

〔研究〕

その場ECRドライエッチングおよびガスエッチング / MOCVD再成長プロセスによる埋め込み型AlGaAs系レーザ

AlGaAs-GaAs Buried Heterostructure Laser with in situ ECR or Gas-Phase Etching and MOCVD Regrowth Process

小倉 睦郎
M. OGURA

An in situ dry etching and Metalorganic chemical-vapor deposition (MOCVD) regrowth process is developed to realize AlGaAs/GaAs buried heterostructure (BH) laser diodes with reduced fabrication steps. By the in situ ECR (Electron cyclotron resonance) etching and MOCVD regrowth technique, arbitrary shaped BH waveguides with strong lateral optical confinement are realized, and applied to complex waveguide lasers and surface emitting lasers. We also discovered that C_2H_5Cl gas-phase etching forms vertical facets in the AlGaAs graded index separate confinement (GRINSCH) structure along the $[0\bar{1}1]$ direction. BH lasers with etch facets and facet coatings are developed by the in situ C_2H_5Cl gas-phase etching and regrowth process. This technique combines the three processing steps of waveguide definition, facet formation, and facet coating into one consecutive gas manipulation in the same growth furnace, and reduced the production cost of the high performance laser greatly. The threshold current of the BH laser by such in situ process turned out to be similar to that of the ridge waveguide lasers, which indicates the existence of interface defects at the regrown interfaces. Interface impurities and surface recombination velocity are also estimated by the secondary ions mass spectroscopy (SIMS) and size effect of photoluminescence and lasing characteristics.

§1 はじめに

半導体レーザ，変調器，ディテクタ等を光導波路で結び，同一基板に集積された光集積回路(OEIC)は光通信や光情報処理のキーデバイスとして期待されているが，必ずしも商業的には成功していないように思われる。これは，集積化による機能の向上が制作コストの上昇に見合わないためで，今後のOEICの発展のためには簡単かつ自由な素子の配置が可能なプロセス技術の開発が必要となる。従来の光半導体デバイス制作プロセスでは結晶成長と導波路形成の

ためのリソグラフィおよびエッチングさらには再成長プロセスなどを順次独立に実行していたが，それらの一部を結合することにより全体の作業量を減少させることが可能になる。例えば，段差基板上や絶縁膜で一部被覆された基板上の一回の選択成長により低閾値の埋め込み型半導体レーザが実現されており，結晶成長と導波路形成を同時に実現することによりプロセスの総作業量を軽減された好例である¹⁻³⁾。但し光の分岐，合波，干渉等を用いた，より高度なOEICを実現するには図1に示すように光素子を自由に配置しそれらを曲がりを含む光導波路で結合する必

KEY WORDS : In Situ Process, MOCVD, OEIC, Dry etching, Gas etching, facet Coating

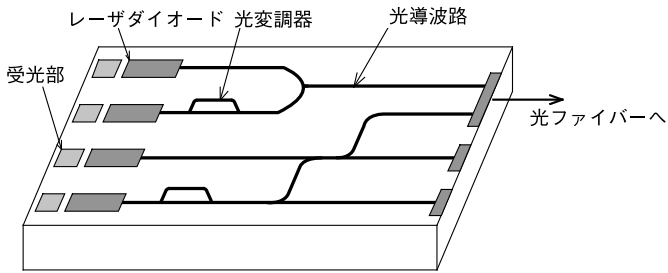


図1 想定したOEICの模式図
光源，変調器，ディテクタなどが曲がりや分岐光導波路により接続されている。

要があり，結晶方位に依存しない加工技術が必要になる。リッジ型レーザや光導波路をドライエッチング技術を用いて形成することにより自由度の高い光素子の配置が可能となり，光スイッチマトリクスを制作した例がある⁴⁾。しかし，リッジ型導波路の横モード閉じこめ効果を再現性良く得るためには厳密なエッチング深さの制御が必要となり必ずしも容易ではない。また埋め込み構造を比較して，横方向の屈折率差が小さく導波路の曲率半径を大きく取る必要がある。

本報告では，第2章においてその場 ECR (Electron cyclotron resonance) エッチング / MOCVD 再成長プロセスにおける AlGaAs系レーザの製作について述べる。塩素系ガスを用いたECRドライエッチング装置とMOCVD反応炉とを結合し，比較的簡単なプロセスにより

AlGaAs系埋め込み構造を制作し，複合キャビティレーザや面発光レーザを実現した。また，第3章において気相ガスエッチングにおいて，A1組成によらず垂直端面が形成されることを見だし，その場ECRガスエッチング / MOCVD再成長プロセスにおける端面窓付き埋め込み型レーザを作製したので報告する。

§2 その場ECRエッチング・再成長プロセスによる埋め込み型レーザの製作

2.1 その場ECRエッチング・再成長プロセスの概要

図2 にその場エッチング・再成長の概略及び装置の模式図を示す。AlGaAs系化合物半導体の場合，結晶欠陥の少ないヘテロ界面を作成するためにはエッチングされた表面を大気に晒すことなく再成長する必要がある。この目的を果たすために，結晶成長炉の手前にエッチング装置を設け，エッチ後直ちに試料を結晶成長炉に導入し再成長するプロセスを開発した。いわゆる真空一貫プロセスに於いては，リソグラフィ工程を成長装置に連結された電子ビームやイオンビーム描画装置で行う必要がある⁵⁾，描画時の振動の問題や現象，転写工程を新規に開発する必要があった。本プロセスではリソグラフィ技術とその場エッチング・再成長プロセスが分離されているため，すでに確立した光露光技術や電子線描画技術を用いて微細な埋め込み構造を作成することが可能である。

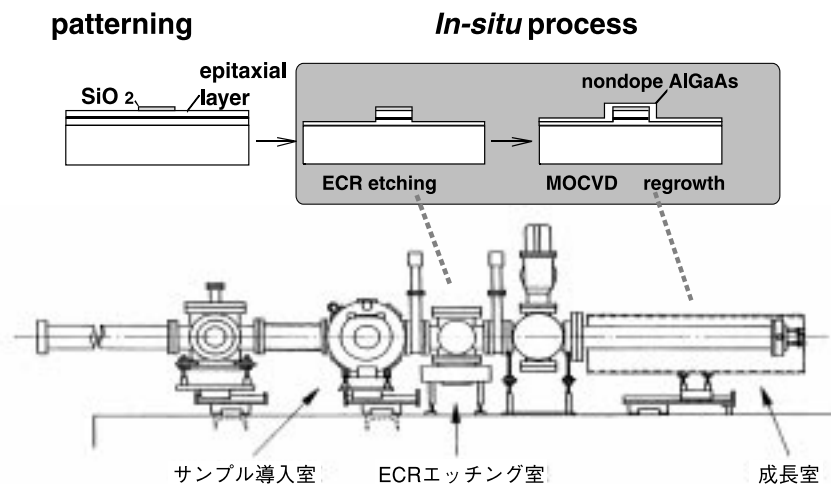


図2 その場ECRエッチング・MOCVD再成長プロセス概略および装置の模式図
ECRエッチング後，試料は大気に晒されることなく成長室に移送され，活性層の側面がノンドーパAlGaAs層により保護される。

表1 ECRおよびRIEドライエッチングにおける各材料のエッチング速度
 ECRエッチング条件：Ar1.5sccm, Cl22sccm(雰囲気), 真空度 8×10^{-4} torr,
 マイクロ波電力60W, イオン電流80mm/cm², 加速電圧500V, 試料温度0。
 RIEエッチング条件：CF₄, or SF₆, 40ccm, 真空度4.5Pa, RF power 100W。
 化合物半導体と無機マスクとのECRエッチングにおける選択比は約6である。

	Etch rate by ECR (nm/min)	Etch rate by RIE (nm/min)
GaAs and AlGaAs	66	
SiO ₂	11	47 (by CF ₄)
W	10	133 (by SF ₆)

プロセスの手順は、通常のリソグラフィと平行平板型高周波ドライエッチング装置によりタングステンや SiO₂ 等の無機マスクを量子井戸レーザ用ウェファ上に形成し、結晶成長炉に隣接したドライエッチング装置に試料を導入し、活性層の部分以外をECRエッチングにより除去した後、直ちに試料を結晶成長炉に導入し、活性層の側面にノンドープ AlGaAs を再成長する。無機マスクの要件はドライエッチング耐性が大きく、半導体とのエッチング選択比が大きいこと、エッチング後の再成長温度（約 700 °C）に耐えること、パタニングそのものは容易であること等が重要で、本研究では SiO₂ とタングステンを選択した。ECRエッチング条件・エッチング速度などを表1に示す。ECRエッチングには塩素イオンを照射する場合と塩素雰囲気中でアルゴンイオンを照射する場合があるが、選択比が高く取れる後者を選択した。後で述べるようにSiO₂マスクを用いた場合、成長中に微量の塩酸ガスを添加することによりマスク上のポリ結晶の形成を防止することができる。

2.2 その場ECRエッチング・再成長プロセスによる再成長界面の評価

その場エッチング再成長プロセスの最適化と界面再結合速度の評価を行うため、図3の挿入図に示すように、SiO₂パタンをストライプ状に形成し、そのフォトルミネセンス(PL)による相対発光強度、および、ライフタイムとストライプ幅との関係性を比較した。また表2にその場エッチ再成長、ドライエッチ、ウェットエッチおよびリッジ構造における相対フォトルミネセンス強度とライフタイムを示す。これらの結果、再結合速度は、1000m/sec程度で、界面処理をしないものよりは、一桁程度良いが、リッジ型と比べ

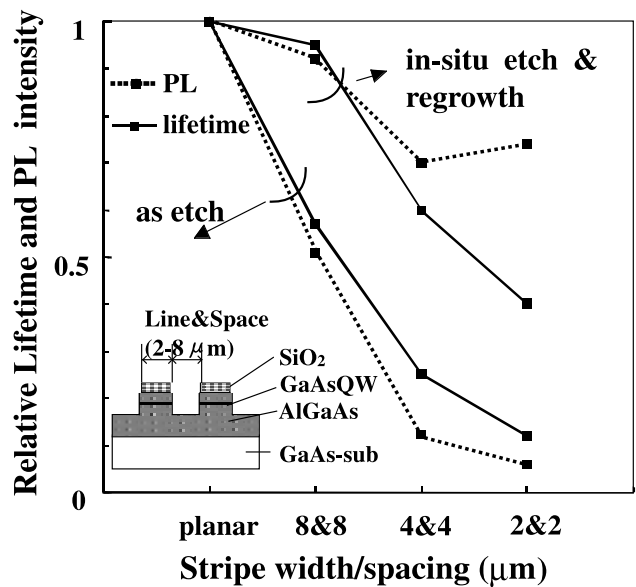


図3 その場エッチング・再成長プロセスによるエッチ側面コート付きの場合と再成長プロセスを省いた場合(As etch)のフォトルミネセンスの相対強度とライフタイム。

て同程度であることが分かった。

2.3 その場ECRエッチング・再成長プロセスによる端面出射レーザ⁶⁾

図4はその場エッチング・再成長プロセスによる端面出射レーザの模式図、SEMおよびTEM断面図を示す。まず、p-GaAs (0.07 μm), P-AlGaAsクラッド (X=0.4, 1.5 μm), GRIN (X=0.4->0.2, 0.09 μm), QW (10nm), GR1N (X=0.2->0.4, 0.09 μm), N-AlGaAs (X=0.4, 1.5 μm) からなるGRIN-SCH構造を減圧MOCVD法により成長し、その上に無機レジストとなる W (500nm) または SiO₂ (500nm) 薄膜をスパッタリングにより形成する。幅 3 ないし 12 μm のストライ

表2 その場エッチ再成長,ドライエッチ,ウェットエッチおよびリッジ構造における相対フォトルミネセンス強度とライフタイム。

	In-situe etch®rowth		As ECR etch		As wet etch		Ridge structure (metal stripe)	
	pl	lifetime	pl	lifetime	pl	lifetime	pl	lifetime
bulk	1.0	2.0 (1.0)	1.0	2.3 (1.0)	1.0	2.6 (1.0)	1.0	2.6 (1.0)
8&8 μ m	0.92	1.9 (0.95)	0.51	1.3 (0.57)	0.35	1.7 (0.65)	0.76	1.9 (0.73)
4&4 μ m	0.70	1.2 (0.6)	0.12	0.57(0.25)	0.01	0.67(0.26)	0.52	1.5 (0.58)
2&2 μ m	0.74	0.9 (0.45)	0.06	0.28(0.12)	0.003	0.16(0.06)	0.37	2.0 (0.77)

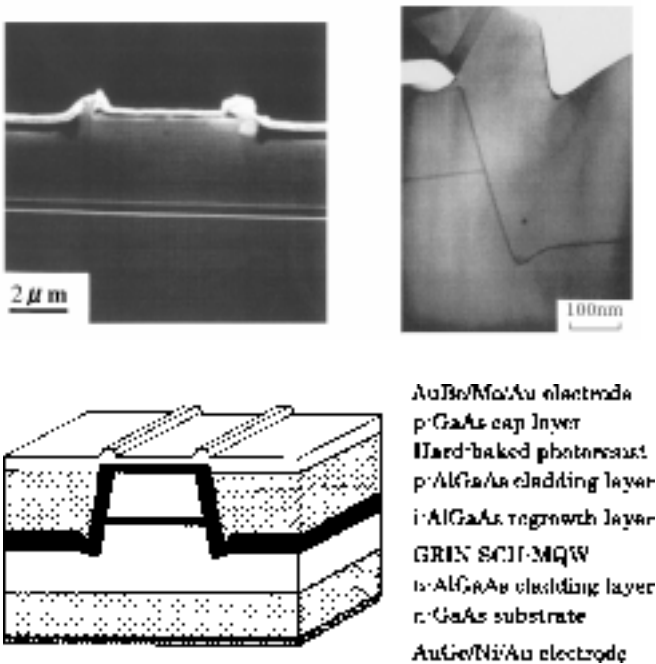


図4 その場エッチング・再成長プロセスによる端面射出レーザーのSEM(左), TEM(右)断面図および模式図(下) SEMによる再成長界面には明瞭な結晶欠陥は見られないが,TEM像においては,界面に沿って10nm位の幅で量子井戸と同様なコントラストが観察される。

パタンをRIEエッチングにより形成した後, その場エッチング・再成長プロセスにより 0.5 μ m のノドープ Al_{0.4}GaAs を成長した。再成長界面には高分解能 SEM で観察する限り結晶欠陥は見られないが TEM 観察によると, 量子井戸と同様な太さのコントラストが存在する。再成長後, ポリイミドやハードベイクフォトレジストにより平坦化を行い, タングステンをマスク材料に用いた場合は, 独立した ECR エッチング装置により多結晶を除去した後, また SiO₂ をマスクに用いた場合は緩衝フッ酸により SiO₂ を除去した後, Ti-AuP 型電極を形成した。製作に必要なマスクはストライ

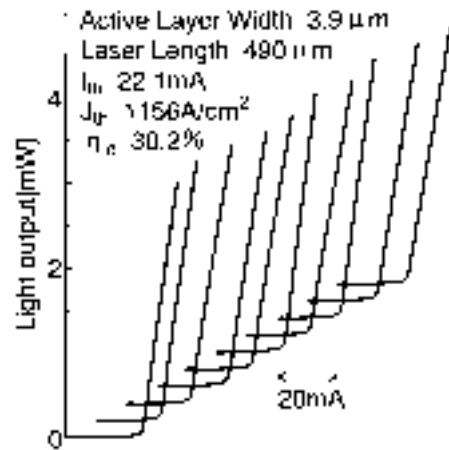


図5 その場エッチング・再成長プロセスによる埋め込み型端面射出レーザーの光 - 電流特性。

プ形成用と電極形成用の 2 枚であり, リッジ構造と同程度のプロセスステップで埋め込み構造が実現できる。また, その場エッチングにおけるエッチ深さは特性に影響しないため, 素子の均一性や歩留まりの点からはリッジ構造よりも有利である。図5 に一本の劈開バーから得られた10本の端面射出レーザーの光 - 電流特性を示す。閾値電流はレーザー長 500 μ m のもので 22mA, 閾値電流密度は1.2KA/cm²である。図6に示すように遠視野像は, ストライブ幅 6 μ m までは, 単峰性を示す。図7 はストライブ幅を変化させた時の閾値電流の実験値 (黒丸, 実線) を表面再結合速度をパラメタとした理論特性 (小丸, 点線) と比較したものである。実験で得られた閾値はストライブ幅 4 μ m 程度で飽和している。理論値の算出においては, バルクの再結合寿命を 5nsec, 拡散定数を 2 \times 10⁻³m²/s, またバルクの利得は $g(x)=B(N-N_0)$ として B を 10⁻²⁰m², N₀を2.0 \times 10²⁴/m³と仮定した。実験値は表面再結合速度 1000m/s から 2000m/s に対応し, 埋め込み構造の再成

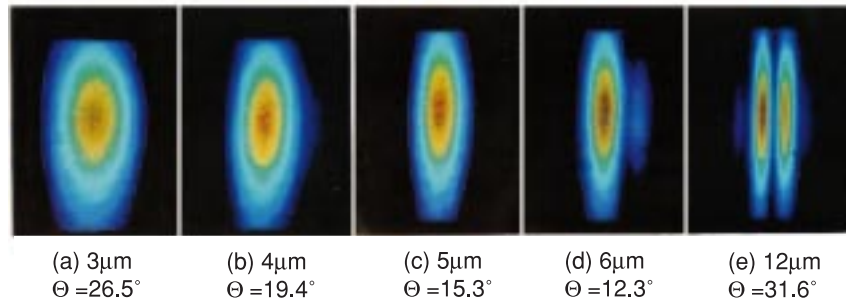


図6 埋め込み型端面出射レーザの遠視野像
ストライブ幅 6μmまでは、基本横モード特性を示す。

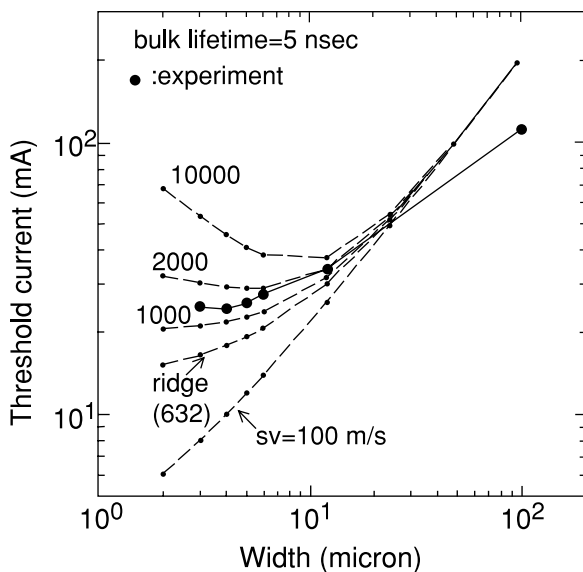


図7 ストライブ幅を変化させた時の閾値電の実験値 (黒丸、実線) と表面再結合速度をパラメータとした理論特徴 (小丸、点線)。実験値は表面再結合速度が 1000m/s から 2000m/s に対応している。

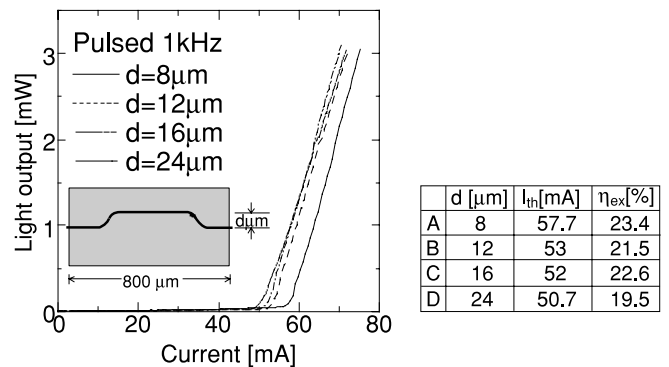


図8 その場プロセスによる埋め込み型曲り導波路レーザの電流 - 光出力特性。

図8は曲がり導波路レーザの模式図および発振特性を示す。その場ドライエッチングによる埋め込み型レーザは横方向の屈折率差が大きいので、曲率を持つ導波路においても発振が可能であるが、同様な形状のリッジ型レーザでは発振不可能であった。

図9は、分岐レーザの平面顕微鏡写真とSEM像を示す。埋め込み型の分岐導波路が、SiO₂のパタニングどおりに形成されている。2本の光導波路の間隔は8μmである。図10は、分岐レーザの近視野像(左)、および左右の分岐の通電電流を変化させた場合の遠視野像(右)を示す。遠視野像は、約5度の周期での干渉パターンとなるが、一方の分枝からの光の位相が0, π, 2πと変化するため中心部の強弱が変化している。また、レーザキャビティとY分岐を分離し、各ブランチの等価屈折率を変化させることによりビーム偏向レーザ⁷⁾を実現することが可能となる。

また、その場 ECRエッチ・MOCVD再成長プロセスを用いて埋め込み型マッハチェンダ複合共振器レーザを作成した。図11はマッハチェンダ構造の模式図

長界面の結晶性に問題が残っていることを示している。

2.4 その場ECRエッチング・再成長プロセスによる複合共振器レーザ

一般に埋め込み型光導波路は、横方向の等価屈折率が急峻であるため、小さな曲率半径の導波路や正確な結合長を持つ方向性結合器を作成することが容易である。特に、その場エッチング・再成長プロセスにおいてはドライエッチングにより形状が決めるため、微細加工性に優れ、結晶方位に依存せず自由に素子を配置できる利点がある。

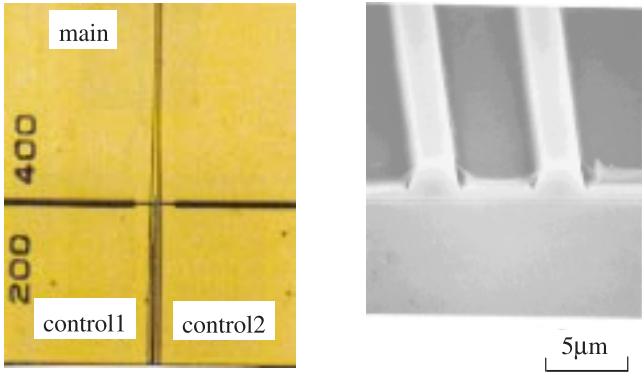


図9 分岐レーザの平面顕微鏡写真(左)と端面SEM像(右)
 端面において,出射端の中心は8mm離れている。また,
 左右分岐および分岐前導波路の電極を分離すること
 により,3ヶ所を独立に通電することができる。

(右)及び表面写真(左)に示す。導波路の幅は3µm, その側面は深さ2.4µmまで再成長による $A_{10.4}GaAs$ により保護されている。写真は再成長直後でマッハチェンダの正面は SiO_2 に覆われている。交差角は2.6度, 両アームによる導波路間隔は8µmである。

図11(下)に片方のアームにそれぞれ6,10,12mAの電流を注入したときの発振スペクトルを示す。注入電流を調節することにより,パルス駆動時においても単一縦モードが得られる。離散的ではあるが3.5nm程度,波長をチューニングすることが可能である。マッハチェンダ干渉器の各分岐の光路差は0.8µmと小さく,強い波長選択性は期待できない。本構造で

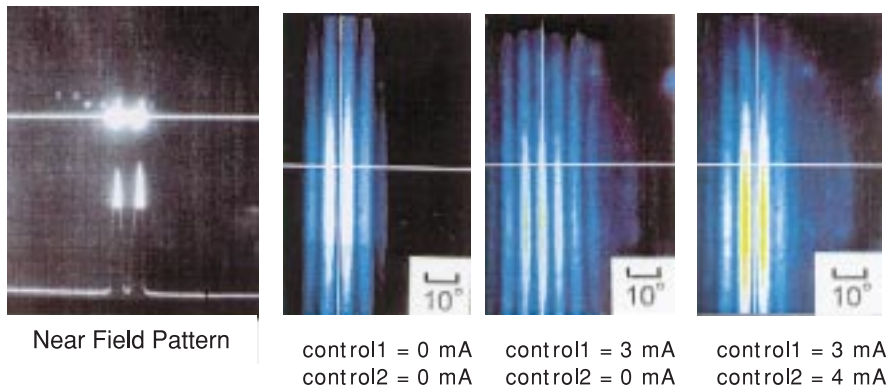


図10 分岐レーザの近視野像(左),および左右の分岐の通電電流を変化させた場合の遠視野像(右)
 遠視野像は,約5度の周期での干渉パターンとなるが,一方の分岐からの光の位相が $0, \pi, 2\pi$ と変化するため中心部の強弱が変化している。

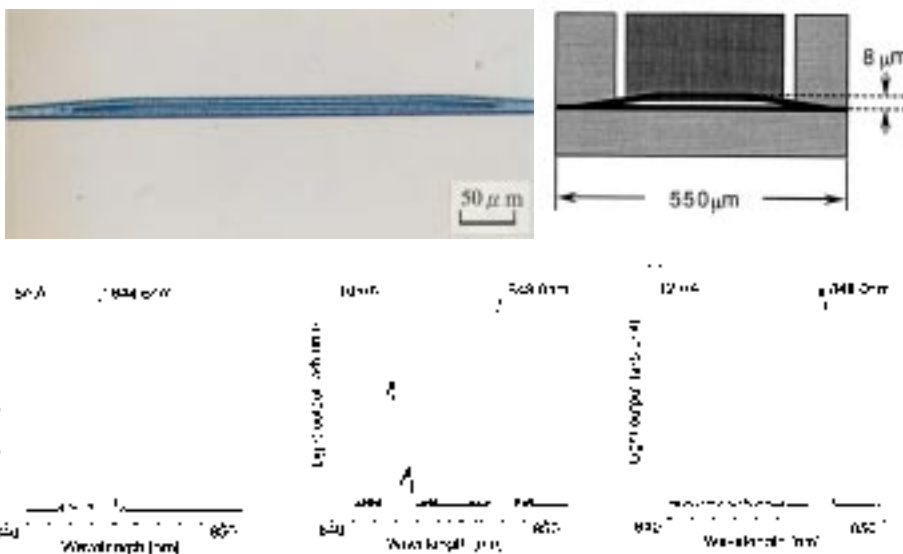


図11 複合キャビティレーザ光学写真(上,左)およびその模式図(上,右)
 片方のアームにそれぞれ6,10,12mAの電流を注入したときの発振スペクトル(下)。

は、レーザの直線部分と分岐の境界で反射が起こり、Cキューブレーザ⁸⁾と同様な波長安定化機構が働いていると考えられる。その場プロセスによる複合キャビティレーザは、フォトマスクの設計変更のみで直線形状の通常レーザと全く同一のプロセスにより制作できる利点があり、安価な波長安定化レーザへの応用が期待できる。

2.5 その場エッチング・再成長プロセスによる埋め込み型面発光レーザ

MOCVDを用いたその場エッチング・再成長プロセスは、高 Al 組成を持つ面発光レーザの埋め込み構造を作るためにも有効である。図12は、その場エッチング・再成長プロセスを用いた埋め込み型面発光レーザの再成長後の表面写真(右上)、SEM断面像(左上)および模式図(下)を示す。無機マスクはタングステンとSiO₂の多層構造とし、ECRエッチング後タングステンが完全に除去され、SiO₂の表面が現れるように膜厚を調節した。表面写真に示すように、再成長中に微量の塩酸ガス(5%, 6sccm)を導入することによりSiO₂上の多結晶の生成を完全に防止できる。再成長後の素子製作プロセスは端面出射レーザと同様に平坦化を行った後、SiO₂を取り除き、P型電極をリフトオフプロセスにより形成する。ECRエッチングとMBE再成長を組み合わせた報告⁹⁾もされているが、MBEの場合はマスク上の多結晶の生成が避け

られず素子製作プロセスが煩雑になる。図13は、埋め込み型面発光レーザの電流 - 光特性を示す。閾値電流は面積により4mAから18mAで、閾値電流密度は約1.2KA/cm²である。図14は、埋め込み構造(黒丸)、プロトン分離構造(白丸)の面発光レーザの閾値をそれぞれ表面再結合速度1000m/sと100m/sにおける理論値¹⁰⁾と比較したものである。実験で得られた閾値電流は表面再結合速度1000m/sに近く、端面出射レーザの場合と同様に再成長界面の結晶性に問題があることを示唆している。

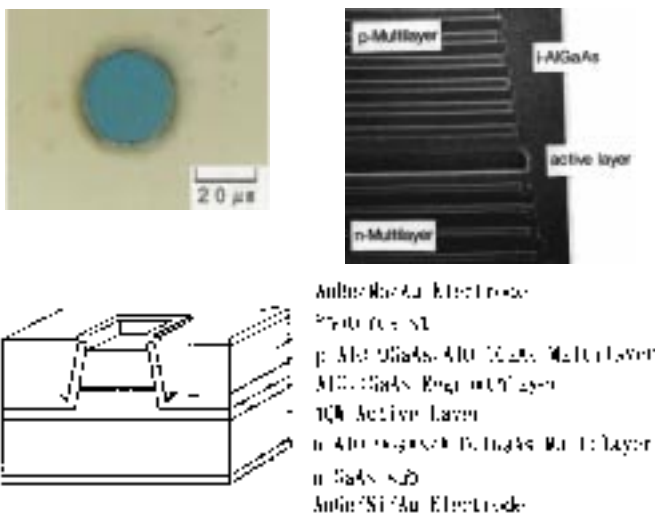


図12 その場エッチング・再成長プロセスを用いた埋め込み型面発光レーザの再成長後の表面写真(右上)、SEM断面像(左上)および模式図(下)。

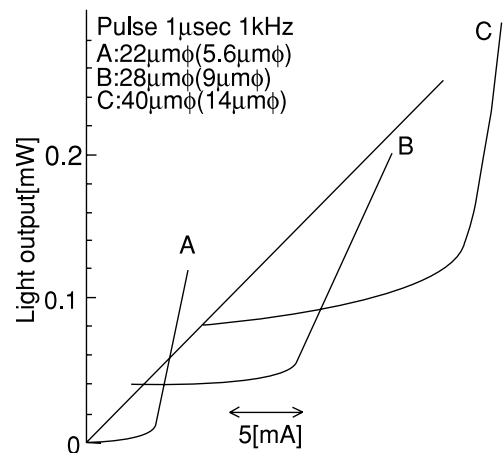


図13 埋め込み型面発光レーザの電流 - 光特性。

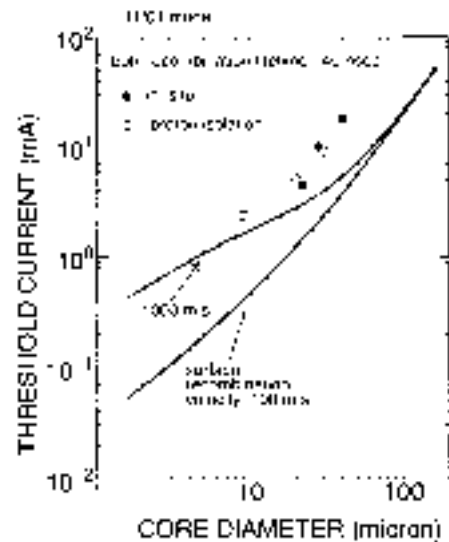


図14 その場エッチング・再成長プロセスを用いた埋め込み型面発光レーザ(黒丸)およびプロトン分離による面発光レーザ(白丸)のしきい値電流。実線は、それぞれ、表面再結合速度を100および1000m/sとしたときのしきい値電流の理論予測値。

2.6 まとめ

その場ECRエッチング・MOCVD再成長プロセスにより AlGaAs系埋め込み型端面出射レーザや面発光レーザを作成した。本プロセスにおいて任意の形状を持つ埋め込み構造が比較的簡単なプロセスで実現可能となり、複合共振器レーザ等、高機能レーザが容易に実現できた。但し閾値電流はリッジ型やプロトン分離型レーザに近く、表面再結合が無視できないことを示している。

§3 その場気相エッチングによるAlGaAs系エッチファセット埋め込み型レーザの製作¹¹⁾

その場ドライエッチング再成長技術は、自由な形状の埋め込み型導波路構造を作製することができる利点があるが、ドライエッチング装置と結晶成長装置を別々のチェンバーに設ける必要があるため、装置や成長手順が複雑になる問題があった。成長装置内部で気相エッチングにより垂直エッチングが可能になれば、MOCVD再成長プロセスを組み合わせ、端面保護膜付きエッチファセット埋め込みレーザを簡単な工程で作製することができる。一方、AlGaAs系化合物半導体の垂直端面形成は、エッチ形状がAl組成に影響されやすく、従来ドライエッチング以外の手法では困難であったが、本研究により初めて塩化エチル(C₂H₅Cl)気相ガスエッチによりAlGaAs系で垂直な(011)端面を形成することができた。端面保護膜付きエッチファセット埋め込みレーザを製作するためには従来プロセスによると1.ウエットエッチング、2.埋め込み成長、3.劈開あるいはドライエッチング、および4.端面コーティングの4工程が必要であるが、その場プロセスにより、MOCVD反応炉中のガスの切り替えのみで実現することが可能になった。

3.1 気相エッチングによるAlGaAs垂直端面の形成

従来、GaAs系化合物半導体の気相エッチングは、塩素や塩酸ガスが用いられて来た。塩素ガスは、Al組成による端面形状の差が少ない利点があるが、逆メサ形状になること、MOCVD成長のキャリアガスに用いる水素と反応するなどの問題がある。塩酸ガスの場合、GaAsのエッチングには適しているが、AlGaAsのエッチング速度が極端に遅いため、Al組成が複雑に

変化する半導体レーザ構造に適用することは困難である。そこで、塩素(Cl-Cl, 243Kcal)と塩酸(H-Cl, 431Kcal)との中間の結合エネルギー(C₂H₅-Cl, 341Kcal)を持つ塩化エチル(C₂H₅Cl)ガスに着目し、エッチング端面形状を観察した。

用いた試料は、GaAsおよびAl組成0.3および0.53のAlGaAsに熱CVDにより厚さ60nm、巾10μmのSiO₂を形成したものである。AlGaAsには、表面酸化を防止するために20nmのGaAsキャップ層を成長している。試料は、35%塩酸溶液により酸化膜を除去の後、MOCVD成長炉に導入し、まず、アルシン20%流量 200sccmにて720度5分間の熱クリーニングした後、塩化エチルガス(C₂H₅Cl, 窒素ベース2.4%) 30~60 SCCMによりエッチングした。成長炉の圧力は0.1気圧、キャリアガスの水素流量は4SLMである。図15は、30分エッチ後の逆メサ方向[011]のGaAs(a)、Al_{0.3}GaAs(b)、Al_{0.53}GaAs(c)、および順メサ方向[011]のGaAs(d)のSEM断面写真を示す。逆メサ方向のGaAsおよびAlGaAsにおいて、ほとんど垂直なファセットが得られている。端面の角度は85度である。また、順メサ方向では、(111)B面に対応する55度となっている。図16は、Al組成とエッチング組成およびアンダーカット量との関係を示す。Al組成の増加に伴い、エッチング速度は、1/2程

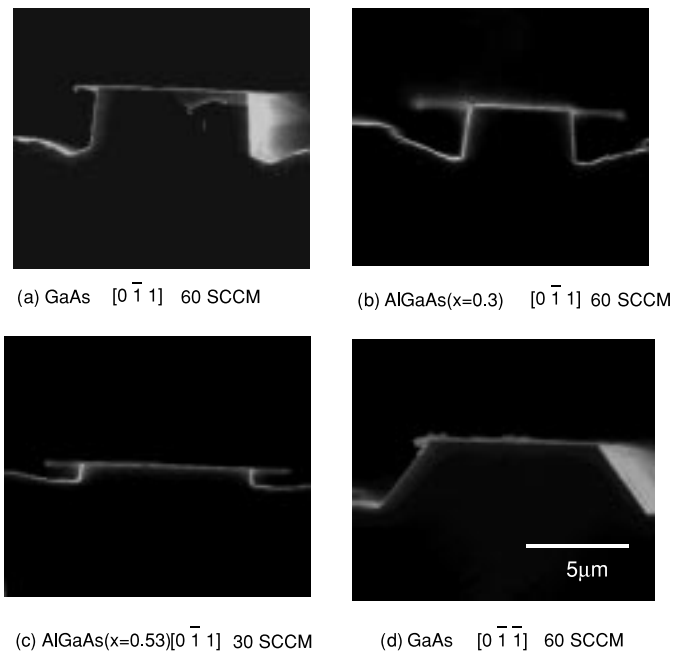


図15 塩化エチル気相エッチングによるGaAsおよびAlGaAsのSEM断面図 680 , 30分。

度に減少し、一方アンダーカット量は増加している。これらの Al 組成とエッチング形状を基に、エッチファセットレーザのマスク形状を決定することができる。例えば、Al 組成0.4のAlGaAs 層2μmをエッチングするためには、マスク巾は、実際のストライプ巾よりも3.7μm増加させる必要がある。

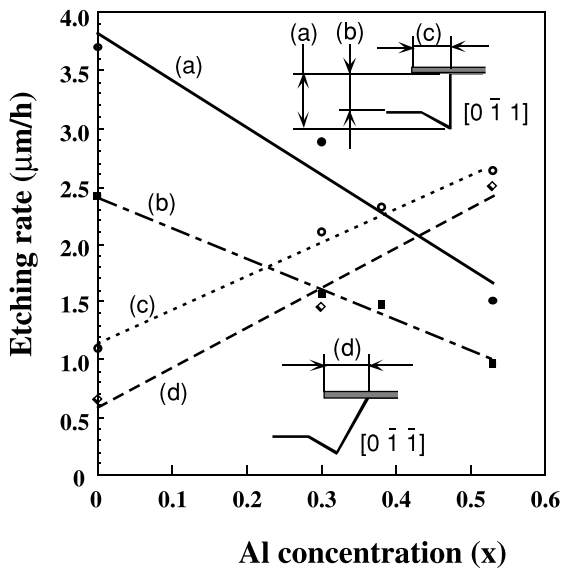


図16 塩化エチルによる気相エッチングのエッチング速度 (a)マスク端 (b)平坦部分 (c)[011] および (d)[011]方向のアンダーカット

3.2 気相エッチング・再成長による端面保護膜付き埋め込みレーザの製作

上記エッチング技術とMOCVD再成長とを組み合わせることにより、端面保護膜付き埋め込みレーザを試作した。まず、グリーンガイド層を持つ量子井戸レーザウェファァーを成長させ、その上にSiO₂を形成した。レーザウェファァーのクラッド層のAl 組成は0.4、グリーン層の厚さは、片側0.1μmでAl 組成0.2まで放物線状に垂下させた。活性層は3重の量子井戸(厚さ10nm)である。SiO₂マスクは、エッチファセットを形成するための[011]方向のストライプに、埋め込み型導波路の方向に沿った[011]方向のストライプを結合したH型の形状とした。ストライプ巾は、[011]方向に10μm、[011]方向に12μmである。結晶成長炉中にて1時間680℃、2.4%塩化メチル60sccmにて気相エッチを行い、エッチング直後に有機金属ガスを導入することにより、250nmのAl_{0.4}GaAsと50nmのGaAsをストライプの斜面およびファセット端面に成長した。図17に、その場気相エッチング・再成長プロセスによる埋め込み型レーザの模式図(右上)およびSEM像(左上)を示す。レーザ端面の拡大SEM像(左下)に示すように、エッチファセットはAl 組成が複雑に変化するグリーン部を含んで完全に平坦である。また、このレーザのファセットは、50nm程度の再成長

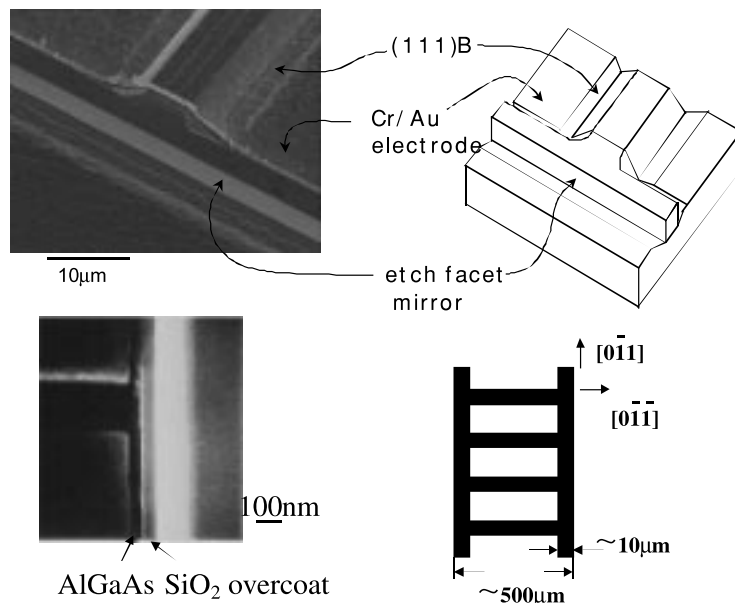


図17 気相エッチング再成長プロセスによる出射窓付き埋め込み型端面出射レーザの模式図(右上), SEM像(左上), レーザ端面の拡大SEM像(左下), およびマスクパターン(右下)。

による AlGaAs 層と熱 CVD による SiO₂ 膜に覆われている。すなわちワイドバンドギャップ窓付きレーザとなっている。従って、端面でのキャリア再結合の抑制による端面破壊 (Catastrophic optical damage) 限界の向上が期待できる。ストライプに沿う方向では、(111) B 面に対応する斜面が現れている。図 17 (右下) に示すように、コーナでの異常エッチングを防ぐために、端面ファセットを形成するストライプを隣接するレーザと連結し、梯子状のマスクパターンとした。ストライプ方向の斜面は、断切れのない電極の形成に有用である。メサの上部の巾は 8.6 μm、底の部分では 12.8 μm である。メサの高さは、平坦部から 1.6 μm、リッジ境界の窪みから 4.6 μm である。図 18 は、その場合気相エッチ再成長プロセスにより作製された、エッチファセット (実線) および、劈開ファセット (点線) 埋め込み型レーザの光 - 電流特性を示す。レーザ長 540 μm の場合、そのしきい値はそれぞれ 48.6 および 39.6 mA。また量子効率も、10.2 および 23.6% である。エッチファセットレーザの量子効率が見かけ上悪いのは、レーザからの放射光の約半分が活性層から約 1 μm ほど下にある基板により遮られるためである。エッチファセットレーザの共振器長依存性から端面反射率は 0.25 と推定される。遠視野像から横発振モードは単一ピークを示している。図 19 にしきい値電流のストライプ巾依存性を示す。しきい値電流

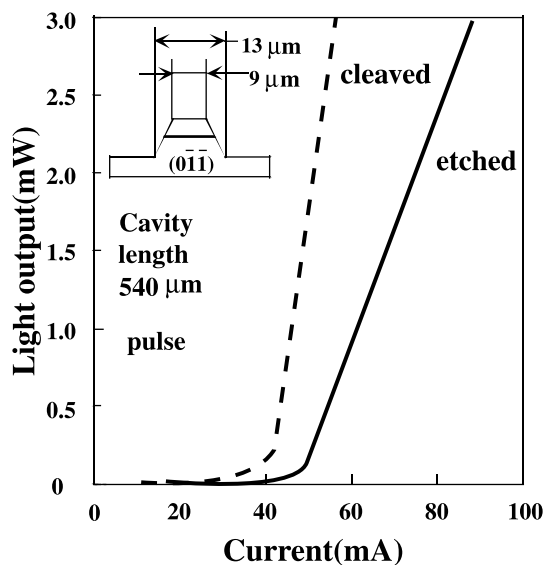


図 18 その場合気相エッチ再成長プロセスにより作製された、エッチファセット (実線) および、劈開ファセット (点線) 埋め込み型レーザの光 - 電流特性を示す。

は、同一ストライプ巾のリッジレーザに比べても倍近い値を示すことから、再成長界面に問題が残されていることが推察できる。そこで、SIMS による界面の組成分析を行った。図 20 に示すように界面に酸素と炭素が集積している。このような不純物の集積は、成長した基板を大気に取り出すことなくエッチングした場合には小さい。すなわち、気相エッチングの際に表面の汚染は基板上に残留し、気相中に半導体材料とともに除去されないためエッチングが終了し、再成長する界面に不純物が残留することを示している。

3.3 まとめ

従来技術では、極めて煩雑な製造工程を必要とするエッチファセット全周埋め込み型半導体レーザを一連の複合プロセスにより、簡単に実現することができた。ドライエッチング技術を利用した真空一貫プロセスに比較して、形状の自由度においては制限があるが、特別なエッチング装置を必要とせず、気相成長装置への反応ガスの切り換えのみで対応できる。同レーザを製作するためには従来プロセスによると 1. ウエットエッチング、2. 埋め込み成長、3. 劈開あるいは、ドライエッチング、および 4. 端面コーティングの 4 工程が必要であるが、その場プロセスにより、MOCVD 反応炉中のガスの切り替えのみで実現することが可能になった。プロセスの簡略化は、今後 O/E IC

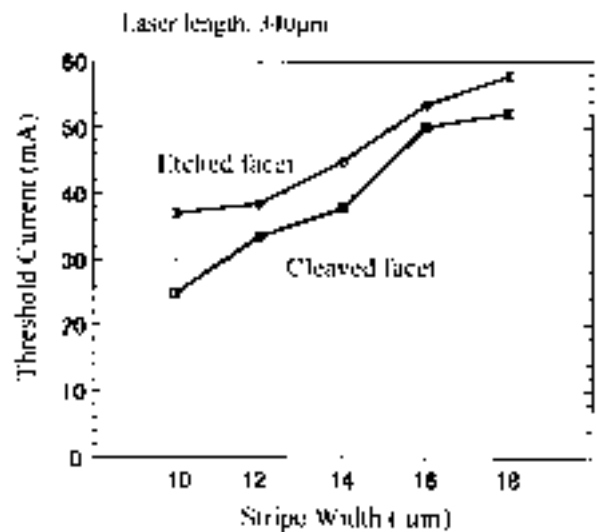


図 19 気相エッチ・再成長レーザ (劈開ファセット) のしきい値電流のストライプ巾依存性。

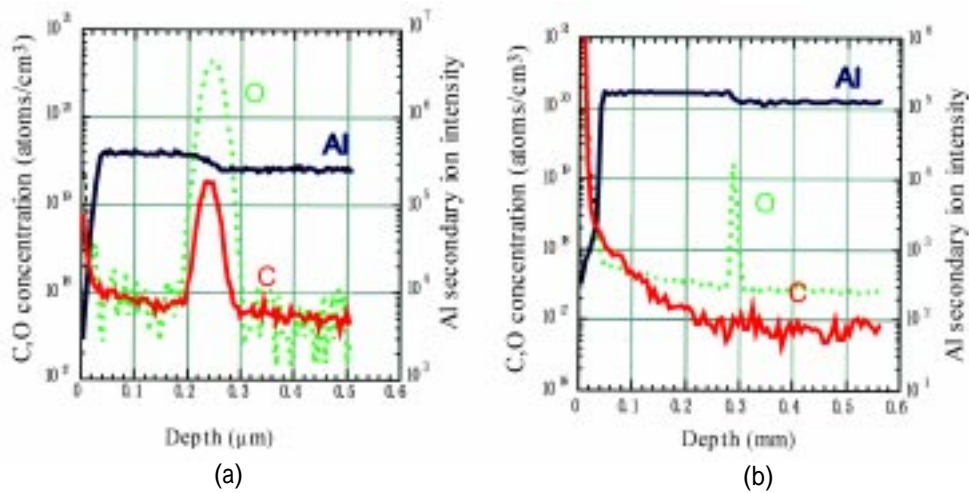


図20 SIMSによる界面不純物分布と試料調整手順
 (a) AlGaAs基板成長後サンプルを大気に取り出し,再度MOCVD成長炉に導入後エッチング・再成長した場合。
 (b) 基板成長後サンプルを大気に取り出さずにエッチング・再成長した場合。

において機能や素子数の集積化を進める上で重要な意味を持ち,本プロセス技術は産業応用上有益であると考えられる。

§ 4 結論

その場ECRエッチングとMOCVD再成長プロセスとを組みあわせることにより,曲がりや分岐導波路を持つAlGaAs系埋め込み型端面出射レーザや面発光レーザを作成した。また塩化メチル気相エッチングとMOCVD再成長プロセスにより,全周囲をAlGaAs再成長膜により保護された,埋め込み型端面窓付きエッチファセットレーザが実現した。本プロセスにおいて任意形状の埋め込み構造や端面保護膜などが比較的簡単なプロセスで実現可能となった。但し閾値電流はリッジ型やプロトン分離型レーザに近く,表面再結合が無視できないことを示している。第3章の気相エッチングによる埋め込み構造の形成は,ECRエッチングにおけるイオンの照射による損傷を避けることを意図して行われたものであるが,再成長界面における表面再結合の問題は,気相エッチング・再成長プロセスにおいても解決されていない。結晶成長の場合残留不純物が成長層に平均して分散するのに対し,エッチプロセスにおいては,Alと結合した酸素はアルミナとなり気相中に蒸発することなく表面に

蓄積すると考えられる。そのため,しきい値電流に関しては酸化物などを物理的にスパッタエッチングするドライエッチングの場合の方が低い値を得ている。気相エッチを行う前に表面の汚染物質を取り除く意味でECRエッチを試みたが,有意な改善が見られなかった。InGaAsやInGaAsP系などAlを含まない材料では,成長温度での3族元素の還元が期待できるので,今後,光通信に重要なInGaAsP系においてエッチングガスの探索やエッチング形状の検証に転じる必要がある。AlGaAs系の界面再結合に関して,活性層を量子細線や量子ドットにすることにより,横方向の等価的拡散速度が減少し,結果として界面再結合の抑制が可能になる¹²⁾ことも付記しておく。

謝 辞

本研究は,(株)クボタ 井川聖史氏,東海大学工学部 宮沢岳彦氏,菊地卓也氏,中央大学 竹山一久氏の協力のもとに行われた。本研究を進めるにあたりご援助いただいた,矢嶋弘義部長,清水啓三前室長,渡辺正信統括主任研究官,東海大学 黒須楯生教授,飯田昌盛教授,また本研究を進めるにあたり日頃ご議論,ご助力いただいた光技術部 鈴木克弘,向井誠二,伊藤日出男,森雅彦,清水三聡,鍛冶良作,東海大短期大学 岡田工各氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) M.Ogura, Z.Y.Chen, H.Kaneko, S.Fujii, H.Itoh, M.Watanabe, S.Mukai and H.Yajima, "AlGaAs/GaAs buried quantum well laser diodes by one time selective metalorganic chemical vapor deposition growth on dielectric window stripes", Appl.Phys.Lett. **62** (26), (1993) 3417-3419.
- 2) H.Narui, T.Ohata, and Y.Mori, " Low threshold AlGaAs BH Lasers fabricated by one-stop MOCVD", Election.Lett. **24** (19), (1988) 1249.
- 3) K.M.Dzurko, E.P.Menu, C.A.Bayler, J.S.Osinski, and P.D.Dapkus, " Low-threshold quantum well Lasers grown by metalorganic chemical vapor deposition on nonplanar substrates", IEEE J of Quantum Electronics **25** (6) , (1989) 1249-1450.
- 4) K.Komatsu, K.Hamamoto, M.Sugimoto, S.Skisawa, Y.Kohga, and A.Suzuki, "4x4 GaAs/AlGaAs Optical matrix switches with uniform device characteristics using alternating $\Delta\beta$ electrooptic guided-wave directional couplers", J. of Lightwave Technology **9** (7), (1991) 871-878
- 5) H.Kawanishi, Y.Sugimoto, K.Akita, T.Ishikawa, and H.Hidaka, "In situ patterning and overgrowth for the formation of buried GaAs/AlGaAs single quantum-well structures", Appl.Phys.Lett. **60** (3), (1992) 365-367.
- 6) Mutsuo Ogura, "In situ etching and regrowth process for edge- and surface-emitting laser diodes with an AlGaAs/GaAs buried heterostructure", J.Vac.Sci.Technol.B **13** (4), (Jul/Aug , 1995) 1529-1535.
- 7) S.Mukai, P.Phelan, M.Watanabe, H.Itoh, and H.Yajima, "A traveling-wave beam deflector cleave-coupled to a diode laser", Optical and Quantum Electronics **21**, (1989) 227-231.
- 8) W.T.Tsang, Semiconductor and semimetals, vol.22, Lightwave Communication technology, Chapter4, p.257 (1985).
- 9) K.D.Choquette, M.Hong, R.S.Freund, J.P.Mannaerts, R.C.Wetzel, and R.E.Leibenguth, "Vertical-cavity surface-emitting laser diodes fabricated by in situ dry etching and molecular beam epitaxial regrowth", IEEE Photonics Technology Letters **5** (3) , (1993) 284-290.
- 10) M.Ogura and H.C.Hsieh, " Effect of surface recombination velocity on the threshold current and differential quantum efficiency of the surface-emitting laser diode", IEEE J.of Quantum Electronics **32** (4), (April ,1996) 597-606
- 11) Seiji Ikawa and Mutsuo Ogura, "AlGaAs/GaAs buried heterostructure laser with vertically etched facets and wide-bandgap optical windows by in-situ C2H5Cl gas-phase etching and MOCVD regrowth", Photonics Technology Letters **9** (6) , (July ,1997) 719-721.
- 12) J.K. Kim, T.A. Strand, R.L. Naone, and L.A. Coldren, "Design Parameters for Lateral Carrier Confinement in Quantum Dot Lasers," Appl.Phys.Letters. **74** (19), (May 10, 1999) 2752-2754.

関 連 特 許

- 1) 「面発光レーザ及びその製造方法」 特願平 1-058595号 特許第1991468号
- 2) 「光機能素子の作製方法」 特願平 3-253108号 特許第2081665号
- 3) 「半導体の微細加工方法」 特願平 4-355611号 特許第2099142号
- 4) 「半導体ストライプレーザ」 特願平 7-177071号 特許第2733210号
- 5) 「半導体加工装置」 特願平 8-000918号 特許第2821571号
- 6) 「III-V族化合物半導体の加工方法及びIII-V族化合物半導体レーザの作製方法」 特願平9-44418号

(2000.3.1受付)