

CPO 向け400 mW 級1.3 μm 帯高出力半導体レーザ

400 mW-Class 1.3 μm High-Power Semiconductor Laser for CPO Application

青山 康之祐*
Konosuke Aoyama

井上 大輔
Daisuke Inoue

藤原 直樹
Naoki Fujiwara

神杉 秀昭
Hideaki Kamisugi

庄子 大生
Daisei Shoji

生成AIやHPCの需要増加に伴ってデータセンタ内通信の高速化及び省電力化の重要性が高まり、Co-Packaged Optics (CPO) へ注目が集まっている。CPOの構成部品であるExternal Laser Sources (ELs)には数百mWの高出力と電力変換効率20%以上の低消費電力性が求められており、本稿ではCPO向けのELsである1.3 μm 帯高出力半導体レーザにワイドストライプ導波路の半導体光増幅器(SOA)を集積し、またそれぞれ素子を電気的に分離した素子構造を用いることで電力分配の最適化を可能とし素子温度45°Cにて400 mWを超える光出力と25%の電力変換効率を実現したことを報告する。

The growing demand for generative AI and high performance computing (HPC) has increased the importance of high-speed, energy-efficient communications in data centers, leading to an increased focus on co-packaged optics (CPO). The external laser sources (ELs), a component of CPO, require high optical output power of several hundred mW and low power consumption with power conversion efficiency greater than 20%. This paper discusses the integration of a wide stripe waveguide semiconductor optical amplifier (SOA) into a 1.3 μm high-power semiconductor laser for CPO. By using an electrically isolated structure for each element, we have optimized the power distribution to achieve over 400 mW output power and 25% power conversion efficiency at a temperature of 45°C.

キーワード：半導体レーザ、半導体光増幅器、光通信、高出力レーザ

1. 緒言

昨今の生成AIやHPCの普及に伴い、データセンタ内通信に代表されるような1 km以内の近距離光ファイバ通信の需要が著しく増加している。近距離光ファイバ通信の需要増加に対して、通信システムの高速化と省電力化が特に重要視されており、打開策として電気集積回路と光の送受信系を同一パッケージ内にコンパクトに収めたCo-Packaged Optics (CPO) 技術の市場導入が推し進められている^{(1),(2)}。CPO技術は光の送受信系と電気集積回路間の電気的な配線を短縮でき通信の高速化と電力損失の削減を可能とする^{(2),(3)}。一方で光の送受信系内で信号処理を行うシリコンフォトニクスとレーザを組合せて使用する際に発生する光学損失を補填するために半導体レーザには100 mW以上の高い光出力が求められつつ、システム全体の電力を抑えるために高光出力動作時においても半導体レーザ特有の低消費電力性として20%以上の高い電力変換効率 (Power conversion efficiency: PCE) を維持する必要がある⁽³⁾。データセンタ内通信向けCPOの市場導入に伴い、External Laser Sources (ELs) となる1.3 μm 帯高出力レーザ光源の研究も盛んに行われており、長いレーザ共振器を用いた構造やDFB-LD^{*1}とSOA^{*2}を集積した構造により100 mWを超える光出力を有するレーザ光源が報告されている^{(4)~(6)}。そのような動向のなか、我々は更なる光出力増加と高効率化に注力し加工用LDやファイバレーザ励起用LDといった高出力LDで使用されているワイドストライプ構造⁽⁷⁾の導

入と電気的素子分離により領域毎に投入電力を最適化することでPCEの改善を行いステージ温度45°Cにおいて400 mW以上の光出力を有しつつ、PCE 25%の高効率な半導体レーザ光源を実現したことを報告する。

2. 素子構造

高出力のレーザ光を得るにあたってワイドストライプ導波路は非常に有効な構造であるが、ワイドストライプ導波路構造のレーザ共振器はシングルモード発振が困難であり、光通信のような高コヒーレンスの求められる用途には向かない。そこで図1に示すようにシングルモード伝搬条

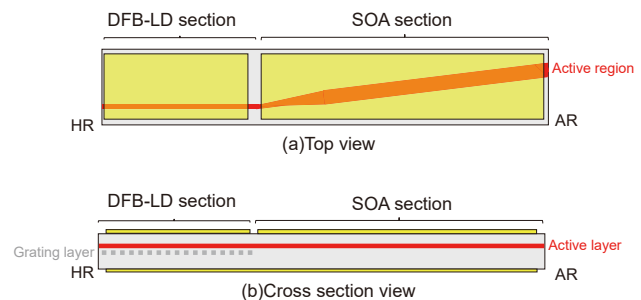


図1 素子構造の概略図
(a) 平面図 (b) 導波路断面図

件を満たす導波路幅に抑えたDFB-LD部とDFB-LD部で生成したシングルモード光をワイドストライプ導波路で増幅するSOA部の集積構造によって素子を構成することで高出力とコヒーレンスの両立を図った。本素子のSOA部の導波路幅は7.2 μmに設定し、素子の全長は2 mmとなる。このSOA部の広い導波路幅は光子密度を低下させることで利得飽和を抑制するとともに電気抵抗値の低下による発熱量の減少と放熱経路の拡大による熱抵抗値の改善により駆動時の活性層温度低下が図られ光出力を増加させることができる。DFB-LD部とSOA部はそれぞれの活性層をテーパー導波路構造により結合させている。光出力が飽和しやすいDFB-LD部は種光源としてコヒーレント光を生成する目的であるため低電流で駆動し、その分SOAの電流を増やすことで素子全体としては高いPCEとコヒーレンスを両立できる。SOA部の端面は反射防止膜 (AR) を施し、DFB-LD部端面は高反射膜 (HR) を施している。本素子構造は出射側にSOAが配置されているため、出射端で反射が生じた場合にはSOA部を共振器としたレーザ発振が生じてしまう恐れがある。そのためSOA部はAR膜に加え出射端に対して角度を設けた斜め導波路構造を採用することで端面反射を抑え⁽⁸⁾、SMSR^{*3}劣化を抑制している。

3. 素子特性

3-1 発光特性

素子特性の評価にあたっては、AlNヒートシンクにLDチップを実装したChip-on-submount (CoS) 形態で評価を実施した。素子温度 T_c はCoSを設置したステージ温度として定義する。図2に光出力の素子温度依存性を示す。 P_o は出射側端面からの光出力であり、 I_{SOA} 及び I_{DFB} はそれぞれSOA部とDFB-LD部の注入電流を示す。このとき、しきい値電流が25℃にて約17 mAのDFB-LD部に対し250 mAの I_{DFB} を注入している。 T_c : 25℃、45℃、60℃における最大光出力はそれぞれ600 mW、450 mW、320 mWが得られ、ワイドストライプSOA部による高出力化に成功したことが確認できた。実使用条件を想定し、それぞれ最大光出力となるSOA電流値の0.7倍を駆動電流とすると動作光出力は T_c : 25℃、45℃、60℃においてそれぞれ530 mW ($I_{SOA} = 1.05$ A)、400 mW ($I_{SOA} = 0.88$ A)、280 mW ($I_{SOA} = 0.78$ A) が得られCPO用途のELSsとして十分な光出力が得られた。

素子分離されたSOA部とDFB-LD部を持つ本素子のPCEは式(1)で与えられる。

$$PCE = \frac{P_o}{I_{SOA} \cdot V_{SOA} + I_{DFB} \cdot V_{DFB}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 V_{SOA} と V_{DFB} はそれぞれSOA部とDFB-LD部への印加電圧を示す。光出力に対するPCEの素子温度依存性を図3に示す。 T_c : 25℃、45℃、60℃における最大PCEはそれぞれ33%、28%、22%であり、また実使用条件におい

てはそれぞれ28%、25%、21%となり高効率な発光特性であることが確認できた。

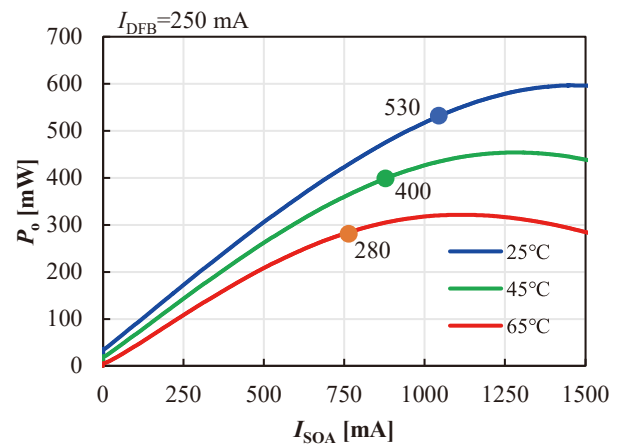


図2 光出力の素子温度依存性

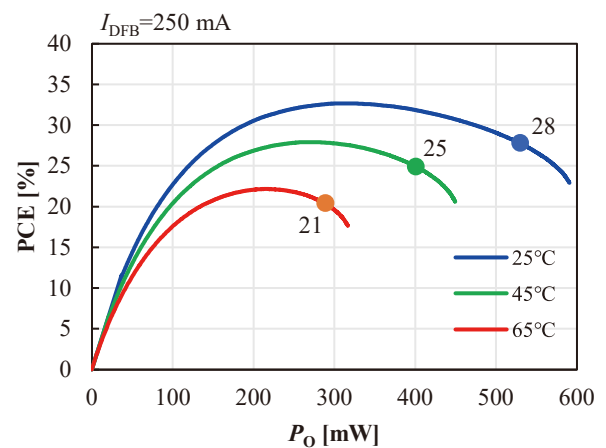


図3 PCEの素子温度依存性

3-2 発振スペクトル

CPOへの応用において発振スペクトルにはシングルモード性と高いSMSRが求められる。特にSOAを集積した素子構造においてはDFB-LDの光出力強度が十分に強くない場合にSOA部で生じるASE^{*4}ノイズや端面反射の影響によるSMSR劣化が報告されており⁽⁹⁾、発振スペクトル評価による光通信への応用可否の確認とSOA部が共振動作をしているかの確認が必要となる。まず、SOAを集積していないDFB-LD部単体の発光特性を確認する。図4にDFB-LD部単体の素子構造における電流-光出力特性を示す。この時DFB-LD部の出射端面はAR膜を施している。3-1節と同様にDFB-LDの動作電流を250 mAとすると T_c : 25℃、45℃、60℃においてそれぞれ P_o : 124 mW、113 mW、90 mWの光出力が得られており、3-1節の実使用条件よりSOA集積構造におけるSOA部利得は T_c : 25℃、45℃、

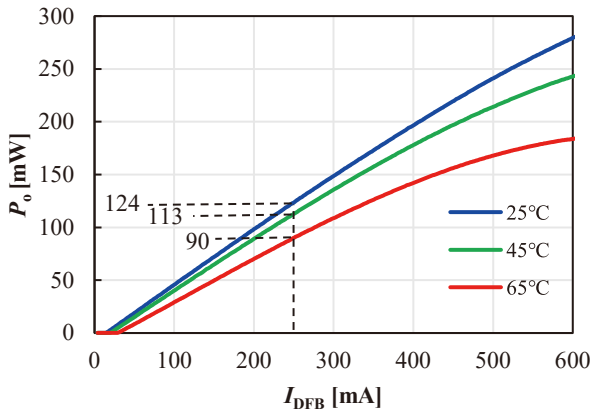


図4 DFB-LD部単体の電流-光出力特性

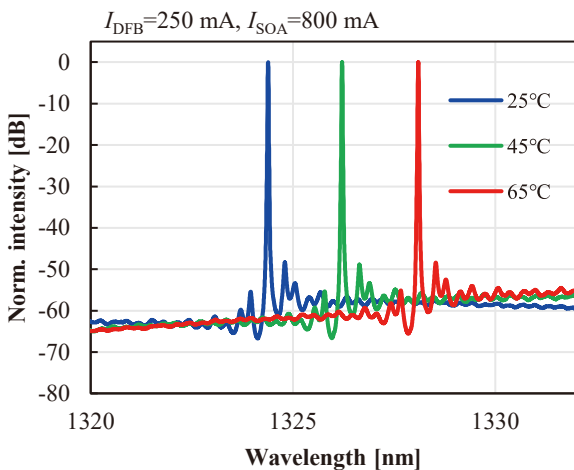
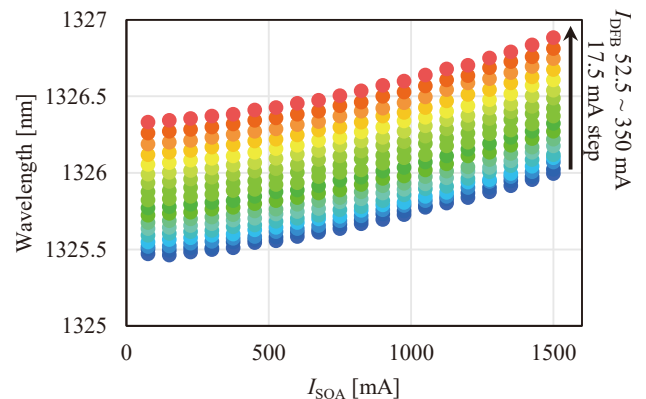


図5 発振スペクトルの素子温度依存性

60°Cにおいてそれぞれ6.3 dB、5.5 dB、4.9 dBと低い増幅率を示しており、一般的にSOAの小信号利得は20 dB以上ある事と飽和光出力が10 mW程度となる事を考慮するとSOA部が利得飽和状態で駆動していることが判断できる⁽⁸⁾。利得飽和状態であるため、SOA部に注入されたほとんどのキャリアは誘導放出により消費されASE光の発生が抑制された動作条件となる。実際に測定した $I_{SOA} = 800$ mAにおける発振スペクトルの素子温度依存性を図5に示す。いずれの測定条件においてもシングルモード発振していることが確認でき、素子設計のコンセプト通りDFB-LDの0次モードのレーザー光のみがSOA部で増幅していることが確認できる。また、安定して45 dB以上のSMSRが得られており、外部共振器モード⁽¹⁰⁾と呼ばれるスペクトルピークも生じていないためSOA部のASEやSOA端面の反射の影響を受けていないことも確認でき、光通信への応用にあたり十分なコヒーレンスが得られている。

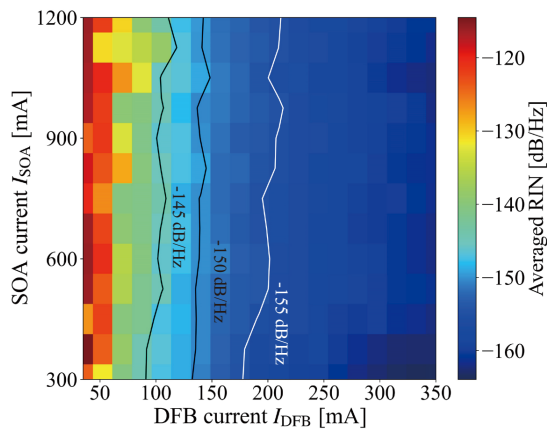
また、CPO向けのELSSsとしては発振スペクトルへの要求として発振モード安定性も要求される。高出力レーザや

長共振器レーザは空間ホールバーニングによる利得減少とそれに伴うモードホップが生じやすいことが知られている⁽¹¹⁾。モードホップとは発振スペクトルが隣接する別波長に跳んでしまうことであり、マルチモード発振を生じることもある。また同時に光出力にもキックと呼ばれる不連続な変化が生じてしまうため光通信システム内で制御する際に問題となる。一方で本素子構造は主にSOA部を用いて高出力化を図っているためDFB-LD部の光密度は相対的に低く空間ホールバーニングが起こりにくい構造となっている。モードホップの発生は注入電流の変化によりレーザ内部の電界強度が変化した際に生じるため、広い範囲の電流掃引により発振周波数の連続的な変化を見ることで確認できる。図6にて $T_c : 45^\circ\text{C}$ にて I_{DFB} を52.5~350 mA、 I_{SOA} を0~1500 mAまで掃引した時の発振スペクトルピークの変化を示す。それぞれの電流を掃引した際の発振スペクトルはいずれも等間隔の変動に終止しており、不連続な変化が見られないことからモードホップが生じておらず、安定な発振スペクトルが得られていることが確認できる。

図6 発振スペクトル遷移の $I_{SOA} \cdot I_{DFB}$ 電流依存性

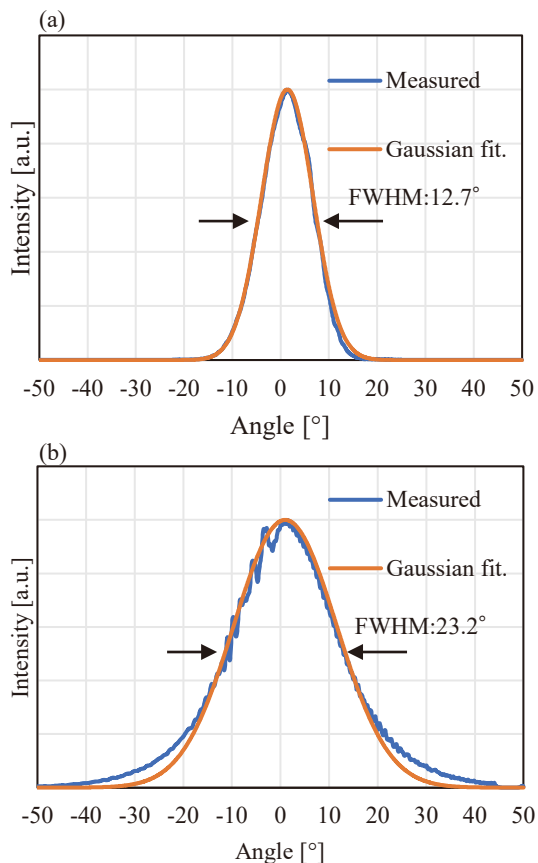
3-3 相対強度雑音 (RIN)

光通信への応用にあたり重要となるパラメータとして発振スペクトルに加えRIN^{※5}の確認も必要となる。 $T_c : 45^\circ\text{C}$ におけるRINの $I_{SOA} \cdot I_{DFB}$ 電流依存性を図7に示す。RINは主に I_{DFB} に対して依存性を有しており、 I_{DFB} の増加に伴って平均RINが減少する。 I_{SOA} 増加による特性変化の傾向は見られず、約200 mA以上の I_{DFB} で動作させることで-155 dB/Hz以下の低いRINが得られることが確認できる。

図7 RINの I_{DFB} 、 I_{SOA} 依存性

3-4 遠視野像 (FFP)

ワイドストライプ導波路を使用した場合の懸念点としてFFP^{*6}形状への影響が考えられる。ワイドストライプ導波路を用いた高出力LDではマルチモード発振によるビーム形状の異常⁽⁷⁾や導波路内の光密度集中によってフィラメンテーションと呼ばれる導波路断面方向の空間ホールバーニングが発生し導波路の中央部のキャリアが枯渇することで

図8 FFP測定結果
(a)水平方向 (b)垂直方向

双峰形状のビームプロファイルになる現象が発生する可能性があり注意が必要である⁽¹²⁾。図8に測定したFFPを示す。水平垂直方向ともにガウシアン形状に近似できるFFPが得られ、水平と垂直それぞれのFWHMは12.7°、23.2°となっており想定通りのシングルモード伝搬条件から得られるビーム形状が確認された。

4. 結 言

今回、我々はCPOへの応用に向けた高出力LDとしてワイドストライプSOA集積DFB-LD構造により45°C動作において400 mWを超える光出力と25%という高効率なPCEを有する1.3 μm 帯半導体レーザを開発した。この高出力LDは発振スペクトルの高い安定性を有しつつ、45 dB以上のSMSRと-155 dB/Hz以下の低いRINという良好な特性が得られておりCPO分野への応用に適していることが示された。

用語集

※1 DFB-LD

Distributed feedback laser diode: レーザ共振器内に分布型回折格子を設けることによるブラッグ反射により発振波長選択を可能とする半導体レーザ。

※2 SOA

Semiconductor optical amplifier: 利得媒質で構成された半導体導波路であり、電流注入により電子の反転分布状態下で光入力を行うことで誘導放出による光増幅を可能とする半導体光増幅器。

※3 SMSR

Side-mode suppression ratio: 主要発振スペクトルピークと側帯スペクトルピークの強度比。

※4 ASE

Amped spontaneous emission: 自然放出光を増幅したインコヒーレントな光。

※5 RIN

Relative intensity noise: 搬送波の光パワーに対する単位周波数あたりの光パワー強度雑音の強度比。

※6 FFP

Far-field pattern: レーザ端面から出射された光パワーの角度に対する強度分布。

参 考 文 献

- (1) J. E. Johnson et al., "Performance and Reliability of Advanced CW Lasers for Silicon Photonics Applications," OFC, San Diego, CA, USA, 2022, pp. 1-27
- (2) R. Mahajan et al., "Co-Packaged Photonics For High Performance Computing: Status, Challenges And Opportunities," J. Light. Technol., 40(2), pp. 379-392 (2022)
- (3) B. J. Lee et al., "Beyond CPO: A Motivation and Approach for Bringing Optics Onto the Silicon Interposer," J. Light. Technol., 41(4), 1152-1162 (2023)
- (4) W. Zhou et al., "High power CW laser for co-packaged optics," CLEO, paper SS2D.3 (2022)
- (5) H. Grant et al., "High-power, high-temperature O-band DFBs and SOAs for integrated photonic applications," Proc. of SPIE, PC12004 (2022)
- (6) S. Yokokawa et al., "Over 100 mW Uncooled Operation of SOA-integrated 1.3- μm Highly Reliable CW-DFB Laser," OFC, San Diego, CA, USA, 2022, pp. 1-3
- (7) Y. Yamagata et al., "915nm high power broad area laser diodes with ultra-small optical confinement based on Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH)" SPIE, 9348, 119-128 (2015)
- (8) Dutta N.K. and Wang Q., Semiconductor Optical Amplifiers, Singapore: World Scientific; 2006
- (9) A. Champagne et al., "Degradation of side-mode suppression ratio in a DFB laser integrated with a semiconductor optical amplifier," J. Quantum Electron., 40(7), 871-877 (2004)
- (10) Ohtsubo J., Semiconductor laser: Stability, Instability and Chaos, New York: Springer Verlag; 2008
- (11) M. R. Alalusi and R. B. Darling, "Effects of nonlinear gain on mode-hopping in semiconductor laser diodes," J. Quantum Electron., 31(7), 1181-1192 (1995)
- (12) I. FISCHER et al., "Complex spatio-temporal dynamics in the near-field of a broad-area semiconductor laser." Europhysics Let., 35 (8), 579 (1996)

執 筆 者

青山康之祐* : 住友電工デバイスイノベーション(株)
主査
博士 (工学)



井上 大輔 : 伝送デバイス研究所 主査
博士 (工学)



藤原 直樹 : 伝送デバイス研究所 グループ長
博士 (工学)



神杉 秀昭 : 住友電工デバイスイノベーション(株)
部長



庄子 大生 : 住友電工デバイスイノベーション(株)
部長
博士 (工学)



*主執筆者