

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3999309号
(P3999309)

(45) 発行日 平成19年10月31日(2007.10.31)

(24) 登録日 平成19年8月17日(2007.8.17)

(51) Int.Cl.

H O 1 S 5/183 (2006.01)

F I

H O 1 S 5/183

請求項の数 18 (全 27 頁)

(21) 出願番号	特願平9-162195	(73) 特許権者	506098789
(22) 出願日	平成9年6月19日(1997.6.19)		アバゴ・テクノロジーズ・ファイバー・ア
(65) 公開番号	特開平10-56233		イピー(シンガポール) プライベート・リ
(43) 公開日	平成10年2月24日(1998.2.24)		ミテッド
審査請求日	平成16年6月14日(2004.6.14)		シンガポール国シンガポール768923
(31) 優先権主張番号	667, 259		, イーシュン・アベニュー・7・ナンバー
(32) 優先日	平成8年6月20日(1996.6.20)		1
(33) 優先権主張国	米国(US)	(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】 高輝度単一モードVCSEL

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光学軸に沿って高輝度単モード光ビームを放射するためのVCSELであって、
 光学損失を有する光学空洞であって、伝導性であり逆の伝導モードを有する第1のミラ
 ー領域及び第2のミラー領域と、前記第1のミラー領域と前記第2のミラー領域の間に挟
 まれ、光学軸に対して垂直であり、量子井戸を1つしか含まない面発光領域と、該面発光
 領域の平面に前記光学空洞の側方限界を形成するための手段とを備える光学空洞、及び
 該光学空洞に結合され、前記光学軸からの側方距離が増すのに応じて前記光学空洞の光
 学損失を漸進的に増大させる損失決定手段を有することを特徴とするVCSEL。

【請求項2】

前記損失決定手段には、屈折、側方拡散、又は、集束ずれによって、前記光学軸からの
 側方距離が増すのに応じて、前記光学空洞の前記光学損失を漸進的に増大させるための手
 段が含まれることを特徴とする、請求項1に記載のVCSEL。

【請求項3】

前記損失決定手段には、前記光学軸からの側方距離が増すのに応じて漸進的に増大する
 反射損失を前記光学空洞の光に加えるための手段が含まれることを特徴とする、請求項1
 に記載のVCSEL。

【請求項4】

光学軸に沿って高輝度単モード光ビームを放射するためのVCSELであって、
 光学損失を有する光学空洞であって、伝導性であり逆の伝導モードを有する第1のミラ

10

20

ー領域及び第2のミラー領域と、前記第1のミラー領域と前記第2のミラー領域の間に挟まれ、光学軸に対して垂直であり、量子井戸を1つしか含まない面発光領域と、該面発光領域の平面に前記光学空洞の側方限界を形成するための手段とを備える光学空洞、及び

該光学空洞に結合され、前記光学軸からの側方距離が増すのに応じて前記光学空洞の光学損失を漸進的に増大させる損失決定手段を有し、該損失決定手段が、前記第1のミラー領域の表面上に設けられ、前記発光領域から遠隔であり、前記第1のミラー領域から遠隔となる部分を含み中心がほぼ光学軸に位置する湾曲表面を含む輪郭形成損失制御層を含むことを特徴とするVCSEL。

【請求項5】

前記輪郭形成損失制御層に、前記発光領域において発生する光に対して透過性のある半導体材料が含まれており、前記湾曲表面が前記半導体材料に形成されることを特徴とする、請求項4に記載のVCSEL。

10

【請求項6】

前記輪郭形成損失制御層に、前記発光領域において発生する光に対して透過性のある誘電体材料が含まれており、前記湾曲表面が前記誘電体材料に形成されることを特徴とする、請求項4に記載のVCSEL。

【請求項7】

前記輪郭形成損失制御層が、
反射防止材料を含んでおり、

前記光学軸における厚さが約 $m / 2 n_4$ であり、

20

前記光学軸と前記輪郭形成損失制御層の周辺部分との間で、約 $\pm / 4 n_4$ だけ漸進的に厚さが変化し、前記周辺部分が前記光学空洞の側方限界に隣接して位置し、ここで、
が前記発光領域に発生した光の波長であり、 m が偶数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である、請求項4に記載のVCSEL。

【請求項8】

前記第1のミラー領域に、直列に構成された、伝導性ミラー及び誘電体ミラーが含まれていることと、前記輪郭形成損失制御層が、前記伝導性ミラーと前記誘電体ミラーの間に挟まれていることを特徴とする、請求項4に記載のVCSEL。

【請求項9】

前記誘電体ミラーが、第1の屈折率を有する高屈折率誘電体材料と、前記第1の屈折率より低い第2の屈折率を有する低屈折率誘電体材料とからなる交互層を含み、

30

前記輪郭形成損失制御層が、反射防止材料を有しており、前記光学軸と前記光学空洞の側方限界に対応する側方距離との間において約 $\pm / 4 n_4$ だけ厚さが漸進的に変化し、ここで、
が前記発光領域に発生した光の波長であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である、請求項8に記載のVCSEL。

【請求項10】

前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料が、前記第2の屈折率より前記第1の屈折率に近い屈折率を有していることと、

前記輪郭形成損失制御層の厚さが、光学軸において約 $m / 2 n_4$ であり、ここで、
が前記発光領域に発生した光の波長であり、 m が偶数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である、請求項9に記載のVCSEL。

40

【請求項11】

前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料に、高屈折率誘電体材料が含まれていることを特徴とする、請求項10に記載のVCSEL。

【請求項12】

前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料が、前記第1の屈折率より前記第2の屈折率に近い屈折率を有していることと、

前記輪郭形成損失制御層の厚さが、前記光学軸において約 $p / 4 n_4$ であり、ここで、
が前記発光領域に発生した光の波長であり、 p が奇数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である、請求項9に記載のVCSEL。

50

【請求項 13】

前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料に、低屈折率誘電体材料が含まれていることを特徴とする、請求項 12 に記載の V C S E L。

【請求項 14】

光学軸に沿って高輝度単モード光ビームを放射するための V C S E L (垂直共振型面発光レーザ)であって、該 V C S E L が、

光学損失を有する光学空洞であって、

伝導性であり逆の伝導モードを有する第 1 のミラー領域及び第 2 のミラー領域であって、前記第 1 のミラー領域が、伝導性ミラー及び誘電体ミラーの直列配置を含む、第 1 のミラー領域及び第 2 のミラー領域と、

前記伝導性ミラー領域と前記第 2 のミラー領域の間に挟まれた、光学軸に対して垂直な、量子井戸を 1 つしか含まない面発光領域と、

該発光領域の平面における前記光学空洞の側方限界を形成するための手段とを含む光学空洞、及び

該光学空洞に結合され、前記光学軸からの側方距離が増すのに応じて前記光学空洞の光学損失を漸進的に増大させる損失決定手段を有し、該損失決定手段が、前記伝導性ミラーと前記誘電体ミラーの間に挟まれた反射防止材料からなる輪郭形成損失制御層であって、該輪郭形成損失制御層は前記光学軸と前記光学空洞の側方限界に対応する側方距離との間において約 $\pm \lambda / 4 n_4$ だけ厚さが漸進的に変化し、ここで、 λ が前記発光領域に発生した光の波長であり、 n_4 が前記輪郭形成損失制御層の屈折率である、輪郭形成損失制御層を含むことを特徴とする V C S E L。

【請求項 15】

前記伝導性ミラーが多層伝導性ミラーであり、前記誘電体ミラーが多層誘電体ミラーである、請求項 14 に記載の V C S E L。

【請求項 16】

前記誘電体ミラーが、第 1 の屈折率を有する高屈折率誘電体材料と、第 1 の屈折率より低い第 2 の屈折率を有する低屈折率誘電体材料とからなる交互層を含むことを特徴とする、請求項 15 に記載の V C S E L。

【請求項 17】

前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料が、前記第 2 の屈折率よりも前記第 1 の屈折率に近い屈折率を有し、

前記輪郭形成損失制御層の厚さが、前記光学軸において約 $m \lambda / 2 n_4$ であり、ここで、 λ が前記発光領域に発生した光の波長であり、 m が偶数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率であることを特徴とする、請求項 16 に記載の V C S E L。

【請求項 18】

前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料が、前記第 1 の屈折率より前記第 2 の屈折率に近い屈折率を有し、

前記輪郭形成損失制御層の厚さが、前記光学軸において約 $p \lambda / 4 n_4$ であり、ここで、 λ が前記発光領域に発生した光の波長であり、 p が奇数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率であることを特徴とする、請求項 16 に記載の V C S E L。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】

本発明は、半導体レーザに関するものであり、とりわけ、高輝度単モード出力を有する垂直共振型面発光レーザに関するものである。

【0002】

【従来の技術】

垂直共振型面発光レーザ (V C S E L) には、従来のエッジ発光レーザに比べて、低製造コスト、高歩留まり、良好なビームの質、スケール可能な幾何学形状といった、多くの利点がある。これらの特性によって、V C S E L は多くの用途にとって望ましいものに

10

20

30

40

50

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 in 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・リンクにおける VCSEL の利用について解説している。しかし、既知の VCSEL は、比較的単モード出力パワーが低く、そのため、用途によっては不適当な場合もある。VCSEL の単モード出力パワーは、VCSEL によって発生する光ビームが最低次のガウス強度分布になる最大出力パワーとして定義される。例えば、磁気光学ディスクに対する書き込みに適したレーザは、約 30 mW の単モード出力パワーを発生しなければならないが、既知の VCSEL によって発生可能な最高の単モード出力パワーは約 2 ~ 3 mW である。

10

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

VCSEL は、レーザ電流が発光領域における断面積の大きい半導体材料に流れることによって光を発生する。レーザ電流がしきい値レベルをほんのわずかだけ超える場合、VCSEL は、単横モードで動作し、ガウス強度分布がほぼ最低次の光ビームを放射する。しかし、レーザ電流が、第 2 のより高いしきい値レベルを超えて増大すると、レーザは、基本の最低次モードに、より高次の強度分布が付加される多モード動作に移行する。

【0004】

VCSEL は、発光領域の中心の誘導放出ゾーンにおいて光を発生する。光が発生すると、発生する光の強度に従ってキャリアの密度に減損を生じる (deplete) ので、最低次モードで動作すると、結果として、誘導放出ゾーンの中心に空乏ゾーンが形成され、相応じて、空乏ゾーンを取り巻くゾーンのキャリア密度が増すことになる。空乏ゾーンにおけるキャリア密度が所定のレベルより低くなると、VCSEL がその 2 次モードで動作するのにより好ましい条件になる。2 次モードの場合、VCSEL によって発生する光ビームは、ダブル・ピークのガウス強度分布を想定している。レーザ電流が大きくなると、誘導放出ゾーンに追加空乏ゾーンが形成されて、VCSEL をより高次のモードで動作させることになる可能性がある。該高次モードの場合、VCSEL によって発生する光ビームは、複数ピークのガウス強度プロファイルを備えている。単モード以外で動作すると、VCSEL は、単一ピークのガウス強度分布を有する光ビームが必要とされる用途において用いるのに適さなくなる。

20

30

【0005】

既知の VCSEL は、高次のモード数を制限しようとして、平面光学空洞を利用し、光学空洞におけるモード・ボリュームを最小限に抑えている。基本モードだけでしか発振できないように、モード・ボリュームを最小限に抑えることによって、レーザはその基本 TEM_{0,0} モードで発振するように制限される。

【0006】

しかし、レーザがその基本モードで動作するように制限するのに十分なほど小さいモード・ボリュームは、レーザによって発生可能な最大出力パワーも制限する。

【0007】

従って、2 次以上のモードの動作が、とにかく、既知の VCSEL によって発生する最大単モード強度よりはるかに高い強度で開始される、VCSEL が必要とされている。

40

【0008】

【課題を解決するための手段】

本発明によれば、光学軸に沿って高強度の単モード光ビームを放射する垂直共振型面発光レーザ (VCSEL) が得られる。VCSEL には、光学損失を生じる光学空洞及び光学空洞に結合された損失決定素子 (loss-determining element) が含まれている。損失決定素子は、光学軸からの側方距離が増すのに応じて、光学空洞の光学損失の漸進的に増大させる。光学空洞には、第 1 のミラー領域、第 2 のミラー領域、光学軸に対して垂直な、第 1 のミラー領域と第 2 のミラー領域に挟まれた面発光領域、及び、発光領域の平面内における光学空洞の側方限界を形成する素子が含まれている。第 1 のミラー領域及び第 2 の

50

ミラー領域は、両方とも、伝導性で、逆の伝導モードを有している。

【0009】

損失決定素子は、屈折、側方拡散、または、集束ずれによって、あるいは、光学軸からの側方距離が増すのに応じて漸進的に増大する反射損失を光学空洞の光に加えることによって、光学軸からの側方距離が増すのに応じて、光学空洞の光学損失を漸進的に増大させることができる。

【0010】

発光領域には、バルク活性領域または任意の数の量子井戸を含むことが可能である。光学軸からの側方距離が増すのに応じて、光学空洞の光学損失を増大させることに対する損失決定素子の効果は、バルク活性領域または任意の数の量子井戸領域を含む発光領域における量子井戸の数に反比例して決まる。損失決定素子の効果は、発光領域に量子井戸が1つだけしか含まれていない場合に最大になる。

10

【0011】

本発明によれば、光学損失を生じる光学空洞、及び、輪郭形成損失制御層 (contoured loss control layer) を含む垂直共振型面発光レーザ (VCSEL) も得られる。光学空洞には、第1のミラー領域、第2のミラー領域、光学軸に対して垂直な、第1のミラー領域と第2のミラー領域に挟まれた面発光領域、及び、発光領域の平面における光学空洞の側方限界を形成する素子が含まれている。第1のミラー領域と第2のミラー領域は、両方とも伝導性で、逆の伝導モードを有している。輪郭形成損失制御層は、活性領域から遠隔の、第1のミラー領域の表面に配置されており、第1のミラー領域から遠隔で、中心がほぼ光学軸に位置する湾曲表面を含んでいる。

20

【0012】

第1のミラー領域には、直列に構成された伝導性ミラーと誘電体ミラーを含むことが可能であり、伝導性ミラーと誘電体ミラーの間に、輪郭形成損失制御層を挟むことが可能である。

【0013】

輪郭形成損失制御層に、発光領域に発生する光に対して透明な半導体材料を含めて、その半導体材料に湾曲表面を形成することが可能である。代替案として、輪郭形成損失制御層に、発光領域に発生する光に対して透明な誘電体材料を含めて、その誘電体材料に湾曲表面を形成することも可能である。

30

【0014】

輪郭形成損失制御層には、代わりに、光学軸において $m / 2 n_4$ の厚さを備え、光学軸と輪郭形成損失制御層の周辺部との間で厚さが約 $\pm \lambda / 4 n_4$ だけ漸進的に変化する反射防止層を含むことも可能である。ここで、 λ は発光領域に発生した光の波長であり、 m は偶数であり、 n_4 は反射防止材料の屈折率である。輪郭形成損失制御層の周辺部は、光学空洞の側方限界に隣接している。

【0015】

誘電体ミラーには、高屈折率の誘電体材料と、高屈折率の誘電体材料より低い屈折率の低屈折率誘電体材料の交互層を含むことが可能である。

【0016】

輪郭形成損失制御層の反射防止材料は、低屈折率の誘電体材料の屈折率よりも高屈折率の誘電体材料の屈折率に近い屈折率を備えることが可能であり、この場合、輪郭形成損失制御層の厚さは光学軸において約 $m \lambda / 2 n_4$ である。代替案として、輪郭形成損失制御層の反射防止材料は、高屈折率の誘電体材料の屈折率よりも低屈折率の誘電体材料の屈折率に近い屈折率を備えることが可能であり、この場合、輪郭形成損失制御層の厚さは光学軸において約 $p \lambda / 4 n_4$ になる。ここで、 p は奇数である。

40

【0017】

最後に、本発明によれば、光学損失を生じる光学空洞と、反射防止材料の輪郭形成損失制御層を含む垂直共振型面発光レーザ (VCSEL) が得られる。光学空洞には、第1のミラー領域、第2のミラー領域、光学軸に対して垂直な面発光領域、及び、面発光領域の平

50

面における光学空洞の側方限界を形成する素子が含まれている。第1のミラー領域及び第2のミラー領域は、伝導性で、逆の伝導モードを有している。第1のミラー領域は、直列に構成された多層伝導性ミラーと、多層誘電体層が含まれている。伝導性ミラーと第2のミラー領域の間には、面発光領域が挟まれている。伝導性ミラーと誘電体ミラーとの間には、輪郭形成損失制御層が挟まれており、その厚さは、光学軸と輪郭形成損失制御層の周辺部との間で約 $\pm \lambda / 4 n_4$ だけ漸進的に変化する。

【0018】

誘電体ミラーには、高屈折率の誘電体材料と、高屈折率の誘電体材料の屈折率より低い屈折率を備えた低屈折率の誘電体材料の交互層を含むことが可能である。輪郭形成損失制御層の反射防止材料は、低屈折率の誘電体材料の屈折率より高屈折率の誘電体材料の屈折率に近い屈折率を備えることが可能であるが、この場合、輪郭形成損失制御層の厚さは光学軸において約 $m \lambda / 2 n_4$ になる。代替案として、輪郭形成損失制御層の反射防止層は、高屈折率の誘電体材料の屈折率より低屈折率の誘電体材料の屈折率に近い屈折率を備えることが可能であるが、この場合、輪郭形成損失制御層の厚さは光学軸において約 $p \lambda / 4 n_4$ になる。

【0019】

【実施例】

図1Aには、本発明による垂直共振型面発光レーザ(VCSEL)の第1の実施例101が示されている。VCSEL101は、光学軸105に沿って放射される光を発生する。VCSELの場合、光学空洞103には、下方ミラー領域107と、下方ミラー領域とは逆の伝導モードを有する上方ミラー領域111が含まれている。光学空洞には、光学軸に対して垂直な、下方ミラー領域と上方ミラー領域の間に挟まれた面発光領域109を含むことも可能である。最後に、光学空洞は、上方ミラー領域においてコア・ゾーン115を包囲する低反射率ゾーン113を含んでいる。低反射率ゾーンは、光学軸に対して側方向に光学空洞の限界を形成している。

【0020】

VCSEL101には、さらに、光学空洞103に結合された損失決定素子117が含まれている。損失決定素子は、側方向において光学軸105からの距離が増すのに応じて光学空洞の光学損失を漸進的に増大させる。

【0021】

VCSELにおける単モード動作は、光学軸に近接して生じ、一方、マルチモード動作は、光学軸から側方により遠隔の位置において生じる。光学軸から側方により遠隔の位置において、光学空洞103の光学損失が増すと、マルチモード動作の開始に必要なキャリア密度のしきい値が大幅に増大する。損失決定素子117は、少なくとも、VCSEL101におけるマルチモード動作の開始を遅延させるので、VCSELによって発生することが可能な最大単モード光強度が大幅に増すことになる。

【0022】

図1Aに示す本発明によるVCSELの第1の実施例において、損失決定素子117には、輪郭形成損失制御層119が含まれる。損失制御層は、上方ミラー領域111から遠隔の、損失制御層の表面121における凹状表面123によって輪郭が形成されている。図1Aに示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層は、VCSEL101によって発生する光に対して透明な半導体材料から形成される。他の形態の損失決定素子を備える他の実施例については、以下で述べることにする。

【0023】

次に、本発明によるVCSELの第1の実施例についてさらに詳細に述べることにする。図1Aには、光学軸105の平面における、発光領域109の平面に対して垂直なVCSELの断面図が示されている。留意すべきは、図がVCSELを一定の拡大率で示していないという点である。基板127を除いたVCSELの全ての層の厚さは、層をより明瞭に示すため、拡大されている。実際の装置の場合、基板の厚さは、約500 μm であるが、下方ミラー領域及び上方ミラー領域107及び111と活性領域125を組み合わせた

10

20

30

40

50

厚さは、約 $6 \sim 7 \mu\text{m}$ である。電極 131 における発光ポート 129 は、直径が一般に約 $10 \mu\text{m}$ である。さらに、ミラー領域 107 及び 111 のそれぞれには、一般に、数十の層が含まれているが、その大部分は、図面を単純化するため、図面におけるこれらの領域の描写から省略されている。最後に、本説明において、上方及び下方という用語は、それぞれ、特定の空間配向を示すためにではなく、基板 127 に対する個々の素子の遠隔または近接を表すために用いられる。

【0024】

VCSSEL101 は、波長が真空中において λ か、あるいは、空気中において約 λ/n の光を放出するような構造をなしている。VCSSEL の場合、光学空洞 103 は、下方ミラー領域 107 と上方ミラー領域 111 の間に挟まれた活性領域 125 によって構成され、その側方限界は、上方ミラー領域における低反射率ゾーン 113 によって形成される。上方及び下方ミラー領域の材料には、それらを電氣的に伝導性にするのに適したドーパントがドーピングされている。下方及び上方ミラー領域 107 及び 111 の一方に、p タイプのドーパントがドーピングされ、そのもう一方には、n タイプのドーパントがドーピングされるので、ミラー領域 107 及び 111 と活性領域の発光領域 109 が、集合的に、p-i-n または n-i-p ダイオードを形成する。

10

【0025】

下方及び上方ミラー領域 107 及び 111 は、図 1A に示す分布式ブラッグ・リフレクタは、例えば、高屈折率と低屈折率が交互になった、層 133 及び 135 のような、薄い半導体または誘電体層の周期構造を備えている。例えば、下方ミラー領域 107 を構成する分布式ブラッグ・リフレクタは、できれば、分子線エピタキシ (MBE) または金属・有機化合物蒸着 (MOCVD) によって、基板 127 上にエピタキシャル成長させた 32.5 対をなす AlGaAs と AlAs の交互層から構成することが可能である。上方ミラー領域 111 を構成する分布式ブラッグ・リフレクタは、20 対をなす AlGaAs と AlAs の交互層から構成することが可能である。上方ミラー領域 111 は、やはり、できれば MBE または MOCVD によって、活性領域 125 上に成長させられる。分布式ブラッグ・リフレクタの各層は、物理的厚さが $q / 4n_1$ であり、ここで、 n_1 は層の屈折率、 q は奇数である。

20

【0026】

発光領域 109 は、活性領域 125 の中心に配置される。好適には、発光領域 109 には、それぞれ、量子井戸と障壁層から構成される、いくつかの量子井戸構造 (不図示) が含まれている。量子井戸は、ガリウム砒素 (GaAs) の層であることが望ましく、障壁層は AlGaAs の層であることが望ましい。各量子井戸構造は、約 80 オングストロームの厚さであることが望ましい。

30

【0027】

活性領域 125 は、物理的全厚が $\lambda / 2n_2$ の整数倍に等しく、ここで、 n_2 は、活性領域の材料の平均屈折率である。活性領域は、下方クラディング層 137、上方クラディング層 139、及び、下方クラディング層と上方クラディング層の間に挟まれた発光領域 109 から構成される。クラディング層は、下方及び上方ミラー領域 107 及び 111 の隣接層の屈折率とは異なる屈折率を備えた半導体材料の層である。クラディング層 137 及び 139 は、例えば、AlGaAs の層とすることが可能である。クラディング層には、それぞれ、隣接ミラー領域と同じ伝導モードになるようにドーピングされる。

40

【0028】

下方及び上方ミラー領域 107 及び 111 を構成する分布式ブラッグ・リフレクタの層、例えば、133 及び 135 は、発光領域 109 に発生した光の大部分を活性領域 125 に反射する。分布式ブラッグ・リフレクタの層内における波の干渉によって、波長 λ の定在波が減少する。上方ミラー領域 111 を構成する分布式ブラッグ・リフレクタの反射率を全反射未満にすることによって、波長 λ のコヒーレントな光が、発光領域 109 の平面に垂直な方向において光学軸 105 に沿って放出される。

【0029】

50

VCSEL 101は、基板127の表面141に一連の層を被着させることによって形成される。

【0030】

発光領域109の平面における光学空洞103の側方限界は、上方ミラー領域111の低反射率ゾーン113によって形成される。低反射率ゾーンの反射率は、極めて低いので、低反射率ゾーンの下に位置する、誘導放出による発光を生じるための発光領域の一部に戻される反射光が不十分になる。従って、低反射率ゾーンは、光学空洞103の側方限界を形成する。この限界は、コア・ゾーン115と低反射率ゾーンの間の境界159にほぼ一致する。

【0031】

上方ミラー領域111の導電率は、コア・ゾーン115よりも低反射率ゾーン113のほうが低い。従って、上方ミラー・ゾーンを通して流れるレーザ電流の側方限界は、低反射率ゾーンによってコア・ゾーンに制限される。低反射率ゾーンによって、活性領域125に流入するレーザ電流の側方限界もコア・ゾーンとほぼ長さのゾーンに制限される。

【0032】

低反射率ゾーン113は、好適には、水素イオンを用いて実施する、イオン衝撃によって上方ミラー領域111に形成される。ヘリウムまたは酸素のような他の適合する元素のイオンを代用することも可能である。イオン衝撃によって結晶構造が破壊されるので、低反射率ゾーンは、通常、活性領域125内にまで延びず、図示のように上方ミラー領域内において途中で止める。

【0033】

代替案として、上方ミラー領域111の少なくとも1つの層にコア・ゾーンを包囲する自然酸化物領域(native oxide region)を形成することによって、低反射率ゾーンを形成することが可能である。

【0034】

図1Aに示す実施例の場合、損失決定素子117は、輪郭形成損失制御層119から構成される。損失制御層は、上方ミラー領域111から遠隔の損失制御層の表面121に形成される凹状表面123によって輪郭が形成される。輪郭形成損失制御層は、凹状表面の中心が光学軸105上にくるようにして、上方ミラー領域の表面147上に配置される。輪郭形成損失制御層は、活性領域125に発生する光に対して透明な半導体材料の層である。例えば、近赤外領域で動作するVCSELの場合、輪郭形成損失制御層は、上方ミラー領域111の表面147にエピタキシャル成長させたガリウム砒素(GaAs)の層であることが望ましい。他の波長で光を発生するVCSELであれば、他の半導体材料のほうが適しているかもしれない。

【0035】

輪郭形成損失制御層119の材料は、上方ミラー領域111に対するドーピングに用いられるのと同じモード下のドーパントで多量にドーブされる。輪郭形成損失制御層は、無視できるほどの電圧降下で、電極131を介して供給されるレーザ電流をコア・ゾーン115に伝導できるようにドーブされる。

【0036】

輪郭形成損失制御層119の厚さは、凹状表面123の寸法によって決まり、輪郭形成損失制御層の厚さは、凹状表面に十分に適応しなければならない。凹状表面の中心とコア・ゾーン115の境界159の上に重なる凹状表面の一部との間で光学軸に沿って測定される凹状表面の深さは、 $\lambda/4n$ をはるかに超える。ここで、 n は輪郭形成損失制御層の半導体材料の屈折率である。

【0037】

輪郭形成損失制御層119の凹状表面123は、光学空洞103の光を屈折する働きと、光学空洞の光を側方に拡散させるか、焦点をずらす働きの両方を行う。凹状表面による光学空洞の光の屈折によって、側方向における光学軸105からの距離が増すのに応じて増大する屈折損失が光学空洞に加えられる。側方向における光学軸105からの距離が

10

20

30

40

50

増すのに応じて増大する屈折損失のために、高次モードに関して光学空洞の屈折損失が増大し、従って、高次モードに関して光学空洞 103 の光学損失が増大することになる。高次モードに関して光学空洞 103 の光学損失が増大することによって、高次モードの動作の開始に必要とされるしきい値キャリア密度が大幅に高くなる。さらに、凹状表面 123 による光学空洞 103 の光の拡散または集束ずれのために、V C S E L 101 のモード・ボリュームが増大する。この結果、マルチモード動作の開始前に V C S E L によって発生可能な出力パワーがさらに増大する。従って、輪郭形成損失制御層の凹状表面は、V C S E L 101 によって発生可能な最大単モード・パワーを増大させることになる。

【0038】

電極 131 は、輪郭形成損失制御層 119 の半導体材料の伝導モードに適合するタイプの金属化電極であり、輪郭形成損失制御層の表面 121 に配置され、上方ミラー領域 111 から遠隔で、光学軸 105 上に中心がくるように配置される。電極 131 は、V C S E L によって発生する光が放出される発光ポート 129 を含むように形成される。発光ポートは、やはり、光学軸の中心に位置し、凹状表面 123 を包囲する。

【0039】

電極 143 は、基板 127 の背面 145 に配置されており、基板の伝導モードに適合するタイプの金属化電極である。

【0040】

損失決定素子 117、上方ミラー領域 111、及び、上方クラディング層 139 は、全て、n タイプのドーパントがドーピングされており、下方クラディング層 137 及び下方ミラー領域 107 は、両方とも、p タイプのドーパントがドーピングされている。基板 127 は、p タイプ表面層 141 を備える n タイプの G a A s ウェーハであって、表面層とウェーハの間に逆バイアス・トンネル接合（不図示）が設けられていることが望ましい。

【0041】

図 1 B には、図 1 A に示す実施例のバリエーションが示されている。図 1 A の構成要素に対応する図 1 B の構成要素は、同じ参照番号で表示されており、ここでは再度の説明は控えることにする。また、上方ミラー領域 111 の上方部分の下にある V C S E L の構成要素も、やはり、図 1 A に示す実施例の対応する構成要素と同一であるため、図 1 B から省略されている。

【0042】

図 1 B に示す本発明による V C S E L 101 B の実施例の場合、損失決定素子 117 B には、輪郭形成損失制御層 119 B が含まれている。損失制御層は、上方ミラー領域 111 から遠隔の、表面 121 B における凹状表面 123 B によって輪郭が形成される。図 1 B に示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層は、V C S E L 101 B によって発生する光に対して透明な誘電体材料から形成される。損失制御層 119 B は、凹状表面 123 B の中心が光学軸 105 上にくるようにして、上方ミラー領域 111 の表面 147 に配置される。表面 147 は、活性領域 125（図 1 A）から遠隔の上方ミラー領域の表面である。輪郭形成損失制御層の一部は、やはり、上方ミラー領域の表面 147 上にある電極 131 B の上に重なる。

【0043】

輪郭形成損失制御層は、活性領域 125（図 1 A）に発生する光に対して透明な誘電体材料の層である。例えば、誘電体材料は、窒化珪素（ Si_3N_4 ）、または、二酸化珪素（ SiO_2 ）または二酸化チタン（ TiO_2 ）といった他の適合する誘電体材料とすることが可能である。

【0044】

輪郭形成損失制御層 119 B の厚さは、凹状表面 123 B の寸法によって決まり、輪郭形成損失制御層の厚さは、凹状表面に十分に適応しなければならない。凹状表面の中心と、コア・ゾーン 115 の境界 159 上に重なる凹状表面の一部との間で光学軸に沿って測定される凹状表面の深さは、 $\lambda/4n$ をはるかに超える。ここで、 n は輪郭形成損失制御層 119 B の半導体材料の屈折率である。実験装置の場合、輪郭形成損失制御層は、厚さ

10

20

30

40

50

約 $1\ \mu\text{m}$ の窒化珪素の層に凹状表面 1 2 3 B を形成することによって作製された。

【 0 0 4 5 】

輪郭形成損失制御層 1 1 9 B の凹状表面 1 2 3 B は、図 1 A に関連して上述の凹状表面 1 2 3 と同様、光学空洞 1 0 3 の光を屈折する働きと、光学空洞の光を側方に拡散させるか、焦点をずらす働きの両方を行う。輪郭形成損失制御層 1 1 9 B によって、光学軸からの側方距離が増すにつれて増大する光学空洞の光学損失が生じる。

【 0 0 4 6 】

電極 1 3 1 B は、上方ミラー領域 1 1 1 の伝導モードに適合するタイプの金属化電極である。輪郭形成損失制御層 1 1 9 B の誘電体材料は絶縁性のため、電極 1 3 1 B は、活性領域（不図示）から遠隔の上方ミラー領域 1 1 1 の表面 1 4 7 に配置される。電極 1 3 1 B は、中心が光学軸 1 0 5 上に位置し、上方ミラー領域のコア・ゾーン 1 1 5 に部分的に重なっている。電極 1 3 1 B は、V C S E L 1 0 1 B によって発生する光が放出される発光ポート 1 2 9 B を含むように形成されている。発光ポートは、やはり、光学軸上に中心がくる。

【 0 0 4 7 】

V C S E L によって発生可能な最大単モードパワーの増大における損失決定素子の有効性は、損失決定素子によって加えられる側方距離に依存した損失を被る、光学空洞内の光の比率によって決まる。この比率は、発光領域と損失決定素子との間に介在する上方ミラー領域の反射率によって決まる。典型的な従来の上部発光 V C S E L の上方ミラー領域には、約 2 0 対の層が含まれており、反射率は 1 に近い。これは、損失決定素子によって加えられる側方距離に依存した損失を被る、光学空洞内の光の比率が、極めて小さいことを表している。結果として、最大単モード・パワーを増大させる損失決定素子の完全なポテンシャル(potential)は、上方ミラー領域が従来の高反射率を備えている場合、十分には実現されない。

【 0 0 4 8 】

図 1 A に示す実施例の場合、V C S E L の最大単モードパワーを増大させる損失決定素子 1 1 7 のポテンシャルは、上方ミラー領域 1 1 1 からわずかな対をなす層を省略して、その反射率を低下させることによって、より十分に実現することが可能である。これによって、損失決定素子によって加えられる側方距離に依存した損失を被る、光学空洞 1 0 3 内の光の比率が高くなり、損失決定素子の有効性が増す。しかし、この損失決定素子の有効性の向上は、光学空洞における全光学損失の増大という犠牲を払って実現される。光学空洞において全光学損失が増すと、V C S E L のしきい値電流が増大する。しきい値電流は、レーザ作用が生じるレーザ電流の最小値である。約 4 対を超える層が上方ミラー領域から除去されると、しきい値電流が許容できないほど大きくなる可能性がある。

【 0 0 4 9 】

図 2 には、本発明による V C S E L の第 2 の実施例 2 0 1 が示されている。第 2 の実施例は、図 1 A に示す第 1 の実施例に基づくものである。

【 0 0 5 0 】

図 1 A に示す第 1 の実施例と比較すると、図 2 に示す V C S E L の構造は、増大するしきい値電流の望ましくない副作用を伴わずに、V C S E L によって発生する最大単モード・パワーを増大させる、損失決定素子のポテンシャルのいっそうの強化を実現できるようにする。図 1 A の構成要素に対応する図 2 の構成要素は、同じ参照番号によって表示されており、ここでは再度の説明は控えることにする。また、上方ミラー領域 2 1 1 の上方部分の下にある V C S E L の構成要素も、やはり、図 1 A に示す実施例の対応する構成要素と同一であるため、図 2 から省略されている。

【 0 0 5 1 】

図 2 に示す実施例の場合、上方ミラー領域 2 1 1 は、直列に配置された 2 つのミラー素子、すなわち、誘電体ミラー 2 4 9 及び伝導性ミラー 2 6 5 から構成される。ミラー素子は、両方とも、上方ミラー領域の反射率に影響を及ぼす。上方ミラー領域 2 1 1 の 2 素子構造によって、伝導性ミラーの反射率が、図 1 A に示す実施例の上方ミラー領域よりも低い

10

20

30

40

50

場合であっても、光学空洞 103 の光学損失を少なくすることが可能になる。上方ミラー領域 211 の 2 素子構造によって、光学空洞 103 内の光の大部分が、損失決定素子 217 による側方距離に依存した屈折及び側方拡散または集束ずれを被ることになる。上方ミラー領域 211 の 2 素子構造によって、しきい値電流を増大させることなく、VCSSEL によって発生する最大単モード強度を増大させる、損失決定素子のポテンシャルのいっそうの強化を実現することが可能になる。

【0052】

伝導性ミラー 265 は、構造的に、図 1A に示す実施例の上方ミラー領域と同様であるが、その反射率を低下させるため、層 133 及び 135 (図 1) のような対をなす層が少ない点が異なっている。例えば、該伝導ミラーは、一般に、しきい値電流が同じである従来の VCSSEL の上方ミラー領域よりも 6 ~ 10 対だけ層を減らすことが可能である

10

【0053】

誘電体ミラー 249 は、高屈折率と低屈折率が交互になった、例えば、層 251 及び 253 のような、薄い誘電体層の周期的構造を備えている。各層は、厚さが $q / 4 n_3$ であるが、ここで、 n_3 は該層の誘電体の屈折率であり、 q は奇数である。好適には、誘電体ミラーは、二酸化珪素 SiO_2 と二酸化チタン TiO_2 の交互層、または、二酸化珪素 SiO_2 と窒化珪素 Si_3N_4 の交互層から形成される。代替案として、誘電体ミラーは、他の適合する対をなす誘電体材料または半導体材料の交互層から形成することも可能である。

【0054】

誘電体ミラー 249 における層 251 及び 253 のような対をなす層の数は、伝導性ミラーの相対的に低い反射率にもかかわらず、誘電体ミラーに対して、上方ミラー領域 211 が、VCSSEL 201 のしきい値電流を許容可能な低い値にセットする総合反射率を備えるのに十分な反射率を付与する数であることが望ましい。例えば、誘電体ミラーにおける層数によって、結果として、従来の VCSSEL の上方ミラー領域の反射率に近似する総合反射率を備えた上方ミラー領域 211 をもたらす反射率が、誘電体ミラーに対して付与される場合には、従来の VCSSEL のしきい値電流と同様のしきい値電流を得ることが可能である。

20

【0055】

損失決定素子 217 は、伝導性ミラー 265 と誘電体ミラー 249 の間に挟まれた輪郭形成損失制御層 119 から構成される。輪郭形成損失制御層は、伝導性ミラー 265 から遠隔の、表面 121 の凹状表面 123 によって輪郭が形成される。図 2 に示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層は、VCSSEL 201 によって発生する光に対して透明な半導体材料の層である。輪郭形成損失制御層は、活性領域 (不図示) から遠隔の、伝導性ミラーの表面 247 に配置される。誘電体ミラー 249 は、輪郭形成損失制御層の凹状表面に配置される。

30

【0056】

上方ミラー領域 211 を 2 つの素子、すなわち、伝導性ミラー 265 及び誘電体ミラー 249 に分割することによって、損失決定素子 217 の有効性が増し、VCSSEL 201 は、図 1A に示す実施例によって生じる最大単モード強度を超える最大単モード強度を発生することが可能になる。

40

【0057】

図 1B に示すバリエーションは、上述と同様のやり方で修正を施し、損失決定素子 117B の有効性を増すことが可能である。

【0058】

図 2 に示す実施例、及び、誘電体ミラー 249 が上方ミラー領域 211 の反射率を増強する、図 1B に示す実施例の上述のバリエーションの製作は、多層伝導性ミラー 265 を単一層の半導体に置き換えることによって簡略化が可能である。これに関するもう 1 つの利点は、半導体の層と輪郭形成損失制御層との界面によって反射される光と誘電体ミラーによって反射される光との間の干渉が、多層伝導性ミラーによって反射される光と湾曲表面 123 によって反射される光との間の干渉よりもはるかに弱いということである。干渉が

50

強いと、ニュートンの環タイプの干渉パターンを生じる可能性がある。半導体層は、厚さが $\lambda / 2 n_6$ の整数倍であり（ここで、 n_6 は、半導体層の材料の屈折率である）、その伝導性を高めるためドーピングされている。半導体層は、屈折率が半導体ミラーよりもはるかに低く、誘電体ミラーによって、上方ミラー領域 211 の反射率のほぼ全てが得られる。

【0059】

本発明による VCSEL のもう 1 つの実施例が、図 3 A 及び 3 B と図 4 A ~ 4 D に示されている。それぞれの損失決定素子 117 が、屈折及び側方拡散または集束ずれによって、光学軸 105 からの側方距離が増すのに応じて増大する光学損失を生じさせる働きをする、図 1 A、1 B、及び、2 に示す実施例とは対照的に、図 3 A 及び 3 B と図 4 A ~ 4 D に示す実施例の損失決定素子 317 及び 417 は、それぞれ、反射によって、光学軸からの側方距離につれて増大する光学損失を生じさせる働きをする。

10

【0060】

まず、図 3 A 及び 3 B に示す実施例について説明する。図 1 A における構成要素に対応する図 3 A 及び 3 B の構成要素は、同じ参照番号で表示されているので、ここでは再度の説明は控えることにする。図 3 A 及び 3 B に示す実施例の対応する構成要素は、それぞれ、文字 A または B を付加した同じ参照番号で表示される。対応する文字のないこうした参照番号の表示は、両実施例におけるそれぞれの構成要素に当てはまるものとみなす。例えば、輪郭形成損失制御層 319 と称する場合、図 3 A に示す輪郭形成損失制御層 319 A と図 3 B に示す輪郭形成損失制御層 319 B の両方に当てはまるものとみなされる。上方ミラー領域 311 の上部の 4 つの層の下にある VCSEL の構成要素は、図 1 A に示す実施例の対応する構成要素と同じであるため、図 3 A 及び 3 B から省略されている。

20

【0061】

まず、図 3 A 及び 3 B に示す実施例に共通した特徴について説明する。VCSEL 301 A 及び 301 B の場合、損失決定素子 317 は、電極 331 の発光ポート 329 内において、上方ミラー領域 311 の表面 347 に配置される。損失決定素子は、輪郭形成損失制御層 319 から構成される。輪郭形成損失制御層は、光学軸 105 上に中心がくる湾曲表面 323 によって輪郭が形成された反射防止材料の層である。輪郭形成損失制御層の輪郭形成によって、光学軸からの側方距離が増すにつれて、上方ミラー領域の反射率が漸進的に低下する。光学軸において、輪郭形成損失制御層の厚さは約 $m \lambda / 4 n_4$ であるが、ここで、 m は偶数であり、 n_4 は輪郭形成損失制御層の反射防止材料の屈折率である。湾曲表面 323 のために、輪郭形成損失制御層の厚さは、光学軸からの側方距離が増すのに応じて漸進的に増すか（図 3 A）、あるいは、減る（図 3 B）ので、周辺部 357 における輪郭形成損失制御層の厚さは、光学空洞における厚さと約 $\pm \lambda / 4 n_4$ だけ異なることになる。周辺部 357 は、光学軸 103 の側方限界に隣接した輪郭形成損失制御層の一部である。光学空洞の側方限界は、コア・ゾーン 115 と低屈折率ゾーン 113 との境界 159 にほぼ一致する。図 3 A 及び 3 B に示す実施例の場合、周辺部は、図示のように、輪郭形成損失制御層と環状電極 331 との境界に位置している。代替案として、周辺部は、さらに、境界 159 から光学軸に向かって入り込ませることもできるし、あるいは、境界 159 の外側に短い距離をおいて配置することも可能である。

30

【0062】

環状電極 331 は、コア・ゾーン 115 に部分的に重なる上方ミラー領域 311 の表面に配置される。上方ミラー領域 311 には、電流拡散層 355 を含むことが望ましい。これによって、環状電極が、コア・ゾーンよりもはるかに導電率が低い低反射率ゾーン 113 にほぼ重なる場合であっても、レーザ電流は、最小限の電圧降下で、環状電極 331 と活性領域（不図示）を通ることが可能になる。電流拡散層を構成する上方ミラー領域の 1 つ以上の層の半導体材料が、電流拡散層の導電性を高めるため、上方ミラー領域の残りの部分の半導体材料と同じモードのドーパントを多量にドーピングされる。

40

【0063】

輪郭形成損失制御層 319 の反射防止材料は、屈折率 $n_4 = (n_5 n_0)^{1/2}$ の透明な誘電体であり、ここで、 n_5 は上方ミラー領域 311 の最上部層、すなわち、電流拡散層 355

50

の材料の屈折率であり、 n_0 は、湾曲表面323と境界をなす媒体の屈折率である。この媒体は、通常、空気、ある種の不活性ガス、または、真空である。本開示において、「空気」と称する場合、「ガス」及び「真空」も包含するものとみなされる。ガリウム砒素電流拡散層の場合、反射防止材料の屈折率は、 $1.9 \sim 2.0$ である。この範囲の屈折率を有する誘電体には、窒化珪素(Si_3N_4)及び二酸化チタン(TiO_2)が含まれる。所望の屈折率が得られるように x 値を調整した酸化珪素 SiO_x を利用することも可能である。

【0064】

図3Aに示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層319Aは、光学軸105における厚さがほぼゼロ($m=0$)である。輪郭形成損失制御層の湾曲表面323Aは、凹状であり、このため、輪郭形成損失制御層の厚さは、光学軸からの側方距離の延長に応じて漸進的に減少し、周辺部357において $\pm \lambda/4n_4$ の厚さに達する。

10

【0065】

次に、まず図5に示す従来のVCSELを参照して、損失決定素子317が、側方向における光学軸105からの距離の延長に応じて光学空洞103の光学損失を増大させる方法について述べることにする。図1Aの構成要素に対応する図5の構成要素は、同じ参照番号で表示されているので、ここでは再度の説明は控えることにする。また、上方ミラー領域における上部3層の下にある従来のVCSELの構成要素も、やはり、図1Aに示す本発明によるVCSELの実施例における対応する構成要素と同一であるため、図5から省略されている。

20

【0066】

図5には、本発明によるVCSELと同様であるが、損失決定素子のない構造を備えた従来のVCSEL10が示されている。VCSEL10の場合、表面部分61は空気にさらされている。表面部分61は、電極31の発光ポート29内における上方ミラー領域11の表面47の一部である。光は、表面部分61における半導体と空気の境界によって反射される。表面部分61の反射率は、上方ミラー領域の対をなす層133及び135のような4対の層の反射率にほぼ等しく、従って、上方ミラー領域の反射率にかなりの影響を及ぼす。このため、光学空洞103の光学損失は、表面部分61の反射率によって決まる。

【0067】

次に図3A及び3Bに戻ると、輪郭形成損失制御層319は、光学軸105における厚さが $m \pm \lambda/4n_4$ であり(ここで、 m は偶数である)、湾曲表面323のために、厚さは、光学軸からの側方距離が増すのに応じて漸進的に増すか、あるいは、減るので、周辺部357における輪郭形成損失制御層の厚さは、光学軸における厚さと約 $\pm \lambda/4n_4$ だけ異なることになる。光学軸におけるこの輪郭形成損失制御層の厚さのため、湾曲表面323によって反射される光は、上方ミラー領域311によって反射される光と同相になり、光学軸における上方ミラー領域の反射率は、表面部分361に通常の反射率の半導体・空気界面が存在する場合とほぼ同じである。従って、光学軸において、輪郭形成損失制御層が、上方ミラー領域の反射率、従って、光学空洞103の光学損失に対して及ぼす効果は無視することができる。

30

【0068】

周辺部357における輪郭形成損失制御層319の厚さのため、凹状表面323において反射される光は、上方ミラー領域311によって反射される光と逆相になる。輪郭形成損失制御層によって、周辺部357の下に位置する表面部分361の一部による反射がほぼ排除され、このため、周辺部の下に位置する上方ミラー領域の一部の反射率が低下する。従って、輪郭形成損失制御層によって、周辺部357の下に位置する光学空洞の一部の光学損失が、光学軸105における光学空洞の光学損失より大きくなる。

40

【0069】

光学軸105と周辺部357の間における輪郭形成損失制御層319の厚さは、 $\pm \lambda/4n_4$ だけ漸進的に変化する。結果として、湾曲表面323によって反射される光と上方ミラー領域311によって反射される光の位相差は、光学軸からの側方距離の延長に応じて

50

、 0° から 180° まで漸進的に変化する。従って、光学軸からの側方距離が増すのに応じて、上方ミラー領域 311 の反射率は、図 3 C の曲線 386 によって示されるように、光学軸における最大値から周辺部 357 における最小値まで漸進的に降下し、光学空洞 103 の光学損失は、光学軸における最小値から周辺部 357 における最大値まで漸進的に増大する。光学軸からの側方距離の延長に応じた光学空洞における光学損失の増大は、VCSEL 301 の軸上における単モード動作が好ましいということと、軸を外れたマルチモード動作のしきい値が大幅に増大するということを表している。

【0070】

図 1 A 及び 1 B に示す実施例の場合のように、図 3 A 及び 3 B に示す実施例の単モード出力パワーは、損失決定素子 317 が、従来の VCSEL と同様の反射率を備える上方ミラー領域、あるいは、その反射率が約 4 対より少ない層を除去することによって低下した上方ミラー領域に配置されたとしても、従来の VCSEL よりも大きい。しかし、図 2 に示す実施例と同様、損失決定素子の有効性は、上方ミラー領域を直列構成をなす 2 つのミラー素子に分割し、損失決定素子がそれらの間に挟まれるようにすることによって増すことが可能である。上方ミラー領域は、対をなす層が従来の VCSEL の上方ミラー領域よりかなり少ない伝導性ミラーと、上方ミラー領域における反射率をしきい値電流が同じである従来の VCSEL の上方ミラー領域における反射率にまでほぼ回復する誘電体ミラーに分割される。

【0071】

図 4 A ~ 4 D には、上方ミラー領域が 2 つの素子に分割された、図 3 A 及び 3 B に示す実施例のバリエーションが示されている。

【0072】

図 3 A 及び 3 B に示す実施例と比較すると、図 4 A ~ 4 D に示す VCSEL の構造によって、増大するしきい値電流の望ましくない副作用を伴うことなく、VCSEL によって発生する最大単モード・パワーを増大させる、損失決定素子 417 のポテンシャルのいっそうの強化が実現可能になる。図 1 A、3 A、及び、3 B の構成要素に対応する図 4 A ~ 4 D の構成要素は、同じ参照番号によって表示されており、ここでは再度の説明は控えることにする。図 4 A、4 B、4 C、及び、4 D に示す実施例における対応する構成要素は、それぞれ、文字 A、B、C、または、D を付加した同じ参照番号を利用して表示されている。対応する文字のないこうした参照番号の表示は、4 つの実施例の全てにおけるそれぞれの構成要素に当てはまるものとみなす。最後に、上方ミラー領域の上方部分の下にある VCSEL の構成要素は、図 1 A に示す実施例の対応する構成要素と同一であるため、図 4 A ~ 4 D から省略されている。

【0073】

まず、図 4 A ~ 4 D に示す実施例に共通した特徴について説明する。図 4 A ~ 4 D に示す実施例の場合、上方ミラー領域 411 は、直列に配置された 2 つのミラー素子、すなわち、誘電体ミラー 449 と伝導性ミラー 465 から構成される。両方のミラー素子とも、上方ミラー領域の反射率に影響を及ぼす。上方ミラー領域の該 2 素子構造によれば、伝導性ミラーの反射率が、しきい値電流がほぼ同じである従来の VCSEL の上方ミラー領域よりはるかに低い場合であっても、光学軸における光学空洞 103 の光学損失を少なくすることが可能になる。また、上位ミラー領域 411 の 2 素子構造によって、光学空洞 103 の光の大部分が損失決定素子 417 による側方距離に依存した反射にさらされることになる。従って、上位ミラー 411 の 2 素子構造によって、しきい値電流を増大させることなく、VCSEL によって発生する最大単モード強度を増大させる、損失決定素子のポテンシャルのいっそうの強化が実現される。

【0074】

伝導性ミラー 465 は、構造的に、図 1 A に示す VCSEL 101 の上位ミラー領域と同様であるが、その反射率を低下させるため、層 133 及び 135 (図 1 A) のような対をなす層が少なくなっている点が異なっている。例えば、伝導性ミラーの層数は、一般に、しきい値電流の値がほぼ同じである VCSEL 101 の実施例の上位ミラー領域に比べて

10

20

30

40

50

、6～10対少なくなるようにすることが可能である。

【0075】

誘電体ミラー449は、高い屈折率（例えば、層451）と低い屈折率（例えば、層453）が交番する、誘電体層の周期構造を備えている。各層の厚さは $\lambda/4n_3$ であり、ここで、 n_3 は誘電体層の材料の屈折率である。誘電体ミラーは、二酸化珪素 SiO_2 と二酸化チタン TiO_2 の交互層、または、二酸化珪素 SiO_2 と窒化珪素 Si_3N_4 の交互層から形成するのが望ましい。代替案として、誘電体ミラーは、他の適合する誘電体材料または半導体材料の対をなす交互層から形成することも可能である。

【0076】

誘電体ミラー449における層451及び453のような対をなす誘電体層の数は、伝導性ミラーの反射率が、従来のVCSELの上位ミラー領域の反射率と比較して低いにもかかわらず、誘電体ミラーに対して、光学軸105における上方ミラー領域411の総合反射率が、しきい値電流がほぼ同じである従来のVCSELの反射率とほぼ同じになるような、反射率を付与する数であることが望ましい。

【0077】

損失決定素子417は、伝導性ミラー465と誘電体ミラー449に挟まれた輪郭形成損失制御層419から構成される。輪郭形成損失制御層は、活性領域（不図示）から遠隔の、伝導性ミラーの表面347に配置される。輪郭形成損失制御層は、光学軸105上に中心がくる湾曲表面423によって輪郭が形成される。誘電体ミラー449は、輪郭形成損失制御層419の湾曲表面に配置される。湾曲表面423の曲率は、輪郭形成損失制御層の厚さが、光学軸105と周辺部457との間の側方距離が増すのに応じて、約 $\lambda/4n_4$ だけ漸進的に変化しているが、ここで、 n_4 は、輪郭形成損失制御層の屈折率である。周辺部457は、光学空洞103の側方限界に重なる輪郭形成損失制御層の一部である。光学空洞の側方限界は、コア・ゾーン115と低反射率ゾーン113の境界にほぼ一致する。図4A～4Dに示す実施例の場合、周辺部457は、図示のように、輪郭形成損失制御層と環状電極311との境界に位置している。代替案として、この周辺部は、さらに、境界159から光学軸に向かって入り込ませることもできるし、あるいは、境界159の外側に短い距離をおいて配置することも可能である。

【0078】

輪郭形成損失制御層419は、反射防止材料の輪郭形成層であり、誘電体ミラーの材料の1つによる層であることが望ましい。光学軸105における輪郭形成損失制御層の厚さは、輪郭形成損失制御層が高屈折率材料の層であるか、あるいは、低屈折率材料の層であるかによって決まる。輪郭形成損失制御層が高屈折率材料の層であるか、あるいは、低屈折率材料の層であるかに関係なく、輪郭形成損失制御層の厚さは、光学軸と周辺部457との間で約 $\lambda/4n_4$ だけ漸進的に変化する。

【0079】

図4A及び4Bに示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層419A及び419Bは、両方とも、高屈折率の誘電体材料、すなわち、層451と同じ材料の層である。輪郭形成損失制御層が高屈折率材料の層である場合、輪郭形成損失制御層の光学軸における厚さは、 $m\lambda/4n_4$ になるが、ここで、 m は偶数であり、 n_4 は輪郭形成損失制御層の材料の屈折率である。また、輪郭形成損失制御層が高屈折率の材料の層である場合、誘電体ミラーは偶数の層を備え、最も外側の層451が、高屈折率材料の層になる。

【0080】

図4C及び4Dに示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層419C及び419Dは、両方とも、低屈折率の誘電体材料、すなわち、層453と同じ材料の層である。輪郭形成損失制御層が低屈折率材料の層である場合、輪郭形成損失制御層の光学軸における厚さは、 $p\lambda/4n_4$ になるが、ここで、 p は奇数であり、 n_4 は輪郭形成損失制御層の材料の屈折率である。また、輪郭形成損失制御層が低屈折率の材料の層である場合、誘電体ミラーは奇数の層を備え、図4A及び4Bに示す実施例のように、最も外側の層451が、高屈折率材料の層になる。

10

20

30

40

50

【0081】

上述のように、輪郭形成損失制御層の厚さは、輪郭形成損失制御層が、高屈折率材料の層であるか、あるいは、低屈折率材料の層であるかに関係なく、光学軸105と周辺部457の間において約 $\pm \lambda / 4 n_4$ だけ漸進的に変化する。図4A及び4Bに示す実施例の場合、それぞれの輪郭形成損失制御層419A及び419Bは、光学軸における厚さが約 $m \lambda / 4 n_4$ の高屈折率材料の層である。図4Aに示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層419Aの光学軸における厚さはほぼゼロ($m = 0$)である。輪郭形成損失制御層の湾曲表面423Aは、凹状であり、このため、輪郭形成損失制御層の厚さは、光学軸からの側方距離の延長に応じて漸進的に増大し、周辺部457において $\lambda / 4 n_4$ の厚さに達する。図4Bに示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層419Bの光学軸における厚さは約 $2 \lambda / 4 n_4$ ($m = 2$)である。輪郭形成損失制御層の湾曲表面423Bは、凸状であり、このため、輪郭形成損失制御層の厚さは、光学軸からの側方距離の延長に応じて漸進的に減少し、周辺部457において約 $\lambda / 4 n_4$ の厚さに達する。

10

【0082】

図4C及び4Dに示す実施例の場合、それぞれの輪郭形成損失制御層419C及び419Dは、光学軸における厚さが約 $p \lambda / 4 n_4$ の低屈折率材料の層である。図4Cに示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層419Cの光学軸における厚さは約 $\lambda / 4 n_4$ ($p = 1$)である。輪郭形成損失制御層の湾曲表面423Cは、凹状であり、このため、輪郭形成損失制御層の厚さは、光学軸からの側方距離の延長に応じて漸進的に増大し、周辺部457において $\lambda / 2 n_4$ の厚さに達する。図4Dに示す実施例の場合、輪郭形成損失制御層419Dの光学軸における厚さは約 $\lambda / 4 n_4$ ($p = 1$)である。輪郭形成損失制御層の湾曲表面423Dは、凸状であり、このため、輪郭形成損失制御層の厚さは、光学軸からの側方距離の延長に応じて漸進的に減少し、周辺部457においてほぼゼロの厚さに達する。

20

【0083】

上方ミラー領域411を2つの素子、すなわち、伝導性ミラー465及び誘電体ミラー449に分割することによって、損失決定素子417の有効性が増し、損失決定素子は、図3A及び3Bに示す実施例に比べてはるかに大きい、光学軸からの側方距離の延長に応じた光学空洞における光学損失の増大を生じさせることが可能になる。これが、図3Cの曲線388によって示されている。

30

【0084】

光学軸からの側方距離の延長に応じた光学空洞における光学損失の大幅な増大は、図4A～4Dに示す実施例において下記のようにして実現する。光学軸において、表面347と高屈折率・低屈折率境界463との間の光路長は、 $\lambda / 2 n_7$ の整数倍になるが、ここで、 n_7 は光路における材料の平均屈折率である。結果として、高屈折率・低屈折率境界463、及び、誘電体ミラー449の残りの層によって反射される光は、全て、伝導性ミラー465によって反射される光と同相をなす。誘電体ミラーの反射率によって、伝導性ミラーの低反射率が大幅に増強され、光学軸105における上方ミラー領域の総合反射率が高くなる。

【0085】

周辺部457において、表面347と高屈折率・低屈折率境界463との間の光路長は、 $\lambda / 4 n_7$ の奇数倍である。結果として、高屈折率・低屈折率境界、及び、誘電体ミラー449の残りの層によって反射される光は、伝導性ミラー465によって反射される光と位相がずれることになる。高屈折率・低屈折率境界、及び、誘電体ミラーの残りの層によって反射される光は、伝導性ミラーの反射率を低下させる。従って、周辺部457における上方ミラー領域の総合反射率は、伝導性ミラー単独の反射率より低くなり、伝導性ミラーと誘電体ミラーの組み合わせ反射率よりはるかに低くなる。

40

【0086】

光学軸105と周辺部457の間において、誘電体ミラーによって反射される光と伝導性ミラーによって反射される光との位相差が漸進的に変化するの、誘電体ミラーによって

50

反射される光は、光学軸と周辺部との間における途中のポイントで漸進的にゼロまで減少する量だけ、伝導性ミラー４６５の反射率を増強する。従って、その途中のポイントと周辺部との間で、誘電体ミラーによって反射される光が、漸進的に増大する量だけ伝導性ミラーの反射率を低下させる。光学軸と周辺部との間の所定のポイントにおける伝導性ミラーの反射率に対する誘電体ミラーの反射率の効果は、そのポイントにおける表面３４７と高屈折率・低屈折率境界４６３との間の光路長によって決まる。

【００８７】

それぞれ、図３Ａ及び３Ｂと、図４Ａ～４Ｄに示す損失決定素子３１７及び４１７の有効性は、発光領域１０９（図１）の量子井戸の数を減らすことによって高めることが可能である。図６には、発光領域に異なる数の量子井戸を有するＶＣＳＥＬのしきい値レベルに対する、ミラー領域１０７及び１１１（図１Ａ）の反射率を変化させる効果が示されている。発光領域の量子井戸が少なくなると、曲線の勾配が大きくなる。換言すれば、発光領域の量子井戸が少なくなると、しきい値レベルの所定の変化に必要なとされる反射率の変化がより小さくなる。従って、発光領域の量子井戸数を減少させると、損失決定素子３１７及び４１７によって生じる、所定の側方距離に依存した反射率の変化から生じるしきい値の変化が大きくなる。

【００８８】

次に図７Ａ～７Ｊを参照して、図３Ｂに示す本発明によるＶＣＳＥＬの実施例の湾曲表面３２３を形成するために利用することが可能な方法の一例について述べることにする。この方法は、上述のＶＣＳＥＬの他の実施例における湾曲表面の形成にも適応することが可能である。

【００８９】

図７Ａ～７Ｊには、ＶＣＳＥＬ３０１Ｂになるものの上方ミラー領域３１１における上部３層が示されている。後述する処理の前に、コア・ゾーン１１５を包囲する低屈折率ゾーン１１３が、従来のやり方で上方ミラー領域にイオン注入することによって形成される。半導体ウェーハに上方ミラー領域の層とその下に位置する層を被着することによって、基本的なＶＣＳＥＬ構造を形成するプロセスは、従来のものであり、ここでは解説を控えることにする。

【００９０】

以下の説明において、ウェーハに適用されるさまざまな操作について述べることにする。云うまでもなく、こうしたステップがウェーハに用いられる場合には、ウェーハに被着した全ての層にも適用される。

【００９１】

図３Ｂに示すＶＣＳＥＬ３０１Ｂの場合、輪郭形成損失制御層３１９Ｂから構成される損失決定素子３１７Ｂは、反射防止材料の層に凸状表面３２３Ｂを形成することによって作製される。損失決定素子を形成するため、例えば、上方ミラー領域３１１の表面３４７に、蒸着または化学蒸着（ＣＶＤ）によって反射防止材料の層７０２を被着させ、図７Ａに示すように、層７０２の表面７０６にフォトレジストの層７０４を塗布する。

【００９２】

その境界が破線７０８によって表示された円形開口部を形成するマスク（不図示）が、コア・ゾーン１１５に中心がくるように、フォトレジスト層に隣接して配置される。フォトレジスト層は、マスクを介して紫外線のような適合する照射線源にさらされる。次に、フォトレジスト層を洗浄して、照射線源にさらされた部分以外のフォトレジスト層が除去される。フォトレジスト層のこの部分は、図７Ｂに示す円筒形フォトレジスト柱７１０として反射防止層７０２の表面に残される。

【００９３】

次に、約５分～約２０分間にわたって、ウェーハを約２５０～３００℃まで加熱する。フォトレジスト柱７１０を加熱すると、フォトレジストが溶解し、エッチング・マスク７１４が形成される。表面張力によって、溶融フォトレジストは、図７Ｃに示す平滑な凸形状を呈することになる。ウェーハの冷却につれて、フォトレジストが固化する時、エッチ

10

20

30

40

50

ング・マスクは、その凸形状を保持する。

【0094】

次に、図7Dの矢印716によって示されるように、イオン・ミリングまたは反応イオン・エッチング(RIE)を用いて、ウェーハにドライ・エッチングが施され、エッチング・マスク714の厚さプロファイルが反射防止層702に転写される。例えば、ウェーハに、50～100Wのパワーで、アルゴン・イオンによる衝撃を加えることが可能である。ドライ・エッチングによって、エッチング・マスクと、エッチング・マスクによる保護が施されないか、あるいは、エッチング・マスクによる保護の量が少ない、反射防止層702の領域718が除去される。領域718の深さプロファイルは、エッチング・マスクの形状、及び、反射防止層の材料とエッチング・マスクのフォトレジスト材料とのエッチング・レート の比によって決まる。

10

【0095】

ドライ・エッチングによって、図7Eに示すプロファイルの反射防止層702が残される。凸状表面323Bによって囲まれた輪郭形成損失制御素子319Bは、上方ミラー領域311のコア・ゾーン115に中心がくる。輪郭形成損失制御素子は、上方ミラー領域の表面347を被覆する反射防止層のゾーン720によって囲まれている。反射防止材料は、ゾーン720における厚さが約 $\lambda/4n_4$ である。

【0096】

次に、図7Fに示すように、反射防止層702の表面724に対して新たなフォトレジスト層722が塗布される。

20

【0097】

その境界が破線726によって表示された、図3Bに示す環状電極331の形状を形成するマスク(不図示)が、コア・ゾーン115に中心がくるように、フォトレジスト層722に隣接して配置される。フォトレジスト層は、マスクを介して紫外線のような適合する照射線源にさらされる。次に、フォトレジスト層を洗浄して、マスクによって画定されるフォトレジスト層の部分が除去される。この結果、環状開口部728が形成され、反射防止層702の表面724の環状部分729が露出する。反射防止層の表面の残りの部分は、図7Gに示すようにフォトレジスト層によって保護されたままである。

【0098】

次に、ウェーハに異方性エッチングが施され、この結果、環状開口部728を介して、反射防止層702の表面724の環状部分729が除去される。これによって、輪郭形成損失制御層319Bの最終形状が決まり、反射防止層に環状開口部730が形成され、図7Hに示すように、上方ミラー領域311の表面347の環状部分731が露出する。

30

【0099】

図7I及び7Jに示す追加ステップによって、輪郭形成損失制御層319Bの最終形状を決めるフォトレジスト層722を利用して、電極331の形状を決めることも可能になる。例えば、蒸着によって、金のような金属層732の被着が行われる。金属層732の被着は、フォトレジスト層が上方ミラー領域の表面347を保護している、フォトレジスト層722の表面734に対して施され、また、図7Iに示すように、開口部730によって露出した上方ミラー領域の表面347の環状部分731に対して施される。

40

【0100】

最後に、フォトレジスト層722を溶解する溶剤中においてウェーハの洗浄が行われる。フォトレジスト層を溶解することによって、フォトレジスト層722の表面734に被着した金属層732の部分736も除去されるが、上方ミラー領域の表面347の環状部分731に被着した金属層の部分は環状電極331として残される。環状電極は、図7Jに示すように、輪郭形成損失制御層319Bを包囲しており、電極の発光ポート329は、輪郭形成損失制御層の周辺部357に隣接している。

【0101】

蒸着、CVD、または、他の適合する方法によって、交互に高屈折率と低屈折率になった、それぞれ、均一な厚さ $\lambda/4n_3$ (ここで、 n_3 は、層の材料の屈折率である)を有する

50

誘電体材料の追加層を湾曲表面 3 2 3 B に被着させることにより、それぞれ、図 4 B 及び 4 D に示す実施例の誘電体ミラー 4 4 9 B または 4 4 9 D を形成することが可能になる。誘電体ミラーは、二酸化珪素 SiO_2 と二酸化チタン TiO_2 の交互層、または、二酸化珪素 SiO_2 と窒化珪素 Si_3N_4 の交互層から形成されるのが望ましい。

【0102】

上述のプロセスは、図 1 A 及び 2 に示す実施例の半導体層 1 1 9 における凹状表面、図 1 B に示す実施例の誘電体層 1 1 9 B における凹状表面 1 2 3 B、図 3 A に示す実施例の輪郭形成損失制御層 3 1 9 A における凹状表面 3 2 3 A、及び、それぞれ、図 4 A 及び 4 C に示す実施例の輪郭形成損失制御層 4 1 9 A 及び 4 1 9 C における凹状表面 4 2 3 A 及び 4 2 3 C の形成に適応することが可能である。こうした凹状表面を形成するため、上方ミラー領域の表面に、損失制御層として、半導体、誘電体、または、反射防止材料の層を適宜被着させ、その上にフォトレジストの層が塗布される。用いられるフォトレジストは、溶融すると、損失制御層の表面を濡らすものでなければならない。図 7 B に示すものと同様のマスク及び溶剤プロセスを利用して、コア・ゾーン 1 1 5 に重なるフォトレジスト層に円形の開口部が形成される。フォトレジスト層が、図 7 C に示すステップで加熱することによって溶融すると、溶融したフォトレジストが、開口部に流入し、コア・ゾーンに中心がくる凹状くぼみが形成される。次に、図 7 D に示すドライ・エッチング・ステップを用いて、フォトレジスト層の凹状くぼみのプロファイルがその下に位置する損失制御層に転写される。

【0103】

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。

【0104】

(実施態様 1)

光学軸に沿って高輝度単モード光ビームを放射するための VCSEL (垂直共振型面発光レーザ) であって、該 VCSEL は以下 (a) 及び (b) を含むことを特徴とする、

(a) 光学損失を有する光学空洞であって、該光学空洞は以下 (a - 1) ないし (a - 3) を含む、

(a - 1) 第 1 のミラー領域及び第 2 のミラー領域であって、該第 1 のミラー領域及び該第 2 のミラー領域は伝導性であり逆の伝導モードを有し、

(a - 2) 前記第 1 のミラー領域と前記第 2 のミラー領域の間に挟まれた面発光領域であって、該面発光領域は光学軸に対して垂直であり、

(a - 3) 前記発光領域の平面における前記光学空洞の側方限界を形成するための手段、

(b) 損失決定手段であって、該損失決定手段は前記光学空洞に結合され、前記光学軸からの側方距離が増すのに応じて前記光学空洞の光学損失を漸進的に増大させる。

【0105】

(実施態様 2)

前記損失判定手段には、屈折、側方拡散、又は、集束ずれによって、前記光学軸からの側方距離が増すのに応じて、前記光学空洞の前記光学損失を漸進的に増大させるための手段が含まれることを特徴とする実施態様 1 に記載の VCSEL。

【0106】

(実施態様 3)

前記損失判定手段には、前記光学軸からの側方距離が増すのに応じて漸進的に増大する反射損失を前記光学空洞の光に加えるための手段が含まれることを特徴とする、実施態様 1 に記載の VCSEL。

【0107】

(実施態様 4)

前記発光領域に、量子井戸が 1 つだけしか含まれていないことを特徴とする、実施態様 1 に記載の VCSEL。

【0108】

(実施態様 5)

光学軸に沿って高輝度単モード光ビームを放射するためのV C S E L（垂直共振型面発光レーザ）であって、該V C S E Lは以下（a）及び（b）を含むことを特徴とする、

（a）光学損失を有する光学空洞であって、該光学空洞は以下（a - 1）ないし（a - 3）を含む、

（a - 1）第1のミラー領域及び第2のミラー領域であって、該第1のミラー領域及び該第2のミラー領域は伝導性であり逆の伝導モードを有し、

（a - 2）前記第1のミラー領域と前記第2のミラー領域の間に挟まれた面発光領域であって、該面発光領域は光学軸に対して垂直であり、

（a - 3）前記発光領域の平面における前記光学空洞の側方限界を形成するための手段、

（b）活性領域から遠隔である、前記第1のミラー領域の表面上の輪郭形成損失制御層であって、該輪郭形成損失制御層は、前記第1のミラー領域から遠隔で、中心がほぼ光学軸に位置する湾曲表面を有する。

10

【0109】

（実施態様6）

前記輪郭形成損失制御層に、前記発光領域において発生する光に対して透明な半導体材料が含まれていることと、前記湾曲表面が半導体材料に形成されることを特徴とする実施態様5に記載のV C S E L。

【0110】

（実施態様7）

前記輪郭形成損失制御層に、前記発光領域において発生する光に対して透明な誘電体材料が含まれていることと、湾曲表面が誘電体材料に形成されることを特徴とする、実施態様5に記載のV C S E L。

20

【0111】

（実施態様8）

実施態様5に記載のV C S E Lであって、前記輪郭形成損失制御層が、以下の（a）ないし（c）の特徴を有するV C S E L、

（a）反射防止材料を含んでおり、

（b）前記光学軸における厚さが約 $m / 2 n_4$ であり、

（c）前記光学軸と前記輪郭形成損失制御層の周辺部分との間で、約 $\pm / 4 n_4$ だけ漸進的に厚さが変化し、前記周辺部分は前記光学空洞の側方限界に隣接して位置し、ここで、 λ が前記発光領域に発生した光の波長であり、 m が偶数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である。

30

【0112】

（実施態様9）

前記第1のミラー領域に、直列に構成された、伝導性ミラー及び誘電体ミラーが含まれていることと、前記輪郭形成損失制御層が、前記伝導性ミラーと前記誘電体ミラーの間に挟まれていることを特徴とする実施態様5に記載のV C S E L。

【0113】

（実施態様10）

実施態様9のV C S E Lであって、該V C S E Lは、以下（a）及び（b）を含むことを特徴とする、

40

（a）前記誘電体ミラーは、交互層をなす、第1の屈折率を有する高屈折率誘電体材料、及び、前記第1の屈折率より低い第2の屈折率を有する低屈折率誘電体材料が含み、

（b）前記輪郭形成損失制御層は、反射防止材料を有しており、前記光学軸と前記光学空洞の側方限界に対応する側方距離との間において約 $\pm / 4 n_4$ だけ厚さが漸進的に変化する、ここで、 λ が前記発光領域に発生した光の波長であり、 m が偶数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である。

【0114】

（実施態様11）

実施態様10に記載のV C S E Lであって、以下の（a）及び（b）であることを特徴と

50

するVCSEL、

(a) 前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料が、前記第2の屈折率より前記第1の屈折率に近い屈折率を有していることと、

(b) 前記輪郭形成損失制御層の厚さが、光学軸において約 $m / 2 n_4$ であり、ここで、 m が前記発光領域に発生した光の波長であり、 m が偶数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である

【0115】

(実施態様12)

前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料に、高屈折率誘電体材料が含まれていることを特徴とする実施態様11に記載のVCSEL。

10

【0116】

(実施態様13) 実施態様10に記載のVCSELであって、該VCSELは以下(a)及び(b)であることを特徴とする、

(a) 前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料が、前記第1の屈折率より前記第2の屈折率に近い屈折率を有していることと、

(b) 前記輪郭形成損失制御層の厚さが、前記光学軸において約 $p / 4 n_4$ であり、ここで、 p が前記発光領域に発生した光の波長であり、 p が奇数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である

【0117】

(実施態様14)

前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料に、低屈折率誘電体材料が含まれていることを特徴とする、実施態様13に記載のVCSEL。

20

【0118】

(実施態様15)

前記発光領域に、量子井戸が1つだけしか含まれていないことを特徴とする、実施態様5に記載のVCSEL。

【0119】

(実施態様16)

光学軸に沿って高輝度単モード光ビームを放射するためのVCSEL(垂直共振型面発光レーザ)であって、該VCSELは以下(a)及び(b)を含むことを特徴とする、

30

(a) 光学損失を有する光学空洞であって、該光学空洞は以下(a-1)ないし(a-3)を含む、

(a-1) 第1のミラー領域及び第2のミラー領域であって、該第1のミラー領域及び該第2のミラー領域は伝導性であり逆の伝導モードを有し、前記第1のミラー領域は、直列に配置された多層伝導性ミラーと多層誘電体ミラーを含み、

(a-2) 前記伝導性ミラー領域と前記第2のミラー領域の間に挟まれた面発光領域であって、該面発光領域は光学軸に対して垂直であり、

(a-3) 前記発光領域の平面における前記光学空洞の側方限界を形成するための手段、

(b) 前記伝導性ミラーと前記誘電体ミラーの間に挟まれた反射防止材料からなる輪郭形成損失制御層であって、該輪郭形成損失制御層は

40

前記光学軸と前記光学空洞の側方限界に対応する側方距離との間において約 \pm $/ 4 n_4$ だけ厚さが漸進的に変化し、ここで、 m が前記発光領域に発生した光の波長であり、 n_4 が前記輪郭形成損失制御層の屈折率である。

【0120】

(実施態様17)

前記誘電体ミラーに、交互層をなす、第1の屈折率を有する高屈折率誘電体材料、及び、第1の屈折率より低い第2の屈折率を有する低屈折率誘電体材料が含まれていることを特徴とする、実施態様16に記載のVCSEL。

【0121】

(実施態様18)

50

実施態様 17 に記載の VCSEL であって、該 VCSEL は以下の (a) 及び (b) であることを特徴とする、

(a) 前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料が、前記第 2 の屈折率よりも前記第 1 の屈折率に近い屈折率を有することと、

(b) 前記輪郭形成損失制御層が、前記光学軸において約 $m / 2 n_4$ であり、ここで、
が前記発光領域に発生した光の波長であり、 m が偶数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である。

【0122】

(実施態様 19)

実施態様 17 に記載の VCSEL であって、該 VCSEL は、以下の (a) 及び (b) であることを特徴とする、 10

(a) 前記輪郭形成損失制御層の前記反射防止材料が、前記第 1 の屈折率より前記第 2 の屈折率に近い屈折率を有していることと、

(b) 前記輪郭形成損失制御層の厚さが、前記光学軸において約 $p / 4 n_4$ であり、ここで、
が前記発光領域に発生した光の波長であり、 p が奇数であり、 n_4 が前記反射防止材料の屈折率である。

【0123】

(実施態様 20)

前記発光領域に、量子井戸が 1 つだけしか含まれていないことを特徴とする、実施態様 16 に記載の VCSEL。 20

【0124】

この開示は、例証となる本発明の実施例について詳述したものであるが、もちろん、本発明は、解説の実施例にそのまま制限されるものではなく、付属の実施態様によって規定される本発明の範囲内において、さまざまな修正を実施することが可能である。

【図面の簡単な説明】

【図 1 A】輪郭形成損失制御素子が半導体の層である、本発明による VCSEL の第 1 の実施例を示す図である。

【図 1 B】輪郭形成損失制御素子が誘電体の層である、本発明による VCSEL の第 1 の実施例のバリエーションを示す図である。

【図 2】上方ミラー領域に 2 つのミラー素子が含まれる、本発明による VCSEL の第 2 の実施例を示す図である。 30

【図 3 A】輪郭形成損失制御素子が反射防止材料の凹状層である、本発明による VCSEL の第 3 の実施例を示す図である。

【図 3 B】輪郭形成損失制御素子が反射防止材料の凸状層である、本発明による VCSEL の第 3 の実施例を示す図である。

【図 3 C】図 3 A 及び 3 B に示す実施例、及び、図 4 A ~ 4 D に示す実施例に関する光学軸からの側方距離に応じた反射率の変動を示すグラフである。

【図 4 A】上方ミラー領域に 2 つのミラー素子が含まれる、本発明による VCSEL の第 3 及び第 4 の実施例に関するバリエーションを示す図である。

【図 4 B】上方ミラー領域に 2 つのミラー素子が含まれる、本発明による VCSEL の第 3 及び第 4 の実施例に関するバリエーションを示す図である。 40

【図 4 C】上方ミラー領域に 2 つのミラー素子が含まれる、本発明による VCSEL の第 3 及び第 4 の実施例に関するバリエーションを示す図である。

【図 4 D】上方ミラー領域に 2 つのミラー素子が含まれる、本発明による VCSEL の第 3 及び第 4 の実施例に関するバリエーションを示す図である。

【図 5】従来の VCSEL を示す図である。

【図 6】VCSEL のしきい値が、活性領域における量子井戸の数が異なるミラー領域の反射率に従ってどのように変動するかを示すグラフである。

【図 7 A】図 3 B に示す本発明による VCSEL の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。 50

【図 7 B】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

【図 7 C】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

【図 7 D】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

【図 7 E】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

【図 7 F】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

10

【図 7 G】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

【図 7 H】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

【図 7 I】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

【図 7 J】図 3 B に示す本発明による V C S E L の実施例の輪郭形成損失制御層を作製するために用いるプロセスを示す図である。

【符号の説明】

1 0 1、2 0 1、3 0 1：垂直空洞発光レーザ (V C S E L)

20

1 0 3：光学空洞

1 0 5：光学軸

1 0 7：下方ミラー領域

1 0 9：面発光領域

1 1 1、2 1 1、3 1 1、4 1 1：上方ミラー領域

1 1 3：低反射率ゾーン

1 1 5：コア・ゾーン

1 1 7、2 1 7、3 1 7、4 1 7：損失決定素子

1 1 9、3 1 9、4 1 9：輪郭形成損失制御層

1 2 1：損失制御層の表面

30

1 2 3：凹状表面

1 2 5：活性領域

1 2 7：基板

1 2 9、3 2 9：発光ポート

1 3 1、1 4 3：電極

1 3 3、1 3 5：層

1 3 7：下方クラディング層

1 3 9：上方クラディング層

1 4 1：p タイプ表面層

1 4 5：基板の背面

40

1 4 7、3 4 7：上方ミラー領域の表面

1 5 9：境界

2 2 3、3 2 3、4 2 3：湾曲表面

2 4 7：伝導性ミラーの表面

2 4 9、4 4 9：誘電体ミラー

2 5 2、2 5 3、4 5 1、4 5 3：層

2 6 5、4 6 5：伝導性ミラー

3 3 1：電極

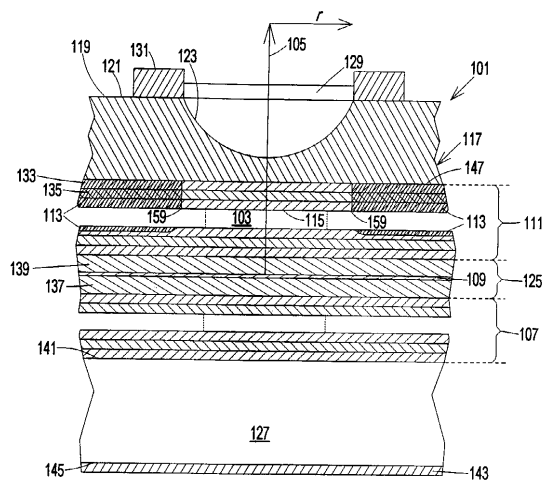
3 5 5：電流拡散層

3 5 7：周辺部

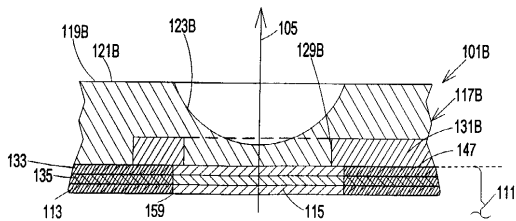
50

- 3 6 1 : 表面部分
- 4 5 7 : 周辺部
- 4 6 3 : 高屈折率・低屈折率境界
- 7 0 2 : 反射防止材料の層
- 7 0 4 : フォトリソスト層
- 7 0 6、7 2 4 : 反射防止層の表面
- 7 0 8、7 2 6 : 境界
- 7 2 2 : フォトリソスト層
- 7 2 8、7 3 0 : 環状開口部
- 7 2 9、7 3 1 : 環状部分

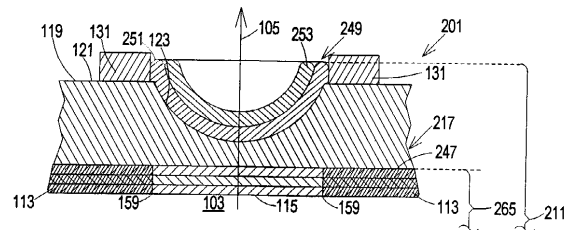
【図 1 A】



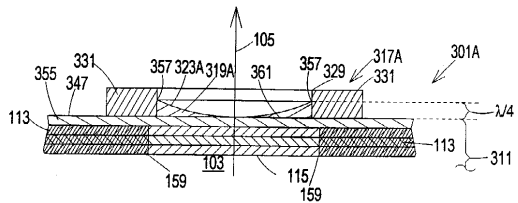
【図 1 B】



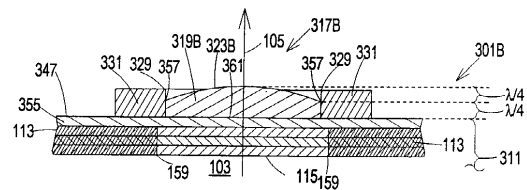
【図 2】



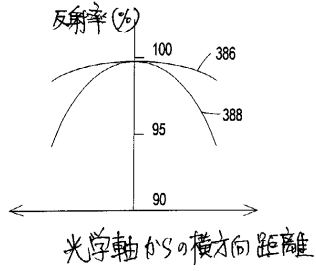
【図 3 A】



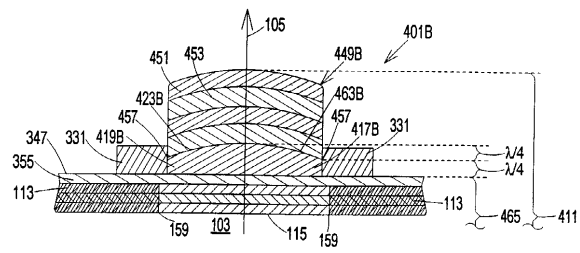
【図 3 B】



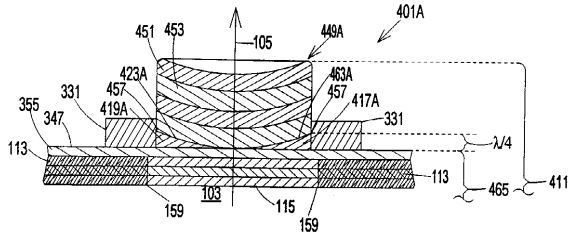
【図 3 C】



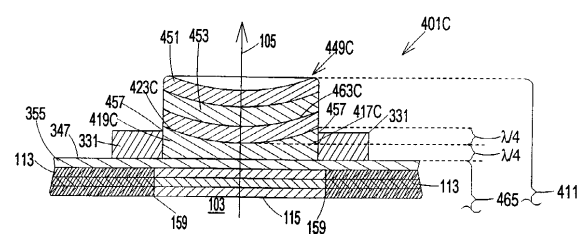
【図 4 B】



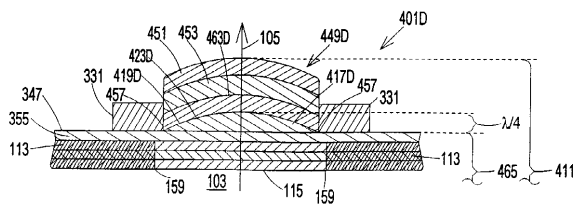
【図 4 A】



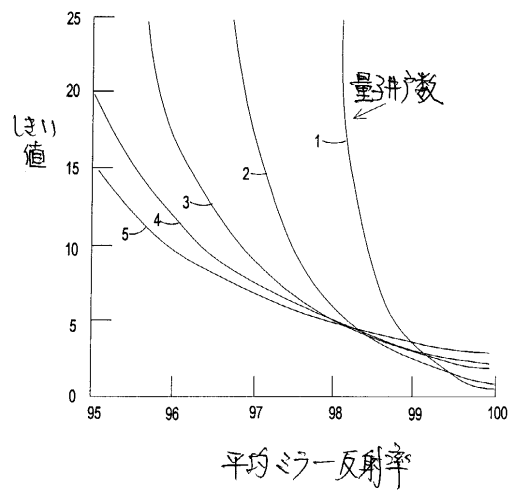
【図 4 C】



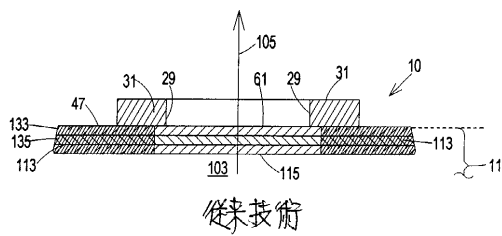
【図 4 D】



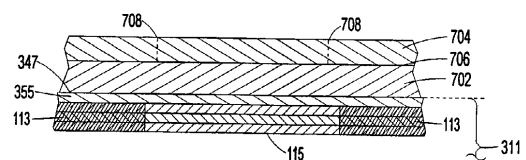
【図 6】



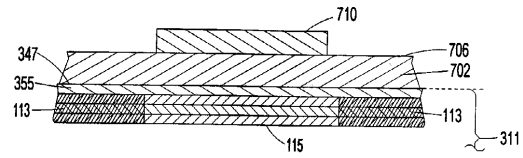
【図 5】



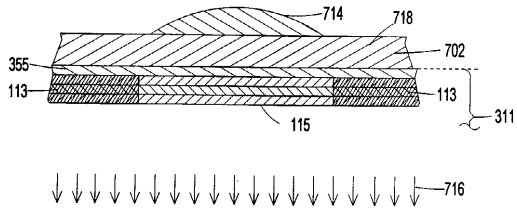
【図 7 A】



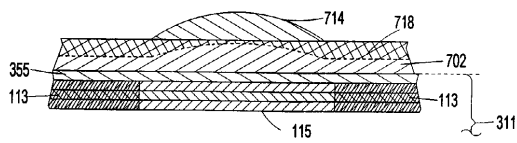
【 図 7 B 】



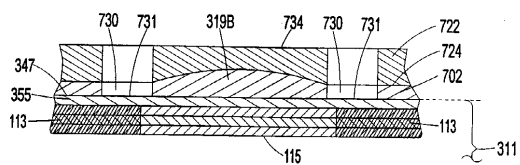
【 図 7 C 】



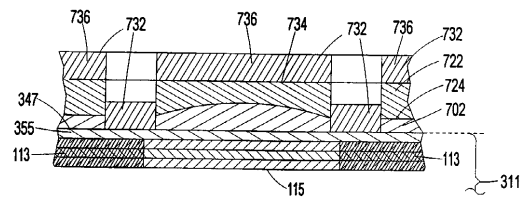
【 図 7 D 】



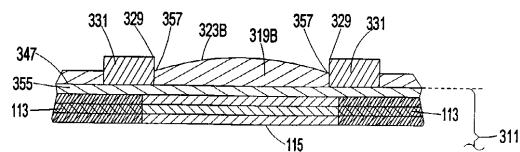
【 図 7 H 】



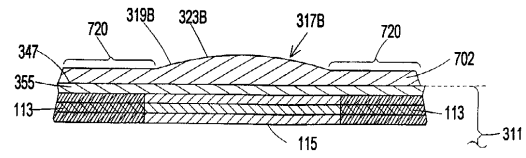
【圖 7 I】



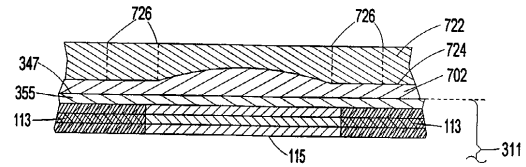
【 図 7 J 】



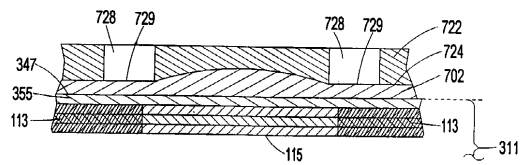
【 図 7 E 】



【 図 7 F 】



【 図 7 G 】



フロントページの続き

- (72)発明者 スコット・ダブリュ・コージン
アメリカ合衆国カリフォルニア州サニーベール、クレセント・アベニュー 628
- (72)発明者 ダブラフコ・アイ・バビック
アメリカ合衆国カリフォルニア州サニーベール、ダフォディル・コート 717C
- (72)発明者 リチャード・ピー・シュナイダー、ジュニア
アメリカ合衆国カリフォルニア州マウンテン・ビュー、チェリートリー・レーン 1759
- (72)発明者 マイケル・アール・ティ・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
- (72)発明者 シー・ユアン・ワン
アメリカ合衆国カリフォルニア州バロアルト、エンシナ・グランデ 766

審査官 松崎 義邦

- (56)参考文献 特開平05-075207(JP,A)
特開平02-213186(JP,A)
特開平02-110988(JP,A)
特開平02-181988(JP,A)
特開昭60-042890(JP,A)
特開平05-021888(JP,A)
欧州特許出願公開第00712182(EP,A1)
特開平06-112587(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01S5/00-5/50