

# フジクラグループの高出力半導体レーザ技術

光応用技術R&Dセンター 葛西 洋平<sup>1</sup>・川上 俊之<sup>2</sup>

## Fujikura group's high-power semiconductor laser technologies.

Y. Kasai, and T. Kawakami

フジクラグループでは高出力半導体レーザおよびレーザモジュールの製品群の開発を通じてIII-V族化合物半導体材料の高品質結晶成長技術、LD構造の最適化による高出力化・高効率化技術、空間光学・ビーム多重化技術、実装技術、放熱技術など膨大な技術やノウハウを蓄積してきた。本稿ではこれまでに当社が開発した高出力半導体レーザ製品群の特性と、それらに使用される技術を紹介する。

Fujikura Group has accumulated a huge number of technologies and know-how through the development of products of high-power semiconductor laser and laser module such as high-quality crystal growth technology for III-V compound semiconductor materials, high-power and high-efficiency technology by optimizing structure of LD, beam multiplexing technology, mounting technology, and heat dissipation technology, etc. This paper introduces the characteristics and technologies of high-power semiconductor laser products developed by Fujikura Group.

### 1. ま え が き

波長 900 nm帯のLDおよびLDMの光出力はここ 10 年あまりで目覚ましい向上を遂げてきた。それはレーザ加工市場においてキロワット級ファイバレーザがCO<sub>2</sub>レーザに代わって主役となり<sup>1)</sup>、その励起光源としての需要が増えたことと、さらに、LD/LDMの高出力化にともないそれ自体の光を直接加工光源として使用するDDLとしての需要も加わったため、市場の急成長と平行して各社が精力的に開発を行い飛躍的に発展を遂げたといえる<sup>2), 3), 4), 5), 6), 7)</sup>。当社においても 10 年以上前からLD/LDMの開発を開始し、光出力特性は常に世界のトップグループに位置してきた<sup>8), 9)</sup>。図 1 に当社のLD/LDMの光出力の変遷を示す。開発初期と比較してLDの光出力は 3 倍に、LDMの光出力は 5 倍まで向上している。LDにおいては長共振器長化や縦構造の最適化等が高出力化に大きく寄与し、また高出力動作時においても極めて高い電力変換効率を達成している。これらLDの高出力化・高効率化技術については 2 章で述べる。LDMにおいては複数のLDを 1 つのパッケージに収容するマルチチップモジュールが登場し、ビーム多重化が進んだことが大きい。ビーム多重化では空間合成に加え偏波合成

がなされ、1 本の光ファイバに数十のビームが結合されることも珍しくなくなった。また、手のひらサイズのパッケージ内に数百ワットの熱が発生するため、LDの性能を最大限に引き出すための放熱技術も高出力化に貢献している。これらLDMの高出力化パッケージング技術については 3 章で述べる。さらに、産業用途においてはレーザ素子の信頼性は製品の保証期間を決定づける極めて重要な特性である。長期通電試験データをもとに当社製品のLD信頼性について 4 章で論じ、5 章でむすびとする。

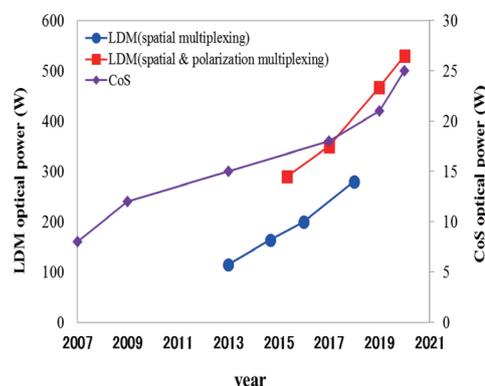


図 1 フジクラグループのLD/LDMの光出力の変遷  
Fig. 1. Improvement of optical power of Fujikura's LDs and LDMs.

1 光デバイス研究部  
2 光デバイス研究部 グループ長

## 略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
LD	Laser Diode	半導体レーザダイオード
CoS	Chip on Submount	LDをサブマウントに実装した状態の素子
LDM	Laser Diode Module	半導体レーザダイオードをパッケージングしたモジュール
DDL	Direct Diode Laser	LDの出射ビームを(伝送用ファイバを介して)直接加工対象物に照射するレーザ装置
PCE	Power Conversion Efficiency	電力変換効率
SAS	Self-Aligned Stripe	LDの電流注入構造の一種
ADCH	Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure	非対称分離光閉じ込め構造. LDの縦構造の一種で、高出力化に適している.
FAC	Fast-axis Collimation Lens	LDの垂直方向の出射ビームを平行光に変換するレンズ
SAC	Slow-axis Collimation Lens	LDの水平方向の出射ビームを平行光に変換するレンズ
BPP	Beam Parameter Product	ビーム半幅と広がり半角の積で定義され、ビームの集光性能を示すパラメータ
NA	Numerical Aperture	光ファイバや導波路のコア内に閉じ込められる最大角度の正弦
FFP	Far-Field Pattern	LD出射端から十分遠方での光の強度分布
NFP	Near-Field Pattern	LD出射端極近傍での光の強度分布
ARコート	Anti-Reflection Coat	反射防止膜
VBG	Volume Bragg Grating	屈折率周期構造が作り込まれたガラスブロック
SWaP	Size, Wate, and Power consumption	寸法、質量、電力消費の頭文字を取った総称で、これらを低減する要求が高まっている

## 2. 高出力半導体レーザの高出力化・高効率化技術

励起光源としてのLDMには多数のLD素子が積載されるため、素子一つ一つの出力や電力変換効率が全体のパフォーマンスに大きな影響を与える。このため、LD素子の高出力化・高効率化は避けて通れない課題である。当社においても、オプトエナジー社と共同で波長 900 nm帯において大出力LD素子の開発に挑戦し、出力および効率を高めてきた<sup>10, 11, 12)</sup>。近年では、出力 20 W以上において効率が世界最高レベルの 900 nm帯LD素子の開発に成功した<sup>13)</sup>。本項では、当社LD素子の高効率化の手法について解説すると共に、利用分野に対応した高出力動作および高効率動作の可能性について展望する。

### 2.1 LDの基本構造

図 2 (a) および (b) は、当社LD素子の模式的な断面構造並びに斜視図である。GaAs単結晶基板の上に、AlInGaAs系材料により構成された活性層/導波層/クラッド層からな

るレーザ構造を、有機金属気相成長法を用いてエピタキシャル成長している。活性層は発振波長に調整させた組成のInGaAsからなり、縦構造による光閉じ込めは、活性層上下の導波層およびクラッド層の組成を変えることで制御されている。エピ層に水平な方向には、電流ブロック層による電流狭窄で注入ストライプを形成するSAS構造を採用し、発光幅を制御している。SAS構造を採用する利点は、素子の平坦化による偏光純度の向上<sup>14)</sup>、共振器端面における電流非注入構造の一括形成<sup>15)</sup>、またp側オーム性電極のコンタクト抵抗の低減等が挙げられ、当社LDの性能を支える重要な要素となっている。

図 2 (c) は当社LDの縦構造による光強度分布と屈折率分布を示した模式図である。屈折率分布を活性層に対してp側とn側で非対称にし、活性層光閉じ込め係数 ( $\Gamma_{\text{well}}$ ) と、p型およびn型ドープ層の光閉じ込め係数の比率、 $\Gamma_p/\Gamma_n$  を独立に制御することができるADCHを採用している。本構造を採用することで、高出力での長期安定動作の実現に

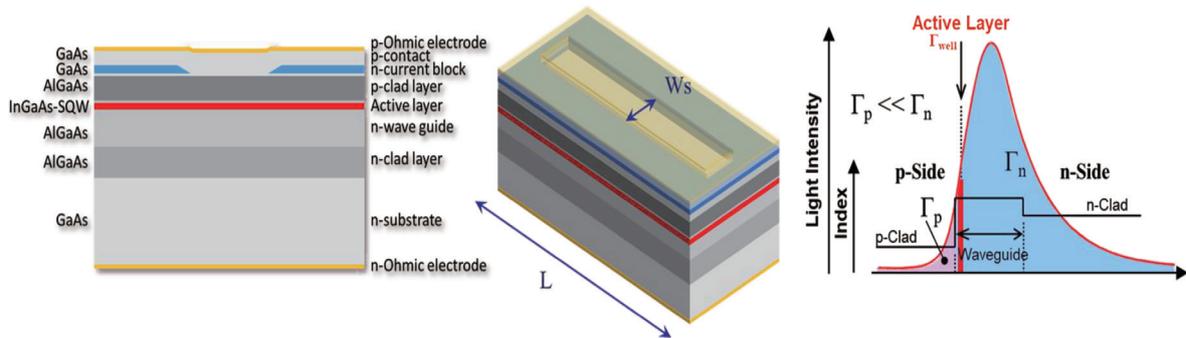


図2 当社LD構造の模式図

(a) 素子断面, (b) LD素子の斜視図, (c) 縦構造の光分布および屈折率分布

Fig. 2. Schematic structure of LD (a) cross section, (b) perspective view, (c) Index guide structure and mode profile.

必要な長共振器化と低 $\Gamma_{well}$ 化を行うと共に、高効率動作を行うための低ロス化を柔軟に進めることができる。AlInGaAs系材料においては、発振波長やキャリア濃度にも依存するがp層の自由キャリアロスがn層に対して2倍以上大きく、p層のドーピングを低く抑えることが必須である。一方、p層はキャリアの移動度がn層と比較して1桁低いため、ドーピング量の安易な低減は素子の動作電圧を上昇させ、電力変換効率を低下させるトレードオフを生じる。そこで、導波領域をp層から離すように $\Gamma_p/\Gamma_n$ を調整すると共に、p層の層厚やドーピング量を調整することにより電圧を低減させることが基本的な方針となる。また、長期安定動作に影響しない範囲で活性層の利得と損失のバランスを調整し、効率よく電力を光に変えるため $\Gamma_{well}$ を適切な大きさにすることも有効な手段である。さらに、効率に直接影響する素子の動作電圧については、キャリアを供給するのに不要な余剰成分を取り除くことも極めて重要である。

## 2.2 LDの効率改善と光出力向上

2.1項で解説した方針に従い、効率の改善に関して以下の項目で検討を実施した。① $\Gamma_p/\Gamma_n$ の調整によるn層への光配分増加を通じたロスの低減、② $\Gamma_{well}$ の調整によるゲインとロスのバランス調整による効率化、③n層へ光分布を寄せたことで閉じ込めに不要となったp層の削除やドーピング量増加による電圧低減、④各エピ層間の余剰電圧の低減である<sup>13, 16, 17</sup>。図3は、横軸に西暦を、縦軸に電力変換効率を取った当社LD素子の電力変換効率(PCE)の変遷を示したものである。各データは、共振器長 $L=4$ mmの素子から25℃の測定にて得られたものであり、ピーク効率および、実用的な20W出力時のPCEがそれぞれプロットされている。図から明らかなように、ピーク効率は2016年の67%から2020年の73.5%、20W出力時においても2016年の63%から2020年の69%へと大きく向上し、世界最高レベルのPCEを達成することに成功した。

高出力ファイバレーザ向けLD素子には、高い信頼性が

求められる。図4は、試作した共振器長4mmの素子をパルス駆動(パルス20 $\mu$ s、駆動デューティ1%)ならびにCW駆動にて動作させた光出力—電流(L-I)特性である。パルス駆動にて69W以上のCODフリー動作が確認された。一方CW駆動においては、共振器長4mm素子の面積による放熱の制限があるため、パルス駆動時より低くなるものの、33Wの大出力を得ることが出来た<sup>16</sup>。

## 2.3 要求性能に応じた素子の設計

LD素子においては、ファイバレーザのように光出力を優先する用途や、光給電などの変換効率そのものを必要とする用途<sup>18</sup>が考えられる。LD素子の用途により共振器長を変えることで、それぞれの要求に適したLD素子を提供することができる。光出力を優先とする用途に向けては、ストライプを長くすることが有効である。これは、単位面積当たりの電流密度が低減することや面積の増大による放熱性の向上<sup>13</sup>、直列抵抗が低下すること<sup>12</sup>により、出力の増大が可能となるためである。一方、共振器長を長くすることでピーク効率が低下するというトレードオフが生じる<sup>13</sup>。しかしながらこの欠点は出力の増大と共に解消し、十分な高出力側では電流負荷や熱負荷の低減効果が上回って実用出力でのPCEを向上させることが可能となる。従って、同一出力でのLDMを比較した場合、長共振器LD素子を採用することにより部品点数の低減によるコスト低減や、電力変換効率の向上を期待することが出来る。一方、高い電力変換効率そのものを必要とする用途に対しては、短共振器化することでPCEピーク値を高め、その出力付近でLD素子を駆動させることが考えられる。図5は、2.2項においてもっとも効率の良かった縦構造において、共振器長を2mm、4mm、5mmと変えた時の電流—PCE特性を示したものである。実線は実測値、点線はシミュレーション値であり、4mm共振器長のデータはrefとして示してある。図5に示すように、2mm共振器においてピークPCEで75.5%、また5mm共振器において実用出力25WにおけるPCEで66.6%の非常に高い値を得ることに成功した<sup>18</sup>。

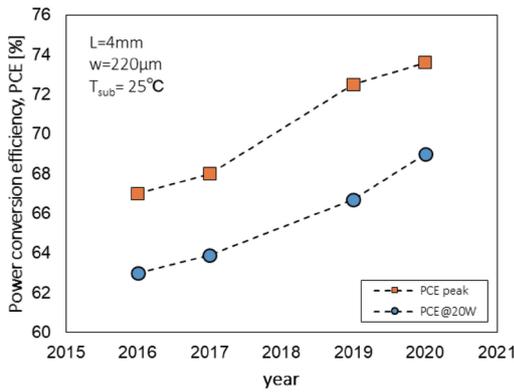


図3 当社LDの電力変換効率の向上

Fig. 3. Advancement in Power conversion efficiency of LDs.

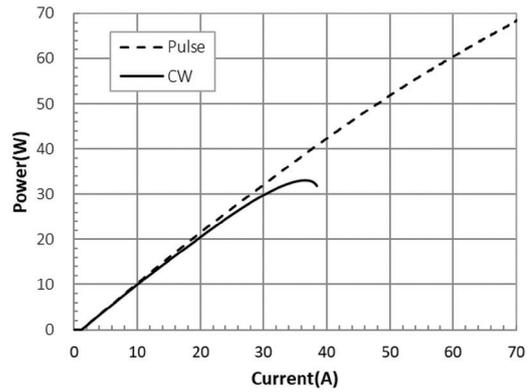


図4 当社LD素子のパルスおよびCW計測時のL-I曲線

Fig. 4. Pulse and CW L-I characteristics of developed LDs.

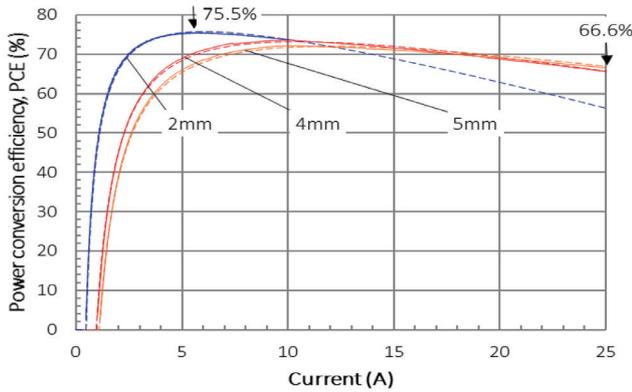


図5 電流-PCE特性の共振器依存性

Fig. 5. Dependencies of Current-PCE characteristics on cavity length.

いずれの値も 900 nm帯LD素子として世界最高レベルの数値であり、低出力から高出力までの幅広い出力において、高効率なLD素子の提供が可能であり、種々の用途に対応できることを確認できた。

### 3. 高出力半導体レーザのパッケージング技術

LDMはファイバレーザを構成する一部品という位置づけながら、他の光部品と比べると幅広い要素技術の上に成り立っており、一つのシステム製品という見方も可能である。本記事では中でも高出力化にとって重要な空間光学システムと放熱システムについて紹介する。

#### 3. 1 空間光学システム

LDMの高出力化にとってビーム多重化は欠かせない。この節では複数のLDから出射されたビームを1本の光ファイバに結合させるために必要な光学技術として、コリメートビーム形成技術、ファイバカップリング技術、そしてビーム合成技術（空間・偏波・波長）を紹介する。

##### 3. 1. 1 FAC-SACコリメーション

LD端面から空間に放射されるビームは水平・垂直それ

ぞれの方向に広がりをもつため、高密度に空間合成を行うためにはコリメーションレンズによっておよそ平行光に変換する必要がある。高出力半導体レーザは水平方向のエミッタ幅が垂直方向のエミッタ幅の約100倍と広いため、BPPが垂直方向と比較して大きい。そして光学的にはコリメーションレンズの曲率半径を大きくした方がコリメートビームの広がり角が小さくなるため、SACは数ミリというオーダーの曲率半径に設計される。一方、垂直方向は波長オーダーの厚みの導波路に閉じ込められているためBPPは小さく、それほど大きなレンズを必要としない。むしろ回折効果を強く受けて広がり角が大きいため、LD端面のごく近傍にレンズを設置しないとビームを補足できない。そのためFACはバックフォーカスが0.1mm前後で、高NA成分を平行光に変換するために非球面レンズが使用される。なお、焦点距離を比較するとFACの方がSACよりも2桁程度小さく、これはすなわちアライメントのシビアさがFACの方が2桁程度厳しいことを意味する。したがってFACはカメラでコリメートビーム像をモニタしながら調心装置によってその位置をアクティブに調整される。

以上で述べたようにFACとSACはLDのNFP/FFPに由来して最適なディメンジョンが大きく異なるため共通化が難しい。そのため図6のように別々のシリンドリカルレンズを使用するのが一般的である。

##### 3. 1. 2 光ファイバカップリング

MC-LDMにおいては図7のように複数のコリメートビームを集光レンズによって光ファイバに結合させる。コリメーションレンズと同様に水平・垂直方向それぞれに最適なレンズのディメンジョンが大きく異なる場合は独立のシリンドリカルレンズを設ける必要があるが、集光レンズは設計次第では共通化できることもある。集光レンズ設計で重要なのは、集光ビームの水平・垂直方向のBPPが等しくなるように焦点距離 $f$ を定めることである。光ファイバのコア形状は円形なので、それが最も高輝度になる条件だ

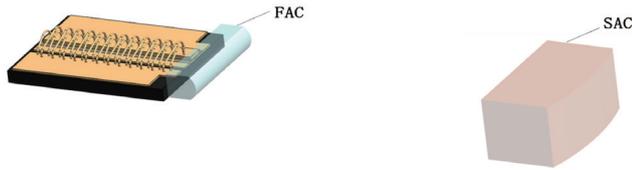


図6 FACとSACによるコリメートビームの形成

Fig. 6. Schematic view of FAC-SAC collimation system.

からである<sup>19)</sup>。また、空間合成数が多くなると外側に位置するビームの光軸からの距離が広がって球面収差が問題となってくる。それを回避するために非球面集光レンズを使用することもある。

また、光ファイバ端面は透過損失抑制およびLDへの戻り光抑制の目的でARコートが施される。

### 3. 1. 3 空間合成/ミラーアライメント

LDのBPPを反映してコリメートビームのBPPも水平方向の方が垂直方向より2桁程度大きい。したがってコリメートビームを空間合成する際は図8で示したように垂直方向にスタックする。ビームの整列は個々のビームに対して設けられたミラーの調整によって行われる。一般的なレイアウトは図8の左側のように、階段状のパッケージにLDが並び、1枚のミラーによってビームの進行方向が90°折り曲げられる。階段の段差がコリメートビームの垂直方向の幅より僅かに広く設定され、ビームが重ならないようになっている。当社では一般的なレイアウトに加え、図8の右側に示す独自のミラー構造の特許技術を保有している<sup>19)</sup>。この構造ではLDが同一平面上に実装され、上下に組み合わせた2枚のミラーによってビームの進行方向および向きを90°回転して整列する。この構造のメリットはLDが同一平面上に実装されるのでヒートシンクまでの放熱距離が各LDで同一となり、各LDの温度が均一となることと、ミラーが1枚では原理的に調整が不能な軸があるが、2枚の場合は完全にビームの位置と角度を目標に合わせられるという点である。そのため高い結合効率が得られる。

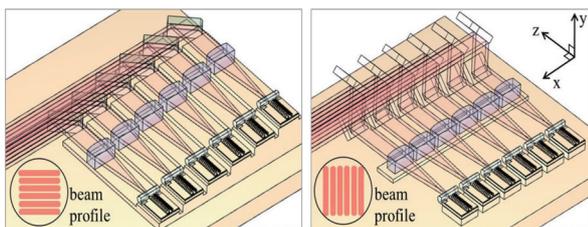


図8 ミラーによるビーム整列の模式図

Fig. 8. Schematic diagram of mirror alignment.

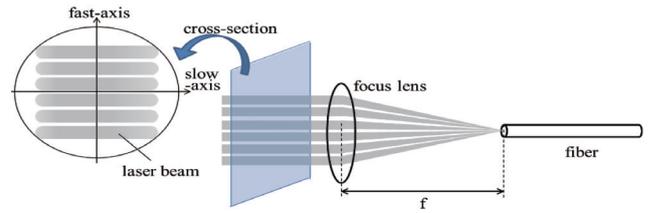


図7 空間合成されたビーム群を光ファイバへ集光する模式図

Fig. 7. Schematic diagram of focusing spatially multiplexed beams onto a fiber.

### 3. 1. 4 偏波合成

空間合成はLDのビームの輝度が向上しているわけではなく、1本の光ファイバに複数のビームを結合させることでファイバ射出光の輝度を向上させる技術である。ビームの輝度を向上させるには合成するビームの進行方向が揃い、かつ空間的に重ならなければならない。そのためには、各ビームに対する何らかの物理応答の差を利用して合成がなされる。輝度向上技術としてよく使われるのは偏波合成と波長合成である。この項では偏波合成について紹介する。

偏波合成は物質の反射率の偏光依存性を利用する。具体的には図9のように偏波ビームコンバイナの誘電体多層膜において、水平偏波が反射し、垂直偏波が透過する性質を利用している<sup>20)</sup>。LD射出光はTEモードがメインなので誘電体多層膜に対して垂直偏波となり、透過する(図9の左から右へ進む光線)。1/2波長板によって偏光を90°回転させれば誘電体多層膜に対して水平偏波となり反射して(図9の下から右へ進む光線)合成される。また、図9からわかるように偏波合成においてはLDのTM偏光成分は損失となるため、偏波純度が高いことはモジュールの高出力化に有利である。当社では実装面の凹凸が少ないSAS構造によってLDの歪を低減し、非常に高い偏波純度を実現している<sup>14)</sup>。

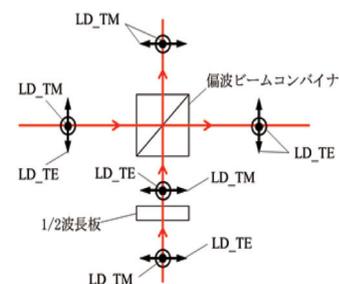


図9 偏波合成光学系の概略図

Fig. 9. Schematic diagram of polarization multiplexing system.

### 3. 1. 5 波長合成/波長ロック

波長合成は物質の反射率の波長依存性を利用する方法と、回折格子のように反射角度の波長依存性を利用する方法がある。前者はさらにダイクロミックミラーを使用する方法とVBGを使用する方法がある。

波長合成においてはLDの出射スペクトルが重なるところは損失となるため、個々のビームが波長分離されていないといけない。しかし高出力LDの出射スペクトル幅は数ナノメートルが一般的で、かつ注入電流依存性もある。したがって、ファイバレーザの励起波長帯域内に複数の波長を合成するような高密度波長合成を行う場合には波長ロック技術も必要となる。当社では波長ロック技術と波長合成技術を組み合わせて図10のように2nm間隔で高出力LDの波長合成を実現している。偏波合成では直交する2偏波しか利用できないが、波長合成においては原理的には分離波長の数だけ合成が可能のため、超高出力光源の実現において有望な技術といえる。

### 3. 2 放熱システム

LDの光出力の制限要因のうち、熱は最も重要な課題の一つである。この節ではパッケージングにおける放熱技術で特に重要な点を3項ピックアップして述べる。

#### 3. 2. 1 はんだ接合

高出力LDのはんだ接合部には機械的・物理的・化学的に高い信頼性が求められ、さらにはんだの濡れ性が良くなければならない。それら要求特性を満たすために、高融点の鉛フリー共晶はんだであるAuSnが使用される。AuSnは金が80wt%と10wt%に共晶点が存在するが、前者の方が金の含有量が多いので融点が高く、熱伝導率もよいためLDの接合に使用される。

LDMにおいてはCoSの実装や次項で説明するサブマウント等のはんだ接合が行われる。前工程で接合したはんだが再溶融するのを防ぐため、後工程になるにしたがい、より低い融点のはんだが選定される。また、近年ではLDの高出力化に対応するため汎用的な金属の中で最も熱伝導率の高い銅をパッケージ材料に使用するようになってきたが、銅はLDと熱膨張率が大きく異なるため、はんだ接合部に大きな熱応力がかかる。そのような接合部にはヤング率が小さく、緩衝層としての性質をもつはんだを使用して応力を逃がす方策がとられる。

#### 3. 2. 2 放熱サブマウント

放熱サブマウントにはLDチップが実装されるLDサブマウントと、LDサブマウントと光学部品が実装される光学系サブマウントの2種類がある。放熱サブマウントはLDの熱を効率良くヒートシンクへ伝熱する機能があるが、その他にも様々な機能を担っている。

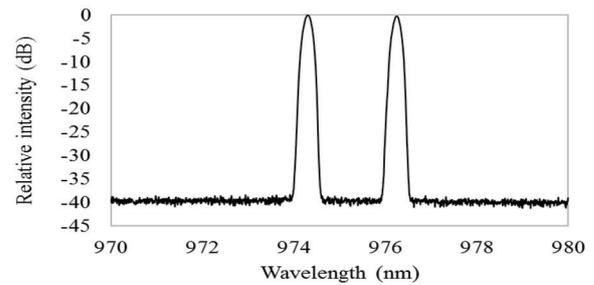


図10 波長合成LDMの出射スペクトル

Fig. 10. Output spectrum of the LDM with wavelength multiplexing.

まず、伝熱については材料として熱伝導率の高いことが必須であり、高出力LDサブマウントでは100 W/m・Kを下回るようなものは使用されない。その上で、熱伝導率が極めて低い空気層(ボイド)が極力生じないようにすること、熱伝導率の比較的低いはんだ層の厚みのある程度薄くすることが肝要である。そのためにはサブマウントの面粗さと平坦度を良くしなければならない。また、はんだを濡らすため金めつき処理が可能であることも必要な特性となる。

他に必要な機能としては、“LDにひずみを与えない”ことが挙げられる。LDと放熱サブマウントの熱膨張率が異なるとはんだ接合時に熱応力が加わり、LDにひずみが生じてしまう。結晶がひずむとレーザの特性や寿命に影響を与える。そのため、線膨張係数がLDと近くなければならない。

さらに、LDサブマウントにおいては絶縁は重要な要素である。キロワットクラスの高出力レーザシステムではLDが直列に何十個も接続されるため、数百ボルトの耐電圧が要求される場合さえある。したがって、ファイバレーザのシステム停止のような大きなトラブルを避けるために、絶縁破壊につながる電流リークが生じないよう構造設計・材料選定するとともに、実装に際しても細心の注意が必要となる。

光学系サブマウントにおいては光学系のアライメントがずれないように、筐体との線膨張係数を近くし、平坦度を良くする必要がある。

以上のように様々な機能を担う放熱サブマウントだが、金属材料ではモリブデンやタングステン、およびそれらと銅の合金材料などが使用される。また、セラミックスや、セラミックスと金属の複合材料も使用されている。

#### 3. 2. 3 筐体

筐体の伝熱や熱応力についての設計指針は放熱サブマウントと同様である。加えて筐体は外部インターフェースがあるので靱性が必要で、前項で例示した材料内の金属材料が使用される。しかし近年では高出力化と低コスト化の追求が進み、3. 2. 1項で説明したように銅が使用されることが一般的になった。また、CoSと筐体の間にサブマ

ウントを設けず、CoSを直接筐体にボンディングするシンプルな構造が採用されるようになった。

さらに最近の開発の動向として注目されているのはSWaPの小さなパッケージである。この背景には、高出力レーザの応用例が様々に開拓され、工場の決まった場所で使用されるだけでなく、レーザ装置を移動させて様々な場所で使用したいという要求が高まってきたことにある。キロワットクラスのファイバレーザでは膨大な数のLDMが使用されるためその重量が問題となる。また、LDMと同様に冷却システムも大型になるので省エネのみならずモビリティの観点からも高効率化の要求が高まっている。そのような需要の中で選択肢の一つとなるのがLDM筐体に直接冷却水を流す構造である<sup>3)</sup>。従来は図11左側のようにLDM筐体を冷却するためのヒートシンクが別に設けられていたが、直接水冷構造では図11右側のようにLDM筐体に水路を形成する。これによりレーザ装置の小型・軽量化、および筐体-ヒートシンク間の接触熱抵抗を無くして放熱性向上による高効率化が可能となる。当社では低SWaPトレンドに先駆けて現在量産中のLDMに直接水冷筐体を採用している。

#### 4. 高出力半導体レーザの信頼性

光出力が高くとも短時間で故障しては産業用途に使えない。当社のLDは高出力かつ高信頼で動作することが長期通電試験によって実証されている。レーザ素子の信頼性はパッケージの実装状態や放熱性、雰囲気等の影響も受けるので、製品の最終評価は素子単体ではなくLDM形態で行うべきである。また、レーザ加工においてはレーザのON/OFFが頻繁に行われるが、ON/OFF時と連続通電時では素子にかかる熱ストレスが異なるのでON/OFF通電の長期試験も必要である。

表1 LDMの長期通電試験データ

Table 1. Data of long-range aging test of LDMs.

光出力 (W)	ジャンクシ ン温度(°C)	連続通電試験		故障数
		通電蓄積時間 (h)	加速を考慮した デバイス時間(h)	
21.0	71.0	169,000	169,000	0
21.0	78.5	345,592	441,634	0
22.2	76.8	157,196	258,567	0
21.9	81.8	630,760	1,127,035	0
24.1	84.1	157,196	503,308	0
23.7	89.1	3,669,321	12,682,992	5
25.6	94.9	359,004	2,206,155	1
	合計	5,488,069	17,388,690	6
光出力 (W)	ジャンクシ ン温度(°C)	ON/OFF通電試験		故障数
		通電蓄積時間 (h)	デバイス ON/OFF回数	
21.0	78.5	309,082	3,671,888,220	0

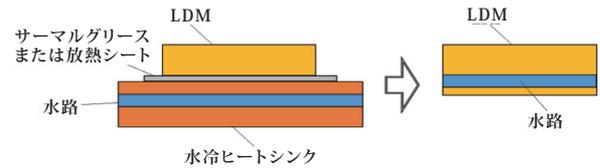


図11 低SWaPの筐体冷却構造

Fig. 11. Schematic view of water cooling system of low SWaP package.

表1に現在量産中のLDMの長期通電試験データを示す。連続通電試験は103モジュール、ON/OFF通電試験は8モジュール、LDチップ数にするとトータル1400個以上という十分な母数を投入している。

連続通電試験においては注入電流と冷却水温を変化させることで光出力とLD温度を調整して様々な負荷加速条件において試験を行った。表1の通電蓄積時間とはLDチップ数とLDM通電時間の掛け算のことである。最も通電時間が長いグループは12000時間を経過しており、現在も試験継続中である。通電蓄積時間に加速係数を掛けたものがデバイス時間で、製品の最大電流動作条件(=21W, 71°C)での通電時間を意味する。1700万時間で6素子の故障が発生した結果から、21W, 71°Cの動作条件でのLD故障率は90%信頼度で1000FIT未満であることがわかる。

ON/OFF通電試験は加速係数が明確でないこともあり、製品の最大電流動作条件で行った(実際にはジャンクション温度を7.5°C高くしており、より高加速の評価をしている)。表Aの蓄積時間はON状態のLDM通電時間にLDチップ数を掛けた値で、蓄積時間にON/OFF周波数を掛けたものがデバイスON/OFF回数である。合計36.7億回ものON/OFFを行ってもLD故障は発生しておらず、レーザ加工用途に対して十分な信頼性を有することを示している。

#### 5. むすび

フジクラグループがこれまでに開発してきたLDおよびLDMの世界最高レベルの特性と信頼性、そしてそれらに使用される高出力化・高効率化技術を網羅的に紹介した。ここ10年の技術開発の進歩により汎用のLDMはコモディティ化が進み、パッケージング技術は各社のオリジナリティが発揮されにくくなってきた感がある。しかし将来展望として、ファイバ出力の高輝度化、放熱性の改善、波長ロック、波長合成、低SWaPパッケージ等の技術フロンティアが広がっており、まだまだ高出力LD/LDMの進化は止まらないと確信している。

## 参 考 文 献

- 1) Allen Noguee, [The Worldwide Market for Lasers: Trends and Five-Year Forecast (2019-2025)], Strategies Unlimited, Mountain View, CA, Chapter 3 (2020).
- 2) N. Moshegov, et al.: "Highly-Efficient High-Power Pumps for QCW Fiber Lasers," Proc. SPIE Vol. 10900, 109000G (2019).
- 3) M. Kanskar, et al.: "High Brightness Diodes and 600 W 62 % Efficient Low SWaP Fiber-coupled Package," Proc. SPIE Vol. 11262, 112620A (2020).
- 4) D. Xu, et al.: "Kilowatt Wavelength-Stabilized CW and QCW Diode Laser," Proc. SPIE Vol. 11262, 112620C (2020).
- 5) M. Hemenway, et al.: "Wavelength Stabilized Fiber-coupled Laser Modules for DPSS and Fiber Laser Pumping," Proc. SPIE Vol. 11262, 112620I (2020).
- 6) G. Garre-Werner, et al.: "1 kW cw fiber-coupled diode laser with enhanced brightness," Proc. SPIE Vol. 11262, 1126202 (2020).
- 7) R. Paoletti, et al.: "High power wavelength stabilized multiemitter semiconductor laser module using highly manufacturable DBR diode lasers," Proc. SPIE Vol. 11262, 112620K (2020).
- 8) Y. Kaifuchi, et al.: "Enhanced power conversion efficiency in 900-nm range single emitter broad stripe laser diodes maintaining high power operability," Proc. SPIE Vol. 10900, 109000F (2019).
- 9) Y. Kasai, et al.: "High-power fiber-coupled pump lasers for fiber lasers," Proc. SPIE Vol. 10514, 105140J (2018).
- 10) 坂元ほか : 「ファイバレーザー励起用高出力半導体レーザーモジュール」, フジクラ技報, 第 126 号, pp.1-6, 2014.
- 11) 山形ほか : 「ファイバレーザー励起用高出力半導体レーザー」, フジクラ技報, 第 129 号, pp.1-5, 2016.
- 12) 能川ほか : 「高効率高出力半導体レーザー」, フジクラ技報, 第 133 号, pp.22-25, 2020.
- 13) Y. Yamagata, et al.: "Highly efficient 9xx-nm band single emitter laser diodes optimized for high output power operation," Proc. SPIE Vol. 11262, 1126203 (2020).
- 14) R. Morohashi, et al.: "High polarization purity operation of 99 % in 9 xx-nm broad stripe laser diodes," Proc. SPIE Vol. 10514, 105140B (2018).
- 15) Y. Yamagata, et al.: "915 nm high-power broad area laser diodes with ultra-small optical confinement based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH)" SPIE Vol. 9348, 93480F (2015).
- 16) Y. Kaifuchi, et al.: "Ultimate high power operation of 9 xx-nm single emitter broad stripe laser diodes," Proc. SPIE Vol. 10086, 100860D (2017).
- 17) Y. Kaifuchi, et al.: "Enhanced power conversion efficiency in 900-nm range single emitter broad stripe laser diodes maintaining high power operability" SPIE Vol. 10900, 109000F (2019).
- 18) 能川ほか : 「高効率9 xxnm帯半導体レーザー」, Proc. OPJ (2020).
- 19) Y. Kasai, et al.: "High-brightness and high-efficiency fiber-coupled module for fiber laser pump with advanced laser diode," Proc. SPIE Vol. 10086, 1008606 (2017).
- 20) 諸橋ほか : 「高偏波純度高出力半導体レーザー」, フジクラ技報, 第 131 号, pp.26-31, 2018.