

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4439193号
(P4439193)

(45) 発行日 平成22年3月24日(2010.3.24)

(24) 登録日 平成22年1月15日(2010.1.15)

(51) Int.Cl. F I
H O I S 5/50 (2006.01) H O I S 5/50 6 1 0

請求項の数 7 (全 17 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2003-76893 (P2003-76893) (22) 出願日 平成15年3月20日(2003.3.20) (65) 公開番号 特開2004-288759 (P2004-288759A) (43) 公開日 平成16年10月14日(2004.10.14) 審査請求日 平成18年2月13日(2006.2.13)</p> <p>(出願人による申告) 国等の委託研究の成果に係る特許出願(平成14年度経済産業省「フォトニックネットワーク技術の研究開発」委託研究、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受けるもの)</p>	<p>(73) 特許権者 000005223 富士通株式会社 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 (74) 代理人 100091340 弁理士 高橋 敬四郎 (74) 代理人 100105887 弁理士 来山 幹雄 (72) 発明者 秋山 知之 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内 審査官 土屋 知久</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体光増幅器及び光増幅方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

量子ドット、量子細線、及び量子ダッシュのいずれかの量子構造を含み、電流が注入されることによって、内部を伝搬する光を増幅する活性層と、

前記活性層が、光の伝搬方向に関して複数の区間に区分され、区間ごとに異なる電流を注入することができる電極と、

前記活性層に注入される電流密度と、該活性層の利得係数との関係を、前記量子構造の、少なくとも2つの異なる遷移波長域の利得係数についてグラフ化したとき、前記活性層の少なくとも1つの区間では、両者の交差する点の電流密度よりも小さい第1の電流密度になり、他の少なくとも1つの区間では、両者の交差する点の電流密度よりも大きい第2の電流密度になるように前記電極に電流を供給する電源とを有する半導体光増幅器。

【請求項2】

前記第1の電流密度になるように電流が供給される区間が少なくとも2つ配置され、前記第2の電流密度になるように電流が供給される区間が少なくとも2つ配置され、該第1の電流密度になるように電流が供給される2つの区間の間に、前記第2の電流密度になるように電流が供給される区間の1つが配置されている請求項1に記載の半導体光増幅器。

【請求項3】

量子ドット、量子細線、及び量子ダッシュのいずれかの量子構造を含み、電流が注入されることによって、内部を伝搬する光を増幅する活性層と、

前記活性層が、光の伝搬方向に関して複数の区間に区分され、各区間は少なくとも2つの組から選択された1つの組に属し、区間ごとに異なる電流を注入することができる電極と、

同一の組に属する区間に流れる電流密度が同一になり、異なる組に属する区間に流れる電流密度を異ならせることが可能になるように、前記電極に電流を供給する電源とを有し、

前記活性層に注入される電流密度と、該活性層の利得係数との関係を、前記量子構造の、少なくとも2つの異なる遷移波長域の利得係数についてグラフ化したとき、少なくとも1つの組に属する区間では、両者の交差する点の電流密度よりも小さい第1の電流密度になり、他の少なくとも1つの組に属する区間では、両者の交差する点の電流密度よりも大きい第2の電流密度になるように、前記電源が前記電極に電流を供給する半導体光増幅器

10

【請求項4】

同一の組に属する2つの区間の間に、当該組以外のすべての組の区間が1個ずつ配置されている請求項3に記載の半導体光増幅器。

【請求項5】

前記組が2個であり、一方の組に属する区間と他方の組に属する区間とが交互に配置されている請求項3に記載の半導体光増幅器。

【請求項6】

(a) 量子ドット、量子細線、及び量子ダッシュの少なくとも1種類からなる量子構造を含む活性層の第1の領域に、該量子構造の最も長い遷移波長域の利得係数が、2番目に長い遷移波長域の利得係数よりも大きくなるような電流密度の電流を注入し、前記第1の領域とは異なる第2の領域に、該量子構造の最も長い遷移波長域の利得係数が、2番目に長い遷移波長域の利得係数よりも小さくなるような電流密度の電流を注入する工程と、

20

(b) 前記電流を注入した状態で、前記活性層内にレーザービームを導入して光増幅を行う工程とを有する光増幅方法。

【請求項7】

前記工程(a)において、前記第1の領域以外の少なくとも1つの第3の領域にも、前記第1の領域に注入される電流密度と同じ電流密度になるように電流を注入し、前記第2の領域以外の少なくとも1つの第4の領域にも、前記第2の領域に注入される電流密度と同じ電流密度になるように電流を注入し、

30

前記工程(b)において、前記第3及び第4の領域でも光増幅を行う請求項6に記載の光増幅方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、半導体光増幅器及び光増幅方法に関し、特に量子ドット、量子細線、または量子ダッシュを含む活性層に電流を流し、その活性層内に光を導入して光増幅を行う半導体光増幅器及び光増幅方法に関する。

40

【0002】

【従来の技術】

メトロ系光通信網やアクセス系光通信網の低コスト化のために、チャンネル間の波長間隔の広い(約20nm程度)波長分割多重通信方式(コース(Coarse)WDM通信方式)が今後広く利用されるようになると予想される。コースWDM方式では、光源やフィルタの波長を精密に制御する必要が無く、ある程度の波長変動が許容される。このため、光源である半導体レーザの温度制御のための冷却器が不要になる等の理由により低コスト化を図ることが可能になる。

【0003】

その反面、利用する波長範囲が広く、1.3μmから1.6μmまでにも亘る。このため

50

、帯域 $0.05 \mu\text{m}$ 程度の従来の光増幅器単体では、利用される波長範囲のすべての光を増幅することができない。利用される波長ごとに光増幅器を準備することは、低コスト化の要請に反する。

【0004】

特許文献1に、量子ドットを使用した半導体光増幅器が開示されている。半導体光増幅器の活性層に量子ドットを用い、活性層の体積を小さくすることにより、限界電流密度において活性層中のキャリア密度の向上を図ることができる。キャリア密度が向上することにより、利得スペクトルを広くすることができる。

【0005】

【特許文献1】

特開2002-344090号公報

【特許文献2】

特開平5-267795号公報

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

半導体光増幅器の活性層に量子ドットを用いることにより、利得スペクトルを広げることができるが、利得の波長依存性が大きく、コースWDM通信方式に用いる広帯域の光増幅器への適用は困難である。

【0007】

本発明の目的は、利得の波長依存性が小さい半導体光増幅器、及び光増幅方法を提供することである。

【0008】

【課題を解決するための手段】

本発明の一観点によると、量子ドット、量子細線、及び量子ダッシュのいずれかの量子構造を含み、電流が注入されることによって、内部を伝搬する光を増幅する活性層と、前記活性層が、光の伝搬方向に関して複数の区間に区分され、区間ごとに異なる電流を注入することができる電極と、前記活性層に注入される電流密度と、該活性層の利得係数との関係を、前記量子構造の、少なくとも2つの異なる遷移波長域の利得係数についてグラフ化したとき、前記活性層の少なくとも1つの区間では、両者の交差する点の電流密度よりも小さい第1の電流密度になり、他の少なくとも1つの区間では、両者の交差する点の電流密度よりも大きい第2の電流密度になるように前記電極に電流を供給する電源とを有する半導体光増幅器が提供される。

【0009】

上記構成とすることにより、2つの遷移波長域における利得の差を小さくすることができる。

本発明の他の観点によると、量子ドット、量子細線、及び量子ダッシュのいずれかの量子構造を含み、電流が注入されることによって、内部を伝搬する光を増幅する活性層と、前記活性層が、光の伝搬方向に関して複数の区間に区分され、各区間は少なくとも2つの組から選択された1つの組に属し、区間ごとに異なる電流を注入することができる電極と、同一の組に属する区間に流れる電流密度が同一になり、異なる組に属する区間に流れる電流密度を異ならせることが可能になるように、前記電極に電流を供給する電源とを有し、前記活性層に注入される電流密度と、該活性層の利得係数との関係を、前記量子構造の、少なくとも2つの異なる遷移波長域の利得係数についてグラフ化したとき、少なくとも1つの組に属する区間では、両者の交差する点の電流密度よりも小さい第1の電流密度になり、他の少なくとも1つの組に属する区間では、両者の交差する点の電流密度よりも大きい第2の電流密度になるように、前記電源が前記電極に電流を供給する半導体光増幅器が提供される。

【0010】

同一の電流密度の区間が分散配置される。このため、1つの区間の長さが短くなる。これにより、特定の波長域の光が過大に増幅され、利得飽和が生じることを抑制することがで

10

20

30

40

50

きる。

【0011】

本発明の他の観点によると、(a)量子ドット、量子細線、及び量子ダッシュの少なくとも1種類からなる量子構造を含む活性層の第1の領域に、該量子構造の最も長い遷移波長域の利得係数が、2番目に長い遷移波長域の利得係数よりも大きくなるような電流密度の電流を注入し、前記第1の領域とは異なる第2の領域に、該量子構造の最も長い遷移波長域の利得係数が、2番目に長い遷移波長域の利得係数よりも小さくなるような電流密度の電流を注入する工程と、(b)前記電流を注入した状態で、前記活性層内にレーザビームを導入して光増幅を行う工程とを有する光増幅方法が提供される。

【0012】

上記構成とすることにより、2つの遷移波長域における利得の差を小さくすることができる。

【0013】

【発明の実施の形態】

本願発明の実施例を説明する前に、従来の半導体光増幅器の動作上の課題について説明する。従来の光増幅器は、例えば、n型GaAs基板の上に、n型AlGaAsクラッド層、GaAs下側光閉込層、活性層、GaAs上側光閉込層、p型AlGaAsクラッド層がこの順番に積層された構造を有する。

【0014】

活性層は、例えば10層の量子ドット層と9層のGaAs層とを交互に積層した構造を有する。量子ドット層の各々の厚さは25nmであり、GaAs層の各々の厚さも25nmである。量子ドット層は、下地表面上に不規則に分布したInAsからなる多数の量子ドットを含む。下地表面のうち量子ドットの配置されていない領域は、InGaAsからなるウェティング層で覆われている。

【0015】

図13に、上記活性層のモード利得係数の波長依存性を示す。横軸は波長を単位「nm」で表し、縦軸はモード利得係数(Modal Gain Coefficient)を単位「 cm^{-1} 」で表す。図13中の各曲線に付された数値は、活性層に注入される電流密度を示す。ここで、電流密度とは、活性層の単位長さあたりの電流を意味する。活性層の幅が変動しても、単位長さあたりの電流が一定であれば、モード利得係数は一定である。

【0016】

図13中のGndは、量子ドットの最も長い遷移波長を示す。最も長い遷移波長は、電子の基底準位と正孔の基底準位との差に対応する波長である。図13中の2ndは、量子ドットの2番目に長い遷移波長を示し、Upperは、量子ドットの3番目に長い遷移波長を示す。これらの遷移波長は、電子の準位と正孔の準位との対により特定される。2番目及び3番目に長い遷移波長が、電子のどの準位と正孔のどの準位との対に対応するかは、半導体光増幅器の材料や構造によって決定される。

高次の準位同士は非常に近接しているため、通常はこれらを分離して観測することは困難である。従って、図13においてUpperで示されている3番目に長い遷移波長は、電子の複数の準位または正孔の複数の準位に対応する場合もある。図13中のWetは、ウェティング層の遷移波長を示す。

【0017】

なお、本明細書において「遷移波長」とは、量子構造からの発光スペクトルが極大値を示す波長を意味する。

また、図13中のCh.1~8は、コースWDM通信方式で使用されるチャンネル1から8までの各チャンネルの波長を示す。

【0018】

図13から分かるように、各チャンネルのモード利得係数が大きくばらついている。例えば、注入電流が100mA/mm、増幅器の長さが25mmの場合、チャンネル8の利得が28dBになるのに対し、チャンネル2の利得は150dBになる。チャンネル8に対して28

10

20

30

40

50

d Bの利得を得ようとする、チャンネル2の150 d Bの利得に耐える低反射膜コーティングを行う必要があるが、これは困難である。利得等化フィルタを用いて各チャンネルの利得を等化することは可能であるが、利得の大きいチャンネルに対する減衰量を非常に大きくする必要があるので、フィルタが高価なものになってしまう。また、電力が無駄に消費されてしまう。

【0019】

図14に、光の伝搬方向に関する利得係数の分布を示す。横軸は波長を単位「nm」で表し、縦軸は光の伝搬方向の位置を単位「mm」で表す。濃淡で利得係数が表わされている。図15に、光の伝搬方向に関する光の強度分布を表す。横軸及び縦軸は、図14の場合と同様である。濃淡で光強度が表されている。

10

【0020】

ウェット層の遷移波長域で自然発光が生じ、この光が増幅されていることがわかる。自然発光した光が増幅されることによって利得の飽和が生じ、端面近傍（位置が0 mm及び25 mmの近傍）で、波長1300～1400 nmの範囲の利得が低下している。このため、図15に示すように、チャンネル1～3の出力端における光強度が、他のチャンネルの光強度に比べて弱くなってしまふ。

【0021】

図16(A)に、入力光の強度と出力光の強度との関係を示す。横軸は入力光の強度を単位「dBm」で表し、縦軸は出力光の強度を単位「dBm」で表す。図中の曲線に付された数字は、チャンネル番号を示す。出力光の強度がチャンネル間で大きくばらついているうえに、チャンネル1～3で利得の飽和が顕著であることがわかる。

20

【0022】

図16(B)に、入力光の強度と雑音指数(Noise Figure)との関係を示す。横軸は入力光の強度を単位「dBm」で表し、縦軸は雑音特性を単位「dB」で表す。利得飽和の顕著なチャンネル1～3の雑音指数が劣化していることが分かる。雑音指数の劣化は、利得飽和によってキャリアの反転分布が不完全になるためである。

【0023】

以下に説明する実施例による半導体光増幅器では、利得飽和を軽減することが可能である。

図1に、第1の実施例による半導体光増幅器の、光の伝搬方向に平行な断面図を示す。n型InPからなる基板1の上に、n型InPからなる厚さ100～200 nmのバッファ層2がエピタキシャル成長されている。バッファ層2は結晶性の優れた下地表面を提供するためのものであり、基板1の結晶性が十分良好であれば省略してもよい。バッファ層2の上に、n型InPからなる厚さ3 μmのクラッド層3が形成されている。基板1、バッファ層2、クラッド層3のn型不純物濃度は、例えば $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。

30

【0024】

クラッド層3の上に、厚さ0.5 μmの活性層4が形成されている。活性層4は、引張り歪を有する量子ドットを含む層である。活性層4の構造については後述する。

【0025】

活性層4の上に、p型InPからなる厚さ3 μmのクラッド層5がエピタキシャル成長されている。クラッド層5の上に、p型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ からなる厚さ0.5 μmのコンタクト層7がエピタキシャル成長されている。クラッド層5のp型不純物濃度は、例えば $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であり、コンタクト層7のp型不純物濃度は、例えば $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である。

40

【0026】

これらの層は、分子線エピタキシ(MBE)または有機金属化学気相成長(MOCVD)によりエピタキシャル成長させることができる。MBEの場合には、各構成元素の固体を原料とし、p型不純物としてBe、n型不純物としてSiを用いる。MOCVDの場合には、In原料としてトリメチルインジウム、P原料としてフォスフィン、Al原料としてトリメチルアルミニウム、Ga原料としてトリエチルガリウム、p型不純物であるZnの

50

原料としてジエチルジシラン、n型不純物であるSiの原料としてジシラン等を用いる。量子ドット層の成長温度は450、その他の層の成長温度は、600~700とする。

【0027】

第1の実施例による光増幅器は、光の伝搬方向に関して3つの領域R1、R2、及びR3に区分されている。コンタクト層7の表面のうち、領域R1、R2、及びR3に対応する領域に、それぞれp側電極9A、9B、及び9Cが形成されている。p側電極9A~9Cは、コンタクト層7の全面上に電極層を堆積させた後、領域R1~R3の境界線に沿って、コンタクト層7の底面よりも浅い溝を形成することにより形成される。この溝により、p側電極9A~9Cが相互に電氣的に分離される。基板1の裏面に、n側電極8が形成されている。光の入射端面及び出射端面が、それぞれ無反射膜20A及び20Bでコーティングされている。

10

【0028】

図2(A)に、図1の一点鎖線A2-A2における断面図を示す。基板1からコンタクト層7までの積層構造は、図1を参照して説明した通りである。コンタクト層7及びクラッド層5の一部がエッチングされ、ストライプ状のリッジ構造が形成されている。リッジ構造の側面は、絶縁層10で埋め込まれている。リッジ構造の幅は数μm、基板1の幅は1mm程度、長さは0.3~30mm程度である。

【0029】

基板1の裏面にn側電極8が形成されている。コンタクト層7及び絶縁層10の上にp側電極9Bが形成されている。

20

図2(A)に示した光増幅器は、リッジ構造のものであるが、埋込構造を採用してもよい。

【0030】

図2(B)に、埋込構造を有する光増幅器の断面図を示す。積層構造自体は、図2(A)に示したリッジ構造のものと同一である。埋込構造の場合、活性層4、及びその上下に接するクラッド層3及び5の一部分の幅が制限されている。この幅を制限している領域に、光閉じ込め効果及び電流狭窄効果を有する埋込構造11が形成される。埋込構造11は、例えばp型クラッド層3に接するn型InP層とn型クラッド層5に接するp型InP層とを含む。

【0031】

このような埋込構造は、クラッド層5の一部を成長させた後、ストライプ状のハードマスクを形成し、ハードマスクの両側の領域をエッチングし、さらに、埋込構造を選択成長させることにより形成される。その後、ハードマスクを除去し、クラッド層5の残りの部分及びコンタクト層7を成長させる。

30

【0032】

図3(A)に、活性層4の構成例を示す。活性層4は、InP基板と格子整合するアンドープの $In_{0.53}(Al_{0.5}Ga_{0.5})_{0.47}As$ からなるバリア層41の上に、相対的に格子定数が小さく、バンドギャップが狭い $In_{0.1}Ga_{0.9}As$ の量子ドット層42が形成されている。量子ドット層42は、例えば1~6原子層の厚さを有し、下地のバリア層41と格子整合しないため、S-Kモードの成長が生じ、連続した均一な膜にはならない。

40

【0033】

図3(B)に、量子ドット層の構成を概略的に示す。下地バリア層41の上に、量子ドット42が島状に点在して形成される。量子ドット42は、例えば平面内の直径が約20nmであり、高さ(高さ)が約5nmである。

【0034】

図3(A)に戻って説明を続ける。量子ドット層42の上に、バリア層43、量子ドット層44、バリア層45、量子ドット層46、バリア層47がこの順番に積層されている。量子ドット層44及び46の構成は、量子ドット層42の構成と同様である。バリア層43、45、及び47の材料は、バリア層41の材料と同一である。バリア層43及び45の厚さは約30nmである。

50

【 0 0 3 5 】

量子ドット層 4 2、4 4、及び 4 6 は、バリア層より狭いバンドギャップを有するため、伝導帯のバンド構造は、図 3 (A) の右に示したようになる。なお、最も下及び上のバリア層を、中間のバリア層より厚くしてもよい。

【 0 0 3 6 】

図 3 (B) に示すように、バリア層 4 3 は、量子ドット 4 2 を埋め込んで、その下のバリア層 4 1 と連続する。ただし、S - K モードで量子ドットを成長させると、バリア層 4 3 と 4 1 との間にウェットティング層が形成される場合がある。

【 0 0 3 7 】

図 3 (A) の構造においては、バリア層の中に 3 層の量子ドット層が埋め込まれている。3 層の量子ドット層は、バリア層よりも格子定数の小さな材料で形成されている。このため、量子ドット 4 2 には引っ張り応力が発生する。すなわち、量子ドット層 4 2、4 4、及び 4 6 は、伸び歪を有する層になる。なお、図 3 (A) では 3 層の量子ドット層を形成したが、量子ドット層の数は 1 ~ 2 0 程度の中から任意に選択することができる。

10

【 0 0 3 8 】

図 3 (C) に、5 層の量子ドット層を形成したときのバンド構造を概略的に示す。活性層 A L 及びその両側のクラッド層 C L の伝導帯下端 c . b、価電子帯上端 v . b が示されている。図の横方向が積層方向に相当する。量子ドット層 Q D においてバンドギャップが狭くなり、電子と正孔との発光性再結合が量子ドット Q D において優先的に生じる。バリア層 B L 及びクラッド層 C L は、量子ドット Q D よりバンドギャップが広く、量子ドット Q D からの発光に対し透明である。

20

【 0 0 3 9 】

図 1 に戻って説明を続ける。p 側電極 8 が接地されている。電源 1 5 が、領域 R 2 上の電極 9 B に電圧を印加する。電源 1 6 が、領域 R 1 及び R 3 上の電極 9 A 及び 9 C に電圧を印加する。これにより、活性層 4 に電流が注入される。領域 R 2 上の電極 9 B が、領域 R 1 及び R 3 上の電極 9 A 及び 9 C から分離されているため、領域 R 2 内の活性層 4 と、領域 R 1 及び R 3 内の活性層 4 とに、独立に電流を注入することができる。

【 0 0 4 0 】

以下、注入電流の好ましい大きさについて説明する。

図 4 に、活性層 4 の単位長さあたりの利得係数の電流密度依存性を示す。横軸は活性層に注入される電流密度を単位「A / mm」で表し、縦軸は単位長さあたりの利得（利得係数）を単位「 cm^{-1} 」で表す。

30

【 0 0 4 1 】

量子ドット内の電子及び正孔の準位は離散的に分布する。例えば、伝導帯の電子の準位には、基底準位、2 次準位、3 次以上の高次の準位が存在する。同様に、価電子帯の正孔の準位にも、基底準位、2 次準位、3 次以上の高次の準位が存在する。キャリアがこれらの準位間で遷移することにより、発光が生ずる。

【 0 0 4 2 】

電子及び正孔の複数の準位が存在するため、量子ドットの遷移波長も複数存在する。最も長い遷移波長は、電子の基底準位と正孔の基底準位とのエネルギー差に対応する。高次準位が関与する遷移波長は、基底準位間の遷移波長よりも短くなる。2 番目に長い遷移波長、及び 3 番目に長い遷移波長が、どの準位間の遷移に対応するのかは、量子ドットやバリア層の材料、寸法等によって決定される。

40

【 0 0 4 3 】

通常、3 次以上の高次の準位は非常に近接しているため、3 番目に長い遷移波長は、これら高次の複数の準位が関与する遷移に対応すると考えることができる。

【 0 0 4 4 】

図 4 中の曲線 G n d、2 n d、及び U p は、それぞれ量子ドットの最も長い遷移波長（第 1 の遷移波長）、2 番目に長い遷移波長（第 2 の遷移波長）、及び 3 番目に長い遷移波長（第 3 の遷移波長）の光に対する利得係数を示す。曲線 G n d、2 n d、及び U p で示さ

50

れる利得係数を、それぞれ第1の利得係数、第2の利得係数、及び第3の利得係数と呼ぶこととする。なお、利得係数は、各遷移波長に対応する準位間の遷移による発光の強度が最大になる波長における値である。

【0045】

注入電流を大きくすると、利得係数が大きくなることが分かる。ところが、その変動の様子は、第1～第3の利得係数で同じではない。電流密度が J_1 の点で第1の利得係数 G_{nd} と第2の利得係数 2_{nd} とが交差する。電流密度が J_1 以下の領域では第1の利得係数 G_{nd} が第2の利得係数 2_{nd} よりも大きく、電流密度が J_1 以上の領域では、第2の利得係数 2_{nd} が第1の利得係数 G_{nd} よりも大きい。

【0046】

また、電流密度が J_2 の点で、第2の利得係数 2_{nd} と第3の利得係数 U_p とが交差する。電流密度が J_2 以下の領域では、第2の利得係数 2_{nd} が第3の利得係数 U_p よりも大きく、電流密度が J_2 以上の領域では、第3の利得係数 U_p が第2の利得係数 2_{nd} よりも大きい。

【0047】

活性層が、光の伝搬方向に関して3つの領域に区分されており、各領域に独立に電流を注入することができる光増幅器を考える。3つの領域を第1～第3の領域とし、それらの長さをそれぞれ $L(1) \sim L(3)$ とする。第 m の領域の第1～第3の利得係数を、それぞれ $g(g_{nd}, m)$ 、 $g(2_{nd}, m)$ 、及び $g(up, m)$ とする。このとき、次の式(1)を満足するように、各領域の長さ、及び各領域に注入される電流密度を選択することにより、第1の遷移波長、第2の遷移波長、及び第3の遷移波長の光に対する利得を等しくすることができる。すなわち、利得の波長依存性を小さくすることができる。

【0048】

【数1】

$$\sum_{m=1,2,3} L(m)g(g_{nd}, m) = \sum_{m=1,2,3} L(m)g(2_{nd}, m) = \sum_{m=1,2,3} L(m)g(up, m) \quad \cdot \cdot \quad (1)$$

上記式(1)を満たすためには、以下の式(2)が成立すればよい。

【0049】

【数2】

$$\begin{aligned} L(1):L(2):L(3) = & \\ & (g(g_{nd},2) - g(up,2))(g(g_{nd},3) - g(2_{nd},3)) - (g(g_{nd},2) - g(2_{nd},2))(g(g_{nd},3) - g(up,3)) : \\ & (g(g_{nd},1) - g(2_{nd},1))(g(g_{nd},3) - g(up,3)) - (g(g_{nd},1) - g(up,1))(g(g_{nd},3) - g(2_{nd},3)) : \\ & (g(g_{nd},1) - g(up,1))(g(g_{nd},2) - g(2_{nd},2)) - (g(g_{nd},2) - g(up,2))(g(g_{nd},1) - g(2_{nd},1)) \\ & \cdot \cdot \cdot \quad (2) \end{aligned}$$

例えば、第1～第3の領域に注入される電流密度が、それぞれ 0.1 A/mm 、 0.014 A/mm 、及び 0.00475 A/mm の場合、長さ $L(1)$ 、 $L(2)$ 、及び $L(3)$ は、それぞれ光増幅器の全長の 41.3% 、 0.7% 、及び 58% になる。長さ $L(2)$ は、光増幅器の全長に対して非常に短いため、第2の領域を省略することも可能である。

【0050】

図1において、領域 $R1$ と $R3$ とに流れる電流密度を 0.00475 A/mm とし、領域 $R2$ に流れる電流密度を 0.1 A/mm とする。すなわち、領域 $R1$ と $R3$ とが、長さ $L(3)$ の第3の領域に相当し、領域 $R2$ が、長さ $L(1)$ の第1の領域に相当する。従って、光増幅器の長さが約 25 mm のとき、領域 $R1$ と $R3$ との合計の長さが約 14.5 mm になり、領域 $R2$ の長さが約 10.4 mm になる。第2の領域を省略しているため、領域 $R1 \sim R3$ の合計の長さが 25 mm にならないが、この差分は、光増幅器の全長または各領域の長さを微調整することにより吸収可能である。

10

20

30

40

50

【0051】

図5に、上記第1の実施例による光増幅器の利得係数の分布を示す。図6に、第1の実施例による光増幅器の活性層内の光強度の分布を示す。図5及び図6の横軸は波長を単位「nm」で表し、縦軸は光の伝搬方向の位置を単位「mm」で表す。図の下辺が入射端面に相当し、上辺が出射端面に相当する。利得係数が濃淡で示されている。

【0052】

図6と図15とを比較すると、図6に示した第1の実施例の場合の方が、波長1200nm近傍の光強度が弱く、この波長域の光の増幅が抑制されていることがわかる。これは、電流密度の高い領域R1及びR3の長さが、図15の場合に比べて短いためである（図15の場合には、全領域に領域R1及びR3と同じ電流密度の電流が注入されている）。

10

【0053】

図5と図14とを比較すると、図5に示した第1の実施例の場合の方が、波長1300～1400nmの範囲の端面近傍の暗い領域が小さくなっていることがわかる。この暗い領域は、注入される電流密度が高いにもかかわらず、利得が飽和してしまって所望の利得係数が得られていない領域である。

【0054】

第1の実施例の場合には、波長1200nm近傍の光の増幅が抑制されているため、波長1300～1400nmの範囲において、利得飽和が生じにくくなっている。

【0055】

図7(A)に、第1の実施例による光増幅器の出力光強度と入力光強度との関係を示す。図7(A)と図16(A)とを比較すると、特にチャネル1、2、3の出力特性が改善されていることがわかる。

20

【0056】

図7(B)に、第1の実施例による光増幅器の雑音指数と入力光強度との関係を示す。図7(B)と図16(B)とを比較すると、雑音特性が大幅に改善されていることがわかる。

【0057】

上記実施例では、領域R1及びR3の電流密度を0.1A/mmとし、領域R2の電流密度を0.00475A/mmとした。この2つの電流密度の一方は、図4において、第1の利得係数 G_{nd} と第2の利得係数 2_{nd} との交点の電流密度よりも低く、他方は、この交点の電流密度よりも高い。同様に、一方は、第2の利得係数 2_{nd} と第3の利得係数 U_p との交点の電流密度よりも低く、他方は、この交点の電流密度よりも高い。

30

【0058】

このように、活性層の2つの領域の電流密度の一方が、2つの遷移波長域の利得係数の交点の電流密度よりも低く、他方が、この交点の電流密度よりも高く設定されている。活性層の一方の領域において第1の遷移波長の利得係数が高い場合、もう一方の領域においては、第2の遷移波長の利得係数の方が高くなる。これにより、2つの遷移波長域における利得係数の差を小さくすることができる。

【0059】

図8に、第2の実施例による光増幅器の断面図を示す。第1の実施例による光増幅器の積層構造は、図1に示した第1の実施例による光増幅器の積層構造と同一である。図1に示した第1の実施例では、光増幅器が領域R1～R3の3つの領域に区分されていたが、第2の実施例では、領域R11～R19の9つの領域に区分されている。領域R11～R19のコンタクト層7の上に、それぞれ電極19A～19Iが形成されている。

40

【0060】

電極19A、19C、19E、19G、及び19Iは電源16に接続され、他の電極19B、19D、19F、及び19Hは、他の電源15に接続されている。領域R11、R13、R15、R17、及びR19の長さの合計は、図1に示した第1の実施例の光増幅器の領域R1とR3との長さの合計に等しい。領域R12、R14、R16、及びR18の長さの合計は、第1の実施例の光増幅器の領域R2の長さに等しい。

50

【0061】

領域 R 1 1、R 1 3、R 1 5、R 1 7、及び R 1 9 に、電流密度が 0.1 A/mm となるように、電源 1 6 から電流が注入される。領域 R 1 2、R 1 4、R 1 6、及び R 1 8 には、電流密度が 0.00475 A/mm となるように、電源 1 5 から電流が注入される。

【0062】

図 9 に、上記第 2 の実施例による光増幅器の利得係数の分布を示す。図 10 に、第 2 の実施例による光増幅器の活性層内の光強度の分布を示す。図 9 及び図 10 の横軸は、波長を単位「nm」で表し、縦軸は、光の伝搬方向の位置を単位「mm」で表す。図の下辺が入射端面に相当し、上辺が出射端面に相当する。利得係数が濃淡で示されている。

【0063】

図 10 を図 6 と比較すると、波長 $1100 \sim 1200 \text{ nm}$ の範囲の光強度が、弱まっていることがわかる。第 2 の実施例では、電流密度の高い領域（例えば領域 R 1 1、R 1 3 等）の各々が短いため、波長 $1100 \sim 1200 \text{ nm}$ の光が電流密度の高い領域で増幅されたとしても、その強度が極端に大きくはならない。このため、波長 $1100 \sim 1200 \text{ nm}$ の範囲の光が過大に増幅されてしまうことを防止できる。波長 $1100 \sim 1200 \text{ nm}$ の光が過大に増幅されると、利得飽和が生じてしまう。

【0064】

図 9 に示されているように、各領域 R 1 1 ~ R 1 9 内において、光の伝搬方向（図 9 の縦方向）に関して利得係数がほぼ一定であることがわかる。すなわち、利得飽和が生じていない。これは、波長 $1100 \sim 1200 \text{ nm}$ の光の増幅が抑制されているためである。

【0065】

図 11 (A) に、第 2 の実施例による光増幅器の出力光強度と入力光強度との関係を示す。図 11 (A) を図 7 (A) と比較すると、出力特性が格段に改善されていることがわかる。

【0066】

図 11 (B) に、第 2 の実施例による光増幅器の雑音指数と入力光強度との関係を示す。図 11 (B) を図 7 (B) と比較すると、雑音特性が大幅に改善されていることがわかる。

【0067】

図 12 に、各チャンネルに光信号を入力した時の出力光の強度の時間変化を示す。横軸は経過時間を単位「ps」で表し、縦軸は波長を単位「nm」で表し、高さは光強度を単位「dbm」で表す。チャンネル間のクロストークはほとんど生じておらず、多チャンネルの光信号を同時に増幅することが可能であることがわかる。

【0068】

第 2 の実施例では、第 1 の電流密度になる領域（区間）が複数個配置され、第 2 の電流密度になる領域も複数個配置されている。また、第 1 の電流密度になる 2 つの領域の間に、第 2 の電流密度になる領域の 1 つが配置されている。このような構成とすることにより、1 つの区間の長さが短くなり、特定の波長域の光の過大な増幅を抑制し、利得飽和の発生を防止することができる。

【0069】

上記第 1 及び第 2 の実施例では、活性層を区分した複数の領域（区間）の各々が、2 つの組から選択された 1 つの組に属し、同一の組に属する区間の電流密度を等しくした。同一の電流密度とされる区間の組を 3 組以上準備し、活性層の区間の各々を、3 つ以上の組から選択された 1 つの組に属するようにしてもよい。

【0070】

この場合、同一の組に属する 2 つの区間の間に、当該組以外のすべての組の区間が 1 個ずつ配置されるような構成とすることが好ましい。同一の電流密度とされる区間の組が 2 組である場合には、一方の組に属する区間と他方の組に属する区間とが交互に配置される。

【0071】

上記実施例では、量子ドットを含む活性層を有する半導体光増幅器について説明したが、

10

20

30

40

50

量子ドット以外の量子構造を含む活性層を用いてもよい。例えば、量子細線または量子ダッシュを含む活性層を用いることも可能である。ここで、量子細線は、キャリアの準位が離散的になる程度に細線化されたポテンシャルの低い線状領域を意味する。量子ダッシュは、量子細線が短く切断されたものである。

【0072】

上記実施例では、量子ドットの寸法が活性層内でほぼ一定である場合を説明した。光の伝搬方向に関して量子ドット等の量子構造の寸法を変化させてもよい。量子構造の寸法が変化すると、利得スペクトルの形状も変化し、活性層の位置によって利得が変動する。すなわち、上記実施例で説明した電流密度を変える方法と同様の効果を得ることができる。

【0073】

以上実施例に沿って本発明を説明したが、本発明はこれらに制限されるものではない。例えば、種々の変更、改良、組み合わせ等が可能なことは当業者に自明であろう。

【0074】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば、利得飽和を抑制し、広い波長域において利得を一定に近づけることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 第1の実施例による半導体光増幅器の断面図である。

【図2】 第1の実施例及びその変形例による半導体光増幅器の断面図である。

【図3】 (A)は、第1の実施例による半導体光増幅器の活性層断面図、(B)は、量子ドット層の断面図、(C)は、活性層のエネルギーバンド図である。

【図4】 半導体光増幅器の利得係数と、電流密度との関係を示すグラフである。

【図5】 第1の実施例による半導体光増幅器の活性層の利得係数の分布を示す図である。

【図6】 第1の実施例による半導体光増幅器の活性層の光強度の分布を示す図である。

【図7】 (A)は、第1の実施例による半導体光増幅器の出力光強度と入力光強度との関係を示すグラフであり、(B)は、雑音指数と入力光強度との関係を示すグラフである。

【図8】 第2の実施例による半導体光増幅器の断面図である。

【図9】 第2の実施例による半導体光増幅器の活性層の利得係数の分布を示す図である。

【図10】 第2の実施例による半導体光増幅器の活性層の光強度の分布を示す図である。

【図11】 (A)は、第2の実施例による半導体光増幅器の出力光強度と入力光強度との関係を示すグラフであり、(B)は、雑音指数と入力光強度との関係を示すグラフである。

【図12】 第2の実施例による半導体光増幅器の光強度の時間変動を波長ごとに示す図である。

【図13】 従来の半導体光増幅器のモード利得係数の波長依存性を示すグラフである。

【図14】 従来の半導体光増幅器の活性層の利得係数の分布を示す図である。

【図15】 従来の半導体光増幅器の活性層の光強度の分布を示す図である。

【図16】 (A)は、従来の半導体光増幅器の出力光強度と入力光強度との関係を示すグラフであり、(B)は、雑音指数と入力光強度との関係を示すグラフである。

【符号の説明】

- 1 基板
- 2 バッファ層
- 3、5 クラッド層
- 4 活性層
- 7 コンタクト層
- 8、9A～9C、19A～19I 電極

10

20

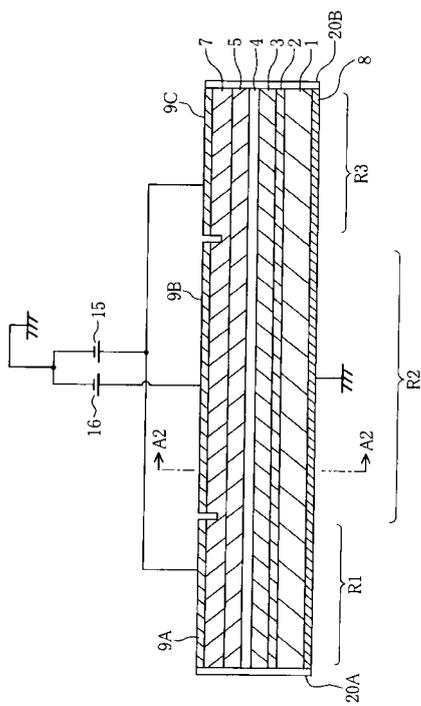
30

40

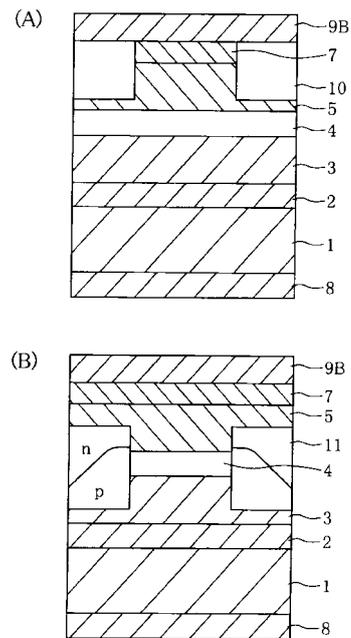
50

- 10 絶縁層
- 11 埋込構造
- 15、16 電源
- 20A、20B 無反射膜
- 41、43、45、47 バリア層
- 42、44、46 量子ドット層

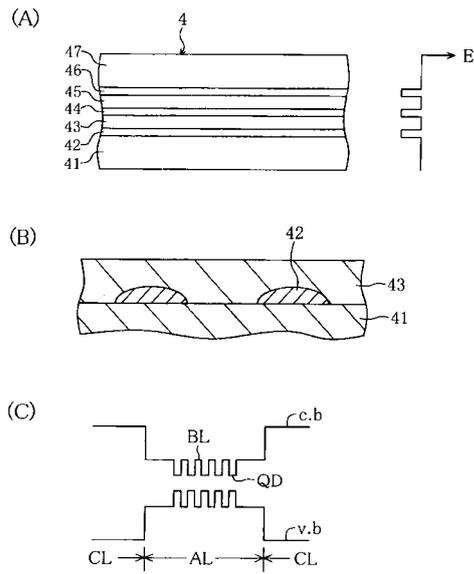
【図1】



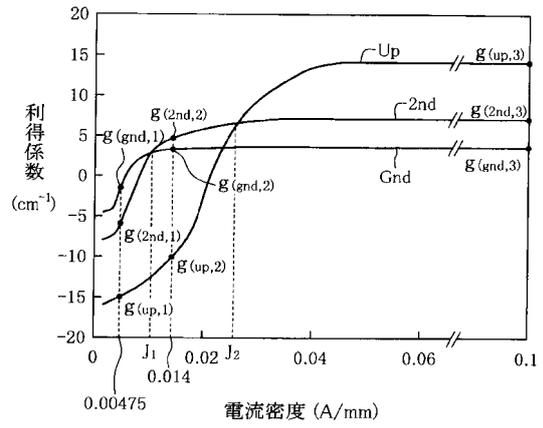
【図2】



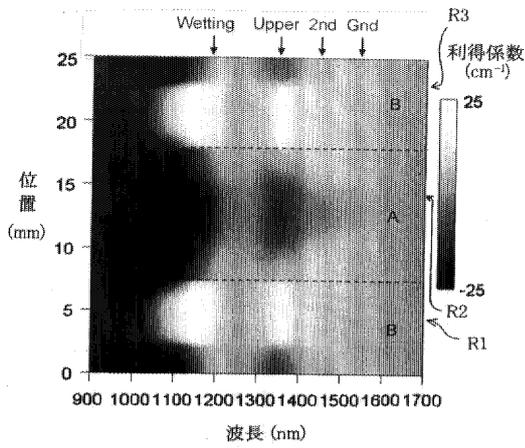
【 図 3 】



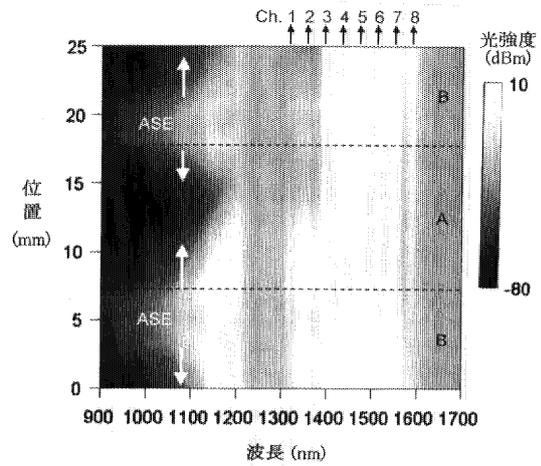
【 図 4 】



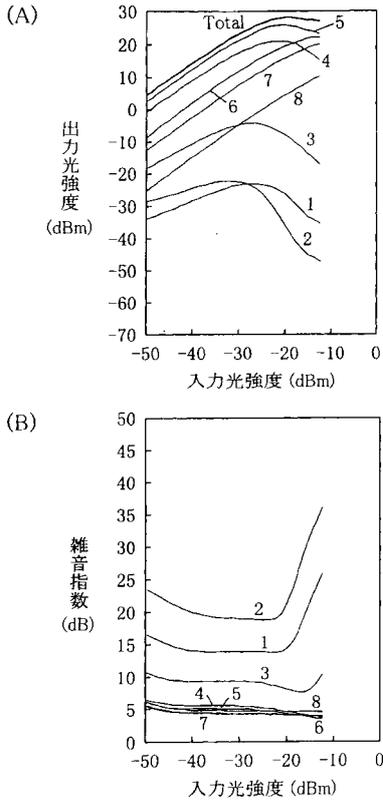
【 図 5 】



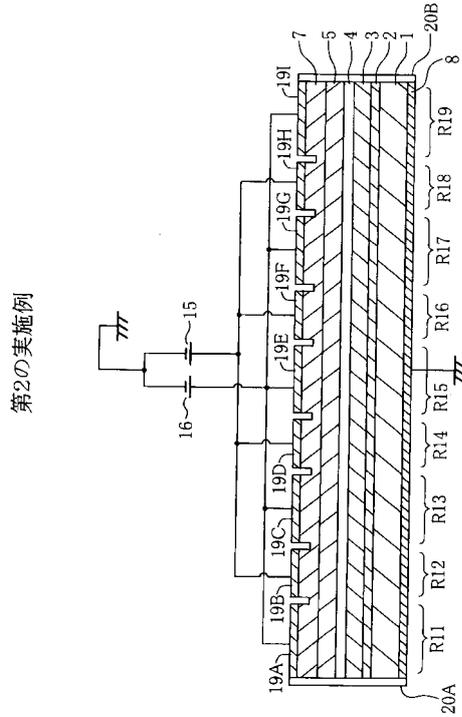
【 図 6 】



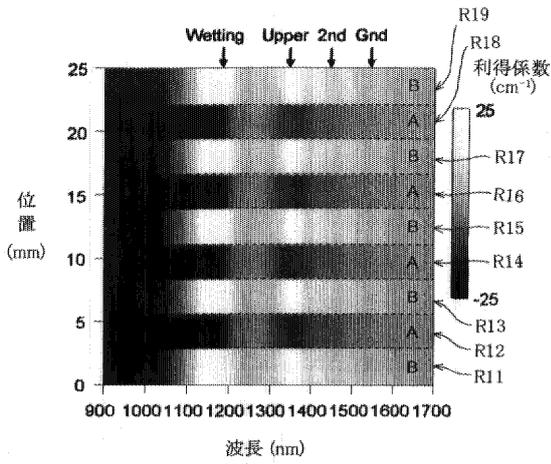
【図7】



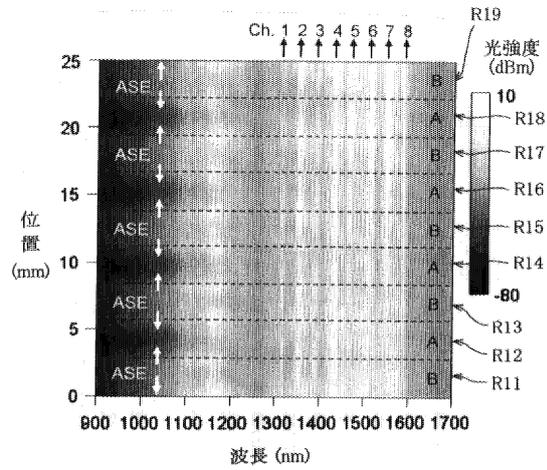
【図8】



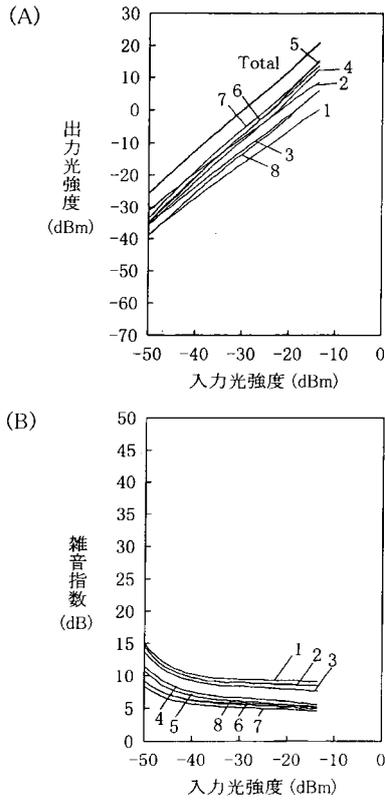
【図9】



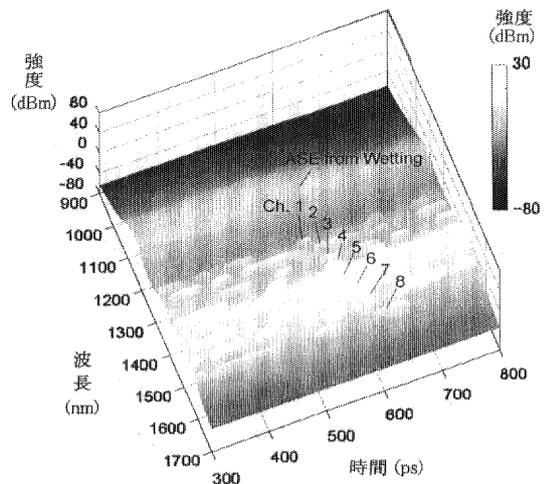
【図10】



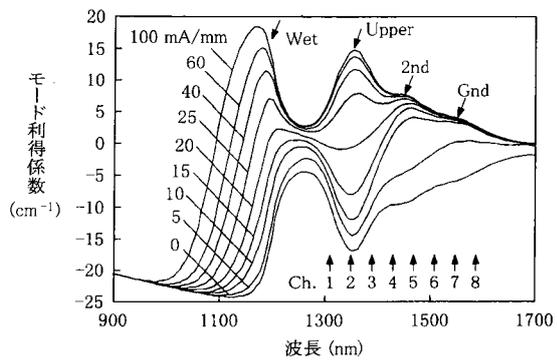
【図 1 1】



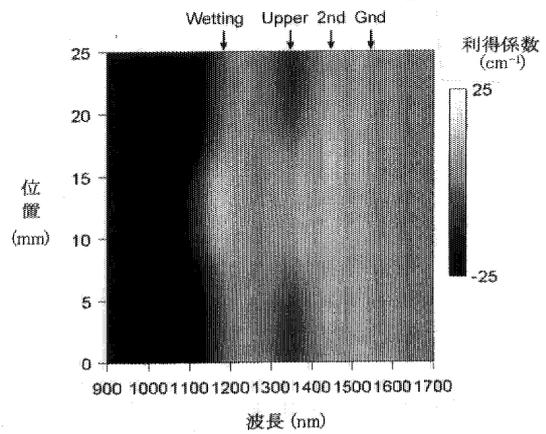
【図 1 2】



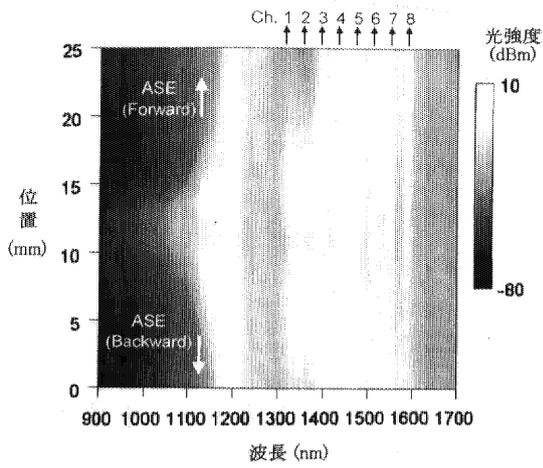
【図 1 3】



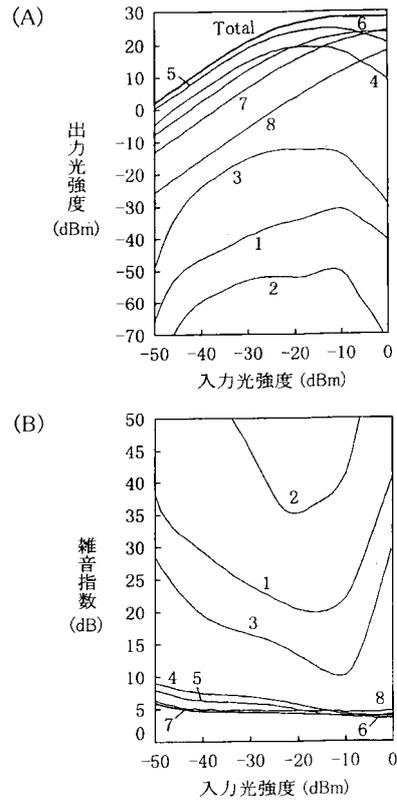
【図 1 4】



【図 15】



【図 16】



フロントページの続き

(56)参考文献 特開昭48-068188(JP,A)
特開平09-214060(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01S 5/50-5/50