

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7212621号
(P7212621)

(45)発行日 令和5年1月25日(2023.1.25)

(24)登録日 令和5年1月17日(2023.1.17)

(51)国際特許分類 F I
 H 0 1 L 33/06 (2010.01) H 0 1 L 33/06
 H 0 1 S 5/183(2006.01) H 0 1 S 5/183
 G 0 2 F 1/017(2006.01) G 0 2 F 1/017 5 0 6

請求項の数 13 (全21頁)

(21)出願番号	特願2019-542719(P2019-542719)	(73)特許権者	593005895 コンセホ・スベリオル・デ・インベステイガシオネス・シエンティフィカス(セエセイセ)
(86)(22)出願日	平成30年2月6日(2018.2.6)		CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS(CSIC)
(65)公表番号	特表2020-506556(P2020-506556A)		スペイン28006マドリッド、セラノ117
(43)公表日	令和2年2月27日(2020.2.27)	(74)代理人	100106518 弁理士 松谷 道子
(86)国際出願番号	PCT/EP2018/052960	(74)代理人	100156122 弁理士 佐藤 剛
(87)国際公開番号	WO2018/146096	(72)発明者	ベニト・アレン・ミリャン スペイン28760トレス・カントス(最終頁に続く)
(87)国際公開日	平成30年8月16日(2018.8.16)		
審査請求日	令和2年11月24日(2020.11.24)		
(31)優先権主張番号	17382061.4		
(32)優先日	平成29年2月8日(2017.2.8)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	欧州特許庁(EP)		

(54)【発明の名称】 量子光光源素子およびその量子光学回路

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

p - 型半導体材料、n - 型半導体材料および真性の半導体材料から選択される半導体材料の基板上に:

基板の上に位置する下方ダイオード(1)、

該下方ダイオード(1)の上に位置する上方ダイオード(3)、

半導体材料ブロック(2)または半導体材料の第1層(11)の少なくとも1つにオーミック電気接触を生じる半導体材料の第1層(11)または半導体材料ブロック(2)のいずれかの上に位置する第1金属層(21)、

半導体材料の第3層(13)または半導体材料の第4層(31)の少なくとも1つにオーミック電気接触を生じる半導体材料の第3層(13)または半導体材料の第4層(31)のいずれかの上に位置する第2金属層(22)、および半導体材料の第6層(33)にオーミック電気接触を生じる半導体材料の第6層(33)の上に位置する第3金属層(23)

を含む量子光光源素子であって、

下方ダイオード(1)は基板の上に位置し、

- ・ p - 型半導体材料および n - 型半導体材料から選択される半導体材料のブロック(2) ; ブロック(2)は基板をドーブした場合の基板のものと同じ型のドーブを有し ;

- ・ ブロック(2)に配置され、前記ブロック(2)と同じ型のドーブを有する半導体材料の第1層(11)、

- ・ 半導体材料の第1層(11)の上に位置し、エレクトロルミネセンスによる古典的な光(

10

20

C光)を生成するように構成された少なくとも1つの量子井戸(4)または古典的な光を吸収して量子光を再放射するように構成された少なくとも1つの量子光エミッター(5)を含む半導体材料の第2層(12)、

- ・半導体材料の第2層(12)上に位置する半導体材料の第3層(13)であって：
 - 半導体材料の第1層(11)がn-型半導体材料である場合はp-型半導体材料、
 - 半導体材料の第1層(11)がp-型半導体材料である場合はn-型半導体材料から製造される半導体材料の第3層(13)

を含み、

上方ダイオード(3)は下方ダイオード(1)の上に位置し、

- ・半導体材料の第3層(13)上に配置される半導体材料の第4層(31)であって：
 - 半導体材料の第1層(11)がn-型半導体材料である場合はp-型半導体材料、
 - 半導体材料の第1層(11)がp-型半導体材料である場合はn-型半導体材料から製造される半導体材料の第4層(31)、

・半導体材料の第4層(31)の上に位置し：

- 半導体材料の第2層(12)が少なくとも1つの量子光エミッター(5)を含む場合はエレクトロルミネセンスによる古典的な光(C光)を生成するように構成された少なくとも1つの量子井戸(4)、または

- 半導体材料の第2層(12)が少なくとも1つの量子井戸(4)を含む場合は古典的な光を吸収して量子光を再放射するように構成された少なくとも1つの量子光エミッター(5)

を含む半導体材料の第5層(32)、

・半導体材料の第5層(32)上に配置され：

- 半導体材料の第1層(11)がn-型半導体材料である場合はn-型半導体材料、
- 半導体材料の第1層(11)がp-型半導体材料である場合はp-型半導体材料から形成される半導体材料の第6層(33)、

を含み、

前記量子光光源素子は、n-光子フォック状態分類に従って電流を量子光に変換するように構成されている、

モノリシックな量子光光源素子。

【請求項2】

半導体材料の第2層(12)が少なくとも1つの量子井戸(4)を含み、量子光光源素子が電氣的単離層または金属層によって置き換えられた半導体材料の第6層(33)によって特徴付けられる、請求項1に記載の量子光光源素子。

【請求項3】

半導体材料の第2層(12)が、少なくとも1つの量子井戸(4)および第3金属層(23)を含み、半導体材料の第6層(33)が除去されている、請求項1に記載の量子光光源素子。

【請求項4】

ダイオード(1、3)の少なくとも1つの半導体材料から発せられる光の少なくとも一部分を反射するためのブラッグリフレクターおよびミラー(51、52、53)をさらに含む、請求項1～3のいずれか1項に記載の量子光光源素子。

【請求項5】

ブラッグリフレクターおよびミラー(51、52、53)の最大合計数が4である、請求項4に記載の量子光光源素子。

【請求項6】

量子光がブロック(2)を通過するようにブロック(2)または基板のいずれかの上に配置された、光ファイバーカプラ(41)および反射防止コーティング(42)の少なくとも1つをさらに含む、請求項1～5のいずれか1項に記載の量子光光源素子。

【請求項7】

量子エミッター(5)の下にエアーギャップを規定する量子エミッター(5)を含む半導

10

20

30

40

50

体材料の第5層(32)上に製作された少なくとも1つの膜(61)をさらに含む、請求項1~6のいずれか1項に記載の量子光光源素子。

【請求項8】

量子エミッター(5)を含む半導体材料の第5層(32)に少なくとも1つのフォトニック構造をさらに含む、請求項1~7のいずれか1項に記載の量子光光源素子。

【請求項9】

膜(61)が、少なくとも1つのフォトニック構造を含む、請求項7、または請求項7を引用する請求項8に記載の量子光光源素子。

【請求項10】

半導体材料の第5層(32)がカンチレバー(62)のような機械的オシレーターを含む、請求項1~9のいずれか1項に記載の量子光光源素子。

10

【請求項11】

下方ダイオードまたは上方ダイオードを通して電流を流すための前記下方ダイオードまたは上方ダイオードに1またはそれよりも多い電流遮断層をさらに含む、請求項1~10のいずれか1項に記載の量子光光源素子。

【請求項12】

半導体材料の基板および層(11、12、13、31、32、33)がIII-V族化合物半導体、I-IV族化合物半導体、およびIV族半導体よりなる群から選択される材料または材料の組合せから製造されていることを特徴とする、請求項1~11のいずれか1項に記載の量子光光源素子。

20

【請求項13】

請求項1~12のいずれか1項に記載の量子光光源素子として少なくとも2つの素子を含む量子光学回路。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の目的は、物理学の分野、詳細には量子物理学の分野に関する。

本発明は量子光光源に関する。より詳細には、本発明は、単一の光子または拡大した光子対を発生することができる素子(device:またはデバイスもしくは装置)に関する。

【背景技術】

30

【0002】

新しい量子情報技術の開発は、光と物質の量子理論の典型的な範囲である。これらの理論が発展されて数年後の今日でさえ、いずれか(または両方)が連続体媒体と考える半古典的な理論に通常基づいて作動している。

【0003】

今日まで、最小の商用トランジスタでさえ、そのナノメートルサイズの特徴にもかかわらず、平衡と電荷輸送の古典的な方程式で合理的に説明できる。同じことが、光が連続的な電磁波として扱われるほとんどの発光素子および検出器についても言える。これらの理論の洗練の力とその信じられないほどの応用範囲を認識しながら、遅かれ早かれ、私たちの技術的成熟度が重大な障壁を超え、そこから光と物質の量子特性が最大限に活用されることは明らかである。

40

【0004】

2013年、西ヨーロッパの住民は、インターネットを介した商取引に2,150億ユーロを費やし、ユーザーの72%が何らかの商取引をオンラインで行っている。古典暗号および量子暗号の目的は、現代の電気通信でデータのプライバシーとセキュリティを維持できる新しい方法と技術を開発することである。

【0005】

公開鍵暗号化に基づく最初のアルゴリズムは、30年以上前にRivest、ShamirおよびAdlemanによって制定され、現在でもこのアルゴリズム(RSA)はインターネットからの機密情報の大部分を暗号化するために使用されている。

50

【 0 0 0 6 】

そのように暗号化されたメッセージが不可侵ではないことを理解する必要がある。その解読は退屈な数学の問題であるが、打ち勝ち難いものではない。古典的な因数分解の方法を使用する場合、現代のデスクトップコンピューターでは256ビットRSAキーで暗号化されたメッセージを解読するために数千年を要するであろう。ただし、量子コンピューターで実行されている量子ファクタリングアルゴリズムがタスクに使用される場合、タスクはそれほど難しくない。このような結果はすぐには期待できないが、最近の5桁の数値または16ビットの因数分解の実証により、これらの量子コンピューターの能力は「最高潮に達した (in crescendo)」。

【 0 0 0 7 】

公開鍵方式の代わりに、ワンタイムパッド暗号化は、無限の計算能力を持つ敵に対して安全である。唯一の欠点は、秘密鍵を交換する方法が壊れないことが証明されなければならないことである。幸いなことに、量子情報理論は、公開鍵アルゴリズムのセキュリティ違反という問題を引き起こすだけでなく、秘密鍵交換のための「不可侵の」方法も提供する。最もよく知られている暗号量子プロトコルはBB84である。これは、不確定性の原理から派生する「量子状態のクローン化定理なし (no cloning theorem of quantum states)」に基づいている。量子状態でエンコードされた情報は、測定プロセス中に不可逆的に変更される。これにより、2つの正当なパートナーが量子状態でエンコードされた情報を交換し、プライバシーが侵害されたときに通知するさまざまな方法が可能になる。量子情報プロトコルのこの排他的な特性により、正当な対話者間で絶対的な秘密鍵を不可侵で交換することができる。

【 0 0 0 8 】

単一光子源は、単一の粒子または光子として光を発する光源である。それは、コヒーレント光源 (レーザー) および熱光源 (白熱電球や水銀灯など) とは異なる。ハイゼンベルグの不確定性の原理は、単一の周波数の正確な数の光子を持つ状態を作成できないことを規定している。ただし、フォック状態 (または数値状態 (number state)) は、電場の振幅が狭い帯域幅に分散しているシステムで調べることができる。この文脈において、単一光子源は、効果的に1光子数の状態を生じさせるが、絡み合った (entangled) 光子対源状態は、効果的に2光子数の状態を生じさせる。フォック状態または数値状態であることは、明確に定義された数の量子を持つフォック空間の要素である光の量子状態である。

【 0 0 0 9 】

量子テレコミュニケーションの場合、単一光子または絡み合った光子対などの光の量子状態が、量子情報の優先キャリアである。それらを生成して操作するために、多くの研究グループと企業は、量子光理論をアプリケーションに、後者をテクノロジーにしようとする無数の努力を費やしている。実際、いわゆる「量子モデム」は、大企業や機関顧客向けのプロトタイプとして実験室の外にすでに存在する。それらを普及させるには、そのような技術が、マイクロプロセッサの発明とムーアの法則以来の他のデジタル技術で起こったような小型化と統合のサイクルを通過することが必要である。重要な問題は、新しい量子情報技術で一般的に使用できる、信頼性の高い、集積化されたスケーラブルな量子光光源の製造である。

【 0 0 1 0 】

20世紀初頭の黒体放射と光電効果を説明するために、光の量子特性がアインシュタインとプランクによって仮定された。しかし、個々の光子の検出を含む光の量子的性質の最初の実験的証拠が見つかったのは70年代までなかった。この先駆的な研究から、原子の個々の量子状態によって放出される光の流れは、ローカルの観測者の観点から、単一の光子 (1つずつ放出される光子) で構成されるが、ほとんどの光源は一般にこのルールを満たす。それを見る簡単な方法は、特定の光源に存在する2つの無関係な個々の原子が、2つの無関係な光子を同時に放出できることである。

【 0 0 1 1 】

次の数十年は量子情報理論の発展の基礎であったが、それは1984年以来、BB84プロト

10

20

30

40

50

コルの発行、インターネットの出現、および電気通信の安全性に対する社会の関心の高まりとともに、量子情報理論と技術は現在の関連性を徐々に達成した。

【 0 0 1 2 】

この技術を開発するのに適した物理システムを見つけるのは簡単ではない。個々の原子とイオンの実験が成功したにもかかわらず、これらの物理システムは、半導体光源と光ファイバーに基づく既存の電気通信技術に新しい量子プロトコルを適応させるのに適していないことが明らかであった。90年代半ばに、個々の分子を量子光エミッターとして使用して、多くの原子で構成される物理システムも1つの電子が毎回励起されると1つの光子を放出できることを示す新しい道が開かれた。

【 0 0 1 3 】

新しい世紀が到来するまで、固体システムの単一光子源が確実に実証されたわけではなかった。それは、ダイヤモンドの色中心、ガラスに分散したコロイド状CdTe量子ドット、およびエピタキシャル法によってGaAs上に成長したInAs量子ドットでほぼ同時に報告された。

【 0 0 1 4 】

長年にわたってこれらの研究は一般的になり、量子光光源は3つのカテゴリーに分類できるさまざまな量子システムで実証されている：

I. - GaAs、InP、GaNなどの半導体マトリックスにナノ構造化され、エピタキシャル法によって成長したさまざまな半導体材料に基づく量子光エミッター。

II. - 有機および無機のナノ構造および分子が固体の基板またはポリマーに分散したものにに基づく量子光エミッター。

III. - ダイヤモンドやシリコンカーバイドなどの大きなエネルギーバンドギャップを持つ結晶に埋め込まれた空孔と欠陥に基づく量子光エミッター。

【 0 0 1 5 】

すべての作業に言及し、その結果を比較するには、ここで利用できるスペースよりもはるかに多くのスペースが必要になるため、各カテゴリーの代表として、InAs / GaAs量子ドット、コロイド状量子ドット、ダイヤモンド上の窒素空孔の比較に準拠する。後者の2つは室温でスムーズに動作するが、最初のカテゴリーのほとんどの量子光光源は適切に動作するために低温 (< 77 K) を必要とする。温度は、提案された技術目標にとって重要な利点であるが、それだけではない。適切な技術になるためのさまざまなアプローチの実際の可能性を決定するいくつかの実用的で基本的な要件がある。

【 0 0 1 6 】

- 波長：現在、中距離および長距離の光通信は光ファイバーを介して行われている。信号の減衰はdB / km単位で測定され、近赤外および短波長赤外では低く、最小値は1.55ミクロンで、可視および紫外領域でははるかに高くなる。GaAsベースおよびInPベースの量子ドットの発光は、850 ~ 1700 nmの赤外線範囲を自然にカバーする。他のシステムは通常、可視光線または紫外線で放射する。

- 統合：最新の光情報技術は、光の生成（検出）がトランスミッター（レシーバー）側の単一のフォトニックチップに信号処理コンポーネントとともにパッケージ化されたフォトニック集積回路に基づいている。それは、エレクトロニクス産業の小型化のステップに従う産業である。半導体ウェーハーとエピタキシャル材料は、エレクトロニクス業界で知られているマイクロプレーナー製造技術を使用して、すでに発光器と検出器、光増幅器、導波路などの受動部品の製造に使用されている。ダイヤモンドは、機械的強度と化学的安定性が高いため、またはコロイド量子ドット、分子、カーボンナノチューブなどは、環境への耐久性や弾力性が不十分であるため、産業スケールでの既存の製造プロセスへの適合が適切または容易ではない可能性がある。この規則の例外はSiCである。SiCは、エレクトロニクスおよびオプトエレクトロニクスでの使用がよく知られている。

【 0 0 1 7 】

- 電気駆動能力：最初の固体レーザーは、活性媒体の電子をより高いエネルギーレベルに励起する外部光源で励起（pump）された。電気エネルギーを直接コヒーレント光に変

10

20

30

40

50

換できる最初のレーザーは、励起エネルギーを提供する電極間で電流が流れるイオン化ガスに基づいていた。これらの光源は、最初に二重ヘテロ構造レーザーダイオード、そして後に量子井戸レーザーダイオードが発明されるまで、まだかさばる機器であった。これらのコンパクトな光源は、低消費電力と高変調レートを備えており、現代の通信で要求されるように、電気データを光に直接変換することができた。集積と小型化が目的の場合、OLEDを含む耐久性があり、簡単に製造できる半導体材料で作られた電気駆動の量子光光源は、この側面ですれほど開発されていない他の代替品に比べて大きな利点を提供することは明らかである。

【 0 0 1 8 】

- 光子の識別不能性：光源から放出された個々の光子の識別不能性は、量子処理アルゴリズムおよび量子暗号プロトコルの重要なパラメーターである。識別不能性は、同じ光源の2つの光子を記述する波束間の差異がないこととして測定される。その敵は、生成プロセス中の環境に起因するランダムな位相シフトである（純粋な位相調整）。

10

【 0 0 1 9 】

固体環境での光子の放出に参与する電子は、それらの間および結晶格子の他の励起との望ましくない相互作用を受ける（すなわち、放射された光子の寿命の逆数（後者の場合は理想的にはフーリエ変換された光子である）を超えて放射線幅（Hzで測定）を拡げるフォノン）。室温でダイヤモンド中の不純物によって放出される光子の線幅は、InAs量子ドットの閉じ込められた励起子によって放出されるものよりも数桁大きくなる。両方が同等になる、1.8 Kまで温度を下げると、その後ダイヤモンドがエピタキシャル量子エミッターの上で、その主な技術の優位性（室温動作）を失う。

20

【 0 0 2 0 】

カテゴリ-1の量子光エミッターの独占的な利点は、2002年に東芝研究所（ケンブリッジ）によって利用された。InAs / GaAs量子ドットにおける単一光子のデモンストレーションの直後に、東芝研究所は直接電気注入に基づく最初のモノリシック量子光光源を開発した。東芝の設計は、真性領域InGaAs自己組織化量子ドットが分子線エピタキシー（MBE）によって成長するp-i-nダイオードで構成されている。ダイオードに直接バイアスをかけると、多数キャリアがドープ層から量子ドットに注入され、光が発生する。単一量子ドットの光が空間的およびスペクトル的にフィルタリングされる場合、結果は電気注入を伴う量子光光源になる。

30

【 0 0 2 1 】

東芝がUS2002196827A1で提示および検証した設計は、（特にエネルギー消費とシステム統合の点で）外部光源による励起に比べて大きな利点があり、次のセクションで説明するいくつかの問題がある。いくつかのバリエーションがあるが、東芝のp-i-n設計は、カテゴリ-1の異なる材料を使用したモノリシック量子光光源の製造に使用されている。他のカテゴリ-1では、この設計は徐々に複製され、より広い範囲の材料での量子光の電力線生成の実現可能性が調査されている。

【 0 0 2 2 】

Toshiba Labs（2002）の設計は不変のままであり、効率を高めるため、または絡み合った光子対を生成するために、それ自体によって改善されたが、その後の開発はすべて単一の活性領域を有する2端子素子に基づいている。量子ドット / 欠陥および電氣的キャリアを注入する2つのドープ領域を含む。

40

【 0 0 2 3 】

2端子設計にはいくつかの欠点がある：

【 0 0 2 4 】

1. - いくつかの重要なパラメーターの競合する制御：外部電場は、量子閉じ込めシュタルク効果と容量性クーロン充電をそれぞれ介して、カテゴリ-1の量子光エミッターの発光波長と充電状態を制御する貴重なリソースである。単一のp-i-n接合に基づく設計では、不可能ではないにしても、エミッターの充電状態および / またはその放出波長を、素子に注入される電流とは独立して制御することが困難になる。先駆的な東芝の研究で見られる

50

ように、量子光エミッターは最低電流（80 nA）に対してのみ単一波長で動作する。より高い電流では、より低いエネルギーで新しい輝線が現れ、より高い輝電流では連続スペクトルになる。実際には、これは、望ましくない新しい光源の出現と、複数の光子の同時放射を意味する。これは、放出される光子の波長または量子特性に影響を与えずに、注入電流によって決定される1秒あたりの光子数を大きく変えることができないため、量子光光源の輝度の制御を妨げる。この欠点は、東芝の設計に基づいたすべての電氣的に駆動される量子光光源に共通する。

【0025】

2. - 超薄膜の限られた性能：2端子設計は、量子ドットが超薄膜に埋め込まれている状況に簡単に適用することはできない。最も重要な実用的重要性の例は、フォトニック結晶マイクロキャビティー（PCM）埋め込み、例えば量子ドット、に基づく電気駆動の量子光光源の製造である。PCMは、パーセル効果（弱光 - 物質結合）を通じて量子光光源の輝度を高める集積量子フォトニックの重要なコンポーネントである。また、空洞量子電気力学（強力な光と物質の結合）に基づいた量子リピーターとスピン - 光子界面を開発するための基礎でもある。どちらの場合も、キャビティモードと量子光エミッターエネルギー間のスペクトル調整が重要である。いくつかのグループは、外部の電場によって、そのようなマイクロキャビティーに埋め込まれた量子光エミッターの放射波長を制御する（シュタルク効果）ために、2つの端子素子を使用した。また、PCMに埋め込まれた量子光エミッターのコレクションからの広くて弱いエレクトロルミネセンスが実証されている。

【0026】

しかし、集積量子フォトニックに対するPCMの大きな電位にもかかわらず、電気駆動の量子光光源はPCMに埋め込むのが非常に困難である。その理由は、フォトニック結晶がその誘電環境に非常に敏感であるため、その品質係数（上記の両方のアプリケーションにとって重要なパラメーター）を大幅に低下させることなく、PCMの上に金属電極を堆積できないためである。この基本的な制限により、金属電極はPC境界（通常～20ミクロン以上）から離れて堆積しなければならず、多数のキャリアが量子エミッター（PCMの中心にある）に到達する前に横方向に移動する必要がある経路を大幅に増やす。～20ミクロンはほとんどのオプトエレクトロニクスアプリケーションにとって妥当な距離であるが、ここで関連するPCMは、2端子設計に従って、キャリア注入p-i-n構造を含む、厚さ約100nmの膜で製造される。このような場合、ドープ層の厚さは～30 - nm - 厚だけであり、シート抵抗は本質的に高いだけでなく、PC製造プロセスによって悪化する。そのため、このような素子は、主に逆バイアスで電場を印加することにより、量子光エミッターの波長を制御する手段として検討されてきた。この場合、多数キャリア電流は必要ではなく、役割も果たさない。

【0027】

量子光エミッターが超薄膜を使用する利点がある別のアプリケーション分野は、量子状態の歪み工学に関連する。これは、タイプIおよびIIIの量子光エミッターを使用した絡み合った光子対（entangled photon pair, EPP）の生成に特に関連する。通常、成長したエミッターは、成長面に外部電界を印加して壊れた結晶対称性が回復しない限り、EPPを放出しない。超薄膜の使用により、中程度の外部から加えられた機械力（通常は圧電トランスデューサーによって誘導される）でこれらの状態を設計することができる。モノリシック素子に電気駆動のキャリア注入とひずみエンジニアリングを追加すると、量子光光源、量子リピーターおよびメモリの開発に影響を与え、既存の設計では、上記で説明した超薄膜の高いシート抵抗によっても損なわれる。

【0028】

同じ欠点は、インテロゲーティング・カンチレバー、膜、および量子光を備えた他の超薄ナノオプトメカニカルリソネーターに基づく集積量子センサーの開発を妨げる。

【0029】

3. - 制限されたシステム統合：集積量子フォトニック回路（IQPC）は、他の集積フォトニック回路と同様に、単一チップ上の複数の機能の統合に基づいている。電気駆動の量子光

10

20

30

40

50

光源およびメモリは、導波管、位相変調器、光検出器、オプトメカニカルリソネーターなどを含む受動および能動コンポーネントの長いリストの最初のものにすぎない。IQPCでのこれらのモノリシックコンポーネントの統合を損なういくつかの重要なパラメーターの制御および超薄膜の限られた性能の競合を示す。捕捉された原子やイオンよりも大きな程度まで、固体システムに基づく量子光光源やメモリは、特性および/または環境の統計的変動によって生じる不均一な広がりによって悩まされる。量子フォトニック回路アプリケーションの場合、さまざまなコンポーネントを個別に調整する必要があり、究極のIQPCの場合は、利用可能なスペースを賢く使用して局所で行わなければならない。1で指摘したように、2端子設計は、量子光光源の波長や輝度などの重要なパラメーターを独立した方法で変更するのに十分な柔軟性を欠いており（要件の調整）、あるいは2で指摘したように、フォトニック結晶膜または超薄型コンポーネント上に容易に実装することができない（空間要件）。これらは、以下の発明セクションの記載で説明するように、再設計されたモノリシック設計が軽減し得る多くの課題のいくつかの例にすぎない。

10

【0030】

モノリシック量子光光源素子の先行技術

東芝の元の設計では、キャリアはp-i-nダイオードのドープ層から注入され、直接「埋め込まれた量子光エミッターにおけるエレクトロルミネセンス」を生成する。エレクトロルミネセンスの強度は、素子バイアスを変化させて制御され、この光の量子特性は、光子ストリームのスペクトルおよび空間フィルタリングから発生する。

【0031】

本発明の目的によって対処されるいくつかの態様に対する部分的な解決策を提供することを目的としたいくつかの開発がある。

20

【0032】

“Electrically Driven Single - Photon Source”、Science、295(5552)102-5 2002年2月の中でYuanは、2の異なるドープ領域および2の端子を有するPINダイオードである、p-i-n接合型の真性領域で開示された単一量子ドットのエレクトロルミネセンスから生成された単一光子から電氣的に誘導された放射源を開示する。この文献では、低レベルの注入電流下で、量子ドットエレクトロルミネセンスのスペクトルが、励起子の再結合による単一の鋭いラインを明らかにする方法について詳しく説明されている。放射光の2次自己補正機能(second order autocorrection function)は、サブナノ秒の長い電圧パルスによって、単一光子放射オンデマンドを刺激できることを示している。

30

【0033】

東芝の活動とともに、例えば文献US2011108744には、光子源が記述されており、それには：量子ドット：前記量子ドットを介して電場を適用するよう構成された電気接点；および前記接点に接続された電源が含まれ、前記電源は、キャリアが前記量子ドットに供給されてバイ励起子またはより高次の励起子を形成するように電位を適用するように構成されている。その文献では、前記光子源は、キャリアが前記量子ドットに出入りするのにかかる時間を増加させるように構成された障壁をさらに含み、その時間は量子ドット内の励起子の放射寿命よりも長く、量子ドットは、バイ励起子の崩壊、励起、または高次の崩壊の間の光子放出に適している。

40

【0034】

WO2011009465は、半導体材料から作られた実質的に円錐形のナノワイヤに基づく光子量子光源を記載しており、ナノワイヤは、ナノワイヤに集積され、電極間に駆動電圧が印加されると単一の光子を生成または放出できる光子エミッターに電氣的に接続された一対の電極によって補完される。この文献では、ナノワイヤが空気または真空中に囲まれているため、ナノワイヤおよび周囲の物質(空気)の屈折率の関係を利用できることを説明している。また、電極が光学的に透明であり、反射防止要素の一部として使用できることも詳述している。

【0035】

先行技術に存在する前記した欠点は、本発明の調整可能なモノリシック量子光光源素子

50

およびその量子光学回路を提供することにより解決でき、これは、先行技術で提唱された量子光発光ダイオードおよび多数のキャリアの注入モードの概念を変える。

【0036】

この目的のために、調整可能なモノリシック量子光光源素子は、 n -光子フォック状態分類（すなわち、単一-光子源が1光子数状態を生成する、または絡み合った光子対源が2光子数状態を生成するなど）に従って量子光を生成できる量子光発光素子であり、新しい端部および新しい素子活性層を提供する。

【0037】

本発明の目的である量子光発光素子において、古典的な光の量子光へのその場での (*in situ*) 変換は、非線形光学プロセスを一切伴わずに実行されることに留意されたい。これは、本発明の目的である量子光発光素子の重要な要素の1つといえる。パラメトリックダウンコンバージョンなどのいくつかの非線形光学プロセスは、励起光源 (pumping light source) の非線形媒質内で周波数変換を行うことにより、単一光子および絡み合った光子対を生成できる。ポンプ光は通常、外部の高出力レーザー光源によって供給される。半導体化合物をモノリシックに使用してポンプ源と非線形媒体を統合する試みを行うことができるが、そのような素子の設計と動作原理は発明の目的とは大きく異なる。

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0038】

したがって、本発明の目的は、波長および輝度のような重要な特性を独立して調整しながら、バッテリーのような電圧源から量子光を発生させることができるモノリシック素子である。LEDが街路を照らし、電流を強力な白色光に変換するか、レーザーダイオードがDVDのデータを読み取って記録するように、本発明の素子は、モノリシック素子の離れた他の活性なコンポーネントを必要としないで、電流を非常に見分けがつかない単一光子または絡み合った光子対に変換する。

20

【0039】

本発明の目的は、超薄膜、フォトリック結晶マイクロキャビティ、および導波路またはより一般的にはその誘電環境に敏感なナノ素子に実装されると性能が制限される既存の電気駆動量子光光源のよく知られている課題の解決策を見出す。これらのすべての場合において、新しい設計はソースのモノリシック特性を損なうことなく課題を解決する。

30

【0040】

その新しい調節能力および光学的統合の実現可能性により、本発明の目的は、量子光の電流モノリシックソースを改善し、量子通信に大きな可能性をもたらすが、量子情報処理および計測のためのより実行可能な量子集積回路に途もひらく。

【課題を解決するための手段】

【0041】

本発明の素子は、モノリシック構造「p-i-n-i-p」で一連のダイオード、好ましくは2セットのダイオード、および一連の真性領域、好ましくは2セットの真性領域を含む。下方の真性層およびドープ層は1つまたはそれよりも多い量子井戸 (QW) を含み、一方、上方の真性層は好ましくは量子光エミッター (例えば、エピタキシャルQD) を含む単一層を含む。底部のダイオードは順バイアスで動作する。すなわち、「QWにおけるエレクトロルミネセンス」を生成する多数のキャリアを注入することによって動作する。この古典的な光 (C光) は、実際には、発光ダイオード (LED) が発光する従来の光であり、量子光エミッターを含む上方の活性ゾーンに到達するまで素子を通して拡がる。この領域では、古典的な光が吸収され、電子-正孔対が生成され、この対は、量子光エミッターによって捕捉され、量子光として再放射される。次に、必要に応じて、量子光光源の時間、空間、およびスペクトルフィルタリングの既知の方法に従って、量子光を収集する。上方ダイオードは独立して駆動でき、2端子設計にはない多くの機能が可能になる：

40

【0042】

・量子閉じ込めシュタルク効果による量子光エミッターエネルギーの制御、したがって

50

、キャリア注入メカニズムとは独立した量子光光源波長の制御。

【0043】

・キャリア注入メカニズムとは無関係に、追加の電気キャリアの容量性または拡散ロードおよびアンロードによるQD充電状態の制御。

【0044】

・2の独立したパラメーターを使用した量子光光源の強度または輝度の変調：下方ダイオードにおける電流注入（古典的な光強度の変調）または上方ダイオードの逆電場（QDにおける電荷の完全な枯渇）。

【0045】

・フォトリック結晶マイクロキャビティ／導波路、ナノ-オプトメカニカルセンサー、歪み工学膜などを組み込み、超薄膜に埋め込まれた量子光光源または量子メモリの完全な電気駆動であって、誘電環境または量子光光源の輝度を損なうことのない完全な電気駆動。

10

【0046】

3端子設計により、モノリシックに埋め込まれた励起光源の注入レベルと独立して、量子光エミッター状態の複雑な垂直および／または横方向の電氣的ゲーティングを実装できる。これは、高度に統合された量子フォトリック回路の実現可能なチューニングおよび省スペース要件を満たすために最も重要である。より具体的には、それによって以下のことが可能となる：

【0047】

・犠牲層およびエッチストップ層と標準の微細加工方法を使用して、完全または選択的に1つまたはそれよりも多いドープ層を除去し、受動領域、電氣的に反転した能動領域、ラテラルゲート、ショットキーゲート、電界効果トランジスタなどを規定する。同一のウェーハーにおけるすべての動作は、モノリシックに埋め込まれた励起典型的光源の注入レベルから独立している。

20

【0048】

また、3端子の概念は、モノリシックに埋め込まれた励起光源の構造に、量子光光源の設計にも特定の制限を課さない。特に：

【0049】

・古典的な発光素子の分野における現在および将来のあらゆる開発を実施できる。特に、従来のLED設計の代わりに、ブラッグリフレクターを使用して共振空洞LEDまたは垂直キャビティレーザ（VCSEL）を製造し、古典的な光スペクトルを狭めて変調率と深さを増加することができる。陽極酸化または他の方法による電流遮断層の形成に基づく電流閉じ込め戦略を実施して、下方または上方のダイオードの電流を流しまたは遮断し、効率／変調率および深さも高めることができる。これらのすべての開発を設計に簡単に組み込んで、必要に応じて単一光子および絡み合った光子対のモノリシック電気生成を改善できる。

30

【0050】

・量子光光源製造用の新しい材料の探索における現在および将来のあらゆる開発を組み込むことができる。特に、量子光エミッターは、励起光を吸収しながら、単一のキャリアを保持しかつ／または量子光を放出できる材料の任意の組み合わせで作成できる。また、サイト制御の量子光エミッターまたは選択的にアドレス指定された量子光エミッターに基づく決定的な製造方法は、当社の設計と完全に互換性がある。

40

【図面の簡単な説明】

【0051】

記載した説明を補完するため、およびその好ましい実施形態による本発明の特徴のより良い理解を助けるために、明細書の不可欠な部分として添付する一連の図面を添付する。これらは例示的なものであって、制限的なものでなく、以下に示す：

【0052】

【図1A】および

【図1B】当該技術分野の状態の透視図を図1Aに、および本発明の素子の透視図を図1Bに示す。

50

【図 2】素子内のポアソン方程式およびドリフト拡散方程式を首尾一貫して解決できる有限要素法シミュレーションを示す。カラーマップは、 $V_{EB} = V_{CB} = 0V$ の電子のエネルギーを示す。

【図 3】さまざまな V_{CE} および V_{BE} の計算されたベース電流とコレクタ電流を、共通ベース構成のバイポーラトランジスタのように解かれた輸送方程式で示す。調整可能な量子光エミッターの設計は、トランジスタ効果（90dB減衰）をほぼ完全に減衰するように最適化されている。すなわち、エミッターによって注入された電流はすべて、量子井戸でエレクトロルミネセンスを生成するために使用される。

【図 4】電氣的に調整可能な量子特性を持つ量子光のモノリシックソースとしての本発明の素子の $p-i-n-i-p$ 構成の図を示す。

【図 5】上方ショットキー接点で交換された上方ドープ層を備えた本発明の素子の図を示す。

【図 6】ミラーおよびブラッグリフレクターを含む本発明の素子の $p-i-n-i-p$ 構成の図を示す。

【図 7】量子光が基板側から抽出されるように修飾された本発明の素子の図を示す。

【図 8】量子エミッターが膜内のフォトリック結晶（PC）構造に埋め込まれ、その量子光発光が同じ素子内で電氣的に駆動し得る、本発明の素子の図を示す。

【図 9】本発明の素子の図を示す。量子エミッターの特性（波長、充電状態など）を、膜内のフォトリック結晶（PC）構造に埋め込んだ状態で、印加電圧によって電氣的に調整できる本発明の素子の図を示す。同時に、その量子光放出は同じ素子内で電氣的に駆動できる。

【図 10】量子エミッターが膜に埋め込まれ、その特性が外部トランスデューサーで加えられた応力または熱によって調整される本発明の素子の図を示す。同時に、その量子光発光は同じ素子内で電氣的に駆動できる。

【図 11】量子エミッターが膜内の $p-i-n$ 接合で埋め込まれ、印加電圧および/または外部トランスデューサーで加えられる応力または熱によってその特性を調整する本発明の素子の図を示す。同時に、その量子光発光は同じ素子内で電氣的に駆動できる。

【図 12】同じ基板からの本発明の2つ以上の素子を含む調整可能な量子光光源アレイの図を示す。さまざまな機能を実行するために、活性およびパッシブエピタキシャル層を各素子から選択的に削除できる。残りの各活性層は、異なるバイアスで独立して駆動できる。同時に、量子光発光は同じ素子内で電氣的に駆動できる。

【図 13】同じ基板からの本発明の2つ以上の素子を含む基本的な量子光学回路の図を示す。素子は、光導波路および吸収体によって回路内で相互接続されている。素子は独立してバイアスをかけて、量子光の特性を放出、検出、または変化することができる。同時に、量子光発光は同じ素子内で電氣的に駆動できる。

【図 14】同じ基板からの本発明の2つ以上の素子を含む基本的な量子光学回路の図を示す。量子エミッター/レシーバーの量子特性は、外部圧電トランスデューサー、ヒーター、および/または内部電界によって制御される。素子は、光導波路および/または吸収体によって接続される。量子光は捕捉され、フォトリック結晶マイクロキャビティおよび導波路を備えた回路に向けられる。素子は、量子光の特性を放出、検出、または変化するために、独立してバイアスをかけることができる。同時に、量子光発光は同じ素子内で電氣的に駆動できる。

【図 15】量子エミッターが量子計測およびセンシング用途のカンチレバーのようなナノオプトメカニカル素子に埋め込まれ、その量子光発光が同じ素子内で電氣的に駆動できる本発明の素子の図を示す。

【発明を実施するための形態】

【0053】

本発明の第1の態様の素子の可能な好ましい実施形態において、図1bおよび図4に示す量子光を放射することができる素子を提供し、それは、少なくとも量子井戸(4)によって放射される光に対して部分的に透明でなければならない少なくとも下方ダイオード(

10

20

30

40

50

1)、およびその放射された光を部分的または完全に吸収する少なくとも1つの上方ダイオード(3)を有し;ここでは量子光エミッター。このルールに合致する半導体材料の種々の組合せが存在するためこれは実際には課題でない。

【0054】

可能な好ましい構成において、本発明の素子は異なるドーピングp-i-n-i-pまたは代わりにn-i-p-i-nのいくつかのゾーンを含む。ただし、図1bに示す素子のように5つの、特定のゾーンの数で素子を開発できる。このように、p-型、真性またはn-型の半導体の交互の層、それぞれの層が一对のp-型半導体とn-型半導体の層を持ち、その間にダイオード(1、3)が配置される。

【0055】

したがって、図1bまたは図4のいずれかに示される素子の基本設計は、ドープし得る(n-型またはp-型)または真性の基板上に、半導体材料のブロック(2)、次に、n-型またはp-型半導体材料の間で選択できる。基板の材料はブロック(2)の材料に依存するため、ブロック(2)がn-型またはp-型でできている場合の真性の材料の場合、基板はn-型または真性の材料でできていることに言及する価値がある。n-型またはp-型半導体材料の選択により、前記のp-i-n-i-pまたはその代わりにn-i-p-i-n構造となり;この基本設計は、III-V族化合物半導体材料から選択されることが好ましい半導体材料に関係なく、n-型、p-型および真性の材料層の可能な異なる配置を考慮して、本発明の好ましい実施形態の礎石であり、モノリシックで、このブロック(2)に含まれる量子光発光素子が形成される。この好ましい実施形態では、p-型半導体材料ブロック(2)である

【0056】

・ブロック(2)およびブロック(2)と同じ組成を有していてもよく、好ましくはp-型半導体材料からできている、該ブロックの上の半導体材料の第1層(11)、好ましくは真性の材料からできており、量子井戸(4)を含んでいてもよい半導体材料の第2層(12);半導体材料の第2層(12)の上に位置し、この場合においては、量子井戸(4)も含んでいてもよいn-型半導体材料からできている、を含む下方ダイオード(1)を提供する。1つ以上の量子井戸(4)を有する素子はそれにもかかわらず働き、具体性のために複数の量子井戸(4)が提供されることは機能的であるとみなされる。

【0057】

・好ましくはn-型半導体材料からできている第3層と同じ組成を有していてもよい半導体材料の第4層(31);該半導体材料の第4層(31)の上に位置し、好ましくは真性の材料からできている半導体材料の第5層(32)、該半導体材料の第5層(32)は量子光エミッター(5)を含んでいてもよく、それはすなわち半導体量子ドット(5)または量子光を放出することができる他の量子材料、すなわちカーボンナノチューブ、有機分子、単層材料などであってもよい、を含む上方ダイオード(3)を提供する。該半導体材料の第5層の上には、半導体材料の第6層(33)が提供され、該半導体材料の第6層(33)は好ましくはp-型半導体材料からできている。

【0058】

・第1金属層(21)は、半導体材料の第1層(11)または半導体材料ブロック(2)のいずれかにも配置されて提供され、それらは該半導体材料の少なくとも1つのオーミック電気接触を生じ、したがって、第1の電気接触を形成する。第2金属層(22)は、半導体材料の第3層(13)または半導体材料の第4層(31)のいずれかに配置されて提供もされ、これらは該半導体材料の少なくとも1つのオーミック電気接触を生じ、したがって、第2の電気接触を形成する。第3金属層(23)は、半導体材料の第6層(32)に配置され、半導体材料(32)へのオーミック電気接触を生じ、したがって第3の電気接点を形成する。

【0059】

前述したように、本発明の素子は、半導体材料(11、12、13、31、32、33)の層に対して、n-型、p-型および真性の半導体材料の可能な異なる配置を提供し得る。この意

10

20

30

40

50

味で、本発明の素子の可能な代替実施形態では、ブロック(2)および半導体材料の第1層(11)はn-型半導体材料で作られ、第2(12)および第5(32)層の半導体材料は真性の半導体材料で構成され、半導体材料の3番目(13)および4番目(31)の層はp-型半導体材料で構成され、6番目の半導体層(33)はn-型半導体材料で構成される。半導体材料の構造を逆にすると、構造がp-i-n-i-pまたはn-i-p-i-nになる。ここで、iは真性層を示す。

【0060】

本発明の素子は、上記の基本モデルに基づいて異なる構造をレンダリングし得；したがって、半導体材料の第2層(12)の上に位置する半導体材料の第3層(13)は、半導体材料の第1層(11)がn-型半導体材料である場合はp-型半導体材料から、または半導体材料の第1層(11)がp-型半導体材料である場合はn-型半導体材料できていてもよい。同様に、半導体材料の第3層(13)の上に配置された半導体材料の第4層(31)は、半導体材料の第1層(11)がn-型半導体材料である場合はp-型半導体材料から、または半導体材料の第1層(11)がp-型半導体材料である場合はn-型半導体材料からできている。同様に、半導体材料の第5層(32)は半導体材料の第4層(31)の上に位置し、順番に半導体材料の第2層(12)が少なくとも1つの量子光エミッター(5)を含む場合は少なくとも1つの量子井戸を含み、または半導体材料の第2層(12)が少なくとも1つの量子井戸(4)を含む場合は少なくとも1つの量子光エミッター(5)を含む。本発明の素子のすべての可能な実施形態は、上記の初期構造のいずれか1つから始まり得る。

【0061】

本発明の素子の別の実施形態では、半導体材料の第2層(12)は、少なくとも1つの量子井戸(4)を含み、この実施形態では、第3金属層(23)および半導体材料の第6層(33)は削除されてもよく、または半導体材料の第6層(33)は電気的単離層または金属層に置き換えてもよい。

【0062】

図1bに示す場合においては、素子は約980 nmで量子光を放出するように設計されており、したがって下方ダイオード(1)はIII-V族化合物半導体の組み合わせで構成されている。-この場合は変動する組成の $Al_xGa_{1-x}As$ 。また、それは、約785 nmで放射するGaAsの量子井戸(4)を含み、一方で上方ダイオード(3)はIII-V族化合物半導体の組み合わせで作られている - この場合はGaAsであり、この波長に対する吸収効率は $> 10^5 \text{ cm}^{-1}$ である。第4層32は、発光が約980 nmである $In_xGa_{1-x}As$ で作られた1つまたはそれよりも多い量子ドットを含む。実際、785 nmは $InGaAs / GaAs$ 量子ドット(5)を励起する標準波長であり、GaAsの層は光の $> 64\%$ を吸収するのに十分な100 nmの厚さしかない。

【0063】

これらのフォト生成キャリアは、低温で高品質のGaAsに容易に拡散するため、量子ドット(5)による捕獲の確率は非常に高くなる。本発明の目的である量子光発光素子は、ファイバー通信窓(1.31ミクロン、1.55ミクロンなど)または可視および紫外領域の自由空間通信のような他のスペクトル窓に適合させることができる。この目的のために、InPベースの材料の組み合わせ、GaNベースの材料の組み合わせ、または関連するスペクトル範囲をカバーできる他の適切な材料の組み合わせに対して、GaAsベースの材料の組み合わせを変更する。

【0064】

本発明は、キャリア注入(下方ダイオード(1)で発生)のプロセスに影響を与えることなく、量子光エミッター(5)に電場を適用する能力を有する上方ダイオード(3)を提供する。この電場を用いて、シュタルク効果により量子光エミッター(5)の強度とエネルギーの放出を調整し、クーロンブロックドメカニズムにより電荷を制御する。これにより、2つの端子の設計の基本的な問題の1つである電流およびキャリア注入のレベルに関係なく、量子光エミッター(5)の発光制御を行い得る。

【0065】

10

20

30

40

50

本発明のなごもう1つの実施形態において、本発明の素子上のフォトニック結晶マイクロキャビティーのようなフォトニック構造、およびミラー、導波路、光カプラー、ディバイダーなどの他のフォトニック部品を製造することが可能になり、...またはピラー、膜(61)、カンチレバー(62)などの機械部品、このような機能の実装には、既知の製造技術を使用した従来の設計にすでに存在するものへの追加の努力は必要ない。上記の機能を実装することにより、外部光源の介入なしに、素子全体が依然としてモノリシック量子光光源として機能する。

【0066】

挿入フォトニック構造は好ましくは半導体材料の第5層(32)でプライミングし、したがって半導体材料の第5層(32)に存在する場合は量子光エミッター(5)を埋め込む。ただし、半導体材料の第6層(33)は、半導体材料の第5層(32)の上に設けることができることに注意する必要がある。この場合、フォトニック構造は、半導体材料の第5層と第6層(32、33)の両方に含まれ得る。

10

【0067】

本発明の素子の電子設計は、光の発生と吸収のメカニズムを別にして、共通ベース構造のBJT型トランジスタに類似している。ただし、寄生トランジスタ効果を排除するために、素子の設計を変更する必要がある。これを行うには、中間ドープ領域(13+31)(パイポラトランジスタのベース)を慎重に(厚さと組成)設計し、真性のゾーンから他への多数キャリアの注入を取り除く必要がある。したがって、2つのダイオード間の相互接続は純粋に光学的なものであり、量子光エミッターに不要な電荷が蓄積するのを防ぐ。

20

【0068】

本発明の素子は、p-i-n-i-p構造に対応する図4に描かれた素子のように、調整可能なモノリシック量子光光源としての素子を可能にするような方法で製造し得る。図4の素子は、独立したソース輝度と量子エミッター特性の電圧制御を提供する。

【0069】

ただし、素子の構造に変更を加えて、素子のさまざまな実施形態と用途を実現することができる。この意味で、図5に示されているように調整可能なモノリシック量子光光源p-i-n-i-ショットキー構造は、半導体材料の第6層(33)を金属ショットキー接点に置き換えることで得ることができる。これにより、素子は独立した光源の輝度と量子エミッター特性の電圧制御を提供できる。

30

【0070】

半導体材料の第5層(32)に含まれる量子光エミッターは非エピタキシャル性であり、いくつかの方法で半導体材料の第4層(31)に堆積する可能性がある。この場合、量子光エミッター特性の電圧調整能力は、半導体材料の第6層(33)を電気絶縁材料に置き換え、金属絶縁体半導体トランジスタのように金属層(23)を介してゲート電圧を加えることができる。これにより、素子は独立した光源の輝度と量子エミッター特性の電圧制御を提供できる。

【0071】

発明の素子には、図6に示すように、光学活性層を含むブラッグリフレクターおよびミラー(51、52、53)を設けることもできる。量子エミッター(5)が量子井戸(4)を含む層の上の層に配置される単純な設計では、単一の下方ブラッグミラー(51)が基板の量子井戸(4)から放射される光を量子光エミッター(5)領域に戻る方向に反射する。第2ブラッグミラー(51)は2つのダイオード(1、3)の間に配置して、量子光を選択的に上方に反射し得る。あるいは、または同時に、上方の金属ミラー(53)がすべての光をブロック(2)に反射し得る。ブラッグリフレクターとミラー(51、52、53)のこの用途および他の用途により、実質的に垂直方向(つまり、成長方向に平行)の古典的および量子光ストリームの伝播を管理し得る。ブラッグリフレクターとミラー(51、52、53)の構造が量子井戸(4)と量子エミッター(5)との配置に依存し得ることは、当業者なら理解するであろう。それらの位置および数は、スペクトル帯域幅を狭め、修飾割合とソースの深さを増やすようにも設計し得る。典型的な構造を図7に示す。ここでは、素子はブラ

40

50

ツグリフレクターおよび/または異なる型のミラーを備えたp-i-n-i-p構造を有し、ブロック(2)を通して光学工学基板に向けての量子光(QL)の反射を可能にする。これは、ブロック(2)または基板に光ファイバースクラウドコーティング(41)、反射防止コーティング(42)などを備え、上方のブラッグリフレクターおよび/またはミラーで量子光(QL)を反射させることで実現する。この後者の構造は、光ファイバースクラウドコーティング(41)と反射防止コーティング(42)の1つ以上の実施形態を提供する。量子光がブロック(2)を通過するように、ブロック(2)または基板のいずれかに配置される。

【0072】

本発明の素子はさらに1つまたはそれよりも多い薄膜(61)を含むことができ、これは次に量子ドット(5)などの量子エミッター(5)を含むことができる。したがって、膜(61)は、半導体材料の第6層(33)または半導体材料の第5層(32)で製造され、量子ドットの下にエアギャップを作成する(5)。膜(61)は、フォトニック結晶(PC)などのフォトニック構造を備えて、光-物質結合および/または光伝搬を変更する誘電環境を量子光エミッター(5)に与えることもできる。図8は、それぞれ1つまたはそれよりも多いフォトニック構造を割り当てるように修正された、半導体材料の第5層(32)上に膜(61)を備えた素子を示す。フォトニック構造は、1つまたはそれよりも多い量子エミッター(5)を含み得る。素子全体は、光と物質の結合を強化し、および/または光の伝播を調整しながら、外部光源の介入なしに量子光を放射することができる。この実施形態から生じる素子は、半導体材料の第5層(32)上に作製された1つの膜(61)を提示し、前述のように、量子エミッター(5)の下にエアギャップを定義する。量子光エミッター(5)を埋め込んだフォトニック結晶構造などの光トラップまたはガイド構造である構造。当業者が認識するように、これは、同じタスクを実行するために、先行技術の既存の制限を解決し得る。

【0073】

図8の素子は、半導体材料の第6層(33)および第3金属層(23)を復元するか、または前記のように上方ショットキー接点または金属絶縁体構造を追加して完成し得る。したがって、上方ダイオード(3)構造は、半導体材料の第5層(32)を埋め込み、ついで量子エミッター(5)を含み得る。膜(61)および/またはフォトニック構造は、この上方ダイオード(3)構造上に直接製造し得る。図9に示す素子全体は、外部光源の介入なしに量子光を放射することができ、同時にPC構造に埋め込みつつ量子エミッターを電氣的に調整し得る。

【0074】

膜(61)は、上方またはその付近に位置する、ストレストランスデューサ(63)、好ましくはピエゾトランスデューサ、ヒーターとして機能する電気抵抗などの外部要素を通じて量子エミッターの特性を変調するのにも役立つ。これらの実施形態では、図10に示すように半導体材料の第6層(33)の上にさらなる層がなくともよく、または図11に示すように上方ダイオード構造(3)の全体が保持されてもよい。外部応力および/または熱は、前記トランスデューサ(63)によって局所的に適用され、埋め込まれた量子エミッター(5)の特性をさらに変調し、他の機能に影響を与えることなく、素子のチューニング機能を向上する。素子全体は、調整可能な量子光放出素子であり、外部光源の介入なしで動作する。

【0075】

本発明のもう1つの局面において、および本発明の量子光放射素子は、エピタキシーを使用して素子の異なるコンポーネントが定義される基板を使用して製造されることを考慮して、基板上に複数の素子を生成して、ここで説明したような少なくとも2つの素子を含む集積光学回路または量子フォトニック回路を規定することができる。

【0076】

図12は、モノリシック量子光光源がその半導体および金属層を選択的に削除または変調して、独立した電圧バイアス方式を実装し、同じウェーハに異なる機能を統合する2つのこのような素子のアレイの例を示す。素子は、量子光を放射または検出したり、量子

10

20

30

40

50

エミッターの特性を変更したりするために、電流と電圧を独立して流して駆動することができる。同時に、量子光放射は回路内で電氣的に駆動できる。

【0077】

図13は、同じ基板内の2つ以上の素子が光導波路と吸収体によって接続されている量子光学回路の例を示す。このような回路の機能は、前記したフォトニック構造および/または外部トランスデューサーを保持する膜(61)を追加することで大幅に強化できる。結果を図14に示す。回路内の各素子は、量子光の特性を放出、検出、または変更するために独立して駆動できる。同時に、量子光放射は回路内で電氣的に駆動できる。

【0078】

上記のいずれの実施形態も、量子光エミッター(5)が埋め込まれたカンチレバー(62)などのナノオプトメカニカルシステムを含むように変更できる。半導体材料の第5層(32)の一部がカンチレバー(62)埋め込み1つまたはそれよりも多い量子エミッター(5)を埋め込んでいるカンチレバー(62)の形状に形作られている例を図15に示す。この実施形態では、半導体材料の第6層(33)の上にさらなる層がなくてもよい。量子オプトメカニカル計測およびセンサーアプリケーションに適した環境で、素子全体が量子光を放射する。外部光源の介入なしでこれを行う。結果として得られる素子は、カンチレバー(62)などの機械的オシレーターを含む半導体材料の第5層(32)を提供する。

【0079】

量子光エミッター(5)はそれぞれの実施形態に従って異なる層に配置されてもよいが、半導体材料の第5層(32)は量子光エミッター(5)を含むものであってもよい。この場合、前記量子光エミッター(5)は、前記した第5半導体材料(32)の上または第5半導体材料(32)の下のいずれかに配置し得る。

【0080】

可能なさらなる実施形態において、本発明の素子は、電流を素子を通して流す1つまたはそれよりも多い電流ブロッキング層をさらに備え得る。これらの電流ブロッキング層は、前記した実施形態のいずれにも組み込み得る。

【0081】

素子の構造にかかわらず、基板および半導体材料の層(11、12、13、31、32、33)は：III-V族化合物半導体、II-VI族化合物半導体、およびIV族半導体からなる群から選択される材料または材料の組み合わせから製造し得る。

【0082】

本発明の第2の局面において、本発明の第1の局面の素子として少なくとも2つの素子を含む集積光学回路または量子フォトニック回路を提供する。

10

20

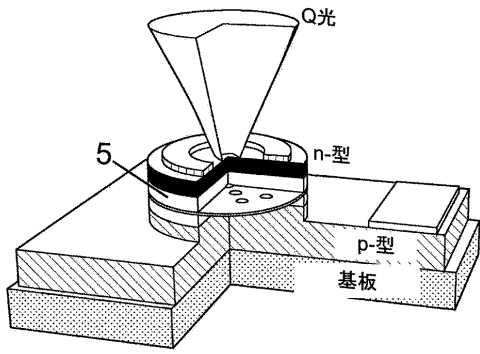
30

40

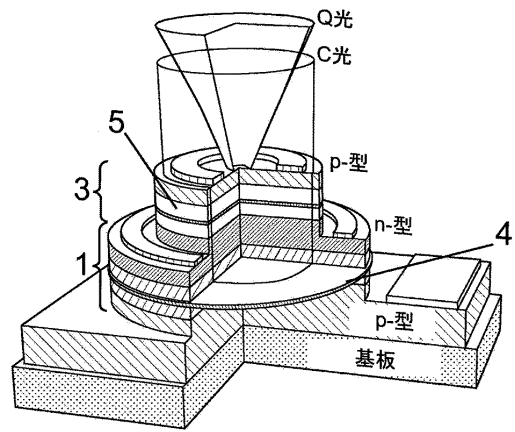
50

【図面】

【図 1 A】



【図 1 B】



【図 2】

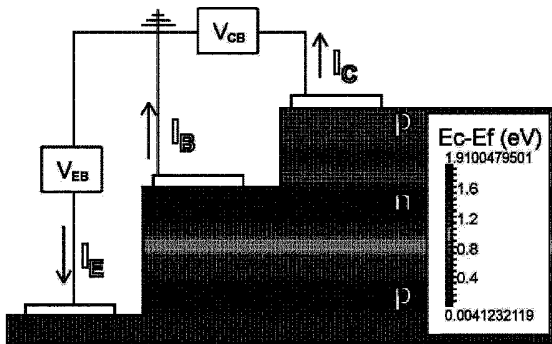


FIG. 2

【図 3】

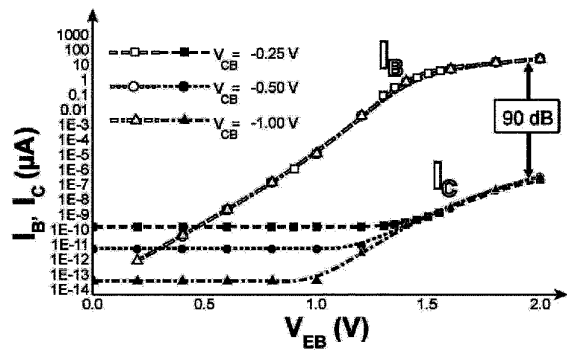


FIG. 3

10

20

30

40

50

【 図 4 】

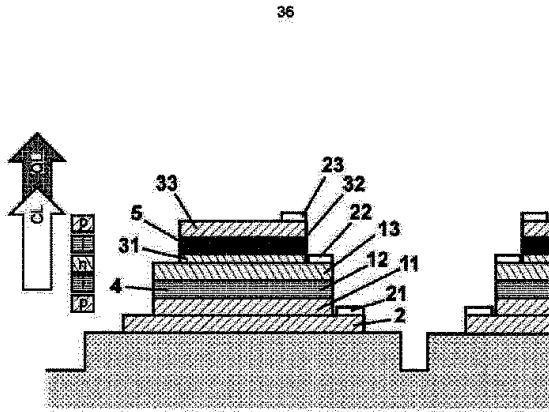


FIG. 4

【 図 5 】

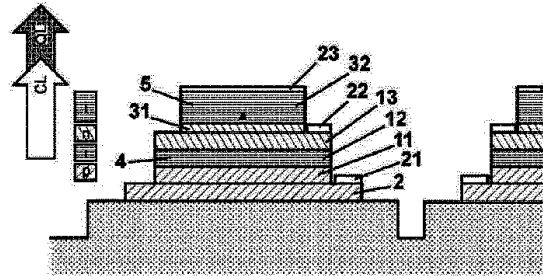


FIG. 5

【 図 6 】

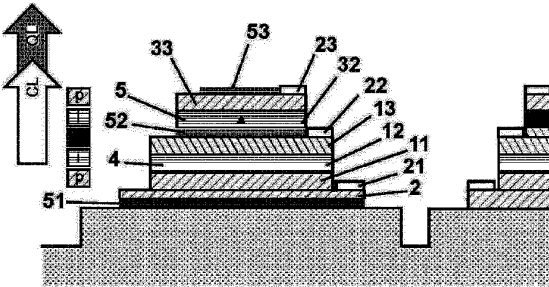


FIG. 6

【 図 7 】

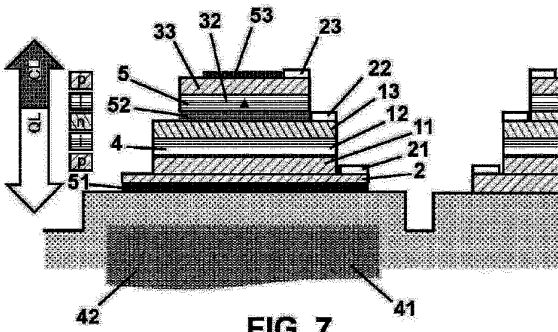


FIG. 7

10

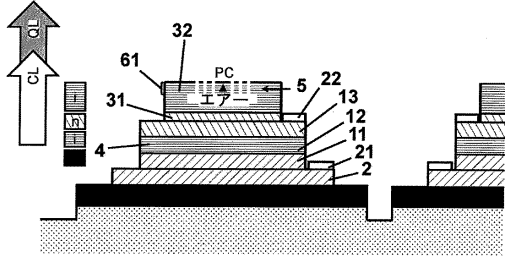
20

30

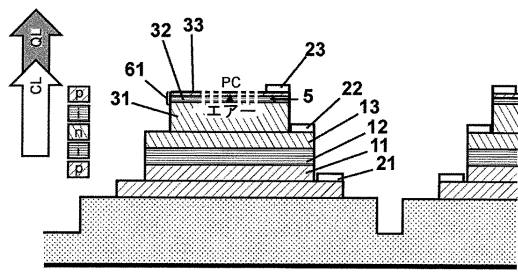
40

50

【図 8】

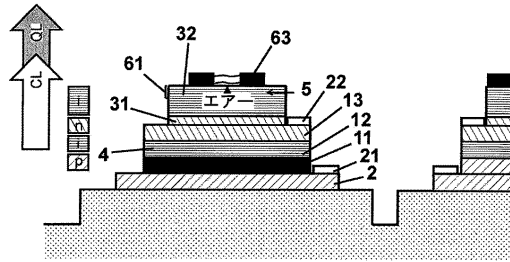


【図 9】

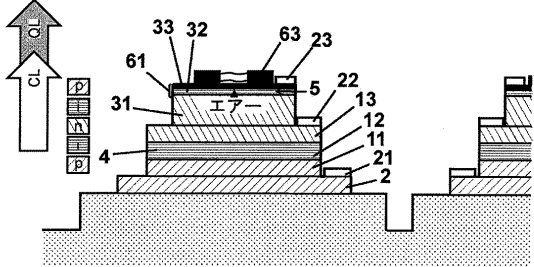


10

【図 10】

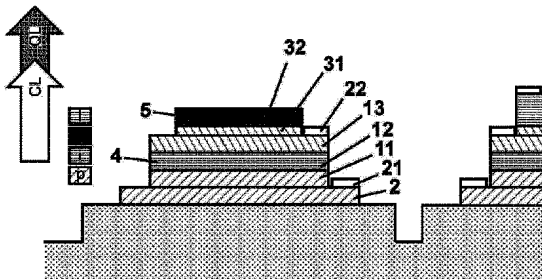


【図 11】

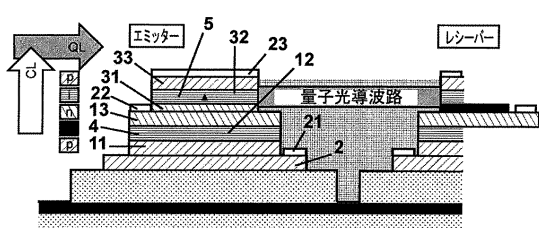


20

【図 12】



【図 13】



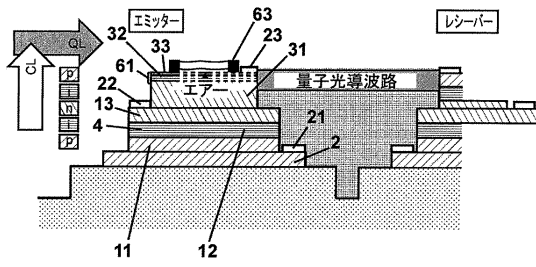
30

FIG. 12

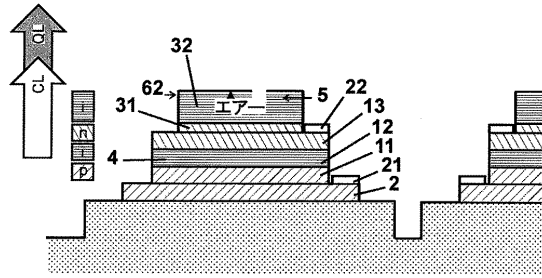
40

50

【図 14】



【図 15】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- マドリッド)、カリエノイサック・ニュートン8番、インスティトゥト・デ・マイクロエレクトロニカ・デ・マドリッド(イエメエメ・セエネエム)
- (72)発明者 ダビド・フステル・シグネス
スペイン28760トレス・カントス(マドリッド)、カリエノイサック・ニュートン8番、インスティトゥト・デ・マイクロエレクトロニカ・デ・マドリッド(イエメエメ・セエネエム)
- (72)発明者 ヨランダ・ゴンサレス・ディアス
スペイン28760トレス・カントス(マドリッド)、カリエノイサック・ニュートン8番、インスティトゥト・デ・マイクロエレクトロニカ・デ・マドリッド(イエメエメ・セエネエム)
- (72)発明者 ルイサ・ゴンサレス・サトス
スペイン28760トレス・カントス(マドリッド)、カリエノイサック・ニュートン8番、インスティトゥト・デ・マイクロエレクトロニカ・デ・マドリッド(イエメエメ・セエネエム)
- 審査官 浅見 一喜
- (56)参考文献 特開2003-202529(JP,A)
特開2016-086156(JP,A)
米国特許出願公開第2006/0220000(US,A1)
特開2006-216722(JP,A)
特開2016-042694(JP,A)
特開2013-062354(JP,A)
特開2016-164971(JP,A)
特開2008-135591(JP,A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01L 33/00-33/64
H01S 5/00-5/50
G02F 1/017
JSTPlus(JDreamIII)
JST7580(JDreamIII)