

一体化外部共振器レーザの開発 (I)

目 次

1. 序	2
2. 素子の構造設計	3
2.1 素子構造	3
2.2 動作原理	3
2.3 各層の層厚設計	4
3. 素子の作製プロセス	5
3.1 プロセス・フロー	5
3.2 プロセス上の問題点	8
4. 素子の基礎特性評価	9
5. まとめ	10
参考文献	11
図表	13

1. 序

将来の高品質光ファイバ通信用光源として、発振周波数の安定な単一縦モード半導体レーザの開発が望まれている。過去数年間、このような半導体レーザを実現するために種々の構造が提案されてきた。代表的なものとしては、分布帰還型 (distributed feedback, DFB) レーザ¹⁾、分布ブラッグ反射器 (distributed Bragg reflector, DBR) レーザ²⁾、へき開結合共振器 (cleaved coupled cavity, C³) レーザ³⁾、短結合共振器 (short coupled cavity, SCC) レーザ⁴⁾、グリンロッド外部共振器 (GRINROD external cavity) レーザ⁵⁾等がある。これらのレーザは、単一縦モード発振をするが、駆動電流による直接強度変調を行うと、いわゆる周波数チャープニングを生じる。これは、半導体レーザを強度変調すると、同時にFM変調もかかってしまうために、発振スペクトルの半値幅が広がってしまうという現象である。一方、半導体レーザの外部にミラーもしくは回折格子を置いて外部共振器構成とすることで半導体レーザの発振周波数を安定化するという試みもなされている。このような構成で半導体レーザの発振周波数を安定化すれば周波数チャープニングが抑圧できることは実証されているが⁶⁾これを機械的に安定化することは困難である。すなわち、実験室内でこのようなセット・アップをすることは可能であるが、これを安定なデバイスとして光ファイバ通信システムに導入していくことは容易ではない。そこで、外部共振器と半導体レーザを一体化した一体化外部共振器付レーザとすることが考えられる。本技術資料は、この一体化外部共振器 (integrated passive cavity, IPC) レーザ開発の中間報告書である。

我々は、まず半導体レーザと外部共振器を一体化するために、新規なデバイス構造を考案した⁷⁾。外部共振器は装荷型光導波路となっており、レーザ活性層のストライプと自己整合的に形成できる。この自己整合集積装荷型導波路 (self-aligned integrated loaded guide, SAIL guide) は、選択エッチングによって容易に作製することができ。以下、

本文において、この SAIL guide IPC レーザの構造と作製方法について詳細に述べるとともに、その基礎特性の評価結果についても報告する。

2. 素子の構造設計

2.1 素子構造

SAIL guide レーザの構造を図1に示す。活性共振器 (active cavity) は平面状の導波層 (waveguide layer) とストライプ状の分離層 (separation layer) を含む以外は通常の埋込みヘテロ構造 (buried heterostructure, BH) レーザと同じである。外部共振器 (passive cavity) は導波層と装荷層 (load layer) よりなっているが、装荷層には分離層と同じ層が用いられている。選択エッチングを用いることによって装荷層ストライプは活性層ストライプと自己整合されている。この構造においては、外部共振器中の光が装荷層の下に横方向閉込めされるので、外部共振器中の光の損失は少なくなると考えられる。

2.2 動作原理

SAIL guide レーザの動作原理は、基本的には半導体レーザの外部に置いたミラーによってレーザに光を帰還する場合と同一である。この場合、SAIL guide レーザの活性共振器が単体レーザに対応し、外部共振器の端面が外部ミラーに対応する。この構成によって縦モードが単一となり、かつ発振周波数が安定化できる原理は、参考文献8) に詳細に述べられているが、以下に簡単な説明を行う。まず、縦モードが単一になる理由であるが、これはいわゆる複合共振器による効果である。通常の単一共振器のレーザでは、共振器の光学長 $N_{eff} L$ 、発振波長 λ_0 に対して、

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2 N_{eff} L} \quad (1)$$

の間隔で、多くの縦モードが発振する。これに対して、レーザを複合共振器とすると、2つの共振器における位相条件

を満す波長の光しか発振できなくなるために単一の波長で発振することになる(図2参照)。次に、発振周波数が安定化される原理であるが、まず通常の(外部共振器付でない)レーザにおいて周波数チャープが生じる原因について述べる。通常の半導体レーザにおいては、直接強度変調を行うために駆動電流を変化させると、活性層の実効屈折率が変化する。これは、低周波変調の場合には、主に電流注入による温度上昇によるものであり、高周波変調の場合にはキャリア数の変動によるものである。活性層の屈折率が変動すると、共振器の光学長が変動することになるので発振周波数が変調されることになる。これに対して、外部共振器付のレーザの場合には、変動を受ける活性共振器に対して、安定な外部共振器が付加されたことになるので発振周波数が安定化されることになる。従って、この効果は活性共振器長に対する外部共振器長の比が大きい程顕著になる。

2.3 各層の層厚設計

SAIL guideレーザの作製においては、各層(特に、活性層、分離層、導波層)の層厚をどのように選ぶかが重要である。まず、分離層の層厚であるが、これを厚く($0.5\mu\text{m}$ 程度)すると、活性共振器内での活性層と導波層間の光の結合が方向性結合器的となり、素子特性を複雑にする。しかし、分離層は装荷層を兼ねているので、これを薄く($0.05\mu\text{m}$ 以下)すると、外部共振器中での光の損失が大きくなる。これらの兼ねいから、分離層の層厚は $0.1\mu\text{m}$ 程度が適当であると考えられる。分離層(装荷層)の層厚を $0.1\mu\text{m}$ とした場合の装荷型光導波路部の導波層の有効屈折率を図3に示す。図中Aは基本モード、Bは層厚方向の1次モードに対応している。有効屈折率が3.2になるところが各モードのカット・オフ条件であり、基本モードのみが導波する導波層の層厚は $0.35\sim 1.25\mu\text{m}$ の範囲である。一方、活性共振器中での光の閉込め係数(活性層中に閉込められる光の割合)が小さくなるとレーザのしきい値電流が増加するが、導波層を厚

くするとこの係数が小さくなることから、導波層の層厚は $0.5\mu\text{m}$ 程度が妥当であると考えられる。ここで $0.35\mu\text{m}$ としないのは、カット・オフぎりぎりの設定では外部共振器中の光の損失が大きくなるためである。活性層の層厚は、今回作製した素子については、従来我々が作製してきた単体レーザと同じく $0.15\mu\text{m}$ とした。その他の層の層厚も従来の単体レーザと同じである。これらの層厚は表1にまとめて示してある。

3. 素子の作製プロセス

3.1 プロセス・フロー

SAIL guide レーザのプロセス・フローを図4に示す。以下、図中の各項目について、説明する。

(1) 1回目エピ成長

(100) $\text{m}^+\text{-InP}$ 基板の上に、表1に示した6層を液相エピタキシャル (liquid phase epitaxial, LPE) 成長する。

(2) ストライプ・メサ・エッチング

エピ基板の上に NSG を全面堆積した後、通常のホトリソグラフィ技術によってストライプ状のレジスト・マスクを形成し、NSG をエッチングする。この際、レジスト・ストライプの幅は $4.3 \pm 0.2\mu\text{m}$ 、NSG ストライプの幅は $3.8 \pm 0.3\mu\text{m}$ に制御している。NSG ストライプが細くなるのはサイド・エッチングの効果による。次いで、NSG をマスクとして、キャップ層、p-クラッド層、活性層、分離層をエッチングする。キャップ層のエッチングは Br-メタノール (2wt%) により行うが、他の層は選択エッチング液により行う。選択エッチング液としては、InP (p-クラッド層、分離層) に対しては $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4 = 1:2$ (体積比)、 InGaAsP に対しては $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:1:5$ (体積比) を用いる。ストライプを (011) 方向に形成すると、Br-メタノールによるエッチングは逆メサ形状となるが、選択エッチングによるエッチングは垂直メサになる。結果として活性層のストライプ幅は $2.0 \pm$

0.4 μm とする。

(3) 2回目エピ成長

ストライプ・メサの形成された基板を p-IMP と m-IMP で埋込む。埋込みエピ後のウエハ断面を図5(a)に示す。

(4) Zn 拡散

埋込まれたウエハのキャップ層ストライプ部分に Zn の選択熱拡散を行う。これはコンタクト抵抗を低くするためである。拡散マスクとしては SiN/NSG ($3,000 \text{ \AA}/3,000 \text{ \AA}$) を用い、拡散マスクのエッチングは、NSG に対しては HF ウェット・エッチを用い、 SiN に対しては CF_4 反応性イオンエッチング (reactive ion etching, R.I.E.) を用いる。 Zn の拡散はアンフル封入で、 500°C 、15分間行う。この拡散による拡散深さは $0.5 \mu\text{m}$ 程度である。

(5) 端面メサ・エッチング

図1に示した外部共振器を形成するためのメサ・エッチング工程である。この工程は SAIL guide レーザに固有の工程であり、素子特性に大きな影響を与える。まず、NSG を $7000 \text{ \AA}$ 堆積し、キャップ層ストライプに垂直な帯状ストライプを形成する。この帯の幅と間隔が活性共振器と外部共振器の最大長を与えることになる。最終的な共振器長は、へき開の位置によって可変であるが、この設定値を超えることはできない。今回試作した素子では最大活性共振器長と最大外部共振器長を、ともに $500 \mu\text{m}$ としたが、一部領域のみ 2 mm とした。最大外部共振器長 2 mm の領域は長い外部共振器をもつ SAIL guide レーザを切出すために設けており、最大活性共振器長 2 mm の領域は素子特性を比較するための活性共振器のみよりなるレーザを切出すために設けてある。

この帯状 NSG をマスクとしてウエハのエッチングを行っていく。まず、キャップ層を除去するために CCl_4 R.I.E. を行う。キャップ層のエッチングをウェット・エッチで行うと、サイド

エッチングが生じ好ましくない。この後、 InP の選択エッチングを行うと、活性層ストライプが露出し、活性層ストライプ以外の領域では導波層が露出する。活性層と導波層はともに InGaAsP であるが、組成が異なるので活性層のみを $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:5$ (体積比) で除去することができる。これで、活性共振器の活性層ストライプの延長線上に外部共振器の装荷層ストライプが形成され、SAIL guide が完成する。SAIL guide のエッチング端面およびその断面を図5(b)および(c)に示す。

(6) Au-Zn 電極蒸着

端面メサエッチングに用いた NSG を除去した後、再び NSG を $4,000 \text{ \AA}$ 堆積する。活性共振器部分の NSG にコンタクト窓を開け、 Au-Zn 電極 ($\text{Au}/\text{Zn}/\text{Au}:100 \text{ \AA}/100 \text{ \AA}/3,000 \text{ \AA}$) を蒸着し、コンタクト窓形成に用いたレジストをそのまま用いてリフト・オフを行う。これで、コンタクト窓部分のみに Au-Zn 電極が被着された状態となり、 N_2 雰囲気中で 420°C 、5分間のシンターを行いオーミック電極とする。

(7) パッド・メタル蒸着

オーミック電極を形成したウエハ上全面に Ti/Au ($1,000 \text{ \AA}/6,000 \text{ \AA}$) をボンディング・パッド用のメタルとして蒸着する。蒸着後、レジスト・マスクで Au および Ti をエッチングし、 Au-Zn 電極上のみに Ti/Au パッドを残す。 Au のエッチングには KI 系のものを用い、 Ti のエッチングには EDTA 系のものを用いる。

(8) 裏面研磨

ウエハをへき開しやすくするために、基板裏面を研磨し、 $100 \mu\text{m}$ 程度の厚さにする。

(9) 裏面電極蒸着

裏面のオーミック電極を形成するために、 Au-Sn 電極 (Au

($S_m/A_m: 100 \text{ \AA}/150 \text{ \AA}/3,000 \text{ \AA}$)を蒸着し、 N_2 雰囲気中で 420°C , 5分間のシンターを行う。この後、裏面のパッド・メタルとして $Ti/A_m (1,000 \text{ \AA}/6,000 \text{ \AA})$ を蒸着する。

(10) ヘキ開

以上で、SAIL guide レザのウエハ・プロセスは終了する。この後、活性共振器 および 外部共振器が所望の長さになるようにウエハをヘキ開する。図5(d)にヘキ開前のウエハ写真を、図5(e)にヘキ開後のチップ写真を示す。

3.2 プロセス上の問題点

プロセス・フローの中で述べた各プロセスのうち、特に問題となるのは、端面メサ・エッチングの工程である。当初、キャップ層のエッチングに H_2SO_4 系によるウェット・エッチングを用いたが、この場合、エッチング端面の最終形状は図6に示すような形となった。これは、埋込みエピ後のウエハ表面が図5(a)に示したように平坦ではないために、キャップ層ストライプ近辺において不均一なサイド・エッチングが生じたことが原因と考えられる。キャップ層をドライ・エッチングすることによって、この問題は一応解決され、図5(b)に示したような端面が得られるようになったが、これで端面メサ・エッチング工程に全く問題がなくなったわけではない。

というのは、エッチング端面の形状は、ドライ・エッチングを用いても必ずしも一様にはならず、これが次節で述べるしきい値電流のばらつきの一因ではないかと考えられるからである。エッチング端面の形状は、レジストでハターン形成した段階において、既にばらつきを生じており、これは、先に述べたように埋込みエピ後のウエハ表面が平坦ではないためである。この点において何らかの改善策を見出すことがSAIL guide レザの歩留り向上の必須条件であるが、現時点においては良い解決策は見出されていない。

4. 素子の基礎特性評価

作製した IPCレーザの室温パルス動作における電流-光出力特性を図7に示す。図7には SAIL guideレーザのウエハから活性共振器のみよりなるレーザを切出した場合の特性も併せて示してある。IPCレーザの外部/活性共振器長比は $243\mu\text{m}/318\mu\text{m}$ (≈ 0.76) と $954\mu\text{m}/288\mu\text{m}$ (≈ 3.3) であり、活性共振器のみのレーザの共振器長は $256\mu\text{m}$ である。この場合、長い外部共振器を有するレーザほどしきい値電流が高くなっている。しかし、IPCレーザのしきい値にはばらつきがあり、IPCレーザの方が活性共振器のみのレーザよりも常にしきい値が高くなるという以外には、外部共振器の長さとしきい値電流の間には明確な対応は見られない。このことから、IPCレーザのしきい値増加の主な原因は、活性共振器と外部共振器の間の光学的結合損失にあると考えられる。

次に IPCレーザの発振スเปフトルを 15°C , CW動作において測定した結果を述べる。IPCレーザは、しきい値のすぐ上の電流値から単一縦モード発振をした。前述の2種の IPCレーザの主/副縦モード比の駆動電流依存性を図8および図9に示す。主/副縦モード比は、しきい値電流の1.15倍の電流値において 短IPCレーザが 20dB、長IPCレーザが 16dB に達している。前述の活性共振器のみよりなるレーザも単一縦モード発振したが、その主/副縦モード比はしきい値電流の1.4倍の電流値において 9.2dB しか得られていない。従って、IPC構造は外部共振器がかなり長い場合においても単一縦モード動作を得るのに非常に有効であると考えられる。

発振周波数の安定化という点に関しては、外部共振器が長い方が有利であるということは先に述べた通りであるが、このことを確かめるために単位電流増加に対する発振周波数のシフト量を測定した。測定には高分解能フーリエ変換干渉計を用いた。結果は表2に示す通りであり、発振周波数安定化の効果は顕著ではないが認められる。また、

外部共振器が長い方が、この効果は大きくなっている。ただし、単位電流増加当りの発振周波数の変化には温度上昇の効果効いており、熱放散の状況が各素子間で必ずしも同じではないことから表2に示す結果をもって発振周波数安定化の定量的比較を行うことは困難である。

5. まとめ

我々は半導体レーザと外部共振器を一体化するための新規なデバイス構造を考察し、その試作を行った。その結果、外部共振器長 $954\mu\text{m}$ (活性共振器長 $288\mu\text{m}$) のものが、低い電流 118mA (室温パルス動作) で発振し、単一縦モード動作することが確認された。また、長い外部共振器をつけることで発振周波数を安定化できる見通しを得ることができた。

今後の開発課題としては以下の各点がある。

- (1) 低い電流化：IPCLレーザを実際使えるデバイスとしていくためには低い電流化が不可欠である。このためには、エピタキシャル層厚の制御、端面メサエッチング技術の向上等が必要である。
- (2) 外部/活性共振器長比を大きくする：発振周波数安定化の効果をより顕著にするためにこの比を大きくする必要がある。当面は、フォトリソの設計変更で対応できると考えられる。
- (3) 周波数チャープの評価：発振周波数安定化の定量的評価を行うためには、強度変調を行った際の周波数チャープ量を測定する必要がある。

参考文献

- 1) S. Akiba, K. Utake, K. Sakai, and Y. Matsushima, "Low-threshold-current distributed-feedback InGaAsP/InP CW lasers," *Electron. Lett.*, vol. 18, pp. 77-78 (1982).
- 2) K. Utake, Y. Suematsu, K. Kobayashi, and H. Kawamishi, "GaInAsP/InP integrated twin-guide lasers with first-order distributed Bragg reflectors at 1.3 μm wavelength," *Japan. J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. L137-L140 (1980).
- 3) W. T. Tsang, N. A. Olsson, and R. A. Logan, "High-speed direct single-frequency modulation with large tuning rate and frequency excursion in cleaved-coupled-cavity semiconductor lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 42, pp. 650-652 (1983).
- 4) Chinlon Lin, C. A. Burrus, R. A. Linke, I. P. Kaminow, J. S. Ko, A. G. Dentai, R. A. Logan, and B. I. Miller, "Short-coupled-cavity (SCC) InGaAsP injection lasers for CW and high-speed single-longitudinal-mode operation," *Electron. Lett.*, vol. 19, pp. 561-562 (1983).
- 5) K.-Y. Lion, "Single-longitudinal-mode operation of injection laser coupled to a GRINROD external cavity," *Electron. Lett.*, vol. 19, pp. 750-751 (1983).
- 6) S. Saito, O. Nilsson, and Y. Yamamoto, "Oscillation center frequency tuning, quantum FM noise, and direct frequency modulation characteristics in external grating loaded semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, pp. 961-970 (1982).

- 7) 松田賢一, 藤田俊弘, 雄谷順, 芥澤皓元, 特原昭
59-43301, 43302 (1984).
- 8) T. Fujita, S. Ishizuka, K. Fujito, H. Serizawa, and
H. Sato, "Intensity noise suppression and
modulation characteristics of a laser diode
coupled to an external cavity," IEEE J. Quantum
Electron., vol. QE-20, pp. 492-499 (1984).

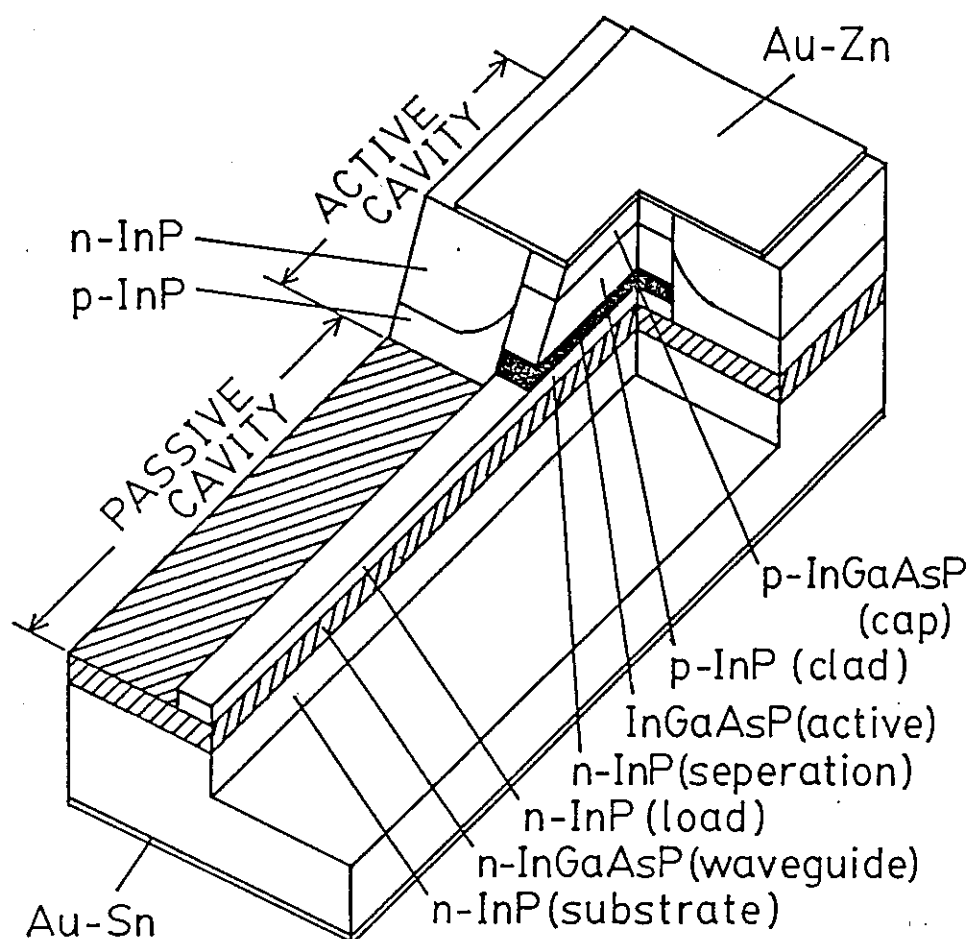


図1 SAIL guide IPC レーザの構造

表1 SAIL guide IPC レーザの各エピタキシアル層の仕様

	Composition ($\lambda g(\mu m)$)	Thickness (μm)	Type (Dopant)	Carrier conc. (cm^{-3})
Buffer	InP	~ 5	n (Te)	3×10^{18}
Waveguide	InGaAsP (1.05)	0.5	n (Te)	5×10^{17}
Seperation	InP	0.1	n (Te)	1×10^{18}
Active	InGaAsP (1.3)	0.15	undoped	5×10^{16}
P-clad	InP	2	p (Zn)	5×10^{17}
Cap	InGaAsP (1.1)	0.5	p (Zn)	2×10^{18}

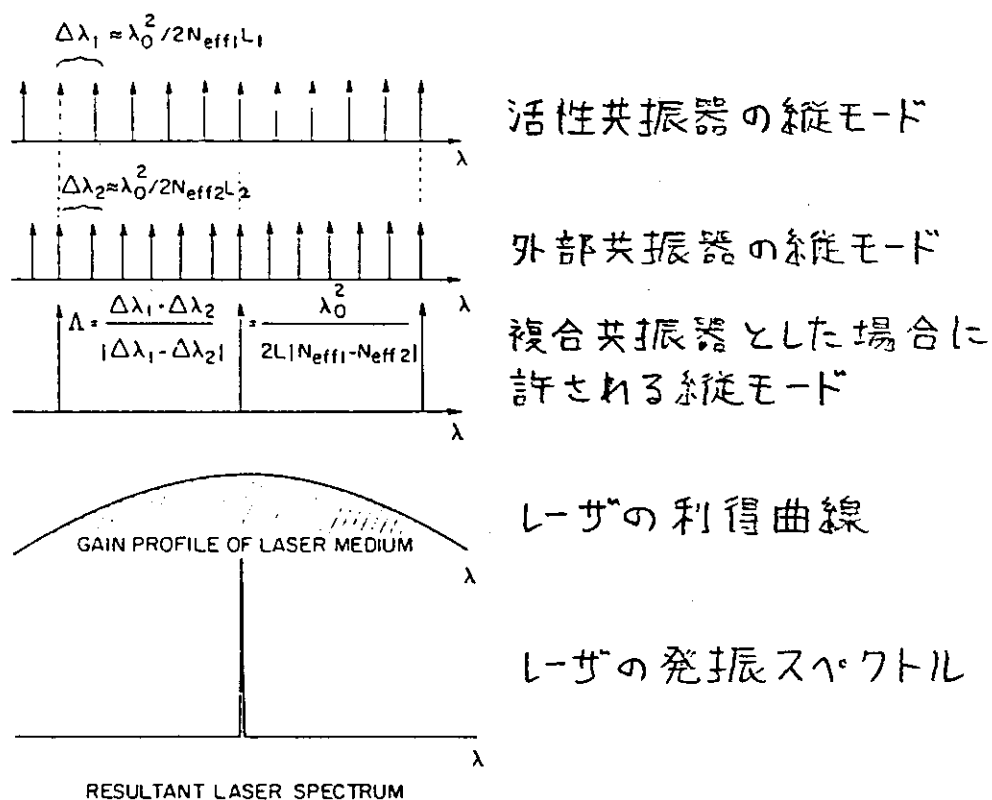


図2 複合共振器レーザーにおいて縦モードが単一となる原理

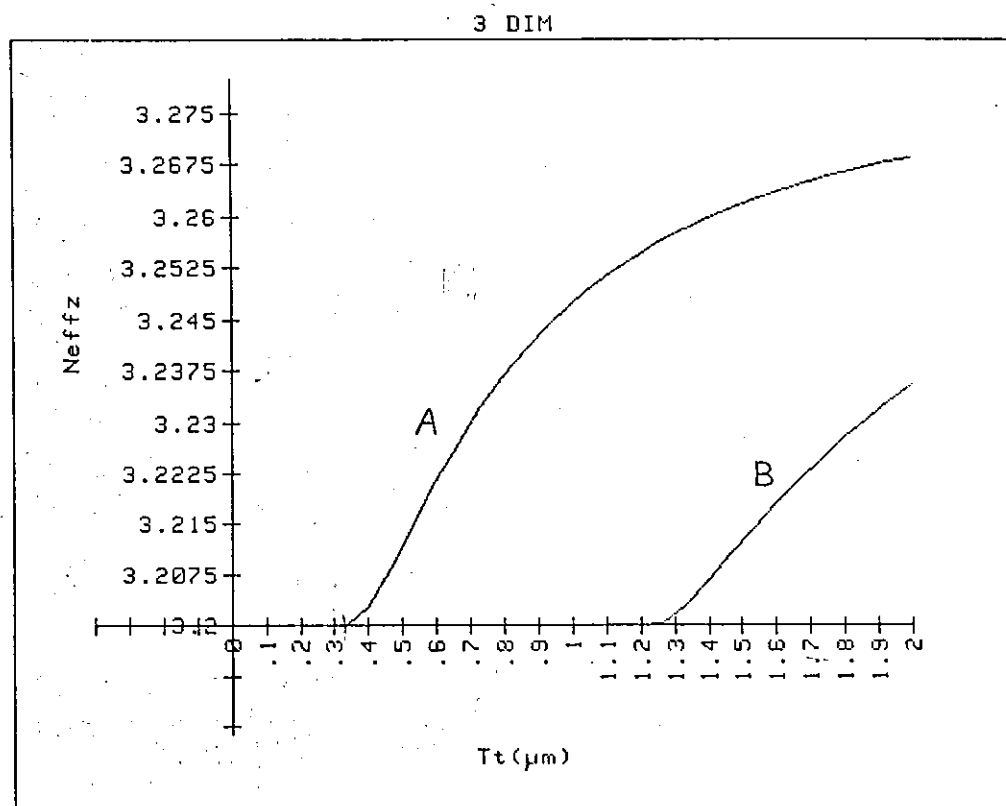


図3 装荷型光導波路(装荷層厚 $0.1\mu\text{m}$,幅 $2.0\mu\text{m}$)の導波層厚と有効屈折率の関係(A:基本モード,B:1次モード)(各層の組成は表1に示したものを仮定)

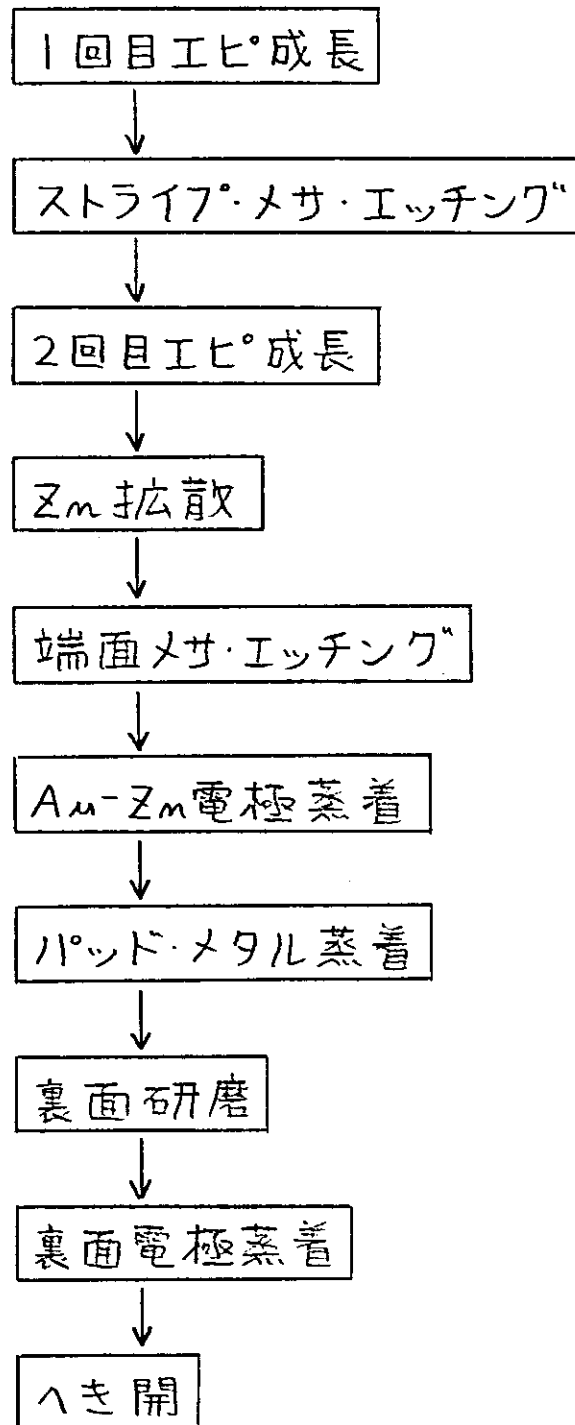
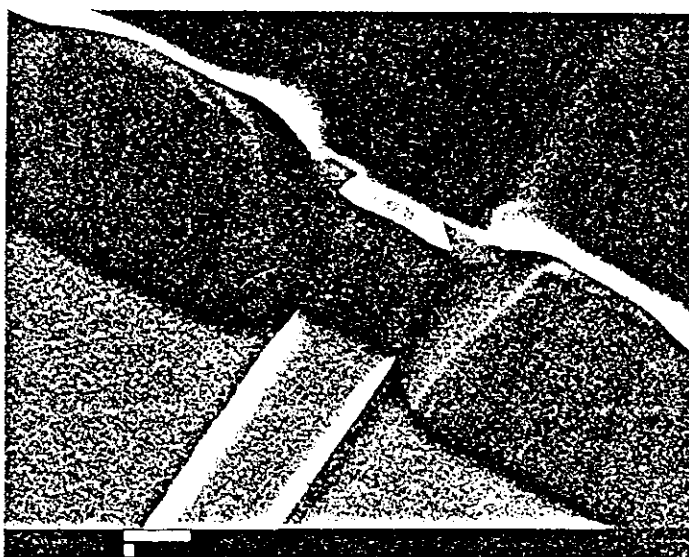


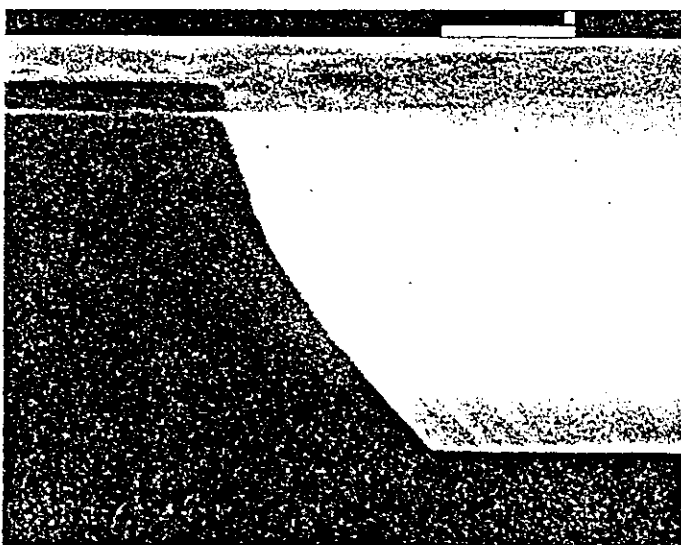
図4 SAIL guide レーザのプロセス・フロー



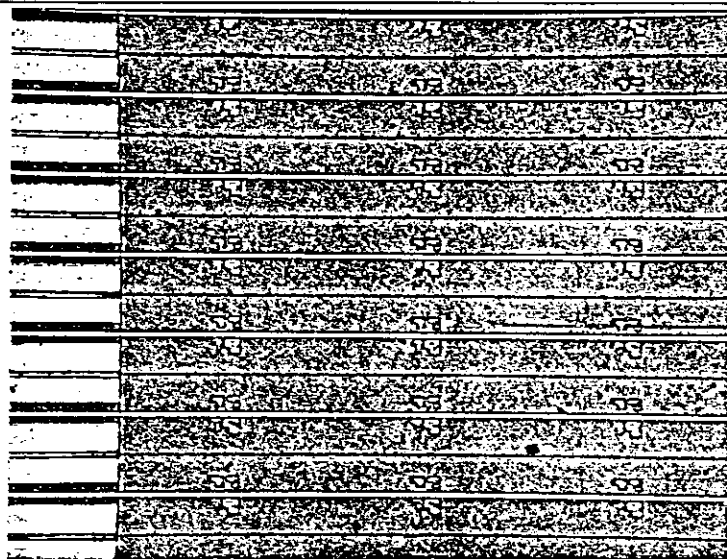
(a) 埋込みエピ後のウエハ断面 (マーカー: $10\mu\text{m}$)



(b) 端面メサ・エッチング後の形状 (マーカー: $1\mu\text{m}$)

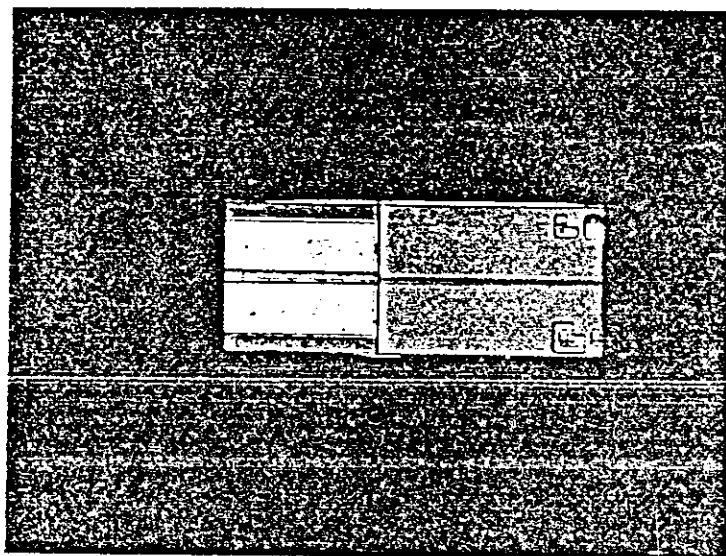


(c) 端面メサ・エッチング後の断面 (マーカー: $1\mu\text{m}$)



500 μm

(a)へき開前のウエハ



500 μm

(e)へき開後のチップ

図5 各プロセス段階における SEM写真 (a)~(c))
および実体顕微鏡写真 (d)~(e))

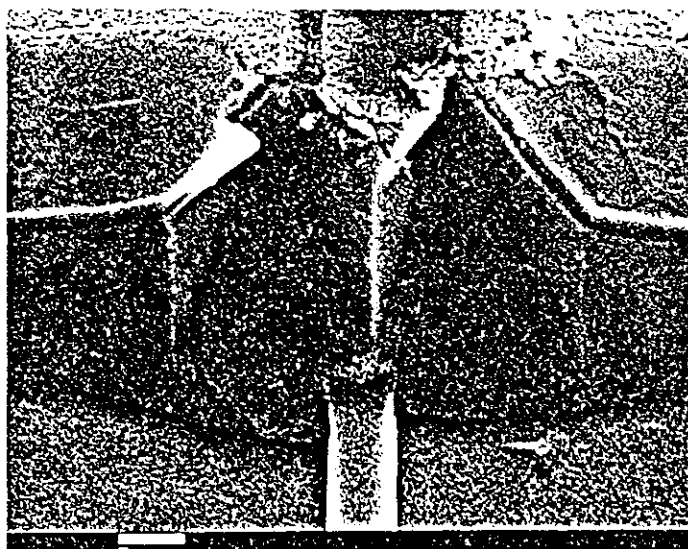


図6 端面メサ・エッチング工程においてキャップ層をウエット・エッチングした場合の端面の最終形状 (マーカー: 1 μm)

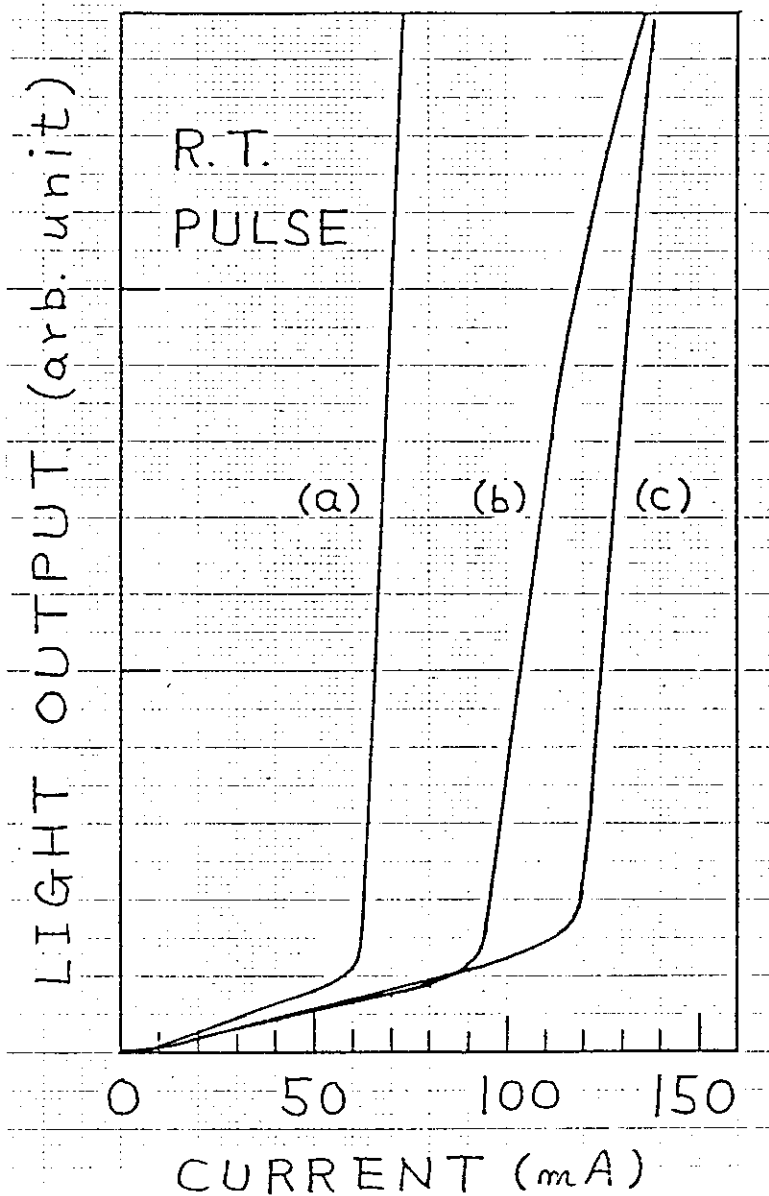


図7 試作したIPCレーザおよび活性共振器のみのレーザの電流-光出力特性 (a), (b), (c) の記号は表2と対応している)

表2 試作したIPCレーザおよび活性共振器のみのレーザの特性一覧

試料	活性共振器長 (μm)	外部共振器長 (μm)	しきい値電流 (mA)	縦モード比 (dB)	周波数シフト (GHz/mA)
(a)	256	—	62	9.2	1.5
(b)	318	243	93	20	1.3
(c)	288	954	118	16	1.15

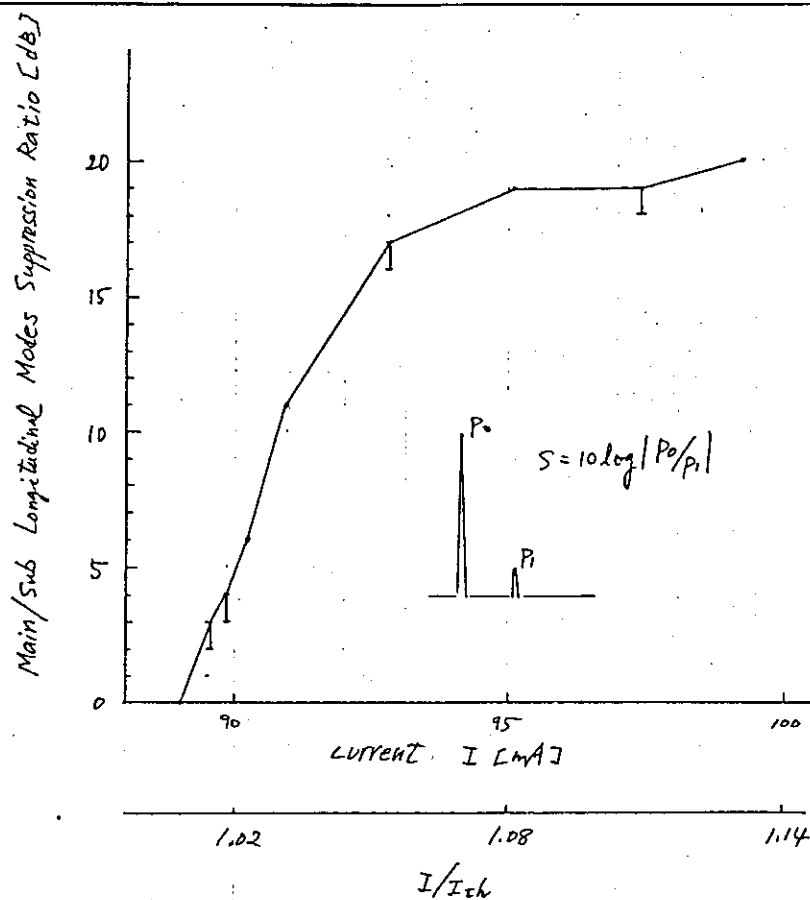


図8 短IPCLレーザ(表2の(b))の主/副縦モード比

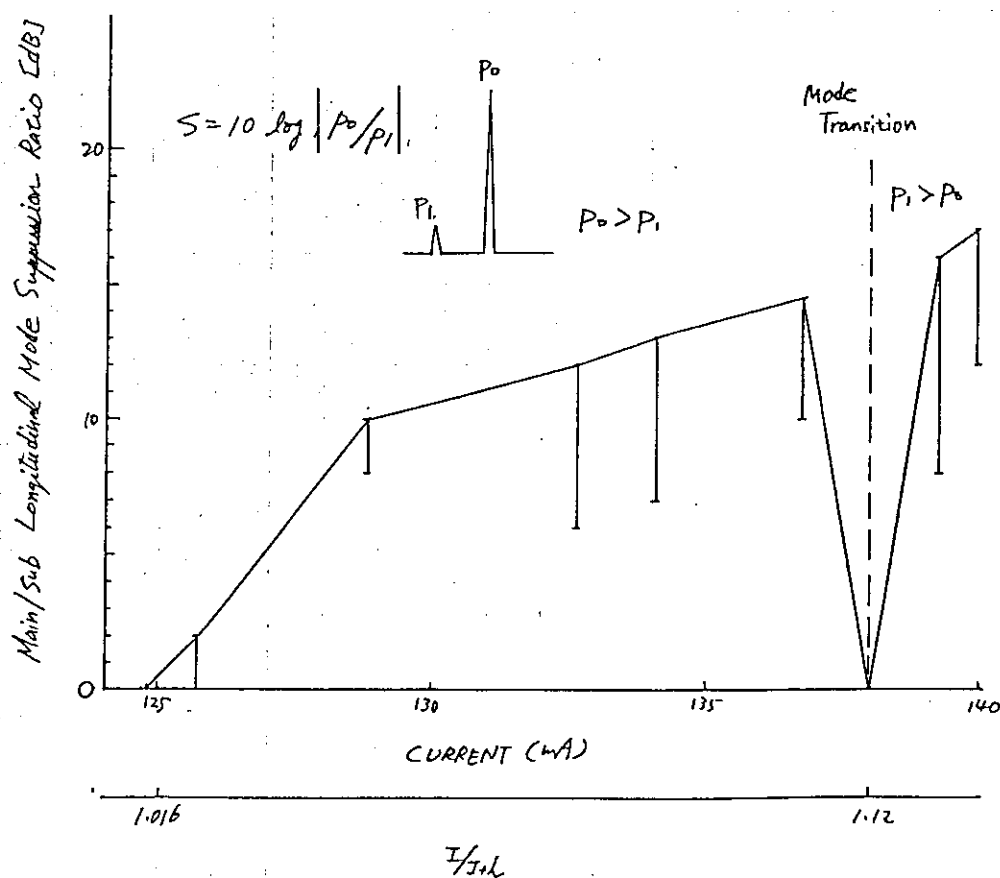


図9 長IPCLレーザ(表2の(c))の主/副縦モード比