

前方励起ラマン増幅用励起光源の開発

Pump Laser Module for Co-propagating Raman Amplifier

大木 泰*

Yutaka Ohki

早水尚樹*

Naoki Hayamizu

入野 聡*

Satoshi Irino

清水 裕*²

Hiroshi Shimizu

吉田順自*

Junji Yoshida

築地直樹*

Naoki Tsukiji

概 要 前方励起ラマン増幅用の励起光源として、新たな構造を持つiGM (inner grating multimode) レーザを考案し、その開発を行った。前方励起ラマン増幅で重要な特性のうち相対雑音強度、誘導ブリルアン散乱に注目し、特性向上のための構造最適化、評価、駆動方法の検討などを行ったので報告する。

1. はじめに

これまで光ファイバ通信において、エルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) を用いて、伝送距離、伝送容量の拡大が成されてきた。しかし最近では、EDFAだけでなくラマン増幅を活用し、両者を有効に組み合わせることが必要不可欠な技術となっている。現在、ラマン増幅として主に用いられているのは、信号光と対向した方向に励起光を入射する後方励起ラマン増幅である。しかし、次世代に向けた更なる高速化 (40 Gb/s)、長距離化 (100 km 伝送)、広帯域化 (L, S-band の活用) のためには、前方励起ラマン増幅と呼ばれる、信号光と同じ方向に励起光を入射する方式を後方励起ラマン増幅と同時に用いることが鍵となっている。この方式は、双方向励起ラマン増幅と呼ばれる。波長多重励起方式を用いることにより後方励起ラマン増幅のみでもラマン利得の平坦化、広帯域化は達成できるが、双方向励起ラマン増幅を利用しないと雑音指数 (NF) の平坦化が達成できないことが報告されている^{1), 2)}。

ここで、これまでEDFA用励起光源として広く用いられてきた14XX nm 帯半導体レーザモジュール (LDM)^{3), 4)}とは別に、なぜ新たに前方励起ラマン増幅用励起光源の開発が必要であるかを述べる。前方励起ラマン増幅で必要とされる主な特性を下記に挙げる。

- (1) 低 RIN (Relative Intensity Noise : 相対強度雑音)
 - (2) 低 SBS (Stimulated Brillouin Scattering : 誘導ブリルアン散乱)
 - (3) 発振波長固定
- 以下、それぞれについて検討する。

1.1 RIN低減の必要性

RINとは、レーザ光の微小な変動成分を全光出力で規格化した指標である。ラマン増幅という現象は、利得を生み出す励起準位の寿命が短い (数fsec) ため、励起光源に強度雑音があるとそのまま増幅過程を通じて信号光の雑音となってしまう。従来のEDFAでは励起準位の寿命が長い (10 msec) ためこのような心配はなかった。ラマン増幅は、単位長さ当たりの利得がEDFAに比べて非常に小さいが、前方励起ラマン増幅では、信号光と励起光が長距離にわたってファイバ中を一緒に伝播することにより、徐々に励起光の雑音が信号光の雑音として乗り移る。後方励起ラマン増幅では、信号光と励起光が対向しているので、ある雑音成分を持った励起光と信号光が交差する時間が短く、励起光の雑音が信号光に与える影響は少ない。また、励起光の雑音はランダムであるため、信号光が影響を受けたとしても対向して進むうちに平均化され問題ではなくなる。以上のことから分かるように前方励起ラマン増幅用励起光源には、これまで必要とされなかったRINが低いという特性が要求される。

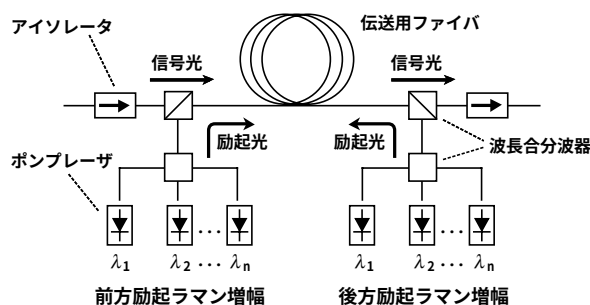


図1 前方励起、後方励起ラマン増幅の基本構成
Basic configuration of co- and counter-propagating Raman amplifiers

* ファイテル製品事業部 開発部

*² ファイテル製品事業部 製造部

1.2 SBS低減の必要性

SBSは、3次の非線形光学効果の1つで、光によってファイバ中に励起された音響フォノンによって光が後方に散乱される現象である。SBSが起ると光が後方に散乱され、有効にラマン増幅に寄与しなくなるので好ましくない。SBSには、この現象が発生する閾値パワー P_{th} が存在し、次式で表される⁵⁾。

$$P_{th} = \frac{21A_{eff}b}{GL_{eff}} \times \begin{cases} 1 & (\text{if } F_p < F_b) \\ F_p/F_b & (\text{if } F_p > F_b) \end{cases} \quad (1)$$

$$L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha L)) / \alpha \quad (2)$$

$$F_b = \eta k^2 / \rho \quad (3)$$

$$(A_{eff} = 47 \mu\text{m}^2 \quad L = 55 \text{ km} \quad \alpha = 0.21 \text{ dB/km})$$

<以上実験に使用したDSFの値>

$$G = 4 \times 10^{-11} \text{ m/W} \quad b = 2 \text{ とすると } P_{th} = 2.57 \text{ mW}$$

ここで、 A_{eff} はファイバの有効コア断面積、 L_{eff} はロス α とファイバ長 L を用いて(2)式で表されるファイバの有効長、 G はブリルアン利得係数、 F_p は励起光源の線幅、 F_b はSBSの利得帯域幅である。 b は、励起光とSBSによる反射光の偏光状態によって1~2の間の値をとる。(3)式において、 $k = 2\pi/\lambda$ 、 ρ はファイバの密度、 η は定数である。 $\lambda = 1480 \text{ nm}$ とすると $F_b = 17.5 \text{ MHz}$ 程度である。 F_b は励起レーザの縦モード間隔よりも狭いので、SBSはレーザの各縦モードで個別に発生する。一方、ラマン利得の帯域幅(30 nm)は広いので、各縦モードによる利得が重なり合い、レーザの全光出力が利得に寄与する。よって、全光出力が同じであれば、発振縦モードの数を増やして縦モード1本当たりの光出力を減らした方が、ラマン利得を減らせずにSBSを抑制することができ有効である。

ファイバの観点から(1)式を見ると、誘導ラマン散乱とSBSは同じ3次の非線形光学効果であるので、ロスの低下、 A_{eff} の縮小などラマン利得を増やす要因は、同時にSBSの発生も容易にしてしまう。DSF、NZDSF、DCFなどではSMFと比較して A_{eff} が小さいのでSBSが発生し易い。

1.3 波長固定と前方励起ラマン増幅用励起光源の必要性

発振波長固定は、ラマン利得プロファイルの設計をするために必要である。従来、14XX nm帯LDMの波長固定技術としては、FBG (Fiber Bragg Grating) が用いられてきた。FBG-LDMでは、数十cm離れた位置にあるFBGで光が反射され、半導体レーザに帰還される。そのような状態はコヒーレンス・コラプス (coherence collapse) と呼ばれ、LDMの安定動作のために好ましい状態と言われてきた。しかし、レーザから離れた点からの反射によってコヒーレンスが乱されているため、レーザの線幅は広く、RINは増加している。(1)式を見ると、線幅が広いことはSBS発生閾値が大きくなり有利である。後方励起ラマン増幅でもSBSは問題なので、低SBSと波長固定を満たしたFBG-LDMが励起光源として用いられている。しかし、RINが高いFBG-LDMは前方励起ラマン増幅には適さない。RINの低減には、分布帰還型半導体レーザ (DFB) のように、半導体レーザ素子の内部に波長固定のための回折格子を形成することが有効である。しかし、DFBはコヒーレンスが高いため、シングルモード発振、狭線幅であり、SBSが問題となって前方励起ラマン増幅用励起光源としては適さない。以上のよう

な背景から、既存のLDMはどれも前方励起ラマン増幅用としては適さず、新たな励起光源を開発する必要性が出てきた。

本研究では、前方励起ラマン増幅用励起光源の素子設計、特性評価、駆動方法の検討などについて報告する。

2. iGMレーザの構造

我々は、前方励起ラマン増幅用として新たに開発した半導体レーザを、iGM (inner grating multimode) レーザと呼んでいる。その最大の特徴は、DFBのように半導体レーザ素子全長にわたって回折格子を形成するのではなく、一部にのみ回折格子を形成し、マルチモード発振を実現していることである。半導体レーザ素子内部の回折格子により、低RINと発振波長固定が実現され、マルチモード発振によりSBS低減を実現している。また、マルチモード発振はラマン増幅で重要な偏光度 (DOP) 低減のためにも必須である。

半導体レーザ素子の基本構造は、高出力、高信頼性の実績がある14XX nm帯半導体レーザと同じで、導波路構造はBH (埋め込みヘテロ) 構造で形成され、層構造は歪補償多重量子井戸活性層、多段SCH (分離閉じ込めヘテロ) 構造となっている。素子の端面には、ファブリペロー (FP) ・モード抑制のためAR (anti-reflection) コーティングが施されている。

モジュール構造は、従来の14XX nm帯LDMと同じで、14-pin バタフライ・パッケージ、2レンズ結合系を採用している。iGMでは、回折格子が半導体レーザ素子内にあるため、アイソレータをLDM内に装備できるという利点がある。それに対しFBG-LDMでは、FBGからの反射光を半導体レーザ素子に帰還させる必要があるため、アイソレータを装備することはできない。増幅器を構成した際に、信号光が励起光源のLDM内に入射、反射して伝送路に戻り、信号の雑音となることがある。このような状況を避けるためLDM内にアイソレータを装備することが有効である。アイソレータの装備は、反射戻り光や他のLDMからの迷光などが半導体レーザ素子に入射することも回避し、励起光源の安定動作を得ることに有効である。

3. iGMレーザの基本特性

図2にiGMの*L-I*曲線を示す。共振器長は1500 μm である。光出力は、310 mW (@1200 mA) を達成している。発振スペクトルは、図3に示すように良好なマルチモード発振となっている。

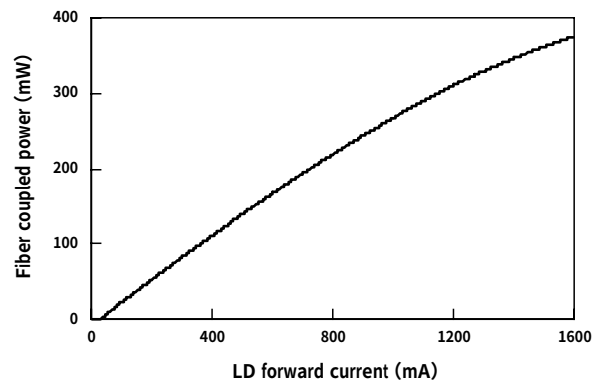


図2 iGMレーザの*L-I*特性
Light-current characteristic of iGM laser

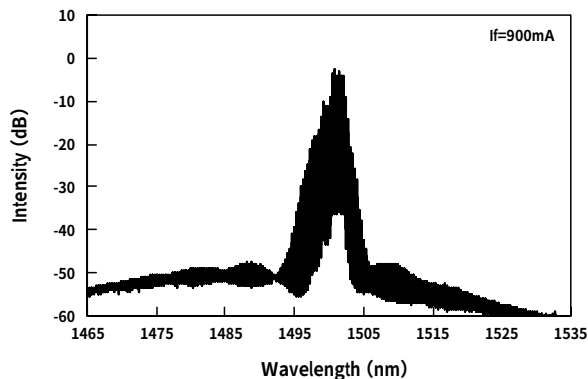


図3 iGM レーザの発振スペクトル
Spectrum of iGM laser

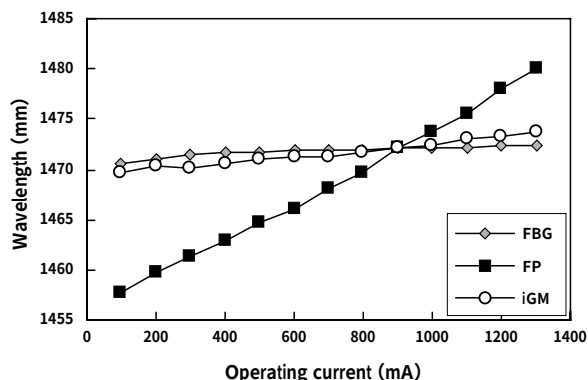


図4 発振波長の電流依存性の比較
Current dependence of lasing wavelength

図4に発振波長の電流依存性を示す。発振波長は良好に固定されているのが分かる。波長変動量は、FBG-LDMに比べるとやや大きいがラマン増幅用励起光源としては十分である。また、DFB (図示しない) と比べると、iGMの波長変動は小さい。これは、長共振器化、ジャンクションダウン・ボンディング、高熱伝導性ヒートシンクの採用などによって得られた良好な放熱特性の結果である。iGMでは、回折格子部分がLDM内のペルチェ素子によってレーザ素子全体と共に温度制御されている。そのため発振波長は外気温度によって変動することはない。一方FBG-LDMでは、FBG部分が外気温度で変化し、回折格子が伸縮するので発振波長が変動してしまう。更にiGMで、電流を注入するほど低温になるように設定すれば、駆動電流による波長変動を補償することも可能である。

4. SBSの抑制

4.1 SBS抑制と発振縦モード数の関係⁹⁾

- (1) 式を見ると、SBS抑制には2つの施策が考えられる。
- (i) 各縦モードの光出力を P_{th} 以下にする。
- (ii) 線幅を広げて P_{th} を上げる。

図5にファイバに入射する前のiGMのスペクトルと反射されたスペクトルを示す。入射光と同じ波長の反射はレーリー散乱によるものであり、波長がずれているものはSBSによるものである。SBSによる反射光は、下記の式で表されるブリルアン・シフト ($11 \text{ GHz} = 0.08 \text{ nm @1480 nm}$) 分だけ元の光の

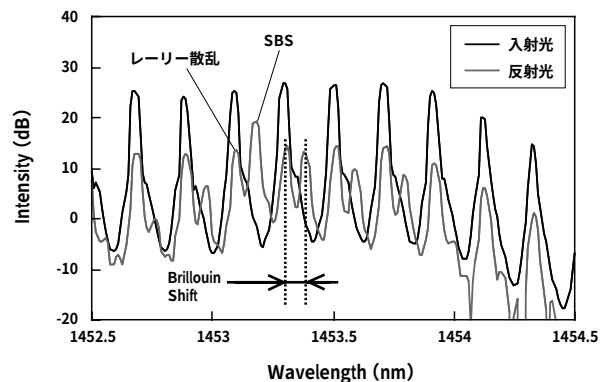


図5 ファイバへの入射スペクトルと反射スペクトル
Spectra of fiber input light and reflected light

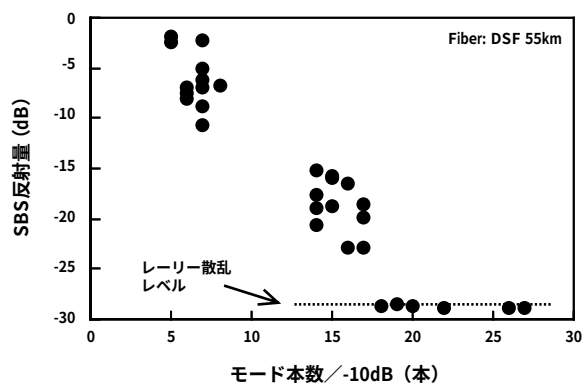


図6 縦モード本数とSBS反射量の関係
Relationship between number of longitudinal modes and amount of SBS reflection

長波側にずれる。

$$v_B = 2nV_s/\lambda \quad (4)$$

(n : ファイバの屈折率 V_s : ファイバ中の音速 5760 m/s)

図5を見ると光強度が強い縦モードではSBSが発生しているが、弱い縦モードでは発生していないことが分かる。つまり (i) の施策については、発振縦モードの数を増やし、全光出力を多くの縦モードに分散させることが有効であることが分かる。図6に縦モードの本数とSBSの反射量の関係を示す。SBSは、後方散乱された光強度の入射光強度に対する比で評価することにする。SBSの P_{th} は小さいので、ピークから -10dB の領域の縦モード本数に着目している。図6を見ると縦モード本数が18本程度以上の場合にはSBSが抑制され、反射量がレーリー散乱のレベルまで下がっていることが分かる。

図7に縦モード本数と P_{th} の関係について示す。図7の P_{th} は各縦モードで個別に発生しているSBSの閾値であり、ファイバに入射している全光出力はそれよりも大きいことに注意されたい。 P_{th} は、図5のような反射スペクトルを用いて、各縦モードとSBSによる反射光の強度比から求めた。縦モード本数が増えると P_{th} が増加しているのが分かる。これは、縦モード数が増えることによってレーザの線幅が広がっていることを示唆している。一番モード数が少ない点はDFBのデータであるが、 $P_{th} = 2.8 \text{ mW}$ であり(1)式による見積りとほぼ一致する。その他の点は、iGMのデータであり、注入電流や回折格子の

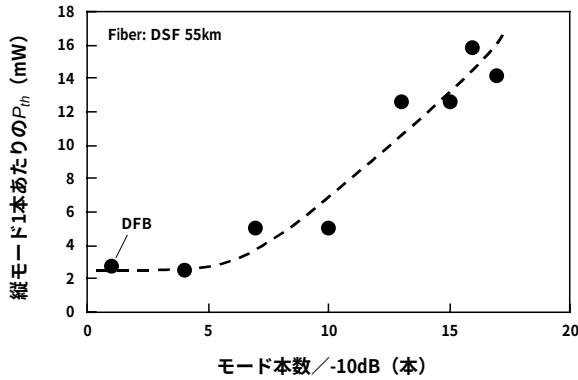


図7 縦モード本数とSBS閾値パワー P_{th} の関係
Relationship between number of longitudinal modes and SBS threshold power P_{th}

設計により縦モード数を変えている。iGMでは、注入電流の増加と共に縦モード数が多くなっていくので、高注入域では縦モード数の増加とそれに伴う P_{th} の増加の相乗効果によりSBSが発生しにくい状態になる。これに対してDFBでは、注入電流が増えてもシングルモード性は変わらないので、全光出力として P_{th} (2.8 mW) 以上の光出力をファイバに入射することができない。もし、縦モード数の増加によって線幅が変わらず、 P_{th} も不変であるとする、例えば200 mWの光出力を入射したいときには80本 ($= 200 \text{ mW} / 2.5 \text{ mW}$) 程度の縦モード本数が必要になるが、実際そのようなことはないし、それは不可能である。ちなみに、マルチモード発振しているレーザの線幅自体を直接、精度良く測定することは、技術上困難である。

4.2 SBS抑制のための駆動方法の検討

全てのLDM、全ての駆動電流域でSBSを完全に抑制するためには、発振縦モード本数を増やす施策のみでは十分ではない。更に多くの縦モード本数を得ようとすると、波長固定性やRINなどの特性が悪化する。我々は、iGMの特性を生かしつつSBSを回避するためには、使用方法の工夫も必要だと考えている。前方励起ラマン増幅では、LDM1つあたりの光出力が小さい(100 mW程度)場合がある。そのような場合には、全ての縦モード強度が P_{th} 以下になるまで、光出力をLDMの外部で減衰させることによって、SBSを回避することができる。その際、高い電流値で駆動した方が縦モード本数が増え、減衰量が小さくて済む。

また、別の方法として周波数重畳(dithering)という方法の検討も行った。周波数重畳とは、微小な振幅の変調信号を直流の駆動電流に重ね合わせた駆動方法である。これは、SBS低減の施策(ii)に対応する。半導体レーザは、駆動電流と共に内部の温度が上昇し発振波長が変化する。そのため周波数重畳すると発振波長も微小に変動し、線幅が広がったような効果がある。

図8は、正弦波で周波数重畳した時のDFBのスペクトルである。周波数重畳の周波数を1 kHz～10 MHzまで変化させている。スペクトルは、最低周波数である1 kHzの時が最も幅が広く、直流で駆動した時と500 kHz以上の時が同程度に狭い。高周波領域では、周波数重畳による電流変化にレーザの温度変化が追従できなくなり、線幅が増大しなくなる。半導体レーザ

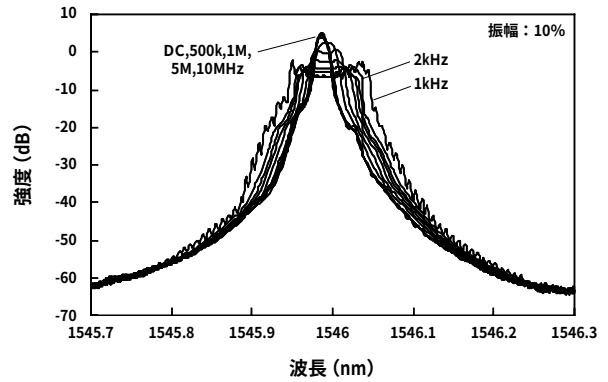


図8 変調周波数を変えたときのDFBスペクトルの様子
Broadening of DFB spectrum achieved by dithering at various frequencies

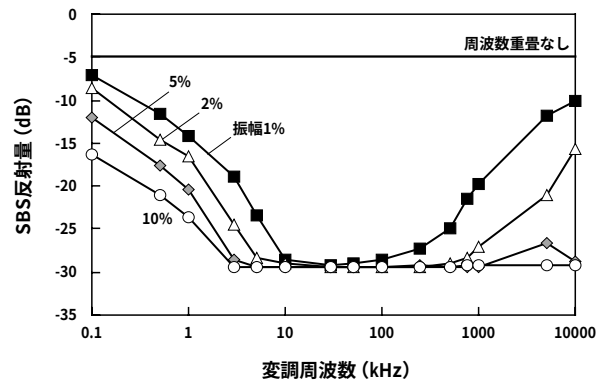


図9 SBS反射量の変調周波数依存性
Change in SBS reflection due to dithering frequency

のキャリア寿命はもっと速い(数nsec)ので、この周波数領域でも光の強度変調は追従している。正弦波で周波数重畳した場合のスペクトルは、正確には元々の発振波長を中心としたベッセル関数の重ね合わせとなる。高次の高調波ほど強度が強いの、図8に示すような中心が下がり両脇が上がった形状となる。

図9に周波数重畳の周波数と振幅を変えたときのSBS反射量を示す。図に示した振幅は、光の直流成分に対する強度変調成分の割合で定義している。約10 kHz～100 kHzの周波数では、もともと-5dB程度存在したSBS反射量が1%という小さい変調でレーリー散乱のレベルまで抑制されているのが分かる。実験は縦モード本数の少ないiGMを用いて行っている。

線幅自体は、図8で分かるように低周波になる程広い。低周波側にSBS抑制の限界があるのは、周波数重畳による波長変動にSBSの現象が追従してしまうからである。SBSは、前進波と後進波の相互作用で起こるので、例えば、 L_{eff} を光が往復する時間よりも周波数重畳の周波数が遅ければ、線幅が広がった効果はない。(2)式を使って、 L_{eff} 20 kmとすると、 $c/2nL_{eff} = 5 \text{ kHz}$ (c :光速)となり、図9とオーダは一致している。高周波側の限界は、上述したように温度応答の限界で線幅が増大しなくなる周波数で決まっている。SBS抑制に適した10 kHz～100 kHzの周波数は、ビットレートに比べて非常に遅いし、変調度も小さいため信号への悪影響は少ないと考えられる。

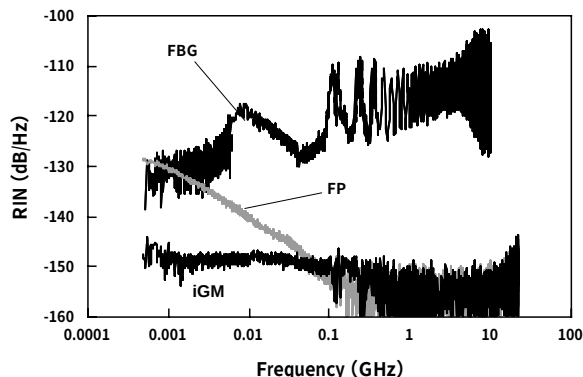


図10 各種レーザのRIN比較
RIN of various types of laser

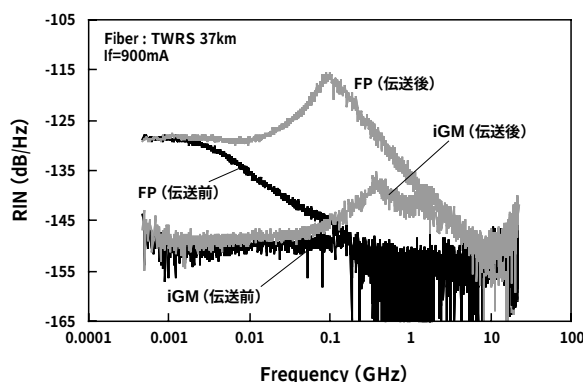


図11 伝送前(黒), 後(灰色)でのRINの比較(iGM, FP)
RIN of iGM and FP lasers before and after transmission over a 37-km TWRS fiber

5. iGMレーザのRIN評価

iGMのRINの様子を図10に示す。横軸は、周波数を対数表示している。比較のためにFBG-LDM, FBGのない形態のFPレーザのRINも載せる。iGMは、広い周波数領域で前方励起ラマン増幅に必要な -140 dB/Hz以下の低RINを実現している。FBG-LDMは、FBGまでの距離 l を往復する時間に対応する $c/2nl$ 間隔のピークを持ち、RINの値は -120 dB/Hz程度と非常に高くなっている。FPは低周波側でRINが上昇している。これは、FPでは発振縦モード数が非常に多く、モード競合が起こっているためだと考えている。

低周波領域のRINに着目しているのは、前方励起ラマン増幅でも信号光と励起光の進む速度がファイバの分散により異なるので、励起光の強度雑音のうち速い周波数成分は伝送中に平均化され、信号光に与える影響が少ないからである。

更に我々は、ファイバ伝送後にRINが増加する現象を観測した(図11)。この現象は、モード分配雑音(MPN)に起因していると考えている⁹⁾。MPNとは、マルチモード発振しているレーザで起こる現象で、レーザの利得を各縦モードに配分する比率が時間的に変動するので、各縦モードの光出力は変動するが全体の光出力は変動しないという現象である。MPNによる変動は、入射地点では各縦モード間で相殺されているが、長い距離を伝送した後では、ファイバの分散の影響で各縦モード

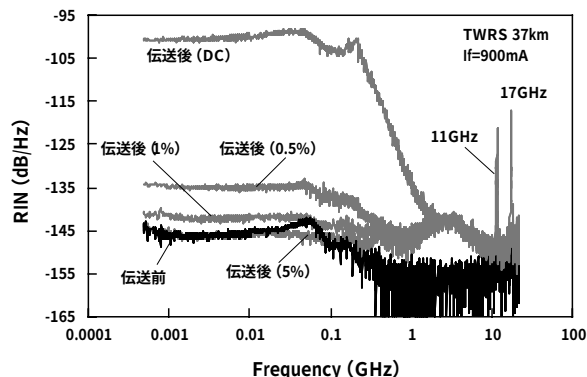


図12 SBSの発生による伝送後のRINの増加とその抑制
()の数字は周波数重畳の振幅を示す
Increase in RIN after transmission produced by SBS and its suppression by dithering

の到着時間が異なるので相殺されず、全体の光出力が揺らぐことになる。そのため伝送後のRIN(灰色)が伝送前(黒)に比べて増加する。FPでは縦モード数が多いためRINの増加が顕著である。iGMもマルチモード発振しているので、伝送後のRINの増加は見られるが、その最大値はFPより20 dB程度小さい。

また、SBSの発生によっても伝送後のRINが増加することを見出した⁹⁾。SBSが発生しているiGMの伝送前(黒)、後(灰色)のRINを図12に示す。伝送後のRINは、低周波領域で大きく増加しており、その増加量はMPN起因の増加よりも大きい。実験では、SBSの発生を周波数重畳の振幅(図12の括弧内)を変えることにより抑制した。RINの増加はSBSと共に抑えられており、この現象がSBSに起因していることを示している。SBSが抑制された後にもMPNによるRINの増加は見られる。この実験に用いたのはSBSが発生するような縦モード本数の少ないiGMなので、MPNによるRINの増加は図11のiGMと比べて小さい。また、MPNによるRINの増加の場合はピークが見られるが、SBSによる場合は観察した周波数領域ではピークは見られず、低周波になるほど増加する傾向がある。

SBSが発生すると高周波領域にも鋭いピークが2つ観測される。これはそれぞれ、SBSを発生させた縦モードとSBS光との周波数差(つまりブリルアン・シフト 11 GHz)、SBSを発生させた縦モードの1つ長波側の縦モードとSBS光との周波数差(17 GHz)によって決まっており、SBSの発生を示している。

DFBはシングルモードなので伝送後でもMPNによるRINの増加は無いが、SBSが容易に発生するのでSBSによるRINの増加が見られる。FPは、図4にもあるように電流による波長変動が大きいですが、一定電流駆動で波長を固定し、VOA(variable optical attenuator)で光出力を変化させ、前方励起ラマン増幅に用いることが検討されている。しかし、上述したようにFPのRINは低周波領域や伝送後で増加しており、前方励起ラマン増幅に使用したときの影響が懸念される。また、FPによるSBSも調査した。FPは、多くの縦モードで発振しているが、SBSが完全に抑制されている訳ではなく、SBSが発生しているものも存在した。

6. おわりに

前方励起ラマン増幅用励起光源として、部分回折格子を内蔵したiGMという新しいレーザを開発した。多モード発振、周波数重畳を用いてSBSを低減できることを示した。他の種類のレーザと比較すると、FBG-LDMはRIN、FPは波長固定、DFBはSBSに大きな問題がある。更にRINについて詳しく調べると、FPは低周波領域とファイバ伝送後、DFBはSBS発生時の伝送後に増加することが分かり、総合的に判断してiGMの雑音特性が最も優れていることが分かった。以上により、前方励起ラマン増幅用励起光源としてiGMが最も適していると考えられる。

参考文献

- 1) S. Kado, Y. Emori, S. Namiki, N. Tsukiji, J. Yoshida, and T. Kimura: ECOC'01 (2001), PD Paper 1.8.
- 2) 江森, 門, 並木: “双方向励起方式によるラマンアンプの雑音指数スペクトル設計” 古河電工時報, 第111号 (2003), 10.
- 3) 木村 (俊), 築地, 吉田, 木村 (直), 愛清, 伊地知, 池上: “光アンプ励起用250mW 1480nmLDモジュール” 古河電工時報, 第105号 (2000), 19.
- 4) N. Tsukiji, J. Yoshida, T. Kimura, S. Koyanagi, and T. Fukushima: ITcom'01, **4532** (2001), 349.
- 5) R. G. Smith: Appl. Opt., **11** (1972), 2489.
- 6) N. Tsukiji, N. Hayamizu, H. Shimizu, Y. Ohki, T. Kimura, S. Irino, J. Yoshida, T. Fukushima, and S. Namiki: OAA'02 (2002), OMB 4.
- 7) J. Yoshida, N. Tsukiji, T. Kimura, M. Funabashi, and T. Fukushima: ITcom'02, **4870** (2002), 169.
- 8) R. H. Wentworth, G. E. Bodeep, and T. E. Darcie: J. Lightwave Technol., **10** (1992), 84.
- 9) Y. Ohki, N. Hayamizu, H. Shimizu, S. Irino, J. Yoshida, N. Tsukiji, and S. Namiki: OAA'02 (2002), PD Paper 7.