待できる。

7. あとがき

ファイバ軸方向に周期的に残留歪を変化させることにより SBS 発生しきい値を増大させた IPRS ファイバを提案し、その効果を実験的に検証した。観測された SBS 抑圧効果は残留歪を矩形

Table 2 The measured and calculated SBS thresholds powers

		Fiber A normal	Fiber B IPRS rectangular	Fiber C IPRS triangular
Fiber length (km)		25.2	23.1	13.5
relative gain peak hight		1	0.54	0.43
SBS threshold (dBm)	measured	8.3	10.7	13.4
	calculated	8.6	11.5	14.0
Improvement (dB)	measured	-	2.4	5.1
	calculated	-	2.9	5.4
	L = ∞	-	2.7	3.7

波状に変化させた IPRS ファイバ 2.4 dB, 三角波状に変化させた IPRS ファイバで 5.1 dB であった。

参考文献

- 1) Cotter D., "Stimulated Brillouin scattering in monomode fiber", J. Opt. Commun. vol. 1, pp. 10-19, (1983).
- 2) Aoki Y., Tajima K., "Stimulated Brillouin scattering in a long single-mode fiber excited with a multimode pump laser", J. Opt. Soc. Am. B, vol. 5, pp. 358-363, (1988).
- 3) Aoki Y., Tajima K., Mito I., "Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems", J. Lightwave Technol., vol. 6, pp. 710-719, (1989).
- 4) Chraplyvy A. R., "Limitations on light-wave communications imposed by optical-fiber nonlinearities", J. Lightwave Technol., vol. 8 pp. 1548-1557, (1990)
- 5) Wada A., Nozawa T., Tanaka D., Sakai T., Yamauchi R., "Suppression of stimulated Brillouin scattering by intentionally induced periodical residual strain in single-mode fibers", Technical Digest of ECOC'91, pp. 25-28, (1991).
- 6) Sugie T., Ohkawa N., Imai T., Ito T., "A novel repeaterless CPFSK coherent light-wave system employing an optical booster amplifier", J. Lightwave Technol. vol. 9, pp. 1178-1186, (1990).
- 7) Yoshizawa N., Horiguchi T., Kurashima T., "Proposal for stimulated Brillouin scattering suppression by fibre cabling", Electron. Lett., vol. 27, pp. 1100-1101, (1991).
- 8) Horiguchi T., Kurashima T., Tateda M., "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers", IEEE Photonics Technol. Lett, vol. 1, pp. 107-108, (1989).
- 9) Smith R. G., "Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering", Appl. Opt., vol. 11, pp. 2489-2494, (1972).
- 10) Wada A., Nozawa T., Tsun T. O., Yamauchi R., "Suppression of stimulated Brillouin scattering by Intentionally Induced periodical residual-strain in single-mode fibers", IEICE, to be published.
- 11) Stolen R. H., "Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers", IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-15, pp. 1157-1160, (1979).
- 12) Hanawa F., Hibino Y., Horiguchi M., "Drawing condition dependence of pure-silica-core single-mode fibers", Electron. Commun. Jpn Part II Electron. vol. 72, pp. 167-176, (1989).
- 13) Paek U. C., Kurkjian C. R., "Calculation of cooling rate and induced stresses in drawing of optical fibers", J. Am. Ceram. Soc., vol. 58, pp. 330-335, (1975).
- 14) Kurashima T., Horiguchi T., Tateda M., "Tensile strain effects on Brillouin frequency shift in single-mode fibers having pure silica and GeO₂-doped cores", IOOC '89, Tokyo, 21C4-2, (1989).
- 15) Tsun T. O., Wada A., Sakai T., Yamauchi R., "Novel method using white noise spectral probe signals to measure Brillouin gain spectra of pure silica core fibers", Electron. Lett., vol. 28, pp. 247-249, (1992).

〔筆者紹介〕



和田 朗 (わだ あきら)
昭和54年 上智大・理工・物理卒、
昭和57年 同大学修士課程修了
同年 藤倉電線株式会社入社
現在 同社、光エレクトロニクス研究所、光通信研究室勤務。光ファイバの研究開発に従事。



野沢 哲郎 (のざわ てつお)
昭和61年 慶応大・理工・応用化学
科卒
昭和63年 同大学修士課程修了
同年 藤倉電線株式会社入社
現在 同社、光エレクトロニクス研究所、光通信研究室勤務。光ファイバの研究開発に従事。

Abstract

Single-mode fibers with intentionally induced periodical residual strains (IIPRS) along the fiber length are proposed for suppression of the stimulated Brillouin scattering. Change of the residual strain along a fiber will change the Brillouin frequency shift, resulting in a broadening of the Brillouin gain profile. A increase of the line width of the gain profile will cause a decrease of the gain coefficient which will increase the threshold power of the stimulated Brillouin scattering.

Two types of the IIPRS fibers were fabricated. The residual strain of one IIPRS fiber is modified rectangularly while that of the other is changed triangularly. The estimate improvement of the threshold for the IIPRS fiber with triangular profile is 2.9 dB while the measured is 2.4 dB. In case of IIPRS fiber with triangular profile, the improvement of the threshold is 5.4 dB by estimation and 5.1 dB by experiment.