

(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2010-80741

(P2010-80741A)

(43) 公開日 平成22年4月8日(2010.4.8)

(51) Int.Cl.
H01L 33/32 (2010.01)F I
H01L 33/00テーマコード (参考)
5 F04 I

審査請求 有 請求項の数 6 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2008-248530 (P2008-248530)
(22) 出願日 平成20年9月26日 (2008.9.26)(71) 出願人 000005049
シャープ株式会社
大阪府大阪市阿倍野区長池町2番2号
(74) 代理人 100064746
弁理士 深見 久郎
(74) 代理人 100085132
弁理士 森田 俊雄
(74) 代理人 100083703
弁理士 仲村 義平
(74) 代理人 100096781
弁理士 堀井 豊
(74) 代理人 100098316
弁理士 野田 久登
(74) 代理人 100109162
弁理士 酒井 将行

最終頁に続く

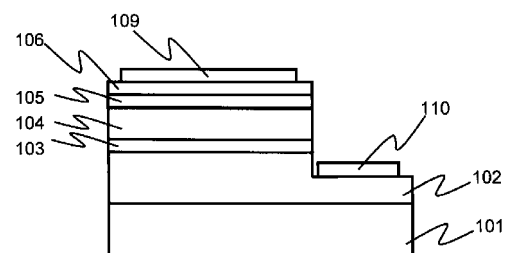
(54) 【発明の名称】 半導体発光素子

(57) 【要約】

【課題】表面プラズモンを確実に利用して改善された発光効率を有する半導体発光素子を提供する。

【解決手段】半導体発光素子では、基板上においてn型半導体を含む第1下部層、p型半導体を含む第2下部層、活性層、およびn型半導体を含む上部層がこの順に積層されており、基板または第1下部層に接して第1のn型用電極が設けられており、上部層上に接して第2のn型用電極が設けられており、上部層は40nm以下の厚さを有し、上部層に接する第2のn型用電極の界面は、活性層から生じた光によって表面プラズモンが励起され得る金属を含むことを特徴としている。

【選択図】図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板上において n 型半導体を含む第 1 下部層、p 型半導体を含む第 2 下部層、活性層、および n 型半導体を含む上部層がこの順に積層されており、
前記基板または前記第 1 下部層に接して第 1 の n 型用電極が設けられており、
前記上部層上に接して第 2 の n 型用電極が設けられており、
前記上部層は 40 nm 以下の厚さを有し、
前記上部層に接する前記第 2 の n 型用電極の界面は、前記活性層から生じた光によって表面プラズモンが励起され得る金属を含むことを特徴とする半導体発光素子。

10

【請求項 2】

前記活性層から生じた光によって表面プラズモンが励起され得る金属は、Ag、Au、および Al のいずれかを主成分として含むことを特徴とする請求項 1 に記載の半導体発光素子。

【請求項 3】

前記第 1 の n 型用電極はアノード電極であり、前記第 2 の n 型用電極はカソード電極であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の半導体発光素子。

【請求項 4】

前記半導体発光素子は窒化物半導体発光素子であることを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれかに記載の半導体発光素子。

20

【請求項 5】

前記第 1 下部層と前記第 2 下部層との間に中間層をさらに含み、この中間層は前記第 1 下部層および前記第 2 下部層との格子定数差に起因する引っ張り歪を含むことを特徴とする請求項 4 に記載の半導体発光素子。

【請求項 6】

前記基板は n 型導電性基板であって、前記第 1 の n 型用電極は前記 n 型導電性基板に接して設けられていることを特徴とする請求項 1 から 5 のいずれかに記載の半導体発光素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

30

本発明は半導体発光素子に関し、とくに表面プラズモンを利用して半導体発光素子の発光効率を向上させる技術に関する。

【背景技術】

【0002】

近年では、半導体発光素子において、表面プラズモンを利用することによって発光効率を向上させる試みがなされている。

【0003】

図 5 の模式的な断面図は、特許文献 1 の特開 2005 - 108982 号公報に開示された表面プラズモンを利用する窒化物半導体発光ダイオード素子を示している。この窒化物半導体発光ダイオード素子においては、基板 501 上に、n 型 GaN 層 502 (層厚: 約 5 μm)、n 型 AlGaIn クラッド層 503 (層厚: 約 0.15 μm)、交互に積層された複数の GaN 層と InGaIn 層を含む多重量子井戸活性層 504、アンドープ GaN 保護層 505 (層厚: 約 10 nm)、p 型 AlGaIn クラッド層 506 (層厚: 約 0.15 μm)、および p 型 GaN コンタクト層 507 (層厚: 約 0.3 μm) がこの順に形成されている。

40

【0004】

p 型 GaN コンタクト層 507 上には、Pd 第一電極層 508 (層厚: 約 1 nm)、Ag 第二電極層 509 (層厚: 約 2 nm)、および Au 保護層 510 (層厚: 約 1 nm) を含む 3 層構造を有する複数のアイランド状の p 型用電極が形成されている。これらのアイランド状の p 型用電極は 2 次的に周期配列されており、具体的には最密六方 2 次元格子

50

点に配置されている。そして、各 p 型用電極は、円形の平面形状を有している。他方、基板 5 0 1 の下面には、n 型用電極 5 1 1 が形成されている。

【 0 0 0 5 】

A g の表面プラズモン振動数は光波長の 4 3 0 n m 帯付近に対応しており、それよりやや長波長の青色領域の光によって表面プラズモンが励起され得る。特許文献 1 は、窒化物半導体発光ダイオード素子の発光層から放射される青色領域の光に対して、電極を所要の周期で配置とすることによって、A g 層界面における表面プラズモンと光波とを結合可能にして発光効率増強効果を得ることを試みている。

【 0 0 0 6 】

ここで、p 型用電極に含まれる P d 第一電極層 5 0 8 は、A g 層 5 0 9 が p 型窒化物半導体に対してオーミック接触を得ることができないので設けられている。すなわち、P d 第一電極層 5 0 8 は、p 型用電極のコンタクトを改善するための層であり、A g 層 5 0 9 の界面における表面プラズモンの励起を阻害しないように極めて薄く形成されている。

10

【 0 0 0 7 】

また、非特許文献 1 の Applied Physics Letters, Vol. 87, 071102 (2005) には、窒化物半導体発光ダイオード素子において、A g - 半導体界面を活性層の近接場内に配置することによって、表面プラズモンと光の結合を有効に行なわせる技術が開示されている。すなわち、この技術は、活性層と A g 層との間の半導体層の厚さを極めて薄い 1 0 n m にすることによって効果を生じさせる。そして、非特許文献 1 では、光ポンピングによる活性層からの発光において、自然放出速度の向上が実際に観測されたことが報告されている。

20

【特許文献 1】特開 2 0 0 5 - 1 0 8 9 8 2 号公報

【非特許文献 1】K. Okamoto et al., "Surface plasmon enhanced spontaneous emission rate of InGaN/GaN quantum wells probed by time-resolved photoluminescence spectroscopy", Applied Physics Letters, Vol. 87, 071102 (2005).

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 8 】

特許文献 1 に開示された発光ダイオード素子においては、未だ有効な表面プラズモンによる発光効率増強効果が現実には得られていない。なぜならば、A g 層 5 0 9 の界面における表面プラズモンと光との結合を十分に行なわせることが現実的には難しいからである。より具体的には、p 型 G a N コンタクト層 5 0 7 に対するオーミック接触を得るために、A g 層 5 0 9 下に P d 金属層 5 0 8 を介挿せざるを得ない。この P d 層 5 0 8 が活性層 5 0 4 からの光を吸収し、それによって A g 層 5 0 9 の界面における表面プラズモン励起が減少させられるのである（図 5 参照）。

30

【 0 0 0 9 】

他方、非特許文献 1 では A g 層を活性層の近接場内に配置するために活性層上の半導体層の厚さを 1 0 n m 程度以下にすることを要するが、この場合には電流注入による活性層の発光自体が困難である。その理由として、非特許文献 1 では、p 型半導体層と A g 層とが直に接しており、特許文献 1 で指摘されているオーミック接触が得られない問題の解決がなされていない。また、窒化物半導体中の p 型不純物のドーピングにおいては、十分に高いキャリア濃度を得ることがそもそも困難である。そして、厚さ 1 0 n m 程度までの極めて薄い窒化物半導体層に高い p 型キャリア濃度のドーピングを行なうことが困難であるので、その p 型層自身のごく薄いこととあいまって、発光のためのホールを活性層に十分供給できない。このように、A g 層を活性層の近接場内に配置する技術において、良好に電流注入し得るデバイス構造は未だ実現されていない。

40

【 0 0 1 0 】

上述のような先行技術の状況に鑑み、本発明の目的は、表面プラズモンを確実に利用して改善された発光効率を有する半導体発光素子を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 1 】

50

本発明による半導体発光素子では、基板上においてn型半導体を含む第1下部層、p型半導体を含む第2下部層、活性層、およびn型半導体を含む上部層がこの順に積層されており、基板または第1下部層に接して第1のn型用電極が設けられており、上部層上に接して第2のn型用電極が設けられており、上部層は40nm以下の厚さを有し、上部層に接する第2のn型用電極の界面は、活性層から生じた光によって表面プラズモンが励起され得る金属を含むことを特徴としている。

【0012】

なお、活性層から生じた光によって表面プラズモンが励起され得る金属は、Ag、Au、およびAlのいずれかを主成分として含むことが好ましい。第1のn型用電極はアノード電極であり、第2のn型用電極はカソード電極であり得る。

10

【0013】

また、半導体発光素子は、窒化物半導体発光素子であり得る。第1下部層と第2下部層との間に中間層をさらに含み、この中間層は第1下部層および第2下部層との格子定数差に起因する引っ張り歪を含むことが好ましい。さらに、基板はn型導電性基板であり得て、第1のn型用電極はそのn型導電性基板に接して設けられていることが好ましい。

【発明の効果】

【0014】

本発明による半導体発光素子においては、活性層に良好にキャリアを注入でき、かつ表面プラズモンを利用した発光増強効果を得ることができ、それによって高い発光効率を実現することができる。

20

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

図1は、本発明の一実施形態による窒化物半導体発光素子を模式的な断面図で示している。この発光素子は、基板101上に順次積層された窒化物半導体の第1下部層102、窒化物半導体の中間層103、窒化物半導体の第2下部層104、窒化物半導体の活性層105、および窒化物半導体の上部層106を含んでいる。

【0016】

第1下部層102の部分的に露出された表面上には第1のn型用電極110が形成されている。また、上部層106上には第2のn型用電極109が形成されている。

【0017】

第1下部層102は、単数または複数の窒化物半導体層を含み、全体としてn型導電性を有している。ここで、全体としてn型導電性を有しているとは、n型導電性の層を主として含み、中間や端に薄いアンドープ層などが配置されていても、全体として主に電子が伝導する性質を有することを表している。第2下部層104は、単数または複数の窒化物半導体層を含み、全体としてp型導電性を有している。ここで、全体としてp型導電性を有しているとは、p型導電性の層を主として含み、中間や端に薄いアンドープ層などが配置されていても、全体として主にホールが伝導する性質を有することを表している。上部層106は、単数または複数の窒化物半導体層を含み、全体としてn型導電性を有している。

30

【0018】

第1のn型用電極110はアノードとして用いられ、第2のn型用電極109はカソードとして用いられる。すなわち、発光素子の動作時において、第1のn型用電極110に外部から正電圧が印加され、第2のn型用電極109には負電圧が印加される。したがって、正電圧から負電圧への電流経路は、第1のn型用電極110から、全体としてn型導電性を有する第1下部層102、中間層103、全体としてp型導電性を有する第2下部層104、活性層105、および上部層106を経て、第2のn型用電極109までの順路で構成されている。

40

【0019】

このように発光素子にバイアスをかけることにより、活性層105を挟む全体としてp型導電性の第2下部層104と全体としてn型導電性の上部層106とによるpn接合に

50

は順バイアスが印加され、通常の発光ダイオードの動作によって発光する。全体として p 型導電性の第 2 下部層 104 に関しては、表面プラズモンと光の結合のために厚やドーピング量が制限されることがない。したがって、第 2 下部層 104 には十分に高濃度のドーピングを行なうことができ、発光素子の動作時において活性層に十分なホールを供給することが可能である。

【0020】

全体として n 型導電性の上部層 106 は、発光層からの光と第 2 の n 型用電極 109 の表面プラズモンとの結合のために、少なくとも 40 nm 以下の厚さに制限される必要がある。しかしながら、窒化物半導体中の n 型不純物のドーピングは、p 型の場合に比較して容易である。

10

【0021】

より具体的には、窒化物半導体中において、p 型不純物（通常 Mg）は所望のキャリア（ホール）濃度を得るために過剰量の不純物をドーピングする必要がある、また Mg は拡散しやすいので厚さ 40 nm 以下のごく薄い層のみに十分な p 型キャリアを発生させることが困難である。窒化物半導体発光素子においては、活性層に Mg が拡散（あるいは添加）すれば、活性層の品質が低下するという問題もある。しかしながら、厚さ 40 nm 以下のごく薄い上部層 106 で生じさせるキャリアは電子であり、ホールの場合のような問題が遥かに生じにくい。

【0022】

すなわち、窒化物半導体中において、n 型の不純物（通常 Si）はドーピング量とほぼ同等のキャリア（電子）を発生させ得るし、Si が活性層に拡散したとしても活性層の品質が低下するという問題を生じにくい。逆に、活性層に Si を添加することで、発光効率が向上するとの報告も存在する（Jpn. J. Appl. Phys., Vol.37 (1998) pp.L362-L364）。活性層自体に n 型不純物をドーピングしても不都合はないし、その場合には複数層の結晶成長時にすばやくドーピングを切り替えるという必要もなくなって発光素子の製造が容易になる。なお、本明細書において、活性層とは、それが多重量子井戸である場合は最下井戸層から最上井戸層までを意味することとし、それが単一量子井戸である場合には井戸層のみを意味することとする。

20

【0023】

他方、図 1 の発光素子においては、中間層 103 を挟む全体として p 型導電性の第 2 下部層 104 と全体として n 型導電性の第 1 下部層 102 とによる付加的 pn 接合には逆バイアスが印加される。ここで、通常の pn 接合であれば逆バイアス方向に電流が流れにくい、トンネル電流を有効に流せる構成（トンネル接合）などを利用することによって、付加的 pn 接合を通して効率よく電流を流すことができる。そのためには、中間層を挟む付加的 pn 接合は、後に例示するような特別の構成にされることが好ましい。

30

【0024】

第 2 の n 型用電極 109 においては、それが半導体層に接触する界面が Ag で構成される。また、上部層 106 は、40 nm 以下の厚さに設定される。こうして活性層 105 の近接場内に半導体 - Ag 界面を配置し、活性層 105 からの光が Ag 界面の表面プラズモンと容易に結合できるようにする。上部層 106 の厚さは、好ましくは 20 nm 以下とし、10 nm が典型的な値とされ得る。

40

【0025】

上述のような図 1 の発光素子の構成によって、電流注入動作時に活性層 105 にホールと電子が効率よく注入できるようになり、活性層からの光が表面プラズモンと結合した表面プラズモンポラリトン（SPP）が Ag 界面に形成され得る。すなわち、図 1 の発光素子では、電流注入によって SPP を有効に発生させることができ、非特許文献 1 におけるような自然放出レートの増大を実現できて、改善された発光効率を得ることができる。

【0026】

なお、窒化物半導体層上に形成された Ag 層は、通常均質でなくて微視的には粒界を含んだり、界面に微小な凹凸を有している。したがって、発生した SPP は、界面に沿って

50

伝播するうちに変調されて再度光に変換され、その光が外部に取り出される。この事象を考慮すれば、人為的に A g 層に凹凸やパターンを設けていてもよい。また、A g 層は n 型窒化物半導体の上部層 1 0 6 と良好なオーミック接触を形成し得るので、これによって活性層へキャリアを良好に注入し得ることも従来技術に対する改善点になる。

【 0 0 2 7 】

活性層 1 0 5 の発光波長と第 2 の n 型用電極 1 0 9 との組み合わせに関して、次のことが考慮され得る。活性層 1 0 5 からの光によって第 2 の n 型用電極 1 0 9 中に生起する表面プラリトンは金属の表面プラズモン振動数と関係するから、A g 層（表面プラズモン周波数の対応波長約 4 4 0 n m）を用いる場合は、青色領域（波長 4 4 0 ~ 5 0 0 n m）の光を発する活性層に対して特に効果的であり、それよりやや長波長側（波長 5 0 0 ~ 6 0 0 n m）の光までに関しては効果を期待し得る。

10

【 0 0 2 8 】

また、A l 層（表面プラズモン周波数の対応波長約 2 3 0 n m）を用いる場合は、深紫外領域（波長 2 3 0 n m ~ 3 0 0 n m）光を発する活性層に対して特に効果的であり、それよりやや長波長側（波長 3 0 0 ~ 4 0 0 n m）の光までに関しては効果を期待し得る。

【 0 0 2 9 】

さらに、A u 膜（表面プラズモン周波数の対応波長約 5 4 0 n m）を用いる場合には、緑色 ~ 赤色領域（波長 5 4 0 ~ 6 0 0 n m）の光を発する活性層に対して特に効果的であり、それよりやや長波長側（波長 6 0 0 ~ 7 0 0 n m）の光までに関しては効果を期待し得る。

20

【 0 0 3 0 】

A l と A u に関しては、それらのいずれもが n 型の窒化物半導体に対して良好なオーミック接触を形成し得るので、上述の A g の場合と同様に良好な電流注入効果を得ることができる。なお、A g、A l、および A u は、窒化物半導体に限らず一般的に化合物半導体の n 型層に対して良好なオーミック接触を形成し得るので、窒化物半導体以外の他の化合物半導体に対しても有用である。

【 0 0 3 1 】

また、A g を主成分として他の成分を混合した合金の場合、表面プラズモン振動数がどのように変化するかは不明な点が多くて予測し難いが、最も多い成分として A g を含む第 2 の n 型用電極 1 0 9 であれば、本発明の効果が期待できるであろう。したがって、本発明においては、第 2 の n 型用電極 1 0 9 に A g 合金層（A g 原子濃度 5 0 % 以上）を用いることができる。このことは、第 2 の n 型用電極 1 0 9 に A l 合金層または A u 合金層を用いる場合についても同様である。また、表面プラズモンを励起させる金属としては、これ以外にも、発光波長に対応して適宜に選択することができる。

30

【 0 0 3 2 】

次に、付加的 p n 接合について検討する。まず、基板 1 0 1 としてサファイア基板、窒化物半導体基板、または炭化ケイ素基板などの六方晶の結晶基板を用いて、その C 面（{ 0 0 0 1 } 面）上に第 1 下部層 1 0 2、中間層 1 0 3、および第 2 下部層 1 0 4 を M O C V D（Metal Organic Chemical Vapor Deposition）法などにより順次エピタキシャル成長させた場合には、それらのエピタキシャル層の表面も C 面になる。このような C 面方位は、窒化物半導体発光素子において最も一般的である。

40

【 0 0 3 3 】

ここで、窒化物半導体の C 面に平行な中間層 1 0 3 において、その上下の層に対する格子不整合に起因して格子歪が生じる場合には、圧電分極によるピエゾ電界が発生し、その分極方向は C 軸方向（< 0 0 0 1 > 方向）に沿っている。その結果、中間層 1 0 3 の C 面が + C 軸側と - C 軸側とで異なる電気的性質を示し、中間層 1 0 3 は互いに極性の異なる下側界面と上側界面を持つことになる。この下側界面は n 型導電性の第 1 下部層 1 0 2 と中間層 1 0 3 との界面であり、上側界面は中間層 1 0 3 と p 型導電性の第 2 下部層 1 0 4 との界面である。

50

【0034】

このように中間層103が極性面を持つ場合、中間層103が引張り応力を受ける積層構造にすれば、中間層103のエネルギーバンドが曲がり、第1下部層102と第2下部層104との間の空乏層の幅を狭くすることができる。その結果、第1下部層102と第2下部層104との間で逆バイアスが印加される付加的pn接合においてトンネル電流が流れやすくなり、中間層103を含まない場合に比べて、発光素子の駆動電圧を低減させることができる。このような積層構造として、たとえば第1下部層102および第2下部層104をGa_{0.9}N_{0.1}または低Al濃度のAl_{0.05}Ga_{0.95}Nで形成し、中間層103をAl_{0.3}Nまたは高Al濃度のAl_{0.5}Ga_{0.5}Nで形成とすることが可能である。なぜならば、Al_{0.5}Ga_{0.5}Nにおいては、Al濃度が増大するにしたがって格子定数が小さくなるからである。

10

【0035】

また、基板101として六方晶の結晶基板を用い、その基板101のR面（{1-102}面）または{11-22}面などの半極性面上に第1下部層102、中間層103、および第2下部層104をMOCVD法などによって順次エピタキシャル成長させてもよい。この場合には、中間層103の表面も、R面（{1-102}面）または{11-22}面などの半極性面になる。このようにR面（{1-102}面）または{11-22}面などの半極性面を表面に有する中間層103においても、格子不整合などに起因して格子歪が生じた場合、圧電分極によるピエゾ電界が発生し、中間層103の両側表面の半極性面がそれぞれ異なる電気的性質を示すことになる。

20

【0036】

さらに、窒化物半導体基板の主面は、C面またはR面に対してオフ角を有する面であってもよい。この場合のオフ角度は、0度<オフ角度<45度の範囲内であればよい。また、窒化物半導体基板の主面は、M面（{10-10}面）またはA面（{11-20}面）の無極性面に対してオフ角を有する面であってもよい。この場合のオフ角度は、0度<オフ角度<45度の範囲内であればよい。これらの場合においても、基板の主面がC面の場合と同様に、窒化物半導体発光素子の駆動電圧を低減させることができる。

【0037】

他方、付加的pn接合に逆バイアスの電流を流しやすくする構成としては、その接合部分に高濃度ドーピングを行なうことも有効である。たとえば、少なくとも接合近傍において、第1下部層102のn型不純物濃度を $1 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ の範囲内で好ましくは $1 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 程度にし、第2下部層104のp型不純物濃度を $10^{19} \sim 10^{21} / \text{cm}^3$ の範囲内で好ましくは $3 \times 10^{19} \sim 3 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 程度にすればよい。この場合、上述のような組成の中間層103を設けて相加的な効果を得てもよいし、それとは異なる組成の中間層を設けまたは設けずに、高濃度ドーピングの効果のみを利用してよい。ここで、接合近傍とは、ドーピングによってトンネル電流を促進し得る接合界面から50nm程度までの範囲を言う。

30

【0038】

図2は、本発明の他の実施形態による窒化物半導体発光素子を模式的な断面図で示している。図1の発光素子に比べて、図2の発光素子においては、n型導電性の六方晶の窒化物半導体基板201を用い、その基板の下面に第1のn型用電極210を形成していることのみにおいて異なっている。

40

【0039】

すなわち、図2の窒化物半導体発光素子は、n型基板201上に順次積層された第1下部層202、中間層203、第2下部層204、活性層205、および上部層206を含んでいる。そして、n型基板201の下面には第1のn型用電極210が形成され、上部層206上には第2のn型用電極209が形成されている。この図2の発光素子において、正電圧から負電圧への電流経路は、第1のn型用電極210から、n型基板201、全体としてn型導電性を有する第1下部層202、中間層203、全体としてp型導電性を有する第2下部層204、活性層205、および上部層206を経て、第2のn型用電極209までの順に構成されているが、動作の原理は図1の発光素子と同様である。

50

【0040】

なお、本発明の半導体発光素子において特に窒化物半導体層を積層する場合には、基板としては上述のようにサファイア基板、窒化物半導体基板、炭化ケイ素基板などの六方晶の半導体結晶基板を用いることができる。なかでも、窒化物半導体基板を用いる場合には、基板とその上に形成される窒化物半導体層との格子定数差が小さくなり、基板と成長層との性質も同様になるので、成長層において良好な結晶性が得られる。

【0041】

窒化物半導体基板としては、 $Al_{x0}Ga_{y0}In_{z0}N$ ($0 \leq x0 \leq 1$ 、 $0 \leq y0 \leq 1$ 、 $0 \leq z0 \leq 1$ 、 $x0 + y0 + z0 = 1$) で表わされる窒化物半導体結晶の基板を用いることができる。また、その基板上に形成される層としては、 $Al_{x1}In_{y1}Ga_{z1}N$ ($0 \leq x1 \leq 1$ 、 $0 \leq y1 \leq 1$ 、 $0 \leq z1 \leq 1$ 、 $x1 + y1 + z1 = 1$) で表わされる窒化物半導体結晶層を成長させることができる。n型不純物としては、シリコンおよび/またはゲルマニウムなどを用いることができ、O、SeなどのVI族元素を用いることも可能である。p型不純物としては、マグネシウムおよび/または亜鉛などを用いることができる。また、活性層105、205は、従来から公知の単一量子井戸(SQW)構造または多重量子井戸(MQW)構造を有していてもよい。

【0042】

本発明の半導体発光素子における第1のn型用電極110、210としては、n型の第1下部層102またはn型基板202とオーミック接触を形成することが可能な公知の金属などを用いることができる。図1および図2に示す窒化物半導体発光素子においては、活性層105、205を形成した後に上部層106、206を形成するが、その上部層を低温で形成した場合でも、上部層106、206がn型窒化物半導体層であるので、その高抵抗化および著しい結晶性の悪化を抑制することができる。すなわち、低温で上部層106、206を形成することが可能であるので、活性層105、205が受ける熱ダメージも低減させることができる。

【0043】

特に、Inを含む窒化物半導体結晶は、Inを含まない窒化物半導体結晶に比べて分解温度がかなり低いことが知られている。たとえば、GaN、AlN、およびそれらの混晶のようにInを含まない窒化物半導体結晶は1000程度の高温においても比較的安定であるが、InNは600~700程度の低温でも分解する。したがって、たとえば $In_yGa_{1-y}N$ で表わされる窒化物半導体結晶は、In組成比yにもよるが、一般的に1000を超える温度では結晶性が悪化してしまう。また、緑色光や赤色光のような長波長の光を活性層105、205に生じさせる場合には、 $In_yGa_{1-y}N$ で表わされる窒化物半導体結晶のIn組成比yを0.15~0.4程度の高い値にする必要がある。この場合、窒化物半導体結晶に含まれるIn濃度の増大に伴って、温度による結晶性の悪化の傾向がさらに顕著になる。しかし、本発明の窒化物半導体発光素子においては、n型の上部層106、206を比較的低温で成長させることができるので、Inを含む活性層105、205の劣化を抑制することが可能である。

【実施例】

【0044】

<実施例1>

図3は、本発明の実施例1による窒化物半導体発光ダイオード素子を模式的な断面図で示している。この窒化物半導体発光ダイオード素子は、厚さ150μmのサファイア基板301上に順次積層された厚さ5μmでn型GaNの第1下部層302、厚さ2.5nmのAlN中間層303、第2下部層304、多重量子井戸活性層305および厚さ10nmでn型GaNの上部層306を含んでいる。

【0045】

ここで、第2下部層304は、順次積層された厚さ0.3μmのp型GaN層304a、厚さ10nmのp型 $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ キャリアブロック層304b、厚さ60nmのノンドープGaN層304c、および厚さ8nmのノンドープ $In_{0.02}Ga_{0.98}N$ 層304

10

20

30

40

50

dを含んでいる。なお、p型キャリアブロック層304b上のノンドープGaN層304cとノンドープ $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 層304dは、相対的に小さな格子定数のAl含有キャリアブロック層304b上に良好な活性層305を形成するためのバッファ層的な役割を果たすとともに、活性層305にMgが拡散すれば発光効率が低下する恐れがあるので、p型キャリアブロック層304bから活性層305へのMgの拡散を防止する役割をも果たしている。

【0046】

多重量子井戸活性層305は、厚さ4nmのSiドープInGaN井戸層、厚さ8nmのSiドープ $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ バリア層、および厚さ4nmのSiドープInGaN井戸層が順次堆積された積層構造を有している。

10

【0047】

n型GaNの第1下部層302の部分的に露出された表面上には第1のn型用電極310が形成され、n型GaNの上部層306上には第2のn型用電極309が形成されている。第1のn型用電極310はn型GaNの第1下部層302へ直に接して形成されており、そのn型GaN層側から順に積層されたHf層(厚さ30nm)、Al層(厚さ200nm)、Mo層(厚さ30nm)、Pt層(厚さ50nm)、およびAu層(厚さ200nm)を含んでいる。

【0048】

他方、第2のn型用電極309は、n型GaNの上部層306へ直に接して形成されており、そのn型GaN層側から順に積層されたAg層(厚さ30nm)、Pt層(厚さ50nm)、およびAu層を含んでいる。こうして、このAg層とn型GaNの上部層306との界面に表面プラズモンポラリトンが発生させる構成にしている。

20

【0049】

図3の窒化物半導体発光ダイオード素子は以下のようにして製造され得る。まず、直径2インチで厚さ400 μm のサファイア基板301の主面であるC面上に、第1下部層302から上部層306までが、MOCVD成膜装置を用いて順次にエピタキシャル成長せられる。ここで、窒素源としてはアンモニアを用い、ガリウム源としてはTMG(トリメチルガリウム)を用い、インジウム源としてはTMI(トリメチルインジウム)を用い、アルミニウム源としてはTMA(トリメチルアルミニウム)を用い、p型不純物のマグネシウム源としては Cp_2Mg (ビスシクロペンタジエニルマグネシウム)を用い、そしてn型不純物のシリコン源としてシランを用いる。

30

【0050】

なお、n型GaNの第1下部層302とn型GaNの上部層306におけるキャリア密度は、いずれにおいても $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 程度である。AlN中間層303においては、p型不純物とn型不純物のいずれもが意図的にドーピングされていない。そして、第2下部層に含まれるp型GaN層304aのキャリア密度は、 $4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 程度である。

【0051】

n型GaNの第1下部層302はサファイア基板301の温度を1125℃にして堆積され、AlN中間層303、p型GaN層304a、およびp型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ キャリアブロック層304bも引き続いて1125℃の基板温度で堆積される。

40

【0052】

その後、ノンドープGaN層304c、ノンドープ $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 層304d、および多重量子井戸活性層305までは、基板温度を750℃まで低下させて堆積される。そして、n型GaNの上部層306は、850℃の基板温度で堆積される。このように、多重量子井戸活性層305を形成した後に、基板温度を850℃程度の比較的低温で上部層306を形成した場合でも、上部層306はn型のGaN層であるので、その高抵抗および結晶性の著しい悪化を抑制することができる。そして、n型GaNの上部層が10nm程度の薄さであっても、良好なn型不純物のドーピングが可能である。

【0053】

仮に活性層上に設ける上部層をp型層で形成としようとするれば、p型導電性を持たせる

50

ような結晶成長が850 程度の低温では困難であり、逆にp型導電性を持たせるために成長温度を上昇させれば井戸層がその温度上昇によって劣化してしまう。この場合に、上部層の厚みに制限がなければ、蒸発を防止する層を井戸層上に設けることが可能であるが、高々40nm程度の厚みしか許容されないような条件下にあっては、蒸発防止層を設けることは困難である。

【0054】

他方、Mgがドーブされた窒化物半導体層は1000 以上の高温で堆積しなければp型の導電性を示さないが、Siがドーブされた窒化物半導体層は1000 未満の低温で堆積されてもn型の導電性を示す。したがって、基板温度が800 程度の低温であっても、堆積条件を最適化することによって、n型GaNの上部層306を形成することができる。

10

【0055】

n型GaNの上部層306上には、第2のn型用電極309がEB (Electron Beam) 蒸着法によって形成される。続いて、上部層306および第2のn型用電極309上に気相エッチング用のマスクを形成し、ICP (Inductively Coupled Plasma) エッチング法を用いて、第1下部層302の厚さの途中までエッチングを行なう。そして、第1下部層302の部分的に露出した表面上に、EB蒸着法およびスパッタ法を用いて、第1のn型用電極310を形成する。

【0056】

その後、サファイア基板301の厚さを一般的な研削および研磨によって150 μm 程度に薄くした後に、スクライブによって一辺が350 μm の正方形平面を有するチップに分割して実施例1の窒化物半導体発光ダイオード素子を得る。

20

【0057】

この実施例1の窒化物半導体発光ダイオード素子においては、第1のn型用電極310をアノードとし、第2のn型用電極309をカソードとして電圧を印加することにより、多重量子井戸活性層305から青色 (ピーク波長約460nm) の光が発せられる。この発光素子において、20mAの電流を注入して発光させるときの駆動電圧は4Vであり、その発光は素子の基板および側面を通して外部に取り出される。この場合の発光の内部量子効率を見積もったところ、20mA動作時において90%以上となり、きわめて高い値が得られた。このことは、表面プラズモン結合による発光増強効果 (自然放出レートの増大) に基づいており、非輻射再結合が室温において問題にならない程に自然放出レートが増大していることを表している。

30

【0058】

< 実施例2 >

本発明の実施例2による窒化物半導体発光ダイオード素子は、活性層305のピーク発光波長を550nmにし、それに伴って第2のn型用電極309における半導体界面側の金属層をAgからAuに変更したこと以外は実施例1の場合と同様である。

【0059】

この実施例2の発光素子において発光の内部量子効率を見積もったところ、20mA動作時において50%以上となり、高い値が得られた。

40

【0060】

窒化物半導体活性層を用いる場合、400nm程度の波長において最も効率のよい発光が得られやすく、波長550nm程度の緑色領域の発光に関する従来の内部量子効率が1/4程度に低下することが知られていることからすれば、50%は非常に良好な値である。すなわち、本実施例2においても、表面プラズモン結合による発光増強効果によって、発光効率の向上したことが確認できた。

【0061】

< 実施例3 >

図4は、本発明の実施例3による窒化物半導体発光ダイオード素子を模式的な断面図で示している。この窒化物半導体発光ダイオード素子は、厚さ200 μm のn型AlGaN

50

基板 401 上に順次積層された厚さ 5 μm で n 型 AlGaIn の第 1 下部層 402、厚さ 4 nm で n 型 InAlGaIn の中間層 403、第 2 下部層 404、多重量子井戸活性層 405、および厚さ 20 nm で n 型 AlGaIn の上部層 406 を含んでいる。

【0062】

ここで、第 2 下部層 404 は、順次積層された厚さ 0.3 μm の p 型 AlGaIn 層 404a、厚さ 10 nm の p 型 AlGaIn キャリアブロック層 404b、厚さ 60 nm のノンドープ InAlGaIn 層 404c、および厚さ 8 nm のノンドープ InAlGaIn 層 404d を含んでいる。なお、p 型キャリアブロック層 404b 上のノンドープ InAlGaIn 層 404c とノンドープ InAlGaIn 層 404d は、相対的に小さな格子定数の Al 含有キャリアブロック層 404b 上に良好な活性層 405 を形成するためのバッファ層的な役割を果たすとともに、活性層 405 に Mg が拡散すれば発光効率が低下する恐れがあるので、p 型キャリアブロック層 404b から活性層 405 への Mg の拡散を防止する役割をも果たしている。

【0063】

多重量子井戸活性層 405 は、厚さ 3 nm の Si ドープ InAlGaIn 井戸層、厚さ 4 nm の Si ドープ InAlGaIn バリア層、厚さ 3 nm の Si ドープ InAlGaIn 井戸層が順次積層された積層構造を有している。

【0064】

n 型 AlGaIn 基板 401 の下面には、第 1 の n 型用電極 410 が形成され、n 型 AlGaIn の上部層 406 上には第 2 の n 型用電極 409 が形成されている。

【0065】

第 1 の n 型用電極 410 は、n 型 AlGaIn 基板 410 に直に接して形成されている。また、第 2 の n 型用電極 409 は、n 型 GaIn の上部層 406 に直に接して形成されており、Al 層（厚さ 300 nm）で構成されている。こうして、Al 層 409 と n 型 GaIn の上部層 406 との界面に表面プラズモンポラリトンが発生させる構成にしている。

【0066】

この実施例 3 の窒化物半導体発光ダイオード素子においては、20 mA の電流注入で駆動させるときの駆動電圧は 8 V であった。この場合に、多重量子井戸活性層 305 から紫外光（ピーク波長約 270 nm）が発せられる。そして、その紫外光は、発光素子の基板および側面を通して外部に取り出される。この発光の内部量子効率を見積もったところ、20 mA 動作時において 10% 以上となり、波長 270 nm の発光ダイオードとしては極めて高い値を示した。この内部量子効率の向上は、表面プラズモン結合による発光増強効果（自然放出レートの増大）に基づいており、本発明の発光素子の構成における電流注入によって、そのような効果が実現されていることを示している。

【0067】

今回開示された本発明に関する上述の実施形態および実施例はすべての点で例示であって制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上述の実施形態または実施例ではなくて特許請求の範囲によって示され、特許請求の範囲と均等の意味および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

【産業上の利用可能性】

【0068】

本発明の発光素子は高い発光効率を有し、たとえば赤外領域にあっては通信用途、可視領域にあっては照明用途やディスプレイ用途、紫外発光素子にあっては殺菌や浄水などに好適に用いることができる。

【図面の簡単な説明】

【0069】

【図 1】本発明の一実施形態による発光ダイオード素子の模式的な断面図である。

【図 2】本発明の他の実施形態による発光ダイオード素子の模式的な断面図である。

【図 3】本発明の一実施例による発光ダイオード素子の模式的な断面図である。

【図 4】本発明の他の実施例による発光ダイオード素子の模式的な断面図である。

【図 5】表面プラリトン効果を利用する従来の発光ダイオード素子の模式的な断面図である。

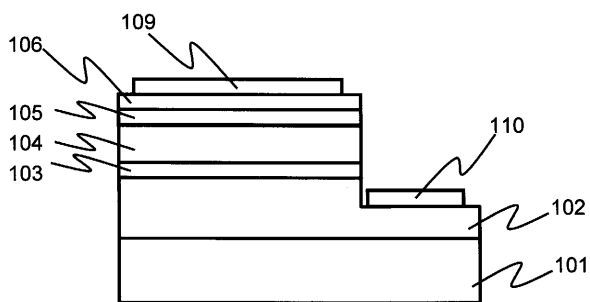
【符号の説明】

【0070】

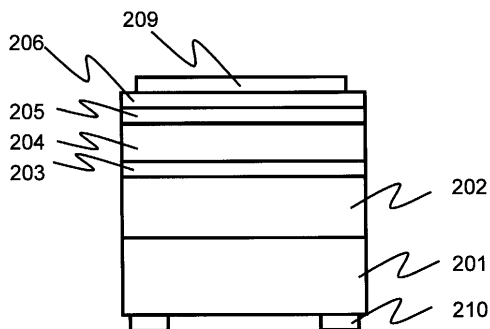
101、301 基板、201、401 n型導電性基板、102、202、302、402 全体としてn型導電性の第1下部層、103、203、303、403、中間層、104、204、304、404 全体としてp型導電性の第2下部層、105、205、305、405 活性層、106、206、306、406 全体としてn型導電性の上部層、109、209、309、409 第2のn型用電極、110、210、310、410 第1のn型用電極。

10

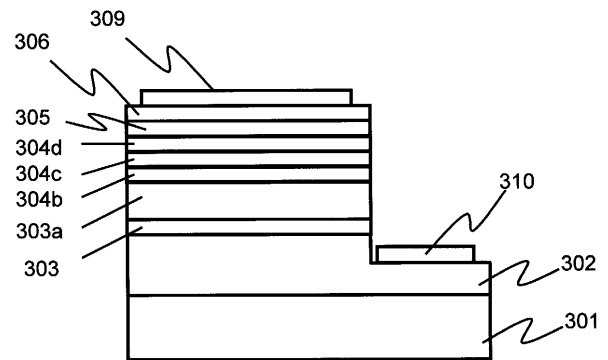
【図 1】



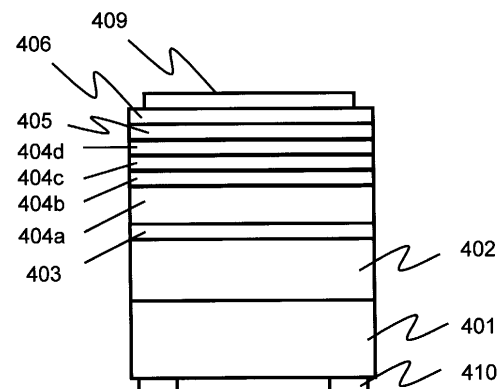
【図 2】



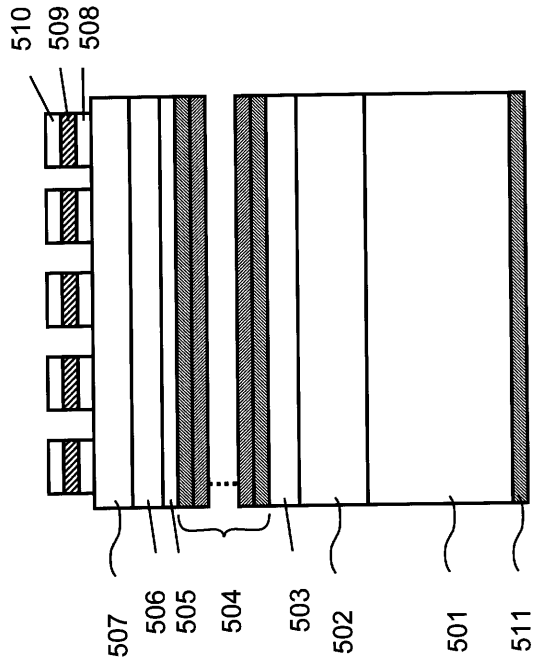
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

(74)代理人 100111246

弁理士 荒川 伸夫

(72)発明者 伊藤 茂稔

大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

(72)発明者 神川 剛

大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

(72)発明者 バッカロ パブロ

大阪府大阪市阿倍野区長池町 2 2 番 2 2 号 シャープ株式会社内

F ターム(参考) 5F041 AA03 CA05 CA40 CA46 CA65 CA83