(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第4836382号
(P4836382)

(45)発行日　平成23年12月14日(2011.12.14)　(24)登録日　平成23年10月7日(2011.10.7)

(51)Int.Cl.		F I		
H01S 5/343	(2006.01)	H01S	5/343	610
H01L 21/205	(2006.01)	H01L	21/205	
H01L 31/10	(2006.01)	H01L	31/10	A
H01L 21/338	(2006.01)	H01L	29/80	B
H01L 29/812	(2006.01)	H01L	27/14	Z

請求項の数 9　(全 36 頁)　最終頁に続く

(21)出願番号　特願2001-550837(P2001-550837)
(86)(22)出願日　平成12年12月8日(2000.12.8)
(65)公表番号　特表2003-519931(P2003-519931A)
(43)公表日　平成15年6月24日(2003.6.24)
(86)国際出願番号　PCT/IB2000/001836
(87)国際公開番号　WO2001/050558
(87)国際公開日　平成13年7月12日(2001.7.12)
審査請求日　平成19年9月13日(2007.9.13)
(31)優先権主張番号　09/476,017
(32)優先日　平成11年12月31日(1999.12.31)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　000005821
パナソニック株式会社
大阪府門真市大字門真１００６番地
(74)代理人　100077931
弁理士　前田　弘
(74)代理人　100094134
弁理士　小山　廣毅
(74)代理人　100110939
弁理士　竹内　宏
(74)代理人　100110940
弁理士　嶋田　高久
(74)代理人　100113262
弁理士　竹内　祐二
(74)代理人　100115059
弁理士　今江　克実

最終頁に続く

(54)【発明の名称】発光素子

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

第１導電型の$Ga_{1-x1}Al_{x1}N_{1-y1}P_{y1}$材料（x1はAl含有率、y1はP含有率）からなる第１のクラッド層と、

GaAlNP活性層と、

前記第１導電型とは逆の導電型の$Ga_{1-x3}Al_{x3}N_{1-y3}P_{y3}$材料（x3はAl含有率、y3はP含有率）からなる第２のクラッド層とを、順次積層形成された状態で備え、

前記第１のクラッド層は、$0<x1<1$、$0<y1<1$、$-0.225x1+25y1<=1$の関係を満たし、

前記第２のクラッド層は、$0<x3<1$、$0<y3<1$、$-0.225x3+25y3<=1$の関係を満たし、

前記活性層は、Al含有率xwおよびP含有率ywが$0<xw<1$、$0<yw<1$、および$-0.225xw+25yw<=1$の関係を満たす、GaAlNP単一あるいは多重量子井戸活性層であり、

前記第１クラッド層、前記活性層および前記第２のクラッド層のそれぞれについて、Al含有率をxs、P含有率をysとしたとき、$3.18(1-xs)(1-ys)+3.86(1-xs)ys+3.11xs(1-ys)+3.85xsys$の値が３．１８±０．０５の範囲内にある

ことを特徴とする発光素子。

【請求項２】

請求項１記載の発光素子において、

前記第１のクラッド層、前記活性層および前記第２のクラッド層の結晶成長温度は、６００℃から１０００℃までの間である

ことを特徴とする発光素子。

【請求項３】
請求項１または２記載の発光素子において、
前記第２クラッド層は、リッジ構造を有する
ことを特徴とする発光素子。
【請求項４】
第１導電型の$IN_{1-x1}Ga_{x1}N_{1-y1}P_{y1}$材料（x1はGa含有率、y1はP含有率）からなる第１のクラッド層と、
InGaNP活性層と、
前記第１導電型とは逆の導電型の$In_{1-x3}Ga_{x3}N_{1-y3}P_{y3}$材料（x3はGa含有率、y3はP含有率）からなる第２のクラッド層とを、順次積層形成された状態で備え、
前記第１のクラッド層は、0<=x1<=1、0<=y1<=1、4.93x1+12.8y1<=1または1.28x1-7y1>=1の関係を満たし、
前記第２のクラッド層は、0<=x3<=1、0<=y3<=1、4.93x3+12.8y3<=1または1.28x3-7y3>=1の関係を満たし、
前記活性層は、Ga含有率xwおよびP含有率ywが0<xw<1、0<yw<1、および4.93xw+12.8yw<=1または1.28xw-7yw>=1の関係を満たす、InGaNP単一あるいは多重量子井戸活性層であり、
前記第１クラッド層、前記活性層および前記第２のクラッド層のそれぞれについて、Ga含有率をxs、P含有率をysとしたとき、3.54(1-xs)(1-ys)+4.15(1-xs)ys+3.18xs(1-ys)+3.86xsysの値が３．１８±０．０５の範囲内にある
ことを特徴とする発光素子。
【請求項５】
請求項４記載の発光素子において、
前記第１のクラッド層、前記活性層および前記第２のクラッド層の結晶成長温度は、６００℃から１０００℃までの間である
ことを特徴とする発光素子。
【請求項６】
請求項４または５記載の発光素子において、
前記第２クラッド層は、リッジ構造を有する
ことを特徴とする発光素子。
【請求項７】
第１導電型の$Al_{1-x1}In_{x1}N_{1-y1}P_{y1}$材料（x1はIn含有率、y1はP含有率）からなる第１のクラッド層と、
AlInNP活性層と、
前記第１導電型とは逆の導電型の$Al_{1-x3}In_{x3}N_{1-y3}P_{y3}$材料（x3はIn含有率、y3はP含有率）からなる第２のクラッド層とを、順次積層形成された状態で備え、
前記第１のクラッド層は、0<=x1<=1、0<=y1<=1、9.62x1+32.3y1<=1または1.12x1-1.54y1>=1の関係を満たし、
前記第２のクラッド層は、0<=x3<=1、0<=y3<=1、9.62x3+32.3y3<=1または1.12x3-1.54y3>=1の関係を満たし、
前記活性層は、In含有率xwおよびP含有率ywが0<xw<1、0<yw<1、および9.32xw+32.3yw<=1または1.12xw-1.54yw>=1の関係を満たす、AlInNP単一あるいは多重量子井戸活性層であり、
前記第１クラッド層、前記活性層および前記第２のクラッド層のそれぞれについて、In含有率をxs、P含有率をysとしたとき、3.11(1-xs)(1-ys)+3.85(1-xs)ys+3.54xs(1-ys)+4.15xsysの値が３．１３±０．０５の範囲内にある
ことを特徴とする発光素子。
【請求項８】
請求項７記載の発光素子において、
前記第１のクラッド層、前記活性層および前記第２のクラッド層の結晶成長温度は、６００℃から１０００℃までの間である

ことを特徴とする発光素子。
【請求項９】
請求項７または８記載の発光素子において、
前記第２クラッド層は、リッジ構造を有する
ことを特徴とする発光素子。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
（発明の分野）
本願は半導体の構造及びプロセスに関し、特に、青色または紫外線レーザダイオード及びその他類似の半導体に使用されるようなIII族窒化物４元及び５元材料系と方法に関する。
【０００２】
（発明の背景）
青色レーザ光源の開発は、ディスク記憶装置、ＤＶＤ等、次世代の高密度光デバイスを先導してきた。図１は、従来技術の半導体レーザ装置の断面図を示す。（Ｓ．ナカムラ、ＭＲＳブリティン(MRS BULLETIN)第２３冊５号３７～４３ページ、１９９８年）。サファイア基板５上に、窒化ガリウム(GaN)緩衝層１０が形成され、その次にｎ型GaN層１５が形成され、さらに、０．１μｍ厚の二酸化ケイ素(SiO_2)層２０がパターン形成されてGaN<1-100>方向に１２μｍの周期性で４μｍ幅のストライプ状のウィンドウ２５が形成されている。その後、ｎ型GaN層３０、ｎ型窒化インジウムガリウム($In_{0.1}Ga_{0.9}N$)層３５、ｎ型窒化アルミニウムガリウム($Al_{0.14}Ga_{0.86}N$)/GaNＭＤ－ＳＬＳ（変調ドープ歪層超格子）クラッド層４０、及びｎ型GaNクラッド層４５が形成されている。次に、$In_{0.02}Ga_{0.98}N/In_{0.15}Ga_{0.85}N$ＭＱＷ（多重量子井戸）活性層５０が形成された後、ｐ型$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$クラッド層５５、ｐ型GaNクラッド層６０、ｐ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層６５、及びｐ型GaNクラッド層７０が形成されている。ｐ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層５５には、リッジストライプ構造が形成されて、そのリッジ導波構造内を水平横方向に伝搬する光の場を閉じ込めるようになっている。ｐ型GaNクラッド層７０及びｎ型GaNクラッド層３０の上には、電極が形成されて電流を注入するようになっている。
【０００３】
図１に示す構造において、ｎ型GaNクラッド層４５及びｐ型GaNクラッド層６０は光導波層である。ｎ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層４０及びｐ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層６５は、InGaNＭＱＷ層５０の活性領域から放出されたキャリアと光を閉じ込めるクラッド層として作用する。ｎ型$In_{0.1}Ga_{0.9}N$層３５は、厚いAlGaN膜を成長させ亀裂の発生を防止する緩衝層として作用する。
【０００４】
図１に示す構造を利用することにより、電極を通じてInGaNＭＱＷ活性層５０内にキャリアが注入され、４００ｎｍ波長領域の光が放出される。リッジストライプ領域下方ではリッジストライプ領域外よりも実効屈折率が大きいので、ｐ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層６５に形成されたリッジ導波構造のために、光の場が活性層内の水平横方向に閉じ込められる。他方、活性層の屈折率はｎ型GaNクラッド層４５及びｐ型GaNクラッド層６０の屈折率、さらに、ｎ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層４０、及びｐ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層６０の屈折率よりも大きいので、ｎ型GaNクラッド層４５、ｎ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層４０、ｐ型GaNクラッド層６０、及びｐ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層５５により、光の場が活性層内の横方向に閉じ込められる。したがって、基本横モード発振が得られる。
【０００５】
しかしながら、図１に示す構造の場合、AlGaN、InGaN及びGaNの格子定数の間には、ｎ型$In_{0.1}Ga_{0.9}N$層３５、$In_{0.02}Ga_{0.98}N/In_{0.15}Ga_{0.85}N$ＭＱＷ活性層５０、ｎ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層４０、ｐ型$Al_{0.14}Ga_{0.86}N$/GaNＭＤ－ＳＬＳクラッド層６５、及びｐ型$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$クラッド層５５の全体の厚さが臨界厚を越えたときは常に歪のエ

ネルギーを解放させる手段として構造内に欠陥を発生させるのに十分な相違が互いに存在するので、$10^{8}cm^{-2}$より小さい桁まで欠陥密度を低減させることは困難である。欠陥は相分離に起因し、レーザ光の吸収の中心として作用するので、発光効率の低下と閾値電流の上昇を引き起こす。その結果、動作電流が大きくなり、ひいては信頼性を損なうことになる。

【０００６】

さらに、InGaNの３元合金系は、図１の構造では活性層として利用されている。この場合、バンドギャップエネルギーはInNの1.9eVからGaNの3.5eVまで変化する。したがって、3.5eVより高いエネルギー準位の紫外光は、InGaN活性層を利用して得ることはできない。このことは、紫外光が、例えば、さらに高密度の光ディスク記憶装置やその他の装置内の光ピックアップ装置用光源として魅力的であることから、問題点となる。

【０００７】

従来の３元材料系における相分離に起因する欠陥をさらに詳しく理解するため、InN、GaN及びAlN間の格子定数の不整合を理解する必要がある。InNとGaN間、InNとAlN間及びGaNとAlN間の格子不整合は、それぞれ１１．３％、１３．９％及び２．３％である。したがって、InN、GaN及びAlN間で等価結合距離が互いに異なっていることからInGaAlN層の等価格子定数が基板と同じであっても、内部歪エネルギーがInGaAlN層内に蓄積する。内部歪エネルギーを低減するために、InGaAlN格子不整合材料系内で相分離が発生する組成範囲が存在し、その場合、InGaAlN層内にIn原子、Ga原子及びAl原子が不均一に分布する。相分離の結果は、InGaAlN層内の In原子、Ga原子及びAl原子が各構成層内の原子モル分率に従って均一に分布されないことになる。このことは、相分離を含むどの層のバンドギャップエネルギー分布も不均一になることを意味する。相分離された部分のバンドギャップ領域は、光吸収中心として不均衡に作用するか、あるいは導波光の散乱を発生させる。上述したように、これらの問題に対する一般的な従来技術の対策は駆動電流を上昇させることであり、それによって半導体装置の寿命を短縮させていた。

【０００８】

その結果、相分離に起因する格子欠陥を最小限に抑え、例えば、青色光または紫外光を高効率に発するレーザダイオードとして、さらに、トランジスタ等の他の半導体構造用に使用可能な半導体構造に対する要望が長い間切実に感じられていた。

【０００９】

（発明の概略）

本発明は、半導体構造の層間の相分離を物質面で抑制することにより欠陥密度を大幅に低減させる半導体構造及び方法を提供することによって従来技術の限界を実質的に克服するものである。これにより、ひいては、発光効率を大幅に向上させることができる。一般に、本発明は、ｘ、ｙ及びｚが全てゼロではないとき、化学式$In_{1-x-y}Ga_xAl_yN_{1-z}P_z$ によって総括的に記述されるIII族窒化物４元及び５元材料系及び方法を利用する。ｘ、ｙまたはｚのうちの１つがゼロであれば、４元系となることが分かる。しかしながら、ｘ、ｙ、ｚのいずれもがゼロではなく、ｘとｙの合計が１にならないときは、５元材料系となる。

【００１０】

相分離を抑制するためには、各層のP含有分の分布が均一であることのみならず、Al含有分の分布が均一な$In_{1-x-y}Ga_xAl_yN_{1-z}P_z$層を有する半導体装置を提供すれば可能であることが分かっている。これにより、発光素子の場合、光吸収損失及び導波散乱損失を低減することができ、高効率の発光素子が実現される。Al及びPの量を周到に選択することにより、少なくとも２つの一般的なバンドギャップの領域を有する素子が生成され、赤外線と青色／紫外線の両方の領域の発光素子を開発することができる。

【００１１】

本発明にかかるGaAlNP４元材料系の第１の実施形態の例によれば、ｘで示すAl含有率及びｙで示すP含有率が3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xyがほぼ一定の値に等しいという条件を完全に満たす場合には、相分離を回避するのに充分な均一性があることが分かっている。発光素子の典型的な実施形態では、上記一定の値は３．１８であってもよ

い。上記構造の構成層の格子定数が欠陥の発生を抑制するのに充分なだけ互いに近く、多くの場合、ほぼ等しいので、相分離がない。

【００１２】

本発明にかかる装置は、一般に、順次積層形成された第１導電型の最初のGaAlNP材料層と、GaAlNP活性層と、逆の導電型のGaAlNP材料層を備えている。3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xyがほぼ一定の値に等しい、例えば、およそ３．１８あるいは３．１８にほぼ等しいという数式に原則的にしたがってモル分率を維持することにより、構成層の格子定数が互いにほぼ等しい状態を維持し、欠陥の発生を低減させることになる。

【００１３】

別の実施形態では、相分離を解消して層境界前後間の均一性を促進させる４元材料系を使用することにより、半導体構造を基本的に上述のとおりに製造する。したがって、既に述べたように、最初のクラッド層は第１の導電型かつ第１の組成のGaAlNPであり、活性層は第２の組成のGaAlNPであり、２番目のクラッド層は最初の層の組成を有する逆の導電型のGaAlNPである。しかしながら、さらに、２番目のクラッド層はリッジ構造を有している。既に述べたように、光吸収損失と導波散乱損失が低減され、より高い効率がもたらされるとともに、光の場をリッジ構造下方の活性層内の水平横方向に閉じ込めることができるという利点もさらにもたらされる。この構造は、基本横モード発振も可能にする。

【００１４】

レーザダイオードの形での実施に特に適している本発明の第３の実施形態では、半導体構造は、それぞれ前の層の上に順次形成された、$Ga_{1-x1}Al_{x1}N_{1-y1}P_{y1}$材料からなる第１導電型の最初のクラッドと、$Ga_{1-x2}Al_{x2}N_{1-y2}P_{y2}$材料からなる活性層と、$Ga_{1-x3}Al_{x3}N_{1-y3}P_{y3}$材料からなる逆の導電型のもう１つのクラッド層を備えている。このような材料系において、x1、x2及びx3はAl含有率を示し、y1、y2及びy3はP含有率を示す。さらに、x1、y1、x2、y2、x3及びy3は、Eg_{GaN}、Eg_{GaP}、Eg_{AlN}及びEg_{AlP}がそれぞれGaN、GaP、AlN、及びAlPのバンドギャップエネルギーであるとき、0<x1<1、0<x2<1、0<x3<1、0<y1<1、0<y2<1、0<y3<1、-0.225x1+25y1<=1、-0.225x2+25y2<=1、-0.225x3+25y3<=1、$Eg_{GaN}(1-x1)(1-y1) + Eg_{GaP}(1-x1)y1 + Eg_{AlN}x1(1-y1) + Eg_{AlP}x1y1 > Eg_{GaN}(1-x2)(1-y2) + Eg_{GaP}(1-x2)y2 + Eg_{AlN}x2(1-y2) + Eg_{AlP}x2y2$、及び$Eg_{GaN}(1-x3)(1-y3) + Eg_{GaP}(1-x3)y3 + Eg_{AlN}x3(1-y3) + Eg_{AlP}x3y3 > Eg_{GaN}(1-x2)(1-y2) + Eg_{GaP}(1-x2)y2 + Eg_{AlN}x2(1-y2) + Eg_{AlP}x2y2$の関係を有している。

【００１５】

上記の材料系にしたがって再現可能な半導体構造を提供するため、GaAlNP層の例示的な実施形態は0<x<1、0<y<1及び-0.225x+25.0y<=1の関係を満たすAl含有率ｘ、P含有率ｙを有している。既に述べたように、この材料系により、光吸収損失及び導波散乱損失の低減が可能になり、高効率発光素子が実現する。さらに、x1、y1、x2、y2、x3及びy3が、0<x1<1、0<x2<1、0<x3<1、0<y1<1、0<y2<1、0<y3<1、-0.225x1+25y1<=1、-0.225x2+25y2<=1、-0.225x3+25y3<=1、EgGaN(1-x1)(1-y1) + EgGaP(1-x1)y1 + EgAlNx1(1-y1) + EgAlPx1y1 > EgGaN(1-x2)(1-y2) + EgGaP(1-x2)y2 + EgAlNx2(1-y2) + EgAlPx2y2、及びEgGaN(1-x3)(1-y3) + EgGaP(1-x3)y3 + EgAlNx3(1-y3) + EgAlPx3y3 > EgGaN(1-x2)(1-y2) + EgGaP(1-x2)y2 + EgAlNx2(1-y2) + EgAlPx2y2の関係を有するとき、活性層のGaAlNPのバンドギャップエネルギーは最初のクラッド層及びもう１つのクラッド層のバンドギャップエネルギーより小さくなる。このような条件下では、注入キャリアが活性層内に閉じ込められる。少なくとも一部の実施形態では、第３の発光素子は、全構成層のAl含有率ｘｗ及びP含有率ｙｗが$0<x_w<1$、$0<y_w<1$及び$-0.225x_w+25y_w<=1$の関係を満たすGaAlNP単一あるいは多重量子井戸活性層を有していることが好ましい。

【００１６】

上記の構造の利点の１つは、レーザダイオードの閾値電流密度を低減させることである。このことは、単一または多重量子井戸構造を使用することによって実現可能であり、それにより、活性層の状態密度が低減される。これにより、反転分布に必要なキャリア密度が小さくなり、閾値電流密度が低下した、あるいは低いレーザダイオードが実現する。

【００１７】
第３の発光素子では、ｘｓとｙｓが各構成層においてそれぞれAl含有率とP含有率であるとき、3.18(1-xs)(1-ys)+3.86(1-xs)ys+3.11xs(1-ys)+3.85xsysが一定の値にほぼ等しい（およそ３．１８または３．１８に近い）という条件が満たされることが好ましい。既に述べたように、これにより、各構成層の格子定数が互いにほぼ等しくなり、ひいては、相分離に起因する欠陥がほぼ最小限に抑えられる。

【００１８】
本発明の第４の実施形態では、半導体構造は、それぞれ前の層の上に順次形成された、$Ga_{1-x1}Al_{x1}N_{1-y1}P_{y1}$材料からなる第１の導電型の最初のクラッド層と、$Ga_{1-x2}Al_{x2}N_{1-y2}P_{y2}$活性層と、$Ga_{1-x3}Al_{x3}N_{1-y3}P_{y3}$材料からなる逆の導電型のもう１つのクラッド層を備えていてもよい。さらに、このもう１つのクラッド層はリッジ構造を有している。上述の材料系の場合、x1、x2及びx3はAl含有率を示し、y1、y2及びy3はAs含有率を示し、x1、y1、x2、y2、x3及びy3は、Eg_{GaN}、Eg_{GaP}、Eg_{AlN}及びEg_{AlP}がそれぞれGaN、GaP、AlN、及びAlPのバンドギャップエネルギーであるとき、0<x1<1、0<x2<1、0<x3<1、0<y1<1、0<y2<1、0<y3<1、-0.225x1+25y1<=1、-0.225x2+25y2<=1、-0.225x3+25y3<=1、$Eg_{GaN}(1-x1)(1-y1) + Eg_{GaP}(1-x1)y1 + Eg_{AlN}x1(1-y1) + Eg_{AlP}x1y1 > Eg_{GaN}(1-x2)(1-y2) + Eg_{GaP}(1-x2)y2 + Eg_{AlN}x2(1-y2) + Eg_{AlP}x2y2$、及び$Eg_{GaN}(1-x3)(1-y3) + Eg_{GaP}(1-x3)y3 + Eg_{AlN}x3(1-y3) + Eg_{AlP}x3y3 > Eg_{GaN}(1-x2)(1-y2) + Eg_{GaP}(1-x2)y2 + Eg_{AlN}x2(1-y2) + Eg_{AlP}x2y2$の関係を有している。

【００１９】
先の実施形態の場合と同様に、各GaAlNP層はAl含有分とP含有分の分布が均一であり、各GaAlNP層のAl含有率ｘ及びP含有率ｙが0<x<1、0<y<1及び-0.225x+25y<=1の関係を満たすときは、それを再現可能に得ることができる。x1、y1、x2、y2、x3及びy3が、0<x1<1、0<x2<1、0<x3<1、0<y1<1、0<y2<1、0<y3<1、-0.225x1+25y1<=1、-0.225x2+25y2<=1、-0.225x3+25y3<=1、$Eg_{GaN}(1-x1)(1-y1) + Eg_{GaP}(1-x1)y1 + Eg_{AlN}x1(1-y1) + Eg_{AlP}x1y1 > Eg_{GaN}(1-x2)(1-y2) + Eg_{GaP}(1-x2)y2 + Eg_{AlN}x2(1-y2) + Eg_{AlP}x2y2$、及び$Eg_{GaN}(1-x3)(1-y3) + Eg_{GaP}(1-x3)y3 + Eg_{AlN}x3(1-y3) + Eg_{AlP}x3y3 > Eg_{GaN}(1-x2)(1-y2) + Eg_{GaP}(1-x2)y2 + Eg_{AlN}x2(1-y2) + Eg_{AlP}x2y2$の関係を有するとき、GaAlNP活性層のバンドギャップエネルギーは第１のクラッド層及び第２のクラッド層のバンドギャップエネルギーより小さくなる。先の実施形態と同様に、注入キャリアが活性層内に閉じ込められ、光の場がリッジ構造下方の活性層内の水平横方向に閉じ込められて、基本横モード発振が発生する。

【００２０】
先の実施形態と同様に、第４の実施形態は、一般に、全構成層のAl含有率ｘｗ及びP含有率ｙｗが0<xw<1、0<yw<1及び-0.225xw+25yw<=1の関係を満たすGaAlNP単一あるいは多重量子井戸活性層を有している。また、ｘｓとｙｓが各構成層においてそれぞれAl含有率とP含有率であるとき、3.18(1-xs)(1-ys)+3.86(1-xs)ys+3.11xs(1-ys) +3.85xsysがほぼ一定の値に等しい、例えば、およそ３．１８または３．１８に近いという条件が一般的に満たされる。同様のパラメータは、サファイア、炭化珪素等の他の基板にも当てはまる。

【００２１】
III族窒化物材料の中では、相対的に大きなバンドギャップであり、かつ直接バンドギャップを有することから、InNも可視光発光素子、可視光検出器及び高出力トランジスタ素子への適用に魅力的である。GaAlNAs材料に対する構造設計概念と同じ概念をInGaNP、AlInNP等の他の材料系を用いた半導体装置にも適用可能である。

【００２２】
InGaNP材料系を用いた半導体装置の場合、各InGaNP層はIn含有分とGa含有分とN含有分とP含有分との分布が均一であり、各InGaNP層のGa含有率ｘ及びP含有率ｙが0<x<1、0<y<1、及び4.93x+12.8y<=1または1.28x-7.0y>=1の関係を満たすときは、それを再現可能に得ることができる。

【００２３】
AlInNP材料系を用いた半導体装置の場合、各AlInNP層はAl含有分とIn含有分とN含有分とP

含有分との分布が均一であり、各AlInNP層のIn含有率ｘ及びP含有率ｙが0<x<1、0<y<1、及び9.62x+32.3y<=1または1.12x-1.54y>=1の関係を満たすときは、それを再現可能に得ることができる。

【００２４】

上記の結果は、従来の処理温度及び時間、通常、５００℃ないし１０００℃の範囲内で実現可能である。アプライド・フィジックス・レターズ(Appl. Phys. Lett.) 58(5)、１９９１年２月４日、５２６ページ以下「低圧有機金属化学蒸着を用いた光学的電気的高品質GaN層の成長(Growth of high optical and electrical quality GaN layers using low-pressure metalorganic chemical vapor deposition)」参照。

【００２５】

本発明は、添付の図面とともに次の発明の詳細な説明によってより深く理解できるであろう。

【００２６】

（発明の詳細な説明）

まず、図２では、本発明の第１の実施形態にかかる半導体構造を断面図で示す。本発明は複数の素子タイプに適用されるが、例示のため、図面の多くにおいて示す半導体構造はレーザダイオードとする。特に図２に示すように、ｎ型GaN基板１００が設けられており、その上には、ｎ型GaN第１クラッド層１０５（通常０．５μｍ厚）が形成されている。その後、通常およそ１．５μｍ厚のｎ型$Ga_{0.75}Al_{0.25}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる第２のクラッド層１１０が形成された後、典型的な構成ではおよそ３５オングストローム厚の$Ga_{0.8}Al_{0.2}N_{0.98}P_{0.02}$材料からなる４つの障壁層と３対の形で構成されるおよそ３５オングストローム厚の$Ga_{0.85}Al_{0.15}N_{0.97}P_{0.03}$材料からなる３つの量子井戸層とから構成された多重量子井戸活性層１１５が形成される。次に、ｐ型$Ga_{0.75}Al_{0.25}N_{0.99}P_{0.01}$（通常およそ１．５μｍ厚）の第３のクラッド層１２０が形成された後、ｐ型GaN第５クラッド層１２５（通常およそ０．５μｍ厚）が形成される。ｐ型GaN第４クラッド層１２５上には、１個のストライプ状ウィンドウ領域１３５（３．０μｍ幅）を有するSiO_2層１３０が形成される。ｎ型GaN基板１００上には第１の電極１４０が形成される一方、SiO_2層１３０及びウィンドウ領域１３５上には第２の電極１４５が形成される。

【００２７】

活性層１１５から４１０ｎｍの波長領域を有する紫色光を放出させるために、全ての層のAl含有率ｘ及びP含有率ｙが、3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xyがほぼ一定の値に等しく、少なくとも第１の実施形態の場合はおよそ３．１８であるという条件を一様に満たしている。相分離に起因する欠陥を回避するため、様々な構成層のそれぞれにおいてAl含有率ｘ及びP含有率ｙを3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+ 3.11x(1-y)+3.85xyが一定の値にほぼ等しい、第１の実施形態の場合はおよそ３．１８±０．０５であるという条件を満たすように設定することによって、様々な構成層の格子定数を互いに一致させ、各層の等価格子定数がGaNの格子定数にほぼ等しくなるようにしている。

【００２８】

材料を適正に選択することにより、ｎ型第２クラッド層１１０及びｐ型第３クラッド層１２０のバンドギャップエネルギーが３対の多重量子井戸活性層１１５のバンドギャップエネルギーより大きくなる。これにより、ｎ型第２クラッド層１１０及びｐ型第３クラッド層１２０からの注入キャリアが活性層１１５内に閉じ込められ、キャリアが再結合して紫外光を放出する。さらに、ｎ型第２クラッド層１１０及びｐ型第３クラッド層１２０の屈折率が多重量子井戸活性層１１５の屈折率より小さいので、光の場が横方向に閉じ込められる。

【００２９】

電極１４５からの注入電流は閉じ込められてウィンドウ領域１３５を流れるので、ウィンドウ領域１３５下方の活性層１１５内の領域が強く活性化される。これにより、ウィンドウ領域６ａ下方の活性層内の局部モード利得がSiO_2層下方の活性層内の局部モード利得より高くなる。したがって、第１の実施形態の構造内に、レーザ発振をもたらす利得導波に

よる導波路を形成することができる。

【００３０】

図３は、第１の実施形態に従って構成されたレーザダイオードの放出光対駆動電流の図を示す。レーザダイオードはデューティサイクル１％のパルス電流で駆動される。閾値電流密度は６．０kA/cm^{2}であることが分かる。

【００３１】

図４Ａないし図４Ｄは、第１の実施形態にかかる典型的なレーザダイオードを構成するのに必要な製造工程の概要を順に示す。図４Ａないし図４Ｄから得られる構造は図２に示すものと類似しているので、可能な場合には要素に同じ参照番号を使用することとする。最初に図４Ａに示すように、ｎ型GaN基板１００が設けられており、その上には、ｎ型GaN第１クラッド層１０５が成長している。第１クラッド層１０５は通常およそ０．５μｍ厚である。その後、通常およそ１．５μｍ厚のｎ型$Ga_{0.75}Al_{0.25}N_{0.99}P_{0.01}$第２クラッド層１１０が形成される。

【００３２】

次に、およそ３５オングストローム厚の$Ga_{0.8}Al_{0.2}N_{0.98}P_{0.02}$材料からなる４つの障壁層と、それぞれおよそ３５オングストローム厚の３層の$Ga_{0.85}Al_{0.15}N_{0.97}P_{0.03}$材料からなる３つの量子井戸を形成することにより、多重量子井戸活性層１１５が形成される。その後、およそ１．５μｍ厚のｐ型$Ga_{0.75}Al_{0.25}N_{0.99}As_{0.01}$材料からなる第３クラッド層１２０が形成された後、およそ０．５μｍ厚のｐ型GaNからなる第４クラッド層１２５が形成される。通常、各層は有機金属化学蒸着（ＭＯＣＶＤ）法あるいは分子線エピタキシ（ＭＢＥ）法のどちらかによって形成される。

【００３３】

その後、図４Ｂに示すように、ｐ型GaN第４クラッド層１２５上に、例えば化学蒸着（ＣＶＤ）法によって二酸化珪素(SiO_2)層１３０が形成される。フォトリソグラフィとエッチングまたは他の適切な方法とを用いて、図４Ｃに示すように、ウィンドウ領域１３５が形成される。ウィンドウ領域１３５は、少なくとも一部の実施形態ではストライプ状であってもよい。最後に、図４Ｄに示すように、蒸着あるいは他の適切な方法により、ｎ型GaN基板１００とSiO_2層１３０上にそれぞれ第１の電極１４０と第２の電極１４５が形成される。

【００３４】

次に、図５を参照することにより、本発明にかかる半導体構造の第２の実施形態をより深く理解することができる。第１の実施形態と同様に、第２の実施形態の典型的な適用例はレーザダイオードの作成である。第２の実施形態の構造により、実屈折率導波を有する導波路機構を構造内に組み込むことができる。これにより、基本横モードで動作可能な低閾値電流レーザダイオードが提供される。

【００３５】

さらに図５に基づいて、参照しやすくするため、同じ要素を同じ参照番号で示す。ｎ型GaN基板１００に、およそ０．５μｍ厚のｎ型GaNから第１クラッド層１０５が形成されている。続いて、およそ１．５μｍ厚の$Ga_{0.75}Al_{0.25}N_{0.99}P_{0.01}$材料からｎ型第２クラッド層１１０が形成されている。その後、およそ３５オングストローム厚の$Ga_{0.8}Al_{0.2}N_{0.98}P_{0.02}$材料からなる４つの障壁層とおよそ３５オングストローム厚の$Ga_{0.85}Al_{0.15}N_{0.97}P_{0.03}$材料からなる３つの井戸層とを備えた多重量子井戸活性層１１５が形成されている。次に、およそ１．５μｍ厚の$Ga_{0.75}Al_{0.25}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる第３のｐ型クラッド層１２０が形成されている。その後、第３クラッド層１２０のリッジ構造５００全体に、およそ０．５μｍ厚のｐ型GaN第４クラッド層１２５が形成されている。そして、第３及び第４クラッド層が部分的に除去されてリッジ構造５００が形成されている。その後、第３クラッド層１２０の残存する露出部分と第４クラッド層１２５を覆うように二酸化珪素(SiO_2)層１３０が形成されている。第４及び第３クラッド層１２５、１２０の上方には、それぞれSiO_2層を介して、およそ２．０μｍ幅のストライプ状のウィンドウ領域１３５が形成されている。第１の実施形態と同様に、ｎ型GaN基板１００上には第１の電極１４０が形成

され、SiO_2層１３０上には第２の電極１４５が形成されている。

【００３６】

第１の実施形態と同様に、活性層１１５から４１０ｎｍ領域の波長を有する紫外光を放出させるために、井戸層内のAl含有率ｘ及びP含有率ｙがそれぞれ０．１５、０．０３に設定されている。同様に、各構成層の格子定数を一致させて相分離に起因する欠陥を回避するため、全ての層のAl含有率ｘ及びAs含有率ｙが、3.18(1-x)(1-y) +3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xyがほぼ一定の値に等しい、例えば、３．１１±０．０５であるという条件を満たしている。同様に、クラッド層のバンドギャップエネルギーが活性層のバンドギャップエネルギーより大きい値に維持され、紫外光の放出が可能になっている。また、材料の屈折率は第１の実施形態に関連して述べたとおりであり、光の場を横方向に閉じ込められるようになっている。

【００３７】

第１の実施形態の動作と同様に、SiO_2層が注入電流を拘束するので、活性層１１５のウィンドウ領域１３５下方の領域が強く活性化される。その結果は、やはり、ウィンドウ領域１３５下方の活性層内の局部モード利得がSiO_2層１３０下方の活性層内の局部モード利得より高くなる。これにより、リッジストライプ領域の外側と比較して内側において横方向の実効屈折率が相対的に高くなることと相俟って、実効屈折率ステップが得られる（ｎ）。これにより、実屈折率導波からなる組込み式の導波路機構を有する構造が得られる。したがって、第２の実施形態の構造により、基本横モードで動作可能な低閾値電流レーザダイオードが提供される。

【００３８】

図６は第２の実施形態にかかるレーザダイオードの放出光対駆動電流特性をグラフ形式で示す。レーザダイオードは持続波電流で駆動される。閾値電流は３６ｍＡであることが分かる。

【００３９】

次に、図７Ａないし図７Ｅに、第２の実施形態にかかる半導体レーザダイオードの典型的な素子の主要製造工程の概要を示す。

【００４０】

まず、図７Ａ及び図７Ｂに示すように、ｎ型GaN基板１００上への第１及び第２クラッド層１０５、１１０及び３対の多重量子井戸活性層１１５の形成は第１の実施形態と同じである。その後、第３及び第４のクラッド層１２０、１２５が形成された後、通常はエッチングにより、一部が除去されてリッジ構造５００が形成される。既に述べたように、典型的な実施形態では、ＭＯＣＶＤ法あるいはＭＢＥ法のどちらかにより様々な層が順次形成される。

【００４１】

その後、図７Ｃないし図７Ｅに示すように、第５及び第３クラッド層１２５、１２０上にそれぞれ、通常はＣＶＤ法により二酸化珪素層１３０が形成され、その後、第１の実施形態と同様に、ウィンドウ領域１３５が形成される。その後、電極１４０、１４５が構造体に蒸着されるかあるいは接合される。

【００４２】

次に、図８を参照することにより、本発明の第３の実施形態をより深く理解できる。第３の実施形態はモル分率がわずかに異なることによって紫外光の放出を可能にするが、その他の点では第１の実施形態と同様である。したがって、ｎ型GaN基板１００をｎ型GaN第１クラッド層１０５とともに依然として使用する。しかしながら、第２クラッド層８１０が一般におよそ１．５μｍ厚のｎ型$Ga_{0.4}Al_{0.6}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる一方、３対の量子井戸活性層８１５が一般に$Ga_{0.6}Al_{0.4}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる４つの障壁層と$Ga_{0.7}Al_{0.3}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる３つの井戸層とを備えている。第３クラッド層８２０が一般にｐ型$Ga_{0.4}Al_{0.6}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる一方、第４クラッド層１２５が、第１の実施形態と同様に、ｐ型GaN材料である。各層の厚さは第１の実施形態の場合とほぼ同じである。SiO_2層１３０、ウィンドウ領域１３５、第１及び第２の電極１４０、１４５が構造体を完成さ

せる。

【００４３】

活性層２４から３１０ｎｍの波長領域で紫外光を放出させるため、井戸層８１５内のAl含有率及びP含有率がそれぞれ０．３及び０．０１に設定されている。構成層の格子定数を一致させて相分離誘因性欠陥の発生を回避するため、各層のAl含有率ｘ及びP含有率ｙが、3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xyがほぼ一定の値に等しいという条件を満たすように設定されている。第３の実施形態を例示すれば、その一定の値はおよそ３．１８±０．０５であってもよい。

【００４４】

第１の実施形態が青色光を放出する一方で、第３の実施形態は紫色光を放出するが、クラッド層のバンドギャップエネルギーは依然として３対の多重量子井戸活性層８１５のバンドギャップエネルギーよりも高く設定されている。既に述べたように、これにより、活性層８１５内でのキャリアの閉じ込めと再結合が可能になる。第１の実施形態と同様に、第２及び第３のクラッド層の屈折率は、意図的に、活性層よりも小さく、その結果、光の場を横方向に閉じ込めている。同様に、ウィンドウ領域１３５の下方に電流を強く注入することにより、活性層のSiO_2層１３０下方の部分に対して比較的に高い活性層内局部モード利得が発生し、その結果、やはり、レーザ発振をもたらす導波路が得られる。

【００４５】

図９は第３の実施形態にかかるレーザダイオードの放出光対駆動電流特性の図を示す。レーザダイオードはデューティサイクル１％のパルス電流で駆動される。閾値電流密度は７kA/cm^2であることが分かる。

【００４６】

図１０Ａないし図１０Ｄは、第３の実施形態の一実施例における半導体レーザダイオードの一連の製造工程を示す。製造工程は図４Ａないし図４Ｄに関連して説明したものと同じであるので、さらに説明は行わない。

【００４７】

次に、図１１を参照することにより、本発明の第４の実施形態をより深く理解することができる。第４の実施形態は、第３の実施形態と同様に、紫外光を放出するよう構成され、したがって、第３の実施形態と同じAl及びP含有率を有している。しかしながら、第４の実施形態は、第２の実施形態と同様に、導波路として作用するリッジ構造を提供するよう構成されている。Al及びP含有率が図８のものと同様であるので、同様の要素は図８で使用した参照番号を使って説明する。

【００４８】

引き続き図１１を見れば、第４の実施形態の構造がGaN基板１００を有し、その上に、第１クラッド層１０５が形成され、その後に第２クラッド層８１０が形成されていることが分かる。それらの上方には、３対の多重量子井戸活性層８１５が形成され、その後に、第３クラッド層８２０が形成されている。既に述べたように、第４クラッド層１２５、二酸化珪素層１３０、ウィンドウ１３５及び電極１４０、１４５も全て形成されている。Al含有率及びP含有率を含む材料は、図８に示すとおりである。同様に、各層のAl含有率ｘ及びP含有率ｙは、第３の実施形態と同様、3.18(1-x)(1-y) +3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xyがおよそ３．１８±０．０５の一定の値にほぼ等しいという条件を満たすように設定されている。バンドギャップエネルギー、屈折率、及び電流注入時のモード利得はすべて第３の実施形態に関連してほぼ記述したとおりであり、さらに説明はしない。

【００４９】

図１２は第４の実施形態に従って構成されたレーザダイオードの駆動電流対放出光を図示している。レーザダイオードは持続波電流で駆動される。閾値電流は４０ｍＡであることが分かる。

【００５０】

図１３は、第４の実施形態にかかる半導体レーザダイオードの製造工程の概要を示す。これらの工程は、図７Ａないし図７Ｅに関連して記述したものと基本的に同一であり、さら

に説明はしない。

【００５１】

次に、図１４を参照することにより、Al含有率ｘ及びP含有率ｙの選択と、GaAlNP構成層の場合の両含有率の関係をより深く理解できる。特に、AlとPの相対含有率は、0<x<1、0<y<1、-0.225x+25y<=1の関係をほぼ満足させることが必要である。

【００５２】

GaAlNP材料系の場合、GaN、AlN、GaP及びAlPの格子定数はそれぞれ異なる。例えば、GaNとGaP間、AlNとAlP間、及びGaNとAlN間の格子不整合は、それぞれ２１．２％、２３．９％及び２．３％である。したがって、GaN、AlN、GaP及びAlP間で等価結合距離が互いに異なっていることからGaAlNP層の等価格子定数が基板と同じであっても、内部歪エネルギーがGaAlNP層内に蓄積する。図１４は、様々な成長温度に対してグラフ化された相分離領域の境界を示す。図１４の線は様々な温度に関して組成的に不安定な（相分離）領域と安定した領域との間の境界を示している。相分離が発生する場合には、GaAlNP層内のGa原子、Al原子、N原子及びP原子が各構成層内の原子含有率に従って均一に分布されない。別の言い方をすれば、相分離された層のバンドギャップエネルギー分布もその層内で不均一になる。相分離された層内の相対的に小さなバンドギャップ領域は、光吸収中心として作用するか、あるいは導波光の散乱を発生させる。このことは、高効率の発光素子を得るためには相分離現象を回避する必要があることを意味する。

【００５３】

さらに図１４によれば、相分離領域が温度とともに変化することが分かる。図１４の線は様々な温度に関して組成的に不安定な領域、すなわち、相分離となる領域と安定した領域との間の境界を示している。GaP-GaN線と、AlP-AlN線と境界線とで囲まれた領域は相分離含有率領域を示す。３元合金AlNP及びGaNPは、AlNとAlPとの間及びGaNとGaPとの間の格子不整合が大きいために相分離領域が大きいことが分かった。他方、３元合金GaAlN及びGaAlPは、約１０００℃の結晶成長温度では、AlNとGaNとの間及びAlPとGaPとの間の格子不整合が小さいために相分離領域がないことが分かった。

【００５４】

したがって、通常結晶成長温度が約６００℃ないし約１０００℃の概算範囲内にあるGaAlNP材料系を提供できることが分かった。同様に、GaAlNPのAl含有率及びP含有率の相分離がおよそ６００℃とおよそ１０００℃の間の処理温度では大量には発生しないことが分かった。最後に、これら２つの点を結びつけることにより、約１０００℃より低い結晶成長温度で相分離を回避するためのGaAlNPのAl含有率及びP含有率の含有率選択領域は、図１５の斜線領域であり、２つの領域を分離する線が-0.225x+25y=1の関係によって近似的に定義されることがわかる。

【００５５】

したがって、これまでに開示した４つの各構造的実施形態の場合、レーザダイオードの全構成層のAl含有率ｘ及びP含有率ｙが0<x<1、0<y<1、-0.225x+25y<=1の関係をほぼ満たすとき、およそ６００℃と約１０００℃との間の結晶成長温度で動作することによって、GaAlNP材料系内で相分離現象を回避することができる。その結果、原子モル分率に従って各構成層内にGa原子、Al原子、N原子及びP原子がほぼ均一に分布する。

【００５６】

図１６は、約１０００℃より低い成長温度で相分離現象を回避するとともにGaNにとって適切な格子整合を依然として確保するためのGaAlNP系のAl含有率ｘ及びP含有率ｙの含有率選択線を示す。図１６の線は3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+3.11x(1-y)　+3.85xy=3.18の例示的な線を示す。したがって、GaN基板上に形成されたレーザダイオードのGaAlNP構成層のAl含有率及びP含有率が、3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+ 3.11x(1-y)+3.85xyがほぼ３．１８に等しく、0<x<1、0<y<1及び-0.225x+25y<=1である関係を確実に有していることによって、欠陥密度が低く、相分離が全くないか非常に少ないレーザダイオードをGaN基板上に得ることができる。

【００５７】

さらに、上述した材料系によって他の半導体構造を製造することも可能である。III族窒化物材料、特にGaNとAlNは高出力高温条件下で動作可能な電子デバイス、例えばマイクロ波パワートランジスタでの使用に有望である。これは、そのバンドギャップの広さ（GaNの場合３．５ｅＶ、AlNの場合６．２ｅＶ）、降伏電界の高さ、飽和速度の高さにある程度起因している。比較すると、AlAs、GaAs、Siのバンドギャップは、それぞれ、２．１６ｅＶ、１．４２ｅＶ、１．１２ｅＶである。このことは、そのような電界効果トランジスタ（ＦＥＴ）用にAlGaN/GaN材料を使用することの有意義な研究に繋がっている。しかしながら、既に述べたように、AlGaNとGaNの格子定数の違いから重大な欠陥が発生し、そのことが、結果得られる構造体内の電子の移動度とそのような材料系のＦＥＴ用途での実用性に限界を与えている。

【００５８】

本発明は、本発明のGaAlNP/GaN材料がGaNと等しい格子定数を有するという点で上記の限界をほぼ克服する。既に述べたように、Al含有率（ｘ）及びP含有率（ｙ）が0<x<1、0<y<1、-0.225x+25Y<=1、及び3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xyが３．１８に等しいという関係を満たすとき、$Ga_{1-x}Al_xN_{1-y}P_y$の４元材料系は３．５ｅＶより大きいバンドギャップを持つだけでなく、GaNとほぼ等しい格子定数を有する。これにより、様々な層内でほぼ均一な原子含有率分布を有するＦＥＴ等の半導体構造が製造可能になる。したがって、Alモル分率ｘ及びPモル分率ｙが上記の関係を満たす本発明にかかるGaAlNP/GaN材料系を使用することにより、欠陥密度の低い高出力高温トランジスタを実現することができる。

【００５９】

図１７Ａに、本発明にかかるGaAlNP/GaN材料を用いたヘテロ接合電界効果トランジスタ（ＨＦＥＴ）の典型的な実施形態を示す。GaN基板５２０上には、０．５μｍ厚のi-GaN層５２５が形成され、その次に、薄い約１０ｎｍ厚のGaN導電用チャンネル層５３０と１０ｎｍ厚のGaAlNP層５３５が形成されている。ソース電極及びドレイン電極５４０Ａ、５４０Ｂとゲート電極５４５が従来の方法で形成されている。この構造において、GaAlNP層のAl含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．２５及び０．０１に設定されている。この場合、ｘとｙの値は0<x<1、0<y<1、-0.225x+25Y<=1、及び3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xy=3.18の関係を満たしている。これにより、実質的に相分離がなくGaNと等しい格子定数を有するGaAlNP層が得られる。ひいては、GaAlNP層とGaN層のヘテロ界面に形成された２次元電子ガスが（欠陥が存在する場合に発生するような）GaAlNP層の原子含有率の揺らぎによって散乱されることがないために、高い電子速度を達成することができる。さらに、GaAlNPのバンドギャップは４ｅＶより大きいので、図１７Ａに示す構造を使用することにより信頼性のある高温動作を実現することができる。

【００６０】

同様に、図１７Ｂは本発明にかかるヘテロ接合バイポーラトランジスタ（ＨＢＴ）の実施形態を示す。GaN基板５５０上には、４００ｎｍ厚のｎ型GaAlNPコレクタ層５５５が形成され、その次に、５０ｎｍ厚のｐ型GaNベース層５６０と３００ｎｍ厚のｎ型GaAlNPエミッタ層５６５が形成されている。ベース電極５７０、コレクタ電極５７５及びエミッタ電極５８０が従来の方法で形成されている。図１７Ａと同様に、図１７Ｂの実施形態では、GaAlNP層のAl含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．２５及び０．０１に設定されており、ｘとｙは上記と同じ関係を満たす必要がある。図１７Ａと同様に、大きな相分離がなくGaNと等しい格子定数を有するGaAlNP層が実現され、その結果、非常に高品質のGaAlNP/GaNヘテロ接合が得られる。さらに、GaAlNPエミッタ層のバンドギャップ（４ｅＶ）はGaNベース層のバンドギャップ（３．５ｅＶ）より大きいので、ｐ型ベース層に発生した正孔がこのベース層内にうまく閉じ込められる。これは、GaNホモ接合バイポーラトランジスタにおいて発生するよりも大きな価電子帯不連続がGaNとGaAlNPとの間に発生することに起因する。このことは、ベース電流に比べて電流増幅が大きいコレクタ電流が得られるという利点をもたらす。さらに、上述したように、GaAlNPとGaN層のバンドギャップは大きいので、トランジスタを高温での用途に信頼性を持って利用することができる。

【００６１】
次に、図１８に、本発明のフォトトランジスタとしての実施例を示す。この点に関して、GaNとAlNは広いバンドギャップ（GaNの場合、２００ｎｍの光の波長に相当する３．５ｅＶ、AlNの場合、３５０ｎｍの光の波長に相当する６．２ｅＶ）を有するので、GaNとAlGaNは紫外線（ＵＶ）領域の光検出器にとって魅力的な材料である。直接バンドギャップとAlN合金の組成範囲全体の中でのAlGaNの可用性のために、AlGaN/GaNによるＵＶ光検出器は、高遮断波長が調整可能であるとともに、量子効率が高いという利点をもたらす。しかしながら、AlGaNの格子定数は欠陥が形成されやすいほどGaNと異なっており、漏れ電流を増加させることになる。Al含有率（ｘ）及びAs含有率（ｙ）が0<x<1、0<y<1及び-0.225x+25y<=1の関係を満たす$Ga_{1-x}Al_xN_{1-y}P_y$は、２．５ｅＶより大きいバンドギャップを提供するだけでなく、各層内に同じ原子含有率分布で形成することができるので、GaAlNP材料をＵＶ光検出器用途に利用することも可能である。さらに、Al含有率ｘ及びP含有率ｙが3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+ 3.11x(1-y)+3.85xy=3.18の関係を満たす$Ga_{1-x}Al_xN_{1-y}P_y$の４元材料は、GaNと等しい格子定数と３．５ｅＶより大きいバンドギャップを有する。したがって、Al含有率ｘ及びP含有率ｙが上記の関係を満たすGaAlNP/GaN材料を使用することにより、欠陥密度の低いＵＶ光検出器を実現することができる。他の周波数、例えば青色光の検出が必要な場合には、わずかな変更しか必要としない。

【００６２】
図１８に示すように、本発明の半導体装置は、GaAlNP/GaN材料を使用してヘテロ接合フォトトランジスタ（ＨＰＴ）の形で実施可能である。GaN基板７００上には、ｎ型GaAlNPコレクタ層７０５がおよそ５００ｎｍ厚に形成され、その次に、２００ｎｍ厚のｐ型GaNベース層７１０が形成されている。その後、およそ５００ｎｍ厚のGaAlNPエミッタ層７１５が形成されている。エミッタ層の上には、光がベース層に当たるようにリング状の電極７２０が形成されている。

【００６３】
典型的な構造では、GaAlNP層のAl含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．２５及び０．０１に設定される。この場合、ｘとｙの値は0<x<1、0<y<1、-0.225x+25Y<=1、3.18(1-x)(1-y)+3.86(1-x)y+3.11x(1-y)+3.85xy=3.18の関係を満たすので、GaAlNP層をGaNと等しい格子定数を持ちながら相分離をほぼ回避するように形成して、高品質のGaAlNP/GaNヘテロ接合を形成することが可能になる。GaAlNPエミッタ層のバンドギャップ（３０７ｎｍの光の波長に相当する４ｅＶ）はGaNベース層のバンドギャップ（３５０ｎｍの光の波長に相当する３．５ｅＶ）よりも大きい。光はエミッタ側に照射される。図示の実施形態の場合、３０７ｎｍと３５０ｎｍの間の波長範囲の照射光はエミッタ層を透過するので、GaNベース層に吸収されて電子と正孔の対を発生させる。GaNとGaAlNPとの間の価電子帯の不連続が従来のGaNホモ接合フォトトランジスタの場合よりも大きいので、ｐ型ベース層の光吸収によって生成された正孔はベース層にうまく閉じ込められる。これにより、より大きなエミッタ電流が誘導されることになり、ホモ接合フォトトランジスタの場合よりも優れた電子中和がベース領域にもたらされる。したがって、高量子効率かつ高感度、及びその結果として入射光からコレクタ電流への高変換効率を有するＵＶ光検出器が得られる。他の周波数を検出する場合には、GaNベース層は、例えば青色光の場合、InGaNに置き換えられる。

【００６４】
図１８のフォトトランジスタに加えて、本発明に従ってフォトダイオードを実現することも可能である。図１９では、ｎ型基板９００が設けられており、その上に$Ga_{1-x}Al_xN_{1-y}P_y$４元材料または等価物からなるｎ型層９１０が形成され、この層は図１８に関連して上述した関係に従っている。その後、活性層９１５が形成され、その上方には、ｐ型$Ga_{1-x}Al_xN_{1-y}P_y$４元材料からなる層９２０が形成されている。そして、この層９２０の上方に、ｐ型第２クラッド層９２５が形成され、そこには、層９２０の一部を露出させるようにウィンドウ９３０が形成されている。ウィンドウ９３０は光を層９２０に当てることができる入口となって正孔を発生させる。従来の方法で一対の電極９３５、９４０が形成されても

よく、その場合、電極９３５は、通常、ウィンドウ９３０周りのリング状の電極である。第２クラッド層９２５のバンドギャップは層９２０のバンドギャップよりも大きいことが好ましく、さらに、層９２０のバンドギャップは活性層９１５のバンドギャップよりも大きいことが好ましいことが理解できる。そのような手法によれば、最大限広い範囲の光の波長に対して感度がよくなる。より狭い波長範囲が望ましい場合には、層９２０よりも小さなバンドギャップを有する材料を層９２５に対して使用してもよい。さらに、層９１０、９１５、９２０は、少なくともいくつかの場合には、適正な光電性ｐｎ接合を提供するので、全ての実施形態に層９２５を含ませる必要はない。

【００６５】

図２０には、本発明の第５の実施形態にかかる半導体構造が断面図で示されている。本発明は複数の素子タイプに適用されるが、例示のため、図面の多くにおいて示す半導体構造はレーザダイオードとする。特に図２０に示すように、ｎ型GaN基板２００が設けられており、その上に、ｎ型GaN第１クラッド層２０５（通常０．５μｍ厚）が形成されている。その後、通常およそ１．５μｍ厚のｎ型$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.999}P_{0.001}$材料からなる第２クラッド層２１０が形成され、その次に、多重量子井戸活性層２１５が形成され、この多重量子井戸活性層２１５は、典型的な構成では、およそ３５オングストローム厚の$In_{0.01}Ga_{0.99}N_{0.97}P_{0.03}$材料からなる３つの量子井戸層と、およそ３５オングストローム厚の$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.975}P_{0.025}$材料からなる４つの障壁層を３対の構成で備えている。次に、ｐ型$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.999}P_{0.001}$材料からなる第３クラッド層２２０（通常およそ１．５μｍ厚）が形成され、その次に、ｐ型GaN第５クラッド層２２５（およそ０．５μｍ厚）が形成されている。ｐ型GaN第４クラッド層２２５の上に、ストライプ状ウィンドウ領域２３５（３．０μｍ幅）を１つ有するSiO_2層２３０が形成されている。ｎ型GaN基板２００の上には第１の電極２４０が形成されており、SiO_2層２３０及びウィンドウ領域２３５の上には第２の電極２４５が形成されている。

【００６６】

活性層２１５から４４０ｎｍの波長領域を有する青色光を放出させるために、全ての層のGa含有率ｘ及びAs含有率ｙが、3.54(1-x)(1-y)+4.15(1-x)y+3.18x(1-y)+3.86xyがほぼ一定の値に等しく、少なくとも第５の実施形態の場合はおよそ３．１８であるという条件を一様に満たしている。相分離に起因する欠陥を回避するため、様々な構成層のそれぞれにおいてGa含有率ｘ及びP含有率ｙを3.54(1-x)(1-y)+4.15(1-x)y+ 3.18x(1-y)+3.86xyが一定の値にほぼ等しい、第５の実施形態の場合はおよそ３．１８±０．０５であるという条件を満たすように設定することによって、様々な構成層の格子定数を互いに一致させ、各層の等価格子定数がGaNの格子定数にほぼ等しくなるようにしている。

【００６７】

材料を適正に選択することにより、ｎ型第２クラッド層２１０及びｐ型第３クラッド層２２０のバンドギャップエネルギーが３対の多重量子井戸活性層２１５のバンドギャップエネルギーより大きくなる。これにより、ｎ型第２クラッド層２１０及びｐ型第３クラッド層２２０からの注入キャリアが活性層２１５内に閉じ込められ、キャリアが再結合して青色光を放出する。さらに、ｎ型第２クラッド層２１０及びｐ型第３クラッド層２２０の屈折率が多重量子井戸活性層２１５の屈折率より小さいので、光の場が横方向に閉じ込められる。

【００６８】

電極２４５からの注入電流は閉じ込められてウィンドウ領域２３５を流れるので、ウィンドウ領域２３５下方の活性層２１５内の領域が強く活性化される。これにより、ウィンドウ領域下方の活性層内の局部モード利得がSiO_2層下方の活性層内の局部モード利得より高くなる。したがって、第５の実施形態の構造内にレーザ発振をもたらす、利得導波による導波路を形成することができる。

【００６９】

図２１Ａないし図２１Ｄは、第５の実施形態にかかる典型的なレーザダイオードを構成するのに必要な製造工程の概要を順に示す。図２１Ａないし図２１Ｄから得られる構造は図

２０に示すものと類似しているので、可能な場合には要素に同じ参照番号を使用することとする。最初に図２１Ａに示すように、ｎ型GaN基板２００が設けられており、その上には、ｎ型GaN第１クラッド層２０５が成長している。第１クラッド層２０５は通常およそ０．５μｍ厚である。その後、通常およそ１．５μｍ厚のｎ型$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.999}P_{0.001}$第２クラッド層２１０が形成される。

【００７０】

次に、およそ３５オングストローム厚の$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.975}P_{0.025}$材料からなる４つの障壁層と、それぞれおよそ３５オングストローム厚の３層の$In_{0.01}Ga_{0.99}N_{0.97}P_{0.03}$材料からなる３つの量子井戸を形成することにより、多重量子井戸活性層２１５が形成される。その後、およそ１．５μｍ厚のｐ型$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.999}P_{0.001}$材料からなる第３クラッド層２２０が形成された後、およそ０．５μｍ厚のｐ型GaNからなる第４クラッド層２２５が形成される。通常、各層は有機金属化学蒸着（ＭＯＣＶＤ）法あるいは分子線エピタキシ（ＭＢＥ）法のどちらかによって形成される。

【００７１】

その後、図２１Ｂに示すように、ｐ型GaN第４クラッド層２２５上に、例えば化学蒸着（ＣＶＤ）法によって二酸化珪素(SiO_2)層２３０が形成される。フォトリソグラフィとエッチングまたは他の適切な方法とを用いて、図２１Ｃに示すように、ウィンドウ領域２３５が形成される。ウィンドウ領域２３５は、少なくとも一部の実施形態ではストライプ状であってもよい。最後に、図２１Ｄに示すように、蒸着あるいは他の適切な方法により、ｎ型GaN基板２００とSiO_2層２３０上にそれぞれ第１の電極２４０と第２の電極２４５が形成される。

【００７２】

次に、図２２を参照することにより、本発明にかかる半導体構造の第６の実施形態をより深く理解することができる。第５の実施形態と同様に、第６の実施形態の典型的な適用例はレーザダイオードの作成である。第６の実施形態の構造により、実屈折率導波を有する導波路機構を構造内に組み込むことができる。これにより、基本横モードで動作可能な低閾値電流レーザダイオードが提供される。

【００７３】

引き続き図２２に基づいて、参照を容易にするため、同じ要素を同じ参照番号で示す。ｎ型GaN基板２００に、およそ０．５μｍ厚のｎ型GaNから第１クラッド層２０５が形成されている。続いて、およそ１．５μｍ厚の$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.999}P_{0.001}$材料からｎ型第２クラッド層２１０が形成されている。その後、およそ３５オングストローム厚の$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.975}P_{0.025}$材料からなる４つの障壁層とおよそ３５オングストローム厚の$In_{0.01}Ga_{0.99}N_{0.97}P_{0.03}$材料からなる３つの井戸層を備えた多重量子井戸活性層２１５が形成されている。次に、およそ１．５μｍ厚の$In_{0.001}Ga_{0.999}N_{0.999}P_{0.001}$材料からなる第３のｐ型クラッド層２２０が形成されている。その後、第３クラッド層２２０のリッジ構造１５００全体に、およそ０．５μｍ厚のｐ型GaN第４クラッド層２２５が形成されている。そして、第３及び第４クラッド層が部分的に除去されてリッジ構造１５００が形成されている。その後、第３クラッド層２２０の残存する露出部分と第４クラッド層２２５を覆うように二酸化珪素(SiO_2)層２３０が形成されている。第４及び第３クラッド層２２５、２２０の上方には、それぞれSiO_2層を介して、およそ２．０オｍ幅のストライプ状であるウィンドウ領域２３５が形成されている。第５の実施形態と同様に、ｎ型GaN基板２００上には第１の電極２４０が形成され、SiO_2層２３０及びウィンドウ領域２３５の上には第２の電極２４５が形成されている。

【００７４】

第５の実施形態と同様に、活性層２１５から４４０ｎｍ領域の波長を有する青色光を放出させるために、井戸層内のGa含有率ｘ及びP含有率ｙがそれぞれ０．９９、０．０３に設定されている。同様に、各構成層の格子定数を一致させて相分離に起因する欠陥を回避するため、全ての層のGa含有率ｘ及びP含有率ｙが、3.54(1-x)(1-y) +4.15(1-x)y+3.18x(1-y)+3.86xyがほぼ一定の値に等しい、例えば、３．１８±０．０５であるという条件を満

たしている。同様に、クラッド層のバンドギャップエネルギーが活性層のバンドギャップエネルギーより大きい値に維持され、青色光の放出が可能になっている。また、材料の屈折率は第５の実施形態に関連して述べたとおりであり、光の場を横方向に閉じ込められるようになっている。

【００７５】

第５の実施形態の動作と同様に、SiO_2層が注入電流を拘束するので、活性層２１５のウィンドウ領域２３５下方の領域が強く活性化される。その結果は、やはり、ウィンドウ領域２３５下方の活性層内の局部モード利得がSiO_2層２３０下方の活性層内の局部モード利得より高くなる。これにより、リッジストライプ領域の外側と比較して内側において横方向の実効屈折率が相対的に高くなることと相俟って、実効屈折率ステップが得られる。これにより、実屈折率導波からなる組込み式の導波路機構を有する構造が得られる。したがって、第６の実施形態の構造により、基本横モードで動作可能な低閾値電流レーザダイオードが提供される。

【００７６】

次に、図２３Ａないし図２３Ｅに、第６の実施形態にかかる半導体レーザダイオードの典型的な素子の主要製造工程の概要を示す。

【００７７】

まず、図２３Ａ及び図２３Ｂに示すように、ｎ型GaN基板２００上への第１及び第２クラッド層２０５、２１０及び３対の多重量子井戸活性層２１５の形成は第５の実施形態と同じである。その後、第３及び第４のクラッド層２２０、２２５が形成された後、通常はエッチングにより、一部が除去されてリッジ構造１５００が形成される。既に述べたように、典型的な実施形態では、ＭＯＣＶＤ法あるいはＭＢＥ法のどちらかにより様々な層が順次形成される。

【００７８】

その後、図２３Ｃないし図２３Ｅに示すように、第５及び第３クラッド層２２５、２２０上にそれぞれ、通常はＣＶＤ法により二酸化珪素層２３０が形成され、その後、第５の実施形態と同様に、ウィンドウ領域２３５が形成される。その後、電極２４０、２４５が構造体に蒸着されるかあるいは接合される。

【００７９】

次に、図２４を参照することにより、Ga含有率ｘ及びP含有率ｙの選択と、InGaNP構成層の場合の両含有率の関係をより深く理解できる。特に、GaとPの相対含有率は、$0<x<1$、$0<y<1$、$4.93x+12.8y<=1$または$1.28x-7y>=1$の関係をほぼ満足させることが必要である。

【００８０】

InGaNP材料系の場合、GaN、InN、GaP及びInPの格子定数はそれぞれ異なる。例えば、GaNとGaP間、InNとInP間、及びGaNとInN間の格子不整合は、それぞれ２１．２％、１７．２％及び１０．２％である。したがって、GaN、InN、GaP及びInP間で等価結合距離が互いに異なっていることからInGaNP層の等価格子定数が基板と同じであっても、内部歪エネルギーがInGaNP層内に蓄積する。図２４は、様々な成長温度に対してグラフ化された相分離領域の境界を示す。図２４の線は様々な温度に関して組成的に不安定な（相分離）領域と安定した領域との間の境界を示している。相分離が発生する場合には、InGaNP層内のGa原子、In原子、N原子及びP原子が各構成層内の原子含有率に従って均一に分布されない。別の言い方をすれば、相分離された層のバンドギャップエネルギー分布もその層内で不均一になる。相分離された層内の相対的に小さなバンドギャップ領域は、光吸収中心として作用するか、あるいは導波光の散乱を発生させる。このことは、高効率の発光素子を得るためには相分離現象を回避する必要があることを意味する。

【００８１】

さらに図２４によれば、相分離領域が温度とともに変化することが分かる。図２４の線は様々な温度に関して組成的に不安定な領域、すなわち、相分離となる領域と安定した領域との間の境界を示している。InP-InN線と、GaP-GaN線と境界線とで囲まれた領域は相分離含有率領域を示す。３元合金InNP、InGaN及びGaNPは、InNとInPとの間、InNとGaNとの間

及びGaNとGaPとの間の格子不整合が大きいために相分離領域が大きいことが分かった。他方、３元合金InGaPは、約１０００℃の結晶成長温度では、InPとGaPとの間の格子不整合が相対的に小さいために相分離領域がないことが分かった。

【００８２】

したがって、通常結晶成長温度が約６００℃ないし約１０００℃の概算範囲内にあるInGaNP材料系を提供できることが分かった。同様に、InGaNPのGa含有率及びP含有率の相分離がおよそ６００℃とおよそ１０００℃の間の処理温度では大量には発生しないことが分かった。最後に、これら２つの点を結びつけることにより、約１０００℃より低い結晶成長温度で相分離を回避するためのInGaNPのGa含有率及びP含有率の含有率選択領域は、図２５の斜線領域であり、２つの領域を分離する線が4.93x+12.8y=1及び1.28x-7y=1の関係によって近似的に定義されることがわかる。

【００８３】

したがって、これまでに開示した２つの各構造的実施形態の場合、レーザダイオードの全構成層のGa含有率ｘ及びP含有率ｙが0<=x<=1、0<=y<=1、かつ4.93x+12.8y<=1または1.28x-7y>=1の関係をほぼ満たすとき、およそ６００℃と約１０００℃との間の結晶成長温度で動作することによって、InGaNP材料系内で相分離現象を回避することができる。その結果、原子モル分率に従って各構成層内にGa原子、In原子、N原子及びP原子がほぼ均一に分布する。

【００８４】

図２６は、約１０００℃より低い成長温度で相分離現象を回避するとともにGaNにとって適切な格子整合を依然として確保するためのInGaNP系のGa含有率ｘ及びP含有率ｙの含有率選択線を示す。図２６の線は3.54(1-x)(1-y)+4.15(1-x)y+3.18x(1-y)　+3.86xy=3.2の例示的な線を示す。したがって、GaN基板上に形成されたレーザダイオードのInGaNP構成層のGa含有率及びP含有率が、3.54(1-x)(1-y)+4.15(1-x)y　+3.18x(1-y)+3.86xyがほぼ３．１８に等しく、0<=x<=1、0<=y<=1及び4.93x+12.8y<=1または1.28x-7y>=1である関係を確実に有していることによって、欠陥密度が低く、相分離が全くないか非常に少ないレーザダイオードをGaN基板上に得ることができる。

【００８５】

さらに、上述した材料系によって他の半導体構造を製造することも可能である。III族窒化物材料、特にGaNとAlNは高出力高温条件下で動作可能な電子デバイス、例えばマイクロ波パワートランジスタでの使用に有望である。これは、そのバンドギャップの広さ（GaNの場合３．５ｅＶ、AlNの場合６．２ｅＶ）、降伏電界の高さ、飽和速度の高さにある程度起因している。比較すると、AlAs、GaAs、Siのバンドギャップは、それぞれ、２．１６ｅＶ、１．４２ｅＶ、１．１２ｅＶである。このことは、そのような電界効果トランジスタ（ＦＥＴ）用にAlGaN/GaN材料を使用することの有意義な研究に繋がっている。しかしながら、既に述べたように、AlGaNとGaNの格子定数の違いから重大な欠陥が発生し、そのことが、結果得られる構造体内の電子の移動度とそのような材料系のＦＥＴ用途での実用性に限界を与えている。

【００８６】

本発明は、本発明のInGaNP/GaN材料がGaNと等しい格子定数を有するという点で上記の限界をほぼ克服する。既に述べたように、Ga含有率（ｘ）及びP含有率（ｙ）が0<=x<=1、0<=y<=1、1.28x-7y>=1、3.54(1-x)(1-y)+4.15(1-x)y+3.18x(1-y)+3.86xyが３．１８±０．０２に等しいという関係を満たすとき、$In_{1-x}Ga_xN_{1-y}P_y$の４元材料系は２．７ｅＶより大きいバンドギャップを持つだけでなく、GaNとほぼ等しい格子定数を有する。これにより、様々な層内でほぼ均一な原子含有率分布を有するＦＥＴ等の半導体構造が製造可能になる。したがって、Gaモル分率ｘ及びPモル分率ｙが上記の関係を満たす本発明にかかるInGaNP/GaN材料系を使用することにより、欠陥密度の低い高出力高温トランジスタを実現することができる。

【００８７】

図２７Ａに、本発明にかかるInGaNP/GaN材料を用いたヘテロ接合電界効果トランジスタ（

ＨＦＥＴ）の典型的な実施形態を示す。GaN基板１５２０上には、０．５μｍ厚のi-InGaNP層１５２５が形成され、その次に、薄い約１０ｎｍ厚のInGaNP導電用チャンネル層１５３０と１０ｎｍ厚のGaN層１５３５が形成されている。ソース電極及びドレイン電極１５４０A、１５４０Bとゲート電極１５４５が従来の方法で形成されている。この構造において、InGaNP層のGa含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．９９９及び０．０２５に設定されている。この場合、ｘとｙの値は0<=x<=1、0<=y<=1、1.28x-7y>=1、3.54(1-x)(1-y)+4.15(1-x)y+3.18x(1-y)+3.86xyがほぼ３．１８に等しいという関係を満たしている。これにより、実質的に相分離がなくGaNとほとんど等しい格子定数を有するInGaNP層が得られる。ひいては、InGaNP層とGaN層のヘテロ界面に形成された２次元電子ガスが（欠陥が存在する場合に発生するような）InGaNP層の原子含有率の揺らぎによって散乱されることがないために、高い電子速度を達成することができる。さらに、InGaNPのバンドギャップは３ｅＶより大きいので、図２７Ａに示す構造を使用することにより信頼性のある高温動作を実現することができる。

【００８８】

同様に、図２７Ｂは本発明にかかるヘテロ接合バイポーラトランジスタ（ＨＢＴ）の実施形態を示す。GaN基板１５５０上には、４００ｎｍ厚のｎ型GaNコレクタ層１５５５が形成され、その次に、５０ｎｍ厚のｐ型InGaNPベース層１５６０と３００ｎｍ厚のｎ型GaNエミッタ層１５６５が形成されている。ベース電極１５７０、コレクタ電極１５７５及びエミッタ電極１５８０が従来の方法で形成されている。図２７Ａと同様に、図２７Ｂの実施形態では、InGaNP層のGa含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．９９９及び０．０２５に設定されており、ｘとｙは上記と同じ関係を満たす必要がある。図２７Ａと同様に、大きな相分離がなくGaNと等しい格子定数を有するInGaNP層が実現され、その結果、非常に高品質のInGaNP/GaNヘテロ接合が得られる。さらに、GaNエミッタ層のバンドギャップ（３．５ｅＶ）はInGaNPベース層のバンドギャップ（３ｅＶ）より大きいので、ｐ型ベース層に発生した正孔がこのベース層内にうまく閉じ込められる。これは、GaNホモ接合バイポーラトランジスタにおいて発生するよりも大きな価電子帯不連続がGaNとInGaNPとの間に発生することに起因する。このことは、ベース電流に比べて電流増幅が大きいコレクタ電流が得られるという利点をもたらす。さらに、上述したように、InGaNPとGaN層のバンドギャップは大きいので、トランジスタを高温での用途に信頼性を持って利用することができる。

【００８９】

次に、図２８に、本発明のフォトトランジスタとしての実施例を示す。この点に関して、GaNとInNは広いバンドギャップ（GaNの場合、３５０ｎｍの光の波長に相当する３．５ｅＶ、InNの場合、６５０ｎｍの光の波長に相当する１．９ｅＶ）を有するので、GaNとInGaNは可視光領域の光検出器にとって魅力的な材料である。直接バンドギャップとInN合金の組成範囲全体の中でのInGaNの可用性のために、InGaN/GaNによる可視光検出器は、高遮断波長が調整可能であるとともに、量子効率が高いという利点をもたらす。しかしながら、InGaNの格子定数は欠陥が形成されやすいほどGaNと異なっており、漏れ電流を増加させることになる。Ga含有率（ｘ）及びP含有率（ｙ）が0<=x<=1、0<=y<=1、1.28x-7y>=1の関係を満たす$In_{1-x}Ga_xN_{1-y}P_y$は、２．７ｅＶより大きいバンドギャップを提供するだけでなく、各層内に同じ原子含有率分布で形成することができるので、InGaNP材料を可視光検出器用途に利用することも可能である。さらに、Ga含有率ｘ及びP含有率ｙが3.54(1-x)(1-y)+4.15(1-x)y+ 3.18x(1-y)+3.86xyがほぼ３．１８±０．０２に等しいという関係を満たす$In_{1-x}Ga_xN_{1-y}P_y$の４元材料は、GaNとほぼ等しい格子定数と２．７ｅＶより大きいバンドギャップを有する。したがって、Ga含有率ｘ及びP含有率ｙが上記の関係を満たすInGaNP/GaN材料を使用することにより、欠陥密度の低いＵＶ光から青色光までの検出器を実現することができる。他の周波数の検出が必要な場合には、わずかな変更しか必要としない。

【００９０】

図２８に示すように、本発明の半導体装置は、InGaNP/GaN材料を使用してヘテロ接合フォトトランジスタ（ＨＰＴ）の形で実施可能である。GaN基板１７００上には、ｎ型GaNコレ

クタ層１７０５がおよそ５００ｎｍ厚に形成され、その次に、２００ｎｍ厚のｐ型InGaNPベース層１７１０が形成されている。その後、およそ５００ｎｍ厚のInGaNPエミッタ層１７１５が形成されている。エミッタ層の上には、光がベース層に当たるようにリング状の電極１７２０が形成されている。

【００９１】

典型的な構造では、InGaNP層のGa含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．９９９及び０．０２５に設定される。この場合、ｘとｙの値は0<=x<=1、0<=y<=1、1.28x-7y>=1、3.54(1-x)(1-y)+4.15(1-x)y+3.18x(1-y)+3.86xyがほぼ３．１８に等しいという関係を満たすので、InGaNP層をGaNと等しい格子定数を持ちながら相分離をほぼ回避するように形成して、高品質のInGaNP/GaNヘテロ接合を形成することが可能になる。GaNエミッタ層のバンドギャップ（３５０ｎｍの光の波長に相当する３．５ｅＶ）はInGaNPベース層のバンドギャップ（４１０ｎｍの光の波長に相当する３ｅＶ）よりも大きい。光はエミッタ側に照射される。図示の実施形態の場合、３５０ｎｍと４１０ｎｍの間の波長範囲の照射光はエミッタ層を透過するので、InGaNPベース層に吸収されて電子と正孔の対を発生させる。GaNとInGaNPとの間の価電子帯の不連続が従来のGaNホモ接合フォトトランジスタの場合よりも大きいので、ｐ型ベース層の光吸収によって生成された正孔はベース層にうまく閉じ込められる。これにより、より大きなエミッタ電流が誘導されることになり、ホモ接合フォトトランジスタの場合よりも優れた電子中和がベース領域にもたらされる。したがって、高量子効率かつ高感度、及びその結果として入射光からコレクタ電流への高変換効率を有する青色光検出器が得られる。

【００９２】

図２８のフォトトランジスタに加えて、本発明に従ってフォトダイオードを実現することも可能である。図２９では、ｎ型基板１９００が設けられており、その上に$In_{1-x}Ga_xN_{1-y}P_y$４元材料または等価物からなるｎ型層９１０が形成され、この層は図２８に関連して上述した関係に従っている。その後、活性層１９１５が形成され、その上方には、ｐ型$In_{1-x}Ga_xN_{1-y}P_y$４元材料からなる層１９２０が形成されている。そして、この層１９２０の上方に、ｐ型第２クラッド層１９２５が形成され、そこには、層１９２０の一部を露出させるようにウィンドウ１９３０が形成されている。ウィンドウ１９３０は光を層１９２０に当てることができる入口となって正孔を発生させる。従来の方法で一対の電極１９３５、１９４０が形成されてもよく、その場合、電極１９３５は、通常、ウィンドウ１９３０周りのリング状の電極である。第２クラッド層１９２５のバンドギャップは層１９２０のバンドギャップよりも大きいことが好ましく、さらに、層１９２０のバンドギャップは活性層１９１５のバンドギャップよりも大きいことが好ましいことが理解できる。そのような手法によれば、最大限広い範囲の光の波長に対して感度がよくなる。より狭い波長範囲が望ましい場合には、層１９２０よりも小さなバンドギャップを有する材料を層１９２５に対して使用してもよい。さらに、層１９１０、１９１５、１９２０は、少なくともいくつかの場合には、適正な光電性ｐｎ接合を提供するので、全ての実施形態に層１９２５を含ませる必要はない。

【００９３】

本発明の好ましい実施形態と様々な代替物について説明したが、当業者であれば、本明細書中の教示を与えられると、本発明から逸脱することなく多数の代替物及び等価物が存在することが理解できるであろう。したがって、本発明は上記の説明によって限定されるものではなく、特許請求の範囲によってのみ限定されるものである。

【００９４】

図３０には、本発明の第７の実施形態にかかる半導体構造が断面図で示されている。本発明は複数の素子タイプに適用されるが、例示のため、図面の多くにおいて示す半導体構造はレーザダイオードとする。特に図３０に示すように、ｎ型GaN基板３００が設けられており、その上に、ｎ型GaN第１クラッド層３０５（通常０．５μｍ厚）が形成されている。その後、通常およそ１．５μｍ厚のｎ型$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる第２クラッド層３１０が形成され、その次に、多重量子井戸活性層３１５が形成され、この多重量

子井戸活性層３１５は、典型的な構成では、およそ３５オングストローム厚の$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.973}P_{0.027}$材料からなる３つの量子井戸層と、およそ３５オングストローム厚の$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.975}P_{0.025}$材料からなる４つの障壁層を３対の構成で備えている。次に、ｐ型$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる第３クラッド層３２０（通常およそ１．５μｍ厚）が形成され、その次に、ｐ型GaN第５クラッド層３２５（およそ０．５μｍ厚）が形成されている。ｐ型GaN第４クラッド層３２５の上に、ストライプ状ウィンドウ領域３３５（３．０μｍ幅）を１つ有するSiO_2層３３０が形成されている。ｎ型GaN基板３００の上には第１の電極３４０が形成されており、SiO_2層３３０及びウィンドウ領域３３５の上には第２の電極３４５が形成されている。

【００９５】

活性層３１５から２３０ｎｍの波長領域を有する紫外光を放出させるために、全ての層のIn含有率ｘ及びP含有率ｙが、3.11(1-x)(1-y)+3.85(1-x)y+3.54x(1-y)+4.15xyがほぼ一定の値に等しく、少なくとも第７の実施形態の場合はおよそ３．１１±０．０５であるという条件を一様に満たしている。相分離に起因する欠陥を回避するため、様々な構成層のそれぞれにおいてIn含有率ｘ及びP含有率ｙを3.11(1-x)(1-y)+3.85(1-x)y+ 3.54x(1-y)+4.15xyが一定の値にほぼ等しい、第７の実施形態の場合はおよそ３．１８±０．０５であるという条件を満たすように設定することによって、様々な構成層の格子定数を互いに一致させ、各層の等価格子定数がGaNの格子定数にほぼ等しくなるようにしている。

【００９６】

材料を適正に選択することにより、ｎ型第２クラッド層３１０及びｐ型第３クラッド層３２０のバンドギャップエネルギーが３対の多重量子井戸活性層３１５のバンドギャップエネルギーより大きくなる。これにより、ｎ型第２クラッド層３１０及びｐ型第３クラッド層３２０からの注入キャリアが活性層３１５内に閉じ込められ、キャリアが再結合して紫外光を放出する。さらに、ｎ型第２クラッド層３１０及びｐ型第３クラッド層３２０の屈折率が多重量子井戸活性層３１５の屈折率より小さいので、光の場が横方向に閉じ込められる。

【００９７】

電極３４５からの注入電流は閉じ込められてウィンドウ領域３３５を流れるので、ウィンドウ領域３３５下方の活性層３１５内の領域が強く活性化される。これにより、ウィンドウ領域下方の活性層内の局部モード利得がSiO_2層下方の活性層内の局部モード利得より高くなる。したがって、第１の実施形態の構造内に、レーザ発振をもたらす、利得導波による導波路機構を形成することができる。

【００９８】

図３１Ａないし図３１Ｄは、第７の実施形態にかかる典型的なレーザダイオードを構成するのに必要な製造工程の概要を順に示す。図３１Ａないし図３１Ｄから得られる構造は図３０に示すものと類似しているので、可能な場合には要素に同じ参照番号を使用することとする。最初に図３１Ａに示すように、ｎ型GaN基板３００が設けられており、その上には、ｎ型GaN第１クラッド層３０５が成長している。第１クラッド層３０５は通常およそ０．５μｍ厚である。その後、通常およそ１．５μｍ厚のｎ型$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.99}P_{0.01}$第２クラッド層３１０が形成される。

【００９９】

次に、およそ３５オングストローム厚の$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.975}P_{0.025}$材料からなる４つの障壁層と、それぞれおよそ３５オングストローム厚の３層の$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.973}P_{0.027}$材料とからなる３つの量子井戸を形成することにより、多重量子井戸活性層３１５が形成される。その後、およそ１．５μｍ厚のｐ型$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる第３クラッド層３２０が形成された後、およそ０．５μｍ厚のｐ型GaNからなる第４クラッド層３２５が形成される。通常、各層は有機金属化学蒸着（ＭＯＣＶＤ）法あるいは分子線エピタキシ（ＭＢＥ）法のどちらかによって形成される。

【０１００】

その後、図３１Ｂに示すように、ｐ型GaN第４クラッド層３２５上に、例えば化学蒸着（

ＣＶＤ）法によって二酸化珪素(SiO_2)層３３０が形成される。フォトリソグラフィとエッチングまたは他の適切な方法とを用いて、図３１Ｃに示すように、ウィンドウ領域３３５が形成される。ウィンドウ領域３３５は、少なくとも一部の実施形態ではストライプ状であってもよい。最後に、図３１Ｄに示すように、蒸着あるいは他の適切な方法により、ｎ型GaN基板３００とSiO_2層３３０上にそれぞれ第１の電極３４０と第２の電極３４５が形成される。

【０１０１】

次に、図３２を参照することにより、本発明にかかる半導体構造の第８の実施形態をより深く理解することができる。第７の実施形態と同様に、第８の実施形態の典型的な適用例はレーザダイオードの作成である。第８の実施形態の構造により、実屈折率導波を有する導波路機構を構造内に組み込むことができる。これにより、基本横モードで動作可能な低閾値電流レーザダイオードが提供される。

【０１０２】

引き続き図３２に基づいて、参照を容易にするため、同じ要素を同じ参照番号で示す。ｎ型GaN基板３００に、およそ０．５μｍ厚のｎ型GaNから第１クラッド層３０５が形成されている。続いて、およそ１．５μｍ厚の$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.99}P_{0.01}$材料からｎ型第２クラッド層３１０が形成されている。その後、およそ３５オングストローム厚の$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.975}P_{0.025}$材料からなる４つの障壁層とおよそ３５オングストローム厚の$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.973}P_{0.027}$材料からなる３つの井戸層を備えた多重量子井戸活性層３１５が形成されている。次に、およそ１．５μｍ厚の$Al_{0.99}In_{0.01}N_{0.99}P_{0.01}$材料からなる第３のｐ型クラッド層３２０が形成されている。その後、第３クラッド層３２０のリッジ構造２５００全体に、およそ０．５μｍ厚のｐ型GaN第４クラッド層３２５が形成されている。そして、第３及び第４クラッド層が部分的に除去されてリッジ構造２５００が形成されている。

【０１０３】

その後、第３クラッド層３２０の残存する露出部分と第４クラッド層３２５を覆うように二酸化珪素(SiO_2)層３３０が形成されている。第４及び第３クラッド層３２５、３２０の上方には、それぞれSiO_2層を介して、およそ２．０μｍ幅のストライプ状のウィンドウ領域３３５が形成されている。第７の実施形態と同様に、ｎ型GaN基板３００上には第１の電極３４０が形成され、SiO_2層３３０及びウィンドウ領域３３５の上には第２の電極３４５が形成されている。

【０１０４】

第７の実施形態と同様に、活性層３１５から２３０ｎｍ領域の波長を有する紫外光を放出させるために、井戸層内のIn含有率ｘ及びP含有率ｙがそれぞれ０．０１、０．０２７に設定されている。同様に、各構成層の格子定数を一致させて相分離に起因する欠陥を回避するため、全ての層のIn含有率ｘ及びP含有率ｙが、$3.11(1-x)(1-y)+3.85(1-x)y+3.54x(1-y)+4.15xy$がほぼ一定の値に等しい、例えば、３．１３±０．０５であるという条件を満たしている。同様に、クラッド層のバンドギャップエネルギーが活性層のバンドギャップエネルギーより大きい値に維持され、青色光の放出が可能になっている。また、材料の屈折率は第７の実施形態に関連して述べたとおりであり、光の場を横方向に閉じ込められるようになっている。

【０１０５】

第７の実施形態の動作と同様に、SiO_2層が注入電流を拘束するので、活性層３１５のウィンドウ領域３３５下方の領域が強く活性化される。その結果は、やはり、ウィンドウ領域３３５下方の活性層内の局部モード利得がSiO_2層３３０下方の活性層内の局部モード利得より高くなる。これにより、リッジストライプ領域の外側と比較して内側において横方向の実効屈折率が相対的に高くなることと相俟って、実効屈折率ステップが得られる。これにより、実屈折率導波からなる組込み式の導波路機構を有する構造が得られる。したがって、第８の実施形態の構造により、基本横モードで動作可能な低閾値電流レーザダイオードが提供される。

【０１０６】

次に、図３３Ａないし図３３Ｅに、第６の実施形態にかかる半導体レーザダイオードの典型的な素子の主要製造工程の概要を示す。

【０１０７】

まず、図３３Ａ及び図３３Ｂに示すように、ｎ型GaN基板３００上への第１及び第２クラッド層３０５、３１０及び３対の多重量子井戸活性層３１５の形成は第７の実施形態と同じである。その後、第３及び第４のクラッド層３２０、３２５が形成された後、通常はエッチングにより、一部が除去されてリッジ構造２５００が形成される。既に述べたように、典型的な実施形態では、ＭＯＣＶＤ法あるいはＭＢＥ法のどちらかにより様々な層が順次形成される。

【０１０８】

その後、図３３Ｃないし図３３Ｅに示すように、第５及び第３クラッド層３２５、３２０上にそれぞれ、通常はＣＶＤ法により二酸化珪素層３３０が形成され、その後、第７の実施形態と同様に、ウィンドウ領域３３５が形成される。その後、電極３４０、３４５が構造体に蒸着されるかあるいは接合される。

【０１０９】

次に、図３４を参照することにより、In含有率ｘ及びP含有率ｙの選択と、InAlNP構成層の場合の両含有率の関係をより深く理解できる。特に、InとAsの相対含有率は、0<=x<=1、0<=y<=1、9.62x+32.3y<=1または1.12x-1.54y>=1の関係をほぼ満足させることが必要である。

【０１１０】

InAlNP材料系の場合、AlN、InN、AlP及びInPの格子定数はそれぞれ異なる。例えば、AlNとAlP間、InNとInP間、及びAlNとInN間の格子不整合は、それぞれ２３．９％、１７．２％及び１３．８％である。したがって、AlN、InN、AlP及びInP間で等価結合距離が互いに異なっていることからInAlNP層の等価格子定数が基板と同じであっても、内部歪エネルギーがInAlNP層内に蓄積する。図３４は、様々な成長温度に対してグラフ化された相分離領域の境界を示す。図３４の線は様々な温度に関して組成的に不安定な（相分離）領域と安定した領域との間の境界を示している。相分離が発生する場合には、InAlNP層内のAl原子、In原子、N原子及びP原子が各構成層内の原子含有率に従って均一に分布されない。別の言い方をすれば、相分離された層のバンドギャップエネルギー分布もその層内で不均一になる。相分離された層内の相対的に小さなバンドギャップ領域は、光吸収中心として作用するか、あるいは導波光の散乱を発生させる。このことは、高効率の発光素子を得るためには相分離現象を回避する必要があることを意味する。

【０１１１】

さらに図３４によれば、相分離領域が温度とともに変化することが分かる。図３４の線は様々な温度に関して組成的に不安定な領域、すなわち、相分離となる領域と安定した領域との間の境界を示している。InP-InN線と、AlP-AlN線と境界線とで囲まれた領域は相分離含有率領域を示す。３元合金InNP、InAlN及びAlNPは、InNとInPとの間、InNとAlNとの間及びAlNとAlPとの間の格子不整合が大きいために相分離領域が大きいことが分かった。他方、３元合金InAlPは、約１０００℃の結晶成長温度では、InPとAlPとの間の格子不整合が小さいために相分離領域がないことが分かった。

【０１１２】

したがって、通常結晶成長温度が約６００℃ないし約１０００℃の概算範囲内にあるAlInNP材料系を提供できることが分かった。同様に、AlInNPのAl含有率及びP含有率の相分離がおよそ６００℃とおよそ１０００℃の間の処理温度では大量には発生しないことが分かった。最後に、これら２つの点を結びつけることにより、約１０００℃より低い結晶成長温度で相分離を回避するためのAlInNPのAl含有率及びP含有率の含有率選択領域は、図３５の斜線領域であり、２つの領域を分離する線が9.62x+32.3y<=1及び1.12x-1.54y>=1の関係によって近似的に定義されることがわかる。

【０１１３】

したがって、これまでに開示した２つの各構造的実施形態の場合、レーザダイオードの全

構成層のIn含有率ｘ及びP含有率ｙが0<=x<=1、0<=y<=1、かつ9.62x+32.3y<=1または1.12x-1.54y>=1の関係をほぼ満たすとき、およそ６００℃と約１０００℃との間の結晶成長温度で動作することによって、AlInNP材料系内で相分離現象を回避することができる。その結果、原子モル分率に従って各構成層内にAl原子、In原子、N原子及びP原子がほぼ均一に分布する。

【０１１４】

さらに、上述した材料系によって他の半導体構造を製造することも可能である。III族窒化物材料、特にGaNとAlNは高出力高温条件下で動作可能な電子デバイス、例えばマイクロ波パワートランジスタでの使用に有望である。これは、そのバンドギャップの広さ（GaNの場合３．５ｅＶ、AlNの場合６．２ｅＶ）、降伏電界の高さ、飽和速度の高さにある程度起因している。比較すると、AlAs、GaAs、Siのバンドギャップは、それぞれ、２．１６ｅＶ、１．４２ｅＶ、１．１２ｅＶである。このことは、そのような電界効果トランジスタ（ＦＥＴ）用にAlGaN/GaN材料を使用することの有意義な研究に繋がっている。しかしながら、既に述べたように、AlGaNとGaNの格子定数の違いから重大な欠陥が発生し、そのことが、結果得られる構造体内の電子の移動度とそのような材料系のＦＥＴ用途での実用性に限界を与えている。

【０１１５】

本発明は、本発明のAlInNP/AlN材料がAlNとほぼ等しい格子定数を有するという点で上記の限界をほぼ克服する。既に述べたように、In含有率（ｘ）及びP含有率（ｙ）が0<=x<=1、0<=y<=1、9.62x+32.3y<=1、3.11(1-x)(1-y)+3.85(1-x)y+3.54x(1-y)+4.15xyがほぼ３．１１に等しいという関係を満たすとき、$Al_{1-x}In_xN_{1-y}P_y$の４元材料系は５ｅＶより大きいバンドギャップを持つだけでなく、AlNとほぼ等しい格子定数を有する。これにより、様々な層内でほぼ均一な原子含有率分布を有するＦＥＴ等の半導体構造が製造可能になる。したがって、Inモル分率ｘ及びPモル分率ｙが上記の関係を満たす本発明にかかるAlInNP/AlN材料系を使用することにより、欠陥密度の低い高出力高温トランジスタを実現することができる。

【０１１６】

図３６Ａに、本発明にかかるAlInNP/AlN材料を用いたヘテロ接合電界効果トランジスタ（ＨＦＥＴ）の典型的な実施形態を示す。AlN基板２５２０上には、０．５μｍ厚のi-AlInNP層２５２５が形成され、その次に、薄い約１０ｎｍ厚のAlInNP導電用チャンネル層２５３０と１０ｎｍ厚のAlN層２５３５が形成されている。ソース電極及びドレイン電極２５４０Ａ、２５４０Ｂとゲート電極２５４５が従来の方法で形成されている。この構造において、AlInNP層のIn含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．０１及び０．０２７に設定されている。この場合、ｘとｙの値は0<=x<=1、0<=y<=1、9.62x+32.3y<=1、3.11(1-x)(1-y)+3.85(1-x)y+3.54x(1-y)+4.15xyがほぼ３．１１に等しいという関係を満たしている。これにより、実質的に相分離がなくAlNとほぼ等しい格子定数を有するAlInNP層が得られる。ひいては、AlInNP層とAlN層のヘテロ界面に形成された２次元電子ガスが（欠陥が存在する場合に発生するような）AlInNP層の原子含有率の揺らぎによって散乱されることがないために、高い電子速度を達成することができる。さらに、AlInNPのバンドギャップは５．２ｅＶより大きいので、図３６Ａに示す構造を使用することにより信頼性のある高温動作を実現することができる。

【０１１７】

同様に、図３６Ｂは本発明にかかるヘテロ接合バイポーラトランジスタ（ＨＢＴ）の実施形態を示す。AlN基板２５５０上には、４００ｎｍ厚のｎ型AlNコレクタ層２５５５が形成され、その次に、５０ｎｍ厚のｐ型AlInNPベース層２５６０と３００ｎｍ厚のｎ型AlNエミッタ層２５６５が形成されている。ベース電極２５７０、コレクタ電極２５７５及びエミッタ電極２５８０が従来の方法で形成されている。図３６Ａと同様に、図３６Ｂの実施形態では、AlInNP層のIn含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．０１及び０．０２７に設定されており、ｘとｙは上記と同じ関係を満たす必要がある。図３６Ａと同様に、大きな相分離がなくAlNとほぼ等しい格子定数を有するAlInNP層が実現され、その結果、非常に

高品質のAlInNP/GaNヘテロ接合が得られる。さらに、AlNエミッタ層のバンドギャップ（６．２ｅＶ）はAlInNPベース層のバンドギャップ（５．２ｅＶ）より大きいので、ｐ型ベース層に発生した正孔がこのベース層内にうまく閉じ込められる。これは、AlNホモ接合バイポーラトランジスタにおいて発生するよりも大きな価電子帯不連続がAlNとAlInNPとの間に発生することに起因する。このことは、ベース電流に比べて電流増幅が大きいコレクタ電流が得られるという利点をもたらす。さらに、上述したように、AlInNPとAlN層のバンドギャップは大きいので、トランジスタを高温での用途に信頼性を持って利用することができる。

【０１１８】

次に、図３７に、本発明のフォトトランジスタとしての実施例を示す。この点に関して、GaNとAlNは広いバンドギャップ（GaNの場合、３５０ｎｍの光の波長に相当する３．５ｅＶ、AlNの場合、２００ｎｍの光の波長に相当する６．２ｅＶ）を有するので、GaNとAlNは紫外光領域の光検出器にとって魅力的な材料である。直接バンドギャップとAlN合金の組成範囲全体の中でのAlGaNの可用性のために、AlGaN/GaNによる可視光検出器は、高遮断波長が調整可能であるとともに、量子効率が高いという利点をもたらす。しかしながら、AlGaNの格子定数は欠陥が形成されやすいほどGaNと異なっており、漏れ電流を増加させることになる。In含有率（ｘ）及びAs含有率（ｙ）が0<=x<=1、0<=y<=1、9.62x+32.3y<=1の関係を満たす$Al_{1-x}In_xN_{1-y}P_y$は、５ｅＶより大きいバンドギャップを提供するだけでなく、各層内に同じ原子含有率分布で形成することができるので、AlInNP材料を可視光検出器用途に利用することも可能である。さらに、In含有率ｘ及びP含有率ｙが3.11(1-x)(1-y)+3.85(1-x)y+3.54x(1-y) +4.15xyがほぼ３．１１に等しいという関係を満たす$Al_{1-x}In_xN_{1-y}P_y$の４元材料は、AlNとほぼ等しい格子定数と５ｅＶより大きいバンドギャップを有する。したがって、In含有率ｘ及びP含有率ｙが上記の関係を満たすAlInNP/AlN材料を使用することにより、欠陥密度の低いＵＶ光検出器を実現することができる。他の周波数の検出が必要な場合には、わずかな変更しか必要としない。

【０１１９】

図３７に示すように、本発明の半導体装置は、AlInNP/AlN材料を使用してヘテロ接合フォトトランジスタ（ＨＰＴ）の形で実施可能である。AlN基板２７００上には、ｎ型AlNコレクタ層２７０５がおよそ５００ｎｍ厚に形成され、その次に、２００ｎｍ厚のｐ型AlInNPベース層２７１０が形成されている。その後、およそ５００ｎｍ厚のAlNエミッタ層２７１５が形成されている。エミッタ層の上には、光がベース層に当たるようにリング状の電極２７２０が形成されている。

【０１２０】

典型的な構造では、AlInNP層のIn含有率ｘ及びP含有率ｙはそれぞれ０．０１及び０．０２７に設定される。この場合、ｘとｙの値は0<=x<=1、0<=y<=1、9.62x+32.3y<=1、3.11(1-x)(1-y)+3.85(1-x)y+3.54x(1-y)+4.15xyがほぼ３．１１に等しいという関係を満たすので、AlInNP層をAlNと等しい格子定数を持ちながら相分離をほぼ回避するように形成して、高品質のAlInNP/AlNヘテロ接合を形成することが可能になる。AlNエミッタ層のバンドギャップ（２００ｎｍの光の波長に相当する６．２ｅＶ）はAlInNPベース層のバンドギャップ（２３０ｎｍの光の波長に相当する５．２ｅＶ）よりも大きい。光はエミッタ側に照射される。図示の実施形態の場合、２００ｎｍと２３０ｎｍの間の波長範囲の照射光はエミッタ層を透過するので、AlInNPベース層に吸収されて電子と正孔の対を発生させる。AlNとAlInNPとの間の価電子帯の不連続が従来のAlNホモ接合フォトトランジスタの場合よりも大きいので、ｐ型ベース層の光吸収によって生成された正孔はベース層にうまく閉じ込められる。これにより、より大きなエミッタ電流が誘導されることになり、ホモ接合フォトトランジスタの場合よりも優れた電子中和がベース領域にもたらされる。したがって、高量子効率かつ高感度、及びその結果として入射光からコレクタ電流への高変換効率を有する青色光検出器が得られる。

【０１２１】

図３７のフォトトランジスタに加えて、本発明に従ってフォトダイオードを実現すること

も可能である。図３８では、ｎ型基板２９００が設けられており、その上に$Al_{1-x}In_xN_{1-y}P_y$４元材料または等価物からなるｎ型層２９１０が形成され、この層は図３７に関連して上述した関係に従っている。その後、活性層２９１５が形成され、その上方には、ｐ型$Al_{1-x}In_xN_{1-y}P_y$４元材料からなる層２９２０が形成されている。そして、この層２９２０の上方に、ｐ型第２クラッド層２９２５が形成され、そこには、層２９２０の一部を露出させるようにウィンドウ２９３０が形成されている。ウィンドウ２９３０は光を層２９２０に当てることができる入口となって正孔を発生させる。従来の方法で一対の電極２９３５、２９４０が形成されてもよく、その場合、電極２９３５は、通常、ウィンドウ２９３０周りのリング状の電極である。第２クラッド層２９２５のバンドギャップは層２９２０のバンドギャップよりも大きいことが好ましく、さらに、層２９２０のバンドギャップは活性層２９１５のバンドギャップよりも大きいことが好ましいことが理解できる。そのような手法によれば、最大限広い範囲の光の波長に対して感度がよくなる。より狭い波長範囲が望ましい場合には、層２９２０よりも小さなバンドギャップを有する材料を層２９２５に対して使用してもよい。さらに、層２９１０、２９１５、２９２０は、少なくともいくつかの場合には、適正な光電性ｐｎ接合を提供するので、全ての実施形態に層２９２５を含ませる必要はない。

【０１２２】

本発明の好ましい実施形態と様々な代替物について説明したが、当業者であれば、本明細書中の教示を与えられると、本発明から逸脱することなく多数の代替物及び等価物が存在することが理解できるであろう。したがって、本発明は上記の説明によって限定されるものではなく、特許請求の範囲によってのみ限定されるものである。

【図面の簡単な説明】

【図１】　従来の３元材料系を用いた従来技術のレーザダイオード構造を示す。

【図２】　本発明の第１の実施形態にかかる半導体構造を断面図で示す。

【図３】　図１の構造にかかるレーザダイオードの光－電流特性のグラフを示す。

【図４】　本発明の第１の実施形態にかかる半導体構造に関する典型的な一連の製造工程を示す。

【図５】　第２の実施形態にかかる半導体構造を断面図で示す。

【図６】　図４の構造にかかるレーザダイオードの光－電流特性のグラフを示す。

【図７】　本発明の第１の実施形態にかかる半導体構造に関する典型的な一連の製造工程を示す。

【図８】　第３の実施形態の半導体レーザダイオードの断面図である。

【図９】　第３の実施形態のレーザダイオードの光－電流特性を示す。

【図１０】　第３の実施形態の一実験例における半導体レーザダイオードの一連の製造工程を示す。

【図１１】　第４の実施形態の半導体レーザダイオードの断面図である。

【図１２】　第４の実施形態のレーザダイオードの光－電流特性を示す。

【図１３】　第４の実施形態の一実験例における半導体レーザダイオードの一連の製造工程を示す。

【図１４】　様々な成長温度において相分離領域と相分離のない領域との間の境界をプロット形式で示す。

【図１５】　約１０００℃より低い成長温度で相分離を回避するためのGaAlNPにおけるGa含有率とP含有率の含有率選択領域を示す。

【図１６】　GaNの格子定数とほぼ等価のGaAlNPの格子定数を生じると同時に、約１０００℃より低い成長温度での相分離を回避するためのGaAlNPにおけるGa含有率とP含有率の含有率選択線を示す。

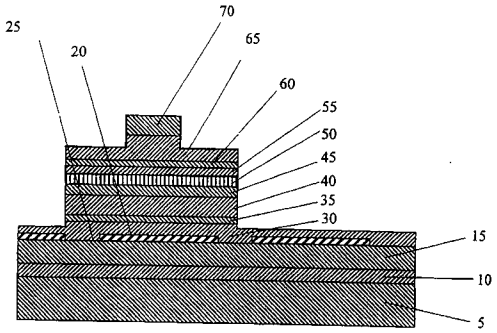
【図１７】　(Ａ)及び(Ｂ)は本発明の材料系にしたがって構成されたバイポーラ及びＦＥＴトランジスタの図を示す。

【図１８】　フォトトランジスタとしての本発明の実施例を示す。

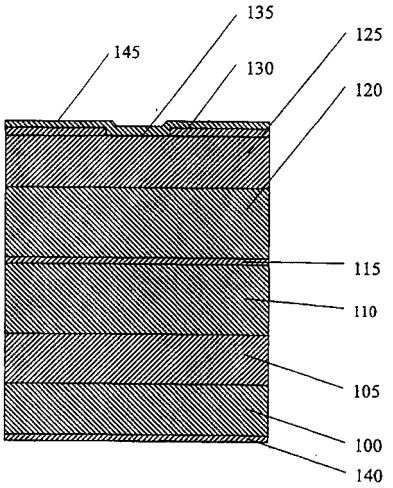
【図１９】　フォトダイオードとしての本発明の実施例を示す。

【図２０】　本発明の第５の実施形態にかかる半導体構造を断面図で示す。
【図２１】　本発明の第５の実施形態にかかる半導体構造に関する典型的な一連の製造工程を示す。
【図２２】　第６の実施形態にかかる半導体構造を断面図で示す。
【図２３】　本発明の第５の実施形態にかかる半導体構造に関する典型的な一連の製造工程を示す。
【図２４】　様々な成長温度において相分離領域と相分離のない領域との間の境界をプロット形式で示す。
【図２５】　約１０００℃より低い成長温度で相分離を回避するためのInGaNPにおけるGa含有率とP含有率の含有率選択領域を示す。
【図２６】　GaNの格子定数とほぼ等価のInGaNPの格子定数を生じると同時に、約１０００℃より低い成長温度での相分離を回避するためのInGaNPにおけるGa含有率とP含有率の含有率選択線を示す。
【図２７】　(Ａ)及び(Ｂ)は本発明の材料系にしたがって構成されたバイポーラ及びＦＥＴトランジスタの図を示す。
【図２８】　フォトトランジスタとしての本発明の実施例を示す。
【図２９】　フォトダイオードとしての本発明の実施例を示す。
【図３０】　本発明の第７の実施形態にかかる半導体構造を断面図で示す。
【図３１】　本発明の第７の実施形態にかかる半導体構造に関する典型的な一連の製造工程を示す。
【図３２】　第８の実施形態にかかる半導体構造を断面図で示す。
【図３３】　本発明の第８の実施形態にかかる半導体構造に関する典型的な一連の製造工程を示す。
【図３４】　様々な成長温度において相分離領域と相分離のない領域との間の境界をプロット形式で示す。
【図３５】　約１０００℃より低い成長温度で相分離を回避するためのAlInNPにおけるIn含有率とP含有率の含有率選択領域を示す。
【図３６】　(Ａ)及び(Ｂ)は本発明の材料系にしたがって構成されたバイポーラ及びＦＥＴトランジスタの図を示す。
【図３７】　フォトトランジスタとしての本発明の実施例を示す。
【図３８】　フォトダイオードとしての本発明の実施例を示す。

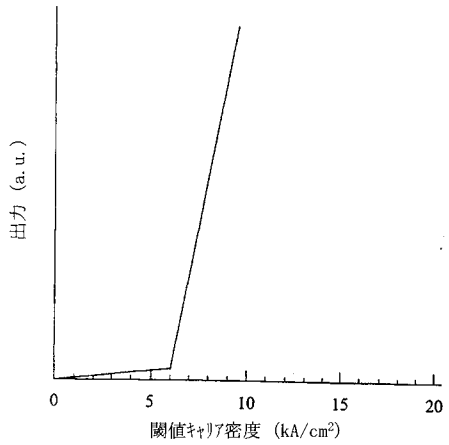
【図１】


25
20
70
65
60
55
50
45
40
35
30
15
10
5

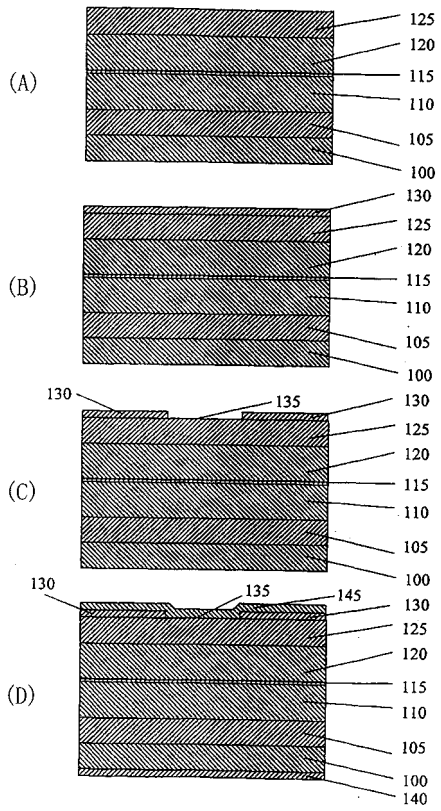
【図２】


135
145
125
130
120
115
110
105
100
140

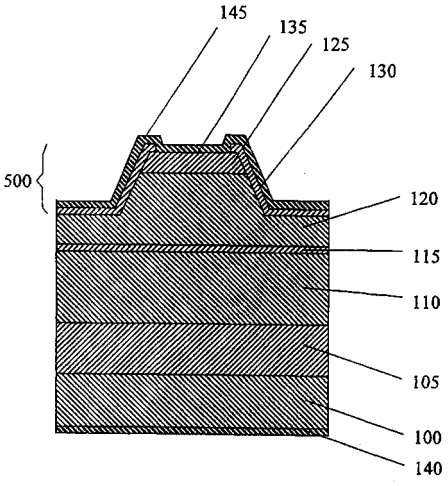
【図３】


出力（a.u.）
0
5
10
15
20
閾値キャリア密度（kA/cm²）

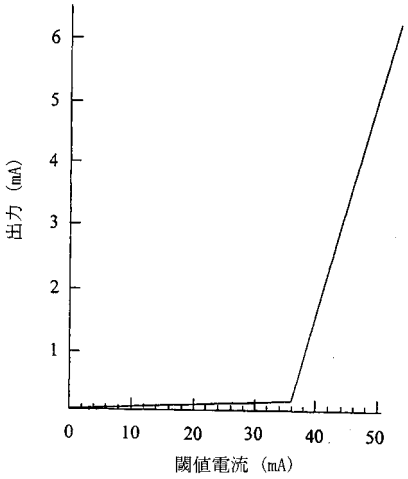
【図４】


(A)
125
120
115
110
105
100
(B)
130
125
120
115
110
105
100
(C)
130
135
130
125
120
115
110
105
100
(D)
130
135
145
130
125
120
115
110
105
100
140

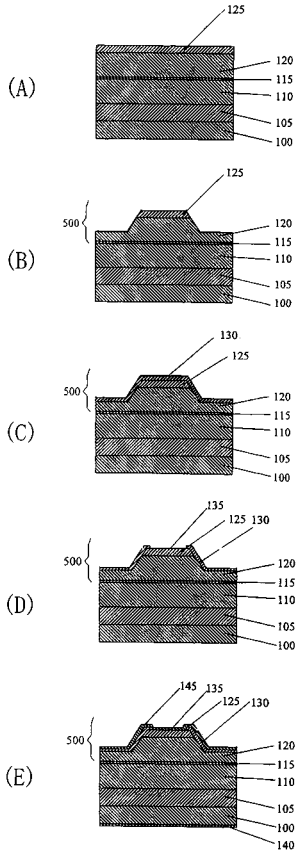
【図５】


145
135
125
130
500
120
115
110
105
100
140

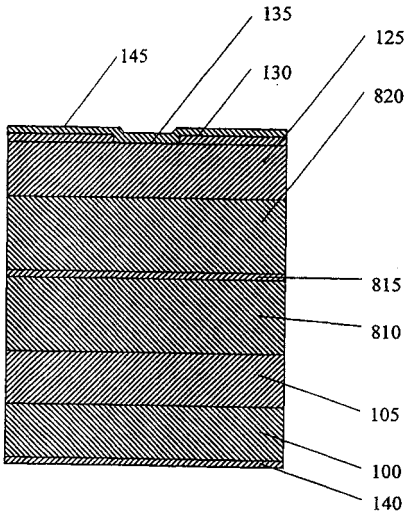
【図６】


出力（mA）
6
5
4
3
2
1
0
10
20
30
40
50
閾値電流（mA）

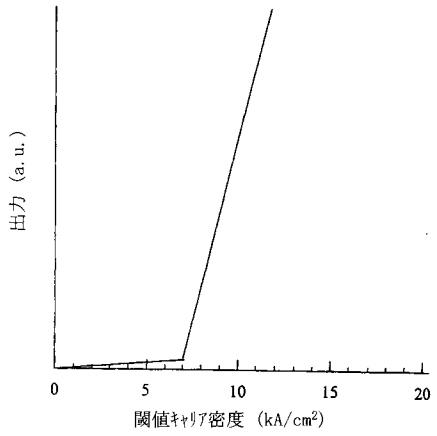
【図７】


(A)
(B)
(C)
(D)
(E)
500
125
130
135
145
120
115
110
105
100
140

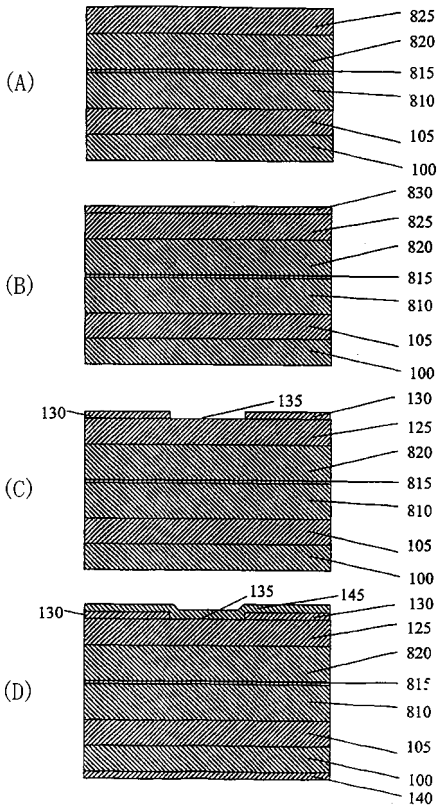
【図８】


145
135
130
125
820
815
810
105
100
140

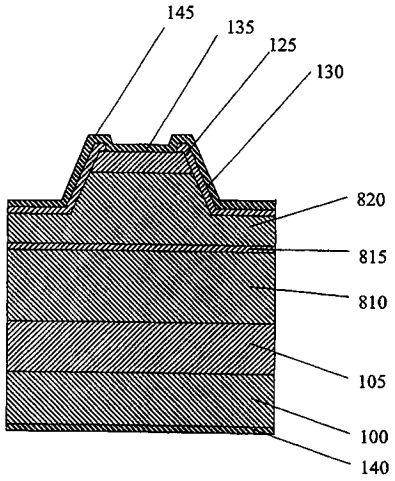
【図９】



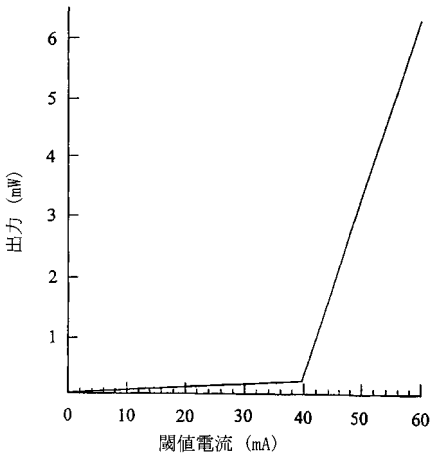
【図１０】



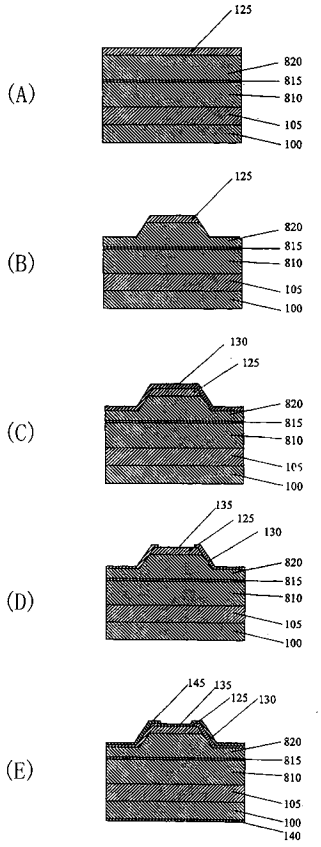
【図１１】



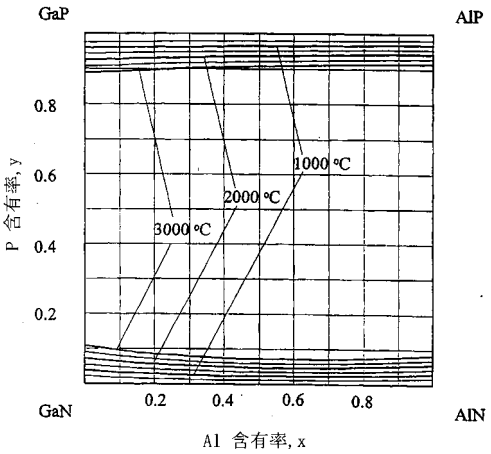
【図１２】



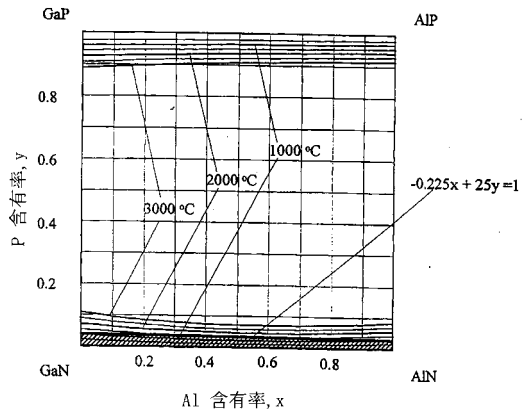
【図１３】



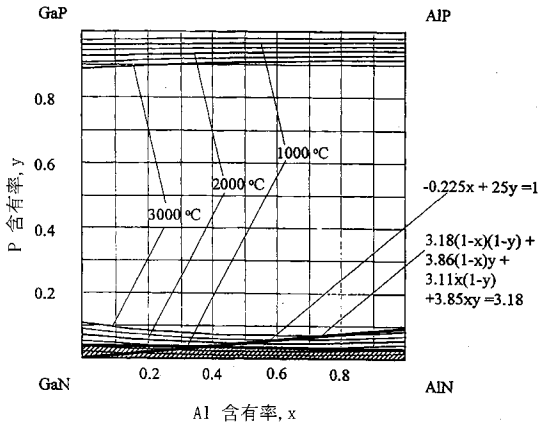
【図１４】



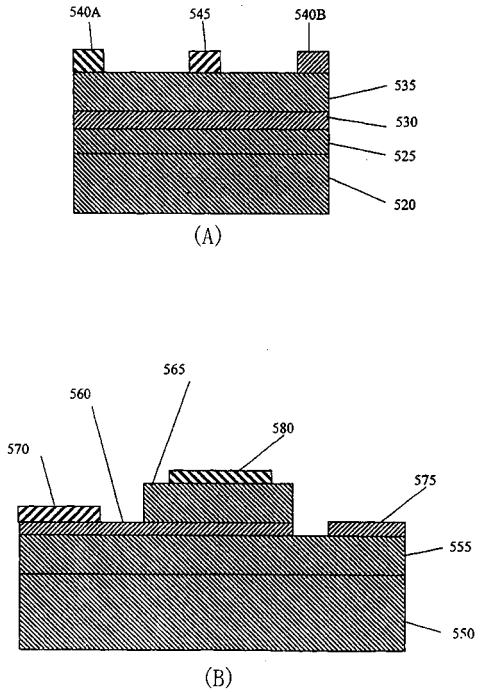
【図１５】



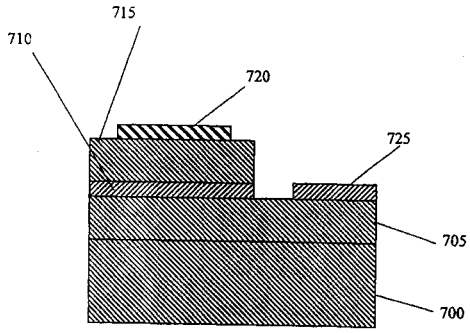
【図１６】



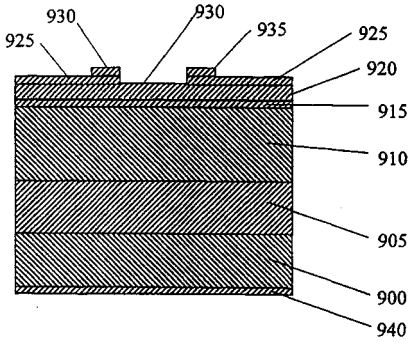
【図１７】



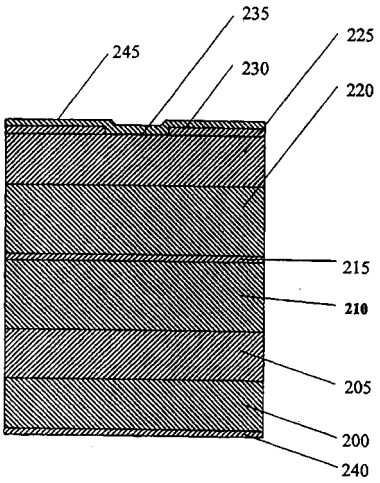
【図１８】



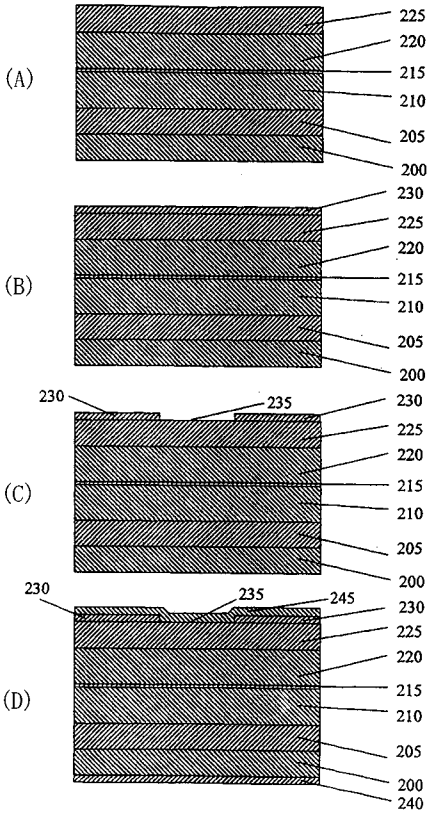
【図１９】



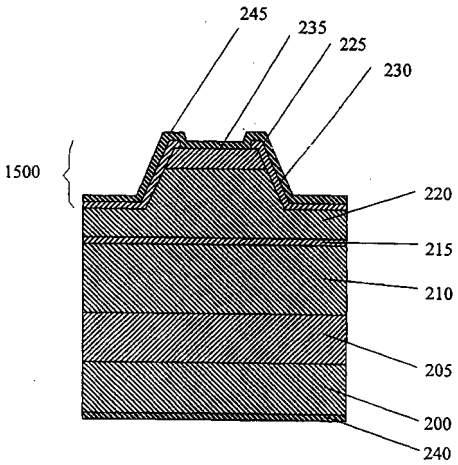
【図２０】



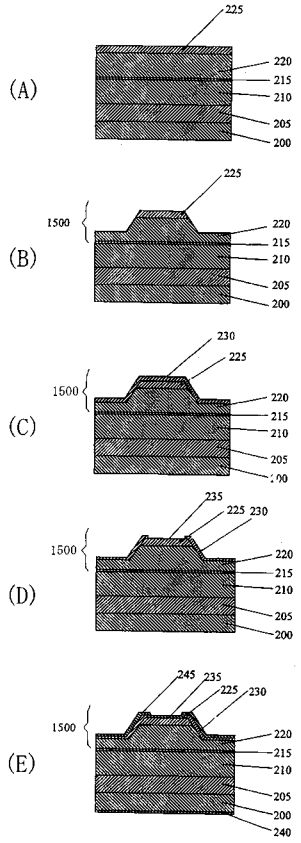
【図２１】



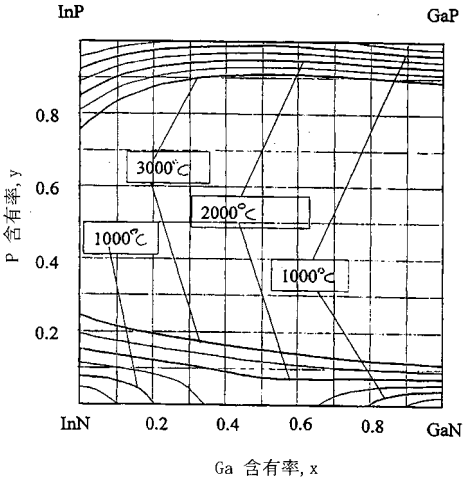
【図２２】



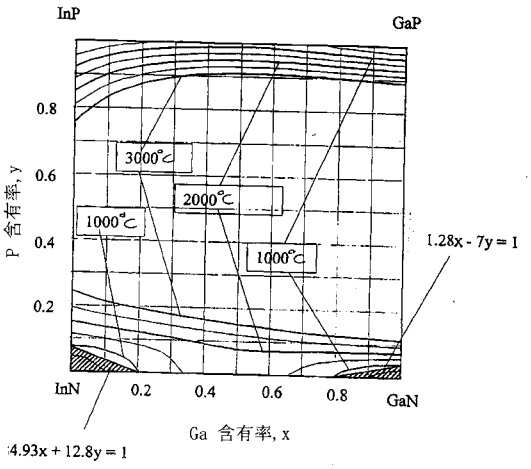
【図２３】



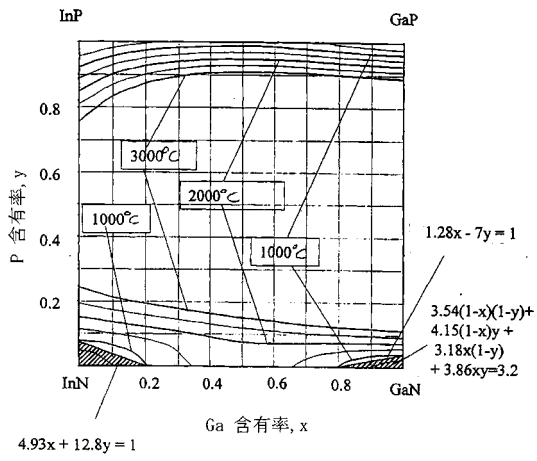
【図２４】



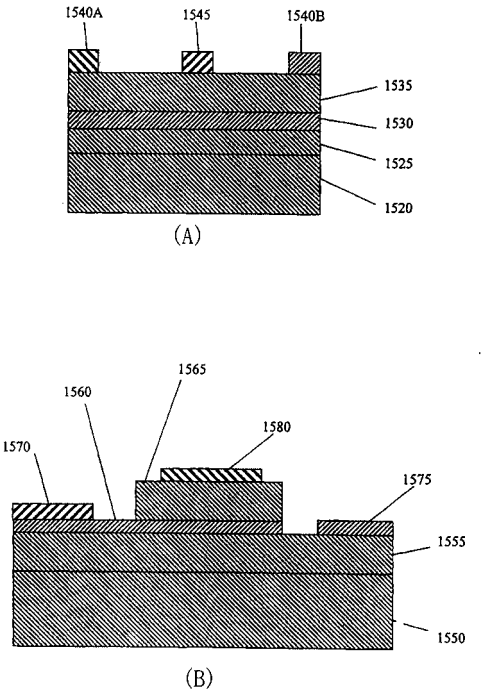
【図２５】



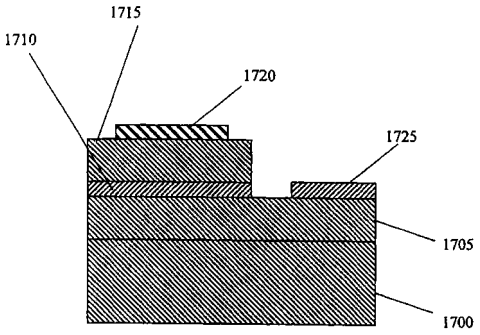
【図２６】



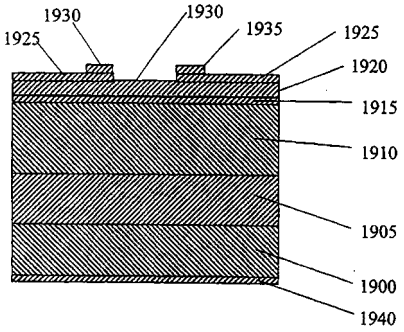
【図２７】



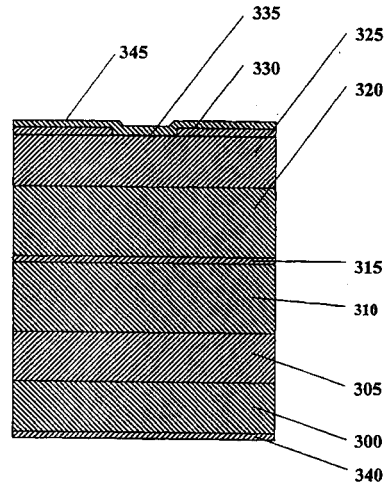
【図２８】



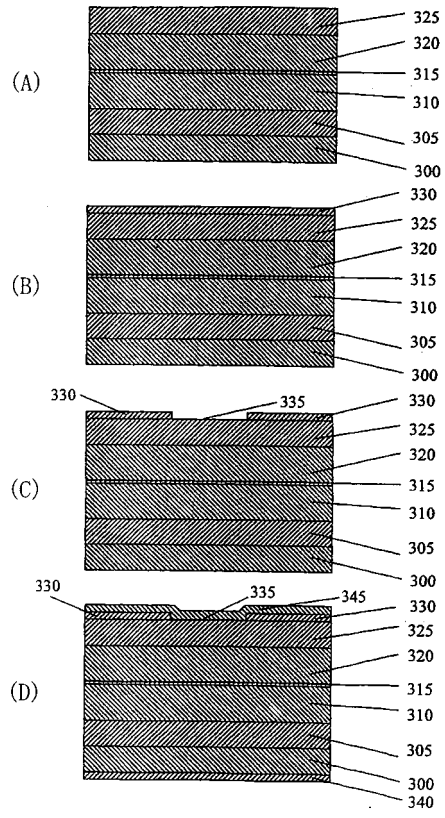
【図２９】



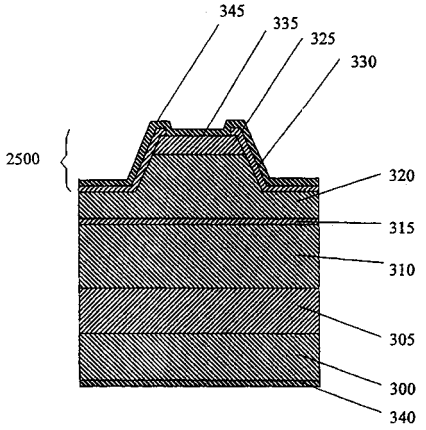
【図３０】



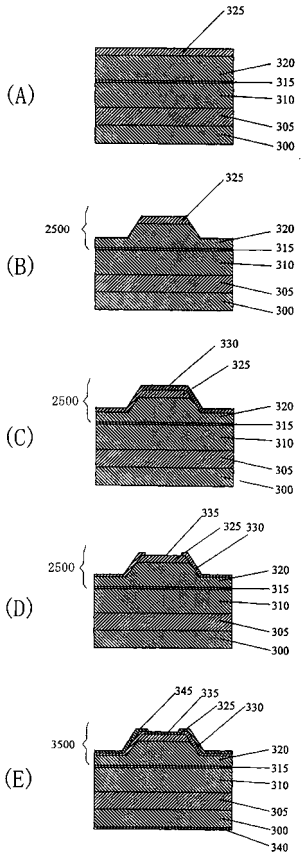
【図３１】



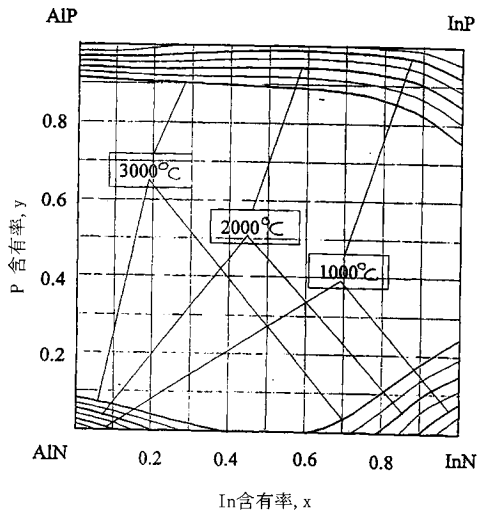
【図３２】



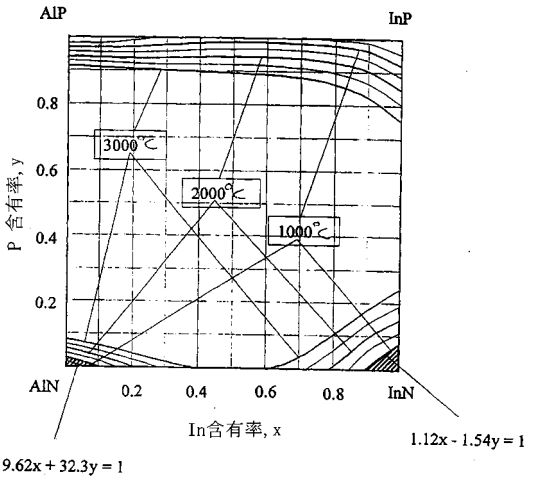
【図３３】



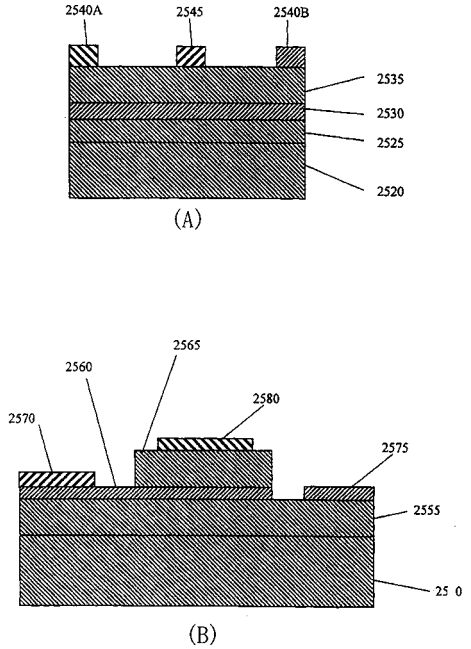
【図３４】



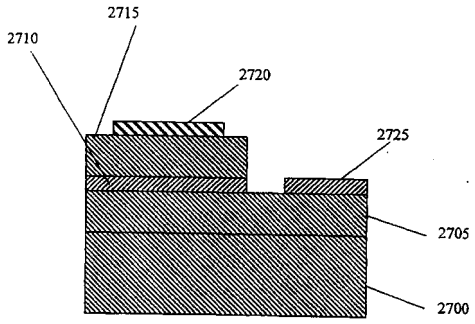
【図３５】



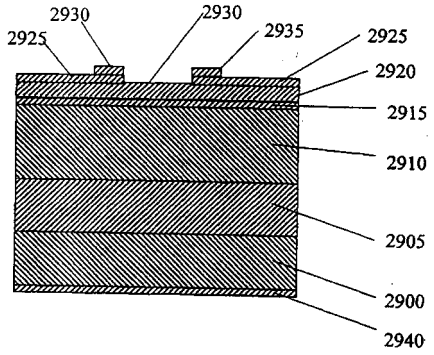
【図３６】


2540A
2545
2540B
2535
2530
2525
2520
(A)
2565
2560
2580
2570
2575
2555
25 0
(B)

【図３７】


2715
2710
2720
2725
2705
2700

【図３８】


2930
2930
2925
2935
2925
2920
2915
2910
2905
2900
2940

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H01L 27/14 (2006.01) H01L 29/72 H
H01L 21/331 (2006.01)
H01L 29/737 (2006.01)

(74)代理人 100115510
弁理士 手島 勝
(74)代理人 100115691
弁理士 藤田 篤史
(72)発明者 タカヤマ トオル
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 ９４０１５，メンロパーク，シャロンロード ２２７５ ナンバー２１６
(72)発明者 ババ タカアキ
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 ９４０２４，ロスアルトス，アルボレーダドライヴ ５３５
(72)発明者 ジェームズ エス．ハリス ジュニア
アメリカ合衆国 カリフォルニア州 ９４０３５，スタンフォード，エスプラナーダウェイ ７６３

審査官 佐藤 俊彦

(56)参考文献 特開平０４－１９２５８６（ＪＰ，Ａ）
特開２００１－２４２８２（ＪＰ，Ａ）
特開２０００－３３２２２９（ＪＰ，Ａ）
特開平１１－２８４２２５（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
H01S 5/00-5/50