低消費電力900 nm帯マルチモードレーザモジュールの開発

Low Power Consumption 900-nm Range Multi-Mode Laser Module

毅*2

早水尚樹* Naoki Hayamizu

三代川純* Jun Miyokawa

入江雄一郎* Yuichiro Irie

田中秀一* Shuichi Tanaka

大枝靖雄*2 Yasuo Oeda

藤本 Takeshi Fujimoto 池上嘉一*2 Yoshikazu Ikegami

概 要 加工や計測などの通信以外の用途にも利用できる900 nm帯半導体レーザモジュールの開 発を行った。様々のアプリケーションに対応するため、小型で高出力かつ低消費電力なモジュールを 目標とし、光結合効率や放熱特性を向上させるための施策を行ったので報告する。

1. はじめに

これまで切断,溶接,マーキングなどの加工や,計測といっ た産業分野で使用されるレーザは、CO2やAr、エキシマレー ザなどの気体レーザや、YAGレーザのようなランプ励起によ る固体励起レーザが主流であった。しかし、これらのレーザに は、消費電力が大きい、頻繁なメンテナンスが必要、寿命が短 いなどの問題があった。このため近年は、小型で電力―光変換 効率が高く、信頼性、量産性に優れた半導体レーザが注目され、 半導体レーザを直接または励起光源とした置き換えが進んでい る。特に、半導体レーザを励起光源に使用したダブルクラッド ファイバによるファイバレーザは、他のレーザに比べビーム品 質が高いことから、急速に普及しつつある。また、医療や半導 体レーザによる直接加工には、808 nmの高出力半導体レーザ が用いられている。更に、通信用途では、Erをドープされた ダブルクラッドファイバがCATV用光増幅器に応用され、こ の励起光源として900 nm帯高出力半導体レーザが用いられて いる。

このように、900 nm帯及び808 nmの高出力半導体レーザモ ジュールは、様々なアプリケーションで欠かすことの出来ない 重要なデバイスとなっている。

このような高出力半導体レーザモジュールは、現在通信分野 で多く使用されているシングルモード発振するレーザダイオー ド (laser diode: LD)とは異なり、高出力を得るために活性層幅 を広げマルチモード発振するLDが用いられたレーザモジュー ルである。これまでのレーザモジュールは高出力化のみが注目 されていたため、下記のような問題点があった。

①放熱設計が最適化されておらず,消費電力が大きい。 ②パッケージが大型で、各社でサイズが異なるため、互換 性がない。

*2 エムシーファイテル株式会社

③光出力を光ファイバから取り出していないタイプが多 く、使い勝手が悪い。

大型で互換性のないパッケージは、それを搭載するアプリ ケーションの小型化や基盤設計を難しくし、高い消費電力は、 ランニングコストを増大させ、またアプリケーションの放熱設 計も困難にする。

今回我々は、このような問題を解決するために、

①電力 – 光変換効率が高く、高出力なLDを採用

②光ファイバへの光結合効率の向上

③モジュール全体の放熱特性の向上

④業界標準である14-pinバタフライパッケージの採用

といった施策を行うことにより、小型で高出力かつ低消費電 力な900 nm帯マルチモード高出力半導体レーザモジュールを 開発したので報告する。

2. レーザダイオード

2.1 基本構造1)

900 nm帯マルチモードLDは, 現在, 当社と三井化学(株) との合弁会社であるエムシー・ファイテル(株)で製造されてい る。

LDはInGaAs / AlGaAs系の材料を使い,低圧MOCVD法 (metalorganic chemical vapor deposition)を用いてエピタキ シャル成長で作られる。図1にこのLDの模式図を示す。活性 層幅は、p-typeのGaAsキャップ層の中に作られているn-GaAs の電流狭窄構造によって、100 µmに制御されている。LDの前 端面には4%の低反射膜が、後端面には96%の高反射膜が形成 されており、共振器長は1.8 mmとしている。

このLDの大きな特徴は、完全分離閉じこめ構造 (decoupled) confinement heterostructure: DCH) を採用することで、高出 力, 高効率を実現していることである。

2.1.1 完全分離閉じ込め構造2)

AlGaAs系高出力LDの基本構造としては、単一量子井戸の 分離閉じ込め構造 (separated confinement heterostructure:

^{*} 研究開発本部 半導体デバイス開発部







図2 SCHとDCHの比較 Comparison of SCH and DCH

SCH) が一般的である。しかし,図2に示すように,SCH構造 は狭い量子井戸活性層にキャリアを有効に閉じ込めることは 困難で,導波層へのキャリアの溢れ出しが生じ,効率が低下す る。したがって,外側のクラッド層での少数キャリアの流出を ブロックする必要があるため,導波層は狭くクラッド層に対し てはエネルギー的に深くする必要がある。AlGaAs混晶系では バンドギャップと屈折率の間には一定の関係があるため,導波 モードの設計は大きな制限を受ける。

一方, DCH構造においては, 活性層の両側にバンドギャッ プが大きく光学的には十分薄いキャリアブロック層を配置する ことにより, 活性層キャリアの導波層への溢れ出しを阻止して いる。このため, 外側の導波構造はキャリアの閉じ込め構造と は完全に独立に設計することが可能である。

2.1.2 耐光学損傷性の向上²⁾

AlGaAs系半導体レーザの出力を制限する最大の要因は端面 の光学損傷 (catastrophic optical damage: COD)である。その 原因としては、キャリアの表面再結合、端面酸化、端面での光 吸収による温度上昇などが考えられる。CODを防止するには、 活性層近傍での光エネルギー密度を下げることが有効である。 DCH構造では図2に示すように導波モードプロファイルの改 善により活性層での光密度を低減させている。

更に,LD端面に電流非注入領域を設けることで端面での光 吸収を低減し,COD発生パワーレベルを向上させている。

2.1.3 熱抵抗, 電気抵抗の低減²⁾

CODと並んでLDの温度上昇に伴う出力飽和も出力を制限す る大きな要因である。LDの温度上昇を抑えるためには、LDを



構成する材料の熱抵抗を低くするとともに、電気抵抗を低くし ジュール熱の発生を抑えることが重要である。AlGaAs混晶系 では、Al組成を下げることで低熱抵抗化、低電気抵抗化が実 現できる。従来のSCH構造では、Al組成を下げしまうとクラッ ド層のバンドキャップエネルギーは低下し、少数キャリアの流 出をブロックできなくなる。

しかし,DCH構造においては,活性層キャリアの溢れ出し を気にすることなく,導波層,クラッド層のAl組成を抑える ことができるため,熱抵抗,電気抵抗を低減することが可能で ある。

2.2 LDの諸特性¹⁾

2.2.1 光出力

図3に900 nm帯マルチモードLD素子単体での光-注入電流 特性(*LI*特性)を示す。DCH構造と1.8 mmと長い共振器長を 採用することにより,最大光出力は9 W,電力-光変換効率は 最大で62%と,高出力,高効率を同時に実現している。

2.2.2 ファーフィールドパターン (far field pattern: FFP)

図4にマルチモードLDのFFPを示す。活性層に垂直方向 (vertical direction)ではシングルモードで発振しているため, ビーム強度はガウシアン分布に近い形をとるが,水平方向 (horizontal direction)ではマルチモード発振しているため,矩 形に近い強度分布となる。



FFP of a typical multi-mode LD chip



ACCelerated aging test result of LD chips

ビームの広がりは、垂直方向において半値幅で33°,ピーク から光強度が1/e²の位置で70°の広がりを持つ。ここで1/e²と は、ビーム強度の分布をガウシアン分布に見たてた場合、ピー クからこの位置までの間に全光出力の86.5%が入っているこ とを示す値である。水平方向では10°程度の広がりを持って おり、LDからの光出力が増すにつれビームの広がりが大きく なっているのは、熱レンズ効果の影響である。

2.2.3 信頼性

LDの信頼性試験は、環境温度70℃,注入電流3Aの条件下 で現在15000時間まで進行中である。その様子を図5に示す。 この結果から見積られる偶発故障率と平均寿命は、1.5 Wのモ ジュール光出力時で490FITと140万時間であり、高い信頼性 を示している。

3. モジュール構造

高出力かつ低消費電力なモジュールを実現するためには,高 い結合効率と,それを安定して実現できる構造,そしてLDの 発熱を効率よく放熱できる設計が重要である。

3.1 基本構造

マルチモードレーザダイオードモジュール (MM-LDM)の基 本構造は,980 nm帯シングルモードレーザダイオードモジュー ル (SM-LDM)の構造を踏襲している。図6にその模式図を示す。

レンズドファイバ サブマウント PD ベース Thermoelectric cooler: TEC 図6 モジュール構造模式図



LDは放熱特性を向上させるため,ジャンクションダウンの配 置でサブマウントに固定されている。LDの後方には,パワー モニタ用のPDが取り付けられている。LDからファイバへの 光結合は,ファイバの先端にレンズ加工を施したレンズドファ イバによってなされている。レンズドファイバは,精密調芯し た後,YAG溶接でベースに固定される。ベースの下にはペル チェ素子(thermoelectric cooler: TEC)が取り付けられ,LDの 温度を一定に制御することができる。

3.2 結合効率の向上³⁾

結合効率を向上させるには、レンズドファイバの設計が重要 である。図4に示したLDのFFPより、レンズドファイバの設 計を行った。980 nm帯のLDから発せられる光は楕円である から、活性層に垂直方向と、水平方向の成分に分けて結合効率 を検討した。まず、水平方向に関しては、レンズドファイバの 場合水平方向にはレンズ加工がされていないので、バットカッ プリング(突き合わせ結合)になる。しかし、前述したように LDの水平方向のビーム放射角(LD divergence angle)は10°程 度であり、開口数(numerical aperture: NA)にすると0.1程度 である。これに対し、我々が使用しているマルチモードファイ バ(multi mode fiber: MMF)はNA = 0.15である。このことに 加え、LDのストライプ幅が100 μ mに対し、MMFのコア径は 105 μ mであることから、水平方向に関してはバットカップリ ングでも十分な結合が得られると考えられる。

垂直方向については、MMFレンズドファイバの場合、楔状 に削られたファイバの先端に加工されたレンズ部分で光を集 光するSMFレンズドファイバと異なり、コア径が大きいため レンズ部だけでなく斜面の部分でも光を集光しなくてはなら ない。その模式図を図7に示す。MMFにおけるレンズドファ イバ設計では、先端の開き角(apex angle) θと頂点部のレン ズの半径(tip radius) Rの2つについて設計を行う必要がある。 ここでは、光の強度分布の中でその大部分が集中している半値 幅まで光を頂点のレンズ部分で、その他の広がった光を斜面の 部分で受けることを仮定して設計を行った。

LDからの光のほぼ全てを結合させるには、1/e²の位置での 放射角を基に先端の開き角を計算すればよい。1/e²の位置に おけるLDの放射角は約70°であり、この光が任意の先端の開 き角に対してどのような屈折角度(refraction angle)でファイ バに結合するか計算した結果を図8に示す。色が付いた部分は NA = 0.15のMMFの全反射を満たす領域で、この領域内に屈 折後の光が入ればその光を伝搬できることを示す。この図より、 1/e²の光を結合にするには、開き角は90~110°まで選択でき



図7 MMFレンズドファイバ模式図 The optical coupling configuration between LD chip and the lensed fiber



図8 先端開き角の検討 The apex angle dependence of refraction angle of the incident light of 70 degrees and 40 degrees



図9 レンズ部の半径の検討 The tip radius dependence of refraction angle of the incident light of FWHM

ることが分かる。しかし、LDからの放射角が小さい部分の光, 例えば図中のLD放射角 = 40°の光は、開き角100~130°が最 適となる。LDの放射角が半値幅以上を楔の部分で受けること を考えると、開き角110°程度が最適と考えられる。

頂点のレンズ部分の半径Rについて、図9に各Rに対する結 合後の角度を計算した結果を示す。この結果から、2.5 μ m ~ 7 μ m程度が最適値であると言える。実際のRは、Rが小さくな るとその研磨が難しくなることから、製造容易性と再現性を考 慮し5 μ mに設定した。

これらの計算結果より実際に試作を行ったところ,最大 90%,平均87%の結合効率を実現した。

また、最適化されたMMFレンズドファイバで、そのカップ リングトレランスの調査を行った。図10には、特にカップリ ングトレランスの厳しい活性層に垂直な方向に対して、MMF レンズドファイバと、SMFレンズドファイバのカップリング トレランスの比較を示す。980 nm帯SMFのモードフィールド 径 (mode field diameter: MFD)は6 µm程度と狭いため、カッ プリングトレランスも1 µmと非常に狭い。MMFはコア径が 105 µmと広いため、レンズドファイバの設計が最適化されて いなくても十分に広いトレランスが確保できるが、今回の検討 結果に従い最適化することにより4 µm程度のフラットなトレ ランスを実現した。

980 nmのSMFレンズドファイバのカップリングトレランス では、レンズドファイバが0.3 μm程度動いただけで、結合効



図10 MMFとSMFレンズドファイバのトレランスの比較 Comparison of coupling tolerances between MM and SM lensed fibers



図11 大型ヒートシンクによる TEC 電流の低減 Reduction of TEC current using large-sized heat sink

率が10%劣化する。我々の980 nmSMF-LDMは,精密YAG溶 接によってサブミクロンオーダーの動きを制御し,この劣化を 起こさない技術が用いられている。このモジュール構造を踏襲 したMM-LDMは,環境温度の変化や長期使用することによる 結合効率の劣化はほぼないと考えてよい。また,このように広 いカップリングトレランスを有すため,非常に製造が容易で, 高い歩留まりが期待できる。

3.3 放熱設計

放熱特性を向上させるには、LDからTEC直上までの部材の 熱伝導率を上げ,吸熱量の大きなTECを用いればよい。しかし、 部材の熱膨張係数を無視してモジュールを組めば、環境温度の 変化による結合効率の劣化、各部材にかかるストレスによる長 期信頼性の劣化が懸念される。また、不必要に吸熱量の大きな TECを使用すれば、モジュール全体の消費電力の増加を招く。

今回我々は, MM-LDM内部の各部材の熱伝導率と熱膨張係 数を最適化し, 更にLD直下のサブマウントを大型化すること により, ベースにより熱を広げて伝導できる構造とした。この 構造により, 特にLDの発熱が大きくなる高電流域において, 図11に示すように冷却に必要なTEC電流値を13%低減した。

低消費電力化に関しては、LDの発熱量に対し最適なTEC を選択する必要がある⁴⁾。具体的には、TECが最も効率良く 熱を引ける領域を見極めて選択しなくてはならない。図12に Type1とType2の2種類のTEC効率を比較した結果を示す。 TEC効率は縦軸のW_{LD}/W_{TEC}で定義され、これはTECに注入



Comparison of total power consumption

された電力に対し、どれだけの熱量が引けるかを表している。 この値が大きい方が効率が良いことを示す。Type1は、TEC 上面と下面の温度差 $\Delta T = 45$ ℃のときに、吸熱量Qc = 2.4 Wの TECであり、比較的小さい熱量を引くのに効率が良い。この ΔT = 45℃とは、70℃の環境温度下でLD温度を25℃に制御する状 態に対応する。Type2は、 $\Delta T = 45$ ℃のときにQc = 6.0 Wの TECであるが、このTECは大きい熱量を引くときに効率が良 く、小さい熱量を引くときにはむしろ効率が悪くなる。

図12によると、モジュール出力1.5 WまではType1のTEC の方が効率が良く、それ以上ではType2の方が効率が良いこ とが分かる。実際のモジュールにおける全消費電力の比較を 図13に示す。ここで全消費電力とは、LDとTECそれぞれの 消費電力を足し合わせた値である。1.5 Wを境にそれ以下では Type1を搭載したモジュールが、それ以上ではType2を搭載 したモジュールの消費電力が低くなっている。

これらの検討から,環境温度70℃,LDの温度25℃の使用条件下では,1.5 W未満の出力のモジュールにはType1のTECを,1.5 W以上の出力のモジュールにはType2のTECを搭載することに決定した。また,環境温度が下がり*ΔT*が小さくなれば,最適なTECは変わることになるが,これらの検討により顧客の仕様に応じたより低消費電力なモジュールを提案できるようになった。







図15 MM-LDMの発振スペクトラム Optical output spectrum of MM-LDM

4. モジュール特性

4.1 光出力

図14にLD温度 $T_s = 25$ C, CW 駆動における*LI*特性を示す。 発振しきい値は344 mA,スロープ効率は最大で0.9 W/Aで あった。また,最大光出力4.7 Wを,駆動電流7.5 Aで達成した。 ただし,実際の製品化はモジュールの信頼性の観点から2.5 W までとしている。モジュール光出力2.5 Wにおける駆動電流値 は3.35 A,LD順方向電圧は1.74 Vであった。

4.2 発振スペクトル

図15に発振波長975 nmのMM-LDMの光出力スペクトルを 示す。発振波長は±3 nmのトレランスで製造可能である。ス ペクトル幅は3 nm程度である。

波長の光出力依存性は、1.3 nm/Wである。この波長シフト は、電流を供給することによる活性層の温度上昇によって生じ ている。波長シフトのLD温度に対する依存性は0.35 nm/℃な ので、TECでLD温度を変化させることによって、波長をコン トロールすることも可能である。

4.3 消費電力

図13に示したように、TECをモジュール出力に応じて最適 化したことにより、光出力1.5 W時には9.3 W、光出力2.5 W 時においても17.4 Wの全消費電力を実現した。この値は、従 来のバタフライ型MM-LDMの全消費電力より、約10~30% 低い値である。



図16 光出力及びモニタ電流の時間安定性 Time stability of the fiber output power and the monitor current

4.4 光出力及びモニタ電流の時間安定性

図16にMM-LDMの光出力及びモニタ電流の時間安定性の 駆動電流依存性を示す。全駆動領域で光出力,モニタ電流とも 変動が1%以下と安定した特性であった。この安定性であれば, CATV用に使われているダブルクラッドファイバを用いた光 増幅器に使用しても問題ないレベルと考えられる。

5. おわりに

ファイバレーザや固体励起レーザの励起光源として,通信以 外の産業用途にも利用できる900 nm帯マルチモード高出力半 導体レーザモジュールを開発した。結合効率と放熱特性の向上 により,従来より30%も低消費電力なモジュールを,業界標 準である14-pinバタフライパッケージという小型のパッケージ で実現した。また,このモジュールは優れた光出力安定性を有 しているため,通信用途の高出力光増幅器にも使用することが 可能である。

参考文献

- 1) Y.Oeda, F.Fujimoto: OAA' 02 (2002), OMB1-1
- 2)室清文,藤本毅,大枝靖雄,山田義和,山田由美,大久保 敦,五十嵐康一:機能材料,1997年8月号
- 3) 河野健治:「光デバイスのための光学系の基礎と応用」現代工学 社
- N.Hayamizu, J.Miyokawa, H.Murata, K.Nishikata, Y.Oeda, T.Fujimoto, and Y.Ikegami: OAA' 03 (2003), TuB4