

14XXnm 帯励起用レーザの開発

Development of 14xx-nm Pumping Laser Diode

UDC 621.382.2/391.6

菊川 知之	Tomoyuki Kikugawa	技術統轄本部	研究所	光ネット基盤技術研究部
山田 敦史	Atsushi Yamada	技術統轄本部	研究所	光ネット基盤技術研究部
大貫 紳一	Shinich Onuki	技術統轄本部	研究所	光ネット基盤技術研究部
金谷 康宏	Yasuhiro Kanaya	アドバンスト	コンポーネンツ	第2開発部
長島 靖明	Yasuaki Nagashima	技術統轄本部	研究所	光ネット基盤技術研究部

1 まえがき

一般に14XXnmと総称される波長1380～1520nm帯の高出力半導体レーザダイオード（LD）は、WDM（Wavelength Division Multiplex）光通信システムに不可欠なエルビウムドープドファイバアンプ（EDFA）や、次世代の長距離大容量システムへの導入が期待されている分布ラマン増幅器の励起光源として使用される。EDFA用の励起光源として見た場合には、一般に波長多重数に比例した光出力が必要と言われており、特にブロードバンドの進展に伴う幹線系の大容量化に向けて波長多重数が増加しつつある昨今、励起用光源にもより高い光出力が要求されている。しかし、現状では一つの励起用モジュールからの光出力だけでは要求を満たせず、複数モジュールから出射される光を合波して必要な光出力値を達成している場合が多い。一方で光通信システムの簡素化や低価格化の要求も高まっており、そのような合波に必要とされる煩雑な光学系を省略するためにも、単体で要求出力値を満足し、かつ消費電力を抑えたLDの実現が望まれている。

このような励起用光源に対して近年では、テーパ型導波路を用いてレーザの飽和出力を向上させ、長波長帯レーザとしては初めて1Wを超えるファイバ出力を実現した例¹⁾や、導波路の一部にMMI（Multi-Mode-Interferometer）構造を導入することで素子抵抗の低減化を図り、駆動電力を50%以上減少させた例²⁾等が報告されている。当社でも以前から14XXnm帯励起用LDの高出力化に関する開発を行っており、現在では400mW出力モジュールが製品化されている。本稿では、このモジュール用に開発されたLDの諸特性と、そこに用いられている要素技術について報告する。

2 開発方針

ファイバアンプ励起用光源は一般に、ファイバと光結合した状態のレーザモジュールとして使用される（図1）。したがって、レーザ素子の高出力化を図ると同時に、シングルモード（SM）ファイバと高い効率で光結合することも重要な課題である。このため、励起用レーザは基本横モードで発振することが望ましい。ところで、InP系材料を用いた長波長帯レーザでは短波系レーザに見られるようなCOD（Catastrophic Optical Damage）は生じにくく、最大光出力は主に熱、および漏れ電流によって制限される。そのため、放熱性に優れ、活性層により電流を集中させやすい構造とする必要もある。以上の観点から当社では従来より、ストライプ状の活性層を、より屈折率が低くバンドギャップの広いInPで覆った、ストライプ導波路型埋込ヘテロ（Buried Hetero: BH）構造を用いている。

図2に高出力化へのアプローチについてまとめた。長波長帯LDの低消費電力化および高出力化を実現するための重要なポイントは、①漏れ電流の低減、②電流-光変換

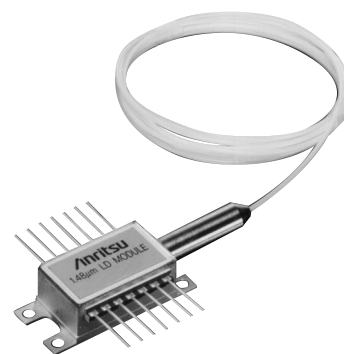
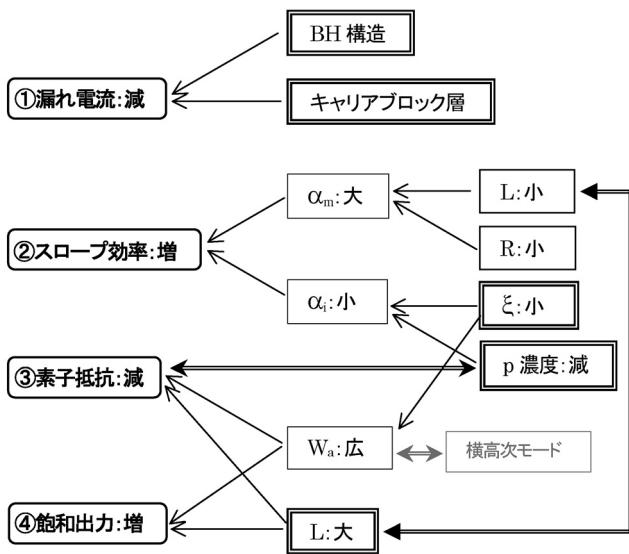


図1 励起用レーザモジュール外観
External view of pumping LD-module

効率 (=スロープ効率) の向上, ③素子抵抗低減, ④飽和光出力向上, の4点である。漏れ電流の低減 (①) に対しては, 注入した電流を無駄なく活性層へ導くための最適なBH構造や, 活性層に注入された電流が活性層からオーバーフローし難い構造を採用する必要がある。また素子抵抗低減 (③) や飽和光出力の向上 (④) の点においては, レーザ共振器をより長くすることが有効となる。しかし, 単純に共振器を長くしただけでは, スロープ効率 (②) の低下を招いてしまい, 高い光出力を得るのに大きな電流が必要となるため, 消費電力の面で不利となる。



W_a : 活性層幅
 R : 端面反射率
 ξ : 光閉じ込め係数
 □ は今回検討した項目を表す

図2 高出力化へのアプローチ
Achieving high output power

ところでレーザのスロープ効率 (η_s) は, 以下の式で表される。

$$\eta_s \propto \eta_i \times \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \quad \dots\dots (1)$$

ここで, η_i は内部量子効率, α_i はレーザ共振器における内部損失である。また α_m はミラー損失であり, 共振器長を L , 端面反射率を R_1, R_2 として次式で与えられる。

$$\alpha_m = \frac{1}{L} \times \ln \left(\frac{1}{R_1 \times R_2} \right) \quad \dots\dots (2)$$

上記 (1) 式から判るように, スロープ効率 η_s を向上

させるためには, α_m の増大, または α_i の低減が有効である。 α_m を増大するには, 共振器長 L を小さくすれば良いが, これは先に述べた飽和出力の向上や素子抵抗の低減と相反する。一方で端面反射率 $R_1 \times R_2$ を低減することでも α_m を増大させることができ, 実際に前端面反射率を 1% 程度まで低減して高出力化を図った報告例もある³⁾。これに対して我々は, より大きな効果が期待できる α_i の低減化に着目した。 α_i は主に活性層における損失と p クラッド層における損失とに分けられる。活性層での光損失を低減する為には, 活性層への光閉じ込め係数を減少させることが有効である。この場合は同時に, 基本横モードを維持できる活性層幅を拡大することも可能となるので, 飽和特性の向上と素子抵抗の低減化を期待できる利点もある。一方の p クラッド層における光損失は主に価電子帯間光吸収 (Inter Valence Band Absorption : IVBA) に因るものであり, これは p 濃度を低減することで小さく抑えることができる。しかし, p 濃度の低減は素子抵抗の増加にもつながるため, 最適な p 濃度を導く必要がある。

3 高出力化に向けての検討内容

3.1 無効電流の低減

ここでは, 注入した電流をより活性層に集中させる構造の検討, および活性層に注入されたキャリアを高い確率で発光再結合させる方法について述べる。

3.1.1 埋込ヘテロ (BH) 構造

励起用 LD 素子の作製方法を図 3 に示す。結晶成長は全て有機金属気相成長 (MOVPE) 法により行っている。まず, n 型 InP 基板上に MQW を含む活性層, および p 型クラッド層の一部を成長する。次に全面にプラズマ CVD (Chemical Vapor Deposition) 法により SiNx 膜を堆積させた後, 通常のリソグラフィと RIE (Reactive Ion Etching) 技術により, SiNx のストライプパターンを形成する。続いて, ウェットエッチング法により活性層部分を含むメサ形状を形成した後に, 再びメサ両脇に p-InP 電流ブロック層 (p ブロック層) および n-InP 電流ブロック層を成長する。その後 SiNx パターンを除去してから, 全面に p-InP クラッド層 (p クラッド層) を成長し, p 側および n 側に電極を形成する。

このようなストライプ型 BH 構造では, メサ両脇は pnpn

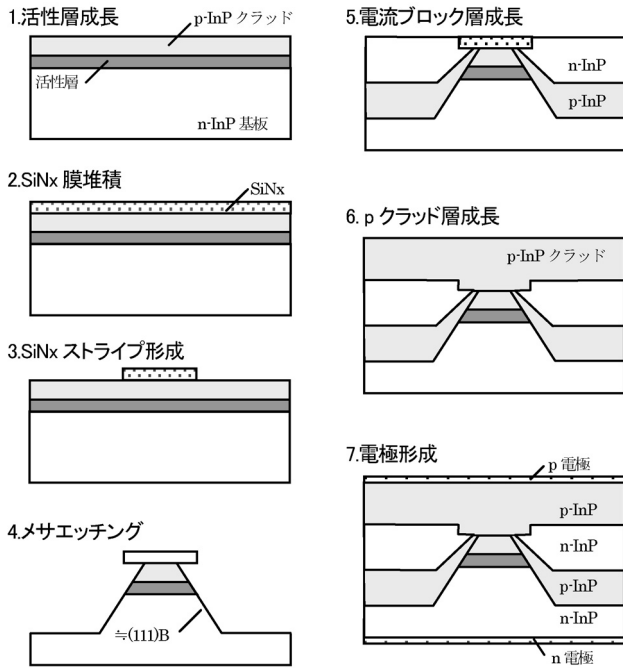


図3 励起用LDの作製方法
Fabrication of pumping LD

構造の途中のnp接合が逆バイアスとなり電流が流れないので、活性層だけに電流を集中させることができる。しかし実際のレーザーでは、pクラッド層からpブロック層へ漏れだす電流が存在する。また、その漏れ電流がゲート電流となってpnpn構造のサイリスタをターンオンさせてしまう可能性もある。このサイリスタ現象を抑制するためには、ゲート電流を極力減らすこと、およびpブロック層を中心としたnpnトランジスタの電流増幅率を小さくすることが必要である。後者はpブロック層濃度を高め、層厚を厚くすることで実現可能であるが、その一方でp濃度を高めることは電気抵抗を減らすことにもなるため、pブロック層へ流れ込む無効電流を増加させてしまう。

この問題に対して我々は、メサ形成時のエッチング液に塩酸・過酸化水素水系の混合液を使用することとした。このエッチング液では、図3の4中でも示したように、側面の面方位が(111)Bに近い台形状のメサ構造が形成される。MOVPE法では(111)B面への成長速度は基板上の(100)面に対して著しく小さく、また同一条件で成長した場合、(111)B面ではp濃度が1桁程度低くなる⁴⁾。したがって、このような台形状メサとすることにより、基板上の平坦部分では十分なp濃度と厚さを持ったpブロック層を形成しつつも、メサ側面ではp濃度を低く、かつ層厚を薄くする

ことができる。これにより、メサ側面部のpブロック層の電気抵抗を高めることができ、漏れ電流を流れ難くすることができる。このような作製方法を採用することにより、漏れ電流低減とサイリスタ抑圧を両立することに成功した。

3.1.2 キャリアブロック層の導入

次に、活性層へ注入されたキャリア（電子と正孔）を高い確率で発光再結合させるための手段について述べる。注入キャリアのうち、特に有効質量の小さい電子は活性層から溢れやすい。これに対しては、pクラッド層の不純物濃度を高めてpクラッド層のビルトインポテンシャルを高めることで、活性層から溢れ出る電子をブロックすることが可能である。しかしp濃度を高めるとIVBAによる光の吸収が増えるため、その濃度設定には注意が必要である。また我々はp型不純物として亜鉛（Zn）を用いているが、Znは熱工程により拡散しやすい性質を持っている。したがって、活性層に近いクラッド層部分のZn濃度が高い場合には、Znが結晶中で拡散し、本来ノンドーパであるべき活性層にまでZnが入り込み、レーザ特性を劣化させてしまう。そこで我々は、図4に示したように、活性層へのZn拡散を防止するために、活性層に隣接する部分は低濃度に設定しておき、続く50～100nm程度の部分を $1 \sim 1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の高濃度としてキャリアブロックとしての働きを持たせることにした。その後は光吸収を最小限に抑えつつも電気特性も考慮して、いったん濃度を下げた後に再び徐々に濃度を上げていく。このような構造を用いることにより、光損失を増やすことなく電子のオーバーフローを防ぐことに成功した。

3.2 内部損失の低減

長共振器構造としつつも高いスローブ効率を得るために

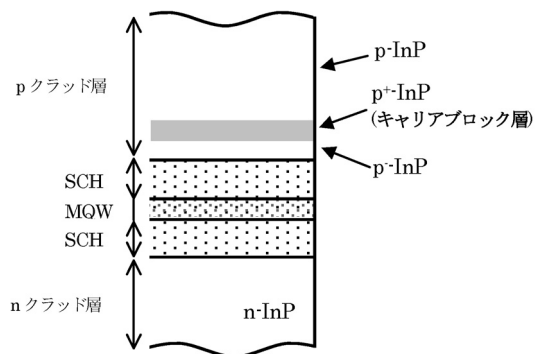


図4 キャリアブロック層の導入
Carrier-blocking layer

は、内部損失 α_i の低減が有効であることは2節で述べた。ここでは実際に我々が行った α_i 低減に向けての検討内容について述べる。

3.2.1 SCH 構造の変更

内部損失 α_i の低減化の一つの施策として、活性層への光閉じ込め係数の低減を試みた。図5 (a) には、従来構造の活性層近傍の屈折率分布を示した⁵⁾。光閉じ込め (SCH) 層は、それぞれ組成波長 (λ_g) が $0.99 \mu\text{m}$, $1.08 \mu\text{m}$, $1.15 \mu\text{m}$ で、層厚の等しい3層の InGaAsP から構成されている。また MQW は +1% 歪みの量子井戸と無歪のバリア層から成り、層数は4である。

内部損失の低減には、この SCH 層を薄膜化することによる光閉じ込め係数の低減が有効であるが、今以上に薄くすることは、p クラッド層からの Zn 拡散の影響を受けてしまいあまり好ましくない。そこで我々は、従来ほぼ等しかった各層の層厚を、図5 (b) に示すように、活性層側の層厚は薄く、活性層から遠ざかるにしたがって徐々に厚くなる構造を採用することにした。これにより、SCH 全体の層厚を薄くすることなく、従来構造に換算すると35%程度 SCH を薄くした場合と同等の光閉じ込め係数低減効果を得ることができた。実際にこの構造で作製したレーザから見積もった α_i の値は、従来に対して約15%低減することを確認した。また、横高次モードを抑圧できる活性層幅も従来からの $3.0 \mu\text{m}$ に対して、 $3.5 \mu\text{m}$ まで拡大することが可能となった。

3.2.2 p クラッド層の不純物濃度検討

SCH 構造の変更により活性層への光閉じ込め係数が低減したことで、より多くの光がクラッド層にしみ出すこととなり、特に p クラッド層においては IVBA による光損失の

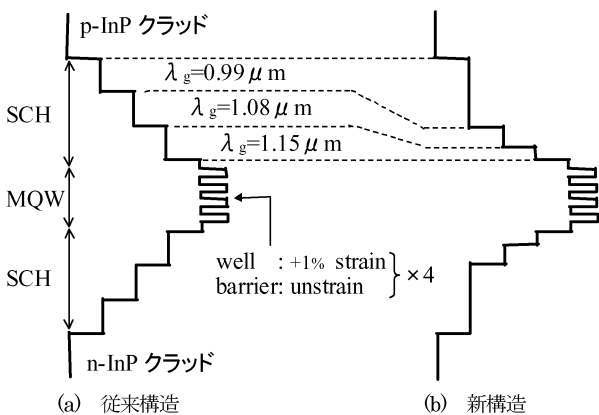


図5 SCH 構造の変更
Change of SCH structure

影響が大きくなる。図6はpクラッド層濃度と各特性値の関係を模式的に示したものである。クラッド層のp濃度を低減するにつれてIVBAによる光損失が低減するため、内部損失 α_i の値は小さくなり、したがって η_s を向上させることができる。しかし、この時同時に素子抵抗 R_d も増加してしまうため、ジュール熱の影響で活性層温度が上昇して光出力の飽和が早まり、結果的に最高出力値 P_{max} はある条件を境に低下していく。

このような関係を考慮し、なるべく素子抵抗を小さく保ちながら、高いスロープ効率と飽和出力値を実現するp濃度の検討を行った。実際には、光密度分布に応じてp濃度を設定しており、活性層に近く光密度が高い領域のp濃度は低く、活性層から遠ざかるにつれて徐々にp濃度を高めることとした。その結果、3.2.1節の構造からさらに内部損失を25%低減することが可能となった。

4 400mW 出力モジュール用LDの諸特性

このような検討に基づいて作製したLDを、チップの放熱性を高めるためにダイヤモンドヒートシンク上に活性層側を下にボンディングし、さらにAINチップキャリア上に搭載した(図7)。作製したレーザから見積もった内部損失 α_i は 4.5cm^{-1} であった。共振器長 L を 1.4mm とした場合のI-LおよびI-V特性を、従来構造 ($L=1.2\text{mm}$) の特性と比較して図8に示す。測定は 25°C , CW (直流電流) の条件下で行い、各LDの後端面には反射率95%のHR (High-Reflection) 膜、前端面にはLR (Low-Reflection) 膜が施されている。LRの値はそれぞれのLDで光出力が最大となる

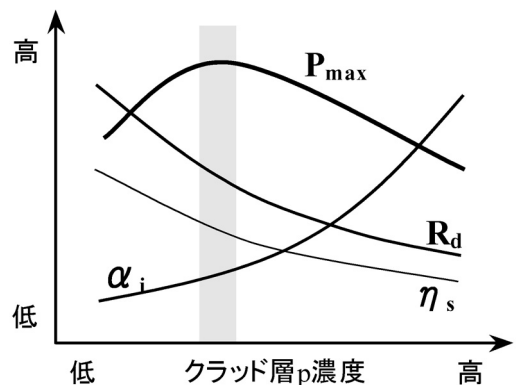


図6 各特性値のクラッド層p濃度依存性
Relationship between each characteristics and P-concentration

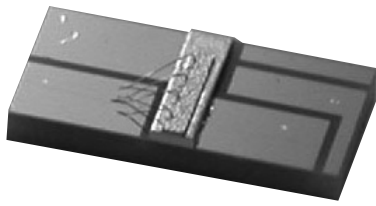


図7 チップキャリア外観
External view of chip carrier

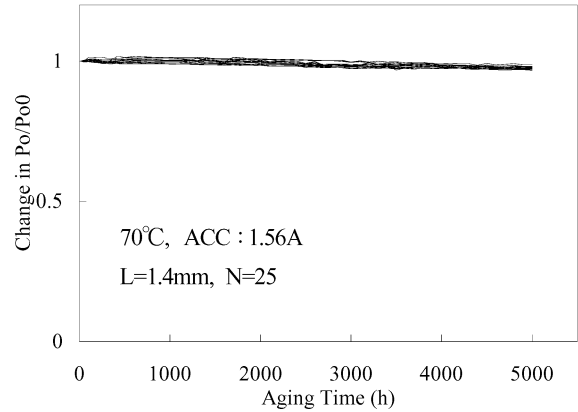


図9 ACC動作寿命試験
Aging test at ACC operation

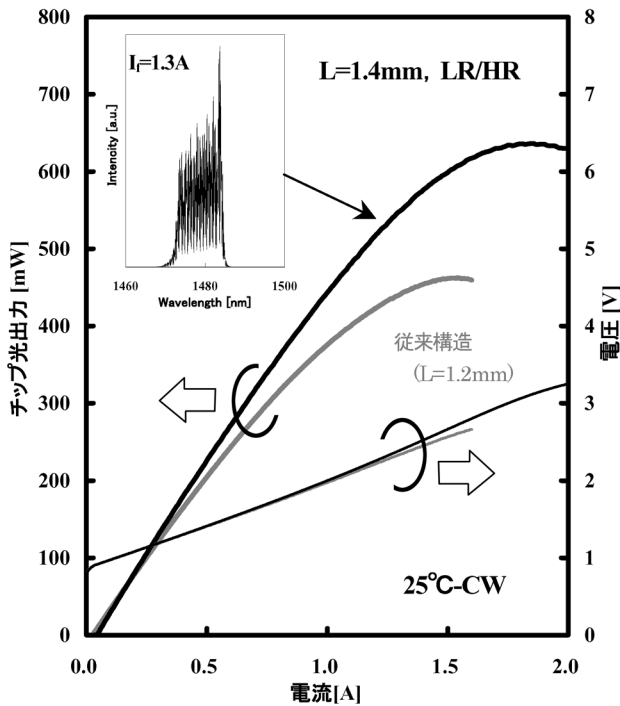


図8 400mW モジュール用LDのI-L,I-V特性
I-L and I-V characteristics of pumping LD for 400-mW output module

ように最適化してあり、今回の構造ではLR=6%とした。

今回、高出力化に向けて共振器長を拡大したが、主に内部損失低減化の効果により、従来構造を大きく上回るスロープ効率を実現した。また一方で、クラッド層のp濃度を低減したものの、長共振器化および活性層幅拡大の効果により、駆動電圧に関しては従来構造と同程度に抑えられている。この時、 $I_{th}=40\text{mA}$ 、スロープ効率 $\eta_s=0.51\text{W/A}$ 、最大光出力 $P_{max} \geq 630\text{mW}$ であった。また、図8中に発振スペクトラムを示すが、中心波長は1479nmであった。図9に連続動作試験の結果を示す。70°C、ACC (Auto Current Control) : 1.56Aの条件で、5000時間以上の試験を行った。

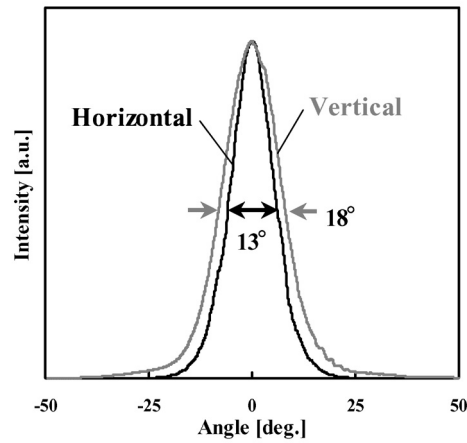
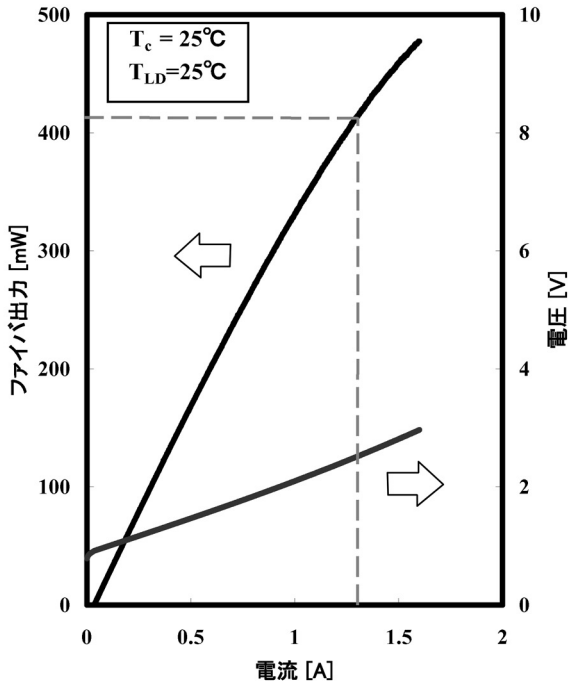


図10 400mW モジュール用LDの遠視野像
Far-field patterns of LD for 400-mW output module

光出力値が20%減少する時間を寿命とすると、25°Cでの推定寿命の中央値は約60万時間となった。図10に遠視野像(FFP)を示す。今回、活性層幅を3.5μmまで拡大したが、FFPは良好な単峰性を示しており、横高次モードが抑圧されていることが判る。この時の半値全幅は水平/垂直方向でそれぞれ13°/18°であった。この値からビームスポット径を推定すると、従来構造に対して20~30%程度拡大していることとなる。そのため、ファイバとの光結合の際に従来よりも像倍率の小さなレンズを使用することで、従来構造とほぼ同等となる1dB以下の光結合損失を達成した⁶⁾。図11(a)にレーザモジュールからの出力特性を示す。駆動電流1.3A時に415mWのファイバ光出力が得られ、本LDにて400mW出力モジュールが実現可能であることを確認した。また、モジュールケース温度を70°Cとした場合の、LDおよび冷却用ペルチェ素子を含んだモジュール全体の消



(a) I-L, I-V 特性

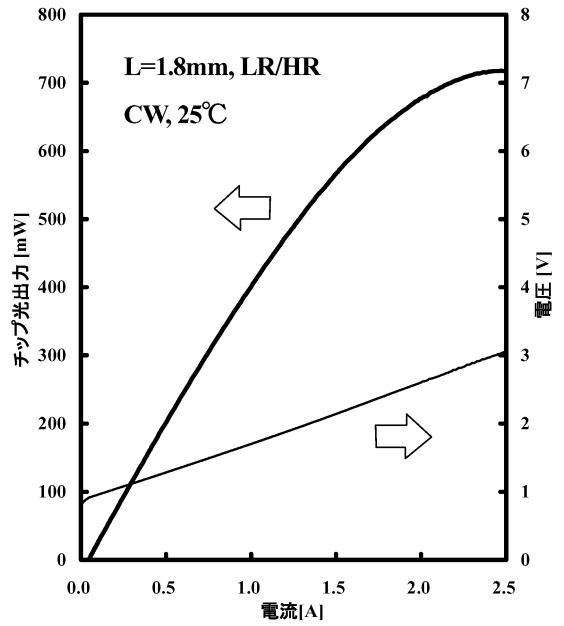
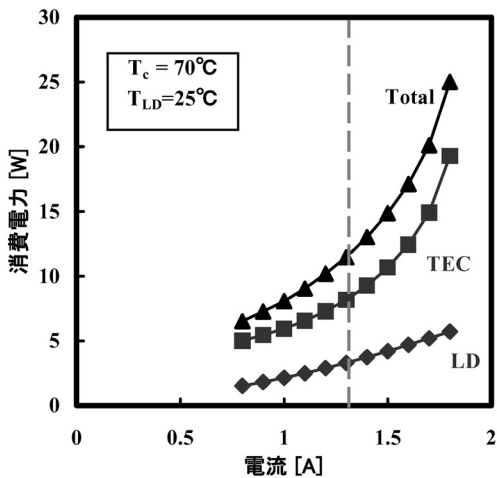


図12 I-L, I-V 特性 (L=1.8 mm)
I-L and I-V characteristics (L=1.8 mm)



(b) 消費電力特性

図11 400mWモジュール特性
Characteristics of 400-mW output module

費電力の特性図を図11(b)に示す。400mWのファイバ出力を得る際の投入電力はおおよそ11.5Wであった。

さらに、同構造において共振器長を1.8mmに拡大した時のI-L特性を図12に示す⁷⁾。スロープ効率は0.46W/Aと依然として高い値を維持しており、その飽和出力は2.45A時で720mWという良好な値が得られた。

5 むすび

14XXnm帯励起用レーザの高出力化に向けての開発方針と、それに基づいた検討内容、およびその結果得られたレーザの諸特性について述べた。導波路を形成する際のメサ側面を(111)B面に近い面で構成すること、およびpクラッド層内の活性層近傍にp濃度の高い層を設けてキャリアブロック層の働きを持たせることで無効電流の低減化を実現した。また、SCH構造の変更による活性層への光閉じ込め係数の低減化とpクラッド層のドーピング濃度分布の最適化を行い、内部損失 α_i を従来比-35%となる 4.5cm^{-1} まで減少させた。

その結果、従来構造よりも長い1.4mmの共振器長にも関わらず、スロープ効率は0.51W/Aと従来よりも高い値を実現した。SMファイバとの光結合損失は1dB以下であり、駆動電流1.3Aにて415mWのファイバ出力を実現した。このLD構造、および駆動条件における推定寿命時間は約60万時間であった。以上のことから、本LDが400mW出力モジュール用として使用可能であることを確認した。

さらに、共振器長を1.8mmに拡大したLDでは、最高出力720mWを実現した。今後は、ワット級レーザの実現を目標に、引き続き内部損失の低減化を中心とした検討を行っていく。

参考文献

- 1) A. Mathur, et al., Record 1Watt Fiber-coupled-power 1480 nm diode laser pump for Ramam and erbium doped fiber amplification, OFC2000, PD15-1 (2000)
- 2) K. Hamamoto, et al., High Power and Low Driving Voltage 14XXnm Active Multi-Mode-Interferometer (MMI) Laser Diode for Fiber Amplifier, OECC2002, 10C3-6, pp. 162-163 (2002)
- 3) H. Yamazaki, et al., Over Half-Watt Output Power 1.48- μ m Wavelength EDFA Pumping ASM LD's, OFC2000, ThK4, pp. 165-167 (2000)
- 4) R. Bhat, et al., Orientation dependence of S, Zn, Si, Te, and Sn doping in OMCVD growth of InP and GaAs: application to DH lasers and lateral p-n junction arrays grown on non-planar substrates, J. Crystal Growth, 107, pp. 772-778 (1991)
- 5) 森, 長島, 金谷, 東久保, 菊川, 土屋, 中野: EDFA励起用 1480nm レーザの高出力化, 1998年電子情報通信学会春季大会, C-4-17 (1998)
- 6) 金谷, 鮫島, 大森, 長島, 篠根: 400mW出力1480nm帯LDモジュール, 2002年電子情報通信学会春期大会, C-4-40 (2002)
- 7) 山田, 長島, 大貫, 金谷, 菊川: 高効率・高出力1480nm帯励起用LD, 2002年電子情報通信学会春期大会, C-4-39 (2002)