

コアエッチ型DRレーザを用いた狭線幅波長可変光源

Narrow Linewidth Tunable Light Source with Etched Core DR Laser

清田和明 *¹
Kazuaki Kiyota

小林 剛 *²
Go Kobayashi

奥山俊介 *¹
Shunsuke Okuyama

木本竜也 *²
Tatsuya Kimoto

〈概要〉

デジタルコヒーレント通信においては信号光源と復調用局所発振光源の双方に狭スペクトル線幅が要求される。線幅特性を改善するために、従来のDFB(分布帰還)レーザにDBR(分布ブラッグ反射)ミラーを組み合わせたDRレーザを用いることが有望である。DRレーザのDBRとして導波路コアである活性層自体を周期的に加工したコアエッチ型のものを用いる構成を考案した。このコアエッチ型DRレーザを広帯域波長可変光源のレーザ部分に適用することで、線幅150 kHz以下を得た。

1. はじめに

個人をネットワーク上でつなげるSNSを多くの人が用いるようになり、VODなどコンテンツ提供も通信ベースで行われることが一般的となった昨今、社会の利便性における通信速度向上の重要性はこれまで以上に増している。通信の基幹部では、デジタルコヒーレント伝送を用いた光通信が用いられる。デジタルコヒーレント伝送とは、光の波としての性質を利用し、位相状態までを用いて通信を行う手法である。この方式によって、通信の感度が向上するほか、強度と位相を組み合わせた多値の変調フォーマットを使用することが可能になり、これが通信の高速化に寄与する。

変調の多値度を上げることでシンボルあたりの情報量を増やすことができる。例えば、4値の位相変調であるQPSK(4値位相シフトキーイング)は1シンボルにつき2ビット、16値の振幅位相変調である16QAM(16値直角位相振幅変調)は1シンボルにつき4ビット、64値の振幅位相変調である64QAM(64値直角位相振幅変調)は1シンボルにつき6ビットの伝送が可能である。一方でこのように多値度を増やすと、符号同士の間隔が小さくなるため、少しの雑音も通信のエラー率に影響するようになる。

デジタルコヒーレント伝送では送信側に信号光源、受信側に局所発振(ローカルオシレータ)光源と呼ばれる2つのレーザを用いる。信号光源に強度と位相の変調を掛けて送信し、それを受信側で局所発振光源の光と干渉させることによって強度と位相の復調を行うことができる。これら2つのレーザの光の位相が揺らぐと、信号の位相の雑音になってエラーの原因となる。このため、これらのレーザには高い周波数安定度が求められる(位相の時間微分が周波数であり、位相安定は周波数安定と一

対一の関係がある)。この周波数安定度を示す指標がレーザのスペクトル線幅であり、線幅が狭いほど周波数純度が高く良好な特性である。

当社では既にデジタルコヒーレント伝送用途として狭線幅の光源を製品化してきた^{1)~3)}。近年、基幹系通信用途の光源としては波長多重を前提として通信帯域内の任意の波長を選択して動作させられる波長可変光源を用いるのが通例となっている。したがってこれらの狭線幅光源は波長可変機能を有するように設計され、ITLA(Integrable Tunable Laser Assembly)あるいはその小型版のmicro ITLAと呼ばれる制御回路付き波長可変レーザモジュールに搭載されている(図1)。



図1 micro ITLA

伝送方式の多値化のために、これまで以上の狭線幅が光源に求められる。そこで、狭線幅を実現できるレーザとしてDR(Distributed Reflector)レーザと呼ばれる構造を用い、それを波長可変光源に適用した⁴⁾。本論文ではそのDRレーザの設計と波長可変光源の特性について報告する。

2. コアエッチ型DBRを用いたDRレーザ

2.1 DRレーザの一般的な概念

DRレーザは初め東京工業大学によって提案された構造で⁵⁾、DFB(Distributed Feed-Back)レーザとDBR(Distributed Bragg Reflector)ミラーを組み合わせたものである。

*¹ 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

*² ファイテル製品事業部門 半導体デバイス部

DFBレーザはレーザの活性領域に回折格子を有する構造である。DFBレーザでは回折格子の周期に対応した波長にストップバンドと呼ばれる光が反射される帯域が形成され、その近傍でレーザ発振が起こる。所望の波長で安定した単一モード発振を得るためには反射同士の間を整合させる位相シフトが必要であり、この位相シフトをレーザの中央付近に設けた $\lambda/4$ シフト構造と呼ばれる構造がよく用いられる。 $\lambda/4$ シフト構造のDFBレーザでは光出力が前後対称となり、後方に出力される光は通常用いることができないので無駄になる(図2上)。一方、 $\lambda/4$ シフト構造ではなく、後端面の高反射コーティングによるミラー反射と位相シフトなしDFBの反射の間のできる位相シフトを用いて単一モード発振を得ることもできる。この場合は前後非対称な光出力を得ることができるが、端面の反射位相はウェハプロセスではなく劈開によって決まるため、作製時に制御することは実質的に不可能で、どのような位相シフト量の設計になるかは確率的に決まる。単一のレーザ素子では作製後に良好な特性を有するものを選別することも可能であるが、複数の素子を集積した集積素子に確率的に不良品が生じる構造を採用することは難しい。

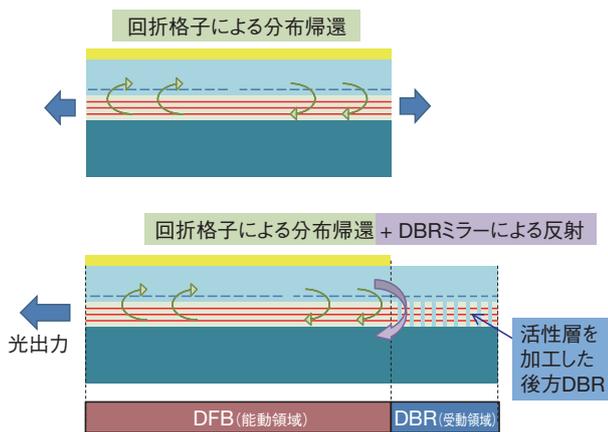


図2 $\lambda/4$ シフト構造のDFBレーザ(上)とDRレーザ(下)の模式図
Schematic of DFB laser (upper) and DR laser (lower).

DRレーザでは、DFB領域の後方にDBRミラーを配置する(図2下)。DBRミラーはDFBと同様に回折格子を有する構造であるが、発光させるための活性領域ではなく、電流注入を行わない受動領域である。端面の高反射コーティングではなくウェハプロセスで形成できるDBRミラーを用いることにより、確定した設計で後端面側に高反射のミラーを配置することがで

きる。このため、DRレーザでは $\lambda/4$ シフト構造のDFBレーザよりも優れた特性を、集積素子に適した高い歩留まりで実現することができる。

レーザを狭線幅にするためには、後ほど述べるように、レーザのしきい値利得を小さくすることが必要である。DFBレーザでは位相シフトから離れるほど光分布が指数関数的に減衰するが、回折格子の結合係数 κ と呼ばれる値を大きくするとこの減衰の度合いは大きくなる。このため、結合係数と長さの積 κL を大きくすると端面での光分布を小さくして等価的な反射率を上げ、ミラー損失を下げることができる。ところが、 κL を大きくしすぎると所望のモードの光分布が極端になって、位相シフトから離れた領域だけでレーザ発振が起こるモードが発生し、単一モード性が悪化する。このため、単一モード性を維持するためには κL に上限が存在する。

一方DRレーザでは、前方の等価的な反射率はDFBレーザと同様に決まるが、後方の反射率はDBRミラーによって決定できる。 κL の上限がDFBレーザと変わらなかったとしても、後方はDBRミラーの高い反射率を利用できるのでミラー損失を小さくできる。このため、狭線幅のためにはDRレーザが有望である。

2.2 コアエッチ型DBRを用いたDRレーザ

今回提案したDRレーザの構造は、図2下の模式図に示すものである。特徴的なことは、DBRミラーとして活性層と同一の導波路コアを周期的に加工したコアエッチ型のDBRを用いていることである。GaInAsPからなる導波路コアがエッチングにより除去された部分にはクラッド材料であるInPが埋め込まれている。一方、電流を注入するDFBの領域は従来のDFBレーザと同様に連続的な活性層が導波路コアとして存在し、その近傍に回折格子を有する。

この構造では、周期的な構造を有する導波路コアそのものがDBRの回折格子として動作する。コア材料とクラッド材料の大きな屈折率差によりDBR領域における回折格子の結合係数 κ を非常に大きくすることができる。このため、短いDBRで高い反射率が得られる上、反射帯域を広くすることができる。

このDRレーザはDBRの領域とDFBの領域で大きく異なる構造を有するので、それに適した製法が必要となる(図3)。まず活性層と近傍の回折格子層を面内様に結晶成長により形成する。その後、DFB領域とDBR領域の両方の周期的なパターンを同時にリソグラフィーによりパターンニングする。そのマスクパターンを用いて、浅いエッチングで回折格子層をエッチングする。この段階でDFB領域の回折格子が周期的に加工される。さらに、DFB領域のみを別のマスクで覆って保護し、DBR領域のみを追加してエッチングする。この追加のエッチングを活性層に達するまで深く行うことにより、DBR領域で

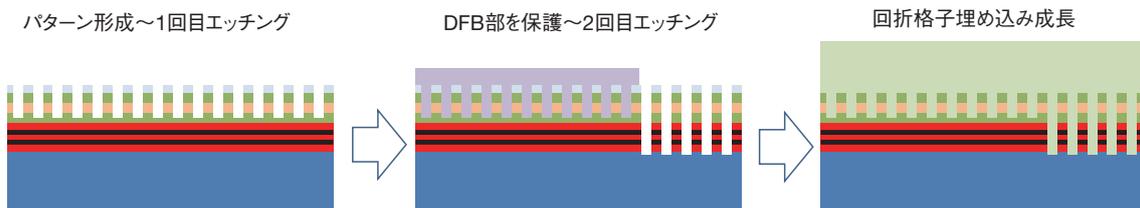


図3 DRレーザの回折格子部分の製法
Manufacturing process of diffraction grating of DR laser.

はコアをエッチングした形状が形成される。マスクを除去してInPによって埋め込む以降は従来のDFBレーザの製法と同様である。この製法では、DFB領域とDBR領域のパターンを同時に形成するので、両者の位相ずれが起こらない。

活性層をエッチングにより周期的に加工したDRレーザは東京工業大学でも研究されている⁶⁾が、今回提案したDRレーザがそれと異なる点は、DFB領域は連続的な活性層を有すること、埋め込み後の上部にコア材料のGaInAsPを形成しないことである。

前者の、DFB領域(連続活性層)とDBR領域(コアエッチ)で大きく異なる構造を用いることは、狭線幅のDRレーザを設計するために必要な構成である。DRレーザではDFB領域のみに電流を注入するので、電流注入の発熱による屈折率変化が主にDFB領域のみで起こる。このため、駆動条件に応じたDFB領域とDBR領域の屈折率のずれが生じやすい。そこで、屈折率変化によってDFBとDBRの波長特性がずれたとしても良好な反射が得られるようにDBR領域の反射帯域を広くすることが好ましい。このためにはDBRをコアエッチ型とすることが有効である。一方で、DFB領域は可能な限り長い構造とすることが好ましい。これは、単一モード性を維持するための κL の制約の下では、狭線幅のための低しきい値利得はDFB領域が長いほど得やすいためである。長い構造で κL を一定に保つためには κ をある程度低くしなければならないので、DFB領域はDBR領域よりも大幅に κ を小さくすることが必要であり、コアエッチ型ではなくコア近傍の回折格子を用いることが有利である。以上のDFB領域とDBR領域の両者に求められる特性を考慮すると、狭線幅レーザとして用いるためにはDFB領域とDBR領域の構造を分けることが必要である。

後者のDBR埋め込み後にコア層を形成しないことは、前述の製法上、埋め込み後の上部にコア材料を形成するとDFB領域の回折格子近傍にも同様の層が形成されて不都合なためである。これによってDBR領域は低屈折率部分に導波構造が存在しない純粋なコアエッチ型のDBRとなるので、加工後の上部にコアを形成する場合はDBRの設計が異なってくる。次の節ではそのDBRの設計について述べる。

2.3 コアエッチ型DBRの反射特性

コアエッチ型のDBRは長手方向に導波路コアが存在しているところと存在していないところが交互に配置された構造である。このため、連続的な導波路コアの近傍に回折格子が配置された構造とは光学特性が異なることが予想される。

コア近傍の回折格子の場合、回折格子の存在による導波モードへの影響は軽微である。そこで、回折格子層の有無による導波モードの屈折率の差を屈折率の異なる2つの媒質が長手方向に交互にあるとして表現し、1次元解析手法を用いることで光学特性を計算することができる。この1次元解析手法としては、モード結合理論による方法や分離法がある^{7),8)}。前者は屈折率の周期的な摂動による前側に伝搬する光と後ろ側に伝搬する光の結合を扱うもので、既に述べてきた結合係数 κ は、このモード結合理論における結合の強さを表す量である。モード結合理論による回折格子の扱いはDFBレーザの設計によく用いられ、DFBとDBRを組み合わせたDRレーザでもこの手法を用いるとレーザ構造の設計が行いやすい。後者は異なる屈

折率の境界におけるフレネル反射の集合として計算を行うもので、多層膜DBRなどの設計によく用いられる。前者に比べて後者は、全ての反射点を考慮するために、計算量が多くなる一方で任意の構造が扱いやすく大きい屈折率差に適しているという利点がある。

これらの1次元解析手法は、長手方向以外の構造を反映することはできない。コアエッチ型DBR特有の、導波路コアが存在しない低屈折率部の存在を反映するためには多次元の解析が必要である。そこで、ここでは2次元FDTD(時間領域有限差分)法⁹⁾を用いて反射率の計算を行った。FDTD法はマクスウェル方程式を差分化して直接逐次計算する方法で、任意の構造の光学特性を仮定なく計算可能であり、特に反射を含む解析には有効である。半導体レーザの導波路構造では厚さ方向には波長以下の構造を有するが、幅方向には波長の数倍程度の構造である。そこで幅方向の依存性は無視して、長手方向と厚さ方向の2次元で計算を行うこととした。

解析モデルの一部(構造境界付近)を図4に示す。図の左半分がDFB領域に相当する連続導波路(ただし、この計算上では導波路近傍の回折格子はモデルに含めていない)、右半分にコアエッチDBRがある。計算領域の左端でパルス励起を行い、最初の入力パルスとそれに対して時間遅れがある反射パルスの電界を連続導波路において観察する。両者は時間的に分離できるので、それぞれをフーリエ変換して比(パワーの場合はその2乗)を取ることで反射率を求めることができる。

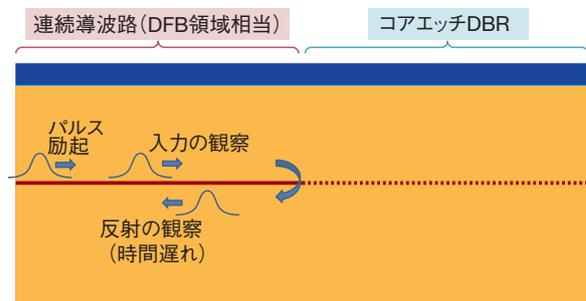


図4 2次元FDTD法によるDBR反射計算のモデル
Calculation model of DBR reflection by 2D-FDTD.

吸収損失が無い場合の反射率計算結果を図5に示す。DBRの長さは300 μm である。この結果から、DBRの反射帯域は明確に見えているが、それは波長に対して対称ではなく短波長側ほど反射率が低いものであることがわかる。通常1次元計算では吸収損失が無ければ波長に対して対称な反射が得られるため、この情報は2次元計算によって初めて得られるものである。この、波長に対して非対称な反射率の原因を考察するため、CW(連続光)で励起して電界の空間分布を出力したものを図6に示す。反射率が高い長波長側と反射率が低い短波長側のそれぞれについて、相当する周波数での励起を行った。図4に表示した解析モデルの図と同じ領域を切り出して表示しており、図の中心にDBRの開始位置がある。

この図から、長波長側ではコアエッチDBRに光が損失無く入り込んでいるが、短波長側ではDBR境界で大きい散乱損失

があることが見て取れる。すなわち、長波長側は低損失であるために反射率が高く、短波長側は高損失であるために反射率が低くなっている。

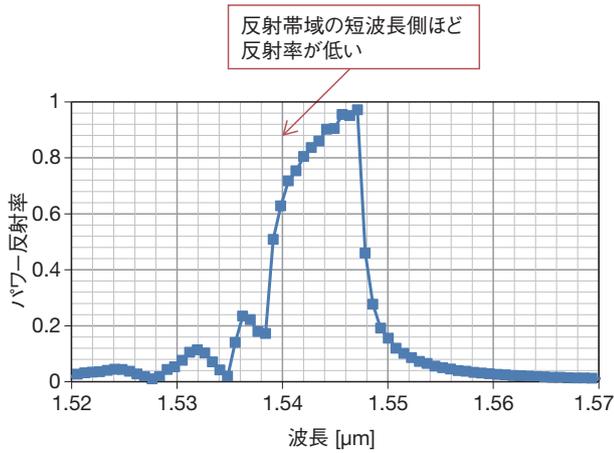


図5 2次元FDTD法による反射スペクトル
Reflection spectrum by 2D-FDTD.

この現象は次のように解釈できる。DBRの反射帯域内では、伝播方向の波数はブラッグ波数にほぼ固定される。このため、周波数が低い(真空中波長が長い)とモード屈折率が高く、周波数が高い(真空中波長が短い)とモード屈折率が低くなる。これは、周波数が低いときにはDBRの高屈折率部分に定在波が分布し、周波数が高いときにはDBRの低屈折率部分に定在波が分布することと関連している。

屈折率が高い場合、導波路の鉛直方向の光閉じ込めは連続導波路部分に近く、連続導波路とDBRでのモード形状の整合性は高くなる。一方、屈折率が低い場合には、導波路の鉛直方向

の光閉じ込めが緩くなる。このため、連続導波路とDBRでのモード形状の整合性が低くなって、両者の境界で大きい接続損失が発生すると考えられる。一方、短波長側の波数と周波数から考えた屈折率でもクラッドの屈折率よりも大きいので、伝播中の散乱損失は短波長においても存在しない。このため、損失はDBR内の伝播中ではなく、連続導波路とDBRの境界のみで起こっている。

さらに吸収損失を含む構造について計算を行った。DBRの長さは100 μmとした。ここでは1次元の解析法との比較も示す。吸収損失は、2次元FDTDについてはDBR領域のコア層のみに吸収を与えている。分離法では、DBR領域の高屈折率部に吸収を与えている。モード結合理論では以上の2方法のように長手方向の位置ごとの屈折率を与えるのは難しいので、一様な吸収損失を与えている。

計算で求めた反射率を図7に示す。モード結合理論では、吸収損失の空間分布を反映できない結果として、波長に対して対称な反射となっている。それに対して、分離法では反射帯域の長波長側で反射率が小さくなる様子が見られる。これは、反射帯域の長波長側は吸収損失がある高屈折率部分に定在波が分布するため、吸収損失が大きくなることによると考えられる。このような効果は、同じく活性層を加工したDBRを用いた文献⁶⁾でも紹介されている通りである。一方、2次元FDTD法で計算した反射スペクトルは、短波長側ほど反射率が小さくなっている。長波長側ほど吸収損失が大きくても、既に述べた反射帯域の短波長側の散乱損失の影響の方が顕著に現れているためにこのような反射スペクトルとなっていると考えられる。これは低屈折率部に導波路コアが無い本構造に特徴的なことであり、1次元の計算では得られない知見である。1次元の手法による計算に比べて、全体的に反射率は低い。レーザ設計においては、DBR境界での損失を考慮したモデル化が必要である。

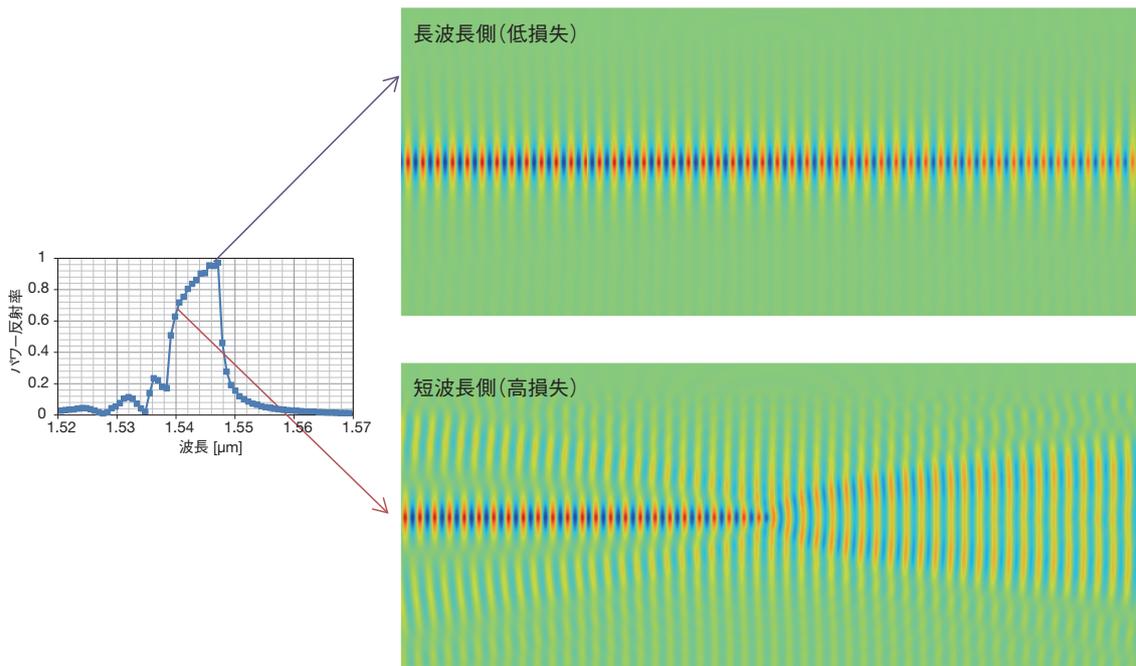


図6 DBR帯域の長波長側と短波長側でのDBR境界付近の電界分布
Electric field around DBR interface at longer wavelength region and shorter wavelength region of DBR reflection band.

実際に作製したDBRの反射スペクトルを調べるために、実験を行った。DRレーザと同一の作製方法で、DBR領域はDRレーザと同等でDFB領域の回折格子を無くして単なる発光領域とした試料を作製した。この試料に電流注入を行うと、発光領域から前方に伝搬する通常のASE (Amplified spontaneous emission; 増幅された自然放出) 光に加えて、後方に伝搬するASEがDBRで反射されて見える。このため、発光スペクトルにおいてDBRの反射スペクトルに対応した形を見ることができる。

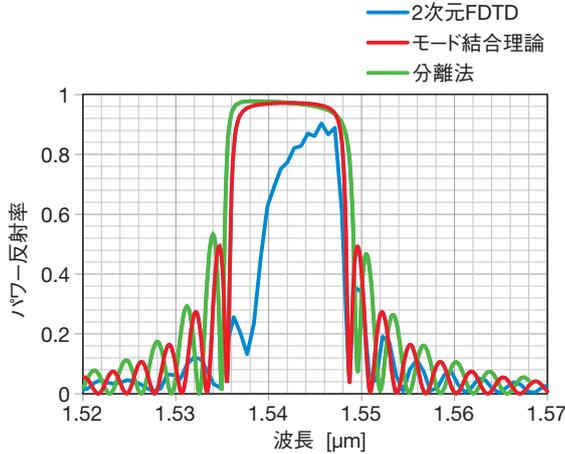


図7 吸収損失を含む構造の各種計算法による反射率の比較
Comparison of reflectance with absorption loss calculated by various methods.

測定したスペクトルを図8に示す。グラフの中央付近に見られる盛り上がり(peak)がDBR反射帯域に対応している。このスペクトル形状は波長に対して対称でなく、短波長側が緩やかに弱くなっている。これは、計算によって予測された反射スペクトルとよく一致している。

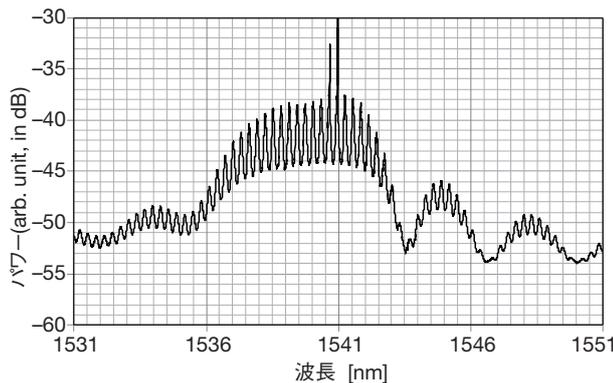


図8 DBR反射を有する構造のASEスペクトル
ASE spectrum of specimen with DBR reflection.

2.4 線幅特性の予測

半導体レーザのスペクトル線幅としては、Henryによる理論式がよく知られている^{8), 10), 11)}。それによれば、線幅は次の式で表される。

$$\Delta\nu = \frac{R_{sp}}{4\pi S} (1 + \alpha^2) = \frac{v_g^2 n_{sp} (\alpha_m + \alpha_i)^2}{4\pi \cdot (I - I_{th})} (1 + \alpha^2)$$

ここで、 S は共振器内のフォトン数であり、 R_{sp} は共振器に結合する自然放出の量である。しきい値利得($\alpha_m + \alpha_i$)を下げると、共振器内のフォトン数が増加する(相対的に雑音の影響が小さくなる)とともに、ノイズとなる自然放出の量が小さくなるという2つの効果によって線幅が小さくなる。 $(1 + \alpha^2)$ の係数は半導体レーザに特有で、1が自然放出光が直接位相を乱す効果、 α^2 が自然放出光による強度変化が屈折率変化を引き起こして共振器の周波数が変化する効果を表している。

DFBレーザやDRレーザでも大きな考え方の変化は無いが、さらに光の空間分布について考慮する必要がある。文献¹²⁾はDFBの結合波理論の式に自然放出のランジュバン力を導入することにより光のレート方程式を得ており、結果として得られるレーザ(単体)の線幅は、

$$\Delta\nu = \frac{R_{sp} K_z}{4\pi S_{av} V_{act}} (1 + \alpha_{eff}^2)$$

である。ここで、

$$R_{sp} = n_{sp} \Gamma g v_g$$

は時間あたりの利得に反転分布パラメータ n_{sp} を掛けたもので自然放出率(時間あたりの自然放出の数)、

$$K_z = \left[\frac{\int_0^L (|R_0^+|^2 + |R_0^-|^2) dz}{4 \int_0^L R_0^+ R_0^- dz} \right]^2$$

は縦ビーターマン係数Longitudinal Petermann factor (R_0^+ と R_0^- は自然放出の影響が無い定常状態におけるDFB中のそれぞれ前進波と後退波の振幅)、

$$S_{av} V_{act} = \frac{1}{h\nu_g} \int_0^L (|R_0^+|^2 + |R_0^-|^2) dz$$

は共振器内のフォトン数、

$$\alpha_{eff} = \frac{\alpha \chi' + \chi''}{\chi' - \alpha \chi''}$$

は実効的な線幅増大係数である。 χ' と χ'' は $\chi = \int_0^L \left(\frac{S_0(z)}{S_{av}} \right) \Gamma_2(z) dz$ のそれぞれ実部と虚部であり、 χ'' が0であれば α_{eff} は通常の線幅増大係数 α に等しくなる。

一方、我々の波長可変光源素子はSOAが集積されており、SOAからのASEにより線幅が増加する効果を考慮する必要がある。文献¹²⁾によると、SOAが集積されたDFB (DR) レーザの線幅は、DFBのパラメータの添字を1、SOAのパラメータの添字をa、Aを増幅率、DFB (DR) レーザとSOAの長さをそれぞれ L_d と L_a として、

$$\begin{aligned} \Delta\nu &= \frac{\Gamma_1 g_1 v_g n_{sp,1} K_z}{4\pi S_{av} V_{act}} (1 + \alpha_{eff}^2) \left[1 + \frac{A-1}{\ln(A)} \frac{L_a}{L_d} \frac{n_{sp,a} \Gamma_a g_a}{n_{sp,1} \Gamma_1 g_1} \alpha_r L_d \right] \\ &= \Delta\nu_0 \left[1 + \frac{A-1}{\ln(A)} \frac{n_{sp,a} \Gamma_a g_a}{n_{sp,1} \Gamma_1 g_1} \alpha_r L_d \right] \end{aligned}$$

となり、単体DFBの線幅 $\Delta\nu_0$ が[]内の第2項の割合だけ増加したように表現される。ここで、 α_r は

$$\alpha_r = \frac{|R_0^+(L_d)|^2 |t_2|^2}{\int_0^{L_d} (|R_0^+|^2 + |R_0^-|^2) dz}$$

(t_2 は端部でのASEの振幅結合効率)であり、前後対称な構造であれば $\alpha_m/2$ に $|t_2|^2$ を掛けた値と等しくなる値である。

以上に述べた式によってSOAを集積したDFB (DR) レーザの線幅を計算することができる。計算に必要な発振モードのしきい値利得と電界強度分布は、モード結合理論によって計算することができる。この際、前節の散乱損失をDBR境界に含めるようにモデル化する。

DRレーザの設計には位相シフトの位置やDFB領域の結合係数 κ などの自由度がある。DBRミラーによる特性改善を前方出力の向上に用いることも、線幅の低減に用いることもできる。ここでは後者に重点を置き、ミラー損失 α_m を下げて線幅を小さくする設計とした。計算した線幅を従来のDFBレーザと比較したものを図9に示す。DRレーザを導入することにより、DFBレーザに比べて線幅を半分程度にできると期待される。

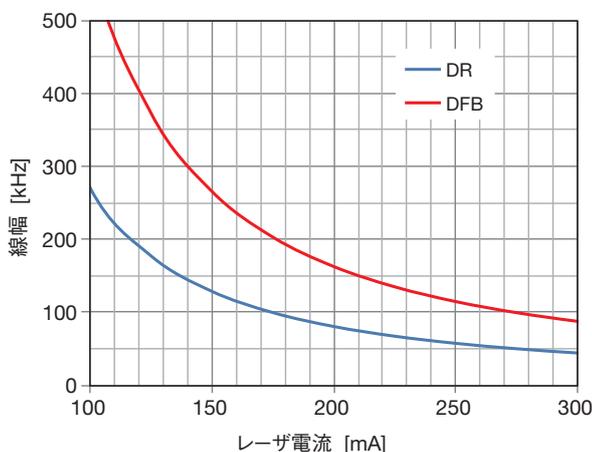


図9 スペクトル線幅の計算値
Calculated spectral linewidth.

3. DRレーザを集積した広帯域波長可変光源

3.1 作製した素子の構造

これまでに説明したDRレーザを集積して、波長可変光源を作製した。作製した素子の写真を図10に示す。

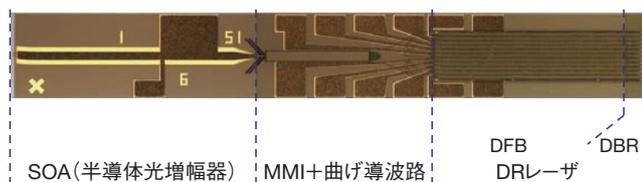


図10 作製した波長可変光源素子
Fabricated tunable light source chip.

波長可変光源素子の形態は当社でこれまでに作製してきたものと同様であり、それぞれ発振波長が異なる12本のレーザのア

レイ、それらからの光を導く曲げ導波路、光を合流させるMMIカプラ、光を増幅するSOA (半導体光増幅器) からなる。12本のレーザのいずれを用いるかを選択することで波長の粗調を行い、素子全体の温度をTEC (Thermo Electric Controller) で変化させることによりレーザ部の屈折率を変化させて波長の微調を行う。

レーザ部のレーザそれぞれをDRレーザとした。レーザの後方領域にはDBRがあり、その部分には半導体へのコンタクト電極は存在せず電流注入しない構造となっている。その点を除いては変更点が無く、これまでの波長可変光源素子との外見上の差はわずかである。

長距離通信の信号光源としては、1.55 μm 帯のC-bandとより長波のL-bandの2つの波長域の需要がある。それぞれに対応した素子を作製した。図11と図12に、C-bandとL-bandそれぞれの素子の12本のレーザのスペクトルを示す。スペクトルは光スペクトラムアナライザにより波長分解能0.1 nmで測定した。全てのレーザで良好な単一モード発振が得られている。

3.2 micro ITLAの特性

作製した素子を用いて図1の形態のmicro ITLAを作製した。

C-band用micro ITLAの特性を図13に示す。このmicro ITLAは光出力17 dBmとなるように駆動条件を設定した。素子上の12個ある各レーザについて温度条件を変えて用いるので、それぞれの条件について測定した点をプロットしている。

線幅については、DRレーザを用いた波長可変光源素子の他に同じウェハ中に比較用に作製したDFBレーザを用いた素子の結果を併せて記載した。DFBレーザを用いた素子では線幅が160 kHzから240 kHzなのに対して、DRレーザでは110 kHzから140 kHzと顕著に低い値が得られている。改善の幅は、計算によって予測された値に近い。

17 dBmという高い光出力が、400 mA程度までの低いSOA電流で得られている。EOL (End Of Life; 故障判定値の劣化時点での値) の消費電力は4.2 Wであった。

L-band用micro ITLAの特性を図14に示す。このmicro ITLAは光出力15.5 dBmとなるように駆動条件を設定した。

C-bandに比べて波長が長いL-bandでは、一般的に良好な特性を得ることが難しい。ところが、DRレーザを用いた素子では全ての波長可変域で150 kHz以下の線幅が得られている。

3.3 波長可変光源素子の信頼性

作製した波長可変光源素子の信頼性を高温エージング試験で評価した。15個の試料を実使用条件の6倍程度の加速条件となる温度でエージングした。レーザを定電流、SOAを定光出力条件で駆動し、SOA駆動電流の変化率を調べた。

図15に結果を示す。全ての素子はわずかな漸次劣化の傾向を示している。用いたDRレーザはDBR部分に活性層と同一材料のコアの加工を含むが、レーザの劣化を示唆するような異常な駆動電流変化は見られておらず、良好な信頼性が確保されていると言える。駆動電流変化率の故障判定値についての20年後のFIT数は50 FIT以下であった。

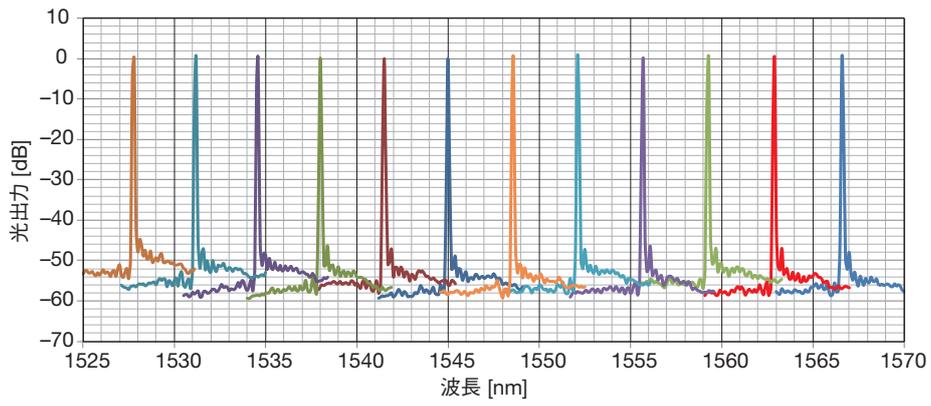


図11 C-band 波長可変光源素子の出力スペクトル
Output spectra of chip for C-band.

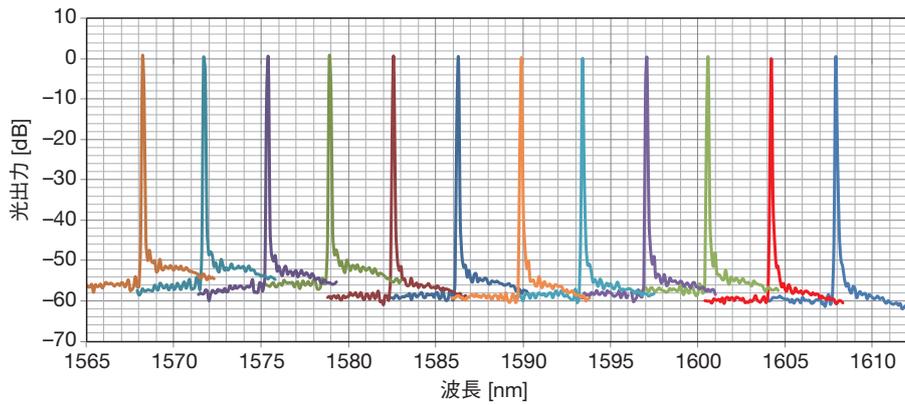


図12 L-band 波長可変光源素子の出力スペクトル
Output spectra of chip for L-band.

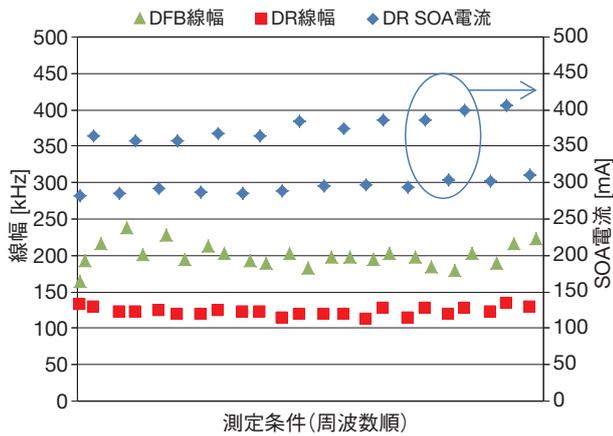


図13 C-band micro ITLA (光出力 17 dBm) の特性
Characteristics of micro ITLA (17 dBm optical output)
for C-band.

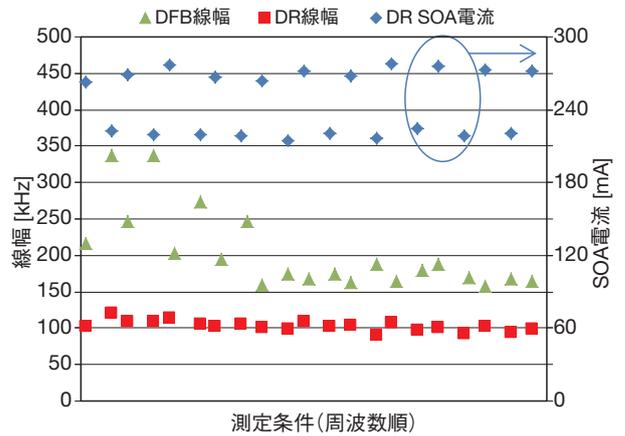


図14 L-band micro ITLA (光出力 15.5 dBm) の特性
Characteristics of micro ITLA (15.5 dBm optical output)
for L-band.

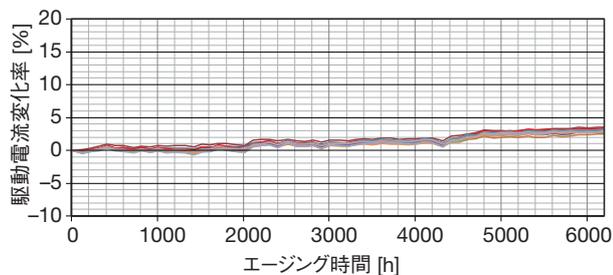


図15 波長可変光源素子のエージング試験結果
Aging result of tunable light source chip.

4. おわりに

デジタルコヒーレント通信用の狭スペクトル線幅光源として、コアエッチ型DBRを用いたDRレーザを考案し、波長可変光源に適用した。作製した素子をmicro ITLAに搭載し、C-bandでは光出力17 dBm、L-bandでは光出力15.5 dBmでいづれも線幅150 kHz以下を得た。この狭線幅は光通信のさらなる多値化のために有用である。

参考文献

- 1) 新製品紹介「狭線幅フルバンドチューナブルレーザ」, 古河電工時報 第129号 (2012).
- 2) 山本篤司, 岡庭武男, 屋富祖良貴, 西田昌義, 「光デジタルコヒーレント通信用小型ITLAの開発」, 古河電工時報 第134号 (2015).
- 3) T. Kimoto, G. Kobayashi, T. Kurobe, T. Mukaiharu, S. Ralph, "Narrow Linewidth Tunable DFB Laser Array for PDM-16QAM Transmission," The 18th OptoElectronics and Communications Conference, MK2-6 (2013).
- 4) G. Kobayashi, K. Kiyota, T. Kimoto, T. Mukaiharu, "Narrow linewidth tunable light source integrated with distributed reflector laser array," 37th Optical Fiber Communications Conference, Tu2H.2 (2014).
- 5) Kazuhiro Komori, Shigehisa Arai, Yasuharu Suematsu, Masahiro Aoki, Isamu Arima, "Proposal of Distributed Reflector (DR) Structure for High Efficiency Dynamic Single Mode (DSM) Lasers", Trans. IEICE, Vol. E71, No. 3, pp. 318-320 (1988).
- 6) Kazuya Ohira, Tomonori Murayama, Shigeo Tamura, Shigehisa Arai, "Low-Threshold and High-Efficiency Operation of Distributed Reflector Lasers With Width-Modulated Wirelike Active Regions," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., Vol. 11, No. 5, pp. 1162-1168 (2005).
- 7) 沼居貴陽, 「半導体レーザー工学の基礎」, 丸善株式会社 (1995).
- 8) 池上徹彦監修, 土屋治彦, 三上修編著, 「半導体フォトリクス工学」, コロナ社 (1995).
- 9) 宇野亨, 「FDTD法による電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社 (1998).
- 10) Charles H. Henry, "Theory of the Linewidth of Semiconductor Lasers", IEEE J. of Quantum Electron., Vol. QE-18, No. 2, pp. 259-264.
- 11) 伊賀健一編著, 「半導体レーザー」, オーム社 (1994).
- 12) Geert Morthier, "An Accurate Rate-Equation Description for DFB Lasers and Some Interesting Solutions," IEEE J. of Quantum Electron., Vol. 33, No. 2, pp. 231-237.
- 13) Geert Morthier and Bart Moeyersoon, "Intensity Noise and Linewidth of Laser Diodes With Integrated Semiconductor Optical Amplifier," IEEE Photonics Technol. Lett., Vol. 14, No. 12, pp. 1644-1646.