(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2015 年 12 月 10 日(10.12.2015)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2015/186462 A1

(51) 国際特許分類:
H01S 5/343 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2015/063183

(22) 国際出願日: 2015 年 5 月 7 日(07.05.2015)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2014-115751 2014 年 6 月 4 日(04.06.2014) JP

(71) 出願人: シャープ株式会社(SHARP KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒5458522 大阪府大阪市阿倍野区長池町２２番２２号 Osaka (JP). 国立大学法人東京大学(THE UNIVERSITY OF TOKYO) [JP/JP]; 〒1138654 東京都文京区本郷七丁目３番１号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 小谷 晃央(KOTANI, Teruhisa). 荒川 泰彦(ARAKAWA, Yasuhiko); 〒1138654 東京都文京区本郷七丁目３番１号 国立大学法人東京大学内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人深見特許事務所(FUKAMI PATENT OFFICE, P.C.); 〒5300005 大阪府大阪市北区中之島二丁目２番７号 中之島セントラルタワー Osaka (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

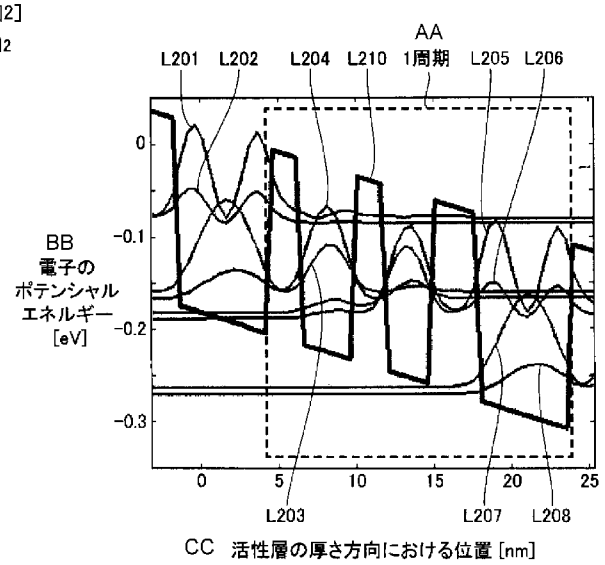
[続葉有]

(54) **Title**: QUANTUM CASCADE LASER

(54) 発明の名称 : 量子カスケードレーザ

[図2]

図2



AA 1 cycle
BB Potential energy of electron [eV]
CC Position in thickness direction of active layer [nm]

(57) **Abstract**: This QCL (10) is provided with: a first electrode (15); a first contact layer (11) which is in contact with the first electrode (15) and is formed of a first compound semiconductor; a second electrode (14) which has a polarity opposite to that of the first electrode (15); a second contact layer (13) which is in contact with the second electrode (14) and is formed of a second compound semiconductor; and an active layer (12) which is arranged between the first contact layer (11) and the second contact layer (13) and has two or more active layer units. Each active layer unit comprises at least one quantum well layer that is formed of a third compound semiconductor and at least one barrier layer that is formed of a fourth compound semiconductor, and is configured by alternately laminating one quantum well layer and one barrier layer. The oscillation energies of respective longitudinal optical phonons of the third compound semiconductor and the fourth compound semiconductor are larger than the oscillation energy of a longitudinal optical phonon of GaAs but equal to or less than the oscillation energy of a longitudinal optical phonon of AlN.

(57) 要約: ＱＣＬ（１０）は、第１電極（１５）と、第１電極（１５）に接し第１化合物半導体からなる第１コンタクト層（１１）と、第１電極（１５）とは反対の極性を有する第２電極（１４）と、第２電極（１４）に接し第２化合物半導体からなる第２コンタクト層（１３）と、第１コンタクト層（１１）と第２コンタクト層（１３）との間に配置され２つ以上の活性層ユニットを有する活性層（１２）とを備える。活性層ユニットのそれぞれは、第３化合物半導体からなる量子井戸層と第４化合物半導体からなるバリア層とを少なくとも１層ずつ有し、１層の量子井戸層と１層のバリア層とが交互に積層されて構成されている。第３化合物半導体及び第４化合物半導体のそれぞれの縦光学フォノンの振動エネルギーが、ＧａＡｓの縦光学フォノンの振動エネルギーよりも大きくＡＩＮの縦光学フォノンの振動エネルギー以下である。

WO 2015/186462 A1

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

明　細　書

発明の名称 ： 量子カスケードレーザ

技術分野

[0001] 本発明は、量子カスケードレーザに関する。

背景技術

[0002] 量子カスケードレーザ（Quantum Cascade Laser、以下では「ＱＣＬ」と記す）は赤外領域からテラヘルツ帯（３００ＧＨｚ～１０ＴＨｚ）までの電磁波を高出力で発生可能な光源として期待されており、その研究開発は近年加速している。特にテラヘルツ帯の電磁波を発生可能な光源としては、ＱＣＬを除いて有望な光源（化合物半導体からなる小型の光源）は存在しない。そのため、ＱＣＬは、テラヘルツ帯の電磁波を発生可能な最も有望な光源として期待されている。このようなＱＣＬでは、化合物半導体からなる多重量子井戸（Multiple Quantum Well、以下では「ＭＱＷ」と記す）構造の伝導帯サブバンド間又は価電子帯サブバンド間に反転分布を形成することによりレーザ発振が起こる。

[0003] 従来、ＧａＡｓ系材料、ＩｎＰ系材料又はＧａＳｂ系材料のいずれかを用いてテラヘルツ帯の電磁波を発生可能なＱＣＬを製造することが多かった。しかし、いずれの材料を用いた場合であっても、２００Ｋ以上の温度でのレーザ発振は報告されていない。

[0004] ２００Ｋ以上の温度でのレーザ発振を妨げている要因は、熱励起フォノン散乱である。熱励起フォノン散乱とは、レーザ上準位にある電子又は正孔（以下では「キャリア」と記す）が熱によって面内の運動エネルギーを得た結果、キャリアのエネルギーとレーザ下準位とのエネルギー差が縦光学（longitudinal optical、以下では「ＬＯ」と記す）フォノンの振動エネルギー以上になったときに、ＬＯフォノンにより散乱されて非輻射的にレーザ下準位に緩和することをいう。

[0005] 例えば約２ＴＨｚ（約９ｍｅＶ）の電磁波を発生させるＱＣＬ（量子井戸

層としてＧａＡｓ層を含む）では、レーザ上準位とレーザ下準位とのエネルギー差は約９ｍｅＶ（レーザ発振波長に相当するエネルギー）である。低温では、キャリアは、レーザ上準位のエネルギーバンドの底部分に多く存在する。そのため、レーザ上準位に存在するキャリアがＬＯフォノンにより散乱されてレーザ下準位に遷移することはない。

[0006] しかしながら、温度が上昇すると、キャリアは熱により励起され、その分布は例えば擬フェルミ分布に近づく。熱によりレーザ上準位のエネルギーバンドの底部分よりも上の準位に励起されたキャリアのエネルギーとレーザ下準位のエネルギーとの差が、そのＱＣＬの量子井戸層を構成する化合物半導体のＬＯフォノンの振動エネルギーに一致すると、熱により励起されたキャリアはＬＯフォノンにより散乱されてレーザ下準位に遷移する。この遷移は、レーザ上準位からレーザ下準位への誘導放出よりも高い確率で起こる。つまり、熱により励起されたキャリアは、電磁波の発生によってではなくＬＯフォノンによる散乱によってエネルギーを失う。それだけでなく、熱により励起されたキャリアがＬＯフォノンにより散乱されてレーザ下準位に遷移すると、エネルギーを失ったキャリアがレーザ下準位を占有するので、反転分布の発生が抑制される。これらのことから、レーザ発振が抑制される。

[0007] 例えば、上述のＱＣＬでは、レーザ上準位に存在するキャリアが熱によって約２７ｍｅＶのエネルギーを得ると、ＬＯフォノンによる散乱（非輻射遷移）が支配的となり、よって、レーザ発振が抑制される。ここで、ＬＯフォノンの振動エネルギーは材料に固有の物性値である。そのため、テラヘルツ帯の電磁波を発生可能なＱＣＬにおいて量子井戸層としてＧａＡｓ層を用いると、そのＱＣＬを室温で動作させることは困難である。

[0008] 特許文献１には、テラヘルツ帯の電磁波を発生可能なＱＣＬにおいて量子井戸層としてＧａＡｓとは異なる化合物半導体からなる層を用いることが提案されている。特許文献１では、量子井戸層としてＧａＮ層が用いられており、ＧａＮのＬＯフォノンの振動エネルギーは９０ｍｅＶ程度である。そのため、上述の熱励起フォノン散乱の発生を防止できると考えられる。

先行技術文献

特許文献

[0009] 特許文献1：特開２０１３－１７１８４２号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] 図１１には、特許文献１に開示されたＧａＮ系ＴＨｚ－ＱＣＬのスペクトル関数を示す。このＧａＮ系ＴＨｚ－ＱＣＬでは、ｃ面ＧａＮ層の上面にＡｌＧａＮ／ＧａＮ系のＭＱＷ構造が形成されており、図１１には、レーザ発振可能な程度にバイアス電圧が印加された状態のスペクトル関数を示す。図１１に示された１unitには、２つの量子井戸層が含まれている。レーザ発振可能な程度にバイアス電圧が印加された状態では、左側の量子井戸層のエネルギー準位（３）の方が右側の量子井戸層のエネルギー準位（２）よりも高い（図１１）。しかし、右側の量子井戸層の量子井戸幅の方が左側の量子井戸層の量子井戸幅よりも狭いので、量子閉じ込め効果は右側の量子井戸層の方が左側の量子井戸層よりも大きい。そのため、上述のバイアス電圧が印加されていない状態では、右側の量子井戸層のエネルギー準位（２）の方が左側の量子井戸層のエネルギー準位（３）よりも高くなる。つまり、バイアス電圧が印加されていない状態からレーザ発振可能な程度にバイアス電圧を印加する途中において、左側の量子井戸層の基底準位のエネルギーと右側の量子井戸層の基底準位のエネルギーとが略同一となる状態（共鳴状態）が存在する。

[0011] 共鳴状態では、左側の量子井戸層と右側の量子井戸層との間でトンネル現象によるキャリアの移動が生じるので、実質的に抵抗が下がる。つまり、共鳴状態よりもバイアス電圧が少し低い状態、及び、共鳴状態よりもバイアス電圧が少し高い状態では、共鳴状態よりも抵抗は高くなる。そのため、レーザ発振に必要なバイアス電圧未満のバイアス電圧が印加された状態において上述の共鳴状態が発生すると、レーザの動作が不安定となる。よって、特許

文献１に開示されたＱＣＬではＱＣＬの動作が不安定となり易いと予測できる。

[0012] また、特許文献１には、バリア層の構成に関する制約は何ら開示されていない。ＱＣＬでは、キャリアがバリア層をトンネリングすることにより動作するので、バリア層の構成は量子井戸層の構成と同様に重要である。バリア層の構成を適切に選定しなければ、バリア層に染み出したキャリアがレーザ上準位とレーザ下準位との間でＬＯフォノンによる散乱によって非輻射的に緩和され、よって、レーザ発振が抑制されることがある。

[0013] 本発明は、かかる点に鑑みてなされたものであり、その目的は、室温でも安定にレーザ発振可能なＱＣＬを提供することである。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明の量子カスケードレーザは、第１電極と、第１電極に接し第１化合物半導体からなる第１コンタクト層と、第１電極とは反対の極性を有する第２電極と、第２電極に接し第２化合物半導体からなる第２コンタクト層と、第１コンタクト層と第２コンタクト層との間に配置され２つ以上の活性層ユニットを有する活性層とを備える。活性層ユニットのそれぞれは、第３化合物半導体からなる量子井戸層と第４化合物半導体からなるバリア層とを少なくとも１層ずつ有し、１層の量子井戸層と１層のバリア層とが交互に積層されて構成されている。第３化合物半導体及び第４化合物半導体のそれぞれの縦光学フォノンの振動エネルギーが、ＧａＡｓの縦光学フォノンの振動エネルギーよりも大きくＡｌＮの縦光学フォノンの振動エネルギー以下である。

[0015] 第３化合物半導体は、$Al_{x3}In_{y3}Ga_{(1-x3-y3)}N$（０≦ｘ３≦１、０≦ｙ３≦１）であることが好ましい。第４化合物半導体は、$Al_{x4}In_{y4}Ga_{(1-x4-y4)}N$（０≦ｘ４≦１、０≦ｙ４≦１）であることが好ましい。第４化合物半導体のバンドギャップエネルギーは、第３化合物半導体のバンドギャップエネルギーよりも大きいことが好ましい。

[0016] 少なくとも１層のバリア層の厚さが１．８ｎｍ以上であることが好ましい。より好ましくは、厚さが１．８ｎｍ以上であるバリア層は、レーザ上準位

を構成する量子井戸層とレーザ下準位を構成する量子井戸層との間に設けられている。

[0017] 活性層に含まれる全てのバリア層は、１．８ｎｍ以上の厚さを有することが好ましく、６．５ｎｍ以下の厚さを有することが好ましい。

[0018] 活性層ユニットのそれぞれは、好ましくは３層以上の量子井戸層と３層以上のバリア層とを有し、より好ましくは３層の量子井戸層と３層のバリア層とを有する。

[0019] 量子井戸層の主面及びバリア層の主面は、それぞれ、好ましくは面方位（０００１）とは異なる面方位を有し、より好ましくは面方位（１－１００）に対するオフ角が±１°である面方位を有する。

[0020] 第１電極若しくは第２電極に接合される支持基板、又は、第１電極若しくは第２電極に電気的に接続される支持基板を更に備えることが好ましい。

[0021] 第１電極と第２電極との間には金属層が設けられていることが好ましい。金属層は、第１コンタクト層及び第２コンタクト層のうちの少なくとも１つの内部に設けられていることが好ましい。第１コンタクト層及び第２コンタクト層のうちの少なくとも１つは、金属層をマスクとする選択成長により形成されていることが好ましい。

発明の効果

[0022] 本発明のＱＣＬでは、室温でも安定にレーザ発振させることができる。

図面の簡単な説明

[0023] [図1]本発明の一実施形態のＱＣＬの断面図である。

[図2]本発明の一実施形態の活性層のエネルギーバンド構造及び波動関数の形状を示す図である。

[図3]本発明の一実施形態の活性層の利得スペクトルを示すグラフである。

[図4]本発明の一実施形態の活性層ユニット当たりに印加されるバイアス電圧と電流密度Ｊ及び光学利得の最大値との関係を示すグラフである。

[図5]本発明の一実施形態の活性層のエネルギーバンド構造及び波動関数の形状を示す図である。

[図6]本発明の一実施形態の活性層ユニット当たりに印加されるバイアス電圧と電流密度Ｊ及び光学利得の最大値との関係を示すグラフである。

[図7]本発明の一実施形態のＱＣＬの断面図である。

[図8]本発明の一実施形態のＱＣＬの断面図である。

[図9]本発明の一実施形態のＱＣＬの製造方法の一部を工程順に示す断面図である。

[図10]本発明の一実施形態のＱＣＬの断面図である。

[図11]特許文献１に開示されたＱＣＬのスペクトル関数を示すグラフである。

発明を実施するための形態

[0024] 以下、本発明について図面を用いて説明する。以下では、テラヘルツ帯の電磁波を発生させるＱＣＬについて示すが、本発明のＱＣＬはテラヘルツ帯の電磁波を発生させるＱＣＬに限定されない。なお、本発明の図面において、同一の参照符号は、同一部分又は相当部分を表すものである。また、長さ、幅、厚さ、深さ等の寸法関係は図面の明瞭化と簡略化のために適宜変更されており、実際の寸法関係を表すものではない。

[0025] ［第１の実施形態］

［ＱＣＬの構造］

図１は、本発明の第１の実施形態のＱＣＬ１０の断面図である。ＱＣＬ１０は、第１コンタクト層として機能する基板１１と、基板１１の上面に設けられた活性層１２と、活性層１２の上面に設けられた第２コンタクト層１３と、第２コンタクト層１３の上面に接する上部電極（第２電極）１４と、基板１１の下面に接する下部電極（第１電極）１５とを備える。活性層１２は、２つ以上の活性層ユニットが積層されて構成されている。活性層ユニットのそれぞれは、量子井戸層とバリア層とを少なくとも１層ずつ有し、１層の量子井戸層と１層のバリア層とが交互に積層されて構成されている。

[0026] ＱＣＬ１０では、幅が例えば１０μｍのメサ形状となるように基板１１の上面側の一部と活性層１２と第２コンタクト層１３とがエッチングされてお

り、これにより導波路が形成されている。ＱＣＬ１０の用途に応じて導波路の幅を変更することができ、「１０μｍ」はテラヘルツ帯の電磁波のシングルモード発振が可能な導波路の幅の一例に過ぎない。

[0027] ＜基板＞

基板１１は、化合物半導体（第１化合物半導体）からなる。第１化合物半導体は、好ましくは一般式$Al_{x1}In_{y1}Ga_{(1-x1-y1)}N$（０≦ｘ１≦１、０≦ｙ１≦１）で表される。より好ましくは、第１化合物半導体は、後述の量子井戸層に用いられる材料の格子定数に近い格子定数を有する材料であり、つまり、ＧａＮ、ＩｎＮ、後述の第４化合物半導体、又は、ＧａＮ又はＩｎＮの格子定数と第４化合物半導体の格子定数との間の格子定数を有する材料である。

[0028] 例えば、基板１１は、ｍ面自立ＧａＮ基板であることが好ましい。より好ましくは、基板１１は、その上面が面方位（１－１００）を有するようにカットされた後に研磨されたｍ面自立ＧａＮ基板である。これにより、結晶品質に優れたＡＩＧａＮ／ＧａＮ系のＭＱＷ構造を成長させることができる。基板１１は、その上面が面方位（１－１００）に対するオフ角が±１°である面方位を有するようにカットされた後に研磨されたｍ面自立ＧａＮ基板であっても良い。この場合であっても結晶品質に優れたＡＩＧａＮ／ＧａＮ系のＭＱＷ構造を成長させることができることを本発明者らは確認している。

[0029] 基板１１は、ｍ面自立ＩｎＮ基板であっても良い。より好ましくは、基板１１は、その上面が面方位（１－１００）を有するようにカットされた後に研磨されたｍ面自立ＩｎＮ基板である。これにより、結晶品質に優れたＩｎＧａＮ／ＩｎＮ系のＭＱＷ構造を成長させることができる。基板１１は、その上面が面方位（１－１００）に対するオフ角が±１°である面方位を有するようにカットされた後に研磨されたｍ面自立ＩｎＮ基板であっても良い。この場合であっても結晶品質に優れたＩｎＧａＮ／ＩｎＮ系のＭＱＷ構造を成長させることができることを本発明者らは確認している。

[0030] 基板１１は、ｎ型ドーパント（例えばＳｉ）を含むことが好ましい。これ

により、基板１１自体の抵抗を低減でき、また、基板１１と下部電極１５との接触抵抗も低減できる。基板１１におけるｎ型ドーパント濃度は、好ましくは１×１０^{17}／ｃｍ^{3}以上５×１０^{19}／ｃｍ^{3}以下であり、より好ましくは１×１０^{17}／ｃｍ^{3}以上３×１０^{18}／ｃｍ^{3}以下である。

[0031] このような基板１１の厚さ（基板１１と下部電極１５との接触面から基板１１と活性層１２との接触面までの距離）は、好ましくは０．１μｍ以上５００μｍ以下であり、より好ましくは０．１μｍ以上５０μｍ以下である。

[0032] ＜活性層＞

（量子井戸層）

活性層１２の量子井戸層は、化合物半導体（第３化合物半導体）からなる。第３化合物半導体は、そのＬＯフォノンの振動エネルギーがＧａＡｓのＬＯフォノンの振動エネルギーよりも大きくＡｌＮのＬＯフォノンの振動エネルギー以下である。

[0033] 第３化合物半導体のＬＯフォノンの振動エネルギーがＧａＡｓのＬＯフォノンの振動エネルギーよりも大きければ、熱によりレーザ上準位のエネルギーバンドの底部分よりも上の準位に励起されたキャリアのエネルギーとレーザ下準位のエネルギーとの差は、第３化合物半導体のＬＯフォノンの振動エネルギーよりも小さくなる。これにより、熱により励起されたキャリアがＬＯフォノンにより散乱されてレーザ下準位に遷移することを防止できる。つまり、熱により励起されたキャリアがＬＯフォノンによる散乱によってエネルギーを失うことを防止できる。よって、室温においてＱＣＬ１０を動作させた場合であっても非輻射遷移を防止できる。

[0034] また、熱により励起されたキャリアがＬＯフォノンにより散乱されてレーザ下準位に遷移することを防止できれば、エネルギーを失ったキャリアがレーザ下準位を占有することを防止できる。これにより、反転分布が形成され易くなるので、レーザ発振させることができる。以上のことから、ＱＣＬ１０では、室温でも安定にレーザ発振させることができる（後述の図３）。

[0035] 第３化合物半導体のＬＯフォノンの振動エネルギーがＡｌＮのＬＯフォノ

ンの振動エネルギー以下であれば、ＬＯフォノンによる散乱確率が高くなり過ぎることを防止できるので、不確定性原理に伴うエネルギーのブロードニングを抑制できる。これにより、エネルギーのブロードニングによる利得の低下を抑制できる。

[0036] このような第３化合物半導体は、好ましくは一般式$Al_{x3}In_{y3}Ga_{(1-x3-y3)}N$（０≦ｘ３≦１、０≦ｙ３≦１）で表され、より好ましくはＧａＮ、又は、基板１１の材料である第１化合物半導体の格子定数と近い格子定数を有するようにｘ３及びｙ３の少なくとも１つが調整された$Al_{x3}In_{y3}Ga_{(1-x3-y3)}N$である。基板１１がｍ面自立ＧａＮ基板等のＧａＮ基板である場合には、第３化合物半導体はＧａＮであることが好ましい。これにより、ＧａＮからなる量子井戸層の結晶品質を高めることができる。基板１１がｍ面自立ＩｎＮ基板等のＩｎＮ基板である場合には、第３化合物半導体はＩｎＮであることが好ましい。これにより、ＩｎＮからなる量子井戸層の結晶品質を高めることができる。

[0037] 量子井戸層の厚さは、好ましくは１ｎｍ以上１００ｎｍ以下であり、より好ましくは１ｎｍ以上６．５ｎｍ以下である。これにより、サブバンド間遷移による光学利得を得ることが可能となる。

[0038] 活性層ユニットのそれぞれにおいて、量子井戸層の厚さは、同一であっても良いし、異なっても良い。例えば、レーザ上準位を構成する量子井戸層の厚さは、好ましくは１ｎｍ以上７ｎｍ以下であり、より好ましくは１．５ｎｍ以上３．５ｎｍ以下である。レーザ下準位を構成する量子井戸層の厚さは、好ましくは１ｎｍ以上７ｎｍ以下であり、より好ましくは１．５ｎｍ以上３．５ｎｍ以下である。キャリア引き抜き準位を構成する量子井戸層の厚さは、好ましくは１ｎｍ以上２０ｎｍ以下であり、より好ましくは４ｎｍ以上１２ｎｍ以下である。

[0039] 量子井戸層の主面（バリア層が形成される量子井戸層の面）は、面方位（０００１）とは異なる面方位を有することが好ましい。これにより、量子井戸層の主面が面方位（０００１）を有する場合に比べて、ＱＣＬ１０におい

て内部電界を低く抑えることができる。よって、ＱＣＬ１０の設計が容易となる。また、活性層１２に含まれる複数の量子井戸層において厚さ又は組成がバラついたとしても、ＱＣＬ１０の性能低下を防止できる。

[0040] より好ましくは、量子井戸層の主面が面方位（１－１００）を有する。これにより、ＱＣＬ１０において内部電界を無視できる程度にまで低く抑えることができ、また、結晶成長が容易となる。よって、ＱＣＬ１０の設計が更に容易となる。なお、量子井戸層の主面が、面方位（１－１００）に対するオフ角が±１°である面方位を有する場合であっても、ＱＣＬ１０において内部電界を無視できる程度にまで低く抑えることができ、また、結晶成長が容易となるということを本発明者らは確認している。

[0041] （バリア層）

活性層１２のバリア層は、化合物半導体（第４化合物半導体）からなる。第４化合物半導体は、そのＬＯフォノンの振動エネルギーがＧａＡｓのＬＯフォノンの振動エネルギーよりも大きくＡｌＮのＬＯフォノンの振動エネルギー以下である。

[0042] 第４化合物半導体のＬＯフォノンの振動エネルギーがＧａＡｓのＬＯフォノンの振動エネルギーよりも大きければ、熱によりレーザ上準位のエネルギーバンドの底部分よりも上の準位に励起されたキャリアがバリア層に染み出した場合であっても、そのキャリアがＬＯフォノンによる散乱によってエネルギーを失うことを防止できる。これにより、室温においてＱＣＬ１０を動作させた場合であっても非輻射遷移を効果的に防止できる。

[0043] 第４化合物半導体のＬＯフォノンの振動エネルギーがＡｌＮのＬＯフォノンの振動エネルギー以下であれば、ＬＯフォノンによる散乱確率が高くなり過ぎることを防止できるので、不確定性原理に伴うエネルギーのブロードニングを抑制できる。これにより、エネルギーのブロードニングによる利得の低下を抑制できる。

[0044] このような第４化合物半導体は、一般式$Al_{x4}In_{y4}Ga_{(1-x4-y4)}N$（$0 \leqq x4 \leqq 1$、$0 \leqq y4 \leqq 1$）で表されることが好ましい。また、第４化合物半導体

は、量子井戸層を構成する第３化合物半導体よりも大きなバンドギャップエネルギーを有することが好ましい。これらのことから、第３化合物半導体がＧａＮである場合には、第４化合物半導体はＡｌＧａＮであることが好ましい。第３化合物半導体がＩｎＮである場合には、第４化合物半導体はＩｎＧａＮであることが好ましい。第３化合物半導体が$Al_{x3}Ga_{(1-x3)}N$（０＜ｘ３＜１）である場合には、第４化合物半導体はＡｌＮであることが好ましい。

[0045] バリア層の厚さは、好ましくは１ｎｍ以上１０ｎｍ以下であり、より好ましくは１．８ｎｍ以上６．５ｎｍ以下である。これにより、サブバンド間遷移による光学利得を得ることが可能となる。

[0046] 少なくとも１層のバリア層の厚さが１．８ｎｍ以上であることが好ましい。これにより、キャリアが弾性散乱（例えば不純物散乱又はラフネス散乱等）によって異なる準位へ非輻射的に遷移することを防止できるので、室温でのレーザ発振を更に安定化させることができる。より好ましくは、活性層１２に含まれる全てのバリア層の厚さが１．８ｎｍ以上である。これにより、キャリアが弾性散乱によって異なる準位へ非輻射的に遷移することを更に防止できるので、室温でのレーザ発振をより一層、安定化させることができる。

[0047] さらに好ましくは、厚さが１．８ｎｍ以上のバリア層は、レーザ上準位を構成する量子井戸層とレーザ下準位を構成する量子井戸層との間に設けられている。これにより、レーザ上準位の波動関数とレーザ下準位の波動関数とのオーバーラップが小さくなるので（後述の図２）、レーザ上準位からレーザ下準位への非輻射遷移（不純物散乱又はラフネス散乱等の弾性散乱による非輻射遷移）を防止できる。しかしながら一方で、バリア層の厚さが大きいためにレーザ上準位の波動関数とレーザ下準位の波動関数とのオーバーラップが小さくなりすぎると、誘導放出が効率良く生じ難くなる。したがって、バリア層の厚さを最適な厚さに調整する必要がある。このように、バリア層の厚さを最適な厚さに調整することによって、室温でのレーザ発振を更に安定化させることができる。より一層好ましくは、レーザ上準位を構成する量

子井戸層とレーザ下準位を構成する量子井戸層との間には、厚さが１．８ｎｍ以上３．０ｎｍ以下のバリア層が設けられている。

[0048] 活性層１２に含まれる全てのバリア層の厚さは６．５ｎｍ以下であることが好ましい。これにより、活性層ユニットのそれぞれの厚さが大きくなり過ぎることを防止できるので、低閾値でのレーザ発振が可能となる。活性層ユニットのそれぞれにおいて、バリア層の厚さは、同一であっても良いし、異なっても良い。

[0049] バリア層の主面（量子井戸層が形成されるバリア層の面）は、面方位（０００１）とは異なる面方位を有することが好ましい。これにより、バリア層の主面が面方位（０００１）を有する場合に比べて、ＱＣＬ１０において内部電界を低く抑えることができる。よって、ＱＣＬ１０の設計が容易となる。また、活性層１２に含まれる複数のバリア層において厚さ又は組成がバラついたとしても、ＱＣＬ１０の性能低下を防止できる。

[0050] より好ましくは、バリア層の主面が面方位（１－１００）を有する。これにより、ＱＣＬ１０において内部電界を無視できる程度にまで低く抑えることができ、また、結晶成長が容易となる。よって、ＱＣＬ１０の設計が更に容易となる。なお、バリア層の主面が、面方位（１－１００）に対するオフ角が±１°である面方位を有する場合であっても、ＱＣＬ１０において内部電界を無視できる程度にまで低く抑えることができ、また、結晶成長が容易となるということを本発明者らは確認している。

[0051] なお、活性層１２における活性層ユニットの個数は特に限定されない。また、活性層ユニットのそれぞれにおける量子井戸層の層数及びバリア層の層数は特に限定されない。

[0052] 好ましくは、活性層ユニットのそれぞれが３層以上の量子井戸層と３層以上のバリア層とを有する。これにより、レーザ発振閾値以下での抵抗の低下を抑制できるので、安定にレーザ発振させることができる。

[0053] より好ましくは、活性層ユニットのそれぞれが３層の量子井戸層と３層のバリア層とを有する。これにより、安定にレーザ発振させることができる。

それだけでなく、活性層ユニットのそれぞれにおける光学利得発生領域を大きく確保できるので、低閾値でのレーザ発振が可能となる。

[0054] 第３化合物半導体がＧａＮであり、第４化合物半導体がＡｌＧａＮであれば、バイアス電圧が、光学利得の最大値が最大となるときのバイアス値に上昇するまで、上述の共鳴状態の発生を防止できる場合がある（後述の図４参照）。これにより、室温でも、より一層安定にレーザ発振させることができる。

[0055] 第３化合物半導体がＩｎＮであり、第４化合物半導体がＩｎＧａＮであれば、上述の共鳴状態においても光学利得が存在する場合がある（後述の図６参照）。これにより、バイアス電圧を最適化すれば、室温でも、より一層安定にレーザ発振させることができる。

[0056] 活性層１２の厚さは、好ましくは０．５μｍ以上１００μｍ以下であり、より好ましくは１μｍ以上２０μｍ以下である。

[0057] ＜第２コンタクト層＞

第２コンタクト層１３は、化合物半導体（第２化合物半導体）からなる。第２化合物半導体は、好ましくは一般式$Al_{x2}In_{y2}Ga_{(1-x2-y2)}N$（０≦ｘ２≦１、０≦ｙ２≦１）で表される。より好ましくは、第２化合物半導体は、上述の量子井戸層に用いられる材料の格子定数に近い格子定数を有する材料であり、つまり、ＧａＮ、ＩｎＮ、上述の第４化合物半導体、又は、ＧａＮ又はＩｎＮの格子定数と第４化合物半導体の格子定数との間の格子定数を有する材料である。

[0058] 第２コンタクト層１３は、ｎ型ドーパント（例えばＳｉ）を含むことが好ましい。これにより、第２コンタクト層１３自体の抵抗を低減でき、また、第２コンタクト層１３と上部電極１４との接触抵抗も低減できる。第２コンタクト層１３におけるｎ型ドーパント濃度は、好ましくは１×１０^{17}／$ｃｍ^{3}$以上１×１０^{20}／$ｃｍ^{3}$以下であり、より好ましくは１×１０^{18}／$ｃｍ^{3}$以上５×１０^{19}／$ｃｍ^{3}$以下である。

[0059] このような第２コンタクト層１３の厚さは、好ましくは０．０５μｍ以上

３μｍ以下であり、より好ましくは０．１μｍ以上１μｍ以下である。

[0060] ＜上部電極、下部電極＞

上部電極１４は、第２コンタクト層１３とは良好なオーミック特性を有する金属材料からなることが好ましく、例えば、Ｔｉ層とＡｌ層とが積層されて構成されたオーミック電極である。上部電極１４は、Ｔｉ及びＡｌとは異なる金属からなっても良いし、透明な酸化物電極であっても良い。

[0061] 下部電極１５は、基板１１とは良好なオーミック特性を有する金属材料からなることが好ましく、例えば、Ｔｉ層とＡｌ層とが積層されて構成されたオーミック電極である。下部電極１５は、Ｔｉ及びＡｌとは異なる金属からなっても良いし、透明な酸化物電極であっても良い。

[0062] ＜効果の検証（その１）＞

シミュレーションによって本実施形態の効果を検証した。このシミュレーションでは、電子のハミルトニアンとして単一バンドハミルトニアンを仮定し、且つ、自己無撞着な計算方法でシュレディンガー方程式とポアソン方程式とを計算することにより、活性層ユニット当たりに約９５ｍｅＶのバイアス電圧を印加した場合の電子のポテンシャルエネルギー及び波動関数を算出した。その計算結果を図２に示す。

[0063] 図２では、横軸には活性層の厚さ方向における位置を表し、縦軸には電子のポテンシャルエネルギーを表す。点線で囲まれた「１周期」が１つの活性層ユニットを表す。Ｌ２０１～Ｌ２０８がエネルギー準位（算出結果）を表す。なお、Ｌ２０１～Ｌ２０８のそれぞれでは、縦軸の値が電子のポテンシャルエネルギーを表し、その形状が波動関数の形状を表す。また、Ｌ２１０が活性層のエネルギーバンド構造（算出結果）を表す。

[0064] シミュレーションでは、活性層として、１周期の活性層ユニット（１つの活性層ユニット）に周期境界条件を適用することによって多数の活性層ユニットが連結されてなる構造を用いた。上述の１周期の活性層ユニットは、３層の量子井戸層と３層のバリア層とを含んでおり、また、１層の量子井戸層と１層のバリア層とが交互に積層されて構成されていた。各量子井戸層の組

成及び厚さ、並びに、各バリア層の組成及び厚さは以下に示す通りであった。後述の「１層目」は、図２の点線で囲まれた領域において最も左側に位置する層である。また、後述の「６層目」は、図２の点線で囲まれた領域において最も右側に位置する層であり、電子を生成するために３×１０^{17}／ｃｍ^{3}のＳｉを含んでいた。

１層目（バリア層）　：$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$（厚さ２．０ｎｍ）

２層目（量子井戸層）：ＧａＮ（厚さ３．５ｎｍ）

３層目（バリア層）　：$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$（厚さ２．０ｎｍ）

４層目（量子井戸層）：ＧａＮ（厚さ３．０ｎｍ）

５層目（バリア層）　：$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$（厚さ３．０ｎｍ）

６層目（量子井戸層）：ＧａＮ（厚さ６．０ｎｍ）。

[0065] 図２に示すように、点線で囲まれた領域に含まれる活性層ユニットはエネルギー準位Ｌ２０３～Ｌ２０８を形成した。エネルギー準位Ｌ２０３及びＬ２０４はレーザ上準位であり、エネルギー準位Ｌ２０５及びＬ２０６はレーザ下準位であり、エネルギー準位Ｌ２０７及びＬ２０８はキャリア引き抜き準位である。なお、エネルギー準位Ｌ２０１及びＬ２０２は、点線で囲まれた領域に含まれる活性層ユニットよりも図２の左側に位置する活性層ユニットにおけるキャリア引き抜き準位である。

[0066] キャリアは、点線で囲まれた領域に含まれる活性層ユニットよりも図２の左側に位置する活性層ユニットからエネルギー準位Ｌ２０３及びＬ２０４へ注入されると、エネルギー準位Ｌ２０３及びＬ２０４からエネルギー準位Ｌ２０５及びＬ２０６へ向かって誘導放出される（発光遷移）。その後、キャリアは、トンネリングによって６層目の量子井戸層へ抜け、ＬＯフォノン（ＧａＮのＬＯフォノンの振動エネルギーは９２ｍｅＶである）により散乱されてエネルギー準位Ｌ２０７及びＬ２０８へ遷移する。エネルギー準位Ｌ２０７及びＬ２０８へ遷移したキャリアは点線で囲まれた領域に含まれる活性層ユニットよりも図２の右側に位置する活性層ユニットへ注入され、上述のプロセスが繰り返される。

[0067] 図２に示すように、上述の２層目がレーザ上準位を形成し、上述の４層目がレーザ下準位を形成する。ここで、２層目と４層目との間に位置する３層目の厚さは２．０ｍｍである。これにより、不純物散乱又はラフネス散乱等の弾性散乱によるレーザ上準位からレーザ下準位の非輻射遷移を抑制できる。このような効果はレーザ上準位を形成する量子井戸層とレーザ下準位を形成する量子井戸層との間に設けられたバリア層の厚さが１．８ｎｍ以上である場合に顕著となるということが、本発明者らによる計算によって明らかとなった。その理由としては、かかるバリア層の厚さが１．８ｎｍ以上であれば、レーザ上準位を形成する量子井戸層とレーザ下準位を形成する量子井戸層との結合が急激に弱くなるからである。別の言い方をすると、レーザ上準位の波動関数とレーザ下準位の波動関数とのオーバーラップが小さくなるからである（図２）。

[0068] 図３には、上述の活性層ユニット当たりに約９５ｍｅＶのバイアス電圧を印加した場合の光学利得を非平衡グリーン関数法により計算した結果を示す。この結果から、上述の活性層ユニットを備えるＱＣＬを３００Ｋで動作した場合であっても２．５～６ＴＨｚの広い周波数範囲で光学利得を有することが分かる。特に３．２～４．８ＴＨｚの周波数範囲では、光学利得は１０ｃｍ$^{-1}$を超えており、光学利得の最大値は１５ｃｍ$^{-1}$程度であった。よって、上述の活性層ユニットを備えたＱＣＬは室温でのレーザ発振に十分な光学利得を有することが分かった。

[0069] 図４には、上述の活性層ユニットを備えるＱＣＬを３００Ｋで動作させた場合において、活性層ユニット当たりに印加されるバイアス電圧と電流密度Ｊ及び光学利得の最大値との関係（計算結果）とを示す。図４では、Ｌ４０１が上述のバイアス電圧と電流密度Ｊとの関係を表し、Ｌ４０２が上述のバイアス電圧と光学利得の最大値との関係を表す。図４に示すように、バイアス電圧が、光学利得の最大値が最大となるときのバイアス値（約９５ｍｅＶ）に上昇するまで、電流密度Ｊの減少は確認されなかった。これらの結果から、上述の活性層ユニットを備えるＱＣＬは室温（３００Ｋ）での動作時に

おいてテラヘルツ帯の電磁波を安定して発振させることができると考えられる。

[0070] ＜効果の検証（その２）＞

活性層ユニットの構成を変更して本実施形態の効果を検証した。このシミュレーションでは、電子のハミルトニアンとして単一バンドハミルトニアンを仮定し、且つ、自己無撞着な計算方法でシュレディンガー方程式とポアソン方程式とを計算することにより、活性層ユニット当たりに約８０ｍｅＶのバイアス電圧を印加した場合の電子のポテンシャルエネルギー及び波動関数を算出した。その計算結果を図５に示す。

[0071] 図５では、横軸には活性層の厚さ方向における位置を表し、縦軸には電子のポテンシャルエネルギーを表す。点線で囲まれた「１周期」が１つの活性層ユニットを表す。Ｌ５０１～Ｌ５０８がエネルギー準位（算出結果）を表す。なお、Ｌ５０１～Ｌ５０８のそれぞれでは、縦軸の値が電子のポテンシャルエネルギーを表し、その形状が波動関数の形状を表す。また、Ｌ５１０が活性層のエネルギーバンド構造（算出結果）を表す。

[0072] 各量子井戸層の組成及び厚さ、並びに、各バリア層の組成及び厚さは以下に示す通りであった。後述の「１層目」は、図５の点線で囲まれた領域において最も左側に位置する層である。また、後述の「６層目」は、図５の点線で囲まれた領域において最も右側に位置する層であり、電子を生成するために3×10^{17}／cm^3のＳｉを含んでいた。

１層目（バリア層）　：$In_{0.9}Ga_{0.1}N$（厚さ４．０ｎｍ）

２層目（量子井戸層）：ＩｎＮ（厚さ６．０ｎｍ）

３層目（バリア層）　：$In_{0.9}Ga_{0.1}N$（厚さ４．０ｎｍ）

４層目（量子井戸層）：ＩｎＮ（厚さ５．０ｎｍ）

５層目（バリア層）　：$In_{0.9}Ga_{0.1}N$（厚さ５．０ｎｍ）

６層目（量子井戸層）：ＩｎＮ（厚さ１１．０ｎｍ）。

[0073] 図５に示すように、点線で囲まれた領域に含まれる活性層ユニットはエネルギー準位Ｌ５０３～Ｌ５０８を形成した。エネルギー準位Ｌ５０３及びＬ

５０４はレーザ上準位であり、エネルギー準位Ｌ５０５及びＬ５０６はレーザ下準位であり、エネルギー準位Ｌ５０７及びＬ５０８はキャリア引き抜き準位である。なお、エネルギー準位Ｌ５０１及びＬ５０２は、点線で囲まれた領域に含まれる活性層ユニットよりも図５の左側に位置する活性層ユニットにおけるキャリア引き抜き準位である。

[0074] キャリアは、点線で囲まれた領域に含まれる活性層ユニットよりも図５の左側に位置する活性層ユニットからエネルギー準位Ｌ５０３及びＬ５０４へ注入されると、エネルギー準位Ｌ５０３及びＬ５０４からエネルギー準位Ｌ５０５及びＬ５０６へ向かって誘導放出される（発光遷移）。その後、キャリアは、トンネリングによって６層目の量子井戸層へ抜け、ＬＯフォノン（ＩｎＮのＬＯフォノンの振動エネルギーは７２．６ｍｅＶである）により散乱されてエネルギー準位Ｌ５０７及びＬ５０８へ遷移する。エネルギー準位Ｌ５０７及びＬ５０８へ遷移したキャリアは点線で囲まれた領域に含まれる活性層ユニットよりも図５の右側に位置する活性層ユニットへ注入され、上述のプロセスが繰り返される。

[0075] 図５に示すように、上述の２層目がレーザ上準位を形成し、上述の４層目がレーザ下準位を形成する。ここで、２層目と４層目との間に位置する３層目の厚さは４．０ｍｍである。これにより、レーザ上準位の波動関数とレーザ下準位の波動関数とのオーバーラップが非常に小さいと考えられる。よって、不純物散乱又はラフネス散乱等の弾性散乱によるレーザ上準位からレーザ下準位の非発光遷移を抑制できる。

[0076] 上述の活性層ユニット当たりに約８０ｍｅＶのバイアス電圧を印加した場合の光学利得を非平衡グリーン関数法により計算すると、周波数が約３ＴＨｚのときに光学利得が最大（２０ｃｍ$^{-1}$）となることが分かった。

[0077] 図６には、上述の活性層ユニットを備えるＱＣＬを３００Ｋで動作させた場合において、活性層ユニット当たりに印加されるバイアス電圧と電流密度Ｊ及び光学利得の最大値との関係（計算結果）とを示す。図６では、Ｌ６０１が上述のバイアス電圧と電流密度Ｊとの関係を表し、Ｌ６０２が上述のバ

イアス電圧と光学利得の最大値との関係を表す。図６に示すように、バイアス電圧が、光学利得の最大値が最大となるときのバイアス値（約９０ｍｅＶ）に至る直前の約７３ｍｅＶにおいて電流密度Ｊの減少が確認された。そのため、活性層ユニット当たりに約９０ｍｅＶのバイアス電圧を印加した場合にはレーザ発振が不安定となるおそれがある。しかし、活性層ユニット当たりに約７３ｍｅＶのバイアス電圧を印加した場合であっても光学利得が存在する。そのため、室温下でも活性層ユニット当たりに約７３ｍｅＶのバイアス電圧を印加すればレーザ発振できると考えられる。

[0078] ［ＱＣＬの製造］

まず、例えば分子線エピタキシー法（ＭＢＥ（Molecular Beam Epitaxy）法）又は有機金属気相成長法（ＭＯＶＰＥ（metal organic vapor phase epitaxy））によって、基板１１の上面に活性層１２及び第２コンタクト層１３を形成する。次に、例えば電子線蒸着法によって、第２コンタクト層１３の上面に上部電極１４を形成し、基板１１の下面に下部電極１５を形成する。続いて、例えばＲＩＥ（Reactive Ion Etching）法によって、上部電極１４、第２コンタクト層１３、活性層１２及び基板１１の一部をエッチングして図１に示すメサ形状を形成する。このようにして図１に示すＱＣＬが得られる。

[0079] ［第２の実施形態］

図７は、本発明の第２の実施形態のＱＣＬ２０の断面図である。ＱＣＬ２０では、支持基板２１が上部電極１４の上面に設けられている。以下では、上記第１の実施形態とは異なる点を主に示す。

[0080] 支持基板２１は、上部電極１４に接合されている、又は、上部電極１４に電気的に接続されている。ＱＣＬ２０がこのような支持基板２１を備えていれば、基板１１の厚さを薄くすることができる。例えば、基板１１の厚さを１０μｍ以下とできる。これにより、上部電極１４と下部電極１５との距離が短くなるので、活性層ユニットにおける光学利得発生領域の割合を高めることができる。よって、レーザ発振の高効率化を実現できる。例えば、低閾

値でのレーザ発振が可能となる。

[0081] 次に示す方法にしたがってＱＣＬ２０を製造できる。まず、上記第１の実施形態に記載の方法にしたがって上部電極１４を形成した後、例えばＡｕＳｎ等のハンダを介して支持基板２１を上部電極１４の上面に固定する。次に、基板厚さが１０μｍ以下になるまで、基板１１の下面を研磨する。基板１１の下面を研磨する代わりに、レーザリフトオフ又は化学エッチング等によって基板１１の厚さを薄くしても良い。続いて、例えばＲＩＥ法によって、上部電極１４、第２コンタクト層１３、活性層１２及び基板１１を基板１１の下面側からエッチングする。その後、基板１１の下面に下部電極１５を形成する。

[0082] ［第３の実施形態］

［ＱＣＬの構造］

図８は、本発明の第３の実施形態のＱＣＬ３０の断面図である。以下では、上記第１の実施形態とは異なる点を主に示す。

[0083] ＜金属層＞

上部電極１４と下部電極１５との間には金属層３１が設けられている。これにより、電磁波の閉じ込め係数が大きくなるので、低閾値でのレーザ発振が可能となる。

[0084] 詳細には、テラヘルツ帯の電磁波は、波長が数十μｍ～数百μｍである。また、レーザ発振に必要な光学利得を有する活性層１２の厚さは数μｍ～十μｍであり、レーザ発振を効率良く行うためには電磁波を活性層１２の内部に閉じ込めておく必要がある。金属層３１が上部電極１４と下部電極１５との間に設けられていれば、テラヘルツ帯の電磁波を金属層３１と上部電極１４との間により一層強く閉じ込めることができる。これにより、ＱＣＬ１０に比べて電磁波と活性層１２との重なりを大きくすることができ、つまり、電磁波の閉じ込め係数が大きくなる。よって、低閾値でのレーザ発振が可能になる。

[0085] より好ましくは、金属層３１は、第１コンタクト層３２の内部に設けられ

ている。これにより、上述の効果を奏する金属層３１を容易に形成できる。

[0086] なお、金属層３１は、第２コンタクト層１３の内部に設けられていても良い。この場合には、テラヘルツ帯の電磁波を金属層３１と下部電極１５との間により一層強く閉じ込めることができる。これにより、ＱＣＬ１０に比べて電磁波と活性層１２との重なりを大きくすることができ、つまり、電磁波の閉じ込め係数を大きくできる。よって、低閾値でのレーザ発振が可能になる。また、金属層３１を容易に形成できる。

[0087] 金属層３１を構成する材料としては、活性層１２及び第２コンタクト層１３等の化合物半導体層を結晶成長させるときの成長温度においても変質しない金属（耐熱性に優れた金属）であることが好ましく、例えば、タングステン（Ｗ）又は銅（Ｃｕ）であることが好ましい。

[0088] このような金属層３１の厚さは、好ましくは０．０１μｍ以上１μｍ以下であり、より好ましくは０．０３μｍ以上０．２μｍ以下である。

[0089] ＜第１コンタクト層＞

第１コンタクト層３２は、好ましくは第２コンタクト層１３と同一の組成からなり、好ましくは第２コンタクト層１３と同一濃度のｎ型ドーパントを含み、好ましくは第２コンタクト層１３と同一の厚さを有する。

[0090] ［ＱＣＬの製造］

図９（ａ）及び（ｂ）は、ＱＣＬ３０の製造方法の一部を工程順に示す断面図である。まず、基板１１の上面に第１コンタクト層３２を形成した後、例えばスパッタ法により第１コンタクト層３２の上面全体に金属層を形成する。

[0091] 次に、フォトリソグラフィーによって金属層をパターン化してストライプ状の金属層３１を形成する（図９（ａ））。形成されるストライプは、第１コンタクト層３２を構成する化合物半導体の面方位（０００１）に対して平行又はその面方位（０００１）に対して垂直に延びていることが好ましい。金属層のパターン化により形成された開口の幅は約１μｍ程度であることが好ましく、金属層３１の幅は約２０μｍ程度であることが好ましい。

[0092] 続いて、第１コンタクト層３２を再成長させる。第１コンタクト層３２が横方向に成長することによって、金属層３１は第１コンタクト層３２の内部に埋め込まれる（図９（ｂ））。その後は、上記第１の実施形態に記載の方法にしたがって活性層１２、第２コンタクト層１３、上部電極１４及び下部電極１５を形成する。このようにしてＱＣＬ３０が得られる。

[0093] なお、従来、サファイア基板又はシリコン基板を利用した窒化物半導体の結晶成長において、金属又は絶縁体からなるマスクを用いて横方向の選択成長を促し、よって、高品質の薄膜を得るという技術については、広く知られている。この場合、上述のマスクは、活性層に対して、活性層とは異なる少なくとも１層を挟んで設けられた層の内部に設けられている。

[0094] また、基板１１として自立基板を用いた場合には、基板１１は高品質な結晶からなる。そのため、従来のマスクを用いて横方向の選択成長を促そうとすると、成長層には導電型ドーパントが不用意にドープされたり、また、成長層において結晶欠陥が増長することがある。

[0095] しかし、金属層３１は、電磁波の閉じ込め係数を大きくするために設けられているので、活性層１２に接する層（本実施形態では第１コンタクト層３２）の内部に設けられている。このように、金属層３１は、上述のマスクとは構成が異なる。

[0096] また、金属層３１をマスクに用いて第１コンタクト層３２を横方向に成長させるので、第１コンタクト層３２に導電型ドーパントが不用意にドープされることを防止でき、また、第１コンタクト層３２における結晶欠陥の増長を防止できる。

[0097] ［第４の実施形態］

図１０は、本発明の第４の実施形態のＱＣＬ４０の断面図である。以下では、上記第３の実施形態とは異なる点を主に示す。

[0098] 金属層３１は、第１コンタクト層３２を挟んで基板１１の上に設けられている。金属層３１は第１コンタクト層３２と電気的に接続されているので、金属層３１に電圧を直接印加できる。つまり、金属層３１を上記第１～第３

の実施形態の下部電極１５として用いることができる。

[0099] また、第１コンタクト層３２は、金属層３１をマスクとする選択成長により形成される。これらのことから、金属層３１は、第１コンタクト層３２を選択成長させるための層として機能し、電磁波の閉じ込め係数を大きくするための層として機能し、下部電極１５の代わりとして機能する。よって、金属層３１と第１コンタクト層３２とを容易に形成できる。

[0100] ［その他の実施形態］

基板１１は、ｍ面とは異なる面方位（例えばａ面（面方位（１１－２０））を有していても良い。また、基板１１としては、サファイア基板又はＳｉＣ基板の上面にｍ面自立ＧａＮ層又はｍ面自立ＩｎＮ層が形成された複合基板を用いても良い。

[0101] ＱＣＬの材料として従来用いられてきたＧａＡｓ系材料とＧａＮ系材料とでは、物性値又は性質等が大きく異なることが知られている。そのため、ＧａＮ系材料を用いてＱＣＬを製造する場合には、従来とは異なる設計指針でＱＣＬを製造する必要がある。

[0102] 特に、ＧａＮ系材料の有効質量は大きいので、ＧａＮ系材料の方がＧａＡｓ系材料よりもエネルギー準位のボケ（ブロードニング）は格段に大きい。そのため、ＧａＡｓ系材料を用いてＱＣＬを製造する場合と同様の設計指針でＧａＮ系材料を含むＱＣＬを製造すると、不具合の発生を招く。例えば、ＱＣＬの動作が不安定となったり、ＱＣＬでのレーザ発振が不可能となる。上述の実施形態で示した設計指針にしたがってＧａＮ系材料を含むＱＣＬを製造すれば、ＧａＮ系材料を含むＱＣＬを安定して動作させることができる。

[0103] ［実施形態の総括］

図１等に示すＱＣＬ１０は、第１電極１５と、第１電極１５に接し、第１化合物半導体からなる第１コンタクト層１１と、第１電極１５とは反対の極性を有する第２電極１４と、第２電極１４に接し、第２化合物半導体からなる第２コンタクト層１３と、第１コンタクト層１１と第２コンタクト層１３

との間に配置され、２つ以上の活性層ユニットを有する活性層１２とを備える。活性層ユニットのそれぞれは、第３化合物半導体からなる量子井戸層と第４化合物半導体からなるバリア層とを少なくとも１層ずつ有し、１層の量子井戸層と１層のバリア層とが交互に積層されて構成されている。第３化合物半導体及び第４化合物半導体のそれぞれの縦光学フォノンの振動エネルギーが、ＧａＡｓの縦光学フォノンの振動エネルギーよりも大きくＡｌＮの縦光学フォノンの振動エネルギー以下である。これにより、室温でも安定にレーザ発振させることができる。

[0104] 第３化合物半導体は、$Al_{x3}In_{y3}Ga_{(1-x3-y3)}N$（０≦ｘ３≦１、０≦ｙ３≦１）であることが好ましく、第４化合物半導体は、$Al_{x4}In_{y4}Ga_{(1-x4-y4)}N$（０≦ｘ４≦１、０≦ｙ４≦１）であることが好ましい。第４化合物半導体のバンドギャップエネルギーは、第３化合物半導体のバンドギャップエネルギーよりも大きいことが好ましい。これにより、量子井戸層及びバリア層の結晶成長が容易となる。

[0105] 少なくとも１層のバリア層の厚さが１．８ｎｍ以上であることが好ましい。これにより、キャリアが弾性散乱によって異なる準位へ非輻射的に遷移することを防止できる。

[0106] より好ましくは、厚さが１．８ｎｍ以上であるバリア層は、レーザ上準位を構成する量子井戸層とレーザ下準位を構成する量子井戸層との間に設けられている。これにより、レーザ上準位の波動関数とレーザ下準位の波動関数とのオーバーラップが小さくなる。

[0107] より一層好ましくは、活性層１２に含まれる全てのバリア層は、１．８ｎｍ以上の厚さを有する。これにより、キャリアが弾性散乱によって異なる準位へ非輻射的に遷移することを更に防止できる。

[0108] 活性層１２に含まれる全てのバリア層は、６．５ｎｍ以下の厚さを有することが好ましい。これにより、活性層ユニットの厚さが大きくなり過ぎることを防止できる。

[0109] 活性層ユニットのそれぞれは、３層以上の量子井戸層と３層以上のバリア

層とを有することが好ましい。これにより、レーザ発振閾値以下での抵抗の低下を抑制できる。

[0110] より好ましくは、活性層ユニットのそれぞれは、３層の前記量子井戸層と３層の前記バリア層とを有する。これにより、活性層ユニットのそれぞれにおける光学利得発生領域を大きく確保できる。

[0111] 量子井戸層の主面及びバリア層の主面は、それぞれ、面方位（０００１）とは異なる面方位を有することが好ましい。これにより、内部電界を低く抑えることができる。

[0112] より好ましくは、量子井戸層の主面及びバリア層の主面が面方位（１－１００）に対するオフ角が±１°である面方位を有する。これにより、内部電界を無視できる程度にまで低く抑えることができる。

[0113] 第１電極１５若しくは第２電極１４に接合される支持基板２１、又は、第１電極１５若しくは第２電極１４に電気的に接続される支持基板２１を更に備えることが好ましい。これにより、低閾値でのレーザ発振が可能となる。

[0114] 第１電極１５と第２電極１４との間には金属層３１が設けられていることが好ましい。これにより、電磁波の閉じ込め係数が大きくなる。より好ましくは、金属層３１は、第１コンタクト層３２及び第２コンタクト層１３のうちの少なくとも１つの内部に設けられている。

[0115] 第１コンタクト３２層及び第２コンタクト層１３のうちの少なくとも１つは、金属層３１をマスクとする選択成長により形成されていることが好ましい。これにより、第１コンタクト３２層又は第２コンタクト層１３と金属層３１とを容易に形成することができる。

[0116] 今回開示された実施の形態はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した説明ではなくて請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味及び範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

符号の説明

[0117] １０，２０，３０，４０ ＱＣＬ、１１ 基板、１２ 活性層、１３ 第

２コンタクト層、１４　上部電極、１５　下部電極、２１　支持基板、３１　金属層、３２　第１コンタクト層。

請求の範囲

[請求項1] 第１電極と、

前記第１電極に接し、第１化合物半導体からなる第１コンタクト層と、

前記第１電極とは反対の極性を有する第２電極と、

前記第２電極に接し、第２化合物半導体からなる第２コンタクト層と、

前記第１コンタクト層と前記第２コンタクト層との間に配置され、２つ以上の活性層ユニットを有する活性層とを備え、

前記活性層ユニットのそれぞれは、第３化合物半導体からなる量子井戸層と第４化合物半導体からなるバリア層とを少なくとも１層ずつ有し、１層の前記量子井戸層と１層の前記バリア層とが交互に積層されて構成され、

前記第３化合物半導体及び前記第４化合物半導体のそれぞれの縦光学フォノンの振動エネルギーが、ＧａＡｓの縦光学フォノンの振動エネルギーよりも大きくＡｌＮの縦光学フォノンの振動エネルギー以下である量子カスケードレーザ。

[請求項2] 前記第３化合物半導体は、$Al_{x3}In_{y3}Ga_{(1-x3-y3)}N$（０≦ｘ３≦１、０≦ｙ３≦１）であり、

前記第４化合物半導体は、$Al_{x4}In_{y4}Ga_{(1-x4-y4)}N$（０≦ｘ４≦１、０≦ｙ４≦１）であり、

前記第４化合物半導体のバンドギャップエネルギーは、前記第３化合物半導体のバンドギャップエネルギーよりも大きい請求項１に記載の量子カスケードレーザ。

[請求項3] 少なくとも１層の前記バリア層の厚さが１．８ｎｍ以上である請求項１又は２に記載の量子カスケードレーザ。

[請求項4] 前記厚さが１．８ｎｍ以上であるバリア層は、レーザ上準位を構成する量子井戸層とレーザ下準位を構成する量子井戸層との間に設けら

れている請求項３に記載の量子カスケードレーザ。

[請求項5] 前記活性層に含まれる全てのバリア層は、１．８ｎｍ以上の厚さを有する請求項１～４のいずれかに記載の量子カスケードレーザ。

[請求項6] 前記活性層に含まれる全てのバリア層は、６．５ｎｍ以下の厚さを有する請求項１～５のいずれかに記載の量子カスケードレーザ。

[請求項7] 前記活性層ユニットのそれぞれは、３層以上の前記量子井戸層と３層以上の前記バリア層とを有する請求項１～６のいずれかに記載の量子カスケードレーザ。

[請求項8] 前記活性層ユニットのそれぞれは、３層の前記量子井戸層と３層の前記バリア層とを有する請求項７に記載の量子カスケードレーザ。

[請求項9] 前記量子井戸層の主面及び前記バリア層の主面は、それぞれ、面方位（０００１）とは異なる面方位を有する請求項１～８のいずれかに記載の量子カスケードレーザ。

[請求項10] 前記量子井戸層の主面及び前記バリア層の主面は、それぞれ、面方位（１－１００）に対するオフ角が±１°である面方位を有する請求項９に記載の量子カスケードレーザ。

[請求項11] 前記第１電極若しくは前記第２電極に接合される支持基板、又は、前記第１電極若しくは前記第２電極に電気的に接続される支持基板を更に備える請求項１～１０のいずれかに記載の量子カスケードレーザ。

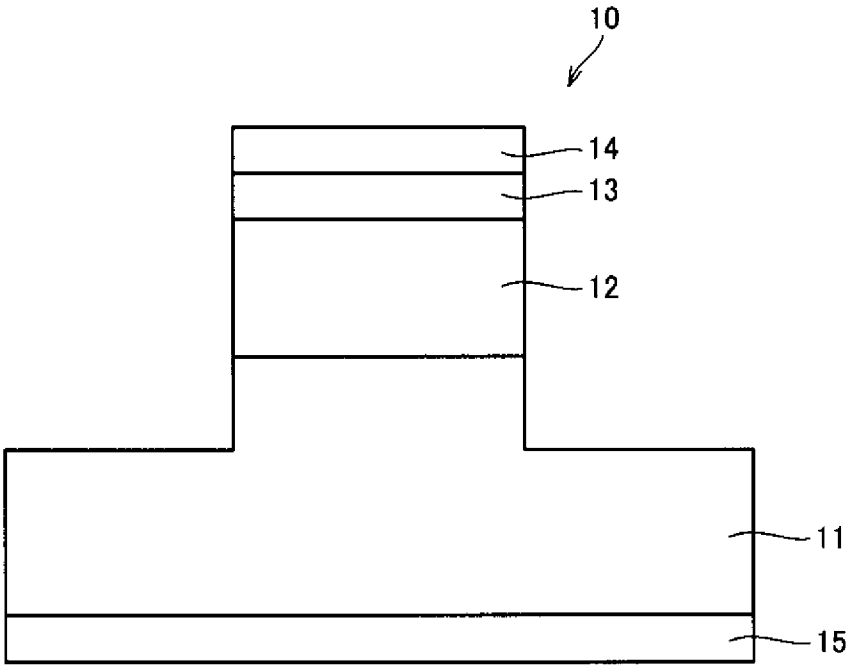
[請求項12] 前記第１電極と前記第２電極との間には金属層が設けられている請求項１～１１のいずれかに記載の量子カスケードレーザ。

[請求項13] 前記金属層は、前記第１コンタクト層及び前記第２コンタクト層のうちの少なくとも１つの内部に設けられている請求項１２に記載の量子カスケードレーザ。

[請求項14] 前記第１コンタクト層及び前記第２コンタクト層のうちの少なくとも１つは、前記金属層をマスクとする選択成長により形成されている請求項１３に記載の量子カスケードレーザ。

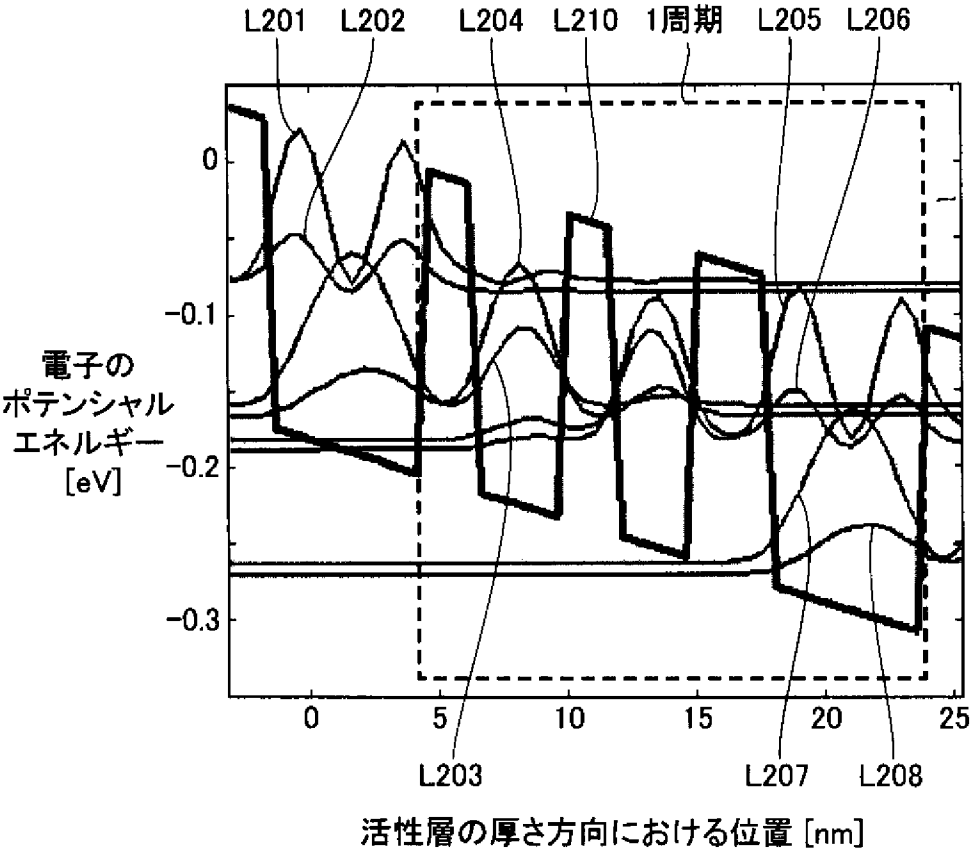
[図1]

図1


10
14
13
12
11
15

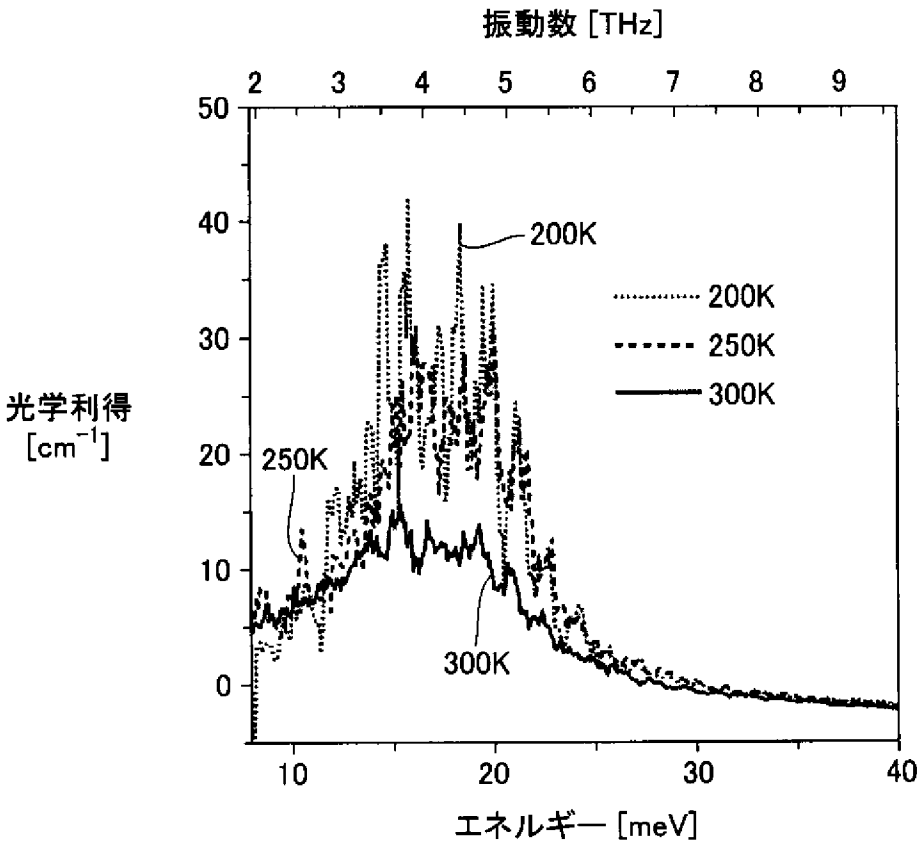
[図2]

図2


L201
L202
L204
L210
1周期
L205
L206
0
-0.1
-0.2
-0.3
電子の
ポテンシャル
エネルギー
[eV]
0
5
10
15
20
25
L203
L207
L208
活性層の厚さ方向における位置 [nm]

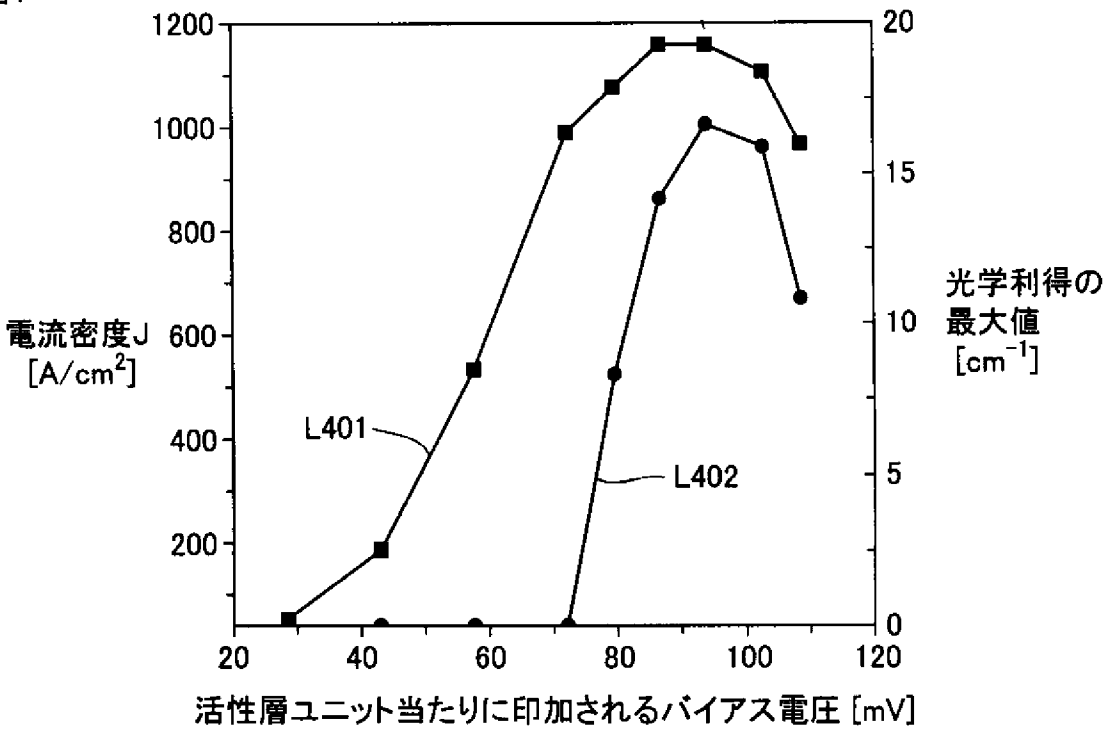
[図3]

図3


振動数 [THz]
2
3
4
5
6
7
8
9
50
40
30
20
10
0
光学利得
[cm^{-1}]
200K
250K
300K
200K
250K
300K
10
20
30
40
エネルギー [meV]

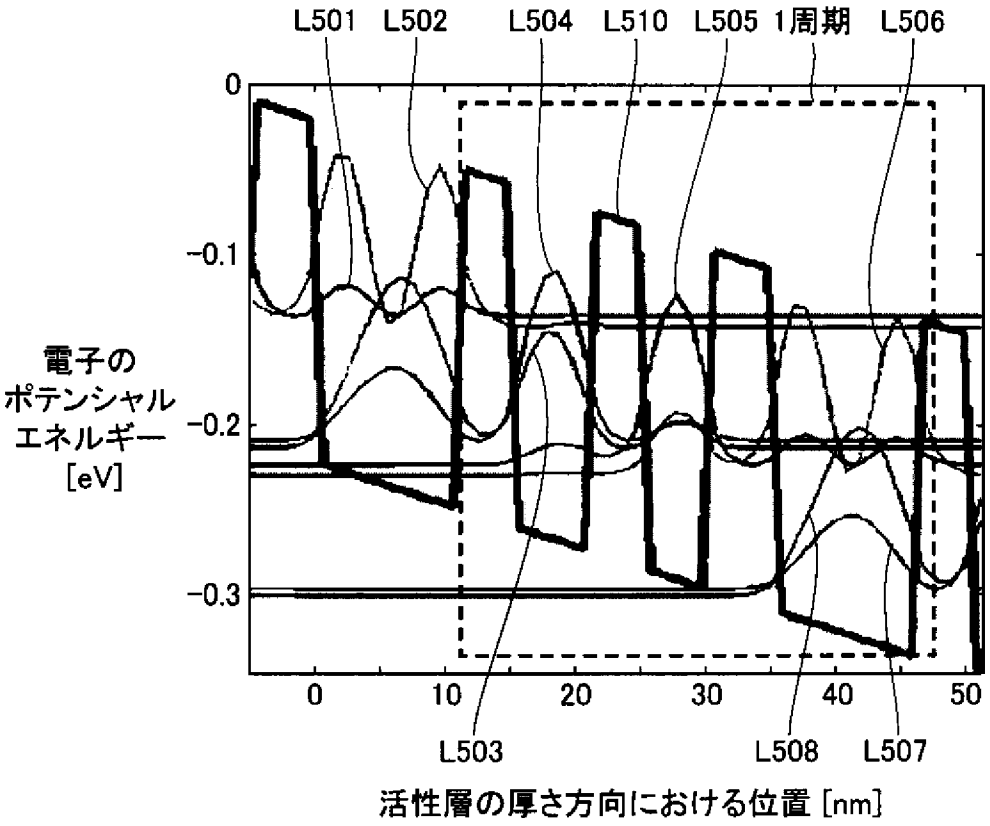
[図4]

図4


1200
1000
800
600
400
200
電流密度J
[A/cm^2]
20
15
10
5
0
光学利得の
最大値
[cm^{-1}]
L401
L402
20
40
60
80
100
120
活性層ユニット当たりに印加されるバイアス電圧 [mV]

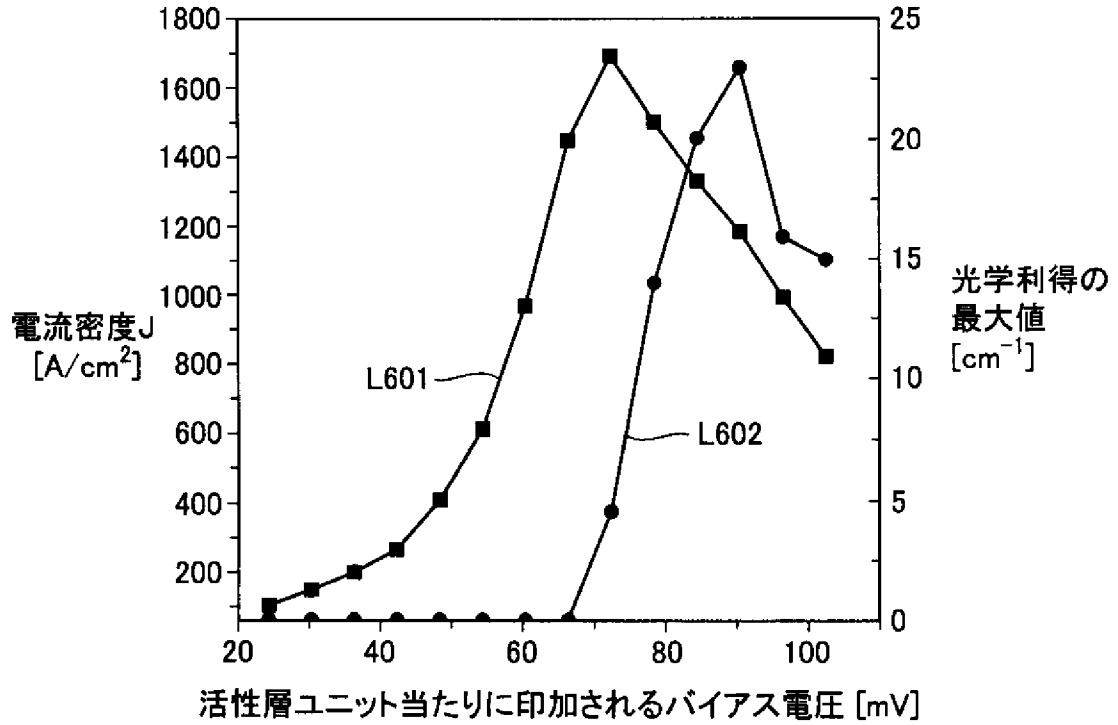
[図5]

図5


L501
L502
L504
L510
L505
1周期
L506
0
-0.1
-0.2
-0.3
電子の
ポテンシャル
エネルギー
[eV]
0
10
20
30
40
50
L503
L508
L507
活性層の厚さ方向における位置 [nm]

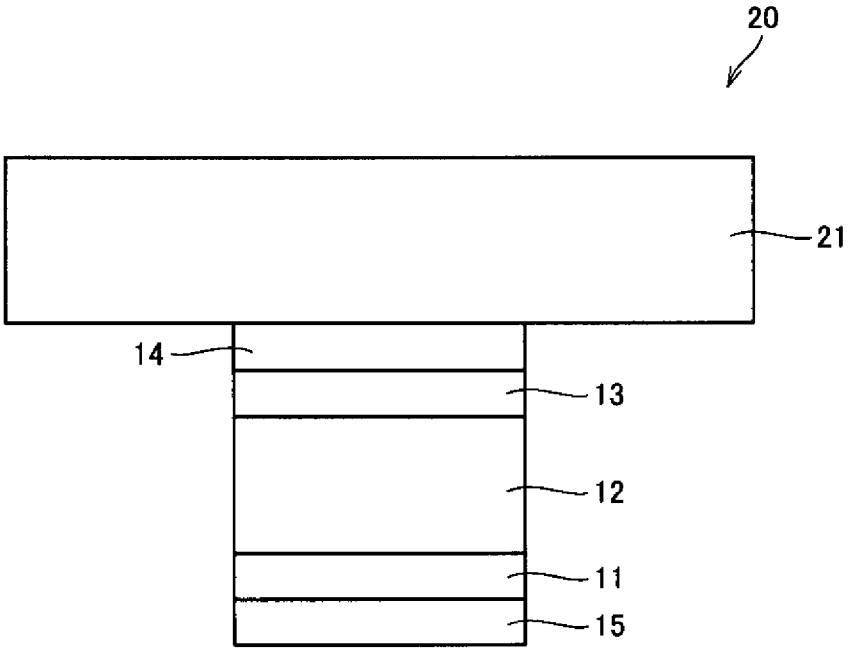
[図6]

図6


1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
電流密度J
[A/cm^2]
25
20
15
10
5
0
光学利得の
最大値
[cm^{-1}]
L601
L602
20
40
60
80
100
活性層ユニット当たりに印加されるバイアス電圧 [mV]

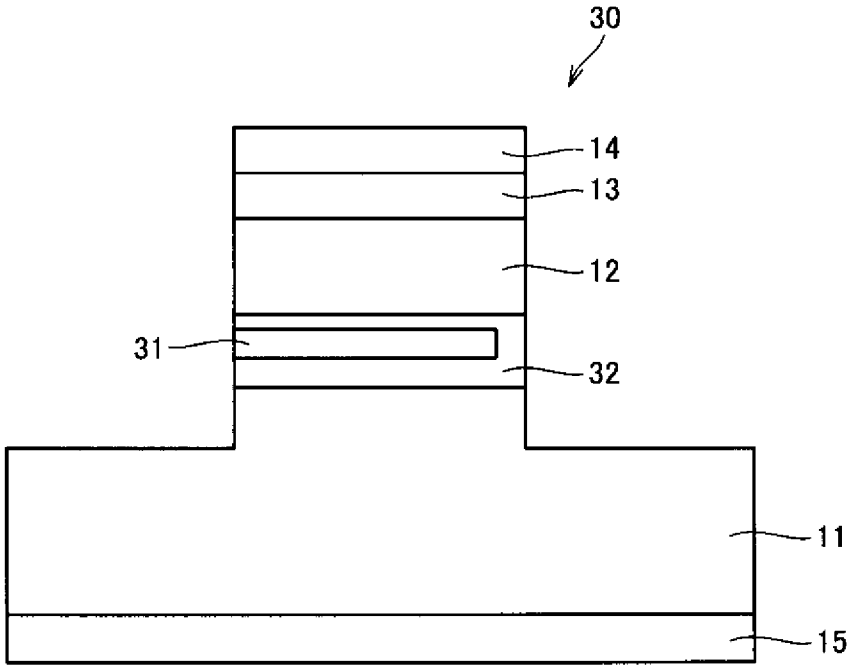
[図7]

図7



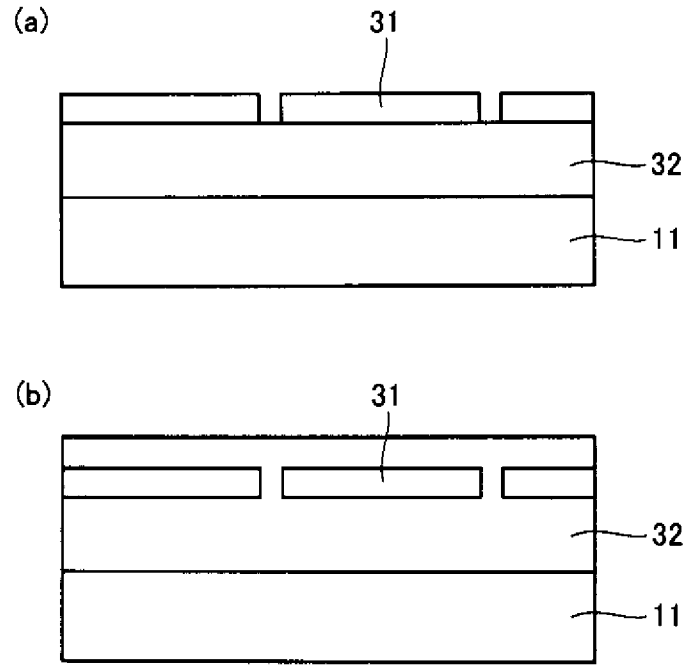
[図8]

図8



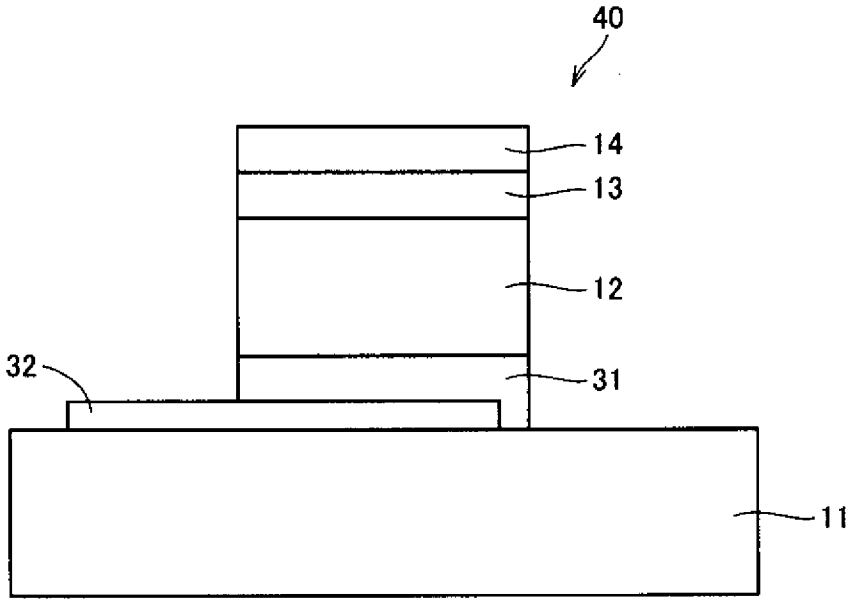
[図9]

図9



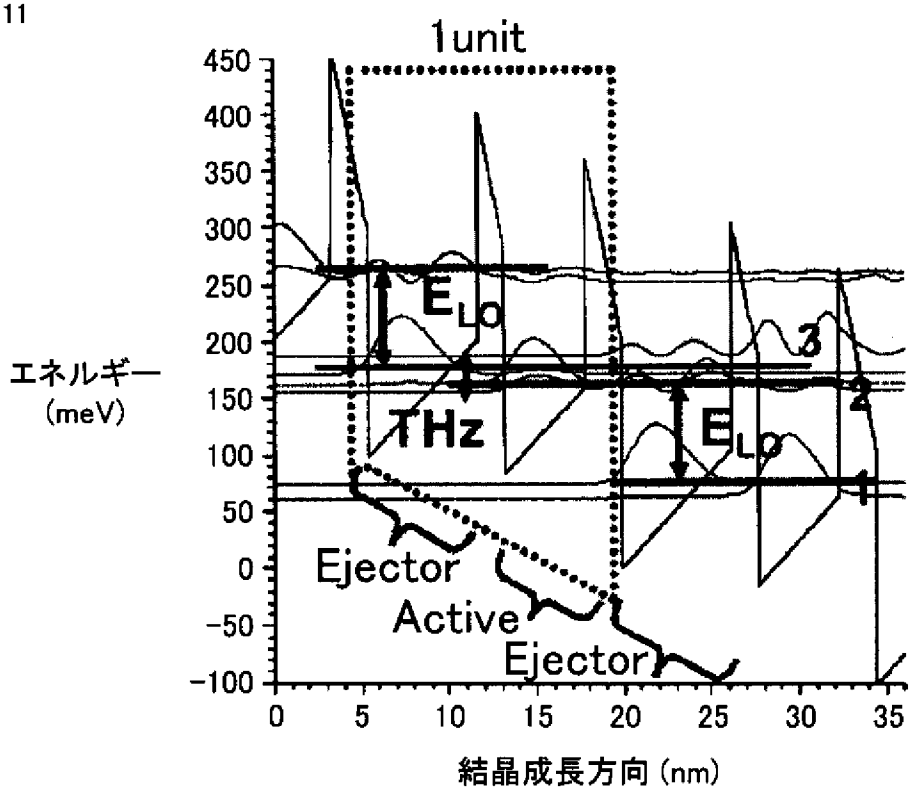
[図10]

図10



[図11]

図11


1unit
エネルギー
(meV)
450
400
350
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
0
5
10
15
20
25
30
35
結晶成長方向 (nm)
E_LO
THz
E_LO
3
2
1
Ejector
Active
Ejector

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2015/063183

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H01S5/343(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
H01S5/00-5/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2015
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2015 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2015

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JSTPlus(JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	V.D.JOVANOVIC,et.al., Simulation and design of GaN/AlGaN far-infrared quantum-cascade laser, Applied Physics Letters, 2004.04.19, Vol.84, No.16, pp.2995-2997	1,2,7,9,10 3-6,8,11-14
A	M.HOLTZ,et.al., Composition dependence of the optical phonon energies in hexagonal AlxGa1-xN, Journal of Applied Physics, 2001.06.15, Vol.89, No.12, pp.7977-7982	1-14
Y	JP 2011-035139 A (Hamamatsu Photonics Kabushiki Kaisha), 17 February 2011 (17.02.2011), entire text; all drawings (particularly, paragraphs [0071] to [0077], [0097] to [0099]) & US 2011/0026556 A1 & WO 2011/013432 A1 & EP 2461435 A1	3-6,8,11-14

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
09 July 2015 (09.07.15)	21 July 2015 (21.07.15)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3,Kasumigaseki,Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915,Japan	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2015/063183

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2006-032691 A (Canon Inc.), 02 February 2006 (02.02.2006), entire text; all drawings (particularly, paragraphs [0014] to [0030]; fig. 1) & US 2006/0039431 A1	3-6,8,11-14
Y	JP 2001-148545 A (Sharp Corp.), 29 May 2001 (29.05.2001), entire text; all drawings (particularly, paragraphs [0012], [0013], [0026]) (Family: none)	12-14
A	WO 2013/018824 A1 (Riken, Japan), 07 February 2013 (07.02.2013), entire text; all drawings (particularly, paragraphs [0032] to [0034], [0037]) & US 2014/0153603 A1 & WO 2013/018824 A1 & EP 2747221 A1 & CN 103797668 A & KR 10-2014-0066174 A	1-14
A	JP 2013-171842 A (National Institute of Information and Communications Technology), 02 September 2013 (02.09.2013), entire text; all drawings (particularly, paragraph [0025]) (Family: none)	1-14
A	JP 10-004242 A (Lucent Technologies Inc.), 06 January 1998 (06.01.1998), entire text; all drawings (particularly, paragraph [0025]) & US 5727010 A & EP 797280 A1	1-14

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１５／０６３１８３

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H01S5/343(2006.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H01S5/00-5/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０１５年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１５年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１５年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus（JDreamIII）

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
X	V.D.JOVANOVIC,et.al., Simulation and design of GaN/AlGaN far-infrared quantum-cascade laser, Applied Physics Letters, 2004.04.19, Vol.84, No.16, pp.2995-2997	1,2,7,9,10
Y		3-6,8,11-14
A	M.HOLTZ,et.al., Composition dependence of the optical phonon energies in hexagonal AlxGa1-xN, Journal of Applied Physics, 2001.06.15, Vol.89, No.12, pp.7977-7982	1-14

☑　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 ０９．０７．２０１５	国際調査報告の発送日 ２１．０７．２０１５
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 郵便番号１００－８９１５ 東京都千代田区霞が関三丁目４番３号	特許庁審査官（権限のある職員）　２Ｘ　３１５４ 佐藤　秀樹 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２９４

C（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
Y	JP 2011-035139 A (浜松ホトニクス株式会社) 2011.02.17, 全文、全図（特に、[0071]-[0077],[0097]-[0099]） & US 2011/0026556 A1 & WO 2011/013432 A1 & EP 2461435 A1	3-6,8,11-14
Y	JP 2006-032691 A (キヤノン株式会社) 2006.02.02, 全文、全図（特に、[0014]-[0030]、図1） & US 2006/0039431 A1	3-6,8,11-14
Y	JP 2001-148545 A (シャープ株式会社) 2001.05.29, 全文、全図（特に、[0012],[0013],[0026]） （ファミリーなし）	12-14
A	WO 2013/018824 A1 (独立行政法人理化学研究所) 2013.02.07, 全文、全図（特に、[0032]-[0034],[0037]） & US 2014/0153603 A1 & WO 2013/018824 A1 & EP 2747221 A1 & CN 103797668 A & KR 10-2014-0066174 A	1-14
A	JP 2013-171842 A (独立行政法人情報通信研究機構) 2013.09.02, 全文、全図（特に、[0025]） （ファミリーなし）	1-14
A	JP 10-004242 A (ルーセント　テクノロジーズ　インコーポレイテッド) 1998.01.06, 全文、全図（特に、[0025]） & US 5727010 A & EP 797280 A1	1-14