

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7158272号
(P7158272)

(45)発行日 令和4年10月21日(2022.10.21)

(24)登録日 令和4年10月13日(2022.10.13)

(51)国際特許分類	F I
C 3 0 B 29/38 (2006.01)	C 3 0 B 29/38 C
C 3 0 B 25/18 (2006.01)	C 3 0 B 25/18
C 2 3 C 16/34 (2006.01)	C 3 0 B 29/38 D
H 0 1 L 21/205 (2006.01)	C 2 3 C 16/34
	H 0 1 L 21/205

請求項の数 9 (全20頁)

(21)出願番号	特願2018-241389(P2018-241389)	(73)特許権者	000126115 エア・ウォーター株式会社
(22)出願日	平成30年12月25日(2018.12.25)		大阪府大阪市中央区南船場二丁目12番8号
(65)公開番号	特開2020-100539(P2020-100539 A)	(74)代理人	100110788 弁理士 椿 豊
(43)公開日	令和2年7月2日(2020.7.2)	(72)発明者	大内 澄人 長野県松本市梓川倭4007番地3 エア・ウォーター株式会社内
審査請求日	令和2年12月10日(2020.12.10)	(72)発明者	鈴木 悠宜 長野県松本市梓川倭4007番地3 エア・ウォーター株式会社内
前置審査		(72)発明者	生川 満久 長野県松本市梓川倭4007番地3 エア・ウォーター株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 化合物半導体基板

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

S i 基板と、

前記 S i 基板上に形成された A l を含む第 1 の窒化物半導体層であって、厚さ方向に沿って前記 S i 基板から離れるに従って A l 濃度が減少する傾斜層である第 1 の窒化物半導体層と、

前記第 1 の窒化物半導体層上に形成された第 2 の窒化物半導体層であって、前記第 1 の窒化物半導体層の平均 A l 濃度よりも低い平均 A l 濃度を有する第 2 の窒化物半導体層と、

前記第 2 の窒化物半導体層上に形成された A l を含む第 3 の窒化物半導体層であって、前記第 2 の窒化物半導体層の平均 A l 濃度よりも高い平均 A l 濃度を有する第 3 の窒化物半導体層とを備え、

前記第 3 の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度は、前記第 1 の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度よりも低く、

前記第 1 の窒化物半導体層内に存在している貫通転位の少なくとも一部は、前記第 2 の窒化物半導体層によって覆われており、

前記第 1 の窒化物半導体層と前記第 2 の窒化物半導体層との界面は滑り面である、化合物半導体基板。

【請求項2】

前記第 2 の窒化物半導体層は G a N よりなり、3 n m 以上 1 0 0 n m 以下の厚さを有する、請求項 1 に記載の化合物半導体基板。

【請求項 3】

前記第 1 の窒化物半導体層は、
下部層と、

前記下部層上に形成され、前記下部層の平均 Al 濃度よりも低い平均 Al 濃度を有する上部層とを含む、請求項 1 または 2 に記載の化合物半導体基板。

【請求項 4】

前記第 1 の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度 D_A 、前記第 3 の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度 D_B とした場合、貫通転位密度 D_A に対する貫通転位密度 D_B の比率 (D_B / D_A) は 0 より大きく 0.6 以下である、請求項 1 ~ 3 のいずれかに記載の化合物半導体基板。

10

【請求項 5】

前記第 1 の窒化物半導体層の厚さ W_1 に対する前記第 2 の窒化物半導体層の厚さ W_2 の比率 (W_2 / W_1) は 0.007 以上 0.26 以下である、請求項 1 ~ 4 のいずれかに記載の化合物半導体基板。

【請求項 6】

前記第 3 の窒化物半導体層上に形成された GaN 層をさらに備えた、請求項 1 ~ 5 のいずれかに記載の化合物半導体基板。

【請求項 7】

前記第 1 の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度 D_A 、前記 GaN 層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度 D_C とした場合、貫通転位密度 D_A に対する貫通転位密度 D_C の比率 (D_C / D_A) は 0 より大きく 0.3 以下である、請求項 6 に記載の化合物半導体基板。

20

【請求項 8】

上部複合層をさらに備え、
前記上部複合層は、

上下方向に積層された複数の上部 GaN 層と、

前記複数の上部 GaN 層の各々の間に形成された Al を含む上部窒化物半導体層とを含み、

前記 GaN 層は前記複数の上部 GaN 層のうち最下層の上部 GaN 層であり、

30

前記複数の上部 GaN 層の各々の厚さ W_3 に対する前記上部窒化物半導体層の厚さ W_4 の比率 (W_4 / W_3) は 0.0015 以上 0.025 以下である、請求項 6 または 7 に記載の化合物半導体基板。

【請求項 9】

前記 Si 基板上に形成された SiC 層と、

前記 SiC 層上に形成された AlN よりなるバッファ層とをさらに備え、

前記第 1 の窒化物半導体層は前記バッファ層上に形成される、請求項 1 ~ 8 のいずれかに記載の化合物半導体基板。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

40

【0001】

本発明は、化合物半導体基板に関し、より特定的には、Al (アルミニウム) を含む窒化物半導体層内の貫通転位を低減することのできる化合物半導体基板に関する。

【背景技術】

【0002】

GaN (窒化ガリウム) は、Si (ケイ素) に比べてバンドギャップが大きく、絶縁破壊電界強度が高いワイドバンドギャップ半導体材料として知られている。GaN は、他のワイドバンドギャップ半導体材料と比べても高い耐絶縁破壊性を有するので、次世代の低損失なパワーデバイスへの適用が期待されている。

【0003】

50

GaNを用いた半導体デバイスのスタート基板（下地基板）にSi基板を用いた場合、GaNとSiとの間の格子定数および熱膨張係数の大きな差に起因して、基板に反りが発生したり、GaN層内にクラックが発生したりする現象が起こりやすくなる。このため、スタート基板として、Si基板上にSiC（炭化ケイ素）層などを形成した化合物半導体基板を採用することで、GaNとSiとの間の格子定数および熱膨張係数の差をSiC層などによって緩和する技術が提案されている。

【0004】

このような技術として、下記特許文献1などには、基板の反りやクラックの発生を抑止する技術が開示されている。下記特許文献1には、SiC層と、SiC層上に形成されたAlN（窒化アルミニウム）バッファ層と、AlNバッファ層上に形成されたAlを含む窒化物半導体層と、窒化物半導体層上に形成された第1のGaN層と、第1のGaN層に接触して第1のGaN層上に形成された第1のAlN中間層と、第1のAlN中間層に接触して第1のAlN中間層上に形成された第2のGaN層とを備えた化合物半導体基板が開示されている。

10

【0005】

従来のGaN層を備えた半導体基板は、下記特許文献2にも開示されている。下記特許文献2には、SiCよりなる基板と、基板上に形成されたAlNよりなる核生成層と、核生成層上に形成されたAlGaN（窒化アルミニウムガリウム）よりなる傾斜層と、傾斜層上に形成されたGaNよりなる窒化物層とを備えた半導体構造が開示されている。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【文献】国際公開第2017/069087号
特表2010-521065号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

従来のGaN層を備えた半導体基板においては、バッファ層としてAlを含む窒化物半導体層（AlGaNなど）が用いられることが多かった。しかし、従来のAlを含む窒化物半導体層には、内部の貫通転位が多いという問題があった。また、Alを含む窒化物半導体層上にGaN層を形成した場合には、貫通転位がGaN層内にも引き継がれ、GaN層内の貫通転位も増加していた。

30

【0008】

本発明は、上記課題を解決するためのものであり、その目的は、Alを含む窒化物半導体層内の貫通転位を低減することのできる化合物半導体基板を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明の一の局面に従う化合物半導体基板は、Si基板と、Si基板上に形成されたAlを含む第1の窒化物半導体層であって、厚さ方向に沿ってSi基板から離れるに従ってAl濃度が減少する傾斜層である第1の窒化物半導体層と、第1の窒化物半導体層上に形成された第2の窒化物半導体層であって、第1の窒化物半導体層の平均Al濃度よりも低い平均Al濃度を有する第2の窒化物半導体層と、第2の窒化物半導体層上に形成されたAlを含む第3の窒化物半導体層であって、第2の窒化物半導体層の平均Al濃度よりも高い平均Al濃度を有する第3の窒化物半導体層とを備え、第3の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度は、第1の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度よりも低く、第1の窒化物半導体層内に存在している貫通転位の少なくとも一部は、第2の窒化物半導体層によって覆われており、第1の窒化物半導体層と第2の窒化物半導体層との界面は滑り面である。

40

【0010】

上記化合物半導体基板において好ましくは、第2の窒化物半導体層はGaNよりなり、

50

3 nm以上100 nm以下の厚さを有する。

【0011】

上記化合物半導体基板において好ましくは、第1の窒化物半導体層は、下部層と、下部層上に形成され、下部層の平均Al濃度よりも低い平均Al濃度を有する上部層とを含む。

【0012】

上記化合物半導体基板において好ましくは、第1の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度DA、第3の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度DBとした場合、貫通転位密度DAに対する貫通転位密度DBの比率(DB/DA)は0より大きく0.6以下である。

【0013】

上記化合物半導体基板において好ましくは、第1の窒化物半導体層の厚さW1に対する第2の窒化物半導体層の厚さW2の比率($W2/W1$)は0.007以上0.26以下である。

【0014】

上記化合物半導体基板において好ましくは、第3の窒化物半導体層上に形成されたGaN層をさらに備える。

【0015】

上記化合物半導体基板において好ましくは、第1の窒化物半導体層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度DA、GaN層内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度DCとした場合、貫通転位密度DAに対する貫通転位密度DCの比率(DC/DA)は0より大きく0.3以下である。

【0016】

上記化合物半導体基板において好ましくは、上部複合層をさらに備え、上部複合層は、上下方向に積層された複数の上部GaN層と、複数の上部GaN層の各々の間に形成されたAlを含む上部窒化物半導体層とを含み、GaN層は複数の上部GaN層のうち最下層の上部GaN層であり、複数の上部GaN層の各々の厚さW3に対する上部窒化物半導体層の厚さW4の比率($W4/W3$)は0.0015以上0.025以下である。

【0017】

上記化合物半導体基板において好ましくは、Si基板上に形成されたSiC層と、SiC層上に形成されたAlNよりなるバッファ層とをさらに備え、第1の窒化物半導体層はバッファ層上に形成される。

【発明の効果】

【0018】

本発明によれば、Alを含む窒化物半導体層内の貫通転位を低減することのできる化合物半導体基板を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本発明の第1の実施の形態における化合物半導体基板CS1の構成を示す断面図である。

【図2】本発明の第1の実施の形態における複合層4内部のAl濃度の分布を示す図である。

【図3】GaN層42aを構成するGaNの二次元成長を模式的に示す図である。

【図4】本発明の第2の実施の形態における化合物半導体基板CS2の構成を示す断面図である。の構成を示す断面図である。

【図5】本発明の第1の実施例における化合物半導体基板CS1の作製条件、ならびに貫通転位数の計測位置P1、P2、およびP3を示す断面図である。

【図6】本発明の第1の実施例における化合物半導体基板CS100の作製条件、ならびに貫通転位数の計測位置P1、P2、およびP3を示す断面図である。

【図7】本発明の第1の実施例における貫通転位密度の計測結果を示す図である。

【図8】本発明の第1の実施例における化合物半導体基板の最表層(Al窒化物半導体層

10

20

30

40

50

10) の表面の顕微鏡写真およびエッチピットの密度の計測結果を示す図である。

【図9】本発明の第2の実施例における試料C1、C2、およびC3の各々の反り量の計測結果を示す図である。

【図10】本発明の第2の実施例における試料C1、C2、およびC3の各々の反り量の計測結果から得られたGaN層42bの厚さと反り量との関係を示すグラフである。

【図11】本発明の第2の実施例における試料D1、D2、およびD3の各々の反り量の計測結果を示す図である。

【図12】本発明の第2の実施例における試料D1、D2、およびD3の各々の反り量の計測結果から得られたAl窒化物半導体層52aおよび52bの厚さと反り量との関係を示すグラフである。

10

【発明を実施するための形態】

【0020】

以下、本発明の実施の形態について、図面に基づいて説明する。

【0021】

[第1の実施の形態]

【0022】

図1は、本発明の第1の実施の形態における化合物半導体基板CS1の構成を示す断面図である。

【0023】

図1を参照して、本実施の形態における化合物半導体基板CS1は、HEMT(High Electron Mobility Transistor)を含んでいる。化合物半導体基板CS1は、Si基板1(Si基板の一例)と、SiC層2(SiC層の一例)と、AlNバッファ層3(バッファ層の一例)と、複合層4と、複合層5(上部複合層の一例)と、GaN層7と、Al窒化物半導体層10とを備えている。

20

【0024】

Si基板1は、たとえばp⁺型のSiよりなっている。Si基板1の表面には(111)面が露出している。なお、Si基板1は、n型の導電性を有していてもよいし、半絶縁性であってもよい。Si基板1の表面には(100)面や(110)面が露出していてもよい。Si基板1は、たとえば6インチの直径を有しており、1000μmの厚さを有している。

30

【0025】

SiC層2は、Si基板1に接触しており、Si基板1上に形成されている。SiC層2は、3C-SiC、4H-SiC、または6H-SiCなどよりなっている。特に、SiC層2がSi基板1上にエピタキシャル成長されたものである場合、一般的に、SiC層2は3C-SiCよりなっている。

【0026】

SiC層2は、Si基板1の表面を炭化することで得られたSiCよりなる下地層上に、MBE(Molecular Beam Epitaxy)法、CVD(Chemical Vapor Deposition)法、またはLPE(Liquid Phase Epitaxy)法などを用いて、SiCをホモエピタキシャル成長させることによって形成されてもよい。SiC層2は、Si基板1の表面を炭化することのみによって形成されてもよい。さらに、SiC層2は、Si基板1の表面に(またはバッファ層を挟んで)ヘテロエピタキシャル成長させることによって形成されてもよい。SiC層2は、たとえばN(窒素)などがドーブされており、n型の導電性を有している。SiC層2は、たとえば0.1μm以上3.5μm以下の厚さを有している。なお、SiC層2はp型の導電性を有していてもよいし、半絶縁性であってもよい。

40

【0027】

なお、AlNバッファ層3の下地層としては任意の材料よりなる層を使用することができる。一例として、Si基板1上にSiC層2を形成せずに、AlNバッファ層3をSi基板1上に直接形成してもよい。この場合、AlNバッファ層3の下地層はSi基

50

板 1 となる。しかし、Si 基板 1 と AlN バッファ層 3 との間に SiC 層 2 を形成することで、メルトバックエッチング (GaN 層中の Ga が拡散し Si 基板 1 中の Si と反応し、Si 基板 1 が破壊される現象) を SiC 層 2 によって確実に抑止することができる。

【 0 0 2 8 】

AlN バッファ層 3 は、SiC 層 2 に接触しており、SiC 層 2 上に形成されている。AlN バッファ層 3 は、SiC 層 2 と、複合層 4 を構成する Al 窒化物半導体層との格子定数の差を緩和するバッファ層としての機能を果たす。AlN バッファ層 3 は、たとえば MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法を用いて形成される。AlN バッファ層 3 の成長温度は、たとえば 1000 以上 Si 融点未満とされる。このとき、Al 源ガスとしては、たとえば TMA (Tri Methyl Aluminium) や、TEA (Tri Ethyl Aluminium) などが用いられる。N 源ガスとしては、たとえば NH₃ (アンモニア) が用いられる。AlN バッファ層 3 は、たとえば 100 nm 以上 1000 nm 以下の厚さを有している。

10

【 0 0 2 9 】

複合層 4 は、AlN バッファ層 3 に接触しており、AlN バッファ層 3 上に形成されている。複合層 4 は、上下方向 (Si 基板 1、SiC 層 2、および AlN バッファ層 3 の積層方向と同じ方向、図 1 中縦方向) に積層された複数の Al 窒化物半導体層と、複数の Al 窒化物半導体層の各々の間に形成された GaN 層とを含んでいる。言い換えれば、複合層 4 は、Al 窒化物半導体層と GaN 層とが 1 以上の回数だけ交互に積層された構成を有しており、複合層 4 の最上層および最下層は、いずれも Al 窒化物半導体層である。

20

【 0 0 3 0 】

複合層 4 を構成する Al 窒化物半導体層の層数は 2 層以上であればよく、9 層以下であることが好ましい。複合層 4 を構成する GaN 層の層数も 1 層以上であればよく、8 層以下であることが好ましい。本実施の形態の複合層 4 は、Al 窒化物半導体層として、2 層の Al 窒化物半導体層 41a (第 1 の窒化物半導体層の一例) および 41b (第 3 の窒化物半導体層の一例) を含んでおり、GaN 層として 1 層の GaN 層 42a (第 2 の窒化物半導体層の一例) を含んでいる。Al 窒化物半導体層 41a は、2 層の Al 窒化物半導体層 41a および 41b のうち Si 基板 1 に最も近い位置に形成されており、AlN バッファ層 3 と接触している。Al 窒化物半導体層 41b は、2 層の Al 窒化物半導体層 41a および 41b のうち Si 基板 1 から最も遠い位置に形成されている。GaN 層 42a は、Al 窒化物半導体層 41a と Al 窒化物半導体層 41b との間に形成されている。言い換えれば、GaN 層 42a は Al 窒化物半導体層 41a 上に形成されており、Al 窒化物半導体層 41b は GaN 層 42a 上に形成されている。

30

【 0 0 3 1 】

複合層 4 を構成する Al 窒化物半導体層の各々は、Al を含む窒化物半導体よりなり、好ましくは AlGaN よりなっている。複合層 4 を構成する Al 窒化物半導体層の各々は、たとえば $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) で表される材料よりなっている。この場合、Al の組成比 x を 0.5 以上にすることで、Ga の組成比が 0.5 以下となり、複合層 4 による反り制御の効果を大きくすることができる。また複合層 4 を構成する Al 窒化物半導体層の各々は、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$) で表される材料よりなっている。複合層 4 を構成する Al 窒化物半導体層は、AlN バッファ層 3 と複合層 5 中の GaN 層との格子定数の差を緩和するバッファ層としての機能を果たす。複合層 4 を構成する Al 窒化物半導体層の総膜厚は、たとえば 100 nm 以上 3 μ m 以下、好ましくは 900 nm 以上 2 μ m 以下の厚さを有している。

40

【 0 0 3 2 】

複合層 4 を構成する Al 窒化物半導体層は、たとえば MOCVD 法を用いて形成される。このとき、Ga 源ガスとしては、たとえば TMG (Tri Methyl Gallium) や、TEG (Tri Ethyl Gallium) などが用いられる。Al 源ガスとしては、たとえば TMA や TEA などが用いられる。N 源ガスとしては、たとえば NH₃ な

50

どが用いられる。

【0033】

複合層4を構成するGaN層は、後述するように化合物半導体基板CS1に凹形状の反りを発生させる役割を果たす。

【0034】

複合層4を構成するGaN層は、たとえばMOCVD法を用いて形成される。このとき、Ga源ガスとしては、たとえばTMGやTEGなどが用いられる。N源ガスとしては、たとえばNH₃などが用いられる。

【0035】

複合層4を構成するGaN層は、たとえば3nm以上100nm以下の厚さを有しており、好ましくは3nm以上50nm以下の厚さを有している。複合層4を構成するGaN層が複数である場合、複合層4を構成するGaN層の各々は、同一の厚さを有していてもよいし、互いに異なる厚さを有していてもよい。

10

【0036】

また、Al窒化物半導体層41aの厚さを厚さW1とし、GaN層42aの厚さを厚さW2とした場合、厚さW1に対する厚さW2の比率(W2/W1)は0.007以上0.26以下であることが好ましい。

【0037】

複合層5は、複合層4(Al窒化物半導体層41b)に接触しており、複合層4(Al窒化物半導体層41b)上に形成されている。複合層5は、上下方向(Si基板1、SiC層2、AlNバッファ層3、および複合層4の積層方向と同じ方向、図1中縦方向)に積層された複数のGaN層と、複数のGaN層の各々の間に形成されたAl窒化物半導体層とを含んでいる。言い換えれば、複合層5は、GaN層とAl窒化物半導体層とが1以上の回数だけ交互に積層された構成を有しており、複合層5の最上層および最下層は、いずれもGaN層である。

20

【0038】

複合層5を構成するGaN層の層数は2層以上であればよく、9層以下であることが好ましい。複合層5を構成するAl窒化物半導体層の層数も1層以上であればよく、8層以下であることが好ましい。本実施の形態の複合層5は、GaN層として3層のGaN層51a、51b、および51c(上部GaN層およびGaN層の一例)を含んでおり、Al窒化物半導体層として2層のAl窒化物半導体層52aおよび52b(上部窒化物半導体層の一例)を含んでいる。GaN層51aは、3層のGaN層51a、51b、および51cのうちSi基板1に最も近い位置に形成されており、複合層4(Al窒化物半導体層41b)と接触している。GaN層51bは、3層のGaN層51a、51b、および51cのうち2番目にSi基板1に近い位置に形成されている。GaN層51cは、3層のGaN層51a、51b、および51cのうちSi基板1から最も遠い位置に形成されている。Al窒化物半導体層52aは、GaN層51aとGaN層51bとの間に形成されている。Al窒化物半導体層52bは、GaN層51bとGaN層51cとの間に形成されている。

30

【0039】

複合層5を構成するGaN層の各々にはC(炭素)がドーピングされていることが好ましい。CはGaN層の絶縁性を高める役割を果たす。CがドーピングされているGaN層は、 1×10^{18} 個/cm³以上 1×10^{21} 個/cm³以下の平均炭素原子濃度を有していることが好ましく、 3×10^{18} 個/cm³以上 2×10^{19} 個/cm³以下の平均炭素濃度を有していることがより好ましい。CがドーピングされているGaN層が複数存在する場合、それらのGaN層は、同一の平均炭素原子濃度を有していてもよいし、互いに異なる平均炭素原子濃度を有していてもよい。

40

【0040】

複合層5を構成するGaN層にCをドーピングする場合、TMGに含まれるCがGaN層に取り込まれるようなGaNの成長条件が採用される。GaN層中にCをドーピングする具体的

50

な方法としては、GaNの成長温度を下げる方法、GaNの成長圧力を下げる方法、または、NH₃に対してTMGのモル流量比を高くする方法などがある。

【0041】

また、複合層5を構成するGaN層の各々は、たとえば550nm以上3000nm以下の厚さを有しており、好ましくは800nm以上2500nm以下の厚さを有している。複合層5を構成するGaN層の各々は、同一の厚さを有していてもよいし、互いに異なる厚さを有していてもよい。複合層5を構成するGaN層は、複合層4を構成するGaN層と同様の方法で形成される。

【0042】

複合層5を構成するAl窒化物半導体層は、後述するように化合物半導体基板CS1に凸形状の反りを発生させる役割を果たす。

10

【0043】

複合層5を構成するAl窒化物半導体層は、Alを含む窒化物半導体よりなっており、好ましくはAlNよりなっている。複合層5を構成するAl窒化物半導体層は、たとえば $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) で表される材料よりなっている。この場合、Alの組成比xを0.5以上にすることで、Gaの組成比が0.5以下となり、複合層4による反り制御の効果を大きくすることができる。また複合層5を構成するAl窒化物半導体層は、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$) で表される材料よりなっている。

【0044】

複合層5を構成するAl窒化物半導体層は、たとえば3nm以上50nm以下の厚さを有しており、好ましくは20nm以下の厚さを有している。複合層5を構成するAl窒化物半導体層が複数である場合、複合層5を構成するAl窒化物半導体層の各々は、同一の厚さを有していてもよいし、互いに異なる厚さを有していてもよい。また、複合層5を構成するAl窒化物半導体層の各々のAl組成比は任意である。複合層5を構成するAl窒化物半導体層は、複合層4を構成するAl窒化物半導体層と同様の方法で形成される。

20

【0045】

複合層5を構成するGaN層の各々の厚さを厚さW3とし、複合層5を構成するAl窒化物半導体層の厚さを厚さW4とした場合、厚さW3に対する厚さW4の比率(W4/W3)は0.0015以上0.025以下であることが好ましい。

【0046】

GaN層7は、複合層5に接触しており、複合層5上に形成されている。GaN層7は、アンドープであり、半絶縁性である。GaN層7は、HEMTの電子走行層となる。GaN層7は、たとえば100nm以上1500nm以下の厚さを有している。GaN層7は、複合層4を構成するGaN層と同様の方法で形成される。

30

【0047】

Al窒化物半導体層10は、GaN層7に接触しており、GaN層7上に形成されている。Al窒化物半導体層10は、Alを含む窒化物半導体よりなっており、たとえば $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) で表される材料よりなっている。またAl窒化物半導体層10は、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$) で表される材料よりなっている。Al窒化物半導体層10は、HEMTの障壁層となる。Al窒化物半導体層10は、たとえば10nm以上50nm以下の厚さを有している。Al窒化物半導体層10は、複合層4を構成するGaN層と同様の方法で形成される。

40

【0048】

図2は、本発明の第1の実施の形態における複合層4内部のAl濃度の分布を示す図である。

【0049】

図2を参照して、Al窒化物半導体層41aは、Al濃度が厚さ方向に沿ってSi基板1から離れるに従って(図1中上方向に向かって)減少する傾斜層である。本実施の形態では、Al窒化物半導体層41aは、下部層411(下部層の一例)と、下部層411上に形成された上部層412(上部層の一例)とを含んでいる。下部層411および上部層

50

4 1 2 の各々は厚さ方向に均一な A l 濃度分布を有している。下部層 4 1 1 の平均 A l 濃度は濃度 S 1 a であり、上部層 4 1 2 の平均 A l 濃度は濃度 S 1 b である。上部層 4 1 2 の平均 A l 濃度 (濃度 S 1 b) は、下部層 4 1 1 の平均 A l 濃度 (濃度 S 1 a) よりも低い。A l 窒化物半導体層 4 1 a の平均 A l 濃度は濃度 S 1 である。

【 0 0 5 0 】

なお、A l 窒化物半導体層 4 1 a は、A l 濃度が厚さ方向に沿って S i 基板 1 から離れるに従って一定の割合で減少する傾斜層であってもよい。

【 0 0 5 1 】

G a N 層 4 2 a は、A l 窒化物半導体層 4 1 a の平均 A l 濃度 (濃度 S 1) よりも低い平均 A l 濃度を有している。G a N 層 4 2 a の平均 A l 濃度は 0 (%) であることは言うまでもない。なお、複合層 4 中の G a N 層は、0 より大きく濃度 S 1 よりも低い平均 A l 濃度を有する A l 窒化物半導体層によって置き換えられてもよい。

10

【 0 0 5 2 】

A l 窒化物半導体層 4 1 b は、G a N 層 4 2 a の平均 A l 濃度よりも高い平均 A l 濃度を有している。A l 窒化物半導体層 4 1 b の平均 A l 濃度は濃度 S 2 である。濃度 S 2 は濃度 S 1 よりも高くても低くてもよい。

【 0 0 5 3 】

複合層 4 を構成する各層の A l 濃度は、M O C D V により成膜する際に使用する原料ガスに占める A l 源ガスの濃度比や成膜温度などにより調整可能である。また、複合層 4 を構成する各層の A l 濃度は、S I M S (S e c o n d a r y I o n M a s s S p e c t r o m e t r y) などの方法によって計測される。さらに、化合物半導体基板を構成する各層の厚さは、T E M (T r a n s m i s s i o n E l e c t r o n M i c r o s c o p e) を用いて化合物半導体基板の断面を観察することにより計測される。

20

【 0 0 5 4 】

続いて、本実施の形態の効果の説明する。

【 0 0 5 5 】

図 3 は、G a N 層 4 2 a を構成する G a N の二次元成長を模式的に示す図である。

【 0 0 5 6 】

図 3 を参照して、本願発明者らは、傾斜層である A l 窒化物半導体層 4 1 a 上に、A l 窒化物半導体層 4 1 a の成膜温度よりも低い成膜温度で G a N 層 4 2 a (A l 窒化物半導体層 4 1 a の平均 A l 濃度よりも低い平均 A l 濃度を有する窒化物半導体層) を形成することにより、G a N の二次元成長 (図 3 中矢印で示す方向の成長) が促進されることを見出した。これにより、下層に存在していた貫通転位 T D が G a N 層 4 2 a によって覆われ、G a N 層 4 2 a の上層である A l 窒化物半導体層 4 1 b の貫通転位を低減することができる。ひいては、A l 窒化物半導体層 4 1 b の上層である G a N 層 5 1 a 、5 1 b 、および 5 1 c の貫通転位を低減することができる。

30

【 0 0 5 7 】

具体的には、A l 窒化物半導体層 4 1 b 内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度は、A l 窒化物半導体層 4 1 a 内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度よりも低い。また、A l 窒化物半導体層 4 1 a 内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度 D A 、A l 窒化物半導体層 4 1 b 内の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度 D B とした場合、貫通転位密度 D A に対する貫通転位密度 D B の比率 (D B / D A) は 0 より大きく 0 . 6 以下である。さらに、G a N 層 5 1 a 、5 1 b 、または 5 1 c の内部の厚さ方向の任意の位置における貫通転位密度を貫通転位密度 D C とした場合、貫通転位密度 D A に対する貫通転位密度 D C の比率 (D C / D A) は 0 より大きく 0 . 3 以下である。

40

【 0 0 5 8 】

加えて本実施の形態によれば、化合物半導体基板 C S 1 の反りを容易に制御することができる。

【 0 0 5 9 】

50

なお、以降の説明における「凸形状」および「凹形状」とは、Si基板1を下側、Al窒化物半導体層10を上側にした場合の凸形状および凹形状を意味している。

【0060】

図1を参照して、複合層4におけるGaN層42aと、GaN層42aの下地層であるAl窒化物半導体層41aと、GaN層42aの上層であるAl窒化物半導体層41bとの関係に着目する。

【0061】

GaN層42aとAl窒化物半導体層41aとの界面BR1は滑り面となっている。言い換えれば、界面BR1においてGaN層42aの結晶とAl窒化物半導体層41aの結晶とは不整合となっている。このため、GaN層42aの結晶構造に及ぼすAl窒化物半導体層41aの結晶構造の影響は小さく、GaN層42aの格子定数に及ぼすAl窒化物半導体層41aの格子定数の影響は小さい。

10

【0062】

一方、Al窒化物半導体層41bは、下地層であるGaN層42aの表面の結晶面に揃うように成長する。このため、Al窒化物半導体層41bの結晶構造はGaN層42aの結晶構造の影響を受け、Al窒化物半導体層41bの格子定数はGaN層42aの格子定数の影響を受ける。Al窒化物半導体層41bを構成する材料(AlGaNやAlNなど)の格子定数はGaN層42aを構成するGaNの格子定数よりも小さいため、Al窒化物半導体層41bには引張り応力が加わり、Al窒化物半導体層41bの内部には引張り歪みが発生する。引張り応力の反作用として、複合層4は化合物半導体基板CS1に凹形状の反りを発生させる。

20

【0063】

なお、GaN層42aのエピタキシャル成長の条件(温度や圧力など)を制御することで、GaN層42aとAl窒化物半導体層41aとの界面BR1を滑り面とすることができる。また、Al窒化物半導体層41bのエピタキシャル成長の条件(温度や圧力など)を制御することで、Al窒化物半導体層41bをGaN層42aの表面の結晶面にすべりが生じないように成長(コヒーレント成長)させることができる。

【0064】

凹形状の反りを発生させる複合層4の作用は、複合層4を構成するGaN層が厚くなるほど大きくなる。一方で、複合層4を構成するGaN層が厚すぎるとGaN層の内部にクラックが発生しやすくなる。複合層4を構成するGaN層の内部へのクラックの発生を抑制しつつ複合層4による凹形状の反りを効果的に発生させるためには、複合層4中の1層当たりのGaN層の厚さを3nm以上100nm以下、好ましくは3nm以上50nm以下とし、複合層4中のGaN層の数を1~2層程度にすることが好ましい。

30

【0065】

次に、複合層5におけるAl窒化物半導体層52bと、Al窒化物半導体層52bの下地層であるGaN層51bと、Al窒化物半導体層52bの上層であるGaN層51cとの関係に着目する。

【0066】

Al窒化物半導体層52bとGaN層51bとの界面BR2は滑り面となっている。言い換えれば、界面BR2においてAl窒化物半導体層52bの結晶とGaN層51bの結晶とは不整合となっている。このため、Al窒化物半導体層52bの結晶構造に及ぼすGaN層51bの結晶構造の影響は小さく、Al窒化物半導体層52bの格子定数に及ぼすGaN層51bの格子定数の影響は小さい。

40

【0067】

一方、GaN層51cは、下地層であるAl窒化物半導体層52bの表面の結晶面に揃うように成長する。このため、GaN層51cの結晶構造はAl窒化物半導体層52bの結晶構造の影響を受け、GaN層51cの格子定数はAl窒化物半導体層52bの格子定数の影響を受ける。GaN層51cを構成するGaNの格子定数はAl窒化物半導体層52bを構成する材料(AlGaNやAlNなど)の格子定数よりも大きいため、GaN層

50

5 1 c には圧縮応力が加わり、G a N 層 5 1 c の内部には圧縮歪みが発生する。圧縮応力の反作用として、複合層 5 は化合物半導体基板 C S 1 に凸形状の反りを発生させる。

【 0 0 6 8 】

なお、A l 窒化物半導体層 5 2 b のエピタキシャル成長の条件（温度や圧力など）を制御することで、A l 窒化物半導体層 5 2 b と G a N 層 5 1 b との界面 B R 2 を滑り面とすることができる。また、G a N 層 5 1 c のエピタキシャル成長の条件（温度や圧力など）を制御することで、G a N 層 5 1 c を A l 窒化物半導体層 5 2 b の表面の結晶面に揃うように成長させることができる。

【 0 0 6 9 】

複合層 5 における A l 窒化物半導体層 5 2 a と、A l 窒化物半導体層 5 2 a の下地層である G a N 層 5 1 a と、A l 窒化物半導体層 5 2 a の上層である G a N 層 5 1 b との関係に着目した場合にも同様のことが言える。すなわち、A l 窒化物半導体層 5 2 a の結晶構造に及ぼす G a N 層 5 1 a の結晶構造の影響は小さく、A l 窒化物半導体層 5 2 a の格子定数に及ぼす G a N 層 5 1 a の格子定数の影響は小さい。一方、G a N 層 5 1 b は、下地層である A l 窒化物半導体層 5 2 a の表面の結晶面に揃うように成長する。G a N 層 5 1 b には A l 窒化物半導体層 5 2 a の影響により圧縮応力が加わり、G a N 層 5 1 b の内部には圧縮歪みが発生する。

【 0 0 7 0 】

凸形状の反りを発生させる複合層 5 の作用は、複合層 5 を構成する A l 窒化物半導体層が厚くなるほど大きくなる。一方で、複合層 5 を構成する A l 窒化物半導体層が厚すぎると A l 窒化物半導体層の内部にクラックが発生しやすくなる。複合層 5 を構成する A l 窒化物半導体層の内部へのクラックの発生を抑止しつつ複合層 5 による凸形状の反りを効果的に発生させるためには、複合層 5 中の 1 層当たりの A l 窒化物半導体層の厚さを 3 n m 以上 5 0 n m 以下、好ましくは 2 0 n m 以下とし、複合層 5 中の A l 窒化物半導体層の数を 1 ~ 2 層程度にすることが好ましい。

【 0 0 7 1 】

本実施の形態によれば、化合物半導体基板 C S 1 に凹形状の反りを発生させる機能を有する複合層 4 と、化合物半導体基板 C S 1 に凸形状の反りを発生させる機能を有する複合層 5 との各々を調節することにより、化合物半導体基板 C S 1 の反りを容易に制御することができる。

【 0 0 7 2 】

加えて、滑り面である界面 B R 1 および B R 2 上の半導体層は、下地層の格子定数差や歪みの影響を受けずに成長することができるので、クラックの発生も抑止することができる。さらに、複合層 4 の層の数が少ないため、容易に化合物半導体基板 C S 2 を作製することができる。

【 0 0 7 3 】

[第 2 の実施の形態]

【 0 0 7 4 】

図 4 は、本発明の第 2 の実施の形態における化合物半導体基板 C S 2 の構成を示す断面図である。

【 0 0 7 5 】

図 4 を参照して、本実施の形態の複合層 4 は、A l 窒化物半導体層として、3 層の A l 窒化物半導体層 4 1 a、4 1 b、および 4 1 c（複数の下部窒化物半導体層の一例）を含んでおり、G a N 層として 2 層の G a N 層 4 2 a および 4 2 b（下部 G a N 層の一例）を含んでいる。A l 窒化物半導体層 4 1 a は、3 層の A l 窒化物半導体層 4 1 a、4 1 b、および 4 1 c のうち S i 基板 1 に最も近い位置に形成されており、A l N バッファ層 3 と接触している。A l 窒化物半導体層 4 1 b は、3 層の A l 窒化物半導体層 4 1 a、4 1 b、および 4 1 c のうち 2 番目に S i 基板 1 に近い位置に形成されている。A l 窒化物半導体層 4 1 c は、3 層の A l 窒化物半導体層 4 1 a、4 1 b、および 4 1 c のうち S i 基板 1 から最も遠い位置に形成されている。G a N 層 4 2 a は、A l 窒化物半導体層 4 1 a

10

20

30

40

50

と Al 窒化物半導体層 4 1 b との間に形成されている。GaN 層 4 2 b は、Al 窒化物半導体層 4 1 b と Al 窒化物半導体層 4 1 c との間に形成されている。

【0076】

Al 窒化物半導体層 4 1 a、GaN 層 4 2 a、および Al 窒化物半導体層 4 1 b の各々は、図 2 に示す第 1 の実施の形態の場合と同じ Al 濃度の分布を有している。Al 窒化物半導体層 4 1 c の Al 濃度は任意である。Al 窒化物半導体層 4 1 c の Al 濃度は、厚さ方向に沿って Si 基板 1 から離れるに従って減少していてもよいし、厚さ方向に沿って一定であってもよい。

【0077】

本実施の形態における複合層 4 を構成する GaN 層の厚さが第 1 の実施の形態の場合と同一であると仮定した場合、本実施の形態における複合層 4 による凹形状の反りを発生させる効果は、第 1 の実施の形態の複合層 4 による凹形状の反りを発生させる効果よりも大きくなる。このため、化合物半導体基板 CS 2 では、化合物半導体基板 CS 1 よりも凹形状の反り量を大きくすることができる。一方で、本実施の形態における複合層 4 を構成する GaN 層の厚さを第 1 の実施の形態の場合よりも薄くした場合には、化合物半導体基板 CS 2 においても、化合物半導体基板 CS 1 と同等の反り量とすることもできる。

10

【0078】

なお、上述以外の化合物半導体基板 CS 2 の構成は、第 1 の実施の形態における化合物半導体基板 CS 1 の構成と同様であるため、その説明は繰り返さない。

【0079】

本実施の形態によれば、第 1 の実施の形態と同様の効果を得ることができる。

20

【0080】

[実施例]

【0081】

第 1 の実施例として、本願発明者らは、GaN 層 4 2 a を形成することによる貫通転位の低減の効果を確認すべく、以下の実験を行った。

【0082】

図 5 は、本発明の第 1 の実施例における化合物半導体基板 CS 1 の作製条件、ならびに貫通転位数の計測位置 P 1、P 2、および P 3 を示す断面図である。

【0083】

図 5 を参照して、本発明例 A として、図 1 に示す化合物半導体基板 CS 1 (GaN 層 4 2 a 有りの化合物半導体基板) を作製した。Si 基板 1 として p⁺型の導電性を有する 6 インチの基板を用いた。Al 窒化物半導体層 4 1 a として下部層 4 1 1 と上部層 4 1 2 とを形成した。GaN 層 4 2 a の厚さを 15 nm とした。Al 窒化物半導体層 5 2 a および 5 2 b の各々の厚さを 15 nm とした。

30

【0084】

本発明例 A において、Al 窒化物半導体層 4 1 a における GaN 層 4 2 a との界面から下方に 0.1 μm だけ離れた位置を計測位置 P 1 とした。Al 窒化物半導体層 4 1 b における GaN 層 4 2 a との界面から上方に 0.34 μm だけ離れた位置を計測位置 P 2 とした。GaN 層 5 1 a における Al 窒化物半導体層 4 1 b との界面から上方に 1 μm だけ離れた位置を計測位置 P 3 とした。

40

【0085】

次に、TEM (Transmission Electron Microscope) を用いた観察により、計測位置 P 1、P 2、P 3 の各々の断面内に存在する貫通転位の個数を計測した。計測した貫通転位の個数を断面の面積 (ここでは $9.25 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$) で除した。これにより、計測位置 P 1 における貫通転位密度 D A、計測位置 P 2 における D B、および計測位置 P 3 における貫通転位密度 D C を算出した。

【0086】

次に、貫通転位密度 D B を貫通転位密度 D A で除することにより、貫通転位密度 D A に対する貫通転位密度 D B の比率 (D B / D A) を算出した。同様に、貫通転位密度 D C を

50

貫通転位密度 D_A で除することにより、貫通転位密度 D_A に対する貫通転位密度 D_C の比率 (D_C / D_A) を算出した。なお、比率 (D_B / D_A) が小さいことは、 Al 窒化物半導体層 4 1 b 内の貫通転位密度 D_B の減少率が大きいことを意味している。比率 (D_C / D_A) が小さいことは、 GaN 層 5 1 a 内の貫通転位密度 D_C の減少率が大きいことを意味している。

【0087】

図 6 は、本発明の第 1 の実施例における化合物半導体基板 $CS100$ の作製条件、ならびに貫通転位数の計測位置 P_1 、 P_2 、および P_3 を示す断面図である。

【0088】

図 6 を参照して、比較例 B として、 GaN 層 4 2 a を含まない化合物半導体基板 $CS100$ (GaN 層 4 2 a 無しの化合物半導体基板) を作製した。 GaN 層 4 2 a を含まない点以外の化合物半導体基板 $CS100$ の構成については、本発明例 A の化合物半導体基板 $CS1$ と同じにした。

【0089】

比較例 B において、 Al 窒化物半導体層 4 1 a における Al 窒化物半導体層 4 1 b との界面から下方に $0.1 \mu m$ だけ離れたの位置を計測位置 P_1 とした。 Al 窒化物半導体層 4 1 b における Al 窒化物半導体層 4 1 a との界面から上方に $0.34 \mu m$ だけ離れた位置を計測位置 P_2 とした。 GaN 層 5 1 a における Al 窒化物半導体層 4 1 b との界面から上方に $1 \mu m$ だけ離れた位置を計測位置 P_3 とした。

【0090】

次に、本発明例 A と同様の方法を用いて、計測位置 P_1 における貫通転位密度 D_A 、計測位置 P_2 における D_B 、および計測位置 P_3 における貫通転位密度 D_C を算出し、比率 (D_B / D_A) および比率 (D_C / D_A) を算出した。

【0091】

図 7 は、本発明の第 1 の実施例における貫通転位密度の計測結果を示す図である。

【0092】

図 7 を参照して、本発明例 A において、計測位置 P_1 の貫通転位密度 D_A は 9.6×10^9 個 / cm^2 、計測位置 P_2 の貫通転位密度 D_B は 5.2×10^9 個 / cm^2 、計測位置 P_3 の貫通転位密度 D_C は 2.2×10^9 個 / cm^2 であった。比率 (D_B / D_A) は 0.55 であり、比率 (D_C / D_A) は 0.23 であった。

【0093】

なお、本発明例 A において、 Al 窒化物半導体層 4 1 a 内の深さ位置が互いに異なる複数の計測位置 P_1 の各々の貫通転位密度 D_A を計測し、 Al 窒化物半導体層 4 1 b 内の深さ位置が互いに異なる複数の計測位置 P_2 の各々の貫通転位密度 D_B を計測し、 GaN 層 5 1 a 内の深さ位置が互いに異なる複数の計測位置 P_3 の各々の貫通転位密度 D_C を計測した。その結果、いずれの計測位置の組合せでも、比率 (D_B / D_A) は 0 より大きく 0.6 以下であり、比率 (D_C / D_A) は 0 より大きく 0.3 以下であった。

【0094】

比較例 B において、計測位置 P_1 の貫通転位密度 D_A は 1.1×10^{10} 個 / cm^2 、計測位置 P_2 の貫通転位密度 D_B は 7.2×10^9 個 / cm^2 、計測位置 P_3 の貫通転位密度 D_C は 3.8×10^9 個 / cm^2 であった。比率 (D_B / D_A) は 0.67 であり、比率 (D_C / D_A) は 0.35 であった。

【0095】

なお、比較例 B において、 Al 窒化物半導体層 4 1 a 内の深さ位置が互いに異なる複数の計測位置 P_1 の各々の貫通転位密度 D_A を計測し、 Al 窒化物半導体層 4 1 b 内の深さ位置が互いに異なる複数の計測位置 P_2 の各々の貫通転位密度 D_B を計測し、 GaN 層 5 1 a 内の深さ位置が互いに異なる複数の計測位置 P_3 の各々の貫通転位密度 D_C を計測した。その結果、いずれの計測位置の組合せでも、比率 (D_B / D_A) は 0.6 より大きく、比率 (D_C / D_A) は 0.3 より大きかった。

【0096】

10

20

30

40

50

以上の結果により、本発明例 A においては、A l 窒化物半導体層 4 1 b 内の貫通転位密度は、A l 窒化物半導体層 4 1 a 内の貫通転位密度よりも低いことが分かる。また、G a N 層 4 2 a の導入により、A l 窒化物半導体層 4 1 b 内の貫通転位が大きく減少し、G a N 層 5 1 a 内の貫通転位が大きく減少することが分かる。

【0097】

続いて本願発明者らは、本発明例 A および比較例 B の各々について、化合物半導体基板 C S 1 の最表層 (A l 窒化物半導体層 1 0) の表面に存在するエッチピットの密度を計測した。本発明例 A および比較例 B の各々の A l 窒化物半導体層 1 0 の表面を、溶融 K O H (水酸化カリウム) 溶液を用いてエッチングし、A l 窒化物半導体層 1 0 の表面を腐食させた。一般的に、溶融 K O H 溶液を用いたエッチングにより、結晶表面の格子歪みが大きい部分や未結合手が存在する転位芯の部分を選択的にエッチングされることが知られている。次に、A l 窒化物半導体層 1 0 の表面を顕微鏡で観察し、A l 窒化物半導体層 1 0 の表面の所定の面積 (ここでは $4.32 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ の面積) の領域内に存在する、所定のサイズより大きいサイズのエッチピット (以降、エッチピット (大) と記すことがある) の数を計測した。そしてエッチピット (大) の数を観察した領域の面積で除することにより、エッチピット (大) の密度を算出した。同様に、A l 窒化物半導体層 1 0 の表面の所定の面積 (ここでは $2.50 \times 10^{-7} \text{ cm}^2$ の面積) の領域内に存在する、所定のサイズより小さいサイズのエッチピット (以降、エッチピット (小) と記すことがある) の数を計測し、エッチピット (小) の密度を算出した。

【0098】

なお、エッチピット (大) は、従来の知見によりナノパイプなどの微小な欠陥に由来するものであると推測される。エッチピット (小) は、密度レベルから貫通転位に由来するものであると推測される。

【0099】

図 8 は、本発明の第 1 の実施例における化合物半導体基板の最表層 (A l 窒化物半導体層 1 0) の表面の顕微鏡写真およびエッチピットの密度の計測結果を示す図である。

【0100】

図 8 を参照して、本発明例 A において、エッチピット (大) の密度は 7.87×10^4 個 / cm^2 であった。エッチピット (小) の密度は 1.04×10^8 個 / cm^2 であった。比較例 B において、エッチピット (大) の密度は 2.78×10^5 個 / cm^2 であった。エッチピット (小) の密度は 1.40×10^8 個 / cm^2 であった。

【0101】

以上の結果により、G a N 層 4 2 a の導入により、G a N 層 5 1 a 内の微小な欠陥および貫通転位が大きく減少することが分かる。

【0102】

第 2 の実施例として、本願発明者らは、本発明の化合物半導体基板による反りの制御の効果を確認すべく、以下の実験を行った。

【0103】

G a N 層 4 2 b の厚さを 1 5 n m (試料 C 1)、4 5 n m (試料 C 2)、または 6 0 n m (試料 C 3) とした 3 種類の化合物半導体基板 C S 2 を作製した。試料 C 1、C 2、および C 3 ではいずれも、A l 窒化物半導体層 5 2 a および 5 2 b の各々の厚さを 1 5 n m とし、G a N 層 4 2 a の厚さを 1 5 n m とした。A l 窒化物半導体層 5 2 a および 5 2 b を A l N とした。得られた化合物半導体基板 C S 2 の反り量を計測した。

【0104】

図 9 は、本発明の第 2 の実施例における試料 C 1、C 2、および C 3 の各々の反り量の計測結果を示す図である。図 1 0 は、本発明の第 2 の実施例における試料 C 1、C 2、および C 3 の各々の反り量の計測結果から得られた G a N 層 4 2 b の厚さと反り量との関係を示すグラフである。なお、図 1 0 および図 1 2 では、凸形状となる反りの方向をマイナスとし、凹形状となる反りの方向をプラスとしている。

【0105】

10

20

30

40

50

図9および図10を参照して、GaN層42bの厚さが15nmである試料C1は、凸形状で90μmの反り量となった。GaN層42bの厚さが45nmである試料C2は、凸形状で15μmの反り量となった。GaN層42bの厚さが60nmである試料C3は、凹形状で39μmの反り量となった。また、GaN層42bの厚さが増加するに従って、化合物半導体基板CS2の反り量は凹形状となる方向に略一定の割合で増加した。

【0106】

次に、Al窒化物半導体層52bの厚さ/Al窒化物半導体層52aの厚さを、15nm/15nm(試料D1)、15nm/10nm(試料D2)、または10nm/10nm(試料D3)とした3種類の化合物半導体基板CS2を作製した。試料D1、D2、およびD3ではいずれも、GaN層42aおよび42bの各々の厚さを15nmとした。Al窒化物半導体層52aおよび52bをAlNとした。得られた化合物半導体基板CS2の反り量を計測した。

10

【0107】

図11は、本発明の第2の実施例における試料D1、D2、およびD3の各々の反り量の計測結果を示す図である。図12は、本発明の第2の実施例における試料D1、D2、およびD3の各々の反り量の計測結果から得られたAl窒化物半導体層52aおよび52bの厚さと反り量との関係を示すグラフである。

【0108】

図11および図12を参照して、Al窒化物半導体層52bの厚さ/Al窒化物半導体層52bの厚さが15nm/15nmである試料D1は、凸形状で90μmの反り量となった。Al窒化物半導体層52bの厚さ/Al窒化物半導体層52bの厚さが15nm/10nmである試料D2は、凸形状で23μmの反り量となった。Al窒化物半導体層52bの厚さ/Al窒化物半導体層52bの厚さが10nm/10nmである試料D3は、凹形状で46μmの反り量となった。また、Al窒化物半導体層52bの厚さとAl窒化物半導体層52bの厚さとの合計値が減少するに従って、化合物半導体基板CS2の反り量は凹形状となる方向に略一定の割合で増加した。

20

【0109】

以上の実験結果から、複合層4を構成するGaN層の厚さまたは複合層5を構成するAl窒化物半導体層の厚さを調節することにより、化合物半導体基板CS1の反りを容易に制御できることが分かった。

30

【0110】

[その他]

【0111】

本発明の化合物半導体基板は、Si基板と、Si基板上に形成されたAlを含む第1の窒化物半導体層であって、厚さ方向に沿ってSi基板から離れるに従ってAl濃度が減少する傾斜層である第1の窒化物半導体層と、第1の窒化物半導体層上に形成された第2の窒化物半導体層であって、第1の窒化物半導体層の平均Al濃度よりも低い平均Al濃度を有する第2の窒化物半導体層と、第2の窒化物半導体層上に形成されたAlを含む第3の窒化物半導体層であって、第2の窒化物半導体層の平均Al濃度よりも高い平均Al濃度を有する第3の窒化物半導体層とを備えていればよい。一例として、図1における複合層5、GaN層7、およびAl窒化物半導体層10は省略されてもよいし、これらの層の代わりに別な層が形成されていてもよい。

40

【0112】

上述の実施の形態は、適宜組み合わせることが可能である。

【0113】

上述の実施の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。本発明の範囲は上記した説明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。

【符号の説明】

50

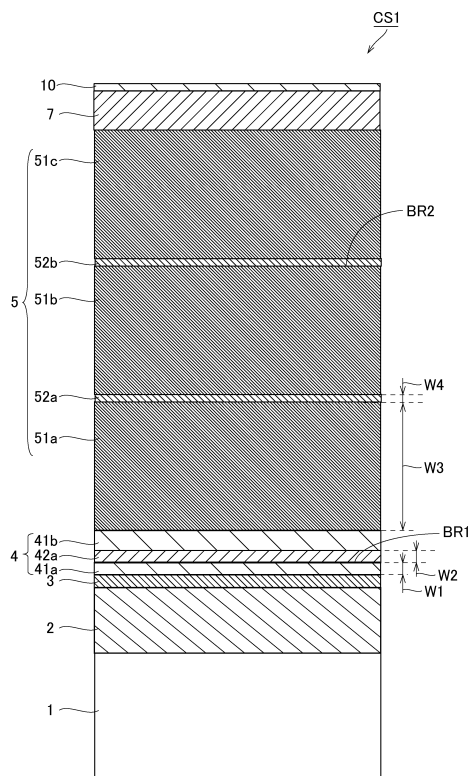
【 0 1 1 4 】

- 1 Si 基板
- 2 SiC 層
- 3 AlN バッファ層
- 4, 5 複合層
- 7, 42a, 42b, 51a, 51b, 51c GaN 層
- 10, 41a, 41b, 41c, 52a, 52b Al 窒化物半導体層
- 411 下部層
- 412 上部層
- BR1, BR2 界面
- CS1, CS2, CS100 化合物半導体基板
- EP エッチピット
- P1, P2, P3 貫通転位数の計測位置
- TD 貫通転位

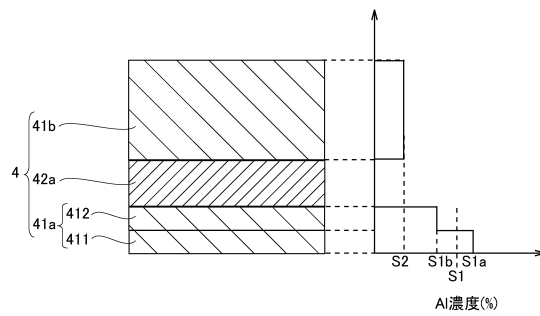
10

【 図 面 】

【 図 1 】



【 図 2 】



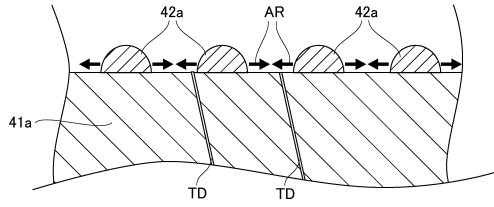
20

30

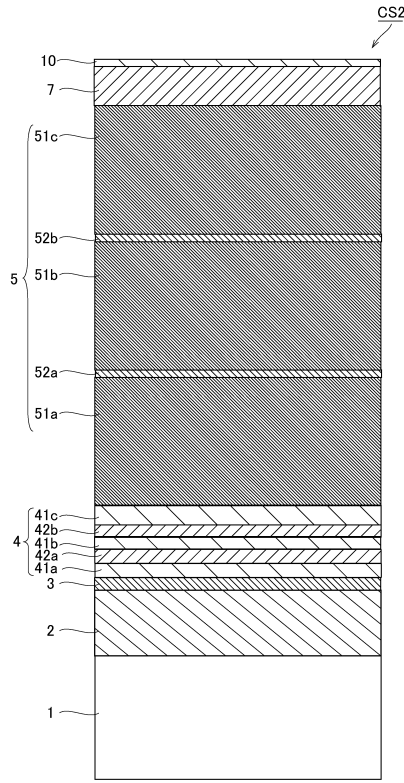
40

50

【 図 3 】



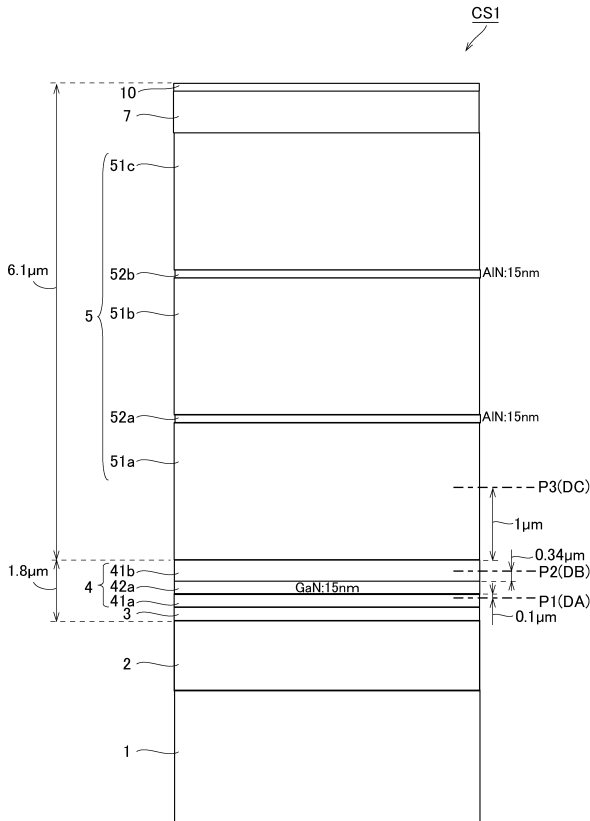
【 図 4 】



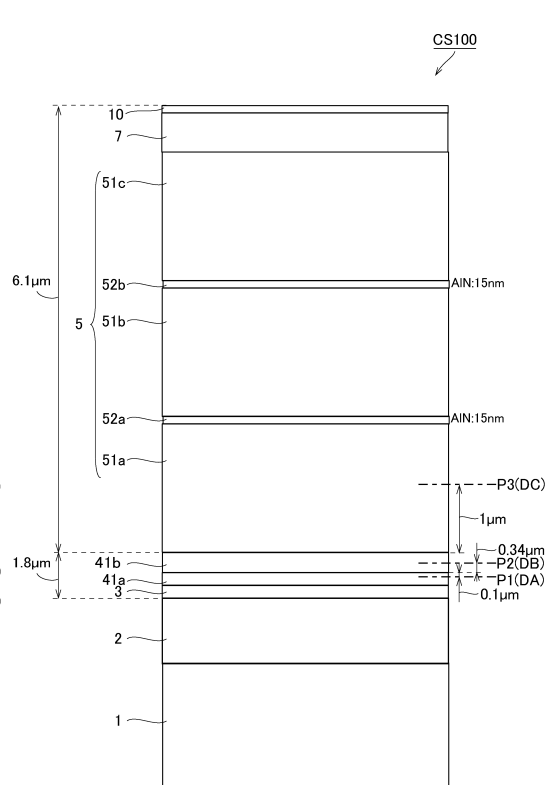
10

20

【 図 5 】



【 図 6 】



30

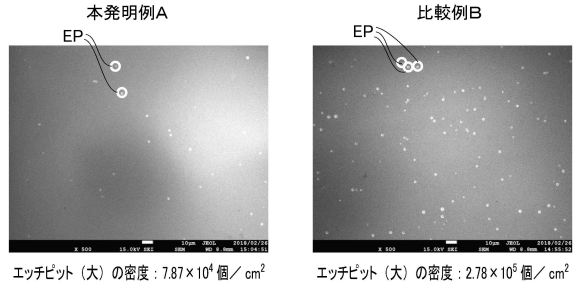
40

50

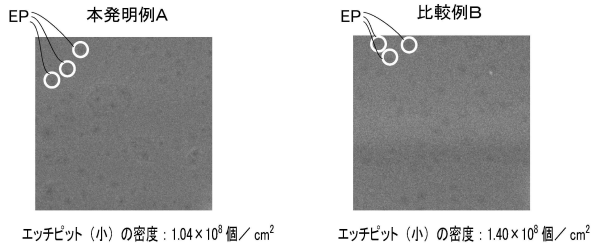
【 図 7 】

試料	本発明例A	比較例B
GaN層51a内の計測位置P3での貫通欠陥密度DC	2.2×10^9 個/cm ²	3.8×10^9 個/cm ²
Al窒化物半導体層41b内の計測位置P2での貫通欠陥密度DB	5.2×10^9 個/cm ²	7.2×10^9 個/cm ²
Al窒化物半導体層41a内の計測位置P1での貫通欠陥密度DA	9.6×10^9 個/cm ²	1.1×10^{10} 個/cm ²
比率(DC/DA)	0.23	0.35
比率(DB/DA)	0.55	0.67

【 図 8 】



10

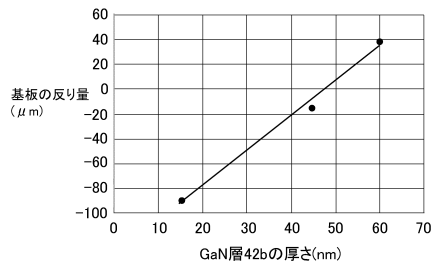


20

【 図 9 】

試料	試料C1	試料C2	試料C3
Al窒化物半導体層52bの厚さ/ AlN窒化物半導体層52aの厚さ	15nm/15nm(固定)		
GaN層42bの厚さ/ GaN層42aの厚さ	15nm/15nm	45nm/15nm	60nm/15nm
反り量	凸90 μm	凸15 μm	凹39 μm

【 図 10 】



30

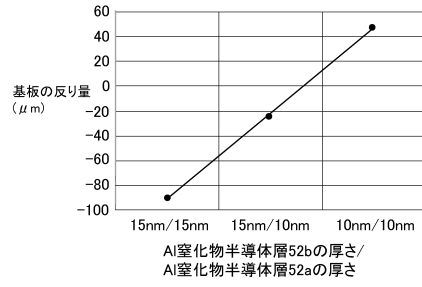
40

50

【 図 1 1 】

試料	試料D1	試料D2	試料D3
Al窒化物半導体層52bの厚さ/ AlN窒化物半導体層52aの厚さ	15nm/15nm	15nm/10nm	10nm/10nm
GaN層42bの厚さ/ GaN層42aの厚さ	15nm/15nm(固定)		
反り量	凸90 μ m	凸23 μ m	凹46 μ m

【 図 1 2 】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(72)発明者 川村 啓介

長野県松本市梓川倭4007番地3 エア・ウォーター株式会社内

審査官 篠原 法子

(56)参考文献 特開2014-053385(JP, A)

米国特許出願公開第2013/0140525(US, A1)

国際公開第2007/077666(WO, A1)

国際公開第2017/069087(WO, A1)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

C30B 1/00 - 35/00

C23C16/00 - 16/56

H01L21/205

H01L21/31

H01L21/365

H01L21/469

H01L21/86