

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(10) 国際公開番号

WO 2011/155496 A1

(43) 国際公開日

2011年12月15日(15.12.2011)

PCT

- (51) 国際特許分類:
H01L 21/205 (2006.01) H01L 29/778 (2006.01)
H01L 21/338 (2006.01) H01L 29/812 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/063071
- (22) 国際出願日: 2011年6月7日(07.06.2011)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2010-131020 2010年6月8日(08.06.2010) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 日本碍子株式会社(NGK INSULATORS, LTD.) [JP/JP]; 〒4678530 愛知県名古屋瑞穂区須田町2番56号 Aichi (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 三好 実人(MIYOSHI Makoto) [JP/JP]; 〒4928137 愛知県稲沢市国府宮1-11-33 Aichi (JP). 角谷 茂明(SUMIYA Shigeaki) [JP/JP]; 〒4678530 愛知県名古屋瑞穂区須田町2番56号 日本碍子株式会社内 Aichi (JP). 市村 幹也(ICHIMURA Mikiya) [JP/JP]; 〒4678530 愛知県名古屋瑞穂区須田町2番56号 日本碍子株式会社内 Aichi

(JP). 前原 宗太(MAEHARA Sota) [JP/JP]; 〒4678530 愛知県名古屋瑞穂区須田町2番56号 日本碍子株式会社内 Aichi (JP). 田中 光浩(TANAKA Mitsuhiro) [JP/JP]; 〒4678530 愛知県名古屋瑞穂区須田町2番56号 日本碍子株式会社内 Aichi (JP).

(74) 代理人: 吉竹 英俊, 外(YOSHITAKE Hidetoshi et al.); 〒5400001 大阪府大阪市中央区城見1丁目4番70号住友生命OBPプラザビル10階 Osaka (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

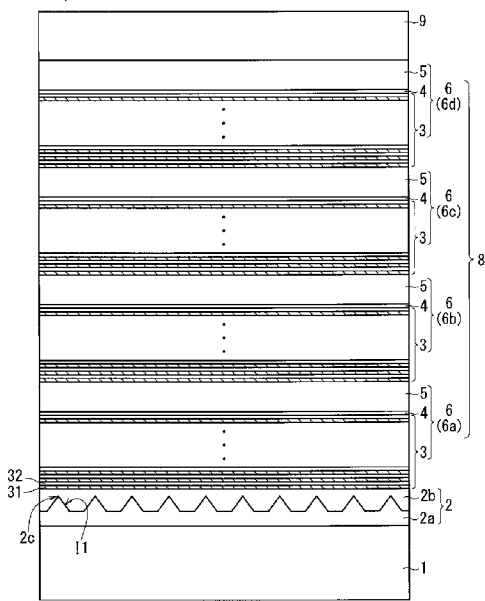
(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ

[続葉有]

(54) Title: EPITAXIAL SUBSTRATE AND METHOD FOR PRODUCING EPITAXIAL SUBSTRATE

(54) 発明の名称: エピタキシャル基板およびエピタキシャル基板の製造方法

[図1]



(57) Abstract: Disclosed is a crack-free epitaxial substrate with reduced warping, which uses a silicon substrate as a base substrate. Specifically disclosed is an epitaxial substrate which is obtained by forming a group of group III nitride layers on a (111) single crystal Si substrate such that the (0001) crystal plane is roughly parallel to the substrate surface. The epitaxial substrate is provided with: a buffer layer and a crystalline layer formed on top of the buffer layer. The buffer layer is obtained by forming contiguous laminated units comprising: a composition-modulated layer having an inherent compressive strain as a result of repeatedly and alternately laminating a first unit layer and a second unit layer, which have different compositions; a termination layer that is formed on the uppermost part of the composition-modulated layer, and that maintains the compressive strain inherent in the composition-modulated layer; and an enhanced-strain layer that is formed on the termination layer, and that increases the compressive strain inherent in the composition-modulated layer.

(57) 要約: シリコン基板を下地基板とし、クラックフリーでかつ反りの低減されたエピタキシャル基板を提供する。(111)単結晶Si基板の上に、基板面に対し(0001)結晶面が略平行となるようにIII族窒化物層群を形成してなるエピタキシャル基板を、組成の相異なる第1単位層と第2単位層とを繰り返し交互に積層してなることで圧縮歪を内在する組成変調層と、組成変調層の最上部に形成されてなり、組成変調層に内在された圧縮歪を維持する終端層と、終端層の上に形成され、組成変調層に内在された圧縮歪を強める歪強化層と、を含む積層単位を連続して複数積層してなるバッファ層と、バッファ層の上に形成された

結晶層と、を備えるように形成する。

WO 2011/155496 A1

(AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：

エピタキシャル基板およびエピタキシャル基板の製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、半導体素子用のエピタキシャル基板に関し、特にIII族窒化物を用いて構成されるエピタキシャル基板に関する。

背景技術

[0002] 窒化物半導体は、直接遷移型の広いバンドギャップを有し、高い絶縁破壊電界および高い飽和電子速度を有することから、LEDやLDなどの発光デバイスや、HEMTなど高周波／ハイパワーの電子デバイス用半導体材料として注目されている。例えば、AlGaInからなる障壁層とGaNからなるチャンネル層とを積層してなるHEMT（高電子移動度トランジスタ）素子は、窒化物材料特有の大きな分極効果（自発分極効果とピエゾ分極効果）により積層界面（ヘテロ界面）に高濃度の二次元電子ガス（2DEG）が生成するという特徴を活かしたものである（例えば、非特許文献1参照）。

[0003] HEMT素子用エピタキシャル基板に用いる下地基板として、SiCのような、III族窒化物とは異なる組成の単結晶（異種単結晶）を用いる場合がある。この場合、歪み超格子層や低温成長緩衝層などの緩衝層が、初期成長層として下地基板の上に形成されるのが一般的である。よって、下地基板の上に障壁層、チャンネル層、および緩衝層をエピタキシャル形成してなるのが、異種単結晶からなる下地基板を用いたHEMT素子用基板の最も基本的な構成態様となる。これに加えて、障壁層とチャンネル層の間に、二次元電子ガスの空間的な閉じ込めを促進することを目的として、厚さ1nm前後のスペーサ層が設けられることもある。スペーサ層は、例えばAlNなどで構成される。さらには、HEMT素子用基板の最表面におけるエネルギー準位の制御や、電極とのコンタクト特性の改善を目的として、例えばn型GaN層や超格子層からなるキャップ層が、障壁層の上に形成される場合もある。

- [0004] HEMT素子およびHEMT素子用の基板に対しては、電力密度の増大、高効率化などの性能向上に関する課題、ノーマリーオフ動作化などの機能性向上に関する課題、高信頼性や低コスト化などの基本的な課題など、様々な課題があり、各々について活発な取り組みが行われている。
- [0005] 一方、エピタキシャル基板の低コスト化、さらにはシリコン系回路デバイスとの集積化などを目的として、上記のような窒化物デバイスを作製するにあたって単結晶シリコンを下地基板として用いる研究・開発が行われている（例えば、特許文献1ないし特許文献3、および非特許文献2参照）。HEMT素子用エピタキシャル基板の下地基板にシリコンのような導電性の材料を選んだ場合には、下地基板の裏面からフィールドプレート効果が付与されるので、高耐電圧や高速スイッチングが可能なHEMT素子の設計が可能となる。
- [0006] また、HEMT素子用エピタキシャル基板を高耐電圧構造とするためには、チャンネル層と障壁層の総膜厚を増やすことや、両層の絶縁破壊強度を向上させることが有効であることも既に公知である（例えば、非特許文献2参照）。
- [0007] また、Si下地基板の上にAlNからなる介在層を形成し、続いて、GaNからなる第1半導体層とAlNからなる第2半導体層とを交互に、ただし全体として凸の反りが生じるように形成し、その後の降温時においてこれらの層が収縮した結果として基板全体の反りが打ち消されるようにした、半導体デバイスの製法も公知である（例えば、特許文献4参照）。
- [0008] しかしながら、サファイア基板やSiC基板を用いる場合に比較して、シリコン基板上に良質な窒化物膜を形成することは、以下のような理由で非常に困難であることが知られている。
- [0009] まず、シリコンと窒化物材料とでは、格子定数の値に大きな差異がある。このことは、シリコン基板と成長膜の界面にてミスフィット転位を発生させたり、核形成から成長に至るタイミングで3次元的な成長モードを促進させる要因となる。換言すれば、転位密度が少なく表面が平坦である良好な窒化

物エピタキシャル膜の形成を阻害する要因となっている。

[0010] また、シリコンに比べると窒化物材料の熱膨張係数の値は大きいため、シリコン基板上に高温で窒化物膜をエピタキシャル成長させた後、室温付近に降温させる過程において、窒化物膜内には引張応力が働く。その結果として、膜表面においてクラックが発生しやすくなるとともに、基板に大きな反りが発生しやすくなる。

[0011] このほか、気相成長における窒化物材料の原料ガスであるトリメチルガリウム（TMG）は、シリコンと液相化合物を形成しやすく、エピタキシャル成長を妨げる要因となることも知られている。

[0012] 特許文献1ないし特許文献3および非特許文献1に開示された従来技術を用いた場合、シリコン基板上にGaN膜をエピタキシャル成長することは可能である。しかしながら、得られたGaN膜の結晶品質は、SiCやサファイアを下地基板として用いた場合と比べると決して良好なものではない。そのため、従来技術を用いて例えばHEMTのような電子デバイスを作製した場合には、電子移動度が低かったり、オフ時のリーク電流や耐圧が低くなったりするという問題があった。

[0013] また、特許文献4に開示された方法は、デバイス作製の途中で大きな凸の反りを意図的に生じさせているため、層形成条件によってはデバイス作製途中においてクラックが生じてしまうおそれがある。

先行技術文献

特許文献

[0014] 特許文献1：特開平10-163528号公報

特許文献2：特開2004-349387号公報

特許文献3：特開2005-350321号公報

特許文献4：特開2009-289956号公報

非特許文献

[0015] 非特許文献1：“Highly Reliable 250W GaN High Electron Mobility Transistor Power Amplifier” Toshihide Kikkawa, Jpn. J. Appl. Phys. 44, (2005

), 4896.

非特許文献2: "High power AlGaIn/GaN HFET with a high breakdown voltage of over 1.8kV on 4 inch Si substrates and the suppression of current collapse", Nariaki Ikeda, Syuusuke Kaya, Jiang Li, Yoshihiro Sato, Sadahiro Kato, Seikoh Yoshida, Proceedings of the 20th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's May 18-22, 2008 Orlando, FL", pp.287-290

発明の概要

- [0016] 本発明は上記課題に鑑みてなされたものであり、シリコン基板を下地基板とし、クラックフリーなエピタキシャル基板を提供することを目的とする。
- [0017] 上記課題を解決するため、本発明の第1の態様では、(1 1 1)方位の単結晶シリコンである下地基板の上に、前記下地基板の基板面に対し(0 0 0 1)結晶面が略平行となるようにIII族窒化物層群を形成してなるエピタキシャル基板が、組成の相異なる第1単位層と第2単位層とを繰り返し交互に積層してなることで圧縮歪を内在する組成変調層と、前記組成変調層の最上部に形成されてなり、前記組成変調層に内在された前記圧縮歪を維持する終端層と、前記終端層の上に形成され、前記組成変調層に内在された前記圧縮歪を強める歪強化層と、を含む積層単位を連続して複数積層してなるバッファ層と、前記バッファ層の上に形成された結晶層と備えるようにした。
- [0018] 本発明の第2の態様では、第1の態様に係るエピタキシャル基板において、前記第1単位層を構成する第1のIII族窒化物よりも前記第2単位層を構成する第2のIII族窒化物の方が無歪状態における面内格子定数が大きく、それぞれの前記第2単位層は前記第1単位層に対してコヒーレントな状態に形成されてなるようにした。
- [0019] 本発明の第3の態様では、第2の態様に係るエピタキシャル基板において、前記終端層が、前記第1のIII族窒化物にて前記第1単位層よりも大きい厚みで形成されてなるようにした。
- [0020] 本発明の第4の態様では、第3の態様に係るエピタキシャル基板において

、前記歪強化層が、第3のIII族窒化物からなり、前記終端層に対してコヒーレントに形成されてなる中間層を備えるようにした。

[0021] 本発明の第5の態様では、(111)方位の単結晶シリコンである下地基板の上に、前記下地基板の基板面に対し(0001)結晶面が略平行となるようにIII族窒化物層群を形成してなるエピタキシャル基板が、組成の相異なるIII族窒化物からなる第1単位層と第2単位層とを繰り返し交互に積層してなり、かつ、前記第1単位層を構成する第1のIII族窒化物よりも前記第2単位層を構成する第2のIII族窒化物の方が無歪状態における面内格子定数が大きい組成変調層と、前記組成変調層の最上部に形成された、前記第1のIII族窒化物からなり前記第1単位層よりも厚み大きい終端層と、第3のIII族窒化物からなる中間層と、を含む積層単位を連続して複数積層してなるバッファ層と、前記バッファ層の上に形成された、III族窒化物からなる結晶層と、を備え、前記組成変調層においてはそれぞれの前記第2単位層が前記第1単位層に対してコヒーレントな状態に形成されてなり、前記中間層が前記終端層に対してコヒーレントな状態に形成されてなるようにした。

[0022] 本発明の第6の態様では、第1ないし第5のいずれかの態様に係るエピタキシャル基板において、前記第1単位層がA₁Nからなり、前記第2単位層がA_{1-x}Ga_xN (0 ≤ x ≤ 0.25)なる組成のIII族窒化物からなるようにした。

[0023] 本発明の第7の態様では、第6の態様に係るエピタキシャル基板において、前記中間層がA_{1-y}Ga_yN (0 ≤ y ≤ 0.25)なる組成のIII族窒化物にて100nm以上500nm以下の厚みに形成されてなるようにした。

[0024] 本発明の第8の態様では、第6または第7の態様に係るエピタキシャル基板において、前記第2単位層がA_{1-x}Ga_xN (0.1 ≤ x ≤ 0.25)なる組成のIII族窒化物からなり、かつ、前記中間層がA_{1-y}Ga_yN (0.1 ≤ y ≤ 0.25)なる組成のIII族窒化物からなるようにした。

[0025] 本発明の第9の態様では、第8の態様に係るエピタキシャル基板において、前記第2単位層の組成と前記中間層の組成が実質的に同じであるようにし

た。

[0026] 本発明の第10の態様では、第1ないし第9のいずれかの態様に係るエピタキシャル基板において、前記下地基板の上に形成された、 AlN からなる第1の下地層と、前記第1の下地層の上に形成され、 $Al_pGa_{1-p}N$ ($0 \leq p < 1$) からなる第2の下地層と、をさらに備え、前記第1の下地層が、柱状あるいは粒状の結晶もしくはドメインの少なくとも一種から構成される多結晶欠陥含有性層であり、前記第1の下地層と前記第2の下地層との界面が3次元的凹凸面であり、前記第2の下地層の直上に前記バッファ層が形成されてなるようにした。

[0027] 本発明の第11の態様では、(111)方位の単結晶シリコンである下地基板の上に、前記下地基板の基板面に対し(0001)結晶面が略平行なIII族窒化物層群を形成してなる半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法が、バッファ層を形成するバッファ層形成工程と、前記バッファ層よりも上方にIII族窒化物からなる結晶層を形成する結晶層形成工程と、を備え、前記バッファ層形成工程が、組成の相異なるIII族窒化物からなる第1単位層と第2単位層とを繰り返し交互に積層することにより組成変調層を形成する組成変調層形成工程と、前記組成変調層の最上部に前記第1単位層と同じ組成を有する終端層を前記第1単位層よりも大きい厚みに形成する終端層形成工程と、前記終端層の上に中間層を形成する中間層形成工程と、を含む積層単位形成工程を連続して複数回繰り返す工程であり、前記組成変調層形成工程においては、前記第1単位層を構成する第1のIII族窒化物よりも前記第2単位層を構成する第2のIII族窒化物の方が無歪状態における面内格子定数が大きくなるように、かつ、それぞれの前記第2単位層を前記第1単位層に対してコヒーレントな状態になるように形成し、前記中間層形成工程においては、前記中間層を、第3のIII族窒化物にて、前記終端層に対してコヒーレントな状態になるように形成する、ようにした。

[0028] 本発明の第12の態様では、第11の態様に係るエピタキシャル基板の製造方法において、前記第1単位層を AlN にて形成し、前記第2単位層を A

$I_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 0.25$) なる組成のIII族窒化物にて形成するようにした。

[0029] 本発明の第13の態様では、第12の態様に係るエピタキシャル基板の製造方法において、前記中間層を $A I_yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y \leq 0.25$) なる組成のIII族窒化物にて100nm以上500nm以下の厚みに形成するようにした。

[0030] 本発明の第14の態様では、第12または第13の態様に係るエピタキシャル基板の製造方法において、前記第2単位層を $A I_xGa_{1-x}N$ ($0.1 \leq x \leq 0.25$) なる組成のIII族窒化物にて形成し、かつ、前記中間層を $A I_yGa_{1-y}N$ ($0.1 \leq y \leq 0.25$) なる組成のIII族窒化物にて形成するようにした。

[0031] 本発明の第15の態様では、第14の態様に係るエピタキシャル基板の製造方法において、前記第2単位層の組成と前記中間層の組成を実質的に同じにするようにした。

[0032] 本発明の第16の態様では、第11ないし第15のいずれかの態様に係るエピタキシャル基板の製造方法において、前記下地基板の上に、 AlN からなる第1の下地層を形成する第1下地層形成工程と、前記第1の下地層の上に、 $A I_pGa_{1-p}N$ ($0 \leq p < 1$) からなる第2の下地層を形成する第2下地層形成工程と、をさらに備え、前記第1下地層形成工程においては、前記第1の下地層を、柱状あるいは粒状の結晶もしくはドメインの少なくとも一種から構成され、表面が三次元的凹凸面である多結晶欠陥含有性層として形成し、前記バッファ層形成工程においては、前記第2の下地層の直上に前記バッファ層を形成するようにした。

[0033] 本発明の第1ないし第16の態様によれば、バッファ層に圧縮歪が内在されるので、シリコンとIII族窒化物との熱膨張係数差に起因して生じる引張応力が該圧縮歪によって相殺される。これにより、シリコン基板を下地基板に用いた場合であっても、クラックフリーで反りが少なく、結晶品質の優れたエピタキシャル基板を、得ることができる。

[0034] 特に、第8、第9、第14および第15の態様によれば、クラックフリーで反りが少なく、かつ耐電圧性の優れたエピタキシャル基板が実現される。

[0035] 特に、第10および第16の態様によれば、低転位かつ表面平坦性に優れた下地層の上にバッファ層が設けられるので、バッファ層や結晶層などが良好な結晶品質を有するものとなる。その一方で、第2の下地層における歪みエネルギーの蓄積は抑制されるので、バッファ層に含まれる圧縮歪による引張応力の相殺効果が、下地層に歪みエネルギーが蓄積されることによって阻害されることはない。

図面の簡単な説明

[0036] [図1]本発明の実施の形態に係るエピタキシャル基板10の構成を概略的に示す模式断面図である。

[図2]第1単位層31の上に第2単位層32が形成されるとき結晶格子の様子を示すモデル図である。

[図3]中間層5の形成までを行ったエピタキシャル基板の反り量を、中間層5の厚みに対してプロットした図である。

発明を実施するための形態

[0037] <エピタキシャル基板の概略構成>

図1は、本発明の実施の形態に係るエピタキシャル基板10の構成を概略的に示す模式断面図である。

[0038] エピタキシャル基板10は、下地基板1と、下地層2と、それぞれ複数の組成変調層3と、終端層4と、中間層5とを備えるバッファ層8と、機能層9とを主として備える。なお、以降においては、下地基板1の上に形成した各層を、エピタキシャル膜と総称することがある。また、III族元素中のAlの存在比率のことを、便宜上、Alモル分率とも称する場合がある。

[0039] 下地基板1は、p型の導電性を有する(111)面の単結晶シリコンウェハーである。下地基板1の厚みに特段の制限はないが、取り扱いの便宜上、数百 μm から数mmの厚みを有する下地基板1を用いるのが好ましい。

[0040] 下地層2と、組成変調層3と、終端層4と、中間層5と、機能層9とは、

それぞれ、ウルツ鉱型のIII族窒化物を(0001)結晶面が下地基板1の基板面に対し略平行となるように、エピタキシャル成長手法によって形成した層である。これらの層の形成は、有機金属化学気相成長法(MOCVD法)により行うのが好適な一例である。

[0041] 下地層2は、その上に上述の各層を良好な結晶品質で形成することを可能とするべく設けられる層である。具体的には、下地層2は、少なくともその表面近傍において(組成変調層3との界面近傍において)、転位密度が好適に低減されてなるとともに良好な結晶品質を有するように設けられる。これにより、組成変調層3さらにはその上に形成される各層においても、良好な結晶品質が得られる。

[0042] 本実施の形態においては、係る目的をみたすべく、以下に示すように、下地層2が、第1下地層2aと第2下地層2bとからなるものとする。

[0043] 第1下地層2aは、AlNからなる層である。第1下地層2aは、下地基板1の基板面に略垂直な方向(成膜方向)に成長した多数の微細な柱状結晶等(柱状結晶、粒状結晶、柱状ドメインあるいは粒状ドメインの少なくとも一種)から構成される層である。換言すれば、第1下地層2aは、エピタキシャル基板10の積層方向への一軸配向はしてなるものの、積層方向に沿った多数の結晶粒界もしくは転位を含有する、結晶性の劣った多欠陥含有性層である。なお、本実施の形態においては、便宜上、ドメイン粒界あるいは転位も含めて、結晶粒界と称することがある。第1下地層2aにおける結晶粒界の間隔は大きくても数十nm程度である。

[0044] 係る構成を有する第1下地層2aは、c軸傾き成分についてのモザイク性の大小もしくはらせん転位の多少の指標となる(0002)面のX線ロックンクカーブ半値幅が、0.5度以上1.1度以下となるように、かつ、c軸を回転軸とした結晶の回転成分についてのモザイク性の大小もしくは刃状転位の多少の指標となる(10-10)面のX線ロックンクカーブ半値幅が0.8度以上1.1度以下となるように、形成される。

[0045] 一方、第2下地層2bは、第1下地層2aの上に形成された、 Al_pGa_{1-p}

N ($0 \leq p < 1$) なる組成のIII族窒化物からなる層である。

[0046] また、第1下地層2aと第2下地層2bとの界面11（第1下地層2aの表面）は、第1下地層2aを構成する柱状結晶等の外形形状を反映した三次元的凹凸面となっている。界面11がこのような形状を有することは、例えば、エピタキシャル基板10のHAADF（高角散乱電子）像において、明瞭に確認される。なお、HAADF像とは、走査透過電子顕微鏡（STEM）によって得られる、高角度に非弾性散乱された電子の積分強度のマッピング像である。HAADF像においては、像強度は原子番号の二乗に比例し、原子番号が大きい原子が存在する箇所ほど明るく（白く）観察されるので、Gaを含む第2下地層2bが相対的に明るく、Gaを含まない第1下地層2aが相対的に暗く観察される。これにより、両者の界面11が、三次元的凹凸面となっていることが容易に認識される。

[0047] なお、図1の模式断面においては、第1下地層2aの凸部2cが略等間隔に位置するように示されているが、これは図示の都合にすぎず、実際には必ずしも等間隔に凸部2cが位置するわけではない。好ましくは、第1下地層2aは、凸部2cの密度が $5 \times 10^9 / \text{cm}^2$ 以上 $5 \times 10^{10} / \text{cm}^2$ 以下であり、凸部2cの平均間隔が45nm以上140nm以下であるように形成される。これらの範囲をみたす場合、特に結晶品質の優れた機能層9の形成が可能となる。なお、本実施の形態において、第1下地層2aの凸部2cとは、表面（界面11）において上に凸の箇所の略頂点位置のことを指し示すものとする。なお、本発明の発明者の実験および観察の結果、凸部2cの側壁を形成しているのは、AlNの(10-11)面もしくは(10-12)面であることが確認されている。

[0048] 第1下地層2aの表面に上記の密度および平均間隔を満たす凸部2cが形成されるには、平均膜厚が40nm以上200nm以下となるように第1下地層2aを形成することが好ましい。平均膜厚が40nmより小さい場合には、上述のような凸部2cを形成しつつAlNが基板表面を覆い尽くす状態を実現することが難しくなる。一方、平均膜厚を200nmより大きくしよ

うとすると、A | N表面の平坦化が進行し始めるために上述のような凸部2cを形成することが難しくなる。

[0049] なお、第1下地層2aの形成は、所定のエピタキシャル成長条件のもとで実現されるが、第1下地層2aをA | Nにて形成することは、シリコンと液相化合物を形成するGaを含まないという点、および、横方向成長が比較的進みにくいので界面11が三次元的凹凸面として形成されやすいという点において好適である。

[0050] エピタキシャル基板10においては、下地基板1と第2下地層2bとの間に、上述のような態様にて結晶粒界を内在する多欠陥含有性層である第1下地層2aを介在させることにより、下地基板1と第2下地層2bとの間の格子ミスフィットが緩和され、係る格子ミスフィットに起因する歪みエネルギーの蓄積が抑制されている。上述した第1下地層2aについての(0002)面および(10-10)面のX線ロックングカーブ半値幅の範囲は、この結晶粒界による歪みエネルギーの蓄積が好適に抑制される範囲として定まるものである。

[0051] ただし、係る第1下地層2aが介在することで、第2下地層2bには、第1下地層2aの柱状結晶等の結晶粒界が起点となった非常に多数の転位が伝播する。本実施の形態においては、第1下地層2aと第2下地層2bとの界面11を上述のように三次元的凹凸面とすることで、係る転位を効果的に低減させてなる。

[0052] 第1下地層2aと第2下地層2bとの界面11が三次元的凹凸面として形成されていることにより、第1下地層2aで発生した転位のほとんどは、第1下地層2aから第2下地層2bへと伝播する(貫通する)際に、界面11で屈曲され、第2下地層2bの内部において合体消失する。結果として、第1下地層2aを起点とする転位のうち、第2下地層2bを貫通する転位はごく一部となる。

[0053] また、第2下地層2bは、好ましくは、その成長初期こそ第1下地層2aの表面形状(界面11の形状)に沿って形成されるものの、成長が進むにつ

れて徐々にその表面が平坦化されていき、最終的には、10 nm以下の表面粗さを有するように形成される。なお、本実施の形態において、表面粗さは、AFM（原子間力顕微鏡）により計測した $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 領域についての平均粗さ r_a で表すものとする。ちなみに、第2下地層2bが、横方向成長が比較的進みやすい、少なくともGaを含む組成のIII族窒化物にて形成されることは、第2下地層2bの表面平坦性を良好なものとするうえで好適である。

[0054] また、第2下地層2bの平均厚みは、40 nm以上とするのが好適である。これは、40 nmより薄く形成した場合には、第1下地層2aに由来する凹凸が十分に平坦化しきれないことや、第2下地層2bに伝播した転位の相互合体による消失が十分に起こらない、などの問題が生じるからである。尚、平均厚みが40 nm以上となるように形成した場合には、転位密度の低減や表面の平坦化が効果的になされるので、第2下地層2bの厚みの上限については特に技術上の制限はないが、生産性の観点からは数 μm 以下程度の厚みに形成するのが好ましい。

[0055] 以上のように、第2下地層2bの表面は、低転位でかつ優れた平坦性を有するものとなっているので、その上に形成される各層は、良好な結晶品質を有するものとなる。

[0056] バッファ層8は、それぞれが組成変調層3と終端層4と中間層5をこの順に積層してなる複数の単位構造体6（積層単位）を連続して積層した構成を有する。図1においては、4つの単位構造体6（6a、6b、6c、6d）を備える場合を例示しているが、単位構造体6の数はこれに限られない。

[0057] 組成変調層3は、それぞれが相異なる組成の2種類のIII族窒化物層である第1単位層31と第2単位層32とを繰り返し交互に積層することにより形成されてなる、超格子構造を有する部位である。なお、1つの第1単位層31と1つの第2単位層32との組をペア層と称する。

[0058] 第1単位層31と第2単位層32とは、前者を構成するIII族窒化物よりも後者を構成するIII族窒化物の方が無歪の状態（バルク状態）における面内格

子定数（格子長）が大きい、という関係をみたすように形成されてなる。

- [0059] また、組成変調層3においては、第2単位層32が、第1単位層31に対してコヒーレントな状態に形成されてなる。また、第1単位層31の厚みよりも第2単位層32の厚みの方が大きくなっている。
- [0060] 第1単位層31は、3nm～20nm程度の厚みに形成されるのが好ましい。典型的には5nm～10nmの厚みに形成される。一方、第2単位層32は、10nm～25nm程度であるのが好適である。また、ペア層の繰り返し数は、5～数十程度である。
- [0061] 好ましくは、第1単位層31はAlNにて構成され、第2単位層32は $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物にて構成される。
- [0062] 終端層4は、組成変調層3の最上部に（終端部に）、組成変調層3の第1単位層31と同じ組成のIII族窒化物にて形成される層である。終端層4は、第1単位層31の厚みより大きな厚みに形成される。かつ、終端層4は、中間層5をその上にコヒーレントな状態に形成し得る範囲の厚みに形成される。具体的には、20nm～100nm程度の厚みに形成されるのが好ましい。典型的には、20nm～50nmの厚みに形成される。
- [0063] 中間層5はIII族窒化物からなる層である。中間層5は、第1単位層31を構成するIII族窒化物よりも無歪の状態における面内格子定数が大きいIII族窒化物にて構成される。例えば、中間層5は、 $Al_yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物にて構成される。中間層5は、終端層4に対してコヒーレントな状態に形成されてなる。中間層5は、概ね100nm以上500nm以下の厚みを有するのが好適である。
- [0064] 単位構造体6を構成する組成変調層3におけるペア層の数や、中間層5の実際の組成および厚みなどは、バッファ層8全体の形成態様に応じて定められる。また、第2単位層32と中間層5とにおけるAlモル分率は、エピタキシャル基板10自体の耐電圧性と関係がある。これらについての詳細は後述する。
- [0065] 機能層9は、バッファ層8の上に形成された、III族窒化物により形成され

る少なくとも1つの層であり、エピタキシャル基板10の上にさらに所定の半導体層や電極などを形成することで半導体素子を構成する場合において、所定の機能を発現する層である。それゆえ、機能層9は、当該機能に応じた組成および厚みを有する1または複数の層にて形成される。図1においては、機能層9が単一の層からなる場合を例示しているが、機能層9の構成はこれに限られるものではない。

[0066] 例えば、高抵抗のGaNからなる数 μm 厚のチャンネル層と、AlGaNやInAlNなどからなる数十nm厚の障壁層とを機能層9として積層すれば、HEMT素子用のエピタキシャル基板10が得られる。すなわち、障壁層の上に、図示を省略するゲート電極、ソース電極、およびドレイン電極を形成することで、HEMT素子が得られる。これらの電極形成には、フォトリソグラフィープロセスなどの公知の技術を適用可能である。また、係る場合において、チャンネル層と障壁層との間にAlNからなる1nm程度の厚みのスペーサ層を設ける態様であってもよい。

[0067] あるいは、機能層9として、1つのIII族窒化物層（例えばGaN層）を形成し、その上に図示を省略するアノードとカソードとを形成することで、同心円型ショットキーバリアダイオードが実現される。これらの電極形成にも、フォトリソグラフィープロセスなどの公知の技術を適用可能である。

[0068] <エピタキシャル基板の製造方法>

次に、MOCVD法を用いる場合を例として、エピタキシャル基板10を製造する方法について概説する。

[0069] まず、下地基板1として(111)面の単結晶シリコンウェハーを用意し、希フッ酸洗浄により自然酸化膜を除去し、さらにその後、SPM洗浄を施してウェハー表面に厚さ数Å程度の酸化膜が形成された状態とする。これをMOCVD装置のリアクタ内にセットする。

[0070] そして所定の加熱条件とガス雰囲気のもとで各層を形成する。まず、AlNからなる第1下地層2aは、基板温度を800°C以上、1200°C以下の所定の初期層形成温度に保ち、リアクタ内圧力を0.1kPa~30kPa

程度とした状態で、アルミニウム原料であるTMA（トリメチルアルミニウム）バブリングガスとNH₃ガスとを適宜のモル流量比にてリアクタ内に導入し、成膜速度を20nm/min以上、目標膜厚を200nm以下、とすることによって、形成させることができる。

[0071] 第2下地層2bの形成は、第1下地層2aの形成後、基板温度を800℃以上1200℃以下の所定の第2下地層形成温度に保ち、リアクタ内圧力を0.1kPa～100kPaとした状態で、ガリウム原料であるTMG（トリメチルガリウム）バブリングガスとTMAバブリングガスとNH₃ガスとを、作製しようとする第2下地層2bの組成に応じた所定の流量比にてリアクタ内に導入し、NH₃とTMAおよびTMGとを反応させることにより実現される。

[0072] バッファ層8を構成する各層、すなわち、組成変調層3を構成する第1単位層31および第2単位層32、終端層4、中間層5の形成は、第2下地層2bの形成に続いて、基板温度を800℃以上1200℃以下の各層に応じた所定の形成温度に保ち、リアクタ内圧力を0.1kPa～100kPaの各層に応じた所定の値に保った状態で、NH₃ガスとIII族窒化物原料ガス（TMA、TMGのバブリングガス）とを、各層において実現しようとする組成に応じた流量比でリアクタ内に導入することによって実現される。その際、設定膜厚に応じたタイミングで流量比を切り替えることで、それぞれの層が連続的にかつ所望の膜厚で形成される。

[0073] 機能層9の形成は、バッファ層8の形成後、基板温度を800℃以上1200℃以下の所定の機能層形成温度に保ち、リアクタ内圧力を0.1kPa～100kPaとした状態で、TMIバブリングガス、TMAバブリングガス、あるいはTMGバブリングガスの少なくとも1つとNH₃ガスとを、作製しようとする機能層9の組成に応じた流量比にてリアクタ内に導入し、NH₃とTMI、TMA、およびTMGの少なくとも1つとを反応させることにより実現される。

[0074] 機能層9が形成された後、エピタキシャル基板10は、リアクタ内で常温

まで降温される。その後、リアクタから取り出されたエピタキシャル基板 10 は、適宜、後段の処理（電極層のパターニングなど）に供される。

[0075] <バッファ層の作用効果>

本実施の形態もそうであるように、一般に、単結晶シリコンウェハーの上に III 族窒化物からなる結晶層を所定の形成温度でエピタキシャル成長させてエピタキシャル基板を得ようとする場合、III 族窒化物の方がシリコンよりも熱膨張係数が大きい（例えば、シリコン： $3.4 \times 10^{-6}/K$ 、GaN： $5.5 \times 10^{-6}/K$ ）ことから、結晶成長後、常温にまで降温される過程において、結晶層には面内方向に引張応力が生じる。この引張応力は、エピタキシャル基板におけるクラック発生や、反りの要因となる。本実施の形態においては、係る引張応力を低減させ、クラック発生や反りを抑制する目的で、エピタキシャル基板 10 にバッファ層 8 が設けられている。より具体的には、バッファ層 8 を構成する各層がそれぞれに奏する作用効果によって、エピタキシャル基板 10 におけるクラックの発生と反りとが抑制されてなる。以下、詳細に説明する。

[0076] （組成変調層）

図 2 は、組成変調層 3 において第 1 単位層 31 の上に第 2 単位層 32 が形成されるときに結晶格子の様子を示すモデル図である。いま、第 2 単位層 32 を構成する III 族窒化物の無歪状態における面内方向の格子長を a_0 、実際の格子長を a とする。本実施の形態においては、図 2 (a)、(b) に示すように、第 2 単位層 32 は第 1 単位層 31 の結晶格子に対して整合を保ちつつ結晶成長していく。このことは、結晶成長時に、第 2 単位層 32 の面内方向に $s = a_0 - a$ だけの圧縮歪が生じることを意味している。すなわち、第 2 単位層 32 の結晶成長は歪みエネルギーを保持した状態で進行する。

[0077] ただし、成長が進むにつれて、エネルギー的な不安定さが増していくため、第 2 単位層 32 には歪みエネルギーを解放するべく徐々にミスフィット転位が導入されていく。やがて、ある臨界状態に達すると、第 2 単位層 32 に保持されていた歪みエネルギーは全て解放されてしまうことになる。このと

き、図2(c)に示すように $a = a_0$ となる。

[0078] ところが、この図2(c)に示す状態に達するまでの、図2(b)に示すような $a_0 > a$ の状態第2単位層32の形成を終了させてしまえば、第2単位層32は歪みエネルギーを保持したまま(圧縮歪を含んだまま)となる。本実施の形態においては、このような歪みエネルギーを含んだままの結晶成長を、コヒーレントな状態での結晶成長と称する。換言すれば、歪みエネルギーが完全に解放されてしまう臨界膜厚よりも小さい厚みに第2単位層32を形成する限りにおいては、第2単位層32は第1単位層31に対してコヒーレントな状態にあるといえる。あるいは、第2単位層32の最上面(直上の第1単位層31と接する面)の格子長 a について $a_0 > a$ が成り立つ限りにおいては、第2単位層32は第1単位層31に対してコヒーレントな状態にあるということもできる。なお、第2単位層32が上述した態様にて歪みエネルギーを含んでいる限りにおいては、第2単位層32において部分的に $a_0 = a$ になっていたとしても、第2単位層32は第1単位層31に対してコヒーレントな状態にあるといえる。

[0079] 第1単位層31を構成するIII族窒化物の面内格子定数は第2単位層32を構成するIII族窒化物の面内格子定数よりも小さいので、この歪みエネルギーを保持したままの第2単位層32の上に第1単位層31を形成させたとしても、コヒーレントな状態は保たれ、直下の第2単位層32に保持された歪みエネルギーが解放されることもない。そして、この第1単位層31の上に再び、第2単位層32をコヒーレントな状態に成長させれば、係る第2単位層32においても、上述と同様の圧縮歪が生じることとなる。

[0080] 以降、同様に、コヒーレントな状態での成長を維持したまま第1単位層31と第2単位層32の形成(ペア層の形成)を繰り返すと、それぞれのペア層の第2単位層32に歪みエネルギーが保持されるので、組成変調層3は全体として、圧縮歪を含んだ部位として形成されることになる。

[0081] 組成変調層3に導入された圧縮歪は、熱膨張係数差に起因して生じる引張応力とは正反対の向きに作用するので、降温時において、該引張応力を相殺

する作用がある。概略的にいえば、1つのペア層における圧縮歪の大きさと、組成変調層3におけるペア層の繰り返し数との積に比例する力で、引張応力が相殺されることになる。すなわち、組成変調層3は、エピタキシャル基板10に圧縮歪を導入してなる部位であるともいえる。

[0082] なお、第1単位層31は、2つの第2単位層32の間に介在することになるが、その厚みが小さすぎる場合は、第2単位層32に生じる圧縮歪が小さくなって逆に第1単位層31自体に引張応力を内在しやすくなり好ましくない。一方、厚みが大きすぎる場合は、第2単位層32自体が引張方向の力を受けやすくなってやはり好ましくない。上述した、3nm~20nm程度の厚みという要件は、このような不具合が生じないという点から好適なものである。

[0083] また、上述した、第1単位層31がAlNにて構成され、第2単位層32が $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物にて構成されるという要件は、個々のペア層において十分な大きさの圧縮歪を得ることができるという点で好適なものである。

[0084] (終端層)

終端層4は、組成変調層3の最上部に、第1単位層31と同じ組成のIII族窒化物にて、つまりは、第2単位層32を形成するIII族窒化物よりも面内格子定数が小さいIII族窒化物にて、第1単位層31よりも大きな厚みで形成されてなる。係る態様にて終端層4が存在することで、組成変調層3に導入された圧縮歪は、後述する態様にて中間層5を設ける場合においても好適に維持される。

[0085] なお、終端層4の厚みが大きすぎる場合、その格子定数がバルク状態に近づくために、この上に形成される中間層5において格子緩和が生じる。この場合、後述するように本来であれば歪強化層として機能させるべく設けられる中間層5が、その作用効果を奏しなくなるため、好ましくない。一方、終端層4の厚みが小さすぎる場合は、2つの第2単位層32の間に介在する第1単位層31と同様に、終端層4に引張応力を内在しやすくなり好ましくな

い。上述した、第1単位層31の厚みより大きな厚みに形成するという要件、および、20nm~100nm程度の厚みという要件は、このような不具合が生じないという点から好適なものである。

[0086] (中間層)

図3は、中間層5の形成までを行ったエピタキシャル基板の反り量と、中間層5の厚みとの関係を示す図である。なお、図3は、エピタキシャル膜の総膜厚を横軸として表している。また、本実施の形態において、エピタキシャル基板の反り量は、レーザー変位計によって測定するものとする。

[0087] 図3に示した5つの例において、中間層5の厚み以外の条件は全て同じである。下地基板1としては、p型の導電性を有する(111)単結晶シリコンウェハ(525 μ m厚)を用いている。その上に、AlNからなり平均膜厚100nmの第1下地層2aと、Al_{0.1}Ga_{0.9}Nからなり平均膜厚40nmの第2下地層2bと、5nm厚のAlNからなる第1単位層31と15nm厚のAl_{0.1}Ga_{0.9}Nからなる第2単位層32とのペア層が20回繰り返し積層された組成変調層3と図示しない終端層4と、GaNからなる中間層5とが積層されてなる。

[0088] 図3においては、中間層5の厚みが200nmのときに、エピタキシャル基板の反り量が極小となっている。上述のように、中間層5は、終端層4に対してコヒーレントな状態に形成されるので、図3に示す結果は、200nm程度の厚みに形成された中間層5が、バッファ層8によってエピタキシャル基板10に導入された圧縮歪をより強める作用効果を奏することを示唆している。係る結果を踏まえ、本実施の形態においては、中間層5を100nm以上500nm以下程度の厚みに設け、組成変調層3において導入された圧縮歪を強めるようにしている。これにより、エピタキシャル基板10においては、引張応力がより効果的に相殺されるようになっている。すなわち、エピタキシャル基板10において、中間層5は、歪強化層として機能する。

[0089] なお、図3に示すように、中間層5の厚みが大きくなりすぎると、エピタキシャル基板10の反り量は増大する。これは、結晶が成長するにつれて歪

みエネルギーの蓄積に限界が生じて圧縮歪が弱まってくるとともに、格子がコヒーレントな状態を保って成長するのが困難となっていき、やがては臨界膜厚を越えて歪みエネルギーが開放されてしまうためである。係る反り量の増加はクラック発生の要因となる。ちなみに、図3においては中間層5の厚みが500nmのときの反り量は中間層5を設けない場合よりも大きい。単位構造体6が連続して複数積層される実際のエピタキシャル基板10において、中間層5の厚みが500nm以下の範囲であればバッファ層8における圧縮歪が好適に強められることは、本発明の発明者によって確認されている。

[0090] さらに多くの単位構造体6を設ける場合も、上述と同様の態様にてそれぞれの単位構造体6を形成することで、全ての単位構造体6に圧縮歪が好適に内在された状態が実現されてなる。なお、単位構造体6の構成が同じであれば、単位構造体6の繰り返し積層数が多いほど、バッファ層8に内在される圧縮歪は大きくなる。

[0091] 以上のような態様にて構成されたバッファ層8を備えるエピタキシャル基板10においては、該バッファ層8が大きな圧縮歪を内在していることで、シリコンとIII族窒化物との熱膨張係数差に起因して生じる引張応力が、好適に相殺された状態が実現されている。これにより、エピタキシャル基板10においては、クラックフリーが実現されてなる。また、このよう態様にて引張応力が相殺されてなることで、エピタキシャル基板10は、反り量が100 μ m以下にまで抑制されたものとなっている。

[0092] すなわち、本実施の形態に係るエピタキシャル基板10においては、歪導入層である組成変調層3の上に終端層4と歪強化層としての中間層5とを設けた単位構造体6を繰り返し積層する態様にて、バッファ層8を設けることで、バッファ層8に大きな圧縮歪を内在させ、シリコンとIII族窒化物との熱膨張係数差に起因してエピタキシャル基板10に生じる引張応力を、好適に低減させてなる。これにより、エピタキシャル基板10においては、クラックフリーが実現され、反りも低減されてなる。

[0093] なお、バッファ層 8 は、上述したように歪みエネルギーの蓄積が抑制された状態の第 2 下地層 2 b の上に形成されることから、引張応力の相殺効果が、第 2 下地層 2 b に蓄積された歪みエネルギーを原因として阻害されることはない。

[0094] また、単位構造体 6 を繰り返し積層することは、エピタキシャル膜自体の総膜厚を増大させることになる。一般に、エピタキシャル基板 10 を用いて HEMT 素子を作製する場合、その総膜厚が大きいほど該 HEMT 素子の絶縁破壊電圧が大きくなるので、本実施の形態に係るエピタキシャル基板 10 の構成は、係る絶縁破壊電圧の増大にも資するものである。

[0095] <エピタキシャル基板の高耐電圧化>

本実施の形態においては、バッファ層 8 の構成パラメータ（各層の組成、厚み、組成変調層 3 のペア層の数、単位構造体 6 の繰り返し積層数など）を種々に違えることで、具体的構成の異なる様々なエピタキシャル基板 10 を得ることができる。

[0096] 特に、第 2 単位層 3 2 を $A_{1-x}Ga_{1-x}N$ ($0.1 \leq x \leq 0.25$) なる組成の III 族窒化物にて形成し、かつ中間層 5 を $A_{1-y}Ga_{1-y}N$ ($0.1 \leq y \leq 0.25$) なる組成の III 族窒化物にて形成することで、クラックフリーであり、かつ、耐電圧の高いエピタキシャル基板 10 が実現される。なお、本実施の形態において、耐電圧とは、エピタキシャル基板 10 に対し、0 V から値を増大させつつ電圧を印加したときに、 1 mA/cm^2 の漏れ電流が生じた電圧値であるとする。

[0097] 係る場合においては、各層の厚みや積層数が同じであれば、上述の組成範囲で第 2 単位層 3 2 と中間層 5 における A I モル分率（上述の x 、 y に相当）が大きいほど、耐電圧が高い傾向がある。なお、係る場合において、第 2 単位層 3 2 と中間層 5 における A I モル分率は同じであってよい。

[0098] 以上、説明したように、本実施の形態によれば、下地基板と機能層との間に、組成変調層と終端層と中間層とからなり圧縮歪を内在する単位構造体を連続して積層してなるバッファ層を設けるようにしたことで、安価で大口徑

のものを入手容易なシリコン基板を下地基板とし、かつ、クラックフリーで結晶品質の優れたエピタキシャル基板を、得ることができる。また、係るエピタキシャル基板は、反り量が $100\mu\text{m}$ 以下にまで抑制されたものとなっている。

[0099] さらに、第2単位層と中間層とをAlモル分率が0.1以上0.25以下のAlGaNにて形成した場合には、クラックフリーであり、かつ、耐電圧の高いエピタキシャル基板が実現される。

[0100] <変形例>

エピタキシャル基板10は、下地基板1と第1下地層2aの間に図示しない界面層を備える態様であってもよい。界面層は、数nm程度の厚みを有し、アモルファスのSiAl_uO_vN_wからなるのが好適な一例である。

[0101] 下地基板1と第1下地層2aとの間に界面層を備える場合、下地基板1と第2下地層2bなどとの格子ミスフィットがより効果的に緩和され、その上に形成される各層の結晶品質がさらに向上する。すなわち、界面層を備える場合には、第1下地層2aであるAlN層が、界面層を備えない場合と同様の凹凸形状を有しかつ界面層を備えない場合よりも内在する結晶粒界が少なくなるように形成される。特に(0002)面でのX線ロックングカーブ半値幅の値が改善された第1下地層2aが得られる。これは、下地基板1の上に直接に第1下地層2aを形成する場合に比して、界面層の上に第1下地層2aを形成する場合の方が第1下地層2aとなるAlNの核形成が進みにくく、結果的に、界面層が無い場合に比べて横方向成長が促進されることによる。なお、界面層の膜厚は5nmを超えない程度で形成される。このような界面層を備えた場合、第1下地層2aを、(0002)面のX線ロックングカーブ半値幅が、0.5度以上0.8度以下の範囲となるように形成することができる。この場合、(0002)面のX線ロックングカーブ半値幅が800sec以下であり、らせん転位密度が $1\times 10^9/\text{cm}^2$ 以下であるという、さらに結晶品質の優れた機能層9を形成することができる。

[0102] なお、界面層の形成は、シリコンウェハーが第1下地層形成温度に達した

後、第1下地層2 aの形成に先立って、TMAバブリングガスのみをリアクタ内に導入し、ウェハーをTMAバブリングガス雰囲気に晒すようすることによって実現される。

[0103] また、第1下地層2 aの形成時に、Si原子とO原子の少なくとも一方が第1下地層2 aに拡散固溶してなる態様や、N原子とO原子の少なくとも一方が下地基板1に拡散固溶してなる態様であってもよい。

実施例

[0104] 実施例として、バッファ層8の層構成が異なる複数種のエピタキシャル基板10を作製した。実施例に係るエピタキシャル基板10の基本構成、具体的には各層の形成材料および膜厚を、表1に示している。

[0105]

[表1]

名称		材料	膜厚		
機能層	バリア層	$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$	25nm		
	チャネル層	GaN	700nm		
単位構造体	中間層		$Al_yGa_{1-y}N$	D nm	
	終端層		AlN	C nm	
	組成変調層	第2単位層	$Al_xGa_{1-x}N$	B nm	} (A+B) × n
		第1単位層	AlN	A nm	
単位構造体	中間層		$Al_yGa_{1-y}N$	D nm	
	終端層		AlN	C nm	
	組成変調層	第2単位層	$Al_xGa_{1-x}N$	B nm	} (A+B) × n
		第1単位層	AlN	A nm	
⋮					
単位構造体	中間層		$Al_yGa_{1-y}N$	D nm	
	終端層		AlN	C nm	
	組成変調層	第2単位層	$Al_xGa_{1-x}N$	B nm	} (A+B) × n
		第1単位層	AlN	A nm	
単位構造体	中間層		$Al_yGa_{1-y}N$	D nm	
	終端層		AlN	C nm	
	組成変調層	第2単位層	$Al_xGa_{1-x}N$	B nm	} (A+B) × n
		第1単位層	AlN	A nm	
第2下地層/第1下地層		$Al_{0.1}Ga_{0.9}N/AlN$	140nm		
下地基板		Si (111)	525nm		

K回
繰り返し

[0106] 表1に示すように、本実施例においては、下地基板1、下地層2（第1下地層2 aおよび第2下地層2 b）、機能層9は全てのエピタキシャル基板10について同じ材料および膜厚にて形成した。なお、機能層9はチャネル層とバリア層との2層構成とした。

[0107] 一方、第1単位層31および終端層4はいずれもAlNにて形成した。表1においては第1単位層31の膜厚を変数A（nm）として示し、終端層4

の膜厚を変数C (nm)として示している。同様に、第2単位層32の膜厚を変数B (nm)として、中間層5の膜厚を変数D (nm)として示している。また、nは、第1単位層31と第2単位層32の層数である。Kは単位構造体6の繰り返し数である。

[0108] 具体的には、x、y、C、D、n、およびKの値を種々に違えることで、バッファ層8の構成が異なる21種のエピタキシャル基板10（試料1～21）を作製し、クラックの発生の有無の評価と、反り量の測定とを行った。なお、いずれの試料においても、 $A = 5 \text{ nm}$ 、 $B = 15 \text{ nm}$ とした。それぞれのエピタキシャル基板10について、層構成と、クラックの発生の有無と、反り量と、耐電圧とを、表2に一覧にして示す。

[0109]

[表2]

試料 No.	パツク層										エ ⁺ 外 シリ膜 総膜厚 [μm]	評価結果		耐電圧 (漏れ 電流 1mA/cm ²) [V]
	単位構造体の構成											クラック発生状況	反り [μm]	
	組成変調層		終端層	中間層		K		総厚 [nm]						
	x	π	C [nm]	y	D [nm]									
1	0	20	20	0	180	4	2340	3.21	なし	57	60			
2	0	16	20	0	240	4	2260	3.13	なし	51	70			
3	0	20	50	0	180	4	2340	3.21	なし	56	80			
4	0	16	50	0	240	4	2260	3.13	なし	52	100			
5	0.1	20	20	0.1	180	4	2340	3.21	なし	70	540			
6	0.1	16	20	0.1	240	4	2260	3.13	なし	64	605			
7	0.1	20	50	0.1	180	4	2340	3.21	なし	72	525			
8	0.1	16	50	0.1	240	4	2260	3.13	なし	64	610			
9	0.15	20	20	0.15	180	4	2340	3.21	なし	76	595			
10	0.15	16	20	0.15	240	4	2260	3.13	なし	69	640			
11	0.15	20	50	0.15	180	4	2340	3.21	なし	75	600			
12	0.15	16	50	0.15	240	4	2260	3.13	なし	64	650			
13	0.2	20	20	0.2	180	4	2340	3.21	なし	70	725			
14	0.2	16	20	0.2	240	4	2260	3.13	なし	63	780			
15	0.2	20	50	0.2	180	4	2340	3.21	なし	70	720			
16	0.2	16	50	0.2	240	4	2260	3.13	なし	62	800			
17	0	100	5	0	180	1	2185	3.05	外周10nm範囲にクラック	126	未評価			
18	0	20	5	0	180	4	2340	3.21	外周10nm範囲にクラック	135	未評価			
19	0	20	5	0	180	4	2340	3.21	外周10nm範囲にクラック	115	未評価			
20	0	16	5	0	240	4	2260	3.13	外周10nm範囲にクラック	125	未評価			
21	0	16	5	0	240	4	2260	3.13	外周10nm範囲にクラック	120	未評価			

[0110] 第2下地層2bの形成まではいずれの試料についても同様の手順で行った。まず、下地基板1として基板厚みが525μmのp型の導電性を有する4インチ(111)面単結晶シリコンウェハー(以下、シリコンウェハー)を用意した。用意したシリコンウェハーに、フッ化水素酸/純水=1/10(体積比)なる組成の希フッ酸による希フッ酸洗浄と硫酸/過酸化水素水=1/1(体積比)なる組成の洗浄液によるSPM洗浄とを施して、ウェハー表

面に厚さ数Åの酸化膜が形成された状態とし、これをMOCVD装置のリアクタ内にセットした。次いで、リアクタ内を水素・窒素混合雰囲気とし、リアクタ内圧力を15kPaとして、基板温度が第1下地層形成温度である1100℃となるまで加熱した。

[0111] 基板温度が1100℃に達すると、リアクタ内にNH₃ガスを導入し、1分間、基板表面をNH₃ガス雰囲気に晒した。

[0112] その後、TMAバブリングガスを所定の流量比にてリアクタ内に導入し、NH₃とTMAを反応させることによって表面が三次元的凹凸形状を有する第1下地層2aを形成した。その際、第1下地層2aの成長速度（成膜速度）は20nm/minとし、第1下地層2aの目標平均膜厚は100nmとした。

[0113] 第1下地層2aが形成されると、続いて、基板温度を1100℃とし、リアクタ内圧力を15kPaとして、TMGバブリングガスをリアクタ内にさらに導入し、NH₃とTMAならびにTMGとの反応により、第1下地層2bとしてのAl_{0.1}Ga_{0.9}N層を平均膜厚が40nm程度となるように形成した。

[0114] 第2下地層2bの形成に続いて、バッファ層8を形成した。なお、組成変調層3の形成においては、基板温度を1100℃とし、リアクタ内圧力を15kPaとした。用いた原料ガスは下地層2の形成に用いたものと同じである。

[0115] いずれの試料においても、バッファ層8の形成後、GaNからなる機能層9を700nmの厚みに形成した。機能層9の形成においては、基板温度を1100℃とし、リアクタ内圧力を15kPaとした。いずれも、用いた原料ガスは下地層2の形成に用いたものと同じである。

[0116] 以上により、エピタキシャル基板が得られた。得られたエピタキシャル基板について、クラック発生の有無を目視により確認した。また、レーザー変位計によって反り量を測定した。

[0117] 表2に示したように、下地基板1上に形成されたエピタキシャル膜の総膜厚は同程度であるにもかかわらず、No. 1～No. 16の試料については

クラックが発生しなかったのに対して、No. 17～No. 21の試料においては、外周10mmの範囲にクラックが発生していた。なお、係るクラックが生じた試料については、耐電圧の評価が行えなかった。

[0118] No. 1～No. 16の試料とNo. 17～No. 21の試料の構成を対比すると、前者の終端層4の厚みは第1単位層31の厚み ($A = 5 \text{ nm}$) よりも大きい20nm以上50nm以下の範囲内であるのに対して、後者の終端層4の厚みは第1単位層31の厚みと同じ5nmである。特に、No. 1～No. 4の試料とNo. 18～No. 21の試料とは、係る終端層4の厚みが異なるほかは、構成が共通している。それにも関わらずクラックの発生状況に上述のような差異が生じているということは、終端層4を第1単位層31よりも厚く形成することが、エピタキシャル基板10のクラックフリー化に有効であることを示している。

[0119] また、エピタキシャル基板10の反り量に着目すると、クラックが発生していたNo. 17～No. 21の試料においては、100 μm を上回っているのに対して、クラックが発生していないNo. 1～No. 16の試料においては、100 μm を大きく下回る約80 μm 以下にまで反り量が抑制されている。係る結果は、上述の実施の形態に係るエピタキシャル基板10においては、クラックフリーに加えて、反りの抑制も実現されていることを示している。

[0120] 一方、耐電圧に着目すると、 $x = y = 0$ の場合、つまりは第2単位層32と中間層5とがGaNにて形成される場合（試料No. 1～No. 4）は、約100V以下と総じて耐電圧が低いのに対して、 $x = y = 0.1$ 、 $x = y = 0.15$ 、および $x = y = 0.2$ の場合（試料No. 5～No. 16）は、約500V以上という高い耐電圧が得られている。係る結果は、Alモル分率が0.1以上0.25以下となるように第2単位層32と中間層5とを形成することで、エピタキシャル基板10の高耐電圧化が実現されることを示している。しかも、第2単位層32と中間層5のAlモル分率が大きいほど、耐電圧が高い傾向がある。

符号の説明

- [0121] 1 下地基板
- 2 下地層
- 2 a 第1下地層
- 2 b 第2下地層
- 3 組成変調層
- 4 終端層
- 5 中間層
- 6 単位構造体
- 8 バッファ層
- 9 機能層
- 10 エピタキシャル基板
- 31 (組成変調層の) 第1単位層
- 32 (組成変調層の) 第2単位層

請求の範囲

- [請求項1] (1 1 1) 方位の単結晶シリコンである下地基板の上に、前記下地基板の基板面に対し(0 0 0 1)結晶面が略平行となるようにIII族窒化物層群を形成してなるエピタキシャル基板であって、
- 組成の相異なる第1単位層と第2単位層とを繰り返し交互に積層してなることで圧縮歪を内在する組成変調層と、
- 前記組成変調層の最上部に形成されてなり、前記組成変調層に内在された前記圧縮歪を維持する終端層と、
- 前記終端層の上に形成され、前記組成変調層に内在された前記圧縮歪を強める歪強化層と、
- を含む積層単位を連続して複数積層してなるバッファ層と、
- 前記バッファ層の上に形成された結晶層と、
- を備えることを特徴とするエピタキシャル基板。
- [請求項2] 請求項1に記載のエピタキシャル基板であって、
- 前記第1単位層を構成する第1のIII族窒化物よりも前記第2単位層を構成する第2のIII族窒化物の方が無歪状態における面内格子定数が大きく、
- それぞれの前記第2単位層は前記第1単位層に対してコヒーレントな状態に形成されてなる、
- ことを特徴とするエピタキシャル基板。
- [請求項3] 請求項2に記載のエピタキシャル基板であって、
- 前記終端層が、前記第1のIII族窒化物にて前記第1単位層よりも大きい厚みで形成されてなることを特徴とするエピタキシャル基板。
- [請求項4] 請求項3に記載のエピタキシャル基板であって、
- 前記歪強化層が、第3のIII族窒化物からなり、前記終端層に対してコヒーレントに形成されてなる中間層を備えることを特徴とするエピタキシャル基板。
- [請求項5] (1 1 1) 方位の単結晶シリコンである下地基板の上に、前記下地

基板の基板面に対し(0001)結晶面が略平行となるようにIII族窒化物層群を形成してなるエピタキシャル基板であって、

組成の相異なるIII族窒化物からなる第1単位層と第2単位層とを繰り返し交互に積層してなり、かつ、前記第1単位層を構成する第1のIII族窒化物よりも前記第2単位層を構成する第2のIII族窒化物の方が無歪状態における面内格子定数が大きい組成変調層と、

前記組成変調層の最上部に形成された、前記第1のIII族窒化物からなり前記第1単位層よりも厚みが大きい終端層と、

第3のIII族窒化物からなる中間層と、
を含む積層単位を連続して複数積層してなるバッファ層と、

前記バッファ層の上に形成された、III族窒化物からなる結晶層と、
を備え、

前記組成変調層においてはそれぞれの前記第2単位層が前記第1単位層に対してコヒーレントな状態に形成されてなり、

前記中間層が前記終端層に対してコヒーレントな状態に形成されてなる、

ことを特徴とするエピタキシャル基板。

[請求項6] 請求項1ないし請求項5のいずれかに記載のエピタキシャル基板であって、

前記第1単位層が A_1N からなり、前記第2単位層が $A_{1-x}Ga_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物からなることを特徴とするエピタキシャル基板。

[請求項7] 請求項6に記載のエピタキシャル基板であって、

前記中間層が $A_1G a_{1-y}N$ ($0 \leq y \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物にて100nm以上500nm以下の厚みに形成されてなることを特徴とするエピタキシャル基板。

[請求項8] 請求項6または請求項7に記載のエピタキシャル基板であって、

前記第2単位層が $A I_x G a_{1-x} N$ ($0.1 \leq x \leq 0.25$) なる組成のIII族窒化物からなり、かつ、前記中間層が $A I_y G a_{1-y} N$ ($0.1 \leq y \leq 0.25$) なる組成のIII族窒化物からなることを特徴とするエピタキシャル基板。

[請求項9]

請求項8に記載のエピタキシャル基板であって、

前記第2単位層の組成と前記中間層の組成が実質的に同じであることを特徴とするエピタキシャル基板。

[請求項10]

請求項1ないし請求項9のいずれかに記載のエピタキシャル基板であって、

前記下地基板の上に形成された、 $A I N$ からなる第1の下地層と、
前記第1の下地層の上に形成され、 $A I_p G a_{1-p} N$ ($0 \leq p < 1$)
からなる第2の下地層と、
をさらに備え、

前記第1の下地層が、柱状あるいは粒状の結晶もしくはドメインの少なくとも一種から構成される多結晶欠陥含有性層であり、

前記第1の下地層と前記第2の下地層との界面が3次元的凹凸面であり、

前記第2の下地層の直上に前記バッファ層が形成されてなる、
ことを特徴とするエピタキシャル基板。

[請求項11]

(111)方位の単結晶シリコンである下地基板の上に、前記下地基板の基板面に対し(0001)結晶面が略平行なIII族窒化物層群を形成してなる半導体素子用エピタキシャル基板の製造方法であって、

バッファ層を形成するバッファ層形成工程と、

前記バッファ層よりも上方にIII族窒化物からなる結晶層を形成する結晶層形成工程と、

を備え、

前記バッファ層形成工程が、

組成の相異なるIII族窒化物からなる第1単位層と第2単位層とを繰り返し交互に積層することにより組成変調層を形成する組成変調層形成工程と、

前記組成変調層の最上部に終端層を形成する終端層形成工程と、
前記終端層の上に中間層を形成する中間層形成工程と、
を含む積層単位形成工程を連続して複数回繰り返す工程であり、

前記組成変調層形成工程においては、

前記第1単位層を構成する第1のIII族窒化物よりも前記第2単位層を構成する第2のIII族窒化物の方が無歪状態における面内格子定数が大きくなるように、かつ、

それぞれの前記第2単位層を前記第1単位層に対してコヒーレントな状態になるように形成し、

前記終端層形成工程においては、前記終端層を、前記第1のIII族窒化物にて前記第1単位層よりも大きい厚みに形成し、

前記中間層形成工程においては、前記中間層を、第3のIII族窒化物にて、前記終端層に対してコヒーレントな状態になるように形成する、

ことを特徴とするエピタキシャル基板の製造方法。

[請求項12] 請求項11に記載のエピタキシャル基板の製造方法であって、
前記第1単位層を A_1N にて形成し、前記第2単位層を $A_1xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物にて形成することを特徴とするエピタキシャル基板の製造方法。

[請求項13] 請求項12に記載のエピタキシャル基板の製造方法であって、
前記中間層を $A_1yGa_{1-y}N$ ($0 \leq y \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物にて100nm以上500nm以下の厚みに形成することを特徴とするエピタキシャル基板の製造方法。

[請求項14] 請求項12または請求項13に記載のエピタキシャル基板の製造方法であって、

前記第2単位層を $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.1 \leq x \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物にて形成し、かつ、前記中間層を $Al_yGa_{1-y}N$ ($0.1 \leq y \leq 0.25$)なる組成のIII族窒化物にて形成することを特徴とするエピタキシャル基板の製造方法。

[請求項15]

請求項14に記載のエピタキシャル基板の製造方法であって、前記第2単位層の組成と前記中間層の組成を実質的に同じにすることを特徴とするエピタキシャル基板の製造方法。

[請求項16]

請求項11ないし請求項15のいずれかに記載のエピタキシャル基板の製造方法であって、

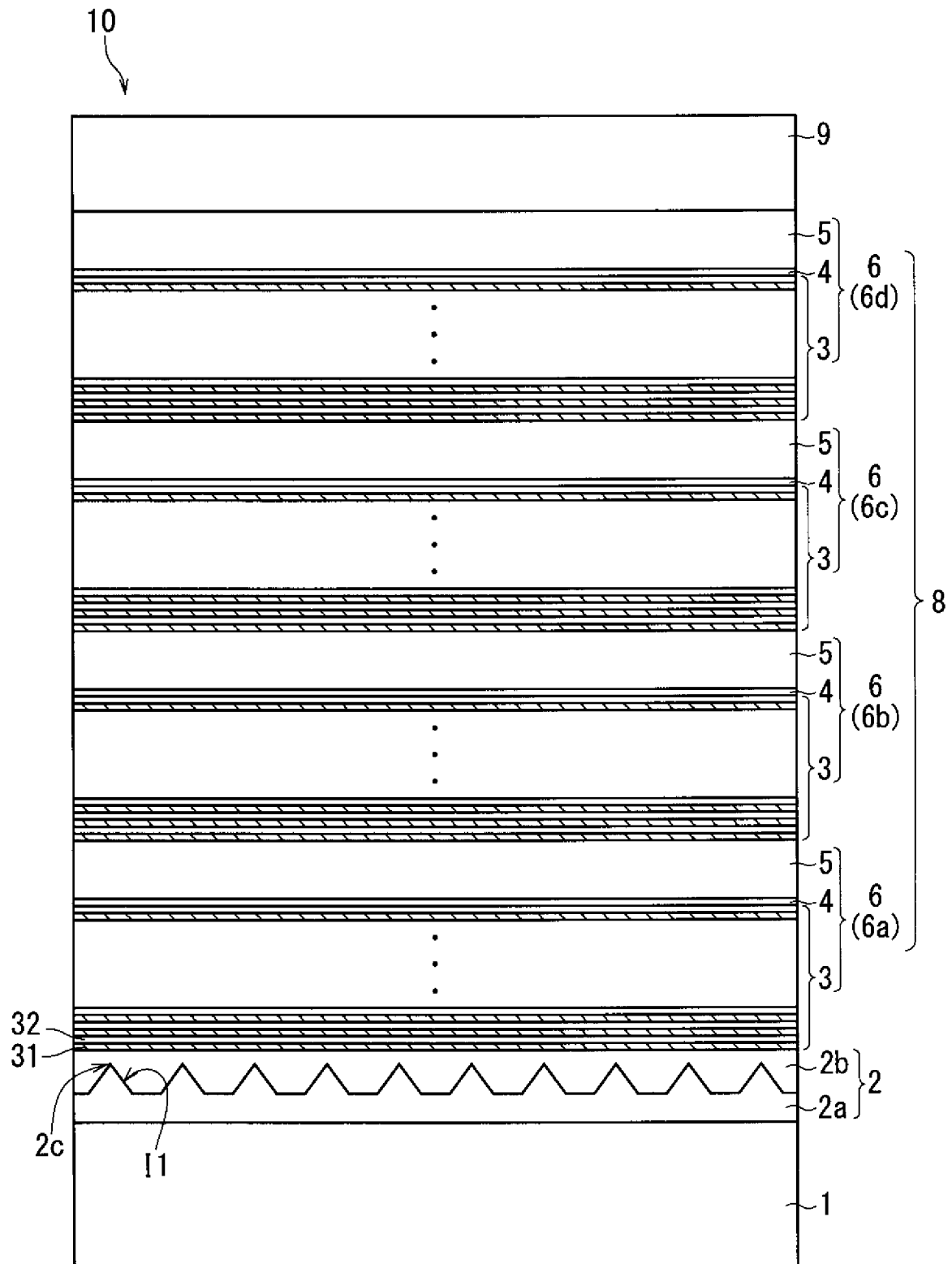
前記下地基板の上に、 AlN からなる第1の下地層を形成する第1下地層形成工程と、

前記第1の下地層の上に、 $Al_pGa_{1-p}N$ ($0 \leq p < 1$)からなる第2の下地層を形成する第2下地層形成工程と、
をさらに備え、

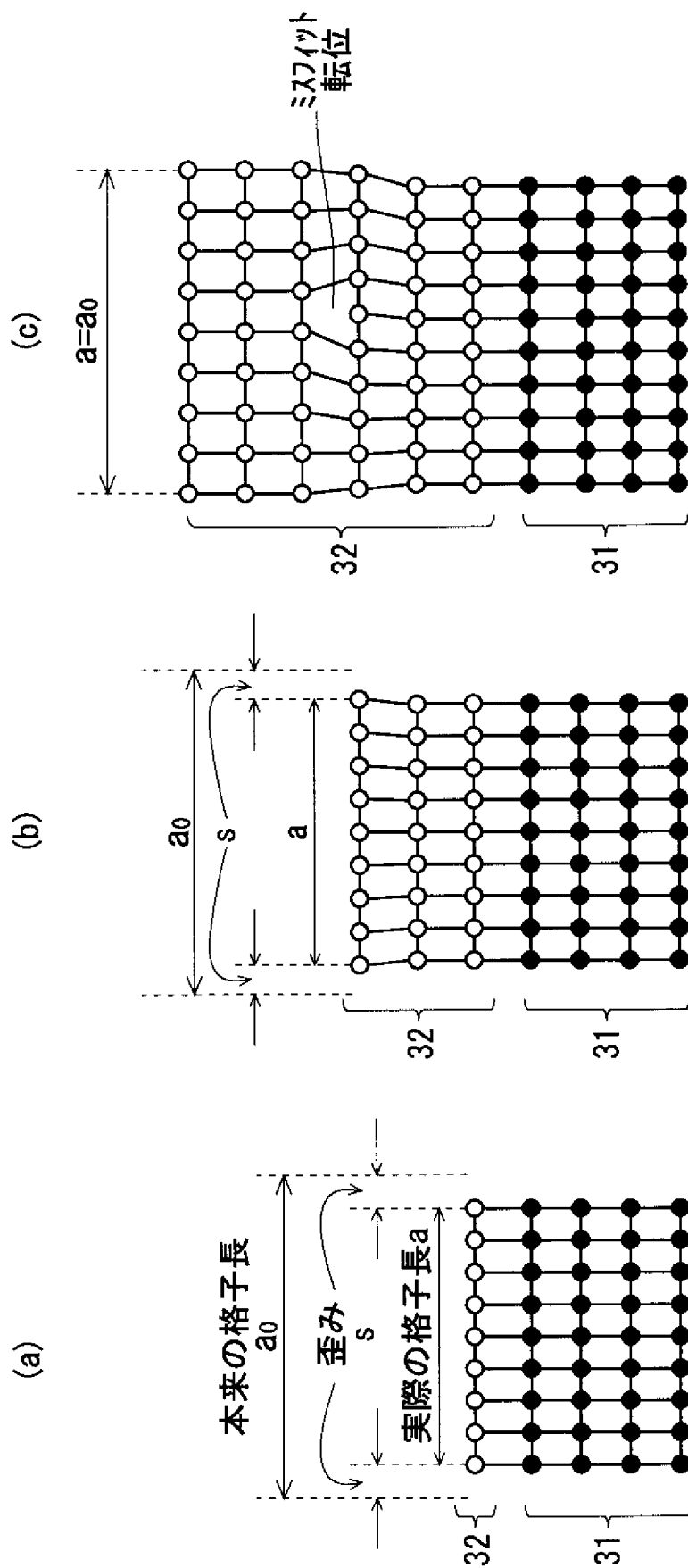
前記第1下地層形成工程においては、前記第1の下地層を、柱状あるいは粒状の結晶もしくはドメインの少なくとも一種から構成され、表面が三次元的凹凸面である多結晶欠陥含有性層として形成し、

前記バッファ層形成工程においては、前記第2の下地層の直上に前記バッファ層を形成する、
ことを特徴とするエピタキシャル基板の製造方法。

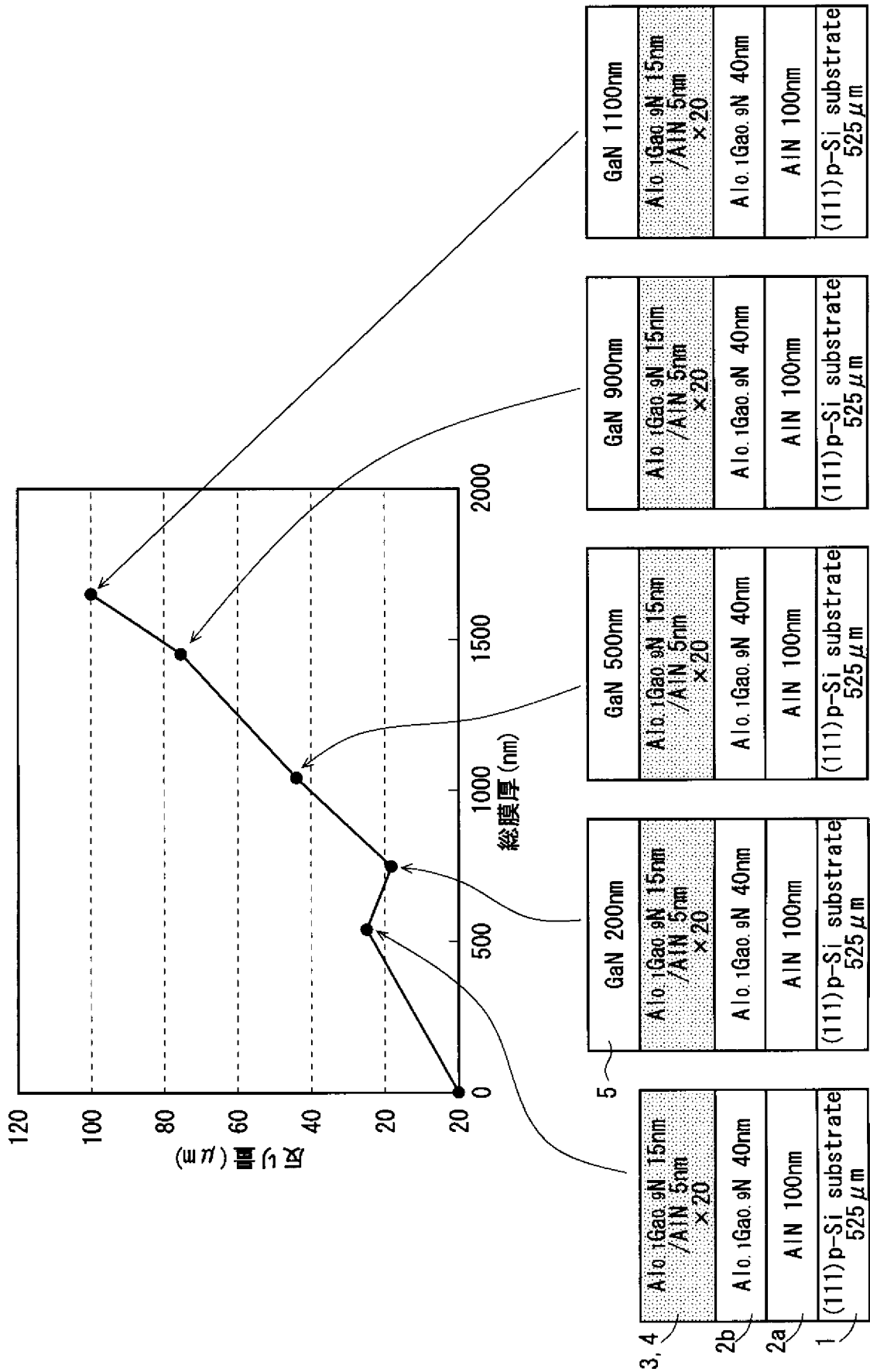
[図1]



[図2]



[図3]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/063071

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L21/205(2006.01)i, H01L21/338(2006.01)i, H01L29/778(2006.01)i,
H01L29/812(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L21/205, H01L21/338, H01L29/778, H01L29/812

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2011
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2011	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2011

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2003-059948 A (Sanken Electric Co., Ltd.), 28 February 2003 (28.02.2003), paragraphs [0012] to [0041]; fig. 1, 3 to 6 (Family: none)	1-5, 11 6-10, 12-16
Y	JP 2000-040858 A (Fujitsu Ltd.), 08 February 2000 (08.02.2000), paragraphs [0053] to [0089]; fig. 7 to 8 & US 2002/0110945 A1	1-5, 11
Y	JP 2009-239084 A (Rohm Co., Ltd.), 15 October 2009 (15.10.2009), paragraphs [0009] to [0065]; fig. 2 to 4, 7 to 8 & US 2009/0238227 A1	2, 4, 5, 11

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
17 August, 2011 (17.08.11)

Date of mailing of the international search report
30 August, 2011 (30.08.11)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01L21/205(2006.01)i, H01L21/338(2006.01)i, H01L29/778(2006.01)i, H01L29/812(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01L21/205, H01L21/338, H01L29/778, H01L29/812

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2011年
日本国実用新案登録公報	1996-2011年
日本国登録実用新案公報	1994-2011年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2003-059948 A (サンケン電気株式会社) 2003.02.28, 段落【0012】 — 【0041】, 図 1, 3-6 (ファミリーなし)	1-5, 11 6-10, 12-16
Y	JP 2000-040858 A (富士通株式会社) 2000.02.08, 段落【0053】— 【0089】, 図 7-8 & US 2002/0110945 A1	1-5, 11
Y	JP 2009-239084 A (ローム株式会社) 2009.10.15, 段落【0009】— 【0065】, 図 2-4, 7-8 & US 2009/0238227 A1	2, 4, 5, 11

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの
 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献
 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

17.08.2011

国際調査報告の発送日

30.08.2011

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

宮本 靖史

電話番号 03-3581-1101 内線 3471

4R

3760