

高効率高出力半導体レーザ

光応用技術R&Dセンター 能川 亮三郎¹・吉田 京平¹・川上 俊之¹・山形 友二²・山口 昌幸³
オプトエナジー株式会社 貝 淵 良 和⁴

High Efficiency and High Power Broad Area Laser Diodes

R. Nogawa, K. Yoshida, Y. Kaifuchi, T. Kawakami, Y. Yamagata and M. Yamaguchi

材料加工分野で急速に普及が進むファイバレーザでは、その励起用光源である 9 xx nm帯に発振波長をもつ半導体レーザ (LD) の高出力かつ高効率での動作が求められる。電気抵抗を低減することによるエネルギー変換効率 (PCE) の向上を目指して、LD縦構造の設計を最適化した。試作したLDのPCEは従来から大きく改善し、世界最高水準である 73.6%を達成した。また最適化された縦構造において共振器長を拡張することで 25 Aにおいても 66.6%を達成し、実用出力を向上させることができた。

As light sources of fiber laser system spreading rapidly in the material processing field, high power and high efficiency 9 xx-nm LDs are strongly demanded. In order to improve PCE by reduction of electrical resistance, vertical designs of LD are optimized. As a result, the newly designed LD successfully demonstrates the high PCE of 73.6% which is comparable to world record. Furthermore, high efficiency 66.6% is obtained even at high injection current power of 25 A by extension of cavity length based on optimized vertical design. The practical output power successfully increases.

1. ま え が き

9 xx nm帯で発振する高出力半導体レーザ (LD) は、ファイバレーザシステムの励起用光源や材料加工装置のダイレクト光源など加工用途を主としてさまざまな産業で利用されている^{1,2)}。ファイバレーザシステムでは 10 kWを超える出力が実現され、高速で高精度な加工が可能になっている³⁾。多数の励起用LDを部品に要するこのようなアプリケーションでは、LDの効率がシステム全体の発熱量、長期信頼性や運用コストといった性能に大きく影響するため、LDにおいては高出力のみならず高効率が重要な性能の一つに位置付けられる。われわれはこれまでLDの導波構造、共振器長、電流注入幅や放熱設計に改良を加えて高出力と高効率化を達成してきた^{4,5)}。本稿では縦構造の設計を追及してLDの有する抵抗を極限まで低減することで世界最高の効率を実現した結果を報告する。

2. L D 構 造

われわれは 9 xx nm帯に発振波長を有するLDをGaAs, AlGaAsおよびInGaAsを材料としてMOCVD法による結

晶成長と半導体プロセスをもって作製している。図1にLD構造と屈折率プロファイルおよび導波光のモードフィールド (光フィールド) を示す。n型層に大きく偏った非対称型の光フィールド形状が特徴で、利点として低導波ロスのLD設計が可能となる⁶⁾。導波ロスの低減は、注入した電流に対する光出力の増加率すなわちスロープ効率の向上に寄与し、その結果として長共振器化による高出力駆動が可能になる。LDへの投入電力と光出力の比であるエネルギー変換効率 (PCE) を向上させるためには、導波ロスの低減に加えて駆動電圧の低減すなわち電気抵抗の低減が求められる。LDを構成する半導体層の電気抵抗を低減するためには、不純物を高濃度にドーピングし

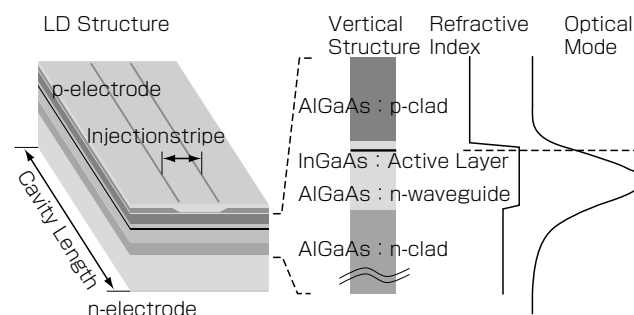


図1 LD構造と屈折率分布および光密度分布
Fig. 1. Schematic structure of LD, refractive index profile and optical profile.

1 光デバイス研究部
2 光デバイス研究部グループ長
3 光デバイス研究部部長
4 製造部

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
LD	Laser Diode	半導体レーザー.
PCE	Power Conversion Efficiency	エネルギー変換効率. 投入電力と光出力の比.
GaAs	Gallium Arsenide	ガリウムヒ素, 半導体レーザー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, 半導体レーザー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, 半導体レーザーを構成する材料の一つ.
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapor Deposition	有機金属気相成長法, 薄膜成長法の一つ.
縦構造	Vertical Structure	LDの厚さ方向に作り込まれた膜厚, 屈折率, ドーピングなどのプロファイル.
スロープ効率	Slope Efficiency	単位電流当たりの出力の上昇度. 電流 - 光出力曲線の傾き.
微分抵抗	Differential Resistance	単位電流当たりの電圧の上昇度. 電流 - 電圧曲線の傾き.
CoS	Chip on Submount	LDを放熱性サブマウントに実装した形態.
活性層	Active Layer	量子井戸構造を含んだ光を生む層.
クラッド層	Clad Layer	低い屈折率を有して, 光を導波層に閉じ込める役割をになう層.

て導電性キャリアの濃度を高めることが有効である. その一方で光フィールド内の導電性キャリアの増加は光の吸収による導波ロスを増加させるトレードオフがある. したがって高いPCEを実現するためにはレーザー構造中のドーピングプロファイルを光フィールド形状とともに注意深く設計する必要がある. 図 2 にチップオンサブマウント (CoS) による従来製品の電流 - 光出力 (I-L) 特性, 電流 - 電圧 (I-V) 特性とPCE曲線を示す. I-V特性が線形な領域では 12.6 mΩ程度の微分抵抗が生じている. 図 3 は半導体成長層のバルク抵抗やサブマウント部の配線といった, CoSを構成する個々の要素がもつ微小な抵抗を分析した結果である. 全体の 75%が半導体成長層に起因し, 特に 37%がpクラッド層に集中している. 今回われわれは, これらの抵抗を低減することによるPCEの向上を目指してLDの設計を最適化し, 試作によって効果を検証した. LDの共振器長は 4 mm(従来製品と同じ寸法)と 5 mmの 2 種類を作製し, 縦構造を再設計した効果と共振器長を拡張した効果を検証した. 特性の評価はCoS形態で行った.

3. 縦構造の設計変更によるPCE向上

3.1 pクラッド層の抵抗低減アプローチ

図 4 に従来設計LDのpクラッド層におけるドーピングプロファイルと光フィールドの形状を示す. pクラッド層のうち活性層に近い領域には高い密度で光が存在するため, 導波ロスを避けるためにキャリア濃度を低く抑える必要がある. 一方で活性層から遠く光密度が小さい領域においては, キャリア濃度を上げて抵抗を下げる必要がある. pクラッド層の電気抵抗を低減するために光フィールドとドーピングプロフ

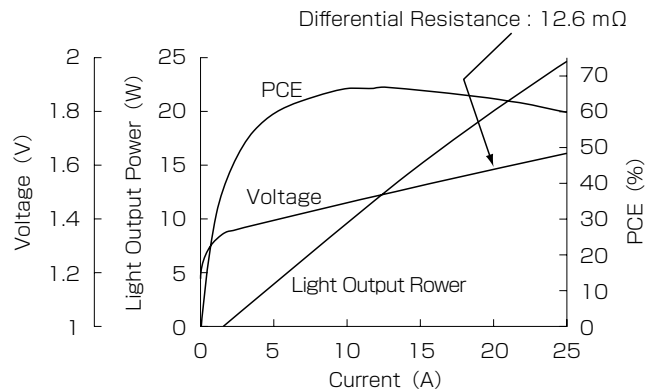


図2 従来構造LDのI-L, I-V, PCE特性
Fig. 2. Light output power, voltage and PCE versus injection current characteristics of conventional LD.

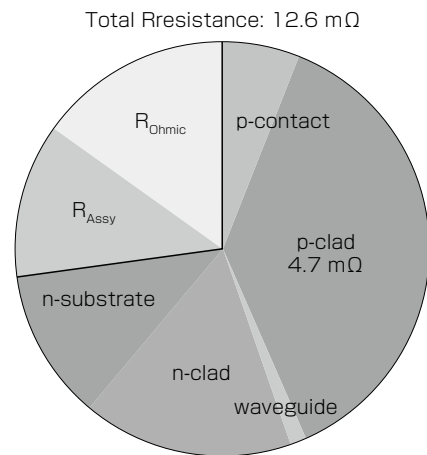


図3 従来構造LDにおける構成要素ごとの電気抵抗
Fig. 3. Pie chart of resistance element of conventional design.

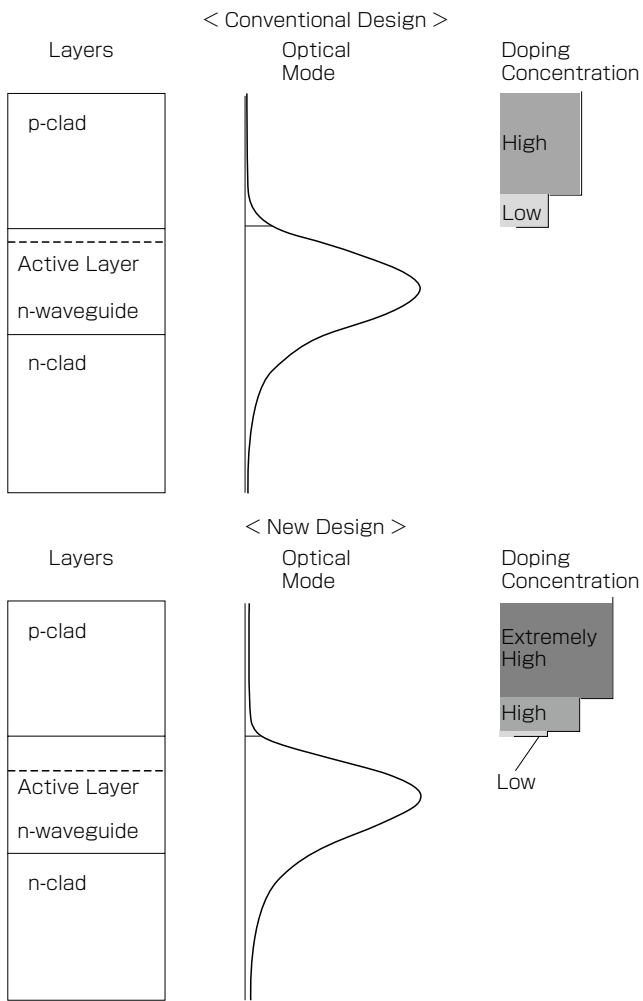


図4 pクラッド層の光フィールドとドーピング濃度プロファイル. 上は従来構造, 下は新構造
Fig. 4. Schematic diagram of optical mode profile and doping profile comparison of conventional design (upper) and new design (lower).

ァイルを再設計した. まず導波構造を再設計してp層とn層における光フィールドの非対称性を強めることで, pクラッド層に存在する光フィールドを従来よりも減少させた. 次にこの光フィールド形状のもとでPCEが最大になるように, pクラッド層のドーピングプロファイルを最適化した. その結果, pクラッド層全体の中で低キャリア濃度である領域の割合を従来の10%程度にまで低減することができた. 加えてpクラッド層の中で活性層から遠い領域のキャリア濃度を従来からさらに大きくすることが可能になり, pクラッド層全体の70%の領域を従来から一桁高い濃度に上げることができた. 新たな構造におけるpクラッド層の抵抗値は従来の25%にまで減少出来ることが計算により見積もられた.

3. 2 PCE改善設計の試作結果

試作したLDのI-V特性を図5, I-L特性を図6, PCE特性を図7にそれぞれ従来構造と比較して示す. 新構造LDの電圧は従来構造から顕著に低下した. 20 Aにおいて微分抵抗は従来構造から5.3 mΩ低減され, ドーピング

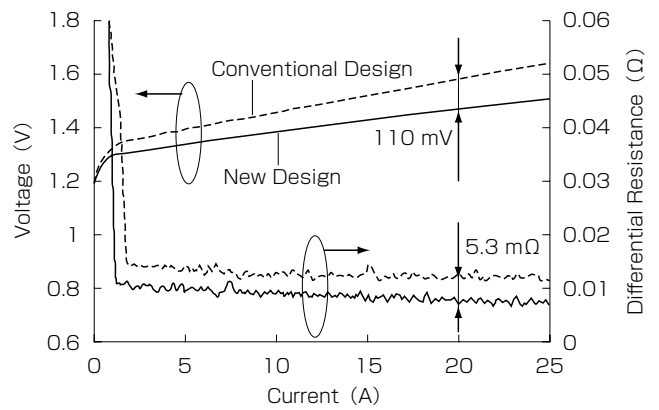


図5 I-V特性, 微分抵抗. 新構造 (実線) と従来構造 (破線) での比較
Fig. 5. Voltage versus injection current characteristics comparison of newly designed LD (solid lines) and conventionally designed LD (dashed lines).

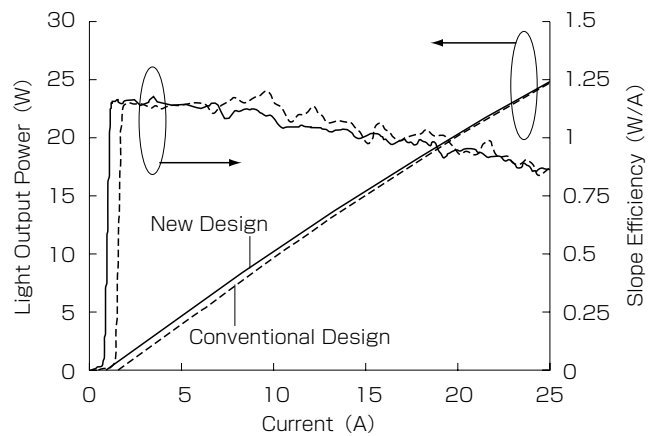


図6 I-L特性, スロープ効率. 新構造 (実線) と従来構造 (破線) での比較
Fig. 6. Light output power versus injection current characteristics comparison of newly designed LD (solid lines) and conventionally designed LD (dashed lines).

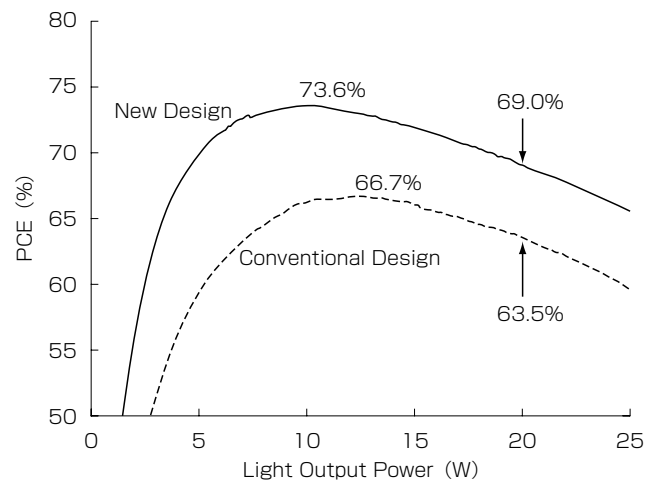


図7 PCE特性. 新構造 (実線) と従来構造 (破線) での比較
Fig. 7. PCE versus light output power characteristics comparison of newly designed LD (solid line) and conventionally designed LD (dashed line).

プロファイルを再設計した効果が確認された。結果として動作電圧を 110 mV 減少させることができた。I-L 特性においては新構造LDと従来構造LDのスロープ効率曲線がほぼ重なっており、ドーピングプロファイルの変更による導波ロスの増加が無視できる程度に小さいことが確認できた。結果、低電流域から高電流域までのすべての領域において新構造LDは従来構造LDに対して同等以上の光出力性能を示した。抵抗の減少を反映してPCEは従来構造LDから大きく向上した。中でもPCE曲線におけるピーク値の上昇は顕著であり 73.6% が得られた。この値は従来構造LDのピーク値から 7.0 ポイント高く、世界最高の水準に至っている。20 W の高出力域においても従来構造よりも 5.5 ポイント高い 69.0% が得られ、高出力と高効率の両立を達成できた。

4. 共振器設計による実用出力向上

これまで述べてきた、高PCEに最適化させた新たな縦構造をベースとして、さらなる設計の変更によって高出力化を目指した。励起用光源LDの高出力化はファイバレーザシステムに対して高出力化や部品点数の削減によるコストの低減、省スペースなどの価値を生む。今回われわれは共振器長さを従来製品と同じ 4 mm から 5 mm に拡張した際の効果を調査した。長共振器化によってLDと実装サブマウントの接触面積が拡大するため放熱性が向上し、さらに導電面積が拡大することによって電気抵抗も低減される。したがって長共振器のLDは短共振器に比べて高電流域での出力特性が改善し、実用出力の向上が期待できる。一方で、スロープ効率の低下と発振しきい値電流の上昇があるため、共振器長は要求性能に応じて選択されるべきである。

縦構造にはPCEに最適化させた新構造を採用して、共振器長さのみを 4 mm と 5 mm とした 2 種類のLDの I-L および PCE 特性を図 8 に示す。5 mm-LD の I-L カーブは 4 mm-LD とほぼ重なり、長共振器化によるしきい値の上昇とスロープ効率の低下は軽微にとどまった。PCE 特性は低電流においては 4 mm が優位であり、しきい値電流の差を反映している。一方で 20 A を超える高電流域においては 5 mm-LD が 4 mm-LD よりも高い PCE を示し、25 A 通電時では 4 mm-LD を 1 ポイント上回る 66.6% を示した。長共振器化による放熱性向上と電流密度の低減によって高出力特性が向上したことが確認できた。

5. む す び

PCE の最大化を目的としてLDの縦構造を再設計しドーピングプロファイルおよび光フィールド形状を最適化することで、スロープ効率を維持しながら消費電力の大幅な抑制に成功した。その試作したLDのPCEはピーク値、高出力特性とともに従来のLDから大きく向上し、特に共振器長 4 mm のLDにおいてPCEピーク値は世界最高水準

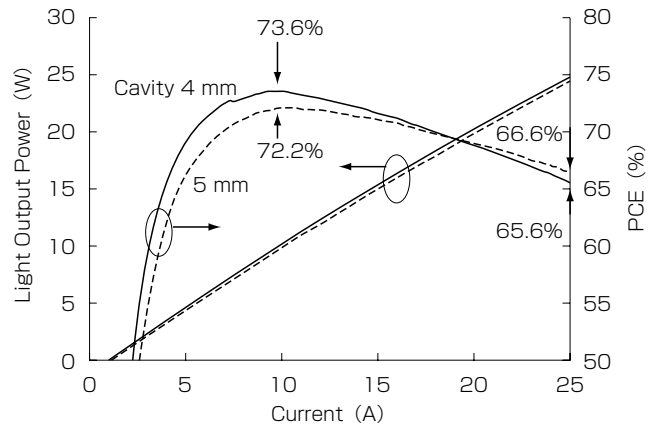


図8 新構造LDのI-L特性とPCE特性。共振器長 4 mm (実線) と 5 mm (破線) での比較

Fig. 8. Light output power and PCE versus injection current characteristics comparison with 4 mm (solid lines) and 5 mm (dashed lines) of cavity length with newly designed vertical structure.

の 73.6% を達成した。さらに共振器長を 5 mm へ拡張したLDにおいては高出力時の特性を向上させることができた。ファイバレーザシステムの高出力、高性能化に貢献できるLD性能を実現することができた。

参 考 文 献

- 1) V. Gapontsev, N. Moshegov, I. Berezin, A. Komissarov, P. Trubenko, D. Miftakhutdinov, I. Berishev, V. Chuyanov, O. Raisky and A. Ovtchinnikov, "Highly-efficient high-power pumps for fiber lasers," Proc. SPIE Vol. 10086, 1008604, 2017.
- 2) J. Skidmore, M. Peters, V. Rossin, J. Guo, Y. Xiao, J. Cheng, A. Shieh, R. Srinivasan, J. Singh, C. Wei, R. Duesterberg, J. J. Morehead and E. Zucker, "Advances in high-power 9XXnm laser diodes for pumping fiber lasers," Proc. of SPIE Vol.9733, 97330B, 2016.
- 3) 石川正博, 北林和夫, 阪本真一, 監物巨人, 下平幸輝, 船津友希, 葛西洋平, 細川幸, "12 kW マルチモードファイバレーザ", Fujikura 技報, Vol.132, pp12-16, 2019.
- 4) Y. Kaifuchi, Y. Yamagata, R. Nogawa, R. Morohashi, Y. Yamada and M. Yamaguchi, "Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes," Proc. SPIE Vol.10086, 100860D, 2017.
- 5) Y. Kaifuchi, K. Yoshida, Y. Yamagata, R. Nogawa, Y. Yamada and M. Yamaguchi, "Enhanced power conversion efficiency in 900-nm range single emitter broad stripe laser diodes maintaining high power operability", Proc. SPIE Vol.10900, 109000F, 2019.
- 6) 山形友二, 能川亮三郎, 貝瀬良和, 佐藤俊太, 山田由美, "ファイバレーザ励起用高出力半導体レーザー", Fujikura 技報, Vol.129, pp46-50, 2016.