

最近の技術から

光ファイバの誘導ラマン，ブリュアン散乱現象

青木 恭 弘

日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 〒213 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

1. ま え が き

光ファイバの非線形光学効果に関する研究の歴史は古く、光伝送路としての有望性が示された 1970 年初期にすでに開始されている¹⁾。以来、誘導ラマン散乱、誘導ブリュアン散乱、四光子混合、自己位相変調などの非線形現象が光ファイバ中で生じることが示され、またその応用研究も活発に行なわれている^{2,3)}。

光ファイバの非線形媒質としての特長は、高い光パワー密度を長距離にわたって維持できることであろう。このため、今日得られる単一モード光ファイバでは、比較的低入力で種々の非線形現象を誘起できる。たとえば、誘導ブリュアン散乱はわずかに数 mW の入力で生じる場合もある。

光ファイバの非線形光学効果は、光通信の観点から、光増幅や光ソリトンなどの新たな機能を実現できる可能性がある半面、クロストークや入力パワー限界等の伝送限界の要因になる恐れがあることが報告されている⁴⁾。本論文では、主に光ファイバの誘導ラマン散乱、誘導ブリュアン散乱と、それを用いる光増幅について紹介する。

2. 誘導ラマン散乱とその応用

誘導ラマン散乱は、光学フォノンによる光散乱現象である。光ファイバは、コア材料であるシリカ (SiO₂) がアモルファスであるために、半値幅で 20 nm 程度の広いラマン利得帯域を示す。このため、誘導ラマン散乱は、しばしば波長変換の手段として用いられ、とくに、光ファイバの分散や損失の評価に応用されている²⁾。

また、この誘導ラマン散乱を用いる信号光の光増幅に関する研究も盛んに行なわれている。誘導ラマン散乱を利用して信号光を増幅するには、信号光よりもラマンシフト量だけ波長が短い励起光を、信号光とともに光ファイバに入力する。このとき、誘導ラマン散乱による励起光から信号光への光パワー変換過程によって、信号光が

光ファイバを伝播中に増幅される。このファイバラマン光増幅では、前述のように利得帯域が広いので、超短光パルスや波長多重信号光を増幅できる。また、光ソリトン通信の実現が期待できるという特長がある。

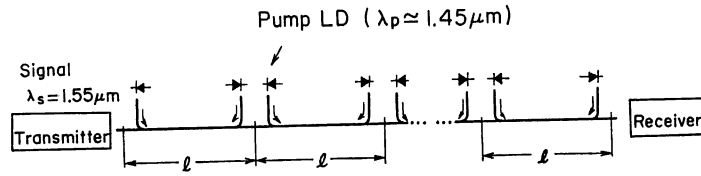
ファイバラマン光増幅の増幅利得や雑音などの基本特性は、すでに理論的、実験的に解明されている⁵⁾。そして、これまでに、波長 1.32 μm の YAG レーザーを励起光源として約 20 dB、波長 1.47 μm の半導体レーザーを励起光源として約 10 dB の CW 増幅利得が実証されている⁶⁾。また、ラマン増幅された信号光の誤り率の評価も行なわれ、受信感度の劣化をほとんど生じることなく光増幅できることが確認されている。

さらに、all optical な長距離光通信システムとして、図 1 に示すようなファイバラマン光増幅を適用した光ソリトン通信システムが提案されている⁷⁾。このシステムは、光ファイバの損失をラマン増幅によって補償しながら、信号光である光ソリトンを伝送させるものである。最近、長さ 42 km の単一モード光ファイバループ中で、パルス幅 55 ps の光ソリトンを多数回伝播させる模擬実験によって、4000 km 以上の超長距離にわたって光ソリトンの伝送が可能であることが実証されている⁸⁾。

3. 誘導ブリュアン散乱とその応用

誘導ブリュアン散乱は、音響フォノンによる光散乱現象であり、光ファイバ中では後方散乱のみ生じる。光ファイバのブリュアン利得係数はラマン利得係数よりも 2 桁以上大きく、誘導ブリュアン散乱を用いると現状の半導体レーザーを励起光源として高利得な光増幅が可能である⁹⁾。しかしながら、その利得帯域幅は ∇ 100 MHz 以下できわめて狭い。このために、被増幅信号光の変調速度は、通常は数百 Mbit/s 以下に限定される。しかし、最近、この狭帯域特性を逆に利用して、高密度波長多重伝送系での光増幅による信号抽出、光ホモダイン検波系でのキャリア増幅などが試みられている⁴⁾。

一方、誘導ブリュアン散乱は、光通信において光ファ

図1 ファイバラマン光増幅による光ソリトン通信の構成⁷⁾表1 誘導ブリュアン散乱閾値の変調依存性¹⁰⁾

Modulation format	SBS threshold
Amplitude-shift-keying (ASK)	$2 P_{cw}$
Frequency-shift-keying (FSK)	$4 P_{cw}$
Phase-shift-keying (PSK)	$\frac{B + \Delta\nu_B}{\Delta\nu_B} P_{cw}^{(a)}$ ($2.5 P_{cw}^{(b)}$)

B : 変調速度, $\Delta\nu_B$: ブリュアン利得帯域幅, P_{cw} : 無変調光に対する閾値 (本文参照). ^{a)} ランダムパターン変調の場合, ^{b)} 固定パターン変調 (1010...) の場合

イバ入力パワーを制限する一要因になる恐れがあり, この点からも考察が進められている⁴⁾. すなわち, 誘導ブリュアン散乱は, 前述のように後方散乱として生じるので, 過剰な伝送損失を引き起こす. したがって, 光通信では, 入力光パワーを誘導ブリュアン散乱閾値以下にする必要があり, これが入力光パワーを制限する.

通常の長尺な単一モード光ファイバの場合, 無変調光に対する閾値 (P_{cw}) は, 波長 $1.3 (1.55) \mu\text{m}$ の領域で約 $8 (4) \text{mW}$ と見積もられ, これはすでに単一周波数半導体レーザーによって実験的に確認されている.

ブリュアン利得帯域幅は, 前述のように 100MHz 以下で狭い. このために, 誘導ブリュアン散乱閾値は入力光の変調特性に依存する. 表1に, 誘導ブリュアン散乱閾値の変調依存性を示す¹⁰⁾. 理想的な ASK, FSK 変調方式での閾値は, それぞれ CW 光の場合の数倍である. これに対して, PSK 変調方式では, 位相シフト量を π に設定すれば, 変調速度を高くすることにより閾値を大きくできることが予測され, 実際に実験によって検証されている.

4. む す び

光通信への応用という観点から, 光ファイバの誘導ラマン, ブリュアン散乱について研究動向を紹介した. この数年来, 半導体レーザーの高出力化には目を見張るも

のがあり, 最近では 100mW を越える素子が得られている. また, 位相同期半導体レーザーでは, 出力が 1W を越えるような固体レーザーに匹敵する出力も得られつつある. したがって, 将来の光通信では, 光ファイバの非線形性の影響を考慮するとともに, ファイバラマン光増幅などを積極的に利用することも今後重要になると考えられる.

文 献

- 1) R. H. Stolen: "Nonlinear properties of optical fibers," *Optical Fiber Telecommunications*, ed. S. E. Miller (Academic Press, 1979) p. 125.
- 2) C. Lin: "Nonlinear optics in fibers for fiber measurements and special device function," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 1103.
- 3) 中沢正隆: "光ファイバ中の非線形光学," *応用物理*, **56** (1987) 1265.
- 4) D. Cotter: "Fiber nonlinearities in optical communications," *Opt. Quantum Electron.*, **19** (1987) 1.
- 5) Y. Aoki: "Properties of fiber Raman amplifiers and their applicability to digital optical communication systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1103.
- 6) N. Edagawa, K. Mochizuki and Y. Iwamoto: "Simultaneous amplification of wavelength-division multiplexed signals by a highly efficient fiber Raman amplifier pumped by high-power semiconductor lasers," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 196.
- 7) L. F. Mollenauer, J. P. Gordon and M. N. Islam: "Soliton propagation in long fibers with periodically compensated by Raman gain," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 157.
- 8) L. F. Mollenauer and K. Smith: "Demonstration of soliton propagation over more than 4000 km in fiber with loss periodically compensated by Raman gain," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 675.
- 9) N. A. Olsson and J. P. Von Der Ziel: "Characteristics of semiconductor laser pumped Brillouin amplifier with electronically controlled band-width," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1986) 147.
- 10) Y. Aoki, K. Tajima and I. Mito: "Input power limits of single mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 710.

(1989年2月3日受理)