光通信に用いられる光デバイス (I)

水戸 郁夫†

1. ま え が き

高速・長距離の光通信回線、LANなどの近距離回線の実用化、最長301kmの無中継伝送¹⁾が記録されている光ヘテロダイン伝送技術の開発など、光通信技術は目覚ましい勢いで進展している。光通信システムの研究・開発そして実用化を支えているkeyデバイスは半導体レーザ、発光ダイオード(LED)等の半導体発光素子、フォトダイオード(PD)、アバランシェフォトダイオード(APD)等の半導体受光素子である。

半導体発光素子は、基本的に単純な pn 接合素子である。エレクトロンとホールが活性層に注入され、ここで再結合して光に変換される。IC、LSIなど電子デバイスの主流をなすSi半導体素子と基本的には異なるのは、発光するという点にある。これは、Siは間接遷移型のエネルギーバンド構造であるが、光半導体素子に用いられるGaAs、InP等の半導体が直接遷移型のエネルギーバンド構造を有することによる。

この発光機能を基礎として、半導体レーザ、LEDや、また、最近では単に発光だけでなく非常に純度の高いレーザ光を放射するコヒーレント通信用半導体レーザなどの研究・開発が進められている。今回は、これらの光デバイスの基礎と現状を解説する。

2. 半導体発光素子の基礎

半導体のエネルギーバンド構造を図1に示す。Si、Ge等は間接遷移型(a)になり、価電子帯の頂上と伝導帯の底が一致しない。したがって、バンド間遷移による発光に際してフォノンの関与が必要となる。このような遷移確率は非常に小さく、非常に弱い発光しか生じない。一方、GaAs、InPなどのIII-V族化合物では直接遷移型(b)の結晶が多い。この場合、価電子帯頂上と伝導帯底が一致し、発光の遷移確率が非常に高くなる。半導体発光素子を作製するには、直接遷移型の半導体を用いる必要

図1 半導体のエネルギーバンド構造

図2 ホモ接合、DH接合の順方向バイアス印加時のエネルギーバンド構造、出力光の分布

† 日本電気株式会社 光エレクトロニクス研究所
 "Optical Communication Techniques (2), Optical Devices Applied for Optical Communication Systems(I)" by Ikuo Mito (Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation, Kawasaki)

図 3 InGaAsP LED の構造図(断面)

がある。

半導体層へのキャリア注入は pn 接合を用いて行われる。すなわち図 2 に示すように、順方向バイアスを印加し pn 接合部に電子、ホールを注入する。この時、 pn 接合が同じ半導体層（ホモ接合）で構成される場合は、電子、ホールは pn 接合部の両側に各々の拡散長だけ広がり、この領域で発光再結合する。

この幅は一般に数 μm になる。 pn 接合部にバンドギャップエネルギーの小さな半導体層（活性層）を形成し、両側をバンドギャップエネルギーの大きな半導体層で挟んだ二重ヘテロ接合構造にすると、注入キャリアはポテンシャル井戸となる活性層に閉じ込められ、したがって、ホモ接合に比べ活性層での発光確率が非常に高くなる。また都合の良いことに、バンドギャップエネルギーの小さな半導体ほど屈折率が高いという物理的性質がある。したがって活性層は、発光層であると同時に、光導波層にもなる。

この構造が発明されたことにより、半導体レーザの室温連続動作が達成され、今日のように光通信光源あるいはコンパクトディスクの光源として広く実用化されるに至った。

3. 光通信発光ダイオード (Light Emitting Diode)

発光波長はほぼバンドギャップエネルギーに相当し、これは半導体材料に依存する。光ファイバの伝搬損失が極小となる波長が $1.3\mu\text{m}$ 帯、 $1.5\mu\text{m}$ 帯であることから、 $1.5\sim 1.6\mu\text{m}$ 帯の発光波長を選ぶことのできる InGaAsP/InP 系の半導体が光通信デバイスの材料として主に用いられている。図 3 に InGaAsP 面発光 LED の構造例⁽²³⁾ を示す。LED は半導体レーザに比較し、光出力が小さい、発光スペクトル半値幅は $1000\text{\AA}$ 程度と広い、応答速度はキャリア寿命で決

図 4 中・高速 LED とメサ型 LED の光ファイバ結合入力と遮断周波数

まる ns 程度である等の特性を有する。したがって、適用領域は短中距離通信システムとなる。しかし、

- ・半導体レーザのような発振閾値がなく使いやすい
- ・信頼性が高い
- ・マルチモードファイバ伝送系で、半導体レーザを光源とするとときに生じ易いモダルノイズが発生しない
- ・半導体レーザで問題となる戻り光ノイズの心配がない
- ・低価格である

などの特長がある。

LED の研究・開発の課題は、高出力化あるいは光ファイバへの結合効率の向上と高速化である。図 4 に、面発光 LED の応答速度と光ファイバ結合光出力との関係を示す。活性層の不純物濃度増加によるキャリア寿命の低減により応答速度が増すが、光出力は低下する傾向にある。発光領域の大きさを物理的に限定したメサ型構造³⁾ にすることで、この関係は大きく改善された。

最近では、半導体レーザの端面に無反射膜を形成する

などにより、レーザ発振を抑制し、LED 動作させる端面発光型 LED の開発、実用化が進められている。端面発光型 LED は発光部が小さいため単一モードファイバとの結合効率が良好である。

メサ型の端面発光 LED と単一モードファイバとの組合せで、2 Gb/s-9.8 km の伝送実験⁴⁾が遂行されている。コンピュータ間の光ファイバ通信などを含め、LAN 等への適用が広く進められていくものと期待される。

4. 光通信用半導体レーザ (Laser Diode)

半導体レーザは、低速から高速のシステムの光源として広く使用される。半導体レーザ高性能化の経過と光通信システムの高性能化の経過は同期している。光通信システムの実用化が始まった時期は、発振スペクトルが多軸モードの Fabry-Perot 半導体レーザが用いられた。しかし、光ファイバは波長により伝搬速度が異なる、いわゆる波長分散を有するため、多軸モードの半導体レーザを光源として、Gb/s の伝送速度、100 km を越える中継距離の高性能システムを実現することは困難である。したがって、単一モードで動作する半導体レーザの開発が進められ、現在実用化が開始されるに至っている。

一方、次世代の光通信システムとして、受信感度の大幅な改善が期待される光ヘテロダイン通信システムの研究・開発が最近活発に行われている。このシステムでは光の周波数・位相などの変調を行う。光源には単一軸モードの動作のみならず、非常にコヒーレンシーの高い、すなわち、単一波長発振のスペクトル純度の高い半導体レーザが要求される。コヒーレント通信用半導体レーザとして新たな研究・開発を進める必要があると思われる。

4.1 Fabry-Perot 半導体レーザ

図 5 に Fabry-Perot 半導体レーザの模式図を示す。「2. 半導体発光素子の基礎」で述べたように DH 接合の活性層は光導波路でもあり、エレクトロンとホール

図 5 半導体レーザの模式図

の再結合で発光した光の一部は、紙面の左右方向に導波される。左右の端面は、結晶を特定の方角で割ると鏡面が得られる“劈開性”を利用して形成した平行平面であり、光導波路とともに共振器を構成する。反射率は約 30% である。長さ L の導波路を往復する光は、利得 g と損失 α を受ける。また、両端面では透過率に相当するミラー損失 $\ln(1/R)/2L$ を生じる、活性層へのキャリア注入量を増加させていくと利得 g が増加し、光が共振器を一往復する間の利得と損失が等しくなる。この点が発振閾値となり、以後レーザ光が放射される。発振閾値における利得 g_{th} と損失の関係は、

$$\Gamma g_{th} = \alpha + \frac{\ln(1/R)}{L} \quad (1)$$

で与えられる。ここで Γ は、導波路を伝搬する光の電界は一部が厚さ d_a の活性層の外に広がっていることを考慮して、活性層に含まれる光の電界の割合を示す。利得 g と注入電流密度 J の関係は、

$$d_a g = \beta(J - J_0) \quad (2)$$

で与えられ、したがって、発振閾値電流密度 J_{th} は、

$$J_{th} = \frac{d_a}{\beta \Gamma} \left(\alpha + \frac{\ln(1/R)}{L} \right) + J_0 \quad (3)$$

となる。発振以後注入キャリアがフォトンに変換される割合(内部量子効率)を η_i として、そのうち、共振器端面からレーザ光として出射される割合が外部微分量子効率 η_d である。 η_d は全損失のうちのミラー損失として次式で与えられる。

$$\eta_d = \eta_i \frac{\{\ln(1/R)\}/L}{\alpha + \{\ln(1/R)\}/L} \quad (4)$$

以上が半導体レーザの基本特性を与える式である。

図 6 に、実用化されている光通信用半導体レーザの幾つかの構造例(端面図)^{5)~8)}を示す。種々の構造が開発されているが、基本横モード発振を維持するために、発光領域の幅を $1.5 \sim 2.0 \mu\text{m}$ に制御すること、この狭い活性領域に効率良く電流を注入する電流閉じ込め構造を形成すること、に工夫がなされている。

図 7 に $1.3 \mu\text{m}$ 帯 DC-PBH LD⁵⁾ の注入電流-光出力特性、および発振横モードとして放射パターンを示す。発振閾値は 20 mA、両端面から出射する光出力を合わせた η_d は 78% であり、電気入力から光出力への変換効率は、最大 43% と非常に高い値が得られている。

波長 $1.2 \mu\text{m}$, $1.3 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$ 帯の InGaAsP/InP 半導体レーザが実用化されている。光出力は $5 \sim 10 \text{ mW}$ が一般的である。破断点検出などの計測器用として数 10 mW の高出力素子も開発されている。In-

図 6 InGaAsP 半導体レーザ構造(断面図)

図 7 1.3 μm DC-PBH LD の発振特性
(注入電流—光出力特性, 放射パターン)

(a) 利得曲線の変化

(b) パルス変調動作模式図

図 8 半導体レーザのパルス変調

GaAsP/InP 半導体レーザは AlGaAs/GaAs 半導体レーザに比べ高出力動作でも端面の光学損傷が少ないことが特徴であり, 最大 200 mW の室温 cw 動作が報告されている⁹⁾. 1.3 μm DC-PBH LD の推定寿命は, 40 万時間 (50 °C-5 mW 定光出力動作) と高信頼度が確立されている.

4.2 単一軸モード半導体レーザ

Fabry-Perot 半導体レーザの発振スペクトルは, 特に高速変調時に多軸モードとなる. 図 8 に示すように Fabry-Perot 半導体レーザでは, 長さ L の共振器に対し,

$$n_{eff}L = \frac{\lambda_m}{2} m \quad (5)$$

(n_{eff} : 光導波路の実効屈折率, m : 正の整数) の定在波の関係を満足する波長 λ_m のモードが発振可能である. ただし, 利得曲線はピーク付近で波長に対

しパラボリックな形をしていることから, 電流を注入し利得を増加させたとき, 利得曲線のピーク波長のモードが発振することになる. 一方, 半導体レーザをデジタル変調する場合, 消光比を大きくするため, 光

が“OFF”時のバイアス電流レベルは、一般に閾値以下に設定される。そこから“ON”の光出力レベルまで数 10 mA 振幅の高速パルス電流が印加される。

半導体レーザは、光出力の立ち上がり時に緩和振動が生じる。この時、活性層内のキャリア密度が変動し、これに相当する利得曲線の変動は中心波長の周辺に幾つかのモードも発振させることになる。図 9 に 1.3 μm DC-PBH LD の直流動作時と、1.8 Gb/s ランダムパルス変調時のスペクトルを示す。高速変調時に軸モード本数が大きく増加していることがわかる。

高速変調時にも単一軸モードで発振させるには、主

図 9 1.3 μm DC-PBH LD のスペクトル特性

図 10 回折格子を有する導波路(a)と、ミラー損失曲線(b)

モードとその周辺のモードとの間に、発振に必要な利得（閾値利得）に大きな差を設ければよい。利得曲線は活性層材料で物理的に決まる。そこで、(1)式の右边で与えられる共振器損失を各モードの波長で変化させる方法がとられる。吸収損失 α に急峻な波長依存性を与えるのは難しい。ミラー損失 (Fabry-Perot 半導体レーザでは $\ln(1/R)/L$ で与えられ波長依存性はない) に波長依存性を与えたのが、分布帰還型半導体レーザ (DFB LD)、分布 Bragg 反射型半導体レーザ (DBR LD) である。

図 10 に示すように、回折格子が形成された光導波路は中心波長 (Bragg 波長) で最も高くなる反射率特性を示す。Bragg 波長付近で、主モードと周辺のモードとの間に 10 cm^{-1} 程度以上のミラー損失の差を与えることができる。Fabry-Perot 半導体レーザでは、1 cm^{-1} に満たない値であり、格段に増加している。このミラー損失と利得の波長依存性を総合させて、各モードの発振閾値が決定される。

図 11 に、DFB LD のなかで最も主モードと副モードとの間の閾値利得差を大きくとれる位相シフト型 DFB-DC-PBH LD¹⁰⁾ の構造図を示す。共振器中央で

図 11 位相シフト DFB-DC-PBH LD の構造図

図 12 1.5 μm 帯位相シフト DFB-DC-PBH LD の特性 (注入電流—光出力特性, 発光スペクトル)

回折格子の位相がシフトしている．図12に，注入電流-光出力特性を示す．25℃の最大cw出力は42 mWで，40 dB以上の高い副モード抑圧比の単一軸モードスペクトルが得られた．

図13に，4 Gb/sのReturn to Zero 擬似ランダムパルス変調時の特性を示す．良好な被変調光波形が得られ，この時の発振スペクトルはcw動作時と同様30 dB以上の高い副モード抑圧比が得られている．ただし，発振スペクトル幅はピークの-20 dBで測定して数Åに広がっている．これは図8に示すように高速変調時に活性層内のキャリア密度が変動し屈折率が変化することから生じ，波長チャージングと呼ばれる．超高速システムを構成するうえでの次の問題となっている．

DFB LDを光源とした数多くの伝送実験が報告されており，最近では4 Gb/s-120 kmの無中継伝送実

験が1.5 μm DFB-DC-PBH LDを用いて遂行された¹¹⁾．

1.3 μm, 1.5 μm帯DFB LDの基本特性はFabry-Perot 半導体レーザとほぼ同等のレベルに達しており，すでに量産が開始されている．今後高速，長距離の実用システムに広く用いられていくものと期待される．

4.3 コヒーレント通信用半導体レーザ

図14にヘテロダイン通信システムの基本構成を示す．光ヘテロダインシステムでは光の振幅・周波数・位相を変調する方式があり，各々ASK, FSK, PSKと呼ばれる．信号光源および局部発振器として半導体光源が必要となり，要求される諸特性は，

- ・単一周波数発振でスペクトル純度が高い

(例)線幅； $\Delta\nu < 1$ MHz @ 1 Gb/s PSKシステム

- ・低ノイズ；RIN(相対雑音強度) < -150 dB/Hz

- ・周波数チューニング特性(特に局部発振器)

- ・広帯域のFM変調特性(FSKシステム光源)

などである．低ノイズ特性はDFB LDで満足できるが，その他の特性実現には新たな研究，開発が必要と思われる．

半導体レーザのスペクトル線幅は次式で与えられる¹²⁾．

$$\Delta\nu = \frac{R}{4\pi I}(1 + \beta^2) \quad (6)$$

ここで R は自然放出係数， I は共振器内光強度， β はキャリア密度変化に対する屈折率の実部と虚部の変化の比で与えられる係数である．

図15に，1.3 μm, 1.5 μm帯DFB-DC-PBH LDのスペクトル線幅を遅延自己ヘテロダイン検波法¹³⁾で測定した結果を示す．線幅は素子のバイアスレベル，すなわち，光出力を増加させるに従って減少し，最小3 MHzが得られているが，一定の電流値以上では，減少傾向が飽和するか，再び増加した．飽和の理由は現段階では充分には明らかになっていない．数MHzがDFB LDで得られる限界値になっている．

半導体レーザの線幅を減少するのに最も有効な手法は，外部のミラーから位相を制御した戻り光を与え，実効的な共振器長を長くすることである．

図16に，30 cmの位置に外部ミラーを設定した時の線幅の値を示す．数百kHzの小さな値が得られる．この考え方に従って，半導体レーザに外部鏡を集積化する試みがなされている¹⁴⁾¹⁵⁾．

その一例を図17に示す．DFB LDに1.4 mmの光導波路がモノリシックに接続

図13 1.5 μm帯位相シフトDFB-DC-PBH LDの4 Gb/s RZ変調特性

図14 光ヘテロダイン伝送系の基本構成

図 15 1.3 μm 帯, 1.5 μm 帯 DFB-DC-PBH LD のスペクトル線幅

図 16 外部鏡を構成した場合の 1.3 μm DFB-DC-PBH LD のスペクトル線幅

されている。この素子では最小 1.2 MHz の線幅が得られた。PSK システムの光源として用いられ、1 Gb/s-150 km¹⁶⁾ の無中継伝送実験が遂行されている。導波路の吸収損失の低減により、さらに狭い線幅が得られるものと期待される。

発振波長のチューニングは、特に局部発振器の特性として重要である。DFB LD の発振波長は、0.7 ~ 1 Å/°C で変化するので、応答の遅い変動には局部発振器の温度を変化させることでも対処できる。図 18 に、電流注入により Bragg 波長を変え発振波長を最大 58 Å、すなわち、720 GHz と広範囲に変化させることのできるチューナブル DBR 半導体レーザ¹⁷⁾の構造図を示す。

回折格子の形成された領域に電流を流すと、キャリアの蓄積によりプラズマ効果を通して屈折率が減少する。したがって、Bragg 波長が変化し発振波長は、数 10 Å の範囲で短波長化する。中央の位相制御領域は、Bragg 波長が変化した場合に単一軸モード発振の位相条件を維持する役割をする。720 GHz は通常の光ヘテロダインシステムの構成には十分な値である。

3 GHz 程度の間隔で送信器光源の周波数を設定すれば、200 チャンネル程度の光周波数多重システム (FDM) を構成できる可能性を有することになり、将来、多チャンネルの光 CATV システムなどへの適用が可能となる要素を有しているといえよう。

この素子の線幅は 20 MHz 程度であるが、位相制御領域に電流を流すと 70 MHz 程度まで増加していく。線幅がより狭小で、かつ、波長チューニング時にも安定な素子の開発が課題である。

DFB LD の発振波長は、注入電流を変化させると

図 17 モノリシックに光導波路を集積化した DFB LD (Monolithic External Cavity DFB LD)

(a) 構造図

(b) SEM 写真

図 18 発振波長チューナブル DBR 半導体レーザ

容易に数 GHz 変化する。しかし、通常の半導体レーザでは、変位量は変調周波数依存性を有し、その特性は平坦ではない。これは周波数変位が、低周波領域で

の温度上昇，高周波領域でのキャリア密度変化による屈折率変動に由来することによる。

この問題を解決するために，図 19 に示すように，DFB LD に電流注入可能な光導波路（位相制御領域）を接続し，戻り光の位相を変化させる方法が試みられ

図 19 位相制御領域付 DFB LD の変調特性

図 20 各種レーザの発振波長

ている¹⁸⁾。DFB LD の領域は直流バイアス電流が印加される。周波数変位量は 2~5 GHz/mA と大きく，200~300 MHz まで平坦な応答特性が得られている。

この素子を用い，FSK デュアルフィルタ検波方式で 34 Mb/s-301 km の，光ファイバ通信としては最長距離の無中継伝送実験が遂行されている¹⁾。最近は Gb/s 領域の光ヘテロダイン伝送実験が報告されており，応答速度の改善が今後の課題である。

5. ガスレーザ，固体レーザ

半導体レーザ以外のレーザには，ガスレーザ，固体レーザ，液体レーザなどがある。図 20 に各種レーザの主な発振波長を示す。短波長域での半導体レーザの発振波長範囲は，0.58 μm の黄緑色 (77 K の温度) 程度であり，レーザ発振波長域としてはまだまだ狭い範囲にある。

赤色の He-Ne ガスレーザ，緑色から青色のアルゴンイオンレーザは，測定，ディスプレイなどへの応用，また，最近では水銀ランプの波長よりも短い紫外域波長の XeCl, KrF, ArF のエキシマレーザが，半導体 LSI プロセスのリソグラフィー用光源として注目されている。

半導体レーザの出力は数 W 程度だが，数百 W のパルス光出力が得られる Nd:YAG 固体レーザや数十 kW の CO₂ レーザは，加工用あるいはレーザレーダの光源として応用されている。

これらのレーザの光通信への応用としては，1.32 μm で発振する Nd:YAG レーザや 1.54 μm 帯の Er ガラスレーザは，高出力の光ファイバ通信用光源としての応用も考えられるが，装置の大きさ，信頼性などの観点から実用は難しい。実験的には，Nd:YAG

レーザが光ファイバ内でのラマン増幅実験¹⁹⁾の光源として用いられ，あるいは，半導体レーザに比べ共振器が長くスペクトル線幅が狭い 1.52 μm の He-Ne レーザが，光ヘテロダイン通信実験の光源²⁰⁾として用いられた報告がある。

6. む す び

光通信に用いられる光デバイスについて，発光ダイオード，半導体レーザを中心に発光の基礎とデバイスの現状を解説した。光ファイバ通信システムは，実用化開始の段階から広範囲に普及される段階に移行しつつあり，これに伴い光源に

も多様な特性が要求されつつある。発光ダイオードのSMF(単一モードファイバ)系システムへの適用, 半導体レーザの光ヘテロダイン通信システムへの適用など, 従来の概念を越えてデバイスを見直す必要も出てきている。

発振閾値の低減, 緩和振動周波数の増加による応答速度の改善, スペクトル線幅の減少が期待される量子井戸型半導体構造の研究・開発, あるいは, 電界効果トランジスタ(FFT), ヘテロバイポーラトランジスタ(HBT)等の電子回路と光デバイスのモノリシック集積化(OEIC)などを通して, 性能の向上, 機能の拡大を図ることが今後の重要な課題であろう。

[参 考 文 献]

- 1) K. Emura, S. Yamazaki, S. Fujita, M. Shikada, I. Mito and K. Minemura: "Over 300 km Transmission Experiment on an FSK Heterodyne Dual Filter Detection System", *Electron. Lett.*, **22**, 21, pp. 1096-1097 (Oct., 1986)
- 2) A. Suzuki, T. Uji, Y. Inomoto, J. Hayashi, Y. Isoda and H. Nomura: "InGaAsP/InP 1.3 μ m Wavelength Surface-Emitting LED's for High-Speed Short-Haul Optical Communication Systems", *J. Lightwave Technol.*, **LT-3**, 6, pp. 1217-1222 (Dec., 1985)
- 3) T. Uji and J. Hayashi: "High-power Operation of Mesa-structure 1.3 μ m Surface Emitting LEDs for Optical Fiber Communications", in *Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics*, TH 15, Baltimore (May, 1985)
- 4) J. Hayashi, S. Fujita, Y. Isoda, T. Uji, M. Shikada and K. Kobayashi: "2 Gb/s and 600 Mb/s Single Mode Fiber Transmission Using a High-Speed Zn-Doped 1.3 μ m Edge-Emitting LED", in *Technical Digest of the Optical Fiber Communication Conference/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OFC/100 C '87)*, PDP-17, Reno (Jan., 1987)
- 5) I. Mito, M. Kitamura, K. Kobayashi, S. Murata, M. Seki, V. Odagiri, M. Yamaguchi and K. Kobayashi: "InGaAsP Double-Channel-Planar-Buried Heterostructure Laser Diode (DC-PBH LD) with Effective Current Confinement", *IEEE J.*, **LT-1**, 1, pp. 195-202 (Mar., 1983)
- 6) M. Hirao, A. Doi, S. Tsuji, M. Nakamura and K. Aiki: "Fabrication and Characterization of Narrow Stripe InGaAsP/InP Buried Heterostructure Lasers", *J. Appl. Phys.*, **51**, pp. 4539-4540 (Aug., 1980)
- 7) H. Ishikawa, H. Imai, T. Tanahashi, Y. Nishitani, M. Takusagawa and K. Takahei: "V-grooved Substrate Buried Heterostructure InGaAsP/InP Lasers", *Electron. Lett.*, **17**, pp. 465-467 (June, 1981)
- 8) Y. Sakakibara, E. Oomura, H. Higuchi, H. Namizaki, K. Ikeda and W. Susaki: "High Temperature cw Operation of p-substrate Buried Crescent Laser Diode Emitting at 1.3 μ m", *Electron. Lett.*, **20**, 19, pp. 761-762 (Sep., 1986)
- 9) 的場, 大柴, 和田, 堀川, 川原, 川井, 佐久田: "1.3 μ m VIPS レーザの高出力化 (共振器長, 端面反射率依存性)", *信学技報*, **OQE86-32**, pp. 25-30 (1986)
- 10) I. Mito, T. Inoue, H. Nishimoto, T. Murakami, N. Henmi and K. Kobayashi: "Highly Stable Single Longitudinal Mode Operation in $\lambda/4$ Shifted 1.5 μ m DFB-DC-PBH LDs", in *Technical Digest of 12th European Conference on Optical Communication*, MB2, pp. 29-32, Barcelona (Sep., 1986)
- 11) S. Fujita, I. Takano, N. Henmi, S. Shikada, I. Mito, K. Taguchi and K. Minemura: "4 Gb/s Long Span Transmission Experiments Employing High Speed DFB-LDs and InGaAs-APD", in *Technical Digest of 11th European Conference on Optical Communication*, pp. 507-510, Barcelona (Sep., 1986)
- 12) C. H. Henry: "Theory of the Linewidth of Semiconductor Lasers", *IEEE J.*, **QE-18**, 2, pp. 25-264 (Feb., 1982)
- 13) T. Ohkoshi, K. Kikuchi and A. Nakayama: "Novel Method for High-Resolution Measurement of Laser output Spectrum", *Electron. Lett.*, **16**, pp. 630-631 (1980)
- 14) K. Matsuda, T. Fujita, J. Ohya, M. Ishino, H. Sato, H. Serizawa and J. Shibata: "Single Longitudinal Mode Operation of Long, Integratred Passive Cavity InGaAsP Lasers", *Appl. Phys. Lett.*, **46**, 11, pp. 1028-1030 (June, 1985)
- 15) S. Murata, S. Yamazaki, I. Mito and K. Kobayashi: "Spectral Characteristics for 1.3 μ m Monolithic External Cavity DFB Lasers", *Electron. Lett.*, **22**, 22, pp. 1197-1198 (Oct., 1986)
- 16) S. Yamazaki, S. Murata, K. Komatsu, Y. Koizumi, S. Fujita, K. Emura and K. Minemura: "A 1.2 Gb/s Optical DPSK Heterodyne Detection Transmission system Using Monolithic External Cavity DFB LDs", in *Technical Digest of the Optical Fiber Communication Conference/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OFC/100 C '87)*, PDP-12, Reno (Jan., 1987)
- 17) S. Murata, I. Mito and K. Kobayashi: "Over 5.8 nm Continuous Wavelength Tuning of 1.5 μ m Wavelength Tunable DBR Lasers", in *Technical Digest of the Optical Fiber Communication Conference/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OFC/100C '87)*, WC3, Reno (Jan., 1987)
- 18) S. Yamazaki, K. Emura, M. Shikada, M. Yamaguchi and I. Mito: "Realization of Flat FM Response by Directly Modulating a Phase Tunable DFB Laser Diode", *Electron. Lett.*, **21**, 7, pp. 283-284 (Mar., 1985)
- 19) Y. Aoki, S. S. Kishida, H. Honmou, K. Washio and M. Sugimoto: "Efficient Backward and Forward Pumping CW Raman Amplification for InGaAsP Laser Light in Silica Fibers", *Electron. Lett.*, **19**, 16, pp. 620-622 (Aug., 1983)
- 20) D. J. Malyon, T. G. Hodgkinson, D. W. Smith, R. C. Booth and B. E. Daymond-John: "PSK Homodyne Receiver Sensitivity Measurement at 1.5 μ m", *Electron. Lett.*, **19**, pp. 144-146 (1983)

みと いくお
水戸 郁夫 昭和 52 年, 東北大学工学部
応用物理修士課程修了。同年, 日本電気(株)
入社, 光エレクトロニクス研究所に所属し,
現在に至る。光通信用 InGaAsP/InP DC-
PBH LD の開発・製品化, 単一波長半導体レ
ーザ, 光コヒーレント通信用周波数制御素子
の開発, 671 nm cw InGaAsP/GaAsP 可視
光半導体レーザの研究等に従事。