レーザー解説

エッチングによるレーザー共振器形成

伊賀健一*・内山誠治*

(1983年10月17日 受理)

Fabrication of Laser Resonator by Chemical Etching

Kenichi IGA* and Seiji UCHIYAMA*

(Received October 17, 1983)

1. まえがき

光エレクトロニクスに使用される半導体レーザーなど半導体光デバイスでは、注入された少数キャリアが利用されることが多く、しかもその濃度は $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上とかなり高いレベルである。それに、発光再結合やキャリアのトランスポートを高い効率で行なわせるために高品質の結晶性と欠陥のない表面、界面を必要とする。しかも、キャリアの閉じ込めや光の導波を行なうための構造を持っていなければならない、そのための手法として微細加工が不可欠である。通常のSiを主流とする電子デバイスの加工の多くがドライプロセスがなされているのに対し、GaAsやInPなどの化合物を用いる光デバイスでは、信頼性の高い加工法として湿式の化学エッチングが依然として実用に供されている。本文では、このような背景をふまえた化学エッチングによる半導体光デバイスの微細加工、特にレーザー共振器形成についてまとめ、いくつかの具体例について紹介する。

2. 光・電子デバイスに必要な加工技術

まず、光・電子デバイスに必要な微細構造とその応用分野についてTable Iにまとめた。まず、基板上あるいは2重ヘテロ構造を成長したウェハの上に形成するリッジやメサは、埋込みヘテロ(BH)レーザー等に用いられており、もちろん幅2～数 μm の導波路として有用である。この他、FETのゲート製作にも幅の狭いリッジは重要である。第2の、チャンネル、溝、テラスは、やはり屈折率導波型半導体レーザーに応用されている。これらの形状を持つ基板上に結晶成長を行なうと、自然にコア層の厚みが不均一となって導波路が形成される。つまり、液相成長時における溶液の飽和度の差により不均一厚さが生じ、等価屈折率導波路となるのである。第3は回折格子であり、分布帰還型(DFB)レーザーや、分布反射型(DBR)レーザーに利用される。第4はファセットであり、垂直面はレーザーの反射鏡として利用される。また、わざと傾斜面を形成して反射を小さくしようという目的もあって、必ずしも垂直面だけとは限らない。第5はヘテロ構造の多層膜であり、面発光レーザーや、分布反射型の導波路に用途がある。

* 東京工業大学精密工学研究所 (〒227 横浜市緑区長津田町4259)

* Research Laboratory of Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology(4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227)

Table I Fine structures for integrated optics.

Scheme	Structure	Application
Ridge and Mesa Channel, Groove and Terrace Grating		BH laser, Waveguide Index-guiding lasers
Facet		DBR and DFB lasers, Filters, Lenses
Multilayers		Etched mirror lasers Reflectors, Filters

Table II Ridge and mesa etch.

Material	Structure	Etchant	Reference
① GaAs		$8\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	Iida et al. 1)
② GaAs/GaAlAs		$\text{Br}_2 + \text{CH}_3\text{OH}$	Tarui et al. 2)
③ Inp		$4\text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$	Kambayashi et al. 3)
④ InP/GaInAsp		$\text{HCl}, 3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Br}_2 + \text{CH}_3\text{OH}$	Kishino et al. 4) Hsieh et al. 5) Itaya et al. 6)

Table III Channel, groove and terrace etch.

Material	Structure	Etchant	Reference
GaAs		$50\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{NH}_4\text{OH}$	Yamamoto et al. 7)
	20Ethylene glycol $+ 5\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$	Burmham et al. 8)
	—	Sugino et al. 9)
Inp		$3\text{HCl} + \text{H}_3\text{PO}_4$	Ishikawa et al. 10)
	$5\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	Doi et al. 11)
	$\text{HCl} + 2\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}_2 (\text{KCl})$	Moriki et al. 12)

3. メサとチャンネルの形成技術

まず、最初の形状はリッジまたはメサであり、埋込みヘテロ (BH) レーザー、光導波路、FET などのチャンネル形成などに利用される。Table II にメサエッチの例についてまとめた^{1~6)} ①や③では、GaAs や InP の基板上に形成したメサの上に 2 重ヘテロ構造を成長すると、一回成長による埋込み構造が作られる。また、②や④では、GaAs/GaAlAs や InP/GaInAsP の 2 重ヘテロ構造を形成後、メサエッチにより活性層の下まで掘り下げ、次に両側から埋込み層を成長させる。いずれにしてもメサの高さと幅の制御が重要な要素となる。

Table III に、チャンネル、溝あるいはテラス

を形成するエッチング法についてまとめた^{7~12)}。V 溝、角型の溝、段差 (テラス) などを、Table に示すようなエッチング液により形成後、液相法により結晶成長を行なうと、チャンネルやテラスの部分付近の溶液中の As や P の飽和度が大きくなるため、周囲よりも厚い層が自動的に形成できる。特に InP の場合には、エッチング溝の形状に結晶軸方向依存性があり、軸が特定される。例えば、(100) 基板では $\langle 011 \rangle$ 方向が使われる。 $\langle 01\bar{1} \rangle$ 方向では、液相成長による導波路形成の再現性がないことも大きな理由になっている。

4. エッチングによるレーザー共振器形成

モノリシックにレーザー共振器を製作するこ

Table IV Table IV Facet etch.

Material	Structure	Etchant	Reference
GaAlAs/GaAs		$\text{NH}_4\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O}$	Tarui et al. 13)
GaInAsP/InP		$\text{HCl} + 2\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}_2$	Iga et al. 14)

とは、半導体光集積回路における重要な課題の一つである。エッチングにより、垂直なファセット面を出し、ファブリ・ペロー共振器にする技術は、GaAlAs/GaAsにおいてかなりの進展をみた¹³⁾。その後、1976年以後のGaInAsP/InP系レーザの開発と並行してエッチングレーザの研究が進められた (Table IV参照)¹⁴⁾。筆者らは、いくつかのエッチング液をテストした後、 $\text{HCl} + 2\text{CH}_3\text{COOH} + \text{H}_2\text{O}_2$ が平坦の面を出すことを発見し、KKI-121と名付けた³⁾。次いで、ベル研究所における共同研究者とともに、波長 $1.3\ \mu\text{m}$ の組成を用いて、エッチングレーザを製作し、室温CW動作を達成するとともに、モニタ用の光検出器を作りつけたデバイスも製作した¹⁴⁻¹⁶⁾。また、垂直面の出しやすさが導波路形成に難のあった〈011〉方向に導波路を持つウェハを用いて、エッチングレーザの製作をおこなった¹⁷⁾。その後、他の研究者たちも異なるエッチング液を見つけて、エッチングレーザの製作を試みている¹⁸⁻²⁰⁾。

しかしながら、このエッチングレーザには、まだ以下のような問題がある。

- 1) エッチング面の共振方向との垂直度、平滑度が十分でなく反射率が低い。
- 2) 端面のパッシベーションが不十分で電流のリークが起こる。
- 3) 短共振器化による単一軸モード発振が得にくい。
- 4) InP系では、横モード制御を行なう導波路や電流狭窄など内部構造を持つウェハ (通常の〈011〉方向にストライプ構造を持つウェハ) に対して、垂直度が得にくい。

エッチングレーザの特徴を十分に生かすためには、これらの問題の解決が必要となる。そこで、最近、筆者らは、エッチングレーザの低しきい値電流化、単一モード化を目指し、

- 1) エッチング面形状の改善
- 2) パッシベーション技術の改善
- 3) 短共振器レーザの実現

を試みた。Fig. 1 にエッチングレーザの構造、およびFig. 2 に製作工程を示す。まず、レーザウェハ表面に SiO_2 をスパッタリングで付け、フォトリソグラフィの手法と CF_4 プラズマエッチングを用い、〈011〉方向にストライプ窓をあけ、エッチングマスクを形成する。次いで、 $\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ 溶液でキャップ

Fig. 1 Schematic view of an etched laser.

Fig. 2 Fabrication process of etched laser.

層を取り除き、 SiO_2 マスクを除去する。そして、再度残ったキャップ層をおおう形で SiO_2 エッチングマスクを形成し、エッチング液として KKI-121 を用い、多段エッチング法²¹⁾ によりレーザー共振器面を形成する。その後、 SiO_2 エッチングマスクを除去し、エッチング面のパッシベーションを行なう。このパッシベーションの強化のために、エッチング端面方向を基準とし、 SiO_2 スパッタリングを基板に対して 45° 方向より 2 度行なうという方法を試みた。このパッシベーション法により、素子表面とエッチング面との境界でしばしば生じていたリーク電流がなくなった。パッシベーションを行なった後、 $\langle 01\bar{1} \rangle$ 方向にストライプ窓電極を形成する。Fig. 3, Fig. 4 に、共振器長 $80\mu\text{m}$ の片面クリープ短共振器型エッチングレーザーの光出力-電流特性および発振スペクトルを示す。発振しきい値電流 110mA 、しきい値電流の 2.2 倍まで単一軸モード動作が得られた。また、両面エッチングレーザーによる発振も得られた。Fig. 5 にその光出力-電流特性を示す。

5. 回折格子の形成

エッチングによって、モノリシックに形成できる共振器をもつレーザーとして、回折格子を用いる分布帰還型 (DFB)、および分布反射型 (DBR) レーザーがある。この回折格子には、 $2000\sim 2500\text{\AA}$ 程度の周期を持つ 1 次回折格子や、 $4000\sim 5000\text{\AA}$ 程度の周期を持つ 2 次回折格子が使われている。Table V にいくつかの結晶上に回折格子を形成するためのエッチング法についてまとめた²²⁻²⁹⁾ 1975年以後、光ファイバの伝送損失が波長 $1.55\mu\text{m}$ で最低となることが明らか

Fig. 3 A light output vs. injection current characteristic of a short cavity laser with one etched and one cleaved mirror.

Fig. 4 Emission spectra of a short cavity laser with one etched and one cleaved mirror.

Table V Grating etch.

Material	Λ	h	Etchant	Reference
GaAlAs	3400 $\text{\AA}$	1500 $\text{\AA}$	$8\text{C}_2\text{H}_5(\text{OH})_2 + \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	Aiki et al. 22)
	3726 $\text{\AA}$		$\text{H}_2\text{SO}_4 + 8\text{H}_2\text{O} + 8\text{H}_2\text{O}_2$	Namizaki et al. 23)
InP	3200 $\text{\AA}$		$\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_{82}$	Doi et al. 24)
	2365 $\text{\AA}$	1200 $\text{\AA}$	$\text{HBr} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Sakai et al. 25)
GaInAsP	1800 $\text{\AA}$		$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	Kawanishi et al. 26)
	2400 $\text{\AA}$	830 $\text{\AA}$	$2\text{ SBW} + 15\text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{PO}_4$	Saitoh et al. 27)
	4500 $\text{\AA}$	2000 $\text{\AA}$	$\text{SBW} + \text{HBr} + \text{H}_2\text{O}$	Itaya et al. 28)
	2440 $\text{\AA}$	800 $\text{\AA}$	$\text{HBr} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Uchiyama et al. 29)

Fig. 5 A light output vs. injection current characteristic of a laser with two etched mirrors.

になったが、そこでは、材料分散が大きく、広帯域伝送を行なうには、波長幅の小さいレーザーが必要であり、GaInAsP/InP系のDBR, DFBレーザーの研究が盛んに行なわれている²⁴⁻³⁶⁾。

Table VIに長波長帯 DFB レーザーのこれまでの研究経過をまとめた^{24, 28-34)}。DFB レーザーの製作方法は、大きく分けて2種類あり、

- 1) 基板に回折格子を形成し、その上に導波路層、活性層等の結晶成長を行なう。
- 2) 活性層、導波路層を結晶成長で形成し、その上に回折格子を設け、これを2度目の結晶成長で埋込む。

に分けられる。Table VIIに各々の特徴をまとめた。1)の方法は、回折格子を基板に形成するため、i) 1回の結晶成長でDFB ウェハが製作できる、ii) 回折格子がInPに形成されるため、メルトバックが少ない、という利点があり、このため、早くから研究が進められてきた。ところで、この製作方法の問題点として、

- i) 回折格子の周期にあわせて、活性層、導波路層の組成、層厚制御が必要である。
- ii) InP上に形成した回折格子ではGaInAsP層上のそれに比べて結晶成長直前での炉中における熱損傷が大きい。

Table VI Progress of DFB lasers.

年・月	Lab.	回折格子	Reference
1979. 9	日立	1.1 μ m 帯 2次 下	A.Doi et al. 24)
81. 12	KDD	1.5 μ m 帯 1次 下	K.Utaka et al. 30)
82. 1	NTT	1.5 μ m 帯 2次 下	T.Matsuoka et al. 31)
82. 9	東芝	1.3 μ m 帯 1次 下	Y.Uematsu et al. 32)
82. 11	NTT	1.5 μ m 帯 2次 上	Y.Iitaya et al. 28)
83. 3	日電	1.3 μ m 帯 2次 下	M.Kitamura et al. 33)
83. 5	NTT	1.5 μ m 帯 1次 上	H.Nagai et al. 34)
83. 6 (1)	本研究	1.5 μ m 帯 1次 上	S.Uchiyama et al. 29)

Table VII Summary of DFB lasers with a grating.

(I) beneath active layer

(II) above the active layer

方法	(I) 下回折格子 (InP 基板上回折格子形成)	(II) 上回折格子 (活性層成長後回折格子形成)
回折格子	InP 上に形成 熱損傷 大 メルトバック 小	GaInAsP 上に形成 熱損傷 小 メルトバック 大
活性層形成	周期にあわせて活性層、導波路層、の層厚、組成決定 不整、欠陥 有 極薄活性層形成困難	活性層、導波路層の層厚、組成にあわせて周期決定 基板上に独立に最適化 不整、欠陥 小 極薄活性層形成容易
結晶成長	1回	2回
その他		IS, CSP, リブ構造等の導入化

iii) 量子井戸構造等に必要な極薄活性層の形成が難しい。

などが存在する。特にii)の問題は大きく、この対策として液相成長のソーク中において、回折格子の上に、GaAs, InAs, GaAsP 等のふたをするという方法が報告されている^{35, 36)}。

一方、2)の製作方法では、

- i) 回折格子を埋込むまでに少なくとも2回の結晶成長が必要である。
- ii) 回折格子の、メルトバックに注意が必要である。

という問題点が存在するが、次の特徴を有する。

- i) 活性層の成長を独立に最適化できる。
- ii) 活性層の不整や欠陥が少ない。
- iii) 量子井戸構造等の極薄活性層が回折格子埋込と独立に形成できる。
- iv) 活性層、導波路層の層厚、組成にあわせて、回折格子の周期を決定できる。
- v) 内部ストライプ (IS), CSP, リブ構造等の応用が容易である。

この方法について、1982年に板屋らにより、2次回折格子を用いたこの方法による製作が報告されている²⁸⁾。しかしながら、2次回折格子では、エッチングにより深い回折格子を形成することは、容易であるが、光の放射損失が大き

Fig. 6 Schematic view of a DFB laser.

Fig. 7 Fabrication process of DFB laser.

いという問題がある。これに対して、1次回折格子は、周期間隔が短いため、エッチングにより、深く回折格子を形成するのは難しいが、結合係数が大きく取りやすく、光の放射損失が小さいという利点を有する。そこで、筆者らは、1次回折格子を採用し、Fig. 6に示す、上一次回折格子型DFBレーザーを初めて試作した。製作手順をFig. 7に示す。まず、液相成長法により、n型InP層、GaInAsP活性層($\lambda_g = 1.62\mu\text{m}$)、p型GaInAsPメルトバック防止層($\lambda_g = 1.4\mu\text{m}$)、p型InP層からなる四層構造ウェハを形成し、通常のへき開レーザーによって、発振しきい値電流密度と発振波長を測定する。また、活性層、メルトバック防止層の厚さを測定し、発振波長(組成)と層厚から回折格子の周期を求め、発振の得られる波長をブラッグ波長より長波長側にするため、 $10\sim 20\text{\AA}$ 程度短く設定する。その後、p型InPクラッド層をHCl + H_2O による選択エッチングで除去し、GaInAsPメルトバック防止層上に、先に決めた周期となるように、一次回折格子のパターンを干渉露光法により形成し、HBr + HNO_3 + H_2O 溶液を用いたエッチングで一次回折格子を形成する。製作した回折格子の周期は $2440\text{\AA}$ 、深さは約 $800\text{\AA}$ である。その後、フォトレジストを O_2 プラズマでアッシングし、有機溶媒でよく洗浄する。そして、2度目の液相成長により、p型InPクラッド層を成長させ回折格子を埋込み、電極を形成する。

このウェハの発振しきい値電流密度を通常のへき開レーザーによって調べてみたが、回折格子形成や2度目の液相成長等のプロセスを経たにもかかわらず、ほとんど値は変化しなかった。このウェハをFig. 6のような電極ストライプ型に加工し、特性を調べた。Fig. 8は室温パルス電流駆動による光出力-電流特性で、電極幅 $18\mu\text{m}$ 、素子長 $510\mu\text{m}$ でしきい値電流 680mA 、外部微分量子効率片面 2.2% である。Fig. 9は、発振波長の温度依存性をしきい値電流の1.2倍程度で測定したもので、 $-60\sim 0^\circ\text{C}$ まで単一軸モード動作が得られ、波長の温度変化による変

Fig. 8 A light output vs. injection current characteristic of a DFB laser.

Fig. 9 Lasing wavelength of a DFB laser against temperature.

動量は0.8 Å/KでDFBモードである。Fig. 10は、別のチップの室温における発振スペクトルで、しきい値電流の1.1倍まで単一軸モードが得られ、それ以上では、横モードが不安定とな

Fig. 10 Emission spectra of a DFB laser.

った。このDFBレーザーにおいて、回折格子を埋込む2度目の液相成長の最適化、および埋込み構造を導入することにより、横モードの安定化、しきい値電流の低減化が可能であるが、本研究では上一次回折格子型DFBレーザーの可能性を示すことが目的であり、デバイスの改良は今後の課題である。

6. その他のエッチング技術

その他の重要なエッチング技術として、選択エッチングがある。これは、異なる組成の化合物半導体を選択的に取り除いたり、ある層でエッチングを停止する目的で使用される。エッチング液としてGaInAsP/InP系において、InPエッチングにHCl、GaInAsPエッチングにH₂O + H₂SO₄ + H₂O₂などがある。また、GaAlAs/GaAs系においては、GaAsエッチングにNH₄OH + H₂O₂、GaAlAsエッチングにHFなどがある。最近、筆者らは、この方法を用いて短共振器のGaInAsPおよびGaAlAs系の面発光レーザーを製作した。(Fig. 11, Fig. 12)^{37, 38)} いずれも基板のInPあるいはGaAsを100 μm程度エッチングで取除き、数μm厚さのエピタキシャル層のみ残すわけで、選択エッチングの使用なくしてはこのことは不可能である。ドライ

Fig. 11 Schematic view of a GaInAsP/InP surface emitting laser.

Fig. 12 Schematic view of a GaAlAs/GaAs surface emitting laser.

プロセスが将来一般化した後も、厚い基板のエッチングにはやはり湿式選択エッチング法が残ると思われる。

液相成長時の溶融した金属によるメルトバックエッチングも一種の湿式エッチングであり、半導体レーザーにおける埋込み構造の形成に役立つ³⁹⁾。また、GaAlAs系では、選択的メルトバックエッチも可能である⁴⁰⁾。

最後に、本研究の機会を与えて下さった本学末松安晴、田幸敏治両教授、ベル研究所、H. Kogelnik、P. K. Tien 両博士、資料のまとめに協力された研究室諸氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) S. Iida and K. Ito: J. Electrochem. Soc. **118** (1971) 768.
- 2) Y. Tarui, Y. Komiya and Y. Harada: J. Electrochem. Soc. **118** (1971) 118.
- 3) T. Kambayashi, C. Kitahara and K. Iga: Jpn. J. Appl. Phys. **19** (1980) 79.
- 4) K. Kishino, Y. Suematsu, Y. Takahashi, T. Tanbun-Ek and Y. Itaya: IEEE JQE **QE-16** (1980) 160.
- 5) J. J. Hsieh and C. C. Shen: Appl. Phys. Lett. **30** (1977) 429.
- 6) Y. Itaya, T. Tanbun-Ek, K. Kishino, S. Arai and Y. Suematsu: Jpn. J. Appl. Phys. **19** (1980) L141.
- 7) S. Yamamoto, Y. Kurata, S. Matsui, T. Hayakawa, S. Yano and T. Hijikata: Papers of Tech. Group of IECE Electron. Devices **ED79-50** (1979) 49.
- 8) R. D. Burnham and D. R. Scifres: Appl. Phys. Lett. **27** (1975) 510.
- 9) T. Sugino, K. Itoh, M. Wada, H. Shimizu and I. Teramoto: IEEE JQE **QE-15** (1979) 714.
- 10) H. Ishikawa, H. Imai, T. Tanahashi, Y. Nishitani, M. Takusagawa and K. Tanahei: Electron. Lett. **17** (1981) 465.
- 11) A. Doi, N. Chinone, K. Aiki, and R. Ito: Appl. Phys. Lett. **34** (1979) 393.
- 12) K. Moriki, K. Wakao, K. Kitamura, K. Iga and Y. Suematsu: Jpn. J. Appl. Phys. **19** (1980) 2191.
- 13) Y. Tarui, Y. Komiya, T. Sakamoto, H. Iida and A. Shoji: Jpn. J. Appl. Phys. **15** (1976) 293.
- 14) K. Iga and B. I. Miller: IEEE JQE **QE-18** (1982) 22.
- 15) J. L. Merz, R. A. Logan and A. M. Sergent: IEEE JQE **QE-15** (1979) 72.
- 16) K. Iga and B. I. Miller: Electron. Lett. **14** (1980) 342.
- 17) K. Moriki, K. Iga, M. Uchida, K. Wakao and T. Kunikane: Electron. Lett. **17** (1981) 559.
- 18) P. D. Wright, R. J. Nelson and T. Cella: Appl. Phys. Lett. **36** (1980) 518.
- 19) S. Adachi: J. Electrochem. Soc. **129** (1980) 609.
- 20) L. A. Coldren, K. Furuya, B. I. Miller and J. A. Rentschler: Electron. Lett. **18** (1982) 235.
- 21) T. Kambayashi and Y. Suematsu: IOOC '77 Tech. Digest **O1-3** (1977) 567.
- 22) K. Aiki, M. Nakamura and J. Umeda: IEEE JQE **QE-12** (1976) 597.
- 23) H. Namizaki, M. K. Shams and S. Wang: Appl. Phys. Lett. **31** (1977) 122.
- 24) A. Doi, T. Fukuzawa, M. Nakamura, R. Ito and K. Aiki: Appl. Phys. Lett. **35** (1979) 441.
- 25) K. Sakai, K. Utaka, S. Akiba and Y. Matsushima: IEEE JQE **QE-18** (1982) 1272.
- 26) H. Kawanishi, Y. Suematsu, K. Utaka, Y. Itaya and S. Arai: IEEE JQE **QE-15** (1979) 701.
- 27) T. Saito, O. Mikami and H. Nakagome: Electron. Lett. **18** (1982) 408.
- 28) Y. Itaya, T. Matsuoka, Y. Nakano, Y. Suzuki, K. Kuroiwa and T. Ikegami: Electron. Lett. **18** (1982) 1006.
- 29) S. Uchiyama and K. Iga: Jpn. J. Appl. Phys. **22**

- (1983) L348.
- 30) K. Utaka, S. Akiba, K. Sakai and Y. Matsushima: Electron. Lett. **17** (1981) 961.
- 31) T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Itaya, Y. Noguchi, Y. Suzuki and T. Ikegami: Electron. Lett. **18** (1982) 27.
- 32) Y. Uematsu, H. Okuda and J. Kinoshita: Electron. Lett. **18** (1982) 857.
- 33) M. Kitamura, K. Kobayashi, M. Seki, M. Yamaguchi and K. Kobayashi: National Conv. IECE of Japan **935** (1983) 4-21.
- 34) H. Nagai, Y. Noguchi, T. Matsuoka and Y. Suzuki: Jpn. J. Appl. Phys. **22** (1983) L291.
- 35) Y. Uematsu, J. Kinoshita, Y. Hirayama and H. Okuda: The 15th Conf. on Solid State Devices **B-6-5** (1983) 301.
- 36) I. Mito, M. Seki and K. Kobayashi: Fall Meet. Jpn. Soc. Appl. Phys. **25p-P-9** (1983) 98.
- 37) K. Iga, H. Soda, T. Terakado and S. Shimizu: IOOC '83 Tech. Digest **29B1-4** (1983) 198.
- 38) A. Ibaraki, S. Ishikawa and K. Iga: Spring Meet. Jpn. Soc. Appl. Phys. **4p-H-12** (1983) 124.
- 39) S. Arai, M. Asada, T. Tanbun-Ek, Y. Suematsu, Y. Itaya and K. Kishino: IEEE JQE **QE-17** (1981) 640.
- 40) K. Kishino, S. Kinoshita, S. Konno and T. Tako: Jpn. J. Appl. Phys. **22** (1983) L473.