

高偏波純度高出力半導体レーザ

先端技術総合研究所 諸橋 倫太郎¹・山形 友二¹・貝 淵 良和¹・能川 亮三郎¹
葛 西洋平²
オプトエナジー株式会社 多田 勝久³・山田 由美³

High Polarization Purity High Power Laser Diodes

R. Morohashi, Y. Yamagata, Y. Kaifuchi, R. Nogawa, Y. Kasai,
K. Tada, and Y. Yamada

ファイバレーザの励起光源として用いられるLDモジュールの高出力化が求められている。LDモジュール高出力化のために用いられる偏波合成技術においては、偏波純度の高いLDを用いることが重要である。本稿では、独自のSAS構造LDで99%以上の偏波純度が得られ、高偏波純度のLDを用いた偏波合成LDモジュールで最高出力394 Wを達成したことを報告する。

High power LD modules are demanded for sources of fiber laser systems. It is important to use high polarization purity LDs in polarization multiplexing techniques for improving the power of LD modules. We have achieved TE polarization purity of over 99 % in our original SAS-LDs. The maximum output power of 394 W has been achieved in the laser diode module by using SAS-LDs for light sources, applied with polarization multiplexing.

1. ま え が き

近年10 kWを超える出力のファイバレーザが実用化され、それに伴って励起光源であるLDモジュールの高出力化が求められている。LDモジュールの出力を倍増させる方法としてビーム光の偏波合成技術が用いられる¹⁾。高効率の偏波合成LDモジュールを実現するには、高偏波純度のLDを用いることが重要である。LD素子に歪が生じるとTM偏波成分のレーザ光が発生し、偏波純度が悪化する可能性がある²⁾。特にLDをサブマウントに実装した際、LD表面の凹凸部分に歪が生じやすいことが知られている。本稿では表面の凹凸が小さい独自のSAS構造により、一般的に用いられるリッジ構造のLDと比較して、高偏波純度を達成できることを報告する。また、高偏波純度LDを用いた偏波合成LDモジュール開発について報告する。

2. 高出力・高信頼LDの開発

高出力ファイバレーザの励起光源としてのLDは、高出力・高効率であることに加えて高い信頼性が求められる。これらの要件を満たすため、われわれは縦構造としてADCH構造を適用し、水平方向の発光幅の拡幅によって

9××nm帯の高出力・高信頼LDを開発した³⁾。図1に示すように、発光幅220 μmのLDでは、CW駆動で最大出力33 W、電力変換効率は最大68%と、世界最高クラスの高出力・高効率特性が得られ、パルス駆動（パルス幅20 μs、駆動デューティ比1%）で69 W以上のCODフリー動作を確認した⁴⁾。また発光幅180 μmのLDの連続通電による信頼性試験では、図2に示すように20 W

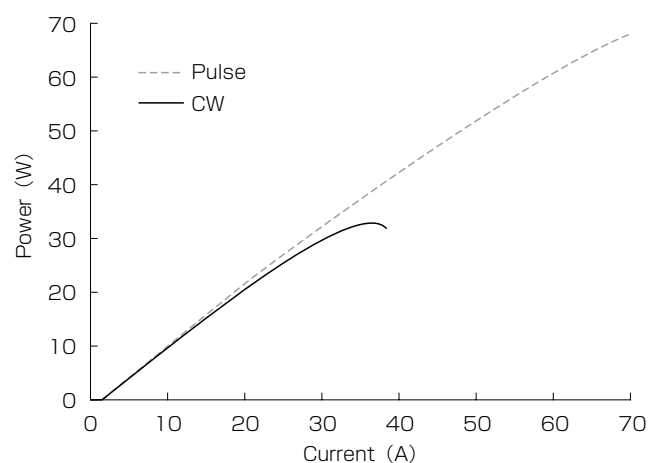


図1 開発した高出力LDの電流 - 光出力特性
(発光幅=220 μm)

Fig. 1. Light-output versus current characteristics of the developed high power LD. (emission width=220 μm)

1 光デバイス研究部
2 ファイバレーザ研究部
3 オプトエナジー株式会社

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.
TE 偏波	Transverse Electric polarization	横電界偏波, 平面型導波路の場合, 電界が基板面に対し水平になる偏波モード.
TM 偏波	Transverse Magnetic polarization	横磁界偏波, 平面型導波路の場合, 磁界が基板面に対し水平になる偏波モード.
SAS	Self-Aligned Stripe	半導体レーザダイオード素子の電流注入構造の一種.
ADCH	Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure	非対称分離閉じ込め構造, 内部ロスの低減を図ったレーザ構造.
CW	Continuous Wave	連続発振.
COD	Catastrophic Optical 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.
MOCVD	Metal-Organic Chemical Vapor Deposition	有機金属気相成長法, 薄膜成長法の一つ.
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.
AuSn	Gold Tin	金-すず合金, 高周波デバイスや光通信デバイス用の半田材料に使用される.
NFP	Near Field Pattern	近視野像, レーザ出射端近傍の光強度分布.

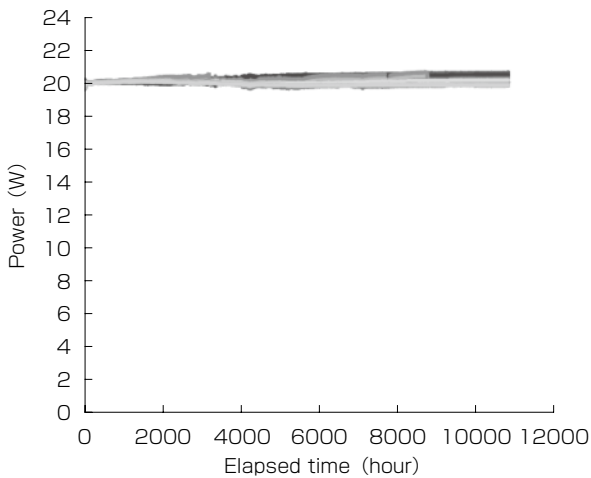


図2 高出力LDの信頼性試験 (発光幅 = 180 μm)
Fig. 2. Reliability test of high power LDs (emission width=180 μm).

駆動条件下で 10000 時間超の無故障駆動を達成し, 高信頼性を実証した⁵⁾. 本稿では, ADCH 構造をベースに設計した SAS 構造 LD とリッジ構造 LD を作製し, それぞれの偏波特性を評価した.

3. LD の 構 造

図 3 に SAS 構造 LD とリッジ構造 LD の構造断面を示す. 一般的に広く採用されているリッジ構造 LD は, メサと呼ばれる凸部の電流注入領域を形成する. 一方 SAS 構造 LD は, 電流ブロック層による電流狭窄で電流注入領域を形成し, リッジ構造に比べると最表面の凹凸を小さくすることができる. これら LD の積層構造は, 高出力・高効率動作のため ADCH 構造をベースとする同一の設計と

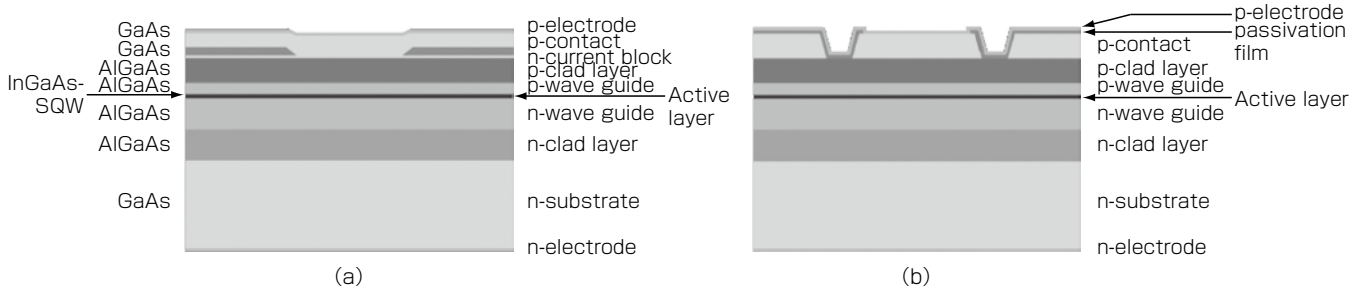


図3 (a) SAS構造LD, (b) リッジ構造LDの構造断面
Fig. 3. Cross-sectional view of (a) SAS-LD, and (b) Ridge-LD.

した。MOCVD法によりn型GaAs基板上にInGaAs/AIGaAs系材料によるLD構造をエピタキシャル成長し、915 nmの発振波長を得た。発光幅と共振器長は、それぞれ180 μm 、4 mmとした。レーザ光が射出される前端面は低反射率、後端面は高反射面となるよう、端面コーティングを施した。放熱性を高めることを目的とし、LDは発光領域に近いp型半導体層側の表面を、セラミック複合材料からなる高放熱サブマウント上に、AuSn半田を用いて実装した（以下、p側実装）。

図4にサブマウント上にp側実装されたリッジ構造LDの歪シミュレーション結果を示す。実装によってリッジ部の両端に強い歪が生じることがわかる。リッジ部の両端のような凹凸部分においては歪が局在しやすいことが知られている⁶⁾。リッジ部の高さは約2 μm であり、SAS構造LDの電流注入ストライプの深さ(0.6 μm)に比べて大きい。凹凸が大きいほど、凹凸部に局在する歪は増加すると考えられる。また図4から、リッジ構造LDは活性層を含むレーザの導波路と、歪が生じる部分が重なっている。リッジ構造LDはSAS構造LDに比べて、凹凸部が導波路に近い構造になっている。LDの発振光はTE偏波を主成分とするが、歪が加わると偏波回転によってTM偏波成分のレーザ光が発生する可能性がある。上記で示した歪の影響により、リッジ構造LDは偏波純度が悪化すると予想される。

4. LDの偏波特性

4.1 LDの光出力特性とNFP

SAS構造LDとリッジ構造LDの電流 - 光出力特性を図5に示す。いずれのLDも、駆動電流20 Aにおいて、20 W以上の光出力が得られた。電力変換効率の最大値は64%だった。この結果から、SAS構造LD、リッジ構造LDレーザの基本特性には差が無く、優れた高出力動作を示すことが分かった。

偏波特性の評価は、レーザ光のNFPのTE偏波成分と、TM偏波成分を分離した測定によって行った。NFP測定系の光路に偏光子を挿入すると、それぞれの偏波成分を分離できる。図6に、注入電流18 A時のSAS構造LD、

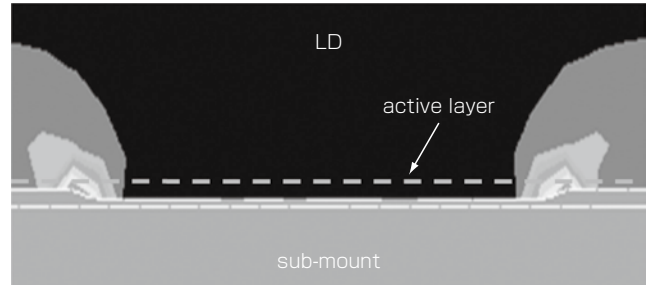


図4 サブマウントに実装したリッジ構造LDの歪シミュレーション
Fig. 4. Strain simulation of Ridge-LD mounted on sub-mount.

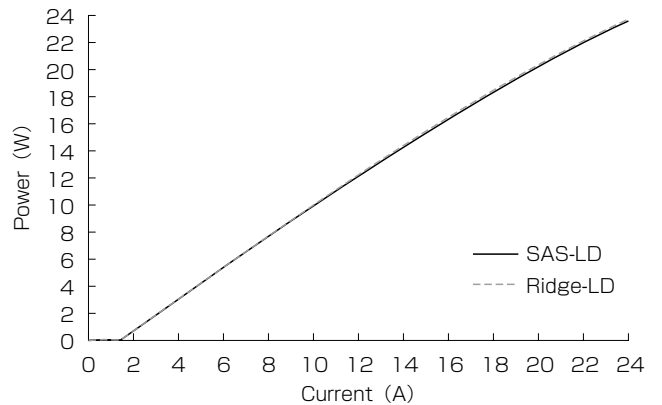


図5 SAS構造LDとリッジ構造LDの電流 - 光出力特性
Fig. 5. Light-output versus current characteristics of SAS-LD and Ridge-LD.

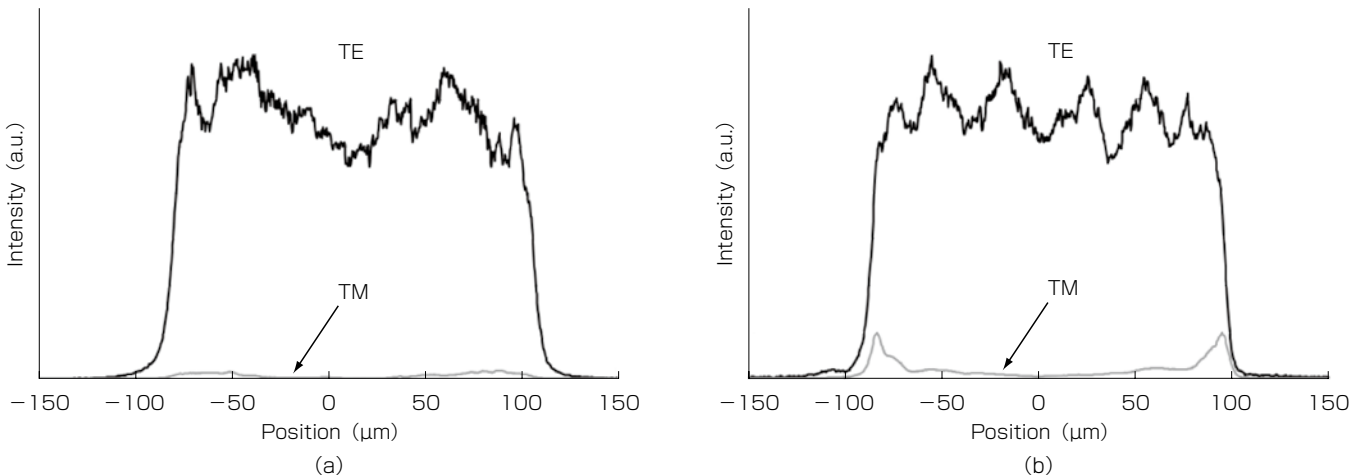


図6 (a) SAS構造LD, (b) リッジ構造LDの各偏波成分のNFPプロファイル (注入電流18 A)
Fig. 6. NFP profiles of TE and TM polarization for (a) SAS-LD, and (b) Ridge-LD at 18 A.

およびリッジ構造LDの各偏波成分のNFPプロファイルを示す。リッジ構造LDでは、リッジ部の両端にTM偏波成分のピークが確認された。図4の歪シミュレーションで予想されたように、歪によってTM偏波成分が生じたと考えられる。一方、SAS構造LDのTM偏波成分は、相対的に平坦な形状を示し、強度が小さいことが確認された。

4.2 LDの偏波純度

偏波特性を定量的に評価するための指標として、「偏波純度」を下記のように定義した。

$$\text{偏波純度} = I_{TE} / (I_{TE} + I_{TM})$$

I_{TE} と I_{TM} は、それぞれNFP測定で得られるTE偏波成分とTM偏波成分の積算強度を示す。レーザー光が完全なTE偏波であれば、値は1となる。図7にSAS構造LDとリッジ構造LDの、注入電流に対する偏波純度を示す。SAS構造LDは99%を超える偏波純度を示し、注入電流18 Aまでほぼ同じ値であった。これに対しリッジ構造LDの偏波純度は注入電流の増加に伴って96%程度まで悪化した。複数のSAS構造LDと、リッジ構造LDの、注入電流12 A時の偏波純度をプロットした結果を図8に示す。SAS構造LD、リッジ構造LDの偏波純度は、それぞれ平均で98.4%、96.8%だった。図7、8の結果から、SAS構造LDはリッジ構造LDに比べて偏波純度が高く、偏波合成に用いるレーザー光源として、より適していることが分かった。

4.3 歪低減実装による偏波純度の改善

歪シミュレーションとNFP測定の結果から、LDの偏波純度は、サブマウントに実装された際に生じる強い歪によって悪化すると考えられる。実装で生じる歪の影響を明らかにするため、通常のp側実装に対してLDの実装面を上下逆にしたn側実装を行い、偏波純度を評価した。p側実装では、サブマウント実装面から活性層までの距離が約4 μmであるのに対し、n側実装では約120 μmに増加する。このため、導波領域に生じる実装歪の影響を大幅に低減できると考えられる。ただし、n側実装はp側実装に比べて放熱性が悪いため、通常は高出力LDの実装には用いない。図9にp側実装、n側実装したSAS構造LD、およびリッジLDの注入電流に対する偏波純度を示す。測定はパルス駆動（パルス幅40 μs、駆動デューティ比1%）で行った。

SAS構造LD、リッジ構造LDのいずれもn側実装によって偏波純度が改善した。SAS構造LDは、偏波純度は最大で99.9%となり、ほぼ完全なTE偏波のレーザー光が得られた。一方リッジ構造LDでは、p側実装に比べて偏波純度が約2ポイント改善したものの、SAS構造LDに比べると低い。この結果は、リッジ構造LDに実装歪以外の歪が存在することを示している。リッジ構造LDは、表面に絶縁膜を成長して注入電流ストライプを形成する。LD材料のGaAsと絶縁膜のSiNxは熱膨張係数が大きく異なるため、絶縁膜の成長中に熱応力が加わり、歪が生じると

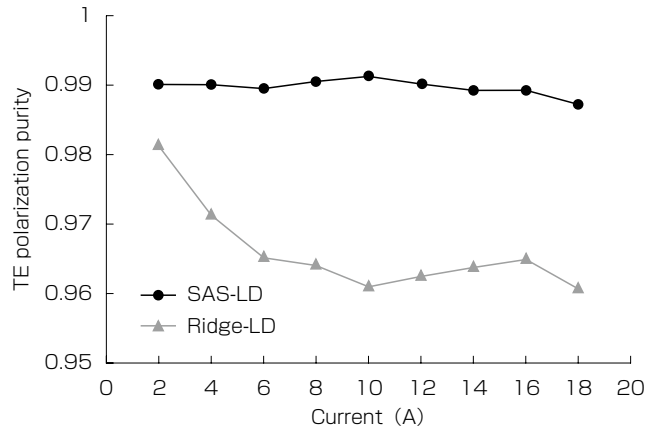


図7 偏波純度の電流依存性
Fig. 7. Injection current dependence of polarization purity.

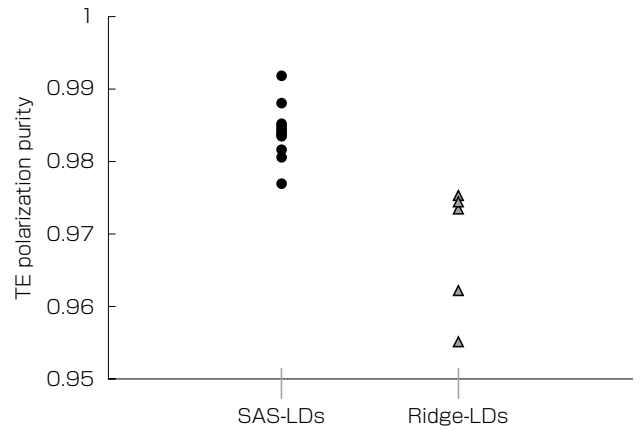


図8 SAS構造LDとリッジ構造LDの偏波純度 (注入電流12 A)
Fig. 8. Polarization purity of SAS-LDs and Ridge-LDs at 12 A.

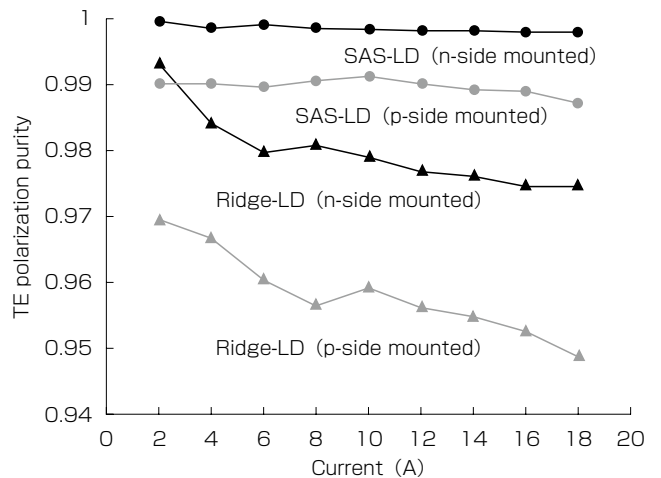


図9 実装方法によるSAS構造LD、リッジ構造LDの偏波純度の比較
Fig. 9. Polarization purity of SAS-LD and Ridge-LD by different mounting.

考えられる。

図 9 の結果は、p 側実装でも実装歪を低減することで偏波純度が改善する可能性を示している。そこで、AuSn 半田の加熱条件、半田実装時に LD に印加する荷重、AuSn 半田組成などの実装条件を改善し、偏波特性を評価した。図 10 に、改善前後の条件で p 側実装した SAS 構造 LD の、注入電流に対する偏波純度を示す。実装条件の改善により、偏波純度は 0.5 ~ 0.7 ポイント向上した。

5. SAS 構造 LD を用いた LD モジュール

リッジ構造 LD に比べ、高偏波純度に優れた SAS 構造 LD を用いたファイバレーザ励起用の高出力 LD モジュールを開発した。モジュールの出力を高めるために空間的なビーム多重のみならず、偏波多重も行っている。図 11 に偏波多重光学系の概略図を示す。偏波ビームコンバイ

ナの誘電体多層膜に対し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。LD 出射光の TM 偏波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。

開発した高出力 LD モジュールの写真を図 12 に、電流-光出力特性を図 13 に示す。LD の波長は 976 nm、ファイバコア径は 118 μm、測定時のケース温度は 25 °C である。駆動電流 23 A において最高出力 394 W を達成した。また当社では、この励起 LD モジュールを用いて 5 kW シングルモードファイバレーザ発振を達成している^{7),8)}。

6. む す び

高効率の偏波合成 LD モジュールを実現するため、SAS 構造 LD とリッジ構造 LD の偏波純度を調査した。偏波純

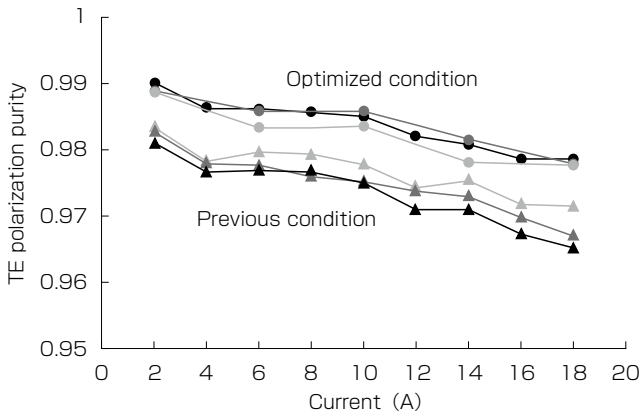


図 10 実装条件改善前後で p 側実装した SAS 構造 LD の偏波純度
Fig. 10. Polarization purity of p-side mounted SAS-LD with previous bonding condition and optimized.

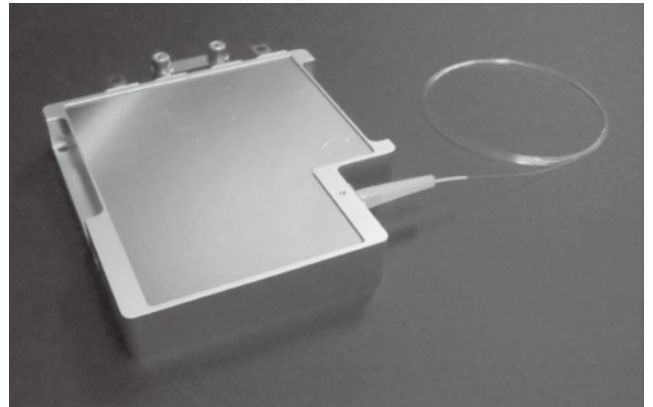


図 12 開発した高出力 LD モジュールの写真
Fig. 12. Photograph of developed high-power LD module.

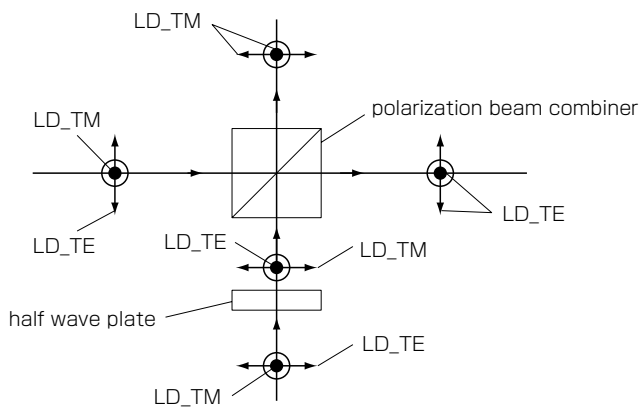


図 11 偏波多重光学系の概略図
Fig. 11. Schematic view of polarization multiplexing system.

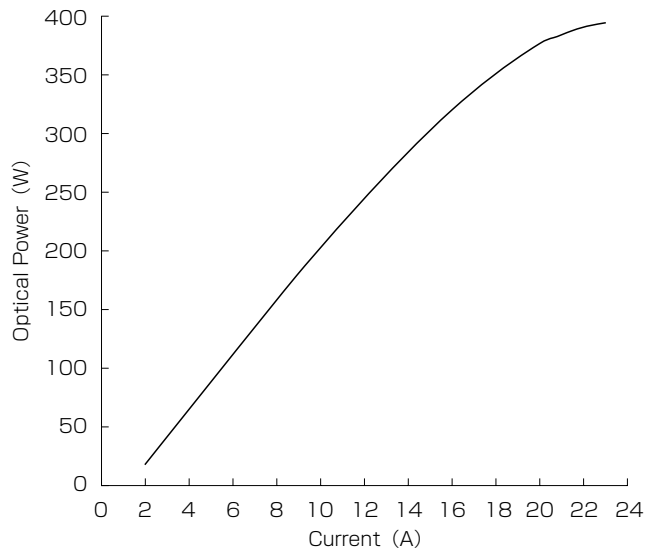


図 13 LD モジュールの電流 - 光出力特性
Fig. 13. Light-output versus current characteristics of the LD module.

度は偏波成分を分離したNFP測定によって評価した。SAS構造LDは偏波純度が99%を超え、一般的なリッジ構造LDに比べて高偏波純度動作に有利であることがわかった。実装歪の影響を明らかにするため、発光領域をサブマウント面から離れたn側実装を行った結果、偏波純度は改善し、実装歪の低減によって偏波純度が改善する可能性が示された。実装条件を改善した結果、偏波純度は約0.5～0.7ポイント向上した。SAS構造LDを用いた偏波合成LDモジュールを開発し、駆動電流23 Aにおいて最高出力394 Wを達成した。

参 考 文 献

- 1) E. Zucker, et al. : "Advancements in laser diode chip and packaging technologies for application in kW-class fiber laser pumping," Proc. SPIE 8965, 896507, 2014
- 2) E. Rosenkrantz, et al. : "High-power laser diodes with high polarization purity," Proc. SPIE 10086, 100860F, 2017
- 3) 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 9348, 93480F, 2015
- 4) Y. Kaifuchi, et al. : "Ultimate high power operation of 9xx-nm single emitter broad stripe laser diodes," Proc. SPIE 10086, 100860D, 2017
- 5) 貝淵良和ほか : 「ファイバレーザー用高出力・高信頼半導体レーザー」, 一般社団法人レーザー学会学術講演会, 第38回年次大会, B6-8, 2018
- 6) M. Winterfeldt, et al. : "Experimental investigation of factors limiting slow axis beam quality in 9xx nm high power broad area diode lasers," J. Appl. Phys. 116, 063103, 2014
- 7) K. Uchiyama, et al. : "High power single-mode fiber laser and its applications to materials processing," Proceedings of 60th Meeting on Lightwave Sensing Technology, 133, 2017
- 8) K. Shima, et al. : "5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing," Proc. SPIE 10512, 105120C, 2018