レーザー解説

O E I C

—現状と将来—

和田 修*

(1987年3月23日 受理)

O E I C

—Present and prospects—

Osamu WADA*

(Received March 23, 1987)

An optoelectronic integrated circuit (OEIC) is a circuit incorporating both optoelectronic and electronic devices on a single semiconductor substrate. They have great advantages in improving the speed and noise characteristics of optoelectronic devices through the elimination of parasitic reactances, implementing multi-function and multi-channel signal processing capabilities and also realizing high reliability and low cost. This paper describes basic technologies for OEIC fabrication, present status of the technology of GaAs-based OEICs operating at the wavelength near $0.8\ \mu\text{m}$, their applications and future prospects.

A variety of processing techniques for planar integrated structures as well as new optoelectronic devices suitable for integration, which include planar, low-capacitance metal-semiconductor-metal (MSM) photodiodes and low-threshold quantum well lasers, have been developed and applied to the fabrication of OEIC transmitters and receivers that can operate at a bitrate of 2 Gbps. Also four-channel arrays of these OEICs have been fabricated. Applicability of these OEICs to high-speed optical links and advanced optical components including 4×4 optical switches has been demonstrated and also the possibility of optical interconnections using OEICs in the future is suggested. Further technological requirements include the simplification of integrated structure for transmitters and the development of fabrication technique for InP-based OEICs usable at long wavelengths. A new integrable quantum well laser structure and a simple GaInAs PIN/FET receiver have been proposed.

1. ま え が き

レーザーやフォトダイオードなどの光半導体素子の開発は、この20年間に多大の成果を生み、低損失石英ファイバの実現とあいまって、光通信システムや光情報処理システムの実用化が達成された。今後これらのシステムがさらに高速化・大容量化し、また多チャンネル化やより複雑な信号処理を行うなど高機能化していくことが

要求されるに伴い、光半導体素子の性能・機能がさらに改善されることが望まれる。これらの要請の多くは、光半導体素子と他の素子・回路との集積化によって満足できると考えられる。Fig.1は、光の波動性・非線形性を利用して高い信号処理機能を実現しようとする導波路形光集積化と、電子素子の高速性と複雑な回路構成を駆使した電子回路との集積化(OEIC化)とを融合した、光集積回路の将来像の一例を示す。

* 富士通研究所 (〒243-01 厚木市森の里若宮10-1)

* Fujitsu Laboratories Ltd., (10-1, Morinosato-Wakamiya, Atsugi, 243-01)

Fig.1 Image of advanced OEIC structure.

このような概念に基づく集積化の研究は、Millerの提言¹⁾以来、誘電体導波路を中心とする光集積化の研究²⁾とYariv³⁾に始まるOEIC研究^{4,5)}の2方向に分かれて展開されてきたものであるが、これらが融合される時期も遠くない。本稿では、このような高機能集積化の基礎となり、またそれ自体の実用性も高いOEICに注目して、技術の現状と今後の展開について述べる。

OEICは、光半導体素子と電子回路を同一半導体基板上に集積するものであり、現在の光システムで行われている回路構成をほぼそのまま集積化により実現しようとするものであるから、集積化の概念としては極めて現実的である。このOEICによって、従来個別素子を接続する際に現れた寄生容量・インダクタンスを取除くことが出来るため、より高速・低雑音な光半導体素子の動作が実現され、かつ集積化の結果、より小型でより高信頼性のシステムがより低価格で実現できるものと期待される。OEICの研究は10年足らずを経過し、各所で活発な開発が行われており、特に最近我が国における展開は目覚ましい。しかし、現在のところ実用システムへ適用されるには到っていない。この理由は、光半導体素子と電子回路という、構造も機能も全く異なる要素を集積化することに、極めて高い水準の技術的革新が必要であり、これがまだ実用素子製造法の確立に達するまでになっていないためである。

以下では、我々が行ってきた波長 $0.8\mu\text{m}$ 帯で動作するGaAs系材料を用いたOEICの研究成

果を中心として、OEIC製作技術の要点と技術の現状を説明し、最後に今後の発展についても触れる。

2. OEICの基本技術

OEICの製作における基本技術としては、低転位、高純度の半導体基板及びエピタキシャル層の成長技術、電子素子と整合性良くかつ高性能な光素子の設計・製作技術、基板の劈開を用いずに実行できるレーザー端面の形成法を例とする集積化プロセス技術など、異種素子をモノリシック集積するための特有の技術が新しく開発されなければならない。またOEICのもつ高い機能と性能を取り出すための実装技術にも新たな発展がなければならない。これらのうち、OEICの製作において、当初から大きな問題であった集積化構造の開発について、以下で説明し、その他の技術については次節以下で述べる。

光素子と電子素子との構造上の差異を克服するため、いくつかの集積化構造が提案されてきた。Fig.2は、我々がPIN/FET形のOEIC受信器に対して試みた種々の集積化構造を示す。(a)は、両素子と半絶縁性のアイソレーション層を介して1回のエピタキシャル成長（ここではMOCVD法）で重み積ねる縦形集積構造であり、ブリッジ配線技術によって製作法が簡略化できる⁶⁾。しかし、電子回路直下にある導電層によって生ずる寄生容量のため応答速度や雑音特性に限界が生ずるのが欠点である。これを解決するためには、半絶縁性基板上に素子を並置する横形集積構造が不可欠となる。(b)は、横形集積構造における最大の問題、すなわち基板上の段差によってフォトリソグラフィーや配線形成が困難になるという問題を克服するために考案した緩斜面構造である⁷⁾。この構造では、イオンビームエッチング法の適用によって極めて浅い角度（約 15° ）の斜面が形成されている。この方法をさらに発展させて得た構造が(c)のプレーナ埋込み構造である⁸⁾。この構造ではOEIC全体がプレーナ化されており、光・電子両素子構造の微

Fig.2 Various structures of photodiode/FET receiver.

- (a) Vertical structure with bridge interconnection.
- (b) Graded-step structure.
- (c) Planar embedded structure.
- (d) Planar, compatible structure using MSM-PD

細化及びプロセスの再現性改善に極めて大きな効果がある。

このような横形化、プレーナ化と並んでOEIC構造に強く望まれる要件は、光素子と電子素子との間の構造および製作プロセスのコンパチビリティである。このためには、従来の個別光素子構造の制約を脱し、集積化に適した新規な光素子の導入が望まれる。この方角に沿うものとして、我々はプレーナ形で、FETとのコンパチビリティの高いMSM(metal-semi-

conductor-metal) フォトダイオード (PD) を導入することによってOEIC構造のさらなる簡略化を実現した⁹⁾。Fig.2(d)にこのOEIC構造を示す。フォトダイオードの楕形電極は、FETのゲートと同様Alショットキーバリアで形成される。Fig.3には、MSM-PDと通常のPIN-PDの容量-電圧特性の比較を示し、MSM-PDにより容量が数分の1以下に低減されることが分る。また外部量子効率の劣化も大きくない (PINの1/2) ため高速・低雑音受信器の製作に極めて有効である。

このようにPIN/FET形OEICでは、構造の横形集積化・プレーナ化及び素子間コンパチビリティの実現へと発展した。Fig.4は、このような経緯を、応答時間 (負荷抵抗1.3kΩで換算) とフォトダイオード及びフロントエンド総合容量との関係において示してみたものである。

Fig.3 Comparison of C-V characteristics for PIN- and MSM-photodiode.

Fig. 4 Dependence of receiver response time on photodiode and total capacitances.

MSMフォトダイオードによって応答速度は著しく改善され、フロントエンド全体の速度は既にFETゲート容量が左右していることが分る。

3. OEICの現状

3.1 OEIC受信器

MSM-PDを用いて試作したOEIC受信器の例を以下に示す。Fig. 5は、MSM-PDとGaAs FETより成る2段アンプ回路とを集積した受信器の(a)回路図と(b)チップ写真である¹⁰⁾。本OEICでは合計24個の素子が1mm×2.2mmのチップに集積されている。Fig. 6は、2 GbpsのNRZ光信号入力に対する出力波形のアイパターンを示す。MSM-PDの低容量(約0.1 pF)性とトランスインピーダンス形広帯域回路の採用によって、立上り時間約300 psの高速性が得られ、よく開いたアイパターンが得られている。また本OEICでは、2段アンプによって高い感度(出力電圧対光パワー比=400 V/W)が得られており、OEICによる光素子動作特性の改善の効果が明確に示されている。

OEICは、上述の特性改善のみならず、電子回路規模の拡大による高機能化やアレー化に対して威力がある。Fig. 7は受信回路の4チャンネル集積化を行ったものの(a)チップ写真と(b)感

Fig. 5 (a) circuit and (b) photograph of OEIC receiver involving MSM photodiode and two-stage amplifier.

Fig. 6 Eye pattern of OEIC receiver at 2 Gbps, NRZ.

度特性を示す。このチップは、合計52個の素子を用いてMSM-PDとトランスインピーダンス形アンプ (Fig. 5(a)の $Q_1 \sim Q_6$) とから成る受信回路をアレー化したもので、従来報告されているOEIC受信器では最大規模のものとなっている。感度特性は(b)に示すとおりチャンネル間の感度不均一が±9%におさえられており、集

Fig.7 (a) chip photograph and (b) sensitivity characteristics of four-channel OEIC receiver array.

積化構造の簡素化・安定化の効果が示されている。また2 Gbpsまでの高速受信特性と、入力換算雑音電流の値として約 $5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ が得られており、受信器の高速・低雑音化による特性改善

Fig.8 Structure of GRIN-SCH single quantum well laser.

効果が確かめられている。

3.2 OEIC送信器

送信器のOEIC化における特有の問題点として、レーザーの低消費電力化すなわち低い値化と集積レーザーの端面形成法の開発がある。低い値化に対しては、従来BH(buried-heterostructure)形レーザー構造¹²⁾などの採用によって努力が払われてきたものの、構造・プロセスの複雑さが問題であり、ここでも新しい集積化に適したレーザー構造の創造が望まれる。我々はMBE法で形成した量子井戸レーザーの採用によってこの問題への接近を行った。Fig.8は、GRIN-SCH (graded-index waveguide separate confinement heterostructure) SQW (single quantum well) 形レーザー構造を示す。井戸層は厚さ6 nmのGaAsで形成され、GRIN-SCH構造による光とキャリア閉じ込めが行われ、かつ量子井戸構造の結晶品質改善のため、起格子バッファ(SLB)層が導入されている。屈折率導波構造とするため、幅約3 μm、のリッジ導波路が表面に設けられている。このような構造によって、しきい値電流5 mA、量子効率80%以上、しきい値の温度特性が安定($T_0=160\text{K}$)なレーザーが開発されている¹³⁾。

レーザー端面形成法としては、化学エッチングやドライエッチングによる方法が研究されており、特にAlGaAs系材料に対してはCl₂ガスを用いたRIBE (reactive ion beam etching) 法¹⁴⁾によって、平坦かつ垂直な端面を形成す

る技術が実りつつあり、今後の実用化が期待される。一方、レーザー端面部の局所的な劈開を行うマイクロクリップ法^{15, 16)}は、その性質から理想的端面が得られることの魅力が大きい。我

Fig.9 (a) circuit and (b) photograph of four-channel OEIC transmitter array.

々の試作では、劈開歩留を高める工夫をした改善マイクロクリップ法⁵⁾を適用した。

送信器の集積化においても、受信器同様プレーナでコンパクトな集積構造が実現できるに越したことはない。しかし残念ながら、屈折率導波路構造の作り付けが必要なこと等、レーザー構造に対する制約の厳しさから、まだコンパクト化が実現される段階に無い。そこで、我々はFig.2(c)に示した、プレーナ埋込み構造によって送信器のOEIC化を行った。

これらの基礎技術を用いて、我々はレーザー、光出力モニター用フォトダイオード及びレーザー駆動用電子回路を集積した送信器を試作した。Fig.9は、(a)回路図と(b)4チャンネルアレー化されたOEIC送信器のチップ写真を示す¹⁷⁾。フォトダイオードはレーザーの接合を利用して形成され、ドライバはGaAs FETから成っている。チップ寸法は4 mm×2 mmであり、合計24個の素子が集積されている。レーザー端面はマイクロクリップ法によって形成されており、Fig.10のSEM写真にみられるとおり、良質の端面が得られている。

Fig.11は4チャンネル送信器におけるレーザーの光パワー—電流特性と、モニターフォトダイオードの出力電流—入力光パワー特性を示したものである。レーザーしきい値として 18 ± 3 mA、微分量子効率として 55 ± 5 %、またモニター効率として 2.4 ± 0.6 mA/Wが得られており、送

Fig.10 Scanning electron micrograph of microcleaved facet of laser incorporated in OEIC transmitter.

Fig.11 Laser light-current and monitor photodiode current-power characteristics for four channels.

Fig.12 Eye pattern of transmitter light output signal.

信器アレー化の可能性を実験的に示したものとして評価できよう。ドライバ回路を含めた入出力変換効率率は約 6 mW/V であり、量子井戸レーザーの高効率特性と、伝達コンダクタンスの良好な (約 50 mS/mm) FET 特性を反映した結果が得られた。また Fig.12 は、この送信器を 2 Gbps で動作させた時の光出力のアイパターン観測結果を示し、このような高速信号に対しても良好な変調動作が得られていることが分る。このように、送信器の集積化においても、基本的な機能をもつ回路の集積が達成されて高速変調動作が確かめられるとともに、アレー化の可能性も示された。

4. OEIC の応用

4.1 OEIC 光リンク

OEIC による高速化をはじめとする高性能化は、今後の光通信システムに期待される高速

(a)

(b)

Fig.13 (a) block diagram and (b) schematic illustration of 4×4 optical switch consisting of OEICs.

化・大容量化に対応できる重要な特徴である。我々は既に、緩斜面構造によって形成した PIN/アンプ形受信器及びレーザー/ドライバ形送信器を用いて、光リンク伝送実験を行い、 800 Mbps 、NRZ において 2 km の伝送に成功した¹⁸⁾。さらに、前に述べたような MSM-PD を用いた受信器による高速化、低雑音化の可能性を考慮すれば、Gbps 領域での光通信ができる OEIC は、既に実現できる水準に達していると考えて良い。

4.2 高機能光部品への適用

前節で述べた回路機能の拡大やアレー化の容易さによって、従来の個別光素子によっては実現が困難であった新しい光部品が OEIC の適用によって可能になる。我々は、4 チャンネル受信及び送信器を用いて、Fig.13(a) に示すような構成の 4×4 光スイッチを試作した。光入力

は OEIC で電気信号に変換・増幅され、GaAs

-ICで構成されるマトリクス形スイッチ回路で切替えられてからOEIC送信器に導かれて再び光出力となる。この構成では、すべてのチップがGaAsで形成されているため動作速度は極めて速く、また電子回路の機能は任意に設計できるため複雑な信号処理機能を実現することが可能である。また、OEICには容易に信号増幅機能を含ませることができるため、従来の光スイッチでは不可能であった入出力間での光利得が実現できる、など多くの特徴がある。

この光スイッチの試作においては、OEICの実装法が重要な技術課題となる。まずアレー化OEICに対する高効率光結合が必要である。Fig. 13(b)に示すとおり、MSM-PDに対しては先端斜め研磨ファイバ¹⁸⁾アレー、レーザーに対してはテーパ先端球ファイバ¹⁸⁾アレーをそれぞれ適用した。またOEICの高速動作特性を損うことなく電氣的接続を行うため、マイクロストリップラインを使用して回路実装を行った。その結果、従来の個別部品で構成した場合に比較して1桁も小型化された光スイッチモジュールが構成され、また560 Mbpsにおける動作確認によって高速動作特性が実証された¹⁹⁾。Table Iに、この光スイッチモジュールについて特性を評価した結果を示す。

Table I Operation characteristics of 4×4 optical switch

Wavelength	830 nm
Signal bitrate	560 Mbps (NRZ)
Optical power	> 0 dBm
Optical gain	> 0 dB
Crosstalk	< -20 dB
Switching speed	1 ns
Power consumption	3.7 W
Optical fiber	multimode (50/125 μ m, graded-index)
Module size	68×79×21 mm ³

4.3 光インターコネクション

OEICの将来の応用分野として光インターコネクション²⁰⁾が今後重要となろう。従来の

機器間・機器内の配線はすべて電子によって行われている。しかし、光を信号伝送に使えば、外界からの誘導や、信号相互間の干渉が無く、広帯域でかつ伝搬速度は電子配線にみられるCR積遅延などが無いために極めて高速であり、多ノード形システムにおける接地の問題も無い、など多くの長がもたらされ、これら光の長は高速で大容量の信号を操作する将来のシステムにおいて益々重要度を高めていくものと考えられる。ボード間、チップ間さらにはチップ内にこの光インターコネクションを適用し、信号の伝送やクロック信号の分配などの遅延を除き、信号処理を高効率化していく光インターコネクションの技術は、将来の光計算機や光交換システムの構築にとっての基礎となるものでもある。しかし、このような応用に向けては数多くの技術課題がある。その中でも、チップ内光伝送を可能にするための導波路形素子の開発や、OEIC送・受信器のさらなる高性能化や低消費電力化などは必須の項目であり、今後益々の発展が期待されるところである。

5. 今後の技術開発

Fig. 1や前節で触れたように、将来の高機能OEICを実現していくためには、広範囲の技術領域にわたる革新が必要であるが、本節ではより具体的な課題として、OEIC送信器構造の改善と1 μ m帯OEICの開発に話題を限り、我々が行っている最近の研究内容を紹介する。

5.1 新しいOEIC送信器構造

OEIC送信器は、前節までに見てきたように、受信器の場合に比較して構造が複雑でプロセスも困難である。そこで、性能の向上に加えて集積化により適した構造をもつレーザーの開発が望まれる。この方角の試みの一端を示すものとして、端面反射率の選択によって達成された超低しきい値レーザーの光出力-電流特性の一例をFig. 14に示す。このレーザーは、前述と同様のSLB GRIN-SCH SQW構造を用い高反射率(64%, 93%)端面により、室温のしき

Fig.14 Light-current characteristics of GRIN-SCH single quantum well laser having high reflectivity facets.

い値として2.8mAを実現したものである²¹⁾。量子効率も充分高いこと、また短共振器化の方法によってさらなる低しきい値化が見込めるばかりでなく、量子井戸構造における微分利得の増大に伴う緩和振動周波数の増大²²⁾の可能性もあることから、低電力・高速のレーザーとしてOEICにとって有効性が高い。

一方、集積化への適合性をあげるためには、プレーナでコンパチビリティのあるレーザー構造が是非必要である。Fig.15は、最近我々が試作した横方向電流注入形(LCI)レーザー²³⁾の構造を示す。このレーザーでは、MQW構造

Fig.15 Structure of lateral current injection (LCI) MQW laser formed by impurity induced disordering.

にn形及びp形電極として、それぞれSi及びZnの拡散を施し、これらによってプレーナ電極構造を形成すると同時に、不純物で誘起されるMQW構造の無秩序化現象を利用して作り付け導波路構造を形成する。従って、極めて簡単な構造によって屈折率導波形レーザーが形成できることになる。また、構造から電極容量が極端に低下できることも理解され、高速化にも有利である。さらに、MQW構造はトランジスタの構造としても利用できる可能性が高いことから、プレーナでかつコンパチビリティの高いOEIC構造の実現にとって極めて重要なものと考えられる。現在までの実験によって、室温パルス発振(しきい値27mA)が確かめられており、今後の特性改善によってOEICへの適用が期待できるものと考えている。また別の観点からすれば、このレーザー構造はイオン注入法による製作プロセスにも適合しやすい。従って、MBE成長装置と集束イオンビーム注入装置とを高真空試料搬送槽を介して連結したOEIC製作装置²⁴⁾など、OEIC用の新しいプロセスの開発とも呼応して、生産性高いOEIC製作法の実現へ寄与できるものと期待できる。

5.1 1μm帯OEIC

1μm帯で動作するOEICには、InGaAs(P)/InP系材料の導入が必要である。前節までに述べた多くの基礎技術は、この材料に対しても適用できるが、ショットキーバリアの形成には障壁高(約0.4eV以下)の増大のための方策が必要であることや、未だ良質な量子井戸構造が形成される段階に到っていないことなど、基本的なところでも問題はあ。しかしながら、光通信を中心とするOEICの応用を考えた場合、石英ファイバの低損失・低分散特性を実現できるこの波長域は、今後の高度光通信システムにおける最重要波長域であることに疑いは無い。我々は、このような背景を認めつつ、OEIC化が特に重要となる超高速・超低雑音受信器に向けての検討を行っている。Fig.16は、GaInAs PIN/FET²⁵⁾の(a)構造と(b)チップ写真

(a)

(b)

Fig.16 (a) cross section and (b) scanning electron micrograph of GaInAs PIN/FET with planar embedded structure.

を示す。(a)に示すとおり前述と同様の埋込み構造PIN-PDとFETとがプレーナ形に集積されている。FETのゲート電極は、高バンドギャップのAlInAsキャップ層を導入し、障壁高を高め(約0.8eV)ることによって形成されている。このようなプレーナ構造によって極めて小受光径(20 μ m)のPIN-PDが実現され、容量は0.08 pF迄低減された。PIN/FET動作においても立上り時間40psの応答が観測されており、今後受信器としての最適設計によって低雑音特性が実現されていくことが期待される。

6. まとめ

OEICは近年著しい発展を遂げ、GaAs系では基本的な受信器・送信器が試作され、集積化による高性能化や高機能化の可能性が示されると同時に、Gbps領域の光リンクや高機能光部品の構築への適用性が実証されるに至っている。今後、光通信や光情報処理システムにおける高速化・大容量化・高機能化の要求が高まるに伴い、OEICの重要性が加速されることは必至であろう。これに対応できるOEIC技術として、性能改善と生産性の向上とを目指した製作技術の確立が重要であり、また一方導波路デバイス等新規な機能を持つ要素との融合によって集積化のインパクトを最大限に発揮できる集積化形態が生み出されていくものと期待される。

参考文献

- 1) S.E. Miller: Bell Syst. Tech. J. **48** (1969) 2059.
- 2) P.K. Tien: Rev. Modern Phys. **49** (1977) 361.
- 3) A. Yariv: IEEE Trans. Electron Devices **ED-31** (1984) 1656.
- 4) I. Hayashi: Optoelectronics (Mita Press, Tokyo) **1** (1986) 1.
- 5) O. Wada, T. Sakurai and T. Nakagami: IEEE J. Quantum Electron, **QE-22** (1986) 805.
- 6) S. Miura, O. Wada, H. Hamaguchi, M. Ito, M. Makiuchi, N. Nakai, and T. Sakurai: IEEE Electron Device Lett., **EDL-4** (1985) 375.
- 7) S. Miura, H. Machida, O. Wada, K. Nakai and T. Sakurai: Appl. Phys. Lett. **46** (1985) 389.
- 8) S. Miura, O. Wada and K. Nakai: Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 1461.
- 9) M. Ito, T. Kumai, H. Hamaguchi, M. Makiuchi, K. Nakai, O. Wada and T. Sakurai: Appl. Phys. Lett. **47** (1985) 1129.
- 10) H. Hamaguchi, M. Makiuchi, T. Kumai and O. Wada: IEEE Electron Device Lett. **EDL-8** (1987) 39.
- 11) M. Makiuchi, H. Hamaguchi, T. Kumai, M. Ito, O. Wada and T. Sakurai: IEEE Electron Device Lett. **EDL-6** (1985) 634.
- 12) I. Ury, K. Law, N. Bar-Chaim and A. Yariv: Appl. Phys. Lett. **41** (1982) 126.
- 13) O. Wada, T. Sanada, M. Kuno and T. Fujii: Electron. Lett. **21** (1985) 1025.
- 14) K. Asakawa, and S. Sugeta: Jpn. J. Appl. Phys. **22** (1983) L653.

- 15) H. Blaubelt, N. Bar-Chaim, D. Fekete, S. Magalit and A. Yariv: Appl. Phys. Lett. **40** (1982) 289.
- 16) O. Wada, S. Yamakoshi, T. Fujii, S. Hiyamizu, and T. Sakurai: Electron. Lett., **18** (1982) 189.
- 17) M. Kuno, T. Sanada, H. Nobuhara, M. Makiuchi, T. Fujii, O. Wada and T. Sakurai: Appl. Phys. Lett. **49** (1986) 1575.
- 18) T. Horimatsu, T. Iwama, Y. Oikawa, T. Touge M. Makiuchi, O. Wada and T. Nakagami: IEEE J. Lightwave Technol. **LT-4** (1986) 680.
- 19) T. Iwama, Y. Oikawa, K. Yamaguchi, T. Horimatsu, M. Makiuchi and H. Hamaguchi: Tech. Dig. OFC/IOOC 1987, Reno.P. 161.
- 20) J.W. Goodman, F.J. Leonberger, S. Kung, and R.A. Athale: Proc. IEEE **72** (1984) 850.
- 21) H. Nobuhara, O. Wada and T. Fujii: unpublished.
- 22) K. Uomi, N. Chinone, T. Ohtoshi and T. Kajimura: Jpn. J. Appl. Phys. **24** (1985) L539.
- 23) A. Furuya, M. Makiuchi, O. Wada, T. Fujii and H. Nobuhara: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L134.
- 24) H. Hashimoto, and E. Miyauchi, Extended Abstract: 16th Conf. Solid State Devices and Materials, Kobe, Japan, 1984, P. 121.
- 25) T. Mikawa, S. Miura, H. Kuwazuka, T. Fujii and O. Wada, Tech. Dig. OFC/IOOC 1987, P. 160.