

光通信加入者用機能集積化光デバイスの研究

尾 江 邦 重 京都工芸繊維大学教授

1. はじめに

近年の光ファイバ通信技術の進展には目覚ましいものがあり、国際通信海底ケーブルに代表される超長距離通信においては、波長多重通信方式の導入による大容量化が、驚異的な速度で進んでいる。このような状況において、通信容量のボトルネックが、加入者線であることが、明らかとなってきている。これに対応して、加入者線路の光化が進められているが、その進展は十分なものとはいえない。この原因の一つに低価格化の要求に、部品製造側が対応できていないことが考えられ、光加入者用光デバイスを安価に大量生産する技術の確立が求められる。

本研究は、このような状況に鑑み、一つの素子で光信号の送信・受信が可能な光加入者用キーデバイスの製作・評価を行った。素子として半絶縁基板上に形成した新しい構造の半導体レーザ（横方向電流注入型半導体レーザ）を取り上げ、そのデバイス設計・プロセス技術・素子評価について、詳細な検討を加えた。このデバイスは、半絶縁性基板上に形成する点から、電子デバイスとの集積化に、きわめて適しているものであり、電子デバイスとのプロセス整合性にも優れているため、電子回路を一体化した光電子集積回路化による光部品のモノリシック化が将来可能であり、大量生産による低価格化も期待することができる。

2. デバイス設計

本デバイスは、レーザ光発振機能と光検出（受光）機能を有するため、その両方の機能に適したデバイス設計をする必要がある。また、変換された電気信号を増幅するトランジスタを将来的に集積化するため、半絶縁基板上に横方向に電流を注入できる横方向電流注入型レーザ（Lateral Current Injection Laser; 以後 LCI レーザと略する）構造とした。図 1 に GaInAsP/InP の LCI レーザの概略図を示すが、基板を半絶縁性にし電流を横向きに流れるようにしたレーザである。上下に電極があり電流を縦方向に流す従来の半導体レーザとは異なり、 n 、 p 電極が左右にあり電流が活性層内を横向きに流れる構造となっている。この構造は、半絶縁性 InP 基板上に厚さ $0.25\mu\text{m}$ の n 型 GaInAsP 電流ガイド層 ($\lambda_g=1.3\mu\text{m}$)、厚さ $0.1\mu\text{m}$ の GaInAsP 活性層 ($\lambda_g=1.5\mu\text{m}$)、厚さ $0.25\mu\text{m}$ の n 型 GaInAsP 電流ガイド層、厚さ $0.3\mu\text{m}$ の InP クラッド層、そして厚さ $1.3\mu\text{m}$ の Fe を添加した

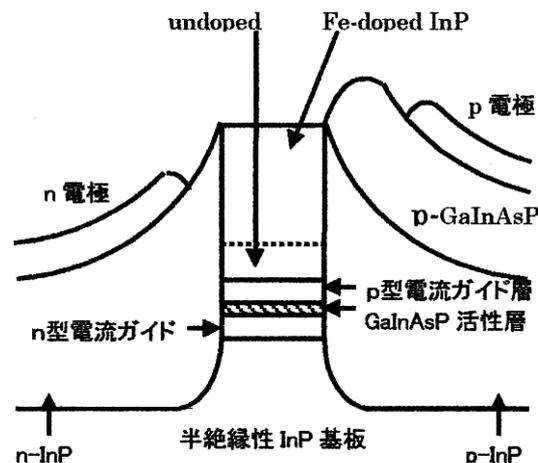


図 1 LCI LD の構造

InP クラッド層からなるダブルヘテロ構造が積層されたものであり、活性層の片側に n 型 InP 層、それと対局する形で p 型 InP 層がある。一般的にレーザ構造は、発振電流しきい値を下げるために、薄膜層構造とする。半導体レーザとしての機能だけを考えるとそれで良いが、そのような構造では、TE 波と TM 波では閉じ込め係数が異なるために、光検出器として使用する時に、偏光面依存性がでてくる。この問題点を解決するために、縦方向には活性層とクラッド層の中間の屈折率を持った電流ガイド層を導入した図 1 のような構造とした。また横方向では、 n 型及び p 型の InP コンタクト層によって挟まれた活性層の幅を 1 ミクロンとすることにより、偏波面依存性のない検出器構造を形成出来ることが分かった。具体的には、図 1 の構造で TE 波に対する閉じ込め係数 0.63、TM 波に対する閉じ込め係数 0.62 となることを設計計算により求め、これを採用した。このレーザ構造は、電子デバイスとのプロセス整合性が良いため、容易に電子デバイスと集積化が出来る。

LCI レーザの構造は、従来のレーザと異なり横方向に電流を流すため、抵抗が大きい。そこで、電流を流れやすくするための工夫がされている。まず、屈折率が活性層よりも低く、InP よりも高い電流ガイド層で活性層の上下を挟んでいる。これは、活性層厚が薄いため横向きに電流を流そうとすると抵抗が大きくなるが、電流ガイド層を上下に挟むことにより電流の通り道が広くなり、抵抗を低減するためである。また、上下の電流ガイド層はそれぞれ p 、 n 型となっているため、 p 型に流れ込んだ電流は n 型のポテンシャル壁により活性層に閉じ込められ光出力に貢献する。さらに、電流ガイド層により SCH 構造を形成しているため、光が活性層内に閉じ込められる係数が増大し、大きな光出力が得られる。次に、Fe を添加した InP クラッド層は半絶縁性となるため、層内を横向きに流れる漏れ電流を防ぐ事となる。これは Si-InP 基板も同じであり、漏れ電流の減少により素子容量が低下し、より高速直接変調ができるようになる。

3. プロセス技術開発

上記の図 1 の素子構造を実現するためのデバイス製作用プロセスの開発のポイントは、上で設計したデバイス構造を可能ならしめる微細プロセスの開発である。この構造は、次のような工程を経て作製されている。まず、半絶縁性 (SI : semi-insulating) InP 基板上に厚さ $0.25\mu\text{m}$ の n 型 GaInAsP 電流ガイド層 ($\lambda_g=1.3\mu\text{m}$)、厚さ $0.1\mu\text{m}$ の GaInAsP 活性層 ($\lambda_g=1.5\mu\text{m}$)、厚さ $0.25\mu\text{m}$ の n 型 GaInAsP 電流ガイド層、厚さ $0.3\mu\text{m}$ の InP クラッド層、そして厚さ $1.3\mu\text{m}$ の Fe を添加した InP クラッド層からなるダブルヘテロ構造を有機金属化合物気相エピタキシャル成長 (MOVPE : metal organic vapor phase epitaxial growth) 法により成長している。そこで、スパッタリング法により厚さ 250nm の SiO_2 でマスクし、 C_2H_6 と O_2 ガスの RIE (reactively ion etch) により n 型 InP 層の場所を幅 $100\mu\text{m}$ 、深さ $2\mu\text{m}$ でドライエッチする。そして、Sn を添加した n 型 InP 層を液相エピタキシャル成長 (LPE : liquid phase epitaxial growth) 法により選択成長している。そして、 n 型 InP 層と幅 $1\mu\text{m}$ の活性層部分をマスクで保護し、 p 型 InP 層の場所を幅 $100\mu\text{m}$ 、深さ $2\mu\text{m}$ でドライエッチする。Zn を添加した p 型 InP 層、GaInAsP キャップ層を成長し、最後に n 電極として AuGeNi、 p 電極として AuZnNi が蒸着されている。活性層の幅は $1.0\mu\text{m}$ であり、キャビティ長は $300\mu\text{m}$ である。また、光が出力される面はへき開されているため、反射率は 30% であり、裏面も同様である。

このプロセスの最も困難な点は、 n 型 InP 層と幅 $1\mu\text{m}$ の活性層部分をマスクで保護し、 p 型 InP 層の場所を幅 $100\mu\text{m}$ 、深さ $2\mu\text{m}$ でドライエッチする所である。現在、私の大学で保有しているホトリソグラフィ技術は密着露光装置のみであるので、密着露光により 0.1 ミクロン精度の寸法合わせを実現する必要がある。種々の検討の結果、この寸法精度を本学の装置で得るには、再現性に問題のあることが明らかとなった。そこで、寸法を 0.2 ミクロンずつずらせたストライプ幅のホトマスクを製作し、結晶成長による埋め込み製作したデバイスのうちどれかのものが、設計に近い寸法をもつようなプロセス技術を開発した。このようなやり方は、素子歩留まりを考慮すると許されないやり方であるが、素子のフィジビリティを明らかにするのが目的である大学では、有益な方法である。これにより、素子製作が可能となった。また、電極形成技術については、長波長半導体レーザの製作について報告されているものを追試し、良好な結果を得たので、それを採用した。埋め込み技術については、予想よりも良質の界面を得るのが困難であった。つまり、 n 型や p 型の InP コンタクト層を形成するのに、元のウエハのそれに対応する部分をドライエッチングで取り除いた後、埋め込み層 (InP コンタクト層) を成長する必要があるが、最初に採用した RIBE エッチングでは、半導体の表面がダメージを受け、その上には良質の InP コンタクト層が成長出来ないようである。この成長法には、現在液相成長法を用いているが、この成長法は、再成長表面の品質に敏感で、成長用の液がはじかれてしまう。そこで、ダメージの小さい C_2H_6 と O_2

ガスの反応性化学エッチング（RIE）技術を用いて、それにより良質の界面をもった埋め込み成長技術を実現することができた。

4. 素子特性評価

4.1 送受光素子に望まれる特性

送受光素子において要求される特性を表1に示す。送受光素子は、レーザとフォトディテクタの両方の特性を持っていなければならない。さらに、発光と受光の切り替えが素早く行われることが望まれるため、要求される特性は発光、受光、スイッチング特性に分けられる。

表1 送受光素子の評価項目

発光特性	<ul style="list-style-type: none"> ・光出力、しきい値 ・動特性（155Mb/s 以上）
受光特性	<ul style="list-style-type: none"> ・動特性（155Mb/s 以上） ・偏波依存性 ・受光感度 ・波長依存性

発光特性においては、レーザに要求されるものと同じである。低しきい値で動作し、高出力が要求され、変調帯域が広く高速動作できなければならない。さらに、温度によってこれらの特性が変化しないことが望まれる。

受光特性では、フォトディテクタにも要求される高い受光感度や低い暗電流、高い遮断周波数を持つことが挙げられるが、レーザを受光もできるように改善したのが送受光素子であるため、フォトディテクタには無かった問題点が出てくる。それが、波長と偏波に対する受光感度依存性である。局側にあるレーザの発振波長が、温度変化により変化することがある。この波長変化によって、送受光素子の変換効率が変化してしまうと好ましくないため、波長依存性が少ない送受光素子が必要となってくる。また、ファイバ内を伝搬している光の偏波状態は、ファイバにかかる圧力などによって変化しているため、送受光素子に偏波依存性があるとファイバ状態に大きく左右されることとなり、偏波依存性はできるだけ小さい必要がある。さらに、受光時もこれらの特性が温度によって変化しないことが望まれる。

スイッチング特性は、素子にかかる電圧変化が高速であればよいので、素子容量が小さければ良いこととなる。

4.2 電流 電圧特性

LCI-LD の素子特性として図2のような電流 電圧特性を得た。順バイアスにおいて微分抵抗 5 ~ 8Ω と

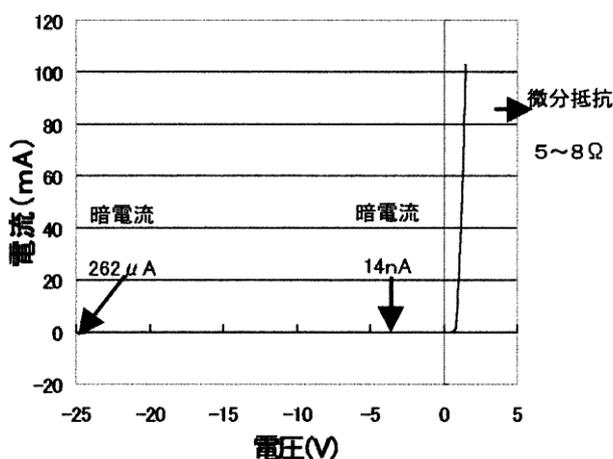


図2 電流 電圧特性

り、電流ガイド層により素子抵抗を低減していることが確認できる。逆バイアスにおいて -5V で暗電流 14nA、-25V でも暗電流 262 μ A とかなり低い値となり、活性層からのリーク電流はほとんどないと考えられる。

4.3 発光特性

LCI レーザを送信素子として評価するため、まず発光特性について評価を行った。しきい値電流 15mA、電流を 90mA まで流すと光出力 8mW 以上が得られた。Geフォトディテクタの性能上、8mW 以上の光出力は測定できないが、LCI レーザは 8mW 以上の光を出力できることが確認できた。他の送受光素子に比べると、しきい値が若干高く光出力は小さい。これは、OEIC に適用するため従来のものとは構造が違うからであり、今後さらに出力を高めることが望まれる。1つの方法として、LCI レーザの光出力端面とは逆側のへき開面の反射率を上げることにより、しきい値電流および光出力の改善が行える。これにより、レーザの共振器内に閉じ込められる光の量が多くなる、つまり損失が減るためにしきい値電流や光出力が改善されるのである。

次に LCI レーザの変調特性を求めた。レーザを正弦波の小電気信号で変調することにより、周波数ごとに光で変調された強度の変化がわかり、レーザの変調帯域を調べることができる。シグナルジェネレータから出力された正弦波変調信号を、バイアスTによりバイアス電流に重畳させ、この信号で LCI レーザを駆動した。出力された光信号を集光し、GaInAs-PD で電気信号に変換して、スペクトラムアナライザにより周波数ごとの電力強度として測定した。GaInAs-PD にバイアス T を取り付け、逆バイアス電圧を印可することにより、高周波信号を受光できるようにしている。この実験では、変調信号強度を 0dBm とし、信号周波数を 10MHz~2GHz まで変化させた。さらに、バイアス電流を 20、40、60mA とし測定した。この測定の結果、バイアス電流が 20mA の時は、1.7GHz で変調強度が 3dB 減少していたが、40 と 60mA の時は変調強度の減少は見られなかった。よって、LCI レーザの変調帯域は、バイアス電流が 20mA で 1.7GHz、40 と 60mA ではシグナルジェネレータの変調周波数が 2GHz で限界であるため、2GHz 以上であることがわかった。また、20mA からバイアス電流値を増やしていくと、変調帯域が 1.7GHz から高周波側に移行していくことを確認した。このようにバイアス電流を増加することにより、LCI レーザの変調帯域は 2GHz 以上と考えることができ、送受光素子の更なる高速化に対応できると考えられる

以上の結果により、実際に 1Gb/s 以上の高速のデジタル信号を発生できると分かった。そこで、入力にデジタル信号を用いて LCI レーザを直接変調した。ここで用いた信号は、1のレベルの際に一旦0レベルに戻らないNRZ (nonreturn-to-zero) 形式の1-0信号の疑似ランダム (PRBS : pseudo-random bit stream) 信号である。PRBS 信号とは、ある長さのパルスパターン列においてランダムな信号を発生した信号であり、今回の実験では23個のパルスを持ちパルス列の種類が $2^{23} - 1$ になるように設定した。また、パルスの信号速度はオシロスコープの測定限界である 1Gb/s まで観測した。1Gb/s NRZ 形式 $2^{23} - 1$ の PRBS 信号を用いたパルス変調波形において図3のような良好なアイパターンを得ることができた。なお今回の測定ではしきい値電流程度のバイアス電流を用いている。

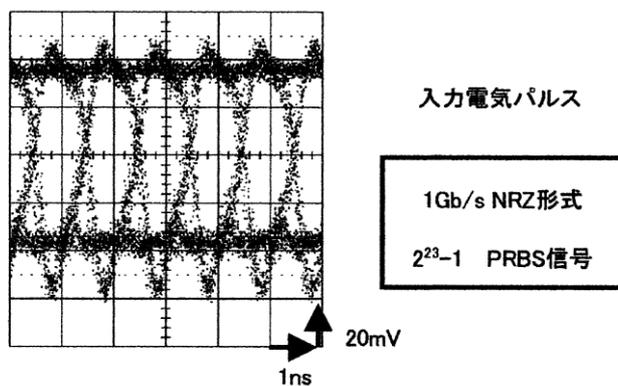


図3 パルス変調波形

4.4 受光特性

LCI レーザ素子の送受光素子としての受光特性について評価を行った。周波数応答特性において図4のような結果を得た。LCI レーザ素子に印可する逆バイアス電圧0, 1, 2V について測定を行った。グラフでは逆バイアス電圧0V における10MHz を基準とし、他の測定値との比較をdB で表示している。周波数応答特性においても測定機器の関係上2GHz 以上の測定は行えなかった。遮断周波数は逆バイアス電圧0V の時2GHz, 逆バイアス電圧2V の時約2.2GHz となる。この結果から次式を用いて LCI レーザ素子の素子容量が求められる。

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR}$$

ここで、 f_c は遮断周波数、 C は素子容量、 R は素子抵抗である。よって、素子容量は逆バイアス電圧0V の時1.6pF, 逆バイアス電圧2V の時1.5pF と考えられる。しかし本来、LCI レーザ素子の素子容量は逆バイアス電圧0V の時0.5pF, 逆バイアス電圧2V の時0.4pF となり、逆バイアス電圧を印可した場合0.1pF 程度の素子容量変化であり、今回の測定では1.1pF 程度の寄生容量があったと考えられる。また本質的な遮断周波数は約6.4GHz と見積もることができる。本研究での実装においても、2GHz 以上の帯域が確認できたので、この LCI レーザ素子を用いて、伝送されてきた高速光信号の OE 変換を行った。入力光パルスを1Gb/sNRZ 形式 $2^{23}-1$ の PRBS 信号とした時の、光パルス信号受光波形を図5 に示す。アイの開いた良好なパターン得ることができ、この LCI レーザ素子が受光素子としても、十分な特性を有していることを確認した。

光ファイバを通過してきて、受光端まで到達した信号光の偏波状態は、ファイバの状態により変化している。よって、受光素子の偏波依存性は小さいことが必要となる。そこでこの LCI レーザ素子の受光偏波依存性を図6 に示す次のような測定方法で行った。

- 位相補償器により直線偏光にする
- 偏光子で直線偏光を消光し、偏光角度を確認
- 様々な角度の直線偏光を、LCI レーザ素子に導入

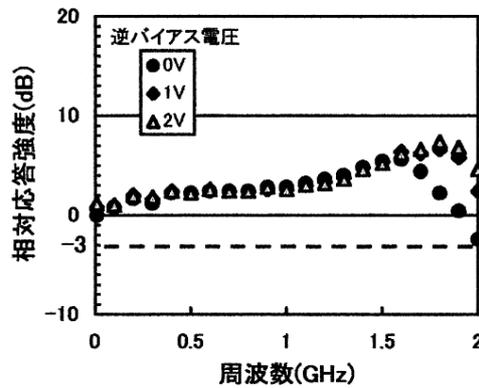


図4 周波数応答特性

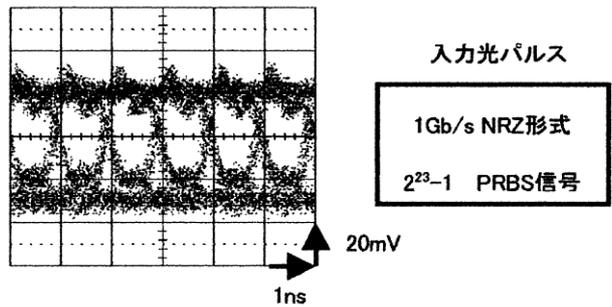


図5 光パルス信号受光波形

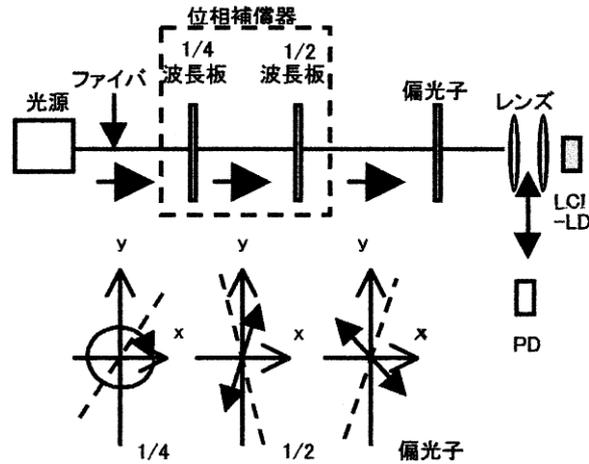


図6 偏波依存性の測定系

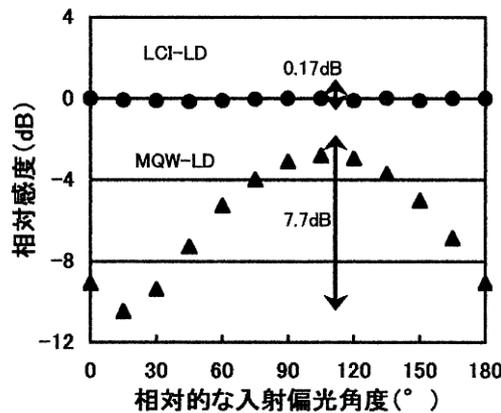


図7 偏波依存性

偏波依存性として図7のような結果を得た。比較のため MQW レーザについても同様の測定を行った。グラフでは LCI レーザ素子の相対的な入射偏光角度 0° を基準に他の測定値との比較を dB で表示している。良く知られていることであるが活性層構造により、MQW レーザでは 7.7dB と受光感度の変化が大きい。このような偏波依存を示すのは、次のように考えることができる。まず、MQW レーザでは、受光面における MQW 活性層構造が井戸層に平行な方向と垂直な方向で異なる。そのため、光の電界ベクトルが MQW 層に平行な光 (TE 偏波光) と垂直な光 (TM 偏波光) では、量子化の影響から吸収スペクトルが異なる。これは、伝導帯と重い正孔帯の光学遷移においては TE 偏波は許容されるが、TM 偏波は禁止されるからである。よって、TE 偏波光の方が TM 偏波光よりも吸収が多くなるため、偏波依存性が大きくなる。これに対して、今回の測定で用いた LCI レーザはバルク活性層を持ち、偏波依存性は量子井戸構造よりも小さくなる。さらに、受光面における活性層構造の厚さと幅を同じにすれば、偏波依存をほとんどなくすることができる。これは、TE、TM 偏波光に対する等価屈折率がほぼ同じになり、各偏波光が活性層内にほぼ同じだけ閉じ込められるからである。LCI レーザの活性層は図1に示されるように、活性層上下に電流ガイド層がある SCH 構造となっているため、通常のバルク活性層の偏波依存性と異なってくる。活性層構造は厚さが $0.1\mu\text{m}$ 、幅が $1\mu\text{m}$ で同じ長さではないが、電流ガイド層により厚さ方向の光閉じ込めが大きくなり、TE、TM 偏波光に対する等価屈折率の差はかなり小さくなると考えられる。この素子は、光の閉じ込め係数が、電界ベクトルが活性層に平行な TE 偏波光と垂直な TM 偏波光においてほぼ等しいように素子設計を行ったので、受光感度の変化がほとんどなく良好な結果を得ることができた。

受光感度としては、先球ファイバによる光導入時の損失を含めて 0.54A/W を得ることができた。この値は送受光素子として使用する際は十分な感度である。波長依存性として図8のような結果を得た。発振波長である

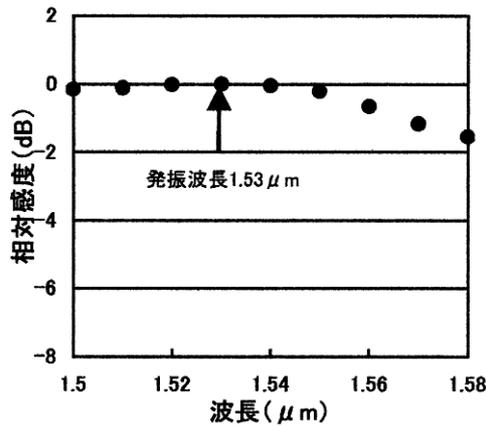


図8 波長依存性

1.53 μm を基準にし、dB 単位で受光感度変化を示した波長依存性を示している。グラフでは発振波長 1.53 μm を基準に他の測定値との比較を dB で表示している。発振波長から短波長側、20nm 長波長までは受光感度の変化ほとんどなく他の送受光素子と比較しても良好な波長依存性を得ることができた。このような波長依存性を示すのは、次のように考えることができる。まず、発振波長より長波長側ではバンドギャップエネルギーが影響してくる。半導体の吸収係数は、バンドギャップエネルギー付近で大きく減少する。フォトディテクタの場合は、バンドギャップ波長を使用する波長帯域よりも長波長側に設定するため、ほとんど影響しないと考えられるが、送受光素子の場合、バンドギャップ波長は発振波長によって決めなければならず、発振波長付近の急激な吸収係数の減少が影響してくる。さらに、温度が低くなるとバンドギャップ波長が短波長側にシフトするため、より大きな問題となる。

また、発振波長よりも短波長側では、緩やかな受光感度の減少が起こると考えられる。これは、短波長になるにつれ活性層内部まで光が届かず吸収が短くなり、半導体表面付近でキャリアが生じるが、半導体の表面では結晶構造がとぎれることにより表面準位が高密度に存在するため、キャリアが表面で再結合してしまい光電流に寄与してしまう。よって、短波長になるほど表面再結合の影響を大きく受けることとなり光吸収が減少する。この現象による波長依存性はわずかであるため、短波長側の波長依存性は小さい。

5. まとめ

本研究は、光アクセス系ネットワークにおいて用いられる送受光素子のコストおよび性能改善のため、電子デバイスとのモノリシック集積に適した横方向電流注入型 (LCI) レーザを製作し、送受光素子として採用したときの特性を評価したものである。

発光時の特性としては、電流 光出力特性と電流 電圧特性からしきい値電流、光出力、微分抵抗を測定し、スペクトル波形により発振波長を調べている。これらの値は送受光素子として十分な性能を示している。さらに、変調帯域を小信号変調特性から測定し、NRZ 形式の PRBS 信号によりアイパターンを観測している。この動特性は光アクセス系伝送方式ではかなり良い特性であり、これからの高速化にも十分対応できると考えられる。受光時の特性は、逆バイアス特性により暗電流を求め、受光感度や波長依存性、偏波依存性を測定している。波長依存性においてはさらなる特性改善が望ましいが、暗電流や受光感度、偏波依存性はどの特性も今までの送受光素子よりも良い性能を示している。さらに、周波数応答特性から遮断周波数を求め、NRZ 形式の PRBS 信号によりアイパターンを観測している。この動特性は、発光時と同様にかなりの良い特性を示している。このように、LCI レーザは送受光素子として望ましい特性を示しており、低コストで高速な OEIC に適用した送受光素子として有望であると考えられる。

より高性能な送受光素子を実現するために、今後の課題としては、しきい値の低減・光出力の増加と受光時の波長依存性の改善が望まれる。今回の測定ではしきい値電流程度のバイアス電流を用いて、発光動特性の測定を行った。より低いしきい値の実現により、バイアス電流を用いずに、LCI-LD を変調することができ、送受光素子において問題となる電子回路への負担も更に軽減されると考えられる。光出力の増加に関しては、レーザ共振器の反射率の最適化により改善することができるため、反射率を変化させたレーザを作製し評価することが要

求される。また、今回の測定では受光時の波長依存性は問題とならなかった。しかし、局側における LD に よって異なる発振波長あるいは 4 / 程度の発振波長の温度変化を考慮し、ワーストケースを想定した場合、 受光時の波長依存性は問題となると考えられる。さらに、実際に送受光素子として OEIC を作製しモジュール にする事によって、発光特性や受光特性、スイッチング特性を把握していく必要がある。

謝 辞

この研究は電気通信普及財団の研究助成によって成されたものであり、ここに感謝の意を表します。

発 表 資 料

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
横方向電流注入型半導体レーザの光アクセス系送受光素子特性	電子情報通信学会技術研究報告	H13年10月
GalnAsP Lateral Current Injection Lasers for Planar Optoelectronic Circuits	Fifth International Symposium on Contemporary Photonics Technology	H14年 1 月