

# 高輝度励起LDモジュール

先端技術総合研究所 葛西洋平<sup>1</sup>・阪本真一<sup>1</sup>・高橋行彦<sup>1</sup>・片桐健<sup>1</sup>・坂元明<sup>2</sup>

## High Brightness Pump Module

Y. Kasai, S. Sakamoto, Y. Takahashi, K. Katagiri, and A. Sakamoto

キロワット級ファイバレーザの励起光源として用いられる高輝度レーザダイオードモジュールの開発成果を報告する。レーザダイオードモジュールはファイバレーザの特性を特徴付けるキーデバイスである。当社で開発した高出力レーザのパッケージング技術とオプトエナジー社のレーザダイオード高出力化技術を組み合わせることで世界最高クラスの輝度を達成した。

We report the development results of high brightness laser diode modules as used pump sources for kilowatt fiber lasers. Laser diode modules are key devices for characterizing the properties of the fiber lasers. We have achieved the highest class brightness in the world by combining the developed packaging technology and high power laser diode technology of OPTOENERGY Inc.

### 1. ま え が き

ファイバレーザはCO<sub>2</sub>レーザやYAGレーザと比較して高効率、高ビーム品質、省スペースなどあらゆる性能で優れているため、レーザ加工市場において年々需要が高まっている<sup>1)</sup>。なかでも金属の切断や溶接といった用途のキロワット級のファイバレーザの成長が著しい<sup>1)</sup>。そのような高出力ファイバレーザシステムには数十台ものLaser Diode (LD) モジュールが励起光源として使用される。LDモジュールの輝度、すなわち1本のファイバ中を導波する出力が高くなるほど使用するLDモジュールの台数を減らすことができ、励起コンバイナの簡略化、システムの省スペース化、部品点数の削減によるコストダウンなどが可能となる。また、総励起パワーを高めることによってファイバレーザの発振出力を高めることも可能となる。したがって、励起LDモジュールの高輝度化は競争力のあるファイバレーザを実現するためにきわめて重要なテーマであり、各社で盛んに開発が行われている<sup>2), 3), 4)</sup>。当社では100 μmコア径のファイバから出力300 Wという超高輝度のLDモジュールの開発に成功した。本稿にて概要と特性評価結果を報告する。

### 2. LDモジュールの高輝度化技術

高出力かつ高輝度の励起LDモジュールの一般的な構成は、複数のレーザエミッタからの出射ビームをコリメー

トレンズで平行光に変換し、ミラーによってビームを整列させ空間多重してファイバに結合させる構成となっている。そのようなLDモジュールの出力と輝度を高めるための方法は以下の2つに大別される。1つ目はモジュールに収容されるエミッタの数を増やすこと、2つ目は1エミッタ当たりの出力を増やすことである。しかしエミッタ数を増加させるにつれて空間多重が困難になりファイバに高い結合効率で集光できなくなる。一方、1エミッタ当たりの出力を増加させるとCatastrophic Optical Damage (COD) とよばれるレーザ素子の端面が溶融してしまう故障モードの発生確率が上昇し、素子寿命が短くなってしまふ。また、あるレベルより高出力動作させると発熱が上昇し、効率が下がり、効率が下がったことでさらに発熱が上昇するといった連鎖に陥り熱飽和が起ってしまう。これらの技術的課題によってLDモジュールの高輝度化が制限されていた。当社ではグループ会社のオプトエナジー社が開発した高出力LDと、われわれのモジュール光学系設計、パッケージ設計、およびアッセンブル技術を結集することでLDモジュールの世界最高レベルの高輝度化に成功した。本章では各要素技術の概要について説明する。

#### 2.1 レーザダイオード

LDの高出力化技術として一般的な方法として、共振器長を長くすることおよび発光ストライプ幅の拡大があげられる。いずれの方法でも活性層のエリア拡大によって熱抵抗と電気抵抗が低減して発熱が抑制される。また、LD端面のパワー密度の低減によりCODレベルが上昇し、素子寿命も延びる。これらの効果によってより高出力動作が可能となる。しかし共振器長を長くすると内部損失

1 ファイバレーザ研究部

2 ファイバレーザ研究部 次長

## 略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
LD	Laser Diode	レーザ発振する半導体ダイオード.
NA	Numerical Aperture	開口数. ファイバのNAという場合は光ファイバの受光可能な臨界角度の正弦として定義される.
COD	Catastrophic Optical Damage	LD端面が光吸収による発熱によって温度上昇し融解にいたる故障モード.
CODレベル	Catastrophic Optical Damage Level	CODが発生しうるパワーの閾値レベルをさす.
BPP	Beam-Parameter-Product	ストライプ幅の1/2とビーム広がり角の1/2との積で定義される.
ADCH	Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure	LDの高出力化技術のひとつ. 活性層における光の閉じ込めを最小化し, 内部損失を最小化することで高いCODレベルが得られる.
MTTF	Mean-Time-To-Failure	平均故障時間
NFP	Near Field Pattern	活性層近端におけるパワーの空間分布.
Fast軸		活性層に対して垂直方向に広がりをもつビーム軸.
Slow軸		活性層に対して水平方向に広がりをもつビーム軸.
電力変換効率		モジュールのリード端子に投入した電力に対してファイバから出力されたレーザパワーの割合.
スロープ効率		光出力が駆動電流を上げたときどのくらいの割合で上昇するかをしめす. I-Lカーブの傾き.
特性温度		半導体の閾値電流およびスロープ効率の温度依存性を指数関数フィットしたときの係数として算出される.
DDL	Direct Diode Laser	対象物にLDのレーザ光を直接照射する装置. ファイバレーザと比較して光のモード変換をしない分効率が高いがビーム品質は劣る.

の影響の増加と閾値電流の上昇によって発光効率が低下するという欠点がある. そこでわれわれはLDのストライプ幅を拡大する設計を採用した. ストライプ幅を拡大しても閾値電流は上昇するものの, 高電流領域では発熱の抑制効果とそのペナルティ分を上回り, 発光効率はむしろ向上するという結果が得られているからである<sup>5)</sup>. しかし, ストライプ幅の拡大は水平方向のBeam-Parameter-Product (BPP) の悪化をとまなう. これは発熱抑制によって熱レンズ効果が弱まり広がり角は小さくなるが, ストライプ幅の増加分を完全に補償できないためである. 高出力動作させるというコンセプトは本質的にBPPの増大に対応した高度の光学設計が必要になる. われわれは独自の光学系と高精度調心装置によって, 100 μm コア, NA 0.22 ファイバに高い結合効率で結合させる範囲で最大限までストライプ幅を拡大することにした.

また, ストライプ幅の拡大とは独立にAsymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH) 構造というLDの高出力動作を可能にさせる素子構造も採用している<sup>5)</sup>. 本稿ではADCH構造の説明は割愛するが, 光の閉じ込めを極限まで低減することによりCODレベルを向上させ, 高出力かつ高信頼動作を可能にしている.

幅広ストライプ構造とADCH構造によってきわめて高い信頼性が得られていることに加え, 発光素子としてシングルエミッタLDを採用しているためレーザバーのよう

に隣接エミッタ間の熱干渉もない. 15 W, ジャンクション温度 80 °C の条件において, 素子のMean-Time-To-Failure (MTTF) は 100 万時間以上と見積もられている.

## 2.2 光学系

コリメートレンズ透過後のビーム径はLDのNear Field Pattern (NFP) を反映してFast軸方向に短くSlow軸方向に長い. したがってビームの空間充填密度を高めるためには図1のようにFast軸方向に並ぶように光学系が組まれる. Slow軸方向については大きなBPPの光を効率的にファイバに結合させるために, ビームの光軸高さとファイバの光軸高さが一直線上に合わせられる. LDの寸法

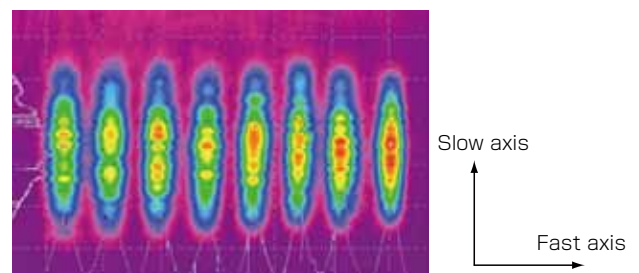


図1 モジュール内のビーム列の一部を取り出して撮影したビームプロファイル像  
Fig. 1. Typical beam alignment profile image of part of the beam column in the module.

に合わせた微細なレンズやミラーが非常に高精度で調整される必要があるため、われわれは独自の自動調心装置を開発し、結合効率の高い光学系の実現を可能にした。また、空間多重に加えて偏波多重もすることで輝度を向上させている。

### 2.3 パッケージ

パッケージを設計するうえで放熱性を向上させることは重要な課題のひとつである。しかし熱伝導率の高い金属は一般的にレーザー素子よりも熱膨張率が大きく、パッケージにはんだ接合する際に巨大な熱応力がかかる懸念がある。熱応力がかかるとレーザー素子の内部故障モードを誘発する。われわれは熱伝導率が高い材料を使用しつつも、素子へかかる熱応力を低減する構造を設計することによって高い信頼性と低い熱抵抗の両立を実現した。図2は開発したLDモジュールの外観写真である。サイズは約10 cm×10 cmとコンパクトである。また、レーザーバーではなくシングルエミッタなのでマイクロ水冷チャンネルを設ける必要もない。

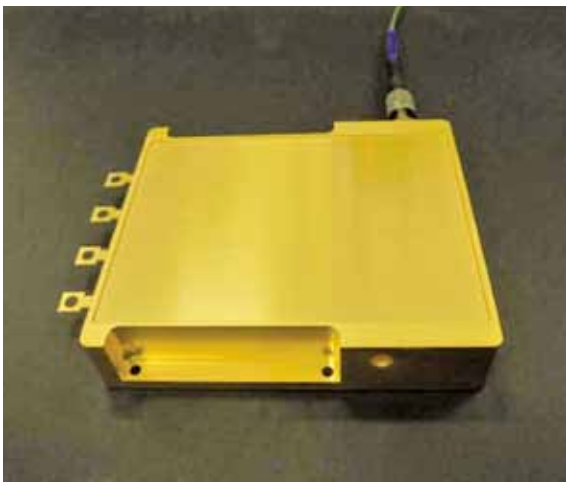


図2 LDモジュールの外観写真  
Fig. 2. Appearance of the 300 W LD module.

## 3. LDモジュール特性

### 3.1 光・電気・熱的特性

開発したLDモジュールの光出力と順方向電圧の電流依存性結果を図3に示す。ヒートシンク温度25℃、駆動電流15.5 Aにおいて出力300 Wを達成した。出力線形性は16 Aまでほぼ維持され、熱飽和もほとんどみられない。図4に電力変換効率（ウォールプラグ効率）の電流依存性結果を示す。300 W出力時の電力変換効率は50%という実用上十分高い水準に届いていることがわかる。また、高電流領域での電力変換効率の低下が非常に小さいのがこのLDモジュールの特徴の1つであり、レーザー素子の幅広ストライプ構造およびADCH構造の効果を示している。

図5にLDモジュールの発振波長が駆動電流に対してどのように変動するかを示す。半導体は温度上昇とともに発振波長が長波長シフトするのでその挙動から放熱性能がわかる。300 W近傍でのシフト量は1 nm/A未満と優れた値がえられ、モジュールの熱抵抗が十分小さいことが確認された。

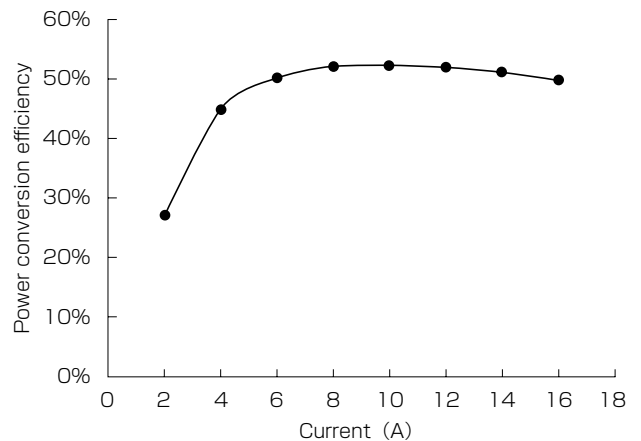


図4 LDモジュールの電力変換効率特性  
Fig. 4. Power conversion efficiency of the module.

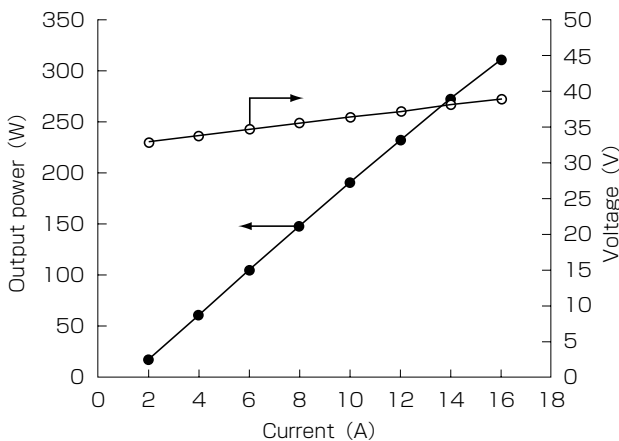


図3 LDモジュールの光出力および順方向電圧特性  
Fig. 3. L-I and V-I characteristics of the module.

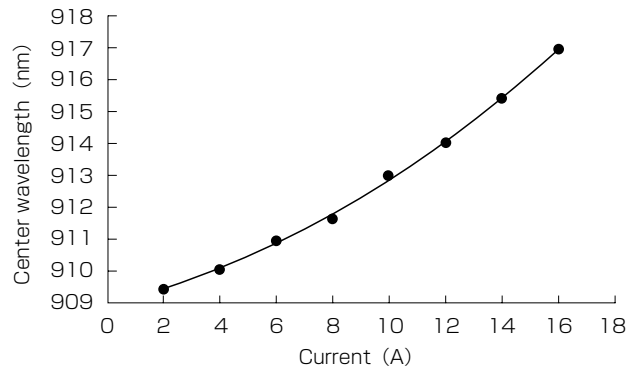


図5 発振波長の駆動電流依存性  
Fig. 5. Center wavelength shift of the module.

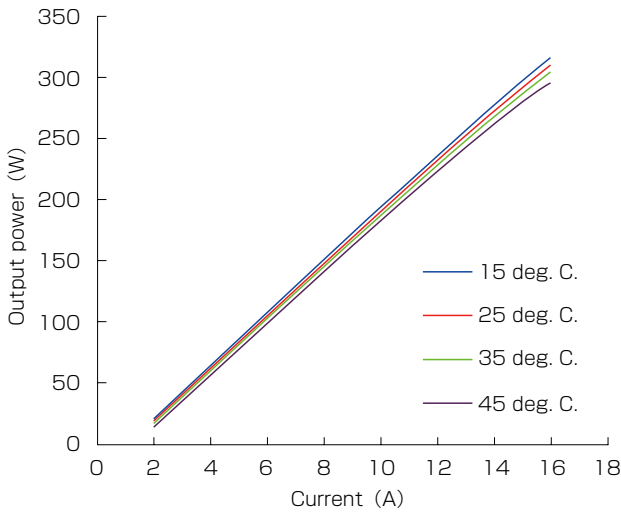


図6 光出力の温度特性

Fig. 6. Temperature dependence of the output power of the module.

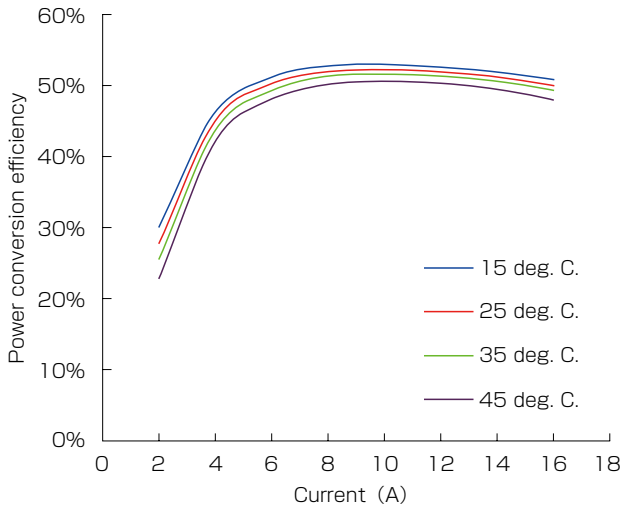


図7 電力変化効率の温度特性

Fig. 7. Temperature dependence of power conversion efficiency of the module.

図 6 および図 7 に光出力と電力変換効率の温度特性結果を示す。半導体の温度特性をあらわす指標としては特性温度という値が一般的に使用される。図 6 および図 7 からモジュールの閾値電流の特性温度は 182 K、スロープ効率の特性温度は 1000 K が得られた。これらはレーザ素子の特性温度とほぼ同じ値である。スロープ効率の特性温度が素子とモジュールでほぼ同じという結果は、パッケージ底面の温度が変化してもモジュールの結合効率はほぼ一定ということを示している。

### 3. 2 信頼性評価

高出力動作時の LD モジュールの信頼性を評価するために加速通電試験を行った結果を図 8 に示す。試験はトータル 158 チップを収容したモジュール群で行った。試験

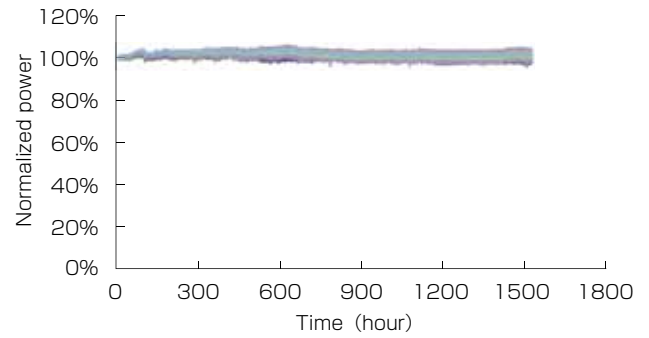


図8 LDモジュールの加速通電試験結果  
Fig. 8. Accelerated test result of the module.

条件はヒートシンク温度 35 °C、駆動電流 16.5 A である。1500 時間を経過しても光出力の低下や発振停止はみられておらず、1 チップの故障もなかった。すなわち素子本来の高い信頼性を維持し、パッケージ化によって COD レベルの低下や内部劣化モードの誘発を引き起こしていないということが確認された。

## 4. む す び

100  $\mu\text{m}$  コア径, NA 0.22 ファイバにおいて 300 W 出力の超高輝度レーザダイオードモジュールの開発に成功した。このような高輝度モジュールはキロワット級ファイバレーザの小型化, コストダウンなどに大きく貢献する。また, 励起光パワーの増加はファイバレーザ出力の増加に寄与するので, 10 kW をこえるようなハイパワーレーザシステムの実現にも貢献すると期待される。さらに, モジュール自体の輝度がきわめて高いので, モード変換せずモジュールの射出光をダイレクトに加工対象物に照射させるダイレクトダイオードレーザ (DDL) としての応用も期待され, 本開発で蓄積した技術はその基盤となりえるものである。

## 参 考 文 献

- 1) Allen Noguee, [The Worldwide Market for Lasers: Market Review and Forecast 2015], Strategies Unlimited, Mountain View, CA, Chapter 1-3 (2015)
- 2) Liu Rui, et. al.: "High Brightness 9xxnm Fiber Coupled Diode Lasers," Proc. SPIE 9348, 93480V (2015)
- 3) M. Kanskar, et. al.: "High Brightness Diodes & Fiber-coupled Modules," Proc. SPIE 9348, 934804 (2015)
- 4) Richard Duesterberg, et. al.: "100 W High-Brightness Multi-Emitter Laser Pump," Proc. SPIE 7918, 79180V (2011)
- 5) Yuji Yamagata, et. al.: "915nm High Power Broad Area Laser Diodes with Ultra-small Optical Confinement Based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH)," Proc. SPIE 9348, 93480F (2015)