

GaAs 系横電極レーザーと光導波路とのモノリシック集積

岡本 和也・山田 篤志

(株)ニコン 技術開発本部 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

Monolithic Integration of Lateral-Electrode Laser and Optical Waveguide in GaAs/AlGaAs System

Kazuya OKAMOTO and Atsushi YAMADA

R & D Headquarters, Nikon Corporation, 1-6-3, Nishi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140

Design and fabrication of photonic integrated circuits in GaAs/AlGaAs applicable to the optical measurement system are described. A ridge-guided Fabry-Perot (FP) or a distributed feedback (DFB) laser is coupled to a waveguide by the evanescent field, and is fabricated simply without resorting to complicated regrowth procedures. The FP laser has planar lateral electrodes with a dry-etched cavity, and the DFB laser has precisely controlled periodic corrugations formed by the electron-beam lithography. Furthermore, the waveguide is of the strip-loaded type, consisting of two cladding layers having different carrier concentrations to reduce the impurity absorption. The growth structure is optimized theoretically, and the coupled beams from the waveguide devices are observed experimentally. Consequently, this device will be useful as a built-in component for various kinds of optical measurement system.

1. はじめに

1970年頃、Miller¹⁾らによって提案された「集積光学 (integrated optics)」は四半世紀程度経た現在において、様々な形態の「光デバイス」として研究開発が進められている。このなかで、従来の光学定盤上に置かれたレンズ、ミラー等の光学部品によりなる「バルク光学系」を光導波路デバイスにより構成する「導波路型光 IC : OIC (optical integrated circuit)」と称されるものである。そのなかで、「半導体モノリシック型 OIC : PIC (photonic integrated circuit) とも称される」は発光部、導波路デバイス部、受光部をすべて半導体基板上に集積化したもので、光源等は外付けとなる「ハイブリッド型 OIC」の短所を凌駕する最終的な形態と考えられる。重要な形態でありながら、これまで立ち遅れていたのは光導波路自身の特性の問題 (伝搬損失の点) や光素子間 (特にレーザー・導波路間) の接続技術等を中心とする作製プロセスの難しさに大きく起因するものと

いえる。最近では、結晶成長装置の充実、微細加工技術の進歩により大幅に躍進し、光ヘテロダイン検波用 PIC²⁾ など様々なデバイスが報告されてきているが、半導体レーザー (LD) 単体の素子と異なり、PIC の素子長は一般に数 mm 以上となりうるため、いかに再現性のよいプロセスを確立するかが重要であり、実用化に向けてはさらなる研究が必要とされている。本論文においては、これまで筆者らが開発した様々な作製プロセスをもとに、LD と単一モード導波路との集積化方式を中心に光計測装置への適用を目的とした PIC の検討を行う。ここでは、結晶成長回数を抑制し、かつ導波路伝搬特性を劣化させることのない、新たな構造を提案し試作した結果について報告する。なお、ファブリー・ペロー (FP) 型/分布帰還 (DFB) 型双方の GaAs/AlGaAs 系横電極 LD と Y 分岐導波路および TE/TM モードスプリッターならびに受光素子とのモノリシック集積について述べるが、本構造は他の導波路デバイスをも容易に付加/接続可能である。

2. 光集積デバイスの設計

2.1 PIC に要求される項目と設計指針

LD 単体の場合、デバイス作製後に結晶の劈開によりレーザー反射端面を形成するが、PIC においては様々なデバイスが共存するため、この劈開という手段により反射器を構成することは困難となる。導波路デバイス単体の観点からは「単一モードで伝搬損失が低いこと」が求められるが、PIC の場合「レーザー反射器の形成と導波路への結合方式の確立」が重要な項目としてあげられる。これまで報告されている結合方式のなかで、多用されているものが「端面直接結合方式」である。これはレーザー活性層と導波路端面とを直接接続させる方法であり、エッチングと多数回の結晶成長による DIC (direct coupling) 法³⁾、導波路部分を局所的に混晶化させる IID (impurity-induced disordering) 法⁴⁾、有機金属気相エピタキシャル (MOVPE) 成長特有の面積依存選択成長法⁵⁾、などが報告されている。いずれの方法も結合効率の点などにおいて優れており実用レベルに近いものと考えられるが、プロセスの複雑さ、大きな導波路伝搬損失、適用できる基板が InP 等に限られるなどの短所も各々有している。本論文では LD/導波路の集積化において、Fig. 1 に示すような「エバネッセント波結合 (evanescent-field coupling) 法 : EFC 法」を適用し、結晶成長回数を抑えた簡易な作製プロセスを主眼におき、さらに LD 用 pn 電極配置を横型とし、導波路を上部クラッド 2 層の装荷型とすることで、その伝搬損失の低減をも目的としたデバイスの試作を行うこととした。

2.2 EFC 型 PIC の設計/解析

本節では、この EFC 型 PIC について、1) 集積化デバイスの層構造設計、2) 装荷型導波路の吸収損失解析、3) 電流密度ベクトル解析、の 3 項目の設計/解析を行う。ここでは、LD としてエッチングミラー共振器を利

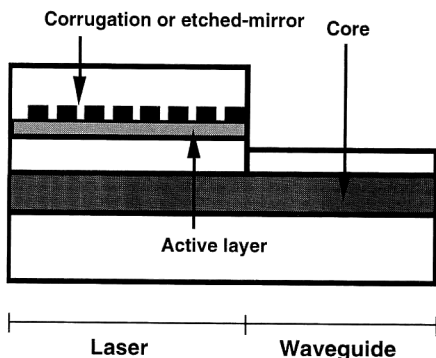


Fig. 1. Basic structure of EFC scheme.

用する FP 型について検討する。

2.2.1 集積化デバイスの層構造設計

ここで述べる EFC 法は Suematsu らが提案した ITG (integrated twin guide) レーザー⁶⁾とその原理を同一にする。類似する構造として、LOC (large optical cavity) レーザーがあるが、結合する外部導波路に対し精密な電界分布が要求されるとともに、結合効率も低く最大 50%程度⁷⁾とされ好ましくない。この EFC 法においては、偶/奇の 2 モードが相互に干渉し、光波は LD/導波路間を往復しながら進行してゆく。この 2 つの導波路が強く結合した状態においては、結合導波路の特性方程式から 2 つの固有モードをもとにした解析が要求される。ここでは Fig. 2 に示す EFC 構造において、AlGaAs-clad 1 および clad 4 は十分に厚いものと仮定し、両層を含む全 8 層構造として計算した。さて、レーザーから導波路へ光パワー移行する長さを完全結合長 L_c と定義すると、 L_c は次式で示される。

$$L_c = \lambda / 2 [\text{Re}(n_e) - \text{Re}(n_o)] \quad (1)$$

ここで、 $\text{Re}(n_e)$ 、 $\text{Re}(n_o)$ は偶モード、奇モードそれぞれの複素等価屈折率の実数部、 λ は波長である。一方、結合導波路の電磁界方程式を直接解くことで求める 2 つの固有モードに関して、伝搬方向 z に対するトータルな電界分布 E_{total} は式 (2) で示される。

$$E_{\text{total}} = \Psi_e \exp[-jk_0 \text{Re}(n_e)z] \exp\left(\frac{g_e}{2}z\right) + \Psi_o \exp[-jk_0 \text{Re}(n_o)z] \exp\left(\frac{g_o}{2}z\right) \quad (2)$$

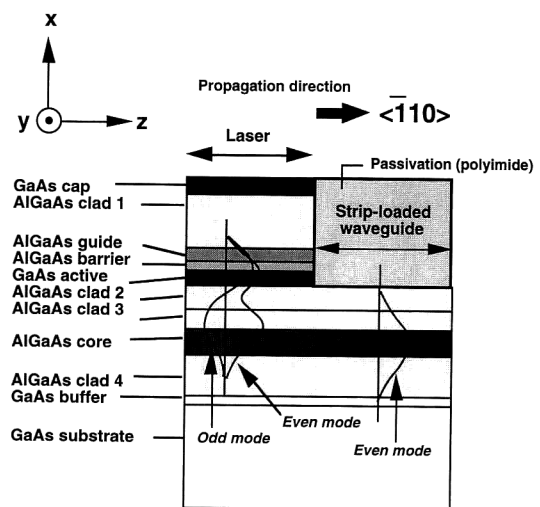


Fig. 2. Layer structure and electric field profiles of the designed EFC-PIC.

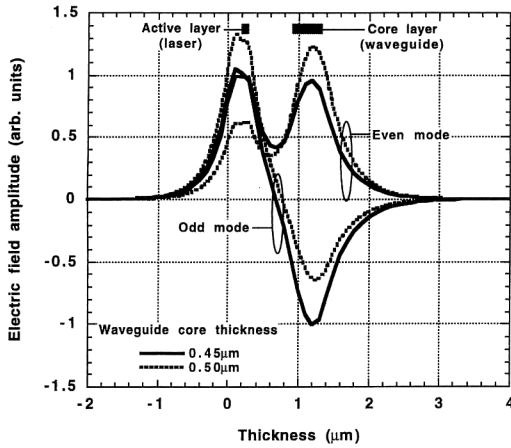


Fig. 3. Electric field profiles dependence on waveguide-core thickness.

Table 1. Calculated parameters for even and odd modes.

		Even mode	Odd mode
Confinement factor	Γ_l	9.22×10^{-2}	8.82×10^{-2}
Effective refractive index		3.5175	3.5132
	n_l		
Modal gain (cm^{-1})	g_l	18.9	18.2

ここで Ψ_e , Ψ_o は偶モード、奇モードの各電界振幅である。同式ではレーザー領域の増幅を考慮に入れ、下式で定義される modal gain g_l を含めてある。

$$g_l = \Gamma_l G m_l / m_i \quad (3)$$

ここで Γ_l , m_l は各モードのレーザー領域の閉じ込め係数および複素屈折率の実数部である。また、 m_i はレーザー活性層の屈折率、 G は利得である。ここではスラブ導波路構造を仮定し、電界分布を Maxwell 方程式を解くことにより近似的に求めた。また、後に GaAs バルク活性層を有する DFB レーザーを集積することを考慮し、導波路層の膜厚を変化させることで試作する構造を決定した。ここで求められる構造とは、偶モード、奇モードの電界分布が互いに対称性を有し、両モードの modal gain が等しい状態とした。一例として、Fig. 3 に導波路コア (AlGaAs core) 厚が $0.45 \mu\text{m}$, $0.50 \mu\text{m}$ の場合の電界分布の差異を示す。前者は両モード間に対称性が見られるものの、後者には見られない。コア厚 $0.45 \mu\text{m}$ の場合について、各パラメータの計算結果を Table 1 に示す。両モードの modal gain はほぼ等しい値を示している。また、 z 軸方向への伝搬に伴う光出力移行の様子を Fig. 4 に示す。前者は (a) に示されるよ

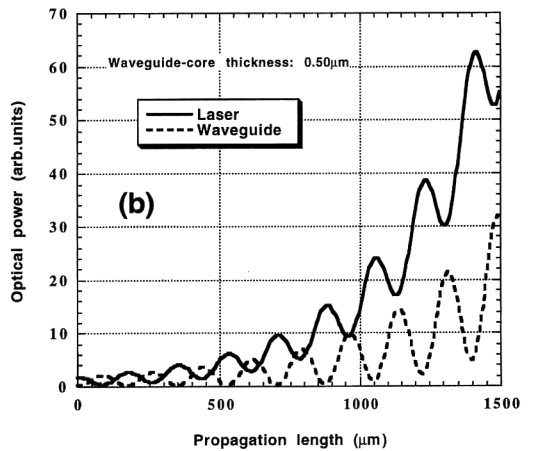
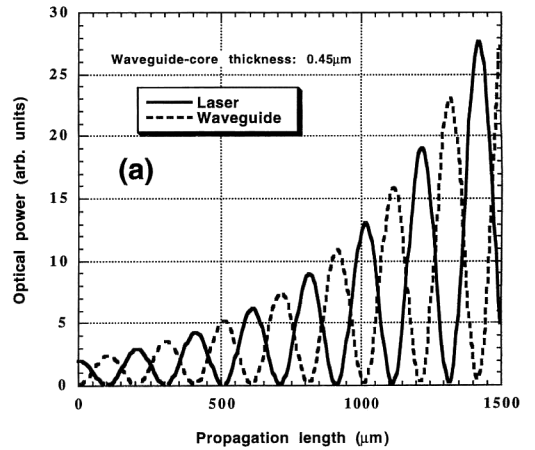


Fig. 4. Optical power in the active layer and waveguide, as a function of propagation length. $G = 200 \text{ cm}^{-1}$. (a) waveguide core: $0.45 \mu\text{m}$, (b) waveguide core: $0.50 \mu\text{m}$.

うに、レーザー領域で発振した光は導波路に移行しながら指数関数的に増幅されていく様子がわかる。一方、後者の場合、(b) に示すように、このような良好な結合は望めない。したがって、ここでは (a) の構造を採用した。また、 L_c の 3 倍にあたる $303 \mu\text{m}$ をレーザー共振器長の現実的な値と据え、ここでは実効結合長 L_{eff} と定義した。

2.2.2 装荷型導波路の吸収損失解析

従来、試作されてきた EFC 型構造デバイス⁶⁻⁸⁾ (ITG レーザー等) においては、レーザー発振のためのキャリア注入電極を上面に、接地電極を下面に配する構造であったため、直列抵抗低減などのために導波路層への不純物ドーピングが必要とされていた。この場合、必然的に光波の不純物/キャリア吸収が生じ、低伝搬損失な

Table 2. Layer structure of the EFC-PIC.

Layer	Al mol fraction x	Thickness (μm)	Doping type	Carrier concentration (cm^{-3})
1	GaAs-cap	0	P	5×10^{18}
2	AlGaAs-clad 1	0.35	P	5×10^{17}
3	AlGaAs-guide	0.15	P	5×10^{17}
4	AlGaAs-barrier	0.30	P	5×10^{17}
5	GaAs-active	0	undoped	—
6	AlGaAs-clad 2	0.35	N	5×10^{17}
7	AlGaAs-clad 3	0.35	undoped	—
8	AlGaAs-core	0.165	undoped	—
9	AlGaAs-clad 4	0.3	undoped	—
10	GaAs buffer	0	N	1×10^{18}
11	GaAs substrate	0	N	1×10^{18}

Laser section : layer 1-6, waveguide section : layer 6-9.

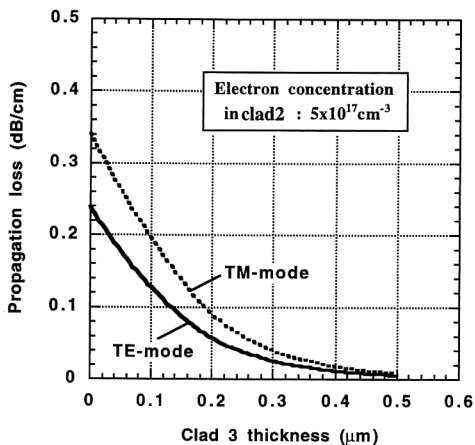


Fig. 5. Calculated propagation loss as a function of clad 3 thickness.

チャンネル導波路の形成は困難となる。本研究で提案するEFC型PICは横電極構造とすることで、導波路ならびにクラッド層の不純物をノンドーピングにできる大きな特徴を有する。ここでは、n型キャリアによる光吸収係数 α^9 により得られる複素屈折率虚数部を加味した吸収損失を、導波モードの固有値方程式から求めた。Table 2に示す層構造において、上部第2クラッド層(AlGaAs-clad 2)の電子濃度を $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ とし、上部第3クラッド層(AlGaAs-clad 3)、コア層、下部クラッド層(AlGaAs-clad 4)はすべてノンドーピング、すなわち虚数部をゼロと仮定した場合について、上部第3クラッド層の膜厚と伝搬損失との関係を計算した。結果をFig. 5に示す。TEモードについては、上部第3クラッド層膜厚を $0.15 \mu\text{m}$ 以上にすれば伝搬損失 0.1 dB/cm に抑制できることがわかる。ここでは、結晶成長における再現

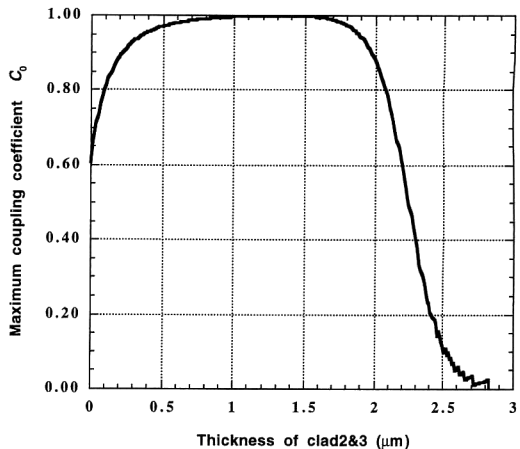


Fig. 6. Maximum coupling coefficient as a function of clad 2 & 3 thickness.

性とLDとしての共振器長を考慮し、第2、第3クラッド層の膜厚を各 $0.3 \mu\text{m}$ に設定した。また、LD/導波路間の最大結合係数 c_0^{10} と上部クラッド膜厚との関係についての計算結果をFig. 6に示す。膜厚 $0.5 \mu\text{m}$ において95%以上の高効率結合が可能である。また、 $0.5 \mu\text{m}$ 以下での c_0 の急激な低下は、きわめて強い結合モード下では電界分布が大幅に変化し、互いに位相整合する導波路間でも100%の結合が生じ得ないという解析結果¹⁰に符合する。なお、横型電極の接地層である上部第2クラッド層(nドーピング層)についてはコンタクト抵抗低減のため、電極部に不純物ドーピングを施した。

2.2.3 電流密度ベクトル解析

以上により得たPIC構造に関して電流密度ベクトルを計算する。LD領域への高濃度キャリア注入(電流注入)時においては、コア層へのリークが問題となる恐

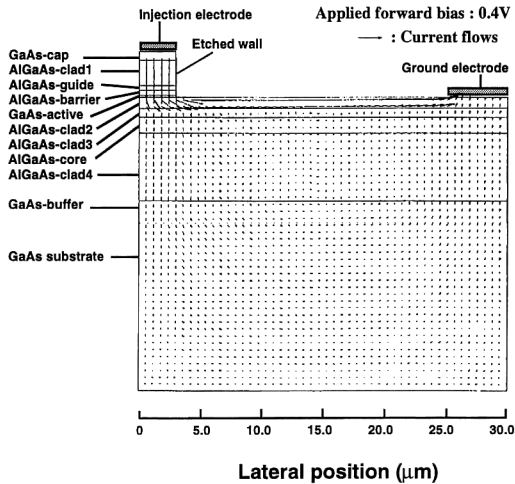


Fig. 7. Calculated current flow in the EFC-PIC.

れがある。ここでは設計した構造における電流密度ベクトルを求めることで、コア層への影響を検討する。さて、デバイス解析の基礎方程式¹¹⁾は、Poisson 方程式、電子電流連続方程式、正孔電流連続方程式の3式であり、これらを一定の境界条件（オーミックコンタクト境界条件、電流と電界の垂直方向成分をゼロとする自然境界条件等）のもとで解けば、その電気特性を求めることができる。また、GaAs/AlGaAsヘテロ界面については、バンドパラメータ¹¹⁾を導入することでヘテロ界面での伝導帯ならびに荷電子帯での不連続性を処理した。半導体の各パラメータ（禁制帯幅、電子親和力、状態密度など）は報告値¹²⁾を用いた。印加電圧0.4Vのときの注入電流密度ベクトルをFig.7に示す。明らかに電流はn型不純物ドーパされた第2クラッド層のみに選択的に存在し、導波路領域その他への電流はほとんど見られない。以上の結果をもとに決定した、試作するEFC型PICの層構造をTable2に示す。

3. FPレーザー/単一モード導波路デバイスの集積化プロセスと試作評価

3.1 プロセス工程に関する検討

まず、始めに試作するPICの設計上面図をFig.8に示す。リッジ型レーザー側部に接地電極を設けた横電極レーザー領域とY分岐装荷型単一モード導波路とがモノリシックに集積されている。次に、この横電極EFC型PICの作製工程をFig.9に示す。

(工程I) n型(100)GaAs基板の上に、MOVPE法により所望の結晶成長を行う。結晶成長温度は最上層以外

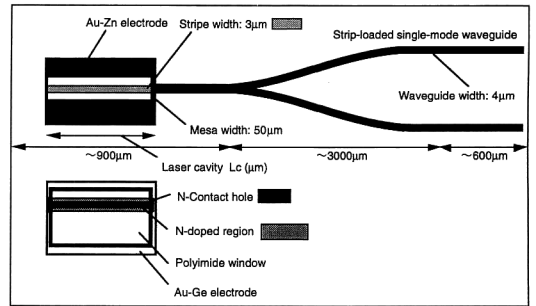


Fig. 8. Pattern of the EFC-PIC with Y-branch waveguide.

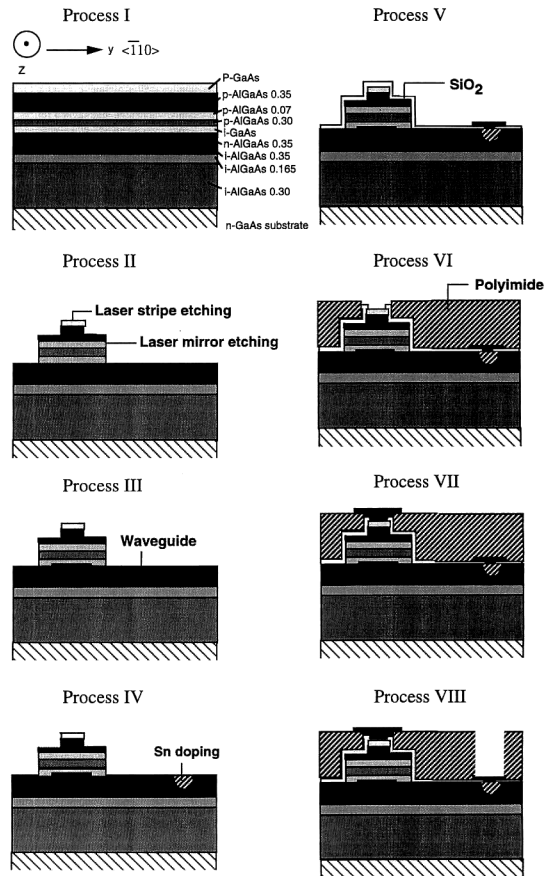


Fig. 9. Process flow of the EFC-PIC.

780°Cである。

(工程II) レーザー部の注入電流狭窄のためのストライプ領域およびレーザーメサ領域を順にドライエッチング(RIE)する。メサエッチングにおいては、同時にエッチングミラーの形成も兼ねる。RIE¹³⁾はBCl₃/Cl₂系ガスを用い(ガス圧は25mTorr)、0.34W/cm²の出力

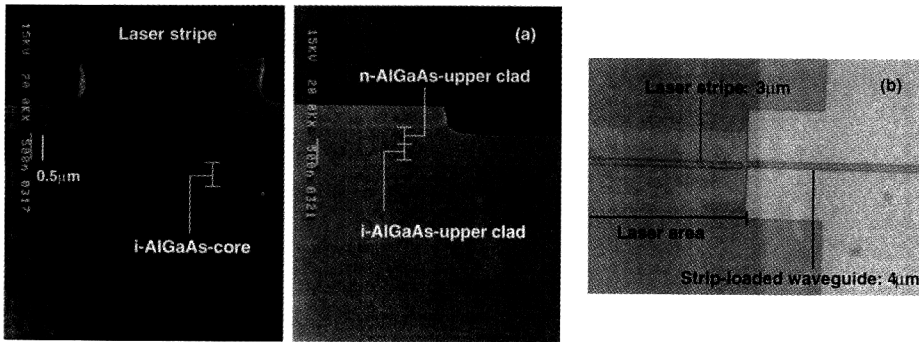


Fig. 10. Images of etched regions: (a) SEM, (b) microscope.

密度にて行った。エッチング速度は $\sim 38 \text{ \AA/s}$ である。

(工程III) 装荷型導波路形成のためのRIEを行う。

(工程IV) 接地電極領域のコンタクト抵抗低減のため、n型不純物ドーピングを行う。ここでは、Snドーピングの SiO_2 薄膜(Sn化合物濃度: 2.0 wt.%)を使用し¹⁴⁾、急速アニール条件を 900°C 、10 min (Arガス流量: 100 sccm)とした。これにより表面濃度 $C_s: 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、拡散深さ $x_j < 0.5 \text{ \mu m}$ の浅いn型ドーピング層を形成した。

(工程V) 素子フィールド領域全体に酸化膜をプラズマCVD法等により施し、コンタクトホールならびにn型電極であるAu-Geを真空蒸着し所望のパターニングを行う。

(工程VI) デバイスの平坦化およびエッチング端部の終端のため、低膨張係数を有する非感光性ポリイミド(PIX-L 110 sx)をコートし、所定の条件で熱処理を終える。その後、酸素ガスプラズマ処理によるエッチバックを行い、レーザー最表面(p型層)を露出させ、かつフィールド SiO_2 を緩衝フッ酸によりエッチング除去する。

(工程VII) p型電極としてAu-Znを蒸着し、パターニングを行う。

(工程VIII) 酸素ガスを用いたプラズマエッチングにより、n型接地電極を露呈させ素子は完成する。

さて、MOVPE結晶成長後のSEM観察および劈開面の顕微フォトルミネッセンス測定より膜厚、組成とも設計通りであることを確認した。また、キャリア濃度測定からもほぼ設計した濃度を満足し、アンドープレベルは $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることも確認した。Fig. 10(a)は工程IIの後のSEM断面像である。設計通り第2クラッド層までエッチングは進行している。また、Fig. 10(b)には工程IIIの上面から観察した光学顕微鏡写

真を示す。ストライプ/メサ/導波路ともきわめて良好にアライメントされている。

3.3 EFC型PICの基本特性評価

共振器長 320 \mu m 、ストライプ幅 3 \mu m のレーザー端部からの光出力特性測定を行い、発振閾値 80 mA (室温パルス測定: 繰り返し周波数 3 kHz 、パルス幅 300 ns)、波長 0.883 \mu m のレーザー光を確認した。また、Fig. 11に示すように、導波路側からはほぼ等量の導波光が観察された。結合効率に関連する評価として、ここでは導波路端部からの光量とLD端部からの光量の比較を行い、レーザー光出力 9.6 mW/facet の際に導波路端から得られる光量はトータル 1.2 mW であった。すなわち、結合損失その他を含めた総合損失は 9.0 dB と見積もられる。この損失の原因としては、レーザーから導波路への横方向結合損、光導波路の吸収/散乱損失等が考えられる。次に、Fig. 12(a)にはモード干渉型TE/TMモードスプリッター(MS)¹⁵⁾との集積デバイスの概念図を示す。このMSは、ダブルモード導波路における各横モードの0次と1次モード間の干渉について、伝搬定数の差異を利用したものである。ダブルモード導波路長が 3000 \mu m の場合について、Fig. 12(b)には導波路出射端からの近視野像を示す。 6.5 mW のレーザー出力(TEモード光)において、ARM1および参照ポートであるARM3からのみ強い出力が得られていることがわかる。また、ARM1/ARM2間の光出力比は 22 dB と高い。次に、受光デバイスとの集積化についての結果をFig. 13に示す。受光部はLD部と同一のEFC構造である。ここでは、0バイアス印加時の受光電流を微小電流測定計(KEITHLEY-617)にて測定した。レーザー発振閾値 120 mA 近傍から受光電流は増加し、受光素子長 300 \mu m において 500 nA 程度の受光電流を検出した。試作したレーザーの発振閾値が高い原因につい

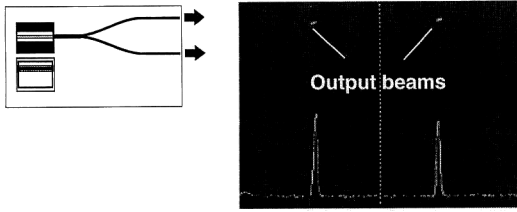


Fig. 11. Light output from the two waveguides.

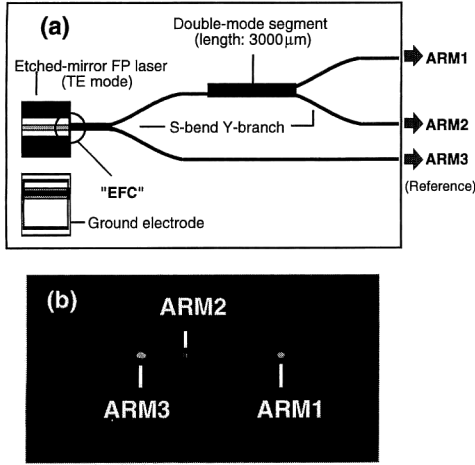


Fig. 12. Structure of the PIC incorporating a TE/TM mode splitter (a) and NFP of the TE-mode output beams (b).

ては、プロセス条件の不備（電極の高コンタクト抵抗、ポリイミドの絶縁終端不良、エッチングミラーレーザー端面の表面性状劣化等）、もしくはデバイスの平面構造における、キャリア注入電極から横接地電極までの直列抵抗の負荷、などが考えられる。ただし、いずれも今後の改良により特性向上が見込まれる要因である。

3.4 DFB レーザーを集積した EFC 型 PIC

FP レーザー集積時のエッチング面に依存した特性変動の防止と単一縦モードレーザー発振光源との集積化を目的とし、本節では DFB レーザーとの集積化を試みる。プロセス工程は FP-PIC に準ずるものであるが、高コントラストな回折格子形成工程¹⁶⁾が含まれるため、プロセスはやや複雑となる。ここでは、電子線 (EB) 描画法を適用し、この場合、回折格子を所望の位置に描画するための短冊状のエッチングアライメントマーク形成、および液層エピタキシャル (LPE) 成長後にアライメントを可能とするための SiO₂ 薄膜パターニング、回折格子形成の EB 描画および RIE、そして LPE 成長の 4 工程が付加される。Fig. 14 に示す短冊状マーク検

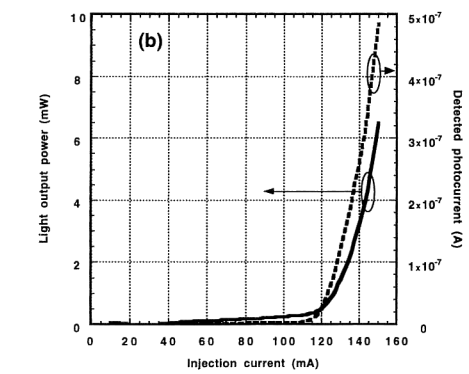
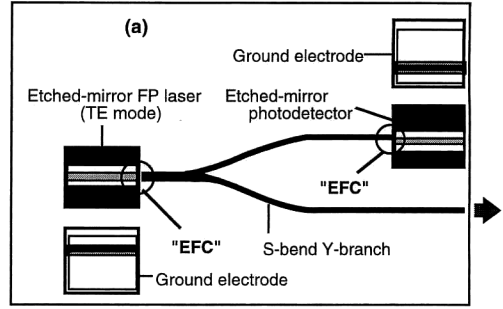


Fig. 13. Structure (a) and characteristics (b) of the PIC incorporating an EFC-photodetector.

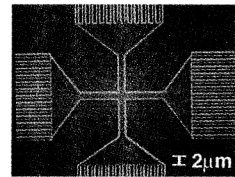


Fig. 14. SEM micrograph of the designed EB alignment mark.

出法により、従来の金属マーク法に比べて汚染がなく高精度にアライメントが可能となった（測定アライメント精度： x 方向 $\pm 0.25 \mu\text{m}$ 、 y 方向 $\pm 0.30 \mu\text{m}$ ）。また、回折格子形成においては、高い結合係数を得るために duty rate を 75% に制御した 2 次回折格子をプラズマ耐性ポジレジスト (ZEP-520) を用いて行った。RIE により形成された回折格子の SEM 写真を Fig. 15 に示す。また、FP 発振モード抑圧のために RIE 端面は 7° 傾斜させる工夫¹⁷⁾も加えた。Fig. 16 には n 型電極形成後のデバイス上面図を示す。アライメントは良好であり、試作された DFB レーザー（共振器長 $300 \mu\text{m}$ 、ストライプ幅 $3 \mu\text{m}$ ）の発振閾値は 160 mA（室温パルス）、発振

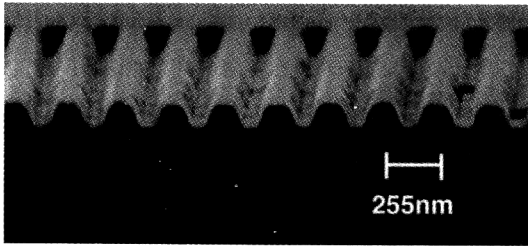


Fig. 15. SEM micrograph of controlled periodic corrugations on GaAs.

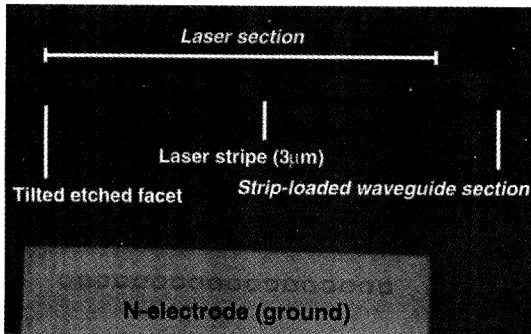


Fig. 16. Microscopic image of the DFB type EFC-PIC.

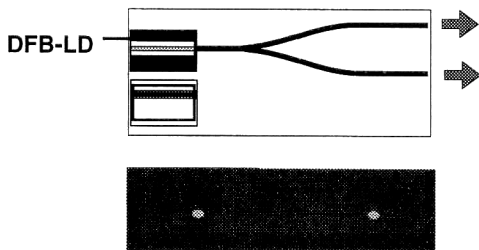


Fig. 17. Light output from the two waveguides incorporating the DFB type EFC-PIC.

波長は $0.884 \mu\text{m}$ であり、温度依存性は $0.09 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 以下であった。LD 端部からの出力 $6.5 \text{ mW}/\text{facet}$ 時に Y 分岐導波路端 (FP モードの場合と同様に等量の単一モード出射光を確認, Fig. 17) からのトータル出力は 0.5 mW であり、総合損失は 11.1 dB と見積もられる。この損失の原因としては FP 型 PIC と同様の原因に加え、回折格子装荷に伴う電界分布に関して、層構造の最適化を施していない点などが考えられる。

4. 結 論

半導体レーザー/単一モードチャンネル導波路を集積一体化した、EFC 型 PIC を試作/評価し以下の結論を得た。

1) エバネッセント波を用いた結合 (EFC) 法において、偶モード/奇モード間のモードプロファイルを解析することで、モード干渉効果による結合方式において簡便に高効率な結合が可能であることを示した。結晶成長回数は、FP レーザーの場合で 1 回、DFB レーザーの場合でも 2 回であり、チャンネル導波路を集積した PIC においては最低の回数で達成される。

2) レーザー接地電極を横側部に配置することで、光導波路領域 (クラッド, コア部) をノンドープ層とすることができ、本質的に導波路の低伝搬損失が達成される。また、導波路部への不要なキャリア注入も抑制されることで屈折率の変動等も抑えられ、制御性に優れた PIC を構築した。

3) Y 分岐導波路, TE/TM モードスプリッター, ならびに同一の EFC 構造を有する光検出器との集積を達成した。

以上、本光集積デバイスは様々な光計測システムの小型集積化に期待されるものとして結論づけられ、現在、作製プロセスの最適化とともに、導波路型顕微鏡ヘッドや光波面検出型微小変位センサー¹⁸⁾などの開発を検討中である。

本研究の遂行にあたり、熱心に議論していただいた東京大学大学院工学系研究科多田邦雄教授ならびに中野義昭助教授に深く感謝いたします。

文 献

- 1) S. E. Miller: "Integrated optics: an introduction," *Bell Syst. Tech. J.*, **48** (1969) 2059-2065.
- 2) F. Fidorra, H. Heidrich, R. Kaiser and D. Trommer: "Monolithic integrated heterodyne receiver," *Proc. 8th Annual Meeting of Laser and Electro-Optical Society* (San Francisco, 1995), paper IO1. 1.
- 3) C. E. Hurwitz, J. A. Rossi, J. J. Hsieh and C. M. Wolfe: "Integrated GaAs-AlGaAs double-heterostructure lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **27** (1975) 241-243.
- 4) T. Hirata, M. Maeda, M. Suehiro and H. Hosomatsu: "GaAs/AlGaAs GRIN-SCH-SQW DBR laser diodes with passive waveguides integrated by compositional disordering of the quantum well using ion implantation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L961-L963.
- 5) M. Aoki, M. Takahashi, M. Suzuki, H. Sano, K. Uomi, T. Kawano and A. Takai: "High-extinction-ratio MQW electroabsorption-modulator integrated DFB laser fabricated by in-plane bandgap energy control technique," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **48** (1992) 580-582.
- 6) Y. Suematsu, M. Yamada and K. Hayashi: "Integrated twin-guide AlGaAs laser with multiheterostructure," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-11** (1975) 457-460.
- 7) J. L. Merz, R. A. Logan and A. M. Sergent: "GaAs integrated optical circuits by wet chemical etching," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15** (1979) 72-82.
- 8) J. C. Campbell and D. W. Bellavance: "Monolithic laser/

- waveguide coupling by evanescent fields," IEEE J. Quantum Electron., **QE-13** (1977) 253-255.
- 9) W. G. Spitzer and J. W. Whelan: "Infrared absorption and electron effective mass in n-type gallium arsenide," Phys. Rev., **114** (1959) 59-63.
 - 10) Y. Suematsu and K. Kishino: "Coupling coefficient in strongly coupled dielectric waveguides," Radio Sci., **12** (1977) 587-592.
 - 11) 横山清行, 富沢雅彰, 吉井 彰: "AlGaAs/GaAs ヘテロ構造デバイスの二次元解析", 電子通信学会論文誌, **J67** (1984) 810-817.
 - 12) H. C. Casey Jr. and M. B. Panish: *Heterostructure Lasers* (Academic Press, New York, 1978).
 - 13) K. Okamoto, A. Yamada, Y. Nakano and K. Tada: "Design and fabrication of monolithically integrated lateral-electrode etched-mirror laser with Y-branch single-mode waveguide in GaAs/AlGaAs," Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) 4809-4814.
 - 14) K. Okamoto, A. Yamada, Y. Shimogaki, Y. Nakano and K. Tada: "Characterization of p- and n-type impurity diffusions in GaAs from doped silica films," Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) 1127-1134.
 - 15) K. Okamoto, M. Doi, T. Irita, Y. Nakano and K. Tada: "Fabrication of TE/TM mode splitter using completely buried GaAs/GaAlAs waveguide," Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) 151-155.
 - 16) K. Okamoto, Y. Nakano and K. Tada: "Formation of high-contrast periodic corrugations by optimizing optical parameters of photoresists in 325 nm laser holographic exposure," Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) 1286-1292.
 - 17) D. Marcuse: "Reflection loss of laser mode from tilted end mirror," IEEE J. Lightwave Technol., **7** (1989) 336-339.
 - 18) M. Doi, Y. Iwasaki, T. Shionoya and K. Okamoto: "High-resolution displacement sensor using mode interference in the optical waveguide," *Proc. 8th European Conf. on Integrated Optics* (Stockholm, 1997) EWD5.