

(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2009-26816

(P2009-26816A)

(43) 公開日 平成21年2月5日(2009.2.5)

(51) Int.Cl.  
H01L 33/00 (2006.01)

F I  
H01L 33/00

テーマコード(参考)  
5FO41

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号 特願2007-185948 (P2007-185948)  
(22) 出願日 平成19年7月17日(2007.7.17)

(出願人による申告)平成19年度、独立行政法人科学技術振興機構、戦略的創造研究推進事業、超伝導フォトリソグラフィーの創成とその応用、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 504173471  
国立大学法人 北海道大学  
北海道札幌市北区北8条西5丁目8番地  
000236436  
浜松ホトニクス株式会社  
静岡県浜松市東区市野町1126番地の1  
(74) 代理人 100088155  
弁理士 長谷川 芳樹  
(74) 代理人 100092657  
弁理士 寺崎 史朗  
(74) 代理人 100124291  
弁理士 石田 悟  
(74) 代理人 100110582  
弁理士 柴田 昌聰

最終頁に続く

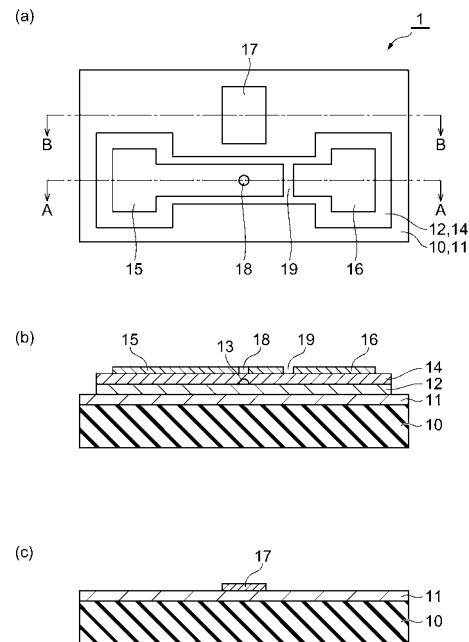
(54) 【発明の名称】 半導体発光素子

(57) 【要約】

【課題】量子情報処理や量子情報通信に用いるのに好適であって動作評価が可能な半導体発光素子を提供する。

【解決手段】半導体発光素子1は、基板10と、基板10の一方の主面上に設けられた第1導電型の第1半導体層11と、第1半導体層11上の第1領域に設けられた第1導電型の第2半導体層12と、第2半導体層12上に設けられた第2導電型の第3半導体層14と、第3半導体層14上に設けられた超伝導の第1電極15および超伝導の第2電極16と、第1半導体層11上の第2領域に設けられた第3電極17と、第1電極15が設けられた領域の下方であって第2半導体層12と第3半導体層14との間に設けられた半導体量子ドット領域13と、を備える。第1電極15のうち半導体量子ドット領域13の上方部分に貫通孔18が設けられ、第1電極15と第2電極16との間に間隙19が設けられている。

【選択図】 図1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

基板と、  
前記基板の一方の主面上に設けられた第 1 導電型の第 1 半導体層と、  
前記第 1 半導体層上の第 1 領域に設けられた第 1 導電型の第 2 半導体層と、  
前記第 2 半導体層上に設けられた第 2 導電型の第 3 半導体層と、  
前記第 3 半導体層上に設けられた超伝導の第 1 電極および超伝導の第 2 電極と、  
前記第 1 半導体層上の第 2 領域に設けられた第 3 電極と、  
前記第 1 電極が設けられた領域の下方であって前記第 2 半導体層と前記第 3 半導体層との間に設けられた半導体量子ドット領域と、  
を備え、  
前記第 1 電極のうち前記半導体量子ドット領域の上方部分に貫通孔が設けられ、  
前記第 1 電極と前記第 2 電極との間に間隙が設けられている、  
ことを特徴とする半導体発光素子。

10

## 【請求項 2】

第 1 導電型の半導体基板と、  
前記半導体基板の一方の主面上に設けられた第 1 導電型の第 1 半導体層と、  
前記第 1 半導体層上に設けられた第 2 導電型の第 2 半導体層と、  
前記第 2 半導体層上に設けられた超伝導の第 1 電極および超伝導の第 2 電極と、  
前記半導体基板の他方の主面上に設けられた第 3 電極と、  
前記第 1 電極が設けられた領域の下方であって前記第 1 半導体層と前記第 2 半導体層との間に設けられた半導体量子ドット領域と、  
を備え、  
前記第 1 電極のうち前記半導体量子ドット領域の上方部分に貫通孔が設けられ、  
前記第 1 電極と前記第 2 電極との間に間隙が設けられ、  
前記第 3 電極のうち前記半導体量子ドット領域の下方部分に貫通孔が設けられている、  
ことを特徴とする半導体発光素子。

20

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

30

## 【0001】

本発明は、半導体発光素子に関するものである。

## 【背景技術】

## 【0002】

従来の半導体発光素子として発光ダイオードやレーザダイオードが挙げられる。これらの半導体発光素子では、互いに接合された p 型半導体層および n 型半導体層を挟んで一対の電極が設けられており、この一対の電極の間に順バイアス電圧が印加されると、p 型半導体層と n 型半導体層との p n 接合部の近傍に活性領域が形成され、この活性領域において電子と正孔との対消滅（再結合）によって光が生成される。

## 【0003】

40

また、従来より格段に処理速度の速い量子情報処理や安全性の高い量子情報通信に用いるために、レーザ光をパラメトリック下方変換して光子対を生成する方法等、量子もつれ合い（互いに区別することのできない）光子対を生成する技術が開発されてきている（非特許文献 1 を参照）。

## 【0004】

しかし、レーザ光をパラメトリック下方変換する方法では、(a) 光子対を発生するタイミングを制御することができない、(b) 一度にただ一つの光子対だけを生成することができず必ずある確率で複数の光子対が生成されてしまう、(c) 光子対を生成する速度が遅い、という課題があった。

## 【0005】

50

そこで、このような問題を解決すべく、超伝導電極において近接効果によって発生した電子クーパ対を半導体量子ドット領域に注入し、この電子クーパ対と2個の正孔とを半導体量子ドット領域において同時に再結合させることによって、2つの互いに区別できない光子を同時に生成する技術が提案されている（非特許文献2を参照）。

【非特許文献1】P. G. Kwiat, K. Mattle, H. Weinfurter, A. Zeilinger, A. V. Sergienko, and Y. Shih, "New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs," Physical Review Letters, Vol.75, No.24 (1995) pp.4337-4341.

【非特許文献2】I. Suemune, "Prospects of superconducting photonics," CPT2006 Technical Digest, pp.39-42.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、非特許文献2で提案されている技術では、近接効果による半導体量子ドット領域へのクーパ対の注入の状態は、わずかな温度変化により変化するだけでなく、注入する半導体層の膜厚や抵抗値などによっても変化する。したがって、安定した動作を得るには、半導体層量子ドット領域に注入されたクーパ対の状態を評価することが重要となるが、そのような技術は知られていない。

【0007】

本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、量子情報処理や量子情報通信に用いるのに好適であって動作評価が可能な半導体発光素子を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る半導体発光素子は、基板と、基板の一方の主面上に設けられた第1導電型の第1半導体層と、第1半導体層上の第1領域に設けられた第1導電型の第2半導体層と、第2半導体層上に設けられた第2導電型の第3半導体層と、第3半導体層上に設けられた超伝導の第1電極および超伝導の第2電極と、第1半導体層上の第2領域に設けられた第3電極と、第1電極が設けられた領域の下方であって第2半導体層と第3半導体層との間に設けられた半導体量子ドット領域とを備え、第1電極のうち半導体量子ドット領域の上方部分に貫通孔が設けられ、第1電極と第2電極との間に間隙が設けられている、ことを特徴とする。ここで、第1導電型および第2導電型のうち、一方はp型であり、他方はn型である。基板は、半絶縁性の材料からなるのが好適である。また、基板、第1半導体層、第2半導体層、第3半導体層及び半導体量子ドット領域それぞれは、化合物半導体からなるのが好適である。

【0009】

この半導体発光素子では、超伝導の第1電極と第3電極との間に順バイアス電圧が印加されると、第2半導体層と第3半導体層とのpn接合部には、超伝導の第1電極から電子クーパ対が注入されるとともに、第2半導体層から正孔が注入され、これら電子クーパ対と正孔とが同時に再結合して、2つの互いに区別できない光子が同時に生成される。或いは、第2半導体層と第3半導体層とのpn接合部には、超伝導の第1電極から正孔クーパ対が注入されるとともに、第2半導体層から電子が注入され、これら正孔クーパ対と電子とが同時に再結合して、2つの互いに区別できない光子が同時に生成される。また、この半導体発光素子では、2つの超伝導の第1電極および第2電極が間隙を隔てて配置されていて、これら2つの超伝導の電極の間超伝導電流を評価することにより、半導体層に注入されたクーパ対の状態を評価することができる。

【0010】

或いは、本発明に係る半導体発光素子は、第1導電型の半導体基板と、半導体基板の一方の主面上に設けられた第1導電型の第1半導体層と、第1半導体層上に設けられた第2導電型の第2半導体層と、第2半導体層上に設けられた超伝導の第1電極および超伝導の第2電極と、半導体基板の他方の主面上に設けられた第3電極と、第1電極が設けられた

10

20

30

40

50

領域の下方であって第 1 半導体層と第 2 半導体層との間に設けられた半導体量子ドット領域とを備え、第 1 電極のうち半導体量子ドット領域の上方部分に貫通孔が設けられ、第 1 電極と第 2 電極との間に間隙が設けられ、第 3 電極のうち半導体量子ドット領域の下方部分に貫通孔が設けられている、ことを特徴とする。ここで、第 1 導電型および第 2 導電型のうち、一方は p 型であり、他方は n 型である。また、半導体基板、第 1 半導体層、第 2 半導体層及び半導体量子ドット領域それぞれは、化合物半導体からなるのが好適である。

【 0 0 1 1 】

この半導体発光素子では、超伝導の第 1 電極と第 3 電極との間に順バイアス電圧が印加されると、第 1 半導体層と第 2 半導体層との p n 接合部には、超伝導の第 1 電極から電子クーパ対が注入されるとともに、第 1 半導体層から正孔が注入され、これら電子クーパ対と正孔とが同時に再結合して、2 つの互いに区別できない光子が同時に生成される。或いは、第 1 半導体層と第 2 半導体層との p n 接合部には、超伝導の第 1 電極から正孔クーパ対が注入されるとともに、第 1 半導体層から電子が注入され、これら正孔クーパ対と電子とが同時に再結合して、2 つの互いに区別できない光子が同時に生成される。また、この半導体発光素子でも、2 つの超伝導の第 1 電極および第 2 電極が間隙を隔てて配置されていて、これら 2 つの超伝導の電極の間の超伝導電流を評価することにより、半導体層に注入されたクーパ対の状態を評価することができる。

10

【 発明の効果 】

【 0 0 1 2 】

本発明によれば、量子情報処理や量子情報通信に用いるのに好適であって動作評価が可能な半導体発光素子を提供することができる。

20

【 発明を実施するための最良の形態 】

【 0 0 1 3 】

以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための最良の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一または同様の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【 0 0 1 4 】

( 第 1 実施形態 )

先ず、本発明に係る半導体発光素子の第 1 実施形態について説明する。図 1 は、第 1 実施形態に係る半導体発光素子 1 の構成を示す図である。同図 ( a ) は平面図である。同図 ( b ) は同図 ( a ) の A - A 線での断面図である。また、同図 ( c ) は同図 ( a ) の B - B 線での断面図である。

30

【 0 0 1 5 】

この図に示されるように、第 1 実施形態に係る半導体発光素子 1 は、基板 1 0 と、基板 1 0 の一方の主面上に設けられた第 1 導電型の第 1 半導体層 1 1 と、第 1 半導体層 1 1 上の第 1 領域に設けられた第 1 導電型の第 2 半導体層 1 2 と、第 2 半導体層 1 2 上に設けられた第 2 導電型の第 3 半導体層 1 4 と、第 3 半導体層 1 4 上に設けられた超伝導の第 1 電極 1 5 および超伝導の第 2 電極 1 6 と、第 1 半導体層 1 1 上の第 2 領域に設けられた第 3 電極 1 7 と、第 1 電極 1 5 が設けられた領域の下方であって第 2 半導体層 1 2 と第 3 半導体層 1 4 との間に設けられた半導体量子ドット領域 1 3 と、を備える。また、半導体発光素子 1 は、第 1 電極 1 5 のうち半導体量子ドット領域 1 3 の上方部分に貫通孔 1 8 が設けられ、第 1 電極 1 5 と第 2 電極 1 6 との間に間隙 1 9 が設けられている。

40

【 0 0 1 6 】

第 2 半導体層 1 2 と第 3 電極 1 7 とは、第 1 半導体層 1 1 上の互いに異なる領域に設けられている。図 1 ( a ) の平面図で見たとき、第 2 半導体層 1 2 および第 3 半導体層 1 4 は、貫通孔 1 8 が設けられた位置 ( すなわち、半導体量子ドット領域 1 3 が設けられた位置 ) を挟んで両側に延在して設けられていて、両端部分が幅広となっている。同じく平面図で見たとき、第 3 半導体層 1 4 上の第 1 電極 1 5 および第 2 電極 1 6 は、スリット状の間隙 1 9 を挟んで各々端部へ向かって延在して設けられていて、両端部分が幅広となってワイヤボンディング用パッド領域となっている。また、同じく平面図で見たとき、第 3 電

50

極 17 は、貫通孔 18 が設けられた位置（すなわち、半導体量子ドット領域 13 が設けられた位置）の近くに、第 2 半導体層 12 および第 3 半導体層 14 と接しないように設けられている。

#### 【0017】

ここで、第 1 導電型および第 2 導電型のうち、一方は p 型であり、他方は n 型である。基板 10 は、半絶縁性の材料からなるのが好適である。また、基板 10、第 1 半導体層 11、第 2 半導体層 12、第 3 半導体層 14 及び半導体量子ドット領域 13 それぞれは、化合物半導体からなるのが好適である。例えば、基板 10 は Cr ドープ GaAs からなり、第 1 半導体層 11 は p 型 GaAs からなり、第 2 半導体層 12 は p 型 AlGaAs からなり、半導体量子ドット領域 13 は GaSb からなり、第 3 半導体層 14 は n 型 GaAs からなる。このような構成を有する半導体発光素子 1 を製造する方法として、例えば MOCVD, MBE, MOMBE 等の広範な技術が適宜に採用される。

10

#### 【0018】

このような半導体発光素子 1 において、超伝導の第 1 電極 15 と第 3 電極 17 との間に順バイアス電圧が印加されると、正孔が p 型 AlGaAs 半導体層 12 から GaSb 半導体量子ドット領域 13 に注入されるとともに、電子クーパ対が超伝導の第 1 電極 15 から n 型 GaAs 半導体層 14 を経て GaSb 半導体量子ドット領域 13 に注入されて、これら電子クーパ対と 2 個の正孔とが同時に再結合して、2 つの互いに区別できない光子が同時に生成される。生成された 1 対の光子は互いに反対方向に放出されて、一方の光子は貫通孔 18 を通過して放出され、他方の光子は Cr ドープ GaAs 基板 10 を通過して放出される。

20

#### 【0019】

半導体量子ドット領域 13 における一つの量子準位に注入される正孔の数は、フェルミ粒子に対するパウリの排他律により、2 個までに制限される。一方、ボーズ粒子であるクーパ対には、そのような個数についての制限はない。したがって、発生する光子の数は、半導体量子ドット領域 13 の量子準位に注入された正孔の数で決まり、2 個となる。半導体量子ドット領域 13 の量子準位に注入された 2 つの正孔は、互いに等しいエネルギーを有し、区別不可能な状態にある。電子クーパ対は、2 つの電子が結合した状態であり、互いに区別できない状態であることから、2 つの正孔と同時に再結合する。この再結合により、2 つの互いに区別できない光子が同時に発生する。

30

#### 【0020】

半導体量子ドット領域 13 の量子準位は複数存在するが、再結合時間より短い幅を持つパルス電流を電極 15, 17 の間に注入すれば、上の準位の正孔から消滅していき、最後に再結合する基底準位の正孔対を用いれば、一度にただ一つの光子対を生成することができる。光子対の生成速度は、パルス電流の繰り返し時間で決まり、再結合時間程度の短時間で繰り返すことができる。

#### 【0021】

n 型 GaAs 半導体層 14 の厚さは、GaSb 半導体量子ドット領域 13 にクーパ対を注入するための輸送効率で決定され、実測結果から 100 nm 程度である。p 型 AlGaAs 半導体層 12 の Al 組成は、電子クーパ対がこの層に進入するのを防ぐことから決定され、15% 程度が必要である。電極 15 に設けられる貫通孔 18 の径は、単一の量子ドットからの発光を取り出す条件から決定され、量子ドットの表面密度が 1  $\mu\text{m}^2$  平方に 1 個程度の場合には直径 1  $\mu\text{m}$  程度が必要である。また、再結合時間は通常 1 ns 程度であり、パルス電流の繰り返しとそれに伴う光子対生成速度とは 1 GHz 程度まで可能である。

40

#### 【0022】

また、半導体発光素子 1 において、第 3 電極 17 にバイアス電圧が印加されると、n 型 GaAs 半導体層 14 中の空乏層の厚さが変化し、n 型 GaAs 半導体層 14 の導電層の厚さが調整され得る。このとき、半導体発光素子 1 は、いわゆる接合型電界効果トランジスタとして動作する。

50

## 【 0 0 2 3 】

図 2 に示されるように、導電層 1 4 A と空乏層 1 4 B とから構成される n 型 GaAs 半導体層 1 4 の厚さが薄い場合は、n 型 GaAs 半導体層 1 4 において電子クーパ対注入領域 1 4 C は導電層 1 4 A と一致する。この場合、超伝導の第 1 電極 1 5 と超伝導の第 2 電極 1 6 との間に電流を流すと、電子クーパ対が n 型 GaAs 半導体層 1 4 を経て超伝導電極 1 5 , 1 6 の間に流れるので、電流 - 電圧特性はジョセフソン電流  $I_J$  による超伝導特性を示す。

## 【 0 0 2 4 】

一方、図 3 に示されるように、n 型 GaAs 半導体層 1 4 の厚さが厚い場合は、n 型 GaAs 半導体層 1 4 における導電層 1 4 A は、電子クーパ対注入領域 1 4 C と準粒子領域 1 4 D とから構成される。この場合、超伝導の第 1 電極 1 5 と超伝導の第 2 電極 1 6 との間で電流を流すと、電子クーパ対によるジョセフソン電流  $I_J$  と準粒子の電子によるオーミック電流  $I_0$  とが混在するので、超伝導電極 1 5 , 1 6 の間の電流 - 電圧特性はなまった超伝導特性を示す。

## 【 0 0 2 5 】

ここで、第 3 電極 1 7 にバイアス電圧が印加されると、n 型 GaAs 半導体層 1 4 において、空乏層 1 4 B が広がる一方で、導電層 1 4 A が狭くなり、導電層 1 4 A が電子クーパ対注入領域 1 4 C に限定される。すると、図 4 に示されるように、超伝導電極 1 5 , 1 6 間を流れるのはジョセフソン電流  $I_J$  のみとなり、n 型 GaAs 半導体層 1 4 の厚さが薄い場合と同様に、電流 - 電圧特性は明瞭な超伝導特性を示す。また、第 3 電極 1 7 に印加されたバイアス電圧の値から n 型 GaAs 半導体層 1 4 の空乏層 1 4 B の厚みを概算することができるので、これにより GaSb 半導体量子ドット領域 1 3 に電子クーパ対を注入するために適した n 型 GaAs 半導体層 1 4 の厚さを確認することができる。

## 【 0 0 2 6 】

なお、基板 1 0、第 1 半導体層 1 1、第 2 半導体層 1 2、半導体量子ドット領域 1 3 および第 3 半導体層 1 4 それぞれの組成については多種の態様があり得る。例えば、基板 1 0 は Cr ドープ GaAs からなり、第 1 半導体層 1 1 は p 型 GaAs からなり、第 2 半導体層 1 2 は p 型 AlGaAs からなり、半導体量子ドット領域 1 3 は ZnTe からなり、第 3 半導体層 1 4 は n 型 ZnSe からなるものであってもよい。この場合には、超伝導の第 1 電極 1 5 と第 3 電極 1 7 との間に順バイアス電圧が印加されると、正孔が p 型 AlGaAs 半導体層 1 2 から ZnTe 半導体量子ドット領域 1 3 に注入されるとともに、電子クーパ対が超伝導の第 1 電極 1 5 から n 型 ZnSe 半導体層 1 4 を経て ZnTe 半導体量子ドット領域 1 3 に注入されて、これら電子クーパ対と 2 個の正孔とが同時に再結合して、2 つの互いに区別できない光子が同時に生成される。

## 【 0 0 2 7 】

また、例えば、基板 1 0 は Cr ドープ GaAs からなり、第 1 半導体層 1 1 は n 型 GaAs からなり、第 2 半導体層 1 2 は n 型 AlGaAs からなり、半導体量子ドット領域 1 3 は InP からなり、第 3 半導体層 1 4 は p 型 GaAs からなるものであってもよい。この場合には、超伝導の第 1 電極 1 5 と第 3 電極 1 7 との間に順バイアス電圧が印加されると、正孔クーパ対が超伝導の第 1 電極 1 5 から p 型 GaAs 半導体層 1 4 を経て InP 半導体量子ドット領域 1 3 に注入されるとともに、電子が n 型 AlGaAs 半導体層 1 2 から InP 半導体量子ドット領域 1 3 に注入されて、これら正孔クーパ対と 2 個の電子とが同時に再結合して、2 つの互いに区別できない光子が同時に生成される。

## 【 0 0 2 8 】

以上のように、第 1 実施形態に係る半導体発光素子 1 は、半導体 p-n 接合をベースとしつつ、一方の電極に超伝導体を用い、その超伝導体の電極からクーパ対を半導体層に注入するとともに、人造原子とも言われる半導体量子ドットの量子準位を使って、伝導帯または価電子帯の各量子準位に 2 つの電子または 2 つの正孔を分布させて、一度にただ一对だけの量子もつれ合い光子対を生成することができる。したがって、この半導体発光素子 1 は、処理速度の速い量子情報処理や安全性の高い量子情報通信において好適に用いら

10

20

30

40

50

れ得る。また、第1実施形態に係る半導体発光素子1では、2つの超伝導の第1電極および第2電極が間隙を隔てて配置されていて、これら2つの超伝導の電極の間の超伝導電流を評価することにより、半導体層に注入されたクーパ対の状態を評価することができる。

#### 【0029】

(第2実施形態)

次に、本発明に係る半導体発光素子の第2実施形態について説明する。図5は、第2実施形態に係る半導体発光素子2の構成を示す図である。同図(a)は平面図である。同図(b)は同図(a)のA-A線での断面図である。

#### 【0030】

この図に示されるように、第2実施形態に係る半導体発光素子2は、第1導電型の半導体基板20と、半導体基板20の一方の主面上に設けられた第1導電型の第1半導体層22と、第1半導体層22上に設けられた第2導電型の第2半導体層24と、第2半導体層24上に設けられた超伝導の第1電極25および超伝導の第2電極26と、半導体基板20の他方の主面上に設けられた第3電極27と、第1半導体層22と第2半導体層24との間に設けられた半導体量子ドット領域23とを備える。また、半導体発光素子2は、第1電極25のうち半導体量子ドット領域23の上方部分に貫通孔28が設けられ、第1電極25と第2電極26との間に間隙29が設けられ、第3電極27のうち半導体量子ドット領域23の下方部分に貫通孔30が設けられている。

#### 【0031】

図5(a)の平面図で見たとき、第1半導体層22および第2半導体層24は、貫通孔28が設けられた位置(すなわち、半導体量子ドット領域23が設けられた位置)を挟んで両側に延在して設けられていて、両端部分が幅広となっている。同じく平面図で見たとき、第2半導体層24上の第1電極25および第2電極26は、スリット状の間隙29を挟んで各々端部へ向かって延在して設けられていて、両端部分が幅広となってワイヤボンディング用パッド領域となっている。

#### 【0032】

ここで、第1導電型および第2導電型のうち、一方はp型であり、他方はn型である。基板20、第1半導体層22、第2半導体層24及び半導体量子ドット領域23それぞれは、化合物半導体からなるのが好適である。例えば、半導体基板20はp型GaAsからなり、第1半導体層22はp型AlGaAsからなり、半導体量子ドット領域23はGaSbからなり、第2半導体層24はn型GaAsからなる。このような構成を有する半導体発光素子2を製造する方法として、例えばMOCVD, MBE, MOMB E等の広範な技術が適宜に採用される。

#### 【0033】

このような半導体発光素子2において、超伝導の第1電極25と第3電極27との間に順バイアス電圧が印加されると、正孔がp型AlGaAs半導体層22からGaSb半導体量子ドット領域23に注入されるとともに、電子クーパ対が超伝導の第1電極25からn型GaAs半導体層24を経てGaSb半導体量子ドット領域23に注入されて、これら電子クーパ対と2個の正孔とが同時に再結合して、2つの互いに区別できない光子が同時に生成される。生成された1対の光子は互いに反対方向に放出されて、一方の光子は貫通孔28を通過して放出され、他方の光子は貫通孔30を通過して放出される。

#### 【0034】

また、この半導体発光素子2でも、第3電極27にバイアス電圧が印加されると、n型GaAs半導体層24において、空乏層が広がる一方で、導電層が狭くなり、導電層が電子クーパ対注入領域に限定される。すると、超伝導電極25, 26間を流れるのはジョセフソン電流のみとなり、電流-電圧特性は明瞭な超伝導特性を示す。また、第3電極27に印加されたバイアス電圧の値からn型GaAs半導体層24の空乏層の厚みを概算することができるので、これによりGaSb半導体量子ドット領域23に電子クーパ対を注入するために適したn型GaAs半導体層24の厚さを確認することができる。

10

20

30

40

50

## 【0035】

なお、第2実施形態においても、基板20、第1半導体層22、半導体量子ドット領域23および第2半導体層24それぞれの組成については多種の態様があり得る。例えば、半導体基板20はp型GaAsからなり、第1半導体層22はp型AlGaAsからなり、半導体量子ドット領域23はZnTeからなり、第2半導体層24はn型ZnSeからなるものであってもよい。或いは、例えば、半導体基板20はn型GaAsからなり、第1半導体層22はn型AlGaAsからなり、半導体量子ドット領域23はInPからなり、第2半導体層24はp型GaAsからなるものであってもよい。

## 【0036】

以上のように、第2実施形態に係る半導体発光素子2も、第1実施形態に係る半導体発光素子1と同様に、一度にただ一对だけの量子もつれ合い光子対を生成することができ、処理速度の速い量子情報処理や安全性の高い量子情報通信において好適に用いられ得る。また、第2実施形態に係る半導体発光素子2でも、2つの超伝導の第1電極および第2電極が間隙を隔てて配置されていて、これら2つの超伝導の電極の間の超伝導電流を評価することにより、半導体層に注入されたクーパ対の状態を評価することができる。

10

## 【図面の簡単な説明】

## 【0037】

【図1】第1実施形態に係る半導体発光素子1の構成を示す図である。

【図2】第1実施形態に係る半導体発光素子1において第3半導体層14が薄い場合に超伝導電極15、16間に流れる電流を説明する図である。

20

【図3】第1実施形態に係る半導体発光素子1において第3半導体層14が厚く且つ空乏層14Bが薄い場合の超伝導電極15、16間に流れる電流を説明する図である。

【図4】第1実施形態に係る半導体発光素子1において第3半導体層14が厚く且つ空乏層14Bが厚い場合の超伝導電極15、16間に流れる電流を説明する図である。

【図5】第2実施形態に係る半導体発光素子2の構成を示す図である。

## 【符号の説明】

## 【0038】

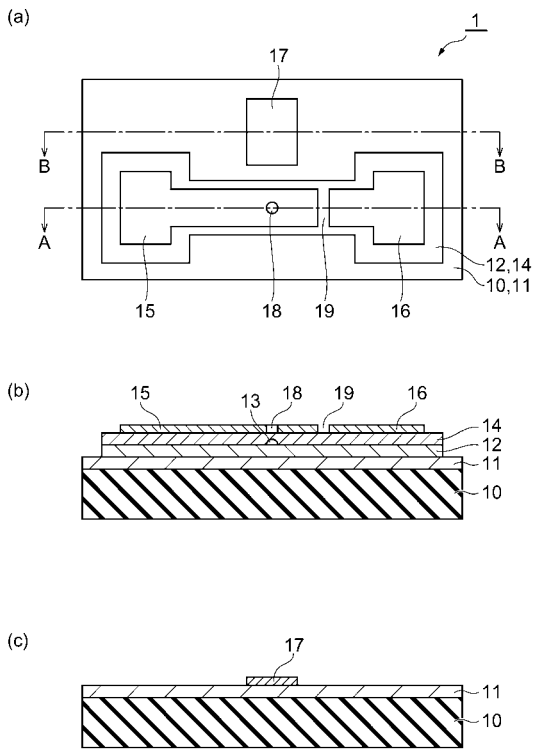
1...半導体発光素子、10...基板、11...第1導電型の第1半導体層、12...第1導電型の第2半導体層、13...半導体量子ドット領域、14...第2導電型の第3半導体層、14A...導電層、14B...空乏層、14C...電子クーパ対注入領域、14D...準粒子領域、15...超伝導の第1電極、16...超伝導の第2電極、17...第3電極、18...貫通孔、19...間隙。

30

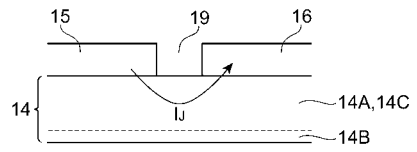
2...半導体発光素子、20...基板、22...第1導電型の第1半導体層、23...半導体量子ドット領域、24...第2導電型の第2半導体層、25...超伝導の第1電極、26...超伝導の第2電極、27...第3電極、28...貫通孔、29...間隙、30...貫通孔。



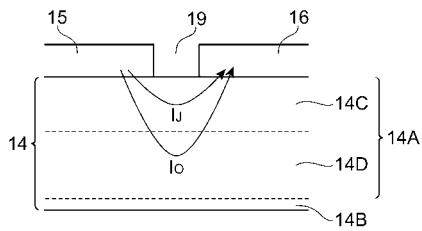
【 図 1 】



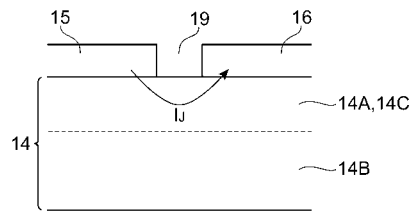
【 図 2 】



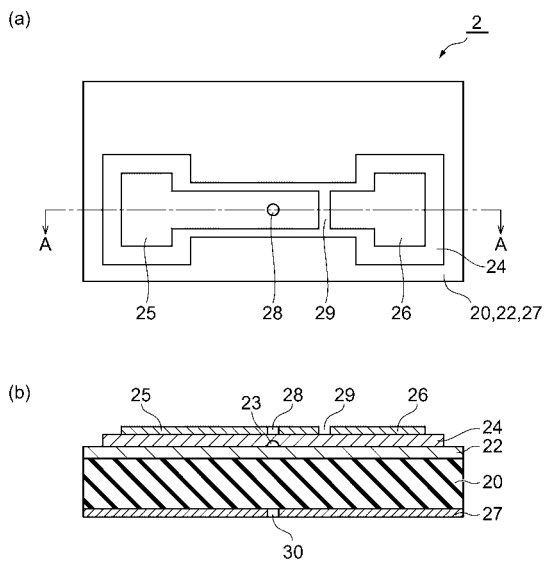
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 末宗 幾夫

北海道札幌市北区北21条西10丁目 北海道大学電子科学研究所附属ナノテクノロジー研究センター

(72)発明者 田中 和典

静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内

Fターム(参考) 5F041 AA02 AA14 CA05 CA34 CA35 CA36 CA65 CA66 CA84 CA93  
CB31 FF14 FF16