

外部共振器レーザ用曲り導波路型ゲインチップ

Curved Waveguide Gain Chip for External Cavity Laser

三瀬 一明 Kazuaki Mise, 山田 敦史 Atsushi Yamada, 森 浩 Hiroshi Mori, 中山 貴司 Takashi Nakayama

[要 旨] WDM 通信や次世代のフォトニックネットワークに必要な、外部共振器型波長可変レーザに用いられる曲り導波路型ゲインチップを開発した。片方の端面近傍で導波路が曲がって斜めに出射する曲り導波路構造を採用することで、帰還側の端面反射率 5×10^{-5} 以下を達成した。また、素子寿命の評価方法も検討し、曲り導波路部分が素子内部に位置するような代替構造を用いることで、チップ単体でもレーザ発振させることができ、素子本来の長寿命特性を確認することができた。

[Summary] We have developed a curved waveguide gain chip for an external cavity laser that can be used in WDM communications as well as next-generation photonic networks. The curved waveguide structure supports very low reflectivity of less than 5×10^{-5} for the angled facet. Furthermore, we have created an alternative structure for the reliability test in which both facets are normal and the curved region is at the chip center. Since this alternative chip can oscillate at the same threshold current as the external cavity laser, its long life is comparable to that of normal Fabry-Perot lasers.

1 まえがき

1.1 波長可変 LD とその用途

波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplex)通信では、安定して単一波長(単一縦モード)で発振する分布帰還型半導体レーザ(DFB-LD: Distributed Feedback Laser Diode)が信号光源として広く用いられている。DFB-LD は素子内部に形成された回折格子のピッチによって発振波長が決定されるので、わずかなピッチの異なる DFB-LD をチャンネル数だけ並べ、それぞれに精密な温度コントロールとエタロン等を用いた波長ロック機構を組み合わせることで、高密度で安定な波長多重光源を構成することができる。しかしながら、システムの信頼性を高めるためには各チャンネルにバックアップ用レーザを準備しておかねばならず、波長が固定的に作り込まれている DFB-LD ではチャンネルごとに専用のバックアップ用 LD を用意しておかなければならないため、コスト増の大きな原因となってきた。

これに対し、発振波長を任意に設定できる波長可変 LD があれば、多数のチャンネルのバックアップが 1 個の LD で済むことになり、大きなコスト削減効果が期待される。ここで波長可変 LD に要求される仕様は、使用される波長帯域(多くは C-band: 1530~1565nm, L-band: 1565~1625nm, または両者を合わせた C+L-band)をカバーする波長可変幅と DFB-LD と同等の光出力(+13dBm かそれ以上)であり、波長切替にかかる時間は秒単位でも良いとされる。

一方、インターネットトラフィックの伸びはとどまるところを知らず、光通信網の大容量化への要望は尽きない。この数年来、point to point は高密度 WDM の実用化によって大幅な大容量化が図られてきたが、現在ではノード部分における処理がボトルネックとなっている。そこで、今注目されているのが、任意の波長で信号を取り出したり追加したりできる ROADM: Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer であり、この装置にも、波長を任意に設定できる波長可変 LD が必要である。この用途でも、波長可変幅は C-band または L-band をカバーする範囲が要求される¹⁾。

1.2 モノリシックと外部共振器型

レーザは、対向する 2 枚の反射鏡と、両者を結ぶ光軸上に配置された光を増幅する光利得媒質から構成される。光利得媒質が半導体で、pn 接合によるダイオード構造を有しているものがレーザダイオード(LD)である。半導体で構成された光利得媒質は増幅できる波長帯域が広いことが特徴で、その結果 LD は多数の波長で同時に発振してしまう。そのため、回折格子などの波長選択性を有するデバイスを組み合わせるか、LD 内部に波長選択構造を作り込むことで発振波長を単一化したものが単一モード LD であり、上述した DFB-LD がその典型である。そして、単一化した波長をある波長帯域内で自由に変更できるものが波長可変 LD である。

波長可変 LD の構造は大きく分けて次の 2 種類がある。

- ・モノリシック型
- ・外部共振器型

以下に、それぞれの特徴について述べる。

1.2.1 モノリシック型波長可変 LD

モノリシック型波長可変 LD は、半導体基板上に形成された導波路の両端に反射鏡が形成されていて光がその内側でのみ往復し、波長制御機構のすべてをその半導体基板上に集積したものである。半導体基板上に一連の光導波路構造が形成され、その内部に光を発生させる活性層と、波長を選択する波長制御部が備わっている²⁾。

モノリシック型波長可変 LD における波長制御は、波長制御部の導波路屈折率を制御することで実現され、具体的には導波路内のキャリア密度を変えるか、導波路の温度を変えることで制御可能である³⁾。

しかしながら、モノリシック型波長可変 LD は 20 年以上に渡って世界中の企業や研究機関がさまざまな独自構造を提案しながら、未だ広く実用化されるに至っていない。その理由は、屈折率変化量自体があまり大きく取れない(キャリア変化で 1%程度、温度変化でも 2%以下)ために、十分な波長可変幅を得ようとすると素子構造が複雑となって、素子の製造歩留りが極端に低くなる上に駆動方法も煩雑化して扱いにくくなることが挙げられる。さらに、複雑な構成は素子の劣化が進んできた際に波長が突然大きく跳んでしまう危険性をはらんでおり、システム設計者に使用を躊躇させる原因ともなっている。そのため、原理的に波長跳びが生じない DFB-LD を並列に集積化した DFB アレイ型が WDM バックアップ用として一部で使用されている程度にとどまっている。

1.2.2 外部共振器型波長可変 LD

外部共振器型波長可変 LD は、反射鏡の少なくとも片方を半導体基板の外側に設け、波長制御機構の少なくとも一部を半導体導波路の外側に設置した光学部品によって構成された構造を有している⁴⁾。

最も代表的な構成は、半導体光増幅素子(SOA: Semiconductor Optical Amplifier, あるいは光学利得を有するチップという意味でゲインチップとも呼ばれる)と回折格子を組合せ、回折格子によって発振波長を単一化するとともに、回折格子を回転させることで発振波長を変化させる方式であるが、そのほかにも全反射ミラーとチューナブル光バンドパスフィルタを組合せた構成や、液晶チューナブルミラーを用いたもの、平面光波回路上にリング共振器を複数形成し部分的に加熱する方式などが提案されている。

外部共振器型の利点は、何と言っても波長可変幅が広いことである。回折格子を用いた方法で可変幅 200nm が実現しているほか、リング共振器を使った構成では可動部分なしでも 160nm の可変幅が得られている⁵⁾。

どのような構成を用いた場合でも、ゲインチップに要求されるのは、外部共振器を構成するために片方のチップ端面の反射率をできる限り低く抑えることである。この端面無反射化が不十分だと、共振器の内部に反射点を持つことになり、波長掃引時の波長跳びや多波長発振などの問題を引き起こす。端面に誘電体多層膜による低反射コーティングを施すことは広く知られているが、それでも反射率は 0.1%程度までの低減が限界である。これに対し、要求される仕様は 0.01% (10^{-4}) 以下であるため、さらにもう一桁の反射率低減を素子構造の工夫によって実現する必要がある。

次に、この端面反射率低減のための構造について説明する。

1.3 窓構造と曲り導波路構造

端面反射率を低減する構造として、これまで我々は「窓構造」と呼ばれる構造を採用してきた。この構造の模式図を図 1(a) に示す。

窓構造では、導波路のコアとなる活性層ストライプが端面より数十 μm 手前で途切れた構造となっており、活性層の先端から端面までのコアのない領域は窓領域と呼ばれる透明な領域である。活性層で生成され、導波されてきた光は窓領域で広がりながら伝搬していき端面に到達する(図中実線矢印)。端面から一部の光が反射され導波路へ戻って行くが、広がりながらのため光のほとんどは活性層に戻ることはなく(図中破線矢印)、活性層内での導波光と反射光との重ね合わせで定義される反射率はこの拡大効果により低減される。我々の作製してきた素子は、低反射コーティングと併せて反射率は 2×10^{-4} 以下を実現してきた。

しかし、窓構造では、反射率をさらに下げるためには窓領域長を長くするか、活性層への光閉じ込めを強くするなどの必要があり、設計上の限界に近づいていて、これ以上の改善は難しかった。

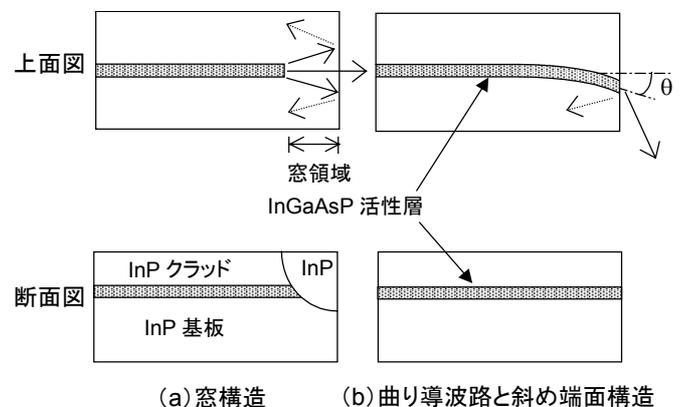


図 1 外部共振器型レーザ用ゲインチップの基本構造模式図
Schematics of gain chip structure for EC-LD

また、活性層端部に結晶の界面が存在するため、長期信頼性の点でも不利になると考えられた。

そこで、窓構造ではなく図 1 (b) に示すような斜め端面構造への転換を考えた。斜め端面構造では導波光が角度 θ をもって端面に斜めに入射するため、やはり反射光は活性層へ戻らず、反射率を低くすることができる。そして、角度を大きくすることで簡単に反射率を下げられる上、窓構造のような余分な結晶界面が存在せず、通常の半導体レーザと同程度の長期寿命が期待できる利点がある。これまで、主に海外メーカでこのような構造のゲインチップを製造しているメーカがあったが、それはリッジ型と呼ばれる導波構造を採用しており、高出力には不適であった。我々は、ファイバアンプ励起用レーザで長年実績を積んできた埋め込み型構造の技術を持っており、それを適用することで他社にない高性能なゲインチップを実現できると考え、開発に着手した。

2 曲り導波路構造

斜め端面における反射率は、以下の式で表される⁶⁾。

$$R = R_0 \exp\left\{-\left(\frac{\pi\omega\theta}{\lambda}\right)^2\right\} \dots (1)$$

ここで、 λ は波長、 n は導波路の屈折率、 ω は光のスポットサイズ、 R_0 は端面におけるフレネル反射率、 θ は導波路角度である。この式から明らかのように、端面反射率を下げるには (a) 導波路角度を大きくする、(b) 端面のフレネル反射率を下げる、(c) 導波路の屈折率を大きくする、(d) 光のスポットサイズを大きくする、の 4 通りの取り組みが考えられる。

最も単純なのは導波路角度を大きくすることであるが、あまり大きすぎると外部鏡への光結合が難しくなるため、現実には出射角度を 20° 程度 (出射光は半導体導波路と空気の屈折率が大きく異なることから、スネルの法則に従って屈折して出射され、出射角度は常に導波路角度より大きくなる = 図中実線矢印 =)。この場合の導波路角度は 6° 程度) に抑えなければならず、設計上の自由度はない。

(b) 端面のフレネル反射率については、誘電体多層膜による低反射コーティング技術が既に確立されており、0.1% 程度まで反射率を下げるのが可能である。一方、(c) 導波路屈折率については半導体の物性値で決まっているため大幅な変更は不可能である。

したがって、斜め端面における反射率低減には、端面に低反射コーティングを施した上で、さらに導波路のスポットサイズを拡大することが有効であると結論できる。

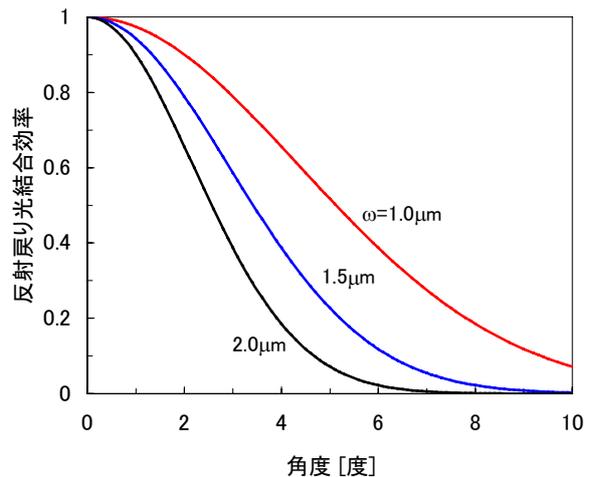


図2 斜め端面反射率の導波路角度およびスポットサイズ依存性
Waveguide angle and spot size dependence of angled facet reflectance

導波路角度およびスポットサイズに依存して、反射率が変化する様子を計算によって求めた結果を図2に示す。横軸は導波路角度で、縦軸は反射戻り光の導波路結合効率(上記(1)式右辺の R_0 を除いた部分)である。反射率は角度を大きくするにつれて減少するが、スポットサイズが大きいほど、よりはやく減少することがわかる。

この結果に基づいて、活性層幅および光分離閉じ込め層厚などを決定し、反射率を最適化することに成功した。端面反射率は以下の式を用いて求めることができる。

$$\frac{P_f}{P_r} = \sqrt{\frac{R_r}{R_f} \left(\frac{1-R_f}{1-R_r} \right)} \dots (2)$$

この式で、 P_f は前面(斜め端面)側光出力、 P_r は背面(垂直端面)側光出力、 R_f は前面反射率、 R_r は背面反射率である。半導体結晶を劈(へき)開して得られた端面の反射率は、コーティング無し状態で通常 30%程度であり、両端面とも垂直端面であれば光出力は均等に得られる(すなわち $R_f = R_r = 0.3$, $P_f = P_r$)。そこで、コーティング無しのチップの両端出力比を測定すれば、斜め端面による反射率低下の効果を定量的に評価できる。これに誘電体多層膜による無反射コーティングの反射率を掛ければ端面反射率が求まる。我々の実験結果からは、最終的に 5×10^{-5} 以下の低反射率を達成できた。

図 3 に、実際に作製した素子の写真を示す。チップ長は 1mm、幅は 0.4mm であり、AlN 製サブマウントに AuSn ハンダでボンディングされている。チップの向きをジャンクションアップとし、サブマウント長とチップ長を同じ 1mm に揃えることで、十分な放熱性を備え

ながら、両端面からの出射光がどちらもサブマウント表面で反射することなく、両方向でレンズ結合しやすい構造とした。

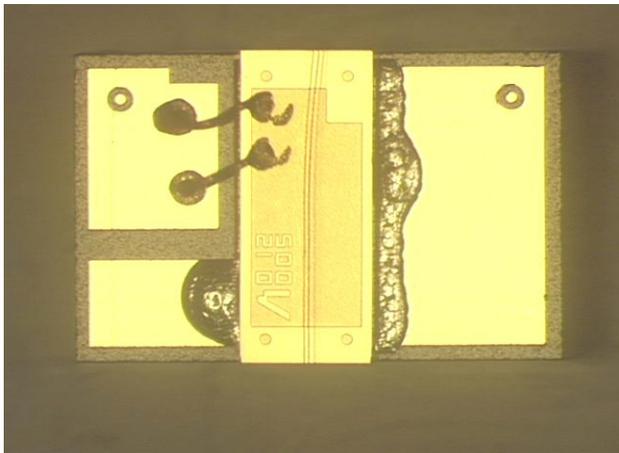


図3 EC-LD用曲り導波路型ゲインチップの外観
Overview of curved waveguide gain chip for EC-LD

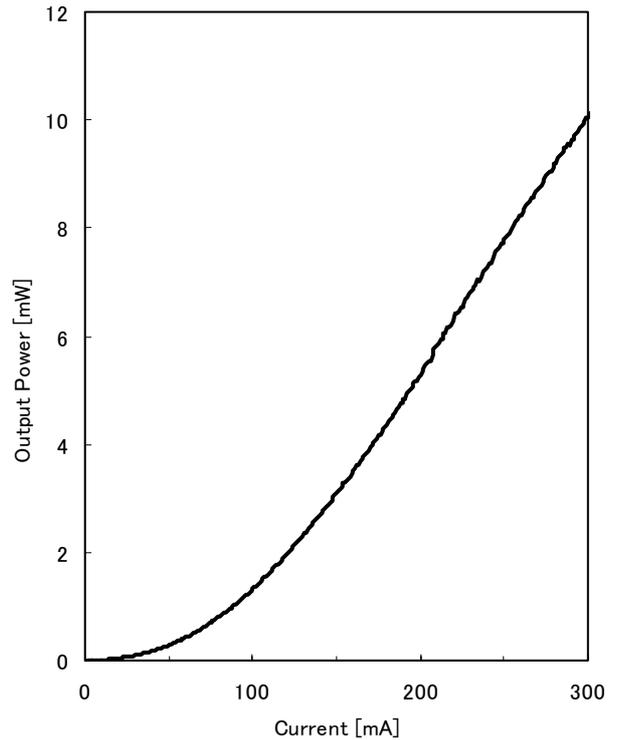


図4 電流-光出力特性
Current-optical output characteristics

3 特性

3.1 チップ単体での特性

以下に、作製した素子の特性を紹介する。まず、外部鏡と結合させずに、チップ単体で発光させたときの特性について述べる。

図4は電流-光出力特性の例である。垂直側端面は反射率6%の低反射コーティングを施してある。ゲインチップは単体ではレーザー発振しないため、スーパーミネッセントダイオード(SLD: Superluminescent Diode)として動作する。

図5は同様にチップ単体での出力光のスペクトルである。活性層はInGaAsPの歪み多重量子井戸構造で、スペクトルの半値幅は約80nmとなっており、WDM通信のC-bandおよびL-bandを十分カバーする範囲となっている。挿入図は1550nm付近を拡大したもので、リップルと呼ばれるスペクトルの振幅は0.5dB程度と非常に小さい。リップルが小さいことは端面反射率が極めて低いことを表しており、斜め端面構造による大きな成果である。

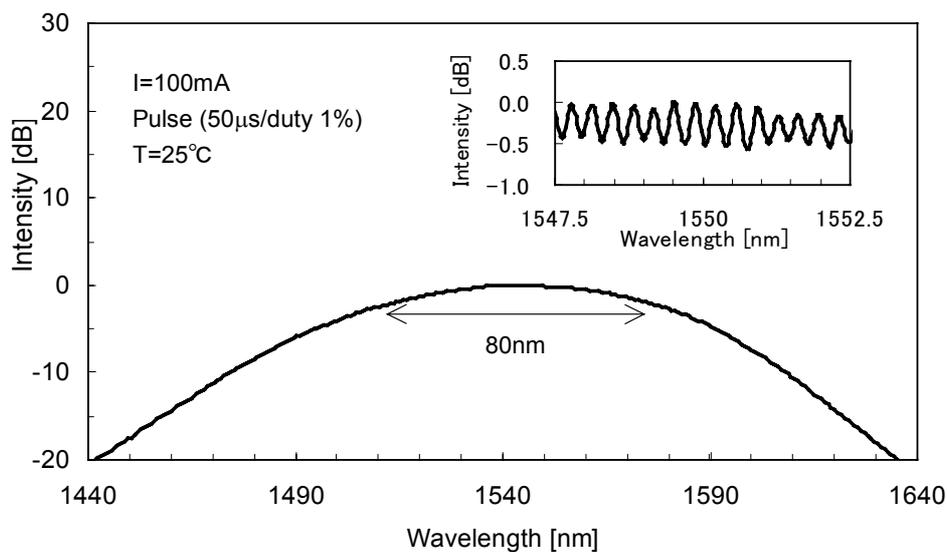


図5 出力光スペクトラム
Optical output spectrum

3.2 外部共振特性

この素子の外部共振時特性を評価するために、**図6**に示す実験系を構築した。斜め端面からの出射光は、レンズでコリメートされたあと外部鏡(全反射ミラー)で反射されて素子に帰還する。その光路上に光バンドパスフィルタを置き、特定の波長のみを選択する。このバンドパスフィルタは平板で、位置によって透過光波長が異なり、スライドさせることで透過波長を自由に変えることができる。垂直端面からの光も同様にレンズでコリメートした後、検出器で光出力を測定する。また、スペクトルを測定する場合は、レンズと検出器の代わりに先球ファイバと光スペアナを設置する。

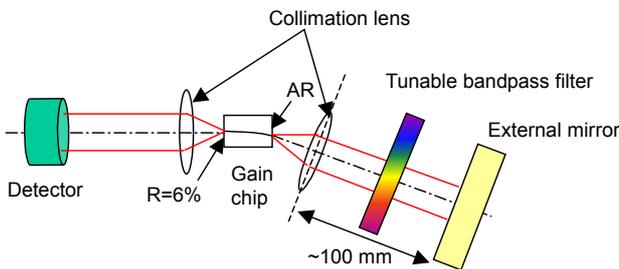


図6 外部共振実験系の構成
Schematic of external cavity setup

この系を用いて外部共振させたときの電流-光出力特性を**図7**に示す。図中の黒線はバンドパスフィルタを用いず、マルチモード発

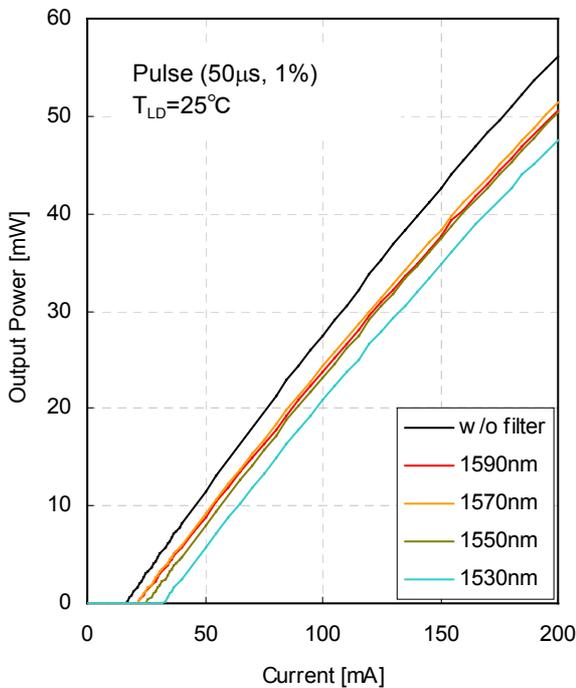


図7 外部共振器レーザの電流-光出力特性
Current-optical output characteristics of external cavity laser

振させたときの特性であり、その他はバンドパスフィルタを用いてそれぞれ1530~1590nmの範囲の20nm間隔の各波長で発振させたときの特性である。垂直端面は反射率6%の低反射コーティングを施しており、素子はAlNサブマウントにボンディングされ25°C一定に制御されている。フィルタ無しのマルチモード状態で発振しきい値17mA、フィルタ挿入によるシングルモード時で同20~35mAとなっている。光出力はWDM用光源として要求されるファイバアウト+13dBmに十分な出力が得られている。

さらに、このゲインチップがどれだけの発振可能波長範囲を有するかを調べるため、**図6**に示したフィルタとミラーの組合せではなく、回転可能な回折格子をリロー配置してチューニング範囲を大きく広げて測定したスペクトルを**図8**に示す。注入電流はCWの300mAである。この図は回折格子の角度を変えながら多数回掃引して得られたスペクトルを重ねてプロットしたものであるが、回折格子の分解能が低いため、詳細に見ると個々のピークは単一波長になっていないマルチモード発振状態である。それでも、220nmという広帯域での発振が確認でき、ピーク出力からのピークパワー変動が3dB以内の範囲でも170nmの帯域が得られている。このことは、この素子が広帯域の波長可変計測器用途にも十分に使用可能であることを示している。

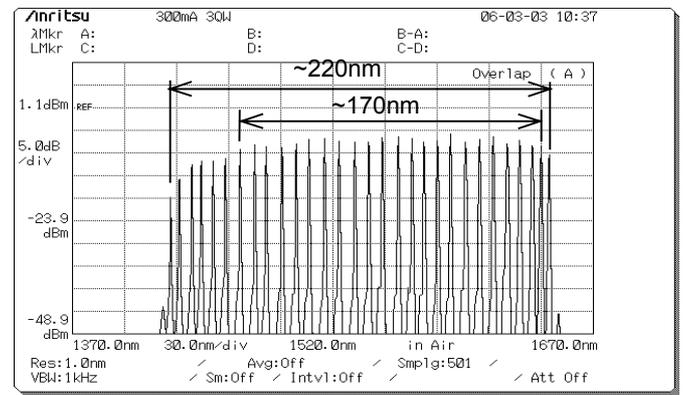


図8 回折格子を用いた外部共振器レーザの発振波長範囲
Lasing wavelength range of external cavity laser with grating

4 信頼性

4.1 信頼性評価用代替構造

作成したゲインチップに関する信頼性を確認するために、長期寿命試験を行った。ゲインチップは単体だとレーザ発振せずに自然放出光(ASE: Amplified Spontaneous Emission)を発するため、誘導放出に寄与せずにライフタイムの長いキャリアが活性層に

過剰に蓄積される。この状態で長期寿命試験を行っても、素子は早く劣化して寿命は短くなってしまい、外部共振器レーザで用いた場合の素子本来の寿命が推定できない。

これを回避するため、外部共振器レーザ用ゲインチップの長期寿命試験はレーザ発振した状態で行うことが求められる。そのためには、両端面の反射率を高くしなければならないが、単に斜め端面側に高反射コーティングを施すだけでは、斜め端面構造による反射率低下の効果のため、十分な反射率を得ることができず、レーザ発振はしなかった。

そこで、図9に示す代替構造を考案した。ウエハから素子を切り出す際に、劈開位置を変えて導波路の曲り部分が素子中央部に位置するようにし、両端面は垂直端面とした。この構造により、実際の素子と比べても、曲り導波路の位置が異なるだけで曲り導波路を有するという本来の素子構造を保ちながら、素子単体でもレーザ発振が可能となった。その結果、高反射コーティングを施さなくても発振しきい値 18mA 程度を得られ、外部共振測定と同等の特性を実現した。これにより、外部共振器レーザに組み込んだ時と同等の条件で長期寿命試験が可能となった。

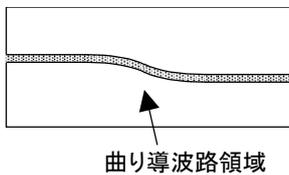


図9 寿命試験用素子構造模式図
Schematic of chip structure for life test

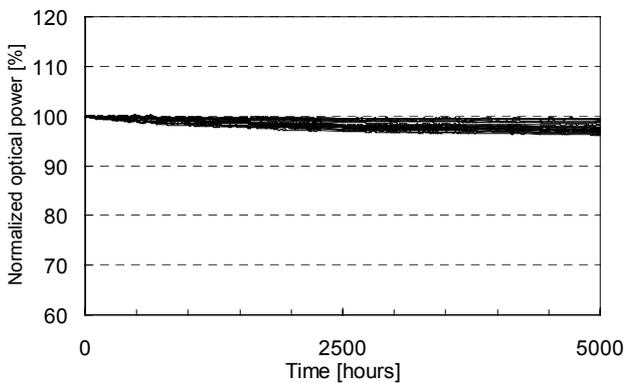


図10 寿命試験結果
Result of life test

4.2 長期寿命試験結果

前節で述べた素子構造を用いて長期寿命試験を行った。試験条件は電流一定 ACC (Auto Current Control) 300mA, 雰囲気温度 $T_a=70^\circ\text{C}$, $N=25$ 個で、5000 時間の連続動作を実施した。その結果を図10に示す。横軸は時間で、縦軸は初期値で規格化した光出力である。途中で急激に劣化する素子はなく、すべて安定に動作しているのがわかる。

2000 時間以降の出力変動を線形近似して傾きを求め、出力が初期値の 90% になったときを各素子の寿命と定義した。この寿命を対数正規確率プロットし、累積故障率 $F(t)$ が 50% になった時間を $T_a=70^\circ\text{C}$ におけるメディアン寿命として求めた。対数正規確率プロットを図11に示す。 $T_a=70^\circ\text{C}$ におけるメディアン寿命は 6 万時間と推定できた。さらに、下のアレニウスの関係式より、活性化エネルギー $E_a=0.4\text{eV}$ とした場合の 25°C 換算での寿命は、51 万時間と推定される。

$$ML = A \exp\left\{-\frac{E_a}{kT}\right\} \cdots (3)$$

ここで ML はメディアン寿命、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度、 A は定数である。

また、対数正規分布の故障率は以下の式より求められる⁷⁾。

$$\lambda(t) = \frac{2 \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(t/ML)}{\sigma}\right)^2\right\}}{\sqrt{2\pi}\sigma \left\{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(t/ML)}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right\}} \cdots (4)$$

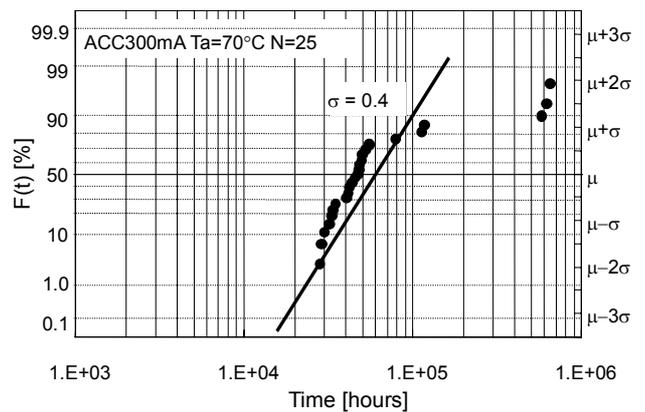


図11 対数正規分布による寿命推定
Estimated life using lognormal probability plot

ここで、 $\lambda(t)$ は故障率、 t は動作時間、 σ は標準偏差、 $\text{erf}(x)$ は誤差関数である。図 11 より、標準偏差 $\sigma=0.4$ であり、動作時間 20 年での故障率は 162 FITs と求められ、実用に十分な高い信頼性を確認することができた。

5 むすび

外部共振器型レーザに用いられる曲り導波路型ゲインチップを開発した。曲り導波路による斜め端面においてスポットサイズの最適化を実現し、さらに、低反射コートを施すことで、端面反射率 5×10^{-5} 以下を達成した。発振可能帯域は 200nm にわたり、通信用光源だけでなく計測器用としても有望である。また、曲り導波路部分を素子中央部に形成した代替構造による寿命試験で、25°Cにおける素子寿命(出力 10%低下)51 万時間を得た。

本構造は外部共振器型レーザに用いられるだけでなく、素子単体でスーパーミネッセントダイオードとして動作させることも可能であり、インコヒーレント方式の計測用光源や白色光源としての利用も期待できる。さらに、光サーキュレータと組み合わせれば、反射型 SOA としても利用可能である。

今後は、連続波長掃引機能に不可欠な位相調整機能を集積化した構造へ開発を展開していく予定である。

参考文献

- 1) 「フォトニックネットワーク革命」超高速フォトニックネットワーク開発推進協議会 2002.
- 2) 「光集積デバイス」小林功郎著 共立出版 1999
- 3) 高橋, 森, 尾登, 小野, 篠根:
“波長可変 DBR LD”, アンリツテクニカル 67 号, pp. 9-14(1994.3)

- 4) 後藤, 津田, 池内, 亀山:
“可変波長光源 MG9632A”, アンリツテクニカル 64 号, pp. 14-19 (1992.10)
- 5) 出来, 高橋, 鈴木, 石坂, 高江洲, 堀江, 佐藤, 工藤, 山崎:
“PLC 二段リング共振器による広帯域波長可変レーザ”, 第 52 回応用物理学学会学術講演会, 29p-ZQ-9 (2005.3).
- 6) W. B. Joyce and B.C. Deloach, “Alignment of Gaussian Beams,” Appl. Optics., vol. 23, pp. 4182-4196 (1984).
- 7) Y. Nakano, et. al., “Reliability of Semiconductor Lasers and Detectors for Undersea Transmission System,” J. Lightwave Technol., vol. LT-1, no.6, pp. 945-951 (1984).

執筆者



三瀬 一明
R&D 本部
光デバイス R&D センター
発光デバイス開発部



山田 敦史
R&D 本部
光デバイス R&D センター
発光デバイス開発部



森 浩
R&D 本部
光デバイス R&D センター
発光デバイス開発部



中山 貴司
R&D 本部
光デバイス R&D センター
発光デバイス開発部