

ファイバレーザ励起用高出力半導体レーザ

先端技術総合研究所 山形 友二¹・能川 亮三郎²・貝 淵 良和²
オプトエナジー株式会社 佐藤 俊太³・山田 由美³

High Power Semiconductor Laser Diode for Fiber Laser Pumping

Y. Yamagata, R. Nogawa, Y. Kaifuchi, S. Sato, and Y. Yamada

ファイバレーザの励起光源として用いられる半導体レーザダイオード素子は、高出力・高効率に加え、長期安定動作が可能な高い信頼性が求められている。我々は、独自のADCH (Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure) 構造を適用し、効率改善と実用出力の向上をめざし、縦構造および電流狭窄構造を含む素子設計の最適化を進めている。本稿では、915 nm帯の発振波長をもつ素子において 17 Wの連続安定駆動と 60 %以上の電力・光変換効率を実現したので報告する。

Semiconductor laser diodes used for fiber laser pumping are required high power, high efficiency, and high reliability for long term operation. In this report, high-power and high-reliability single emitter laser diodes based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH) are reported. Laser design optimization in vertical layer and lateral current injection structure enabled high power operation of 915 nm LDs up to 17 W and high wall plunge efficiency more than 60 %.

1. ま え が き

9×× nm帯に発振波長をもつ高出力半導体レーザダイオード素子（以下、LD）は、さまざまな産業分野での応用が進められている。特にLDをポンプ光として用いるファイバレーザシステムは、高出力・高ビーム品質である特性を生かし、金属の切断・溶接・穴あけ加工をはじめとする材料加工分野への応用において、近年その市場が拡大を続けている^{1), 2)}。

我々は、LDの高出力、高効率動作に必要となる、長共振器長化、低ロス化、活性層における低光密度化等の設計要件を満たし、共振器端面の瞬时光学損傷=Catastrophic Optical damage (COD) フリーの高信頼性、長期安定動作を実現するために、LDの縦構造設計に従来のDCH構造を改良したAsymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH) 構造を適用した^{3), 4)}。本稿では、ADCH構造の概要とファイバレーザ用のポンプ光源として用いられる9×× nm帯LDの基本特性、および、信頼性について報告し、さらに将来に向けた高出力動作の可能性について展望する。

2. LD素子の構造と設計

ADCH構造によるLDの断面構造および電流注入構造の模式図を図1および図2にそれぞれ示す。有機金属気相成長法を用いて、GaAs単結晶基板上にInGaAs/AlGaAs



図1 LDの断面構造

Fig. 1. Cross section of laser diode.

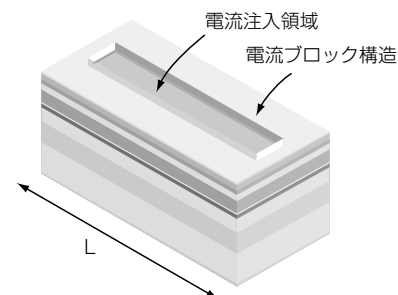


図2 LDの電流注入構造

Fig. 2. Current injection structure of laser diode.

1 光デバイス研究部グループ長
2 光デバイス研究部
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
DCH	Decoupled Confinement Heterostructure	分離閉じ込め構造。半導体レーザの高出力化に適したレーザ構造の一つ。
ADCH	Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure	非対称分離閉じ込め構造。DCHに対し、内部ロスの低減を図った構造。
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半導体レーザ素子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。
SAS	Self-Aligned Structure	半導体レーザダイオード素子の電流注入構造の一種。
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。
CoS	Chip on Submount	チップオンサブマウント、半導体レーザ素子をサブマウント上にはんだづけした形態。
CW	Continuous Wave	連続発振
WPE	Wall Plug Efficiency	電力変換効率、投入電力に対する光出力の割合。
BPP	Beam Parameter Product	ビーム放射角と発光幅の積、ビームの品質の指標。
MTTF	Mean Time To Failure	平均故障時間周期

材料系により縦構造を形成した。電流注入部を規定する電流ブロッキング構造にはSelf-Aligned Structure (SAS) 構造を用いた。SASを用いるメリットは、横方向の発光幅を決める電流注入ストライプ構造、および、信頼性を向上するために必要となる共振器端面の電流非注入構造を一括して形成できる点にある。レーザ光が射出される前端面側には低反射率、後端面側には高反射率となるような非対称コートを施し、レーザ共振器端面を形成した。

図 3 に $9 \times 9 \text{ nm}$ 帯 LD の導波路における屈折率、光学モード分布、および、バンド構造を模式的に示した。ADCH 構造では、活性層における光閉じ込め係数 (Γ_{well}) と、p 型および n 型ドープ層の光閉じ込め係数の比率、 Γ_p / Γ_n を独立に制御可能である。特に高出力での長期安定動作を実現するために、長共振器化と低 Γ_{well} 化が必要であるが、高効率動作を維持するためには、同時に導波路の低ロス化が重要となる。ADCH 構造では、活性層位置、

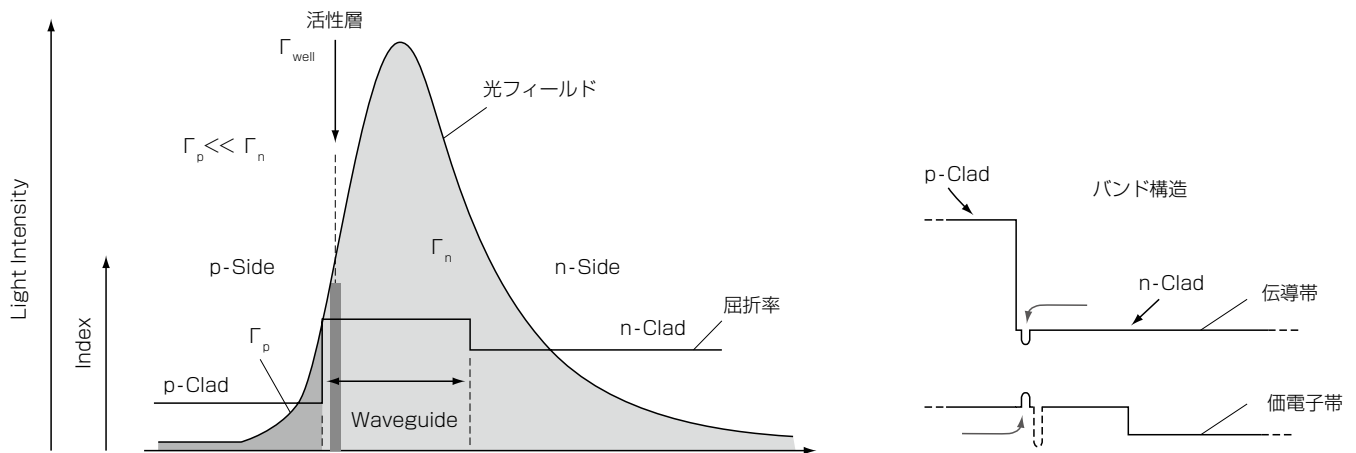


図3 屈折率導波構造、光フィールド、および、バンド構造の模式図
 Fig. 3. Schematic index guide structure, optical mode profile and band diagram of LD.

クラッド材料であるAlGaAsのAl組成に大きな非対称性を導入することで、ロスの大きなp型層への光閉じ込め Γ_p を低減することが可能となる。このような設計の柔軟性により、高出力・高効率・高信頼動作の実現が可能となっている⁴⁾。本開発のLDでは、ADCH構造の設計自由度を活かして、ファイバレーザシステムの要求特性にマッチするように、LD導波構造、電流注入ストライプ幅等の最適化を行っている。

3. LDの特性

共振器長 $L=4$ mm, 915 nmに発振波長をもつLDをサブマウントに実装したチップオンサブマウント (CoS) を用いて、素子特性を評価した。基本特性として、電流-光出力特性および電流-電力変換効率 (WPE) 特性を図4, 図5にそれぞれ示す。これらの図には、従来素子, および、新開発のLDについて、CWおよびパルス駆動における特性を比較した。

図4に示すように、新開発のLDでは、CW 30 Aにおいて28 W, パルス駆動 50 A (パルス幅 40 μ s, 駆動デューティ比 1%) において、47 Wに達し、いずれの素子においてもCODが発生しないことがわかった。

また、図5から、新開発のLDでは、特に高電流域における電流-光出力特性の直線性が改善し、18 Wまで60%以上の高い電力変換効率を維持していることが確認できる。このような高出力駆動におけるCODフリー動作や、高い電力変換率は、ADCH構造の優位性を示している。

LD素子のビーム出射特性も、ファイバ出力型のモジュールにおいて、LD素子とファイバの結合効率を支配するため重要である。図6は、従来LDと新開発LDにおいて、ビーム放射角と発光幅の積であるBeam-Parameter-

Product (BPP) の駆動出力依存性を水平方向ビームに対して比較したものである。従来LD および新開発LDとも、12 Wにおいて4 - 4.5, 17 Wにおいては6 mm mrad程度と、ほぼ同等の値を示した。

4. LDの信頼性

LDの信頼性を評価するために、915 nm帯の新開発LDにおいて長期エージング試験を実施した。通電条件、蓄積デバイスアワー、故障数の結果を表1にまとめる。光出力は15 Wおよび17 Wの2条件とし、LDの活性層における接合温度 $T_j=100-105$ °Cの温度加速条件下におい

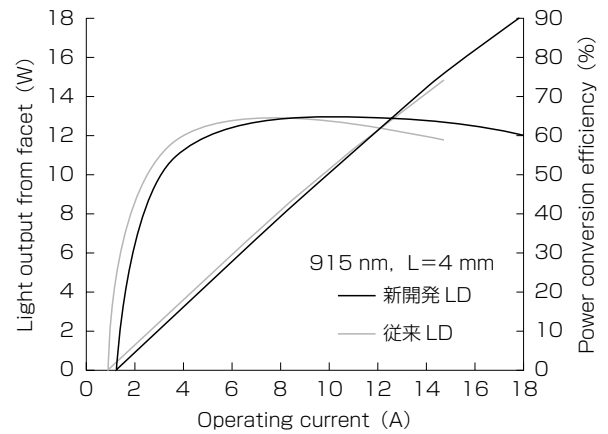


図5 電流-光出力特性および電流-電力変換効率特性の比較

Fig. 5. Comparison of L-I and WPE-I characteristic.

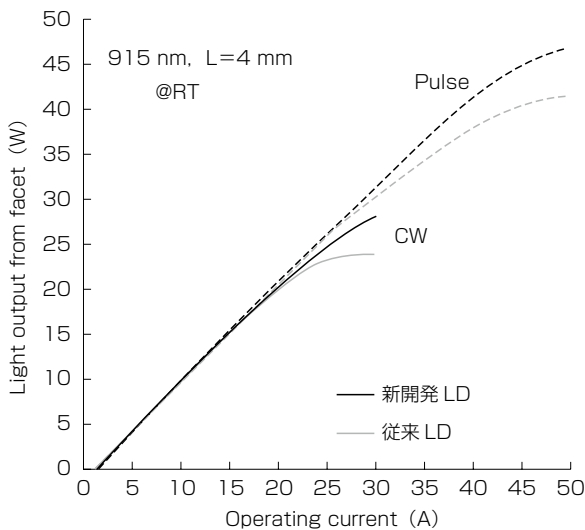


図4 高電流域までの電流-光出力特性の比較

Fig. 4. Comparison of CW and pulse L-I characteristics under high current condition.

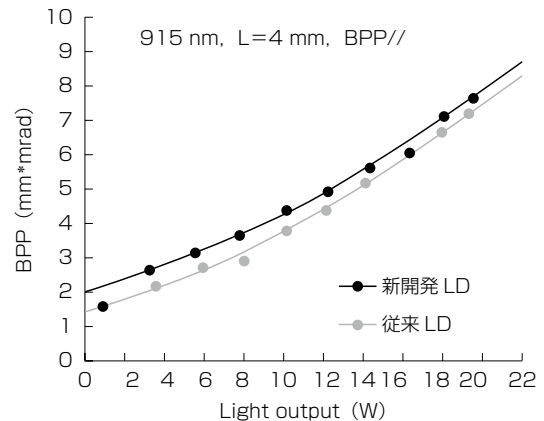


図6 共振器長4 mmにおけるBPPの駆動電流依存性の比較

Fig. 6. Comparison of beam parameter product for 4 mm cavity LDs.

て、77 素子を連続通電し、デバイスアワーを蓄積した。時間経過に伴う光出力変化率の一例を図 7 に示す。20 素子が、光出力 17 W、接合温度 100 °C の条件下において、13,000 時間経過後も劣化が生じず、長期安定動作が実現されていることがわかる。表 1 の試験結果について、べき乗モデルによるパワー加速、アレニウスモデルによる温度加速を考慮し、LD の偶発故障モードによる平均故障時間周期 (MTTF) を見積もった。過去に評価した従来 LD の結果とともに表 2 に MTTF の計算結果をまとめる⁵⁾。新開発 LD においては、光出力 17 W の駆動条件に

おいて、MTTF は 68 万時間であることがわかった。kW 級ファイバレーザシステムのように多数の素子を同時に駆動するシステムにおいては、要求される運用寿命を確保するために余剰の素子を搭載し冗長性をもたせた設計とするのが通例である。仮に 10 % の余剰素子を搭載し冗長性を持たせたシステムにおいて、累積故障率が 10 % に達する時間は 7 年以上と見込まれ、17 W の高出力動作においても、十分な信頼性を有していることを実証している。

5. 高出力化の展望

高出力駆動の制限を与える重要な要素として、接合温度上昇がある。接合温度が 100 °C を上回ると、熱飽和による特性悪化や寿命の低下を引き起こしうる。LD 構造を構成する各層の電気抵抗を下げて電力ロスの低減を図ったり、LD 素子から発生する熱の放散に大きく影響するサブマウントの熱抵抗 R_{th} を低減し、放熱を促進することは、LD 特性の改善に有効なアプローチである。前者については既に電気抵抗を最小化する最適な設計がなされている。そこで、 R_{th} の電流 - 光出力特性への影響について LD 素子の温度特性を考慮した計算を行い、光出力特性の改善の可能性について検討を行った。

図 8 に、共振器長 4 mm、915 nm 帯の LD 素子について、 R_{th} をパラメータとして計算した電流 - 光出力特性、電流 - 電力変換効率特性を示す。従来サブマウントにおける R_{th} は 3.2 K/W と見積もられている。 R_{th} を低減した 2.4 K/W および 1.6 K/W のサブマウントによる計算結果から、光出力、電力変換効率の両方において特性が改善し、特に

表1 共振器長4 mm, 新開発LDに対するエージング試験の結果

Table 1. Result of multi-cell aging test for new LD with 4 mm cavity.

試験セル	P_o (W)	T_j (°C)	時間 (hrs)	試験数 (個)	蓄積時間 (hrs)	故障数 (個)
# 1	15	100	13,835	20	271,912	1
# 2	15	100	13,152	20	263,040	0
# 3	17	100	13,153	20	263,060	0
# 4	17	105	10,732	17	182,444	0
合計				77	980,456	1

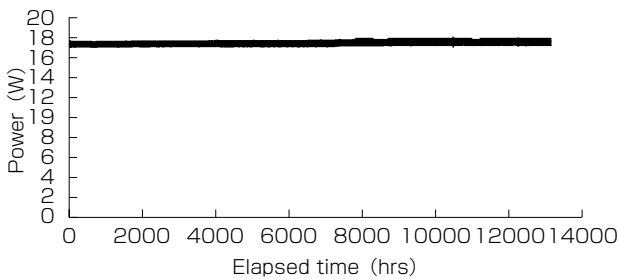


図7 共振器長4 mm, 新開発LDによる加速エージング試験 ($P_o=17$ W, $T_j=100$ deg.C, サンプル数20)
Fig. 7. Accelerated aging test for new LD with 4 mm cavity. ($P_o=17$ W, $T_j=100$ deg.C, SS=20pcs)

表2 サブマウント温度25 °C条件における偶発故障モードのMTTF計算結果

Table 2. Calculated results of MTTF for random failure mode for submount temperature of 25 deg. C.

LD	P_o (W)	T_j (°C)	MTTF@CL 60 % (hrs)
従来素子	11	65	2,250,000
	12	70	1,190,000
	13	80	560,000
新開発素子	13	70	3,981,771
	15	75	1,573,176
	17	80	686,848

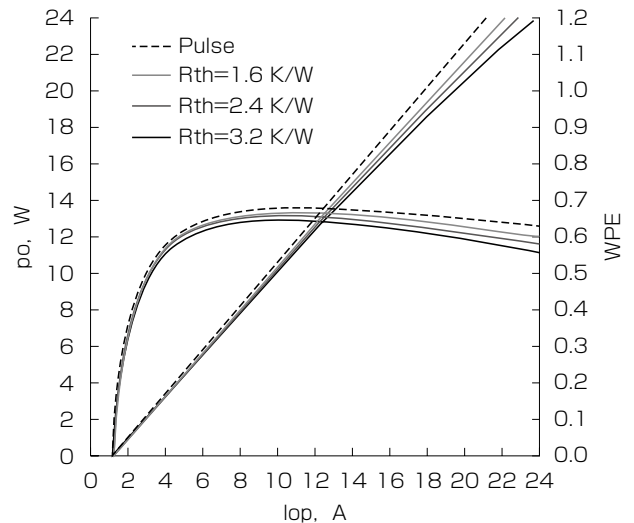


図8 電流 - 光出力特性および電流 - 電力変換効率の熱抵抗依存性のシミュレーション結果
Fig. 8. Calculated dependence of thermal resistance on L-I and WPE-I properties.

定格出力である 17 W を超える高電流領域において大きな改善がみられることがわかる。

今後、20 W を超える光出力において、より高い電力変換効率、長期にわたる連続駆動を実現するためには、現実的なコストでより高放熱のサブマウントが入手可能となることが強く望まれる。そして、最大出力を制限する種々の物理的制限^{6), 7)} に対し、LD 素子のさらなる設計改善が必要と考えられる。実装、素子設計の両面から検討を続け、一層の特性向上を目指していく。

6. む す び

本報告では、 $9 \times \mu\text{m}$ 帯のシングルエミッタにおける LD の諸特性を紹介した。高出力・高信頼動作を実現するためには、LD 素子の縦方向の光・キャリアの閉じ込め設計同様、横方向の電流ブロッキング構造の設計も重要である。我々は、ADCH 構造と SAS 構造を用いた素子設計の最適化により特性を改善し、共振器長 4 mm の LD において 17 W を超える長期高信頼動作を可能とした。LD の能力を最大限引き出すために、サブマウントの高放熱化は極めて重要であり、今後、更なる性能向上を図るために、検討を行っていく。

参 考 文 献

- 1) A. Noguee, "The Worldwide Market for Lasers: Market Review and Forecast 2015", Strategies Unlimited, Mountain View, CA, Chapter 1-3, 2015
- 2) K. Washio, "Industrial Laser Markets and Technologies in Japan: Status and Trends," 12th International Laser Marketplace, June 24, LASER World of PHOTONICS 2015
- 3) T. Fujimoto, et. al, "High-power, InGaAs/AlGaAs Laser Diodes with Decoupled Confinement Heterostructure," Proc. SPIE, Vol. 3628, pp38-45, 1999
- 4) 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
- 5) 坂元ほか:「ファイバレーザ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.12-16, 2014
- 6) A. Demir, et. al, "29.5W Continuous Wave Output from 100um Wide Laser Diode," Proc. SPIE, Vol. 9348, 93480G, 2015.
- 7) E. A. Avrutin, et at., "Theory and Modelling of the Power Conversion Efficiency of Large Optical Cavity Laser Diodes," Proc. High Power Diode Lasers & Systems, October 14, 2015.