

(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

(43) 国際公開日
2020年3月5日(05.03.2020)



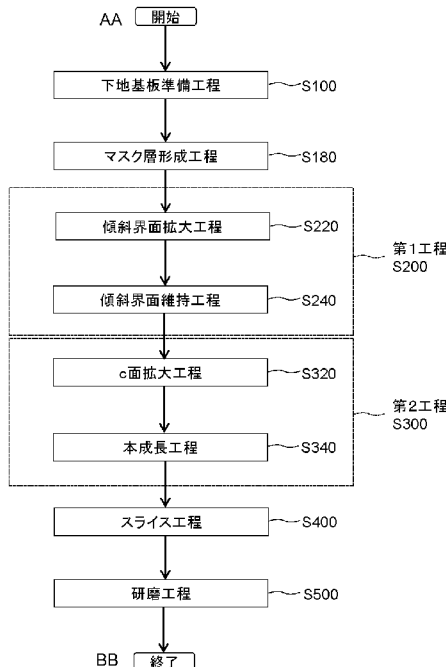
(10) 国際公開番号

WO 2020/045233 A1

- (51) 国際特許分類:
C30B 29/38 (2006.01) *C30B 25/04* (2006.01) **COMPANY, LIMITED)** [JP/JP]; 〒1048260 東京都中央区新川二丁目27番1号 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/032850
- (22) 国際出願日: 2019年8月22日(22.08.2019)
- (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 2018-159987 2018年8月29日(29.08.2018) JP
- (71) 出願人: 株式会社サイオクス (**SCIOCS COMPANY LIMITED**) [JP/JP]; 〒3191418 茨城県日立市砂沢町880番地 Ibaraki (JP). 住友化学株式会社 (**SUMITOMO CHEMICAL**
- (72) 発明者: 吉田 丈洋 (**YOSHIDA Takehiro**); 〒3191418 茨城県日立市砂沢町880番地 株式会社サイオクス内 Ibaraki (JP).
- (74) 代理人: 福岡 昌浩, 外 (**FUKUOKA Masahiro et al.**); 〒1020072 東京都千代田区飯田橋四丁目6番1号 21東和ビル3階 Tokyo (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, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH,

(54) **Title:** METHOD FOR MANUFACTURING NITRIDE SEMICONDUCTOR SUBSTRATE, NITRIDE SEMICONDUCTOR SUBSTRATE, AND LAYERED STRUCTURE

(54) 発明の名称: 窒化物半導体基板の製造方法、窒化物半導体基板および積層構造体



S100 Base substrate preparing step
S180 Mask layer forming step
S200 First step
S220 Inclined interface expanding step
S240 Inclined interface maintaining step
S300 Second step
S320 C plane expanding step
S340 Primary growth step
S400 Slicing step
S500 Polishing step
AA Start
BB End

(57) **Abstract:** The present invention includes: a step for preparing a base substrate; a step for forming a mask layer having a plurality of openings on a principal surface of the base substrate; a first step for growing a first layer, the surface of which is composed only of an inclined interface, on the principal surface of the base substrate; and a second step for epitaxially growing a single crystal of a group-III nitride semiconductor on the first layer, removing the inclined interface,

KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, 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, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (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, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

- 一 国際調査報告（条約第21条(3)）

and growing a second layer having a mirror-finished surface. In the first step, a plurality of recesses are formed in the top surface of the single crystal, and the (0001) plane is removed, thereby forming at least one valley section and a plurality of peak sections above each opening among the plurality of openings in the mask layer so that when any cross section perpendicular to the principal surface is viewed, the average distance of separation in the direction along the principal surface between a pair of the peak sections most adjacent across a single valley section among the plurality of peak sections is greater than 100 μm .

(57) 要約：下地基板を準備する工程と、下地基板の主面上に複数の開口部を有するマスク層を形成する工程と、下地基板の主面上に、表面が傾斜界面のみで構成される第1層を成長させる第1工程と、第1層上にⅠⅠ族窒化物半導体の単結晶をエピタキシャル成長させ、傾斜界面を消失させ、鏡面化された表面を有する第2層を成長させる第2工程と、を有し、第1工程では、単結晶の頂面に複数の凹部を生じさせ、（0001）面を消失させることで、マスク層の複数の開口部のうちそれぞれ1つの開口部の上方に、少なくとも1つの谷部および複数の頂部を形成し、主面に垂直な任意の断面を見たときに、谷部の1つを挟んで複数の頂部のうちで最も接近する一対の頂部同士が主面に沿った方向に離間した平均距離を、100 μm 超とする。

明 細 書

発明の名称：

窒化物半導体基板の製造方法、窒化物半導体基板および積層構造体

技術分野

[0001] 本発明は、窒化物半導体基板の製造方法、窒化物半導体基板および積層構造体に関する。

背景技術

[0002] III族窒化物半導体の単結晶を成長させる方法として、いわゆるELO (Epitaxial Lateral Overgrowth) 法が知られている。ELO法では、例えば、まず、下地基板上に、所定の開口部を有するマスク層を形成する。マスク層を形成したら、下地基板上にマスク層の開口部を介して断面三角形形状のファセット構造を成長させる。さらにファセット構造を成長させると、ファセット構造が形成するV字状の溝部が埋め込まれ、平坦な結晶層が得られる。このとき、ファセット構造の成長過程で、転位が屈曲されることで、結晶層の表面に到達する転位が低減される（例えば、特許文献1および2）。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2018-030763号公報

特許文献2：特開2018-030764号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] ここで、上述のELO法では、マスク層のピッチを長くすることで、すなわち、開口部の幅を広くすることで、結晶層の表面における転位密度が低減された領域を広くすることができる。

[0005] しかしながら、発明者は、マスク層のピッチを長くした場合に、以下のような課題が生じることを見出した。

[0006] マスク層のピッチを長くすると、ファセット構造の成長過程で（０００１）面を消失させることが困難となり、頂部が尖った断面三角形のファセット構造を形成することが困難となる。このため、（０００１）面が残存したまま、結晶層が成長する。（０００１）面が残存すると、転位が屈曲されずに結晶層の表面に伝播してしまう。その結果、結晶層の表面における転位密度が十分に低減されない可能性がある。

[0007] また、マスク層のピッチを長くすると、下地基板の主面からファセット構造の頂部までの高さが高くなる。このため、結晶層を平坦化させるまでの時間が長くなる。その結果、結晶層をスライスすることで得られる窒化物半導体基板の生産性が低下する可能性がある。

[0008] 本発明は、発明者が見出した上述の新規課題に基づくものであり、本発明の目的は、窒化物半導体基板の主面における転位密度を効率よく低減させることにある。

課題を解決するための手段

[0009] 本発明の一態様によれば、

気相成長法を用いた窒化物半導体基板の製造方法であって、

Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなり、最も近い低指数の結晶面が（０００１）面である主面を有する下地基板を準備する工程と、

前記下地基板の前記主面上に、複数の開口部を有するマスク層を形成する工程と、

前記（０００１）面以外の一对の傾斜界面で挟まれ前記（０００１）面が露出した頂面を有するⅢ族窒化物半導体の単結晶を前記下地基板の前記主面上に前記マスク層の前記開口部を介してエピタキシャル成長させ、前記（０００１）面以外の傾斜界面で構成される複数の凹部を前記頂面に生じさせ、前記下地基板の前記主面の上方に行くにしたがって該傾斜界面を徐々に拡大させ、前記（０００１）面を前記頂面から消失させ、表面が前記傾斜界面のみで構成される第１層を成長させる第１工程と、

前記第１層上にⅢ族窒化物半導体の単結晶をエピタキシャル成長させ

、前記傾斜界面を消失させ、鏡面化された表面を有する第2層を成長させる第2工程と、

を有し、

前記第1工程では、

前記単結晶の前記頂面に前記複数の凹部を生じさせ、前記(0001)面を消失させることで、前記マスク層の前記複数の開口部のうちそれぞれ1つの開口部の上方に、少なくとも1つの谷部および複数の頂部を形成し、

前記主面に垂直な任意の断面を見たときに、前記谷部の1つを挟んで前記複数の頂部のうちで最も接近する一対の頂部同士が前記主面に沿った方向に離間した平均距離を、 $100\mu\text{m}$ 超とする

窒化物半導体基板の製造方法が提供される。

[0010] 本発明の他の態様によれば、

2インチ以上の直径を有し、最も近い低指数の結晶面が(0001)面である主面を有する窒化物半導体基板であって、

多光子励起顕微鏡により前記窒化物半導体基板の主面を観察して暗点密度から転位密度を求めたときに、

前記主面には、転位密度が $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 未満である低転位密度領域と、転位密度が前記低転位密度領域の転位密度よりも高く $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下である高転位密度領域とが、交互に配列しており、

前記低転位密度領域の少なくとも一部は、 $50\mu\text{m}$ 角以上の無転位領域を有する

窒化物半導体基板が提供される。

[0011] 本発明の更に他の態様によれば、

III族窒化物半導体の単結晶からなり、最も近い低指数の結晶面が(0001)面である主面を有する下地基板と、

前記下地基板の前記主面上に設けられ、複数の開口部を有するマスク層と、

前記マスク層の前記開口部を介した前記下地基板の前記主面上と前記マス

ク層上とに設けられ、ⅠⅠⅠ族窒化物半導体の単結晶からなる第1低酸素濃度領域と、

前記第1低酸素濃度領域上に設けられ、ⅠⅠⅠ族窒化物半導体の単結晶からなる高酸素濃度領域と、

前記高酸素濃度領域上に設けられ、ⅠⅠⅠ族窒化物半導体の単結晶からなる第2低酸素濃度領域と、

を備え、

前記高酸素濃度領域の酸素濃度は、前記第1低酸素濃度領域および前記第2低酸素濃度領域のそれぞれの酸素濃度よりも高く、

前記主面に垂直な任意の断面を見たときに、

前記第1低酸素濃度領域の上面は、前記マスク層の前記複数の開口部のうちそれぞれ1つの開口部の上方に、少なくとも1つの谷部および複数の山部を有し、

前記谷部の1つを挟んで前記複数の山部のうちで最も接近する一対の山部同士が前記主面に沿った方向に離間した平均距離は、 $100\mu\text{m}$ 超である積層構造体が提供される。

発明の効果

[0012] 本発明によれば、窒化物半導体基板の主面における転位密度を効率よく低減させることができる。

図面の簡単な説明

[0013] [図1]本発明の一実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法を示すフローチャートである。

[図2] (a) ~ (c) は、本発明の一実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法の一部を示す概略断面図である。

[図3]本発明の一実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法の一部を示す概略斜視図である。

[図4] (a) ~ (b) は、本発明の一実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法の一部を示す概略断面図である。

[図5] (a) ~ (b) は、本発明の一実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法の一部を示す概略断面図である。

[図6] (a) は、傾斜界面および c 面のそれぞれが拡大も縮小もしない基準成長条件下での成長過程を示す概略断面図であり、(b) は、傾斜界面が拡大し c 面が縮小する第 1 成長条件下での成長過程を示す概略断面図である。

[図7] 傾斜界面が縮小し c 面が拡大する第 2 成長条件下での成長過程を示す概略断面図である。

[図8] 本発明の一実施形態に係る窒化物半導体基板の主面を、多光子励起顕微鏡により観察したときの観察像を示す模式図である。

[図9] サンプル 1 の積層構造体の断面を蛍光顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

[図10] サンプル 1 の積層構造体の表面を多光子励起顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

[図11] サンプル 2 の積層構造体の断面を蛍光顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

[図12] サンプル 2 の積層構造体の断面を蛍光顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

[図13] サンプル 2 の積層構造体の表面を多光子励起顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

[図14] サンプル 3 の積層構造体の断面を蛍光顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

[図15] サンプル 3 の積層構造体の表面を多光子励起顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

[図16] サンプル 4 の積層構造体の断面を蛍光顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

[図17] サンプル 4 の積層構造体の表面を多光子励起顕微鏡により観察した観察像を示す図である。

発明を実施するための形態

[0014] <本発明の一実施形態>

以下、本発明の一実施形態について図面を参照しながら説明する。

[0015] (1) 窒化物半導体基板の製造方法

図1～図5を用い、本実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法について説明する。

図1は、本実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法を示すフローチャートである。図2(a)～(c)、図4(a)～図5(b)は、本実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法の一部を示す概略断面図である。図3は、本実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法の一部を示す概略斜視図である。なお、図3は、図2(b)の時点での斜視図に相当し、下地基板10上に成長する第1層30の一部を示している。また、図4(b)において、細実線は、成長途中の結晶面を示し、図2(c)～図5(b)において、点線は、転位を示している。

[0016] 図1に示すように、本実施形態に係る窒化物半導体基板の製造方法は、例えば、下地基板準備工程S100と、マスク層形成工程S180と、第1工程S200と、第2工程S300と、スライス工程S400と、研磨工程S500と、を有している。

[0017] (S100：下地基板準備工程)

まず、下地基板準備工程S100において、Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなる下地基板10を準備する。本実施形態では、下地基板10として、例えば、窒化ガリウム(GaN)自立基板を準備する。

[0018] なお、以下では、ウルツ鉱構造を有するⅢ族窒化物半導体の結晶において、 $\langle 0001 \rangle$ 軸(例えば $[0001]$ 軸)を「c軸」といい、 (0001) 面を「c面」という。なお、 (0001) 面を「+c面(Ⅲ族元素極性面)」といい、 $(000-1)$ 面を「-c面(窒素(N)極性面)」ということがある。また、 $\langle 1-100 \rangle$ 軸(例えば $[1-100]$ 軸)を「m軸」といい、 $(1-100)$ 面を「m面」という。なお、m軸は $\langle 10-10 \rangle$ 軸と表記してもよい。また、 $\langle 11-20 \rangle$ 軸(例えば $[11-2$

0] 軸) を「a 軸」といい、(11-20) 面を「a 面」という。

[0019] 本実施形態の下地基板準備工程 S100 では、例えば、VAS (Void-Assisted Separation) 法により下地基板 10 を作製する。

[0020] 具体的には、例えば、以下の手順により、下地基板 10 を作製する。まず、サファイア基板などからなる基板を準備する。基板を準備したら、例えば、有機金属気相成長 (MOVPE) 法により、基板上に、例えば、窒化ガリウム (GaN) からなる第 1 結晶層を成長させる。第 1 結晶層を成長させた後、第 1 結晶層上に、例えば、チタン (Ti) からなる金属層を蒸着させる。金属層を蒸着させた後、例えば、アンモニアガスを含む雰囲気中で基板の熱処理を行う。これにより、金属層を窒化し、表面に高密度の微細な穴を有する金属窒化層を形成する。また、上述の熱処理を行うことで、金属窒化層の穴を介して第 1 結晶層の一部をエッチングし、該第 1 結晶層中に高密度のボイドを形成する。これにより、ボイド含有第 1 結晶層を形成する。金属窒化層およびボイド含有第 1 結晶層を形成したら、例えば、ハイドライド気相成長 (HVPE) 法により、ボイド含有第 1 結晶層および金属窒化層上に、例えば、GaN からなる第 2 結晶層を成長させる。第 2 結晶層の成長が終了した後、基板を冷却する過程において、第 2 結晶層は、ボイド含有第 1 結晶層および金属窒化層を境に基板から自然に剥離する。剥離した第 2 結晶層を得たら、当該第 2 結晶層をスライスし、研磨する。

[0021] 以上の下地基板準備工程 S100 により、GaN の単結晶からなる下地基板 10 が得られる。

[0022] 下地基板 10 の直径は、例えば、2 インチ以上である。また、下地基板 10 の厚さは、例えば、300 μm 以上 1 mm 以下である。

[0023] 下地基板 10 の主面 10s は、例えば、エピタキシャル成長面となる主面 (下地表面) 10s を有している。本実施形態において、主面 10s に対して最も近い低指数の結晶面は、例えば、c 面 (+c 面) である。

[0024] また、本実施形態では、例えば、下地基板 10 を構成する GaN 結晶の主

面 10s に対して所定のオフ角を付与してもよい。ここでいう「オフ角」とは、主面 10s の法線に対して c 軸がなす角度のことをいう。具体的には、下地基板 10 の主面 10s におけるオフ角の大きさは、例えば、 0° 超 1° 以下である。

[0025] なお、オフ角の大きさおよび方向は、例えば、上述の VAS 法で用いる結晶成長用基板のオフ角の大きさおよび方向と、スライス時のスライス角度およびスライス方向とによって調整することが可能である。

[0026] また、本実施形態では、下地基板 10 が上述の VAS 法により作製されるため、下地基板 10 の主面 10s における転位密度が低くなっている。具体的には、下地基板 10 の主面 10s における転位密度は、例えば、 $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以上 $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 未満である。

[0027] (S180: マスク層形成工程)

下地基板 10 を準備したら、例えば、スパッタ法により、下地基板 10 上にマスク層 20 を形成する。マスク層 20 は、例えば、酸化シリコン (SiO_2) 層または窒化シリコン (SiN) 層等とする。このとき、マスク層 20 の厚さは、 300 nm 以上 $2 \mu\text{m}$ 以下とする。マスク層 20 を形成したら、フォトリソグラフィ法により、マスク層 20 をパターニングする。

[0028] これにより、図 2 (a) に示すように、複数の所定の開口部 20a を有するマスク層 20 を形成する。当該複数の開口部 20a を有するマスク層 20 を形成することで、後述の第 1 工程 S200 において GaN の単結晶の 3 次元成長を誘発させることができる。

[0029] このとき、マスク層 20 の開口部 20a を、例えば、m 軸に沿った方向または a 軸に沿った方向のうちのいずれかの方向に沿って延在するストライプ状とする。ここでいうマスク層 20 の開口部 20a が「m 軸に沿った方向または a 軸に沿った方向のうちのいずれかの方向に沿って延在するストライプ状」である場合とは、平面視で、ストライプ状の開口部 20a が延在する方向が、m 軸に沿った方向または a 軸に沿った方向に完全に一致する方向である場合だけでなく、m 軸に沿った方向または a 軸に沿った方向に対して若干

傾斜した方向である場合を含む。ストライプ状の開口部 20a を構成する少なくとも 1 つの単位開口部において、m 軸に沿った方向または a 軸に沿った方向のうちのいずれか一方の方向成分の長さを、他方の方向成分の長さよりも長くすると考えてもよい。なお、ストライプ状の開口部 20a を構成する少なくとも 1 つの単位開口部は、必ずしも下地基板 10 の主面 10s の一端から他端まで延在していなくてもよい。

[0030] 本実施形態では、マスク層 20 の開口部 20a を、例えば、a 軸に沿った方向に沿って延在するストライプ状とする。

[0031] また、このとき、ストライプ状のマスク層 20 のそれぞれの幅 w を、例えば、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下、好ましくは $5\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以下とする。マスク層 20 の幅 w を $1\text{ }\mu\text{m}$ 以上とすることで、マスク層 20 の断線を抑制し、パターニングの歩留りを向上させることができる。さらにマスク層 20 の幅 w を $5\text{ }\mu\text{m}$ 以上とすることで、パターニングの歩留りをさらに向上させることができる。一方で、マスク層 20 の幅 w を $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下とすることで、後述の第 1 工程 S200 において、マスク層 20 上の異常な結晶核の発生を抑制することができる。さらにマスク層 20 の幅 w を $30\text{ }\mu\text{m}$ 以下とすることで、後述の第 1 工程 S200 において、マスク層 20 上の異常な結晶核の発生を安定的に抑制することができる。

[0032] また、ストライプ状のマスク層 20 のそれぞれのピッチ p は、例えば、後述の第 1 工程 S200 および第 2 工程 S300 において転位が屈曲して伝播する距離に影響し、すなわち、窒化物半導体基板 1 の主面 1s の低転位密度領域の面積に影響する。従来、マスク層 20 のピッチ p が広い場合では、安定的な GaN 結晶の成長が困難であったが、本実施形態では、下地基板 10 として VAS 法により作製される基板を用いることで、マスク層 20 のピッチ p が広くても、後述の第 1 層 30 を安定的に成長させることができる。

[0033] 具体的には、本実施形態では、マスク層 20 のそれぞれのピッチ p を、例えば、 $800\text{ }\mu\text{m}$ 以上、好ましくは 1 mm 以上とする。マスク層 20 のピッチ p が $800\text{ }\mu\text{m}$ 未満であると、マスク層 20 の上方に高転位密度領域が形

成されるため、窒化物半導体基板 1 から半導体装置を切り出す際に、半導体装置内に高転位密度領域が含まれてしまう可能性がある。これに対し、マスク層 20 のピッチ p を $800\text{ }\mu\text{m}$ 以上とすることで、半導体装置内に高転位密度領域が含まれてしまうことを抑制し、主に低転位密度領域から半導体装置を切り出すことができる。さらにマスク層 20 のピッチ p を 1 mm 以上とすることで、高出力発光ダイオード (LED) 等の半導体装置のチップサイズが $600\text{ }\mu\text{m}$ 以上 1 mm 以下であることから、半導体装置が高出力発光ダイオード等である場合であっても、低転位密度領域から半導体装置を安定的に切り出すことができる。

[0034] なお、マスク層 20 のそれぞれのピッチ p は長ければ長いほどよいため、ピッチ p の上限値は限定されるものではない。ただし、マスク層 20 の安定的なパターン形成の観点では、マスク層 20 のそれぞれのピッチ p は、例えば、 10 mm 以下であることが好ましい。

[0035] (S200: 第 1 工程 (第 1 層成長工程))

下地基板 10 を準備したら、図 2 (b) および (c)、図 3 に示すように、 c 面以外の一対の傾斜界面 $30i$ と、該一対の傾斜界面 $30i$ で挟まれ c 面 $30c$ が露出した頂面 $30u$ と、を有する III 族窒化物半導体の単結晶を、下地基板 10 の主面 $10s$ 上にエピタキシャル成長させる。これにより、第 1 層 (3 次元成長層) 30 を成長させる。

[0036] このとき、 c 面以外の傾斜界面 $30i$ で囲まれて構成される複数の凹部 $30p$ を単結晶の頂面 $30u$ にさらに生じさせ、下地基板 10 の主面 $10s$ の上方に行くにしたがって、該傾斜界面 $30i$ を徐々に拡大させ、 c 面 $30c$ を徐々に縮小させる。これにより、 c 面 $30c$ を頂面 $30u$ から消失させる。その結果、表面が傾斜界面 $30i$ のみで構成される第 1 層 30 を成長させる。

[0037] すなわち、第 1 工程 S200 では、下地基板 10 の主面 $10s$ をあえて荒らすように、第 1 層 30 を 3 次元成長させる。なお、第 1 層 30 は、このような成長形態を形成したとしても、上述のように、単結晶で成長させる。こ

の点において、第1層30は、サファイアなどの異種基板上にIII族窒化物半導体をエピタキシャル成長させる前に該異種基板上にアモルファスまたは多結晶として形成されるいわゆる低温成長バッファ層とは異なるものである。

[0038] 本実施形態では、第1層30として、例えば、下地基板10を構成するIII族窒化物半導体と同じIII族窒化物半導体からなる層をエピタキシャル成長させる。具体的には、例えば、HVPE法により、下地基板10を加熱し、当該加熱された下地基板10に対してGaClガスおよびNH₃ガスを供給することで、第1層30としてGaN層をエピタキシャル成長させる。

[0039] ここで、第1工程S200では、上述の成長過程を発現させるために、例えば、所定の第1成長条件下で、第1層30を成長させる。

[0040] まず、図6(a)を用い、傾斜界面30iおよびc面30cのそれぞれが拡大も縮小もしない基準成長条件について説明する。図6(a)は、傾斜界面およびc面のそれぞれが拡大も縮小もしない基準成長条件下での成長過程を示す概略断面図である。

[0041] 図6(a)において、太い実線は、単位時間ごとの第1層30の表面を示している。図6(a)で示されている傾斜界面30iは、c面30cに対して最も傾斜した傾斜界面とする。また、図6(a)において、第1層30のうちのc面30cの成長レートを G_c とし、第1層30のうちの傾斜界面30iの成長レートを G_i とし、第1層30においてc面30cと傾斜界面30iとのなす角度を θ とする。また、図6(a)において、c面30cと傾斜界面30iとのなす角度 θ を維持したまま、第1層30が成長するものとする。なお、第1層30のc面30cのオフ角が、c面30cと傾斜界面30iとのなす角度 θ に比べて無視できるものとする。

[0042] 図6(a)に示すように、傾斜界面30iおよびc面30cのそれぞれが拡大も縮小もしないとき、傾斜界面30iとc面30cとの交点の軌跡は、c面30cに対して垂直となる。このことから、傾斜界面30iおよびc面30cのそれぞれが拡大も縮小もしない基準成長条件は、以下の式(a)を

満たす。

$$G_{c0} = G_i / \cos \theta \quad \dots (a)$$

[0043] 次に、図6（b）を用い、傾斜界面30iが拡大しc面30cが縮小する第1成長条件について説明する。図6（b）は、傾斜界面が拡大しc面が縮小する第1成長条件下での成長過程を示す概略断面図である。

[0044] 図6（b）においても、図6（a）と同様に、太い実線は、単位時間ごとの第1層30の表面を示している。また、図6（b）で示されている傾斜界面30iも、c面30cに対して最も傾斜した傾斜界面とする。また、図6（b）において、第1層30のうちのc面30cの成長レートを G_{c1} とし、第1層30のうちの傾斜界面30iとc面30cとの交点の軌跡の進行レートを R_1 とする。また、傾斜界面30iとc面30cとの交点の軌跡と、c面30cとのなす角度のうち、狭いほうの角度を θ_{R1} とする。 R_1 方向と G_i 方向とのなす角度を θ' としたとき、 $\theta' = \theta + 90 - \theta_{R1}$ である。なお、第1層30のc面30cのオフ角が、c面30cと傾斜界面30iとのなす角度 θ に比べて無視できるものとする。

[0045] 図6（b）に示すように、傾斜界面30iとc面30cとの交点の軌跡の進行レート R_1 は、以下の式（b）で表される。

$$R_1 = G_i / \cos \theta' \quad \dots (b)$$

[0046] また、第1層30のうちのc面30cの成長レート G_{c1} は、以下の式（c）で表される。

$$G_{c1} = R_1 \sin \theta_{R1} \quad \dots (c)$$

[0047] 式（c）に式（b）を代入することで、 G_{c1} は、 G_i を用いて、以下の式（d）で表される。

$$G_{c1} = G_i \sin \theta_{R1} / \cos (\theta + 90 - \theta_{R1}) \quad \dots (d)$$

[0048] 傾斜界面30iが拡大しc面30cが縮小するためには、 $\theta_{R1} < 90^\circ$ となることが好ましい。したがって、傾斜界面30iが拡大しc面30cが縮小する第1成長条件は、式（d）と $\theta_{R1} < 90^\circ$ とにより、以下の式（1）を満たすことが好ましい。

$$G_{c1} > G_i / \cos \theta \quad \cdots (1)$$

ただし、上述のように、 G_i は、 c 面 $30c$ に対して最も傾斜した傾斜界面 $30i$ の成長レートであり、 θ は、 c 面 $30c$ に対して最も傾斜した傾斜界面 $30i$ と、 c 面 $30c$ とのなす角度である。

[0049] または、第1成長条件下での G_{c1} が、基準成長条件下での G_{c0} よりも大きいことが好ましい。このことから、 $G_{c1} > G_{c0}$ に式(a)を代入することにより、式(1)が導出されうる。

[0050] なお、 c 面 $30c$ に対して最も傾斜した傾斜界面 $30i$ を拡大させる成長条件が最も厳しい条件となることから、第1成長条件が式(1)を満たせば、他の傾斜界面 $30i$ も拡大させることが可能となる。また、 $G_i / \cos \theta$ に対して G_{c1} が大きくなるにつれて、傾斜界面 $30i$ が拡大し c 面 $30c$ が縮小し易くなる。

[0051] 具体的には、例えば、 c 面 $30c$ に対して最も傾斜した傾斜界面 $30i$ が $\{10-11\}$ 面であるとき、 $\theta = 61.95^\circ$ である。したがって、第1成長条件は、例えば、以下の式(1')を満たすことが好ましい。

$$G_{c1} > 2.13 G_i \quad \cdots (1')$$

[0052] 本実施形態の第1成長条件としては、例えば、第1工程S200での成長温度を、後述の第2工程S300での成長温度よりも低くする。具体的には、第1工程S200での成長温度を、例えば、 980°C 以上 1020°C 以下、好ましくは 1000°C 以上 1020°C 以下とする。

[0053] また、本実施形態の第1成長条件として、例えば、第1工程S200での III 族原料ガスとしての $GaCl$ ガスの分圧に対する窒化剤ガスとしての NH_3 ガスの流量の分圧の比率（以下、「 V/III 比」ともいう）を、後述の第2工程S300での V/III 比よりも大きくしてもよい。具体的には、第1工程S200での V/III 比を、例えば、2以上20以下、好ましくは、2以上15以下とする。

[0054] 実際には、第1成長条件として、式(1)を満たすように、成長温度および V/III 比のうち少なくともいずれかをそれぞれ上記範囲のなかで調整

する。

[0055] なお、本実施形態の第1成長条件のうちの他の条件は、例えば、以下のとおりである。

成長圧力：90～105 kPa、好ましくは、90～95 kPa

GaC l ガスの分圧：1.5～15 kPa

N₂ガスの流量／H₂ガスの流量：0～1

[0056] ここで、本実施形態の第1工程S200は、例えば、第1層30の成長中の形態に基づいて、2つの工程に分類される。具体的には、本実施形態の第1工程S200は、例えば、傾斜界面拡大工程S220と、傾斜界面維持工程S240と、を有している。これらの工程により、第1層30は、例えば、傾斜界面拡大層32と、傾斜界面維持層34と、を有することとなる。

[0057] (S220：傾斜界面拡大工程)

まず、図2(b)および図3に示すように、III族窒化物半導体の単結晶からなる第1層30の傾斜界面拡大層32を、上述の第1成長条件下で、マスク層20の開口部20a内に露出した下地基板10の主面10s上に選択的にエピタキシャル成長させる。

[0058] 傾斜界面拡大層32が成長する初期段階では、マスク層20の開口部20aの直上では、下地基板10の主面10sの法線方向(c軸に沿った方向)に、c面30cを成長面として傾斜界面拡大層32が成長する。一方で、マスク層20上では、結晶成長が抑制される。これにより、傾斜界面拡大層32のマスク層20側の位置において、c面以外の傾斜界面30iが露出される。一对の傾斜界面30iは、1つのマスク層20を挟んで対向するように形成される。

[0059] ここでいう「傾斜界面30i」とは、c面30cに対して傾斜した成長界面のことを意味し、c面以外の低指数のファセット、c面以外の高指数のファセット、または面指数で表すことができない傾斜面を含んでいる。なお、c面以外のファセットは、例えば、{11-2m}、{1-10n} などである。ただし、mおよびnは0以外の整数である。

- [0060] 上述のように、傾斜界面拡大層 32 のマスク層 20 側の位置で傾斜界面 30 i を露出させることで、一对の傾斜界面 30 i と、該一对の傾斜界面 30 i で挟まれ c 面 30 c が露出した頂面 30 u と、を有する傾斜界面拡大層 32 が形成される。
- [0061] さらに、第 1 成長条件下で傾斜界面拡大層 32 を徐々に成長させることで、図 2 (b) および図 3 に示すように、傾斜界面拡大層 32 のうち c 面 30 c を露出させた頂面 30 u に、c 面以外の傾斜界面 30 i で構成される複数の凹部 30 p を生じさせる。c 面以外の傾斜界面 30 i で構成される複数の凹部 30 p は、当該頂面 30 u にランダムに形成される。これにより、c 面 30 c と c 面以外の傾斜界面 30 i とが表面に混在する傾斜界面拡大層 32 が形成される。
- [0062] なお、ここで傾斜界面拡大層 32 のうち c 面 30 c を露出させた頂面 30 u に形成される傾斜界面 30 i は、上述のマスク層 20 上に形成される傾斜界面 30 i と同様に、c 面 30 c に対して傾斜した成長界面のことを意味する。
- [0063] その後、第 1 成長条件下で傾斜界面拡大層 32 をさらに成長させると、図 2 (b) および (c) に示すように、傾斜界面拡大層 32 の一部は、c 面以外の傾斜界面 30 i を成長面として、マスク層 20 上に成長する。
- [0064] また、第 1 成長条件下で傾斜界面拡大層 32 をさらに成長させることで、図 2 (b) および (c) に示すように、下地基板 10 の上方に行くにしたがって、傾斜界面拡大層 32 において、c 面以外の傾斜界面 30 i を徐々に拡大させ、c 面 30 c を徐々に縮小させる。なお、このとき、下地基板 10 の上方に行くにしたがって、該下地基板 10 の主面 10 s に対する、傾斜界面 30 i がなす傾斜角が徐々に小さくなっていく。
- [0065] さらに傾斜界面拡大層 32 を成長させていくと、傾斜界面拡大層 32 の c 面 30 c は頂面 30 u から消失し、傾斜界面拡大層 32 の表面は傾斜界面 30 i のみで構成される。これにより、錐体を連続的に結合させた山脈状の傾斜界面拡大層 32 が形成されることとなる。

[0066] このように、傾斜界面拡大層 32 の頂面 30 u に c 面以外の傾斜界面 30 i で構成される複数の凹部 30 p を生じさせ、c 面 30 c を消失させることで、図 2 (c) に示すように、該傾斜界面拡大層 32 の表面に、複数の谷部 30 v および複数の頂部 30 t を形成する。複数の谷部 30 v のそれぞれは、傾斜界面拡大層 32 の表面のうち下に凸の変曲点であって、c 面以外の傾斜界面 30 i のそれぞれが発生した位置の上方に形成される。一方で、複数の頂部 30 t のそれぞれは、傾斜界面拡大層 32 の表面のうち上に凸の変曲点であって、互いに相反する方向を向いて拡大した一对の傾斜界面 30 i を挟んで c 面 30 c が（最後に）消失して終端した位置またはその上方に形成される。谷部 30 v および頂部 30 t は、下地基板 10 の主面 10 s に沿った方向に交互に形成される。なお、複数の谷部 30 v には、マスク層 20 の上方における一对の傾斜界面 30 i で構成される谷部も含まれる。

[0067] 本実施形態では、例えば、マスク層 20 の開口部 20 a の上方に成長した傾斜界面拡大層 32 の頂面 30 u に、c 面以外の傾斜界面 30 i で構成される複数の凹部 30 p を生じさせることで、当該マスク層 20 の開口部 20 a の上方に、複数の谷部 30 v および複数の頂部 30 t を形成する。言い換えれば、マスク層 20 の複数の開口部 20 a のうちそれぞれ 1 つの開口部 20 a の上方に、少なくとも 1 つの谷部 30 v および複数の頂部 30 t を形成する。これにより、マスクの開口部の上方に 1 つの頂部のみを有する大きな略三角柱状の 3 次元成長層を形成する場合よりも、下地基板 10 の主面 10 s から頂部 30 t までの高さを低くすることができる。その結果、後述の第 2 層 40 の表面を早く鏡面化させることができる。

[0068] また、本実施形態では、傾斜界面拡大層 32 が成長する初期段階において、マスク層 20 の開口部 20 a の直上に、傾斜界面 30 i を生じさせずに c 面 30 c を成長面として傾斜界面拡大層 32 を所定の厚さで成長させた後、傾斜界面拡大層 32 の表面に、c 面以外の傾斜界面 30 i を生じさせる。これにより、マスク層 20 の開口部 20 a の上方に形成される複数の谷部 30 v は、下地基板 10 の主面 10 s から上方に離れた位置に形成されることと

なる。

[0069] 以上のような傾斜界面拡大層 3 2 の成長過程により、転位は、以下のように屈曲して伝播する。具体的には、図 2 (c) に示すように、下地基板 1 0 内において c 軸に沿った方向に延在していた複数の転位のうちの一部は、マスク層 2 0 によって遮断され、傾斜界面拡大層 3 2 への伝播が抑制される。一方で、下地基板 1 0 内において c 軸に沿った方向に延在していた複数の転位のうちの他部は、下地基板 1 0 からマスク層 2 0 の開口部 2 0 a を介して傾斜界面拡大層 3 2 の c 軸に沿った方向に向けて伝播する。傾斜界面拡大層 3 2 のうち c 面 3 0 c を成長面として成長した領域では、下地基板 1 0 から傾斜界面拡大層 3 2 の c 軸に沿った方向に向けて転位が伝播する。しかしながら、傾斜界面拡大層 3 2 の c 軸に沿った方向に伝播した転位が、傾斜界面 3 0 i に露出すると、当該転位は、傾斜界面 3 0 i が露出した位置で、該傾斜界面 3 0 i に対して略垂直な方向に向けて屈曲して伝播する。すなわち、転位は、c 軸に対して傾斜した方向に屈曲して伝播する。これにより、傾斜界面拡大工程 S 2 2 0 以降の工程において、一对の頂部 3 0 t 間での略中央の上方において、局所的に転位が集められることとなる。その結果、後述の第 2 層 4 0 の表面における転位密度を低減させることができる。

[0070] このとき、本実施形態では、下地基板 1 0 の主面 1 0 s に垂直な任意の断面を見たときに、谷部 3 0 v の 1 つを挟んで複数の頂部 3 0 t のうちで最も接近する一对の頂部 3 0 t 同士が、下地基板 1 0 の主面 1 0 s に沿った方向に離間した平均距離（「最近接頂部間平均距離」ともいう）L を、例えば、 $100\mu\text{m}$ 超とする。傾斜界面拡大工程 S 2 2 0 の初期段階から下地基板 1 0 の主面 1 0 s 上に微細な六角錐状の結晶核を生じさせる場合などのように、最近接頂部間平均距離 L が $100\mu\text{m}$ 以下であると、傾斜界面拡大工程 S 2 2 0 以降の工程において、転位が屈曲して伝播する距離が短くなる。このため、傾斜界面拡大層 3 2 のうち一对の頂部 3 0 t 間の略中央の上方で充分に転位が集められない。その結果、後述の第 2 層 4 0 の表面における転位密度が充分に低減されない可能性がある。これに対し、本実施形態では、最近

接頂部間平均距離 L を $100\mu\text{m}$ 超とすることで、傾斜界面拡大工程 $S220$ 以降の工程において、転位が屈曲して伝播する距離を、少なくとも $50\mu\text{m}$ 超、確保することができる。これにより、傾斜界面拡大層 32 のうち一对の頂部 $30t$ 間の略中央の上方に、十分に転位を集めることができる。その結果、後述の第2層 40 の表面における転位密度を十分に低減させることができる。なお、本実施形態では、特にマスク層 20 の開口部 $20a$ の上方で最近接頂部間平均距離 L が $100\mu\text{m}$ 超となっていることが好ましい。

[0071] 一方で、本実施形態では、最近接頂部間平均距離 L を $800\mu\text{m}$ 未満とする。最近接頂部間平均距離 L が $800\mu\text{m}$ 以上であると、下地基板 10 の主面 $10s$ から傾斜界面拡大層 32 の谷部 $30v$ から頂部 $30t$ までの高さが過剰に高くなる。このため、後述の第2工程 $S300$ において、第2層 40 が鏡面化するまでの厚さが厚くなる。これに対し、本実施形態では、最近接頂部間平均距離 L を $800\mu\text{m}$ 未満とすることで、下地基板 10 の主面 $10s$ から傾斜界面拡大層 32 の谷部 $30v$ から頂部 $30t$ までの高さを低くすることができる。これにより、後述の第2工程 $S300$ において、第2層 40 を早く鏡面化させることができる。

[0072] また、このとき、傾斜界面拡大層 320 には、成長過程での成長面の違いに基づいて、 c 面 $30c$ を成長面として成長した第1 c 面成長領域 60 と、 c 面以外の傾斜界面 $30i$ を成長面として成長した傾斜界面成長領域 70 （図中灰色部）とが形成される。

[0073] また、このとき、第1 c 面成長領域 60 では、傾斜界面 $30i$ が発生した位置に谷部 $60a$ を形成し、 c 面 $30c$ が消失した位置に山部 $60b$ を形成する。また、第1 c 面成長領域 60 では、山部 $60b$ を挟んだ両側に、 c 面 $30c$ と傾斜界面 $30i$ との交点の軌跡として、一对の傾斜部 $60i$ を形成する。

[0074] また、このとき、第1成長条件が式（1）を満たすことで、一对の傾斜部 $60i$ のなす角度 α を、例えば、 70° 以下とする。

[0075] これらの領域については、詳細を後述する。

[0076] (S 2 4 0 : 傾斜界面維持工程)

傾斜界面拡大層 3 2 の表面から c 面 3 0 c を消失させた後に、図 4 (a) に示すように、表面において傾斜界面 3 0 i が c 面 3 0 c よりも多く占める状態、好ましくは表面が傾斜界面 3 0 i のみで構成された状態を維持しつつ、所定の厚さに亘って第 1 層 3 0 の成長を継続させる。これにより、傾斜界面拡大層 3 2 上に、傾斜界面 3 0 i が c 面 3 0 c よりも多く占める表面を有する傾斜界面維持層 3 4 を形成する。傾斜界面維持層 3 4 を形成することで、第 1 層 3 0 の表面全体に亘って確実に c 面 3 0 c を消失させることができる。

[0077] このとき、傾斜界面維持層 3 4 の表面の一部において c 面 3 0 c が再度出現してもよいが、下地基板 1 0 の主面 1 0 s に沿った沿面断面において傾斜界面成長領域 7 0 の占める面積割合が 8 0 % 以上となるように、傾斜界面維持層 3 4 の表面において、主に傾斜界面 3 0 i を露出させることが好ましい。なお、沿面断面において傾斜界面成長領域 7 0 の占める面積割合は、高ければ高いほどよく、1 0 0 % であることが好ましい。

[0078] このとき、傾斜界面維持工程 S 2 4 0 での成長条件を、傾斜界面拡大工程 S 2 2 0 と同様に、上述の第 1 成長条件で維持する。これにより、傾斜界面 3 0 i のみを成長面として傾斜界面維持層 3 4 を成長させることができる。

[0079] また、このとき、第 1 成長条件下で、傾斜界面 3 0 i を成長面として傾斜界面維持層 3 4 を成長させることで、上述のように、傾斜界面拡大層 3 2 において傾斜界面 3 0 i が露出した位置で、c 軸に対して傾斜した方向に向けて屈曲して伝播した転位は、傾斜界面維持層 3 4 においても同じ方向に伝播し続ける。

[0080] また、このとき、傾斜界面維持層 3 4 は、傾斜界面 3 0 i を成長面として成長することで、傾斜界面維持層 3 4 の全体が、傾斜界面成長領域 7 0 の一部となる。

[0081] 以上の第 1 工程 S 2 0 0 により、傾斜界面拡大層 3 2 および傾斜界面維持層 3 4 を有する第 1 層 3 0 が形成される。

[0082] 本実施形態の第1工程S200では、下地基板10の主面10sから第1層30の頂部30tまでの高さ（第1層30の厚さ方向の最大高さ）を、例えば、 $100\mu\text{m}$ 超 1.5mm 未満とする。

[0083] (S300：第2工程（第2層成長工程）)

c面30cを消失させた第1層30を成長させたら、図4（b）および図5（a）に示すように、第1層30上に、III族窒化物半導体の単結晶をさらにエピタキシャル成長させる。

[0084] このとき、下地基板10の主面10sの上方に行くにしたがって、傾斜界面40iを徐々に縮小させ、c面40cを徐々に拡大させる。これにより、第1層30の表面に形成されていた傾斜界面30iを消失させる。その結果、鏡面化された表面を有する第2層（平坦化層）40を成長させる。なお、ここでいう「鏡面」とは、表面の凹凸の最大高低差が可視光の波長以下である面のことをいう。

[0085] 本実施形態では、第2層40として、例えば、第1層30を構成するIII族窒化物半導体と同じIII族窒化物半導体を主成分とする層をエピタキシャル成長させる。なお、第2工程S300では、所定の成長温度に加熱された下地基板10に対して、GaClガス、NH₃ガスおよびn型ドーパントガスとしてのジクロロシラン（SiH₂Cl₂）ガスを供給することで、第2層40として、シリコン（Si）ドーパントGa₂N層をエピタキシャル成長させる。なお、n型ドーパントガスとして、SiH₂Cl₂ガスの代わりに、GeCl₄ガスなどを供給してもよい。

[0086] ここで、第2工程S300では、上述の成長過程を発現させるために、例えば、所定の第2成長条件下で、第2層40を成長させる。

[0087] 図7を用い、傾斜界面40iが縮小しc面40cが拡大する第2成長条件について説明する。図7は、傾斜界面が縮小しc面が拡大する第2成長条件下での成長過程を示す概略断面図である。図7は、c面30cに対して最も傾斜した傾斜界面30iが露出した第1層30上に、第2層40が成長する過程を示している。

[0088] 図7においても、図6(a)と同様に、太い実線は、単位時間ごとの第2層40の表面を示している。また、図7において、第2層40のうちのc面40cの成長レートを G_{c2} とし、第2層40のうちの傾斜界面40iの成長レートを G_i とし、第2層40のうちの傾斜界面40iとc面40cとの交点の軌跡の進行レートを R_2 とする。また、傾斜界面40iとc面40cとの交点の軌跡と、c面30cとのなす角度のうち、狭いほうの角度を θ_{R2} とする。 R_2 方向と G_i 方向とのなす角度を θ'' としたとき、 $\theta'' = \theta - (90 - \theta_{R2})$ である。また、図7において、第1層30におけるc面30cと傾斜界面30iとのなす角度 θ を維持したまま、第2層40が成長するものとする。なお、第2層40のc面40cのオフ角が、c面30cと傾斜界面30iとのなす角度 θ に比べて無視できるものとする。

[0089] 図7に示すように、傾斜界面40iとc面40cとの交点の軌跡の進行レート R_2 は、以下の式(e)で表される。

$$R_2 = G_i / \cos \theta'' \quad \dots (e)$$

[0090] また、第2層40のうちのc面40cの成長レート G_{c2} は、以下の式(f)で表される。

$$G_{c2} = R_2 \sin \theta_{R2} \quad \dots (f)$$

[0091] 式(f)に式(e)を代入することで、 G_{c2} は、 G_i を用いて、以下の式(g)で表される。

$$G_{c2} = G_i \sin \theta_{R2} / \cos (\theta + \theta_{R2} - 90) \quad \dots (g)$$

[0092] 傾斜界面40iが縮小しc面40cが拡大するためには、 $\theta_{R2} < 90^\circ$ となることが好ましい。したがって、傾斜界面40iが縮小しc面40cが拡大する第2成長条件は、式(g)と $\theta_{R2} < 90^\circ$ とにより、以下の式(2)を満たすことが好ましい。

$$G_{c2} < G_i / \cos \theta \quad \dots (2)$$

ただし、上述のように、 G_i は、c面40cに対して最も傾斜した傾斜界面40iの成長レートであり、 θ は、c面40cに対して最も傾斜した傾斜界面40iと、c面40cとのなす角度である。

[0093] または、基準成長条件下での第2層40のうちのc面30cの成長レートを G_{c0} としたとき、第2成長条件下での G_{c2} が、基準成長条件下での G_{c0} よりも小さいことが好ましいと考えることもできる。このことから、 $G_{c2} < G_{c0}$ に式(a)を代入することにより、式(2)が導出されうる。

[0094] なお、c面40cに対して最も傾斜した傾斜界面40iを縮小させる成長条件が最も厳しい条件となることから、第2成長条件が式(2)を満たせば、他の傾斜界面40iも縮小させることが可能となる。

[0095] 具体的には、c面40cに対して最も傾斜した傾斜界面40iが{10-11}面であるとき、第2成長条件は、以下の式(2')を満たすことが好ましい。

$$G_{c2} < 2.13 G_i \quad \dots (2')$$

[0096] 本実施形態の第2成長条件としては、第2工程S300での成長温度を、例えば、第1工程S200での成長温度よりも高くする。具体的には、第2工程S300での成長温度を、例えば、990℃以上1120℃以下、好ましくは1020℃以上1100℃以下とする。

[0097] また、本実施形態の第2成長条件として、第2工程S300でのV/I/I比を調整してもよい。例えば、第2工程S300でのV/I/I比を、第1工程S200でのV/I/I比よりも小さくしてもよい。具体的には、第2工程S300でのV/I/I比を、例えば、1以上10以下、好ましくは、1以上5以下とする。

[0098] 実際には、第2成長条件として、式(2)を満たすように、成長温度およびV/I/I比のうち少なくともいずれかをそれぞれ上記範囲のなかで調整する。

[0099] なお、本実施形態の第2成長条件のうちの他の条件は、例えば、以下のとおりである。

成長圧力：90～105 kPa、好ましくは、90～95 kPa

GaC I ガスの分圧：1.5～15 kPa

N₂ガスの流量/H₂ガスの流量：1～20

[0100] ここで、本実施形態の第2工程S300は、例えば、第2層40の成長中の形態に基づいて、2つの工程に分類される。具体的には、本実施形態の第2工程S300は、例えば、c面拡大工程S320と、本成長工程S340と、を有している。これらの工程により、第2層40は、例えば、c面拡大層42と、本成長層44と、を有することとなる。

[0101] (S320：c面拡大工程)

図4(b)に示すように、第1層30上に、上述の第2成長条件で、III族窒化物半導体の単結晶からなる第2層40のc面拡大層42をエピタキシャル成長させる。

[0102] このとき、第1層30の上方に行くにしたがって、c面40cを拡大させつつ、c面以外の傾斜界面40iを縮小させる。

[0103] 具体的には、第2成長条件下での成長により、c面拡大層42は、傾斜界面維持層34の傾斜界面30iから、傾斜界面40iを成長面としてc軸に垂直な方向に沿った方向（すなわち沿面方向または横方向）に成長する。c面拡大層42を横方向成長させていくと、傾斜界面維持層34の頂部30tの上方で、c面拡大層42のc面40cが再度露出し始める。これにより、c面40cとc面以外の傾斜界面40iとが表面に混在するc面拡大層42が形成される。

[0104] さらにc面拡大層42を横方向成長させていくと、c面40cが徐々に拡大し、c面拡大層42の傾斜界面40iが徐々に縮小する。これにより、第1層30の表面において複数の傾斜界面30iにより構成された凹部30pが徐々に埋め込まれる。

[0105] その後、さらにc面拡大層42を成長させると、c面拡大層42の傾斜界面40iが完全に消失し、第1層30の表面において複数の傾斜界面30iにより構成された凹部30pが完全に埋め込まれる。これにより、c面拡大層42の表面が、c面40cのみにより構成される鏡面（平坦面）となる。

[0106] このとき、第1層30およびc面拡大層42の成長過程で、転位を局所的に集めることで、転位密度を低減させることができる。具体的には、第1層

30においてc軸に対して傾斜した方向に向けて屈曲して伝播した転位は、c面拡大層42においても同じ方向に伝播し続ける。これにより、c面拡大層42のうち、一对の頂部30t間での略中央の上方において、隣接する傾斜界面40iの会合部で、局所的に転位が集められる。c面拡大層42において隣接する傾斜界面40iの会合部に集められた複数の転位のうち、互いに相反するバーガスベクトルを有する転位同士は、会合時に消失する。また、隣接する傾斜界面40iの会合部に集められた複数の転位の一部は、ループを形成し、c軸に沿った方向（すなわち、c面拡大層42の表面側）に伝播することが抑制される。なお、c面拡大層42において隣接する傾斜界面40iの会合部に集められた複数の転位のうちの他部は、その伝播方向をc軸に対して傾斜した方向からc軸に沿った方向に再度変化させ、第2層40の表面側まで伝播する。このように複数の転位の一部を消失させたり、複数の転位の一部をc面拡大層42の表面側に伝播することを抑制したりすることで、第2層40の表面における転位密度を低減することができる。また、転位を局所的に集めることで、第2層40のうち、転位がc軸に対して傾斜した方向に向けて伝播した部分の上方に、低転位密度領域を形成することができる。

[0107] また、このとき、c面拡大層42では、c面40cが徐々に拡大することで、c面40cを成長面として成長した後述の第2c面成長領域80が、厚さ方向の上方に行くにしたがって徐々に拡大しながら形成される。

[0108] 一方で、c面拡大層42では、傾斜界面40iが徐々に縮小することで、傾斜界面成長領域70が厚さ方向の上方に行くにしたがって徐々に縮小し、厚さ方向の所定位置で終端する。このようなc面拡大層42の成長過程により、断面視で、c面40cが再度発生した位置に、傾斜界面成長領域70の谷部70aが形成される。また、傾斜界面40iにより構成された凹部が徐々に埋め込まれる過程で、断面視で、傾斜界面40iが消失した位置に、傾斜界面成長領域70の山部70bが形成される。

[0109] c面拡大工程S320では、c面拡大層42の表面がc面40cのみによ

り構成される鏡面となるため、c面拡大層42の厚さ方向の高さ（厚さ方向の最大高さ）は、例えば、傾斜界面維持層34の谷部30vから頂部30tまでの高さ以上となる。

[0110] (S340:本成長工程(c面成長工程))

c面拡大層42において傾斜界面40iが消失し、表面が鏡面化されたら、図5(a)に示すように、c面拡大層42上に、c面40cを成長面として所定の厚さに亘って本成長層44を形成する。これにより、傾斜界面40iを有さずc面40cのみを表面に有する本成長層44を形成する。

[0111] このとき、本成長工程S340での成長条件を、c面拡大工程S320と同様に、上述の第2成長条件で維持する。これにより、c面40cを成長面として本成長層44をステップフロー成長させることができる。

[0112] また、このとき、傾斜界面40iを露出させることなく、c面40cのみを成長面として、本成長層44を成長させることで、本成長層44の全体が、後述の第2c面成長領域80となる。

[0113] 本成長工程S340では、本成長層44の厚さを、例えば、 $300\mu\text{m}$ 以上 10mm 以下とする。本成長層44の厚さを $300\mu\text{m}$ 以上とすることで、後述のスライス工程S400において、本成長層44から少なくとも1枚以上の基板1をスライスすることができる。一方で、本成長層44の厚さを 10mm とすることで、最終的な厚さを $650\mu\text{m}$ とし、 $700\mu\text{m}$ 厚の基板1を本成長層44からスライスする場合に、カーフロス $200\mu\text{m}$ 程度を考慮しても、少なくとも10枚の基板1を得ることができる。

[0114] 以上の第2工程S300により、c面拡大層42および本成長層44を有する第2層40が形成される。その結果、本実施形態の積層構造体2が形成される。

[0115] なお、以上の第1工程S200から第2工程S300までの工程を、下地基板10を大気暴露することなく、同一のチャンバ内で連続的に行う。これにより、第1層30と第2層40との間の界面に、意図しない高酸素濃度領域（傾斜界面成長領域70よりも過剰に高い酸素濃度を有する領域）が形成

されることを抑制することができる。

[0116] (S400:スライス工程)

次に、図5(b)に示すように、例えば、本成長層44の表面と略平行な切断面に沿ってワイヤーソーにより本成長層44をスライスする。これにより、アズスライス基板としての窒化物半導体基板1(以下、基板1ともいう)を少なくとも1つ形成する。このとき、基板1の厚さを、例えば、300 μ m以上700 μ m以下とする。

[0117] (S500:研磨工程)

次に、研磨装置により基板1の両面を研磨する。なお、このとき、最終的な基板1の厚さを、例えば、250 μ m以上650 μ m以下とする。

[0118] 以上の工程S100～S500により、本実施形態に係る基板1が製造される。

[0119] (半導体積層物の作製工程および半導体装置の作製工程)

基板1が製造されたら、例えば、基板1上にIII族窒化物半導体からなる半導体機能層をエピタキシャル成長させ、半導体積層物を作製する。半導体積層物を作製したら、半導体積層物を用いて電極等を形成し、半導体積層物をダイシングし、所定の大きさのチップを切り出す。これにより、半導体装置を作製する。

[0120] (2) 積層構造体

次に、図5(a)を用い、本実施形態に係る積層構造体2について説明する。

[0121] 本実施形態の積層構造体2は、例えば、下地基板10と、マスク層20と、第1層30と、第2層40と、を有している。

[0122] マスク層20は、下地基板10の主面10s上に設けられ、所定の開口部20aを有している。マスク層20の開口部20aは、例えば、ストライプ状に複数設けられている。マスク層20のそれぞれのピッチpは、例えば、800 μ m以上である。

[0123] 第1層30は、例えば、下地基板10の主面10s上にマスク層20の開

口部 20a を介して成長している。

[0124] 第 1 層 30 は、例えば、III 族窒化物半導体の単結晶の頂面 30u に、c 面以外の傾斜界面 30i で構成される複数の凹部 30p を生じさせ、c 面 30c を消失させることで形成される複数の谷部 30v および複数の頂部 30t を有している。第 1 層 30 は、例えば、マスク層 20 の開口部 20a の上方に、複数の谷部 30v および複数の頂部 30t を有している。言い換えれば、第 1 層 30 は、例えば、マスク層 20 の複数の開口部 20a のうちそれぞれ 1 つの開口部 20a の上方に、少なくとも 1 つの谷部 30v および複数の頂部 30t を有している。下地基板 10 の主面に垂直な任意の断面を見たときに、最近接頂部間平均距離 L は、例えば、100 μ m 超である。

[0125] また、第 1 層 30 は、例えば、成長過程での成長面の違いに基づいて、第 1 c 面成長領域（第 1 低酸素濃度領域）60 と、傾斜界面成長領域（高酸素濃度領域）70 と、を有している。

[0126] 第 1 c 面成長領域 60 は、c 面 30c を成長面として成長した領域である。第 1 c 面成長領域 60 は、例えば、断面視で、複数の谷部 60a および複数の山部 60b を有する。なお、ここでいう谷部 60a および山部 60b のそれぞれは、積層構造体 2 の断面を蛍光顕微鏡等で観察したときに発光強度差に基づいて観察される形状の一部分を意味し、第 1 層 30 の成長途中で生じる最表面の形状の一部分を意味するものではない。複数の谷部 60a のそれぞれは、断面視で、第 1 c 面成長領域 60 のうち下に凸の変曲点であって、傾斜界面 30i が発生した位置に形成される。複数の谷部 60a のうち少なくとも 1 つは、下地基板 10 の主面 10s から上方に離れた位置に設けられている。一方で、複数の山部 60b のそれぞれは、断面視で、第 1 c 面成長領域 60 のうち上に凸の変曲点であって、互いに相反する方向を向いて拡大した一对の傾斜界面 30i を挟んで c 面 30c が（最後に）消失して終端した位置に形成される。谷部 60a および山部 60b は、下地基板 10 の主面 10s に沿った方向に交互に形成される。

[0127] 下地基板 10 の主面 10s に垂直な任意の断面を見たときに、谷部 60a

の1つを挟んで複数の山部60bのうちで最も接近する一対の山部60b同士が、下地基板10の主面10sに沿った方向に離間した平均距離は、上述の第1層30の最近接頂部間平均距離Lに相当し、例えば、100 μ m超である。

[0128] 第1c面成長領域60は、複数の山部60bのうちの1つを挟んだ両側に、c面30cと傾斜界面30iとの交点の軌跡として設けられる一対の傾斜部60iを有している。なお、ここでいう傾斜部60iは、積層構造体2の断面を蛍光顕微鏡等で観察したときに発光強度差に基づいて観察される形状の一部分を意味し、第1層30の成長途中で生じる最表面の傾斜界面30iを意味するものではない。

[0129] 断面視で、一対の傾斜部60iのなす角度 α は、例えば、70°以下、好ましくは、20°以上65°以下である。一対の傾斜部60iのなす角度 α が70°以下であることは、第1成長条件において、第1層30のうちのc面30cに対して最も傾斜した傾斜界面30iの成長レート G_i に対する、第1層30のうちのc面30cの成長レート G_{c1} の比率 G_{c1}/G_i が高かったことを意味する。これにより、c面以外の傾斜界面30iを容易に生じさせることができる。その結果、傾斜界面30iが露出した位置で、転位を容易に屈曲させることが可能となる。また、一対の傾斜部60iのなす角度 α を70°以下とすることで、マスク層20の開口部20aの上方に、複数の谷部30vおよび複数の頂部30tを容易に生じさせることができる。さらに、一対の傾斜部60iのなす角度 α を65°以下とすることで、c面以外の傾斜界面30iをさらに容易に生じさせることができ、マスク層20の開口部20aの上方に、複数の谷部30vおよび複数の頂部30tをさらに容易に生じさせることができる。なお、一対の傾斜部60iのなす角度 α を20°以上とすることで、第1層30の谷部30vから頂部30tまでの高さが高くなることを抑制し、第2層40が鏡面化するまでの厚さが厚くなることを抑制することができる。

[0130] 一方で、傾斜界面成長領域70は、c面以外の傾斜界面30iを成長面と

して成長した領域である。傾斜界面成長領域 70 の下面は、例えば、第 1 c 面成長領域 60 の形状に倣って形成される。傾斜界面成長領域 70 は、下地基板 10 の主面に沿って連続して設けられている。

[0131] 傾斜界面成長領域 70 では、第 1 c 面成長領域 60 と比較して、酸素を取り込みやすい。このため、傾斜界面成長領域 70 中の酸素濃度は、第 1 c 面成長領域 60 中の酸素濃度よりも高くなる。なお、傾斜界面成長領域 70 中に取り込まれる酸素は、例えば、気相成長装置内に意図せずに混入する酸素、または気相成長装置を構成する部材（石英部材等）から放出される酸素等である。

[0132] なお、第 1 c 面成長領域 60 中の酸素濃度は、例えば、 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下、好ましくは $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、具体的には、 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。一方で、傾斜界面成長領域 70 中の酸素濃度は、例えば、 $9 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

[0133] 第 2 層 40 は、例えば、成長過程での成長面の違いに基づいて、傾斜界面成長領域（高酸素濃度領域）70 と、第 2 c 面成長領域（第 2 低酸素濃度領域）80 と、を有している。

[0134] 第 2 層 40 における傾斜界面成長領域 70 の上面は、例えば、断面視で、複数の谷部 70 a および複数の山部 70 b を有している。なお、ここでいう谷部 70 a および山部 70 b のそれぞれは、積層構造体 2 の断面を蛍光顕微鏡等で観察したときに発光強度差に基づいて観察される形状の一部分を意味し、第 2 層 40 の成長途中で生じる最表面の形状の一部分を意味するものではない。傾斜界面成長領域 70 の複数の谷部 70 a は、上述のように、断面視で、c 面 40 c が再度発生した位置に形成されている。また、傾斜界面成長領域 70 の複数の谷部 70 a は、それぞれ、断面視で、第 1 c 面成長領域 60 の複数の山部 60 b の上方に形成されている。一方で、傾斜界面成長領域 70 の複数の山部 70 b は、上述のように、断面視で、傾斜界面 40 i が消失して終端した位置に形成されている。また、傾斜界面成長領域 70 の複数の山部 70 b は、それぞれ、断面視で、第 1 c 面成長領域 60 の複数の谷

部60aの上方に形成されている。

[0135] また、第2層40のうち傾斜界面成長領域70の上端で下地基板10の主面10sに略平行な面が、第2層40で傾斜界面40iが消失して終端した位置の境界面40bとなる。

[0136] 第2c面成長領域80は、c面40cを成長面として成長した領域である。第2c面成長領域80では、傾斜界面成長領域70と比較して、酸素の取り込みが抑制される。このため、第2c面成長領域80中の酸素濃度は、傾斜界面成長領域70中の酸素濃度よりも低くなる。第2c面成長領域80中の酸素濃度は、例えば、 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下、好ましくは $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

[0137] 本実施形態では、第1層30の成長過程で、c面以外の傾斜界面30iが露出した位置で、該傾斜界面30iに対して略垂直な方向に向けて、転位が屈曲して伝播することで、第2層40では、複数の転位の一部が消失したり、複数の転位の一部がc面拡大層42の表面側に伝播することが抑制されたりしている。これにより、第2層40の表面における転位密度は、下地基板10の主面10sにおける転位密度よりも低減されている。

[0138] また、本実施形態では、第2層40の表面における転位密度は、厚さ方向に急激に低減される。

[0139] ここで、下地基板10の主面10sにおける転位密度を N_0 とし、第2層40のうち傾斜界面40iが消失した位置の境界面40bにおける転位密度を N とする。なお、境界面40bにおける低転位密度領域（例えば $250 \mu\text{m}$ 角）内の転位密度を N とする。一方で、下地基板10の主面10s上にc面のみを成長面としてIII族窒化物半導体の結晶層を、本実施形態の下地基板10の主面から境界面40bまでの厚さと等しい厚さでエピタキシャル成長させた場合（以下、「c面限定成長の場合」ともいう）の、結晶層の表面における転位密度を N' とする。

[0140] c面限定成長の場合では、結晶層の表面における転位密度は、当該結晶層の厚さに対して反比例する傾向があった。具体的には、c面限定成長の場合

では、結晶層の厚さが1.5 mmのときに、 N'/N_0 で求められる転位密度の減少率は、およそ0.6であった。

[0141] これに対し、本実施形態では、 N/N_0 で求められる転位密度の低減率が、例えば、c面限定成長の場合における N'/N_0 で求められる転位密度の低減率よりも小さい。

[0142] 具体的には、本実施形態では、第2層40のうち傾斜界面40iが消失した位置の境界面40bの、下地基板10の主面10sからの厚さは、例えば、1.5 mm以下、好ましくは1.2 mm以下である。また、本実施形態では、上述の N/N_0 で求められる転位密度の低減率は、例えば、0.3以下、好ましくは0.23以下である。

[0143] なお、本実施形態において、下地基板10の主面10sから境界面40bまでの厚さの下限値は、薄ければ薄いほどよい、限定されるものではない。しかしながら、第1工程S200および第2工程S300において、傾斜界面30iを生じさせてから傾斜界面40iを消失させるまでの過程を考慮すると、下地基板10の主面10sから境界面40bまでの厚さは、例えば、200 μ m超である。

[0144] また、本実施形態において、転位密度の低減率の下限値は、小さければ小さいほどよい、限定されるものではない。しかしながら、下地基板10の主面10sから境界面40bまでの厚さが1.5 mm以下であることを考慮すると、転位密度の低減率は、例えば、0.01以上である。

[0145] その他、本実施形態では、第2層40の表面全体は+c面により構成されており、第1層30および第2層40は、それぞれ、極性反転区（インバージョンドメイン）を含んでいない。この点において、本実施形態の積層構造体2は、いわゆるDEEP (Dislocation Elimination by the Epitaxial-growth with inverse-pyramidal Pits) 法により形成された積層構造体とは異なり、すなわち、ピットの中心に位置するコアに極性反転区を含む積層構造体とは異なっている。

[0146] (3) 窒化物半導体基板（窒化物半導体自立基板、窒化物結晶基板）

次に、本実施形態に係る窒化物半導体基板 1 について説明する。

[0147] 本実施形態において、上述の製造方法によって第 2 層 40 をスライスすることで得られる基板 1 は、例えば、Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなる自立基板である。本実施形態では、基板 1 は、例えば、Ga N 自立基板である。

[0148] 基板 1 の直径は、例えば、2 インチ以上である。また、基板 1 の厚さは、例えば、 $300\mu\text{m}$ 以上 1mm 以下である。

[0149] 基板 1 の導電性は特に限定されるものではないが、基板 1 を用いて縦型のショットキーバリアダイオード (SBD) としての半導体装置を製造する場合には、基板 1 は例えば n 型であり、基板 1 中の n 型不純物は例えば Si またはゲルマニウム (Ge) であり、基板 1 中の n 型不純物濃度は例えば $1.0 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 以上 $1.0 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 以下である。

[0150] 基板 1 は、例えば、エピタキシャル成長面となる主面 1s を有している。本実施形態において、主面 1s に対して最も近い低指数の結晶面は、例えば、c 面である。

[0151] なお、基板 1 の主面 1s は、例えば、鏡面化されており、基板 1 の主面 1s の二乗平均粗さ RMS は、例えば、 1nm 未満である。

[0152] また、本実施形態において、上述の製造方法によって得られる基板 1 中の不純物濃度は、フラックス法またはアモノサーマル法などによって得られる基板よりも低くなっている。

[0153] 具体的には、基板 1 中の水素濃度は、例えば、 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 未満、好ましくは $5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 以下である。

[0154] また、本実施形態では、基板 1 は、c 面 40c を成長面として成長した本成長層 44 をスライスすることで形成されるため、傾斜界面 30i または傾斜界面 40i を成長面として成長した傾斜界面成長領域 70 を含んでいない。すなわち、基板 1 の全体は、低酸素濃度領域により構成されている。

[0155] 具体的には、基板 1 中の酸素濃度は、例えば、 $5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 以下、好

ましくは $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

[0156] また、本実施形態では、基板 1 は、例えば、上述のように、極性反転区（インバージョンドメイン）を含んでいない。

[0157] （暗点）

次に、本実施形態の基板 1 の主面 1 s における暗点について説明する。なお、ここでいう「暗点」とは、多光子励起顕微鏡における主面 50 s の観察像や、主面 50 s のカソードルミネッセンス像などにおいて観察される発光強度が低い点のことを意味し、転位だけでなく、異物または点欠陥を起因とした非発光中心も含んでいる。なお、「多光子励起顕微鏡」とは、二光子励起蛍光顕微鏡と呼ばれることもある。

[0158] 本実施形態では、V A S 法により作製された高純度の G a N 単結晶からなる下地基板 10 を用いて基板 1 が製造されているため、基板 1 中に、異物または点欠陥を起因とした非発光中心が少ない。したがって、多光子励起顕微鏡等により基板 1 の主面を観察したときの暗点の 95% 以上、好ましくは 99% 以上は、異物または点欠陥を起因とした非発光中心ではなく、転位となる。

[0159] また、本実施形態では、上述の製造方法により、第 2 層 40 の表面における転位密度が、下地基板 10 の主面 10 s における転位密度よりも低減されている。これにより、第 2 層 40 をスライスして形成される基板 1 の主面 1 s においても、転位が低減されている。

[0160] これらの結果、本実施形態では、多光子励起顕微鏡により視野 $250 \mu\text{m}$ 角で基板 1 の主面 1 s を観察して暗点密度から転位密度を求めたときに、転位密度が $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ を超える領域が存在せず、転位密度が $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 未満である領域が主面 1 s の 69% 以上、好ましくは 80% 以上存在する。

[0161] ここで、図 8 を用いて、基板 1 の主面 1 s における暗点としての転位の分布について、詳細を説明する。図 8 は、本実施形態に係る窒化物半導体基板の主面を、多光子励起顕微鏡により観察したときの観察像を示す模式図であ

る。また、図8中の四角枠は、基板を多光子励起顕微鏡で観察したときの所定の視野を示している。

[0162] 図8に示すように、本実施形態では、基板1は、上述の製造方法で用いるマスク層20の上方に転位が集められることに起因して、主面1s内に、高転位密度領域1HDと、低転位密度領域1LDと、を有している。低転位密度領域1LDの転位密度は、高転位密度領域1HDの転位密度よりも低い。

[0163] 具体的には、本実施形態の基板1の主面1sのうち、低転位密度領域1LDの転位密度は、例えば、 $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 未満であり、好ましくは $7 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 以下であり、より好ましくは $5.5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 未満であり、さらに好ましくは $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 以下である。

[0164] 一方で、高転位密度領域1HDの転位密度も、下地基板10よりも若干低減されており、例えば、 $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下であり、好ましくは $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下であり、より好ましくは $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下である。なお、高転位密度領域1HDの転位密度は、低転位密度領域1LDの転位密度の最大値よりも大きい。

[0165] 平面視で高転位密度領域1HDの位置は、上述の製造方法で用いられるマスク層20の位置に対応している（重なっている）。高転位密度領域1HDおよび低転位密度領域1LDのそれぞれは、例えば、m軸に沿った方向またはa軸に沿った方向のうちのいずれかの一方の方向に沿って延在するストライプ状となっている。高転位密度領域1HDおよび低転位密度領域1LDは、例えば、m軸に沿った方向またはa軸に沿った方向のうちのいずれかの他方の方向に交互に設けられている。

[0166] 本実施形態では、例えば、高転位密度領域1HDおよび低転位密度領域1LDのそれぞれは、例えば、a軸に沿った方向に延在するストライプ状となっている。高転位密度領域1HDおよび低転位密度領域1LDは、a軸に垂直なm軸に沿った方向に交互に設けられている。

[0167] また、高転位密度領域1HDの短手方向（ストライプに垂直な方向）のピッチPは、上述のマスク層20のピッチpに対応し、例えば、 $800 \mu\text{m}$ 以

上である。なお、高転位密度領域 1 HD のピッチ P とは、高転位密度領域 1 HD の中心間の距離のことを意味する。または、高転位密度領域 1 HD のピッチ P とは、視野 $250\ \mu\text{m}$ 角ごとの転位密度の極大位置から隣接する極大位置までの距離と考えてもよい。

[0168] また、高転位密度領域 1 HD の短手方向の幅 W は、後述の実施例の結果によれば、例えば、 $100\ \mu\text{m}$ 以上 $250\ \mu\text{m}$ 以下である。

[0169] したがって、基板 1 の主面 1 s における高転位密度領域 1 HD が占める割合は、 $W/P \times 100$ により求められ、例えば、31% 以下である。

[0170] すなわち、基板 1 の主面 1 s における転位密度が $1 \times 10^6\ \text{cm}^{-2}$ 未満である低転位密度領域 1 LD は、基板 1 の主面 1 s の 69% 以上、好ましくは 80% 以上存在することとなる。

[0171] また、低転位密度領域 1 LD の少なくとも一部は、例えば、上述の第 1 工程 S200 での最近接頂部間平均距離 L に基づいて、小さくとも $50\ \mu\text{m}$ 角（ $50\ \mu\text{m}$ 角以上）の無転位領域を含んでいる。好ましくは、 $50\ \mu\text{m}$ 角の無転位領域は、例えば、複数の低転位密度領域 1 LD に亘って散在している。

[0172] また、本実施形態の基板 1 の主面 1 s の全体における、重ならない $50\ \mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度は、例えば、 $100\ \text{個}/\text{cm}^2$ 以上、好ましくは $600\ \text{個}/\text{cm}^2$ 以上、より好ましくは $1200\ \text{個}/\text{cm}^2$ 以上である。低転位密度領域 1 LD のみにおける無転位領域を計測した場合には、複数の低転位密度領域 1 LD における、重ならない $50\ \mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度は、例えば、 $130\ \text{個}/\text{cm}^2$ 以上、好ましくは $800\ \text{個}/\text{cm}^2$ 以上、より好ましくは $1600\ \text{個}/\text{cm}^2$ 以上である。

[0173] なお、重ならない $50\ \mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度の上限値は、例えば、高転位密度領域を含む視野の割合が少なくとも $1/4$ であることから、 $3000\ \text{個}/\text{cm}^2$ である。

[0174] なお、参考までに、転位を集める特段の工程を行わない従来の製造方法で得られる基板では、無転位領域の大きさが $50\ \mu\text{m}$ 角よりも小さいか、或い

は、 $50\mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度が $100\text{個}/\text{cm}^2$ よりも低くなる。また、従来のELO法においてc面が残存した場合に得られる基板においても、無転位領域の大きさが $50\mu\text{m}$ 角よりも小さいか、或いは、 $50\mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度が $100\text{個}/\text{cm}^2$ よりも低くなる。

[0175] 次に、本実施形態の基板1における転位のバーガスベクトルについて説明する。

[0176] 本実施形態では、上述の製造方法で用いられる下地基板10の主面10sにおける転位密度が低いため、下地基板10上に第1層30および第2層40を成長させる際に、複数の転位が結合（混合）することが少ない。これにより、第2層40から得られる基板1内において、大きいバーガスベクトルを有する転位の生成を抑制することができる。

[0177] 具体的には、本実施形態の基板1では、例えば、バーガスベクトルが $\langle 11-20 \rangle/3$ 、 $\langle 0001 \rangle$ 、または $\langle 11-23 \rangle/3$ のうちいずれかである転位が多い。なお、ここでの「バーガスベクトル」は、例えば、透過電子顕微鏡（TEM）を用いた大角度収束電子回折法（LACBED法）により測定可能である。また、バーガスベクトルが $\langle 11-20 \rangle/3$ である転位は、刃状転位であり、バーガスベクトルが $\langle 0001 \rangle$ である転位は、螺旋転位であり、バーガスベクトルが $\langle 11-23 \rangle/3$ である転位は、刃状転位と螺旋転位とが混合した混合転位である。

[0178] 本実施形態では、基板1の主面50sにおける転位を無作為に 100個 抽出したときに、バーガスベクトルが $\langle 11-20 \rangle/3$ 、 $\langle 0001 \rangle$ または $\langle 11-23 \rangle/3$ のうちいずれかである転位の数の割合は、例えば、 50% 以上、好ましくは 70% 以上、より好ましくは 90% 以上である。なお、基板1の主面50s内の少なくとも一部において、バーガスベクトルが $2\langle 11-20 \rangle/3$ または $\langle 11-20 \rangle$ などである転位が存在していてもよい。

[0179] （４）本実施形態により得られる効果

本実施形態によれば、以下に示す1つまたは複数の効果が得られる。

- [0180] (a) 第1工程S200において、第1層30を構成する単結晶の表面にc面以外の傾斜界面30iを生じさせることで、傾斜界面30iが露出した位置で、該傾斜界面30iに対して略垂直な方向に向けて、転位を屈曲させて伝播させることができる。これにより、転位を局所的に集めることができる。転位を局所的に集めることで、互いに相反するバーガスベクトルを有する転位同士を消失させることができる。または、局所的に集められた転位がループを形成することで、転位が第2層40の表面側に伝播することを抑制することができる。このようにして、第2層40の表面における転位密度を低減することができる。その結果、下地基板10よりも転位密度を低減させた基板1を得ることができる。
- [0181] (b) 第1工程S200では、第1層30の頂面30uからc面30cを消失させる。これにより、下地基板10から伝播する転位を、第1層30における傾斜界面30iが露出した位置で、確実に屈曲させることができる。
- [0182] ここで、第1工程において、c面が残存した場合について考える。この場合、c面が残存した部分では、下地基板から伝播した転位が、屈曲されずに略鉛直上方向に伝播し、第2層の表面にまで到達する。このため、c面が残存した部分の上方では、転位が低減されず、高転位密度領域が形成されてしまう。
- [0183] これに対し、本実施形態によれば、第1工程S200において、第1層30の頂面30uからc面30cを消失させることで、第1層30の表面をc面以外の傾斜界面30iのみにより構成することができる。これにより、下地基板10から伝播する転位を、第1層30の表面全体に亘って、確実に屈曲させることができる。転位を確実に屈曲させることで、複数の転位の一部を消失させ易くし、または、複数の転位の一部を第2層40の表面側に伝播し難くすることができる。その結果、第2層40から得られる基板1の主面1s全体に亘って転位密度を低減することが可能となる。
- [0184] (c) 第1工程S200において、第1層30の頂面30uにc面以外の傾斜界面30iで構成される複数の凹部30pを形成することで、c面30c

を容易かつ確実に消失させることができる。ここで、マスク層20のピッチが長い場合では、第1層の頂面に凹部を形成せずに、マスクの開口部の上方に1つの頂部のみを有する略三角柱状の3次元成長層を形成すると、上述のように、成長過程でc面を消失させることが困難となり、少なくとも一部にc面が残存してしまう可能性がある。これに対し、本実施形態では、第1層30の頂面30uに複数の凹部30pを形成することで、第1層30の表面に傾斜界面30iの占める割合を増やし、c面30cを早く縮小させることができる。その結果、マスク層20のピッチが長い場合であっても、マスク層20の開口部20aの上方で、c面30cを容易かつ確実に消失させることができる。

[0185] (d) 第1工程S200において、第1層30の頂面30uにc面以外の傾斜界面30iで構成される複数の凹部30pを形成し、c面30cを消失させることで、マスク層20の開口部20aの上方に、複数の谷部30vおよび複数の頂部30tを形成することができる。言い換えれば、マスク層20の複数の開口部20aのうちそれぞれ1つの開口部20aの上方に、少なくとも1つの谷部30vおよび複数の頂部30tを形成することができる。

[0186] 本実施形態では、マスク層20の開口部20aの上方に、複数の谷部30vおよび複数の頂部30tを形成することで、マスクの開口部の上方に大きな略三角柱状の3次元成長層を形成する場合よりも、下地基板10の主面10sから頂部30tまでの高さを低くすることができる。これにより、第2層40の表面を早く鏡面化させることができる。第2層40の表面を早く鏡面化させることで、本成長層44に至るまでの層を薄くすることができ、すなわち、基板1が得られない無駄な層を薄くすることができる。その結果、基板1の製造コストの増大を抑制することができる。

[0187] また、本実施形態では、マスク層20の開口部20aの上方で、ランダムに、複数の谷部30vおよび複数の頂部30tを形成することで、c面以外の傾斜界面30iが露出した位置で屈曲された転位を、ランダムに分散させることができる。これにより、狭いピッチでマスク層を形成する場合に比べ

て、転位の局所的な集中を抑制することができる。転位の局所的な集中を抑制することで、基板 1 から半導体装置を切り出す際に、半導体装置内に高転位密度領域が含まれることを抑制することができる。その結果、半導体装置の歩留りを向上させることができる。

[0188] (e) 上述のように、マスク層 20 の開口部 20 a の上方に c 面以外の傾斜界面 30 i を複数形成し、複数の傾斜界面 30 i のそれぞれで転位を屈曲させることで、c 面限定成長の場合よりも、急激に早く、転位密度を低減することができる。すなわち、本実施形態における N/N_0 で求められる転位密度の低減率を、c 面限定成長の場合における N'/N_0 で求められる転位密度の減少率よりも小さくすることができる。その結果、下地基板 10 よりも転位密度を低減させた基板 1 を効率よく得ることができ、その生産性を向上させることが可能となる。

[0189] (f) 本実施形態では、下地基板 10 の主面 10 s に垂直な任意の断面を見たときに、最近接頂部間平均距離 L を $100\mu\text{m}$ 超とすることで、転位が屈曲して伝播する距離を、少なくとも $50\mu\text{m}$ 超、確保することができる。これにより、第 1 層 30 のうち一对の頂部 30 t 間の略中央の上方に、十分に転位を集めることができる。その結果、第 2 層 40 の表面における転位密度を十分に低減させることができる。

[0190] (g) 第 1 工程 S200 では、第 1 層 30 の表面から c 面 30 c を消失させた後に、該表面が傾斜界面 30 i のみで構成された状態を維持しつつ、所定の厚さに亘って第 1 層 30 の成長を継続させる。これにより、第 1 層 30 の表面全体に亘って確実に c 面 30 c を消失させることができる。例えば、たとえ傾斜界面拡大工程 S220 において第 1 層 30 の表面で c 面 30 c が消失するタイミングがずれ、傾斜界面拡大層 32 の一部に c 面 30 c が残存していたとしても、確実に c 面 30 c を消失させることができる。

[0191] また、c 面 30 c が消失した後に、第 1 層 30 の傾斜界面 30 i による成長を継続することで、傾斜界面 30 i が露出した位置で転位を屈曲させる時間を十分に確保することができる。ここで、c 面が消失してから直ぐに c 面

成長をさせると、転位が十分に屈曲されずに、第2層の表面に向けて略鉛直方向に伝播してしまう可能性がある。これに対し、本実施形態では、c面以外の傾斜界面30iが露出した位置で転位を屈曲させる時間を十分に確保することで、特に第1層30の頂部30t付近の転位を確実に屈曲させることができ、下地基板10から第2層40の表面に向けて略鉛直方向に転位が伝播することを抑制することができる。これにより、第1層30の頂部30tの上方における転位の集中を抑制することができる。

[0192] <他の実施形態>

以上、本発明の実施形態を具体的に説明した。しかしながら、本発明は上述の実施形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能である。

[0193] 上述の実施形態では、下地基板10がGa₂N自立基板である場合について説明したが、下地基板10は、Ga₂N自立基板に限らず、例えば、窒化アルミニウム(AlN)、窒化アルミニウムガリウム(AlGa₂N)、窒化インジウム(InN)、窒化インジウムガリウム(InGa₂N)、窒化アルミニウムインジウムガリウム(AlInGa₂N)等のIII族窒化物半導体、すなわち、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ 、 $0 \leq x + y \leq 1$)の組成式で表されるIII族窒化物半導体からなる自立基板であってもよい。

[0194] 上述の実施形態では、基板1がGa₂N自立基板である場合について説明したが、基板1は、Ga₂N自立基板に限らず、例えば、AlN、AlGa₂N、InN、InGa₂N、AlInGa₂N等のIII族窒化物半導体、すなわち、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ 、 $0 \leq x + y \leq 1$)の組成式で表されるIII族窒化物半導体からなる自立基板であってもよい。

[0195] 上述の実施形態では、基板1がn型である場合について説明したが、基板1はp型であったり、または半絶縁性を有していたりしてもよい。例えば、基板1を用いて高電子移動度トランジスタ(HEMT)としての半導体装置を製造する場合には、基板1は、半絶縁性を有していることが好ましい。

- [0196] 上述の実施形態では、下地基板準備工程 S 1 0 0 において V A S 法により下地基板 1 0 を作製する場合について説明したが、下地基板 1 0 を作製する方法であれば、V A S 法以外の方法を用いてもよい。
- [0197] 上述の実施形態では、マスク層形成工程 S 1 8 0 において、マスク層 2 0 の開口部 2 0 a を a 軸に沿った方向に沿って延在するストライプ状とする場合について説明したが、マスク層 2 0 の開口部 2 0 a を m 軸に沿った方向に沿って延在するストライプ状としてもよい。
- [0198] 上述の実施形態では、第 1 工程 S 2 0 0 において、第 1 成長条件として主に成長温度を調整する場合について説明したが、第 1 成長条件が式 (1) を満たせば、当該第 1 成長条件として、成長温度以外の成長条件を調整したり、成長温度と成長温度以外の成長条件とを組み合わせ調整したりしてもよい。
- [0199] 上述の実施形態では、第 2 工程 S 3 0 0 において、第 2 成長条件として主に成長温度を調整する場合について説明したが、第 2 成長条件が式 (2) を満たせば、当該第 2 成長条件として、成長温度以外の成長条件を調整したり、成長温度と成長温度以外の成長条件とを組み合わせ調整したりしてもよい。
- [0200] 上述の実施形態では、傾斜界面維持工程 S 2 4 0 での成長条件を、傾斜界面拡大工程 S 2 2 0 と同様に、上述の第 1 成長条件で維持する場合について説明したが、傾斜界面維持工程 S 2 4 0 での成長条件が第 1 成長条件を満たせば、該傾斜界面維持工程 S 2 4 0 での成長条件を、傾斜界面拡大工程 S 2 2 0 での成長条件と異ならせてもよい。
- [0201] 上述の実施形態では、本成長工程 S 3 4 0 での成長条件を、c 面拡大工程 S 3 2 0 と同様に、上述の第 2 成長条件で維持する場合について説明したが、本成長工程 S 3 4 0 での成長条件が第 2 成長条件を満たせば、該本成長工程 S 3 4 0 での成長条件を、c 面拡大工程 S 3 2 0 での成長条件と異ならせてもよい。
- [0202] 上述の実施形態では、スライス工程 S 4 0 0 において、ワイヤーソーを用

い、本成長層 4 4 をスライスする場合について説明したが、例えば、外周刃スライサー、内周刃スライサー、放電加工機等を用いてもよい。

[0203] 上述の実施形態では、積層構造体 2 のうちの本成長層 4 4 をスライスすることで、基板 1 を得る場合について説明したが、この場合に限られない。例えば、積層構造体 2 をそのまま用いて、半導体装置を作製するための半導体積層物を製造してもよい。具体的には、積層構造体 2 を作製したら、半導体積層物作製工程において、積層構造体 2 上に半導体機能層をエピタキシャル成長させ、半導体積層物を作製する。半導体積層物を作製したら、積層構造体 2 の裏面側を研磨し、積層構造体 2 のうち、下地基板 1 0 と、第 1 層 3 0 と、c 面拡大層 4 2 と、を除去する。これにより、上述の実施形態と同様に、本成長層 4 4 と、半導体機能層と、を有する半導体積層物が得られる。この場合によれば、基板 1 を得るためのスライス工程 S 4 0 0 および研磨工程 S 5 0 0 を省略することができる。

[0204] 上述の実施形態では、基板 1 を製造したら、製造工程を終了する場合について説明したが、当該基板 1 を下地基板 1 0 として用い、工程 S 2 0 0 ~ S 5 0 0 を再度行ってもよい。これにより、さらに転位密度を低減させた基板 1 を得ることができる。また、基板 1 を下地基板 1 0 として用いた工程 S 2 0 0 ~ S 5 0 0 を 1 サイクルとして、当該サイクルを複数回繰り返してもよい。これにより、サイクルを繰り返す回数に応じて、基板 1 の転位密度を徐々に低減させていくことができる。

[0205] 上述の実施形態では、基板 1 が高転位密度領域 1 H D および低転位密度領域 1 L D を有する場合について説明したが、第 2 層 4 0 を厚く成長させた場合には、第 2 層 4 0 の成長過程で転位がばらけるため、当該第 2 層 4 0 からスライスした基板 1 には、高転位密度領域 1 H D および低転位密度領域 1 L D の明確な差が現れない可能性がある。

実施例

[0206] 以下、本発明の効果を裏付ける各種実験結果について説明する。

[0207] (1) 窒化物半導体基板作製用の積層構造体の作製

上述の実施形態の方法を用い、以下の条件および構成で、サンプル 1～4 の窒化物半導体基板作製用の積層構造体を作製した。

[0208] [サンプル 1]

(下地基板)

材質：G a N

作製方法：V A S 法

直径：2 インチ

厚さ：4 0 0 μ m

主面に対して最も近い低指数の結晶面：c 面

主面のオフ角：m 方向に 0. 4 °

なお、下地基板の主面における転位密度は $3. 0 \times 1 0^6 \text{ cm}^{-2}$ であった。

(マスク層)

マスク層の平面視形状：ストライプ状

マスク層の延在方向：a 軸方向

マスク層の厚さ：1 μ m

マスク層の幅：1 0 μ m

マスク層のピッチ：1 m m

(第 1 層)

材質：G a N

成長方法：H V P E 法

第 1 成長条件については後述する。

(第 2 層)

材質：G a N

成長方法：H V P E 法

成長温度：1 0 5 0 °C

V / I I I 比：2

なお、上記第 2 成長条件は、式 (2) を満たす。

[0209] [サンプル 2]

(下地基板)

サンプル 1 と同じ。

(マスク層)

サンプル 1 と同じ。

(第 1 層)

材質 : G a N

成長方法 : H V P E 法

第 1 成長条件がサンプル 1 と異なる。第 1 成長条件については後述する。

(第 2 層)

サンプル 1 と同じ。

[0210] [サンプル 3]

(下地基板)

サンプル 1 と同じ。

(マスク層)

サンプル 1 と同じ。

(第 1 層)

材質 : G a N

成長方法 : H V P E 法

第 1 成長条件がサンプル 1 および 2 と異なる。第 1 成長条件については後述する。

(第 2 層)

サンプル 1 と同じ。

[0211] [サンプル 4]

(下地基板)

サンプル 1 と同じ。

(マスク層)

サンプル 1 と同じ。

(第 1 層)

材質：GaN

成長方法：HVPE法

第1成長条件がサンプル1～3と異なる。第1成長条件については後述する。

(第2層)

サンプル1と同じ。

[0212] (第1成長条件)

以上のサンプル1～4での第1層を成長させる第1成長条件は、成長温度および V/III 比などのうち少なくともいずれかを調整することで、第1層のうちのc面に対して最も傾斜した傾斜界面の成長レート G_i に対する、第1層のうちのc面の成長レート G_{c1} の比率 G_{c1}/G_i （以下、「c面成長レート比率 G_{c1}/G_i 」ともいう）が、サンプル1<サンプル2<サンプル3<サンプル4の順で高くなるような条件とした。具体的には、サンプル1では、第1成長条件が式(1)を満たさないこととなるように、第1工程での成長温度を1030℃とし、 V/III 比を10とした。サンプル2では、第1成長条件が式(1)を満たすが、第1工程での成長温度を1023℃とし、 V/III 比を10とした。これに対し、サンプル3および4では、成長温度を980℃以上1020℃以下とし、 V/III 比を1以上15以下とした。このとき、サンプル3および4では、第1成長条件が式(1)を満たすように、成長温度および V/III 比のうち少なくともいずれかをそれぞれ上記範囲のなかで調整した。

[0213] また、サンプル3および4では、第1層の頂面からc面を消失するタイミング後において、c面成長レート比率 G_{c1}/G_i を維持したまま、所定時間、成長を継続させた。なお、サンプル3および4での第1工程の成長時間を互いに同じ時間とした。

[0214] (2) 評価

(蛍光顕微鏡による観察)

蛍光顕微鏡を用い、上述の積層構造体の断面を観察した。

[0215] (多光子励起顕微鏡による観察)

多光子励起顕微鏡を用い、上述の積層構造体のうち第2層の表面(上面)を観察した。このとき、視野 $250\mu\text{m}$ 角ごとに積層構造体の表面における暗点密度(すなわち転位密度)を測定した。なお、これらの基板における暗点の全てが転位であることは、厚さ方向に焦点をずらして測定することにより確認している。また、このとき、視野 $250\mu\text{m}$ 角での全測定領域数に対する、転位密度が $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 未満である領域(低転位密度領域)の数の割合を求めた。

[0216] (3) 結果

図9～図17を用い、サンプル1～4の結果について説明する。図9、図11、図12、図14、図16は、それぞれ、サンプル1～4の積層構造体の断面を蛍光顕微鏡により観察した観察像を示す図である。なお、図9、図11、図12、図14、図16において、下地基板における矢印はマスク層の位置を示している。図10、図13、図15、図17は、それぞれ、サンプル1～4の積層構造体の表面を多光子励起顕微鏡により観察した観察像を示す図である。なお、図15および17において、太線枠は、 $50\mu\text{m}$ 角の無転位領域を示している。

[0217] (サンプル1)

図9に示すように、サンプル1では、マスク層の開口部の上方に、第1層の頂部が形成されておらず、第1層の第1c面成長領域の上方と、第2層の第2c面成長領域の下方とが繋がっていた。第1層の成長過程でc面が残存していたと考えられる。当該c面残存領域の幅は約 $200\mu\text{m}$ であった。

[0218] また、図10に示すように、サンプル1では、マスク層と重なる高転位密度領域が、 1mm ピッチで形成されていた。さらに、c面残存領域と重なる高転位密度領域が、およそ $200\mu\text{m}$ の幅で形成されていた。なお、高転位密度領域における転位密度は、 $1.2 \times 10^6 \sim 3.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ であった。一方、高転位密度領域の間に低転位密度領域が形成されていたが、積層構造体の表面に対する低転位密度領域の割合は、 50% 未満だった。なお、

低転位密度領域における転位密度は、 $2.7 \times 10^5 \sim 9.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ であった。また、サンプル1の低転位密度領域には、 $50 \mu\text{m}$ 角の無転位領域が形成されていなかった。

[0219] サンプル1では、第1層を成長させる第1成長条件においてc面成長レート比率 G_{c1}/G_i を他のサンプルよりも低くし、当該第1成長条件が式(1)を満たさなかった。このため、第1層の成長過程で、c面を消失させることができなかった。c面が消失しなかったことから、上述のc面残存領域において、転位が屈曲せずに第2層の表面側に伝播した。このため、c面残存領域と重なる位置に、高転位密度領域が形成されていた。その結果、積層構造体の表面に対する低転位密度領域の割合が低くなったと考えられる。

[0220] (サンプル2)

図11に示すように、サンプル2では、第1層においてc面が消失し、マスク層の開口部の上方に、1つの頂部のみを有する略三角柱状の第1層が形成されていた。最近接頂部間平均距離は、およそ 1 mm であった。また、下地基板の主面から第1c面成長領域の頂部までの高さは、 $890 \mu\text{m}$ であり、第2層のうち傾斜界面が消失した位置の境界面の、下地基板の主面からの厚さ(第2層が鏡面化するまでの厚さ)は、およそ $1250 \mu\text{m}$ であった。

[0221] なお、図12に示すように、積層構造体の一部に、第1層のc面が残存している部分(c面残存領域)が散見された。当該c面残存領域の幅は約 $20 \mu\text{m}$ であった。

[0222] また、図13に示すように、サンプル2では、マスク層と重なる高転位密度領域が、 1 mm ピッチで形成されていた。なお、高転位密度領域における転位密度は、 $7.0 \times 10^5 \sim 3.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ であった。一方、 1 mm ピッチの高転位密度領域の間には、低転位密度領域が形成されていた。ただし、 1 mm ピッチの高転位密度領域の間に、微小な高転位密度領域が散在していた。積層構造体の表面に対する低転位密度領域の割合は、 60% であった。なお、低転位密度領域における転位密度は、 $2.2 \times 10^5 \sim 7.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ であった。また、サンプル2の低転位密度領域には、 $50 \mu\text{m}$ 角の

無転位領域がほとんど形成されていなかった。サンプル2の表面全体における $50\mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度は、 $100\text{個}/\text{cm}^2$ よりも低かった。また、 N/N_0 で求められる転位密度の低減率は、例えば、 0.23 以下であった。

[0223] サンプル2では、第1層を成長させる第1成長条件においてc面成長レート比率 G_{c1}/G_i をサンプル1よりも高くし、当該第1成長条件が式(1)を満たしたことで、第1層の成長過程で、c面を消失させることができた。これにより、第1層における傾斜界面が露出した位置で、転位を屈曲させることができた。その結果、ほぼマスク層の開口部と重なる範囲に亘って、低転位密度領域を形成することができた。

[0224] しかしながら、サンプル2では、第1成長条件におけるc面成長レート比率 G_{c1}/G_i が、十分に高くなかったため、マスク層の開口部の上方に、複数の頂部を形成することができなかった。また、第1層の成長過程で、第1層のc面が消失するまでに時間がかかっていた。このため、下地基板の主面から第1層の頂部までの高さが高くなっており、第2層が鏡面化するまでの厚さが厚くなっていたと考えられる。また、積層構造体の一部に、第1層のc面が残存している部分が散見されており、c面の消失具合が不安定であった。このため、 1mm ピッチの高転位密度領域の間に、微小な高転位密度領域が散在していたと考えられる。その結果、積層構造体の表面に対する低転位密度領域の割合が低くなったと考えられる。

[0225] (サンプル3)

図14に示すように、サンプル3では、第1層においてc面が消失し、マスク層の1つの開口部の上方に、少なくとも1つの谷部と、複数の頂部とが形成されていた。第1c面成長領域のうち一对の傾斜部のなす角度の平均値は、およそ 57.1° だった。また、最近接頂部間平均距離は、およそ $400\mu\text{m}$ であった。なお、マスク層の開口部の上方における最近接頂部間平均距離は、およそ $125\mu\text{m}$ であった。また、下地基板の主面から第1c面成長領域の頂部までの高さは、およそ $410\mu\text{m}$ であった。また、傾斜界面成

長領域は、下地基板の主面に沿って連続して形成されていた。また、第2層のうち傾斜界面が消失した位置の境界面の、下地基板の主面からの厚さは、およそ $980\mu\text{m}$ であった。

[0226] また、図15に示すように、サンプル3では、マスク層と重なる高転位密度領域が、 1mm ピッチで形成されていた。高転位密度領域の幅は、およそ $100\sim 250\mu\text{m}$ であった。高転位密度領域における転位密度は、 $9.5\times 10^5\sim 2.0\times 10^6\text{cm}^{-2}$ であった。一方、 1mm ピッチの高転位密度領域の間には、低転位密度領域が形成されていた。積層構造体の表面に対する低転位密度領域の割合は、 69% 以上であった。低転位密度領域における転位密度は、 $1.3\times 10^5\sim 5.0\times 10^5\text{cm}^{-2}$ であった。また、サンプル3の低転位密度領域には、 $50\mu\text{m}$ 角以上の無転位領域が複数形成されていた。 $50\mu\text{m}$ 角の無転位領域は、複数の低転位密度領域に亘って散在していた。また、積層構造体の表面全体における、重ならない $50\mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度は、およそ $4500\text{個}/\text{cm}^2$ であった。また、 N/N_0 で求められる転位密度の低減率は、例えば、 0.17 以下であった。

[0227] サンプル3では、第1層を成長させる第1成長条件において c 面成長レート比率 $G_{c,1}/G_i$ をサンプル1および2よりも高くし、当該第1成長条件が式(1)を満たしていた。これにより、第1層の成長過程で、第1層の頂面に複数の凹部を形成し、 c 面を容易かつ確実に消失させることができた。 c 面を確実に消失させたことで、第1層における傾斜界面が露出した位置で、転位を確実に屈曲させることができた。その結果、マスク層の開口部と重なる範囲全体に亘って、低転位密度領域を形成することができ、積層構造体の表面に対する低転位密度領域の割合を 69% 以上とすることができたことを確認した。

[0228] また、サンプル3では、第1成長条件における c 面成長レート比率 $G_{c,1}/G_i$ をサンプル2よりも高くしたことで、マスク層の開口部の上方に、少なくとも1つの谷部と、複数の頂部とを形成することができた。これにより、第2層が鏡面化するまでの厚さを薄くすることができたことを確認した。

[0229] また、サンプル3では、第1成長条件におけるc面成長レート比率 G_{c1}/G_i を適切に調整したことで、最近接頂部間平均距離を $100\mu\text{m}$ 超とすることができた。これにより、低転位密度領域における転位密度を十分に低減させることができたことを確認した。最近接頂部間平均距離を $100\mu\text{m}$ 超とすることで、低転位密度領域に $50\mu\text{m}$ 角以上の無転位領域を複数形成することができ、 $50\mu\text{m}$ 角の無転位領域を複数の低転位密度領域に亘って散在させることができたことを確認した。また、積層構造体の表面全体における、重ならない $50\mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度を $1600\text{個}/\text{cm}^2$ 以上とすることができたことを確認した。

[0230] (サンプル4)

図16に示すように、サンプル4では、第1層においてc面が消失し、マスク層の開口部の上方に、サンプル3よりも多くの谷部および頂部が形成されていた。第1c面成長領域のうち一对の傾斜部のなす角度の平均値は、 54.4° だった。また、最近接頂部間平均距離は、およそ $260\mu\text{m}$ であった。なお、マスク層の開口部の上方における最近接頂部間平均距離は、およそ $199\mu\text{m}$ であった。また、下地基板の主面から第1c面成長領域の頂部までの高さは、およそ $360\mu\text{m}$ であった。また、傾斜界面成長領域は、下地基板の主面に沿って連続して形成されていた。また、第2層のうち傾斜界面が消失した位置の境界面の、下地基板の主面からの厚さは、およそ $1090\mu\text{m}$ であった。

[0231] また、図17に示すように、サンプル4では、マスク層と重なる高転位密度領域が、 1mm ピッチで形成されていた。高転位密度領域の幅は、およそ $100\sim 250\mu\text{m}$ であった。高転位密度領域における転位密度は、 $5.0\times 10^5\sim 1.0\times 10^6\text{cm}^{-2}$ であった。一方、 1mm ピッチの高転位密度領域の間には、低転位密度領域が形成されていた。積層構造体の表面に対する低転位密度領域の割合は、 69% 以上であった。低転位密度領域における転位密度は、 $1.2\times 10^5\sim 5.0\times 10^5\text{cm}^{-2}$ であった。また、サンプル4の低転位密度領域には、 $50\mu\text{m}$ 角以上の無転位領域が複数形成されて

いた。50 μm 角の無転位領域は、複数の低転位密度領域に亘って散在していた。また、積層構造体の表面全体における、重ならない50 μm 角の無転位領域の密度は、およそ5000個/ cm^2 であった。また、 N/N_0 で求められる転位密度の低減率は、例えば、0.17以下であった。

[0232] サンプル4では、第1層を成長させる第1成長条件においてc面成長レート比率 $G_{c,1}/G_i$ をサンプル1～3よりも高くし、当該第1成長条件が式(1)を満たしていた。これにより、第1層の成長過程で、第1層の頂面に複数の凹部を形成し、c面を容易かつ確実に消失させることができた。その結果、サンプル3と同様に、マスク層の開口部と重なる範囲全体に亘って、低転位密度領域を形成することができ、積層構造体の表面に対する低転位密度領域の割合を69%以上とすることができたことを確認した。

[0233] また、サンプル4では、第1成長条件におけるc面成長レート比率 $G_{c,1}/G_i$ をサンプル3よりも高くしたことで、マスク層の開口部の上方に、サンプル3よりも多くの谷部および頂部を形成することができた。これにより、第2層が鏡面化するまでの厚さを薄くすることができたことを確認した。なお、サンプル4での第1工程の成長時間をサンプル3と同じ時間としたが、第1工程での成長時間を最適化すれば、第2層が鏡面化するまでの厚さをより薄くすることが可能となると考えられる。

[0234] また、サンプル4では、第1成長条件におけるc面成長レート比率 $G_{c,1}/G_i$ を適切に調整したことで、最近接頂部間平均距離を100 μm 超とすることができた。これにより、サンプル3と同様に、低転位密度領域における転位密度を十分に低減させることができたことを確認した。最近接頂部間平均距離を100 μm 超とすることで、サンプル3と同様に、低転位密度領域に50 μm 角以上の無転位領域を複数形成することができ、50 μm 角の無転位領域を複数の低転位密度領域に亘って散在させることができたことを確認した。また、積層構造体の表面全体における、重ならない50 μm 角の無転位領域の密度を1600個/ cm^2 以上とすることができたことを確認した。

[0235] <本発明の好ましい態様>

以下、本発明の好ましい態様について付記する。

[0236] (付記1)

気相成長法を用いた窒化物半導体基板の製造方法であって、

Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなり、最も近い低指数の結晶面が(0001)面である主面を有する下地基板を準備する工程と、

前記下地基板の前記主面上に、複数の開口部を有するマスク層を形成する工程と、

前記(0001)面以外の一対の傾斜界面で挟まれ前記(0001)面が露出した頂面を有するⅢ族窒化物半導体の単結晶を前記下地基板の前記主面上に前記マスク層の前記開口部を介してエピタキシャル成長させ、前記(0001)面以外の傾斜界面で構成される複数の凹部を前記頂面に生じさせ、前記下地基板の前記主面の上方に行くにしたがって該傾斜界面を徐々に拡大させ、前記(0001)面を前記頂面から消失させ、表面が前記傾斜界面のみで構成される第1層を成長させる第1工程と、

前記第1層上にⅢ族窒化物半導体の単結晶をエピタキシャル成長させ、前記傾斜界面を消失させ、鏡面化された表面を有する第2層を成長させる第2工程と、

を有し、

前記第1工程では、

前記単結晶の前記頂面に前記複数の凹部を生じさせ、前記(0001)面を消失させることで、前記マスク層の前記複数の開口部のうちそれぞれ1つの開口部の上方に、少なくとも1つの谷部および複数の頂部を形成し、

前記主面に垂直な任意の断面を見たときに、前記谷部の1つを挟んで前記複数の頂部のうちで最も接近する一対の頂部同士が前記主面に沿った方向に離間した平均距離を、 $100\mu\text{m}$ 超とする

窒化物半導体基板の製造方法。

[0237] (付記2)

前記マスク層を形成する工程では、

前記マスク層の前記開口部をストライプ状に形成し、
 前記マスク層のピッチを、 $800\mu\text{m}$ 以上とする
 付記1に記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[0238] (付記3)

前記第1工程では、
 最も接近する前記一对の頂部同士の前記平均距離を、 $800\mu\text{m}$ 未満とする
 付記1又は2に記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[0239] (付記4)

前記第1工程では、
 前記(0001)面を前記表面から消失させた後に、前記表面が前記傾斜
 界面のみで構成された状態を維持しつつ、所定の厚さに亘って前記第1層の
 成長を継続させる
 付記1～3のいずれか1つに記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[0240] (付記5)

前記第1工程では、式(1)を満たす第1成長条件で、前記第1層を成長
 させ、
 前記第2工程では、式(2)を満たす第2成長条件で、前記第2層を成長
 させる
 付記1～4のいずれか1つに記載の窒化物半導体基板の製造方法。

$$G_{c1} > G_i / \cos \theta \quad \cdots (1)$$

$$G_{c2} < G_i / \cos \theta \quad \cdots (2)$$

(ただし、前記第1層のうちの前記(0001)面の成長レートを G_{c1} とし、
 前記第2層のうちの前記(0001)面の成長レートを G_{c2} とし、前記第
 1層および前記第2層のそれぞれのうち前記(0001)面に対して最も傾
 斜した前記傾斜界面の成長レートを G_i とし、前記第1層および前記第2層の
 それぞれにおいて前記(0001)面に対して最も傾斜した前記傾斜界面と
 前記(0001)面とのなす角度を θ とする。)

[0241] (付記6)

前記第1工程では、

前記第1層に、前記(0001)面を成長面として成長した第1c面成長領域を形成し、

前記第1c面成長領域のうち前記(0001)面が消失し上に凸の変曲点として終端した位置に凸部を形成するとともに、前記第1c面成長領域のうち前記凸部を挟んだ両側に、前記(0001)面と前記傾斜界面との交点の軌跡として一对の傾斜部を形成し、

前記一对の傾斜部のなす角度を 70° 以下とする

付記1～5のいずれか1つに記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[0242] (付記7)

前記第1工程は、

前記下地基板の上方に行くにしたがって前記傾斜界面を徐々に拡大させ、傾斜界面拡大層を形成する工程と、

前記(0001)面を前記表面から消失させた前記傾斜界面拡大層上に、前記表面が前記(0001)面以外の傾斜界面のみで構成された状態を維持しつつ、所定の厚さに亘って傾斜界面維持層を形成する工程と、

を有する

付記1～6のいずれか1つに記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[0243] (付記8)

前記第2工程は、

前記第1層の上方に行くにしたがって前記(0001)面を拡大させつつ前記(0001)面以外の傾斜界面を縮小させ、c面拡大層を形成する工程と、

表面が鏡面化された前記c面拡大層上に、前記(0001)面を成長面として所定の厚さに亘って本成長層を形成する工程と、

を有する

付記1～7のいずれか1つに記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[0244] (付記 9)

前記第 2 工程の後に、前記第 2 層から少なくとも 1 つの窒化物半導体基板をスライスする工程を有する

付記 1 ～ 8 のいずれか 1 つに記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[0245] (付記 10)

2 インチ以上の直径を有し、最も近い低指数の結晶面が (0001) 面である主面を有する窒化物半導体基板であって、

多光子励起顕微鏡により前記窒化物半導体基板の主面を観察して暗点密度から転位密度を求めたときに、

前記主面には、転位密度が $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 未満である低転位密度領域と、転位密度が前記低転位密度領域の転位密度よりも高く $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下である高転位密度領域とが、交互に配列しており、

前記低転位密度領域の少なくとも一部は、 $50 \mu\text{m}$ 角以上の無転位領域を有する

窒化物半導体基板。

[0246] (付記 11)

前記主面の全体における、重ならない $50 \mu\text{m}$ 角の無転位領域の密度は、 $100 \text{ 個} / \text{cm}^2$ 以上である

付記 10 に記載の窒化物半導体基板。

[0247] (付記 12)

酸素濃度は、 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である

付記 10 又は 11 に記載の窒化物半導体基板。

[0248] (付記 13)

水素濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満である

付記 10 ～ 12 のいずれか 1 つに記載の窒化物半導体基板。

[0249] (付記 14)

前記主面における転位を無作為に 100 個 抽出したときに、バーガースベクトルが $\langle 11-20 \rangle / 3$ 、 $\langle 0001 \rangle$ または $\langle 11-23 \rangle / 3$ のう

ちいずれかである転位の数の割合は、50%以上である

付記10～13のいずれか1つに記載の窒化物半導体基板。

[0250] (付記15)

Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなり、最も近い低指数の結晶面が(001)面である主面を有する下地基板と、

前記下地基板の前記主面上に設けられ、複数の開口部を有するマスク層と、

前記マスク層の前記開口部を介した前記下地基板の前記主面上と前記マスク層上とに設けられ、Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなる第1低酸素濃度領域と、

前記第1低酸素濃度領域上に設けられ、Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなる高酸素濃度領域と、

前記高酸素濃度領域上に設けられ、Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなる第2低酸素濃度領域と、

を備え、

前記高酸素濃度領域の酸素濃度は、前記第1低酸素濃度領域および前記第2低酸素濃度領域のそれぞれの酸素濃度よりも高く、

前記主面に垂直な任意の断面を見たときに、

前記第1低酸素濃度領域の上面は、前記マスク層の前記複数の開口部のうちそれぞれ1つの開口部の上方に、少なくとも1つの谷部および複数の山部を有し、

前記谷部の1つを挟んで前記複数の山部のうちで最も接近する一対の山部同士が前記主面に沿った方向に離間した平均距離は、100 μ m超である積層構造体。

[0251] (付記16)

前記高酸素濃度領域は、前記下地基板の前記主面に沿って連続して設けられる

付記15に記載の積層構造体。

[0252] (付記 17)

前記第1低酸素濃度領域は、前記山部を挟んだ両側に設けられる一対の傾斜部をさらに有し、

前記一対の傾斜部のなす角度は、 70° 以下である

付記15又は16に記載の積層構造体。

[0253] (付記 18)

前記下地基板の前記主面における転位密度を N_0 とし、前記高酸素濃度領域の上端で前記主面に沿った境界面における転位密度を N としたときに、 N/N_0 で求められる転位密度の低減率は、前記下地基板の前記主面上に前記(0001)面のみを成長面としてIII族窒化物半導体の結晶層を、前記下地基板の前記主面から前記境界面までの厚さと等しい厚さでエピタキシャル成長させた場合の、前記結晶層の表面における転位密度を N' としたときに、 N'/N_0 で求められる転位密度の低減率よりも小さい

付記15～17のいずれか1つに記載の積層構造体。

[0254] (付記 19)

前記第2層のうち前記傾斜界面が消失した位置の境界面の、前記下地基板の前記主面からの厚さは、 1.5 mm 以下であり、

前記下地基板の前記主面における転位密度を N_0 とし、前記第2層の前記境界面における転位密度を N としたときに、 N/N_0 で求められる転位密度の低減率は、 0.3 以下である

付記15～18のいずれか1つに記載の積層構造体。

符号の説明

[0255] 1 窒化物半導体基板（基板）

2 積層構造体

10 下地基板

10s 主面

20 マスク層

20a 開口部

3 0 第 1 層

4 0 第 2 層

請求の範囲

[請求項1]

気相成長法を用いた窒化物半導体基板の製造方法であって、

Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなり、最も近い低指数の結晶面が（０００１）面である主面を有する下地基板を準備する工程と、

前記下地基板の前記主面上に、複数の開口部を有するマスク層を形成する工程と、

前記（０００１）面以外の一対の傾斜界面で挟まれ前記（０００１）面が露出した頂面を有するⅢ族窒化物半導体の単結晶を前記下地基板の前記主面上に前記マスク層の前記開口部を介してエピタキシャル成長させ、前記（０００１）面以外 of 傾斜界面で構成される複数の凹部を前記頂面に生じさせ、前記下地基板の前記主面の上方に行くにしたがって該傾斜界面を徐々に拡大させ、前記（０００１）面を前記頂面から消失させ、表面が前記傾斜界面のみで構成される第１層を成長させる第１工程と、

前記第１層上にⅢ族窒化物半導体の単結晶をエピタキシャル成長させ、前記傾斜界面を消失させ、鏡面化された表面を有する第２層を成長させる第２工程と、

を有し、

前記第１工程では、

前記単結晶の前記頂面に前記複数の凹部を生じさせ、前記（０００１）面を消失させることで、前記マスク層の前記複数の開口部のうちそれぞれ１つの開口部の上方に、少なくとも１つの谷部および複数の頂部を形成し、

前記主面に垂直な任意の断面を見たときに、前記谷部の１つを挟んで前記複数の頂部のうちで最も接近する一対の頂部同士が前記主面に沿った方向に離間した平均距離を、 $100\mu\text{m}$ 超とする窒化物半導体基板の製造方法。

[請求項2]

前記マスク層を形成する工程では、

前記マスク層の前記開口部をストライプ状に形成し、
前記マスク層のピッチを、 $800\mu\text{m}$ 以上とする
請求項1に記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[請求項3]

前記第1工程では、
最も接近する前記一对の頂部同士の前記平均距離を、 $800\mu\text{m}$ 未満とする
請求項1又は2に記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[請求項4]

前記第1工程では、
前記(0001)面を前記表面から消失させた後に、前記表面が前記傾斜界面のみで構成された状態を維持しつつ、所定の厚さに亘って前記第1層の成長を継続させる
請求項1～3のいずれか1項に記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[請求項5]

前記第1工程では、
前記第1層に、前記(0001)面を成長面として成長した第1c面成長領域を形成し、
前記第1c面成長領域のうち前記(0001)面が消失し上に凸の変曲点として終端した位置に凸部を形成するとともに、前記第1c面成長領域のうち前記凸部を挟んだ両側に、前記(0001)面と前記傾斜界面との交点の軌跡として一对の傾斜部を形成し、
前記一对の傾斜部のなす角度を 70° 以下とする
請求項1～4のいずれか1項に記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[請求項6]

前記第2工程の後に、前記第2層から少なくとも1つの窒化物半導体基板をスライスする工程を有する
請求項1～5のいずれか1項に記載の窒化物半導体基板の製造方法。

[請求項7]

2インチ以上の直径を有し、最も近い低指数の結晶面が(0001)面である主面を有する窒化物半導体基板であって、
多光子励起顕微鏡により前記窒化物半導体基板の主面を観察して暗点密度から転位密度を求めたときに、

前記主面には、転位密度が $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 未満である低転位密度領域と、転位密度が前記低転位密度領域の転位密度よりも高く $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下である高転位密度領域とが、交互に配列しており、

前記低転位密度領域の少なくとも一部は、 $50 \mu\text{m}$ 角以上の無転位領域を有する

窒化物半導体基板。

[請求項8]

Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなり、最も近い低指数の結晶面が(0001)面である主面を有する下地基板と、

前記下地基板の前記主面上に設けられ、複数の開口部を有するマスク層と、

前記マスク層の前記開口部を介した前記下地基板の前記主面上と前記マスク層上とに設けられ、Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなる第1低酸素濃度領域と、

前記第1低酸素濃度領域上に設けられ、Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなる高酸素濃度領域と、

前記高酸素濃度領域上に設けられ、Ⅲ族窒化物半導体の単結晶からなる第2低酸素濃度領域と、

を備え、

前記高酸素濃度領域の酸素濃度は、前記第1低酸素濃度領域および前記第2低酸素濃度領域のそれぞれの酸素濃度よりも高く、

前記主面に垂直な任意の断面を見たときに、

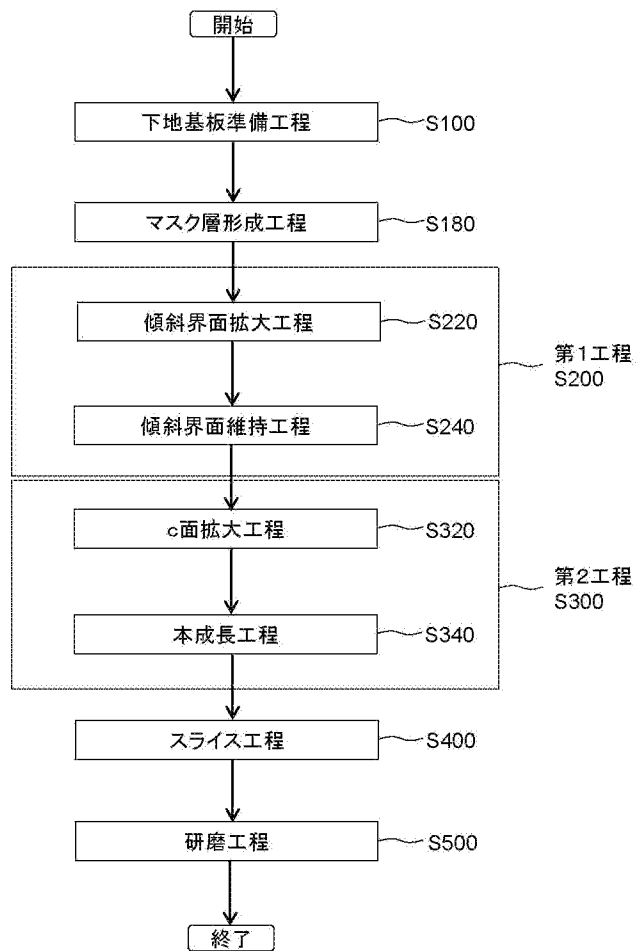
前記第1低酸素濃度領域の上面は、前記マスク層の前記複数の開口部のうちそれぞれ1つの開口部の上方に、少なくとも1つの谷部および複数の山部を有し、

前記谷部の1つを挟んで前記複数の山部のうちで最も接近する一対の山部同士が前記主面に沿った方向に離間した平均距離は、 $100 \mu\text{m}$ 超である

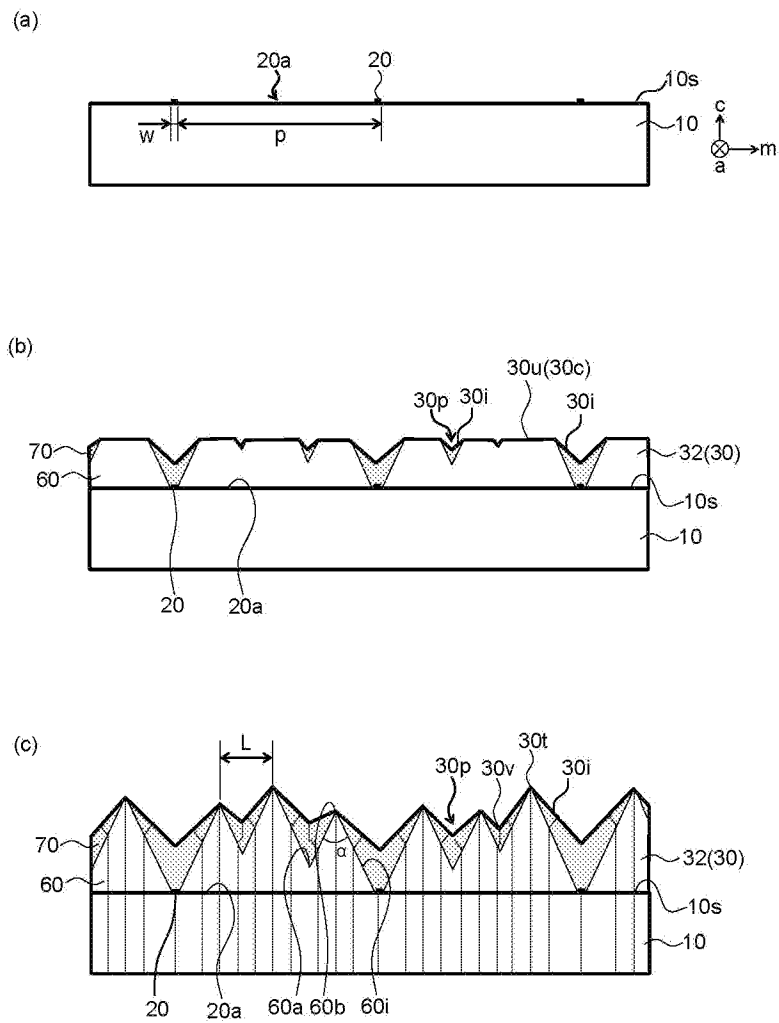
積層構造体。

- [請求項9] 前記高酸素濃度領域は、前記下地基板の前記主面に沿って連続して設けられる
請求項8に記載の積層構造体。
- [請求項10] 前記第1低酸素濃度領域は、前記山部を挟んだ両側に設けられる一対の傾斜部をさらに有し、
前記一対の傾斜部のなす角度は、 70° 以下である
請求項8又は9に記載の積層構造体。
- [請求項11] 前記下地基板の前記主面における転位密度を N_0 とし、前記高酸素濃度領域の上端で前記主面に沿った境界面における転位密度を N としたときに、 N/N_0 で求められる転位密度の低減率は、前記下地基板の前記主面上に前記(0001)面のみを成長面としてIII族窒化物半導体の結晶層を、前記下地基板の前記主面から前記境界面までの厚さと等しい厚さでエピタキシャル成長させた場合の、前記結晶層の表面における転位密度を N' としたときに、 N'/N_0 で求められる転位密度の低減率よりも小さい
請求項8～10のいずれか1項に記載の積層構造体。
- [請求項12] 前記高酸素濃度領域の上端で前記主面に沿った境界面の、前記下地基板の前記主面からの厚さは、 1.5 mm 以下であり、
前記下地基板の前記主面における転位密度を N_0 とし、前記境界面における転位密度を N としたときに、 N/N_0 で求められる転位密度の低減率は、 0.3 以下である
請求項8～11のいずれか1項に記載の積層構造体。

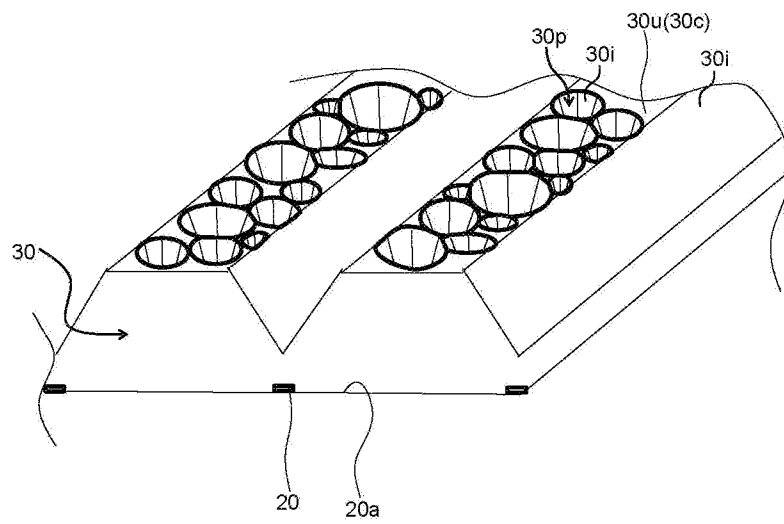
[図1]



[図2]

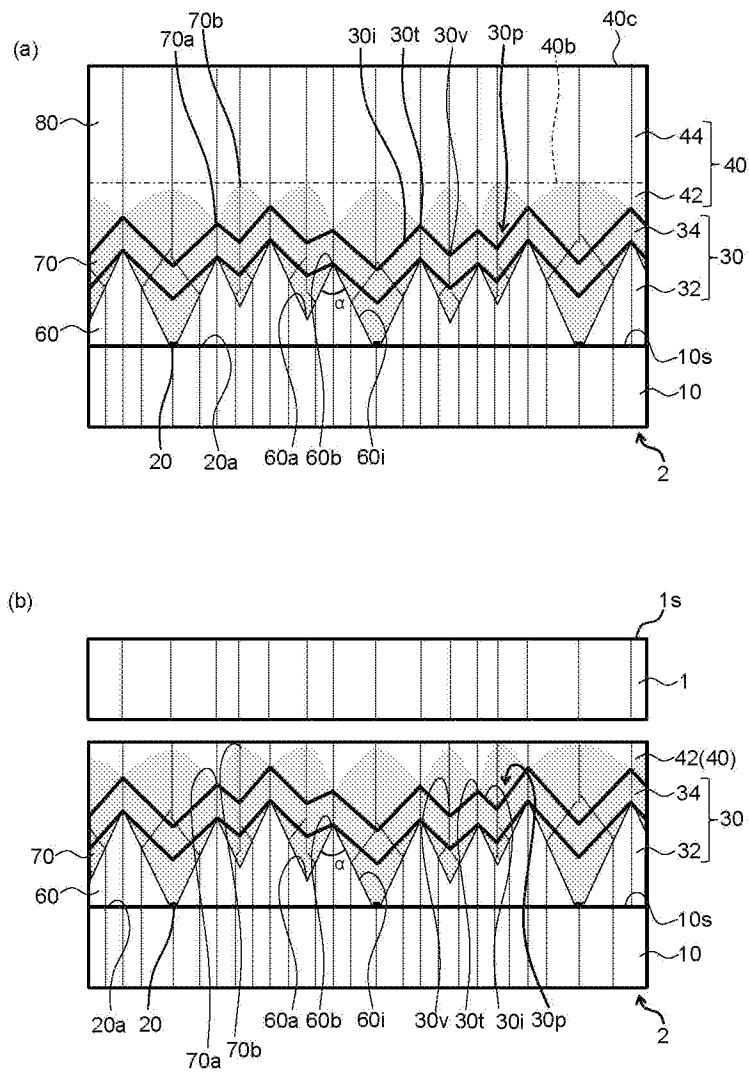


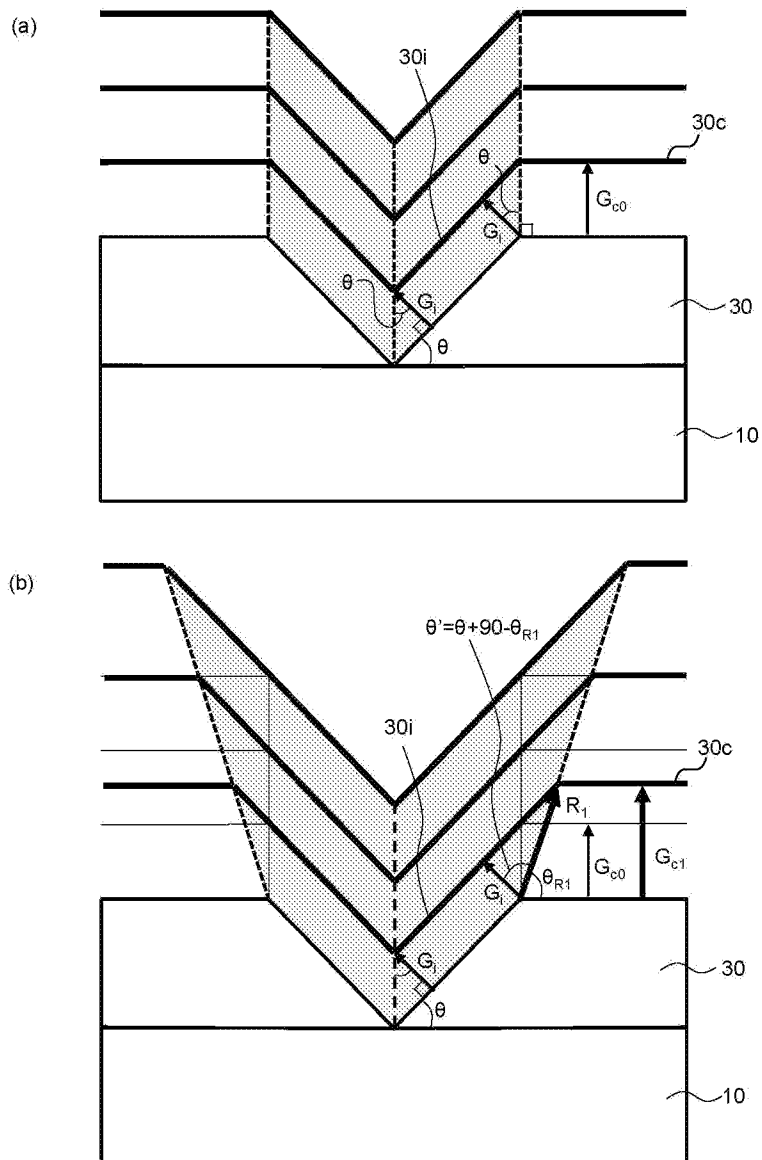
[図3]



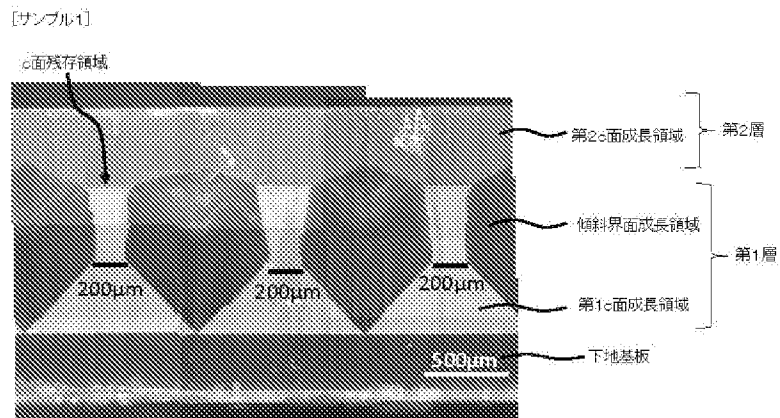
[illegible]

[図5]

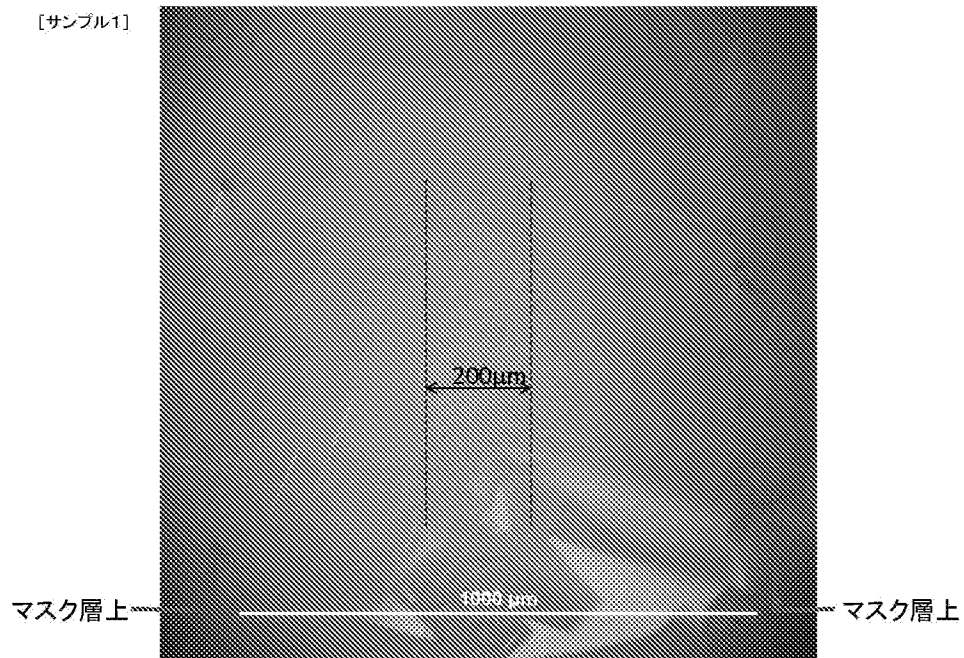




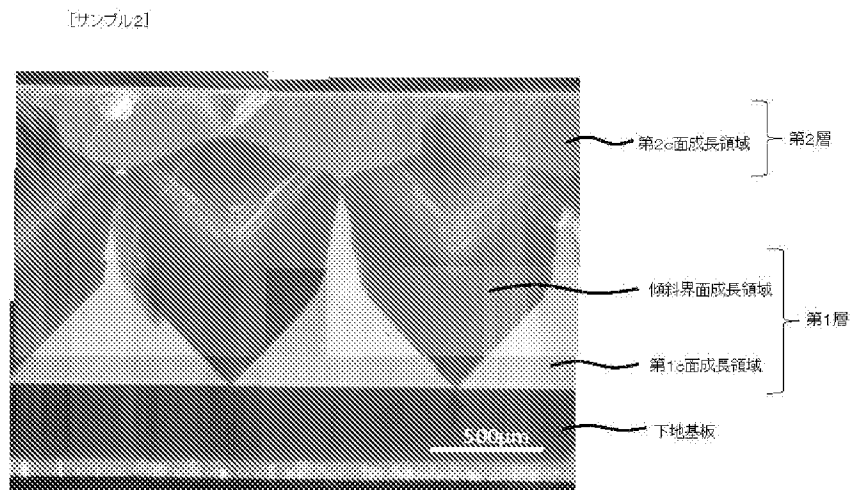
[図9]



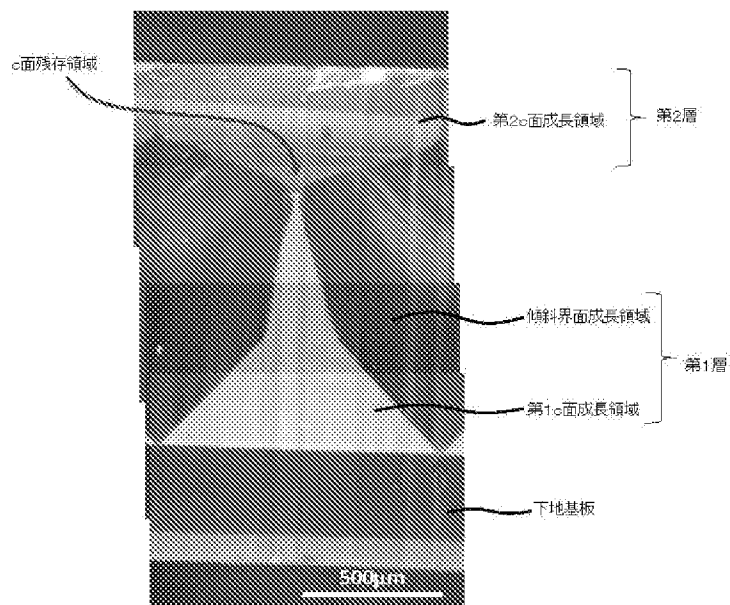
[図10]



[図11]

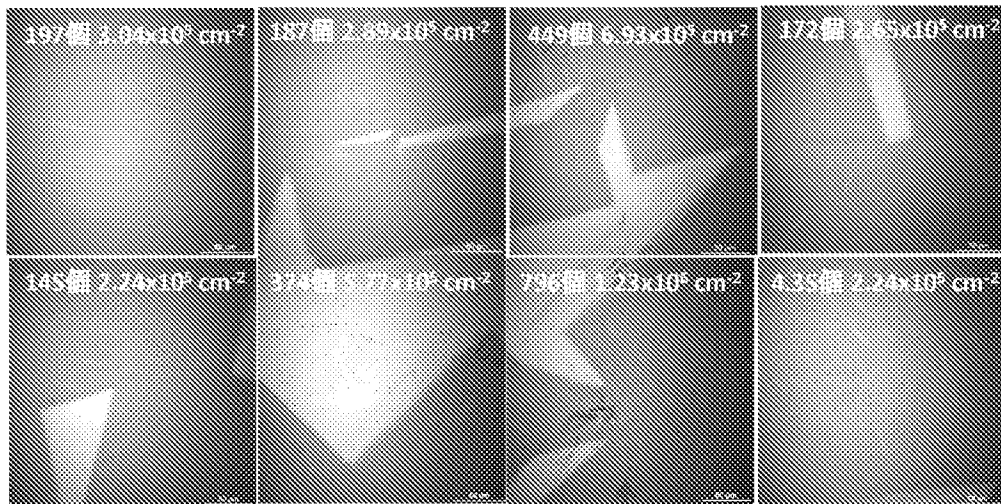


[図12]



[図13]

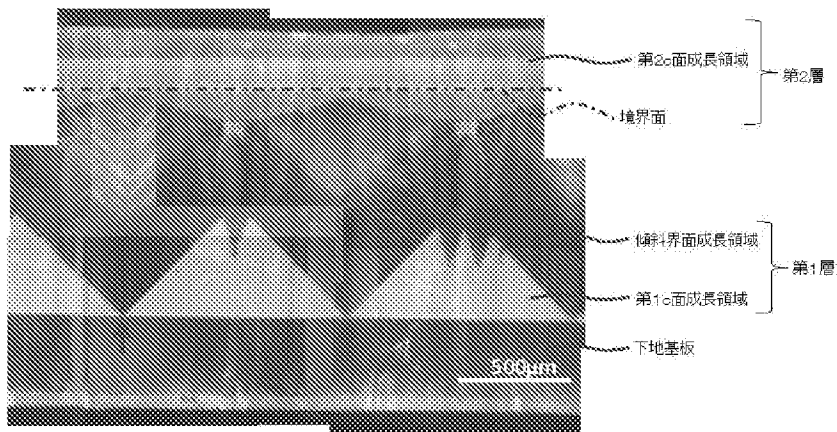
[サンプル2]



マスク層上

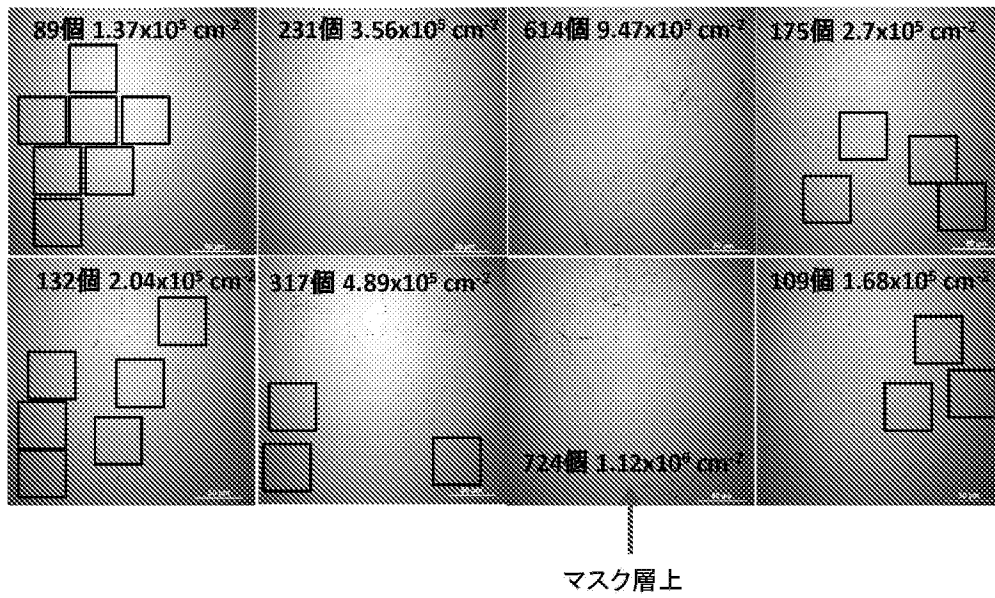
[図14]

[サンプル3]



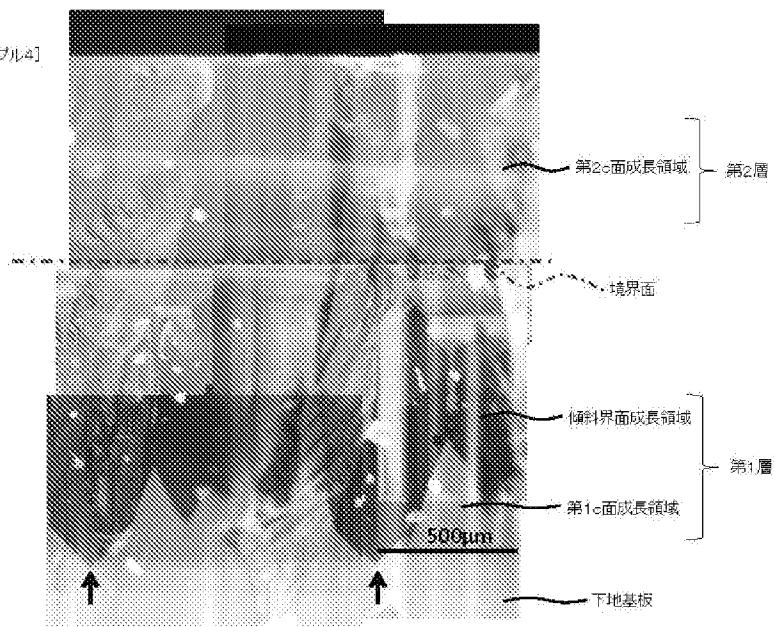
[図15]

[サンプル3]



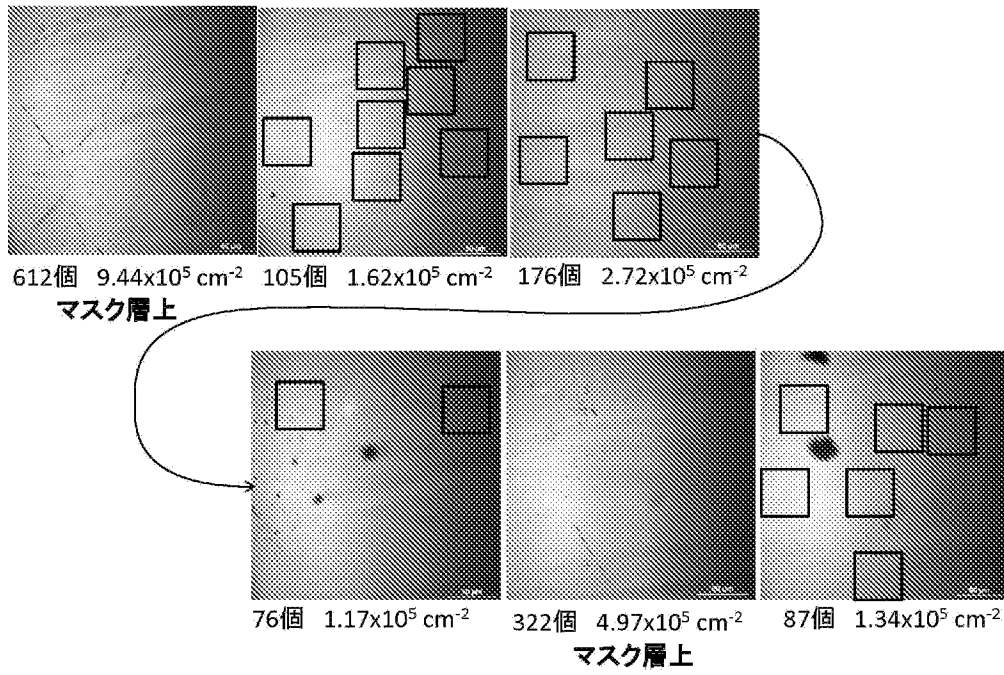
[図16]

[サンプル4]



[図17]

[サンプル4]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/032850

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. C30B29/38(2006.01)i, C30B25/04(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)

Int.Cl. C30B29/38, C30B25/04

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996

Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2019

Registered utility model specifications of Japan 1996-2019

Published registered utility model applications of Japan 1994-2019

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

JSTPlus/JST7580/JSTChina (JDreamIII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2010-70430 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) 02 April 2010, paragraphs [0101]-[0105], fig. 20 (Family: none)	1-12
A	JP 2018-27893 A (SUMITOMO CHEMICAL CO., LTD.) 22 February 2018, paragraphs [0091], [0092] (Family: none)	1-12
A	JP 2001-102307 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) 13 April 2001, claim 1, paragraphs [0038], [0050], [0055], [0072], fig. 13 & US 6468347 B1, claim 1, paragraphs [0041], [0057], [0065], [0088], fig. 13 & EP 1088914 A1 & CN 1289865 A	1-12



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

25.09.2019

Date of mailing of the international search report

08.10.2019

Name and mailing address of the ISA/

Japan Patent Office

3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/032850

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2012-66983 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) 05 April 2012, claims 1-6 & US 2012/0074403 A1, claims 1-6 & CN 103124811 A	1-12
A	WO 2015/037232 A1 (TOKYO UNIVERSITY OF AGRICULTURE AND TECHNOLOGY) 19 March 2015, claims 21, 24, paragraphs [0090], [0091] & US 2016/0186361 A1, claims 16, 18, paragraphs [0123], [0124]	1-12
A	JP 2013-107819 A (MITSUBISHI CHEMICAL CORPORATION) 06 June 2013, paragraphs [0080], [0081] (Family: none)	1-12
A	JP 2006-290676 A (HITACHI CABLE LTD.) 26 October 2006, paragraphs [0082], [0083] & US 2006/0226414 A1, paragraphs [0104]-[0106]	1-12
A	WO 2010/092736 A1 (NGK INSULATORS LTD.) 19 August 2010, paragraph [0045] & US 2012/0012984 A1, paragraph [0057]	1-12
A	JP 2009-231816 A (SHIN ETSU CHEMICAL CO., LTD.) 08 October 2009, paragraphs [0040]-[0045] & US 2009/0221131 A1, paragraphs [0067]-[0076] & CN 101521155 A	1-12
A	JP 2013-214686 A (FURUKAWA CO., LTD.) 17 October 2013, claim 1 (Family: none)	1-12
A	JP 2005-72310 A (TOYODA GOSEI CO., LTD.) 17 March 2005, claim 1 & US 2005/0076828 A1, claim 1	1-12

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. C30B29/38(2006.01)i, C30B25/04(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. C30B29/38, C30B25/04

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	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019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）

JSTPlus/JST7580/JSTChina (JDreamIII)

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
A	JP 2010-70430 A（住友電気工業株式会社）2010.04.02, 段落0101-0105、図20（ファミリーなし）	1-12
A	JP 2018-27893 A（住友化学株式会社）2018.02.22, 段落0091、0092（ファミリーなし）	1-12
A	JP 2001-102307 A（住友電気工業株式会社）2001.04.13, 請求項1、段落0038、0050、0055、0072、図13 & US 6468347 B1, 請求項1、段落0041、0057、0065、0088、図	1-12

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

25.09.2019

国際調査報告の発送日

08.10.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

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）

神▲崎▼ 賢一

4G

6109

電話番号 03-3581-1101 内線 3416

C (続き) . 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
	1 3 & EP 1088914 A1 & CN 1289865 A	
A	JP 2012-66983 A (住友電気工業株式会社) 2012.04.05, 請求項 1 - 6 & US 2012/0074403 A1, 請求項 1 - 6 & CN 103124811 A	1-12
A	WO 2015/037232 A1 (国立大学法人東京農工大学) 2015.03.19, 請求項 21、24、段落 0090、0091 & US 2016/0186361 A1, 請求項 16、18、段落 0123、0124	1-12
A	JP 2013-107819 A (三菱化学株式会社) 2013.06.06, 段落 0080、0081 (ファミリーなし)	1-12
A	JP 2006-290676 A (日立電線株式会社) 2006.10.26, 段落 0082、0083 & US 2006/0226414 A1, 段落 0104 - 0106	1-12
A	WO 2010/092736 A1 (日本碍子株式会社) 2010.08.19, 段落 0045 & US 2012/0012984 A1, 段落 0057	1-12
A	JP 2009-231816 A (信越化学工業株式会社) 2009.10.08, 段落 0040 - 0045 & US 2009/0221131 A1, 段落 0067 - 0076 & CN 101521155 A	1-12
A	JP 2013-214686 A (古河機械金属株式会社) 2013.10.17, 請求項 1 (ファミリーなし)	1-12
A	JP 2005-72310 A (豊田合成株式会社) 2005.03.17, 請求項 1 & US 2005/0076828 A1, 請求項 1	1-12