ファイバグレーティングレーザのモードホッピング制御と 発振波長安定化

Mode Hopping Control and Lasing Wavelength Stabilization of Fiber Grating Lasers

> 橋 詰 直 樹 * 那 須 秀 行 ^{*2} Naoki Hashizume Hideyuki Nasu

概 要 ファイバグレーティングレーザの理論解析を行い,温度変化に対して発振波長を安定させ る条件をモードホッピング抑制の観点から検討した。半導体光増幅器チップ自身の縦モードに起因す る不規則で変化幅の大きいモードホッピングを除外するために,チップ前端面反射率を0.05%以下 に下げる必要がある。また,モードホッピングの抑制には,ホッピング周期を大きくしてモードホッ プフリーとする,又はホッピングの変化を小さくして波長変化幅を抑えるという2つのアプローチが あることを示した。

1. はじめに

異なる波長の光信号を1本の光ファイバで多重伝送して光フ ァイバの帯域を有効に利用する光波長分割多重(WDM: wavelength division multiplexing)伝送システムは,伝送容量 を増大できるだけでなく,波長制御により送信先を選択できる 光波長ルーティング機能など柔軟なネットワーク構成が可能で あることから,その実用化に大きな期待がかけられている。 WDMシステムで光源として使用されるレーザには高い波長選 択性と高い波長安定性が要求され,通常は分布帰還型(DFB: distributed feedback)の半導体レーザが用いられる。しかしな がら,現状では波長選別仕様のDFBレーザは高価である。そ の理由は,発振波長が温度や注入電流に大きく依存するために レーザモジュール単位での波長選別がいまだ容易ではなく,結 果として製造歩留りが悪くなってしまうためである。

このDFB レーザの代替光源としてファイバグレーティング レーザ(FGL: fibergrating laser)が注目されている¹⁾⁻⁴。FGL は図1に示すように,一端に高反射(HR: high-reflection)膜, もう一端に無反射(AR: anti-reflection)あるいは低反射膜を施 した半導体光増幅器(SOA: semiconductor optical amplifier) に,外部反射鏡としてファイバブラッググレーティング (FBG: fiber Bragg grating)を組み合わせた,一種の分布ブラ ッグ反射型(DBR: distributed Bragg reflector)レーザである。 ブラッグ波長近傍の光のみを反射するFBGの特徴から,FGL は波長選択性が高く,かつ,波長の選択はFBGの選別により 実現が可能である。DFBレーザを発振波長で選別するよりも FBGのブラッグ波長を選別するほうがずっと安価ですむため に,光源の低コスト化が期待できる。また,屈折率の温度変化 率や線膨張係数は一般に石英ガラスのほうがはるかに小さいた め,DFBレーザに比べて波長の温度依存性が小さいという利 点もある。一方でFGLは外部共振構造のレーザであるため温 度変化時のモードホッピング等により発振波長が不安定になる 懸念があり,実際のWDMシステムへの適用に向けては,その 特性を理論と実験の両面から詳細に把握していく必要がある。

FGLのモードホッピングを問題にする際,SOA前端面のAR 膜反射率は特に重要なパラメータで,光出力対電流特性(LI 特性)に現れるモードホッピング起因のキンクを避けるために は反射率を0.01%まで下げなければならないという実験報告が ある⁹。そこで本研究では,FGLのモードホッピングを理論的 に解析してLD前端面AR膜反射率がモードホッピングに与え る影響を検討し,モードホッピングを抑制して発振波長を安定 化するための指針を探ることを目的とした。FGLの理論解析 はこれまでにもいくつか報告されているが,発振波長安定化と いう観点からAR反射率の影響について議論された例はほとん どなかった。



図1 ファイバグレーティングレーザの概念図 Schematic of a fiber grating laser

— 7 —

^{*} 横浜研究所 基盤技術センター

^{*2} 横浜研究所 WA チーム

2. モードホッピング

図2にモードホッピングの典型的なグラフを示す。半導体レ ーザでは通常温度が変わると共振器長の変化に伴って共振波長 がシフトし、その結果発振波長が温度依存性を持つようになる。 一方利得スペクトルの中心波長も温度変化に伴い変化するが、 これらの変化率に差があると、レーザ発振モードが隣りの共振 縦モードに急に飛び移る現象、すなわちモードホッピングが起 こる。これを繰り返すとレーザ発振波長の温度依存性は図2の ように周期的に変動するグラフとなる。

このモードホッピングは図2中にも示した4つの量で特徴付 けられる。

1つはモードホッピングの際の波長間隔 $\Delta\lambda$,これはFGL共振器の縦モード間隔に相当する。レーザの発振波長を λ ,レーザ共振器の総光学長を L_{total} とすると

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2L_{\text{total}}} \tag{1}$$

である。

2つめはレーザ発振波長の傾きη,これは共振器縦モードの 温度変化率に当たる。レーザ共振器の総光学長についての線膨 張係数αを使って

$$\eta = \lambda \alpha \tag{2}$$

と表される。

3つめはグラフ全体の平均的な傾き η_{av} , これは利得スペクトル中心波長の温度変化率に当たるが, FGLにおいては実質的にはFBG プラッグ波長の温度変化率, すなわち

$$\eta_{\rm av} = \lambda \alpha_{\rm g} \tag{3}$$

となる。ここで α_{g} はFBGの線膨張係数である。

4つめはモードホッピングの起こる周期△Tで,単純なモデ ルでは

$$\Delta T = \frac{\Delta \lambda}{|\eta - \eta_{\rm av}|} \tag{4}$$

で計算される。

3. 解析モデル

本件における解析モデルは図3で示すような波長1.5 µm帯で 単ーモード発振するFGLである。SOA長600 µm,SOA前端面 とFBG端面とのギャップ10 µm,FBGの端から回折格子まで の間の回折格子のない光ファイバ部分の長さ0.1 mm,FBGプ ラッグ波長1545 nm,ピーク反射率20%,反射率半値全幅0.1 nm,FBG端反射率0.01%,FBGへの結合効率50%としている。 SOA後端面のHR膜反射率は90%,前端面のAR膜反射率は 0.01%から5%まで変化させて計算した。解析はトランスファ ーマトリックス法を用いて,複合共振器内のすべての反射を考 慮に入れた計算を行った。



Temperature





4. AR 膜反射率の影響

図4で示したグラフはAR 膜反射率を0.01%,0.1%,1%, 2%と変えたときのモードホッピングの様子の違いである。こ こではレーザの使用温度範囲を0 ~50 とした。発振波長の 温度依存性は,反射率が0.01%では典型的な周期的モードホッ ピングの形をしているが,反射率を上げていくとモードホッピ ングの周期性が乱れて不規則になり,波長飛びも大きくなって いくのがわかる。この系では反射率が0.05%で既にグラフに乱 れが見られることがわかった。

このメカニズムを考えるために,同じくAR膜反射率を変え ていったときの,共振器を一周する際の周回位相のグラフを図 5に示す。位相が0となる波長が共振器の縦モードとなる。反 射率0.01%では位相曲線は総共振器長の縦モード間隔の周期で 振動していて頻繁に横軸を横切るが,反射率が高くなっていく と振動が収斂していき,より大きい別の周期が現れてくる。こ の周期は実はSOAを単独の共振器とした縦モード間隔に相当 する。つまり,AR膜反射率が上がるとSOA自体の縦モードが 支配的になっていくということがわかる。

つぎに,図6にAR膜反射率を変えていったときのFGL外部 共振鏡の実効的な反射率及び共振器縦モードの波長と対応する しきい値利得を表す。共振器縦モードのうち,しきい値利得が 最も小さい波長がレーザ発振のモードとなる。AR膜反射率 0.01%ではレーザ発振モードと他の縦モードでは倍以上の利得 差がついているが,反射率が上がるに従って縦モードの数が減 り,また実効反射率が底上げされていくので利得差もなくなっ ていく。反射率2%ではしきい値利得がほぼ等しい3つの縦モ ードが残るが,この状況ではレーザ発振モードが容易に推移す るのでモードホッピングが起きやすく,しかもホッピングの波 長飛び幅も大きくなることがわかる。



図4 AR 膜反射率を変えたときの FGL 発振波長温度依存性の違い Lasing wavelength vs temperature at several reflectivities of the SOA front facet





以上まとめると, SOA前端面のAR反射率が上がるとSOA縦 モードの影響が現れてくるが, SOA縦モードの間隔が大きい ためにモードホッピングの変化幅が大きくなり,更に,各縦モ ードのしきい値利得にあまり差がつかないのでモードホッピン グ自体が起こりやすくなり,発振波長が不安定となってしまう。 このSOA縦モードの影響を避けるにはAR膜反射率を0.05%以 下まで下げなければならないことが数値計算によりわかった。 このことは先に述べた,LI特性のキンクをなくすためには反 射率を0.01%まで下げなければなければならない,という実験 報告をよく説明している。

5. モードホッピング抑制の指針

上で述べた方針に従ってSOA縦モードを抑制すれば不規則 なホッピングはなくなり,図2で示したような典型的なモード ホッピングとなる。SOA縦モードが抑制されている状況下に おいて,更にモードホッピングの制御を検討すると,これには 以下の2つのアプローチが考えられる。

 モードホップの周期△Tを非常に大きくとって,使用温 度範囲でホッピングが一度も起こらないような状況を作 る。言い換えればモードホップの「頻度」を減少させると いうアプローチである。具体的には,FBGの線膨張係数 を実装により制御して,共振器縦モードとFBGの温度変 化率を合わせる。

2) モードホッピングは許容するが全体的な傾き η_{av}と波長 飛び幅Δλを小さく抑えて,使用温度範囲でのトータルの 波長変化を所定の値以下に抑える。これは先の「頻度」に 対して,モードホップの「変化」を減少させるというアプ ローチである。具体的には,温度無依存のFBGを用意し て,かつレーザの総共振器長を長くして縦モード間隔を狭 める。

図7に具体的な数値例を示す。ここでも使用温度範囲を0 ~50 とする。第1のアプローチでやるならば,FBG ブラッ グ波長の温度変化率を実装によって0.09 ± 0.005 nm/ に制御 する,という厳しい条件が課せられる。第2のアプローチのほ うは,許容波長幅を0.1 nm以下と設定すると,FBG温度変化 率を0.0015 nm/ 以下に下げて,かつFBGの端から回折格子 までの間の光ファイバ長を100 mmまで長くすれば達成可能で ある。温度係数を制御したFBGよりも温度無依存FBGのほう



図6 AR 膜反射率を変えたときの FGL 実効反射率と各縦モードにおけるしきい値利得 Effective reflectivity and modal threshold gain of FGL at several reflectivities of the SOA front facet



図7 FGL発振波長安定化の2つの手法 Two approaches of lasing wavelength stabilization of FGL

が一般には選択肢が多いため,後者のほうが達成は容易である。

6. おわりに

ここに本報告を総括する。

ファイバグレーティングのモードホッピングを理論解析し, 発振波長安定化の指針をモードホッピング抑制の観点から検討 した。半導体光増幅器チップ前端面のAR膜反射率がモードホ ッピングに与える影響を調べたところ,チップ自身を共振器と した縦モードの影響が顕著になると発振波長が不安定になるた め,これを除外するためにAR膜反射率を0.05%以下に下げな ければならないという,過去の実験報告と矛盾しない結果が得 られた。また,モードホッピングの抑制には,ホッピング周期 を大きくして仕様温度範囲内でのモードホッピングを排除す る,又はホッピングの変化を小さくして仕様温度範囲内での波 長変化幅を抑える,という2つのアプローチがあることを示し た。

参考文献

- 1) J-L. Archambault and S.G. Grubb: J. Lightwave Tech. 15 (1997) 1378.
- 2) T. Kato, T. Takagi, A. Hamakawa, K. Iwai and G. Sasaki: IEICE Trans. Electron. E82-C (1999) 357.
- 3) 那須, 大村: レーザー研究 27 (1999) 51.
- 4) F.N. Timofeev, P. Bayvel, V. Mikhailov, O.A. Lavrova, R. Wyatt, R. Kashyap, M. Robertson and J.E. Midwinter: Electron. Lett. 33 (1997) 1406.
- 5) R.J. Campbell, J.R. Armitage, G. Sherlock, D.L. Williams, R. Payne, M. Robertson and R. Wyatt: Electron. Lett. 32 (1996) 119.

— 10 —