(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第4053109号
(P4053109)
(45)発行日　平成20年2月27日(2008.2.27)　(24)登録日　平成19年12月14日(2007.12.14)

(51)Int.Cl.　F I
H01S 5/183 (2006.01)　H01S 5/183

請求項の数 8　(全 21 頁)

(21)出願番号　特願平9-49976
(22)出願日　平成9年3月5日(1997.3.5)
(65)公開番号　特開平9-326530
(43)公開日　平成9年12月16日(1997.12.16)
審査請求日　平成16年2月25日(2004.2.25)
(31)優先権主張番号　614,988
(32)優先日　平成8年3月12日(1996.3.12)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　506098789
アバゴ・テクノロジーズ・ファイバー・アイピー（シンガポール）プライベート・リミテッド
シンガポール国シンガポール７６８９２３，イーシュン・アベニュー・７・ナンバー１
(74)代理人　100087642
弁理士　古谷　聡
(74)代理人　100076680
弁理士　溝部　孝彦
(74)代理人　100121061
弁理士　西山　清春

最終頁に続く

(54)【発明の名称】垂直共振器型面発光レーザとその製法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
ターンオン・ジッタを低減し、且つ空間ホールバーニングを低減した垂直共振器型面発光レーザを製造する方法であって、
（ａ）第一の鏡面層を形成するために第一の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層を堆積させるステップと、
（ｂ）活性層を形成するために前記第一の鏡面層の上に半導体材料の層を堆積させるステップであって、
（ｂ－１）量子井戸領域を形成するステップ、及び
（ｂ－２）拡散増強領域を形成するステップであって、前記拡散増強領域によって前記量子井戸領域に誘発される正孔がそこにある電子を約１桁上回るような高濃度に前記半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングして前記拡散増強領域を形成するステップ
を含むステップと、
（ｃ）第二の鏡面層を形成するために第二の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層を前記活性層上に堆積させるステップと
を含むことを特徴とする製造方法。
【請求項２】
前記拡散増強領域を形成するステップでは、前記量子井戸領域の外側部に前記活性層の領域を堆積させている間だけ前記アクセプタ不純物を使って前記半導体材料をドーピングすることを特徴とする、請求項１に記載の製造方法。

【請求項３】
前記拡散増強領域を形成するステップでは、前記量子井戸領域を包含する前記活性層の領域を堆積させている間に前記アクセプタ不純物を使って前記半導体材料をドーピングすることを特徴とする、請求項１に記載の製造方法。
【請求項４】
前記拡散増強領域は、デルタドープ領域であることを特徴とする、請求項１に記載の製造方法。
【請求項５】
垂直共振器型面発光レーザであって、ターンオン・ジッタを低減し且つ空間ホールバーニングを低減する垂直共振器型面発光レーザであって、
（ａ）第一の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の第一の鏡面層と、
（ｂ）該第一の鏡面層に隣接する半導体材料の活性層であって、
（ｂ－１）量子井戸領域と、
（ｂ－２）拡散増強領域であって、前記量子井戸領域に誘発される正孔がそこにある電子を約１桁上回るような高濃度に半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングした拡散増強領域とを有する活性層と、
（ｃ）第二の鏡面層であって、前記活性層に隣接し且つ前記第一の鏡面層から離れた層であって、第二の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層である第二の鏡面層を含むことを特徴とするレーザ。
【請求項６】
前記拡散増強領域は、前記活性層における前記量子井戸領域の外側部に配置されることを特徴とする、請求項５に記載のレーザ。
【請求項７】
前記拡散増強領域は、前記活性層における前記量子井戸領域を包含することを特徴とする、請求項５に記載のレーザ。
【請求項８】
前記拡散増強領域は、前記活性層におけるデルタドープ領域であることを特徴とする、請求項５に記載のレーザ。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【産業上の利用分野】
本願発明は、半導体レーザに関し、より詳細には、垂直共振器型面発光レーザに関する。
【０００２】
【従来の技術】
垂直共振器型面発光レーザ(Vertical-cavity surface-emitting laser:VCSEL)は、在来のエッジ放出レーザより優れた多くの利点、例えば、低コスト製造、高歩留り、優れたビーム品質、及び計測可能な形状寸法を有する。これらの特性により、VCSELは、多くの応用分野で推奨すべきものとなっている。例えば、K.H.Hahn, M.R.T.Tan,及びS.Y.Wangは、"Modal and Intensity Noise of Large-Area Multiple-Transverse-Mode VCSELs",Multimode-Optical-Fiber Links, 1994 Conference on Optical Fiber Communication - paper ThB3, OFC '94において、マルチモード・ファイバデータリンクにVCSELを使用する例を説明している。しかし、VCSELのターンオン・ジッタ（ターンオン遅延時間の変動）は、該データリンクで達成し得る最大ビットレートを制限することがある。この問題は、C.R.Mirasso, P.Colet,及びM.San Miguelが"Dependence of Timing Jitter on Bias Level for Single-mode Semiconductor Lasers under High Speed Operation", QE-29 IEEE J.Quantum Electron.,pp.23-32 (1993)で、A.Sapia, P.Spano, C.R.Mirasso, P.Colet,及びM.San Miguelが"Pattern Effects in Timing Jitter of Semiconductor Lasers", 61 Appl.Phys. Lett.,pp.1748-1750 (1992)で、及びT.M.Shenが"Timing Jitter in Semiconductor Lasers under Pseudorandom Word Modulation",7 J.Lightwave Technology,pp.1394-1399 (1989)で論じている。

【０００３】
VCSELのターンオン遅延は、VCSELのオフタイム、即ち、レーザ電流がスイッチオフされ再度スイッチオンされるまでの時間、により変化することは分かっている。VCSELのオフタイムは、レーザ電流を変調するデータのオンタイムの前における連続する０値の長さに応じて変化するので、VCSELのターンオン遅延はデータ依存ジッタを免れない。図1Aと1Bは、単一モードVCSELのターンオン遅延時間のビットパターン依存性を説明するものである。図1Aは、２つの両極端ビットパターンに関するターンオン過程中の光子密度の時間依存性を示す。図1Bは、２つの両極端ビットパターン及びその中間ビットパターンに関するターンオン過程中の光子密度の時間依存性を示す。図1Aと1Bにおいて、１ビットの持続時間は1 nsであり、かつレーザ電流は、VCSELのスレッショルド（しきい値）電流の約半分のOFF状態とスレッショルド電流の約５倍のON状態との間で切換えられる。図1Aにおいて、０値が長く続いた後、1値へ切換わったとき（０００００１）の曲線Aで描かれたターンオン遅延時間は、長い１値の後１個の0値の後、1値への切換わったとき（１１１０１）の曲線Bで描かれたターンオン遅延時間よりかなり長い。曲線Aを曲線Bと較べれば、ターンオン遅延時間はレーザ電流のビットパターンに依存して変化することが分かる。

【０００４】
図1Bは、いくつかの中間ビットパターンと共に図1Aに示した両極端のビットパターンを含むいくつかの異なった疑似ランダム・ワードパターンに応答した光子密度の変化を示す。各トレースは、1値の間に様々な数の0値が入ったパターンでの遅延時間を表す。最大及び最小ターンオン遅延間の差は、ジッタの広がり(jitter spread)と呼ばれる。ジッタの広がりによって、VCSELが変調される最大レートに制限が課せられる。

【０００５】
ジッタの広がりの制限に加えて、VCSELはまた空間ホールバーニング（spatial hole burning）の制限を受ける。VCSELでは、光は、量子井戸領域における半導体材料の大きい断面積を通して流れるレーザ電流で生ずる。ある種の応用では、VCSELは、単一のガウス強度分布を有する光線を放出する必要がある。これは単一モード動作として知られており、単一モード動作のレーザで生じた光線は、単一光線を呼ばれる。VCSELは、レーザ電流がスレッショルドレベルをわずかに上回る時に単一光線を放出する。しかし、第二の、より高いスレッショルドレベルを越えてレーザ電流を増やすと、レーザは、二重の、又はより高い、ガウス強度分布を有する光線を放出し始める。

【０００６】
VCSELは、量子井戸領域の中央の誘導放出ゾーンで単一光線を発生する。光が発生すると、発生光の強度に依存してキャリア密度が減損するので、単一光線の発生は、誘導放出ゾーンの中央に空乏ゾーンを形成し、かつ空乏ゾーンを囲むゾーンにおいて対応したキャリア密度の増加を来すことになる。空間ホールバーニングは、空乏ゾーンのキャリア密度がスレッショルド以下に落ちる時に生じ、その結果、光は空乏ゾーンでもはや発生されなくなる。その時、VCSELで生じた光線は、二重のガウス強度分布を呈する。比較的高いレーザ電流では、さらに別の空乏ゾーンが誘導放出ゾーンに現れることがあり、結果として、VCSELで生じた光線は多重のガウス強度分布を有することになる。該強度分布のため、単一のガウス強度分布を持つ光線が必要とされる用途には、VCSELは適応できなくなる。

【０００７】
VCSELが単一光線を発生し得る最大強度に及ぼす空間ホールバーニングの制限効果のため、VCSELはある種の用途には適応できなくなる。例えば、磁気光ディスク上への書込みに適するレーザは、約30 mWの出力を有する単一光線を発生する必要があるのに、既知VCSELで発生させ得る単一光線の最高出力は、1-2 mWの範囲である。

【０００８】
【発明が解決しようとする課題】
従って、VCSELを基礎とした光通信システムのビット伝送速度を高めるために、及びレーザプリンタのVCSELの光出力を変調できる速度を上げるために、そしてVCSELの光出力を高速で変調する必要のあるその他の応用に使えるようにするために、ジッタの広がりを低減

したVCSELが必要とされるのである。また、高い強度を有する単一光線が必要となる用途に使えるようにするために、空間ホールバーニングの開始が、既知VCSELと較べて実質的に高い光強度で生ずるVCSELが要求される。

【０００９】

【課題を解決するための手段】

上述した目的に応ずるため、本発明は、ターンオン・ジッタが低減されかつ空間ホールバーニングが低減された垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)の作製方法を提供するものである。該方法では、第一の伝導モードを有する、ドーピングされた半導体材料の層を堆積して第一の鏡面層を形成する。その第一の鏡面層上に半導体材料の層を堆積して活性層を形成する。活性層を形成するために半導体材料の層を堆積する際、量子井戸領域を形成する。また、拡散増強領域(diffusion enhancing region)は、拡散増強領域によって量子井戸領域に誘発される正孔が量子井戸領域の電子を約１桁上回るような高濃度のアクセプタ不純物で活性層の半導体材料をドーピングして形成する。最後に、第二の伝導モードを有する、ドーピングされた半導体材料の層を活性層上に堆積して第二の鏡面層を形成する。

【００１０】

拡散増強領域によって、量子井戸領域のキャリアの拡散速度が５～２５倍に高められる。このため、キャリアは量子井戸領域内部へ急速に拡散することができるようになる。拡散増強領域は、レーザ電流がスイッチオフされると、そうでなければ量子井戸領域の誘導放出ゾーンを囲む環状領域に蓄積したであろうキャリアを誘導放出ゾーン中へ速やかに拡散させる。これによってレーザのターンオン時間のレーザのオフ時間への依存性が軽減され、従って、ジッタの広がりが低減される。拡散増強領域はまた、誘導放出による光の発生で生ずる空乏ゾーン中へ量子井戸領域の比較的高いキャリア濃度ゾーンからキャリアを拡散させ、このため、空間ホールバーニング発生の可能性が軽減される。

【００１１】

拡散増強領域を形成する際、活性層の領域を量子井戸領域の外部に形成している間だけ、活性層の半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングしてよい。あるいは、量子井戸領域を囲む活性層の領域を堆積している間、活性層の半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングしてもよい。しかし、好適には、拡散増強領域は、活性層におけるデルタドープ領域(delta-doped region)である。

【００１２】

拡散増強領域を形成する際、量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が$10^{19}cm^{-3}$を越えるよう、活性層の半導体材料をシート密度(sheet dennsity)$P_{dope,sheet}$のアクセプタ不純物でドーピングすることにより拡散増強領域を形成する。拡散増強領域におけるアクセプタ不純物のシート密度$P_{dope,sheet}$は、ほぼP' t_{QW}であり、ここでt_{QW}は、量子井戸領域における量子井戸の全厚さである。あるいは、拡散増強領域は、厚さt_{DER}をもって形成し、かつ量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が$10^{19}cm^{-3}$を越えるよう、アクセプタ不純物で濃度P_{dope}までドーピングしてよい。拡散増強領域におけるアクセプタ不純物の濃度P_{dope}は、式 P_{dope}＝ P' t_{QW}/t_{DER}により量子井戸領域における正孔の密度P'、量子井戸領域の厚さt_{QW}及び拡散増強領域の厚さt_{DER}に依存する。

【００１３】

本発明はまた、ターンオン・ジッタが低減されかつ空間ホールバーニングが低減された垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)も提供する。該レーザは、第一の鏡面層、量子井戸領域と拡散増強領域を含む活性層、及び第二の鏡面層から成る。第一の鏡面層は、第一の伝導モードを有する、ドーピングされた半導体材料の層である。活性層は、第一の鏡面層に隣接した半導体材料の層である。第二の鏡面層は、活性層に隣接しかつ第一の鏡面層から離れており、そして拡散増強領域は、第二の伝導モードを有する、ドーピングされた半導体材料の層である。拡散増強領域は、拡散増強領域によって量子井戸領域に誘発される正孔が量子井戸領域の電子を約１桁上回るような高濃度に活性層の半導体材料がそこでアクセプタ不純物でドーピングされる活性層の領域である。

【００１４】
拡散増強領域は、活性層における量子井戸領域の外部に配置してよい。あるいは、拡散増強領域は、活性層における量子井戸領域を包含してもよい。しかし、好適には、拡散増強領域は、活性層におけるデルタドープ領域である。
【００１５】
拡散増強領域の半導体材料は、量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が$10^{19}cm^{-3}$を越えるよう、シート密度$P_{dope,sheet}$のアクセプタ不純物でドーピングしてよい。アクセプタ不純物のシート密度$P_{dope,sheet}$は、ほぼP' t_{QW}であり、ここでt_{QW}は、量子井戸領域における量子井戸の全厚さである。
【００１６】
あるいは、拡散増強領域における半導体材料は、量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が$10^{19}cm^{-3}$を越えるよう、濃度P_{dope}のアクセプタ不純物でドーピングしてもよい。アクセプタ不純物の濃度P_{dope}は、式 P_{dope}＝ P' t_{QW}/t_{DER}により量子井戸領域における正孔密度P'、量子井戸領域の厚さt_{QW}及び拡散増強領域の厚さt_{DER}に依存する。
【００１７】
【実施例】
本発明は、少ないジッタの広がりを有しかつ空間ホールバーニングの開始が既知VCSELと較べ高い光強度で起こるVCSELを提供するものである。本発明によるVCSELでは、活性層は、拡散増強領域を含むよう形成される。拡散増強領域は、アクセプタ不純物で密にドーピングされた半導体材料の層である。拡散増強領域は、量子井戸領域に隣接するか、又は量子井戸領域内部か、又は量子井戸領域を囲む活性層に配置される。拡散増強領域は、量子井戸領域において極めて高密度の正孔を含む。量子井戸領域における正孔が高密度のため、量子井戸領域におけるキャリアの両極性(ambipolar)拡散速度が著しく増大する。量子井戸領域におけるキャリアの両極性拡散速度が増大すれば、キャリアは急速に量子井戸領域に拡散でき、このため、VCSELのジッタの広がりが著しく低減され、かつ空間ホールバーニングの開始以前に発生し得る最大光強度が増強される。
【００１８】
本発明によるVCSELの好適な実施例11を図2Aに示す。図2Aは、活性層13の誘導放出ゾーン37、及びコアゾーン29の一部を含むVCSELの部分断面図である。活性層は、下部鏡面層15上にエピタキシー成長させる。上部鏡面層17は、活性層上にエピタキシー成長させる。図面を簡略化するため、活性層に隣接する下部鏡面層の上方部分と活性層に隣接する上部鏡面層の下方部分だけを示す。下部鏡面層と上部鏡面層とは、逆の伝導モードを持つようドーピングする。例えば、下部鏡面層は、好適には、ドナー不純物でドーピングし(n型）、上部鏡面層は、好適には、アクセプタ不純物でドーピングする(p型）。
【００１９】
上部鏡面層17は、陽子注入ゾーン27を含み、これがコアゾーン29を規定し取り囲む。陽子注入ゾーンは上部鏡面層を通って流れるレーザ電流をコアゾーンに限定する。レーザ電流は、上部鏡面層の上面に形成された電極から、下部鏡面層15が堆積される基板の底面上に形成された電極へ流れる。活性層近辺のVCSELの構造をより明解に示すことができるよう、電極、基板、及び上部鏡面層の上面は図2Aには示されていない。
【００２０】
活性層13は、λｎの整数倍の厚さであり、ここでλｎは、量子井戸領域19で生じた光の活性層材料中の波長である。活性層の好適な厚さは、λｎである。活性層は、下部鏡面層15と上部鏡面層17との間にサンドイッチ状に挟まれる。活性層は、下部クラッド領域31、上部クラッド領域32及び量子井戸領域19を包含している。クラッド領域の厚さは、量子井戸領域が下部鏡面層と上部鏡面層の中間に位置するような厚さである。量子井戸領域の構造の詳細は、図面を簡略化するため図2Aからは省かれているが、図2Cに示しかつ以下により詳細に記述する。
【００２１】

光は、誘導放出により量子井戸領域19の誘導放出ゾーン37で発生する。誘導放出ゾーンの横方向の範囲は、上部鏡面層17のコアゾーン29の横方向の範囲で限定されており、線39で表示してある。

【００２２】

本発明によるVCSELの第一の実施例11の活性層13は、拡散増強領域41を包含するよう形成する。好適な実施例では、拡散増強領域は、量子井戸領域19の外部の活性層に位置するデルタドープ領域である。拡散増強領域は、好適には、上部鏡面層17と量子井戸領域の間の上部クラッド領域32において量子井戸領域から数百オングストローム以内に配置する。

【００２３】

拡散増強領域41は、高濃度のアクセプタ不純物でドーピングする。拡散増強領域の実際のドーピングの程度は、量子井戸領域で誘発されるべき正孔密度と量子井戸領域及び拡散増強領域間の厚さとに依存する。活性層がIII-V族の半導体の層である時、拡散増強領域に対する好適なドーピング材料は炭素である。III-V族の半導体のうちアクセプタ不純物として作用する他の元素も用いることができる。特に、マグネシウム、ベリリウム、亜鉛のようなII族の元素は、拡散増強領域をドーピングするのに用いてよい。

【００２４】

前述したように、好適な実施例では、拡散増強領域41は、活性層13の上部クラッド領域32において量子井戸領域19から数百オングストローム以内にあるデルタドープ領域である。該デルタドープ領域は、量子井戸領域において所要の正孔密度を誘発するだけの十分な高さのシートドーピング密度を実現できるよう十分な量のアクセプタ不純物を上部クラッド領域の単原子層に注入することにより形成する。適切なシートドーピング密度は、$10^{13}cm^{-2}$のオーダーであり、これは、それらが単原子層の約0.1%と約1%の間の原子を構成するような濃度で注入される不純物原子に相当する。所要のシート密度を定める方法を以下に詳説する。

【００２５】

拡散増強領域41のアクセプタは、量子井戸領域19における対応正孔を誘導する。拡散増強領域におけるアクセプタのドーピングのレベルは非常に高いので、量子井戸領域で誘発される正孔の密度は、そこの電子の密度より約1桁大きい。そのような高密度の正孔は、正孔の拡散により量子井戸領域の電子の拡散を緩和する。電子と正孔の両方に関係する有効拡散レートを考慮する両極性拡散速度は、正孔拡散速度にほぼ同等の値から電子拡散速度に近い値に増大する。電子拡散速度は、代表的半導体材料では正孔拡散速度の10倍から50倍の間である。

【００２６】

量子井戸領域におけるキャリアの両極性拡散速度を高めることは、２つの有益な効果を生む。先ず、ジッタの広がりが低減する。高い両極性拡散速度によって誘導放出ゾーン37を囲む活性層のゾーンに蓄積するキャリアの影響力が低減される。そうでなければ該ゾーンに蓄積したであろうキャリアは、横方向に誘導放出ゾーン中に拡散することができる。次に、空間ホールバーニングの開始以前に発生し得る単一光線の強度は強くなる、何故なら高い両極性拡散速度によってキャリアが横方向に拡散して誘導放出ゾーン37の中央の空乏ゾーンにおけるキャリア供給量を補充できるからである。このため、空乏ゾーンのキャリア密度がスレッショルドレベル以下に降下することはなく、誘導放出ゾーン全域で光の発生が維持されるのである。

【００２７】

これより本発明によるVCSELの好適な実施例をさらに詳細に説明する。下部鏡面層15と上部鏡面層17は、それぞれ、好適には、多対の鏡面要素から成る分散型ブラッグ反射器である。例えば、下部鏡面層は32.5対の鏡面要素から構成されることがあり、上部鏡面層は20対の鏡面要素から構成されることもある。図面を簡単にするため、活性層13にすぐ隣接する下部鏡面層における鏡面要素対21だけを示す。鏡面要素の各対は、高屈折率の鏡面要素と低屈折率の鏡面要素とから成る。鏡面要素対21は、例えば、鏡面要素23と25から成る。鏡面要素の各対では、２つの鏡面要素は、異なった屈折率を有する異なった半導体材料の

層である。例えば、高屈折率の鏡面要素はAlGaAsの層であってよいし、低屈折率の鏡面要素はAlAsの層であってよい。あるいは、AlAsとGaAsの層、又は当分野で周知の他の適当な材料の対から成る層を用いることもできる。鏡面要素は、好適には、当分野で知られているように、隣接鏡面要素間の界面前後の電気抵抗とバンドオフセットを低減できるよう構成する。例えば、グレーデッド（傾斜）遷移(graded transition)が隣接した鏡面要素の材料間で行われたり、又はグレーデッド短周期超格子(graded short period super lattice)が隣接鏡面要素間で形成されることもある。各鏡面要素は、λｎ/4という厚さを有し、ここでλｎは、量子井戸領域19で生じた光に関する鏡面要素の半導体材料中の波長である。

【００２８】

陽子注入ゾーン27は、活性層13から離れた上部鏡面層の表面（非表示）から上部鏡面層17中へ延びるが、上部鏡面層中を活性層の所までは延びない。陽子注入ゾーンの導電率は、それが取り囲んでいるコアゾーン29のそれより小さい。この導電率の差によって上部鏡面層中を流れるレーザ電流をコアゾーンに限定するのである。陽子注入ゾーンの最深部と活性層間の領域33では、レーザ電流は、陽子注入ゾーンによって規定された閉じ込め状態から横方向に広がる。故に、活性層の量子井戸領域19中へ流れるレーザ電流は、量子井戸領域の誘導放出ゾーン37に、即ち、上部鏡面層のコアゾーンの下にある量子井戸領域の部分に、限定されない。

【００２９】

活性層13は、量子井戸領域19で生じた光を透過する半導体材料の層である。例えば、活性層は、AlGaAsの層であってよい。拡散増強領域41の外側では、活性層は、ドーピングしないか、もしくは等しい濃度のドナー及びアクセプタ不純物でドーピングする。あるいは、活性層の下部クラッド層31は、下部鏡面層15におけるドナー不純物とほぼ同じ濃度のドナー不純物でドーピングしてもよく、かつ上部クラッド層32は、上部鏡面層17におけるアクセプタ不純物とほぼ同じ濃度のアクセプタ不純物でドーピングしてもよい。

【００３０】

量子井戸領域19は、好適には、３ないし５層の量子井戸から成る。図2Cは、３層の量子井戸を有する量子井戸領域の一例を示す。量子井戸51は下部クラッド領域31に隣接して配置され、障壁層55によって量子井戸53から分離されている。量子井戸57は上部クラッド領域32に隣接して配置され、障壁層59によって量子井戸53から分離されている。各量子井戸は、好適には、ガリウム砒素(GaAs)の層であり、各障壁層は、好適には、AlGaAsの層である。各量子井戸は、好適には、約80Åの厚さである。

【００３１】

本発明によるVCSELの好適な実施例11は、分子線エピタキシー法(MBE)又は有機金属気相成長法(MOCVD)のような技術によって、適当な基板（非表示）上に下部鏡面層15を成長させることにより作られる。半導体材料の薄い層を順番に成長させるこれらの技術は、当分野で周知である。下部鏡面層15を成長させている間に、ドナー(n型)不純物を、交互に堆積される半導体材料に一連の流れの中で注入し下部鏡面層を形成する。このように、下部鏡面層は、n型にドーピングされる。

【００３２】

次いで、例えば、AlGaAsの層をMBE又はMOCVDにより下部鏡面層上に堆積させて下部鏡面層に隣接する活性層13の下部クラッド領域31を形成する。下部クラッド領域を形成するには堆積材料に不純物を注入しない。あるいは、等濃度のドナー及びアクセプタ不純物を堆積材料に注入して下部クラッド領域を形成してもよい。さらに別法として、下部クラッド領域は、下部鏡面層におけるそれと同様の濃度のn型不純物を用い、下部クラッド領域の厚さが増すにつれその濃度を減らすようにして、ドーピングしてもよい。

【００３３】

下部クラッド領域31がその所要の厚さに到達し終わった後、半導体材料の多層薄膜層を下部クラッド領域上に堆積させて量子井戸領域19を形成する。量子井戸領域が形成され終わった後、さらに半導体材料を量子井戸領域上に堆積させて上部クラッド領域32を形成する

。上部クラッド領域を形成するには堆積材料に不純物を注入しない。あるいは、等濃度のドナー及びアクセプタ不純物を堆積材料に注入して上部クラッド領域を形成してもよい。さらに別法として、上部クラッド領域は、上部鏡面層17で用いられるそれと同様の濃度まで漸次増加する濃度のp型不純物を用いてドーピングしてもよい。

【００３４】

拡散増強領域41は、上部クラッド層の厚さが数百オングストローム未満の時に上部クラッド領域32を形成するべく堆積される半導体材料の一連のプロセスの流れを中断することにより、そして部分的に形成された上部クラッド領域の表面上にアクセプタ不純物原子を堆積させることにより、形成する。炭素原子は、四臭化炭素 CBr_4 を気化し、その蒸気を部分的に形成された上部クラッド領域と接触させることにより、アクセプタ不純物として堆積される。部分的に形成された上部クラッド領域と接触すると、四臭化炭素が分離し、その結果生ずる炭素原子が、アクセプタ不純物として、部分的に形成された上部クラッド領域の半導体材料の格子上に堆積される。拡散増強領域を構成するアクセプタ不純物原子が部分的に形成された上部クラッド領域上に堆積され終わった後、上部クラッド領域を形成する半導体材料の堆積操作が再開される。

【００３５】

活性層13がλｎという所要全厚を有するような厚さに上部クラッド領域32が到達すると、上部鏡面層17を形成するべく材料を堆積させる工程が開始される。上部鏡面層を形成するべく材料を堆積している間に、上部鏡面層を形成するべく交互に堆積される半導体材料のプロセスの一連の流れの中でアクセプタ不純物を注入する。これによって上部鏡面層の半導体材料がp型にドーピングされる。上部鏡面層を形成するべく堆積される半導体材料に注入されるアクセプタ不純物の濃度は、実質的には、拡散増強領域41におけるそれより低い。

【００３６】

図2Bは、本発明によるVCSELの好適な実施例11についての図2Aの線2B-2Bに沿うドーピング分布を示す。図2Bのy-軸のスケールは、図2Aの垂直スケールに一致する。図2Bは、下部鏡面層15が中程度乃至高濃度のドナー不純物でドーピングされていることを示す。下部鏡面層と活性層13間の境界では、アクセプタ不純物の濃度は急激に減少してドナー不純物の濃度とほぼ同等である。ドナー不純物の濃度は、拡散増強領域41における以外、活性層全域でアクセプタ不純物の濃度と実質的に同等に保持される。拡散増強領域41では、アクセプタ不純物の濃度は、下部鏡面層におけるドナー不純物の及び上部鏡面層17におけるアクセプタ不純物の濃度より約10倍高い値まで急激に増加する。活性層と上部鏡面層間の境界では、アクセプタ不純物の濃度は、下部鏡面層におけるドナー不純物のそれとほぼ同等の値まで急激に増加する。アクセプタ不純物の濃度は、上部鏡面層全域でこのレベルに保持される。

【００３７】

上述のように、拡散増強領域41は、活性層13のどこに位置するデルタドープ領域であってよい。しかし、拡散増強領域は、量子井戸領域19から100オングストローム以内の活性層にある時が最も効果的である。図2Aに示した好適な実施例では、拡散増強領域は、量子井戸領域19から数百オングストローム以内の活性層13の上部クラッド領域32に位置するデルタドープ領域である。

【００３８】

図2C-2Fは、拡散増強領域41の代替配置と構成を示す。拡散増強領域は、量子井戸領域19の障壁層の１つに配置されたデルタドープ領域であってよい。図2Cは、量子井戸領域19を含む活性層13の部分を示す。量子井戸領域では、量子井戸51は下部クラッド領域31に隣接して配置され、障壁層55によって量子井戸53から分離されている。量子井戸57は上部クラッド領域32に隣接して配置され、障壁層59によって量子井戸53から切り離されている。図2Cに示した代替例では、拡散増強領域41は、量子井戸19の中で、量子井戸層51、53、及び59の外側に位置するデルタドープ領域である。拡散増強領域は、障壁層59に位置するように示されているが、その代わりに、障壁層55に配置されてもよい。

【００３９】
好適な実施例では、拡散増強領域41は、量子井戸領域と上部鏡面層17の間の活性層13に位置するデルタドープ領域である。しかし、図2Dに示すように、拡散増強領域は、量子井戸領域と下部鏡面層の間の活性層13の下部クラッド層31に位置するデルタドープ領域であってよい。再度記述するが、拡散増強領域は、量子井戸領域から数百オングストローム以内にある時が最も効果的である。
【００４０】
上述のデルタドープ領域より厚い層を拡散増強領域41として代わりに用いることもできる。図2Eは、上部クラッド領域32、活性領域19及び下部クラッド領域31の一部分がアクセプタ不純物で密にドーピングされて拡散増強領域を形成する場合の活性層13の一部を示す。拡散増強領域は、上部クラッド領域の全体を通り下部クラッド領域の途中まで延び、量子井戸領域を囲むように示されている。あるいは、拡散増強領域は、下部クラッド領域中の途中から上部クラッド領域中の途中まで延びて、量子井戸領域を包含するようにしてもよい。以下にさらに詳細に記述するように、図2Eに示すバルクドープ拡散増強領域のアクセプタ不純物のシート密度は、実質的には、図2A-2Cに示すデルタドープ拡散増強領域におけるそれより低い。
【００４１】
図2Fは、上部クラッド領域32の部分だけをアクセプタ不純物で密にドーピングして拡散増強領域41を形成する場合の変形を示す。上部クラッド領域が数百オングストローム未満の厚さである時には、そこから高濃度のアクセプタ不純物を堆積材料に添加して上部クラッド領域を形成する。拡散増強領域は、図示したように、上部鏡面層17の所まで延びるか、又は上部鏡面層への途中まで延びてよい。以下に詳細に述べるように、図2Fにおける拡散増強領域の厚さを図2Eの拡散増強領域のそれに較べて薄くするには、量子井戸領域19に同一の正孔密度を誘発できるよう前者の不純物密度が後者のそれより大きい必要がある。
【００４２】
次ぎに、ターンオン・ジッタと空間ホールバーニングの発生メカニズムを示す、在来型VCSELの動作についての発明者の解析を図3Aを参照して説明する。図3Aは、図2Aに示した本発明によるVCSELの好適な実施例と類似した在来型VCSELの部分200を示す。図3Aに示した在来型VCSELは、その活性層に拡散増強領域を欠失していることを除けば、図2Aに示した実施例と同様の構造を有している。好適な実施例の構成要素に対応する図3Aに示したVCSELのそれらは、図2Aにおけるのと同じ参照番号を使って表示し、ここでは詳細に説明しない。図2Aに示した代表的な鏡面要素の対は、図面を簡略化するため図3Aからは省く。
【００４３】
矢印43で示したレーザ電流は、上部鏡面層17の上側表面上に形成された電極から下部鏡面層15が堆積される基板の底面表面上に形成された電極の方へ流れる。それらの電極、基板、及び上部鏡面層の上面は、図面を簡略化するため図3Aには示さない。上部鏡面層のコアゾーン29とそれを取り囲む陽子注入ゾーン27との間に導電率の差があるため、上部鏡面層中のレーザ電流の流れは、横方向にはコアゾーンに限定される。
【００４４】
陽子注入ゾーン27も、上部鏡面層17におけるより精度は落ちるが、活性層213の量子井戸領域219中のレーザ電流の流れ43の横方向の広がりを限定する。陽子注入で生ずる結晶構造の崩壊のため、陽子注入領域は、活性層の所まで拡張しないように上部鏡面層に配置される。キャリアは、陽子注入ゾーンのよって規定された限定範囲を越えて陽子注入ゾーンの最深部と活性層間の領域33で横方向に広がる。
【００４５】
活性層の量子井戸領域219に入るキャリアは、誘導放出で光を発生する。しかし、誘導放出による光の発生は、上部鏡面領域17のコアゾーン29の下にある量子井戸領域219の一部分である、誘導放出ゾーン37においてのみ生ずる。レーザ電流の横方向の広がりとは、誘導放出ゾーンを取り囲みかつ上部鏡面領域の陽子注入ゾーン27の下にある蓄積ゾーン(reservoir zone)にキャリアのいくつかが入ることを指す。蓄積ゾーンに入るキャリアは、誘

導放出によって光を発生しない、何故なら陽子注入ゾーンの反射率が低いため誘導放出が起こるほど十分な光学利得が得られないからである。蓄積ゾーンに入るキャリアは、誘導放出によって光を発生することで消滅することはない。さらに、在来型VCSEL 200は、活性層213に拡散増強領域を欠いている故、量子井戸領域におけるキャリアの拡散速度は比較的低く、かつ蓄積ゾーンに入るキャリアは、誘導放出ゾーン中へ徐々に拡散するに過ぎない。結果として、レーザ電流が流れると、キャリアが蓄積ゾーンに蓄積することになる。蓄積ゾーンに蓄積するキャリアの密度は、図3Bに示すように、限界密度を越えるおそれもある。

【００４６】

蓄積ゾーン35に蓄積するキャリアの在来型VCSEL 200のターンオン遅延に及ぼす影響についての発明者の解析を次に述べる。単一モード陽子注入VCSELのターンオン過程は、最も標準的なキャリアと陽子のレート方程式に類似した一組の単一モードレート方程式を使って想定してよい。L.A.ColdrenとS.W.Corzineは、DIODE LASERS AND PHOTONIC INTEGRATED CIRCUITS, Wiley Interscience, New York (1995)の第5章に前述の方程式を記述している。しかし、発明者は、誘導放出ゾーン37を囲む蓄積ゾーン35におけるキャリアの効果を考慮に入れるべく２つのキャリア成分を含むようにその方程式を修正した。第一の成分は、キャリアの密度が限界密度に近づくと誘導放出によって光を発生する誘導放出ゾーンのキャリアを表す。第一成分は、標準のレート方程式で記述される。第二成分は、誘導放出ゾーンを囲む蓄積ゾーンにあるキャリアを表す。上述のように、キャリアは、陽子注入領域27によるレーザ電流43の横方向の限定の不完全さに起因するレーザ電流の横方向への拡張により、蓄積ゾーンに入る。蓄積ゾーンに入るキャリアは、誘導光子放出に荷担できず、かつ、それらの低拡散速度のため、蓄積ゾーンから外へ徐々に拡散するだけである。それ故、それらは蓄積ゾーンに蓄積することになる。そのレート方程式を次に示す、

$$dN_1/dt = (1-\alpha)\,\eta I/qV_1 - (R_{sp1}+R_{nr1}) - v_g g N_p - (N_1-N_2)/\tau_d$$

$$dN_p/dt = (\Gamma v_g g - 1/\tau_p)\,N_p + \Gamma R_{sp}$$

$$dN_2/dt = \alpha\eta I/qV_2 - (R_{sp2}+R_{nr2}) + V_1(N_1-N_2)/V_2\tau_d$$

ここで、

N_1とN_2は、それぞれ、誘導放出ゾーンと蓄積ゾーンにおけるキャリア密度、

V_1とV_2は、それぞれ、誘導放出ゾーンと蓄積ゾーンの容積、

Ｉは、レーザ電流、

αは、蓄積ゾーンへ入るレーザ電流Ｉの割合であり

αは、次式によってV_1とV_2と関係付けられる、

$V_2 = \alpha V_1/(1-\alpha)$

N_pは、平均光子密度、

τ_pは、光子の寿命、

ｇは、材料利得、

V_gは、群速度、

Γは、定在波強調（standing wave enhancement）を含む三次元限定因子、

ηは、（誘導放出ゾーンと蓄積ゾーンの両方で等しいと仮定した）垂直注入効率、

R_{sp}は、自然放出レート、

R_{nr}は、Auger再結合を含む非発光再結合であり、かつレーザ放射モードへの自然放出レート、

τ_dは、拡散時間である。

【００４７】

誘導放出ゾーンと蓄積ゾーンの間の結合項は、拡散時間、τｄを含む。この項は、１つのゾーンから他へのキャリアの拡散速度を特性付けるものである。拡散時間は、

$\tau_d = L^2 / 2D_{np}$

で表してよく、

ここで、

D_{np}は、電子と正孔の両方の拡散を表す両極性拡散定数であり、

Ｌは、２ゾーン間の特性拡散長である。

【００４８】

拡散時間の正確な計算には、キャリア及び光子密度の両方の空間依存性を含まなければならないであろう。しかし、この解析では、上に説明したように計算した拡散時間は、蓄積ゾーンと誘導放出ゾーンの間のキャリアの拡散効果を予測するのに十分使えるだけの精度がある。典型的拡散長として5μｍを、典型的両極性拡散定数として$10 cm^2 s^{-1}$を選ぶことにより、典型的拡散時間τｄとして10 nsのオーダーが与えられる。

【００４９】

図4は、上述の発明者のモデルから得たもので、ジッタの広がりに及ぼすキャリアの拡散時間定数の効果を示す。ジッタの広がりは、図1Aのカーブ A及びBの条件下で得られた最大及び最小ターンオン時間の間の変動分である。ジッタの広がりは、レーザ電流からのキャリアが誘導放出ゾーン37の外部の蓄積ゾーン35に蓄積するために生ずる。蓄積ゾーンにおけるキャリアの累積は、レーザ電流がスイッチオフされた後の、誘導放出ゾーン中へ拡散するキャリアの一時的供給源として作用する。誘導放出ゾーン中へ拡散するキャリアによって、誘導放出ゾーン中のキャリア密度がゼロまで急激に降下するのが防止される。それどころか、拡散キャリアは、レーザ電流がスイッチオフされた後短時間の間、誘導放出ゾーンのキャリア密度を維持するのである。結果として、レーザ電流が短時間スイッチオフされると、図1Aのカーブ Bにおけるように、誘導放出ゾーンにおけるキャリア密度は、キャリアの拡散が無かった場合に得られる値より高くなる。これは、キャリア密度を限界水準まで回復させるのに比較的少ないキャリアがレーザ電流によって誘導放出ゾーンに注入されればよいので、通常より短いターンオン時間になる。

【００５０】

他方、レーザ電流が、図1Aにおけるように連続する長い0値が1に先行する時のような、比較的長い時間スイッチオフされると、キャリアが蓄積ゾーンから誘導放出ゾーンへ拡散し、その後誘導放出ゾーンにおけるキャリアの密度が低い値になるのに十分な時間が経過する。レーザ電流が再度スイッチオンされる時、キャリア密度をこの低水準から限界水準まで持ち上げるのに十分なキャリアがレーザ電流によって誘導放出ゾーンに注入されなければならない。これには、誘導放出ゾーンのキャリア密度が蓄積ゾーンから拡散するキャリアによって維持される時より長い時間を要する。このように、ターンオン遅延は、レーザ電流のオフ時間により変化する。最大のターンオン時間は、ターンオンの前に長いオフ時間、即ち、5ビットの時間に対応するオフ時間がある時に得られる。最小のターンオン時間は、ターンオンの前に短いオフ時間、即ち、1ビットの時間に対応するオフ時間がある時に得られる。

【００５１】

図4において、各カーブは、蓄積ゾーンと誘導放出ゾーン間の拡散時間τｄに応じてジッタの広がりがどのように変化するかを示すものである。３つのカーブを示す。各カーブは蓄積ゾーンに入るレーザ電流の様々な割合についてプロットされている。図4はレーザ電流の大部分が蓄積ゾーンに入る時にジッタの広がりが増大すること、及びビットレートに関して一定の範囲にある拡散時間ではジッタの広がりが2倍以上に大きくなることを示している。

【００５２】

図4はまた、拡散時間τｄが非常に小さいか又は非常に大きい時に、ジッタの広がりは、キャリアの溜めからのキャリアの拡散が無い場合に対応する値まで減少する、ということも示している。拡散時間が非常に小さい時、キャリアは、蓄積ゾーンから誘導放出ゾーン

へ速やかに拡散し、そして２つのゾーンにおけるキャリア密度が速やかに平衡状態に達する。このように、拡散時間を極めて小さい値まで減らせば、蓄積ゾーンに蓄積するキャリアで引き起こされるジッタの広がりが実質的に低減される。他方、極めて大きい拡散時間では、キャリアは２つのゾーン間で非常に緩慢に拡散するようになり、その結果、蓄積ゾーンは、レーザ電流がターンオフされた後、誘導放出ゾーンのキャリア密度を十分維持できるほど速やかに誘導放出ゾーンへキャリアを供給できなくなる。それ故、拡散時間τｄが非常に小さいか又は非常に大きいかの何れかである時は、蓄積ゾーンからのキャリアの拡散は、顕著なジッタの広がりの原因にはならない。拡散時間がキャリアの寿命にほぼ近い時に最大のジッタの広がりが生ずる。

【００５３】

上述のように、蓄積ゾーンと誘導放出ゾーン間の拡散時間τ_dは、次式

$\tau_d = L^2 / 2D_{np}$

によって、両極性拡散定数D_{np}及び蓄積ゾーンと誘導放出ゾーン間の特性拡散長Lに関連する。両極性拡散定数D_{np}は、次式、

$D_{np} = (N + P) / (N / D_p + P / D_n)$

によって、電子密度Ｎ、電子拡散定数D_n、正孔密度Ｐ及び正孔拡散定数D_pに関連する。

【００５４】

図3Aに示す在来型のVCSELは、拡散増強領域を欠いている。従って、量子井戸領域219における電子密度は正孔密度に等しい、即ち、Ｐ＝Ｎ、それ故、両極性拡散定数は、

$D_{np} = 2D_nD_p / (D_n + D_p)$

となる。電子拡散定数D_nと正孔拡散定数D_pは、それぞれ、電子移動度μ_nと正孔移動度μ_pに比例すると、即ち

$D_n / D_p = \mu_n / \mu_p$

と仮定することができる。典型的量子井戸領域の材料に関して、電子移動度μｎは、正孔移動度μｐの10-50倍の範囲にある。結果として、

$D_n >> D_p$ 、及び

$D_{np} \quad 2D_p$（在来型VCSELの場合）となる。

このように、在来型VCSEL量子井戸領域219においては、両極性拡散定数は、正孔拡散定数のそれの約２倍であり、かつ電子拡散定数の1/5～1/25の範囲にある。

【００５５】

これより、図5Aと5Bを参照し、本発明によるVCSELの好適な実施例11を例として使って、本発明によるVCSELにおいてジッタの広がりと空間ホールバーニングを低減する際の拡散増強領域の作用を説明する。図5Aは、本発明によるVCSELの好適な実施例を例証例として示すものである。本発明によるVCSEL 11では、拡散増強領域は、拡散時間τｄを縮めることによってジッタの広がりを減じかつ空間ホールバーニングを抑えている。

【００５６】

VCSEL 11の上部鏡面層17中のレーザ電流の流れを矢印43で表す。レーザ電流の流れは、図3Aに示した在来型VCSELにおけるそれと類似している。上部鏡面層のコアゾーン29とそれを取り囲む陽子注入ゾーン27との間に導電率の差があるため、上部鏡面層中のレーザ電流の流れは、横方向にコアゾーンまでに限定される。陽子注入ゾーン27も、上部鏡面層17におけるより精度は落ちるが、活性層13の量子井戸領域19中のレーザ電流の流れ43の横方向の広がりを限定する。従って、ある割合のレーザ電流が、誘導放出ゾーン37を取り囲む蓄積ゾーン35の量子井戸領域に入る。蓄積ゾーンに入るキャリアは、光発生に荷担することによって減らされることはない。

【００５７】

本発明によるVCSELは、活性層13に拡散増強領域41を包含する。拡散増強領域は、アクセプタ不純物で密にドーピングされる。拡散増強領域における高濃度のアクセプタ不純物は、量子井戸領域に高密度の正孔を誘発する。結果として、量子井戸領域における正孔の密度は、電子の密度よりはるかに大きくなる、即ち、Ｐ＞＞Ｎ。正孔の密度が電子の密度よりはるかに大きくなると、量子井戸領域の両極性拡散定数は、

D_{np} D_n
となる。このように、本発明によるVCSELでは、電子密度に比して量子井戸領域における正孔の密度がはるかに大きいので、量子井戸領域の両極性拡散定数Ｄｎｐが電子拡散定数Ｄｎとほぼ同じ値になる。換言すれば、拡散増強領域は、在来型のVCSELに較べ拡散時間τｄを5～25倍短縮する。そのジッタの広がりが最大値に近いVCSELでは、拡散時間が5～25倍短縮されると、ジッタの広がりが顕著に低減されるに至る、ということを図4は示している。このため、次には、レーザ電流が変調される周波数を高くでき、又は変調周波数を変更しない場合には比較的単純な検出回路の使用が可能となる。

【００５８】

拡散増強領域41による拡散時間τｄの短縮により、キャリアは、量子井戸領域19の蓄積ゾーン35から誘導放出ゾーン37まで在来型のVCSELにおけるより速く拡散できるようになる。キャリアは、図5Aの矢印47で示されたように、蓄積ゾーンから誘導放出ゾーン中に拡散できるので、蓄積ゾーンに溜まっているキャリアの密度は減少する。その結果得られるキャリア密度の分布を図5Bに示す。

【００５９】

拡散時間の短縮は、レーザ電流がスイッチオンされている間の蓄積ゾーン35に溜まっているキャリアの最大密度を下げるのみならず、レーザ電流がスイッチオフされる時に蓄積ゾーンに残存しているキャリアが誘導放出ゾーン37中に拡散しそして誘導放出に加わるのに要する時間を短縮する。従って、誘導放出ゾーンにおけるキャリアの密度は、レーザ電流がスイッチオフされた後、在来型のVCSELにおけるより速く低い値に降下する。それ故、レーザ電流が再度スイッチオンされると、レーザ電流はキャリア密度をこの低値から常に引き上げなければならない。ターンオン時間のオフ時間への依存性は、それ故、軽減されるのである。

【００６０】

ジッタの広がりを低下させるのに加えて、本発明によるVCSELの拡散増強領域41によって量子井戸領域19においてもたらされたキャリアの拡散速度の増大は、VCSELが発生する単一光線の最大強度も高める。上述のように、低いレーザ電流では、誘導放出は、誘導放出ゾーン37全域で起こり、その最高強度はゾーン中央部で生ずる。誘導放出は、誘導放出ゾーンのキャリア密度を光の強度に比例して低下させる。結果として、キャリア密度の欠失は、誘導放出ゾーンの中央部で最大となる。在来型VCSELの誘導放出ゾーンの中央部におけるキャリア密度の欠失は、図3Bの破線61で表す。レーザ電流が増加するにつれて、誘導放出ゾーンの中央部におけるキャリア密度が、発光をしない臨界であるスレッショルド値以下に十分に低下する時に、空間ホールバーニングが起こる。

【００６１】

本発明によるVCSEL 11の活性層13の拡散増強領域41によって、キャリアが活性層で横方向に拡散する速度が高められる。拡散増強領域が上述の蓄積ゾーン35と誘導放出ゾーン37間のキャリアの拡散をスピードアップする情況と同じように、拡散増強領域により量子井戸領域に誘発されるキャリア拡散の高速化によって、キャリアは、光発生でキャリア密度が減じる時、誘導放出ゾーン中央部に拡散することが可能となる。このため、誘導放出ゾーン中央部におけるキャリア密度は、光発生が起こらない臨界密度より下に落ちることはない。従って、誘導放出による光発生によって、誘導放出ゾーン中央部のキャリア密度が減じると、キャリアは速やかに空乏ゾーン内部に拡散でき、ここでそれらは誘導放出による単一光線発生に荷担する。広面積の活性層からのキャリアが単一光線発生に荷担するので、その結果として、本発明によるVCSELの最大単一モード光出力は、拡散増強領域を欠いている在来型VCSELにおけるより大きくなるのである。

【００６２】

さらに、発明者が本発明のVCSELから予測していることは、大面積のVCSELでは、誘導放出ゾーン37においてより均一なキャリア分布を得ることに対する拡散増強領域41の効果がより均一なモード分布を生ずるであろうということ、及び該モードは、レーザ電流を増加するにつれてそれほど突発的には変化しないであろうということである。モードのより均一

な分布は、在来型VCSELの強度／レーザ電流特性におけるより途切れの少ない、より平滑な光強度／レーザ電流特性を生ずる。

【００６３】

また、発明者は本発明のVCSELから、拡散増強領域41は量子井戸領域19の微分利得を著しく増加させるであろう、ということも予測している。微分利得は、キャリア密度に関する利得の変分である。高い微分利得は、在来型VCSELに較べ本発明によるVCSELの緩和共振周波数を高めて、本発明によるVCSELをより高い変調速度で作動できるようにする。

【００６４】

最後に、本発明によるVCSELの拡散増強領域41におけるドーピングレベルを決定するプロセスを記述する。在来型VCSELの量子井戸領域における電子密度と正孔密度は、各々、臨界レーザ電流値において約$4 \times 10^{18}cm^{-3}$である。それ故、電子密度と正孔密度の積 PNは、約$1.6 \times 10^{37}cm^{-6}$となる。本発明によるVCSELでは、拡散増強領域41は、量子井戸領域19において誘発される正孔密度P'が電子密度N'より約１桁（約10倍）大きくなるように、アクセプタ不純物で密にドーピングしなければならない。この不均衡は、両極性拡散定数の有効増をもたらすためには拡散増強領域にとって必要とされるものである。また、本発明によるVCSELが在来型VCSELとほぼ同じ利得を有するためには、拡散増強領域は、量子井戸領域の電子密度と正孔密度の積 P'N'が在来型VCSELのPNの値とほぼ同等となるようにドーピングされなければならない。これらの要件は、例えば、量子井戸領域における正孔密度P'を電子密度N'の約10倍、即ち、

$$P' = 10N'$$

にすることによって、満足し得る。

また、

$$P'N' = 1.6 \times 10^{37}$$

N'に代入して

$$P' = 1.26 \times 10^{19}$$

を得る。

故に、量子井戸領域における対応電子密度N'は、

$$N' = (1.6 \times 10^{37}) / (1.26 \times 10^{19})$$
$$= 1.26 \times 10^{18}cm^{-3}$$

となる。

【００６５】

量子井戸領域19における正孔密度P'と電子密度N'に対するこの値の選択で、正孔密度P'が電子密度N'の10倍に設定される。キャリア密度におけるこの不均衡の次数は、両極性拡散定数Ｄｎｐを電子拡散定数Ｄｎに実質的に等しい値まで大きくするのには十分であり、その結果、特性拡散時間τｄは、電子拡散定数と正孔拡散定数の比の半分の率まで、即ち、５～25倍の範囲で、縮められることになる。この範囲の大きさまで拡散時間を減じれば、ジッタの広がりの実質的低減がもたらされることは、図4から分かることである。

【００６６】

拡散増強領域41は、量子井戸領域19において、拡散増強領域41の正孔のシート密度$P_{dope,sheet}$に実質的に等しい正孔のシート密度$P_{QW,sheet}$を誘発する。従って、拡散増強領域は、量子井戸領域において誘発される正孔のシート密度が正孔の所望バルク密度P'に対応するようなシート密度にアクセプタ不純物でドーピングされなければならない。量子井戸領域におけるシート密度$P_{QW,sheet}$は、量子井戸領域における正孔の所望バルク密度P'と、量子井戸領域における量子井戸の全厚t_{QW}との積に等しい、即ち、

$$P_{QW,sheet} = P' t_{QW}$$

【００６７】

上述のように、P'の値を1.26×10^{18}に設定し、全厚t_{QW}が250Åの量子井戸領域において３つの80Å厚の量子井戸を用いる場合、量子井戸領域において誘発されなければならないシート密度$P_{QW,sheet}$は、約、

$$P_{QW,sheet} = 1.26 \times 10^{18} \times 2.4 \times 10^{-6}$$

$3 \times 10^{13}cm^{-2}$
となる。
【００６８】
デルタドープ領域は、それらのシートドーピング密度で特色付けれれる。それ故、図2Aと2Cに示したような、デルタドープ拡散増強領域41を有する実施例では、拡散増強領域は、そのシートドーピング密度$P_{dope,sheet}$が量子井戸領域におけるシート密度$P_{QW,sheet}$に等しくなるように、即ち、
$P_{dope,sheet} = P_{QW,sheet}$ $3 \times 10^{13}cm^{-2}$
になるようにドーピングする。
【００６９】
図2Dと2Eに示したような、バルクドープ拡散増強領域41を有する実施例では、拡散増強領域はやはり、そのシートドーピング密度$P_{dope,sheet}$が量子井戸領域におけるシート密度$P_{QW,sheet}$に等しくなるように、即ち、約$3 \times 10^{13}cm^{-2}$までドーピングする。
【００７０】
拡散増強領域のシートドーピング密度$P_{dope,sheet}$は、拡散増強領域における所要バルクドーピング密度P_{dope}と、拡散増強領域の厚さt_{DER}との積に等しい。それ故、拡散増強領域の所要バルクドーピング密度P_{dope}は、
$P_{dope} = P' t_{QW}/t_{DER}$
又は
$P_{dope} = P_{dope,sheet}/t_{DER}$ $3 \times 10^{13}/t_{DER}$
で与えられる。
【００７１】
このように、量子井戸領域において与えられた正孔密度を誘発するために拡散増強領域において必要とされるバルクドーピング密度は、拡散増強領域の厚さに反比例する。
【００７２】
以上、本発明の実施例について詳述したが、以下、本発明の各実施態様の例を示す。
【００７３】
（実施態様１）ターンオン・ジッタを低減しかつ空間ホールバーニングを低減した垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)の製造方法において、以下の（ａ）ないし（ｃ）のステップを含むことを特徴とする方法、
（ａ）第一の鏡面層を形成するために第一の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層を堆積させるステップと、
（ｂ）活性層を形成するために前記第一の鏡面層の上に半導体材料の層を堆積させるステップであって、前記半導体材料の層を堆積させるステップは以下（ｂ－1）および（ｂ－2）のステップを含む、
（ｂ－1）量子井戸領域を形成するステップと、
（ｂ－２）拡散増強領域を形成するステップであって、前記拡散増強領域によって前記量子井戸領域に誘発される正孔がそこにある電子を約１桁上回るような高濃度に前記半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングして前記拡散増強領域を形成するステップ、
（ｃ）第二の鏡面層を形成するために第二伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層を前記活性層上に堆積させるステップ。
【００７４】
（実施態様２）実施態様1記載の製造方法であって、前記拡散増強領域を形成するステップにおいて、前記量子井戸領域の外側部に前記活性層の領域を堆積させている間だけ前記アクセプタ不純物を使って前記半導体材料をドーピングすることを特徴とする製造方法。
【００７５】
（実施態様３）実施態様1記載の製造方法であって、前記拡散増強領域を形成するステップにおいて、前記量子井戸領域を包含する前記活性層の領域を堆積させている間に前記アクセプタ不純物を使って前記半導体材料をドーピングすることを特徴とする製造方法。
【００７６】

（実施態様４）実施態様1記載の製造方法であって、前記拡散増強領域がデルタドープ領域であることを特徴とする製造方法。

【００７７】

（実施態様５）実施態様1ないし4に記載の製法であって、前記活性層として堆積される前記半導体材料がIII-V族の半導体材料であり、かつ前記アクセプタ不純物がII族の元素とIV族の元素から成る組から選択されることを特徴とする製造方法。

【００７８】

（実施態様６）実施態様1記載の製造方法であって、以下の（ａ）および（ｂ）を含むことを特徴とする方法、

（ａ）前記量子井戸領域を形成するステップにおいて、全厚t_{QW}を有する量子井戸が形成され、

（ｂ）前記拡散増強領域を形成するステップにおいて、前記拡散増強領域は、前記量子井戸領域における前記拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が$10^{19}cm^{-3}$を越えるようなシート密度$P_{dope,sheet}$の前記アクセプタ不純物で前記活性層の半導体材料をドーピングすることにより形成され、前記拡散増強領域における前記アクセプタ不純物の該シート密度$P_{dope,sheet}$がほぼP' t_{QW}である。

【００７９】

（実施態様７）実施態様1記載の製造方法であって、以下の（ａ）および（ｂ）を含むことを特徴とする方法、

（ａ）前記量子井戸領域を形成するステップにおいて、全厚t_{QW}を有する量子井戸が形成され、

（ｂ）前記拡散増強領域を形成するステップにおいて、前記拡散増強領域が厚さt_{DER}に形成され、かつ前記活性層の半導体材料は前記量子井戸領域における拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が$10^{19}cm^{-3}$を越えるような濃度P_{dope}の前記アクセプタ不純物でドーピングされ、該アクセプタ不純物の濃度P_{dope}は、前記量子井戸領域における正孔の密度P'、前記量子井戸領域の厚さ及び式P_{dope} = P' t_{QW}/t_{DER}による前記拡散増強領域の厚さに依存する。

【００８０】

（実施態様８）垂直共振器型面発光レーザ(VCSEL)であって、ターンオン・ジッタを低減しかつ空間ホールバーニングを低減し、以下の（ａ）ないし（ｃ）を含むことを特徴とする垂直共振器型面発光レーザ、

（ａ）第一の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の第一の鏡面層と、

（ｂ）第一鏡面層に隣接する半導体材料の活性層であって、以下（ｂ－１）および（ｂ－2）を含む活性層、

（ｂ－１）量子井戸領域と、

（ｂ－２）拡散増強領域であって、前記量子井戸領域に誘発される正孔がそこにある電子を約１桁上回るような高濃度に半導体材料をアクセプタ不純物でドーピングした拡散増強領域、

（ｃ）第二の鏡面層であって、前記活性層に隣接しかつ前記第一鏡面層から離れた層であって、第二の伝導モードを有するドーピングされた半導体材料の層である第二の鏡面層。

【００８１】

（実施態様９）実施態様8記載のレーザであって、前記拡散増強領域が前記活性層において前記量子井戸領域の外側部に配置されることを特徴とするレーザ。

【００８２】

（実施態様１０）実施態様8記載のレーザであって、前記拡散増強領域が前記活性層における前記量子井戸領域を包含することを特徴とするレーザ。

【００８３】

（実施態様１１）実施態様8記載のレーザであって、前記拡散増強領域が前記活性層におけるデルタドープ領域であることを特徴とするレーザ。

【００８４】

（実施態様１２）実施態様8ないし11に記載のレーザーであって、前記活性層の半導体材料がIII-V族の半導体材料であり、かつ前記アクセプタ不純物がII族の元素とIV族の元素から成る組から選択されることを特徴とするレーザ。

【００８５】

（実施態様１３）実施態様8に記載のレーザであって、以下の（ａ）および（ｂ）を含むことを特徴とするレーザ、

（ａ）前記量子井戸領域が全厚t_{QW}を有する量子井戸、

（ｂ）前記拡散増強領域において、前記量子井戸領域における前記拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が$10^{19}cm^{-3}$を越えるようなシート密度$P_{dope,sheet}$の前記アクセプタ不純物で前記活性層の半導体材料がドーピングされ、該アクセプタ不純物のシート密度$P_{dope,sheet}$がほぼ$P' t_{QW}$である。

【００８６】

（実施態様１４）実施態様８記載の製造方法であって、以下の（ａ）ないし（ｃ）を含むことを特徴とするレーザ、

（ａ）前記量子井戸領域が全厚t_{QW}を有する量子井戸、

（ｂ）厚さt_{DER}を有する前記拡散増強領域、

（ｃ）前記拡散増強領域であって、前記拡散増強領域において前記活性層の半導体材料は前記量子井戸領域における前記拡散増強領域で誘発される正孔の密度P'が$10^{19}cm^{-3}$を越えるような濃度P_{dope}の前記アクセプタ不純物でドーピングされ、該アクセプタ不純物の濃度P_{dope}は、前記量子井戸領域における正孔密度P'、前記量子井戸領域の厚さ及び式$P_{dope} = P' t_{QW}/t_{DER}$による前記拡散増強領域の厚さに依存する。

【００８７】

本明細書は、本願発明の実証的実施例を詳細に記述するものであるが、本発明は、明確な記述実施例に限定されるものではなく、かつ種々の修正は、前出の請求の範囲に定められた本発明の範囲内で実施し得るものであると解されるべきである。

【図面の簡単な説明】

【図１Ａ】２つの両極端のビットパターンで変調されたレーザ電流に応答する既知VCSELにおける光子密度の変化を示す図である。

【図１Ｂ】図1Aに示した両極端のビットパターン及びその中間ビットパターンを含むいくつかの異なった疑似ランダムワードパターンで変調されたレーザ電流に応答する既知VCSELにおける光子密度の変化を示す図である。

【図２Ａ】本発明によるVCSELの好適な実施例の一部分の断面を示す図である。

【図２Ｂ】本発明によるVCSELの好適な実施例のドーピング分布を示す図である。

【図２Ｃ】本発明によるVCSELの量子井戸領域の一部分の断面図であって、拡散増強領域の第一の代替配置を示す図である。

【図２Ｄ】本発明によるVCSELの一部分の断面図であって、拡散増強領域の第二の代替配置を示す図である。

【図２Ｅ】本発明によるVCSELの一部分の断面図であって、拡散増強領域の第一の代替構成及び配置を示す図である。

【図２Ｆ】本発明によるVCSELの一部分の断面図であって、拡散増強領域の第二の代替構成及び配置を示す図である。

【図３Ａ】既知VCSELの一部分の断面図であって、VCSEL中のレーザ電流の流れを示す図である。

【図３Ｂ】図3Aに示した既知VCSELの量子井戸領域におけるキャリア密度の変化を示す図である。

【図４】VCSELにおけるキャリア拡散についての発明者のモデルによって予測される、拡散時間定数及び蓄積ゾーンに入るレーザ電流の割合に対するジッタの広がりの依存性を示す図である。

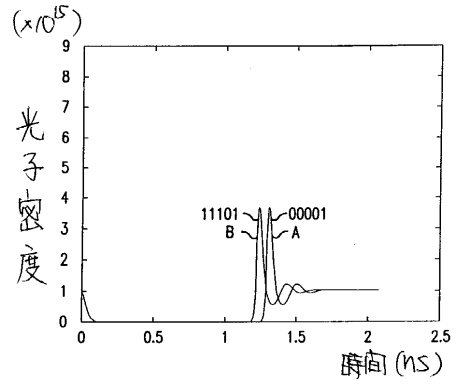
【図５Ａ】本発明によるVCSELの好適な実施例の一部分の断面図であって、VCSEL中のレーザ電流の流れを示す図である。

【図５Ｂ】図5Aに示した本発明によるVCSELの好適な実施例の量子井戸領域におけるキャリア密度の変化を示す図である。

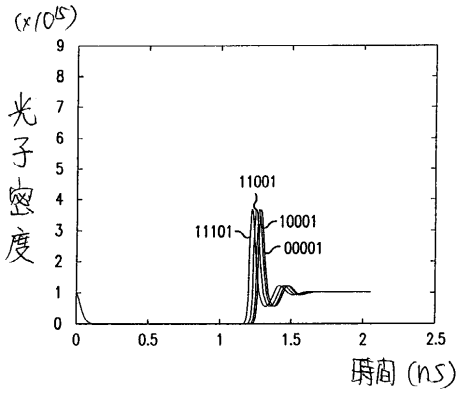
【符号の説明】

１１：本発明の実施例(VCSEL)
１３、２１３：活性層
１５：下部鏡面層
１７：上部鏡面層
１９、２１９：量子井戸領域
２１：鏡面要素対
２３、２５：鏡面要素
２７：陽子注入ゾーン
２９：コアゾーン
３１、２３１：下部クラッド領域
３２、２３２：上部クラッド領域
３３：陽子注入ゾーンの最深部と活性層間の領域
３５：蓄積ゾーン
３７：誘導放出ゾーン
４１：拡散増強領域
４３：レーザ電流の流れ
５１、５３、５７：量子井戸
５５、５９：障壁層
２００：従来技術によるVCSEL

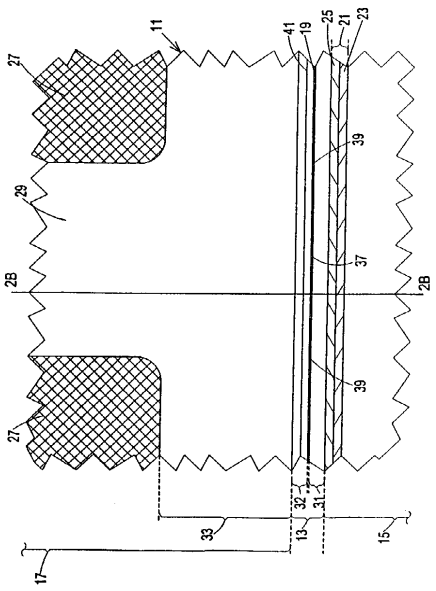
【図１Ａ】



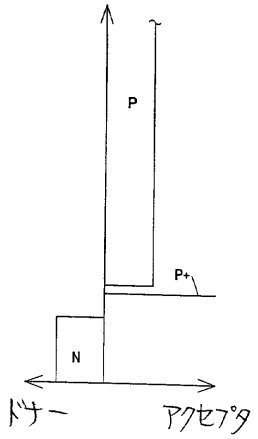
【図１Ｂ】



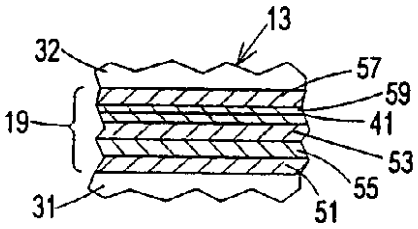
【図２Ａ】



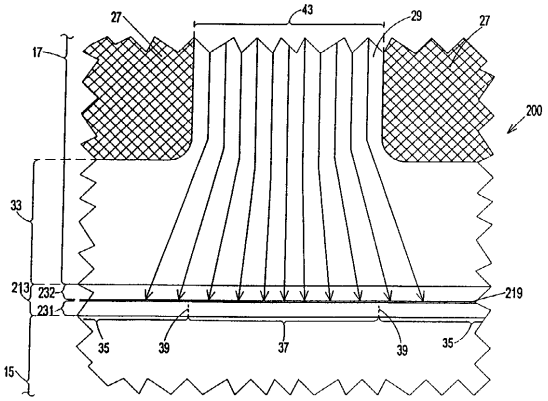
【図２Ｂ】



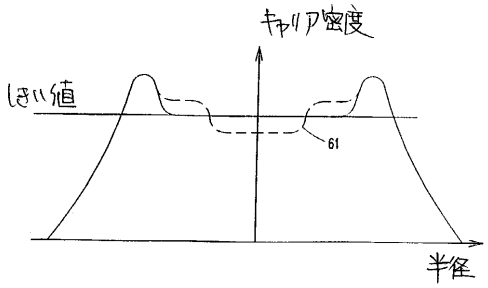
【図２Ｃ】



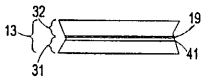
【図３Ａ】



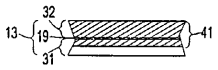
【図３Ｂ】



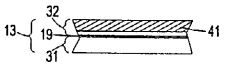
【図２Ｄ】



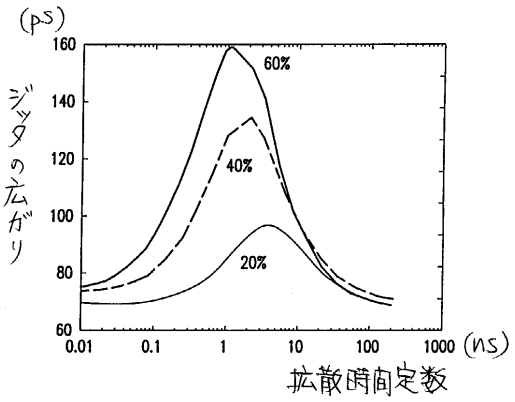
【図２Ｅ】



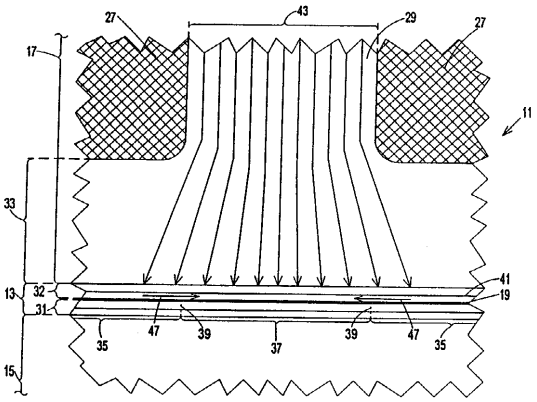
【図２Ｆ】



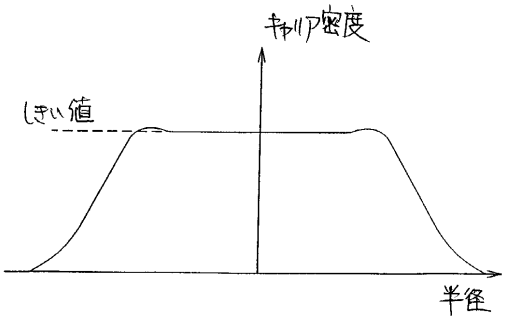
【図４】



【図５Ａ】


27
43
29
27
17
11
33
13
32
31
41
19
35
47
39
37
39
47
35
15

【図５Ｂ】


キャリア密度
しきい値
半径

フロントページの続き

(72)発明者 スコット・ダブリュ・コルジン
アメリカ合衆国カリフォルニア州サニーヴェイル, クレシェント アヴェニュー６２８
(72)発明者 マイケル・アール・ティー・タン
アメリカ合衆国カリフォルニア州メンロー・パーク, コットン ストリート３１５

審査官 小林 謙仁

(56)参考文献 特開平０５－２４３６６８（ＪＰ，Ａ）
Kazuhisa UOMI, Modulation-Doped Multi-Quantum Well(MD-MQW)Lasers, Japanese Journal of Applied Physics, １９９０年, Vol.29, No.1, pp.81-87

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
H01S 5/00-5/50
JSTPlus(JDream2)