

〔研究〕

分岐導波路レーザの開発

A Study on Branching Waveguide Lasers

鍛 冶 良 作 菊 地 卓 也 小 倉 睦 郎 渡 辺 正 信
R. KAJI T. KIKUCHI M. OGURA M. WATANABE

Y-shaped branch waveguide lasers and square-shaped junction waveguide lasers are fabricated and their modal properties are investigated by numerical method to integrate a semiconductor laser and an optical spatial modulation element.

The Y-shaped branch waveguide laser with buried heterostructure (BH) waveguide is fabricated by an in-situ etching and regrowth technique. Owing to strong lateral confinement of the BH structure, the optical radiation losses of the branching region can be avoided, and the laser oscillation can be achieved. Far field patterns of the Y-branch laser are controlled digitally by adjusting the bias current at the edge of the each branch waveguide.

The square-shaped junction waveguide laser is composed of a narrow single-moded square waveguide and a wide multi-moded square waveguide. Because of multi-mode interference effect, optical branching can be achieved very efficiently.

The laser oscillation was realized with usual mesa-stripped structure. Near field pattern of this laser shows the switching property by adjusting external current.

§ 1 はじめに

広帯域で大容量のデジタル通信システムを実現するため、従来の通信網に光ファイバが導入されている。現在のところ、光技術の情報処理への応用は情報伝送部が主であり、信号処理は電気信号への変換後に行われている。しかしながら、電子デバイスの処理能力では光ファイバによって伝送可能な情報容量を十分に活用することはできていない。光信号を電気信号に変換せずに、光のまま情報処理することにより、処理速度の低下を回避したり、可干渉性や並列処理など光特有の性質を情報処理に応用する技術の進展が必要である。将来的には、同一基板上に信号伝達系と信号処理系を集積化する、いわゆる光電子集積回路の実現が必要である。なかでも、その基本的構成要素である光源と空間光変調素子の一体化は光情報処理技術

の展開に不可欠である。

代表的な空間光変調素子としては、Y字に分岐したLiNaO₃導波路を伝搬する光波を外部印加電圧による屈折率変調でスイッチングを行うものがある¹⁾。このような誘電体結晶を基板とする光デバイスは、既存のすぐれた半導体素子との集積化が困難である。また、光源と変調素子が個別素子の場合、レーザ光と導波路のアライメントが必要である。こうした状況下で、これらの構成要素を半導体基板上に作製しようという試みが種々検討されている。化合物半導体はこれらの機能を一体化できる可能性を有し、従来の微細加工技術を積極的に利用して複雑な光デバイス構造を実現すると共に、既存の半導体電子デバイスとの集積化も可能となり、光源と光変調素子のアライメントも不要になる。

半導体レーザ光源と光変調素子を一体化する試み

KEY WORDS : 光源・光変調器一体型素子, in-situエッチング再成長プロセス, 分岐導波路レーザ, マルチモード導波路レーザ

としては、これまでに、ツインストライプ半導体レーザ、および発振部とツインストライプ偏向部とを集積したAlGaAs系半導体レーザの開発を行い、出射ビームの連続的偏向、スイッチ的偏向、双安定性等がすでに実現されている²⁻⁵⁾。

本研究では、集積構造を一步進め、強い閉じこめ構造による安定な発振が期待できるY分岐型、及び、接続損失の低減が期待できる多モード偏向器集積型について、試作と動作評価を行った。

第2節では、GaAs系半導体材料を用いて、半導体レーザと光変調器を一体化したY分岐導波路レーザを試作し、その動作評価を行った結果について述べている。一般に、既存のY分岐導波路では、分岐部における放射損失が大きいため、レーザにしようとする発振しきい値が高すぎたり、発振しないこともある。ここでは、in-situエッチング再成長プロセスを用いた界面欠陥の少ないBH(Buried Hetero)導波路作製技術を利用して、強い光波の閉じ込めを実現し、Y分岐導波路レーザの発振しきい値の低減に成功している。

第3節では、矩形導波路レーザーを試作し、その動作評価を行った結果について述べている。これは、マルチモード導波路による光分波では、極めて放射損失が少ない⁶⁾ことに着目し、Y分岐導波路における放射損失を克服するために、Y分岐部分をマルチモード導波路に置き換えたものである。この素子は、光分波が非常に効率よく行われるため、Y分岐に必要であったBH構造を作製する必要がない。さらに、導波路構造が矩形であるため、製造過程の大幅な効率化が可能である。

§2 Y分岐導波路レーザ

Fig.1はY分岐導波路レーザ変調器の模式図である。本デバイスは、光源と光変調素子を同一基板上に集積化することを目的としたものであり、外部電流変調により光の空間制御を行うものである。このデバイスは、図左から長さ150 μm の直線導波路、250 μm の分岐導波路、200 μm の平行直線導波路で構成されている。図中に示しているように、電極を主電極(Main)、左制御電極(Control-L)、右制御電極(Control-R)の3領域に設け、それぞれ独立に電流注入による屈折率変調を可能にしている。Main部で発振したレーザ光は、Y分岐部分で分割され二本の平行な導波路を伝搬する。空間

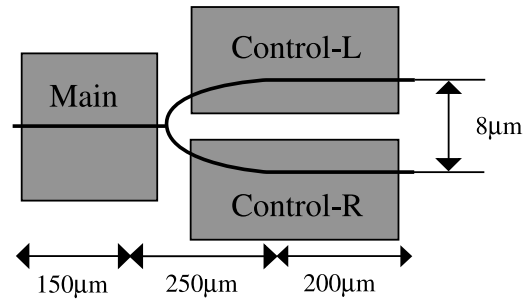


Fig.1 Y分岐導波路レーザの模式図

光スイッチングは、平行直線導波路から出射する2つに分けられた光の干渉効果により行うものとする。これらの干渉光は、制御電極に適切な電流を注入することにより制御するものとする。一般にY分岐導波路では、光の伝搬方向に対して大きな曲率を持つため放射損失が大きくなる。そこでここでは、導波路側壁を屈折率差の大きな薄膜で保護するBH(Buried Hetero)型導波路構造を用いて従来の難点を克服している。

2.1 作製工程

BH型導波路の作製に用いるウェハは、成長温度710 $^{\circ}\text{C}$ 、反応ガス圧0.1気圧のMOCVD法により作製する。

エピタキシャル層の構造としては、成長順にエピタキシャル層の下地になるn-GaAsバッファ層、結晶成長レートを確認する目的のn-Al_{0.4}Ga_{0.6}Asマーカー層、再びレーザエピタキシャル層の下地になるn-GaAsバッファ層、n-Al_{0.4}Ga_{0.6}Asのクラッド層、GRIN層(x=0.4-0.2)、GaAs井戸層とAl_{0.2}Ga_{0.8}Asバリア層の多重量子井戸(GaAs井戸層は5層)、エッチングをGRIN層の直上で停止する目的のp-Al_{0.65}Ga_{0.35}Asエッチストップ層、GRIN層(x=0.2-0.4)、p-Al_{0.4}Ga_{0.6}Asクラッド層、Alの酸化を防ぐためのp-GaAsキャップ層である。

Fig.2は作製したレーザウェハの活性層断面SEM像と屈折率分布⁷⁾を示している。GRIN層と約10nm間隔のMQWが確認できる。活性層は、MQWを上下のGRIN層で挟み込むGRIN-SCH(Separate Confinement Heterostructure)構造とした。

Y分岐導波路レーザの作製プロセスは、まず、先に試作したレーザウェハにスパッタリングでSiO₂膜を堆積し、フォトリソグラフィ技術とRIE(Reactive Ion Etching)による加工を経て、Fig.3(a)に示すようなストライプ形成用のSiO₂マスクを作製する。次に、Fig.3下

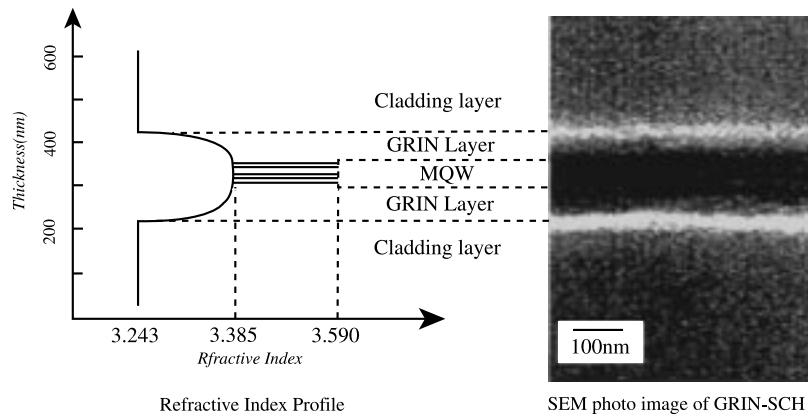


Fig.2 活性層の断面SEM像とその屈折率分布³⁾

に示したその場 (in-situ) エッチング再成長装置³⁾に試料を導入し、ECRエッチング室に搬送する。Fig.3 (b)に示すように加工したSiO₂膜を装着し、ECR (Electron Cyclotron Resonance) で約8 μm (活性層よりも深く) エッチングした後、直ちに試料をECRに直結したMOCVD成長炉に搬送し、ノドープAl_{0.4}Ga_{0.6}Asを再成長しBH構造を作成する (Fig.3 (c))。その後、基板表面の凹凸を平坦化するためフォトリソグラフィによりストライプ部分の窓明けを行い、ウエットエッチングにより再成長したAlGaAsとその下にあるSiO₂を取り除く。表面電極はリフトオフプロセスによりMo/AuBe/Mo/Auを蒸着、合金化してp型電極とする。ここでMoを用いた理由は電極の密着性を高めるためである。劈開のためと放熱効果を高めるために基板を約100 μmの厚さまで研磨し、裏面電極としてAuGe/Ni/Auを蒸着し、合金化してn型電極を形成する。

再成長を行う際、従来の製法では試料の物理的な移動により、活性層が大気に曝され、再成長結晶界面欠

陥の原因となっていた。Fig.3に示した装置は、MOCVD装置に小型ECRエッチング装置が付随しているため、レーザーウェハをエッチングした後、酸化されやすいAlGaAs層を大気に曝すことなく再成長を行うことが可能であり、結晶界面欠陥を低減できる。

Fig.4は試作したBH構造導波路と活性層の高分解能SEM像とBH構造導波路の模式図である。高分解能SEM写真で観察する限り、再成長界面に結晶欠陥は見られていない。これは、BH構造をin-situエッチング再成長技術により作製しているため、すなわち、酸化されやすい活性層側面を大気に曝すことなく再成長を行っているためであると考えられる。

Fig.5 (a)は、完成したY分岐導波路型レーザーの表面写真である。全長は600 μmで、同図下端から150 μmが直線のレーザー部分 (Main)、そこから250 μmが曲率をもった分岐導波路部分、上端から200 μmが8 μm間隔で並ぶ2本の平行直線導波路である。同図上辺および下辺に相当する両端面は結晶方向に依存した劈開により鏡面を形成している。また、下半分がレーザー共振

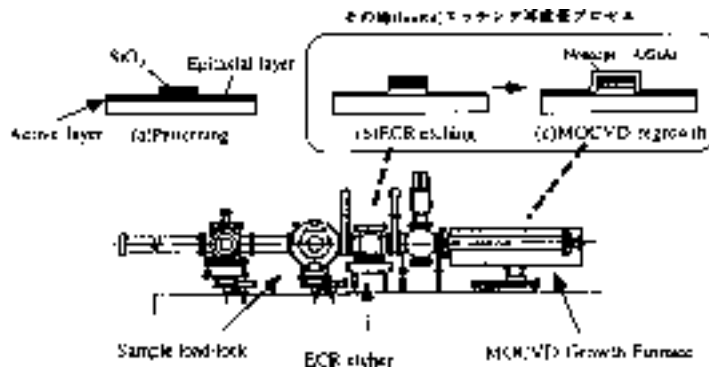


Fig.3 その場 (insitu) エッチング再成長プロセス

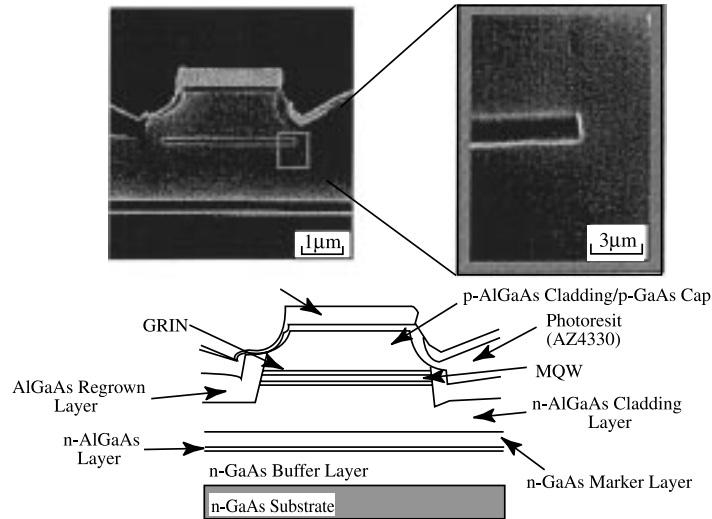


Fig.4 BHレーザ導波路の断SEM像とその模式図

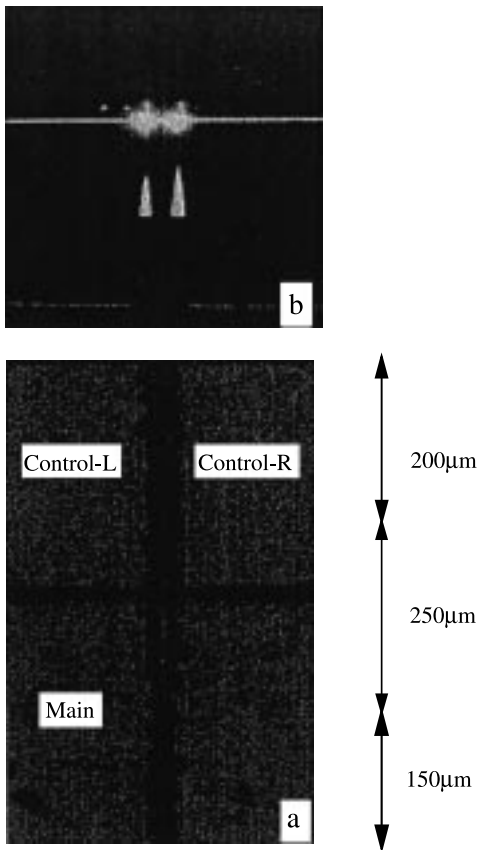


Fig.5 Y分岐導波路レーザの表面写真(a)と端面における近視野像(b)

2.2 測定結果

Fig.5(b)は、Mainにのみ通電して発振させたときの制御電極側の端面から見た近視野像(NFP)である。ここで、注入電流は75 mAである。このとき、しきい値電流は、全長が600 μmのY分岐導波路レーザで約75mAであった。これは、同一プロセスで試作したストライプレーザ(共振器長590 μm、しきい値電流40mA)のほぼ2倍のしきい値電流に相当する。本図からわかるように、ほぼ均等な2本の光強度分布が劈開端面に現れている。これは、発振光が導波路構造に忠実に従い、光路分離に成功していることを示している。

Fig.6は、Mainを注入電流60mAで発振させた状態で、制御電極側の注入電流を変化させた場合のY分岐導波路型レーザの遠視野像(FFP)の観測結果である。ここに(a)は制御電極に電流を流さない場合(b)は制御電極-Lに3mAの電流を注入した場合(c)は制御電極-Lに3mA、制御電極-Rに4mAの電流を注入した場合に対するものである。本図から、電流を流さない状態で制御電極-R、-Lの導波路から出射したレーザ光は、互いに干渉を起し約5°間隔の干渉縞を描いていることが確認できる。また、制御電極-L部分に電流を流すと、干渉縞が2.5°シフトする。これは、電流注入により一方の導波路のみ、屈折率が変調されていることを示している。そこを伝搬する光波は、他方の導波路とは異なる位相変調を受け、その結果、出射端面での干渉縞が(a)とは異なるものになる。さらに、この状態で制

器となる直線導波路部分(Main)へ電流を注入する電極、上半分の左右(Control-LとControl-R)がそれぞれ、左右の導波路に電流注入する電極である。

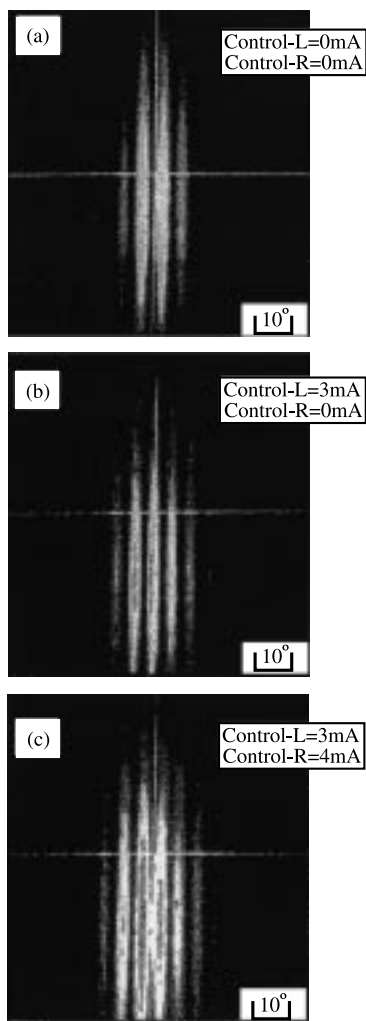


Fig.6 Y分岐導波路レーザの遠視野像の変化

御電極-Rに4mAの電流を注入すると,干渉縞は初期状態に戻る。

2.3 数値計算による定量的考察

ここでは 2次元光導波路の散乱問題に関して,標準的な解法としてよく知られたモード展開とモードマッチング法に基づく解析法であるBER(Bidirectional Eigenmode Propagation)法⁹⁾により,Y分岐導波路の実験結果の定量的な考察を試みる。

Y分岐導波路型レーザは,3次元屈折率分布を有するが,厚さ方向に等価屈折率法を用いて二次元等価モデルについて解析を行った。従って以下の計算結果は,平面回路に対して垂直な方向への放射,あるいはモード変換に関する知見を含んではいない。しかしながら,結晶成長の方向に関する導波路の厚さは十分に小

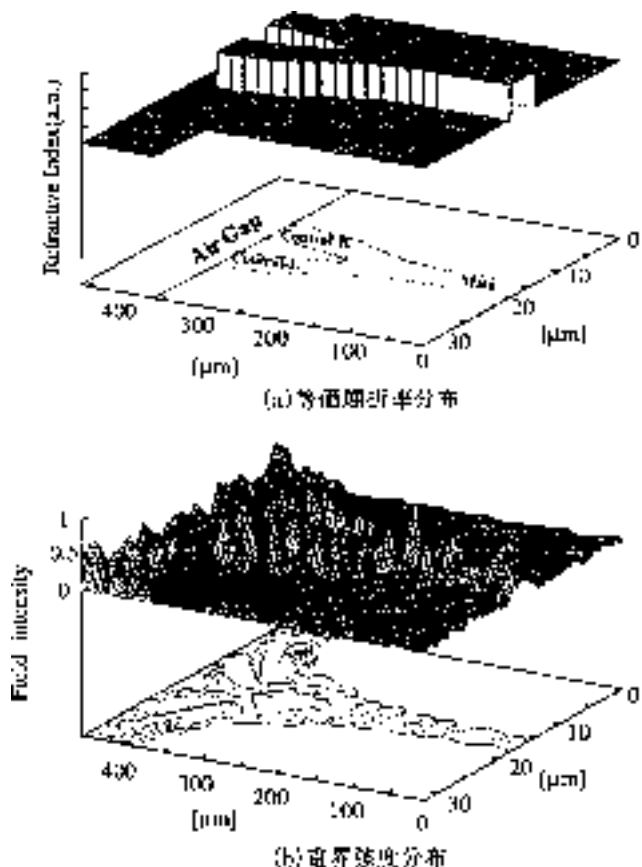


Fig.7 BEP法による解析結果

さく,単一モードになっていることを数値計算で確認しており,おおまかな特性の把握には支障がないと考えられる。

Fig.7(a)は,計算に用いたY分岐導波路の二次元等価屈折率分布の概念図である。屈折率3.4のコアと屈折率3.38のクラッドを有するY分岐導波路が屈折率1.0の空気に接続されている。空気との境界は,レーザの劈開面に相当する。Fig.7(b)は Fig.7(a)の右方の直線導波路から基本モードが入射した場合の電界強度分布である。ここに,導波路の両側面には電気壁を設け,放射モードを離散化して考慮に入れている。本図からわかるように,Main部分から入射した光が分岐部で左右に分離され,制御電極-L,Rの端面から出射した波が互いに干渉している。

Fig.8は,片方の制御電極部分の屈折率を0.1%減少¹⁰⁾させ3.397としたときのY分岐側出射端面での位相角および振幅の計算結果である。ここに,(a)は制御電極部分の導波路の屈折率が両方とも3.400(b)は制御電極-Lを3.397,制御電極-Rが3.400の場合である。本図か

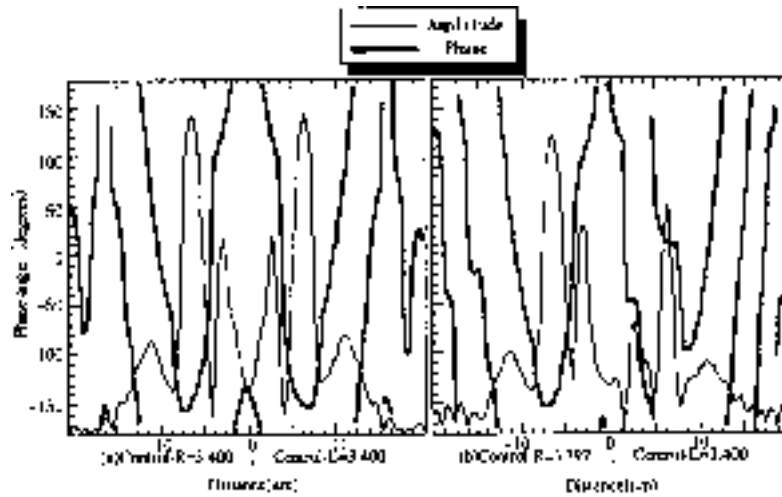


Fig.8 BEP法による解析結果(NFP)

らわかるように、屈折率変調を加えないときは、当然のことながら、左右の導波路で振幅と位相が共に揃っていることがわかる。また2つのピークを持つ振幅の強度分布はFig.5(b)に示した実験結果のNFPとほぼ一致していることがわかる。これに対し、片側だけ屈折率の変調を与えた場合、振幅に大きな変化はみられないが、制御電極-L側の振幅のピークに対する位相が制御電極-R側に対して約 $\pi/2$ ずれていることがわかる。これは遠方界の強度の山谷反転の原因となるものである。

Fig.9は導波路端面での近傍界の計算結果から遠方界(FFP)を計算したものである。端面から出射した二つの波が干渉し、周期的な山と谷をもつ干渉縞が確認できる。制御電極-Lの屈折率を変化させると山の部分が谷へ、谷の部分が山へとFFPの干渉縞が逆転している。これはFig.6に示した実験と一致している。このことから、Y分岐導波路型レーザーでは、注入電流により制御電極下の導波路の屈折率が変化し、片方の導波路を伝搬する光の位相が相対的にずれることにより、出射端面において干渉縞がシフトすることが明らかになった。

これらの結果は、Y分岐導波路レーザーの光スイッチング素子への応用を示唆するものであり、レーザー素子と方向性結合器を同一プロセス上で作製できる本素子は、光学系素子に必要なとされる光軸のアライメントを簡略化できるので、ドップラ-効果を利用した速度計などへの適用が期待される。

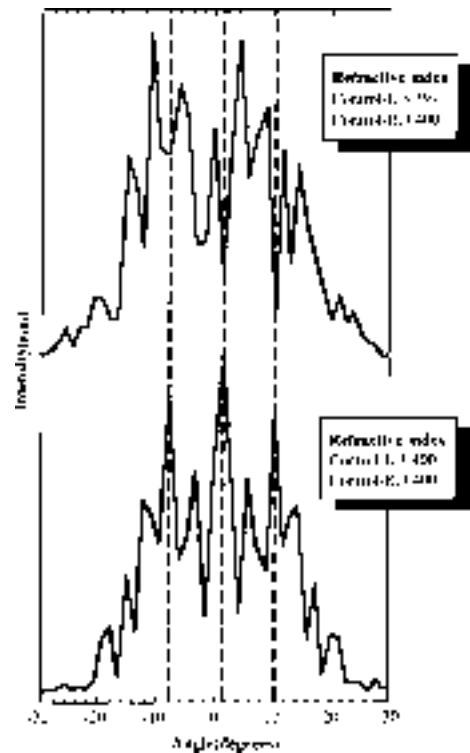


Fig.9 シミュレーションによるFFPの解析結果

§ 3 矩形導波路レーザー

Y分岐導波路レーザーは前節で示したように、以下のような問題点がある。(I)同じ長さのストライプレザーと比較して2倍以上の高いしきい値特性を示す。(II)Y分岐部での放射損失を回避するため、BH構造を用いたが、これは2回の結晶成長が必要である。

マルチモード導波路では、光分波を行うにあたっ

て、光分波にともなう放射損失が極めて小さいことがよく知られている⁶⁾。また Fig. 10 に示すように、マルチモード導波路は矩形構造であるため、Y分岐のような微妙な曲率制御が不要であり、作製が容易とされている利得導波型導波路として実現が可能である。

本節では 2 節で示した Y 分岐導波路レーザ変調器の作製プロセスの難点を克服するべく、矩形導波路レーザ変調器を新たに考案し、その試作および測定結果について述べている。

Fig. 11 は、導波路の断面構造を示したものである。ここに (a) はウエットエッチングによる結晶方位に依存したメサストライプ構造を用いた利得導波型であり、本節の矩形導波路レーザの基本構造である。(b) は

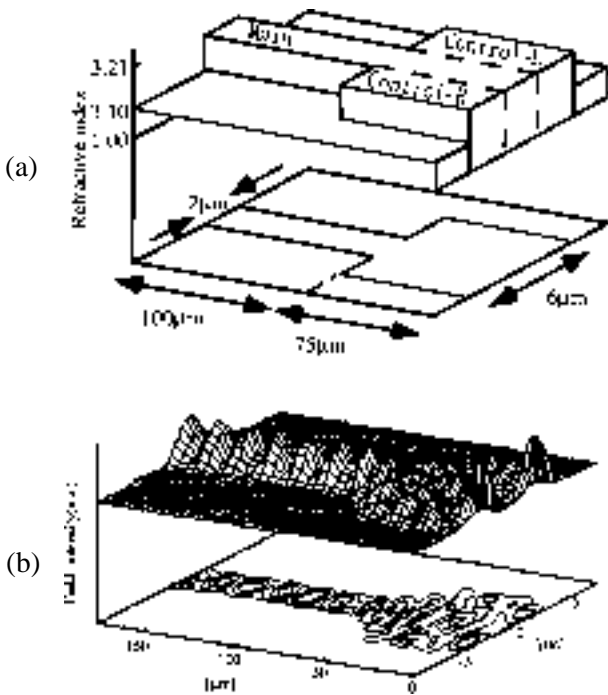


Fig. 10 マルチモード導波路の二次元等価屈折率分布図(a)及び、上記のMain側より基本導波モードが入射したときの電界強度分布(b)

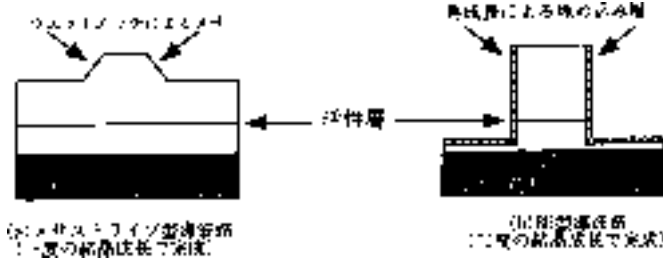


Fig. 11 メサストライプ型とBH型導波路の模式図

前節で扱った Y 分岐導波路レーザの基本構造である。先に述べたように、(b) は BH 構造であり、光閉じ込めが強く、曲率を持った導波路に有効である。しかし、導波路側面を結晶再成長で保護するため二回の結晶成長が必要である。また、導波路を形成する際、活性層側面をエッチングするためエッチング界面で欠陥を生じる可能性がある。これに対し、(a) のように結晶方位に依存したメサストライプ構造を導波路に用いれば、活性層をエッチングすることなくレーザ共振器を作成できる。さらに、導波路側面をエピタキシャル成長層で保護する必要がないため、試作も容易である。

3.1 作製工程

エピタキシャル層の構造としては、成長順にエピタキシャル層の下地になる n-GaAs バッファ層、結晶成長レートを確認する目的の n-Al_{0.4}Ga_{0.6}As マーカー層、再びレーザエピタキシャル層の下地になる n-GaAs バッファ層、n-Al_{0.4}Ga_{0.6}As のクラッド層、GRIN 層 (x = 0.4 - 0.2)、GaAs 井戸層と Al_{0.2}Ga_{0.8}As バリア層の多重量子井戸 (GaAs 井戸層は 5 層)、エッチングを GRIN 層の直上で停止する目的の p-Al_{0.65}Ga_{0.35}As エッチストップ層、GRIN 層 (x = 0.2 - 0.4)、p-Al_{0.4}Ga_{0.6}As クラッド層、Al の酸化を防ぐための p-GaAs キャップ層である。活性層は、Y 分岐導波路で用いたレーザウエハと同様の GRIN-SCH 構造を用いており、キャリアを作りつけ電界によるドリフトで活性層に閉じこめる構造とした。また、予め活性層の直上に Al 組成比が高い (x = 0.65) エッチストップ層を形成し、酸によるエッチング速度を下げる構造とした。

Fig. 12 に上記の行程を経て完成したレーザ用ウエハの断面 SEM 像を示す。本図から、エピタキシャル膜

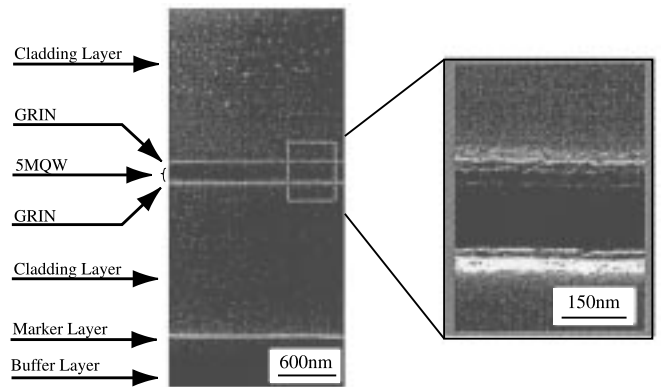


Fig. 12 レーザ用ウエハ断面図SEM像

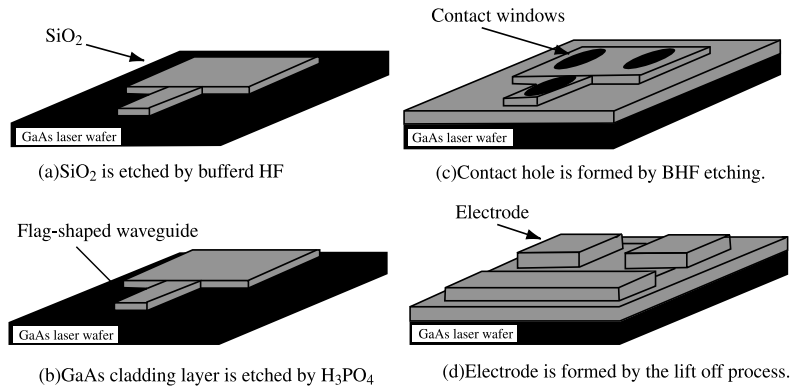


Fig.13 矩形導波路製作プロセス

が成長されたことがわかる。また高分解能SEM写真で観察する限り各結晶成長界面に欠陥は見られない。

Fig. 13は矩形導波路レーザ作製プロセスの模式図である。矩形導波路レーザは先述の手順を経て完成したレーザウエハに以下のプロセスを行い試作した。(a)レーザウエハ表面に熱CVD装置によりSiO₂膜を成膜した後、フォトリソグラフィ技術とBHFのウエットエッチングにより加工してストライプ共振器形成用のマスクを形成する。(b)加工されたSiO₂のマスクを用いてリン酸によるウエットエッチングによりエピタキシャル層をエッチングし共振器を形成する。(c)エッチング後ストライプ形成用に用いたSiO₂をBHFにより除去し絶縁膜として再び全面にSiO₂を成膜した後にフォトリソグラフィとBHFによるウエットエッチングにより電極のコンタクトホールを形成する。(d)フォトリソグラフィーによりp側のリフトオフパターンをフォトレジストにより形成後、Cr/Zn/Auの順に金属を蒸着、アセトンによりレジスト部分をリフトオフしてp-電極を形成する。劈開のためと放熱効果を高めるために基板を約100μmの厚さまで研磨し、裏面電極としてAuGe/Ni/Auを蒸着し、合金化してn型電極を形成する。

Fig. 14は矩形導波路断面SEM像である。活性層は結晶成長表面から約1.60μmのところであり、活性層より0.90μm上までエッチングした利得導波型導波路であることがわかる。

Fig. 15(a)は、矩形導波路レーザの表面写真である。矩形構造は、細い導波路と太い導波路を突き合わせた形になっており、細い導波路の幅が8μm、長さが480μm、太い導波路の幅が16μm、長さが260μmである。本図から

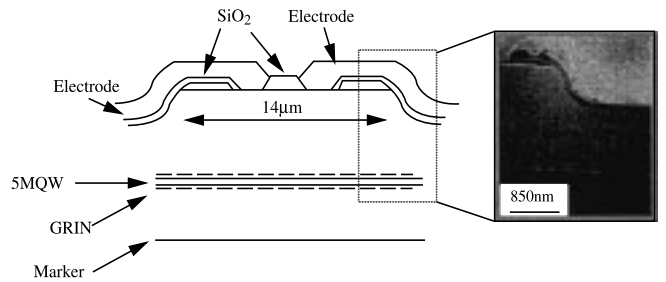


Fig. 14 矩形導波路レーザの断面模式図と断面SEM像

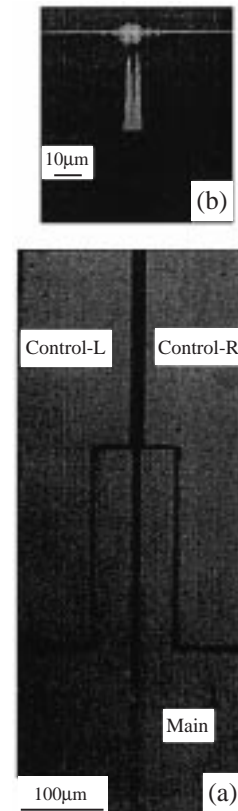


Fig. 15 矩形導波路レーザ写真(a)と出射端面におけるNFP(b)

わかるように、電極は細い導波路の上に1つ(Main)太い導波路の上に左右に分けて2つ(Control-L, Control-R)設けており、前節のY分岐導波路レーザの電極に対応するような構造になっている。

3.2 測定結果

Fig.15(b)は発振状態のときの太い導波路側の端面(以後、出射端面と呼ぶ)におけるNFPを測定したものである。ここに、駆動電流は、Mainに75mA、Control-LとControl-Rに5mAであり、発振のしきい値は85mAであった。本図からわかるように、Y分岐導波路レーザと同様に光を2つの経路に分離することに成功している。Y分岐導波路レーザと異なるのは、Main部分にのみ電流を注入しても発振しなかったということである。本デバイスが発振するには、常に両Control電極にしきい値より十分に低い電流(5mA)を流した状態でMain部の電流を流す必要があった。比較のため、同程度の長さを有する、幅16 μm 、長さ700 μm の直線導波路レーザのしきい値を測定したところ112mAであった。これらのしきい値に大差がないことから、太い導波路と細い導波路結合部分で生じる放射損失のしきい値への

影響は軽微であると言える。

Fig.16(a)はMain部の電流を70mAに固定したときの矩形導波路レーザの出射端面でのNFPの測定結果である。ここに、条件AはControl-L=50mA、Control-R=0、条件BはControl-L=0、Control-R=50mA、条件CはControl-L=25mA、Control-R=25mAの場合である。Fig.16(b)は細い導波路からその基本モードが入射した場合の出射端面でのNFPの計算結果である。ここに、条件A'、B'、C'は条件A、B、Cに対応しており、屈折率をA'はControl-L:3.18、Control-R:3.21、B'はControl-L:3.21、Control-R:3.18、C'はControl-L:3.21、Control-R:3.21と設定した。それぞれの図の中心にある点線は、矩形導波路の出射端面の中心を示す。条件AのNFPでは中心より左側に主要なピークが2つ観測された。条件Bでは条件Aとは逆の右側に主要なピークが2つ観測された。条件Cでは左右それぞれに主要なピークが2つ観測された。シミュレーションでは、空間的には同方向にピークが現れるがその数は1つだけであった。これは、数値計算を行った系は屈折率の実部しか考慮していない受動デバイスとしてのマルチモード導波路であるためであると考えられる。モード間の結合を高効率

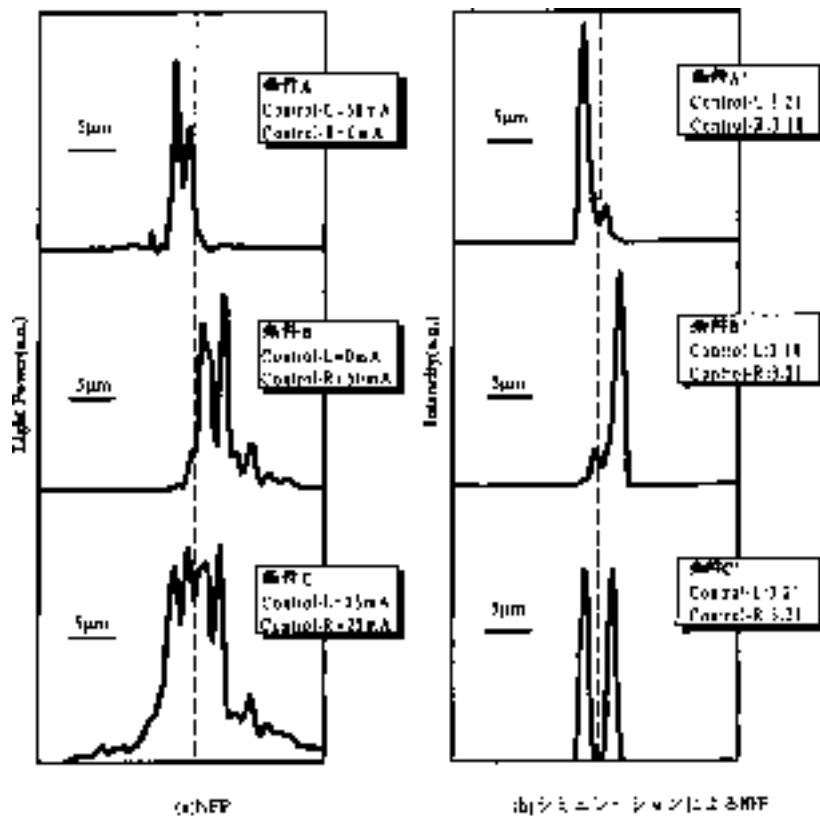


Fig.16 矩形導波路レーザのNFP(実測値)とシミュレーションによるNFP

に行なうために、マルチモード導波路のコンセプトを流用しようとしたが、作製した導波路が利得導波型であるために、屈折率の虚部による光波の位相変調が大きく、初期設計の動作特性とはかけ離れた結果が生じている。しかしながら、これらの実験結果から、矩形導波路レーザはControl電極の注入電流を制御することにより、NFPのスイッチングが可能であることが明らかになった。

3.3 発振状態の考察

まず、矩形導波路を構成する太い導波路と同じ幅16 μm 、長さ390 μm の単純な直線導波路レーザの発振しきい値を測定したところ、62.5mAであった。

矩形導波路レーザの当初のコンセプトは、細い導波路で発振したレーザ光が受動デバイスである太い導波路により、光路を分離するというものであった。しかしながら、矩形導波路レーザの発振時の太い導波路への注入電流値は50mAであり、ストライプレーザの発振しきい値62.5mAに近いので、太い導波路部での発振も考えられる。

発振している場所を特定するためには、レーザの縦モード間隔を測定し、光学顕微鏡から実測した共振器長を用いて理論計算した縦モード間隔と比較を行えばよい。

Fig. 17は矩形導波路レーザのスペクトル特性の測定結果である。ここに、矩形導波路レーザをしきい値より高い100mAで駆動した。本図から、矩形導波路レーザの縦モードは多モードであり、その縦モード間隔は0.14nmであることがわかる。これは実測値である。

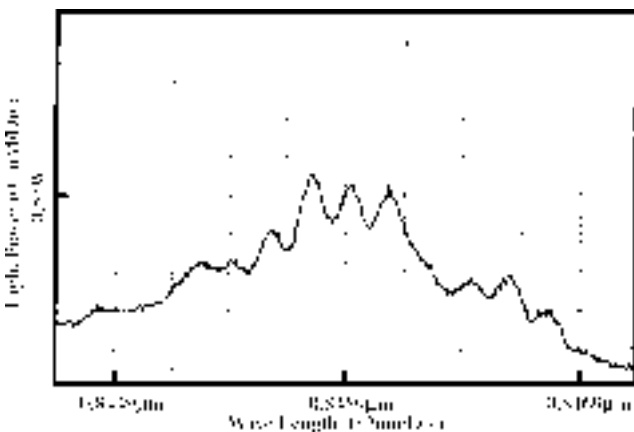


Fig.17 旗型導波路レーザの発振スペクトル

さて、レーザの発振条件式から縦モードの数は次式で計算できる。

$$N = \frac{2Ln}{\lambda} \approx 5957 \quad (1)$$

ここに、波長はFig.17の中心波長 = 864 nm、共振器の屈折率はGRINと5MQW活性層を考慮して $n = 3.5$ 、共振器長は $L = 720 \mu\text{m}$ とした。

一方、縦モード間隔は隣り合うモードの間隔であるから

$$\Delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1| = \left| \frac{2Ln}{N+1} - \frac{2Ln}{N} \right| \approx \frac{\lambda_1}{N} \approx 0.14\text{nm} \quad (2)$$

ここに、 $N = 1$ 、 $\lambda_1 = 2Ln/N$ 、 $\lambda_2 = 2Ln/(N+1)$ である。

実測値の縦モード間隔は0.14 nmであり、計算より求めた値と一致している。一方、同様の計算を太い導波路部の長さ、つまり $L = 260 \mu\text{m}$ を用いて行くと、 $\Delta\lambda = 0.39 \text{ nm}$ となり実測値と一致しない。同様に細い導波路部の長さ $L = 480 \mu\text{m}$ では $\Delta\lambda = 0.21 \text{ nm}$ となりこれも実測値と一致しない。以上の考察から、矩形導波路レーザでは、当初の想定であるところの、細い導波路でレーザ発振させて、太い導波路で光路変調を行うという計画からはずれ、細い導波路と太い導波路をあわせた全領域で発振していることがわかった。以上のことから、矩形導波路レーザは、系全体で発振していることが明らかとなった。

§4 むすび

光源部と光変調素子部が一体化された半導体空間光変調デバイスを開発することを目的として、Y分岐導波路レーザと矩形導波路レーザの作製とその動作評価を行なった。まず、Y分岐導波路レーザを試作した。Y分岐部での放射損を回避するために、in-situエッチング再成長プロセスにより、界面欠陥の少ないBH導波路作製技術の開発に成功した。このY分岐型導波路型レーザは分岐側出射端面において5°間隔の干渉縞を描くFFPを示した。FFPはControl電極の注入電流により2.5°偏向が可能であった。これらの実験により、Y分岐導波路レーザは光スイッチング素子への応用可能性を示した。

次に、光路分岐をより高効率に行うことを目的として、マルチモード導波路の概念を導入し、矩形導波路

レーザーを新規に考案した。矩形導波路レーザー作製には、ウエットエッチングによるメサストライプ構造を採用し、製作プロセスの大幅な簡略化を達成した。試作した矩形導波路レーザーは75 mA で発振した。矩形導波路レーザーは出射端面において複数のピークを示した。このNFPはControl電極の注入電流を変化させることによりスイッチングが可能であることを確認した。また、矩形導波路のレーザーは系全体で発振するレーザーであることを縦モード間隔の計算と実測により明らかにした。

参 考 文 献

- 1) F. Koyama and K. Iga, IEEE J. Lightwave Tech., LT-6, No. 1 (1988) pp. 87-93.
- 2) S. Mukai, M. Watanabe, H. Itoh, H. Yajima, Y. Hosoi, and S. Uekusa, "Beam scanning and switching characteristics of twin-stripped lasers with a reduced stripe spacing," Opt. Quantum Electron., Vol. 17, (1985) pp. 431-434.
- 3) S. Mukai, Y. Kaneko, M. Watanabe, H. Itoh, and H. Yajima, " Laser beam scanning using a local deflector integrated with an effective mode filter," Appl. Phys. Lett., Vol. 51, No. 25 (1987) pp. 2091-2093.
- 4) M. Watanabe, S. Mukai, H. Itoh, H. Yajima, M. Saito, and K. Hasegawa "Influence of carrier spreading on the current-controlled lateral-mode behavior of twin-stripe lasers," J. Appl. Phys., Vol. 68, No. 6 (1990) pp. 2599-2605.
- 5) M. Watanabe, H. Fujiki, S. Mukai, M. Ogura, H. Yajima, K. Shimoyama, and H. Gotoh "Observation of switching related to bistability between two cross-coupled lateral modes in twin-stripe lasers," IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-30, (1994) pp. 2232-2234.
- 6) Lucas B. Soldano and Erik C.M. Pennings, Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 4 (1995).
- 7) S. Adachi and K. Oe's paper, J. Appl. Phys., Vol. 54, No. 11 (1983) p. 6621.
- 8) M. Ogura, J. Vac. Sci. Technol., B13, (1995) p. 1529.
- 9) G. Sztefka and H.P. Nolting, IEEE PTL., Vol. 5, No. 5 (1993) p. 554.
- 10) T. Okada and M. Ogura, Rev. Sci., Instrum. Vol. 66, No. 5 (1995) p. 3121.

(2000.3.1 受付)