

解説**半導体レーザーと検知器**

茅 根 直 樹

(株)日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1994年12月29日受理)

Semiconductor Lasers and Detectors

Naoki CHINONE

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
1-280, Higashikoigakubo, Kokubunji 185**1. ま え が き**

これまで幹線伝送システムにまず光技術が導入され、実用化されてきたので、これに用いる光デバイスについては、幹線系の高速化に従って高性能化のための研究開発が進められてきた。加入者伝送システムへ光技術を導入するにあたってはこれまでと異なった見方からの光デバイス技術の開発が必要である。特に加入者系では低コスト化が重要な課題であり、光実装周りのコストが大きな部分を占めると想定されるので、実装技術とデバイス技術は切り離せない。ここでは、光加入者系への適用を目指した半導体レーザーと検知器について、実装技術とのからみも含めて概説する。

2. 半導体レーザー

光加入者系応用に向けた半導体レーザーについての主要な技術課題を表1に示す。

加入者側におく光端局では、トータルの消費電力低減のために半導体レーザーの低消費電力化が望ましい。また同じ理由で冷却素子を用いることができないので温度変化などへの耐環境性の向上も重要である。これとともに高温での信頼性の向上も課題となる。さらに電子回路の簡素化のためにはDCバイアスの固定化あるいは無バイアス化が望ましい。これらの条件を満たすためには半導体レーザーのしきい電流値の低減と温度特性の向上が必須である。温度特性の向上にはデバイス特性の温度依存性の低減と動作限界温度の向上の両方があり、各々相互に関係している。

光端局では小型化を図るため、複数のデバイスが一つのパッケージに収められるようになるので、量産性の高い複合デバイスの光実装技術が重要となる。光デバイスについても実装技術とリンクしたデバイス特性が望まれる。半導体レーザーの問題点の一つは、出射されるビーム拡がり角が大きく、単一モード光ファイバーや光導波路との結合が難しいところにある。このためビーム拡がり角の低減が望まれる。

多数の加入者へ向けた大量のデバイス供給のためには量産性の向上が重要である。このためにはデバイス構造の簡略化によるプロセス改善とともに検査工程を含めた作製プロセスの高度化が必須である。

その他、低コスト化のためには幹線伝送系のようなアイソレータが使えないので、外部の反射点からの戻り光に対する耐反射特性の向上も考慮すべき重要な点である。

光加入者系において、特に映像分配に関してはアナログ光伝送方式が導入される可能性が高い。このため映像を分配する局側においてアナログ伝送用の半導体レーザーが必要となるが、これについてはここでは詳細は述べない。以下ブレイクダウンされた課題ごとに概説する。

2.1 しきい電流値の低減

半導体レーザーのしきい電流値の低減に関しては長い間研究が進められてきている。これまで低しきい値化のために以下のような方法が報告されている。

- 1) 短共振器化や活性層幅の狭小化などの活性領域体積の低減
- 2) 端面への高反射率コーティングによる損失の低減

表 1 半導体レーザーの技術課題

課題	特性・構造へのブレークダウン
低消費電力化	しきい電流値の低減
耐環境性の向上	温度依存性の低減
無バイアス化	動作限界温度の向上
光結合の向上	ビーム拡がりの低減
量産性の向上	構造の簡略化 プロセスの高度化
耐反射特性の向上	マルチモード化

3) SCH (separated confinement heterostructure) 構造の導入による活性層への光閉じ込め係数の向上

4) 歪を含む量子井戸 (量子細線, 量子箱) 構造の導入による利得の向上

5) 自然放出光制御による無効電流の低減

これらの方法により, 特に波長 $0.98 \mu\text{m}$ 帯では 0.2 mA 台の小さなしきい電流値が報告されている¹⁾.

一方光加入者系で用いられると思われる波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯の長波長領域では, オージェ効果より電子のエネルギーが高くなりやすく, かつ特性層とクラッド層との間の電子に対するエネルギー差を十分大きくとれる材料がないために活性層からクラッド層へのリーク電流が大きい. また短波長帯では問題にならなかったオージェ再結合による非発光電流が大きい. これらの理由で, $0.98 \mu\text{m}$ 帯ほどの低しきい値は報告されていない. 最近の報告では, $1.3 \mu\text{m}$ 帯で, 短共振器化, 高反射コーティング, 歪量子井戸構造の導入などにより, 20°C で 0.58 mA , 90°C で 1.62 mA のしきい値を得た²⁾. 素子の構造と特性を図 1 に示す. 端面の反射率を全面 85% , 後面 96% , 共振器長を $200 \mu\text{m}$ とし, また歪量 1.4% の量子井戸層を用いている. これらの工夫により, 90°C の高温においても 2 mA 以下の低いしきい電流値が得られている. また別の報告では, 有機 V 族による成長法を用いた歪量子井戸構造の $1.3 \mu\text{m}$ 帯レーザーで, 20°C で 0.4 mA , 85°C で 3.0 mA の値が報告されている³⁾.

最終的には必要な光出力を得るための駆動電流が小さいことが重要であるから, 発光効率とのバランスを考慮する必要がある. また次節で述べる温度依存性の低減とのバランスも重要である. この意味で高反射コーティングや短共振器化などについては最適化が必要である.

低しきい値レーザーでの無バイアス変調の検討も進められており, しきい値 2.5 mA の $1.3 \mu\text{m}$ 帯レーザーで, 1 Gb/s までの無バイアス変調が報告されている. 無バイ

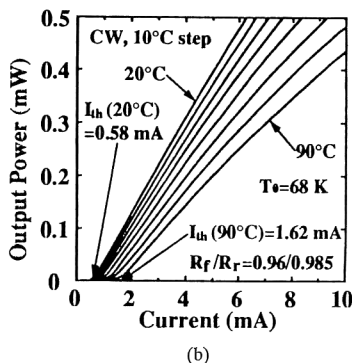
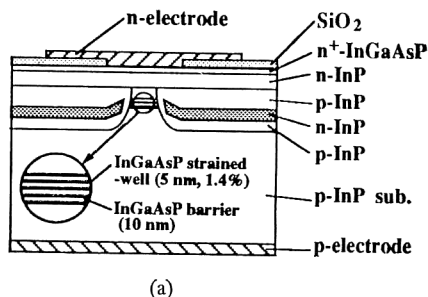


図 1 $1.3 \mu\text{m}$ 帯低しきい値半導体レーザー²⁾
(a) 断面図, (b) 光出力-電流特性.

アスでも良好なアイ開口が得られている⁴⁾.

面発光レーザーは短共振器化に最適であり, $0.98 \mu\text{m}$ 帯では 1.0 mA 以下の低しきい値が得られているが⁵⁾, $1.3 \mu\text{m}$ 帯ではオージェ効果のためと良好な多層反射膜が得られにくいなどの理由で, 14°C の連続発振が報告されているのみである⁶⁾. 今後のブレークスルーが期待される. また量子細線 (量子箱) や自然放出光の制御などは低しきい値化への基本的な技術として期待されるが, 未だ長波長領域では良いデータが得られていない.

2.2 温度特性の向上

加入者系での使用温度として $-40 \sim 85^\circ\text{C}$ の範囲が一般的である. これに向けて温度特性の向上が重要な課題であるが, これにはしきい値の温度依存性の低減と動作限界温度の向上の両方がある. 後者については, 動作限界温度が使用温度に対して余裕があるほど高温時の信頼性が向上するためである. 限界温度は高温動作時のしきい値と熱抵抗で決まるので, 高温動作時のしきい値の低減が重要である.

2.1 項で述べたように, オージェ再結合やクラッド層材料の問題で, 波長 $1.3 \mu\text{m}$ 帯ではしきい値やスロープ効率の温度依存性が大きい. しきい電流値 I_{th} の温度 T に対する依存性を $I_{th} = I_0 \exp(T/T_0)$ という経験式で表した時の指標 T_0 について, GaAs 系の材料では, T_0

は150K以上あるのに対し、InP系では60~70Kしかない。これを改善する目的で最近さまざまな報告がなされている。

1) 電子のオーバーフローの低減

通常の1.3 μm レーザーでは、活性層にInGaAsP、クラッド層にInPを用いているが、2.1項で述べたように活性層からクラッド層へのリーク電流が大きい。リーク電流は大きな温度依存性を持っているので、温度特性向上のためにはリーク電流の低減が必要である。これに向けてクラッド層に伝導帯のエネルギー差を大きくとれる新しい材料を導入する研究が行われている。クラッド層の材料として、InPの代りにGaAs基板上に成長したInGaPを用いる⁷⁾、InGaAlAsを用いる⁸⁾、またInAlAs/InGaAlAs多重量子障壁層を用いる⁹⁾などの報告がされている。InGaAlAsを用いた例では、100°Cまで、122Kの T_0 が報告されている。一方活性層の材料として、InGaAsPの代りにInAsP歪層を用いた報告もされている¹⁰⁾。この材料では従来のクラッド層に対して伝導帯エネルギー差の割合が大きく、電子に対するエネルギー差を大きくできる。150°Cまでの高い温度での連続発振が報告されている。さらにInGaAs混晶基板を用いてクラッド層のエネルギーギャップを大きくする試みも報告されており、1.0 μm までの発振が報告されている¹¹⁾。

2) 埋込み構造におけるリーク電流の低減

現在低しきい値化のために長波長帯のレーザーでは埋込み構造が用いられているが、高温動作時に埋込み層でのリーク電流が増加する現象も温度特性劣化の原因になる。これを防ぐための試みも報告されている。pnpn構造を持つInP埋込み層のpn接合の間にInGaAsP層を挿入することによって、高温動作時のpnpn構造のターンオンを防止した報告がある¹²⁾。これにより温度85°Cにおける最大光出力が1.8倍に改善された。またInP埋込み層の途中にInAlAs層を挿入した報告もある¹³⁾。この場合は高温におけるしきい値の温度依存性を改善することができた。

3) その他

温度依存性を改善する試みとして、端面に波長選択性のある反射膜コーティングを行う報告もされている¹⁴⁾。レーザーの発振波長は温度依存性を持っているので、高温での発振波長に対して反射率が高くなるようにコーティングする。これにより高温でのしきい値の増加が抑えられ、温度依存性が改善される。 T_0 として480Kの高い値が得られた。低温でのしきい値は高くなるが、固定バイアス変調方式などには適していると思われる。

格子不整合による歪を導入した歪量子井戸構造では、価電子帯のバンドスプリッティングのためにオージェ再結合が小さくなり、温度特性が向上することが期待されていた。現在この技術は広く使われているが、低しきい値化には有効であったものの温度特性改善には大きな効果をもたらしていない。さらに詳細な検討が必要である。

2.3 ビーム拡がりの低減

加入者系への応用では実装を容易にするための技術が重要であり、半導体チップについても実装を考慮した工夫が必要である。半導体レーザーの実装上の問題点として光ファイバーや光導波路への結合の難しさが挙げられる。これは、半導体レーザーの発光スポット径が1 μm 前後と波長オーダーに近いいため、ビーム拡がりが非常に大きいためである。現在は、組合せレンズを用いる、またレーザーを発光させ、結合光量をモニターしながら位置合せするなどの方法により、モジュールが作製されている。しかしながら大量で低コストのモジュール作製には部品点数の削減と機械的な位置合せ(いわゆるパッシブアライメント)が必須である。これに向けて半導体レーザーの射出端面付近におけるスポットサイズを大きくしてビーム拡がりを低減する方法が有力である。ビーム拡がりの低減に向けては次のような試みが報告されている。

1) テーパー状導波路の集積化

射出端面付近のみテーパー状に狭くした導波路を集積し、レーザービームを導波路外に染みださせてスポットサイズを上げたレーザーがいくつか報告されている。図2に示した報告例¹⁵⁾では横方向に幅を変化させた導波路を集積化したものである。この素子では、ビーム拡がり角が従来は縦方向、横方向ともに27°であったのに対し、11°に低減された。これにより通常の垂直端面加工した単一モード光ファイバーに対する結合損失として、従来の-10dB以上から-4.1dBまで結合損失を低減できた。また結合損失が-3dB増加するまでの位置裕度として、従来の $\pm 1.5\mu\text{m}$ くらいから $\pm 3.6\mu\text{m}$ に拡大できた。この他の報告として、同様に横方向に変化させたもの¹⁶⁾、また選択成長法を用いて縦方向に変化させたもの¹⁷⁾などがある。

2) マイクロレンズの集積化

レーザーの共振器の外側にマイクロレンズを集積化した報告もされている¹⁸⁾。レーザーの端面をドライエッチングで形成し、その外側にSi-O-Nよりなる分布屈折率膜を堆積した後、この膜を非球面加工した。単一モード

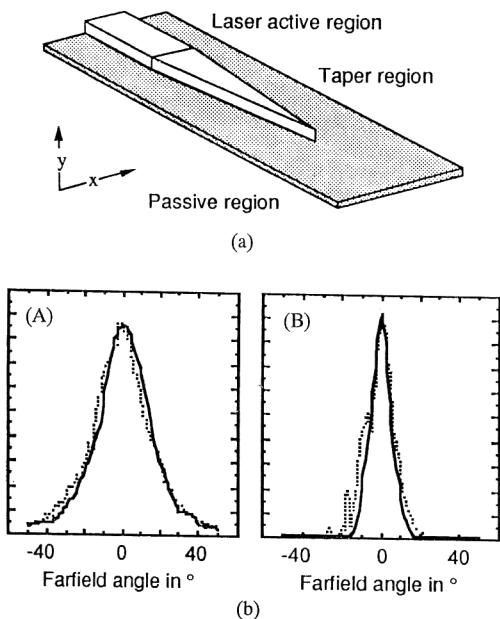


図2 テーパー導波路を集積化した狭ビーム半導体レーザー¹⁶⁾

(a) 概要図, (b) 出射光分布 (図中の (A), (B) は各々テーパー導波路のない素子, ある素子, 実線は縦方向, 破線は横方向)。

ファイバーに対して 39% (-4.1 dB) の結合光率を得た。

上記のいくつかの報告によれば, ビーム拡がりの低減によって光ファイバーとの結合が改善されていることが明らかである。今後低しきい値化との両立, 作製プロセスの簡素化, また結合特性のいっそうの向上などが課題と思われる。面発光型のレーザーは発光径が大きいのでビーム拡がり角は低減されるが, 2.1項で述べたように長波長帯では良好な特性が未だ得られていない。

2.4 構造の簡略化と作製プロセスの高度化

光通信用レーザーでは, 活性領域を InP 層で埋め込んで細い活性領域に電流を閉じ込めた埋込みヘテロ (BH) 構造が広く用いられている。この構造を実現するためには表面から深い位置にある活性領域の幅を $1\mu\text{m}$ 程度に絞り込み, かつそれを埋め込むために InP で再成長するという複雑なプロセスが必要である。ところで最近歪を含む量子井戸構造が再現性良く実現できるようになり, より基本的な特性であるしきい電流密度の低減が可能となっている。このため埋込み構造から脱皮し, 構造簡略化を図るために, ストライプ状の電流励起部分の周囲の部分活性層付近までエッチング除去したリッジ型構造の研究が進められている。

図3に示す最近の例では⁸⁾, リッジ構造で, 活性層に

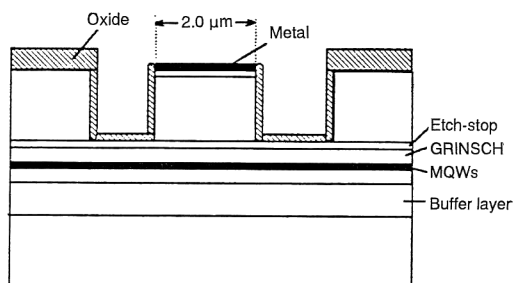


図3 1.3 μm 帯リッジ導波路型レーザーの断面図⁸⁾

歪量子井戸構造を導入し, 19 mA のしきい値と 100°C までの高温動作が報告されている。また別の報告では 200 mW までの高出力動作も得られている¹⁹⁾。今後低しきい値化などの技術課題に対応できるかが問題ではあるが, 注目すべき技術である。

作製プロセス自体に関しては, SiLSI に比べて遅れているウェハの大口径化やこれに伴う縮小投影露光の導入なども重要と考えられる。また作製プロセス工程に関する別の側面として, 半導体レーザーでは劈開しないと特性が得られないので, オンウェハ評価が難しいという問題がある。プロセスの容易化の観点からオンウェハ評価による特性検査も重要である。このためエッチングによる端面形成技術にも着目する必要がある。オンウェハ評価を可能とする技術として面発光レーザーも候補の一つである。

2.5 その他

光通信用に用いられるファブリ・ペローレーザーのスペクトルはわずかなマルチモードとなっており, アイソレータなしでも実用化されている。ところで, 今後光ファイバーとの結合が高くなると戻り光による雑音が問題となる可能性もある。従来のデバイスにおけるマルチモード化の原因が十分に明らかにされていないだけに特に注意する必要がある。テーパー導波路を集積化したレーザーにおいて, 戻り光の影響を調べた報告がある²⁰⁾。

3. 検知器

幹線伝送系では長距離の光ファイバーで減衰した微弱信号を検出するため, 検知器に光を増倍する機能をもつなだれ増倍型フォトダイオード (APD) が広く用いられてきた。最近では光増幅器で増幅した後, pin 型のフォトダイオード (pin-PD) で検出する方法も検討されている。しかしながら, 光加入者系においては伝送距離が大きくないことと伝送信号が幹線伝送系ほど高速でないこと, APD では高い電圧を必要とし, かつ利得制御が難

表 2 検知器の技術課題

課 題	特性・構造へのブレイクダウン
実装方式への適合	横方向光注入化
高感度化	光・電気変換効率の向上

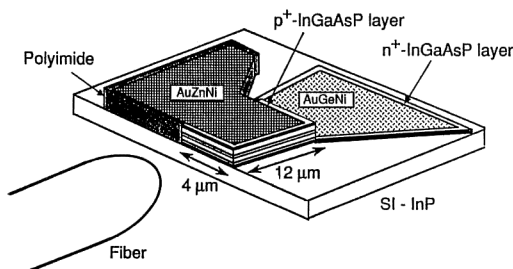
しいことなどから、pin-PD を検知器として用いる方が有力である。検知器に対する技術課題を表 2 に示す。光加入者系モジュールの実装方法として、光デバイスを平面状に実装する面実装が有力視され、いくつかの報告がされている。この場合、検出器に関しても信号光をデバイスの横方向の端面から入射する横型の PD が有力である。このような導波路型 PD に関する新たな課題として、入射した信号光が十分に吸収され、高感度特性が得られることが必要である。導波路型 PD とその高感度化について以下に概説する。

3.1 導波路型 PD

信号光を横方向から注入する導波路型 PD では信号光が横方向から注入されるため、キャリアの走行時間を制限する吸収層の厚みと信号光を十分吸収するための吸収層の長さを独立に設計できるという利点がある。このため高速特性の向上を図ることができる。この目的で設計された導波路型 PD を図 4 に示す²¹⁾。この例では、吸収層の厚みを低減して 40 GHz 以上の高速特性が得られた。一方量子効率に関しては吸収層の光軸方向の長さを長くすることによって 68% の値が得られている。この例では高速化のために導波路構造を採用したものであるが、この技術は平面実装方式の導入に対応して加入者系応用にも適用が期待できる。他に単一モード導波路と集積化した導波路型 PD の報告もある²²⁾。

3.2 光電気変換効率の向上

導波路型 PD での量子効率は、信号光が吸収される割合と導波路と光ファイバー間の結合効率の積によって決定される。後者に関しては、2.4 項で述べたような光軸合せに関する実装上の問題があり、結合効率を高めるための工夫が必要である。導波路型の検出器において、高

図 4 導波路型 pin-PD の概観図²¹⁾

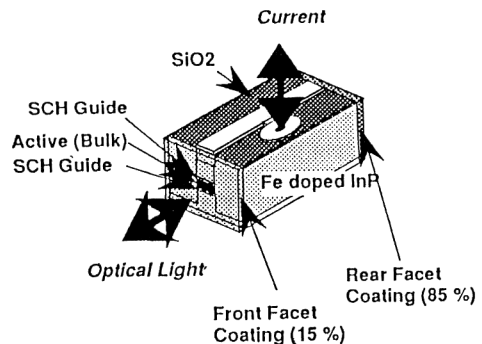
感度化に向けて APD を導入する試みも報告されている²³⁾。超格子型の APD を導入することにより、バイアス電圧 30 V 程度で増倍率 30 が得られ、導波路との結合損を補うのに十分な値を得た。従来の縦型構造に比べ低電圧化が図られているものの今後いっそうの低電圧化が実用化のための鍵となる。

3.3 その他

検出器に関するその他の課題として、組立てコストの低減などを狙いといた検知器とプリアンプのモノリシックな集積化も研究開発の一つの方向である。集積化容易な素子構造とプロセス技術が立ち上がれば、加入者系応用にも活用可能である。

4. 送受一体型デバイス

加入者系においては、一本の光ファイバーで加入者と局との双方向通信を行う方式が検討されている。このため、加入者側では光ファイバーの出口を二つに分けて、各々受信器と送信器に接続する必要がある。このため光導波路などの新たな光部品が増え、実装上複雑になるという問題がある。ところで、一つの光デバイスを送信と受信と両方に使うことができればこの問題は解決する。このような送受一体型デバイス (トランシーバー) は古くから LED では検討されてきたが、最近レーザーを検知器として用いる方法が検討されている²⁴⁾。構造図を図 5 に示す。検出器として十分な帯域をとるために、レーザーの活性領域周辺の埋込み部分に Fe ドープの反絶縁性 InP を用いてデバイスの容量を低減した。デバイス容量として 1 pF 以下の容量が実現でき、30 Mb/s の信号に対して良好な受信感度を得た。半導体レーザーと検知器について今まで述べてきた課題をこのデバイスについても明らかにしなければならないが、今後の発展が期待される。

図 5 半導体レーザーと PD を兼用したトランシーバーの概観図²⁴⁾

5. ま と め

加入者系への応用に向けた半導体レーザーと検知器について、技術課題と研究開発例について述べた。加入者系では量産性向上や低コスト化へ向けての研究開発が重要であり、幹線系へ向けて長い間培ってきた光通信用光デバイス技術が広範囲な応用へ適用できるかどうか、現存まさに正念場を迎えていると言っても過言ではないだろう。

文 献

- 1) H. Zhao, M. H. Macdougall, K. Uppal and P. D. Dapkus: "Sub-milliamper threshold InGaAs/GaAs/AlGaAs laser array elements by single step growth on nonplanar substrates," *Tech. Dig. IEEE Int. Semicond. Laser Conf.*, Hawaii (1994) p. 18.
- 2) K. Uomi, T. Tsuchiya, M. Komori, A. Oka, K. Shinoda and A. Oishi: "Ultralow-threshold (0.56 mA) 1.35 μm InGaAsP/InP compressive-strained-MQW lasers," *ibid.*, p. 20.
- 3) T. Terakado, K. Tsuruta, T. Ishida, T. Nakamura, K. Fukushima, S. Abe, A. Uda, T. Torikai and T. Uji: "Extremely low threshold (0.4 mA @ 20°C, 3.0 mA @ 85°C) 1.3 μm strained MQW lasers with novel P-substrate (RIBPBH) grown by MOVPE using TBA and TBP," *ibid.*, PD9.
- 4) 千賀賢一, 佐々木義浩, 山田博仁, 鳥飼俊敬, 宇治俊男: "1.3 μm 短共振器歪 MQW レーザの無バイアス変調動作", 電子情報通信学会秋季大会予稿集, C-184 (1994) p. 185.
- 5) T. Kawakami, T. Nimai, T. Yoshikawa, M. Sugimoto, Y. Sugimoto, H. Yokoyama, K. Kasahara and K. Asakawa: "Microcavity surface-emitting laser with record low threshold current of 190 μA ," *Tech. Dig. SSDM*, Chiba (1993) p. 972.
- 6) T. Baba, Y. Yogo, K. Suzuki, F. Koyama and K. Iga: "First room temperature CW operation of GaInAsP/InP surface emitting laser," *IEICE Trans. (C)*, **E76-C** (1993) 1423.
- 7) H. Kurakake, T. Uchida, K. Kubota, S. Ogita, H. Soda and S. Yamasaki: "High T_0 1.3 μm InGaAs strained quantum well laser with InGaP wide band-gap clad layers," *Tech. Dig. IEEE Int. Semicond. Laser Conf.*, Hawaii (1994) p. 24.
- 8) Z. Wang, D. B. Darby, R. Panock, P. Whitney and D. C. Flanders: "High speed, ultra low noise operation from -40°C to 100°C tensile strained InGaAlAs MQW lasers emitting at 1300 nm," *ibid.*, PD 10.
- 9) H. Shimizu, T. Fukushima, K. Nishikata, Y. Hirayama and M. Irikawa: "1.55 μm strained GaAnAs/AlGaInAs MQW lasers with a multi-quantum barrier," *ibid.*, p. 26.
- 10) H. Oohashi, T. Hirono, S. Seki, H. Sugiura, J. Nakano, M. Yamamoto, Y. Tohmori and K. Yokoyama: "High temperature operation InAsP-based MQW lasers," *Tech. Dig. Int. Conf. InP and Related Material*, Santa Barbara (1994) PDA 3.
- 11) H. Shoji, T. Uchida, T. Kusunoki, M. Matsuda, H. Kurakake, S. Yamazaki, K. Nakajima and H. Ishikawa: "InGaAs/InGaAsP strained SQW LD grown on InGaAs ternary substrate," *Tech. Dig. IEEE Int. Semicond. Laser Conf.*, Hawaii (1994) p. 22.
- 12) 鶴岡清貴, 寺門知二, 中村隆宏, 阿江 敬, 石田朋子, 福島 淳, 鳥飼俊敬, 宇治俊男: "全 MOVPE 新埋込構造 1.3 μm MQW レーザの高温高出力特性", 応用物理学会秋季大会予稿集, 21p-S-14 (1994) p. 905.
- 13) 高岡圭児, 柳部光弘: "InAlAs 電流ブロック層を用いた InGaAsP/InP 系埋込型半導体レーザー", 応用物理学会春季大会予稿集, 30 p-K-13 (1994) p. 1040.
- 14) 粕川秋彦, 岩井則弘: "TDR 反射鏡を用いた波長 1.3 μm 高温特歪量子井戸レーザー", 電子情報通信学会秋季大会予稿集, C-300 (1994) p. 301.
- 15) I. F. Lealman, M. J. Robertson, L. J. Rivers, M. J. Harlow, S. D. Perrin and C. P. Seltzer: "1.5 μm InGaAsP/InP large mode size laser for high coupling efficiency to cleaved single mode fibre," *Tech. Dig. IEEE Int. Semicond. Laser Conf.*, Hawaii (1994) p. 189.
- 16) R. Ben-Michael, U. Koren, B. I. Miller, M. G. Young, M. Chien and G. Raybon: "InGaAs/InGaAsP multiple quantum well laser with an integrated tapered beam expander waveguide," *ibid.*, p. 187.
- 17) H. Kobayashi, H. Soda, M. Ekawa, N. Okazaki, S. Ogita and S. Yamazaki: "Narrow-beam tapered thickness waveguide integrated BH MQW laser operation at high temperatures," *ibid.*, p. 191.
- 18) 嶋田純一, 沢田廉士, 鈴木与志雄, 田中秀尚, 渡部昭憲: "プレーナプロセスによる半導体レーザー/単一モードファイバ無調芯結合モジュール", 電子情報通信学会秋季大会予稿集, C-187 (1994) p. 188.
- 19) 青木雅博, 土屋朋信, 中原宏治, 魚見和久: "逆メサリッジ側壁を有する高出力歪 InGaAsP/InP MQW リッジ導波路型レーザー", *ibid.*, C-301, p. 302.
- 20) 東 敏正, 小林宏彦, 江川 満, 萩田省一, 雙田晴久: "テラ導波路 FBH レーザの戻り光雑音特性", *ibid.*, C-304, p. 305.
- 21) K. Kato, S. Hata, K. Kawano, J. Yoshida and A. Kozen: "A high-efficiency 50GHz InGaAs multimode waveguide photodetector," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) p. 278.
- 22) 竹内 剛, 浜本貴一, 山本雅子, 田口剣申, 小松啓郎: "選択 MOVPE によるフォトダイオード/光導波路集積素子", 応用物理学会秋季大会予稿集, 19a-R-1 (1994) p. 905.
- 23) 穴倉正人, 中村 均, 花谷昌一, 田中滋久, 野津千秋: "導波路型 InAlAs/InGaAs 超格子 APD の検討", 応用物理学会春季大会予稿集, 28a-L-3 (1994) p. 994.
- 24) T. Sugie, Y. Tohmori, M. Fukuda, T. Kurosaki, N. Ishihara, Y. Suzuki, S. Matsumoto and M. Yamamoto: "1.3- μm low-capacitance semi-insulating BH-laser for TCM transmission," *Tech. Dig. Int. Workshop on Optical Access Networks*, Kyoto (1994), p. 2. 2-1.