

酸素分光用 760nmDFB 半導体レーザーの開発と応用展開

Development and application of 760nm DFB-laser diodes for oxygen detection

藤原淳志 北島秀訓 樋口彰 内藤秀幸 杉本賢一 前田純也

A. Fujiwara, H. Kitajima, A. Higuchi, H. Naito, K. Sugimoto, J. Maeda

浜松ホトニクス株式会社

HAMAMATSU PHOTONICS K.K.

Abstract

We present high power distributed feedback laser diodes (DFB-LDs) emitting at 760 nm wavelength. Operation in this wavelength, near the oxygen A-band, is attractive for absorption-based optical gas sensing. The developed devices provide an excellent linearity with narrow linewidth in the light-output current characteristics up to 40 mW. Threshold current, slope efficiency and catastrophic optical damage (COD) level of the device are 60 mA, 0.6 W/A, and over 180 mW, respectively. Moreover, absorption measurements of atmospheric oxygen are demonstrated using the developed devices. The experimental results show that the shape of absorption-signal allowing to calculate gas concentration depends on linearity of light sources strongly. Additionally, we present recent works to fabricate high-performance laser diodes and mention the prospects for next-generation applications.

1. はじめに～浜松ホトニクスにおけるレーザーセンシング用半導体レーザーの取組み～

浜松ホトニクスでは「光」を産業創成の鍵と位置付け、光の研究と、それを基盤とした製品開発を通じて、光の本質を追究してきた。例えば「エネルギーの枯渇と環境破壊という2つの大きな問題を同時に解決する」といった壮大な夢に向かって挑み続けるレーザー核融合技術の研究開発は、その最たるものである。このような未知未踏の模索を続ける中、レーザーセンシング用半導体レーザー (LD: Laser Diode) についても開発・製品化を続けている。

はじめに既に製品化されているパルス LD について紹介する。図1はパルス LD のラインナップの中でも最大出力が得られる

L11348-330-04 である。本素子は設計発光エリア $300 \times 10 \mu\text{m}$ の発光部を3段積層することで、9mmφの小型メタルキャンパッケージであるにも関わらず、ピーク出力は典型値で90W(パルス幅:100ns、

Duty : 0.075%)となっている。本製品については、その高出力高信頼性が高く評価され、レジュー・測量などのレーザーレンジファインダ用、輸送機械などでの衝突防止用として既に多くの採用実績がある。厳密な波長制御、狭線幅が要求されない測距用途には好適な素子である。

次に量子カスケードレーザーについて紹介する。量子カスケードレーザーはサブバンド間の光学遷移を利用した、従来のPN接合型LDとは異なる動作原理を持った中赤外帯の半導体レーザーである[1]。2004年の本シンポジウムにて、分布帰還型(DFB: Distributed Feedback)量子カスケードレーザー室温発振の成功を報告[2]した。10年たった現在、標準品として4.5~7.8μmの波長域でCWとパルスの製品がラインナップされ、すでに自動車排ガスやプロセス制御のためのリアルタイムガス分析用光源として普及している。なお研究用途向けに、駆動電源、温調関係、マウント類などのオプション類も充実させている。



Fig.1: L11348-330-04

Table1: QCL LINEUP

Type	Wavelength (Typ.)	Output power (Min.)
DFB-CW	4.53μm	20mW
	4.57μm	
	5.26μm	
	6.13μm	
	7.73μm	
DFB-Pulsed	4.48μm	50mW _{peak} (10ns 200KHz)
	5.26μm	
	6.13μm	
	7.82μm	

2. 酸素分光用 760nmDFB-LD の開発

中赤外帯は分子の指紋領域と呼ばれ、環境計測用として対象となるガスの多くはその領域に存在するが、指標ガスとなる酸素は近赤外帯である 760nm に吸収線が存在する。プロセス制御のためのガス分析として代表的なものは、発電用ボイラや大型ごみ焼却炉などの炉内ガス濃度監視がある[3]。

従来、酸素分光用としては面発光型の LD と端面発光型の DFB-LD の 2 種類の光源があった。面発光型の光出力はサブミリワットと小さいが、波長チューニングレンジが広いという利点があり、一方端面発光型の DFB-LD は光出力がミリワット以上と大きいものの、波長チューニングレンジが狭い、高出力化と高信頼性を両立させるのが難しいなどの課題がある。どちらのタイプが良いかはシステム設計や使用環境によって異なる[4][5]。

今回は端面発光型の高出力 760nmDFB-LD を開発した。使用する GaAs 系材料は 760nm では光吸収の大きい領域であることから、高出力化と高信頼性の両立は難しい。我々は結晶構造及び回折格子構造の最適化によりその問題の解決を図り、光学的端面損傷レベルを 180mW にまで高め、キンクレベルを 40mW 以上にすることに成功している (Fig.2) [6]。本開発素子については運用光出力を 20mW とすることで冗長性を持たせ、高出力と高信頼性の両立を図っている。

波長可変半導体レーザー吸収分光法 (TDLAS : Tunable diode laser absorption spectroscopy) を用いて、管炉内の酸素濃度計測を行う場合、シンプルなシングルビーム系で構築されることが多い。その場合、LD の駆動電流を変化させることで波長掃引した光線を供試体中で伝搬させ、酸素分子による光吸収量の変化をフォトダイオードで受光し、その信号を 2f 信号として変換する方法が多用される [7][8]。この方式の場合、電流変化による光出力変化が発振閾値から最大定格出力まで線形性を保っていることが望まれるが、従来このことはあまり重要視されてこなかった。

DFB-LD の場合、ファブリペロー型の半導体レーザーダイオードとは異なり、発振閾値直後に急峻な光出力の立ち上がりが見られることが多い。そのメカニズムは完全には解明されていないが、その理由として可飽和吸収的な現象や素子内での利得不均一性が考えられる[9]。これらの問題を解決する為、LD 構造を最適化し、駆動時の共振器内キャリア密度を均一化することで、線形性を向上させる試みをおこなった。

Fig.3 は 2Hz の鋸波で掃引、1KHz で変調した DFB-LD を使用して、大気透過率 99.6%相当の酸素吸収線を計測した際の 2f 信号のグラフである。挿入図は測定に使用した DFB-LD の電流－光出力特性とその微分効率を示している。

線形性が悪い素子を使用した Fig3(a)では、2f 信号のフロアレベルに傾きや波形ゆがみが生じているのがわかる。このような傾きがあるとゼロ点補正が面倒であり、計測上の誤差となりやすい。一方、線形性の良い DFB-LD では、対称性があり、フロアレベルが水平な 2f 信号を得ることが出来ていることが分かる。

なお同じ TDLAS でも参照光を用いる方式の場合は、このような問題は生じにくい。システムに応じた素子特性を選択することが重要であろう。

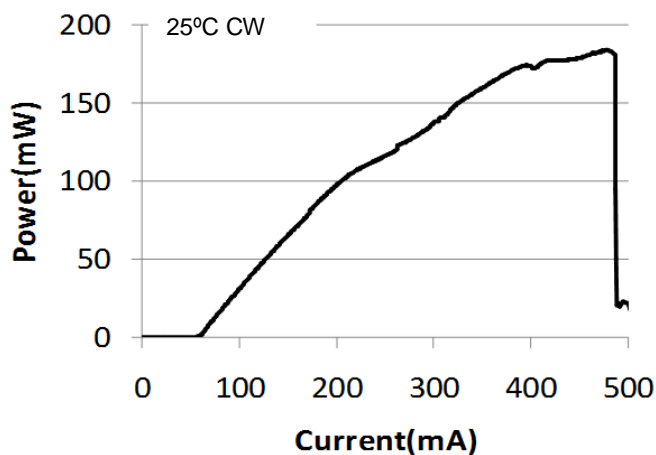


Fig.2: Output power vs. drive current of developed 760nm DFB-LD chip

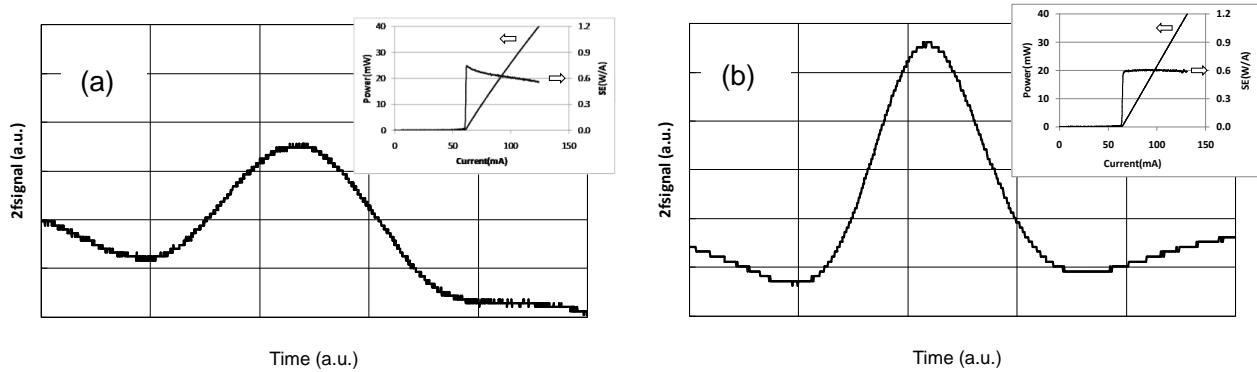


Fig.3: TDLAS oxygen absorption 2f-signals. The inserts are currents vs. optical powers and slope efficiencies
(a) Bad linearity (b) Good linearity

今回開発した 760nmDFB-LD はファブリペロー干渉計で計測したところ、スペクトル線幅は 13MHz 以下であることがわかっている。半導体テーパンプを使用し、光出力を増強すれば、酸素ガスをターゲットとしたライダー計測の可能性もあり、今後の検討課題として考えている。

3. 高出力・高信頼性ブロードエリア LD の開発とライダー応用

ファイバレーザ励起用および直接加工用の光源として、発振波長 900nm 帯のブロードエリア LD の高出力化・高信頼性化に取り組んでいる。高出力化・高信頼性化の手法としては、①光学的端面損傷を抑制するための窓構造の最適化、②熱的要因による特性劣化を防止するため結晶構造最適化による電気光変換効率の向上、排熱技術の強化等を検討してきた。その結果、ストライプ幅 100 μm のシングルエミッタ素子で連続波 (CW) 光出力 15W が得られている[10]。またエミッタを 1cm 幅で並べたアレイ素子においては、CW で 300W の光出力を得られている[11]。このように 900nm 帯では LD の高出力化が急速に進んでいる。

なおシングルエミッタ素子についてはコア径 105 μm 、開口数 0.15 のマルチモードファイバへの高結合効率化も検討されており、現時点では結合効率は 90% に到達している。Fig.4 は同ファイバモジュールの光出力—駆動電流特性の一例であるが、最大ピーク出力は約 18W となっている。

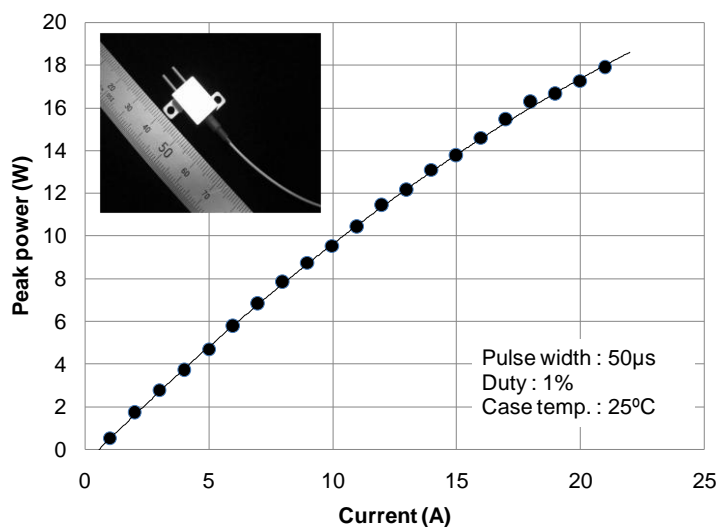


Fig.4: Peak power vs. current of fiber coupled single emitter 915nm BA-LD.

小型の高スペクトル分解能ライダー(HSRL: High Spectral Resolution Lidar)の光源として、LD への期待が高まっている[12]が、上述した高出力 BA-LD を HSRL に適用するためには、2つの課題がある。

ひとつは単一波長で安定化させる必要があること、もう一つはその波長にあった狭帯域高アイソレーションフィルタを開発する必要があることである。単一波長化する方法としては、①Volume Bragg Grating (VBG)を外部共振器として波長選択する方法、②DFB 構造とすることである。

VBG はスペクトル半値幅 0.1~0.3nm 程度の単一波長化が比較的容易に行え、LD 動作温度や駆動電流による波長変化の影響を受けにくいといったメリットがある一方、現時点では VBG の国内メーカは存在しておらず、波長によっては入手が難しいこと、外部共振器構造による複合共振化に伴う発振不安定化と信頼性低下に注意する必要がある。

一方、DFB 構造については LD メーカーで作りこむことが出来ることから、その自由度が高いといったメリットがある。しかし発振波長が LD 動作環境に大きく影響されること、高出力化が難しいなどのデメリットがある。

上記より総合的に考えて、現時点では高出力 BA-LD の単一波長安定化の手法として VBG を採択するケースが多い。現在、アルカリ原子の吸収波長に合わせた VBG の入手性は決して良いとはいえない。今後 HSRL の波長が標準化され、流通量が増えれば、VBG の入手性も改善するだろう。

狭帯域高アイソレーションフィルタについては、アルカリ原子フィルタを使用する場合には、その波長に合わせた LD 設計と VBG 選定もしくは DFB 設計が必要となる。880~980nm 帯であれば開発成果を使った高出力化が可能であるが、880nm より短波長になると高出力化は難しくなっていく。またアルカリ原子フィルタではなく、エタロンフィルタの高アイソレーション化などを模索する方法もある。今後、これらの課題について解決され、小型 HSRL が実現することを期待したい。

謝辞

BA-LD の高出力化・高信頼性化技術の開発の一部は NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

- [1] 秋草直大, 枝村忠孝, OPTRONICS, No.5, pp.60-65 (2013)
- [2] 秋草直大, 枝村忠孝, 杉山厚志, 瀧口義浩, 菅博文, 第 23 回レーザセンシングシンポジウム予稿集, pp.121-122 (2004)
- [3] 牟田研二, 田浦昌純, 飯嶋正樹, 菊川知之, 中屋耕, 三菱重工技報, 41, pp.208-211 (2004)
- [4] J.Wang, S. T. Sanders, J. B. Jeffries, R. K. Hanson, Appl. Phys. B 72, pp.865-872(2001)
- [5] H. Cattaneo, T. Laurila, R. Hernberg, Apply. Phys. B85, pp337-341(2006)
- [6] 北島秀訓, 樋口彰, 藤原淳志, 内藤秀幸, 前田純也, 信学技報, IEICE-114, pp.69-73 (2014)
- [7] I. Linnerud, P. Kaspersen, T. Jæger, Appl. Phys. B 67, 297-305 (1998)
- [8] 牟田研二, 田浦昌純, 三菱重工技報, 38, pp.258-261 (2001)
- [9] Wolfgang G. Scheibenzuber and Ulrich T. Schwarz, Appl. Phys. Express 5 (2012) 042103
- [10] 吉田治正, 森田剛徳, 長倉建人, 鳥井康介, 高氏基喜, 前田純也, 宮本昌浩, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 113, pp. 71-75
- [11] 影山進人, 森田剛徳, 鳥井康介, 長倉建人, 高氏基喜, 前田純也, 吉田治正, 電子情報通信学会技術研究報告(2014) (予定)
- [12] 小林喬郎, 第 26 回レーザセンシングシンポジウム予稿集, pp.34-35 (2008)