

光ファイバラマン増幅

国際電信電話(株) 目黒研究所 望月 清文

Optical fiber Raman amplification

Kiyofumi Mochizuki

KDD Meguro Research and Development Laboratories

1. まえがき

光ファイバ、特に単一モード光ファイバは、光の伝搬するコア部の直径が約 $10 \mu\text{m}$ と細い。このため、コアを伝搬する光のエネルギー密度は、 1 mW の入射光パワーに対して、 1 kW/cm^2 以上にもなる。また、光ファイバの損失は、 -0.2 dB/km と非常に低く、非線形媒質としての光ファイバの長さを長くとれる。このため、光ファイバ内では、入射パワー数 mW 程度の光を用いても、誘導ラマン散乱や誘導ブリルアン散乱等の光の非線形現象が発生し、その散乱光を観測することができる。通常の光ファイバ通信においては、これらの非線形現象は好ましいものではなく、信号光の光ファイバ内への最大入射パワーを制限する要因になる。しかし、これらの非線形現象を積極的に利用することによって、信号光を光のまま直接増幅することが可能になる。

ここでは、光ファイバ内で発生するラマン散乱

の特徴及び誘導ラマン散乱を用いた光増幅(光ファイバラマン増幅)の光通信システムへの適用について述べる。

2. 光ファイバ内ラマン散乱

構成分子が振動数 (ν_0) で振動している物質に光をあてると、Fig. 1 に示すように入射光と同じ周波数 (ν_0) の光の他に、物質の分子振動に影響され、入射光の周波数と異なる周波数 ($\nu_0 \pm \nu_0$) の光が散乱される。このように、入射光と異なった周波数成分の光を散乱する現象をラマン散乱といい、入射光よりも低い周波数成分を持つ光をストークス光、高い周波数成分を持つ光を反ストークス光と呼ぶ。

入射光は、物質の分子振動に変化を与えるほど強くないのが普通であるが、ピークパワーの高い光が入射すると、分子振動の変化が強制的に駆動される現象がおこる。このような場合、分子振動

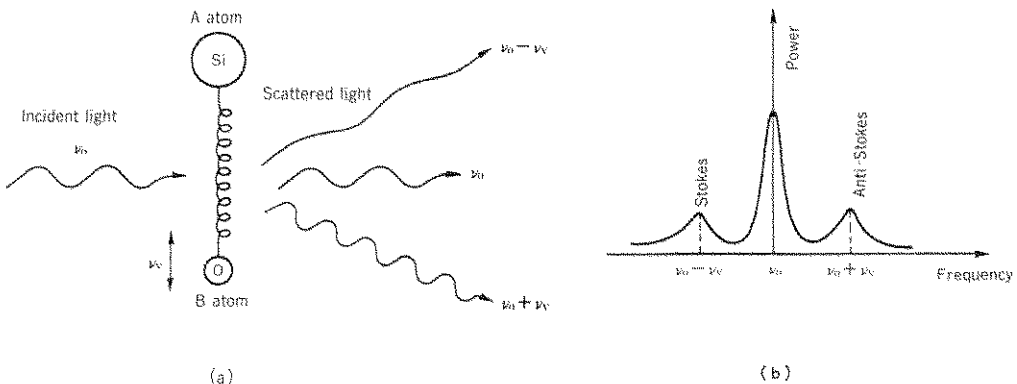


Fig. 1 ラマン散乱光モデル(a)及びその周波数関係(b)

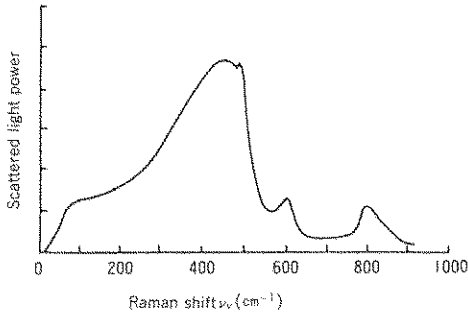


Fig. 2 SiO₂のラマンスペクトル

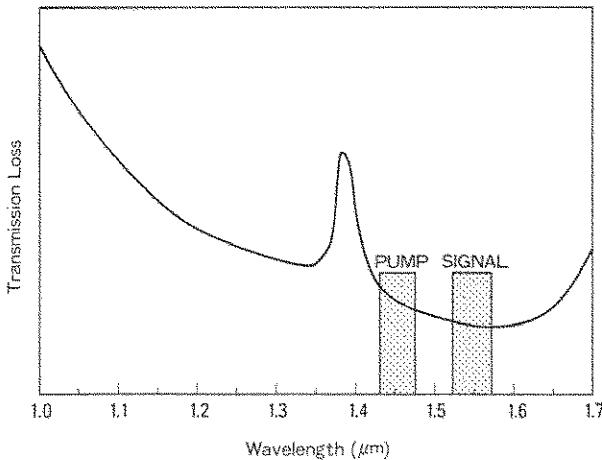


Fig. 3 光ファイバラマン増幅における信号光とポンプ光との波長関係

は一斉に位相をそろえた振動となり、散乱光は強力でコヒーレントな光となる。このような散乱を誘導ラマン散乱という。光ファイバ内では、光のエネルギー密度が高くなり、数十 mW 以上の入射光パワーでは、誘導ラマン散乱が発生するようになる。光ファイバラマン増幅は、ストークス光の波長が、信号光の波長と同じになるような波長の光(ポンプ光)を用い、誘導ラマン散乱によって信号光を増幅するものである。

光ファイバ内で発生するラマン散乱光のスペクトルは、光ファイバの母材である SiO₂ や GeO₂ 等の分子振動数と関係し、Fig. 2 のようなスペクトルを示す⁽¹⁾。Fig. 2 から分かるように、光ファイバ内でのラマン散乱は、入射光の光周波数から約 450 cm⁻¹ 低周波側に離れたところにピークを持つ、この周波数偏移は、光ファイバの損失が最低

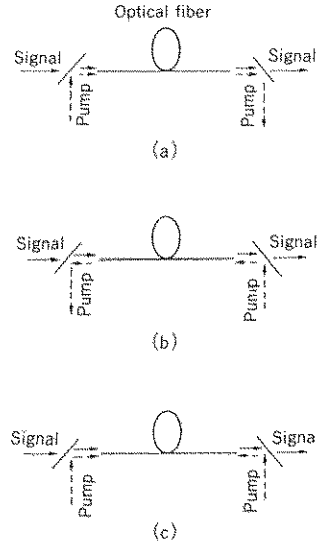


Fig. 4 前方向光ファイバラマン増幅(a), 後方向光ファイバラマン増幅(b)及び(a)・(b)併用した光ファイバラマン増幅(c)

となる波長 1.5 μm 帯の光に対しては、波長にして約 100 nm 長波長側にシフトする。従って、波長 1.5 μm 帯の信号光を光ファイバラマン増幅により効率良く増幅するためには、Fig. 3 に示すように、ポンプ光の波長としては信号光の波長より約 100 nm 短波長側の 1.4 μm 帯を選ぶ必要がある。

3. 光ファイバラマン増幅特性

光ファイバラマン増幅の増幅形態としては、Fig. 4 に示すように、ポンプ光が信号光と同方向に伝播しながら信号光を増幅する前方向光ファイバラマン増幅、ポンプ光が信号光と逆方向に伝播しながら信号光を増幅する後方向光ファイバラマン増幅、及び両者を併用したものの3つのタイプがある。

前方向光ファイバラマン増幅による増幅度と後方向光ファイバラマン増幅による増幅度は、光ファイバの長さが十分長い場合にはほぼ等しく、近似的に次式で表わされる⁽²⁾、

$$G = \exp \left\{ \frac{\Gamma \cdot \gamma \cdot P_p}{\alpha \cdot S} \right\} \quad (1)$$

ここで、 P_p , α , S はそれぞれポンプ光の光ファイバ入射時のパワー、光ファイバの損失、モード

フィールド径を直径とする光ファイバの有効断面積を表す。γは、光ファイバのラマン散乱係数で、コア材料によって決まる値である。光ファイバのコアにGeO₂をドープしたゲルマニウムドープ光ファイバのラマン散乱係数は、ゲルマニウムドープ量が増えるに従って大きくなる⁽³⁾。またラマン散乱係数は、長波長になるに従って小さくなり、通信用に使われている通常の光ファイバでは、波長1.55 μmで 4.8×10^{-12} cm/W程度である⁽⁴⁾。

Γ は偏光依存性のある定数で0から1の値をとる。光ファイバラマン増幅の増幅度は、ポンプ光の偏光状態と信号光の偏光状態とが一致したとき($\Gamma=1$)に最も高くなる。しかし、通常の単一モード光ファイバは、光ファイバ内に残留している応力歪みや外乱等の影響で複屈折性を示し、光ファイバを伝播する光の偏光状態は様々に変化する。この複屈折性には波長依存性があるため、通常の光ファイバでは、光ファイバの全長に渡って、波長の異なるポンプ光と信号光の偏光状態を完全に一致させることができない。特に長い光ファイバにおいては、両者の偏光状態はスクランブル状態になっていて、 Γ は1/2になる⁽⁵⁾。従って、通常の単一モード光ファイバを用いた場合の増幅度は、信号光とポンプ光との偏光状態が一致した状態の増幅度のほぼ半分になる。ポンプ光の偏光状態と信号光の偏光状態を一致させ効率良く増幅を行うため、偏波面保存光ファイバを用いた実験も報告されている⁽⁶⁾。

損失0.2 dB/kmの通常の単一モード光ファイバを用いた場合には、増幅度としてはポンプ光の光パワー100 mWに対して2.5 dB程度である。増幅度は、(1)式から分かるように、光ファイバのモードフィールド径の二乗に逆比例するため、光ファイバのモードフィールド径を通常の光ファイバのものより小さくすることによってさらに増幅度を高めることができる。波長1.55 μmで平均モードフィールド径が6.3 μmと通常の光ファイバより小さな光ファイバを用い、ポンプ光の光パワー90 mWに対して約7.5 dBの増幅度が得られている⁽⁷⁾。このような効率の良い光ファイバを用いると、500 mWのポンプ光で理想的には、40 dBもよ利得が期待できる。

SPECTRUM

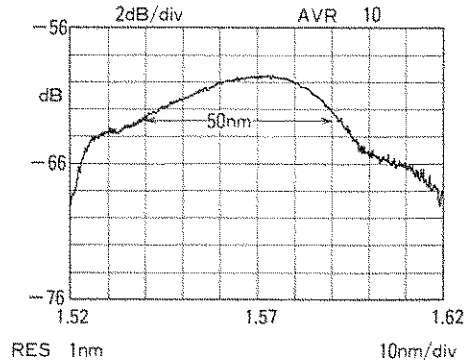


Fig. 5 自然ラマン散乱光スペクトル

光ファイバラマン増幅を用いた伝送実験に関しては、ポンプ用光源として、高出力な半導体レーザを用いたものが報告されている⁽⁷⁾。この実験では、伝送速度565 Mb/sと1.2 Gb/sの強度変調された波長多重信号光の増幅及び、560 Mb/s・FSKヘテロダインコヒーレント信号光の増幅が行われている⁽⁷⁾。これらの実験により、光ファイバラマン増幅が、強度変調された信号及び周波数変調された信号共に、波形劣化なしで増幅できることが確認されている⁽⁷⁾。

光ファイバラマン増幅の増幅帯域としては、Fig. 5に示すように、最大ラマン散乱量を与える波長を中心に、約20 nmの範囲でほぼ一定であり、半値全幅で考えると約50 nmの幅がある。このため、この範囲においては、波長多重された信号を一括して増幅することが可能となる。この波長域で4波長多重した信号の一括増幅実験がおこなわれており、この範囲では、ほぼ同じ増幅度が得られることが確認されている⁽⁸⁾。

光ファイバラマン増幅では、自然ラマン散乱光が雑音光となり信号対雑音比を劣化させる。自然ラマン散乱光レベルは、前方向光ファイバラマン増幅の場合と後方向光ファイバラマン増幅の場合とで異なる。後方向光ファイバラマン増幅の場合には、散乱光レベルが光ファイバの長さが長くなるに従って一定値に収束していく傾向にあるのに対し、前方向自然ラマン散乱光の場合には、散乱光レベルに収束現象はなく、光ファイバの長さが長くなるに従って、散乱光レベルが低下してい

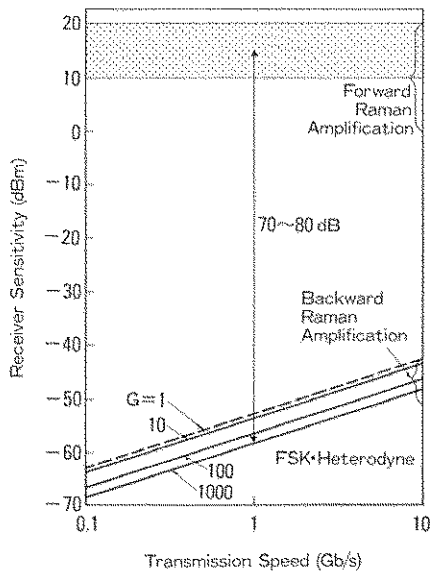


Fig. 6 光ファイバラマン増幅を用いた光通信システムにおける伝送速度に対する送受信光信号レベル

る⁽⁹⁾。このため、前方向光ファイバラマン増幅においては、自然ラマン散乱光の影響はあまり大きくなりませんが、後方向光ファイバラマン増幅においては、自然ラマン散乱光のレベルが信号光のレベルと同程度あるいはそれ以上になることもあり、十分な信号対雑音比を得るためには、光フィルタの使用が不可欠となる。

光ファイバラマン増幅を Fig. 4-(c) に示すように、ブースタンプ及びプリアンプとして用いた場合の伝送速度に対する送受信レベルの関係を Fig. 6 に示す。Fig. 6 から、1 Gb/s の伝送速度に対して、理想的には、中継器間の損失配分として 70~80 dB が期待できる。これは、損失 0.2 dB/km の光ファイバを用い、350 km 以上の無中継伝送が可能であることを示している。

4. まとめ

光ファイバラマン増幅は、出力の高いポンプ用光源を用いることによって高い増幅度が期待できる上に、利得飽和のレベルが高いという特徴を持っている。また、増幅度が信号光の偏光状態の影響を受けにくく、温度依存性がないこと等増幅特性がきわめて安定である。しかし、光ファイバ

マン増幅を実用化する上では、安定で高出力なポンプ用光源の開発及び、ラマン利得の高い光ファイバの開発が必要である。これらの要素技術が開発された暁には、光ファイバラマン増幅は、上で述べた特徴を生かし、光ファイバ通信システムの主要技術の1つとなるであろう。

参考文献

- 1) R. H. Stolen and E. P. Ippen, "Raman gain in glass optical waveguide", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 22, pp. 276-278, 1972.
- 2) K. Mochizuki, "Optical fiber transmission systems using stimulated Raman scattering: Theory", *IEEE, Lightwave Technol.*, Vol. LT-3, pp. 688-694, 1985.
- 3) T. Nakashima, S. Seikai and M. Nakazawa, "Dependence of Raman gain on relative index difference for GeO₂-doped single-mode fibers", *Opt. Lett.*, Vol. 10, pp. 420-422, 1985.
- 4) K. Mochizuki, N. Edagawa and Y. Iwamoto, "Amplified Spontaneous Raman scattering in fiber Raman amplifiers", *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol. LT-4, pp. 1328-1333, 1986.
- 5) R. H. Stolen, "Polarization effects in fiber Raman and Brillouin lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-15, pp. 1157-1160, 1979.
- 6) M. Nakazawa, "Highly efficient Raman amplification in a polarization-preserving optical fiber", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 46, pp. 628-630, 1985.
- 7) 枝川 登, 笠 史郎, 望月清文, 若林博晴, "光ファイバラマン増幅における増幅特性", *電子情報通信学会技術研究会 OQE 88-33*, 1988.
- 8) 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.*, Vol. 23, pp. 196-

197, 1987.

〔筆者紹介〕



望月 清文 (もちづき きよふみ)

昭和48年 山梨大学・工・電子工学卒,

昭和50年 大阪大学大学院修士課程終了, 同年国際電信電話(株)に入社. 光ファイバの伝送特性, 光増幅, コヒーレント光通信の研究開発に従事. 工学博士.

現在国際電信電話(株)目黒研究所主任研究員.