ファイバグレーティング付き980 nmポンプレーザの出力最適化

Output Power Optimization of 980 nm Pump Lasers Wavelength-Locked Using Fiber Bragg Grating

麦野　明 [*]　　入江雄一郎 [*2]
Akira Mugino　　Yuichiro Irie

概　要　帯域980 nmのポンプレーザを用いてEDFAを励起する場合励起波長の変動により1.55 μm帯域における利得又は増幅出力が大きく変動する。この現象はいわゆるPump Mediated Inhomogeneity（PMI）問題である。このため，980 nmレーザモジュールに対する波長変動要求が厳しくなりつつある。励起波長の変動を抑える方法として，ファイバグレーティング（FBG）を用いたポンプレーザが開発されている。しかしFBGによる波長フィードバックではレーザ出力パワーのレベルがFBGのない場合に比べて低くなる傾向がある。このパワー低下問題をできるだけ最小に抑える必要がある。我々は今回FBG反射率，レーザ前端面反射率，FBGによる波長引込み効果及び空間的なホールバーニング効果などを取り入れて解析を行った。本報告書はFBG付き980 nmレーザモジュールの出力パワー最適化コンセプト及び理論解析，シミュレーション結果等について述べる。

1. はじめに

980 nmポンプレーザモジュールを用いてエルビウムドープファイバ増幅器（EDFA）を励起するメリットとして低雑音，低温度依存性のアンプ利得特性が得られるなどが挙げられる。ところが，通常の980 nmレーザモジュールは電流注入による波長シフト特性を有し，一般的には0.03（nm/mA）と電流の注入量に従って長波長側へシフトする。一方，D-WDMシステムを構築する際，決まったチャンネル数に対し，EDFAの増幅量を電子回路でポンプレーザモジュールの注入電流を制御することにより，ONとなっているチャンネル数に依存しない一定の利得量を有するEDFAとすることが望ましい。すなわちONするチャンネル数に応じて異なる注入電流で980 nmレーザモジュールを駆動しても利得出力に影響を与えないことが要求される。ところが注入電流が変化するとポンプレーザの出力波長も当然変化する。励起波長の変動は1.55 μm帯域の増幅出力特性に反映されてしまい，利得変動が簡単に1 dB以上にも及んでしまう。すなわちPump Mediated Inhomogeneity（PMI）[1)] 問題が生じてしまう。この励起波長の変動を抑えるため，ファイバグレーティング（FBG）を用いたポンプレーザの開発が盛んに行われている。しかしFBGによる波長フィードバックではレーザの出力パワーレベルがFBGのない場合に比べて必ず低くなってしまうデメリットがある。このパワーの低下を最小限に抑えるため，FBG反射率，レーザ前端面反射率を最適に設計する必要がある。そのためにはFBGによる波長引込み効果及び空間的なホールバーニング効果などを考慮した解析が必須である。本報告ではそのシミュレーション結果について記述しながら，FBG付き980 nmレーザの出力特性の最適化設計コンセプトを紹介する。

2. モジュールの構成

実際のレーザモジュールの構成を**図1**に示した。製造工程の流れとしてはまずレーザチップをサブマウント上にボンディングしてパッケージ内に実装し，くさび型レンズドファイバを用いてチップとベスト調心を行い，YAG固定工程を経てモジュールを製造する。このとき，レーザとファイバとの結合効率の実績平均は約75 %～80 %となっている[2)]。この値は従来の対称

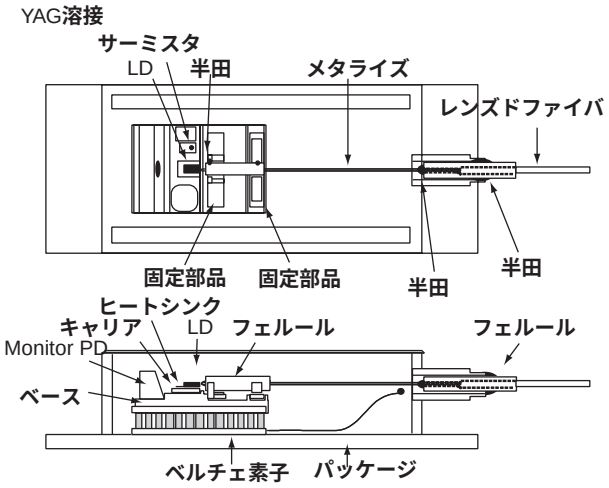

図1　980 nmレーザモジュールの構成図
Elevation and plan diagrams of a 980 nm laser module

[*] 研究開発本部 横浜研究所 WAチーム
[*2] 研究開発本部 横浜研究所 980 nm LDモジュールチーム

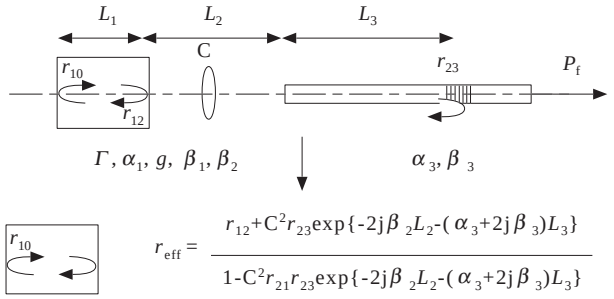

図2　等価反射率（R_{eff}）概念を用いた簡易モデルによる複合共振結合系の解析概念図
Effective reflectivity conceptual model is used to simplify the external cavity resonator coupling system

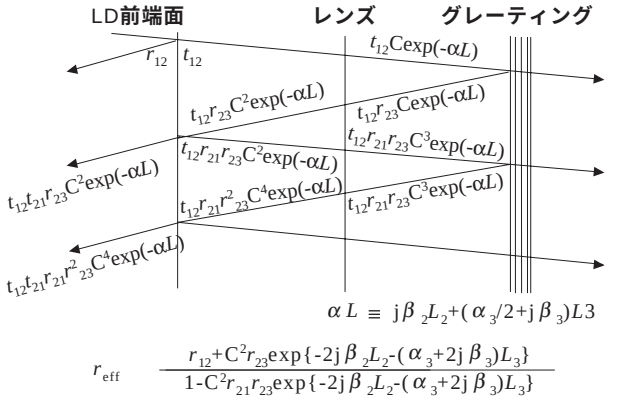

図3　振幅反射率r_{eff}の導出に用いた複合共振器モデル
External cavity model for amplitude reflectivity evaluation

2レンズ系に比べて約10 %強良くなっている。図1に示したモジュール構成において，レーザチップがサブマウントを通してパッケージ内に固定され，くさびファイバ先端とレーザチップ前端面とは約数ミクロン程度離れている。第一フェルールは前段ベース上にYAG溶接工程で固定される。また，第二フェルールはネックのところに半田封止工程で固定される。このようにレーザとファイバの結合系を構成したモジュールをモデル化することで解析を簡単にすることができる。

3. 解析モデル

グレーティングが形成されているレンズドファイバを用いてレーザチップと結合している系の簡略図を**図2**に示した。以下にこの簡略結合系について考察を進める。図2に示した結合効率C，FBGの反射率r_{23}，レーザ前端面（低反射膜ARコート）反射率r_{12}，後端面（高反射率HRコート）反射率r_{10}及びレーザチップの諸特性パラメーターを用いてFBG外部共振器型レーザに関する諸特性についてシミュレーション[6]を行った。

FBG付き980 nmレーザモジュールにおいて最も重要な設計方針として，

- ●できるだけ大きな出力パワーを有すること
- ●ある電流又は温度においてレーザ発振は本来の発振波長からFBG反射中心波長に引き込まれてFBG波長で発振することが必要で，その引き込める波長範囲をできるだけ広くすること

の2点である。つまり最大出力パワーと最も広い引込み幅を有するレーザモジュールをいかに両立させるかが重要である。ここで解析手順としてまず前端面ARコート反射率とFBG反射率を図2に示した等価反射率と関係付け，等価的な反射率を求める。このとき，レーザ発振し得るモードが多いため，最も発振強度の強い主モードでの反射率を等価反射率R_{eff}とする。つぎにチップのAR及びHR反射率が起因の，レーザチップ内部キャリア密度不均一による空間的なホールバーニング現象（Spatial Hole Burning）を考慮して，出力パワーを正しく求める必要がある。つまり等価反射率に対応したレーザモジュール出力特性を求めることで，出力パワーの最適化ができる。次節にARとFBG反射率の最適な組合せを求める。なお，FBGの反射率に注目した場合，トレードオフ関係である出力パワーと引込み幅（詳しい定義は次節を参照）の最適な設定値の関係についても詳しく考察する。

4. 等価反射率及び複合共振器のミラー損失

図3に示したレーザ前端面，レンズドファイバ，及びグレーティングなど各界面での反射及び透過成分を合わして絶対値をとることによりR_{eff}を求めた。この等価反射率R_{eff}（r_{eff}は振幅で，R_{eff}はパワー反射率）を用いて通常レーザの前後端面反射率（ここではr_{10}とr_{eff}）を閾値条件式に当てはめると**式（1）**のようになる。この閾値条件式からミラー損失を書き直すと，**式（2）**のように書ける。通常用いられるいわゆるミラー損失$1/L \times \ln(R)$と異なるところは複素数であることと，長さで割っていない無次元の量であることを注意されたい。

5. 引込み幅

この節ではFBGによる波長ロックのメカニズムについて引込み幅の概念を導入して説明する。式（1）の閾値条件[3)～4)]から式（2）に示したミラー損失と正味利得を数値解析することにより発振し得る複合共振器型レーザの各縦モード（スペクトル出力）を求めることが出来る。例えば，**図4**は理想的な外部共振器（AR=0）の場合，レーザ素子の利得ピーク波長が引込み幅以内（λ_{LD}=980 nm及び970 nm）と引込み幅領域以外（λ_{LD}=966 nm）の比較を示したミラー損失と正味利得関係スペクトル図である。図4からまずレーザ素子の利得が注入電流又は温度によって変化が生じた場合，利得ピーク波長が変化するものの，ミラー損失特性がFBGによって一定となっているため，閾値条件を満たすレーザの縦発振モードが結局FBG反射中心波長の近傍にロックされることがわかる。また，利得ピーク波長の値はFBG反射中心波長からある値まで離れると，FBGモードで発振しなくなり，通常の利得ピーク波長（λ_{FP}）近傍で

$$r_{10} \times \frac{r_{12}+C^2 r_{23}\exp\{-2j\beta_2 L_2-(\alpha_3+2j\beta_3)L_3\}}{1-C^2 r_{21} r_{23}\exp\{-2j\beta_2 L_2-(\alpha_3+2j\beta_3)L_3\}} \times \exp\{-\Gamma(\alpha_1-g)+2j\beta_1)L_1\}=1 \qquad (1)$$

$$\ln\left[\frac{1}{r_{10}} \times \frac{1-C^2 r_{21} r_{23}\exp[-2j\beta_2 L_2-(\alpha_3+2j\beta_3)(L_3+L_{geff}\}}{r_{12}+C^2 r_{23}\exp[-2j\beta_2 L_2-(\alpha_3+2j\beta_3)(L_3+L_{geff}\}}\right] \qquad (2)$$

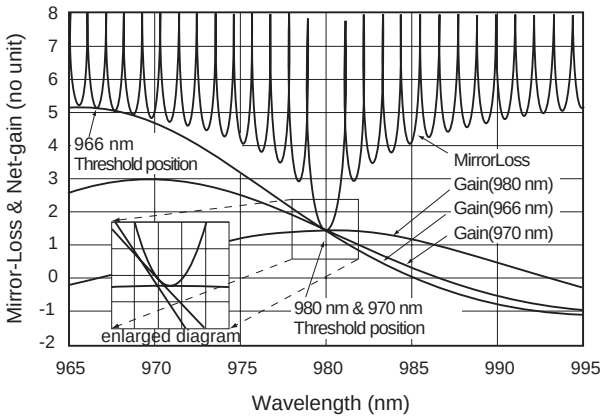

図4　閾値条件において，利得ピーク波長に対するミラー損失と正味利得の変化様子
Mirror loss and net gain relationship for different gain peak wavelengths under a threshold condition

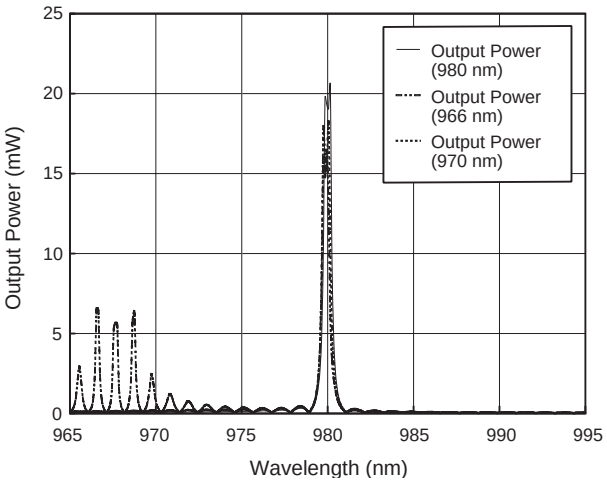

図5　AR=0で，異なる利得ピーク波長に対するFBGモジュールの発振スペクトル特性
FBG-pump laser module power spectrum due to the variation of gain peak wavelength where AR is set to zero

ファブリ・ペローモード（FP-mode）で発振が起こってしまうことがわかる。この値は以降"引込み幅（λ_{pull}）"と呼ぶ。上の例ではFBG波長λ_{FBG}は980 nmと設定されている。AR=0では引込み幅の理論値は約13.9 nmとなっている。したがって，数式で表すと

$$\lambda_{FBG} - \lambda_{FP} = \lambda_{pull} \qquad (3)$$

式（3）のように引込み幅を定義することができる。なお，厳密にはFBG波長に対して長波長側と短波長側に対する引込み幅はわずかに異なるが，ここでは区別せず単に片側の引込み幅とする。また，図4に対応する出力スペクトルを**図5**に示した。図5からわかるように，レーザ素子の利得ピーク波長が短波長にあるほど発振スペクトルがFBG波長である980 nmより短波長側で発振することがわかった。なお，波長966 nmの計算では引込み幅よりもわずかに外側にあるため，FPモードとFBGモードと競合して，共に発振が起きている。これは本シミュレーション方法がマルチモード発振スペクトル[3]に対応しているためである。なお，実際のポンプレーザではAR反射率はゼロにならないため，発振はより複雑となる。一例として，λ_{FBG}=979 nm，λ_{LD}=970 nm，AR=5 %，HR=92 %，FBG反射率

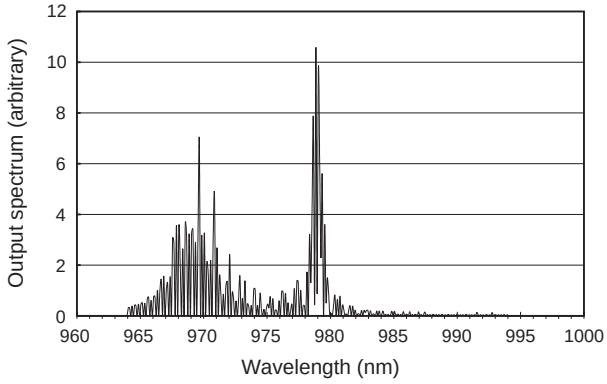

図6　わずかに引き込まない条件での出力スペクトル特性図
Simulated output spectrum of a FBG-laser module for a small deviation outside the pulling width condition

=10 %，FBG半値幅=1.0 nmとして計算すると，引込み幅は8.9 nmであるため，式（3）より，片側引込み幅領域（970.1 nm，980 nm）から外れるため，発振スペクトルは**図6**のようにFPモードとFBGモードの競合となる。したがって，FBG付きポンプレーザを設計する場合，まずFBG波長に対してレーザ素子の発振閾値における発振波長（又は利得ピーク波長）が短波長側の引込み幅内にあることが必須である。そして，一定温度制御条件のもとで駆動電流がEOL（End Of Life）まで増えても利得ピーク波長の長波長側へのシフト量の総計が引込み幅内に収まることが必要不可欠である。この場合，発振閾値波長λ_{Ith}はλ_{FBG}より短波長側にしておけば，EOLでの発振波長λ_{EOL}とλ_{Ith}との差がλ_{FBG}を中心とする場合，左右両側の引込みを生かすことができるので，得策である。

6. FBG半値幅の影響

つぎにFBGの半値幅（Full Width Half Maximum）に対する引込み幅への影響について調べた。その結果，FWHMの値が1 nmから2 nmに変化しても片側引込み幅がわずかに0.05 nm程度しか変化しない。また，発振閾値電流I_{th}もわずか0.1 mAしか大きくならない。更に出力スペクトルを調べたところ**図7**に示したように明らかに主発振モード数及びスペクトル幅が異なるものの，レーザモジュール全出力パワーの和は同じである

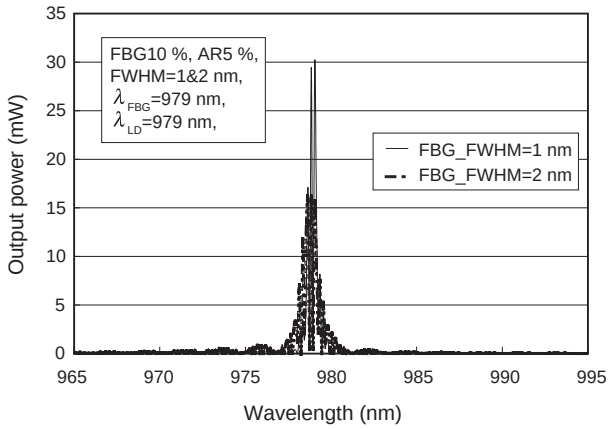

図7　半値幅1 nmと2 nmのFBGを用いた場合のスペクトル特性比較図
Spectrum property comparison where the FWHM of the FBG is set to 1 nm and 2 nm

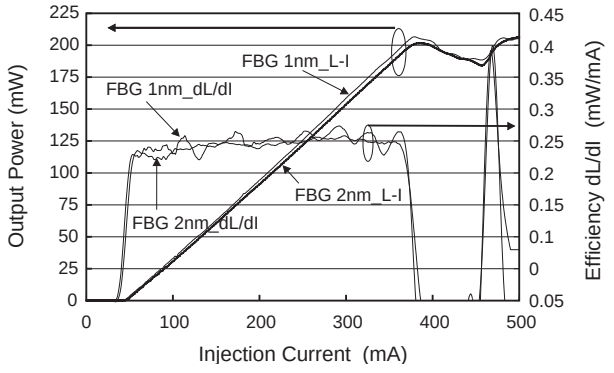

図8　FBG半値幅1 nmと2 nmを用いた場合の*I-L*実験結果
Experimental results of *I-L* properties using FBGs with 1 nm and 2 nm FWHM

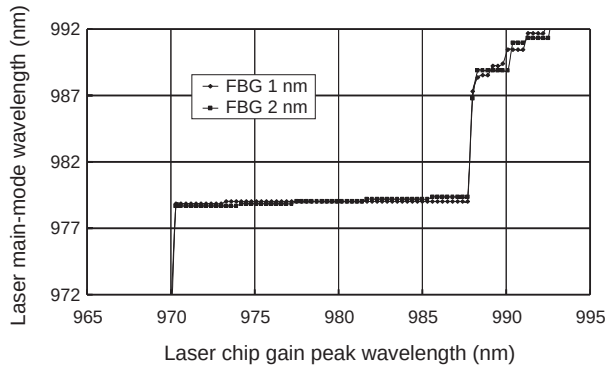

図9　FBG半値幅に対する利得ピーク波長と発振波長の関係
Relationship between gain peak value and lasing wavelength with respect to 1 nm and 2 nm FWHM of FBG

ことがわかった。また，FBG内で発振している主モードの数は1 nm FBGでは約7本，2 nm FBGでは約15本となっている。これはレーザ素子長が800 μmに対応してFSR（Free Spectral Range）がほぼ0.17 nmとなっていることを考えるとFBGモードで発振する場合，AR反射率がゼロでないことが原因で，主モード間隔はほぼレーザ素子長によって決定されていることがわかった。一方，レーザ静特性である*L-I*特性及び発振波長安定度特性について調べたところ，半値幅による影響が非常に大きいことがわかった。一般的に安定なレーザ発振では出力対電流の勾配であるd*L*/d*I*値が右下がりの緩やかな線形減少を示す。一方，ある電流に対して不安定な発振が繰り返して生じる場合，d*L*/d*I*値が波打ち形状となる。これはいわゆるキンク現象である。ところで，FBG付きポンプレーザに限らず，レーザ発振は常に外乱の影響を受けて変化しており，発振の主モードが長波長側又は短波長側に行ったり来たりする。このため，FBG半値幅のぎりぎりのところに最も多くパワーの割合を占めている主発振モードが近くに存在すると，次の発振し得る縦モード（FBG半値幅外にある）へホップした場合，レーザの出力パワーは著しく変化し，*L-I*特性にはキンクが発生し，d*L*/d*I*は波打ち形状となる。**図8**は半値幅1 nmと2 nmのFBGを付けた場合の*L-I*特性の測定結果を示したものである。明らかに半値幅が大きい2 nmのほうがd*L*/d*I*特性は平坦である。これは，FBGの半値幅を大きくしたほうが半値幅内における発振モード数が増え，パワーが平均化されたからと考える。ところが，安定な発振のほかに，狭い波長範囲内でのレーザ発振

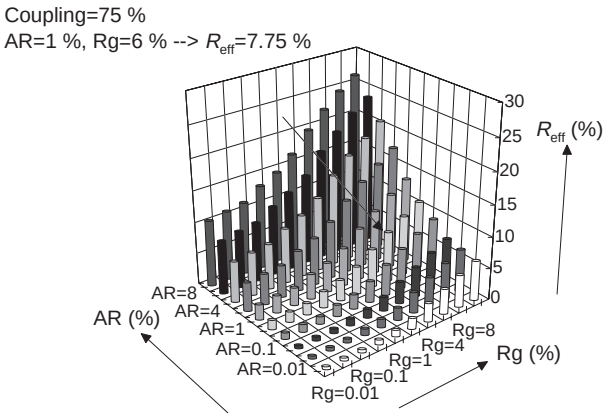

図10　C=75 %時のARとFBG反射率とR_{eff}との関係
Relationship between AR, FBG and Reff reflectivity for a 75 % coupling

も要求されるので，FBG半値幅を広くしすぎると，逆に駆動電流，温度又は動作環境の変動によって発振波長の変動幅が広くなってしまう恐れがある。**図9**にレーザ素子の利得ピーク波長に対するレーザモジュールの発振波長を示した。図9から半値幅が1 nm及び2 nmとしたとき利得ピーク波長の変化（970.3 nm～987.7 nm）に対する発振波長の変動範囲がそれぞれ0.17 nmと0.68 nmとなる。この結果とFBGの環境変動による波長ズレ範囲を合わせて考えると，例えば，ファイバ温度係数は約0.01（nm/℃）となっているので，室温25℃を基準として－20℃から65℃の温度動作範囲では約40度の温度変化があり得る。この分の波長変動は約0.4 nmとなる。更に2 nm半値幅のFBGを用いると，0.68 nmの半分で0.34 nm（電流シフト量に対応する引込み幅は8 nm～9 nm程度であるため）のズレがあるので，合計0.74 nm程度の波長ズレが生じる。したがって，余裕を持って考えると，FBG付きポンプレーザの発振波長許容範囲は1 nmの幅が限界と考える。

7. AR及びFBG反射率とR_{eff}との関係

つぎに等価反射率とFBG及びAR反射率間の相関関係を結合効率も考慮してシミュレーションを行った。**図10**はそれぞれのパラメーターの相互関係から求めた3次元グラフである。式は図3中に記載したものを用いた。その結果，まず結合効率によって，等価的な反射率はかなり異なることがわかった。例えば，C=65 %，75 %及び90 %のとき，AR=1 %，FBG=6 %としてそれぞれの等価反射率は6.5 %，7.75 %，及び9.82 %となっている。代表例として，結合効率75 %の場合のR_{eff}とAR及びFBG反射率の関係グラフを図10に示した。例えばAR反射率を一定にしてFBGの変化を追ってみると，R_{eff}の変化は右上がりのカーブとなり，逆にFBGを一定にしてARの変化を追ってみるとARが大きい順で右下がりとなることがわかる。また，同じレベルのR_{eff}に対して，いくつかのARとFBG反射率の組パターンがあることもわかった。実際にレーザチップをARコートする際，ある値を狙ってレーザチップを製造するので，FBGの反射率をどの程度にすれば良いかを知りたい。次節では上記のR_{eff}をAR反射率の代わりに図2に示したモデルでレーザの出力パワーの最適化を求める方法について説明する。

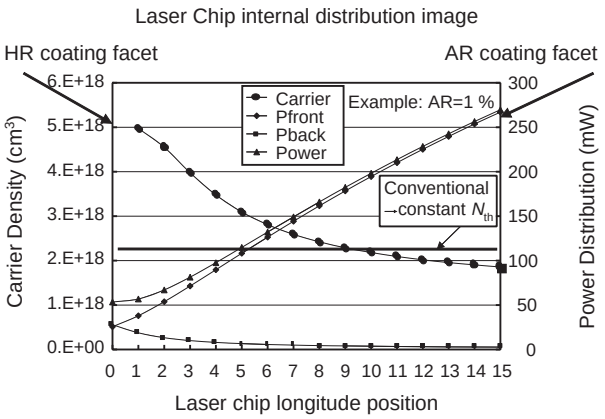

図11　レーザ素子内部キャリア密度とパワーの分布様子
Distribution of carrier density and internal power in the propagation direction of the laser element

8. SHBを考慮した出力パワーの計算結果

EDFA用ポンプレーザでは出力パワーを出来るだけ大きく取り出すことが最も重要である。レーザ素子の前端面反射率を小さく抑え，後端面にHR膜をコートすることにより大きなパワーを前端面から取り出す方法が最も多く使われている。これは前端面反射率に対する出力パワーが単調的に増加する特性があるからである。しかし，実際には光が大きく出力されることはレーザ内部の電子密度が大きく消費されていることを意味する。つまり前端面では大出力，小キャリア密度，後端面では小さな出力である反面大きなキャリア密度を有することとなる。一方，レーザ電極から均一に注入されたキャリア（電流）がレーザ素子の長手軸方向全体に渡って電子-光子変換過程を起こしているため，両端面付近ではキャリア密度が端面反射率に依存して軸方向に分布が不均一となる。このため，空間的なホールバーニングが発生し，この現象に伴うレーザ前端面の出力が反射率に対して飽和する現象が現れる[5)～7)]。したがって，最大の出力パワーを得るためには最適な反射率（AR反射率）が存在する。更に，図2に示したようにFBGを付けて複合共振器を構成する場合，前端面反射率は等価的な反射率R_{eff}となるため，結局最適な反射率はこのR_{eff}に対応することとなる。前節に述べたように，あるR_{eff}の値に対していくつのARとFBG反射率の組合せがあるため，ARが決めればFBGを選ぶだけで最適化することが可能であることを意味する。**図11**に示したグラフは左右両軸でそれぞれレーザ素子の前後出射端面を模擬して，前端面とAR膜までの光パワー分布とキャリア密度分布を示したものである。SHB効果を考慮しない場合レーザ発振閾値条件から求めたキャリア密度N_{th}が一定である計算を従来方法と呼ぶことにする。図11から明らかにSHB効果によって消費されたキャリアの分布が不均一となっていることがわかる。図に打点してあるP_{front}及びP_{back}はそれぞれレーザの前端面及び後端面の出力パワーである。パワーはP_{front}及びP_{back}との足しあわせである。この計算からレーザ前端面AR反射率の最適化だけでなく，端面出力強度のレベルがわかるので端面密度から破壊強度を求めることも可能である。**図12**は結合効率75％における従来方法とSHBを考慮した手法の出力パワーと前端面反射率（AR又はR_{eff}）の関係を示したものである。

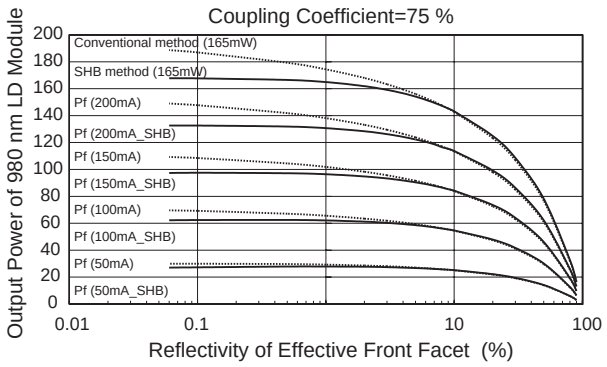

図12　従来とSHB方法によるパワー出力比較（結合効率75％）
Comparison of conventional and SHB methods for output power analysis

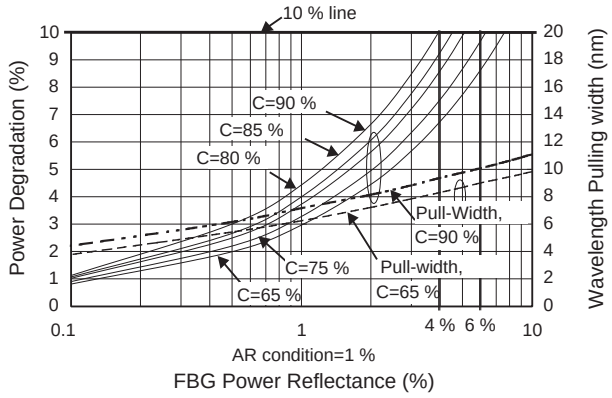

図13　AR 1％で，FBG反射率に対する引込み幅及びパワー低下率と結合効率との関係図
Pulling width, power degradation percentage and coupling efficiency relative to FBG reflectivity where AR=1 %

従来計算では前端面反射率が小さくなるにつれて出力が単調的に増加するのに対し，SHBを考慮した計算では明らかに出力パワーはある前端面反射率で飽和し始めることがわかった。この飽和する直前の前端面反射率が最適値となる。したがって，前端面反射率（AR反射率）の代わりにR_{eff}を用いてSHB方法で計算するとFBG付きレーザモジュールの出力パワーを見積もることが出来る。これにより，ある AR反射率に対する最適なFBG反射率を割り出すことが可能で，FBGがない場合と比較してそのパワー低下率及び引込み幅と結合効率等の関係を結び付けることで，最適設計を行うことができる。AR反射率が低い場合引込み幅が広くとれることと，FBGなしでも最大の出力が得られることなどから，AR=1％として計算した結果を**図13**に示した。図13は重要な設計指針を与えるもので，最適化設計の流れはまず出力パワーが飽和しないぎりぎりのところのAR反射率を決め，これに対応する図13のようなグラフから引込み幅，パワー低下率を考慮しながらFBG反射率を決めてレーザモジュールを製造する。図13の例を取るとFBG波長は979 nmで，レーザ素子の電流に対する利得ピーク波長の限界値は，引込み幅を8 nm～10 nmにしたい場合，短波長では970 nm，長波長側では988 nmとなる。このときパワー低下率10％を限界と設定すると，YAG溶接固定による結合効率のばらつきを65％～90％と想定しておのずとFBGの使える反射率範囲が4％～6％となる。

表1　ARとFBGの反射率組合せによる引込み幅の値
Pulling width values of different AR and FBG reflectivity combinations

AR反射率 / FBG反射率	1 %	5 %	ARによる差
6 %	9.5 nm	8.02 nm	1.48 nm
10 %	10.5 nm	8.9 nm	1.6 nm
FBGによる差	1 nm	0.88 nm	

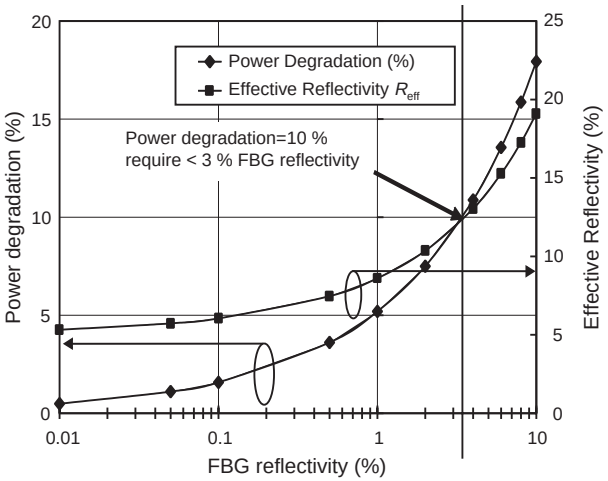

図14　AR=5 %，FBG反射率とR_{eff}とパワー低下率との関係
Relationship of FBG, power degradation and effective reflectivity (R_{eff}) under AR=5 % condition

9. まとめ

引込み幅を大きくするためにはAR反射率を小さくする方法とFBG反射率を大きくする方法がある。**表1**は主なレーザチップAR及びFBGの反射率を比較したものである。いずれもARを下げたほうが比較的広い引込み幅が得られることを示した。また図13において結合効率が高いほうのパワー低下率が大きくなるのは，R_{eff}が図3通り結合効率に比例しているからである。結合効率が大きいほうが高い出力が得られるので，結合効率を高くしたほうが良いことは言うまでもない。なお，比較のためAR=5 %での等価反射率とパワー低下率のグラフを**図14**に示した。一般的にはAR反射率が高くなると安定なFBGモード発振を得るためにはFBG反射率も高くする必要があり，図14からわかるように低下率を10 %以内に抑えるためにはFBG反射率を3 %程度とする必要があるが，安定なレーザ発振は難しくなるので，最適設計の観点から好ましくない。

以上の諸議論から，AR反射率とFBG反射率の最適選択によって引込み幅，パワー出力，パワー低下率などを最適化し，FBGの半値幅を*I-L*特性，出力パワーの安定性及びキンク電流などを総合的に考慮する必要がある。結論として，AR 1～2 %程度，FBG半値幅2 nm程度が妥当と考える。

10. おわりに

FBG付きポンプレーザの出力パワー最適化においては，考慮すべきパラメーターが多く，お互いに影響し合うため完全な最適化が難しい。本報告ではAR反射率，FBG反射率を中心に，安定な狭帯域（1 nm以内）波長範囲でFBGモード発振を起こさせるための設計コンセプトについて等価反射率モデル及び空間的なホールバーニング効果を考慮した最適設計のポイントについて説明した。この設計に基づき，今後特性の良いFBG付き980 nmポンプレーザを製造したいと考える。

参考文献

1）NE Jolley and F Davis, OAA, TuD6-1, pp.139-142, 1998.
2）Akira Mugino et.al. : IEICE, Autumn National Convention Record, C-3-105, 1997.
3）Akira Mugino et.al. : IEICE, Spring National Convention Record, C-4-16, 1998.
4）Akira Mugino et.al. : Technical report of IEICE, LQE-7, 1998.
5）Akira Mugino et.al. : IOOC/OFC'99, TuC4, pp.29-31, 1999.
6）Akira Mugino, (invited) Photonics East '99, Critical Reviews, CR73-09, Boston, 1999.
7）T. Higashi et al, IEEE J.QE Vol.29 No.6, pp.1918-1923, 1993.