

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6818672号
(P6818672)

(45) 発行日 令和3年1月20日(2021.1.20)

(24) 登録日 令和3年1月5日(2021.1.5)

(51) Int. Cl.		F I	
HO 1 S	5/183	(2006.01)	HO 1 S 5/183
HO 1 S	5/34	(2006.01)	HO 1 S 5/34
HO 1 S	5/42	(2006.01)	HO 1 S 5/42
HO 1 S	5/14	(2006.01)	HO 1 S 5/14

請求項の数 8 (全 11 頁)

(21) 出願番号	特願2017-220739 (P2017-220739)	(73) 特許権者	000003078 株式会社東芝 東京都港区芝浦一丁目1番1号
(22) 出願日	平成29年11月16日(2017.11.16)	(74) 代理人	100108062 弁理士 日向寺 雅彦
(65) 公開番号	特開2019-91839 (P2019-91839A)	(72) 発明者	齋藤 真司 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
(43) 公開日	令和1年6月13日(2019.6.13)	(72) 発明者	高瀬 智裕 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
審査請求日	平成31年3月25日(2019.3.25)	(72) 発明者	橋本 玲 東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 面発光量子カスケードレーザ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

サブバンド間遷移を生じる量子井戸層を有しかつ赤外レーザ光を放出する活性層と、前記活性層の上に設けられかつピットが直方格子を構成するフォトリック結晶層を有する第1半導体層と、前記活性層の下方に設けられた第2半導体層と、を有する半導体積層体と、

前記第1半導体層の上面に設けられた上部電極と、
前記第2半導体層の下面のうち、少なくとも前記上部電極と重なる領域に設けられた下部電極と、

を備え、

前記第1半導体層の前記上面の側には前記フォトリック結晶層が設けられ、
前記ピットの開口端の平面形状は、前記平面形状の重心を通りかつ前記直方格子の2辺のそれぞれ平行な線に関して非対称であり、

平面視にて、前記半導体積層体は、前記フォトリック結晶層を含む面発光領域と、前記面発光領域の外縁から放射状に外側に向かって延在する電流注入領域と、を有し、

前記上部電極は、前記第1半導体層の前記上面のうち前記電流注入領域に設けられ、

前記面発光領域の外縁は、前記電流注入領域と前記面発光領域との間の領域から、前記電流注入領域の前記延在方向と交差する方向に延出する部分を含み、

前記活性層は、前記電流注入領域において前記上部電極と前記下部電極との間に流れる電流に基づき前記サブバンド間遷移により利得を発生させ、光共振を生じつつ前記面発光

領域の概ね垂直方向へ前記赤外レーザー光を放出可能とする、面発光量子カスケードレーザー。

【請求項 2】

前記電流注入領域は、前記第 1 半導体層の前記上面において、互いに直交する 2 つの直線に沿って設けられる、請求項 1 記載の面発光量子カスケードレーザー。

【請求項 3】

前記電流注入領域は、前記直方格子の前記 2 辺の少なくともいずれかに直交する、請求項 2 記載の面発光量子カスケードレーザー。

【請求項 4】

前記フォトリソニック結晶層の前記ピットを含む前記面発光領域を覆う金属層をさらに備え、
前記下部電極には前記金属層で反射された前記赤外レーザー光が外部に向かって放出可能な開口部が設けられ、

前記金属層の上面および前記上部電極の上面は、ヒートシンク取り付け面とされる、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 つに記載の面発光量子カスケードレーザー。

【請求項 5】

前記面発光領域の前記活性層の前記量子井戸層の一部は無秩序化された請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 つに記載の面発光量子カスケードレーザー。

【請求項 6】

前記面発光領域の前記活性層の前記量子井戸層の一部は酸化された請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 つに記載の面発光量子カスケードレーザー。

【請求項 7】

前記電流注入領域と前記面発光領域との間にテーパー共振器を有し、

前記赤外レーザー光は単一モードであり、

前記テーパー共振器のテーパー幅の最小領域は前記面発光領域に接続された、

請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 つに記載の面発光量子カスケードレーザー。

【請求項 8】

前記テーパー共振器が並列アレイ状に設けられた、請求項 7 記載の面発光量子カスケードレーザー。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、面発光量子カスケードレーザーに関する。

【背景技術】

【0002】

面発光量子カスケードレーザーは、TM (Transverse Magnetic) モードで発振し、かつ赤外線からテラヘルツ波長のレーザー光を放出する。

【0003】

光共振器は、活性層に近接して設けられた二次元フォトリソニック結晶により構成することができる。

【0004】

二次元フォトリソニック結晶を有する面発光量子カスケードレーザーは、活性層の表面に対して略垂直方向にレーザー光を放出可能な面発光型として動作する。

【0005】

電流注入部とフォトリソニック結晶部とが同一領域にある構造において、高出力を得るために動作電流を高めるとチップ動作温度が高くなるためにフォトリソニック結晶部の屈折率の変化が大きくなり光学特性が低下する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

10

20

30

40

50

【特許文献1】特開2014-197659号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

高出力時に光学特性が改善可能な面発光量子カスケードレーザを提供する。

【課題を解決するための手段】

【0008】

実施形態の面発光量子カスケードレーザは、半導体積層体と、上部電極と、下部電極と、を有する。前記半導体積層体は、サブバンド間遷移を生じる量子井戸層を有しかつ赤外レーザ光を放出する活性層と、前記活性層の上に設けられかつピット部が直方格子を構成するフォトリソニック結晶層を有する第1半導体層と、前記活性層の下方に設けられた第2半導体層と、を有する。前記上部電極は、前記第1半導体層の上面に設けられる。前記下部電極は、前記第2半導体層の下面のうち、少なくとも前記上部電極と重なる領域に設けられる。前記第1半導体層の前記上面の側には前記フォトリソニック結晶層が設けられる。前記ピット部の開口端の平面形状は、前記平面形状の重心を通りかつ前記直方格子の2辺のそれぞれ平行な線に関して非対称である。平面視にて、前記半導体積層体は、前記フォトリソニック結晶層を含む面発光領域と、前記面発光領域の外縁から放射状に外側に向かって延在する電流注入領域と、を有する。前記上部電極は、前記第1半導体層の前記上面のうち前記電流注入領域に設けられる。前記面発光領域の外縁は、前記電流注入領域と前記面発光領域との間の領域から、前記電流注入領域の前記延在方向と交差する方向に延出する部分を含む。前記活性層は、前記電流注入領域において前記上部電極と前記下部電極との間に流れる電流に基づき前記サブバンド間遷移により利得を発生させ、光共振を生じつつ前記面発光領域の概ね垂直方向へ前記赤外レーザ光を放出可能とする。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】図1(a)は第1の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図1(b)はA-A線に沿った模式正面図、である。

【図2】第1の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの面発光領域の模式斜視図である。

【図3】第1の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの上部電極を二次元格子領域の模式平面図である。

【図4】比較例にかかる面発光量子カスケードレーザである。

【図5】図5(a)は第2の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図5(b)はB-B線に沿った模式断面図、である。

【図6】図6(a)は第3の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図6(b)はM部を拡大した模式平面図、である。

【図7】図7(a)はpn接合型レーザダイオードにおける波長に対する利得・吸収または発光スペクトル依存性のグラフ図、図7(b)は量子カスケードレーザにおける波長に対する利得・吸収または発光スペクトル依存性のグラフ図、である。

【図8】図8(a)は量子カスケードレーザの電流注入時のエネルギーバンド図、図8(b)はゼロバイアス時のエネルギーバンド図、である。

【図9】図9(a)は第3の実施形態の変形例にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図9(b)はM部を拡大した模式平面図、である。

【図10】図10(a)は第4の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図10(b)は発光の遠視野像のグラフ図、である。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、図面を参照しつつ、本発明の実施形態について説明する。

図1(a)は第1の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図1(b)はA-A線に沿った模式正面図、である。

10

20

30

40

50

第1の実施形態の面発光量子カスケードレーザは、半導体積層体10と、上部電極50と、下部電極52と、を有する。

【0011】

半導体積層体10は、サブバンド間遷移を生じる量子井戸層を有しかつ赤外レーザ光を放出する活性層20と、活性層20の上に設けられかつ二次元回折格子を含むフォトリック結晶層を有する第1半導体層30と、前記活性層20の下方に設けられた第2半導体層39と、を有する。

【0012】

上部電極50は、第1半導体層30の上面に設けられる。下部電極52は、第2半導体層39の下面のうち、少なくとも上部電極50と重なる領域に設けられる。第1半導体層30の上面30aの側にはフォトリック結晶層31が設けられる。

10

【0013】

平面視にて、半導体積層体10は、フォトリック結晶層31を含む面発光領域70と、面発光領域70の外縁70aから放射状に外側に向かって延在する電流注入領域72と、を有する。すなわち、図1(b)に表すように、面発光領域70は、第1半導体層30の一部(フォトリック結晶層31を含む)と、活性層20の一部と、第2半導体層39の一部と、が、チップの中央部に積層された領域を表す。また、電流注入領域72は、第1半導体層30の他の一部と、活性層20の他の一部と、第2半導体層39の他の一部と、が、チップの外周部に積層された領域を表す。

【0014】

20

上部電極50は、第1半導体層30の上面30aのうち、電流注入領域72に設けられる。なお、図1(a)において、電流注入領域72は、第1半導体層30の上面30aにおいて、互いに直交する2つの直線に沿って設けられている。

【0015】

上部電極50と下部電極52との間に流れる電流Jにより電流注入領域72に含まれる活性層20はサブバンド間遷移を生じ、二次元回折格子により光共振を生じつつ面発光領域22の垂直方向へ赤外レーザ光80を放出可能とする。

【0016】

図1(b)に表すように、上部電極50と下部電極52との間に流れる電流Jにより、サブバンド間遷移を可能とし、電流注入領域72で発生する光L1、L2、L3は、面発光領域70に向かって進み、面発光領域70のフォトリック結晶層31により光共振を生じつつ面発光領域70の垂直方向へ向かって赤外レーザ光80を放出可能である。

30

【0017】

上部電極50は、第1半導体層30の上面30aから互いに直交する2つの直線に沿って外側に向かって延在するように、電流注入領域72の第1半導体層30上面に設けられてもよい。

【0018】

第1半導体層30は、活性層20の側にクラッド層を有してもよい。また、第2半導体層39は、活性層20の側にクラッド層39a、下部電極52の側に基板39bを有してもよい。

40

【0019】

図2は、第1の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの面発光領域の模式斜視図である。

また、図3は、第1の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの二次元格子領域の模式平面図である。

ピット63の平面形状は、平面形状の重心G1を通りかつ二次元直方格子の少なくとも1辺に平行な線(51または53)に関して非対称である。赤外レーザ光80は、活性層20に対して概ね垂直方向に放出される。なお、本明細書において、概ね垂直方向とは、活性層20の表面に対して81°以上、99°以下であるものとする。電流注入領域72は、直方格子の2辺51、53のいずれかに直交する。

50

【 0 0 2 0 】

図 2、3 において、ピット 6 3 は直角三角柱（平面形状が直角三角形）とする。但し、ピット 6 3 の平面形状は、直角三角形に限定されず格子の 2 辺 5 1、5 3 に関してそれぞれ非対称であればよい。

【 0 0 2 1 】

第 1 半導体層 3 0 および第 2 の半導体層 3 9 が n 形層をそれぞれ含むと、サブバンド間遷移を生じるキャリアは電子である。第 1 半導体層 3 0 の厚さは数 μm 、第 2 の半導体層 3 9 の厚さは数 μm などとすることができる。

【 0 0 2 2 】

上部電極 5 0 および下部電極 5 2 に印加された電界によりキャリアが量子井戸層を通過することによりサブバンド間遷移を生じ、たとえば、波長が $2\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ の単一モードのレーザ光を放出する。第 1 のピット 6 3 の格子間隔 P 1 は、赤外レーザ光 8 0 の媒質内波長程度とすることができる。

10

【 0 0 2 3 】

図 4 は、比較例にかかる面発光量子カスケードレーザである。

比較例では、上部電極 1 5 0 は第 1 半導体層 1 3 0 のフォトリック結晶層上面に設けられ、面発光領域と電子注入領域とは同一領域にある。このため、注入電流 J J はフォトリック結晶層内を垂直方向に流れる。光（水平方向の矢印）は、第 1 半導体層 1 3 0 の下方に設けられた活性層 1 2 0 内で発生し、二次元格子で共振しつつ上方に放出される。比較例は、構造が簡素でチップサイズが小さいが、電流を増加すると素子内部が温度上昇し屈折率が変化する。光学特性が低下するので高出力化が困難である。

20

【 0 0 2 4 】

これに対して、第 1 の実施形態では、電流注入領域 7 2 と面発光領域 7 0 とが離間する。このため、電流注入領域 7 2 で生じた熱の多くは、下部電極 5 2 および下方に設けられたヒートシンクを経由して外部に排出される。このため、電流注入領域 7 2 の内側に設けられた面発光領域 7 0 へは熱が伝導しにくい。この結果、温度上昇による面発光領域 7 0 の屈折率の変化による光学特性の低下を抑制し、高出力化が容易となる。

【 0 0 2 5 】

図 5 (a) は第 2 の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図 5 (b) は B - B 線に沿った模式断面図、である。

30

第 2 の実施形態では、第 1 半導体層 3 0 の上面に設けられたピット 6 3 の内面および底面を含むフォトリック結晶層 3 1 を覆うように金属層 5 6 が設けられる。この場合、ピット 6 3 の周期構造が設けられた面発光領域 7 0 において面発光が可能である。下部電極 5 4 には、金属層 5 6 で反射された赤外レーザ光が外部に向かって放出可能な開口部 5 4 a が設けられる。金属層 5 6 の上面および上部電極 5 0 の上面とは、ヒートシンク取り付け面とすることができる。

【 0 0 2 6 】

面発光領域 7 0 には、電流注入がなされないが、ピット 6 3 の内部に熱伝導性のよい金属層 5 6 が設けられる。金属層 5 6 は、第 1 半導体層 3 0 に接触する。また、金属層 5 6 および上部電極 5 0 をヒートシンク 5 8 に接触させることができるので、電流注入領域 7 2 で発生する熱や、面発光領域 7 0 でわずかに発生する熱を効率的に外部に排出できる。この結果、温度特性が改善され、高出力化が容易となる。

40

【 0 0 2 7 】

図 6 (a) は第 3 の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図 6 (b) は M 部を拡大した模式平面図、である。

第 3 の実施形態は、無励起領域に光学的機能素子を内蔵した面発光量子カスケードレーザである。光学的機能素子は、たとえば、テーパー共振器 9 0 とすることができる。テーパー共振器 9 0 には、上部電極 5 0 が設けられないので、テーパー共振器 9 0 の活性層の領域は無励起である。テーパー共振器 9 0 のテーパー幅の最小領域 9 0 a は面発光領域 7 0 に接続される。テーパー共振器 9 0 は、フォトリック結晶層 3 1 内で単一モードを維持しつつレーザ

50

光を広げるとともに、フォトニック結晶層 3 1 からの戻り光を共振器に戻す。

【 0 0 2 8 】

図 7 (a) は p n 接合型レーザダイオードにおける波長に対する利得・吸収または発光スペクトル依存性のグラフ図、図 7 (b) は量子カスケードレーザにおける波長に対する利得・吸収または発光スペクトル依存性のグラフ図、である。

また、図 8 (a) は量子カスケードレーザの電流注入時のエネルギーバンド図、図 8 (b) はゼロバイアス時のエネルギーバンド図、である。

【 0 0 2 9 】

図 7 (a) に表すように、p n 接合型レーザダイオードは、ホールと電子とが再結合することにより、バンドギャップエネルギー E_g に応じた波長で発振する。すなわち、キャリアの注入がない場合（鎖線）には発振波長（ E_g に対応）近傍では光吸収が大きい。このため、破線に表すように電流を注入して利得を大きくしないと、テーパ共振器における光損失が大きくなる。

【 0 0 3 0 】

これに対して、図 7 (b)、図 8 (a)、(b) に表すように、第 3 実施形態の面発光量子カスケードレーザは、電子のサブバンド間遷移により発光する。サブバンド間遷移では、発振波長はバンドギャップエネルギーには依存しない。このため、発光波長において、キャリアの注入がない（鎖線に表す）場合でも光吸収は少ない。このため、無励起状態でも、2 次元回折格子、D B R (Distributed Black Reflector) などの光学的機能素子を設けることができる。

【 0 0 3 1 】

図 9 (a) は第 3 の実施形態の変形例にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図 9 (b) は M 部を拡大した模式平面図、である。

第 3 の実施形態の変形例は、無励起領域に光学的機能素子を内蔵した面発光量子カスケードレーザである。光学的機能素子は、テーパ共振器 9 1 とする。テーパ共振器 9 1 には、テーパ内で共振を発生させる D B R (Distributed Black Reflector) が設けられる。

【 0 0 3 2 】

図 9 (a)、(b) において、テーパ共振器 9 1 に上部電極 5 0 が設けられない。しかし、テーパ領域に上部電極 5 0 を設けても良い。テーパ共振器 9 1 のテーパ幅の最小領域 9 1 a は面発光領域 7 0 に接続される。テーパ共振器 9 1 は、フォトニック結晶層 3 1 に単一モードを維持しつつ広げるとともに、フォトニック結晶層 3 1 からの戻り光をテーパ共振器 9 1 に戻す。

【 0 0 3 3 】

図 1 0 (a) は第 4 の実施形態にかかる面発光量子カスケードレーザの模式平面図、図 1 0 (b) は合成された発光の遠視野層のグラフ図である。

第 4 の実施形態では、図 1 0 (a) に表すように、テーパ共振器 9 2 が並列アレイ状に設けられ光学的機能素子となる。本図では、1 つの上部電極 5 0 が 5 つのテーパ共振器に分割される。

【 0 0 3 4 】

5 つのテーパ共振器近傍でのそれぞれの遠視野像（破線）はフォトニック結晶層 3 1 においては重なり合い実線のような強度を持った光分布となる。これによりフォトニック結晶層 3 1 では光の強度が単一のピークを持った強度分布が実現され、フォトニック結晶層 3 1 内の回折作用により垂直方向に取り出される光の強度も同様に単一のピークを持った分布で出射される。

【 0 0 3 5 】

第 3 の実施形態およびそれに付随する変形例、および第 4 の実施形態によれば、量子カスケードレーザの量子井戸構造は、無励起状態でも光吸収が小さいので、面発光領域 7 0 と、電流注入領域 7 2 と、の間に光学的機能素子を設けることができる。このため、光学的機能素子により光学特性を制御することが容易となる。

【 0 0 3 6 】

10

20

30

40

50

なお、量子井戸構造に種々のイオン注入を行い無秩序化を行うか、または酸化層を導入すると、光吸収をさらに低減し、より透明に近づけることができる。イオン注入による無秩序化は以下のように行う。たとえば、水素をフォトニック結晶層 31 の領域に注入し、基板温度を 600 とし 30 分アニールすると量子井戸の界面に存在する原子が相互拡散を生じて、量子井戸の界面で混晶化、無秩序化が生じる。これにより、アニール前に比べて量子井戸の井戸部分に Al が拡散することにより井戸の量子準位が全体的に高エネルギーとなる。または B のような比較的重い原子を注入すると量子井戸全体が無秩序化して量子井戸自体が無くなり、サブバンドが存在しなくなる。これによりフォトニック結晶層 31 のサブバンド間遷移の光吸収は全く存在しなくなる。

【0037】

また、別な手段として、活性層の量子井戸の障壁層である InAlAs 層の Al を水蒸気酸化する手段がある。フォトニック結晶層 31 をドライエッチングで加工し、絶縁膜を形成する前にウェーハを水蒸気酸化炉に導入する。水蒸気酸化を行うとフォトニック結晶層 31 が加工されている領域ではフォトニック結晶の穴部分の側面が水蒸気にさらされ酸化される。たとえば 450 の水蒸気酸化炉にウェーハを導入し、6 時間の酸化を行う。これにより InAlAs 障壁層は側面から 1.8 μm 酸化される。穴の間隔は広い部分でも 3.6 μm 離れていないため、穴のある領域では量子井戸の InAlAs 層はすべて酸化され、この領域では InAlO と InGaAs とが積層された構造となり、障壁層のエネルギーギャップが非常に大きくなり、量子井戸内でのサブバンドによる吸収が、この波長域ではなくなる。

【0038】

第 1 および第 2 の実施形態によれば、高温特性が改善された面発光量子カスケードレーザが提供される。また、第 3 および第 4 の実施形態によれば、光吸収の少ない光学的機能素子を有することにより光学特性を制御可能であり、かつ高温特性が改善された面発光量子カスケードレーザが提供される。これらの面発光量子カスケードレーザは、ガス分析装置、環境測定装置、レーザ加工機などに利用可能である。

【0039】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら新規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれる。

【符号の説明】

【0040】

10 半導体積層体、20 活性層、30 第 1 半導体層、30a (第 1 半導体層の) 表面、31 フォトニック結晶層、39 第 2 半導体層、53 上部電極、52、54 下部電極、54a 開口部、56 金属層、63 ピット、70 面発光領域、70a (面発光領域の) 外縁、72 電流注入領域、90、91、92 テーパ共振器、90a、91a (テーパ幅の) 最小領域、G1 (ピットの) 重心、J 電流

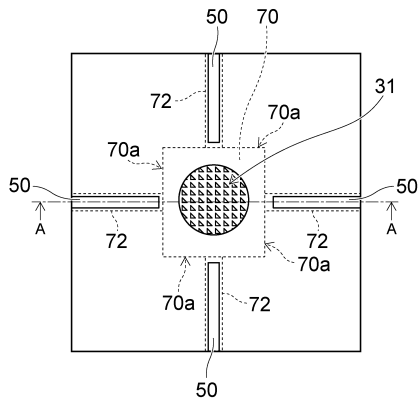
10

20

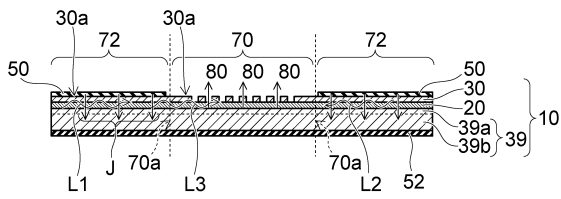
30

40

【図1】

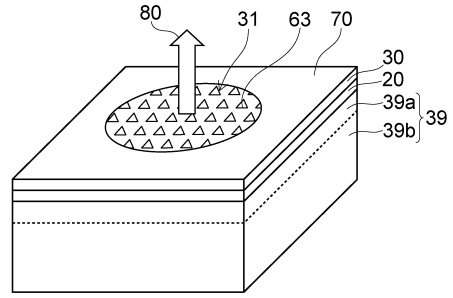


(a)

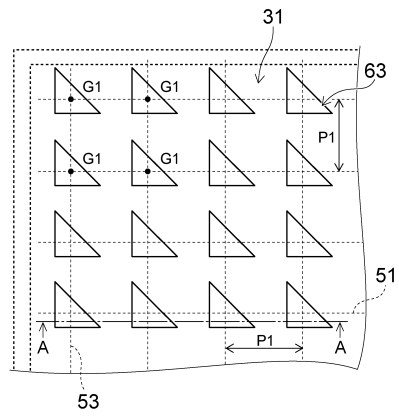


(b)

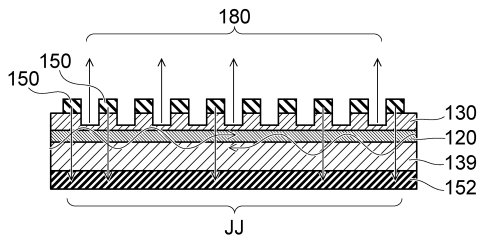
【図2】



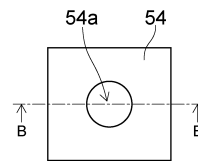
【図3】



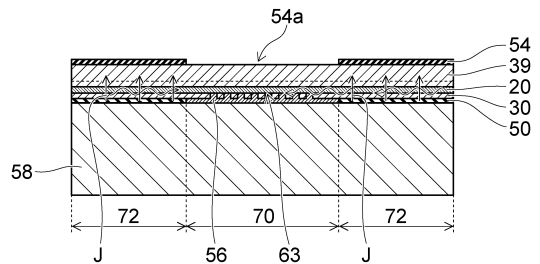
【図4】



【図5】

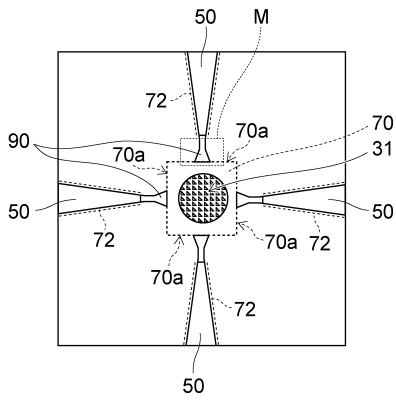


(a)

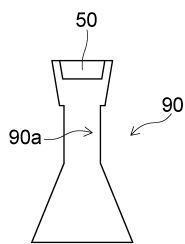


(b)

【図6】

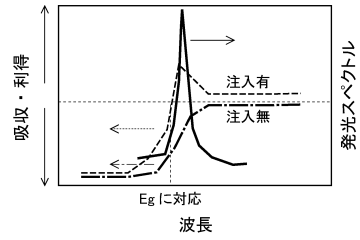


(a)

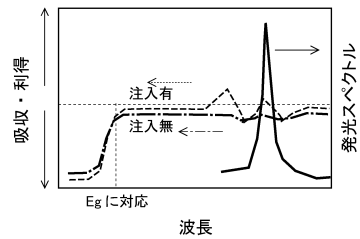


(b)

【図7】

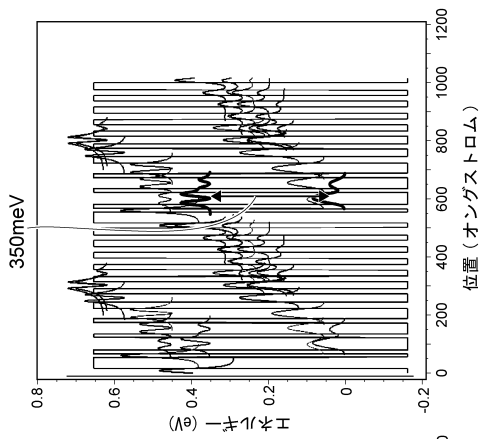


(a)

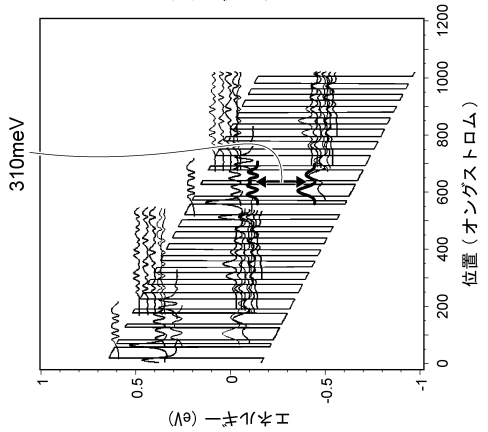


(b)

【図8】

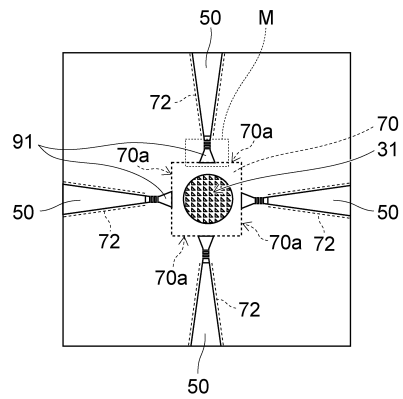


ゼロバイアス時のバンド
(b)

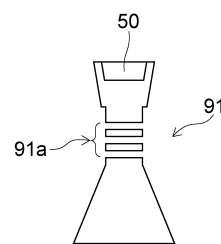


電流注入時のバンド
(a)

【図9】

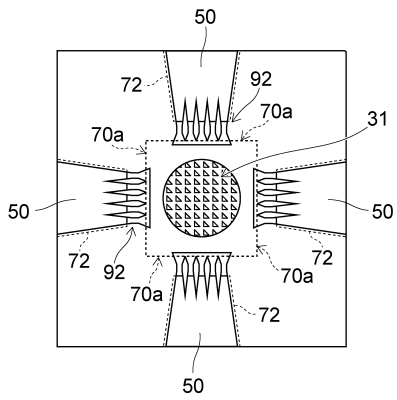


(a)

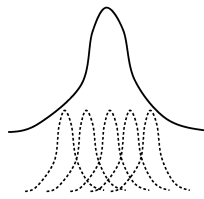


(b)

【 図 10 】



(a)



(b)

フロントページの続き

(72)発明者 角野 努
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

審査官 大西 孝宣

(56)参考文献 特開2017-168594(JP,A)
国際公開第03/067724(WO,A1)
国際公開第2010/140404(WO,A1)
特開2003-124569(JP,A)
特開2010-232504(JP,A)
特開平07-193322(JP,A)
特開2010-098135(JP,A)
特開2014-197659(JP,A)
中国特許出願公開第102201648(CN,A)
米国特許出願公開第2005/0063438(US,A1)

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