

ファイバレーザ励起用高出力半導体レーザモジュール

光電子技術研究所 坂元 明¹・小川 弘 晋²・阪本 真 一³
オプトエナジー株式会社 山形 友 二⁴・山田 由 美⁵

High Power Laser Diode Module for Fiber Laser Pumping

A. Sakamoto, H. Ogawa, S. Sakamoto, Y. Yamagata, and Y. Yamada

ファイバレーザ発振器を励起するために用いられる高出力半導体レーザモジュールは、ファイバレーザ出力の源であり、ファイバレーザの特性を左右する重要な部品である。当社では、オプトエナジー社の高出力半導体レーザ素子を用い、情報通信分野で培ってきた光部品アッセンブル技術と組み合わせることで、世界最高レベルの高出力かつ高信頼の半導体レーザモジュールを実現した。

High power laser diode modules are essential devices for fiber laser systems because properties of the modules directly affect the performance of the fiber laser systems. We have realized high power and high reliability laser diode modules by combining assembling technology developed for optical transmission devices and high power laser diode chips developed by Optoenergy Inc.

1. ま え が き

光出力が数十ワットのマーキング用途から、光出力が数キロワットの金属加工用途まで幅広い分野でファイバレーザが用いられ、近年その市場は世界規模で拡大を続けている。ファイバレーザにおいては、イッテルビウム (Yb) を添加した光ファイバに励起光を入射し反転分布を実現することでレーザ発振をさせることから、励起光源の特性がファイバレーザの性能を左右する。当社では、情報通信分野で培ってきた光部品アッセンブル技術をベースに、オプトエナジー社の高出力半導体レーザ素子を用いることで、高出力かつ高信頼のレーザダイオード (LD) モジュールを実現した。本稿では、オプトエナジー社のLD素子の特性および、LD素子からの光を光ファイバに結合させたLDモジュールについて報告する。

2. 高出力レーザダイオード素子

2. 1 素子構造

900 nm帯に発振波長を持つマルチモードLD素子 (以下、LD素子) の構造概略を図1に示す。活性層/導波層/クラッド層からなるレーザ構造は、エピタキシャル成長技術により、GaAs単結晶基盤上に形成される。素子の発光幅は横方向に電流狭窄構造を設けることで、光

結合を行う光ファイバのコア径に合わせて 100 μm に制御している。発振波長 900 nm帯の素子は、InGaAs/AlGaAs/GaAsによるIII-V族化合物が一般に用いられるが、これらの結晶材料がもつ劈開性を用いて原子レベルの平坦な結晶端面を前後に2面形成し、この端面を共振器ミラーとして利用している。端面部には、反射率調整のためにコーティングが施され、ここを通してレーザ光が射出される。

この材料系の素子においては、レーザ光射出端面において、光密度が材料限界を超えたときに生ずる瞬时光学損傷(COD)が、実用最大出力の制限となっている^{1) 2) 3) 4) 5) 6)}。このため、CODの発生を抑制することが高出力かつ高信

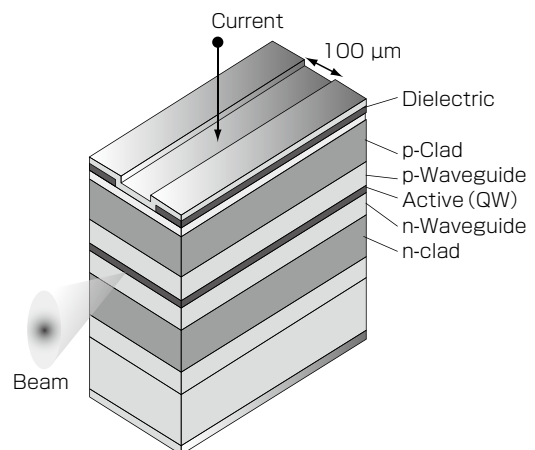


図1 マルチモード半導体レーザ素子の模式図
Fig. 1. Schematic structure of multimode semiconductor laser diode chip.

1 応用電子技術研究部グループ長
2 ファイバレーザ事業推進室 製造部 主席技術員
3 シリコン技術研究部 (工学博士)
4 オプトエナジー株式会社 (工学博士)
5 オプトエナジー株式会社

略語・専門用語リスト		説明
略語・専門用語	正式表記	
GaAs	Gallium Arsenide	ガリウムヒ素, 半導体レーザを構成する材料の一つ
InGaAs	Indium Gallium Arsenide	インジウムガリウムヒ素, 半導体レーザを構成する材料の一つ
AlGaAs	Aluminum Gallium Arsenide	アルミニウムガリウムヒ素, 半導体レーザを構成する材料の一つ
CoS	Chip on Submount	チップオンサブマウント, 半導体レーザ素子をサブマウント上に半田づけした形態
DCH	Decoupled Confinement Heterostructure	分離閉じ込め構造, 半導体レーザの高出力化に適したレーザ構造の一つ
CW	Continuous Wave	連続発振
WPE	Wall Plug Efficiency	電力変換効率, 投入電力に対する光出力の割合
LD	Laser Diode	半導体レーザダイオード
NA	Numerical Aperture	開口数
COD	Catastrophic Optical Damage	瞬时光学損傷, レーザ光の出力がある限界出力を超えると発熱により瞬時に半導体レーザ素子の光出射端面を構成する結晶が溶解し, 発光停止に至る現象
MTTF	Mean Time To Failure	平均故障時間

頼を実現するうえで重要となる。図2に端面部においてCODが発生する過程を模式的に示す。劈開で形成した素子の端面部は、反射率調整のための誘電体膜コーティングが施されているが、これは半導体表面の不活性化のための保護膜も兼ねている。その形成過程に特別な配慮を払わなければ、半導体表面の酸化等に起因して高密度の準位が形成される^{7) 8)}。レーザ光の出射端面部において、光吸収により生じたキャリアの非発光再結合が誘発され、局所的な温度上昇が生ずる。温度上昇により半導体のバンドギャップ縮小が生ずるため、光吸収や非発光結合を更に助長する。このような連鎖により素子の端面部はついに熔融にいたり、レーザ発振を維持できなく

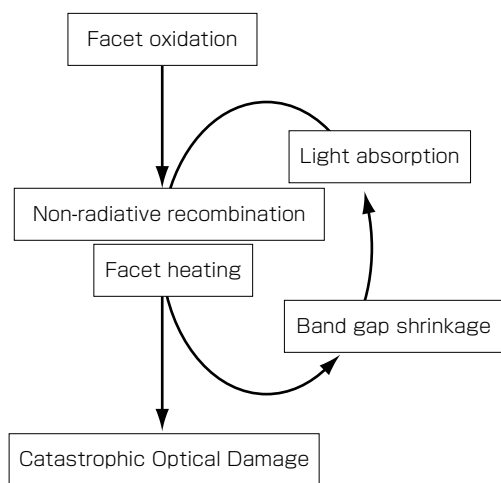


図2 LD素子端面ミラーの損傷過程

Fig. 2. Degradation process of LD facet mirror.

なる。このような状態がCODである。従ってCODを防止し、信頼性の改善を図るためには、端面部において、①準位形成の抑制⁹⁾、②光吸収の抑制^{10) 11) 12)}、③光密度¹⁾の低減を行って、温度上昇の連鎖を断ち切ることが重要である。

オプトエナジー社のLD素子では、DCH構造をベースとした光密度低減技術をはじめとする端面温度上昇の抑制に有効な対策を行うことにより、長期安定動作が可能な信頼性を実現している¹³⁾。DCH構造の模式図を図3に示す。DCH構造は、素子特性、とりわけ最大出力や温度特性に直接影響するキャリア閉じ込めを悪化させることなく、光密度を低減できる構造である。したがって、より大きな光出力を取り出すことができ、高出力・高信頼のLD素子を実現することが可能となる。

LD素子は熱膨張係数がGaAs基板に整合したサブマ

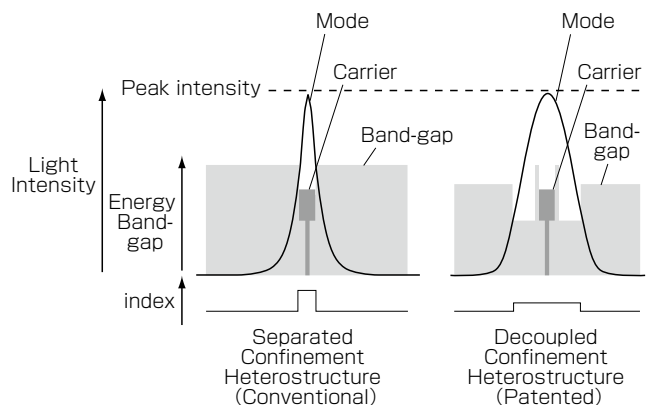


図3 DCH構造と従来構造の比較

Fig. 3. Comparison of conventional structure and DCH concept.

ウント材料に、AuSn共晶はんだを用いてエピサイドダウンで接合する。接合後の外観を図4に示す。この様に実装された形態をチップオンサブマウント (CoS) と呼ぶ。

このCoS実装形態において、LD素子のCOD抑制効果を確認した結果を図5に示す。通常連続発振駆動 (CW) の場合、素子全体の発熱による熱飽和によって光出力が制限されてしまうためCODレベルの評価ができない。この熱飽和を回避する目的でパルス駆動 (Pulse) した場合、駆動電流 50 Aで光出力が 38 Wに達しているが、そのレベルでもCODによる故障は発生しておらず、DCH構造の効果を確認された。

2.2 素子光学特性

LD素子は、共振器長の長尺化により高出力化が可能となるが、LD素子の電力光変換効率は低下する。このため、電力光変換効率を重視した 4 mm共振器長素子 (以下、4 mm-CoS)、および、実用最大出力を重視した

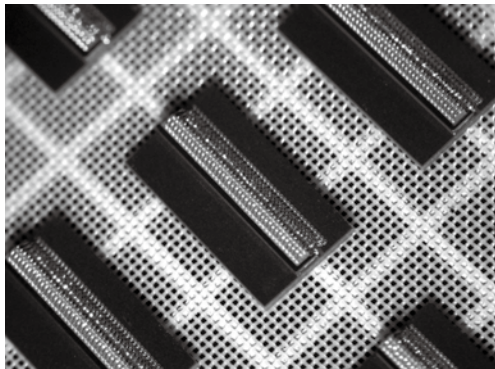


図4 LDチップオンサブマウント
Fig. 4. LD chip on submount (CoS).

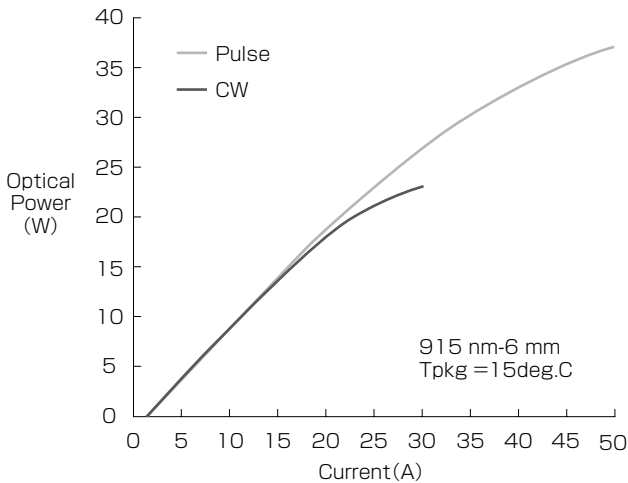


図5 6 mm-CoSのCWおよびPulse駆動におけるI-L特性パッケージ温度Tpkg=15℃におけるの比較
Fig. 5. Comparison of I-L characteristics between CW and pulse operation for 6 mm-CoS under package temperature Tpkg of 15 °C.

6 mm共振器長素子 (以下、6 mm-CoS) を製品化しており、用途に適したものを選択している。4 mm-CoSと6 mm-CoSによる光出力および電力光変換効率特性を図6、図7および表1に示す。4 mm-CoSにおける実用出力は 13 Wであり、6 mm-CoSでは 15 Wにおよぶ。これらの実用出力は、100 μm幅のシングルエミッタにおける光出力として、世界トップクラスの出力を有している。室温駆動における電力光変換効率は、4 mm-CoSの 13 W駆動では 60 %、6 mm-CoSにおける 15 W駆動では 55 %である。

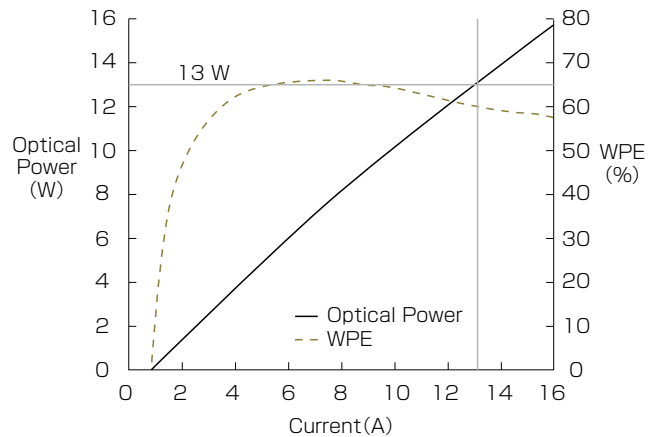


図6 4 mm-CoSの特性
Fig. 6. Characteristics of 4 mm-CoS.

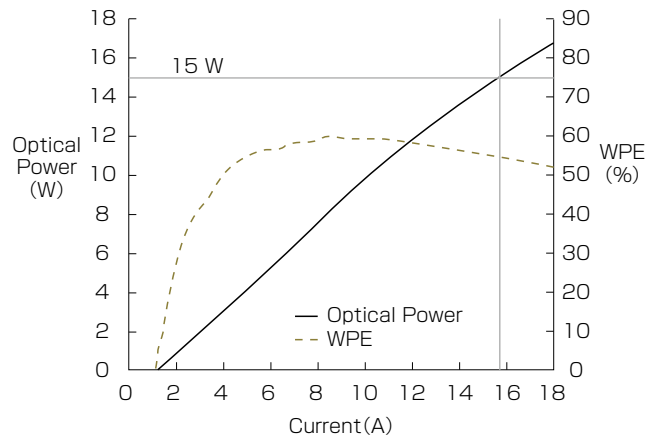


図7 6 mm-CoSの特性
Fig. 7. Characteristics of 6 mm-CoS.

表1 4 mm-CoSと6 mm-CoSの特性
Table. 1. Properties of 4 mm-CoS and 6 mm-Cos.

項目	単位	特性	
素子長	mm	4	6
光出力	W	13	15
電力光変換効率	%	60	55
水平ビーム広がり角	°	< 11	< 11

LD素子のビーム広がり特性は、ファイバ結合効率の支配要素となるため、光出力と同様に重要な特性である。図8にLD素子からのビーム広がりを垂直、および、水平方向のそれぞれについて示す。垂直方向は単一横モード発振するため、ビームはガウシアンに近く、半値全角 27°であり、駆動電流依存性はない。一方、水平横モードは多モード発振しており、注入電流依存性をもつ。これは電流注入ストライプ部が発熱することで半導体の屈折率が増加することにより生ずる、熱レンズ効果によるものである。この熱レンズ効果による影響は、同じ光出力の場合、共振器長 4 mm よりも 6 mm のほうが、小さくなる傾向がある。これはLD素子長が長いと電流密度が低減されることに加え、接合面積の増加により放熱特性が強化されることに伴い注入ストライプ部の温度上昇が抑えられ、熱レンズ効果が低減されるためである。

この効果により、6 mm-CoSの実用出力 15 Wにおける水平ビーム広がり角は、4 mm-CoSの実用出力 13 W時と同等に抑えられ、共に 11°未満となる。この値は

ファイバNAに対し、十分に小さなビーム広がり角に抑えられており、光ファイバへの結合効率の高いビーム特性を備えていることがわかる。

2.3 素子長期信頼性評価

LD素子が長期の高出力動作に耐えうる実用的な信頼性を有することを検証するために、接合温度 T_j および光出力 P_o を 5 条件に設定したマルチセルの加速通電試験を実施した。4 mm および 6 mm-CoS について、それぞれ 150 素子以上、80 万時間以上のデバイスアワーを蓄積し、偶発故障率を集計した。

最大 6500 時間におよぶ長期通電が実施されているなかで、4 mm および 6 mm-CoS それぞれについて、最も光出力負荷条件の厳しい試験セルの光出力時間変化推移を図 9、図 10 に示す。6 mm-CoS において、1600 時間で急激に光出力が低下する突発的な故障が発生しているが、これは 900 nm 帯の素子に典型的にみられる、端面のCODが原因であった。この故障素子以外には、光出力・接合温度ともに加速条件であるにもかかわらず、可観測なレベルの光出力低下は確認されず、長期の安定駆動

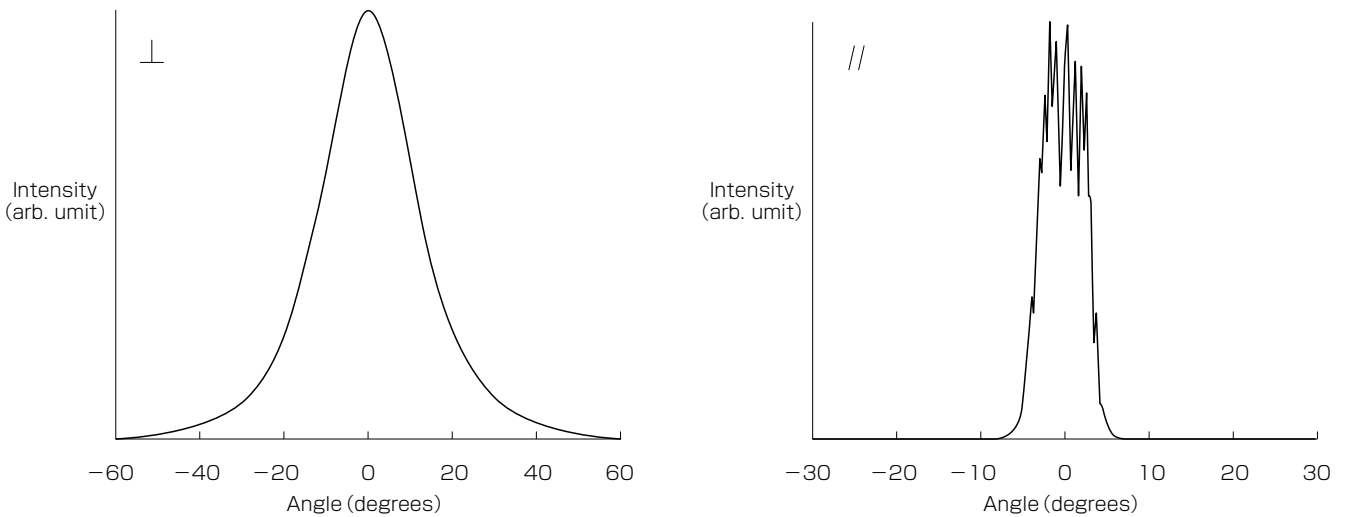


図8 4mm-CoSにおける垂直(⊥)および水平(//)方向のビーム放射パターン

Fig. 8. Typical beam divergence pattern of 4mm-CoS measured in perpendicular (⊥) and horizontal (//) directions.

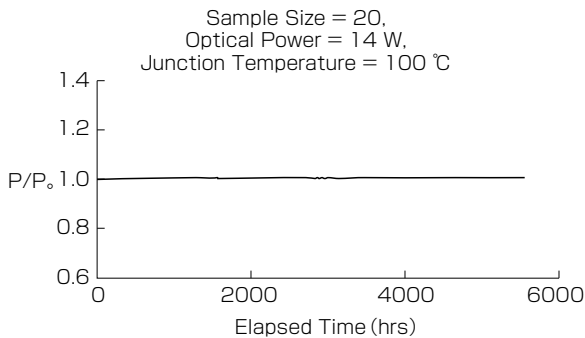


図9 4 mm-CoSの連続通電試験結果

Fig. 9. Power variation in accelerated aging test for 4 mm-CoS.

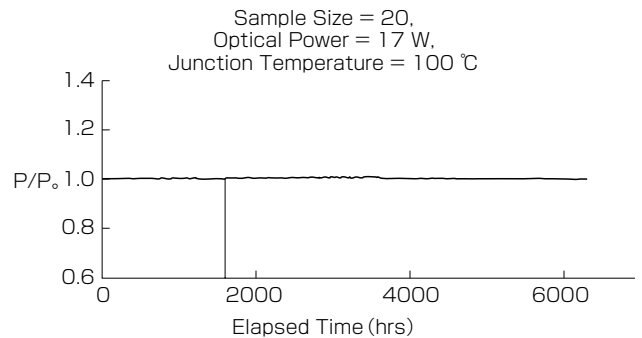


図10 6 mm-CoSの連続通電試験結果

Fig. 10. Power variation in accelerated aging test for 6 mm-CoS.

に耐えうることを証明している。

これらのマルチセル加速通電試験結果を用い、サブマウント温度 25℃・定格光出力における、偶発故障モードの平均故障時間 (MTTF) を見積もった結果を表 2 にまとめる。4 mm-CoS の 13 W 駆動において 56 万時間、一方、6 mm-CoS の 15 W 駆動では 63 万時間と推定され、世界トップレベルの高い信頼性を持つことが実証された。なお、一部のセルでは現在でも通電試験を継続しており、MTTF は今後さらに伸びることが想定される。

表2 サブマウント温度25℃条件における偶発故障モードのMTTF計算結果

Table. 2. Calculated results of MTTF for random failure mode under submount temperature of 25℃.

LD素子タイプ	Po (W)	Tj (℃)	MTTF@CL 60% (hrs)
4 mm-CoS	11	65	2,250,000
	12	70	1,190,000
	13	80	560,000
6 mm-CoS	13	65	1,890,000
	14	70	1,070,000
	15	75	630,000

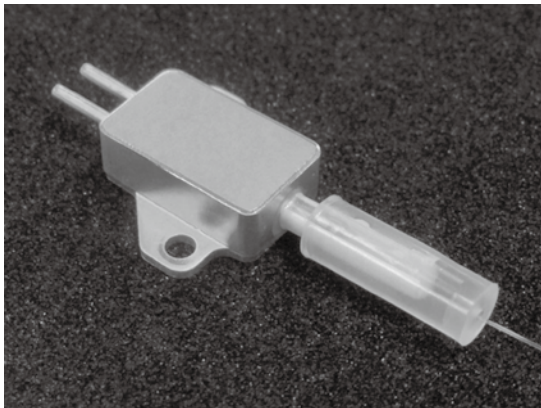


図11 シングルチップLDモジュール外観
Fig. 11. Appearance of single-chip LD module.

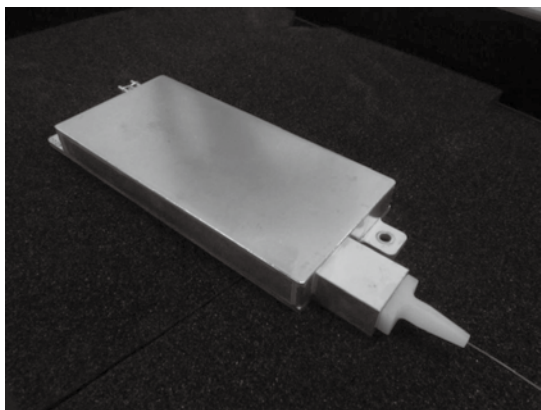


図12 マルチチップLDモジュール外観
Fig. 12. Appearance of multi-chip LD module.

3. レーザダイオードモジュール

3.1 レーザダイオードモジュール特性

オプトエナジー社の半導体レーザ素子を用い、筐体内部に一つのレーザ素子を実装したシングルチップLDモジュールと、複数の素子を実装したマルチチップLDモジュールをそれぞれ製品化した。図 11, 図 12 にはシングルチップLDモジュールと、マルチチップLDモジュールの外観写真、図 13, 図 14 にはそれぞれのモジュールの光出力の駆動電流依存性のグラフを、表 3 には特性をまとめた結果一覧を示す。シングルチップLDモジュールでは、光出力を重視し素子長 6 mm の CoS を

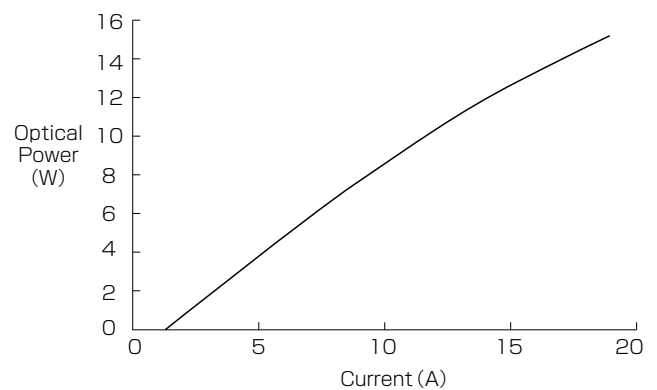


図13 シングルチップLDモジュール特性
Fig. 13. Characteristics of single-chip LD module.

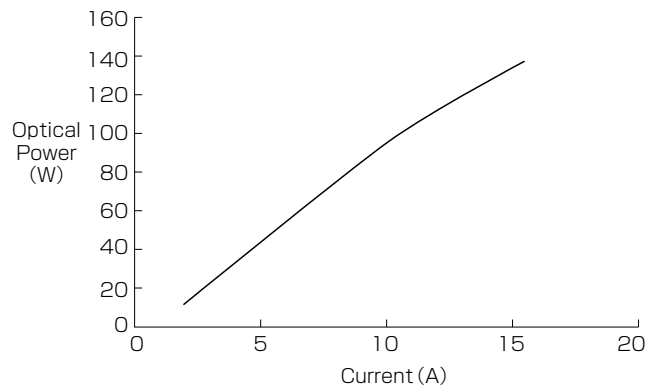


図14 マルチチップLDモジュール特性
Fig. 14. Characteristics of multi-chip LD module.

表3 シングルチップLDモジュールとマルチチップLDモジュールの特性

Table. 3. Properties of single-chip LD module and multi-chip LD module.

項目	単位	特性	
		single	multi
LD素子数	-	single	multi
光出力	W	13	110
電力光変換効率	%	45	50
駆動電流	A	16	12

採用した。一方、マルチチップLDモジュールでは、光出力と電力光変換効率の両立を目指し素子長 4 mm の CoS を採用した。その結果、シングルチップの構造においては世界最大となる常用光出力 13 W を実現した。一方、マルチチップLDモジュールでは、チップを複数用いることでシングルチップLDモジュールの約 8.5 倍の光出力となる 110 W を得ながら、電力光変換効率はシングルチップLDモジュールより高い 50 % を実現した。

3. 2 レーザダイオードモジュール信頼性

シングルチップ・マルチチップLDモジュール共に、光通信部品に適用される信頼性評価試験をベースにした試験項目に合格しており、高い信頼性を有していることを確認している。加えて、モジュール化によるLD素子故障率の上昇も確認されておらず、2.3 項で示したLD素子の長期通電特性と同等の寿命を有している。

当社のファイバレーザは、これらのLDモジュールを励起用光源として採用することで、高出力かつ高信頼を実現している。

4. む す び

オプトエナジー社の高出力半導体レーザ素子を用い、筐体内部に一つのレーザ素子を実装したシングルチップLDモジュールと、複数の素子を実装したマルチチップLDモジュールをそれぞれ製品化した。これにより、光出力が数十ワットから数キロワットまで幅広い範囲のファイバレーザへの搭載が可能であり、当社のファイバレーザの心臓部を支えている。

参 考 文 献

- 1) M.R. Gokhale, et. al.: "High-Power High-Efficiency 0.98-um Wavelength InGaAs-(In)GaAs(P)-InGaP Broadened wave-guide Lasers Grown by Gas-Source Molecular-Beam Epitaxy", IEEE Journal of Quantum Electronics, 33 pp. 2266-2276, 1997.
- 2) S. O'Brien, et. al.: "9.3W CW (In)AlGaAs 100 μm wide lasers at 970 nm", Electron.Lett., 33, pp. 1869-1870, 1997.
- 3) A. Al-Muhanna, et. al.: "High-power (>10 W) continuous-wave operation from 100-mm-aperture 0.97-mm-emitting Al-free diode lasers", Appl. Phys. Lett., 73, pp. 1182-1184, 1998.
- 4) X. He, et. al.: "10.9 W continuous-wave optical power from 100um aperture InGaAs/AlGaAs (915nm) laser diodes" Electron. Lett., 34, pp.2126-2127, 1998.
- 5) J. K. Wade, et. al.: "8.8W CW power from broadwaveguide Al-free active region ($\lambda = 805$ nm) diode lasers", Electron., Lett., 34, pp.1100-1101, 1998.
- 6) K. Shigihara, et. al.: "High Power Operation of Broad Area Laser Diodes with GaAs and AlGaAs Single Quantum Wells for Nd:YAG Laser Pumping", IEEE J. Quantum Electron., 27, pp.1537-1543, 1991.
- 7) W.E. Spicer, et. al.: "The Surface Electronic Structure of III-V Compounds and the Mechanism of Fermi Level Pinning by Oxygen (Passivation) and Metals (Schottky Barriers)", Surface. Sci., 86, pp.763-788, 1979.
- 8) Winfried Mönch: Semiconductor surfaces and interfaces, Springer Series in Surface Sciences, Springer, Berlin, 26, pp.354, 2001
- 9) L. W. Tu, et. al.: "In-vacuum cleaving and coating of semiconductor laser facets using thin silicon and a dielectric.", J. Appl. Phys. Vol.80, pp.6448-6451, 1996
- 10) S.Yamamura, et. al.: "A very low failure rate of COD free high power 0.98 μm laser diode with the window structure", Conf. Publ., Opt. Fiber. Commun. Conf, USA, pp.162, 2000.
- 11) Y. Sakamoto, et. al.: "Reliable high-temperature 50-70 mW CW operation of 659-nm window-mirror laser diodes", Conf. Publ. ISLC 1998 NARA, pp.15-16, 1998.
- 12) Dan A. Yanson, et. al.: "High-Power, High-Brightness, High-Reliability Laser Diodes Emitting at 800-1000 nm", Proc. SPIE, Vol.6456, 64560L1-8, 2007.
- 13) T. Fujimoto, et. al.: "Highpower, InGaAs/AlGaAs laser diodes with decoupled confinement heterostructure", Proc.SPIE Vol. 3628, pp.38-45, 1999.