

(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2004-253801
(P2004-253801A)

(43) 公開日 平成16年9月9日(2004.9.9)

(51) Int.Cl.⁷

H01S 5/343

F 1

H01S 5/343 610

テーマコード(参考)

5FO73

審査請求 未請求 請求項の数 10 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2004-41196 (P2004-41196)
 (22) 出願日 平成16年2月18日 (2004. 2. 18)
 (31) 優先権主張番号 10/368502
 (32) 優先日 平成15年2月18日 (2003. 2. 18)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(71) 出願人 399117121
 アジレント・テクノロジーズ・インク
 AGILENT TECHNOLOGIE
 S, INC.
 アメリカ合衆国カリフォルニア州パロアル
 ト ページ・ミル・ロード 395
 395 Page Mill Road
 Palo Alto, California
 U. S. A.
 (74) 代理人 100087642
 弁理士 古谷 聰
 (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

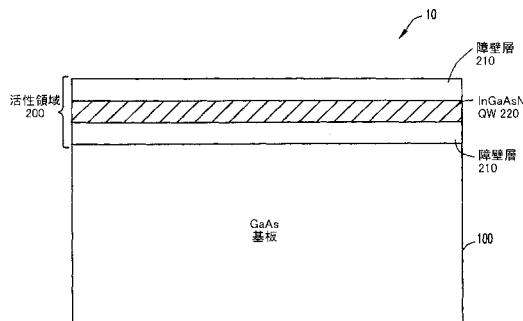
(54) 【発明の名称】 改善された波長安定性を有する InGaAsN 素子

(57) 【要約】

【課題】 燃焼後、 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の範囲内で発光可能な InGaAsN/GaAs 材料構造を提供することを課題とする。

【解決手段】 本願発明は、ガリウム砒素を含む基板と、インジウム、ガリウム、砒素及び窒素を有する材料からなる量子井戸層とを有する半導体発光構造であって、基板(100)が表面を有し、量子井戸層(220)が基板(100)の表面上に配置され、かつ前記量子井戸層(220)が対向する表面を有するものにおいて、障壁材料からなる第1及び第2の障壁層(210)のどちらもが、量子井戸層(220)と実質上同じ濃度の窒素を含み、第1の障壁層(210)が量子井戸層(220)の対向する表面の一方の表面に隣接して配置され、第2の障壁層(210)が量子井戸層(220)の対向する表面のもう一方の表面に隣接して配置されていることを特徴とする。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

ガリウム砒素を含む基板と、インジウム、ガリウム、砒素及び窒素を含む材料からなる量子井戸層とを有する半導体発光構造であって、前記基板(100)が表面を有し、前記量子井戸層(220)が前記基板(100)の表面上に配置され、かつ前記量子井戸層(220)が対向する表面を有するものにおいて、

障壁材料からなる第1及び第2の障壁層(210)のどちらもが、前記量子井戸層(220)と実質上同じ濃度の窒素を含み、前記第1の障壁層(210)が前記量子井戸層(220)の前記対向する表面の一方の表面に隣接して配置され、前記第2の障壁層(210)が前記量子井戸層(220)の前記対向する表面のもう一方の表面に隣接して配置され、

前記半導体発光構造(10)を焼鈍することによって、前記半導体発光構造が $1.2\text{ }\mu\text{m}\sim1.6\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で発光可能であることを特徴とする半導体発光構造。

【請求項 2】

前記量子井戸層(220)のインジウム濃度が30~40パーセントの範囲にあり、前記量子井戸層(220)の窒素濃度が1.5~4パーセントの範囲にある請求項1に記載の半導体発光構造。

【請求項 3】

前記障壁材料がIII-V族窒素化合物から構成されている群より選択され、このIII-V族窒化物に、ガリウム砒素窒素(GaAsN)、インジウムガリウム砒素窒素(InGaAsN)、アルミニウムガリウム砒素窒素(AlGaAsN)、アルミニウムインジウムガリウム砒素窒素(AlInGaAsN)、インジウムガリウムリン窒素(InGaPN)、インジウムガリウム砒素リン窒素(InGaAsPN)、ガリウム砒素リン窒素(GaAsPN)、アルミニウムインジウムガリウムリン窒素(AlInGaPN)及びアルミニウムインジウムガリウム砒素リン窒素(AlInGaAsPN)が含まれている請求項1に記載の半導体発光構造。

【請求項 4】

ガリウム砒素を含む基板と、インジウム、ガリウム、砒素及び窒素を含む材料からなる量子井戸層とを有する半導体発光構造であって、前記基板(100)が表面を有し、前記量子井戸層(220)が前記基板(100)の表面上に配置され、かつ前記量子井戸層(220)が対向する表面を有するものにおいて、

障壁材料からなる第1及び第2の障壁層(210)のどちらもが、少なくとも2つ又はそれより多いIII族元素と窒素を含み、前記第1の障壁層(210b)が前記量子井戸層(220)の前記対向する表面の一方に隣接して配置され、前記第2の障壁層(210b)が前記量子井戸層(220)の前記対向する表面のもう一方に隣接して配置され、

前記半導体発光構造(10)を焼鈍することによって、前記半導体発光構造が $1.2\text{ }\mu\text{m}\sim1.6\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で発光可能であり、

前記障壁材料における2つ又はそれより多いIII族元素と窒素との組成比が、前記量子井戸層(220)からの窒素の拡散を最小とするように設計されていることを特徴とする半導体発光構造。

【請求項 5】

前記障壁材料が、インジウムガリウム砒素窒素(InGaAsN)、アルミニウムガリウム砒素窒素(AlGaAsN)、アルミニウムインジウムガリウム砒素窒素(AlInGaAsN)、インジウムガリウムリン窒素(InGaPN)、インジウムガリウム砒素リン窒素(InGaAsPN)、アルミニウムインジウムガリウムリン窒素(AlInGaPN)及びアルミニウムインジウムガリウム砒素リン窒素(AlInGaAsPN)から構成されている群より選択されている請求項4に記載の半導体発光構造。

【請求項 6】

ガリウム砒素を含む基板と、インジウム、ガリウム、砒素及び窒素を含む材料からなる量子井戸層とを有する半導体発光構造であって、前記基板(100)が表面を有し、前記量子井戸層(220)が前記基板(100)の表面上に配置され、かつ前記量子井戸層(220)が対向する表面を有するものにおいて、

10

20

30

40

50

障壁材料からなる第1と第2の障壁層(210b)のどちらもが、少なくともインジウムとガリウムを含み、前記第1の障壁層(210b)が前記量子井戸層(220)の前記対向する表面の一方に隣接して配置され、前記第2の障壁層(210b)が前記量子井戸層(220)の前記対向する表面のもう一方に隣接して配置され、

前記半導体発光構造(10)を焼鈍することによって、前記半導体発光構造が $1.2\text{ }\mu\text{m}\sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で発光可能であり、

前記障壁材料が、前記第1及び第2の障壁層(210)と前記量子井戸層(220)との間ににおけるインジウム/ガリウム(In/Ga)の混合を最小とするように、インジウム及びガリウムを含むことを特徴とする半導体発光構造。

【請求項7】

前記障壁材料におけるインジウム濃度が、前記量子井戸層(220)におけるインジウム濃度と実質上等しい請求項6に記載の半導体発光構造。

【請求項8】

ガリウム砒素を含む基板と、インジウム、ガリウム、砒素及び窒素を含む材料からなる量子井戸層とを有する半導体発光構造であって、前記基板(100)が表面及び第1の格子定数を有し、前記量子井戸層(220)が、前記基板(100)の表面上に配置されているとともに、前記第1の格子定数を超える第2の格子定数及び対向する表面を有するものにおいて、

材料からなる第1と第2の障壁層(210)のそれぞれが、前記第1の格子定数よりも小さな第3の格子定数を有し、前記第1の障壁層(210)が前記量子井戸層(220)の前記対向する表面の一方に隣接して配置され、前記第2の障壁層(210)が前記量子井戸層(220)の前記対向する表面のもう一方に隣接して配置され、

材料からなる第1と第2の中間障壁層(230)のそれぞれが、前記第1の格子定数を超える第4の格子定数を有し、前記第1の中間障壁層(230)が、前記量子井戸層(220)と前記第1の障壁層(210)の間及び前記量子井戸層(220)と第2の障壁層(210)の間の一方に配置され、前記第2の中間障壁層(230)が、前記量子井戸層(220)と前記第1の障壁層(210)の間及び前記量子井戸層(220)と第2の障壁層(210)の間のもう一方に配置され、

前記半導体発光構造(10)を焼鈍することによって、前記半導体発光構造が $1.2\text{ }\mu\text{m}\sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ の範囲で発光可能であることを特徴とする半導体発光構造。

【請求項9】

前記第1及び第2の中間障壁層(230)が、歪みに関連した前記量子井戸層(220)からの窒素の拡散を最小とするように設計された組成を有する圧縮歪み障壁材料から形成され、この圧縮歪み障壁材料が、III-V族窒素化合物、III-V族リン化合物、III-V族砒素化合物及びIII-V族窒素リン化合物から構成されている群より選択されている請求項8に記載の半導体発光構造。

【請求項10】

前記第1及び第2の障壁層(210)が引張歪み材料からなり、この引張歪み材料が、ガリウム砒素リン(GaAsP)、ガリウム砒素リン窒素(GaAsPN)、インジウムガリウムリン(InGaP)、インジウムガリウムリン窒素(InGaPN)、アルミニウムインジウムガリウムリン(AlInGaP)、インジウムガリウム砒素リン(InGaAsP)、インジウムガリウム砒素リン窒素(InGaAsPN)、アルミニウムインジウムガリウム砒素リン(AlInGaAsP)、インジウムガリウム砒素窒素(InGaAsN)及びガリウム砒素窒素(GaAsN)から構成されている群より選択されている請求項8に記載の半導体発光構造。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、概してInGaAsN素子に関する。より詳細には、本発明は、InGaAsN半導体レーザにおいて波長安定性を改善、向上させることに関する。

【背景技術】

10

20

30

40

50

【0002】

垂直共振器表面発光レーザ(VCSEL)、端面発光レーザ(EEL)及び、量子カスケードレーザや発光ダイオード(LED)のような他の形式の半導体発光素子が、光相互接続システム、光計算システム及び遠隔通信システムを含む多種多様な用途において次第に重要性を増してきている。高速光ファイバ通信の場合、 $1.2\sim1.6\mu\text{m}$ の範囲内の発光波長が望ましい。 $1.2\sim1.6\mu\text{m}$ の範囲の半導体発光素子を製造するためのさまざまな取り組みには、InPに格子整合するInGaAsPの利用、InPをベースとした材料に対するAlAs/GaAsのウェーハボンディング、タリウム化合物の利用及びアンチモン化合物の利用が含まれる。

【0003】

最近、 $1.2\sim1.6\mu\text{m}$ 用の光電子素子として、ガリウム砒素(GaAs)基板上に成長されたI 10 II族窒素-砒素化合物(例えばインジウムガリウム砒素窒素(InGaAsN))が有望な材料になってきた。InGaAsNに急速な熱処理を施すことにより、InGaAsN材料のフォトルミネセンスが大幅に改善し、InGaAsNが光電子用途で使用される材料として発展性のあるものとなる。しかし焼鈍工程、熱処理工程によって、さらにInGaAsN材料の発光波長に青方偏移が生じる。

【0004】

結果生じる青方偏移は、主として、量子井戸からの窒素の拡散に起因するものと考えられている。例えば先行技術文献(例えば非特許文献1参照)では、焼鈍後の発光波長における青方偏移は、量子井戸と周囲の層の間における窒素の濃度勾配のために、ヘテロ界面を横切ってN-As原子の相互拡散が生じる結果であると結論付けている。この非特許文献1 20は、参考することによってその内容を全て本願に取り入れる。

【0005】

しかし、ヘテロ界面における歪み場及び、インジウムとガリウムの混合による量子井戸からの窒素の外方への拡散のような他の要因もまた、焼鈍後の発光波長における青方偏移の潜在的原因とみなされてきた。例えば先行技術文献(例えば非特許文献2参照)は、In 30 GaAs/GaAs(インジウムガリウム砒素/ガリウム砒素)界面において水素のパイルアップ効果が観測され、これによって量子井戸に達した水素が、障壁内に拡散して、系の歪みエネルギーが低下される傾向のあることを示唆している。この非特許文献2は、参考することによってその内容を全て本願に取り入れる。窒素の原子半径、原子の寸法が小さいので、量子井戸からの窒素の外方への拡散の原因に対して同様の論法を適用することも可能である。

【0006】

もう1つの例として、先行技術文献(例えば非特許文献3参照)において、成長後の焼鈍によっても、InGaAs/GaAs量子井戸に青方偏移が生じる可能性のあることが見出されている。この非特許文献3は、参考することによってその内容を全て本願に取り入れる。成長後の焼鈍の後、InGaAsN材料に見られる青方偏移は、ヘテロ界面におけるIn/Ga(インジウム/ガリウム)の混合に起因するものとみなすことができる。

【0007】

現在のところ、熱処理又は焼鈍を施されたInGaAsN/GaAs材料の発光波長における青方偏移を補償する機構は存在しない。

【0008】

【非特許文献1】Li他著、「Effects of rapid thermal annealing on the optical properties of $\text{GaN}_{x}\text{As}_{1-x}/\text{GaAs}$ single quantum well structure grown by molecular beam epitaxy」、J.Appl.Phys.、2000年、第87巻、p.245

【非特許文献2】Chang他著、「Study of hydrogenation on near-surface strained and unstrained quantum wells」、J.Appl.Phys.、1994年、第75巻、p.3040

【非特許文献3】Mars他著、「Growth of $1.2\mu\text{m}$ InGaAsN laser material on GaAs by molecular beam epitaxy」、J.Vac.Sci.Technol.、1999年、第B17巻、p.1272

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

【0009】

従って本発明は、焼鈍後、 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の範囲内で発光可能なInGaAsN/GaAs材料による構造を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明の実施態様によれば、1つ又は複数の障壁層を利用して、量子井戸からの1つ又は複数の元素の拡散を最小とすることにより、InGaAsN材料の波長安定性を向上、改善させるための方法及び装置が提供される。実施態様の1つでは、量子井戸からの窒素の外方への拡散を最小限に抑え、同時に電子の閉じ込めを維持するため、InGaAsN層と実質上同じ濃度の窒素を含む材料からなる障壁層が、InGaAsN層に隣接して設けられている。他の実施態様では、障壁層の材料に、2つ又はそれよりも多いIII族元素及び窒素を含むことがあり、その場合2つ又はそれよりも多いIII族元素と窒素の組成比は、量子井戸からの窒素の外方への拡散を最小とするように設計されている。10

【0011】

その他の実施態様では、量子井戸に対するヘテロ界面におけるIn/Gaの混合を最小とするために、障壁層の材料にインジウム及びガリウムが含まれる。窒素の外方への拡散を最小限に抑え、同時にインジウムとガリウムの混合を最小とするため、さらにIn/Ga障壁層に窒素をドープすることもできる。

【0012】

その他の実施態様では、InGaAsN量子井戸と引張歪み障壁層との間に、圧縮歪み中間層を配置し、歪みに関連した窒素の外方への拡散を最小とすることができます。引張歪み障壁層は、窒素及び/又はインジウム及びガリウムを含有することによって、窒素の外方への拡散及び/又はIn/Gaの混合を最小とするように設計することができる。20

【0013】

InGaAsN量子井戸からの1つ又は複数の原子の外方への拡散を最小とするように設計されている組成を有する1つ又は複数の障壁層を組み込むことによって、焼鈍されたInGaAsN材料の発光波長における青色偏移を縮小させることができると可能である。結果として、InGaAsN/障壁層/GaAs材料構造は、焼鈍後、 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の範囲内で発光することが可能になる。さらに、本発明によれば、上述のものに加えて、又はそれらの代わりに、他の特徴及び利点を備えた実施態様が提供される。これらの特徴及び利点の多くは、付属の図面に関連した下記の説明から明らかになるであろう。30

【発明の効果】

【0014】

本願発明は、インジウムガリウム砒素窒素半導体発光素子(10)に関し、この素子は、量子井戸から1つ又は複数の元素の拡散を防ぐように設計されている1つ又は複数の障壁層(210)を含む。一実施形態では、障壁層(210)は、インジウムガリウム砒素窒素と実質上同じ濃度の窒素を含むことができ、又は窒素とともに組み合わされる2つ又はそれよりも多いIII族の元素を含むことができ、このとき2つ又はそれよりも多いIII族と窒素の組成比は、量子井戸(220)からの窒素の外方への拡散が最小となるように設計されている。他の実施形態では、障壁層(210)は、インジウム及びガリウムを含み、量子井戸に対するヘテロ界面におけるIn/Gaの混合を最小とすることができます。さらなる実施形態では、圧縮歪み又は格子整合中間障壁層(230)が、インジウムガリウム砒素窒素量子井戸(220)と引張歪み障壁層(210)の間に付加され、歪みに関連する窒素の外方への拡散を最小とすることができます。40

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

開示の発明は、本発明の重要な実施態様見本を示し、参照することによって本明細書に組み込まれている添付の図面に関連して解説される。

【0016】

本出願の幾多の画期的な教示について、特に典型的な実施態様に関連して解説する。し50

かし、云うまでもないが、これらの実施態様は、本明細書における画期的な教示の多くの有効な用途のうちのごくわずかな例しか示していないことが理解されなければならない。一般に、本明細書においてなされる説明は、必ずしも、特許請求の範囲に記載のさまざまな発明の範囲を限定するものではない。さらに、説明の中には、ある発明の特徴には当てはまるが、他の特徴には当てはまらないものもあり得る。

【0017】

下記では、化学元素に関する全ての濃度を、0.0~1.0の範囲にわたる比率で示すが、ここで1.0は、その元素が含まれている元素の群のなかで、その元素が100%含まれていることに相当する。例えばIII族又はV族半導体材料について議論する場合、その比率は、III族材料又はV族材料における元素の濃度には当てはまるが、半導体材料全体に当てはまるわけではない。さらに、本明細書に開示の全ての濃度は、その濃度に関して「約」又は「実質上」といった語が用いられているか否かに関わりなく、おおよその値である。これらの濃度は、1モルパーセント、2モルパーセント、5モルパーセント又は10~20モルパーセントまで異なる可能性があるが、ここでモルパーセントは、重量ではなく、モルで表わした百分率である。さらに、本明細書で用いられる限りにおいて、「実質上等しい」及び「実質上同じ」という用語は、隣接層間の濃度差が10モルパーセント~約20モルパーセント以下、10モルパーセント~約200モルパーセント以下であることを意味している。

10

【0018】

本発明の実施態様によれば、原子の移動度を低下させるか、又は排除する半導体発光構造が得られる。いくつかの実施態様においては、量子井戸と障壁層の界面又は界面近くにおける濃度勾配を低減することによって、原子の移動度が低下する。他の実施態様においては、中間圧縮歪み障壁層によって、量子井戸と引張歪み障壁層の間の格子不整合のために誘導される移動度が低下される。

20

【0019】

図1は、本発明の実施態様の1つによる、基板10を焼鈍した後に、1.2μm~1.5μmの範囲内で発光可能な典型的な半導体発光構造10を例示した略断面図を示す。半導体発光構造10は、任意の発光素子の一部をなすことが可能である。限定するわけではないが、例として、発光素子は、垂直共振器表面発光レーザ(VCSEL)、端面発光レーザ(EEL)、量子カスケードレーザ又は発光ダイオード(LED)とすることが可能である。

30

【0020】

構造10には、Ga及びAsから構成されている半導体材料によって形成されている基板100と、InGaAsN発光量子井戸220を含む活性領域200とが含まれている。基板100が、活性領域200の下に任意の材料を含み得ることは、明らかのことである。例えば、ミラー層(反射鏡層)、導波層及びクラッド層により基板100の一部を形成することが可能である。InGaAsN量子井戸220は、厚みが約4ナノメートル(nm)~約10ナノメートル(nm)であり、インジウム濃度が30%~45%、窒素濃度が0.5%~4%である。例えば、実施態様の1つでは、量子井戸材料は、 $In_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.99}N_{0.01}$ とすることが可能である。

30

【0021】

さらに活性領域200には、InGaAsN量子井戸220の両側に1つ又は複数の障壁層210が含まれている。各障壁層210の厚みは約5nm~約20nmの範囲である。障壁層210の組成は、焼鈍工程、熱処理工程の結果生じる発光波長の青色偏移を低減するため、量子井戸220からの1つ又は複数の元素の拡散を最小とするように設計されている。InGaAsN量子井戸220及び障壁層210は、任意の既知のエピタキシャル成長技法を利用して、GaAs基板100上に仮像的に成長させることができる。例えば、このような技法には、限定するわけではないが、分子線エピタキシ法(MBE)、有機金属化学気相エピタキシ法(MOVPE)、有機金属化学気相蒸着法(MOCVD)又は有機金属分子線エピタキシ法(MOMBE)が含まれている。InGaAsN量子井戸220は、单一量子井戸(SQW)構造又は複数量子井戸(MQW)構造を有することができる。MQW構造の場合、各量子井戸層220の間に少なくとも1つの障壁層210が設けられている。

40

【0022】

50

一実施態様では、障壁層210は、量子井戸220からの窒素の拡散を最小とするように設計されている。例えば、障壁層210をIII-V族窒化物とすることが可能である。障壁層210が窒素を含むことによって、量子井戸220と周囲の材料の間における窒素濃度の勾配が緩やかになり、それによって構造10の熱処理中に窒素が量子井戸220から拡散しようとする傾向が抑制される。

【0023】

図2は、図1の半導体発光素子の典型的な活性領域に関する概略図である。図2において、縦軸は成長材料の格子定数を表わし、横軸は基板の格子定数の位置に延びている。横軸は成長方向を表わしている。図2から分るように、InGaAsN量子井戸220の周囲には、GaAs基板と実質上格子整合がとれる窒素(N)を含む障壁層210aが設けられている。10

【0024】

一実施態様では、障壁層210a材料の窒素濃度が、量子井戸220からの窒素の外方への拡散を効果的に阻止し、同時に電子の閉じ込めを維持するため、InGaAsN量子井戸220と実質上等しいか、又はその濃度を超える。例えば、障壁層210aの材料は、量子井戸220の材料における窒素濃度と実質上等しいか、又はその濃度を超える窒素濃度を有するGaAsN材料とすることが可能である。

【0025】

他の実施態様では、障壁層210aの材料に、窒素と組み合わせた2つ又はそれよりも多いIII族元素を含ませることが可能であるが、この場合2つ又はそれよりも多いIII族元素と窒素の濃度は、量子井戸220からの窒素の外方への拡散を最小とするように設計されている。障壁層210aの材料は、圧縮歪み材料、引張歪み材料又はGaAs基板と実質上格子整合のとれた材料とすることができます。障壁層210aの材料が格子整合のとれない材料(圧縮歪み材料又は引張歪み材料)である場合、歪みは3パーセントまでとすることが可能である。例えば、障壁層210aの材料は、InGaAsN(インジウムガリウム砒素窒素)材料、AlGaAsN(アルミニウムガリウム砒素窒素)材料、AlInGaAsN(アルミニウムインジウムガリウム砒素窒素)材料、InGaPN(インジウムガリウムリン窒素)材料、AlInGaPN(アルミニウムインジウムガリウムリン窒素)材料あるいは、2つ又はそれよりも多いIII族元素及び1つ又は複数のV族元素と窒素の他の任意の組合せとすることが可能である。窒素の外方への拡散を最小とすることができる、GaAs基板と実質上格子整合をとることができ障壁層材料の例として、In_{0.5}Ga_{0.5}P_{0.99}N_{0.1}を挙げることができる。30

【0026】

図3は、図2に示す活性領域を有する半導体発光構造を製造するための典型的な工程を単純化して例示するフローチャートである。発光構造を形成するため、量子井戸からの窒素の外方への拡散を最小とするのに十分な濃度の窒素を含む第1の障壁層が基板上に形成される(ブロック300及び310)。例として、基板は、シリコンのようなn導電型の不純物材料又はドーパントをドープしたガリウム砒素(GaAs)を含む半導体基板とすることができます。第1の障壁層は、例えば、MBE、MOVPE、MOCVD又はMOMBEを利用して、約5nmから約20nmの範囲の厚みを有するように、基板上にエピタキシャル成長させることができる。40

【0027】

InGaAsNを含む発光量子井戸が、任意のエピタキシャル成長技法を利用して第1の障壁層上に形成される(ブロック320)。InGaAsN量子井戸は、約4nm～約10nmの範囲の厚みを有し、インジウム濃度が30%～45%、窒素濃度が0.5%～4%である。第1の障壁層と実質上同じ組成及び同じ厚みを有する第2の障壁層が、任意のエピタキシャル成長技法を利用してInGaAsN量子井戸上に形成される(ブロック330)。窒素(N)を含有する障壁層は、InGaAsN材料のフォトルミネセンス(PL)を向上、改善させるために実施される焼鈍工程、熱処理工程(ブロック340)中に、量子井戸からの窒素の外方への拡散を低減するように機能する。窒素の外方への拡散を低減するか又は排除することによって、焼鈍を施されたInGaAsN材料の発光波長における青方偏移が抑制される。結果として、焼鈍後、InGaAsN材料は1.2～1.6μmの範囲で発光することが可能になる。50

【0028】

その他の実施態様では、障壁層が、インジウムとガリウムの両方を含むIII-V族化合物から構成され、量子井戸に対するヘテロ界面におけるIn/Gaの混合を最小とするものもある。図4は、図1の半導体発光構造の第2の典型的な活性領域の概略図である。図4に示すように、InGaAsN量子井戸220の両側に、GaAs基板と実質上格子整合がとれているか、又はGaAs基板と比べて、わずかに引張歪みのあるIn/Gaを含む障壁層210bが設けられている。

【0029】

一実施態様では、障壁層210bの材料におけるインジウム濃度が、InGaAsN量子井戸220のインジウム濃度と実質上等しいか、又はその濃度より高く、量子井戸220に対するヘテロ界面におけるインジウムとガリウムの混合が最小に抑えられる。例えば、障壁層210bの材料は、InGaP(インジウムガリウムリン)材料、AlInGaP(アルミニウムインジウムガリウムリン)材料、InGaAsP(インジウムガリウム砒素リン)材料、AlInGaAsP(アルミニウムインジウムガリウム砒素リン)材料、あるいはIn/Ga(インジウム/ガリウム)の混合を最小とするのに十分な濃度のインジウム(In)及びガリウム(Ga)を含有しつつGaAs基板と実質上格子整合がとれるか又はGaAs基板と比べてわずかに引張歪みのある他の任意の材料から構成することができる。GaAs基板と実質上格子整合がとれ、In/Gaの混合を最小とすることが可能な組成を有する障壁層材料の例として、In_{0.5}Ga_{0.5}Pを挙げることができる。

10

【0030】

他の実施態様では、In/Ga障壁層210bの材料にさらに窒素をドープして、窒素の外方への拡散を最小限に抑え、同時にインジウムとガリウムの混合を最小とすることが可能である。例えば、障壁層210bの材料は、InGaAsNから構成することが可能であり、あるいはIn/Gaの混合及び量子井戸220からの窒素の外方への拡散を最小とするのに十分な濃度のインジウム(In)、ガリウム(Ga)及び窒素(N)を含有し、GaAs基板と実質上格子整合がとれるか又はGaAs基板と比べてわずかに引張歪みのある他の任意の材料から構成することができる。

20

【0031】

図5は、図4に示す活性領域を有する半導体発光構造を製造するための典型的な工程を単純化して例示するフローチャートである。発光構造を形成するため、量子井戸に対するヘテロ界面におけるIn/Gaの混合を最小とするのに十分な濃度のインジウムを含む第1の障壁層が、基板上に形成される(ブロック500及び510)。例として、基板として、シリコンのようなn導電型の不純物材料又はドーパントをドープしたガリウム砒素(GaAs)を含む半導体基板が挙げられる。第1の障壁層は、例えばMBE、MOVPE、MOCVD又はMOMBEを利用して、基板上にエピタキシャル成長させることができ、その厚みは約5nm～約20nmの範囲である。

30

【0032】

InGaAsNを含む発光量子井戸が、任意のエピタキシャル成長技法を利用して第1の障壁層上に形成される(ブロック520)。InGaAsN量子井戸は、厚みが約4nm～約10nmの範囲であり、インジウム濃度が30%～45%、窒素濃度が0.5%～4%である。第1の障壁層と実質上同じ組成及び同じ厚みを有する第2の障壁層が、任意のエピタキシャル成長技法を利用してInGaAsN量子井戸上に形成される(ブロック530)。Inを含有する障壁層は、焼鈍後に、1.2～1.6μmの範囲内の光を放出できるように、焼鈍工程(ブロック540)中に、In/Gaの混合を低減するように機能する。

40

【0033】

図6は、本発明の実施態様の1つに従う、構造10の焼鈍後に、1.2μm～1.5μmの範囲で発光することができる、もう1つの典型的な半導体発光構造10を例示する略断面図である。図1の場合のように、半導体発光構造10は任意の発光素子の一部とすることができます。例として、限定するものではなく、発光素子を、垂直共振器表面発光レーザ(VCSEL)、端面発光レーザ(EEL)、量子カスケードレーザ又は発光ダイオード(LED)とすることが

50

できる。

【0034】

構造10は、ガリウム(Ga)及び砒素(As)から形成されている基板100と、1つ又は複数のInGaAsN発光量子井戸220からなる活性領域200を含む。当然明らかなように、基板100は、活性領域の下に任意の材料を含むことが可能である。例えば、ミラー層(反射鏡層)、導波層及びクラッド層により基板100の一部を形成することができる。各InGaAsN量子井戸220は、約4ナノメートル(nm)～約10nmの範囲の厚みを有し、インジウム濃度が30%～45%、窒素濃度が0.5%～4%である。例えば、実施態様の1つでは、量子井戸材料を $In_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.99}N_{0.01}$ とすることが可能である。

【0035】

さらに活性領域200には、引張歪み障壁層210及び、InGaAsN量子井戸層220と引張歪み障壁層210の間の圧縮歪み中間障壁層230が含まれている。圧縮歪み中間障壁層230は、量子井戸220と引張歪み障壁層210の間の歪み差を低減するように機能する。圧縮歪み中間障壁層230と引張歪み障壁層210はそれぞれ、約2.5nm～約30nmの範囲の厚みを有する。圧縮歪み中間障壁層230は、焼鈍工程の結果として生じる発光波長における青方偏移を低減するために、歪みに関連した量子井戸220からの窒素の外方への拡散を最小とするように設計された組成を有する。さらに引張歪み障壁層210は、図2及び4に関連して上述のように、窒素及び/又はインジウム及びガリウムを含有することによって、窒素の外方への拡散及び/又はIn/Gaの混合を最小とするように設計することもできる。例えば、圧縮歪み中間障壁層230及び引っ張り障壁層210はそれぞれ、適合する格子定数を有するIII-V族窒素化合物、III-V族リン化合物、III-V族砒素化合物及びIII-V族窒素リン化合物から別個に形成することが可能である。

【0036】

量子井戸220の材料及び圧縮歪み中間障壁層230の材料はどちらも、基板100よりも大きな格子定数を有するが、引張歪み障壁層210の材料は、基板100よりも小さな格子定数を有する。障壁層材料の格子定数は、さまざまな元素の濃度を適切に選択することによって制御される。例えば、より大きな格子定数が望ましい場合には、より大きな原子半径を有する元素の濃度を増すことができる。同様に、より小さな格子定数が望ましい場合には、1つ又は複数の原子半径の小さな元素の濃度を増大させることに応じて、1つ又は複数の大きな原子半径の元素の濃度を低下させることができ、同時に材料における電気的中性を維持することができる。

【0037】

InGaAsN量子井戸220及び障壁層210及び230は、MBE、MOVPE、MOCVD又はMOMBEのような任意の既知エピタキシャル成長技法を利用して、GaAs基板100上に仮像的に成長させることができる。InGaAsN量子井戸220は、単一量子井戸(SQW)構造又は複数量子井戸(MQW)構造とすることができ、後者の複数量子井戸(MQW)構造を図6に示す。MQW構造では、各量子井戸220の両側に、独立した圧縮歪み中間障壁層230が設けられ、また独立した引張歪み障壁層210が設けられ、圧縮歪み中間障壁層230が分離されている。圧縮歪み中間障壁層230を設けることによって、量子井戸220と中間障壁層230の間の歪み差がより小さくなり、それによって構造10の熱処理中に、窒素が量子井戸220から拡散しようとする傾向が減少する。

【0038】

図7は、図6の半導体発光素子構造の典型的な活性領域に関する概略図である。図7において、縦軸は成長材料の格子定数を表わし、横軸は基板の格子定数の位置に配置されている。横軸は、成長方向を表わしている。図7に示すように、InGaAsN量子井戸220の周囲には、GaAs基板と比較して、圧縮ひずみのある中間障壁層230が設けられている。例えば、圧縮歪み障壁層230の材料は、圧縮歪みInGaP材料、InGaAsN材料、AlInGaP材料、InGaAsP材料、AlInGaAsP材料、又は圧縮歪み材料を生成する他の任意の元素の組合せから構成することができる。歪みに関連した窒素の外方への拡散を最小とするのに十分な圧縮歪み中間層230に関する障壁層材料の例として $In_{0.5}Ga_{0.5}As_{0.2}P_{0.8}$ を挙げることができる。

10

20

30

40

50

【0039】

圧縮歪み中間障壁層230を分離するのは、圧縮歪み量子井戸220及び中間層230を補うように設計された引張歪み障壁層210である。これに加えて、引張歪み障壁層210は、さらに窒素及び/又はインジウム及びガリウムを含有することによって、窒素の外方への拡散及び/又はIn/Gaの混合を最小とするように機能するように設計することも可能である。例えば、引張歪み障壁層210の材料は、引張歪みGaAsP材料、InGaP材料、AlInGaP材料、InGaAsP材料、AlInGaAsP材料、InGaAsN材料、GaAsN材料、又は引張歪み材料を生成する他の任意の元素の組合せから構成することができる。引張歪み障壁層210に関する障壁層材料の例として $In_{0.4}Ga_{0.6}P$ を挙げることができる。

【0040】

図8は、図7に示す活性領域を有する半導体発光構造を製造するための典型的な工程を単純化して例示するフローチャートである。発光構造を形成するために、圧縮歪み量子井戸を補うように設計されている第1の引張歪み障壁層が、基板上に形成される(ブロック800及び810)。基板として、シリコンのようなn導電型の不純物材料又はドーパントをドープしたガリウム砒素(GaAs)を含む半導体基板を、例として挙げることができる。第1の引張歪み障壁層は、例えば、MBE、MOVPE、MOCVD又はMOMBEを利用して、基板上にエピタキシャル成長させることができ、その厚みは約5nm～約20nmの範囲である。

【0041】

第1の圧縮歪み中間障壁層が、例えば、MBE、MOVPE、MOCVD又はMOMBEを利用して、第1の引張歪み障壁層上に形成されるが(ブロック820)、その厚みは約2.5nm～約30nmの範囲である。InGaAsNを含む発光量子井戸が、任意のエピタキシャル成長技法を利用して、第1の圧縮歪み障壁層上に形成される(ブロック830)。InGaAsN量子井戸は、約4nm～約10nmの範囲に厚みを有し、インジウム濃度が30%～45%、窒素濃度が0.5%～4%である。

【0042】

第1の圧縮歪み障壁層と実質上同じ組成及び同じ厚みを有する第2の圧縮歪み中間障壁層が、任意のエピタキシャル成長技法を利用して、InGaAsN量子井戸上に形成される(ブロック840)。第1の引張歪み障壁層と実質上同じ組成及び同じ厚みを有する第2の引張歪み障壁層が、任意のエピタキシャル成長技法を利用して、第2の圧縮歪み中間障壁層上に形成される(ブロック850)。圧縮歪み中間障壁層は、焼鈍工程(860)中に量子井戸からの窒素の外方への拡散を低減するように機能し、焼鈍後に、InGaAsN材料は1.2～1.6μmの範囲の光を放出することが可能となる。

【0043】

図9A及び9Bは、本発明の実施態様に従って、図1又は図6の構造を有する典型的な半導体発光素子を例示する。次に図9Aを参照すると、この図は、図1又は図6に示す活性領域200の構造を備えるように形成されている典型的な端面発光レーザ300を例示している。端面発光レーザ300には、ガリウム砒素から形成されている単結晶基板100が含まれている。基板100は、例えばシリコンのようなn型ドーパントをドープすることが可能である。基板100の厚みは、約100μm～約500μmの範囲とすることが可能である。

【0044】

約0.5μm～約5μmの範囲の厚みを有するクラッド層110が、基板100上に形成されている。クラッド層110に適した材料は、アルミニウムガリウム砒素(AlGaAs)である。例として、クラッド層110は、1立方センチメートル当たり約 10^{18} 個の原子濃度(10^{18} atoms/cm³)を有するn型ドーパントをドープした $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ とすることが可能である。クラッド層110におけるアルミニウムのモル分率は、約0.2～約0.9の範囲とすることができます。

【0045】

約20nm～約500nmの範囲の厚みを有する閉じ込め層又はアンドープ層120が、クラッド層110上に形成されている。閉じ込め層120及び130は、分離閉じ込めヘテロ構造(SCH)とも呼ばれる。SCH層120に適した材料のバンドギャップは、クラッド層110よりも小さく、SCH層120上に付着されている活性領域200の量子井戸(单数又は複数)220よりも大きい。例えばSCH層120は、 $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ とすることができます。SCH層120におけるアルミニウムの

モル分率は、0～約0.5の範囲とすることが可能である。SCH層120はn側SCH層とも呼ばれる。

【0046】

約16nm～約300 nmの範囲の厚みを有する活性領域200が、n側SCH層120上に形成されている。活性領域200には、それぞれが約4 nm～約10 nmの範囲の厚みを有する1つ又は複数のInGaAsN量子井戸層220と、量子井戸層220を分離するとともに、それぞれが約5 nm～約20 nmの範囲の厚みを有する1つ又は複数の障壁層210/230が含まれている。例として、活性領域200には、上述のように、1つ又は複数の層を含むことが可能である各障壁層210/230によって分離されている1つのInGaAsN量子井戸層220が含まれる。従って、SCH層120上に第1の障壁層210/230が形成され、第1の障壁層210/230上にInGaAsN量子井戸層220が形成され、InGaAsN量子井戸層220上に第2の障壁層210/230が形成されている。10

【0047】

各InGaAsN量子井戸220は、インジウム濃度が30%～45%、窒素濃度が0.5%～4%である。例えば実施態様の1つでは、量子井戸材料を $In_{0.35}Ga_{0.65}As_{0.99}N_{0.01}$ とすることができる。各障壁層210/230は、III-V族窒素化合物、III-V族リン化合物、III-V族砒素化合物又はIII-V族窒素リン化合物からなる1つ又は複数の層から形成され、この場合、各障壁層210/230は、図1～8に関連して上述したように、量子井戸220からの1つ又は複数の元素の外方への拡散を最小とするように設計されている。

【0048】

約20 nm～約500 nmの範囲の厚みを有するp側SCH層130が、活性領域200上に形成されている。p側SCH層130はアンドープクラッド層である。p側SCH層130に適した材料のバンドギャップは、活性領域200における量子井戸（単数又は複数）220よりも大きく、p側SCH層130上に付着されているp型クラッド層140よりも小さい。例えば、p側SCH層130を $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ とすることができます。p側SCH層130におけるアルミニウムのモル分率は、0～約0.5の範囲とすることができます。20

【0049】

約0.5 μm～約5 μmの範囲の厚みを有するp型クラッド層140が、p側SCH層130上に形成されている。p型クラッド層140に適した材料は、アルミニウムガリウム砒素（AlGaAs）である。例として、p型クラッド層140を、1立方センチメートル当り 5×10^{17} 個の原子濃度（ $5 \times 10^{17} \text{ atoms/cm}^3$ ）を有するp型ドーパントをドープした $Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ とすることができます。p型クラッド層140におけるアルミニウムのモル分率は、約0.2～約0.9の範囲とすることが可能である。30

【0050】

約5 nm～約500 nmの範囲の厚みを有するキャップ層150が、p型クラッド層140上に形成され、接触層として機能する。キャップ層150に適した材料は、多量にp型ドーパントをドープされ、p型クラッド層140よりもバンドギャップエネルギーが小さいガリウム砒素（GaAs）である。これによって、キャップ層150とそこに形成されている金属電極（不図示）の間の界面に、バンドギャップエネルギーがより小さなショットキ障壁がもたらされる。例として、キャップ層150は、1立方センチメートル当り約 1×10^{19} 個を超える原子濃度（ $1 \times 10^{19} \text{ atoms/cm}^3$ ）のp型ドーパントをドープしたGaAsとすることができます。上述の層は全て、MBE、MOVPE、MOCVD又はMOMBEのような、任意の従来の技法又は他の適合する技法を利用して形成することが可能である。40

【0051】

次に図9Bを参照すると、この図は、図1又は図6に示す活性領域200構造を備えるように形成されている典型的な垂直共振器表面発光レーザ（VCSEL）350を例示している。VCSEL 350には、ガリウム砒素から形成されている単結晶基板100が含まれている。基板100は、例えばシリコンのようなn型ドーパントをドープすることが可能である。基板100の厚みは、約100 μm～約500 μmの範囲とすることができます。

【0052】

約0.5 μm～約100 μmの範囲の厚みを有する第1の四分の一波長積層体（スタック）11550

が、基板100上に形成されている。第1の四分の一波長積層体は、反射鏡積層体（ミラースタック）又は分布プラグ反射鏡（DBR）とも呼ばれる。VCSEL 350は、一般にレイジング波長と呼ばれる特定の波長で動作するように製造されている。VCSEL 350がレイジング波長で発光できるようするため、DBR 115材料は、一般にレイジング波長において透明である。通常、第1のDBR 115には、異なるn型材料の層が交互に積層されている。第1のDBR 115には異なるn型材料の交互層が含まれている。n型DBR 115に適した材料には、n型アルミニウム砒素（AlAs）及びガリウム砒素（GaAs）が交互に積層される層、交互層が含まれる。さらに、各層の厚みを、レイジング波長の1/4を屈折率で割った値に等しくなるようにすることができる。交互層対の周期数によって、DBR反射鏡115の反射率が決まる。一般に、n型DBR 115の周期数は、30～40の範囲である。

10

【0053】

約200 nm～500 nmの範囲の厚みを有するn側共振器スペーサ層120が、n型DBR 115上に形成されている。共振器スペーサ層120に適した材料は、バンドギャップが、n型DBR 115より小さく、n型共振器スペーサ層120上に付着されている活性領域200における量子井戸（単数又は複数）220より大きい。例えば、共振器スペーサ層120を $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ とすることが可能である。共振器スペーサ層120におけるアルミニウムのモル分率は、0～0.5の範囲とすることができます。

【0054】

約16nm～約300 nmの範囲の厚みを有する活性領域200が、n側共振器スペーサ層120上に形成されている。活性領域200には、それぞれの厚みが約4 nm～約10 nmの範囲の1つ又は複数のInGaAsN量子井戸層220と、それぞれの厚みが約5 nm～約20 nmの範囲にあり、かつ量子井戸層220を分離する1つ又は複数の障壁層210/230が含まれている。例として、活性領域200には、複数の障壁層210/230によって分離されている1つのInGaAsN量子井戸層220が含まれ、障壁層210/230のそれぞれには、上述のように、1つ又は複数の層を含むことが可能である。従って、共振器スペーサ層120上に第1の障壁層210/230が形成され、第1の障壁層210/230上にInGaAsN量子井戸層220が形成され、InGaAsN量子井戸層220上に第2の障壁層210/230が形成されている。

20

【0055】

各InGaAsN量子井戸220は、インジウム濃度が30%～45%、窒素濃度が0.5%～4%である。例えば、実施態様の1つでは、量子井戸220材料を $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.99}\text{N}_{0.01}$ とすることができる。各障壁層210/230は、III-V族窒素化合物、III-V族リン化合物、III-V族砒素化合物又はIII-V族窒素リン化合物による1つ又は複数の層から形成され、この場合、各障壁層210/230は、図1～8に関連して上述したように、量子井戸220からの1つ又は複数の元素の外方への拡散を最小とするように設計されている。

30

【0056】

約200 nm～約500 nmの範囲の厚みを有するp側共振器スペーサ層130が、活性領域200上に形成されている。p側共振器スペーサ層130はアンドープクラッド層である。p側共振器スペーサ層130に適した材料は、バンドギャップが活性領域200における量子井戸（単数又は複数）220よりも大きく、p側共振器スペーサ層130上に付着されているp型DBR 145よりも小さい。例えば、p側共振器スペーサ層130を $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ とすることができます。p側共振器スペーサ層130におけるアルミニウムのモル分率は、約0.1～約0.5の範囲とすることが可能である。

40

【0057】

約0.5 μm～約10 μmの範囲の厚みを有するp型DBR 145が、p側SCH層130上に形成されている。p型DBR 145に適した材料は、p型アルミニウム砒素（AlAs）とガリウム砒素（GaAs）の交互層が含まれる。n型DBR 115の場合のように、p型DBR 145における各層の厚みは、レイジング波長の1/4を屈折率で割った値に等しくすることができる。p型DBR 145の交互層対の周期数は、20～25の範囲である。例えばアルミニウム砒素とガリウム砒素の繰り返しが、20～25回繰り返されている。n型DBR 115、共振器スペーサ層120、130、活性領域200及びp型DBR 145は、レイジング波長における空洞共振によって特徴付けられる光共振器

50

を形成する。

【0058】

約5nm～約500nmの範囲の厚みを有するキャップ層150が、p型DBR 145上に形成され、接触層として機能する。キャップ層150に適した材料は、多量にp型ドーパントをドープされ、p型クラッド層140よりもバンドギャップエネルギーが小さいガリウム砒素(GaAs)である。これによって、キャップ層150とそこに形成されている金属電極(不図示)の間の界面に、バンドギャップエネルギーがより小さなショットキ障壁がもたらされる。例として、キャップ層150は、1立方センチメートル当り約 1×10^{19} 個を超える原子濃度(1×10^{19} atoms/cm³)のp型ドーパントをドープしたGaAsとすることができる。上述の層は全て、MBE、MOVPE、MOCVD又はMOMBEのような、任意の従来の技法又は他の適合する技法を利用して形成することが可能である。10

【0059】

当業者には明らかであるように、本出願において記述された画期的な概念は、広範囲にわたる用途で修正及び変更することが可能である。従って、特許で保護される対象の範囲は、議論された特定の典型的な教示のどれにも制限されるものではなく、代わりに付属の特許請求の範囲の記載によって規定される。20

【図面の簡単な説明】

【0060】

【図1】本発明の実施態様の1つによる典型的な半導体発光構造を例示する略断面図である。20

【図2】図1の半導体発光構造の第1の典型的な活性領域の概略図である。

【図3】図2に示す活性領域を有する半導体発光構造を製造するための典型的なプロックを単純化して例示するフローチャートである。

【図4】図1の半導体発光構造の第2の典型的な活性領域の概略図である。

【図5】図4に示す活性領域を有する半導体発光構造を製造するための典型的なプロックを単純化して例示するフローチャートである。30

【図6】本発明のもう1つの実施態様による、典型的なもう1つの半導体発光構造を例示する略断面図である。

【図7】図6の半導体発光構造の典型的な活性領域の概略図である。

【図8】図7に示す活性領域を有する半導体発光構造を製造するための典型的なプロックを単純化して例示するフローチャートである。30

【図9A】本発明の実施態様による、図1又は図6の構造を有する典型的な半導体発光素子を例示する図である。

【図9B】本発明の実施態様による、図1又は図6の構造を有する典型的な半導体発光素子を例示する図である。

【符号の説明】

【0061】

10 半導体発光構造

100 基板

200 活性領域

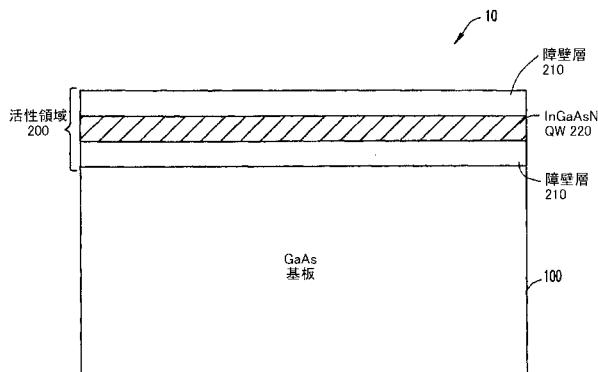
210 障壁層

220 量子井戸層

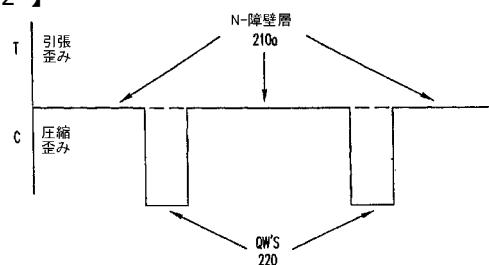
230 中間障壁層

40

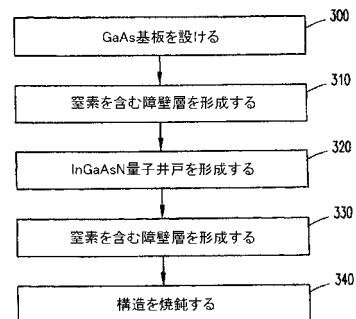
【図1】



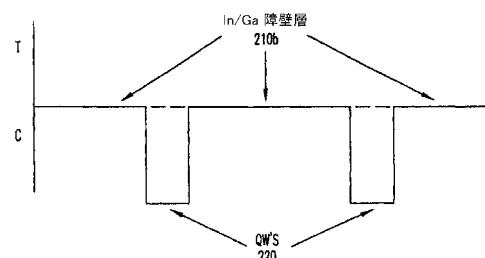
【図2】



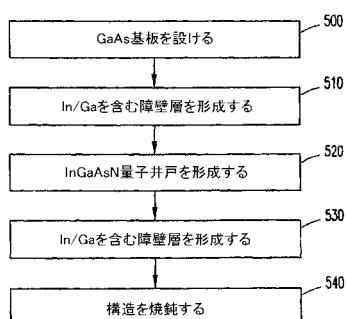
【図3】



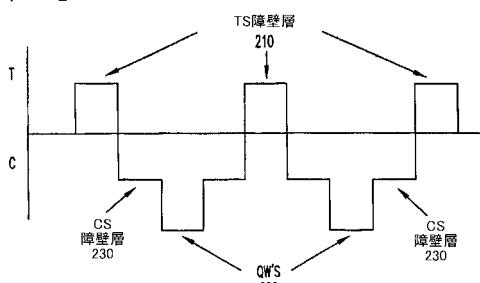
【図4】



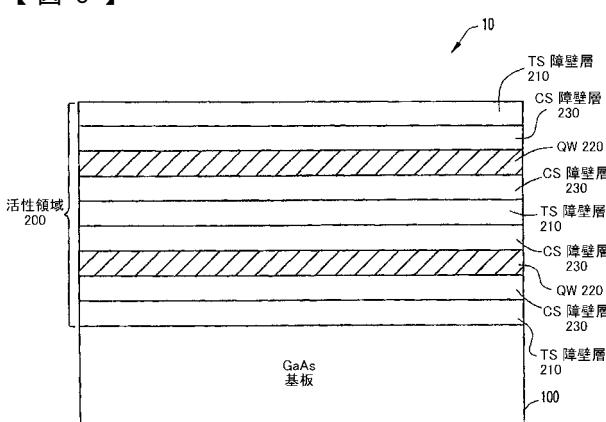
【図5】



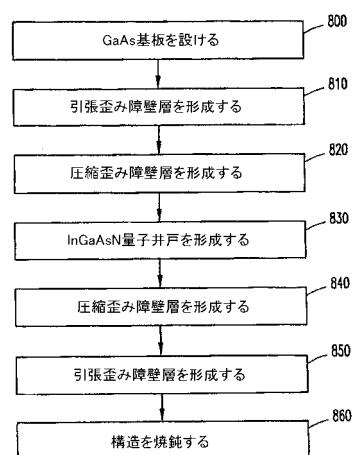
【図7】



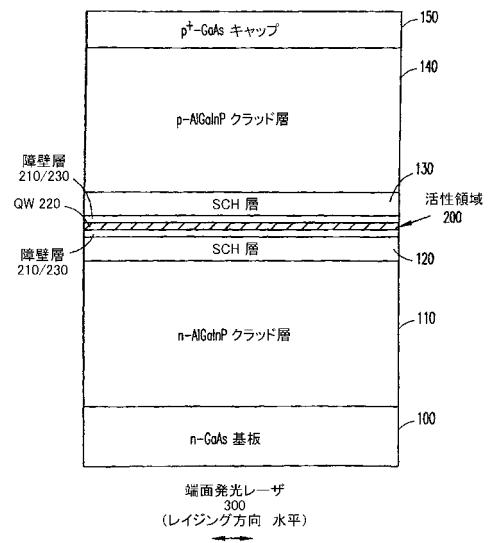
【図6】



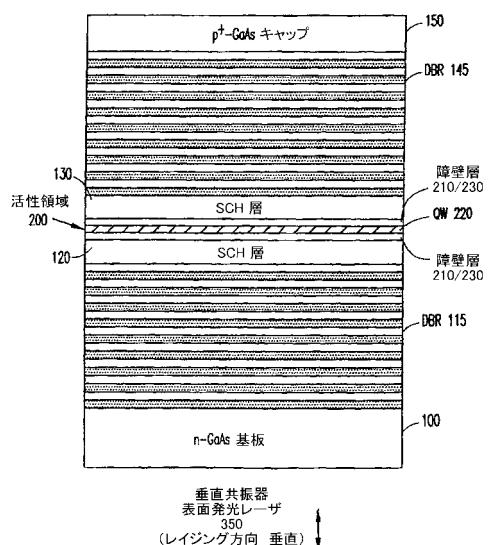
【図8】



【図9A】



【図9B】



フロントページの続き

(72)発明者 イン・ラン・チャン

アメリカ合衆国カリフォルニア州95014, クバチーノ, プレシディオ・ドライブ・8099

(72)発明者 テツヤ・タケウチ

アメリカ合衆国カリフォルニア州94086, サニーベイル, エベリン・テラス・ウェスト・ナンバー2・999

(72)発明者 ダニー・イー・マーズ

アメリカ合衆国カリフォルニア州94024, ロスアルトス, チャートン・アベニュー・1960

(72)発明者 デイビッド・ピー・ボア

アメリカ合衆国カリフォルニア州95014, クバチーノ, ベル・エア・コート・11092

(72)発明者 マイケル・アール・ティー・タン

アメリカ合衆国カリフォルニア州94025, メンロパーク, コットン・ストリート・315

F ターム(参考) 5F073 AA45 AA74 AB17 CA17 DA16 EA03