

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6296548号  
(P6296548)

(45) 発行日 平成30年3月20日(2018.3.20)

(24) 登録日 平成30年3月2日(2018.3.2)

(51) Int.Cl. F I  
H O I S 5/34 (2006.01) H O I S 5/34

請求項の数 8 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2014-136998 (P2014-136998)	(73) 特許権者	000005223 富士通株式会社
(22) 出願日	平成26年7月2日(2014.7.2)		神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号
(65) 公開番号	特開2016-15417 (P2016-15417A)	(73) 特許権者	504137912 国立大学法人 東京大学
(43) 公開日	平成28年1月28日(2016.1.28)		東京都文京区本郷七丁目3番1号
審査請求日	平成29年4月5日(2017.4.5)	(74) 代理人	100107766 弁理士 伊東 忠重
		(74) 代理人	100070150 弁理士 伊東 忠彦
		(74) 代理人	100192636 弁理士 加藤 隆夫

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光子発生装置及び光子発生方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

半導体基板上に形成された単一の量子ドットと、  
前記量子ドットに励起光を照射して前記量子ドットのs-シェル励起子分子状態を共鳴励起する励起光源と、

前記s-シェル励起子分子状態を形成する2つのs-シェル励起子のうち、s-シェル励起子の再結合エネルギーに共鳴し、かつs-シェル励起子分子の再結合エネルギーに共鳴しない共振エネルギーを有する共振器と、

前記励起光と前記s-シェル励起子分子の再結合発光から、前記s-シェル励起子の再結合発光を分離する光学フィルタと、  
を備えることを特徴とする光子発生装置。

【請求項2】

前記s-シェル励起子の前記再結合エネルギーを  $E_x$ 、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーを  $E_{Bx}$ 、前記励起光のエネルギーを  $E_p$  とすると、前記励起光は、

$$E_p = (E_x + E_{Bx}) / 2$$

を満たすことを特徴とする請求項1に記載の光子発生装置。

【請求項3】

前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーに等しいエネルギーの制御光を生成する制御光源、

をさらに有し、前記制御光源は、前記励起光の照射の後、前記励起光のパルス幅の数倍

の時間をおいた後に、前記制御光を前記量子ドットへ照射することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光子発生装置。

【請求項 4】

前記励起光源は、前記s-シェル励起子分子状態を共鳴励起する前記励起光と、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーに等しい制御光とを切り換え可能な可変光源であり、

前記励起光源は、前記励起光の照射の後、前記励起光のパルス幅の数倍の時間をおいた後に、前記制御光で前記量子ドットを照射することを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の光子発生装置。

【請求項 5】

単一の量子ドットの周囲に、前記量子ドットのs-シェル励起子の再結合エネルギーに共鳴し、かつ前記量子ドットのs-シェル励起子分子の再結合エネルギーに共鳴しない共振エネルギーを有する共振器を配置し、

前記量子ドットを、励起光で照射してs-シェル励起子分子状態に共鳴励起し、

前記励起光と前記s-シェル励起子分子の再結合発光から、前記s-シェル励起子の再結合発光を分離する、  
ことを特徴とする光子発生方法。

【請求項 6】

前記s-シェル励起子の前記再結合エネルギーを  $E_X$ 、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーを  $E_{BX}$ 、前記励起光のエネルギーを  $E_P$  とすると、前記励起光は、

$$E_P = (E_X + E_{BX}) / 2$$

を満たすことを特徴とする請求項 5 に記載の光子発生方法。

【請求項 7】

前記励起光の照射の後、前記励起光のパルス幅の数倍の時間をおいた後に、前記量子ドットに、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーに等しい制御パルス照射し、

その後に、前記励起光と前記s-シェル励起子分子の前記再結合発光から、前記s-シェル励起子の前記再結合発光を分離する、

ことを特徴とする請求項 5 または 6 に記載の光子発生方法。

【請求項 8】

エネルギー可変の光源を用いて、前記量子ドットに前記励起光を照射し、

前記励起光の照射の後に前記光源のエネルギーを切り換え、前記励起光のパルス幅の数倍の時間をおいた後に、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーに等しい制御パルスを前記量子ドットに照射し、

その後に、前記励起光と前記s-シェル励起子分子の前記再結合発光から、前記s-シェル励起子の前記再結合発光を分離する、

ことを特徴とする請求項 5 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の光子発生方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、単一光子を生成する光子発生装置と光子発生方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、光や物質の間の相互作用を精緻に制御することで、それらの量子的な状態を操作し、情報処理に活用する量子情報技術への期待が高まっている。量子情報技術の代表的なアプリケーションは、量子暗号通信（量子鍵配布）や量子演算である。これらを実現することで安全性が高い情報通信や、特定アルゴリズムでの高速演算が実現可能となる。量子情報技術の基盤となる技術は、制御された量子状態を作り出すことである。特に単一光子およびもつれ光子対を制御性良く発生させることは、量子暗号通信などへの適用の可能性が拡がり、重要である。

【0003】

10

20

30

40

50

単一光子発生器として、固体材料、安定動作、発光波長制御の観点から、半導体量子ドットを用いたものが多く研究されている。現在までのところ、近紫外の波長領域から光ファイバー通信の波長帯まで、主に光励起によって単一光子発生器が実現されている。

【0004】

最も基本的な量子鍵配布に単一光子発生器を用いる場合に、その性能指標として、複数光子発生を反映する二次光子相関値 $g^{(2)}(0)$ や、光取り出し効率 $h$ 、繰り返し周波数、ジッターなどのパラメータが用いられる。中でも $g^{(2)}(0)$ は、単一光子発生器とその他の光源との差を端的に表すパラメータである。一般的な光源では $g^{(2)}(0)$ は1を下回ることはないが、単一光子発生器では1を下回り、理想的な単一光子発生器では0となる。しかし実際には量子ドットなどの量子二準位系を用いて単一光子を発生させたとしても、 $g^{(2)}(0) = 0$ となることは困難である。その原因として、所望の量子ドット以外の何かからの除去しきれない発光（バックグラウンド発光）が発生し、複数光子が発生したかのように観測される場合と、および1回の光励起で一つの量子ドットから複数回光子が発生する場合が挙げられる。

10

【0005】

単一光子性を高めて $g^{(2)}(0) = 0$ に近づける手法として、準共鳴励起が有効であることが知られている（たとえば、非特許文献1～4参照）。準共鳴励起とは、量子ドットのp-シェル励起子（伝導体の第一励起準位の1個の電子と価電子帯の第一励起準位の1個の正孔からなる励起子）などの励起状態のエネルギーや、s-シェル励起子（伝導体の基底準位の1個の電子と価電子帯の基底準位の1個の正孔からなる励起子）からLOフォノン一個分高いエネルギーに共鳴する励起光を照射し、これらの準位から基底状態へと緩和したs-シェル励起子を単一光子として使用する手法である。

20

【0006】

図1では一例として、p-シェル状態を共鳴的に光励起する場合の準共鳴励起による単一光子発生器の動作を示す。p-シェル励起子のエネルギー $E_{ex}$ と同じエネルギーの励起パルス照射すると、励起パルスの時間幅 $\tau_{pulse}$ で量子ドットにp-シェル励起子が生成される。その後、緩和時間 $\tau_{relax}$ 程度でp-シェル励起子がs-シェル励起子に緩和し、再結合寿命 $\tau_x$ 程度の時間で単一光子を発生する。この手法によって余剰なキャリア生成を抑え、単一光子発生器として使用する量子ドットのみを選択的に光励起することが可能となる。量子ドットを光励起する際に同時に励起されてしまうその他の発光源（別の量子ドットなど）からの発光が抑制され、バックグラウンド発光が低減される。

30

【0007】

なお、量子ドットを共振器中に配置して放出光子を単一空間モード化し、光ファイバーなどの光学素子との結合効率を高める手法が提案されている（たとえば、特許文献1参照）。この方法では、エネルギー調整が可能な励起レーザを使用して、p-シェルなどの励起状態の励起子を光励起し、基底状態にエネルギー緩和したs-シェル励起子の再結合発光を、単一光子またはもつれ光子対の発生に用いている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特表2004-518275号公報

【非特許文献】

【0009】

【非特許文献1】Santori et al., Phys. Rev. Lett. 86, 1504 (2001)

【非特許文献2】Mal'ko et al., APL 88 081905 (2006)

【非特許文献3】Kumano et al., J. Nanoelectron. Optoelectron. 1 p.39 (2006)

【非特許文献4】K. Takemoto, et al., phys. stat. sol. (c) 5, No. 9, 2699 (2008)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

40

50

p-シェル励起子状態などへの準共鳴励起を用いても実際の単一光子発生では $g^{(2)}(0) = 0$ とはならず、複数光子の発生が起きる。この複数光子発生を抑制することが課題である。

【課題を解決するための手段】

【0011】

準共鳴励起を用いても複数光子が発生する原因は、単一光子として用いるs-シェル状態から一回の励起光照射イベントにつき2個以上の光子が生成されるためと考えられる。単一光子発生器で、1回の励起パルス照射イベントで2個以上の光子が生成される理由としては、1回の励起パルス照射内で起きる再励起の過程が考えられる。再励起の過程とは、特定の時間幅  $\tau_{\text{pulse}}$  を有する励起パルスの一回の照射が完了しないうちに、励起光の吸収による励起状態の励起子（例えばp-シェル励起子）生成、励起状態の励起子のs-シェル状態の励起子への緩和、s-シェル励起子の再結合発光、励起光の再吸収によるp-シェル励起子生成、が起こる過程である。この再励起の過程は確率的に発生するので、励起イベントによっては、1回または複数回この過程が発生する可能性が残り、複数個の光子発生の原因となる。バンド内遷移（例えばp-シェルからs-シェルへの緩和）の遷移時間  $\tau_{\text{relax}}$  が10ps程度であるのに対して、励起パルスの時間幅  $\tau_{\text{pulse}}$ （典型値は10～20ps）もそれと同程度あるいはそれ以上であることから、再励起の過程が生じうる。再励起が起きると、単一光子の発生純度が低下する。

10

【0012】

そこで課題解決の手段としては、再励起の過程を抑制するために、s-シェル励起子分子状態（伝導帯の基底準位の2個の電子と価電子帯の基底準位の2個の正孔からなる2個のs-シェル励起子状態）と共振器効果を利用する。外部からの励起パルスのエネルギーを、後述する二光子吸収によるs-シェル励起子分子生成を可能とするエネルギーに調整し、照射する。共振器効果を用いて、光励起されたs-シェル励起子分子状態にある2個のs-シェル励起子のうち、最初に起きるs-シェル励起子分子発光の再結合寿命を長く制御し、引き続いて起きるs-シェル励起子発光の再結合寿命を短く制御することで、励起パルスの照射時間と比較して十分に長いs-シェル励起子分子発光の再結合寿命が実現されるので、再励起の効果を抑制可能となる。これにより、1回の励起パルス照射イベント内の単一光子の発生純度を高める。

20

【0013】

なおこの明細書および特許請求の範囲で、「s-シェル励起子分子状態」というときは、2つの励起子が量子ドットのs-シェル状態に存在することをいい、「s-シェル励起子状態」というときは、1つの励起子が量子ドット内のs-シェル状態に存在することをいう。s-シェル励起子分子状態が再結合発光する際は、s-シェル励起子分子の再結合エネルギーである $E_{Bx}$ の光子が発生し、その後s-シェル励起子の再結合エネルギーである $E_x$ の光子が発生する。これをs-シェル励起子の再結合発光と呼ぶ。量子ドット中の電子と正孔などのキャリア間に働くクーロン相互作用によってs-シェル励起子分子再結合エネルギー $E_{Bx}$ とs-シェル励起子再結合エネルギー $E_x$ は異なる値を取るため、発生するs-シェル励起子分子再結合発光とs-シェル励起子再結合発光は異なる波長となる。励起パルスのエネルギー $E_p$ は $E_x$ と $E_{Bx}$ の中間のエネルギーであるため、励起パルス中の2つの光子を量子ドットが吸収することによって、s-シェル励起子分子状態が生成される。この時、 $E_x$ と $E_{Bx}$ および $E_p$ がそれぞれ異なるエネルギーを取るため、それぞれの光子の波長が異なることからフィルタで識別可能となる。

30

40

【0014】

上記より、光子発生装置は、

半導体基板上に形成された単一の量子ドットと、

前記量子ドットに励起光を照射して前記量子ドットのs-シェル励起子分子状態を共鳴励起する励起光源と、

前記s-シェル励起子分子状態を形成する2つのs-シェル励起子のうち、s-シェル励起子の再結合エネルギーに共鳴し、かつs-シェル励起子分子の再結合エネルギーに共鳴しな

50

い共振エネルギーを有する共振器と、

前記励起光と前記s-シェル励起子分子の再結合発光から、前記s-シェル励起子の再結合発光を分離する光学フィルタと、  
を備える。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】準共鳴励起による単一光子発生過程を示す図である。

【図2】第1実施形態の単一光子発生の原理を説明する図である。

【図3】第1実施形態の単一光子発生装置の概略図である。

【図4】単一光子発生装置で用いられる共振器の一例を示す図である。

10

【図5】第2実施形態の単一光子発生の原理を説明する図である。

【図6】第2実施形態の単一光子発生装置の概略図である。

【図7】第1実施形態および第2実施形態の変形例1を示す図である。

【図8】変形例1で用いられる素子構造を示す図である。

【図9】第1実施形態および第2実施形態の変形例2で用いられる素子構造を示す図である。

【図10】変形例2で用いられる素子構造の別の例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

<第1実施形態>

20

図2は、第1実施形態の単一光子発生の原理を説明するための図である。図2(A)において、s-シェル励起子分子状態を共鳴励起する励起パルス照射による単一量子ドットへのs-シェル励起子分子状態生成を示す。励起パルスのエネルギー  $E_p$  は、s-シェル励起子の再結合エネルギー  $E_X$  と、s-シェル励起子分子の再結合エネルギー  $E_{BX}$  の中間のエネルギーであり、 $E_p = (E_X + E_{BX}) / 2$  を満たす。

【0017】

実施形態では、後述するように、単一の量子ドットの周囲に微小な共振器を配置して、光閉じ込めを実現する。共振器は、s-シェル励起子エネルギー  $E_X$  に共鳴する共振エネルギーを有する。共振器の共振エネルギーを  $E_{cavity}$  とすると、 $E_{cavity} = E_X$ 、かつ  $E_{cavity} > E_{BX}$  の条件を満たす。

30

【0018】

図2(B)で、s-シェル励起子分子状態に励起されたs-シェル励起子対のうち、最初に再結合するs-シェル励起子分子(再結合エネルギーは  $E_{BX}$ )は、再結合寿命(あるいは発光寿命)  $T_{BX}$  で再結合して単一光子を発生する。s-シェル励起子分子の再結合寿命  $T_{BX}$  は、共振器効果により、共振器がない場合のs-シェル励起子分子の再結合寿命  $T_{BX}$  に比べて数倍程度長くなる。どの程度長くできるかは、励起光のパルス幅  $\tau_{pulse}$  や量子ドットの種類、共振器の構成にもよるが、実施形態では、 $T_{BX}$  は  $t_{BX}$  の3倍程度とする。s-シェル励起子分子の再結合寿命  $T_{BX}$  を長くすることで、照射時間  $\tau_{pulse}$  内での再励起を抑制する。

【0019】

40

図2(C)および図2(D)で、再結合寿命  $T_X$  で再結合エネルギー  $E_X$  のs-シェル励起子が再結合して、2つ目の単一光子を発生する。s-シェル励起子の再結合寿命  $T_X$  は、共振器効果により、共振器がない場合のs-シェル励起子の再結合寿命  $T_X$  と比較して短くなる。実施形態では1/5程度とする。異なるエネルギーを有する2つの単一光子を光学フィルタで弁別することで、所望のエネルギーを有する単一光子だけを取り出すことができる。実施形態では、2番目に再結合するs-シェル励起子発光を単一光子として取り出す。

【0020】

伸長されたs-シェル励起子分子の再結合寿命  $T_{BX}$  の直後に、迅速に励起子発光を生じさせることで、1回の励起パルス照射イベント内での再励起を抑制し、単一光子を高い純度で生成することができる。

50

## 【 0 0 2 1 】

次に、共振器の効果について説明する。s-シェル励起子の再結合エネルギー  $E_X$  に共鳴する共振器を単一の量子ドットの周囲に配置することで、エネルギー  $E_{BX}$  を有する光子の状態密度が低減する。他方、エネルギー  $E_X$  を有する光子の状態密度が増大する。その結果、s-シェル励起子分子の発光寿命  $T_{BX}$  は長く、s-シェル励起子の再結合寿命  $T_X$  は短くなる。

## 【 0 0 2 2 】

共振器効果がない場合、代表的なs-シェル励起子の再結合寿命  $T_X$  は1 ns程度、s-シェル励起子分子の再結合寿命  $T_{BX}$  は0.5 ns程度である。共振器の共振エネルギー  $E_{cavity}$  を、 $E_{cavity} = E_X$ 、かつ  $E_{cavity} > E_{BX}$  を満たすように設計することで、s-シェル励起子の再結合寿命  $T_X$  を0.2 ns程度に短縮させ、s-シェル励起子分子の再結合寿命  $T_{BX}$  を、1.5 ns程度に延長することができる。

## 【 0 0 2 3 】

共振器効果により、s-シェル励起子分子からs-シェル励起子への遷移時間  $T_{BX}$  が1.5 nsまで延びると、一般的な励起パルス光の時間幅  $\tau_{pulse} = 10 \sim 20$  psと比較して十分に大きな値になる。励起パルスが残っている時間内で再励起される可能性は無視できる程度に小さくなり、単一光子純度が改善される。

## 【 0 0 2 4 】

図3は、s-シェル励起子分子状態と共振器効果を利用した単一光子発生装置10Aの概略構成図である。単一光子発生装置10Aは、単一の量子ドット15および共振器14を有する素子部13と、量子ドット15に励起光を照射する励起パルス発生器11と、量子ドット15から発生する単一光子の中から所望のエネルギーを有する単一光子を取り出す光学フィルタ12を有する。

## 【 0 0 2 5 】

励起光のエネルギー  $E_p$  は、上述のようにs-シェル励起子分子状態のs-シェル励起子の再結合エネルギー  $E_X$  とs-シェル励起子分子の再結合エネルギー  $E_{BX}$  の中間であり、 $E_p = (E_X + E_{BX}) / 2$  である。励起パルス発生器11の光学パスと、単一光子を検出する光学フィルタ12の検出パスとの間の角度  $\theta$  は、光励起が実現される角度であれば任意の角度に設定できる。 $\theta = 0^\circ$  のように、励起パスと検出パスが同軸になってもかまわない。励起パルス発生器11は、たとえば、半導体レーザダイオードによるパルス光源である。

## 【 0 0 2 6 】

光学フィルタ12は、図3の例では、エネルギー  $E_X$  の単一光子だけを取り出す。その結果、単一光子発生装置10Aの出力は、エネルギー  $E_X$  の単一光子となる。

## 【 0 0 2 7 】

図4は、素子部13の構成例を示す。素子部13は、共振器14としてポスト型共振器14を有する。ポスト型共振器14は、GaAs基板31上で、下部DBR(分布ブラッグ反射器)35aと上部DBR35bの間に、共振器層(キャビティ層)32を挟み込んだ構成を有する。量子ドット15を有する量子ドット層33は、共振器層32の中心部の最も電場強度が大きくなる箇所位置する。

## 【 0 0 2 8 】

量子ドット層33は、たとえばInAs/GaAs量子ドット15を有する。GaAs基板31に替えてInP基板を用い、InAs/InP量子ドット15を用いてもよい。

## 【 0 0 2 9 】

下部DBR35aおよび上部DBR35bは、屈折率の異なる結晶膜を交互に積層したものである。下部DBR35aおよび上部DBR35bの積層は、エピタキシャル成長されたGaAs/AlGaAs多層膜であってもよいし、Si/SiO<sub>2</sub>や、SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>のような酸化膜との多層膜構造を用いてもよい。適切なマスクとドライエッチング条件を用いて、積層を円柱形のポストに加工する。ポスト構造の直径(X-Y面内の径)は、たとえば2 μm以下である。

## 【 0 0 3 0 】

10

20

30

40

50

共振器層 3 2 の膜厚は、s-シェル励起子の発光波長（1 波長）に一致する厚さである。下側 D B R 3 5 a と上部 B D R 3 5 b の膜数も、量子ドット 1 5 のs-シェル励起子エネルギー（再結合エネルギー） $E_x$  に共振し、かつ、反射率が 9 9 % 程度を超える高反射率を実現できる数に設定される。

#### 【 0 0 3 1 】

ポスト型共振器 1 4 に課される条件としては、共振エネルギー  $E_{cavity}$  が量子ドット 1 5 のs-シェル励起子エネルギー  $E_x$  に等しく、s-シェル励起子分子エネルギー  $E_{BX}$  とは異なっていることである。量子ドット 1 5 中に励起されたs-シェル励起子はキャリア間のクーロン相互作用の影響を受けるので、s-シェル励起子状態にあるときと、s-シェル励起子分子状態にあるときでは発光再結合エネルギーが変化する。このエネルギー変化量を、s- 10  
シェル励起子分子束縛エネルギー（ $E_{BX}$ ）と呼ぶ。代表的な I n A s / G a A s 量子ドットや I n A s / I n P 量子ドットでは、 $E_{BX}$  は 1 m e V から数 m e V 程度のエネルギーとなる。

#### 【 0 0 3 2 】

エネルギー差  $E_{BX}$  の存在により、s-シェル励起子の再結合エネルギーから  $E_{BX} / 2$  だけ離れたエネルギーで、s-シェル励起子分子状態の共鳴励起が可能となる。上述のように、s-シェル励起子分子状態への励起には、s-シェル励起子発光とs-シェル励起子分子発光の中間のエネルギー  $E_p = (E_x + E_{BX}) / 2$  の励起パルスを使用する。共振器 1 4 を用いることで、s-シェル励起子状態への遷移時間  $T_{BX}$ （図 2 参照）を長く、s-シェル励起子状態からの遷移時間（再結合寿命） $T_x$  を短く制御することができる。これにより、1 20  
回の励起パルス照射で生成される単一光子の純度が向上する。

#### 【 0 0 3 3 】

##### < 第 2 実施形態 >

図 5 は、第 2 実施形態の単一光子発生原理を説明する図である。第 2 実施形態では、励起光（ $E_p$ ）の照射の後に（図 5（A））、パルス幅  $\tau_{pulse}$  の数倍程度の時間をあけて（図 5（B））、制御パルスを照射する（図 5（C））。制御パルスのエネルギー  $E_c$  は、s-シェル励起子分子の再結合エネルギー  $E_{BX}$  に等しい（ $E_c = E_{BX}$ ）。制御パルス  $E_c$  の照射を受けて、s-シェル励起子分子状態にある励起子対のうちs-シェル励起子分子が再結合して、ひとつ目の単一光子を発生する。制御パルスの持続時間（パルス幅）は、たとえば励起パルスと同じ  $\tau_{pulse}$  である。 30

#### 【 0 0 3 4 】

励起パルス  $E_p$  の照射後に、 $\tau_{pulse}$  の数倍の時間をあけて制御パルス  $E_c$  を照射することで、制御パルスの照射時間内（典型値は、 $\tau_{pulse} = 10 \sim 20$  p s 程度）に、s-シェル励起子分子状態（図 5（B））からs-シェル励起子状態（図 5（D））へ、コヒーレントに遷移する。

#### 【 0 0 3 5 】

第 1 実施形態では、s-シェル励起子分子からs-シェル励起子状態への遷移時間  $T_{BX}$  は、励起パルス  $E_p$  の照射後 1 . 5 n s 程度の時定数で確立的に遷移していた。第 2 実施形態では、s-シェル励起子分子からs-シェル励起子状態への遷移時間  $T_{BX}$  は、制御パルス  $E_c$  の照射時間  $\tau_{pulse}$  で確定的に決定される。 40

#### 【 0 0 3 6 】

図 6 は、第 2 実施形態の単一光子発生装置 1 0 B の概略構成図である。単一光子発生装置 1 0 B は、第 1 実施形態の単一光子発生装置 1 0 A に制御パルス発生器 1 6 を追加したものである。第 1 実施形態の単一光子発生装置 1 0 A と同じ構成要素には、同じ符号を付けてその説明を省略する。

#### 【 0 0 3 7 】

制御パルス発生器 1 6 は、s-シェル励起子分子の再結合エネルギー  $E_{BX}$  のレベルの制御パルス  $E_c$  を照射する。制御パルス発生器 1 6 の光学パスと再結合発光による光子の検出パスの間の角度 に課される条件は、光照射が実現されればよく、 $\theta = 0$  のように励起パスと検出パスが同軸となってもかまわない。また、励起パルス発生器 1 1 と制御パルス発 50

生器 16 と 1 つのレーザで兼用してもよい。この場合、出力レベルが可変のレーザを使用して、S-シェル励起子分子状態を励起する励起光 ( $E_p$ ) と、制御パルス ( $E_c = E_{BX}$ ) を切り換える構成としてもよい。共振器 14 は、第 1 実施形態と同様にポスト型共振器 14 としてもよい。

【0038】

第 2 実施形態の方法では、s-シェル励起子分子の再結合寿命を  $T_{BX}$  (たとえば 1.5 ns 程度) から、制御パルスの時間幅  $\tau_{pulse}$  (たとえば 10 ~ 20 ps) に低減することができる。したがって、繰り返しレートが向上する。

【0039】

また、単一光子発生装置 10B のジッターを低減することができる。単一光子のジッターは、確率的に決まる単一光子の発光時刻のイベントごとのズレであり、通常の単一光子発生では s-シェル励起子の発光寿命  $\tau_X$  程度である。第 1 実施形態では、共振器効果によって短くなった s-シェル励起子の寿命  $T_X$  と、共振器効果によって長くなった s-シェル励起子分子の寿命  $T_{BX}$  の和が単一光子発生装置 10A のジッターとなる。第 2 実施形態では、制御パルス  $E_c$  の導入によって、コヒーレントに s-シェル励起子状態への遷移が起きる。したがって、単一光子発生装置 10B のジッターは、共振器効果によって短くなった s-シェル励起子の寿命  $T_X$  程度で済む。

【0040】

<変形例 1>

図 7 は、第 1 実施形態および第 2 実施形態の単一光子発生装置の変形例 1 を示す。図 7 (A) は、第 1 実施形態の単一光子発生装置 10A の変形例である単一光子発生装置 10C の概略構成図、図 7 (B) は、第 2 実施形態の単一光子発生装置 10B の変形例である単一光子発生装置 10D の概略構成図である。

【0041】

これらの変形例では、素子部 23 は、量子ドット 15 と、共振器 14 と、量子ドット 15 を挟んで配置される一組の電極 27 を有する。電極 27 は、量子ドット 15 の s-シェル励起子のエネルギーを電場制御する。

【0042】

一組の電極 27 に電圧を印加することで、シュタルク効果を利用して、量子ドット 15 中の s-シェル励起子エネルギーを微調整する。適切な電場を印加することによって、s-シェル励起子エネルギーと共振器 14 の共振エネルギーを合致させ、共振器効果 (s-シェル励起子分子の再結合寿命を長引かせ、s-シェル励起子の再結合寿命を短くする) を確実にする。

【0043】

Stranski krastanow 法などの手法によって自己形成的に形成された量子ドット 15 では、サイズばらつきに起因してエネルギーが不均一になる。この場合、量子ドット 15 の s-シェル励起子の再結合エネルギーに合わせて設計された共振器 14 を配置しても、量子ドット 15 のサイズばらつきによって、s-シェル励起子の再結合エネルギー  $E_X$  と、共振器 14 の共振エネルギー  $E_{cavity}$  の間に若干のエネルギー差が存在する可能性がある。そこで外部からの電場印加によって s-シェル励起子エネルギーを微調整し、共鳴条件を実現する。

【0044】

図 8 は、図 7 の電極 27 構造を用いた素子部 23 の構成例を示す図である。図 8 (A) は断面図、図 8 (B) は平面図である。

【0045】

素子部 23 では、GaAs 基板 41 上にドーブ層 42 を介して、ポスト型共振器 14 が形成されている。ドーブ層 42 は、n 型または p 型の不純物がドーブされた半導体層である。ポスト型共振器 14 の中央に量子ドット 15 が配置される。

【0046】

ポスト型共振器 14 の周囲に低屈折率の絶縁膜 43 を成膜し、所定の形状に加工する。

10

20

30

40

50

絶縁膜 43 上に、トップ電極 27a を形成する。トップ電極 27a は、ポスト型共振器 14 にコンタクトするリング電極 27b を有する。光を基板 41 の垂直方向（紙面の上方）に取り出す場合、電場強度が強いポスト型共振器 14 の中心軸周辺での反射や遮蔽を取り除くのが望ましい。そのため、上部電極 27a に接続するリング電極 27b を設ける。ドープ層 42 上にボトム電極 27c を配置する。ポスト型共振器 14 の DBR 部（図 4 参照）の上端や下端の誘電体層に、p 型または n 型の不純物をドープしてもよい。

【0047】

トップ電極 27a とボトム電極 27c の間に電圧を印加して、 $E_{\text{cavity}} = E_x$  となる電圧値を検知する。検知された電圧値で単一光子発生器 10C、10D を動作させる。これにより、素子部 23 の作製誤差による共振エネルギー  $E_{\text{cavity}}$  のズレや、量子ドット 15 の形状ばらつきによる再結合エネルギー  $E_x$ 、 $E_{\text{BX}}$  のズレが生じても、外部電場によって  $E_x$  を調整することで  $E_{\text{cavity}} = E_x$ 、 $E_{\text{cavity}} = E_{\text{BX}}$  の条件を実現できる。

10

【0048】

<変形例 2>

図 9 は、第 1 実施形態および第 2 実施形態の変形例 2 を示す。変形例 2 では、共振器 14 として二次元スラブスラブ形状のフォトニック結晶 50 を用いる。フォトニック結晶 50 は周期的な穴 52 を有する。穴 52 の径と間隔、および欠陥構造の形状・サイズを設計することで  $E_{\text{cavity}} = E_x$ 、 $E_{\text{cavity}} = E_{\text{BX}}$  の条件が達成可能である。

【0049】

フォトニック結晶 50 は、共振器層 51 を有する。共振器層 51 は、p-i-n のドープ構造を有する。図示はしないが、フォトニック結晶 50 中の欠陥構造が共振器 14 として機能する。同じく図示はしないが、共振器層 51 内で電場強度が最大になると考えられる i 層の中心に、量子ドット 15 を有する量子ドット層を配置する。

20

【0050】

共振器層 51 として、GaAs 系や InP 系の材料を用いることができる。基板 71 と p-i-n 型の共振器層 51 の間に異種半導体材料のエッチング犠牲層 72 を配置する。エッチング犠牲層 71 は、たとえば共振器層 51 が GaAs 系材料ならば AlGaAs 層、共振器層 51 が InP 系材料なら InGaAs 層を用いることができる。電子線ビーム露光によるレジストパターニングの後に、エッチング犠牲層 72 を選択エッチングして、空気部（キャビティ）74 を作り、スラブ型構造を実現することが可能である。

30

【0051】

図 10 は、フォトニック結晶 60 に電極構造 75 を設けた構成例を示す。フォトニック結晶 60 は、共振器層 61 として、n 型ドープ層 61n、ノンドープ層 61i、p 型ドープ層 61p がこの順で積層された構成を有する。共振器層 61 内で電場強度が最大になると考えられるノンドープ層 61i の中心に、量子ドット 15 を有する量子ドット層を配置する。共振器層 61 の材料や、エッチング犠牲層の配置は、図 9 と同様である。

【0052】

フォトニック結晶 60 の欠陥（不図示）の周囲に、トップ電極としてリング型電極 75b と、これに接続する電極線 75a を形成する。また、n 型ドープ層 61n 上の共振器から離れた場所にボトム電極 75c を配置する。リング型電極 75a とボトム電極 75c の間に電場を印加して、 $E_{\text{cavity}} = E_x$  となる電圧値を検知し、その電圧値で単一光子発生器 10C、10D を動作させることができる。

40

【0053】

上述した実施形態および変形例により、純度が高い単一光子発生器が実現される。

【0054】

本発明は上述した実施形態および変形例に限定されるものではなく多様な変形が可能である。たとえば、光学フィルタ 12 は、s-シェル励起子の再結合発光（2 番目に発生する単一光子）を、励起光および s-シェル励起子分子の再結合発光（1 番目の単一光子）から分離して取り出す構成としてもよい。また、s-シェル励起子分子の再結合発光（1 番目に発生する単一光子）を、励起光および s-シェル励起子の再結合発光（2 番目の単一光子）

50

から分離して取り出す構成としてもよい。

【 0 0 5 5 】

以上の説明に対し、以下の付記を提示する。

(付記 1)

半導体基板上に形成された単一の量子ドットと、

前記量子ドットに励起光を照射して前記量子ドットのs-シェル励起子分子状態を共鳴励起する励起光源と、

前記s-シェル励起子分子状態を形成する2つのs-シェル励起子のうち、s-シェル励起子の再結合エネルギーに共鳴し、かつs-シェル励起子分子の再結合エネルギーに共鳴しない共振エネルギーを有する共振器と、

前記励起光と前記s-シェル励起子分子の再結合発光から、前記s-シェル励起子の再結合発光を分離する光学フィルタと、

を備えることを特徴とする光子発生装置。

(付記 2)

前記s-シェル励起子の前記再結合エネルギーを  $E_X$ 、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーを  $E_{BX}$ 、前記励起光のエネルギーを  $E_P$  とすると、前記励起光は、

$$E_P = (E_X + E_{BX}) / 2$$

を満たすことを特徴とする付記 1 に記載の光子発生装置。

(付記 3)

前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギー  $E_{BX}$  に等しいエネルギーの制御光を生成する制御光源、

をさらに有し、前記制御光源は、前記励起光の照射の後、前記励起光のパルス幅の数倍程度の時間をおいた後に、前記制御光を前記量子ドットへ照射することを特徴とする付記 1 または 2 に記載の光子発生装置。

(付記 4)

前記励起光源は、前記s-シェル励起子分子状態を共鳴励起する前記励起光と、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーに等しい制御光とを切り換え可能な可変光源であり、

前記励起光源は、前記励起光の照射の後、前記励起光のパルス幅の数倍の時間をおいた後に、前記制御光で前記量子ドットを照射することを特徴とする付記 1 または 2 に記載の光子発生装置。

(付記 5)

前記量子ドットに電場を印加するための一対の電極、

をさらに有することを特徴とする付記 1 ~ 4 のいずれかに記載の光子発生装置。

(付記 6)

前記共振器はポスト型共振器であり、前記量子ドットは、前記ポスト型共振器内の最も電場強度が強くなる位置に配置されることを特徴とする付記 1 ~ 5 のいずれかに記載の光子発生装置。

(付記 7)

前記共振器はフォトリック結晶を用いた共振器であり、前記量子ドットは、前記フォトリック結晶中の最も電場強度が強くなる位置に配置されることを特徴とする付記 1 ~ 5 のいずれかに記載の光子発生装置。

(付記 8)

単一の量子ドットの周囲に、前記量子ドットのs-シェル励起子の再結合エネルギーに共鳴し、かつ前記量子ドットのs-シェル励起子分子の再結合エネルギーに共鳴しない共振エネルギーを有する共振器を配置し、

前記量子ドットを、励起光で照射してs-シェル励起子分子状態に共鳴励起し、

前記励起光と前記s-シェル励起子分子の再結合発光から、前記s-シェル励起子の再結合発光を分離する、

ことを特徴とする光子発生方法。

10

20

30

40

50

(付記 9)

前記s-シェル励起子の前記再結合エネルギーを  $E_x$ 、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーを  $E_{Bx}$ 、前記励起光のエネルギーを  $E_p$  とすると、前記励起光は、

$$E_p = (E_x + E_{Bx}) / 2$$

を満たすことを特徴とする付記 8 に記載の光子発生方法。

(付記 10)

前記励起光の照射の後、前記励起光のパルス幅の数倍の時間をおいた後に、前記量子ドットに、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーに等しい制御パルス照射し、その後、前記励起光と前記s-シェル励起子分子の前記再結合発光から、前記s-シェル励起子の前記再結合発光を分離する、

10

ことを特徴とする付記 8 または 9 に記載の光子発生方法。

(付記 11)

エネルギー可変の光源を用いて、前記量子ドットに前記励起光を照射し、

前記励起光の照射の後、前記光源のエネルギーを切り換え、前記励起光のパルス幅の数倍の時間をおいた後に、前記s-シェル励起子分子の前記再結合エネルギーに等しい制御パルスを前記量子ドットに照射し、

その後、前記励起光と前記s-シェル励起子分子の前記再結合発光から、前記s-シェル励起子の前記再結合発光を分離する、

ことを特徴とする付記 8 ~ 10 のいずれかに記載の光子発生方法。

20

(付記 12)

前記量子ドットに電場を印加し、前記量子ドットの前記s-シェル励起子の再結合エネルギーと前記共振器の前記共振エネルギーを一致させる、

ことを特徴とする付記 8 ~ 11 のいずれかに記載の光子発生方法。

【符号の説明】

【0056】

10A、10B、10C、10D 単一光子発生装置

11 励起パルス発生器(励起光源)

12 光学フィルタ

13、23 素子部

14 共振器

30

15 量子ドット

16 制御パルス発生器

27、75 電極

27a トップ電極

27b、75b リング電極

27c、75c ボトム電極

31、41、71 半導体基板

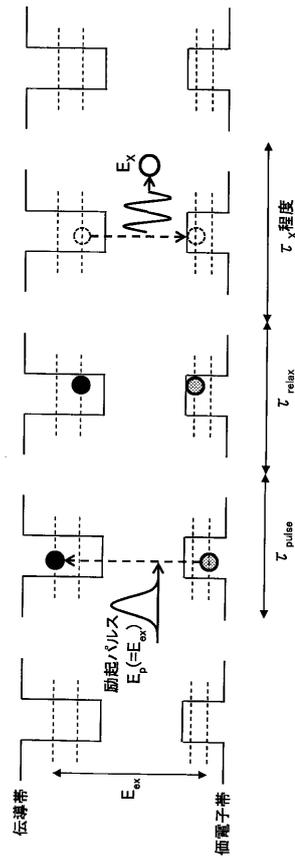
32、51、61 共振器層

33 量子ドット層

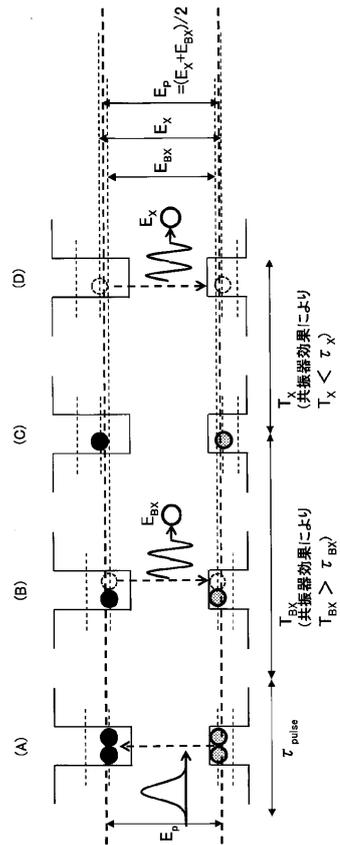
50、60 フォトニック結晶

40

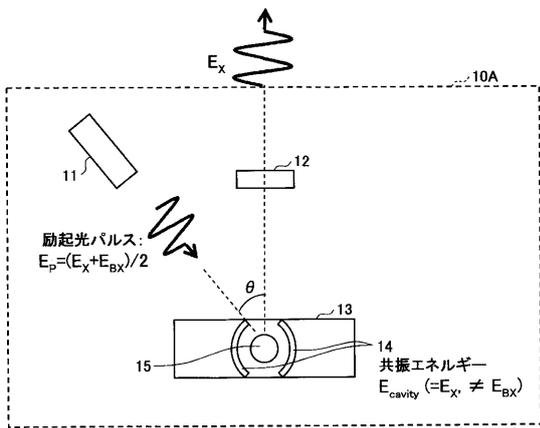
【図1】



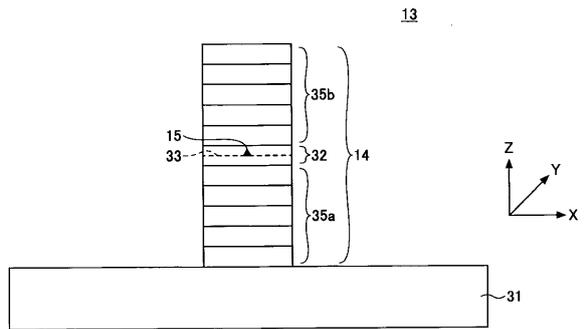
【図2】



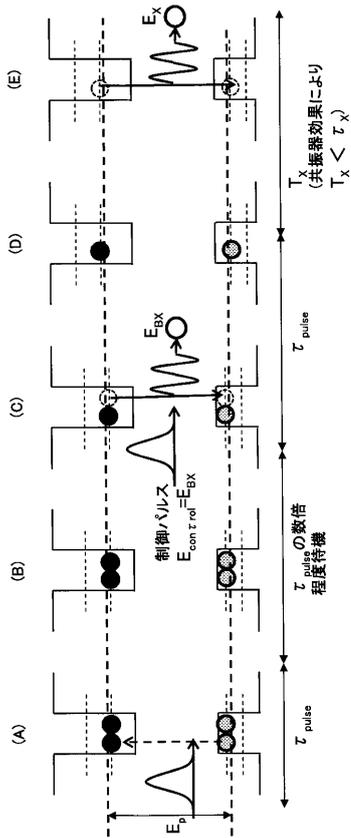
【図3】



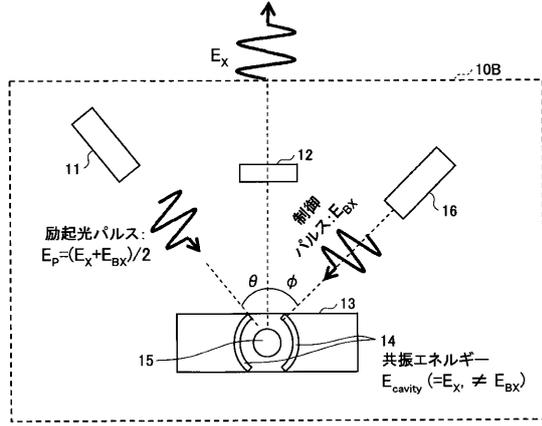
【図4】



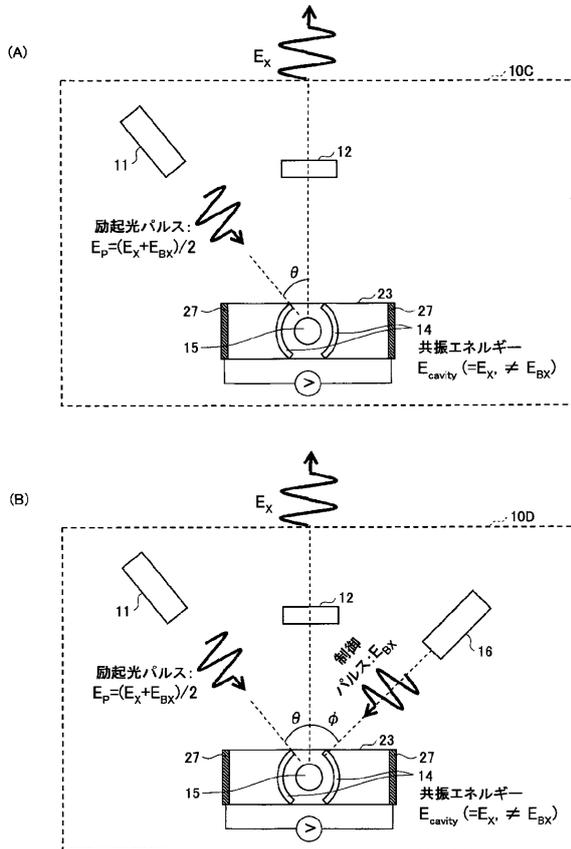
【図5】



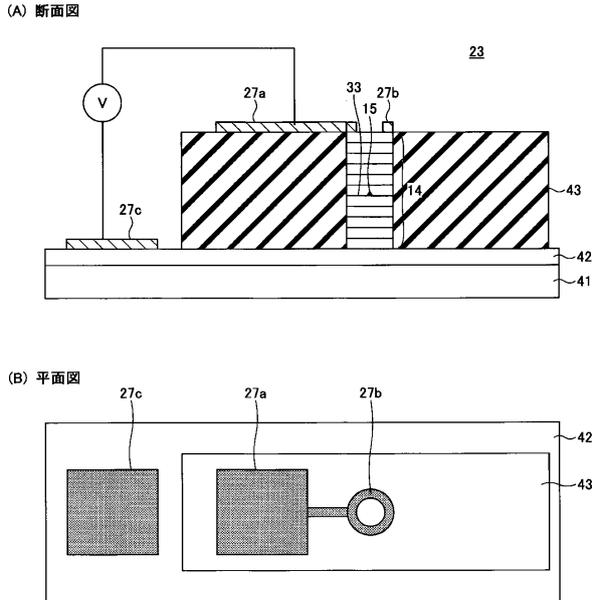
【図6】



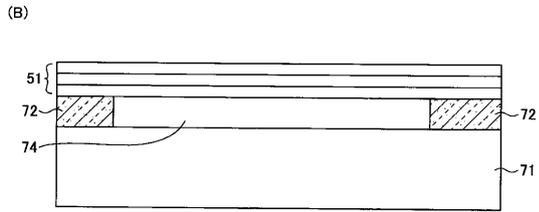
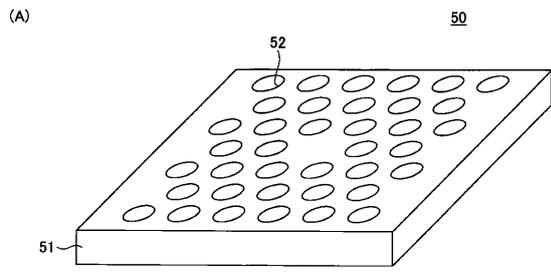
【図7】



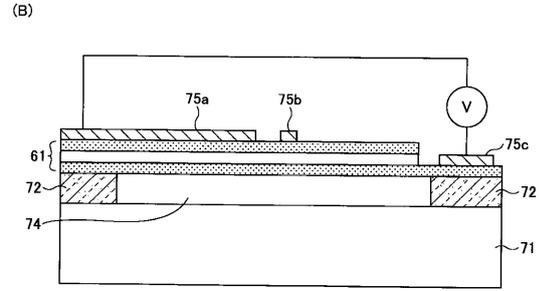
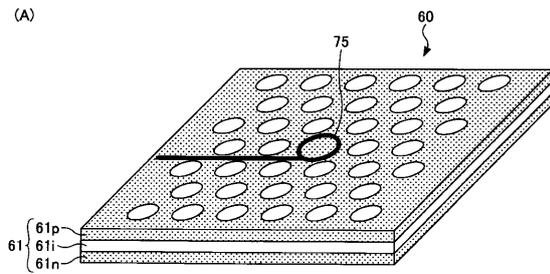
【図8】



【 9 】



【 10 】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 宮澤 俊之  
神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内
- (72)発明者 荒川 泰彦  
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

審査官 小濱 健太

- (56)参考文献 特表2004-518275(JP,A)  
特表2004-501514(JP,A)  
特開2011-238929(JP,A)  
特開2011-141477(JP,A)  
米国特許出願公開第2002/0196827(US,A1)

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