

産業用ファイバレーザ向け励起LDの性能向上

光応用技術R&Dセンター 諸 橋 倫 大 郎¹・内 山 正 裕²・山 形 友 二³・寺 田 佳 弘⁴
ファイバレーザ事業部 川 上 俊 之⁵

Performance Improvement of Pump LDs for Industrial Fiber Laser Applications

R. Morohashi, M. Uchiyama, T. Kawakami, Y. Yamagata, and Y. Terada

産業用ファイバレーザシステムの励起光源である高出力LDには、高出力・高効率動作に加え、ファイバ結合に適したビーム放射角低減や長期信頼性の向上が求められる。本稿では、導波構造の見直しにより、垂直放射角を30%以上低減しつつ、駆動電流27 Aで光出力27.9 W、PCE 66.5%の高出力・高効率動作を達成した。さらに、長期エージング試験により、高負荷の連続動作においても優れた信頼性を実証した成果を報告する。これら高性能なLDの開発を通じて、次世代産業用ファイバレーザシステムの性能向上に貢献する。

High-power LDs, which are applied as pump sources for industrial fiber laser systems, are required to achieve not only high-power and high-efficiency operation but also reduced beam divergence suitable for fiber coupling, as well as improved long-term reliability. In this report, we achieved high-power and high-efficiency operation with a light output of 27.9 W and a PCE of 66.5% at a driving current of 27 A, and reduced vertical divergence angles by more than 30% by optimizing the waveguide structure. Furthermore, long-term aging tests demonstrated excellent reliability even under severe operation conditions. We aim to contribute to the advancement of next-generation industrial fiber laser systems through the development of these high-performance LDs.

1. ま え が き

波長9xx nm帯の近赤外高出力LDは、材料加工を主な用途とする高出力ファイバレーザシステムの励起光源として利用されている。特に近年では、高出力LDのコスト当たりの出力(W/\$)やSWaPの向上が重視される傾向にあり、LDの長共振器化、エミッタ幅拡大、エピタキシャル構造の最適化を通して、単一エミッタ当たりの出力向上を目指した開発が進んでいる^{1) 2) 3) 4) 5) 6)}。当社は、LDの高出力化に必要な長共振器において、非対称性の極めて大きな導波構造を採用することで低ロス化を図り、また、ドーピングプロファイルの最適化により電気抵抗を最小化することで、高出力・高効率動作の両立を実現してきた^{7) 8) 9) 10)}。本稿では、これまで報告してきた高出力・高効率を更に推し進めつつ、ファイバ結合型LDモジュールへ搭載する際に有利となる、垂直ビーム放射角を低減する新たな導波構造を適用したLDを作製し、特性評価と初期的な信頼性試験を実施した結果について報告する。

2. 特性改善へ向けたLD構造の変更

LDの単一エミッタ当たりの出力を向上する最も有効な方法は、ワイドストライプの採用と長共振器化である。電流注入面積の拡大により電圧が低減し、放熱性の改善を図ることができるため、その結果として実用光出力の向上が期待できる。LDのエピタキシャル構造は、導波構造の強い非対称化によって、吸収ロスの大きなp型ドープ層へのモードの重なりを最小化することで、内部ロスの低減を図ることが可能なADCH構造を採用しているため、特に長共振器化に有利である⁹⁾。以下では、当社LDの基本構造を示したのち、今回開発したLDの設計変更点とそれにより見込まれる特性改善点について説明する。

ファイバレーザの励起光源として用いる高出力LDでは、970 nm帯での発振が可能なInGaAs/GaAs系を用いている。当社高出力LDでは、基本構造としてSASを適用しており、その断面構造を図1に示す。同構造では、レーザ発光幅を規定する電流注入ストライプと、レーザ端面部の電流非注入領域を、電流ブロック層の埋め込み再成長により同時に形成するため、ウエハプロセスが比較的簡素である。これに加え、表面が比較的平坦であるため、エピソードダウンで高放熱サブマウントにダイボンドした際の不均一歪

1 レーザフォトンクス研究部
2 レーザフォトンクス研究部 グループ長
3 レーザフォトンクス研究部 上席研究員、博士(工学)
4 レーザフォトンクス研究部 部長
5 製造部 グループ長、博士(工学)

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
PCE	Power Conversion Efficiency	電力光変換効率
SWaP	Size Weight and Power consumption	寸法, 質量, 消費電力の頭文字を取った総称で, これらそれぞれを低減する要求が高まっている
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
SAS	Self-Aligned Stripe	LDの電流注入構造の一種
CoS	Chip on Submount	LDチップをサブマウントに実装した状態の素子
CW	Continuous Wave	連続波
COMD	Catastrophic Optical Mirror Damage	瞬時光学損傷. 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LD出射端面の結晶が溶解し, 発振停止に至る現象
QCW	Quasi Continuous Wave	準連続波
FIT	Failure In Time	10億時間当たりの平均故障回数
FFP	Far Field Pattern	遠視野像. LD出射端から十分遠方での光の強度分布

による偏光純度低下が生じにくいなどのメリットがある¹¹⁾.

新開発LDでは, 実用光出力の向上を目的として, 共振器長を従来の4 mmから5 mmへと拡大した. 大きな出力向上を得るためには, 出力の制限を与える発熱ロスを徹底的に低減する必要がある, このためにPCEの改善に同時にとりくんだ. 具体的には, pクラッド層のドーピング濃度を光密度にあわせて調整することで, フリーキャリア吸収による内部ロスの増加を抑えながら, pクラッド層の抵抗低減をはかった¹²⁾.

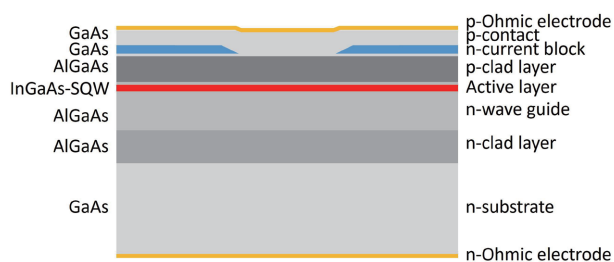


図1 LD積層構造の断面

Fig. 1. Cross-sectional view of LD structure.

共振器長の拡大に加えて, 新開発LDでは従来構造をベースとして垂直ビーム放射角の低減をはかった導波構造の変更について検討した. 垂直ビーム放射角を低減することは, ファイバ結合型LDモジュールにおいて, 多数のLDをスタックビーム化した際のビーム幅を低減させることができ, ファイバ結合の安定化, 高輝度化, 低SWaP化などに有用である. 図2に, 従来および新開発LDの屈折率プロファイルおよび光強度分布を示す. 垂直ビーム放射角の低減は, 一般に導波層厚の拡大により得られるが, 高次モード発振が課題となる. それを抑制する対策として, クラッド層Al組成の非対称性を強めながら導波層厚を拡大することで, 基本モードのみが許容される導波構造の限界を見極めながら, 垂直ビーム放射角の低減をはかった.

以上のように, 長共振器化に加え, 屈折率導波構造, ドーピングプロファイルを含むエピタキシャル構造を大きく見直したLDを作製し, セラミックベースの高熱伝導性サブマウント上にエピソードダウンで実装したCoSにより, 特性の確認を実施した.

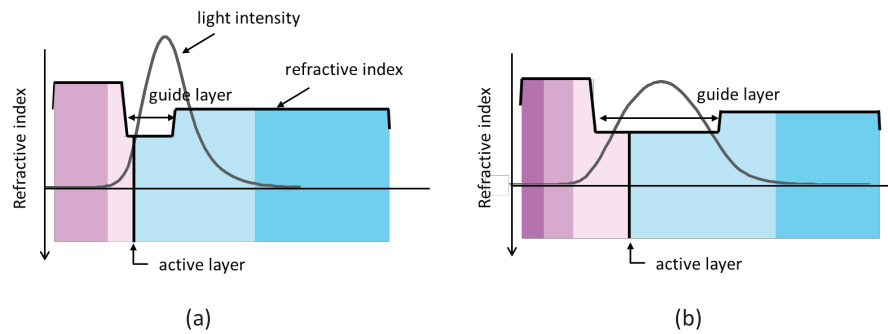


図2 (a) 従来LDと(b) 新開発LDの屈折率プロファイルと光強度分布

Fig.2. Refractive index profile and light intensity distribution of (a) conventional LD and (b) newly designed LD.

3. 新開発LDにおける特性改善の結果

共振器長の拡大により、出力特性は大きく改善している。新開発LDの電流－光出力特性の、従来LDとの比較を図3に示す。25℃、CW駆動により測定した電流－光出力特性において20 A以上の高電流領域でのリニアリティが向上していることがわかる。このようなリニアリティの向上は、注入ストライプ面積の拡大に加え、エピタキシャル構造の改善によって得られた発熱ロスの低減効果の寄与が大きい。同図にはPCEの比較も示されている。従来LDでは、実駆動電流22 Aにおいて、出力22.0 Wであるが、この駆動電流条件で比較すると新開発LDでは5ポイント以上のPCE向上が得られていることがわかる。また、新開発LDの実駆動電流として想定している27 Aにおいては、27.9 Wの光出力と66.5%のPCEが得られている。

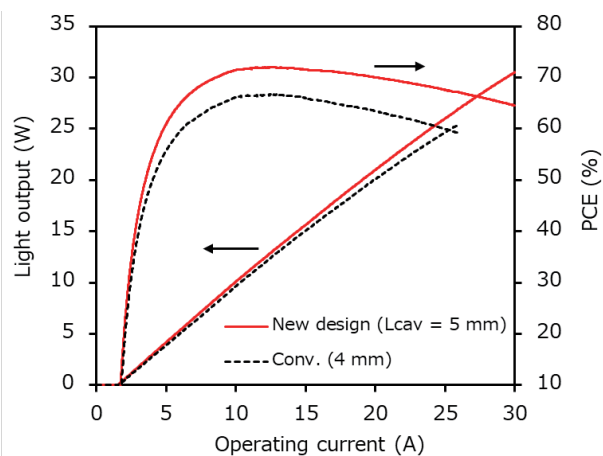


図3 LDの電流－光出力特性およびPCE

Fig. 3. L-I characteristics and PCE of LDs.

導波構造の見直しによる垂直方向のビーム放射特性への改善効果について、図4に従来および新開発LDを比較した結果を示す。95%の累積強度で定義される95%ビーム幅は、新開発LDにおいて47°が得られており、従来の69°から30%以上低減できた。ビーム形状は単峰のガウシアン分布

を示しており、高次モード発振が抑えられていることが確認できた。一方、図5に水平方向のビーム放射特性を示す。新開発LDでは、電流注入構造の工夫により、低放射角領域に、より高い光強度分布を持つように調整されている。95%ビーム幅では従来LDよりわずかに広がっているものの、多数のLDを使用したマルチLDチップモジュールにおいて、スタックビームを形成・集光し、ファイバ結合した際に得られる結合効率は2%程度改善するなど、良好な結果が得られることがわかった。

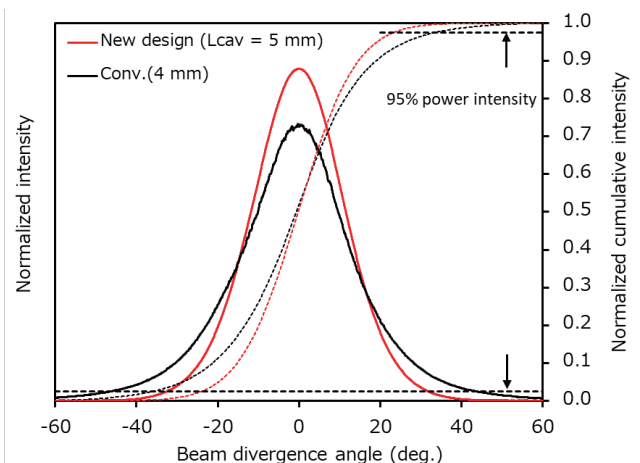


図4 LDの垂直方向FFP

Fig. 4. Vertical FFP of LDs.

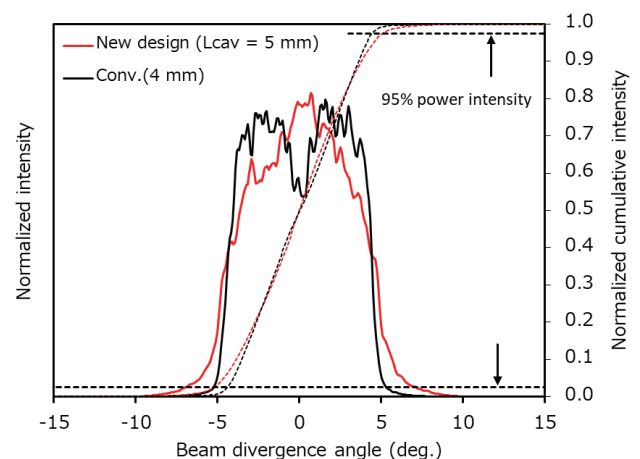


図5 LDの水平方向FFP

Fig. 5. Horizontal FFP of LDs.

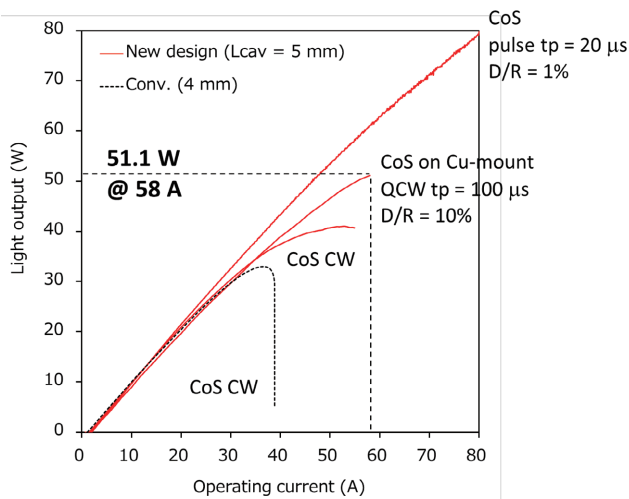


図6 LDの最大出力測定結果

Fig.6. Results of maximum output power measurement of LDs.

新開発LDにおける限界出力を把握するため、CWおよび種々のパルス駆動条件下における出力特性を比較した結果を図6に示す。まずはCoS単体で測定を行ったが、熱飽和の問題を回避するため、パルス駆動（パルス幅20 μ s、駆動デューティ比1%）による測定を行った。パルス駆動では、LDドライバの電流上限の80 Aまで駆動したが、新開発LD、従来LDのいずれもCOMDが生ずることはなく、新開発LDでは最大光出力79.7 WのCOMDフリー動作を確認した。次に、CW駆動による特性を比較した。新開発LDでは、共振器長の拡大で放熱特性が改善された恩恵により、最大光出力は42 Wが得られ、従来LDの33 Wから10 W近く向上した。CWによる電流－光出力特性は、40 A以上の電流領域において光出力の飽和傾向が顕著にみられるが、これはCoS単体ではサブマウントと測定ステージ間の接触熱抵抗が大きいため、LDの接合温度の上昇が大きく、最大光出力の制限を受けているためである。そこで、CuブロックにCoSをボンディングし、Cuブロック温度を

25 $^{\circ}$ Cに維持可能なQCW駆動条件（パルス幅100 μ s、駆動デューティ比10%）に調整し、最大光出力を測定した。その結果、51 Wの最大光出力が得られ、トップレベルの出力特性を示すことができた。

4. 高出力・長期駆動の実証

産業用ファイバレーザシステムに使用されるLDには、高出力・高効率動作のみならず、極めて高い信頼性が求められる。当社では、加速エージング試験を通じて信頼性を検証しつつ、LDの高出力化および高効率化を推進してきた。前章では、高い光出力条件下でのCOMDフリー動作を実証したが、産業用途においては、高出力条件下での長期信頼性を実証することが重要である。

図7 (a) に示すように、従来LDにおいては、駆動電流25 Aおよび接合温度100 $^{\circ}$ C相当という厳しい加速条件下で、44,700時間（約5年）を超える無故障連続動作を実証した。この試験はCoS形態で実施されたものであり、長期間のデータとして極めて稀少であると同時に、当社のLD製造プロセスの安定性を直接的に証明する結果である。また、LDモジュールを用いた加速エージング試験においても同様に高い信頼性が確認されている¹⁰⁾。

一方、今回新たに開発したLDについては、次世代マルチモードファイバレーザシステムへの適用を目指し、現在信頼性評価を進行中である。図7 (b) に示す新開発LDの加速エージング試験結果からは、駆動電流27 Aおよび接合温度90 $^{\circ}$ C相当の条件下で6,900時間以上の無故障動作が確認されており、高負荷環境下でも優れた信頼性を示している。さらに、並行して実施しているファイバ結合型LDモジュールの通電試験においてデバイスアワーが蓄積されており、1000 FIT以下の故障率達成が見込まれるなど、新開発LDの高い信頼性が実証されつつある。

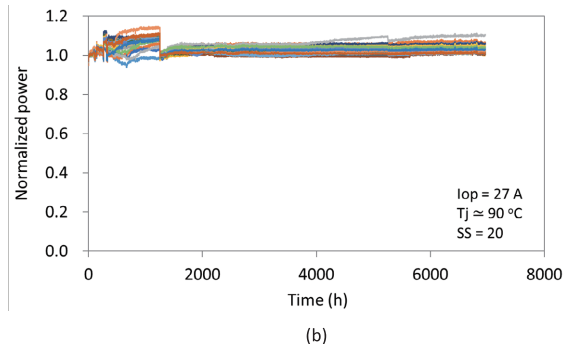
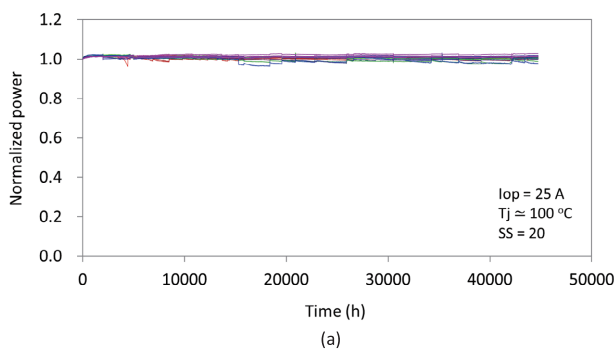


図7 (a) 従来LDと (b) 新開発LDの加速エージング試験結果

Fig. 7. Results of accelerated aging test of (a) conventional LDs and (b) newly designed LDs.

5. むすび

従来よりも高出力・高効率特性を大きく改善しながら、垂直ビーム放射特性を改善する導波構造を適用したLDを開発した。実駆動電流として想定する27 Aにおいて、光出力27.9 W、PCE 66.5%が得られた。導波層厚を拡大しながら、基本モードのみが許容される導波構造を適用することにより、垂直ビームの95%幅は47°となり、従来構造LDと比較して30%以上放射角を低減した。加速エージング試験では、6,900時間以上の無故障動作を達成した。近赤外LDは高出力・高効率化の進展が著しく、近年その技術は成熟期にきている。我々も、これまで培ってきた高出力・高効率性能に加えて、ファイバレーザ用の励起光源としての機能を向上させる検討を引き続き行っていく。

参考文献

- 1) N. Moshegov, et al.: "High-power highly-efficient wavelength stabilized pumps operating in 8xx-9xx nm range," Proc. SPIE vol.11983, 1198308, 2022
- 2) T. Könning, et al.: "Advances in fiber coupled high power diode laser modules at 793nm and 976nm for defense applications," Proc. SPIE vol.11983, 119830I, 2022
- 3) S. McDougall, et al.: "Operation of wide emitter 976 nm fiber laser pump chips with high reliability and temperature stability," 28th International Semiconductor Laser Conference, 2022
- 4) M. Kanskar, et al.: "High efficiency on-chip wavelength-stabilized laser diodes," Proc. SPIE vol.12867, 128670P, 2024
- 5) G. Yang, et al.: "Efficient power scaling of broad-area laser diodes from 915 to 1064 nm," Proc. SPIE vol.12867, 128670W, 2024
- 6) J. Wang, et al.: "Volume manufacturing of high-power diode lasers using 6" wafers," Proc. SPIE vol.11983, 1198306, 2022
- 7) 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
- 8) 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
- 9) Y. Yamagata, et al., "915nm high-power broad area laser diodes with ultra-small optical confinement based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH) ," Proc. SPIE vol.9348, 93480F, 2015
- 10) 葛西ほか：「フジクラグループの高出力半導体レーザ技術」, フジクラ技報, 第134号, pp.60-67, 2021
- 11) 諸橋ほか：「高偏波純度高出力半導体レーザ」, フジクラ技報, 第131号, pp.26-31, 2018
- 12) 能川ほか：「高効率高出力半導体レーザ」, フジクラ技報, 第133号, pp.22-25, 2020