

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-45329

(P2010-45329A)

(43) 公開日 平成22年2月25日(2010.2.25)

(51) Int.Cl.
H01L 33/06 (2010.01)F1
H01L 33/00 112テーマコード (参考)
5F041

審査請求 未請求 請求項の数 14 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2009-114603 (P2009-114603)
 (22) 出願日 平成21年5月11日 (2009.5.11)
 (31) 優先権主張番号 特願2008-182223 (P2008-182223)
 (32) 優先日 平成20年7月14日 (2008.7.14)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 000004237
 日本電気株式会社
 東京都港区芝五丁目7番1号
 (74) 代理人 100096253
 弁理士 尾身 祐助
 (72) 発明者 桐原 明宏
 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株
 式会社内
 (72) 発明者 藤方 潤一
 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株
 式会社内
 Fターム(参考) 5F041 AA03 CA05 CA08 CA12 CA35
 CA66 CA85 CA93 CA94

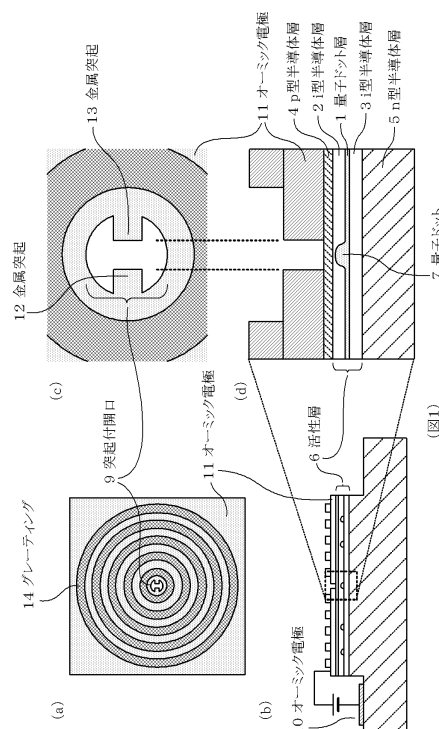
(54) 【発明の名称】 光子発生装置

(57) 【要約】

【課題】半導体量子ドットへの電流注入と、十分な光子
 取り出し効率の両方を兼ね備える単一光子発生装置を提供する。

【解決手段】量子ドット7を含む活性層6がp型半導体
 層4とn型半導体層5の間に埋め込まれ、その上部のオ
 ーミック電極11に、円形開口から金属突起12、13
 が張り出した構造を持つ突起付開口9が形成されている
 。p型半導体層4およびn型半導体層5からの電流注入
 により生成された光子は、突起付開口9の中心部に存在
 する強い電磁場モードに優先的に結合し、同心円状に形
 成されたグレーティング14を通して高い効率で外部へ
 と取り出される。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

微小発光部を含む発光層と、前記発光層の第 1 の主面側に形成された第 1 の半導体層と、前記発光層の第 2 の主面側に形成された第 2 の半導体層と、前記第 1 の半導体層と接合を形成する第 1 の金属電極と、前記第 2 の半導体層の前記発光層と反対側の表面に設置された、前記第 2 の半導体層と接合を形成する、前記微小発光部上に開口を有する第 2 の金属電極と、を備え、前記開口は、開口の周縁部から開口内部に張り出す少なくとも 1 つの金属突起が設けられている突起付開口であることを特徴とする光子発生装置。

【請求項 2】

前記微小発光部のサイズが発光波長よりも小さいことを特徴とする請求項 1 に記載の光子発生装置。 10

【請求項 3】

前記微小発光部として、量子ドットを用いることを特徴とする請求項 2 に記載の光子発生装置。

【請求項 4】

前記微小発光部の発光波長を λ 、前記第 2 の半導体層の屈折率を n としたとき、前記発光層の前記第 2 の金属電極の下面からの距離 d が、 $d < \lambda / 2 n$ を満たすことを特徴とする請求項 1 から請求項 3 のいずれかに記載の光子発生装置。

【請求項 5】

前記微小発光部の発光波長を λ 、第 2 の半導体層の屈折率を n としたとき、前記発光層の前記第 2 の金属電極の下面からの距離 d が、 $\lambda / 20 n < d < \lambda / 5 n$ を満たすことを特徴とする請求項 1 から請求項 3 のいずれかに記載の光子発生装置。 20

【請求項 6】

前記微小発光部の発光波長を λ 、前記微小発光部のサイズを s 、前記金属突起の先端に形成されるギャップを w としたとき、 $s < w < \lambda / 5 n$ を満たすことを特徴とする請求項 1 から請求項 5 のいずれかに記載の光子発生装置。

【請求項 7】

前記第 2 の金属電極の、前記微小発光部側とは反対側の表面には、前記突起付開口を中心として複数の凸部または凹部が周期的に形成されていることを特徴とする請求項 1 から請求項 6 のいずれかに記載の光子発生装置。 30

【請求項 8】

前記第 2 の金属電極は、表面プラズモンを誘起することが可能な材料により形成されていることを特徴とする請求項 1 から請求項 7 のいずれかに記載の光子発生装置。

【請求項 9】

前記微小発光部が、前記突起付開口により電磁場モードが強められる位置またはその近傍に配置されていることを特徴とする請求項 1 から請求項 8 のいずれかに記載の光子発生装置。

【請求項 10】

前記突起付開口において、開口内部に張り出す前記金属突起の先端が尖っていることを特徴とする請求項 1 から請求項 9 のいずれかに記載の光子発生装置。 40

【請求項 11】

前記開口内部に張り出す前記金属突起は、対をなして形成されていることを特徴とする請求項 1 から請求項 10 のいずれかに記載の光子発生装置。

【請求項 12】

前記第 2 の金属電極の前記微小発光部側の表面には、前記金属突起の内側先端部に、前記金属突起の先端部に沿って前記第 2 の半導体層に埋め込まれた埋め込み金属突起が形成されていることを特徴とする請求項 1 から請求項 11 のいずれかに記載の光子発生装置。

【請求項 13】

前記第 1 または第 2 の半導体層の少なくとも一方の層内には、前記微小発光部上または下に開口を有する酸化膜が形成されていることを特徴とする請求項 1 から請求項 12 のい 50

ずれかに記載の光子発生装置。

【請求項 14】

前記第 1 または第 2 の半導体層の少なくとも一方が屈折率の異なる 2 種類の半導体を交互に積層した構造を有していることを特徴とする請求項 1 から請求項 13 のいずれかに記載の光子発生装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電圧を印加することで量子ドットなどから単一光子を発生させる半導体装置に関するもので、特に従来装置に比べて高い光子取り出し効率を実現する半導体単一光子発生装置に関する。

10

【背景技術】

【0002】

光や物質の量子力学的な状態を利用する量子情報技術は、安全性の高い暗号通信や、秘匿性の高い認証など、高度なセキュリティ技術を提供することができると期待されている。例えば量子暗号通信では、偏光や位相といった量子力学的な自由度を用いて表現される情報（以後、量子情報）を光子に乗せて伝送することで、通信路上での盗聴者の存在を確実に検知することができ、安全な秘密鍵の配布が可能になる。

このような量子情報技術にとってキーデバイスとなるのが、光子を 1 つずつ発生させる単一光子発生装置である。単一光子は、単一の原子や単一のイオンなどから生成することができ、特に半導体から単一光子を生成するためのデバイスとして、半導体量子ドットによる単一光子源が盛んに研究されている。

20

量子ドットから単一光子を生成するためには量子ドット中に電子と正孔のペアを生成する必要があるが、その方法としては外部からの励起光を利用する光励起型と、電氣的に電子と正孔を注入する電流注入型の 2 種類の方式が存在する。このうち、開発が先行しているのは光励起型であるが、デバイスの小型化や低コスト化という点では電流注入型の単一光子発生器の方が優れている。

【0003】

電流注入型の単一光子発生装置に関しては、例えば非特許文献 1 などで報告されている。この単一光子発生装置では、InAs 量子ドット層が n 型 GaAs 層と p 型 GaAs 層の間に挟まれた構造を有しており、n 型層と p 型層それぞれにオーミック電極が取り付けられている。そして、これらのオーミック電極間に電圧を印加することで、n 型層から電子が、p 型層から正孔がそれぞれ量子ドットに注入される。

30

また、電極の片方には、単一量子ドットから発せられた光子を取り出すための微小開口が形成されている。単一光子を生成するには単一量子ドットからの発光を利用する必要があるが、分子線エピタキシー (MBE) で成長した量子ドットの密度は通常 $1 \times 10^{10} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$ 程度と比較的大きいため、対物レンズで集光しただけでは多くの量子ドットからの発光を拾ってしまい、単一光子を得ることはできない。このため非特許文献 1 では、電極の一部に開口を形成することで、一個の量子ドットからの発光のみが開口を通して取り出せるような構造を作製している。

40

【0004】

ここで、この開口のサイズが大きい場合、開口内部に複数個の量子ドットが入ってしまうために単一光子を得ることができず、また、量子ドット以外のからのバックグラウンド光も増えるという 2 つの問題が生じる。このため、開口のサイズとしては通常直径 $1 \mu\text{m}$ からそれ以下のものが用いられる。このように、単一光子発生装置における表面の金属膜は、量子ドットにキャリアを注入するための電極であると同時に、単一の量子ドットを隔離するための遮光膜としての役割も果たしている。

以上が従来報告されている電流注入型単一光子発生装置の基本的な構造である。しかしながら、現状ではまだ改善すべき課題も残っている。その一つが、光子の取り出し効率の問題である。そもそも量子ドット光源は発光波長よりもサイズが小さいため、伝播光への

50

変換効率が悪い。加えて、量子ドットによる単一光子発生は自然放出に基づくものであるため、光子は全ての方位角にランダムに放出される。このため、微小開口部以外の方向（例えば基板面に平行な方向）に放出された光子は、外部に有効に取り出すことができない。また、仮に微小開口部の方向に光子が放出されたとしても、開口サイズは光の波長以下、または波長と同程度であるため、その透過率は非常に小さな値になってしまう。

【0005】

単一量子ドットからの光子を外部に効率よく取り出すための構造としては、いくつかの方式が試みられている。以下に代表的な例を示す。

非特許文献2には、マイクロピラー共振器中に量子ドットを埋め込んだ構造が示されている。ここでマイクロピラー共振器とは、発光体であるInAs量子ドットが、GaAsとAlAsの多層膜からなるDBRミラーに上下から挟まれ、かつ側部のドライエッチングにより、基板に垂直な柱状に切り出された構造を指している。このような構造では、柱を細く切り出すことで原理的には1個の量子ドットを隔離することができることに加え、上下方向の共振器効果および側壁での全反射により、量子ドットからの発光を上方向に効率よく取り出すことも可能である。しかしながら、細く不安定な柱状構造に電極を取り付けるのは難しく、電流注入方式には適していない。実際、これまでに報告されているマイクロピラー型単一光子発生装置はほとんどが光励起方式によるものである。

【0006】

非特許文献3には、2次元フォトリック結晶の点欠陥中に量子ドットを埋め込んだ構造が示されている。この構造において、2次元フォトリック結晶部分は量子ドットの発光波長に対して禁制帯となっているため、点欠陥部分にのみ光が閉じ込められる微小共振器となっている。このような構造下では、量子ドットの横方向（基板面方向）への発光はバンドギャップ効果により強く抑制されるため、基板に垂直な方向に光子を効率よく取り出すことができる。しかしながら、フォトリック結晶共振器の場合も電極を取り付けることで共振器の性能が大幅に低下するため、電流注入方式には適していない。

【0007】

非特許文献4では、DBRミラーと微小開口を組み合わせた構造により電流注入型単一光子発生装置が実現されている。量子ドットの下部にDBRミラーが配置されており、上部の空気-半導体界面との間に共振器が形成される。これにより、量子ドットからの光子を主に上方向に放出することが可能となる。この結果、非特許文献1の装置に比べて取り出し効率が向上するが、それでも最終的には微小開口における透過率が取り出し効率を制限すると考えられる。

【0008】

上記の3つの文献は半導体共振器を利用した例であるが、最近になって金属微細構造を利用したデバイスも報告されている。非特許文献5では、量子ドットなどの点光源が、直径50~100nmの銀のナノワイヤ近傍に配置された構造が採用されている。このような微細なナノワイヤにおける空気と銀の界面には高密度の表面プラズモンモードが立つため、点光源からの自然放出光はナノワイヤのプラズモンモードに優先的に結合し、最終的にはエヴァネッセント結合を通して誘電体導波路やファイバーへと取り出すことができる。また非特許文献6には、このようなプラズモン効果を利用した開口を面発光レーザー(VCSEL)に応用した例が報告されている。しかしこの文献で報告された構造は、発光材料として横方向に大きな広がりを持つ量子井戸を用いており、加えて量子井戸と開口の間の距離は波長よりもはるかに大きい。

また非特許文献7では、アルミニウムによる微小アンテナ構造により量子ドットからの光の取り出しが向上することが示されている。しかしながら、いずれの文献においても、量子ドットへの電流注入を行う構造や、他の発光体からの背景光を遮るような構造は示されていない。

以上のように、量子ドットへの電流注入構造と、十分な光子取り出し効率の両方を兼ね備えたデバイスは実現されていない。

【先行技術文献】

10

20

30

40

50

【非特許文献】

【0009】

【非特許文献1】Z. Yuan et al., "Electrically Driven Single-Photon Source", Science Vol. 295, pp. 102-105 (2002)

【非特許文献2】M. Pelton et al., "Efficient Source of Single Photons: A Single Quantum Dot in a Micropost Microcavity", Phys. Rev. Lett. Vol. 89, 233602 (2002)

【非特許文献3】D. G. Gevaux et al., "Enhancement and suppression of spontaneous emission by temperature tuning InAs quantum dots to photonic crystal cavities", Appl. Phys. Lett. 88, 131101 (2006)

10

【非特許文献4】A. J. Bennett et al., "Microcavity single-photon-emitting diode", Appl. Phys. Lett. 86, 181102 (2005)

【非特許文献5】D. E. Chang et al., "Quantum Optics with Surface Plasmons", Phys. Rev. Lett. 97, 053002 (2006)

【非特許文献6】J. Hashizume et al., "Plasmon-enhancement of optical near-field of metal nanoaperture surface-emitting laser", Appl. Phys. Lett. 84, 3226 (2004)

【非特許文献7】J. N. Farahani et al., "Single Quantum Dot Coupled to a Scanning Optical Antenna: A Tunable Superemitter", Phys. Rev. Lett. 95, 017402 (2005)

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

半導体量子ドットを用いた電流注入型単一光子発生装置は、潜在的にはコンパクトで低コストなデバイスの実現が期待されているが、現状では以下のような課題が残っている。

自己形成型量子ドットにおいて単一量子ドットからの光のみを取り出すために、電極上に直径 $1\mu\text{m}$ からそれ以下の微小開口が作製されているが、量子ドットからの光子はあらゆる方向にランダムに放出されることに加え、微小開口部分の透過率が小さいため、光子の取り出し効率が低い。

また、電流注入型の装置では、電極から注入されたキャリアが半導体中の不純物や欠陥にトラップされて光るため、量子ドット以外からのバックグラウンド光が大きくなる。これは、光子レベルの微弱光による通信では大きな問題となる。また、このような不純物起因のバックグラウンド光の問題は、開口サイズを大きくするほどより深刻になるため、光子の取り出し効率とトレードオフの関係にある。

30

本発明の課題は、上述した従来技術の問題点を解決することであって、その目的は、第1に、電流注入型単一光子発生装置において光子取り出し効率を十分な値に向上させることであり、第2に、バックグラウンド光の影響を十分低減させることである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

上述の目的を達成するため、本発明によれば、微小発光部を含む発光層と、前記発光層の第1の主面側に形成された第1の半導体層と、前記発光層の第2の主面側に形成された第2の半導体層と、前記第1の半導体層と接合を形成する第1の金属電極と、前記第2の半導体層の前記発光層と反対側の表面に設置された、前記第2の半導体層と接合を形成する、前記微小発光部上に開口を有する第2の金属電極と、を備え、前記開口は、開口の周縁部から開口内部に張り出す少なくとも1つの金属突起が設けられている突起付開口であることを特徴とする光子発生装置、が提供される。

40

【0012】

そして、好ましくは、前記微小発光部のサイズが発光波長よりも小さい。また、好ましくは、前記微小発光部として、量子ドットを用いる。また、好ましくは、前記微小発光部の発光波長を λ 、前記第2の半導体層の屈折率を n としたとき、前記発光層の前記第2の金属電極の下面からの距離 d が、 $d < \lambda / 2n$ を満たす。そして、一層好ましくは、 d は

50

、 $\lambda / 20n < d < \lambda / 5n$ を満たす。

また、好ましくは、前記第2の金属電極の、前記微小発光部側とは反対側の表面には、前記突起付開口を中心として複数の凸部が周期的に形成されている。すなわち、前記第2の金属電極の表面にはグレーティングが形成されている。

また、好ましくは、前記突起付開口において、開口内部に張り出す前記金属突起の先端が尖っている。これにより、金属突起先端に形成されるギャップにおいて、アンテナモードがより励起されやすくなり、光取り出し効率のさらなる増大が可能となる。

また、好ましくは、前記第2の金属電極の前記微小発光部側の表面には、対をなす前記金属突起同士に対向側の先端部に、前記金属突起の先端部に沿って前記第2の半導体層に埋め込まれた埋め込み金属突起が形成されている。

また、好ましくは、前記第1または第2の半導体層の少なくとも一方の層内には、前記微小発光部上または下に開口を有する酸化膜が形成されている。

また、好ましくは、前記第1の半導体層の前記第1の金属電極と接する部分は、n型とp型のいずれか一方であり、前記第2の半導体層の前記第2の金属電極側の部分は、n型とp型のいずれか他方である。この場合、前記第1、第2の金属電極はそれぞれ前記第1、第2の半導体層にオーミックに接触している。

また、好ましくは、前記第1の半導体層と前記第2の半導体層の内一方はi型で、他方はp型またはn型である。この場合、この場合、二つの金属電極の内、一方の金属電極は半導体層とオーミックに接触し、他方はi型の半導体層とショットキー接合を形成している。

また、好ましくは、前記第1または第2の半導体層の少なくとも一方が屈折率の異なる2種類の半導体を交互に積層した構造を有している。

【0013】

[作用]

本発明の光子発生装置によれば、量子ドット上の金属電極に所定の間隔のギャップを有する突起付開口が形成されている。このような突起付開口では、空間的に限られた範囲で電磁場モードが増強される結果、量子ドットから放出される光子の透過率が増大し、光子を効率よく外部に取り出すことができる。

特に、量子ドット層の、前記第2の金属電極の下面からの深さdが、 $\lambda / 20n < d < \lambda / 5n$ を満たすときに、より高い効率で光子を取り出すことができる。

また、本発明の光子発生装置において、前記第2の金属電極には、前記突起付開口を中心として周期的に凸部が形成されている。これによりグレーティングが形成され、光子発生装置から発生する光子を、高い指向性を持って自由空間に放出させることができ、ファイバーなどへの結合効率を向上させることができる。

また、本発明の別の実施形態によれば、前記金属突起の対向側先端部には、前記第2の半導体層に埋め込まれた埋め込み金属突起が形成されている。これにより、量子ドットから発生する光をより強く突起付開口に結合させ、光子の取り出し効率を向上させることができる。

さらに、本発明の別の実施形態によれば、前記第2の半導体層の層内には、前記量子ドット上に開口を有する酸化膜が形成されている。これにより、量子ドットから発生する光をより強く突起付開口に結合させ、光子の取り出し効率を一層向上させることができる。また、注入電流を量子ドット近傍に限定することができ、高効率化を実現することができる。

また、本発明の光子発生装置において、前記第1、第2の半導体層の金属電極側は、一方がp型で、他方がn型である。従って、前記1対の金属電極間に電圧を印加することで、p型層から正孔を、n型層から電子を量子ドットに注入することができ、電流注入による光子の発生が実現される。

また、本発明の別の実施形態によれば、前記第1、第2の半導体層の内、一方がi型で、他方がp型またはn型である。これにより、量子ドット内に正または負の電荷を持つ荷電励起子と呼ばれる状態を光励起し、発光させることができる。これにより、発光レートを

向上させることができる。

また、本発明の別の実施形態によれば、前記第 1 の半導体層内に屈折率の異なる 2 種類の半導体を交互に積層した構造を有している。これにより、量子ドットの周りに実効的なファブリペロー共振器が形成されるため、量子ドットから発せられる光は突起付開口により強く結合し、光子の取り出し効率をさらに向上させることができる。

【発明の効果】

【0014】

第 1 の効果は、突起付開口におけるアンテナ効果により、量子ドットからの光子の取り出し・収集効率を向上できる点である。また、第 2 の効果として、突起付開口中心付近の限られた空間から選択的に光を取り出すために、不純物起因のバックグラウンド光を低減

10

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図 1】本発明の第 1 の実施形態である単一光子発生装置の構造を示す上面図と断面図。

【図 2】本発明の第 1 の実施形態である単一光子発生装置における増強された電磁場モード分布を示す図。

【図 3】本発明の第 1 の実施形態である単一光子発生装置の動作を説明する図。

【図 4】本発明の第 1 の実施形態である単一光子発生装置の実施例を示す図。

【図 5】本発明の第 2 の実施形態である単一光子発生装置の構造を示す上面図と断面図。

【図 6】本発明の第 3 の実施形態である単一光子発生装置の構造を示す上面図と断面図。

20

【図 7】本発明の第 4 の実施形態である単一光子発生装置の構造を示す上面図と断面図。

【図 8】本発明の第 5 の実施形態である偏光無依存な単一光子発生装置の構造を示す上面図と断面図。

【図 9】本発明の第 6 の実施形態である単一光子発生装置の構造を示す上面図と断面図。

【図 10】本発明の第 7 の実施形態である単一光子発生装置の構造を示す上面図と断面図。

【図 11】本発明の第 7 の実施形態である単一光子発生装置の動作を説明する図。

【図 12】本発明における突起付開口の異なる形態を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0016】

30

次に、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。

(第 1 の実施形態)

図 1 (a)、(b) は、本発明の単一光子発生装置の第 1 の実施形態を示す上面図と断面図であり、図 1 (c)、(d) はその部分拡大図である。本実施形態の光子発生装置において、量子ドット層 1、i 型半導体層 2、3 を含む活性層 6 が、p 型半導体層 4 と n 型半導体層 5 の間に挟まれて形成されており、p-i-n 構造が構成されている。p 型半導体層 4 と n 型半導体層 5 には、それぞれオーミック電極 11、10 が取り付けられており、p-i-n 構造に電圧を印加することができるようになっている。

p 型半導体層 4 と接触するオーミック電極 11 には、量子ドット層 1 から光子を取り出すための突起付開口 9 が形成されている。ここで突起付開口 9 は通常の円形開口と異なり、開口の周縁部から中心部へと金属突起 12、13 が張り出した構造を有している。そして、この金属突起 12、13 間のギャップの直下に量子ドット 7 が位置している。

40

【0017】

ここで、開口径やギャップ幅などのパラメータを適切に設計することで、金属突起 12 と 13 の間のダイポール結合により、図 2 に示すようにギャップにおいて、金属突起の突起方向に平行な偏光成分をもつ特定波長の電磁場モード (アンテナモード) が増強される。そして、このアンテナモードを介して、直下にある量子ドットからの光取り出し効率を増大することができる。以後簡単のため、これをアンテナ効果と呼ぶことにする。

突起付開口 9 においてアンテナ効果が生じる共鳴波長は開口径 a とギャップ幅 w の関数であるため、 a と w という 2 つの自由度を調整することで、共鳴波長を量子ドットの発光波長

50

に合わせる。ただし、ギャップ幅 w が大きすぎる場合、２つのダイポールは結合せず、十分なアンテナ効果を得ることができない。そこで、ギャップ幅 w が量子ドットのサイズ s よりも大きく、かつ量子ドットの発光波長 λ よりも十分小さくなるように突起付開口 9 を設計する。ここでは、 $s < w < \lambda / 5n$ とする。

【 0 0 1 8 】

また、オーミック電極 1 1 の下面からの量子ドット層 1 の深さ d （すなわち、 i 型半導体層 2 と p 型半導体層 4 の厚さの和）も重要なパラメータとなる。量子ドット 7 からの光を突起付開口 9 の電磁場モードに結合させるためには、深さ d は少なくとも $d < \lambda / 2n$ である必要がある。ここで n は i 型半導体層 2 と p 型半導体層 4 の屈折率を表す。

深さ d を小さくするほど結合はより強くなる。ただし、あまり d が小さすぎると、金属への非輻射緩和のために量子ドットが光らなくなることが文献（D. E. Chang et al., Phys. Rev. Lett. 97, 053002）より知られている。従って、光子の取り出し効率を最適化するには $\lambda / 20n < d < \lambda / 5n$ であることが望ましい。

なお、量子ドット層 1 において量子ドット 7 が埋め込まれている位置（水平位置）については、図 1（b）に示しているように、金属突起 1 2 と 1 3 の間のギャップ内に収まっている場合が光取り出し効率の点から最も好ましい。分子線エピタキシー装置（MBE）で成長する自己形成型量子ドットの場合、量子ドットが形成される水平位置は通常ランダムになるが、走査型プローブ顕微鏡などの技術を応用することで量子ドット成長位置の制御が可能となる。例えば、原子間力顕微鏡（AFM）のカンチレバー型プローブを用いて量子ドット成長の核となる種をパターンニングすることで、任意の位置に自己形成型量子ドットを成長させる方法が知られている（S. Ohkouchi, et al., Journal of Crystal Growth 311, 1819 (2009)）。この技術を用いれば、最初にプローブで指定した位置に量子ドット 7 を成長させ、その後、その位置を中心として突起付開口 9 を形成することにより、アンテナ効果が最大となる位置に量子ドット 7 を配置することができる。

【 0 0 1 9 】

オーミック電極 1 1 上の突起付開口 9 の周りには、凹凸構造が同心円状に周期的に並んだグレーティング 1 4 が形成されている。このような凹凸構造はbull's eye構造と呼ばれ、光子が自由空間に放出される際の指向性を高める効果を持っている。

なお、本実施形態において、オーミック電極 1 1 および金属突起 1 2、1 3 の材料としては、可視光～近赤外光領域において光学損失が比較的小さくかつ表面プラズモンを誘起することが可能な金、銀、アルミニウム、銅などを用いる。このように本発明では、従来の面発光レーザーなどの場合と異なり、発光波長よりも小さな微小光源を金属突起間ギャップの直下に配置することで、光源からの光を突起付開口のアンテナモードに直接結合させている。このような「ナノスケール光源から光を効率的に取り出すためのアンテナ」として機能が本発明の特徴である。

【 0 0 2 0 】

次に、図 3 を用いて本実施形態の単一光子発生装置の動作を説明する。最初に、オーミック電極 1 0、1 1 間に電圧を印加することにより、 p 型半導体層 4 から正孔を、 n 型半導体層 5 から電子をそれぞれ量子ドット 7 に注入する〔図 3（a）〕。これにより、量子ドット 7 中には電子と正孔のペアである励起子が生成される。量子ドット中に生成された励起子はやがて電子と正孔の再結合により光子を 1 個放出するが、このときアンテナ効果により、放出される光子は突起付開口 9 の金属突起 1 2、1 3 間ギャップに立つ電磁場モードに優先的に結合する〔図 3（b）〕。突起付開口 9 に結合した光子 8 は、ギャップ間を下から上へと伝播し、最終的には図面上方向の自由空間へと放出される。以上の過程により、同じサイズの通常の円形開口を用いた場合に比べ、突起付開口を用いた本発明では光子の透過率を大きく向上させることができる。

【 0 0 2 1 】

突起付開口 9 を透過した光子は、グレーティング 1 4 の効果により、図面上方へと高い指向性をもって放出される。これにより、単一光子発生装置から取り出した光子をファイバーなどへ結合する際の効率を高めることができる。

ここまで述べたように、量子ドットからの光子の取り出し・収集効率を向上できる点が本発明の最大の利点であるが、もう一つの利点としてバックグラウンド光低減の効果が挙げられる。これまで報告されている電流注入型単一光子発生装置では、光励起型の装置に比べてバックグラウンド光がより強く観測されていた。これは、p型層やn型層から流れるキャリアが半導体中の不純物を通して光るためと考えられる。本発明の単一光子発生装置では、開口中心の真下に位置する発光体からの光のみが突起付開口9を透過するため、従来装置に比べて不純物起因のバックグラウンド光を大きく低減することができる。

次に、第1の実施形態の実施例を、図4を参照して説明する。

【実施例1】

【0022】

図4(b)は、実施例1のデバイス構造を示す上面図であり、図4(a)は、その主要部の拡大図、図4(c)は主要部の断面図である。実施例1では、量子ドット7として、分子線エピタキシー(MBE)によりn-GaAs基板上に成長された直径20nmの自己形成型InGaAs/GaAs量子ドット(InGaAs量子ドットがi-GaAsバリア層に埋め込まれた構造)を用いる。また、p型半導体層4としてはZnなどをドーピングしたp-GaAs、n型半導体層5としてはSiなどをドーピングしたn-GaAsを用いる。ここでは各層の厚さとして、p-GaAs層4を20nm、i-GaAs層2、3をそれぞれ30nmとした。このように成長されたInGaAs/GaAs量子ドットは一般に1μm弱の波長で発光することが知られている。

【0023】

このような量子ドット基板を、フォトリソグラフィとウェットエッチングにより50×50μm程度のメサ構造に切り出した後、蒸着、リフトオフ法を用いてオーミック電極を作製する。電子線リソグラフィによってパターンニングされたレジスト膜を設けた後、n型層へはAuGe/Ni/Au、p型層へはAuZn/Auを蒸着し、リフトオフ後400℃程度でアニールすることによりオーミック接触を取る。これにより、突起付開口9を持つオーミック電極11が形成され、図4(a)～(c)に示す素子構造が作製される。ここで突起付開口9のパラメータとして、膜厚100nm、開口径を200nm、金属突起12、13の幅を100nm、金属突起12、13間のギャップを80nmとした。さらに突起付開口9の外側のグレーディング14として、420nm周期、深さ100nmの凹凸構造を作製している。

なお、以上説明した電極構造自体は集束イオンビーム法(FIB)によっても作製することが可能であるが、突起付開口の直下に量子ドットが存在するため、プロセス時にダメージを与えてしまう。このため、本発明の単一光子発生装置の場合、リフトオフ法による作製が望ましい。

【0024】

設計した光子発生装置の性能を理論的に予測するために、量子ドットの位置に点光源を置いた場合に突起付き開口9を通して光子が外部に取り出される効率をシミュレーションにより調べた。点光源の発光波長依存性を計算した結果を図4(d)に示す。実線が突起付開口、点線が同じ面積を有する単純円形開口にそれぞれ対応している。設計した突起付開口では、波長980nmを中心に約100nmの波長範囲においてアンテナ効果による透過率増大が見られており、同面積の円形開口と比べて最大185倍まで光子の取り出し効率を向上することができる。また、比較的広い波長範囲で動作する点も本発明の突起付開口の特徴で、発光エネルギーのばらつきの大きい自己形成型量子ドットと組み合わせる上では大変都合がよい。

【0025】

(第2の実施形態)

図5(a)、(b)は、本発明の単一光子発生装置の第2の実施形態を示す上面図と断面図である。図5において、第1の実施形態を示す図1の部分と対応する部位には、同一の参照符号を付し重複する説明は適宜省略する〔これ以降の第3～第7の実施形態(図6～図10)についても同様である〕。本実施形態では、図1に示される第1の実施形態の基本構成において、突起付開口9の金属突起として、先端部分の尖った金属突起12、13を採用している。

10

20

30

40

50

このように、金属突起 12、13 の先端を尖らせることで、その間のギャップにおいてアンテナモードがより励起されやすくなり、光取り出し効率のさらなる増大が可能となる。

【0026】

(第3の実施形態)

図6(a)、(b)は、本発明の単一光子発生装置の第3の実施形態を示す上面図と断面図である。本実施形態では、図1に示される第1の実施形態の基本構成に加え、突起付開口9の金属突起12、13の先端部の直下に、埋め込み金属突起16、17が付加されている。

埋め込み金属突起16、17の材料としては金属突起12、13と同様に可視光～近赤外光領域において光学損失が比較的小さい金、銀、アルミニウム、銅などを用いる。このような埋め込み金属突起16、17が付加された電極構造は、電子線リソグラフィとドライエッチングによりp型半導体層4に窪みを形成し、その上から金属を蒸着することにより作製することができる。

埋め込み金属突起16、17は、量子ドット層の埋め込み深さdに対し、 $d/2 < h < d$ 程度の深さhまで埋め込む。すなわち、量子ドット層の深さを $d=50\text{nm}$ とした場合、金属突起埋め込み金属突起16、17の深さは $h=30\text{nm}$ 程度とする。これにより、量子ドットが感じるアンテナ効果をさらに強めると同時に、量子ドットから発せられる光子が基板面方向(図面横方向)に逃げるのを防ぐことができる。

【0027】

(第4の実施形態)

図7(a)、(b)は、本発明の単一光子発生装置の第4の実施形態を示す上面図と断面図である。本実施形態では、図1に示される第1の実施形態の基本構成に加え、活性層6とオーミック電極11との間に、突起付開口9の下に開口を有する酸化膜18が付加されている。このような酸化膜18は、活性層6上に、例えばGaAs層、AlGaAs層、GaAs層を成長させ、メサ構造に切り出した後水蒸気雰囲気下で400℃程度まで加熱し、AlGaAsを側面から Al_2O_3 にウェット酸化させることにより作製することができる。

酸化膜18の下面のオーミック電極11からの深さDが、量子ドット層の埋め込み深さdに対し、 $d/2 < D < d$ を満たす程度の深さに酸化膜18を埋め込む。すなわち、量子ドット層の深さを $d=50\text{nm}$ とした場合、酸化膜開口18の深さは $D=30\text{nm}$ 程度とする。

このような開口を有する酸化膜18の効果は2つある。1点目は、光のモードを横方向に閉じ込めることができる点である。これにより、量子ドット7からの光を突起付開口9により強く結合させることができる。2点目は、酸化膜18が電流阻止膜として働くため、量子ドット7を中心とする開口内にだけ電流を流すことができる点である。これにより、高効率な電流注入型光子発生が可能となる。なお、この酸化膜18は、活性層の両側もしくは下側に付加することもできる。

【0028】

(第5の実施形態)

図8に、本発明の第5の実施形態である偏光無依存な突起付開口を用いた単一光子発生装置を示す。図8(a)、(b)は、その上面図と断面図である。第1～第4の実施形態にて用いた一对の金属突起を有する突起付開口では、金属突起の突起方向に平行な偏光(以下、水平偏光と呼ぶ)を持つ光子に関しては取り出し効率を向上することができたが、逆に金属突起の突起方向に垂直(金属突起先端部の辺と平行)な偏光(以下、垂直偏光)の光子に関してはアンテナ効果が働かないため、ほとんど外部に取り出すことができない。すなわち、第1の実施形態などに示したデバイスは常に決まった直線偏光の光のみを取り出す単一光子発生装置となっている。しかし、光子の偏光状態を利用した量子情報処理を行う場合、あらゆる偏光の光子を一樣に透過させる偏光無依存な構造が求められる。

【0029】

図8に示す突起付開口は、そのような偏光無依存構造の一例である。第1の実施形態(図1)で示した左右の金属突起12、13に加え、新たに上下の金属突起22、23が付

け加えられている。このような二対の金属突起を用いた場合、これらの突起に囲まれた開口の中心部において電磁場モードが増強される。

特に、4本の金属突起を全て同じ長さ、同じ幅で設計した場合、開口の中心部では水平偏光と垂直偏光の電磁場モードがそれぞれ全く同様に増強される〔図8(c)〕。全ての偏光は水平偏光と垂直偏光の和と考えられるので、これはあらゆる偏光成分に対してアンテナ効果が機能することを意味する。従って、開口中心の直下に量子ドットをおいた場合、全ての偏光の光子を同様に外部に効率よく取り出す偏光無依存な単一光子発生装置が実現される。

【0030】

(第6の実施形態)

10

図9(a)、(b)は、本発明の単一光子発生装置の第6の実施形態を示す上面図と断面図である。基本的な構成は図1に示した第1の実施形態と共通で、量子ドットをp-i-n構造に埋め込み、電子と正孔を量子ドットへ電氣的に注入することで単一光子を発生させる。但し、本実施形態では、n型半導体層5の代わりに、n型DBR構造(15)が用いられている。この構造は、量子ドット7から発せられる波長の光に対してミラーとして働き、このn型DBRミラー15と、p型半導体層4の上端との間で共振器(ファブリペロー共振器)が形成される。これにより、量子ドット7からの発せられる光子は、より優先的に突起付開口9における電磁場モードに放出されるようになり、さらに突起付開口9と反対方向に発せられた光子も、DBRミラー15で反射し、突起付開口9での透過光に寄与する。このように、n型DBRミラー15を用いることで光子の取り出し効率をさらに向上させることができる。

20

例えば、量子ドット7としてInGaAs/GaAs量子ドットを用いた場合、n型DBRミラー15としてはGaAsとAlAsを交互に10~20層ほど積み重ねた超格子構造を用いることができる。なお、このDBRミラーは、活性層6の上側もしくは両側に設けることもできる。

【0031】

(第7の実施形態)

ここまでの実施形態では、電流注入型単一光子発生装置について説明してきたが、本発明の構造は光励起型単一光子発生装置に利用することもできる。図10(a)、(b)は、本発明の第7の実施形態であるショットキーダイオード型単一光子発生装置の上面図と断面図である。

30

本実施形態の光子発生装置では、量子ドット層1は、i型半導体層3/n型半導体層5とi型半導体層24に挟まれており、n型半導体層5にはオーミック電極10が、i型半導体層24にはショットキー電極21がそれぞれ取り付けられている。すなわち本実施形態は、量子ドット7がn-iショットキーダイオード内部に埋め込まれた構造を有している。また、突起付開口9は、第6の実施形態で示した二対の金属突起を有する構造を用いている。従って、あらゆる偏光の光子を同様に取り出すことができる。

【0032】

量子ドット7からの光を突起付開口9に結合するために、上部のi型半導体層24の厚みは50nm程度とする。また、下部のi型半導体層3の厚みは30nm程度とする。また、開口の直下に位置する量子ドット7に電場を効率的に印加するために、i型半導体層24とショットキー電極21との間に透明電極層25が形成されている。透明電極層25としては例えば厚さ5nmのTiを用いる。また、ITO(Indium tin oxide)などを用いてもよい。

40

この場合、量子ドット7に正孔を電氣的に注入することはできないが、n型半導体層5からの電子の注入は可能である。従って、電圧制御により電子の電氣的注入と、光励起による電子・正孔対の生成を組み合わせることで、負に帯電した荷電励起子と呼ばれる状態を量子ドット中に生成し、発光させることができる。

【0033】

図11を用いて本実施形態に係るショットキーダイオード型単一光子発生装置の動作を具体的に説明する。最初にオーミック電極10とショットキー電極21の間に適切なバイアス電圧を印加することで、n型半導体層5から量子ドット7に電子を1個電氣的に注入

50

する〔図 1 1 (a) 〕。この状態で、光励起によりさらに電子と正孔のペアを量子ドット 7 内に励起する。これにより、量子ドット 7 内には電子 2 個と正孔 1 個からなる負の荷電励起子状態が生成される〔図 1 1 (b) 〕。この荷電励起子が発光する際に、光子が 1 個放出される〔図 1 1 (c) 〕。この光子は、突起付開口 9 を通して効率よく外部に取り出すことができる。

このような荷電励起子発光を利用した単一光子発生装置の利点は 2 点挙げられる。1 点目は、ピークの分裂のない理想的な単一光子発生装置が実現できる点である。中性励起子では電子スピンと正孔スピンの間の交換相互作用のために、偏光によって微細相互分裂と呼ばれるエネルギー差が生じてしまうのに対し、2 つの電子スピンがペアを組む荷電励起子ではこのような分裂が生じない。2 点目は、中性励起子と異なり、荷電励起子には暗状態と呼ばれる発光しないスピン状態が存在しないため、最終的な発光レートを上げることができる。

【 0 0 3 4 】

以上、本発明の好ましい実施形態、実施例について説明したが、本発明は、これら実施形態、実施例に限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内での各種の変更が可能なものである。例えば、突起付開口の形状については、図 1 2 (a) のような円形開口から 2 本の突起が張り出したものに限られない。開口形状については必ずしも円形である必要はなく、図 1 2 (b) のように正方形開口から 2 本の突起が張り出した構造を代わりに用いてもよい。また、図 1 2 (c) に示すように、突起が 1 本だけのものでも、突起先端と開口の端との間で同様のアンテナ効果の発現が可能である。ただし、突起が 1 本のものに比べると、2 本を向かい合わせた方がアンテナモードが誘起されやすくなるため、高効率光取り出しには 2 本の突起を用いた形状がより好ましい。

また、量子ドットや半導体層の半導体材料は InGaAs や GaAs に限定されない。また、p 型半導体層と n 型半導体層との導電型は入れ替えてもよい。また、光励起型の光子発生装置において注入されるキャリアは、電子、正孔のいずれであってもよい。また、光励起型の光子発生装置において、量子ドットにキャリアを注入する半導体層は、量子ドット層の上層側、下層側のいずれの半導体層であってもよい。また、量子ドットは自己形成型に限定されない。また、実施の形態では、グレーティング 1 4 は、凸形状に形成されていたが、オーミック電極 1 1 やショットキー電極 2 1 にエッチングを行うなどして凹形状に形成してもよい。また、グレーティング 1 4 は電極と同じ材料を用いて形成しなくてもよい。また、以上では光源として主に量子ドットを用いる実施形態について説明してきたが、光子を発生する他の微小発光体に置き換えることもできる。例えば半導体中のドナー（またはアクセプタ）不純物や、ナノ結晶、ダイヤモンド中の窒素空孔などが候補として上げられる。また、開口内部に張り出す金属突起は、必ずしも平面的に形成されている必要はなく、例えば先端に向かってせりあがるような三次元的構造に形成されたものであってもよい。さらに、各実施形態を組み合わせたものも本発明に含まれる。

【符号の説明】

【 0 0 3 5 】

- 1 量子ドット層
- 2、3 i 型半導体層
- 4 p 型半導体層
- 5 n 型半導体層
- 6 活性層
- 7 量子ドット
- 8 光子
- 9 突起付開口
- 10、11 オーミック電極
- 12、13、22、23 金属突起
- 14 グレーティング
- 15 n 型 D B R ミラー

10

20

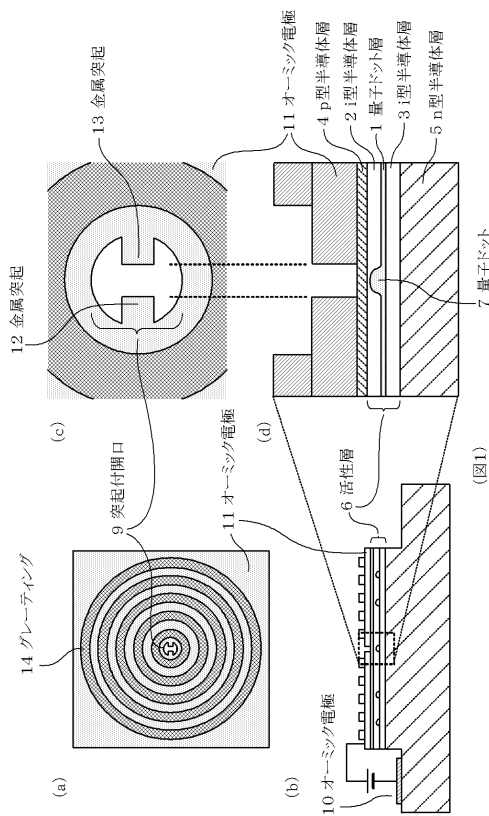
30

40

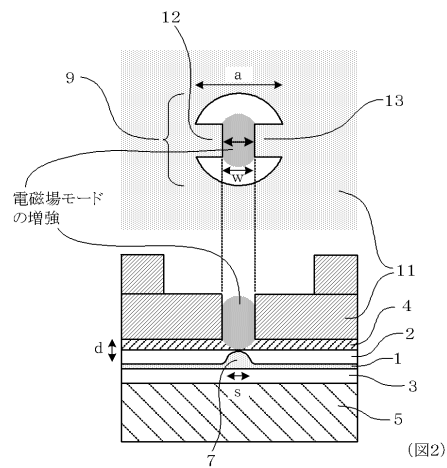
50

- 16、17 埋め込み金属突起
- 18 酸化膜
- 21 ショットキー電極
- 24 i型半導体層
- 25 透明電極層

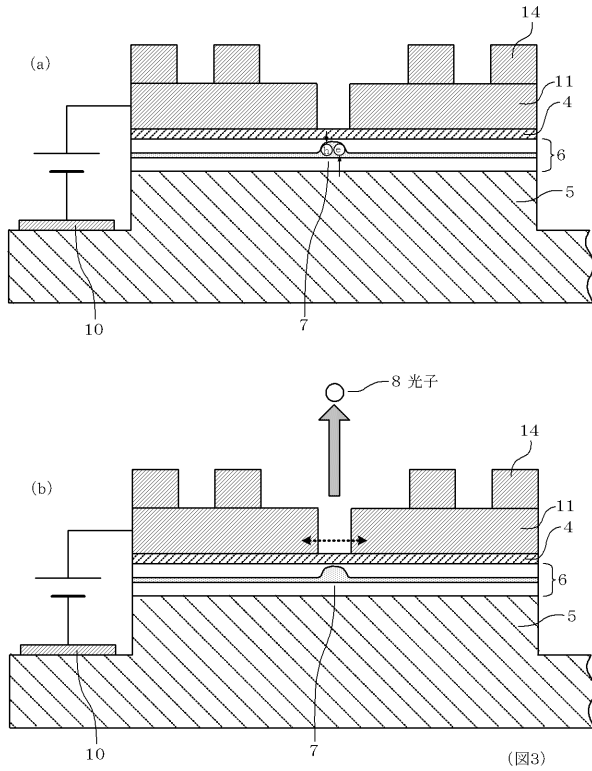
【図1】



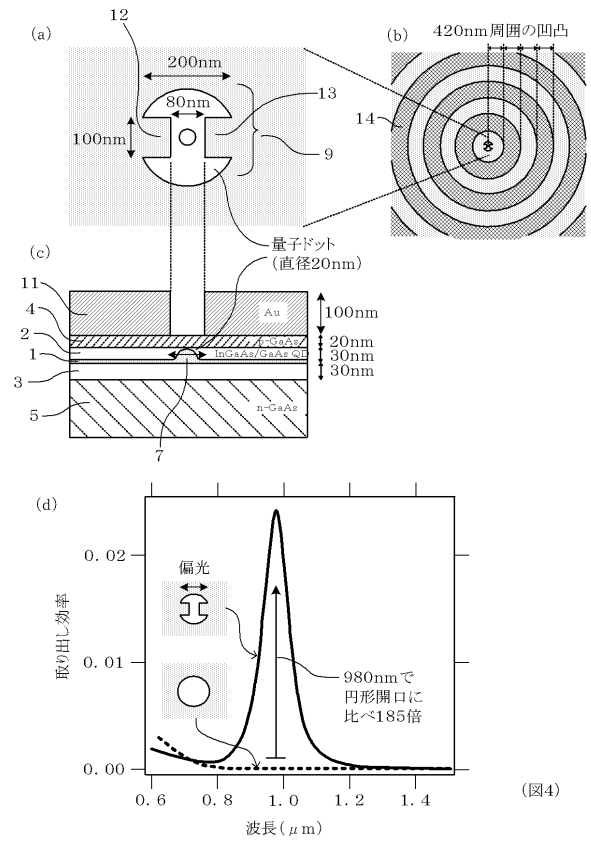
【図2】



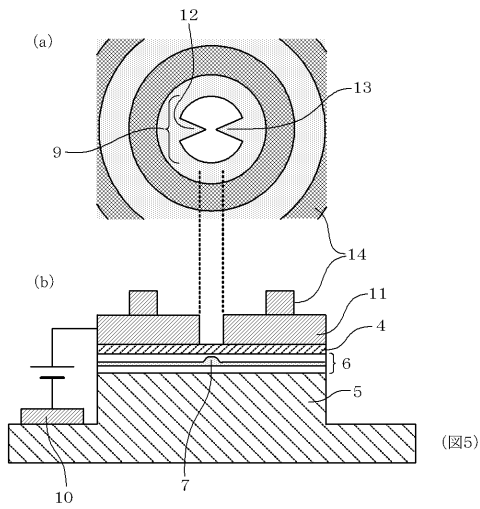
【図 3】



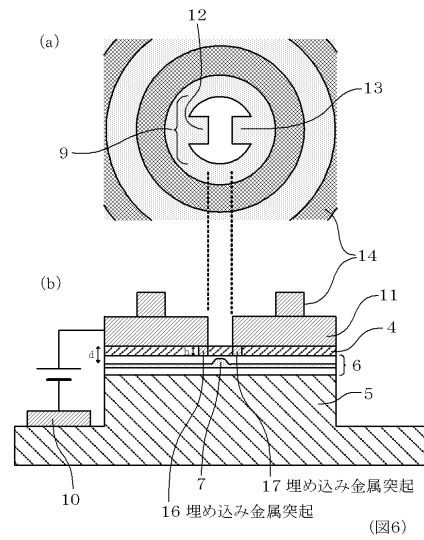
【図 4】



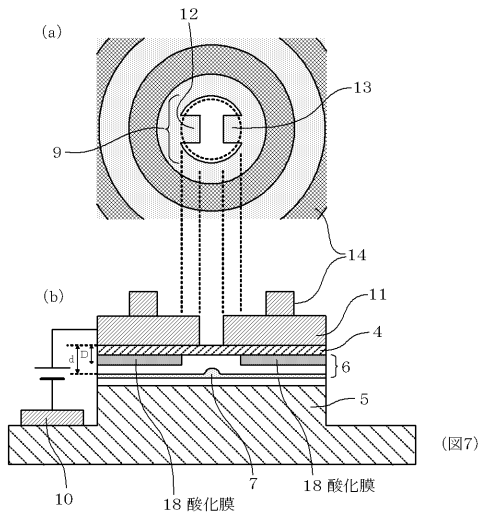
【図 5】



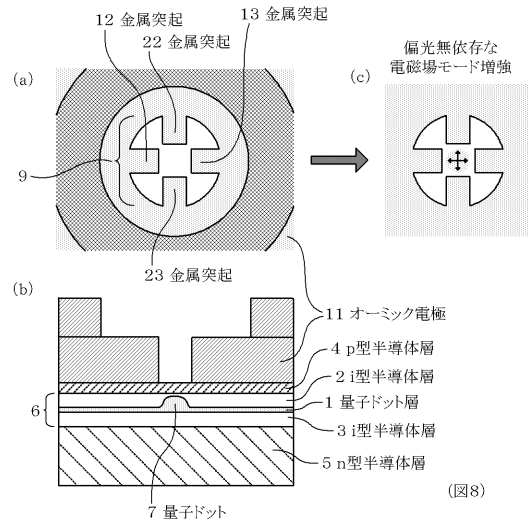
【図 6】



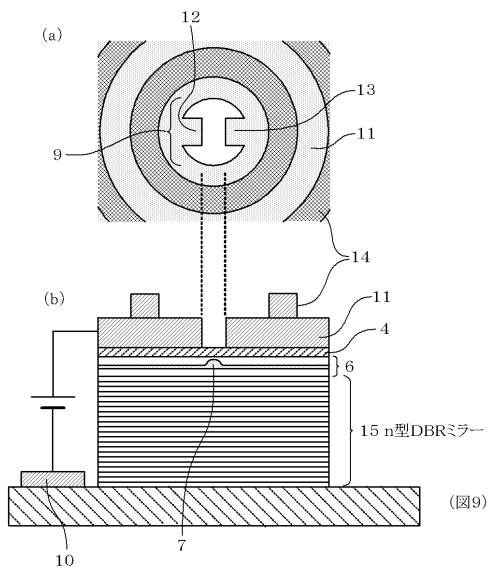
【図 7】



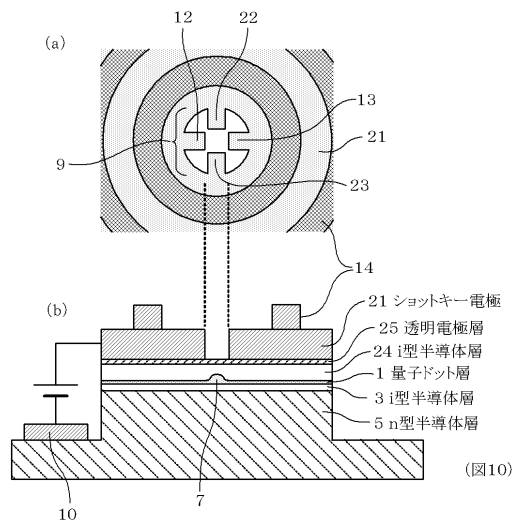
【図 8】



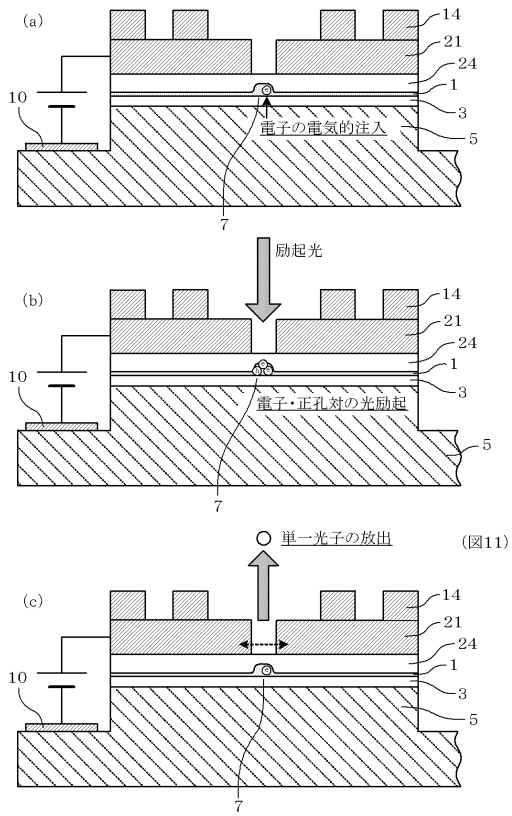
【図 9】



【図 10】



【図 1 1】



【図 1 2】

