

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5143384号  
(P5143384)

(45) 発行日 平成25年2月13日 (2013. 2. 13)

(24) 登録日 平成24年11月30日 (2012. 11. 30)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 L 33/04 (2010. 01)

H O 1 L 33/00 1 1 0

H O 1 L 33/32 (2010. 01)

H O 1 L 33/00 1 8 6

H O 1 S 5/343 (2006. 01)

H O 1 S 5/343 6 1 0

請求項の数 7 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2006-221375 (P2006-221375)  
(22) 出願日 平成18年8月15日 (2006. 8. 15)  
(65) 公開番号 特開2007-53376 (P2007-53376A)  
(43) 公開日 平成19年3月1日 (2007. 3. 1)  
審査請求日 平成21年8月4日 (2009. 8. 4)  
(31) 優先権主張番号 11/203917  
(32) 優先日 平成17年8月15日 (2005. 8. 15)  
(33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 506200186  
アバゴ・テクノロジーズ・イーシービーユ  
ー・アイピー (シンガポール) プライベ  
ー・リミテッド  
シンガポール国シンガポール768923  
、イーシュン・アベニュー・7・ナンバー  
1  
(74) 代理人 100087642  
弁理士 古谷 聡  
(74) 代理人 100076680  
弁理士 溝部 孝彦  
(74) 代理人 100121061  
弁理士 西山 清春

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体素子の作動電圧を低下させるための構造

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

注入された電荷に応じて光を発生するように構成されている活性領域 (210) と、  
前記活性領域 (210) に電荷を注入するために配置されたトンネル接合構造 (220)  
を備え、

前記トンネル接合構造が、第1の半導体材料のn型トンネル接合層 (214)、第2の  
半導体材料のp型トンネル接合層 (212)、及びこれらのトンネル接合層 (212、2  
14) の間のトンネル接合 (216) を含み、

前記n型トンネル接合層 (214) と前記p型トンネル接合層 (212) の少なくとも一  
方が少なくとも2つのドーパントでドーブされ、該ドーパントの少なくとも1つが、他の  
ドーパントのイオン化エネルギーよりも高いイオン化エネルギーを有し、

前記n型トンネル接合層にドーブされるイオン化エネルギーの異なるドーパントはいず  
れもn型ドーパントであり、前記p型トンネル接合層にドーブされるイオン化エネルギーの  
異なるドーパントはいずれもp型ドーパントであることからなる、発光素子 (200)。

【請求項 2】

前記少なくとも2つのドーパントのうちのn型ドーパントが、シリコン (Si)、セレン  
(Se)、テルル (Te)、酸素 (O)、硫黄 (S)、錫 (Sn) から選択される、請求項 1 に記載  
の発光素子。

【請求項 3】

10

20

前記少なくとも2つのドーパントのうちのp型ドーパントが、マグネシウム(Mg)、亜鉛(Zn)、カルシウム(Ca)、ベリリウム(Be)、カドミウム(Cd)から選択される、請求項1に記載の発光素子。

【請求項4】

前記少なくとも2つのドーパントが、前記n型トンネル接合層(214)と前記p型トンネル接合層(212)との界面において形成される空乏領域(314)の幅を最小化する、請求項1に記載の発光素子。

【請求項5】

前記n型トンネル接合層(214)及び前記p型トンネル接合層(212)の接合部または該接合部の近傍に欠陥(610)をさらに有し、

10

前記欠陥(610)は、トンネル現象を促進して前記発光素子の作動電圧を低減する中間のバンドギャップエネルギー状態を生成する、請求項1の発光素子。

【請求項6】

前記n型トンネル接合層と前記p型トンネル接合層の間に付加的な層(730)をさらに有し、

前記付加的な層(730)は、前記n型トンネル接合層と前記p型トンネル接合層のバンドギャップよりも小さいバンドギャップを有し、トンネル現象を促進して前記発光素子の作動電圧を低減する、請求項1の発光素子。

【請求項7】

発光素子を形成する方法であって、

20

基板(201)を設け、

前記基板(201)上に活性領域(210)を形成し、

前記基板(201)上にp型トンネル接合層(212)を形成し、

前記基板上にn型トンネル接合層(214)を形成することを含み、

前記n型トンネル接合層(214)及び前記p型トンネル接合層(212)の少なくとも一方を少なくとも2つのドーパントでドーブし、該ドーパントの少なくとも1つが、他のドーパントのイオン化エネルギーよりも高いイオン化エネルギーを有し、

前記n型トンネル接合層にドーブされるイオン化エネルギーの異なるドーパントはいずれもn型ドーパントであり、前記p型トンネル接合層にドーブされるイオン化エネルギーの異なるドーパントはいずれもp型ドーパントであることからなる方法。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、半導体素子に関し、より詳細には半導体素子の作動電圧を低下させるための構造に関する。

【背景技術】

【0002】

半導体に基づく光電子素子が、光通信システム及び他のシステムにおいて利用されている。

【0003】

40

様々な材料が、光電子発光素子を製造するのに利用されている。一例を挙げれば、III族及びV族の元素が種々の組成で組み合わせられ、層が形成される。III族及びV族の元素を利用する材料システムの1つとして窒化ガリウム(GaN)材料システムが挙げられる。概して、III-V族元素の層が形成されて、半導体光電子素子が製造される。これらの素子には、概して、p-n接合と称される領域が含まれている。1つ又はそれ以上のp-n接合が、半導体光電子素子の部分として形成される。

【0004】

GaN材料システムを利用して形成される光電子素子の場合、概して、p型材料の接触抵抗が、n型材料の接触抵抗と比較して相対的に高い。さらに、p型材料内の正孔の移動度は、概して、n型材料内の電子の移動度よりも低い。これにより、GaN素子のp側の直列抵抗が

50

結果高くなる。高い直列抵抗は、素子の作動電圧を上昇させ、概して素子の性能を低下させる熱の発生を引き起こす。

【0005】

光電子素子のp側の直列抵抗を最小化する1つの方法は、素子にトンネル接合を組み込むことである。逆方向にバイアスされると、トンネル接合は、p型材料からn型材料への電子の流れを助長し、n型材料への接続を可能とし、したがって接触抵抗が最小となる。このような素子では、p型材料の量を最小とすることができ、したがって直列抵抗が最小化され、素子の作動電圧が低下される。トンネル接合から最大の恩恵を得るために、概して、トンネル接合を介する電圧降下が最小化される。

【発明の開示】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

半導体素子の作動電圧を低下させるための構造を提供する。

【課題を解決するための手段】

【0007】

半導体素子の作動電圧を低下させる構造を開示する。他のドーパントのイオン化エネルギーよりも高いイオン化エネルギーを有するドーパントで1つ又はそれ以上のトンネル接合材料の層を副次的にドーピングすることにより、半導体素子の作動電圧が低下する。また、2つのトンネル接合層の界面に欠陥を導入することにより、中間のエネルギーギャップ状態を生じさせて、トンネル現象を助長することによって、半導体素子の作動電圧が低下する。また、2つのトンネル接合層の界面に付加的な材料層を導入することにより、中間のエネルギーギャップ状態を生じさせて、トンネル現象を助長することによって、半導体素子の作動電圧が低下する。

20

【発明の効果】

【0008】

本発明は、注入される電荷に応じて光を発生するように構成されている活性領域、n型材料層及びp型材料層からなる発光素子に関し、n型材料層及びp型材料層の少なくとも1つが、少なくとも2つのドーパントでドーブされ、ドーパントの少なくとも1つが他のドーパントのイオン化エネルギーよりも高いイオン化エネルギーを有する。

【発明を実施するための最良の形態】

30

【0009】

本発明の実施形態は、以下の図面を参照することによってより一層理解することが可能となる。図面内の構成要素は、必ずしも縮尺通りではなく、本発明の原理を明瞭に図解する場合には、代わりに強調して示す。さらに、図面では、幾つかの図面を通して、同様の参照番号が対応する部分を指し示す。

【0010】

本発明の実施形態は、バルク半導体材料にわずかな影響を与えるが、アクセプタ及びドナーの深いレベルでのドーブは、トンネル接合又は抵抗接点の空乏領域でイオン化されると、半導体材料の導電性を著しく改善するという理解に基づいている。III-V族窒化物材料において、概してマグネシウムがp型ドーパントとして利用され、概してシリコンがn型ドーパントとして利用される。しかしながら高いイオン化エネルギー、すなわち活性化、エネルギー（すなわち「より深い」不純物）を備えている付加的なドーパントが、空乏領域でイオン化され、かなりの程度空乏領域の幅が縮小し、したがって半導体素子の作動電圧が低下する。

40

【0011】

本発明の一実施形態では、ドーブされた半導体材料のp型トンネル接合とn型トンネル接合のトンネル接合構造を形成し、p型トンネル接合層の材料の価電子帯エネルギーとn型トンネル接合層の材料の伝導帯エネルギーの間の空乏領域の幅が縮小することによって、トンネル接合の電圧降下が低減される。空乏領域の幅が縮小することにより、p型トンネル接合層の材料の価電子帯エネルギーとn型トンネル接合層の材料の伝導帯エネルギーの間

50

のエネルギー障壁が減少し、所定の逆方向のバイアスにおけるトンネル現象の可能性が増大し、したがってトンネル接合を介する所定の電流に対するトンネル接合を介する電圧降下が低減する。価電子帯で高いイオン化エネルギー及び深いアクセプタレベルを有するドーパントでp型トンネル接合層の材料を副次的にドーピングすることによって、p型トンネル接合層の材料の価電子帯エネルギーとn型トンネル接合層の材料の伝導帯エネルギーの間の差は小さくなる。ドーパントが材料層全体に均一に分配される1つ又はそれ以上の層の副次的なドーピングが同時に生じ、もしくは材料層の部分が第1のドーパントで先ずドーブされ、材料層の次の部分が第2の、すなわち副次的なドーパントでドーブされる副次的なドーピングが連続して生じる。

【0012】

10

p型接点の場合、金属の接点材料と接触するp型層の材料を副次的にドーピングすることによって、p型材料と金属接点の間の抵抗が低下し、したがって素子の作動電圧が低下する。

【0013】

本発明の一実施形態では、半導体素子の作動電圧は、p型材料及び/又はn型材料に副次的なドーパントを導入することによって低下する。副次的なドーパントは、第1のドーパントの活性化エネルギーよりも深いレベルのエネルギーレベル及び、より高い活性化エネルギーを有する。p型材料として、本発明の実施形態では、典型的なマグネシウム(Mg)ドーパントに対して、亜鉛(Zn)、カルシウム(Ca)、ベリリウム(Be)又はカドミウム(Cd)のようなドーパントを加える。n型材料として、本発明の実施形態では、従来のシリコン(Si)ドーパントに対して、セレン(Se)、テルル(Te)、酸素(O)、硫黄(S)又は錫(Sn)のようなドーパントを加える。亜鉛、カルシウム、ベリリウム、カドミウムのようなドーパントは、マグネシウムよりも極めて深いアクセプタレベルとより高い活性化エネルギーを有し、概してバルク材料内のドープレベルに著しい影響を及ぼすことがない。同様に、セレン、テルル、酸素、硫黄、錫のようなドーパントは、シリコンよりも深いドナーレベルを有し、n型ドーピングされたバルクに影響を及ぼさない。

20

【0014】

しかしながら、これらの第2のドーパントは、半導体表面又は界面において生じる空乏領域でイオン化され、したがって接点とトンネル接合の抵抗が低下する。空乏領域の幅が縮小することにより、接点とトンネル接合の抵抗が効果的に低下する。空乏領域の幅が縮小することにより、材料層が深いアクセプタレベル及びドナーレベルを有するドーパントで副次的にドーブされる素子の作動電圧が低下する。

30

【0015】

また、本発明の実施形態は、トンネル接合のp型材料層及びn型材料層の周辺に欠陥を導入することによって、半導体素子の作動電圧を低下させる。欠陥は、トンネル現象を助長し、半導体素子の作動電圧を低下させる中間のバンドギャップエネルギー状態を作り出す。

【0016】

また、本発明の実施形態は、トンネル接合のn型材料層とp型材料層の間に付加的な層を導入することによって半導体素子の作動電圧を低下させる。付加的な層の材料は、n型トンネル接合層及びp型トンネル接合層のバンドギャップよりも実質的に低いバンドギャップを有し、トンネル現象を助長し、半導体素子の作動電圧を低下させる。

40

【0017】

本明細書で利用する場合、副次的なドーブという用語は、少なくとも2つのドーパントを含む半導体材料層について言及する。材料層を形成するとき、2つのドーパントを同時に適用することも、もしくは、半導体材料層の部分に第1のドーパントを加え、第2のドーパントを半導体材料層の次の部分に加えて、少なくとも2つのドーパントを連続して加えてもよい。

【0018】

本発明の実施形態は、深いアクセプタレベルのドーパントで副次的にドーブされている

50

少なくとも1つの層を有して形成されているトンネル接合を介する電圧降下を低減する。この実施形態では、トンネル接合構造は、深いアクセプタレベルを有する副次的なドーパントで少なくとも1つのトンネル接合層をドーブすることにより得られるよりも、より低い電圧においてトンネル現象の可能性を著しく増大させる。特に、p型トンネル接合層の材料の価電子帯とn型トンネル接合層の伝導帯の間のエネルギーの差が、亜鉛、カルシウム、ベリリウム、カドミウムのような副次的なドーパントを、この実施例では、マグネシウムである典型的なp型ドーパントに加えることによって縮小する。本発明の他の実施形態では、上記の副次的なドーブが、抵抗接点と接触するp型材料層で実施される。典型的なマグネシウムドーパントに加えて、亜鉛、カルシウム、ベリリウム、カドミウムのような副次的なドーパントで抵抗接点と接触するp型材料層をドーブすることによって、接触抵抗が低下し、したがって素子の作動電圧が低下する。

10

#### 【0019】

本発明の他の実施形態は、トンネル接合における材料に結晶欠陥を形成することによって、トンネル接合を介する電圧降下を低減する。本発明の他の実施形態では、n型トンネル接合層及びp型トンネル接合層のバンドギャップよりも実質的に低いバンドギャップを有するエピタキシャル金属又は半金属層が、n型トンネル接合層及びp型トンネル接合層の界面に形成され、トンネル接合を介するトンネル現象を助長する。欠陥又は金属中間層は、p型トンネル接合層材料の価電子帯からn型トンネル接合層の伝導帯への捕獲及び放出過程を介するトンネル現象を助長する中間バンドギャップ状態を作り出す。

#### 【0020】

20

図1は、相対的なアクセプタドーピング準位を概略的に示す。参照用に、荷電子帯を参照番号102で、伝導帯を参照番号104で示す。マグネシウムのアクセプタレベルを参照番号106で示し、亜鉛のアクセプタレベルを参照番号108で示す。説明を簡単にするために、亜鉛のアクセプタレベルのみをマグネシウムのアクセプタレベル及び荷電子帯に対して示す。しかしながら、カルシウム、ベリリウム、カドミウムのような他のドーパントも、マグネシウムよりも深いドーピングアクセプタレベルを有する。さらに、p型ドーパントを図1に図解するが、セレン、テルル、酸素、硫黄、錫のようなn型ドーパントのドナーレベルは、伝導帯104に関連して示される。

#### 【0021】

窒化ガリウムの価電子帯に関して、マグネシウムのエネルギーレベル( $E_a$ )又は活性化エネルギーとも称されるドーパントのイオン化エネルギーは、図1のd1で示すように、おおよそ180ミリエレクトロンボルト(meV)であり、亜鉛のエネルギーレベル( $E_a$ )は、図1のd2で示すように、おおよそ300 meVである。バルク材料のドーブ濃度に最小の効果しか有さないが、マグネシウムに対する亜鉛アクセプタ(又はカルシウム、カドミウム、ベリリウム)の付加は、p-n接合の局所的な伝導性を著しく改善する。P型材料内のアクセプタの濃度は亜鉛を加えることによって上昇するが、亜鉛の付加はバルク材料に対する正孔の濃度を上昇させない。金属接点又はp-n接合と関連する空乏領域において、深いアクセプタはイオン化するが、それらの存在によって、そのような接合において欠乏領域の幅は最小化される。深いアクセプタのドープレベルが、バルク材料に対する電氣的に平衡な恩恵をもたらさないために、これは直感に反する。しかしながら深いアクセプタの副次的なドーブは、その深い特徴にも関わらず、空乏領域の幅を著しく縮小する。つまり、空乏領域の幅の縮小によって、1つ又はそれ以上の副次的なドーブ層を有する半導体素子は、副次的なドーブ層を有さない素子の電圧レベルを下回る電圧レベルで作動可能である。

30

40

#### 【0022】

図2は、本発明の実施形態によるトンネル接合を使用する半導体発光ダイオード200の概略図である。一実施形態では、半導体素子200は、有機金属気相結晶成長装置(OMVPE)とも称される有機金属化学気相成長法(MOCVD)を利用して形成される。MOCVDを利用して、化学的前駆体が処理されて、その構成要素が解放される。要素は、気化され、キャリアガスを使用して搬送されて、基板上に原子層を形成する。種々の組成の多くの層が、形成されて、半導体素子が作り出される。代替的には、半導体素子200の層が、分子線エピタ

50

キシー（MBE）又は他の製造工程を利用して製造される。

【0023】

サファイア基板201上に緩衝層202が形成される。本発明の一実施形態では、緩衝層202をおおよそ500-800 の比較的低温で成長した窒化ガリウムから形成することができる。窒化ガリウムのn型層204が、緩衝層202上に形成されている。本発明の一実施形態では、窒化ガリウム層204はおおよそ3ミクロンメートル（ $\mu\text{m}$ ）の厚みである。インジウムガリウム窒素量子井戸層と窒化ガリウム障壁層の交代層からなる活性領域210が、層204上に形成されている。活性領域は1つ又はそれ以上の量子井戸からなり、この例示では4つの量子井戸を含む。

【0024】

活性領域210上にアルミニウムガリウム窒素のp型層206が形成される。層206はおおよそ30ナノメートル（nm）の厚みである。窒化ガリウム層208が層206上に形成されている。層208はおおよそ100-1000 nmの厚みである。

【0025】

p型トンネル接合層212及びn型トンネル接合層214からなるトンネル接合構造220が層208上に形成されている。p型トンネル接合層212及びn型トンネル接合層214はトンネル接合216を形成する。本発明の一実施形態では、p型トンネル接合層212は、窒化ガリウム又はガリウムインジウム窒素を利用して形成され、おおよそ10 nmの厚みである。p型トンネル接合層212は、マグネシウム及び、マグネシウムよりも高いイオン化エネルギーとマグネシウムよりもより深いアクセプタレベルを有する他のドーパントの組み合わせを利用してドーピングされる。この例示では、p型トンネル接合層212は、マグネシウムと亜鉛で副次的にドーピングされている。しかしながら、p型トンネル接合層212を、他の元素で、又は例えばカルシウム、ベリリウムを含む元素の組み合わせで副次的にドーピングすることもできる。マグネシウム及び亜鉛でp型トンネル接合層を副次的にドーピングすることにより、p型トンネル接合層212内に局所的に高いアクセプタ濃度が存在する。したがって、以下に記述するように、マグネシウムのみをドーピングする場合と比べて、空乏層の幅が縮小される。それによって、素子200が逆方向にバイアスされると、亜鉛によってもたらされる深いアクセプタドープレベルが、p型トンネル接合層212の荷電子帯からn型トンネル接合層214の伝導帯へのトンネル現象を助長する。

【0026】

概して、ドーパントは、材料層が形成される際に材料層に付加される。本発明の一実施形態では、マグネシウム及び亜鉛が、p型トンネル接合層212が形成される際に、p型トンネル接合層212に付加される。例として、マグネシウムはp型トンネル接合層212の成長全体にわたって付加され、亜鉛はp型トンネル接合層212の成長の終わり頃に付加され、それによってn型トンネル接合層214と直接接触するp型トンネル接合層212の表面に濃密に副次的にドーピングされた領域が存在する。

【0027】

窒化ガリウム又はガリウムインジウム窒素を利用して、おおよそ10 nmの厚みに、n型トンネル接合層214が形成される。n型トンネル接合層214は、従来のようにドーピングことができ、又はシリコン及びシリコンのドナーレベルよりも深いドナーレベルを有する他のドーパントとの組み合わせを利用してドーピングすることができる。n型トンネル接合層212が副次的にドーピングされるのであれば、n型トンネル接合層212をシリコンと酸素で副次的にドーピングすることができる。しかしながら、n型トンネル接合層214を他の元素で、又は例えばセレン、テルル、硫黄、錫を含む元素の組み合わせで副次的にドーピングすることもできる。代替的に、炭素又はゲルマニウムのような他の不純物を副次的なドーパントとして利用することができる。n型最上層222が、n型トンネル接合層214上に、おおよそ0.5  $\mu\text{m}$ の厚みをもって窒化ガリウムから形成されている。n型接点層224が、最上層222上に、おおよそ50 nmの厚みをもって窒化ガリウムから形成されている。n型接点226が接点層224上に形成され、n型接点228が下方へエッチングすることにより層204に形成されている。

【0028】

図2は、GaNに基づく発光ダイオード構造に適用されているトンネル接合を示すが、また類似のトンネル接合構造をIII族-窒素に基づくレーザダイオードに組み込むこともできる。このような用途では、代わりに、同一のトンネル接合層がレーザのAlGaNの上部クラッド層に埋め込まれる。

【0029】

図3は、電氣的にわずかに逆方向にバイアスされている図2のトンネル接合を示すエネルギーバンド図300である。伝導帯エネルギーが参照番号302を利用して、価電子帯エネルギーが参照番号304を利用して図解されている。このトンネル接合の例では、マグネシウムに対するp型の副次的なドーパントとして亜鉛を加える効果を伝導帯の点線306及び価電子帯の点線308を利用して図解している。価電子帯の点線308を参照すると、p型トンネル接合層212（図2）に対する副次的なドーパントとしての亜鉛の付加が、p型トンネル接合層212のエネルギーバンドを変化させ、それによって空乏領域214の幅Wが、p型トンネル接合層212をドーピングするのにマグネシウムしか利用しない場合の空乏領域312の幅Wに対して縮小している。

10

【0030】

マグネシウムのみがドーピングに使用される場合の、p型トンネル接合層214の価電子帯304とn型トンネル接合層214の伝導帯302の間のトンネル現象の距離を距離d3として示し、矢印316を利用して図解する。p型トンネル接合層がマグネシウムと亜鉛により副次的にドーピングされると、p型トンネル接合層212の価電子帯304とn型トンネル接合層214の伝導帯302の間のトンネル現象の距離は距離d4に減少し、矢印318を利用して図解する。電子がp型トンネル接合層212の価電子帯からn型トンネル層214の伝導帯へ通り抜けなければならない距離が減少することにより、トンネル接合220を介する電圧降下が低減し、半導体素子の作動電圧が低下する。

20

【0031】

したがって、p型トンネル接合層212及びn型トンネル接合層214を副次的にドーピングすることにより、空乏領域の幅が最小化し、トンネル現象の可能性が増大する。これにより、素子の全体の作動電圧が低下する。

【0032】

図4は、本発明の他の実施形態による低抵抗接触を使用する半導体素子400を概略的に示す図である。半導体素子400は、種々の半導体素子の多くの実例を表し、高度に単純化して示されている。半導体素子400は、基板401上に形成されているn型材料層402からなる。p型材料層404がn型材料層402の上に形成され、それらの間にp-n接合410が形成される。例えば、半導体素子400を、窒化ガリウム材料システムで形成された発光素子とすることができる。

30

【0033】

n型接点406がn型材料層402上に形成され、p型接点408がp型材料層404上に形成されている。上記のように、窒化ガリウム材料システムに形成されたp型材料の接触抵抗が高く、正孔の移動度が小さいため、通常、半導体素子のp型材料の量を最小化することが望まれている。しかしながら、多くの場合、p型接点を備える必要が依然としてある。本発明の実施形態では、p型材料層404をマグネシウム及び亜鉛を利用して副次的にドーピングする。一実施形態では、半導体素子400が、有機金属気相結晶成長装置（OMVPE）とも称される有機金属化学気相成長法（MOCVD）を利用して形成される。MOCVDを利用して、化学的前駆体が処理されて、その構成要素が解放される。要素は、気化され、キャリアガスを使用して搬送されて、基板の上に原子層を形成する。種々の組成の多くの層が、形成されて、半導体素子が作り出される。代替的には、半導体素子400の層が、分子線エピタキシー（MBE）又は他の製造工程を利用して製造される。

40

【0034】

概して、ドーパントは、材料層が形成される際に材料層に付加される。本発明の一実施形態では、マグネシウム及び亜鉛が、p型材料層404が形成される際に、p型材料層404に付加される。例として、マグネシウムはp型材料層404の成長全体にわたって付加され、亜鉛

50

はp型材料層404の成長の終わり頃に付加され、それによってp型接点408の直下にp型材料層404の表面に濃密に副次的にドーピングされた領域が存在する。

【0035】

p型接点408と接触するp型材料層404の濃密に副次的にドーピングされた領域は、p型材料層404とp型接点408の金属の間の接触抵抗が著しく低下する。この仕方では、p型材料層404とp型接点408の接合における空乏領域の幅が、従来のドーピングを利用するよりも一層狭くなる。空乏領域幅が低減することにより、p型材料層404とp型接点408の間のトンネル現象の可能性が増大し、したがって、素子の全体の作動電圧が低減する。

【0036】

図5は、図4の半導体素子のp型接点及びp型材料層のエネルギーバンド図500である。伝導帯エネルギーを参照番号502を利用して図解し、価電子帯エネルギーを参照番号504を利用して図解する。p型接点を金属408として図解する。このp型接点の例として、マグネシウムに対する副次的なドーパントとして加えられた亜鉛の効果は伝導帯の点線506及び価電子帯の点線508を利用して図解する。価電子帯の点線508を参照すると、p型材料層404に対する副次的なドーパントとしての亜鉛の付加は、p型材料層404のエネルギーバンドを変化させ、それによって空乏領域の幅Wが、マグネシウムのみでp型材料層404をドーピングした場合の空乏領域の幅Wに対して狭くなる。

【0037】

マグネシウムのみを利用してドーピングした際の、p型材料層404の価電子帯504と伝導帯502（すなわちp型接点408）の間のトンネル現象の距離を矢印516を利用して図解する距離として示す。p型材料層404をマグネシウム及び亜鉛で副次的にドーピングすると、p型材料層404の価電子帯504とp型接点408の間のトンネル現象の距離は、矢印518を利用して図解する距離まで狭くなる。電子がp型材料層404の価電子帯からp型接点408へ通り抜けなければならない距離が減少することにより、接触抵抗が低下し、したがって半導体素子の作動電圧が低下する。したがって、p型材料層404を副次的にドーピングすることは、空乏領域の幅を最小化し、トンネル現象の可能性を増大させる。これにより、素子の全体の作動電圧が低減される。

【0038】

図6は、図2のトンネル接合を介する電圧降下を低減する、本発明の代替的な実施形態を示すエネルギーバンド図600である。伝導帯エネルギーを参照番号602を利用して図解し、価電子帯エネルギーを参照番号604を利用して図解する。このトンネル接合の例として、欠陥が、p型トンネル接合層212とn型トンネル接合層214の接合に又は接合の近くに導入されている。欠陥を図6において参照番号610で図解する。例えば、欠陥610を、p型トンネル接合層212及びn型トンネル接合層214の一方もしくは両方の材料の結晶格子内の欠陥とすることができる。欠陥610の効果は、中間のエネルギーギャップ状態を生じさせて、p型トンネル接合層212の価電子帯604とn型トンネル接合層214の伝導帯602の間のトンネル現象を助長する。欠陥610は、トンネル現象が捕獲及び放出過程を介して生じるエネルギー状態によって、トンネル現象を促進する。欠陥610を利用して中間のエネルギーギャップ状態を作り出す効果を、p型材料の価電子帯604内の電子が欠陥位置610に通り抜ける線620及び622を利用して図解する。さらに、電子は欠陥位置610からn型材料の伝導帯602へ通り抜ける。

【0039】

さらに、欠陥610を利用する中間のエネルギーギャップ状態を作り出すことは、上記の副次的なドーピングと組み合わせられ、トンネル現象をさらに促進し、半導体素子の作動電圧をさらに低下させる。

【0040】

図7は、本発明の代替的な実施形態によるトンネル接合を利用する半導体発光ダイオード700の概略図である。半導体素子700は、半導体素子200と同様の仕方では形成可能である。

【0041】

10

20

30

40

50



緩衝層702が、サファイア基板701の上に形成されている。本発明の実施形態では、緩衝層702を、およそ500-800 の比較的低い成長温度で窒化ガリウムから形成することができる。窒化ガリウムのn型層704が、緩衝層702の上に形成されている。本発明の実施形態では、窒化ガリウム層704は、およそ3ミクロンメートル( $\mu\text{m}$ )の厚みである。インジウムガリウム窒素量子井戸層及び窒化ガリウム障壁層の交代層からなる活性領域710が層704の上に形成されている。活性層は、1つ又はそれ以上の量子井戸を含み、この例では、4つの量子井戸を含む。

【0042】

アルミニウムガリウム窒素からなるp型層706が、活性領域710上に形成されている。この層706は、およそ30ナノメートル( $\text{nm}$ )の厚みである。窒化ガリウム層708が層706の上に形成されている。層708は、およそ100-1000  $\text{nm}$ の厚みである。

10

【0043】

p型トンネル接合層712、付加的な層730、n型トンネル接合層714からなるトンネル接合構造720が、層708の上に形成されている。p型トンネル接合層712及びn型トンネル接合層714がトンネル接合716を形成する。本発明の実施形態では、中間層とも称される付加的な層730は、金属材料又は半金属材料であり、およそ1  $\text{nm}$ の厚みに形成されている。付加的な層730は、p型トンネル接合層712及びn型トンネル接合層714のバンドギャップよりも実質的に低いバンドギャップを有し、好ましくは窒化ガリウムと適合する。制限するのではなく、付加的な層730に対して適する材料の例として、窒化インジウム( $\text{InN}$ )、砒化インジウム( $\text{InAs}$ )、インジウムアンチモン( $\text{InSb}$ )を挙げることができる。さらに、砒化エルビウムや他の希土類砒素、燐、アンチモン又は窒素のような希土類V属材料からなる半金属材料も適する。

20

【0044】

この実施形態では、p型トンネル接合層712は、窒化ガリウム又はガリウムインジウム窒素を利用して、およそ10  $\text{nm}$ の厚みに形成されている。p型トンネル接合層712を、マグネシウムのみを利用してドーピングすることも、又はマグネシウムと、マグネシウムとは異なるイオン化エネルギー及びアクセプタレベル深さを有する他のドーパントとの組み合わせを利用してドーピングすることもできる。この例では、p型トンネル接合層712をマグネシウムでドーピングしている。しかしながら、p型トンネル接合層712を、他の元素で副次的にドーピングすることができ、例えば亜鉛、カルシウム、ベリリウム、カドミウムを含む元素の組み合わせで副次的にドーピングすることができる。付加的な材料の層730は、中間のエネルギーギャップ状態を作り出し、素子700が逆方向にバイアスされる際、p型材料の価電子帯からn型材料の伝導帯へのトンネル現象を促進する。付加的な層730は、窒化インジウムを利用して形成した場合、およそ0.9  $\text{eV}$ のバンドギャップを有し、砒化エルビウムを利用して形成した場合、およそ0.1-0.2  $\text{eV}$ のバンドギャップを有する。p型トンネル接合層712及びn型トンネル接合層714は、窒化ガリウムを利用して形成した場合、およそ3.4  $\text{eV}$ のバンドギャップを有する。材料の組成によって、付加的な材料の層730は、およそ0.9  $\text{eV}$ と3.4  $\text{eV}$ の間のバンドギャップを有する。トンネル接合層712及び714のバンドギャップと比較して付加的な層730のバンドギャップがより低いことにより、中間的なエネルギーギャップ状態が生じ、素子700が逆方向にバイアスされた際、p型材料の価電子帯からn型材料の伝導帯への通り抜けが促進される。

30

40

【0045】

n型トンネル接合層714は、窒化ガリウム又はガリウムインジウム窒素を利用して、およそ10  $\text{nm}$ の厚みに形成されている。n型トンネル接合層714は、従来のドーピングとすることも、又はシリコンと、シリコンとは異なる深さのドナーレベルを有する他のドーパントとの組み合わせを利用してドーピングすることもできる。n型トンネル接合層712を副次的にドーピングするならば、n型トンネル接合層712をシリコンと酸素で副次的にドーピングすることができる。しかしながら、n型トンネル接合層714を、他の元素、すなわち例えば上記のような、セレン、テルル、硫黄、錫を含む元素の組み合わせで副次的にドーピングすることもできる。窒化ガリウムからなるn型最上層722が、n型トンネル接合層714上におおよそ0.5  $\mu\text{m}$ の厚み

50

で形成されている。窒化ガリウムからなるn型接点層724が、最上層722上におおよそ50 nmの厚みで形成されている。接点層724上にn型接点726が形成され、n型接点が、層704へ下方へエッチングされることにより形成される。

【0046】

図7は、GaNに基づく発光ダイオード構造に適用されるトンネル接合を示すが、また同様のトンネル接合構造はIII族窒素に基づくレーザダイオードに組み込まれる。このような適用において、同一のトンネル接合層を、レーザのAlGaInNの上部クラッド層に代わりに埋め込むことができる。

【0047】

図8は、図7のトンネル接合を介する電圧降下を示すエネルギーバンド図である。伝導帯エネルギーを参照番号802で示し、価電子帯エネルギーを参照番号804で示す。このトンネル接合の例では、p型トンネル接合層712及びn型トンネル接合層714のバンドギャップよりも小さなバンドギャップを有する付加的な材料の層730、すなわち中間層が、p型トンネル接合層712の価電子帯804とn型トンネル接合層714の伝導帯802の間のトンネル現象を促進する中間エネルギーギャップ状態を作り出す。付加的な層730は、トンネル現象が二段階のトンネル現象過程を介して生じるエネルギー状態を作り出すことによってトンネル現象を促進する。付加的な層730を利用して中間のエネルギーギャップ状態を作り出す効果を、p型材料の価電子帯804の電子が付加的な層730に通り抜ける線820及び822を利用して図解する。さらに電子は、付加的な層730からn型材料の伝導帯802に通り抜ける。

【0048】

さらに付加的な層を利用して中間のエネルギーギャップ状態を作り出すことを上記の副次的なドーパントと組み合わせることができ、トンネル現象をさらに促進し、半導体素子の作動電圧をより低下させることができる。

【0049】

図9は、半導体素子の作動電圧を低下させるトンネル接合構造を製造するための、本発明の実施形態による方法900を図解する。ブロック902において、基板が設けられる。ブロック904において、第1の半導体材料のp型トンネル接合層が基板上に形成される。これは、基板上又は基板上方に第1の半導体材料の層を堆積することによって達成される。第1の半導体材料の層は、第1及び第2のドーパントでドーパされている。例えば第1のドーパントをマグネシウムとすることができ、例えば、第2の又は副次的なドーパントをマグネシウムよりも高いイオン化エネルギーとマグネシウムよりも深いアクセプタレベルを有する材料とすることができる。この例では、副次的なドーパントを、亜鉛(Zn)、カルシウム(Ca)、カドミウム(Cd)、ベリリウム(Be)から選択することができる。ドーパントは、層が成長されるときに供給される。MOCVDを利用して製造されるならば、ジエチル亜鉛、ジメチル亜鉛、ジメチルカドミウム、ジエチルベリリウムのような気体状、分子状の化合物が利用される。分子線エピタキシ(MBE)を利用して製造されるならば、固体の元素材料が、ドーパントとして利用するための元素源から蒸発される。

【0050】

第1及び第2のドーパントを、半導体材料層の成長時、同時に付加することができ、結果として、層全体でドーパントが均一に分配される。代替的に、半導体材料層の第1の部分が第1のドーパントでドーパされ、半導体材料層の第2の部分が第2のドーパントでドーパされるように、第1及び第2のドーパントを順次付加することができる。代替的に、第1及び第2のドーパントを、層の厚みにわたって異なる比率で半導体材料層に付加することができる。

【0051】

ブロック906において、第2の半導体材料のn型トンネル接合層が、p型トンネル接合層に近接して形成される。n型トンネル接合層及びp型トンネル接合層が、全体としてトンネル接合を形成する。第1の半導体材料及び第2の半導体材料のどちらか又はどちらもが、第1のドーパント及び第2のドーパントを含む。n型トンネル接合層の第2の半導体材料が、シリコン(Si)のような第1のドーパント及び、第1のドーパントよりも高いイオン

化エネルギーとより深いドナーレベルを有する第2の、すなわち副次的なドーパントでドーピングされる。この例では、副次的なドーパントは、セレン (Se)、テルル (Te)、硫黄 (S)、錫 (Ti)、酸素 (O) から選択される。ドーパントは、層の成長と同時に供給される。MOCVDを利用して製造されるならば、水素化セレン ( $\text{H}_2\text{Se}$ )、ジエチルテルル、ジメチルテルル、硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ )、テトラエチル錫、酸素 ( $\text{O}_2$ )、水のような気体状、分子状の化合物が前駆体として利用される。分子線エピタキシ (MBE) を利用して製造するならば、固体又は気体状の元素材料が、第1及び第2のドーパントとして利用される。

【0052】

p型トンネル接合層又はn型トンネル接合層の何れかが、近接する層に対して、格子整合し、又はシュードモルフィックに成長され、あるいは他の仕方で適用される。付加的な材料の層は、基板から離れたトンネル接合層に成長され、又は他の仕方で適用される。

【0053】

図10は、半導体素子の作動電圧を低下する低抵抗接触を形成するための、本発明の実施形態による方法1000を図解する。ブロック1002において、光電子素子が形成される。ブロック1004において、p-n接合が、光電子素子内に配置される。ブロック1006において、低抵抗のp型接点、第1のドーパント及び第2のドーパント、又は副次的なドーパントでp型材料をドーピングすることにより形成される。副次的なドーパントは、より高いドーパントのイオン化エネルギーを有し、したがって第1のドーパントよりも深いアクセプタレベルを有する。ブロック1006は、ブロック1008及び1010を含む。ブロック1008において、p型材料は、マグネシウムのような第1のドーパントでドーピングされる。ブロック1010において、p型材料は、亜鉛、カルシウム、ベリリウム、カドミウムから選択される第2のドーパントでドーピングされる。第2のドーパントは、第1のドーパントよりも深いアクセプタレベルとより高いドーパントイオン化エネルギーを有する。ブロック1012において、電圧が光電子素子に適用され、光電子素子が作動する。

【0054】

図11は、半導体素子の作動電圧を低下させるための、本発明の実施形態による代替的な方法1100を図解する。ブロック1102において、光電子素子が形成される。ブロック1104において、p-n接合が、光電子素子内に配置される。ブロック1106において、欠陥がp-n接合の近傍に形成される。欠陥は、例えば、p-n接合の近傍に光電子素子の層を形成する際に成長パラメータを変更することにより、又はp-n接合層を不純物でドーピングして中間のエネルギーギャップ状態を作り出すことにより形成される。欠陥は中間のエネルギーギャップ状態をp-n接合の近傍に作り出す。中間のエネルギーギャップ状態は、価電子帯のp型材料から伝導帯のn型材料へ、例えば捕獲及び放出により通り抜けるキャリアに対する経路をもたらす。トンネル現象の経路は、トンネル現象が起こる可能性を増大させ、それによって光電子素子の作動電圧が低下する。ブロック1108において、光電子素子に電圧が適用され、光電子素子が作動する。

【0055】

図12は、半導体素子の作動電圧を低下させるための、本発明の実施形態による代替的な方法を図解する。ブロック1202において、光電子素子が形成される。ブロック1204において、第1の半導体材料のp型トンネル接合層が基板上に形成される。これは、基板上に又は基板上方に第1の半導体材料の層を堆積することによって達成される。ブロック1206において、付加的な層が第1のトンネル接合層上に形成される。付加的な層は、第1のトンネル接合層及び次に形成される第2のトンネル接合層のバンドギャップよりも実質的に小さいバンドギャップを有する。ブロック1208において、第2のトンネル接合層が付加的な層の上に形成される。付加的な層は、p-n接合の近傍に中間のエネルギーギャップ状態を作り出す。中間のエネルギーギャップ状態は、価電子帯のp型材料から伝導帯のn型材料へ、例えば捕獲及び放出により通り抜けるキャリアに対する経路をもたらす。トンネル現象の経路は、トンネル現象が起こる可能性を増大させ、それによってトンネル接合が位置する光電子素子の作動電圧が低下する。ブロック1210において、光電子素子に電圧が適用され、光電子素子が作動する。

## 【 0 0 5 6 】

本開示は、本発明の具体例を利用して本発明を詳細に記述する。しかしながら、記述した正確な実施形態に制限されず、添付の特許請求の範囲の記載によって本発明が画定されることが理解されなければならない。

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 0 5 7 】

【図 1】相対的なアクセプタドーピング準位を概略的に示す図である。

【図 2】本発明の実施形態によるトンネル接合を使用する半導体レーザの概略図である。

【図 3】電氣的にわずかに逆方向にバイアスされている図 2 のトンネル接合を示すバンド図である。

10

【図 4】本発明の他の実施形態による低い接触抵抗を使用する半導体素子の概略図である。

【図 5】図 4 の半導体素子の p 型接点及び p 型材料層のエネルギーバンド図である。

【図 6】図 2 のトンネル接合を介する電圧降下を低下させる本発明の代替的な実施形態を示すエネルギーバンド図である。

【図 7】本発明の代替的な実施形態によるトンネル接合を使用する半導体レーザの概略図である。

【図 8】図 7 のトンネル接合を介する電圧降下を示すエネルギーバンド図である。

【図 9】半導体素子の作動電圧を低下させるトンネル接合構造を製造するための、本発明の実施形態による方法を図解する図である。

20

【図 10】半導体素子の作動電圧を低下させる低い接触抵抗を形成するための、本発明の実施形態による方法を図解する図である。

【図 11】半導体素子の作動電圧を低下させるための、本発明の実施形態による代替的な方法を図解する図である。

【図 12】半導体素子の作動電圧を低下させるための、本発明の実施形態による代替的な方法を図解する図である。

## 【符号の説明】

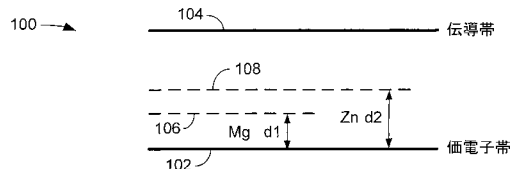
## 【 0 0 5 8 】

1 0 2	価電子帯
1 0 4	伝導帯
1 0 6	マグネシウムのアクセプタレベル
2 0 0	半導体素子
2 0 1	サファイア基板
2 0 2	緩衝層
2 0 4	n 型層
2 0 6	p 型層
2 0 8	窒化ガリウム層
2 1 0	活性領域
2 1 2	p 型トンネル接合層
2 1 4	n 型トンネル接合層
2 2 0	トンネル接合
2 2 4	n 型接点層
2 2 6	n 型接点
2 2 8	p 型接点

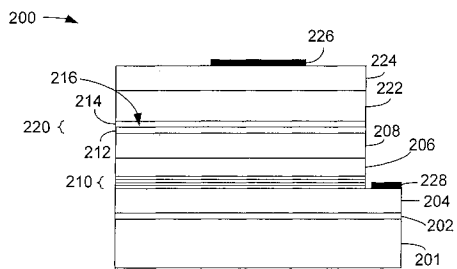
30

40

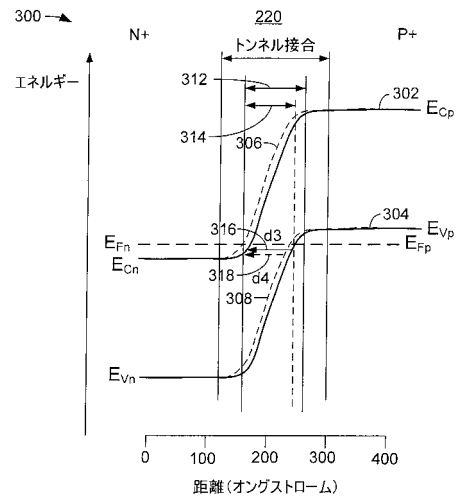
【図 1】



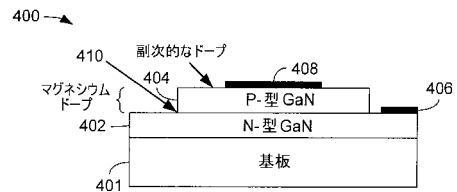
【図 2】



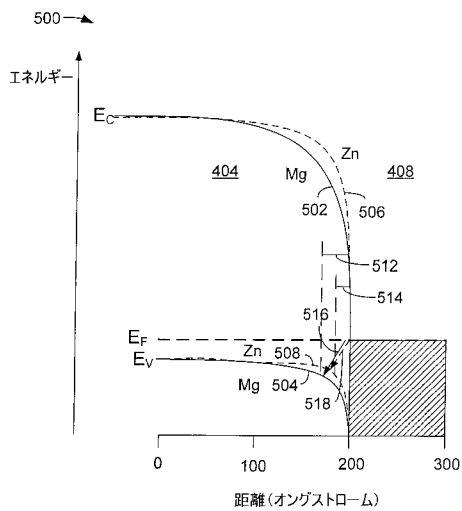
【図 3】



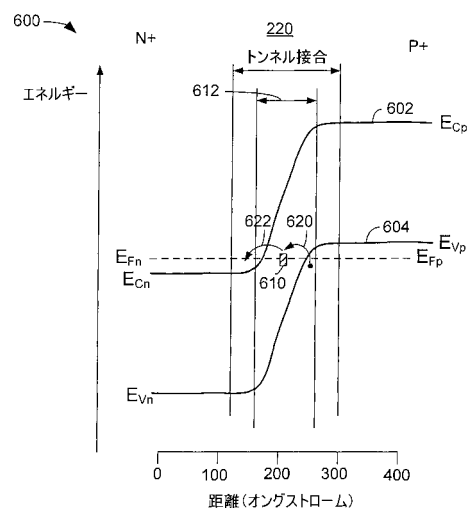
【図 4】



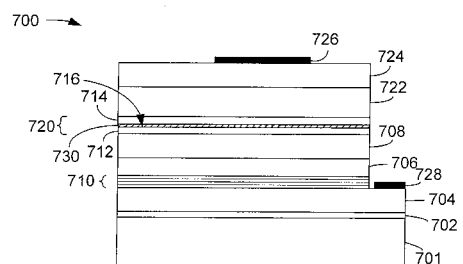
【図 5】



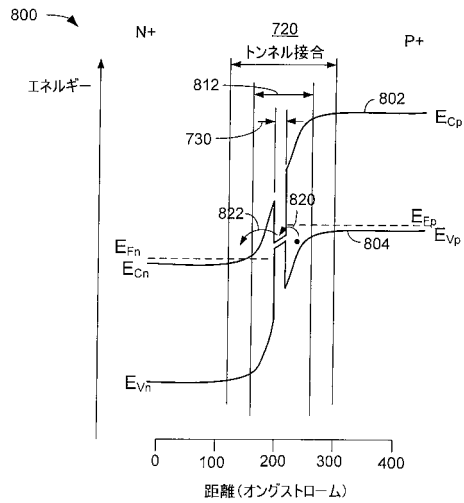
【図 6】



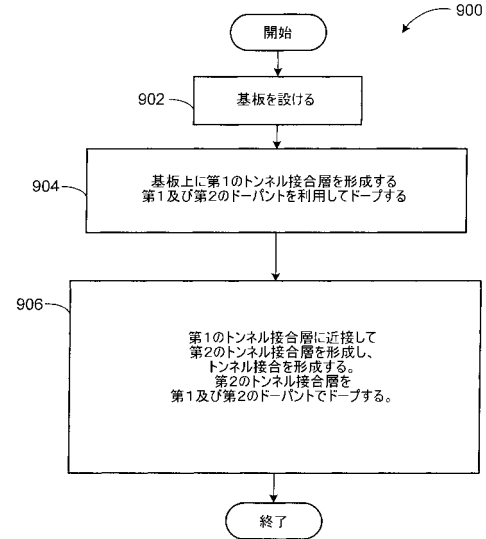
【図 7】



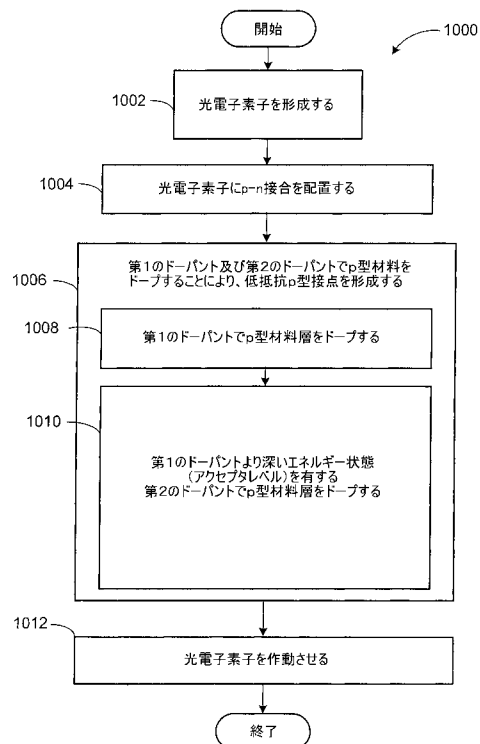
【図 8】



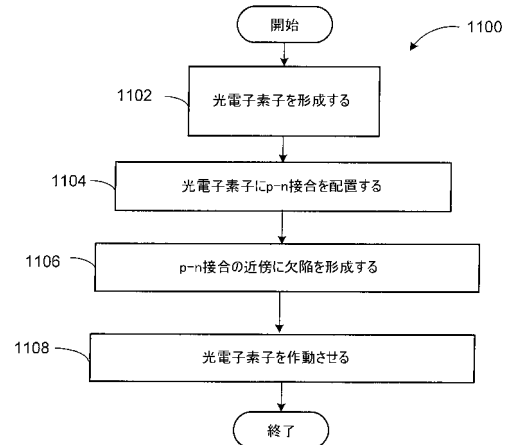
【図 9】



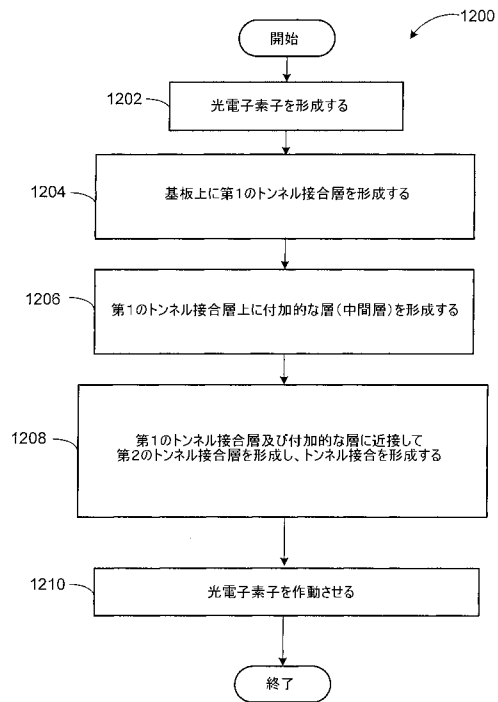
【図 10】



【図 11】



【図 12】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 バージニア・エム・ロビンズ  
アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 5 0 1 8 , フェルトン , イースト・ザヤンテ・ロード・ 1 3 2  
0 3
- (72)発明者 スティーブン・ディー・レスター  
アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 4 3 0 6 , パロアルト , マタデロ・アベニュー・ 8 2 9
- (72)発明者 ジェフェリー・エヌ・ミラー  
アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 4 0 2 2 , ロスアルトスヒルズ , スネル・レーン・ 2 6 6 9 9
- (72)発明者 デイビッド・ボアー  
アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 5 0 1 4 , クパティーノ , ベル・アイル・コート・ 1 1 0 9 2

審査官 日夏 貴史

- (56)参考文献 特開 2 0 0 5 - 2 6 8 7 3 9 ( J P , A )  
特開平 0 8 - 0 6 4 8 6 9 ( J P , A )  
国際公開第 2 0 0 5 / 0 0 4 2 4 4 ( W O , A 1 )

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

H 0 1 L	3 3 / 0 0	-	3 3 / 6 4
H 0 1 S	5 / 0 0	-	5 / 5 0