

半導体レーザー

IBIDEN USA R&D, Inc.
玉貫岳正

1 はじめに

筆者はNECに在職時代、サイバーレーザーの創業者とともにNEC光エレクトロニクス研究所に所属し、LD励起固体レーザー開発の大型プロジェクトにて共同作業を行った。現在筆者は米国籍の企業に移籍し、業務に邁進しているが、このような背景のもと本稿の執筆をサイバーレーザー社に依頼された。

半導体レーザー (LD; Laser diode) は光ファイバ通信、CDやDVDのような光ディスク、バーコードリーダー、レーザープリンタ等の光源、YAGなどの固体レーザーやファイバアンプの励起用光源として広く使われており、小型で安価であることや信頼性が高いこと、電力・光変換効率が高いことからさまざまな用途への展開が期待されている。本稿ではLDに関する基礎的な知識として、その構造と動作原理、基本特性について説明する。さらにLD励起固体レーザーや光通信技術の概要とそれに用いられているLDやいろいろなLDの特徴について述べる。

2 半導体レーザーの構造

レーザーは誘導放出が行われる光増幅媒質と光共振器で構成されるが、LDでは半導体活性層と、半導体結晶の端面を反射鏡として用いる共振器がそれに相当する。活性層には電流によりエネルギーを注入し、レーザー光を得ることができる。図1 (a) は基本的なLDの構造、(b) は光通信に用いられている一般的なLDの構造である。

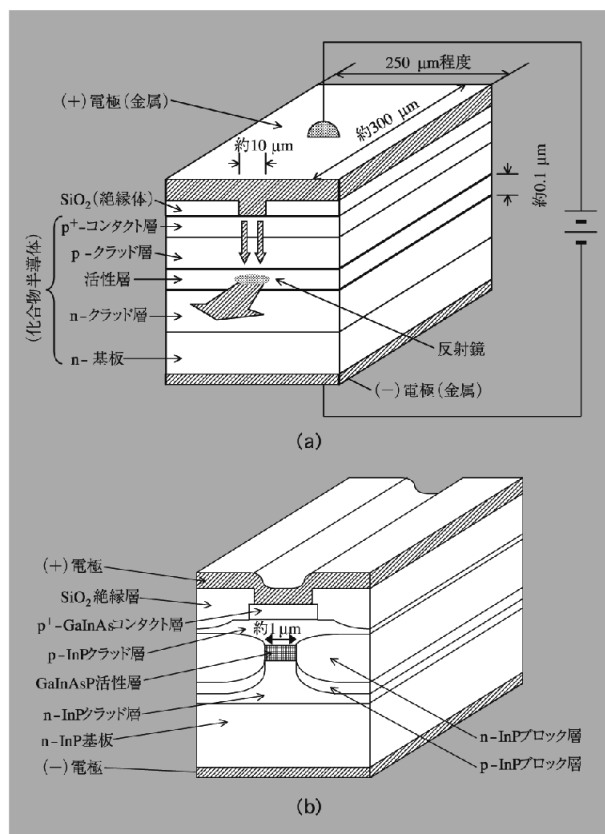


図1 半導体レーザーの構造
(a) 基本構造 (b) 光通信に用いられている一般的なLDの構造

活性層をp型クラッド層とn型クラッドで挟んだpn接合の構成になっており、順方向バイアスを印加するとn領域から電子が、p領域から正孔がそれぞれ活性層に注入され反転分布状態となると誘導放出が生じる。素子の両端面は「へき開面」と呼ばれる結晶の割れやすい面が反

表1 代表的な半導体レーザーの材料と発振波長

活性層材料名	基板材料名	発振波長	IDの主な用途
GaInN	サファイヤ	0.3 μm~0.45 μm(紫外-緑色)	CD, DVD, レーザポインタ
GaAlInP	GaAs	0.6 μm~0.7 μm (赤色)	CD, DVD, レーザポインタ, レーザプリンタ, バーコードリーダー
GaAlAs	GaAs	0.65 μm~0.9 μm(赤色-赤外)	光通信, 光計測, 励起光源
GaInAs	GaAs	0.9 μm~1.2 μm (赤外)	励起光源
GaInNAs	GaAs	1.1 μm~1.5 μm (赤外)	光通信, 光計測
GaInAsP	InP	0.9 μm~1.9 μm (赤外)	光通信

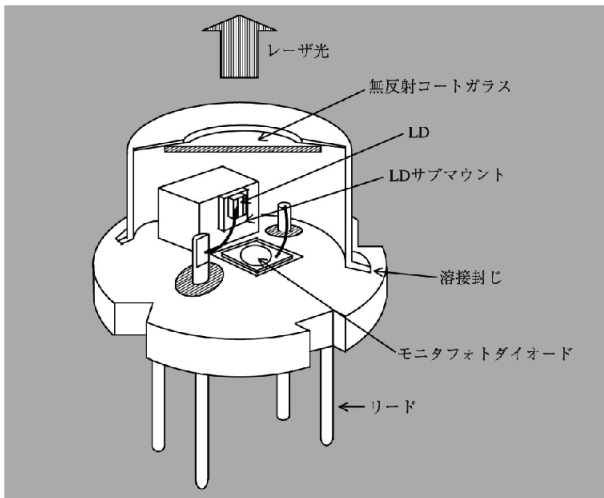


図2 CANパッケージに実装されたLD



図3 光ファイバが接続された光通信用LDモジュール(同軸型モジュール, NEC製)
小型CAN-パッケージに実装されたLDに光ファイバを結合した汎用型光モジュール。広い温度範囲での使用が可能

射鏡となっており、このファブリ・ペロー共振器で光増幅が行われてレーザー光が発生する。表1は代表的なLDの発振波長と半導体材料の構成である。半導体材料の組み合わせにより紫外から、可視、赤外領域までのさまざまな波長のLDが実現されており、用途に合わせた波長のLDを選択することができる。LDの材料にはGa, In,

AlのようなⅢ属元素とAs, PのようなⅤ属元素で構成される化合物半導体材料が主に用いられており、これらの多くは直接遷移型の半導体であるため、発光効率が高い性質を持っている。三種類以上の元素の化合物半導体はGa_xAl_{1-x}As (0 ≤ x ≤ 1) のように表示し、元素の組成比により発光波長が異なる。例えば

Ga_{0.7}Al_{0.3}Asの組成では中心波長が0.7 μmとなる。化合物半導体の合成には有機金属気相成長(MOCVD; Metal organic chemical vapor deposition)法が広く導入されており、材料ガスの混合比や温度を調整しながら半導体基板上にて化学反応させ、各層を堆積させる。その後、半導体のエッチングやブロック層の再成長、絶縁層の積層やエッチング、電極となる金属膜の蒸着工程を経てLDが完成する。LDはパッケージに実装された形態で一般に市販されており、例えば図2のようなCANパッケージに光出力モニタ用のフォトダイオードとともに気密封じされているものや、さらに図3のように光ファイバが接続されているものが代表的である。

3 半導体レーザーの基本特性

表2はLDの光-電気特性の例である。LDに電流を流すと図4に示されたような特性を示す。LDの電気特性はダイオードと同様に順方向にバイアス電圧を印加する

表2 半導体レーザーモジュールの光-電気特性の例

項目	記号	条件	特性
しきい値電流	I _{th}	25℃, ΩV (80℃, ΩV)	1.7 mA(5.0 mA)
特性温度	T ₀	0℃~85℃	51 K
動作電圧	V _{op}	25℃, φ=10 mA	1.1 V
素子光出力	R _{out}	25℃, φ=10 mA	2.5 mW
ファイバ光出力	P _f	25℃, φ=10 mA	1.3 mW
微分効率(素子出力)	η _d	25℃	0.3 W/A
微分効率(ファイバ出力)	η _{df}	25℃	0.15 W/A
電力-光変換効率	η	25℃, φ=13 mA	27%
中心波長	λ _c	25℃, φ=10 mA	1310 nm
スペクトル幅	Δλ _c	25℃, φ=10 mA	6 nm
中心波長の温度依存性	Δλ/ΔT	0℃~85℃	0.35 nm/K
立ち上がり時間	T _r	I _{bias} =I _{th} , 10~90%	0.5 ns
立ち下り時間	T _f	I _{bias} =I _{th} , 10~90%	0.5 ns
モニタ電流	I _m	P _f =3 mW	0.5 mA
立ち上がり電圧	V _f	25℃	0.95 V
垂直方向放射角	Δθ _v	25℃, R _{out} =2.5 mW	30°
水平方向放射角	Δθ _h	25℃, R _{out} =2.5 mW	20°

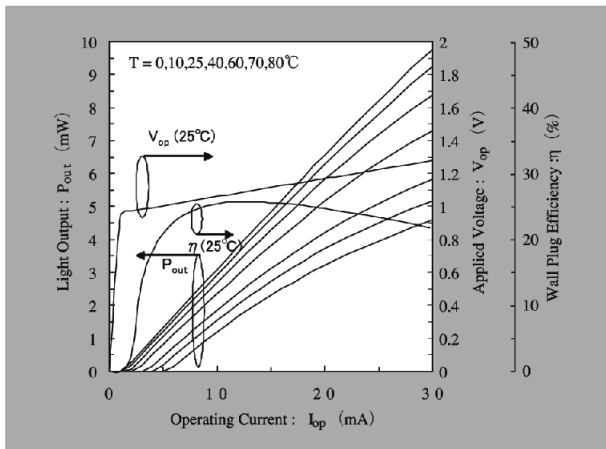


図4 LDの電流-光出力, 電圧, 電力・光変換効率特性

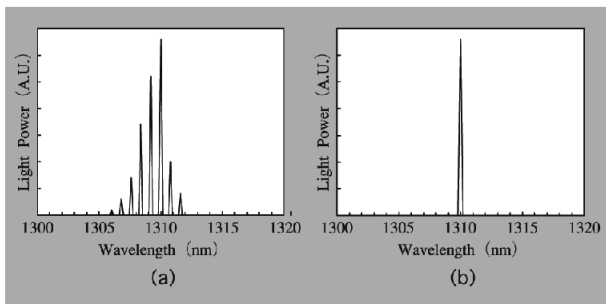


図5 LDの発振スペクトル
(a) 多モード発振 (b) 単一モード発振

ことで電流が流れる。電流が流れ始める立ち上がり電圧 V_f は主に活性層のバンドギャップエネルギーに対応しているため、発振波長が短いLDほど V_f は大きくなる。電流を増加するとレーザー発振がはじまり急激に光出力が増大する。このレーザー発振がはじまる電流値をしきい値電流 (I_{th}) といい、LD内部での媒質による吸収や反射鏡での透過などで失われる電力と活性層での誘導放出によって増幅される電力がつり合った状態になっている。 I_{th} は活性層の体積、反射鏡の反射率、活性層とクラッド層の屈折率の差などの設計パラメータに依存する。また、 I_{th} は環境温度 (T) とともに $I_{th} \propto \exp(T/T_0)$ のように指数関数的に増大することが知られている。ここで T_0 はしきい値電流の温度依存性を特徴づけるパラメータであり、特性温度という。GaAlAs系のLDでは $T_0=100-150$ K, GaInAsP系のLDでは $T_0=45 \sim 70$ K程度であり T_0 の値が高いほど温度依存性が小さい。レーザー発振状態での電

流-光出力特性の傾きを微分量子効率 (η_d) とよび、 I_{th} とともにLDの重要な特性である。電流値が高くなると η_d が低下し光出力が飽和するが、これは主に熱の発生によるものである。LDの電力・光変換効率は $\eta = [\text{光出力}] / [\text{駆動電力}] = P_{out} / (V_{op} I_{op})$ で表され、駆動電流や温度によって変化する。図4では25°Cにおいて $I_{op}=13$ mAで η が最大の27%となっており、このような条件でLDを駆動すれば効率よく使用することができる。 I_{th} 以上の電流では図5のような発振スペクトルが得られる。LDの利得はバンド間の遷移であり、10 nm程度の波長範囲にわたって利得が分布している。このためファブリー・ペロー共振器のLDでは図5(a)のように共振器長に対応した縦モード間隔で多モード発振する。一方、後述するDFB-LDや面発光LDでは共振器の構造が異なり、図5(b)のような単一波長の発振スペクトルが得られる。CD, DVD, レーザプリンタ, バーコードリーダ, レーザポインタ, 光計測, 短距離光通信等の用途には安価なファブリー・ペローLDが用いられており、長距離光ファイバ通信を実現するには単一波長で発振するLDが必要である。これは、光ファイバに分散と呼ばれる波長によって伝播速度が異なる性質があるためである。もし、多モードで発振するLDを使用すると光ファイバを通過後の波形は時間方向に広がってしまい、信号の識別が困難になってしまう。レーザー光は共振器の断面構造に対応した横モードの形状(発光近視野像: NFP; near field pattern)にてLD端面から空間へ出射されるが、その放射パターン(発光遠視野像: FFP; far field pattern)はNFPの回折像となる。回折像はNFPのフーリエ変換に従うため、NFPの空間周波数が低いほどFFPは狭くなる。通常のLDでは垂直方向のFFP (θ_{\perp}) の半値全幅 ($\Delta\theta_{\perp}$) は $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 水平方向は $\Delta\theta_{\parallel}=15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 程度であり、レンズや光ファイバ等でLD光を集光する場合には、FFPの特性に応じた光学系の設計が重要となる。表2における立ち上がり時間 (T_r) と立下り時間 (T_f) とはLDにパルス電流を印加した場合のキャリア密度の応答特性を現すもので、キャリア密度が定常値の10%から90%になるまでの時間を T_r , 90%から10%になるまでの時間を T_f として定義している。

P_f や P_{in} のような光出力の単位は“mW”以外に“dBm”

で表示されることが多い。これは $1\text{ mW}=0\text{ dBm}$ を基準に対数で表示している。したがって、 $2\text{ mW}=3\text{ dBm}$ 、 $0.1\text{ mW}=-10\text{ dBm}$ のようになる。光学部品の損失や増幅率、光分岐比率等の仕様は通常“dB”で表示されるため、光出力を“dBm”単位で考慮する方がシステム設計における光強度マネジメントに便利である。

4 半導体レーザー励起固体レーザー

本連載の第2回にて紹介したように、Nd: YAG レーザの励起は従来まではランプ励起型が主流であったが、励起光の波長を Nd: YAG 結晶の吸収波長 (808 nm) に一致させた LD を用いることで高効率、小型化、高信頼性が一挙に図れるようになった。LD はランプに比べて、スペクトル幅が狭いため、Nd: YAG 結晶の励起したいエネルギー順位に選択的にエネルギーを注入でき励起効率が非常に高い。励起には通常、後述するようなアレイ LD を用いるが、ワットクラスの LD 光を効率よく固体結晶へ集光するための光学設計や固体結晶の冷却設計とともに LD 自体の冷却設計も重要な技術となってくる。LD はペルチェ素子と強制空冷の組み合わせや水冷による方法で効率よく冷却することができるが、温度により LD の光出力だけでなく波長も変動するため、LD モジュール付近の温度をモニタし制御することが必要である。また、LD 素子の光出力の偏波は全て TE であるため、二つの LD を用いて偏波を合成する光学系を構成すれば、同一光軸上の光出力を倍にすることも可能である。

5 光ファイバ通信と半導体レーザー

光ファイバ通信には LD が適用されているが、光ファイバの損失が $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 帯では $3\sim 5\text{ dB/km}$ と比較的大きいため波長が $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 帯である GaAlAs 系の LD はデータリンクのような短距離通信 (SR: Short reach: $0\sim 4\text{ km}$) に用いられ、また光ファイバの損失は $1.31\text{ }\mu\text{m}$ で 0.6 dB/km 、 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ で 0.2 dB/km と低いため、GaInAsP 系の LD がそれぞれメトロアクセス系のような中距離伝送 (IR: Intermediate reach: $4\text{ km}\sim 20\text{ km}$) そして海底伝送のような長距離伝送 (LR: Long reach: $20\text{ km}\sim 80\text{ km}$) に用い

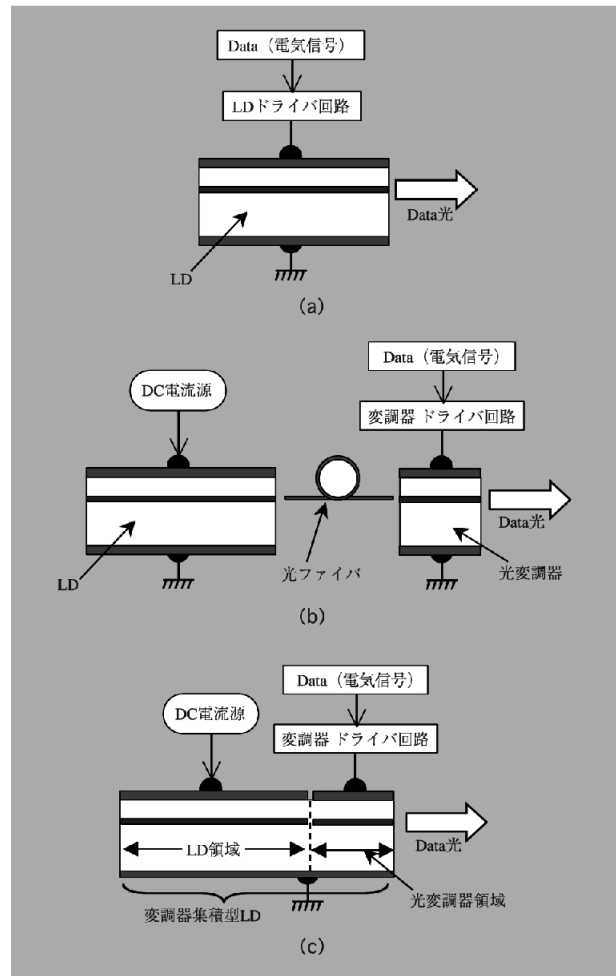


図6 LDの変調方法
(a) 直接変調方式 (b) 外部変調方式
(c) 変調器を集積したLDによる外部変調方式

られている。一般に基幹系の長距離伝送では $80\text{ km}\sim 100\text{ km}$ ごとに中継器がおかれ、信号の再生 (3R: Reshaping, Re-timing, Re-amplifying) が行われている。光通信のデジタル光信号を発生させる方法は、図6 (a) のように LD の駆動電流を直接変調する直接変調方式と (b) のように LD からは連続のレーザー光を発生させておき、外部の光変調器を用いて変調する外部変調方式がある。また、外部変調方式には (c) のように変調器を集積させた LD による方式もある。SR や IR そして 2.5 Gb/s 程度以下の変調速度の LR では直接変調方式による伝送が可能であるが、高速の LR では光ファイバの分散特性がさらに無視できなくなってくるため外部変調方式

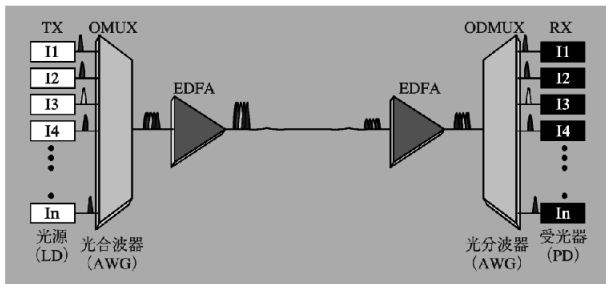


図7 WDM伝送システムの構成例

が採用されている。LDを直接変調するとLD内部の屈折率変動にともない発振波長が変動してしまうチャープ現象があるためである。

インターネットの急激な発展にともない、光ファイバ通信ネットワークの伝送容量は増加を続けている。光通信システムの大容量化の解として、波長多重 (WDM; Wavelength division multiplexing) 伝送技術が基幹システムなどに広く適用されている。すでに 10 Gb/s の 64 波長多重で構成された 640 Gb/s の容量をもつ伝送装置が実現されており、研究開発では 10 Tb/s を越える容量で、117 km にわたる WDM の中継伝送実験も成功している¹⁾。WDM 伝送では、光中継増幅器としてエルビウムを添加した光ファイバ増幅器 (EDFA: Er doped optical fiber amplifier) が用いられている。図 7 に WDM の伝送システムの構成例を示す。それぞれ波長の異なる光源をアレイ導波路格子 (AWG: Arrayed waveguide grating) で 1 本の光ファイバに合波し、EDFA により中継伝送された後 AWG で分波して受信する構成となっている。WDM 伝送の波長帯域は EDFA の利得帯域で制限されるが、現在の EDFA は波長 1530 ~ 1565 nm (C バンド) と波長 1570 ~ 1605 nm (L バンド) の光信号を増幅することが可能になっている。10 Gb/s で 160 波のシステムの場合、チャンネル間隔 50 GHz (0.4 nm) で各バンド 80 波 (波長帯域 30 nm) に設定されており、このような広い波長帯に亘って多数の波長の LD をいかにして実用的に製作するかが WDM 光源の課題である。

6 いろいろな構造の半導体レーザー

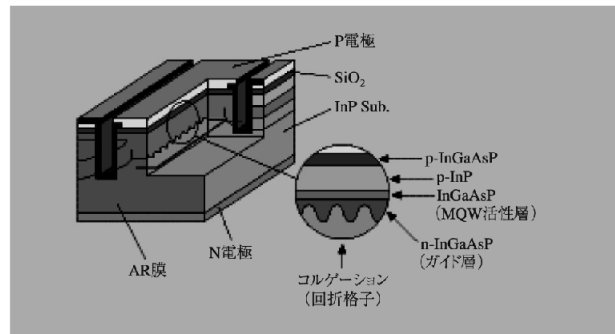


図8 DFB-LDの構造 (例)

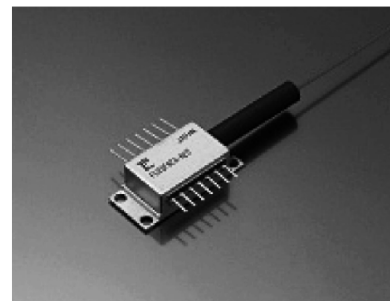


図9 WDM通信用DFB-LDモジュール
(富士通量子デバイス: FLD5F6CX-H28)

6.1 DFBレーザー

前節でもふれたが、長距離・高速光ファイバ通信を実現するには単一波長で発振するLDが必要である。DFB (distributed feedback) LDは図8のように共振器内に回折格子を形成することで、特定した波長のみ発振できるようにした構造になっている。図9はWDM通信用DFB-LDモジュールであり、単一波長で発振するDFB-LDをバタフライパッケージ内にて光ファイバと結合してある。モジュールに内蔵されているペルチェ素子によりLD温度を制御して発振波長を一定に保つ機能があり、WDMの各波長に対応したラインナップが揃っている。

6.2 面発光レーザー

面発光レーザー (VCSEL; vertical cavity surface emitting laser) は図10のように基板と垂直方向にLD光が射出される構造になっている。このため、モノリシックなLDの形成が可能であり、共振器の形成にへき開が不要、LSI工程のようにウェハ単位での検査が容易、2次元に

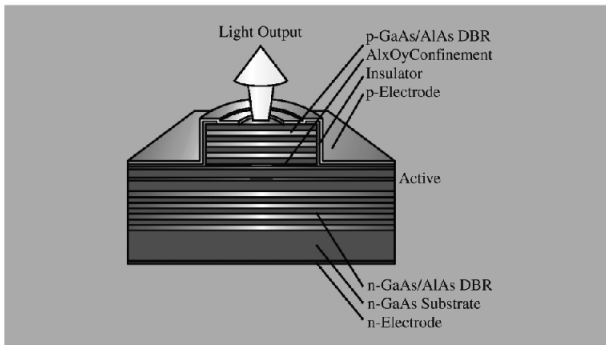


図10 面発光レーザー (VCSEL) の構造
(東京工業大学 小山二三夫教授, 宮本智之助教授による)

アレイ集積ができる等の特徴がある。また、通常のLDの共振器長が $300\ \mu\text{m}$ 程度であるのに対して、VCSELではわずか数 μm 以下であるため図5 (b) のような単一波長のスペクトルが得られる。狭い円形のFFPが得られるため光学系との接続が容易、そのサイズ効果から μA オーダーでの極低しきい値で動作できるといった長所がある。VCSELは $0.8\ \mu\text{m}$ 帯のデータコムにおける並列光伝送用途の光源素子として実用段階にあり、 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯や $1.5\ \mu\text{m}$ 帯では実用に向けた研究開発が活発に行われている。

6.3 アレイレーザ

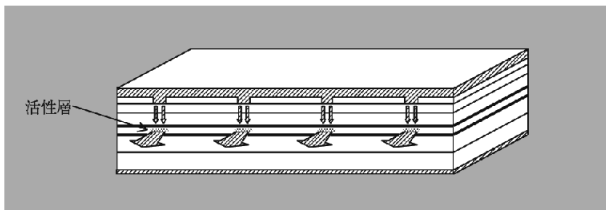


図11 アレイLDの構造

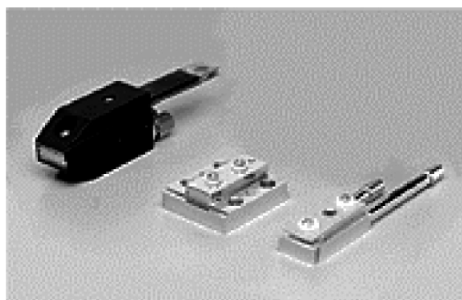


図12 高出力LDモジュール
(浜松ホトニクス: 左よりL8410, L8413, L8412)

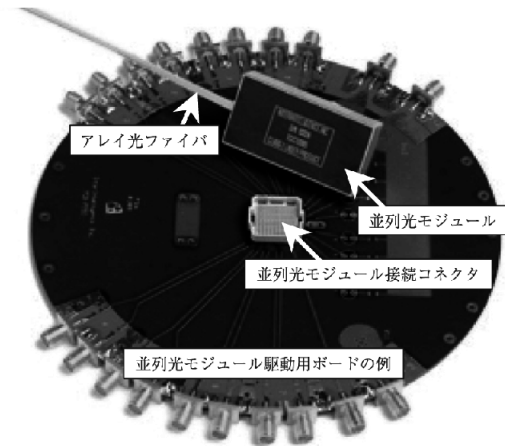


図13 並列光モジュール
(IBIDEN/InterIntelligence 社製)

通常のLDは図1 (b) に示したように単一の素子に切り出して形成されるが、図11のように複数のLDを一次元のアレイ状に集積することで、ワットクラスの高出力が得られるLDや多チャンネルの光送信光源をコンパクトに構成することが可能である。図12はアレイLDを用いた高出力LDモジュールである。アレイLDが積層されており、高出力CW動作が実現できる。水冷やペルチェ素子により冷却して使用し、外部にレンズを設置することで集光が可能である。図13はアレイLDにアレイファイバを結合した8チャンネル並列光送信モジュールである。波長 $1.31\ \mu\text{m}$ のGaInAsP/InP LDアレイを直接変調する方式で、アレイ受信モジュールと組み合わせることでIRの並列通信が可能である。

6.4 半導体光増幅器

図14は半導体光増幅器 (SOA; Semiconductor optical amplifier)

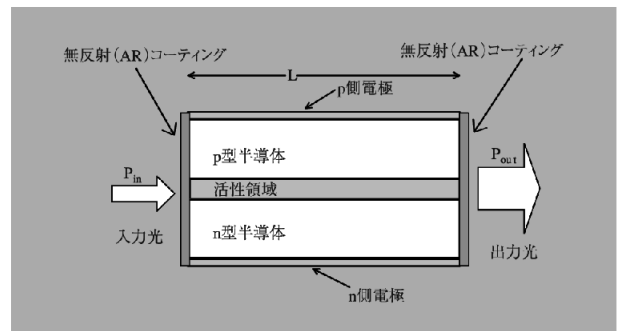


図14 半導体光増幅器 (SOA) の概念図

amplifier) の概念図である。SOA は LD と同様なダブルヘテロ構造からなる活性領域で構成され、両端面に無反射 (AR: Anti reflection) コーティングを施してあるため SOA 自体はレーザ発振しないようになっている。素子の片側から信号光 (P_{in}) を入力すると、誘導放出による光増幅が実現でき、 P_{in} の強度が十分小さい場合には 20 ~ 30 dB という大きな増幅率 (利得) が得られる。一方、 P_{in} の強度を増加させていくと利得は飽和してくる。一般に、 P_{in} が充分小さく利得の飽和が生じないときの利得を小信号利得 G_0 、そして P_{in} が増大して $G=G_0/2$ となったものを飽和利得、その時の出力を飽和出力 P_{sat} と呼んでいる。 P_{sat} は SOA の出力限界の目安となる要因となっている。EDFA は実用化レベルに達し、光通信システムの構成には必須のものとなっているが、SOA は半導体レーザの高性能化の中で、その研究開発が行われてきた。SOA は電流注入で動作できることや低コスト化に有利であるといった特徴から実用化が期待されている。また、SOA は P_{in} の強度により利得だけでなく屈折率も変化するため、このような非線形性効果を積極的に利用した超高速対応の波長変換器や信号再生器の開発も行われている²⁾。

7 まとめ

LD に関する基礎知識としてその構造や動作原理、基本特性について説明した。LD は波長や出力、ビームの品質等さまざまなパラメータを最適化する設計が可能であり、光通信や光ディスクのみならず医療や加工等のさまざまな用途への展開が期待される。また、LD は半導体で構成されているため各種素子と集積したり、平面光導波路 (PLC) やプリント回路基板 (PCB) へ高密度実装することにより新しい機能を生み出すことも十分可能で

あると考えられる。

参考文献

- 1) K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Itoh, K. Sekiya, D. Ogasahara and T. Ono, *OFC '01*, **PD24**, 2001.
- 2) S. Nakamura, Y. Ueno, K. Tajima, J. Sasaki, T. Sugimoto, T. Kato, T. Shimoda, M. Itho, H. Hatakeyama, T. Tamanuki and T. Sasaki, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **vol. 12**, p. 425, 2000.

■ Semiconductor Lasers

■ Takemasa Tamanuki

■ Chief Engineer, IBIDEN USA R&D, Inc.

■ Fundamental principles and characteristics of semiconductor laser diodes (LD) are summarized. LD's have been widely used as light sources for optical fiber communications, optical disc memory (CD and DVD), bar-code readers, laser printers, excitation for YAG lasers and fiber amplifiers, because they have excellent features such as small size, low cost, high wall plug efficiency and high reliability. By introducing LDs into optical circuits using integration technology and mounting on a printed circuit board (PCB) and planar lightwave circuit (PLC), higher performance boards and backplanes can be designed and implemented.



タマヌキ タケマサ

所属：IBIDEN USA R&D, Inc. チーフエンジニア
連絡先：970 Knox Street, Suite A, Torrance, CA 90502 U.S.A

Tel. +1-310-768-0519 Fax. +1-310-768-0522

E-mail : t-tamanuki@ibiden-usa.com

経歴：1993年東京工業大学博士課程修了。同年日本電気(株)入社、光エレクトロニクス研究所勤務。

2002年12月 InterIntelligence, Inc. (米国カリフォルニア州) に転職。2003年10月に IBIDEN USA R&D, Inc. (同州) へ移籍し現職。光通信用並列送信・受信モジュール等の開発、応用研究に従事。博士 (工学)。趣味は絵画鑑賞 (シャガール画等)。