

解説

ONU (光ネットワークユニット) の光技術

吉田 淳一

NTT 光エレクトロニクス研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 3-1

(1995年1月11日受理)

Key Technologies of Photonic Components for the ONU (Optical Network Unit) for FTTH Applications

Junichi YOSHIDA

NTT Opto-Electronics Laboratories, 3-1, Morinosato-Wakamiya, Atsugi 243-01

1. ま え が き

光加入者システム^{1,2)}で、各家庭において光信号を送信したり受信したりするために使用される装置を、ONU (optical network unit) と称している (ONU の機能等については、本特集の関連論文に詳しく述べられているのでそちらを参照していただきたい)。現在、日本全国の電話加入数は約5,900万であり、今後15年ないし20年で各家庭まで光ファイバーを敷設して fiber to the home (FTTH) を実現するためには、年間100万台以上のONUが必要となる。このレベルの生産量は、光部品ではCD (コンパクトディスク) 用の半導体レーザーならびにピックアップ以外では経験がない。特に、通信用光部品で、一品種でこれだけの数が製造され使用されている例は皆無である。このような状況にあって、必要な性能を十分満足させ、小型でかつ経済的なONUを実現するためには、発光と受光ならびに分岐回路、および波長分波の機能をコンパクトに、しかも低コストで実現することが不可欠である。当然のことながら、それらの製造にあたっては、年間100万個以上の生産量に適合したデバイス形態と製造プロセスを併せ持っていないとてならない。

光部品がLSIなどの電子部品と際だって異なる点は入出力の接続である。光部品では電気配線に加え、光ファイバー等の光導波媒体とのアライメントを正確に行う必要がある。このため、光モジュールのアセンブリング工程で光軸調整と固定等に独特の技術と装置を必要とし、これが光部品をLSIのような量産部品とするため

のボトルネックになっている。もう一つのボトルネックは、特に伝送用に使用される半導体レーザーやpinフォトダイオードにおいては、LSIと異なり、ほとんどの場合気密封止が施されている点である。これは、気密封止以外の樹脂モールド等のパッケージでの信頼性について現状では十分なデータが得られていないことによる。しかし、LSIのパッケージ材料の変遷³⁾ならびにシリコン基板上に石英の光導波路を形成したプレーナ光波回路 (planar lightwave circuit, 以下PLC⁴⁾と記す) 部品の信頼性評価結果^{5,6)}が示すように、開発技術の方向性は明らかである。通信用光部品の樹脂封止技術も早急に解決すべき課題であるが、詳細は省略し、ここでは半導体光部品等をPLC上に光軸無調整で、しかも光部品であることを意識せずにLSI等の電子部品と全く同一の手法で実装するPLCプラットフォーム技術⁷⁾について、光半導体ならびにPLCの両面から述べることにする。

2. PLC プラットフォーム

シリコン基板上に石英光導波路を形成したPLC技術を用いて、WDMならびにスプリッターを一つのチップ上に集積化し、これに半導体レーザーとpinフォトダイオードをハイブリッド集積した形態の光モジュールについては、すでにプロトタイプモジュールが製作され⁸⁾、フィービリティが確認されている⁹⁾。しかしながら、小型化・高性能化に加え低コスト化の要請に応えるには、半導体レーザーおよびpinフォトダイオードをはじめ、ドライバIC等のLSI等をより簡便にかつ確実にPLC上にマウントしモジュール組立の量産性向上を可

能とする, さらに一歩進んだ光ハイブリッド集積化技術が必要不可欠である.

PLC の基板に使用しているシリコンそのものは素材として優れた熱伝導性と加工性を有しており, 以前から光部品のハイブリッド集積基板として使用する試みがなされてきた¹⁰⁻¹²⁾. しかしながら, PLC はシリコン基板が数十 μm の厚い石英の光導波路層で覆われている構造となっている⁴⁾ため, そのままではこれらの利点が引き出せず, 光ハイブリッド集積の基板として広く用いることは難しかった. そこで, 図 1 のように研磨あるいはエッチングなどの手法で基板の一部を取り除いたテラス付きシリコン基板¹³⁾の上に光導波路層を形成することによって, 半導体レーザーなどの他の部品をシリコン上に直接実装することを可能とする PLC プラットフォーム^{7,14)}が開発された.

図 2 は, PLC プラットフォームの製作工程を表したものである. まず, テラス部分に下部クラッド層を FHD 法 (flame hydrolysis deposition: 火炎堆積法)⁴⁾によって形成し, 研磨等によってテラス部分との高さを揃える. 下部クラッド層の厚さは約 30 μm である. 次に, コア層を堆積後, ドライエッチングでパターン形成を行い, 上部クラッド層を再び FHD 法によって形成する. この場合, コア層とクラッド層の屈折率差は, 0.75% に設定してある⁴⁾. 最後に, ドライエッチングで半導体等を実装する部分となるシリコンテラス部を露出させ, 実装に必要なガイド・マーカー等の加工を行う. 石英とシリコンのエッチングレートの差により, コア層の位置はシリコンテラス面と正確に一致させることができる. この結果, シリコンテラス部は高精度な基準面とヒートシンクの両方を兼ね備える実装プラットフォームとして機能する. この方法によって作成した PLC 光導波路の伝搬損失は 0.1 dB/cm (@ 1.55 μm)¹³⁾ で, 通常の PLC と同様の値が得られている.

PLC プラットフォーム技術を用いて, 半導体レーザ

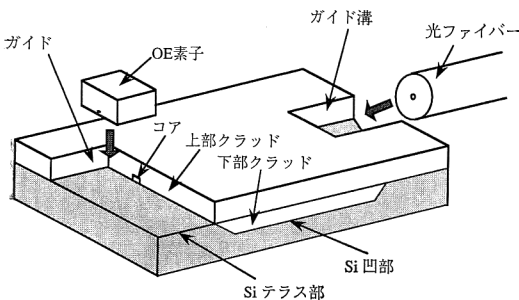
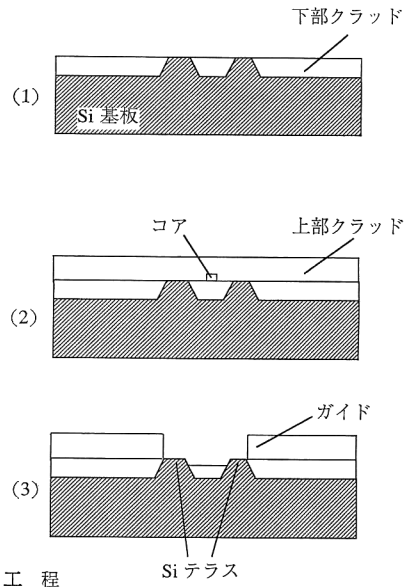
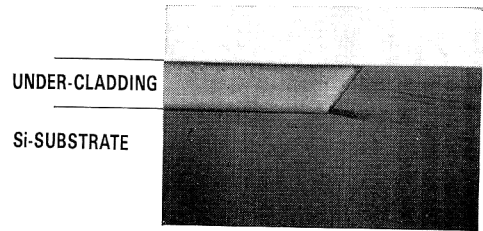


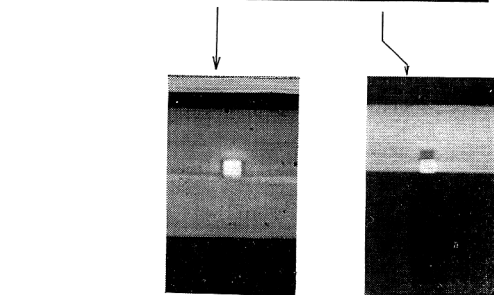
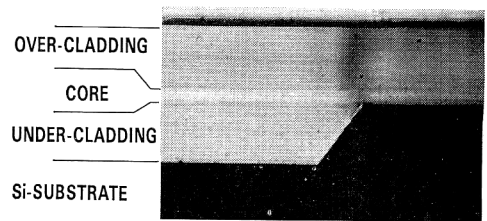
図 1 PLC プラットフォームの概要



(a) 工程



(1)



(b) 断面

(2)

図 2 PLC プラットフォームの製作工程

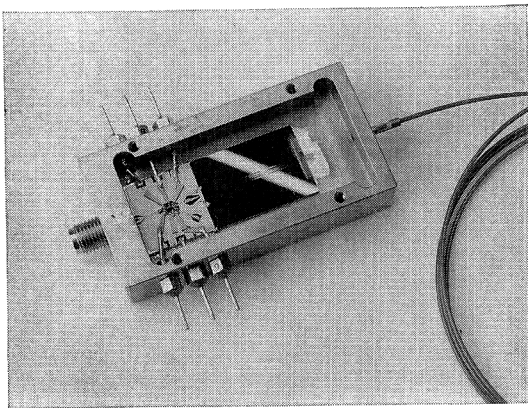
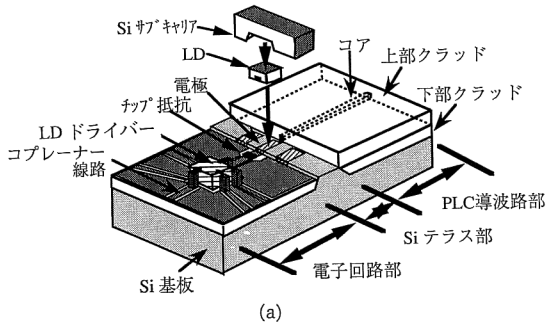


図3 PLCプラットフォームの実装の例
(a)模式図, (b)半導体レーザーとドライバICのハイブリッド集積モジュール。

ーとドライバICをPLC上にハイブリッド集積したレーザーモジュール¹⁴⁾を図3に示す。シリコンテラス上に直線導波路を形成し、半導体レーザー(1.3 μm 帯)からの出射光をこの導波路に結合させるようにマウントし、さらにコプレーナ線路を配線としてLDドライバーIC(0.5 μm ゲートGaAs-MESFETIC)とレーザーを接続している。半導体レーザー部には裏面電極との電気的接続ならびに放熱を兼ねたシリコンサブキャリアを使用している。このモジュールは2.5Gb/sNRZ信号で良好な動作が確認されている¹⁵⁾。しかしながら、PLC光導波路と半導体レーザーの結合損失は両者のスポットサイズの違いから約7.5dB¹⁴⁾と大きな値になっており、実際にONU用の光モジュールとして適用するには損失をさらに低下させなければならない。これには次に述べる光半導体技術の革新が不可欠である。

3. 光半導体技術の革新

3.1 半導体レーザーとPLCの光結合特性の改善

導波路形状をテーパ状に加工して光ファイバーとの結合損失を小さくする試みは以前から行われており¹⁶⁻¹⁸⁾,

最近はこの半導体レーザー等のアクティブデバイスにも応用する試みがさまざまな研究機関で活発に行われている¹⁹⁻²³⁾。これらのレーザーの特性や製作方法については参考文献ならびに本特集の関連論文を参照いただくこととし、ここではPLCとの光結合について述べることにする。

図4は、作製したスポットサイズ変換導波路をモノリシックに集積化した半導体レーザー²³⁾の模式図である。変換導波路部分は選択成長を用いて形成されており、レーザー部とはバットジョイントである。図5に、FFP(far-field pattern)を示す。FFPの半値角から求めたレーザーおよびPLCのスポットサイズは、おおよそ4.3 μm 、2.6 μm と4.0 μm 、3.9 μm であった。PLCとの結合を意図して、半導体レーザーからの出射光が所定のスポットサイズとなるように、変換導波路部分の形状を幅1~1.5 μm 、厚さ0.1 μm 程度としており、ほぼ設計どおりのFFPが得られている。図6に、PLC光導波路との結合におけるスポットサイズ変換導波路先端の形状と結合損失の関係を、有限要素法による導波路解析から求めた結果²³⁾を示す。

このレーザーを用い、PLC光導波路との水平方向、垂直方向ならびに光軸方向の結合特性を測定した結果²⁴⁾

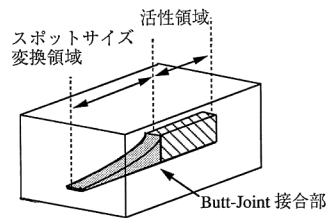


図4 スポットサイズ変換導波路集積型半導体レーザー

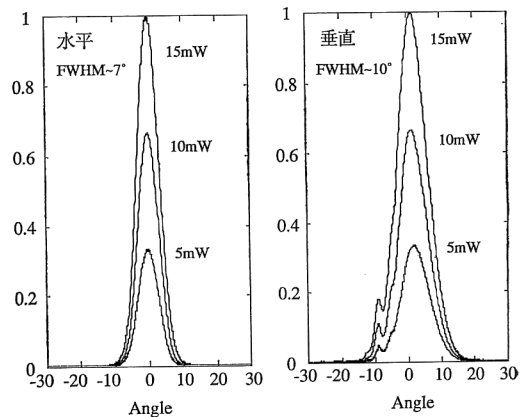


図5 ファーフィールドパターン

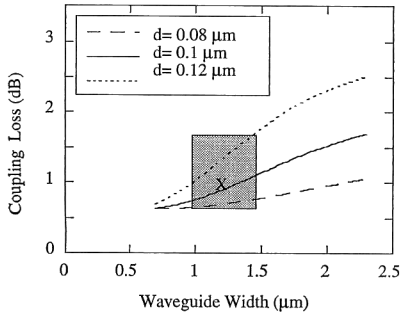


図 6 スポットサイズ変換導波路の先端形状に対する PLC 導波路との結合損失の計算値

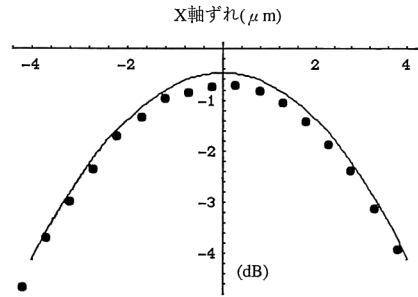
を図 7 に示す。なお、PLC 光導波路の端面は、無反射コーティングが施されている。図中の ● は実測値を示し、実線はレーザーからの出射光をガウシアンビームと仮定して計算²⁵⁾した結合特性である。水平方向および垂直方向の 1 dB トレランスは $\pm 2 \mu\text{m}$ 、最大結合効率は 0.75 dB と、計算 (図 6) に近いきわめて低損失な結合が得られた。このように結合がきわめて良い状態では、反射戻り光による半導体レーザーの特性変動が問題となることがあるが、遠端反射による戻り光を -10 dB まで戻した状態での誤り率特性²⁴⁾(30 Mb/s NRZ 擬似ランダム信号、零バイアス印加)において、 -10 dB の戻り光でも約 1 dB の受光感度の劣化であった。この結果から、PLC 光導波路に適合した設計のスポットサイズ変換導波路をモノリシック集積した半導体レーザーは、遠端反射の有無にかかわらずきわめて良好な結合特性を実現できることがわかった。

3.2 半導体レーザーの微分効率の温度特性改善

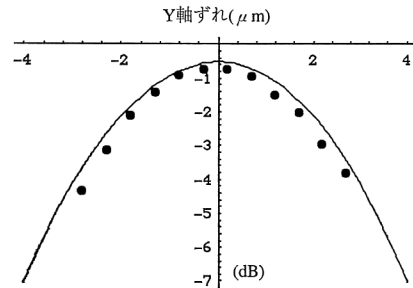
近年、半導体レーザーの最高発振温度の高温化²⁶⁻²⁸⁾としきい値電流の低減化²⁹⁾が進んでいるが、経済性の面からは、APC (automatic power control) フリーで動作可能な高温動作・高光出力動作・低電流動作の三条件を同時に満たす半導体レーザーの開発が望まれている。前節で述べたスポットサイズ変換導波路集積型の半導体レーザーは、導波路部分でのロス増が不可避なため、駆動電流の低減化および微分効率の温度依存性の面でいっそうの改善が必要であり、高温での高出力特性を維持しつつ、温度変動に伴う出力変動を抑制する設計指針の確立が望まれる。

3.3 導波路型フォトダイオード

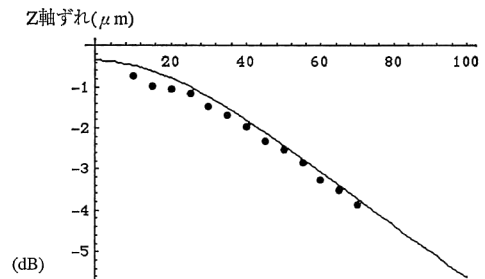
PLC プラットフォーム技術に最適なフォトダイオード技術は、光導波路からの出射光を 3 次元的に方向変換することなく、光の伝搬方向が光導波路と同一平面内にあるという特長を持つ導波路型フォトダイオードであ



(a) 水平方向



(b) 垂直方向



(c) 光軸方向

図 7 スポットサイズ変換導波路集積半導体レーザーと PLC 光導波路との光結合特性

る。導波路型フォトダイオードは、光の入射方向とフォトダイオード内を電子および正孔が走行する方向が互いに独立しており、CR 時定数と走行時間とから決まる帯域がほぼ独立に設計可能であるという特長から、主に数十 GHz 以上の超高帯域・高感度フォトダイオードとして研究³⁰⁾が行われていた。しかしながら、PLC プラットフォーム技術においては半導体レーザーと全く同一の実装技術を適用できるという特長があり、技術の統一によるメリットはきわめて大きいものが期待できる。超広帯域導波路型フォトダイオードの設計に関しては詳しい報告³⁰⁾がすでにあるのでそれを参照していただき、ここでは光加入者の帯域にあった構造について述べる。

1 GHz 程度の帯域は CR 時定数のみで決まるので、

ONU 用としては帯域よりも光ファイバーとのカップリングが設計上の優先事項である。光吸収層の厚さは印加電圧ならびに結晶成長の観点からはできるだけ薄い方が望ましく、一方量子効率の観点からは、厚い方が望ましい。InGaAs の吸収係数を $0.68 \mu\text{m}^{-1}$ とすれば、厚さ $3 \mu\text{m}$ 程度で 90% 以上の吸収が得られるので $3 \mu\text{m}$ の光吸収層をコア層とし、コア層の片側にクラッド層の屈折率との中間的な屈折率を持つ InGaAsP 第2コア層を設けた非対称マルチモード導波路型フォトダイオード (図 8)³¹⁾ について、第2コア層まで含めた導波路層厚と結合効率の関係を計算したところ、導波路層厚が $4.5 \mu\text{m}$ 付近で第10次の高次導波モードが現れ、これが大きく効率に寄与し、90% 以上の結合効率を得られることがわかった³¹⁾。なお、計算では PLC 光導波路からの入射光はスポットサイズ $4 \mu\text{m}$ のガウシアンビームとし、効率の計算方法は文献 30) の方法に従った。導波路の幅が入射光のスポットサイズに比べて十分広いと仮定すれば、水平 (幅) 方向の結合 η_{ex} は入射光 $\Psi_{ex}(x)$ の積分で表されるので、導波路の幅としてスポットサイズの4倍程度あればほぼ 100% の結合が得られることになる。これらの結果から、導波路の幅を $15 \mu\text{m}$ 、長さを $20 \mu\text{m}$ としてフォトダイオードを作製し、PLC 光導波路とはほぼ等しいスポットサイズを有する DSF ファイバーとの光結合特性を測定した³¹⁾ (図 9)。なお、フォトダイオ-

ド端面には反射防止膜をコーティングしてある。感度は約 0.8 A/W であった。水平方向および垂直方向で、1 dB トレランスはそれぞれ $\pm 5 \mu\text{m}$ と $\pm 2 \mu\text{m}$ が得られた。この値はスポットサイズ変換導波路集積半導体レーザーと同等以上であり、両者が全く同様な実装方法で PLC プラットフォームにハイブリッド集積化が可能なことを示している。

4. ま と め

FTTH に使用される ONU の光技術の現状について、PLC 技術ならびに光半導体デバイス技術の両面から述べた。現状では、小型化・高性能化に加え低コスト・経済性追求が大きな課題であり、光部品を意識させない光・電子共通のユニバーサルな実装技術 (光軸無調整実装) と、それを可能とするデバイス技術の二つの分野でのイノベーションが同時に必要である。これに代えるものとして、PLC プラットフォーム技術と高温動作・高光出力動作・低電流動作を同時に満足するスポットサイズ変換導波路集積半導体レーザー、導波路型フォトダイオードが、ブレークスルーの鍵であると考えられる。また、詳しくは述べなかったが、LSI パッケージの変遷と同様、通信用光デバイスにおいても経済的な非気密封止パッケージの開発が必要不可欠であることも指摘しておきたい。

文 献

- 1) T. Miki: "Fiber-optic subscriber networks and system development," IEICE Trans., **E74** (1991) 93-100.
- 2) K. Okada and F. Mano: "Passive double star system features," *3rd IEEE Workshop on Local Optical Networks*, Tokyo (1991) pp. 5.1.1-5.1.10.
- 3) N. Sinnadurai: "Plastic packaging is highly reliable," *5th Eur. Symp. Reliability of Electr. Devices, Failure Phys. and Analysis*, Glasgow (1994) pp. 387-397.
- 4) M. Kawachi: "Silica waveguide on silicon and their application to integrated-optical components," *Opt. Quantum Electron.*, **22** (1990) 391-416.
- 5) Y. Hibino, F. Hanawa, N. Takato, H. Nakagome, Y. Inoue, T. Miya and M. Yamaguchi: "Silica-based PLC splitters which satisfy reliability requirements for more than 5000 hours," *Optical Fiber Communication Conf.*, San Jose (1994) PD7.1-7.4.
- 6) J. Yoshida, Y. Yamada and H. Terui: "Packaging and reliability of photonic components for subscriber network systems," *IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol.*, **16** (1993) 778-782.
- 7) Y. Yamada, A. Sugita, K. Moriwaki, I. Ogawa and S. Mino: "Silica-on-terraced-silicon platform for optical hybrid integration," *5th Optoelectronics Conf.*, Tokyo (1994) pp. 325-328.

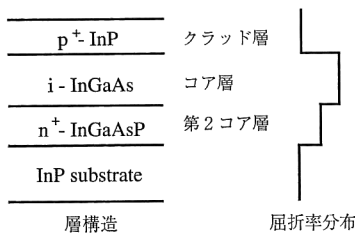


図 8 非対称導波路型フォトダイオードの層構造

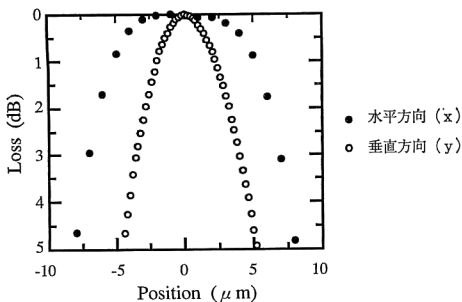


図 9 非対称導波路型フォトダイオードと DSF ファイバーとの光結合特性

- 8) H. Terui, K. Kominato, K. Yoshino, F. Ichikawa, S. Hata, S. Sekine, M. Kobayashi, J. Yoshida and K. Okada: "Optical module with a silica-based planar lightwave circuit for fiber-optic subscriber systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4** (1992) 660-662.
- 9) J. Yoshida, S. Sekine, H. Terui, T. Kominato, K. Yoshino, N. Tsuzuki, M. Kobayashi and K. Okada: "A compact optical module with a 1.3/1.5- μm WDM circuit for fiber optic subscriber systems," *IEICE Trans. Commun.*, **E75-B** (1991) 880-885.
- 10) C.H. Henry, G.E. Blonder and R.F. Kazarinov: "Glass waveguide on silicon for hybrid optical packaging," *J. Lightwave Technol.*, **LT-7** (1989) 1530-1539.
- 11) C.A. Armiento, M. Tabasky, C. Jagannath, T.W. Fitzgerald, C.L. Shieh, V. Barry, M. Rothman, A. Negri, P.O. Haugsjaa and H.F. Lockwood: "Passive coupling of InGaAs/InP laser array and single mode fibers using silicon waferboard," *Electron. Lett.*, **27** (1991) 1109-1111.
- 12) K.P. Jackson, E.B. Flint, M.F. Cina, D. Lacey, J.M. Trehwella, T. Cauffield and S. Sibley: "A compact multichannel transceiver module using planar-processed optical waveguides and flip-chip optical components," *42nd Electron. Components and Technol. Conf.*, San Diego, CA (1992) pp. 93-97.
- 13) Y. Yamada, A. Takagi, I. Ogawa, M. Kawachi and M. Kobayashi: "Silica-based optical waveguide on terraced silicon substrate as hybrid integration platform," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 444-445.
- 14) S. Mino, K. Yoshino, Y. Yamada, M. Yasu and K. Moriwaki: "Optoelectronic hybrid integrated laser diode module using planar lightwave circuit platform," *Electron. Lett.*, **30** (1994) 1888-1890.
- 15) 美野真司, 山田泰文, 吉野 薫, 柳沢雅弘, 安光 保, 森脇和幸: "PLC プラットフォームを用いたハイブリッド光電子集積 LD モジュール", 電子情報通信学会春季大会 (1995) 予定.
- 16) G. Müller, B. Stegmüller, H. Westermeier and G. Wegner: "Tapered InP/InGaAsP waveguide structure for efficient fiber-chip coupling," *Electron. Lett.*, **27** (1991) 1836-1838.
- 17) R.N. Thuston, E. Kapon and A. Shahar: "Two dimensional control of mode size in optical channel waveguide by lateral channel tapering," *Opt. Lett.*, **16** (1991) 306-308.
- 18) K. Kasaya, O. Mitomi, M. Naganuma, Y. Kondo and Y. Noguchi: "A simple laterally tapered waveguide for low-loss coupling to single-mode fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **5** (1993) 345-347.
- 19) T. Koch, U. Koren, G. Eisenstein, M.G. Young, M. Oron, C.R. Giles and B.I. Miller: "Tapered waveguide InGaAs/InGaAsP multiple-quantum-well lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2** (1990) 88-90.
- 20) K. Kasaya, Y. Kondo, M. Okamoto, O. Mitomi and M. Naganuma: "Monolithically integrated DBR lasers with simple tapered waveguide for low-loss fiber coupling," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 2067-2068.
- 21) H. Soda, H. Kobayashi, M. Ekawa, N. Okazaki, O. Aoki, S. Ogita, T. Watanabe and S. Yamazaki: "Tapered thickness spot-size transformer integrated BH MQW lasers," *Integrated Photonics Research Conf. '94*, San Francisco (1994) pp. PD3.1-3.4.
- 22) I. Moerman, M. D'Hondt, W. Vanderbauwhede, G. Coudenys, J. Haes, P. De Dobbelaere, R. Baets, P. Van Daele and P. Demeester: "Monolithic integration of a spot size transformer with a planar buried heterostructure InGaAsP/InP laser using the shadow masked growth technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6** (1994) 888-890.
- 23) 杉江利彦, 東盛裕一, 須崎泰正, 深野秀樹, 岡本 稔, 近藤康洋, 山本ミツ夫, 三富 修, 和田正人, 堺 義久, 岸 健志, 中尾正史, 板屋義夫: "Butt-Joint 型選択成長スポットサイズ変換付き 1.3 μm LD", 電子情報通信学会春季大会, SC-4-5 (1995).
- 24) 堺 義久, 黒崎武志, 佐藤里江子, 東盛裕一, 鈴木扇太, 三富 修, 吉田淳一: "スポットサイズ変換付き LD の PLC との結合及び動特性", 電子情報通信学会春季大会, C-356 (1995).
- 25) 河野健治: 光デバイスのための光結合系の基礎と応用 (現代工学社, 1991) p. 45.
- 26) P. J. A. Thijis, T. Dongen, L. F. Tiemeijer and J. J. M. Binsma: "High-performance $\lambda=1.3\mu\text{m}$ InGaAsP-InP strained-layer quantum well lasers," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **12** (1994) 28-37.
- 27) T. Namegaya, A. Kasukawa, N. Iwai and T. Kikuta: "High temperature operation of 1.3 μm GaInAsP/InP GRINSCH strained-layer quantum well lasers," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 392-393.
- 28) H. Ohashi: "High temperature operation InAsP-based MQW lasers," *Inp & Related Materials Conf.*, Santa Barbara (1994) PDA 3.
- 29) K. Uomi, T. Tsuchiya, M. Komori, A. Oka, K. Shinoda and A. Osishi: "Ultralow threshold (0.56 mA) 1.35 μm InGaAsP/InP compressive-strained-MQW laser," *IEEE Semicond. Laser Conf.*, Hawaii (1994) pp. 20-21.
- 30) K. Kato, S. Hata, K. Kawano, J. Yoshida and A. Kozen: "A high-efficiency 50 GHz multimode waveguide photodiode," *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1992) 2728-2735.
- 31) 赤津祐史, 村本好史, 池田睦夫, 幸前篤郎, 河野健治, 加藤和利, 吉田淳一: "光ハイブリッド実装用 1.3 μm 導波路型フォトダイオード", 電子情報通信学会春季大会, C-387 (1995).