

(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6月11日(11.06.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/115950 A1

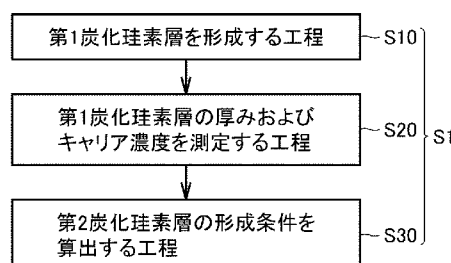
- (51) 国際特許分類:
H01L 21/205 (2006.01) *C30B 25/16* (2006.01)
C23C 16/42 (2006.01) *C30B 29/36* (2006.01)
C23C 16/52 (2006.01) *H01L 21/66* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2019/031349
- (22) 国際出願日: 2019年8月8日(08.08.2019)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2018-227913 2018年12月5日(05.12.2018) JP
- (71) 出願人: 住友電気工業株式会社
(SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.)
- [JP/JP]; 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号 Osaka (JP).
- (72) 発明者: 伊東 洋典(ITO, Hironori); 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号 住友電気工業株式会社内 Osaka (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人深見特許事務所(FUKAMI PATENT OFFICE, P.C.); 〒5300005 大阪府大阪市北区中之島三丁目2番4号 中之島フェスティバルタワー・ウエスト 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, 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,

(54) Title: METHOD FOR PRODUCING SILICON CARBIDE EPITAXIAL SUBSTRATE

(54) 発明の名称: 炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法

[図2]

FIG.2



S10 Step for forming first silicon carbide layer
S20 Step for measuring thickness and carrier concentration of first silicon carbide layer
S30 Step for calculating conditions for formation of second silicon carbide layer

(57) Abstract: According to the present invention, if the flow rate of a first ammonia gas in a step for forming a first silicon carbide layer by epitaxial growth is taken as the first flow rate, the formation time of the first silicon carbide layer in the step for forming the first silicon carbide layer by epitaxial growth is taken as the first formation time, the thickness of the first silicon carbide layer is taken as the first thickness, the carrier concentration of the first silicon carbide layer is taken as the first concentration, the target thickness of a second silicon carbide layer is taken as the second thickness, and the target carrier concentration of the second silicon carbide layer is taken as the second concentration, the formation time of the second silicon carbide layer is calculated as a value that is obtained by multiplying the value, which has been obtained by dividing the second thickness by the first thickness, by the first formation time in a step for calculating the conditions for the formation of the second silicon carbide layer, while the flow rate of a second ammonia gas in a step for forming the second silicon carbide layer by epitaxial growth is calculated as a value that is obtained by multiplying the

HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH,
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)）

value, which has been obtained by dividing the second concentration by the first concentration, by the first flow rate.

(57) 要約：第1炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における第1アンモニアガスの流量を第1流量とし、第1炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における第1炭化珪素層の形成時間を第1形成時間とし、第1炭化珪素層の厚みを第1厚みとし、第1炭化珪素層のキャリア濃度を第1濃度とし、第2炭化珪素層の目標厚みを第2厚みとし、第2炭化珪素層の目標キャリア濃度を第2濃度とした場合、第2炭化珪素層の形成条件を算出する工程においては、第2炭化珪素層の形成時間は、第2厚みを第1厚みで除した値に第1形成時間を掛けた値として算出され、かつ、第2炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における第2アンモニアガスの流量は、第2濃度を第1濃度で除した値に第1流量を掛けた値として算出される。

明 細 書

発明の名称：炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法に関する。本出願は、2018年12月5日に出願した日本特許出願である特願2018-227913号に基づく優先権を主張する。当該日本特許出願に記載された全ての記載内容は、参照によって本明細書に援用される。

背景技術

[0002] 国際公開2017/056691号（特許文献1）には、炭化珪素単結晶基板上に炭化珪素層をエピタキシャル成長させる方法が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：国際公開2017/056691号

発明の概要

[0004] 本開示に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法は以下の工程を備えている。第1アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第1炭化珪素基板上に第1炭化珪素層が形成される。第1炭化珪素層の厚みおよび第1炭化珪素層のキャリア濃度が測定される。第2炭化珪素層の形成条件が算出される。第2アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第2炭化珪素基板上に第2炭化珪素層が形成される。第1炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における第1アンモニアガスの流量を第1流量とし、第1炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における第1炭化珪素層の形成時間を第1形成時間とし、第1炭化珪素層の厚みを第1厚みとし、第1炭化珪素層のキャリア濃度を第1濃度とし、第2炭化珪素層の目標厚みを第2厚みとし、第2炭化珪素層の目標キャリア濃度を第2濃度とした場合、第2炭化珪素層の形成条件を算出する工程においては、第2炭化珪素層の第2形成時間は、第2厚みを第1厚みで除した値に第1形成時間を掛けた値と

して算出され、かつ、第2炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における第2アンモニアガスの第2流量は、第2濃度を第1濃度で除した値に第1流量を掛けた値として算出される。第2炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程においては、第2形成時間および第2流量を用いて、第2炭化珪素層が形成される。第1炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程と、第2炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程とは、同じ装置で行われる。

図面の簡単な説明

[0005] [図1]図1は、炭化珪素エピタキシャル基板の製造装置の構成を示す一部断面模式図である。

[図2]図2は、本実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造条件の算出方法を概略的に示すフローチャートである。

[図3]図3は、本実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造条件の算出方法の第1工程を示す平面模式図である。

[図4]図4は、図3のⅠV-ⅠV線に沿った断面模式図である。

[図5]図5は、本実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造条件の算出方法の第2工程を示す断面模式図である。

[図6]図6は、第1実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法を概略的に示すフローチャートである。

[図7]図7は、第1実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法の第1工程を示す断面模式図である。

[図8]図8は、第1実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法の第2工程を示す断面模式図である。

[図9]図9は、第2実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法を概略的に示すフローチャートである。

[図10]図10は、第2実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法の第1工程を示す断面模式図である。

[図11]図11は、第2実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方

法の第2工程を示す断面模式図である。

[図12]図12は、第2実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法の第3工程を示す断面模式図である。

[図13]図13は、第2実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法の第4工程を示す断面模式図である。

[図14]図14は、第2実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法の第5工程を示す断面模式図である。

[図15]図15は、第3実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法により製造された炭化珪素エピタキシャル基板の構成を示す断面模式図である。

[図16]図16は、キャリア濃度とエピタキシャル成長時間との関係を示す図である。

[図17]図17は、キャリア濃度と窒素ガス流量との関係を示す図である。

[図18]図18は、キャリア濃度とアンモニアガス流量との関係を示す図である。

発明を実施するための形態

[0006] [本開示が解決しようとする課題]

本開示の目的は、条件出し工程を簡略化しつつ、炭化珪素層のキャリア濃度の精度を向上することである。

[0007] [本開示の効果]

本開示によれば、条件出し工程を簡略化しつつ、炭化珪素層のキャリア濃度の精度を向上することができる。

[0008] [本開示の実施形態の概要]

まず本開示の実施形態の概要について説明する。本明細書の結晶学的記載においては、個別方位を $[\]$ 、集合方位を $\langle \rangle$ 、個別面を $(\)$ 、集合面を $\{ \}$ でそれぞれ示す。結晶学上の指数が負であることは、通常、数字の上に“ $-$ ”（バー）を付すことによって表現されるが、本明細書では数字の前に負の符号を付すことによって結晶学上の負の指数を表現する。

- [0009] (1) 本開示に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法は以下の工程を備えている。第1アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第1炭化珪素基板110上に第1炭化珪素層10が形成される。第1炭化珪素層10の厚みおよび第1炭化珪素層10のキャリア濃度が測定される。第2炭化珪素層20の形成条件が算出される。第2アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第2炭化珪素基板120上に第2炭化珪素層20が形成される。第1炭化珪素層10を形成する工程における第1アンモニアガスの流量を第1流量とし、第1炭化珪素層10を形成する工程における第1炭化珪素層10の形成時間を第1形成時間とし、第1炭化珪素層10の厚みを第1厚みとし、第1炭化珪素層10のキャリア濃度を第1濃度とし、第2炭化珪素層20の目標厚みを第2厚みとし、第2炭化珪素層20の目標キャリア濃度を第2濃度とした場合、第2炭化珪素層20の形成条件を算出する工程においては、第2炭化珪素層20の第2形成時間は、第2厚みを第1厚みで除した値に第1形成時間を掛けた値として算出され、かつ、第2炭化珪素層20を形成する工程における第2アンモニアガスの第2流量は、第2濃度を第1濃度で除した値に第1流量を掛けた値として算出される。第2炭化珪素層20を形成する工程においては、第2形成時間および第2流量を用いて、第2炭化珪素層20が形成される。第1炭化珪素層10をエピタキシャル成長により形成する工程と、第2炭化珪素層20をエピタキシャル成長により形成する工程とは、同じ装置で行われる。
- [0010] (2) 上記(1)に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法において、第2濃度を第1濃度で除した値は、0.1以上5以下であってもよい。
- [0011] (3) 上記(1)または(2)に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法において、第1厚みを第1形成時間で除した値は、 $5\mu\text{m}/\text{時間}$ 以上 $30\mu\text{m}/\text{時間}$ 以下であってもよい。
- [0012] (4) 上記(1)～(3)のいずれかに係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法において、第1炭化珪素基板110のキャリア濃度を第1

基板濃度とした場合、第1濃度は、第1基板濃度の半分よりも小さくてもよい。

[0013] (5) 上記(1)～(4)のいずれかに係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法は、第3アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第3炭化珪素基板130上に第3炭化珪素層30を形成する工程と、第3炭化珪素層30の厚みおよび第3炭化珪素層30のキャリア濃度を測定する工程と、第4炭化珪素層40の形成条件を算出する工程と、第2炭化珪素層20を形成する工程前に、第4アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第2炭化珪素基板120上に第4炭化珪素層40を形成する工程とをさらに備えていてもよい。第2炭化珪素層20は、第4炭化珪素層40上に形成されてもよい。第3炭化珪素層30を形成する工程における第3アンモニアガスの流量を第3流量とし、第3炭化珪素層30を形成する工程における第3炭化珪素層30の形成時間を第3形成時間とし、第3炭化珪素層30の厚みを第3厚みとし、第3炭化珪素層30のキャリア濃度を第3濃度とし、第4炭化珪素層40の目標厚みを第4厚みとし、第4炭化珪素層40の目標キャリア濃度を第4濃度とした場合、第4炭化珪素層40の形成条件を算出する工程においては、第4炭化珪素層40の第4形成時間は、第4厚みを第3厚みで除した値に第3形成時間を掛けた値として算出され、かつ、第4炭化珪素層40を形成する工程における第4アンモニアガスの第4流量は、第4濃度を第3濃度で除した値に第3流量を掛けた値として算出されてもよい。第4炭化珪素層40を形成する工程においては、第4形成時間および第4流量を用いて、第4炭化珪素層40が形成されてもよい。第3炭化珪素層30をエピタキシャル成長により形成する工程と、第4炭化珪素層40をエピタキシャル成長により形成する工程とは、同じ装置で行われる。

[0014] (6) 上記(5)に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法において、第4濃度を第3濃度で除した値は、0.1以上5以下であってもよい。

[0015] (7) 上記(5)または(6)に係る炭化珪素エピタキシャル基板100

の製造方法において、第3厚みを第3形成時間で除した値は、 $5\text{ }\mu\text{m}/\text{時間}$ 以上 $30\text{ }\mu\text{m}/\text{時間}$ 以下であってもよい。

[0016] (8) 上記(5)～(7)のいずれかに係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法において、第3炭化珪素基板130のキャリア濃度を第3基板濃度とした場合、第3濃度は、第3基板濃度の半分よりも小さくてもよい。

[0017] [本開示の実施形態の詳細]

以下、本開示の一実施形態（以下「本実施形態」とも記す）について説明する。ただし本実施形態はこれらに限定されるものではない。以下の説明では、同一または対応する要素には同一の符号を付し、それらについて同じ説明は繰り返さない。

(炭化珪素エピタキシャル基板の製造装置)

まず、炭化珪素エピタキシャル基板100の製造装置200の構成について説明する。

[0018] 図1に示されるように、炭化珪素エピタキシャル基板100の製造装置200は、たとえばホットウォール方式の横型CVD (Chemical Vapor Deposition) 装置である。炭化珪素エピタキシャル基板100の製造装置200は、反応室201と、ガス供給部235と、制御部245と、発熱体203、石英管204、断熱材（図示せず）、誘導加熱コイル（図示せず）とを主に有している。

[0019] 発熱体203は、たとえば筒状の形状を有しており、内部に反応室201を形成している。発熱体203は、たとえば黒鉛製である。発熱体203は、石英管204の内周面に接するように石英管204の内部に設けられている。断熱材は、発熱体203の外周を取り囲んでいる。誘導加熱コイルは、たとえば石英管204の外周面に沿って巻回されている。誘導加熱コイルは、外部電源（図示せず）により、交流電流が供給可能に構成されている。これにより、発熱体203が誘導加熱される。結果として、反応室201が発熱体203により加熱される。

- [0020] 反応室201は、発熱体203の内壁面205に取り囲まれて形成された空間である。反応室201内には、炭化珪素基板が配置される。反応室201は、炭化珪素基板を加熱可能に構成されている。反応室201には、炭化珪素基板を保持するサセプタ210が設けられる。炭化珪素基板は、サセプタ210に配置される。サセプタ210は、ステージ202上に配置される。ステージ202は、回転軸209によって自転可能に構成されている。ステージ202が回転することで、サセプタ210が回転する。
- [0021] 炭化珪素エピタキシャル基板100の製造装置200は、ガス導入口207およびガス排気口208をさらに有している。ガス排気口208は、図示しない排気ポンプに接続されている。図1中の矢印は、ガスの流れを示している。ガスは、ガス導入口207から反応室201に導入され、ガス排気口208から排気される。反応室201内の圧力は、ガスの供給量と、ガスの排気量とのバランスによって調整される。
- [0022] ガス供給部235は、反応室201に、原料ガスとドーパントガスとキャリアガスとを含む混合ガスを供給可能に構成されている。具体的には、ガス供給部235は、たとえば第1ガス供給部231と、第2ガス供給部232と、第3ガス供給部233と、第4ガス供給部234とを含んでいる。
- [0023] 第1ガス供給部231は、炭素原子を含む第1ガスを供給可能に構成されている。第1ガス供給部231は、たとえば第1ガスが充填されたガスボンベである。第1ガスは、たとえばプロパン(C_3H_8)ガスである。第1ガスは、たとえばメタン(CH_4)ガス、エタン(C_2H_6)ガス、アセチレン(C_2H_2)ガス等であってもよい。
- [0024] 第2ガス供給部232は、シランガスを含む第2ガスを供給可能に構成されている。第2ガス供給部232は、たとえば第2ガスが充填されたガスボンベである。第2ガスは、たとえばシラン(SiH_4)ガスである。第2ガスは、シランガスと、シラン以外の他のガスとの混合ガスでもよい。
- [0025] 第3ガス供給部233は、アンモニアガスを含む第3ガスを供給可能に構成されている。第3ガス供給部233は、たとえば第3ガスが充填されたガ

スポンベである。第3ガスは、N（窒素原子）を含むドーピングガスである。アンモニアガスは、三重結合を有する窒素ガスに比べて熱分解されやすい。

[0026] 第4ガス供給部234は、たとえば水素などの第4ガス（キャリアガス）を供給可能に構成されている。第4ガス供給部234は、たとえば水素が充填されたガスポンベである。

[0027] 制御部245は、ガス供給部235から反応室201に供給される混合ガスの流量を制御可能に構成されている。具体的には、制御部245は、第1ガス流量制御部241と、第2ガス流量制御部242と、第3ガス流量制御部243と、第4ガス流量制御部244とを含んでいてもよい。各制御部は、たとえばMFC(Mass Flow Controller)であってもよい。制御部245は、ガス供給部235とガス導入口207との間に配置されている。言い換えれば、制御部245は、ガス供給部235とガス導入口207とを繋ぐ流路に配置されている。

[0028] 反応室201の軸方向において、誘導加熱コイルの巻き密度を変化させてもよい。巻き密度[回/m]とは、装置の軸方向の単位長さあたりのコイルの周回数である。たとえば、上流側でアンモニアを効果的に熱分解させるために、上流側の誘導加熱コイルの巻き密度は、下流側の誘導加熱コイルの巻き密度よりも高くてもよい。

[0029] （炭化珪素エピタキシャル基板の製造条件の算出方法）

次に、本実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造条件の算出方法について説明する。

[0030] まず、たとえば昇華法により、ポリタイプ4Hの炭化珪素単結晶が製造される。次に、たとえばワイヤーソーによって、炭化珪素単結晶をスライスすることにより、炭化珪素基板110が準備される（図3参照）。炭化珪素基板110を構成する炭化珪素のポリタイプは、たとえば4H-SiCである。4H-SiCは、電子移動度、絶縁破壊電界強度等において他のポリタイプより優れている。炭化珪素基板110は、n型不純物としての窒素を含ん

でいる。炭化珪素基板 110 の導電型は、n 型である。

[0031] 図3および図4に示されるように、炭化珪素基板 110 は、第1主面 111 と、第2主面 112 と、外縁部 113 とを有している。第1主面 111 は、第1方向 101 および第2方向 102 の各々の方向に沿って2次元的に広がっている。第2主面 112 は、第1主面 111 の反対側にある。第1主面 111 に対して垂直な方向から見て、外縁部 113 は、第1主面 111 を取り囲んでいる。外縁部 113 は、たとえばオリエンテーションフラット1と、円弧状部2とを有している。オリエンテーションフラット1は、第1方向 101 に沿って延在している。円弧状部2は、オリエンテーションフラット1に連なっている。

[0032] 第2方向 102 は、たとえば $\langle 1-100 \rangle$ 方向である。第2方向は、たとえば $[1-100]$ 方向であってもよい。第1方向 101 は、第1主面 111 に対して平行であり、かつ第2方向 102 に対して垂直な方向である。第1方向 101 は、たとえば $\langle 11-20 \rangle$ 方向成分を含む方向である。別の観点から言えば、第1方向は、 $\langle 11-20 \rangle$ 方向を第1主面 111 に平行な平面に投影した方向である。第1方向 101 は、たとえば $[11-20]$ 方向成分を含む方向であってもよい。

[0033] 図3に示されるように、炭化珪素基板 110 の第1主面 111 の直径3（最大径）は、100mm以上である。直径3は150mm以上でもよいし、200mm以上でもよいし、250mm以上でもよい。直径3の上限は特に限定されないが、直径3の上限はたとえば300mmであってもよい。

[0034] 第1主面 111 は、 $\{0001\}$ 面または $\{0001\}$ 面に対して 8° 以下の角度で傾斜した面である。具体的には、第1主面 111 は、たとえば (0001) 面または (0001) 面に対して 8° 以下の角度で傾斜した面である。第1主面 111 が $\{0001\}$ 面に対して傾斜している場合、傾斜方向（オフ方向）は、たとえば $\langle 11-20 \rangle$ 方向である。 $\{0001\}$ 面に対する傾斜角（オフ角）は、 1° 以上であってもよいし、 2° 以上であってもよい。オフ角は、 7° 以下であってもよいし、 6° 以下であってもよいし

、 4° 以下であってもよい。第1主面111は、(000-1)面または(000-1)面に対して 8° 以下の角度で傾斜した面であってもよい。

[0035] 次に、第1炭化珪素層を形成する工程(S10:図2)が実施される。具体的には、上述した製造装置200を用いて、炭化珪素基板110上に第1炭化珪素層10がエピタキシャル成長によって形成される。まず、炭化珪素基板110がサセプタ210に載置される。次に、反応室201の圧力が大気圧から 1×10^{-6} Pa程度に低減された後、炭化珪素基板110の昇温が開始される。昇温の途中において、第4ガス供給部234からキャリアガスである水素(H_2)ガスが反応室201に導入される。水素ガスの流量は、第4ガス流量制御部244により調整される。

[0036] 反応室の温度がたとえば $1600^{\circ}C$ 程度になった後、反応室201に、原料ガス、ドーパントガスおよびキャリアガスが供給される。具体的には、シランとプロパンとアンモニア(第1アンモニアガス)と水素とを含む混合ガスが、反応室201に導入される。反応室201において、それぞれのガスが熱分解され、炭化珪素基板110上に第1炭化珪素層10が形成される。混合ガスのC/Si比が、たとえば1.0程度となるように、シランおよびプロパンとの流量が調整される。反応室201の圧力は、たとえば6 kPaである。

[0037] 第2ガス流量制御部242を用いて、反応室201に供給される第2ガス(シランガス)の流量は、たとえば 115 sccm となるように調整される。第2ガス(シランガス)の流量は、たとえば 80 sccm 以上 150 sccm 以下であってもよい。

[0038] 同様に、第1ガス流量制御部241を用いて、反応室201に供給される第1ガス(プロパンガス)の流量は、たとえば 37.5 sccm となるように調整される。第1ガス(プロパンガス)の流量は、たとえば 25 sccm 以上 50 sccm 以下であってもよい。

[0039] 同様に、第3ガス流量制御部243を用いて、反応室201に供給される第3ガス(アンモニアガス)の流量は、たとえば 0.0033 sccm とな

るよう調整される。第3ガス（アンモニアガス）の流量は、たとえば0.001 sccm以上0.1 sccm以下であってもよい。

[0040] 同様に、第4ガス流量制御部244を用いて、反応室201に供給される第4ガス（水素ガス）の流量は、たとえば120 slmとなるように調整される。第4ガス（水素ガス）の流量は、たとえば100 slm以上150 slm以下であってもよい。

[0041] 以上のように、第1アンモニアガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素基板110上に第1炭化珪素層10が形成される（図5参照）。第1炭化珪素層10の厚み（第1厚みT1）は、たとえば3 μm 以上10 μm 以下である。第1厚みT1は、たとえば3.5 μm 以上であってもよいし、4 μm 以上であってもよい。第1厚みT1は、たとえば9.5 μm 以下であってもよいし、9 μm 以下であってもよい。

[0042] 第1炭化珪素層10は、n型不純物としての窒素（N）を含んでいる。この場合、キャリアは電子である。第1炭化珪素層10のキャリア濃度は、たとえば $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。図5に示されるように、第1炭化珪素層10は、第3主面11と、第4主面12とを有している。第4主面12は、第3主面11の反対側にある。第4主面12は、第1主面111に接している。

[0043] 次に、第1炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S20：図2）が実施される。

[0044] まず、第1炭化珪素層10の厚みの測定方法について説明する。

第1炭化珪素層10の厚みは、たとえばFT-IR（Fourier Transform-Infrared spectrometer）を用いて測定することができる。第1炭化珪素層10の厚みは、たとえば島津製作所製フーリエ変換赤外分光光度計（IR Prestige-21）および同社製の赤外顕微鏡（AIM-8800）を組み合わせで測定することができる。FT-IRによる第1炭化珪素層10の厚み測定は、第1炭化珪素層10と炭化珪素基板110とのキャリア濃度差により生じる光学定数差を利用

して求められる。具体的には、赤外光を照射して、第1炭化珪素層10の第3主面11からの反射と、第1炭化珪素層10と炭化珪素基板110との界面からの反射による干渉を計測することにより、第1炭化珪素層10の厚みが計測される。測定波数範囲は、たとえば 1500 cm^{-1} から 3500 cm^{-1} までの範囲である。波数間隔は、たとえば 4 cm^{-1} 程度である。

[0045] 第1炭化珪素層10の厚みは、第3主面11の複数の位置において測定される。面内方向の測定間隔は、たとえば 10 mm である。具体的には、第1方向101に平行な方向において、第3主面11の中心から $\pm 10\text{ mm}$ 、 $\pm 20\text{ mm}$ 、 $\pm 30\text{ mm}$ 、 $\pm 40\text{ mm}$ 、 $\pm 50\text{ mm}$ および $\pm 60\text{ mm}$ 離れた点が厚みの測定位置とされる。同様に、第2方向102に平行な方向において、第3主面11の中心から $\pm 10\text{ mm}$ 、 $\pm 20\text{ mm}$ 、 $\pm 30\text{ mm}$ 、 $\pm 40\text{ mm}$ 、 $\pm 50\text{ mm}$ および $\pm 60\text{ mm}$ 離れた点が厚みの測定位置とされる。第3主面11の中心も厚みの測定位置とされる。複数の測定位置において測定された第1炭化珪素層10の厚みの平均値が、第1炭化珪素層10の厚みとされる。

[0046] 次に、第1炭化珪素層10のキャリア濃度の測定方法について説明する。

第1炭化珪素層10のキャリア濃度は、たとえば水銀プローブ方式のC（キャパシタンス）-V（電圧）測定装置により測定される。具体的には、第1炭化珪素層10の第3主面11側に一方のプローブが配置され、第1炭化珪素層10の第4主面12側に他方のプローブが配置される。一方のプローブの面積は、たとえば 0.01 cm^2 である。一方のプローブと他方のプローブとの間に電圧が印加され、一方のプローブと他方のプローブとの間のキャパシタンスが測定される。縦軸を $1/C^2$ （キャパシタンスの二乗の逆数）とし、横軸をV（電圧）とし、測定データの直線の傾きから、キャリア濃度が求められる。測定電圧範囲は、典型的には $-5\text{ V} \sim 0\text{ V}$ の範囲である。なお、キャリア濃度は、たとえばSIMS（Secondary Ion Mass Spectrometry）により測定されてもよい。

[0047] 第1炭化珪素層10のキャリア濃度は、第3主面11の複数の位置におい

て測定される。面内方向の測定間隔は、たとえば10mmである。具体的には、第1方向101に平行な方向において、第3主面11の中心から±10mm、±20mm、±30mm、±40mm、±50mmおよび±60mm離れた点がキャリア濃度の測定位置とされる。同様に、第2方向102に平行な方向において、第3主面11の中心から±10mm、±20mm、±30mm、±40mm、±50mmおよび±60mm離れた点がキャリア濃度の測定位置とされる。第3主面11の中心もキャリア濃度の測定位置とされる。複数の測定位置において測定された第1炭化珪素層10のキャリア濃度の平均値が、第1炭化珪素層10のキャリア濃度とされる。以上のように、第1炭化珪素層10の厚みおよび第1炭化珪素層10のキャリア濃度が測定される。

[0048] 次に、第2炭化珪素層の形成条件を算出する工程（S30：図2）が実施される。

具体的には、第2炭化珪素層20の形成時間が算出される。第1炭化珪素層10を形成する工程における第1炭化珪素層10の形成時間を第1形成時間とし、第1炭化珪素層10の厚みを第1厚みとし、第2炭化珪素層20の目標厚みを第2厚みとした場合、第2炭化珪素層20の形成条件を算出する工程においては、第2炭化珪素層20の形成時間は、第2厚みを第1厚みで除した値に第1形成時間を掛けた値として算出される。一例として、第1形成時間が6分であり、第1厚みが6μmであり、第2厚みが10μmである場合、第2炭化珪素層20の形成時間は、 $(10\mu\text{m} / 6\mu\text{m}) \times 6\text{分} = 10\text{分}$ として算出される。

[0049] 第1厚みを第1形成時間で除した値は、第1炭化珪素層10の形成速度である。第1厚みを第1形成時間で除した値は、たとえば5μm/時間以上30μm/時間以下である。第1厚みを第1形成時間で除した値は、たとえば7μm/時間以上であってもよいし、10μm/時間以上であってもよい。第1厚みを第1形成時間で除した値は、たとえば25μm/時間以下であってもよいし、20μm/時間以下であってもよい。

[0050] 同様に、第2炭化珪素層20を形成する工程における第2アンモニアガスの流量が算出される。第1炭化珪素層10を形成する工程における第1アンモニアガスの流量を第1流量とし、第1炭化珪素層10のキャリア濃度を第1濃度とし、第2炭化珪素層20の目標キャリア濃度を第2濃度とした場合、第2炭化珪素層20の形成条件を算出する工程においては、第2炭化珪素層20を形成する工程における第2アンモニアガスの流量は、第2濃度を第1濃度で除した値に第1流量を掛けた値として算出される。一例として、第1流量が 0.001 sccm であり、第1濃度が $1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ であり、第2濃度が $2 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ である場合、第2炭化珪素層20を形成する工程における第2アンモニアガスの流量は、 $(2 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3} / 1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}) \times 0.001\text{ sccm} = 0.002\text{ sccm}$ として算出される。

[0051] 第2濃度を第1濃度で除した値は、たとえば0.1以上5以下である。第2濃度を第1濃度で除した値は、たとえば0.2以上であってもよし、0.3以上であってもよい。第2濃度を第1濃度で除した値は、たとえば4以下であってもよし、3以下であってもよい。第1炭化珪素基板110のキャリア濃度を第1基板濃度とした場合、第1濃度は、たとえば第1基板濃度の半分よりも小さい。第1濃度は、たとえば第1基板濃度の $1/3$ よりも小さくてもよいし、 $1/10$ よりも小さくてもよい。以上のように、第2炭化珪素層20の形成条件が算出される。

[0052] (炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法)

(第1実施形態)

次に、第1実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法について説明する。

[0053] 図6に示されるように、第1実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法は、第1炭化珪素層を形成する工程(S10:図6)と、第1炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程(S20:図6)と、第2炭化珪素層の形成条件を算出する工程(S30:図6)と、第2炭化珪素層を形成する工程(S40:図6)とを主に有している。

- [0054] まず、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）が実施される。第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）は、上述の第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図2）と同様である。第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）においては、第1アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第1炭化珪素基板110上に第1炭化珪素層10が形成される。
- [0055] 次に、第1炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S20：図6）が実施される。第1炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S20：図6）は、上述の第1炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S20：図2）と同様である。第1炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S20：図6）においては、第1炭化珪素層10の厚みおよび第1炭化珪素層10のキャリア濃度が測定される。
- [0056] 次に、第2炭化珪素層の形成条件を算出する工程（S30：図6）が実施される。第2炭化珪素層の形成条件を算出する工程（S30：図6）は、上述の第2炭化珪素層の形成条件を算出する工程（S30：図2）と同様である。第2炭化珪素層の形成条件を算出する工程（S30：図6）においては、第2炭化珪素層20の形成条件が算出される。
- [0057] 次に、第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）が実施される。具体的には、まず、第2炭化珪素基板120が準備される（図7参照）。第2炭化珪素基板120は、第1炭化珪素基板110とは異なる基板である。第2炭化珪素基板120は、第1炭化珪素基板110と実質的に同じ物理的および化学的特性を有している。図7に示されるように、第2炭化珪素基板120は、第5主面121と、第6主面122を有している。第6主面122は、第5主面121と反対側にある。第2炭化珪素基板120を構成する炭化珪素のポリタイプは、たとえば4H-SiCである。第2炭化珪素基板120の直径は、たとえば150mm以上である。
- [0058] 第5主面121は、 $\{0001\}$ 面または $\{0001\}$ 面に対して 8° 以下の角度で傾斜した面である。具体的には、第5主面121は、たとえば (0001) 面または (0001) 面に対して 8° 以下の角度で傾斜した面で

ある。第5主面121が{0001}面に対して傾斜している場合、傾斜方向（オフ方向）は、たとえば<11-20>方向である。{0001}面に対する傾斜角（オフ角）は、1°以上であってもよいし、2°以上であってもよい。オフ角は、7°以下であってもよいし、6°以下であってもよいし、4°以下であってもよい。第5主面121は、(000-1)面または(000-1)面に対して8°以下の角度で傾斜した面であってもよい。

[0059] 次に、上述した製造装置200を用いて、第2炭化珪素基板120上に第2炭化珪素層20がエピタキシャル成長によって形成される。まず、第2炭化珪素基板120がサセプタ210に載置される。次に、反応室201の圧力が大気圧から 1×10^{-6} Pa程度に低減された後、第2炭化珪素基板120の昇温が開始される。昇温の途中において、第4ガス供給部234からキャリアガスである水素(H₂)ガスが反応室201に導入される。水素ガスの流量は、第4ガス流量制御部244により調整される。

[0060] 反応室201の温度がたとえば1600℃程度になった後、反応室201に、原料ガス、ドーパントガスおよびキャリアガスが供給される。具体的には、シランとプロパンとアンモニア（第2アンモニアガス）と水素とを含む混合ガスが、反応室201に導入される。反応室201において、それぞれのガスが熱分解され、第2炭化珪素基板120上に第2炭化珪素層20が形成される。混合ガスのC/Si比が、たとえば1.0程度となるように、シランおよびプロパンとの流量が調整される。反応室201の圧力は、たとえば6 kPaである。

[0061] 第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における反応室201の温度は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における反応室201の温度と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における反応室201の温度（℃）は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における反応室201の温度（℃）±0.2%以内である。

[0062] 第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における反応室201の

圧力は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における反応室201の圧力と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における反応室201の圧力（kPa）は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における反応室201の圧力（kPa） $\pm 2\%$ 以内である。

[0063] 第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における第2ガス（シランガス）の流量は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における第2ガス（シランガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における第2ガス（シランガス）の流量（sccm）は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における第2ガス（シランガス）の流量（sccm） $\pm 0.5\%$ 以内である。

[0064] 第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における第1ガス（プロパンガス）の流量は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における第1ガス（プロパンガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における第1ガス（プロパンガス）の流量（sccm）は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における第1ガス（プロパンガス）の流量（sccm） $\pm 0.5\%$ 以内である。

[0065] 第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における第4ガス（水素ガス）の流量は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における第4ガス（水素ガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第2炭化珪素層を形成する工程（S40：図6）における第4ガス（水素ガス）の流量（slm）は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図6）における第4ガス（水素ガス）の流量（slm） $\pm 0.5\%$ 以内である。

[0066] 以上のように、第2アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第2炭化珪素基板120上に第2炭化珪素層20が形成される（図8参照）。第2

炭化珪素層 20 の厚み（第 2 厚み T2）は、たとえば $5\ \mu\text{m}$ 以上 $30\ \mu\text{m}$ 以下である。第 2 厚み T2 は、たとえば $6\ \mu\text{m}$ 以上であってもよいし、 $7\ \mu\text{m}$ 以上であってもよい。第 2 厚み T2 は、たとえば $28\ \mu\text{m}$ 以下であってもよいし、 $26\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第 1 炭化珪素層を形成する工程（S10：図 6）と、第 2 炭化珪素層を形成する工程（S40：図 6）とは、同じ装置で行われる。

[0067] 第 2 炭化珪素層 20 は、n 型不純物としての窒素（N）を含んでいる。この場合、キャリアは電子である。第 2 炭化珪素層 20 のキャリア濃度は、たとえば $1 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ 以下である。図 8 に示されるように、第 2 炭化珪素層 20 は、第 7 主面 21 と、第 8 主面 22 とを有している。第 8 主面 22 は、第 7 主面 21 の反対側にある。第 8 主面 22 は、第 5 主面 121 に接している。以上のように、第 2 炭化珪素基板 120 と、第 2 炭化珪素層 20 とを有する炭化珪素エピタキシャル基板 100 が製造される。

[0068] （第 2 実施形態）

次に、第 2 実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板 100 の製造方法について説明する。

[0069] 図 9 に示されるように、第 2 実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板 100 の製造方法は、炭化珪素層の形成条件の決定工程（S3：図 9）と、第 4 炭化珪素層を形成する工程（S80：図 9）と、第 2 炭化珪素層を形成する工程（S90：図 9）を主に有している。炭化珪素層の形成条件の決定工程（S3：図 9）は、第 2 炭化珪素層 20 の形成条件の決定工程（S1：図 9）と、第 4 炭化珪素層 40 の形成条件の決定工程（S2：図 9）とを主に有している。

[0070] 第 2 炭化珪素層 20 の形成条件の決定工程（S1：図 9）は、第 1 炭化珪素層を形成する工程（S10：図 9）と、第 1 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S20：図 9）と、第 2 炭化珪素層の形成条件を算出する工程（S30：図 9）とを主に有している。第 4 炭化珪素層の形成条件の決定工程（S2：図 9）は、第 3 炭化珪素層を形成する工程（S50

: 図 9) と、第 3 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程 (S 60 : 図 9) と、第 4 炭化珪素層の形成条件を算出する工程 (S 70 : 図 9) とを主に有している。

[0071] なお、第 2 実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板 100 の製造方法において、第 2 炭化珪素層の形成条件の決定工程 (S 1 : 図 9) と第 4 炭化珪素層の形成条件の決定工程 (S 2 : 図 9) との順番は、特に限定されない。第 2 炭化珪素層の形成条件の決定工程 (S 1 : 図 9) は、第 4 炭化珪素層の形成条件の決定工程 (S 2 : 図 9) の前に行われてもよいし、第 4 炭化珪素層の形成条件の決定工程 (S 2 : 図 9) の後に行われてもよい。

[0072] まず、第 1 炭化珪素層を形成する工程 (S 10 : 図 9) が実施される。第 1 炭化珪素層を形成する工程 (S 10 : 図 9) は、上述の第 1 炭化珪素層を形成する工程 (S 10 : 図 2) と同様である。第 1 炭化珪素層を形成する工程 (S 10 : 図 9) においては、第 1 アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第 1 炭化珪素基板 110 上に第 1 炭化珪素層 10 が形成される。

[0073] 次に、第 1 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程 (S 20 : 図 9) が実施される。第 1 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程 (S 20 : 図 9) は、上述の第 1 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程 (S 20 : 図 2) と同様である。第 1 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程 (S 20 : 図 9) においては、第 1 炭化珪素層 10 の厚みおよび第 1 炭化珪素層 10 のキャリア濃度が測定される。

[0074] 次に、第 2 炭化珪素層の形成条件を算出する工程 (S 30 : 図 9) が実施される。第 2 炭化珪素層の形成条件を算出する工程 (S 30 : 図 9) は、上述の第 2 炭化珪素層の形成条件を算出する工程 (S 30 : 図 2) と同様である。第 2 炭化珪素層の形成条件を算出する工程 (S 30 : 図 9) においては、第 2 炭化珪素層 20 の形成条件が算出される。

[0075] 次に、第 3 炭化珪素層を形成する工程 (S 50 : 図 9) が実施される。具体的には、まず、第 3 炭化珪素基板 130 が準備される (図 10 参照)。第 3 炭化珪素基板 130 は、第 1 炭化珪素基板 110 および第 2 炭化珪素基板

120の各々とは異なる基板である。第3炭化珪素基板130は、第1炭化珪素基板110と実質的に同じ物理的および化学的特性を有している。図10に示されるように、第3炭化珪素基板130は、第9主面131と、第10主面132を有している。第10主面132は、第9主面131の反対側にある。第3炭化珪素基板130を構成する炭化珪素単結晶のポリタイプは、たとえば4H-SiCである。第3炭化珪素基板130の直径は、たとえば150mm以上である。

[0076] 第9主面131は、 $\{0001\}$ 面または $\{0001\}$ 面に対して 8° 以下の角度で傾斜した面である。具体的には、第9主面131は、たとえば (0001) 面または (0001) 面に対して 8° 以下の角度で傾斜した面である。第9主面131が $\{0001\}$ 面に対して傾斜している場合、傾斜方向（オフ方向）は、たとえば $\langle 11-20 \rangle$ 方向である。 $\{0001\}$ 面に対する傾斜角（オフ角）は、 1° 以上であってもよいし、 2° 以上であってもよい。オフ角は、 7° 以下であってもよいし、 6° 以下であってもよいし、 4° 以下であってもよい。第9主面131は、 $(000-1)$ 面または $(000-1)$ 面に対して 8° 以下の角度で傾斜した面であってもよい。

[0077] 次に、上述した製造装置200を用いて、第3炭化珪素基板130上に第3炭化珪素層30がエピタキシャル成長によって形成される。まず、第3炭化珪素基板130がサセプタ210に載置される。次に、反応室201の圧力が大気圧から 1×10^{-6} Pa程度に低減された後、第3炭化珪素基板130の昇温が開始される。昇温の途中において、第4ガス供給部234からキャリアガスである水素（ H_2 ）ガスが反応室201に導入される。水素ガスの流量は、第4ガス流量制御部244により調整される。

[0078] 反応室201の温度がたとえば 1600°C 程度になった後、反応室201に、原料ガス、ドーパントガスおよびキャリアガスが供給される。具体的には、シランとプロパンとアンモニア（第3アンモニアガス）と水素とを含む混合ガスが、反応室201に導入される。反応室201において、それぞれのガスが熱分解され、第3炭化珪素基板130上に第3炭化珪素層30が形

成される。混合ガスのC/S i比が、たとえば0.9程度となるように、シランおよびプロパンとの流量が調整される。反応室201の圧力は、たとえば6kPaである。

[0079] 第2ガス流量制御部242を用いて、反応室201に供給される第2ガス（シランガス）の流量は、たとえば46sccmとなるように調整される。第2ガス（シランガス）の流量は、たとえば30sccm以上60sccm以下であってもよい。

[0080] 同様に、第4ガス流量制御部244を用いて、反応室201に供給される第1ガス（プロパンガス）の流量は、たとえば14sccmとなるように調整される。第1ガス（プロパンガス）の流量は、たとえば9sccm以上18sccm以下であってもよい。

[0081] 同様に、第3ガス流量制御部243を用いて、反応室201に供給される第3ガス（アンモニアガス）の流量は、たとえば0.7sccmとなるよう調整される。第3ガス（アンモニアガス）の流量は、たとえば0.1sccm以上1.0sccm以下であってもよい。

[0082] 同様に、第4ガス流量制御部244を用いて、反応室201に供給される第4ガス（水素ガス）の流量は、たとえば120slmとなるように調整される。第4ガス（水素ガス）の流量は、たとえば100slm以上150slm以下であってもよい。

[0083] 以上のように、第3アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第3炭化珪素基板130上に第3炭化珪素層30が形成される（図11参照）。第3炭化珪素層30の厚み（第3厚みT3）は、たとえば3 μ m以上10 μ m以下である。第3厚みT3は、第1厚みT1と同じであってもよい。

[0084] 第3炭化珪素層30は、n型不純物としての窒素（N）を含んでいる。この場合、キャリアは電子である。第3炭化珪素層30のキャリア濃度は、たとえば $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。第3炭化珪素層30のキャリア濃度は、第1炭化珪素層10のキャリア濃度よりも高くてもよい。図11に示されるように、第3炭化珪素層30は、第11主面31と、第

1 2 主面 3 2 とを有している。第 1 2 主面 3 2 は、第 1 1 主面 3 1 の反対側にある。第 1 2 主面 3 2 は、第 9 主面 1 3 1 に接している。

[0085] 次に、第 3 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S 6 0 : 図 9）が実施される。第 3 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S 6 0 : 図 9）は、上述の第 1 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S 2 0 : 図 2）と同様である。第 3 炭化珪素層の厚みおよびキャリア濃度を測定する工程（S 6 0 : 図 9）においては、第 3 炭化珪素層 3 0 の厚みおよび第 3 炭化珪素層 3 0 のキャリア濃度が測定される。

[0086] 次に、第 4 炭化珪素層の形成条件を算出する工程（S 7 0 : 図 9）が実施される。

具体的には、第 4 炭化珪素層 4 0 の形成時間が算出される。第 3 炭化珪素層 3 0 を形成する工程における第 3 炭化珪素層 3 0 の形成時間を第 3 形成時間とし、第 3 炭化珪素層 3 0 の厚みを第 3 厚みとし、第 4 炭化珪素層 4 0 の目標厚みを第 4 厚みとした場合、第 4 炭化珪素層 4 0 の形成条件を算出する工程においては、第 4 炭化珪素層 4 0 の形成時間は、第 4 厚みを第 3 厚みで除した値に第 3 形成時間を掛けた値として算出される。一例として、第 3 形成時間が 4 分であり、第 3 厚みが $4 \mu\text{m}$ であり、第 4 厚みが $1 \mu\text{m}$ である場合、第 2 炭化珪素層 2 0 の形成時間は、 $(1 \mu\text{m} / 4 \mu\text{m}) \times 4 \text{分} = 1 \text{分}$ として算出される。

[0087] 第 3 厚みを第 3 形成時間で除した値は、第 3 炭化珪素層 3 0 の形成速度である。第 3 厚みを第 3 形成時間で除した値は、たとえば $5 \mu\text{m} / \text{時間}$ 以上 $30 \mu\text{m} / \text{時間}$ 以下である。第 3 厚みを第 3 形成時間で除した値は、たとえば $7 \mu\text{m} / \text{時間}$ 以上であってもよいし、 $10 \mu\text{m} / \text{時間}$ 以上であってもよい。第 3 厚みを第 3 形成時間で除した値は、たとえば $25 \mu\text{m} / \text{時間}$ 以下であってもよいし、 $20 \mu\text{m} / \text{時間}$ 以下であってもよい。

[0088] 同様に、第 4 炭化珪素層 4 0 を形成する工程における第 4 アンモニアガスの流量が算出される。第 3 炭化珪素層 3 0 を形成する工程における第 3 アンモニアガスの流量を第 3 流量とし、第 3 炭化珪素層 3 0 のキャリア濃度を第

3濃度とし、第4炭化珪素層40の目標キャリア濃度を第4濃度とした場合、第4炭化珪素層40の形成条件を算出する工程においては、第4炭化珪素層40を形成する工程における第4アンモニアガスの流量は、第4濃度を第3濃度で除した値に第3流量を掛けた値として算出される。一例として、第3流量が0.4 sccmであり、第3濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であり、第4濃度が $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である場合、第4炭化珪素層40を形成する工程における第4アンモニアガスの流量は、 $(2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} / 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}) \times 0.4 \text{ sccm} = 0.8 \text{ sccm}$ として算出される。

[0089] 第4濃度を第3濃度で除した値は、たとえば0.1以上5以下である。第4濃度を第3濃度で除した値は、たとえば0.2以上であってもよし、0.3以上であってもよい。第4濃度を第3濃度で除した値は、たとえば4以下であってもよし、3以下であってもよい。第3炭化珪素基板130のキャリア濃度を第3基板濃度とした場合、第3濃度は、たとえば第3基板濃度の半分よりも小さい。第3濃度は、たとえば第3基板濃度の $1/3$ よりも小さくてもよいし、 $1/10$ よりも小さくてもよい。以上のように、第4炭化珪素層40の形成条件が算出される。

[0090] 以上のように、第3炭化珪素層30を形成する工程における第3アンモニアガスの流量を第3流量とし、第3炭化珪素層30を形成する工程における第3炭化珪素層30の形成時間を第3形成時間とし、第3炭化珪素層30の厚みを第3厚みとし、第3炭化珪素層30のキャリア濃度を第3濃度とし、第4炭化珪素層40の目標厚みを第4厚みとし、第4炭化珪素層40の目標キャリア濃度を第4濃度とした場合、第4炭化珪素層40の形成条件を算出する工程においては、第4炭化珪素層40の第4形成時間は、第4厚みを第3厚みで除した値に第3形成時間を掛けた値として算出され、かつ、第4炭化珪素層40を形成する工程における第4アンモニアガスの第4流量は、第4濃度を第3濃度で除した値に第3流量を掛けた値として算出される。

[0091] 次に、第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）が実施される。具体的には、まず、第2炭化珪素基板120が準備される（図12参照）。第

第2炭化珪素基板120は、第3炭化珪素基板130とは異なる基板である。第2炭化珪素基板120は、第3炭化珪素基板130と実質的に同じ物理的および化学的特性を有している。図12に示されるように、第2炭化珪素基板120は、第5主面121と、第6主面122を有している。第6主面122は、第5主面121の反対側にある。第2炭化珪素基板120を構成する炭化珪素単結晶のポリタイプは、たとえば4H-SiCである。第2炭化珪素基板120の直径は、たとえば150mm以上である。

[0092] 次に、上述した製造装置200を用いて、第2炭化珪素基板120上に第4炭化珪素層40がエピタキシャル成長によって形成される。まず、第2炭化珪素基板120がサセプタ210に載置される。次に、反応室201の圧力が大気圧から 1×10^{-6} Pa程度に低減された後、第2炭化珪素基板120の昇温が開始される。昇温の途中において、第4ガス供給部234からキャリアガスである水素(H_2)ガスが反応室201に導入される。水素ガスの流量は、第4ガス流量制御部244により調整される。

[0093] 反応室201の温度がたとえば1600℃程度になった後、反応室201に、原料ガス、ドーパントガスおよびキャリアガスが供給される。具体的には、シランとプロパンとアンモニア(第4アンモニアガス)と水素とを含む混合ガスが、反応室201に導入される。反応室201において、それぞれのガスが熱分解され、第2炭化珪素基板120上に第4炭化珪素層40が形成される(図13参照)。混合ガスのC/Si比が、たとえば0.9程度となるように、シランおよびプロパンとの流量が調整される。反応室201の圧力は、たとえば6kPaである。

[0094] 第4炭化珪素層を形成する工程(S80:図9)における反応室201の温度は、第3炭化珪素層を形成する工程(S50:図9)における反応室201の温度と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第4炭化珪素層を形成する工程(S80:図9)における反応室201の温度(℃)は、第3炭化珪素層を形成する工程(S50:図9)における反応室201の温度(℃) $\pm 0.2\%$ 以内である。

- [0095] 第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）における反応室201の圧力は、第3炭化珪素層を形成する工程（S50：図9）における反応室201の圧力と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）における反応室201の圧力（kPa）は、第3炭化珪素層を形成する工程（S50：図9）における反応室201の圧力（kPa） $\pm 2\%$ 以内である。
- [0096] 第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）における第2ガス（シランガス）の流量は、第3炭化珪素層を形成する工程（S50：図9）における第2ガス（シランガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）における第2ガス（シランガス）の流量（sccm）は、第3炭化珪素層を形成する工程（S50：図9）における第2ガス（シランガス）の流量（sccm） $\pm 0.5\%$ 以内である。
- [0097] 第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）における第1ガス（プロパンガス）の流量は、第3炭化珪素層を形成する工程（S50：図9）における第1ガス（プロパンガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）における第1ガス（プロパンガス）の流量（sccm）は、第3炭化珪素層を形成する工程（S50：図9）における第1ガス（プロパンガス）の流量（sccm） $\pm 0.5\%$ 以内である。
- [0098] 第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）における第4ガス（水素ガス）の流量は、第3炭化珪素層を形成する工程（S50：図9）における第4ガス（水素ガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。具体的には、第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）における第4ガス（水素ガス）の流量（slm）は、第3炭化珪素層を形成する工程（S50：図9）における第4ガス（水素ガス）の流量（slm） $\pm 0.5\%$ 以内である。
- [0099] 以上のように、第4アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第2炭

化珪素基板 120 上に第 4 炭化珪素層 40 が形成される（図 13 参照）。第 4 炭化珪素層 40 の厚み（第 4 厚み T4）は、たとえば $0.5\ \mu\text{m}$ 以上 $3\ \mu\text{m}$ 以下である。第 4 厚み T4 は、たとえば $0.6\ \mu\text{m}$ 以上であってもよいし、 $0.7\ \mu\text{m}$ 以上であってもよい。第 4 厚み T4 は、たとえば $2.8\ \mu\text{m}$ 以下であってもよいし、 $2.6\ \mu\text{m}$ 以下であってもよい。第 3 炭化珪素層を形成する工程（S50：図 9）と、第 4 炭化珪素層を形成する工程（S80：図 9）とは、同じ装置で行われる。

[0100] 第 4 炭化珪素層 40 は、n 型不純物としての窒素（N）を含んでいる。この場合、キャリアは電子である。第 4 炭化珪素層 40 のキャリア濃度は、たとえば $1 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 以下である。図 13 に示されるように、第 4 炭化珪素層 40 は、第 13 主面 41 と、第 14 主面 42 とを有している。第 14 主面 42 は、第 13 主面 41 の反対側にある。第 14 主面 42 は、第 5 主面 121 に接している。

[0101] 次に、第 2 炭化珪素層を形成する工程（S90：図 9）が実施される。第 2 炭化珪素層を形成する工程（S90：図 9）においては、第 4 炭化珪素層 40 上に第 2 炭化珪素層 20 がエピタキシャル成長によって形成される（図 14 参照）。具体的には、反応室 201 に、原料ガス、ドーパントガスおよびキャリアガスが供給される。具体的には、シランとプロパンとアンモニア（第 4 アンモニアガス）と水素とを含む混合ガスが、反応室 201 に導入される。反応室 201 において、それぞれのガスが熱分解され、第 4 炭化珪素層 40 上に第 2 炭化珪素層 20 が形成される。反応室 201 の温度は、たとえば 1600°C である。混合ガスの C/Si 比が、たとえば 1.0 程度となるように、シランおよびプロパンとの流量が調整される。反応室 201 の圧力は、たとえば 6 kPa である。

[0102] 第 2 炭化珪素層を形成する工程（S90：図 9）における反応室 201 の温度は、第 1 炭化珪素層を形成する工程（S10：図 9）における反応室 201 の温度と実質的に同じになるように調整されている。第 2 炭化珪素層を形成する工程（S90：図 9）における反応室 201 の圧力は、第 1 炭化珪

素層を形成する工程（S10：図9）における反応室201の圧力と実質的に同じになるように調整されている。

[0103] 第2炭化珪素層を形成する工程（S90：図9）における第2ガス（シランガス）の流量は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図9）における第2ガス（シランガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。第2炭化珪素層を形成する工程（S90：図9）における第1ガス（プロパンガス）の流量は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図9）における第1ガス（プロパンガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。第2炭化珪素層を形成する工程（S90：図9）における第4ガス（水素ガス）の流量は、第1炭化珪素層を形成する工程（S10：図9）における第4ガス（水素ガス）の流量と実質的に同じになるように調整されている。

[0104] 以上のように、第2炭化珪素層20は、第4炭化珪素層40上に形成される（図14参照）。第4炭化珪素層を形成する工程（S80：図9）は、第2炭化珪素層を形成する工程（S90：図9）の前に実施される。第2炭化珪素層20の厚み（第2厚みT2）は、たとえば $10\mu\text{m}$ である。第2炭化珪素層20は、n型不純物としての窒素（N）を含んでいる。第2炭化珪素層20のキャリア濃度は、たとえば $1\times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 以上 $1\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 以下である。図14に示されるように、第2炭化珪素層20は、第7主面21と、第8主面22とを有している。第8主面22は、第7主面21の反対側にある。第8主面22は、第13主面41に接している。以上のように、第2炭化珪素基板120と、第4炭化珪素層40と、第2炭化珪素層20とを有する炭化珪素エピタキシャル基板100が製造される。

[0105] （第3実施形態）

次に、第3実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法について説明する。

[0106] 第1実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法および第2実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法で説明し

たように、炭化珪素層の形成条件を決定する工程に基づいて、炭化珪素層の形成条件を算出し、当該算出結果に基づいて、炭化珪素層を実際に形成することを繰り返すことによって、3層以上の炭化珪素層を有する炭化珪素エピタキシャル基板100を製造することができる。

[0107] 図15に示されるように、第3実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法によって製造された炭化珪素エピタキシャル基板100は、第2炭化珪素基板120と、第4炭化珪素層40と、第5炭化珪素層50と、第2炭化珪素層20とを有している。第4炭化珪素層40は、第2炭化珪素基板120上に設けられている。第5炭化珪素層50は、第4炭化珪素層40上に設けられている。第2炭化珪素層20は、第5炭化珪素層50上に設けられている。

[0108] 第5炭化珪素層50は、n型不純物としての窒素(N)を含んでいる。この場合、キャリアは電子である。第5炭化珪素層50のキャリア濃度は、たとえば $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。図15に示されるように、第5炭化珪素層50は、第15主面51と、第16主面52とを有している。第16主面52は、第15主面51の反対側にある。第15主面51は、第8主面22に接している。第16主面52は、第13主面41に接している。

[0109] 次に、本実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板100の製造条件の算出方法および炭化珪素エピタキシャル基板100の製造方法の作用効果について説明する。

[0110] 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する場合、一定積算膜厚ごとに成長炉のメンテナンスを行う必要がある。成長炉(製造装置200)のメンテナンスにおいては、炉内部材に堆積した炭化珪素が除去される。その際、炉内部材が解体される。炉内部材を清掃した後、炉内部材が組み立てられる。そのため、メンテナンスの前後において、炉内の環境が微妙に変動する可能性がある。

[0111] 炭化珪素層の成長速度および炭化珪素層に対するドーパントガスの導入効

率は、炉内の温度によって変化する。そのため、炉内の温度は、メンテナンスの前後において出来る限り同じにする。しかしながら、メンテナンス前後における炉内の温度をほぼ同じにしたとしても、メンテナンス後の炉内環境をメンテナンス前の炉内環境と全く同じにすることは困難である。そのため、メンテナンス後に、メンテナンス前と全く同じ設定条件を用いて炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成した場合であっても、メンテナンス後における炭化珪素層の厚みおよび炭化珪素層のキャリア濃度は、メンテナンス前における炭化珪素層の厚みおよび炭化珪素層のキャリア濃度と異なる場合がある。従って、メンテナンス後にメンテナンス前と同様の炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成するため、メンテナンス後には、炭化珪素層の形成条件の調整（条件出し）を行う必要がある。

[0112] 一般的には、ドーパントガスとして窒素ガスを用いて炭化珪素層が形成される。成長炉に導入する窒素ガスの流量を増加させると、炭化珪素層のキャリア濃度は高くなる。しかしながら、窒素ガスの流量が増加すると、炭化珪素層に対する窒素ガスの導入効率は低下する。つまり、炭化珪素層のキャリア濃度は、窒素ガスの流量に完全に比例する訳ではない（線形性が低い）。そのため、窒素ガスの流量を変化させた場合においては、キャリア濃度を精度良く予測することが困難である。

[0113] また、窒素ガスは化学的に非常に安定であるため、熱によって分解されづらい。完全に分解されなかった窒素は、時間の経過に従って成長炉内に蓄積される。そのため、エピタキシャル成長初期におけるキャリア濃度よりも、エピタキシャル成長後期におけるキャリア濃度が高くなる傾向がある（メモリ効果）。よって、炭化珪素層の厚みを変化させた場合においては、キャリア濃度を精度良く予測することが困難である。以上のように、窒素ガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する場合には、キャリア濃度を精度良く予測することが困難である。

[0114] 本開示に係る炭化珪素エピタキシャル基板 100 の製造条件の算出方法および炭化珪素エピタキシャル基板 100 の製造方法によれば、第 1 アンモニ

アガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素基板 1 1 0 上に第 1 炭化珪素層 1 0 が形成される。第 2 炭化珪素層 2 0 を形成する工程における第 2 アンモニアガスの流量は、第 2 濃度を第 1 濃度で除した値に第 1 流量を掛けた値として算出される。

[0115] 窒素ガスと比較して、アンモニアガスは、ドーパント流量とキャリア濃度との線形性が高い。そのため、アンモニアガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する場合には、キャリア濃度がドーパント流量に比例するという簡便な計算式に基づいて、キャリア濃度を精度良く調整することができる。従って、アンモニアガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する場合には、窒素ガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する場合と比較して、条件出し工程を大幅に簡略化しつつ、炭化珪素層のキャリア濃度の精度を向上することができる。

[0116] またアンモニアガスは、メモリ効果の影響がほとんど無視できる程小さい。そのため、アンモニアガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する場合には、エピタキシャル成長時間によらず、炭化珪素層のキャリア濃度は一定である。結果として、炭化珪素層のキャリア濃度の精度を向上することができる。

[0117] 本実施形態に係る炭化珪素エピタキシャル基板 1 0 0 の製造条件の算出方法および炭化珪素エピタキシャル基板 1 0 0 の製造方法によれば、炭化珪素層のキャリア濃度は、炭化珪素基板のキャリア濃度の半分よりも小さい。F T - I R は、炭化珪素基板のキャリア濃度と炭化珪素層のキャリア濃度との差に起因する屈折率差によって生じる赤外光の干渉スペクトルを利用して、炭化珪素層の厚みを算出している。そのため、F T - I R を使用して炭化珪素層の厚みを測定する場合には、炭化珪素層のキャリア濃度は、炭化珪素基板のキャリア濃度の半分よりも小さいことが望ましい。

実施例 1

[0118] (サンプル準備)

まず、比較例として、窒素ガスを用いて炭化珪素基板上に炭化珪素層をエピタキシャル成長によって成長させた。具体的には、シランガスとプロパンガスと窒素ガスとを用いて、炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成した。より具体的には、シランガスの流量は、 120 sccm とした。プロパンガスの流量は、 40 sccm とした。窒素ガスの流量は、 27.0 sccm とした。水素ガスの流量は、 130 slm とした。エピタキシャル成長時間が異なる3種類のサンプルを準備した。エピタキシャル成長時間は、10分、75分および100分とした。

[0119] 次に、実施例として、アンモニアガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素基板上に炭化珪素層をエピタキシャル成長によって成長させた。具体的には、シランガスとプロパンガスとアンモニアガスとを用いて、炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成した。より具体的には、シランガスの流量は、 120 sccm とした。プロパンガスの流量は、 40 sccm とした。アンモニアガスの流量は、 0.067 sccm とした。水素ガスの流量は、 130 slm とした。エピタキシャル成長時間が異なる3種類のサンプルを準備した。エピタキシャル成長時間は、10分、75分および100分とした。

[0120] (キャリア濃度測定)

次に、炭化珪素層のキャリア濃度が水銀プローブ方式のC-V測定装置により測定された。炭化珪素層のキャリア濃度の測定条件は、上述の通りである。

[0121] (測定結果)

図16に示されるように、比較例のサンプルに係る炭化珪素層のキャリア濃度は、 $3.0 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ (エピタキシャル成長時間10分)、 $3.1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ (エピタキシャル成長時間75分) および $3.2 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ (エピタキシャル成長時間150分)であった。一方、実施例のサンプルに係る炭化珪素層のキャリア濃度は、 $3.0 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ (エピタキシャル成長時間10分)、 $3.0 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ (エピタキシャル成長時間75分) およ

び3. $0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (エピタキシャル成長時間150分)であった。

- [0122] 図16に示されるように、窒素ガスを使用して形成した炭化珪素層の場合には、エピタキシャル成長時間が長くなるに従って、炭化珪素層のキャリア濃度が高くなるという傾向がある(メモリ効果)。一方、アンモニアガスを使用して形成した炭化珪素層の場合には、エピタキシャル成長時間が長くなっても、炭化珪素層のキャリア濃度は一定であり、ほとんど変化しない。つまり、窒素ガスの場合とは異なり、アンモニアガスの場合には、炭化珪素層のキャリア濃度はエピタキシャル成長時間によらず一定である。そのため、炭化珪素層の厚みが変わった場合であっても、炭化珪素層のキャリア濃度を精度良く調整することができる。

実施例 2

- [0123] (サンプル準備)

まず、比較例として、窒素ガスを用いて炭化珪素基板上に炭化珪素層をエピタキシャル成長によって成長させた。具体的には、シランガスとプロパンガスと窒素ガスとを用いて、炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成した。より具体的には、シランガスの流量は、 120 sccm とした。プロパンガスの流量は、 40 sccm とした。水素ガスの流量は、 130 slm とした。窒素ガスの流量が異なる3種類のサンプルを準備した。窒素ガスの流量は、 28.0 sccm 、 50.0 sccm および 70.0 sccm とした。

- [0124] 次に、実施例として、アンモニアガスをドーパントガスとして用いて炭化珪素基板110上に炭化珪素層をエピタキシャル成長によって成長させた。具体的には、シランガスとプロパンガスとアンモニアガスとを用いて、炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成した。より具体的には、シランガスの流量は、 120 sccm とした。プロパンガスの流量は、 40 sccm とした。水素ガスの流量は、 130 slm とした。アンモニアガスの流量が異なる3種類のサンプルを準備した。アンモニアガスの流量は、 0.065 sccm 、 0.125 sccm および 0.184 sccm とした。

[0125] (キャリア濃度測定)

次に、炭化珪素層のキャリア濃度が水銀プローブ方式のC-V測定装置により測定された。炭化珪素層のキャリア濃度の測定条件は、上述の通りである。

[0126] (測定結果)

図17に示されるように、比較例のサンプルに係る炭化珪素層のキャリア濃度は、 $3.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (窒素ガス流量28.0 sccm)、 $5.4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (窒素ガス流量50.0 sccm) および $7.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (窒素ガス流量70.0 sccm) であった。

[0127] 図18に示されるように、実施例のサンプルに係る炭化珪素層のキャリア濃度は、 $2.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (アンモニアガス流量0.065 sccm)、 $5.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (アンモニアガス流量0.125 sccm) および $8.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (アンモニアガス流量0.184 sccm) であった。

[0128] 図17に示されるように、窒素ガスを使用して形成した炭化珪素層の場合には、ドーピングガスの流量に対する炭化珪素層のキャリア濃度は、線形近似から少しずれていることが確認された(線形性が低い)。具体的には、ドーピングガスの流量が多くなるに従って、線形近似直線から離れる傾向がある。そのため、窒素ガスを用いた場合には、炭化珪素層のキャリア濃度とドーピングガスの流量に比例するという単純な計算式に基づいて、炭化珪素層のキャリア濃度を調整することができない。

[0129] 一方、図18に示されるように、アンモニアガスを使用して形成した炭化珪素層の場合には、ドーピングガスの流量に対する炭化珪素層のキャリア濃度は、線形近似にほぼ一致している(線形性が高い)。そのため、窒素ガスを用いた場合とは異なり、アンモニアガスを用いた場合には、炭化珪素層のキャリア濃度はドーピングガスの流量に比例するという単純な計算式に基づいて、炭化珪素層のキャリア濃度を精度良く調整することができる。

[0130] 今回開示された実施形態および実施例はすべての点で例示であって、制限的なものではないと考えられるべきである。本発明の範囲は上記した実施形

態ではなく請求の範囲によって示され、請求の範囲と均等の意味、および範囲内でのすべての変更が含まれることが意図される。

符号の説明

[0131] 1 オリエンテーションフラット、2 円弧状部、3 直径、10 第1炭化珪素層、11 第3主面、12 第4主面、20 第2炭化珪素層、21 第7主面、22 第8主面、30 第3炭化珪素層、31 第11主面、32 第12主面、40 第4炭化珪素層、41 第13主面、42 第14主面、50 第5炭化珪素層、51 第15主面、52 第16主面、100 炭化珪素エピタキシャル基板、101 第1方向、102 第2方向、110 炭化珪素基板（第1炭化珪素基板）、111 第1主面、112 第2主面、113 外縁部、120 第2炭化珪素基板、121 第5主面、122 第6主面、130 第3炭化珪素基板、131 第9主面、132 第10主面、200 製造装置、201 反応室、202 ステージ、203 発熱体、204 石英管、205 内壁面、207 ガス導入口、208 ガス排気口、209 回転軸、210 サセプタ、231 第1ガス供給部、232 第2ガス供給部、233 第3ガス供給部、234 第4ガス供給部、235 ガス供給部、241 第1ガス流量制御部、242 第2ガス流量制御部、243 第3ガス流量制御部、244 第4ガス流量制御部、245 制御部、T1 第1厚み、T2 第2厚み、T3 第3厚み、T4 第4厚み。

請求の範囲

[請求項1]

第1 アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第1 炭化珪素基板上に第1 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程と、

前記第1 炭化珪素層の厚みおよび前記第1 炭化珪素層のキャリア濃度を測定する工程と、

第2 炭化珪素層の形成条件を算出する工程と、

第2 アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第2 炭化珪素基板上に前記第2 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程とを備え、

前記第1 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における前記第1 アンモニアガスの流量を第1 流量とし、前記第1 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における前記第1 炭化珪素層の形成時間を第1 形成時間とし、前記第1 炭化珪素層の厚みを第1 厚みとし、前記第1 炭化珪素層のキャリア濃度を第1 濃度とし、前記第2 炭化珪素層の目標厚みを第2 厚みとし、前記第2 炭化珪素層の目標キャリア濃度を第2 濃度とした場合、

前記第2 炭化珪素層の形成条件を算出する工程においては、前記第2 炭化珪素層の第2 形成時間は、前記第2 厚みを前記第1 厚みで除した値に前記第1 形成時間を掛けた値として算出され、かつ、前記第2 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における前記第2 アンモニアガスの第2 流量は、前記第2 濃度を前記第1 濃度で除した値に前記第1 流量を掛けた値として算出され、

前記第2 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程においては、前記第2 形成時間および前記第2 流量を用いて、前記第2 炭化珪素層が形成され、

前記第1 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程と、前記第2 炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程とは、同じ装置で行われる、炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法。

- [請求項2] 前記第2濃度を前記第1濃度で除した値は、0.1以上5以下である、請求項1に記載の炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法。
- [請求項3] 前記第1厚みを前記第1形成時間で除した値は、 $5\mu\text{m}/\text{時間}$ 以上 $30\mu\text{m}/\text{時間}$ 以下である、請求項1または請求項2に記載の炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法。
- [請求項4] 前記第1炭化珪素基板のキャリア濃度を第1基板濃度とした場合、前記第1濃度は、前記第1基板濃度の半分よりも小さい、請求項1～請求項3のいずれか1項に記載の炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法。
- [請求項5] 第3アンモニアガスをドーパントガスとして用いて第3炭化珪素基板上に第3炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程と、
前記第3炭化珪素層の厚みおよび前記第3炭化珪素層のキャリア濃度を測定する工程と、
第4炭化珪素層の形成条件を算出する工程と、
前記第2炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程前に、第4アンモニアガスをドーパントガスとして用いて前記第2炭化珪素基板上に前記第4炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程とを備え、
前記第2炭化珪素層は、前記第4炭化珪素層上に形成され、
前記第3炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における前記第3アンモニアガスの流量を第3流量とし、前記第3炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における前記第3炭化珪素層の形成時間を第3形成時間とし、前記第3炭化珪素層の厚みを第3厚みとし、前記第3炭化珪素層のキャリア濃度を第3濃度とし、前記第4炭化珪素層の目標厚みを第4厚みとし、前記第4炭化珪素層の目標キャリア濃度を第4濃度とした場合、
前記第4炭化珪素層の形成条件を算出する工程においては、前記第4炭化珪素層の第4形成時間は、前記第4厚みを前記第3厚みで除し

た値に前記第3形成時間を掛けた値として算出され、かつ、前記第4炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程における前記第4アンモニアガスの第4流量は、前記第4濃度を前記第3濃度で除した値に前記第3流量を掛けた値として算出され、

前記第4炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程においては、前記第4形成時間および前記第4流量を用いて、前記第4炭化珪素層が形成され、

前記第3炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程と、前記第4炭化珪素層をエピタキシャル成長により形成する工程とは、同じ装置で行われる、請求項1～請求項4のいずれか1項に記載の炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法。

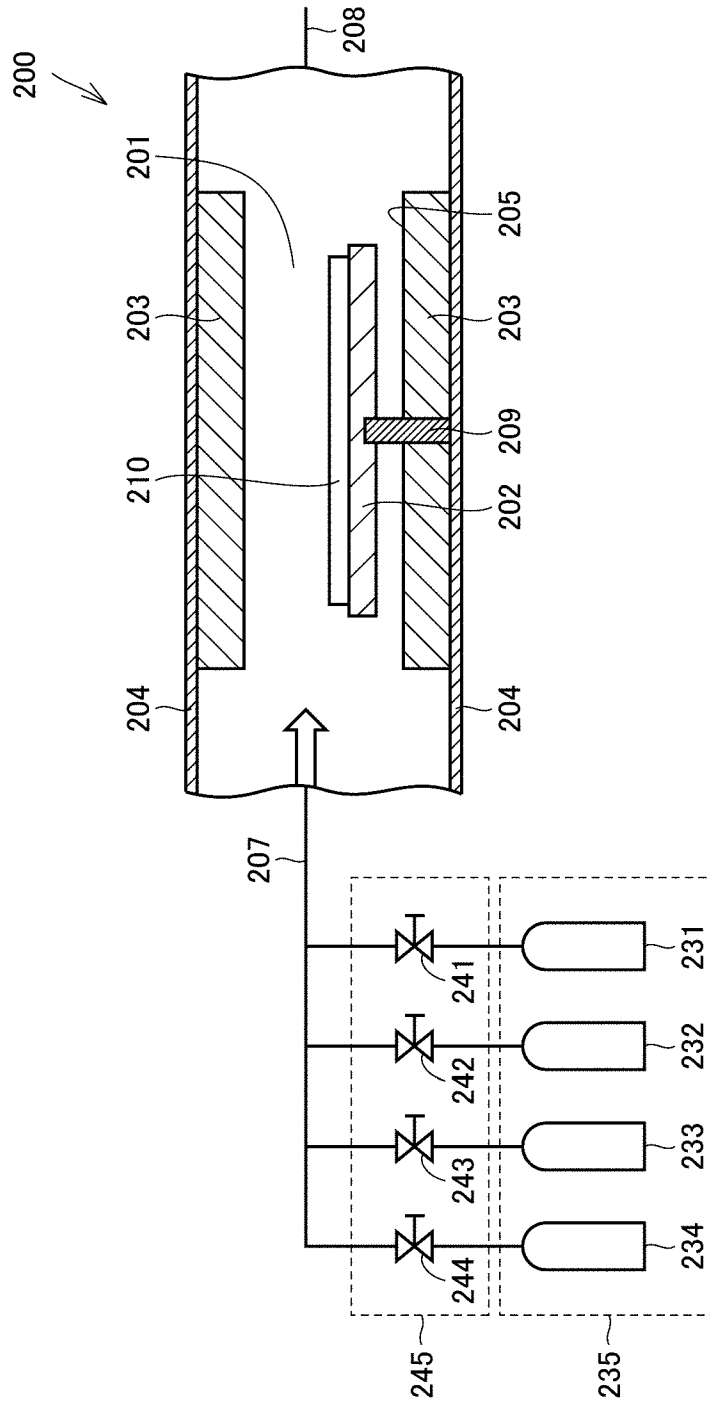
[請求項6] 前記第4濃度を前記第3濃度で除した値は、0.1以上5以下である、請求項5に記載の炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法。

[請求項7] 前記第3厚みを前記第3形成時間で除した値は、 $5\mu\text{m}/\text{時間}$ 以上 $30\mu\text{m}/\text{時間}$ 以下である、請求項5または請求項6に記載の炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法。

[請求項8] 前記第3炭化珪素基板のキャリア濃度を第3基板濃度とした場合、前記第3濃度は、前記第3基板濃度の半分よりも小さい、請求項5～請求項7のいずれか1項に記載の炭化珪素エピタキシャル基板の製造方法。

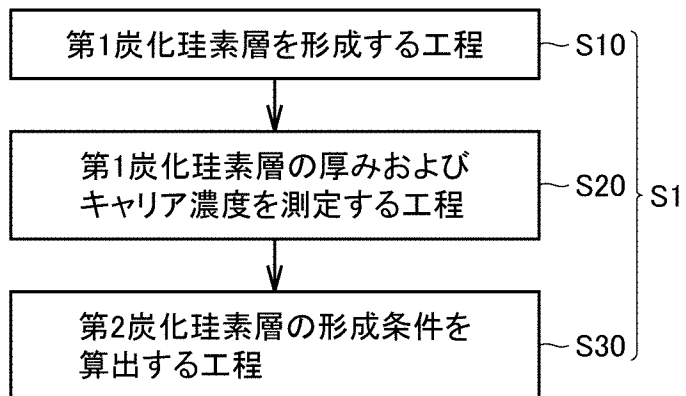
[図1]

FIG.1



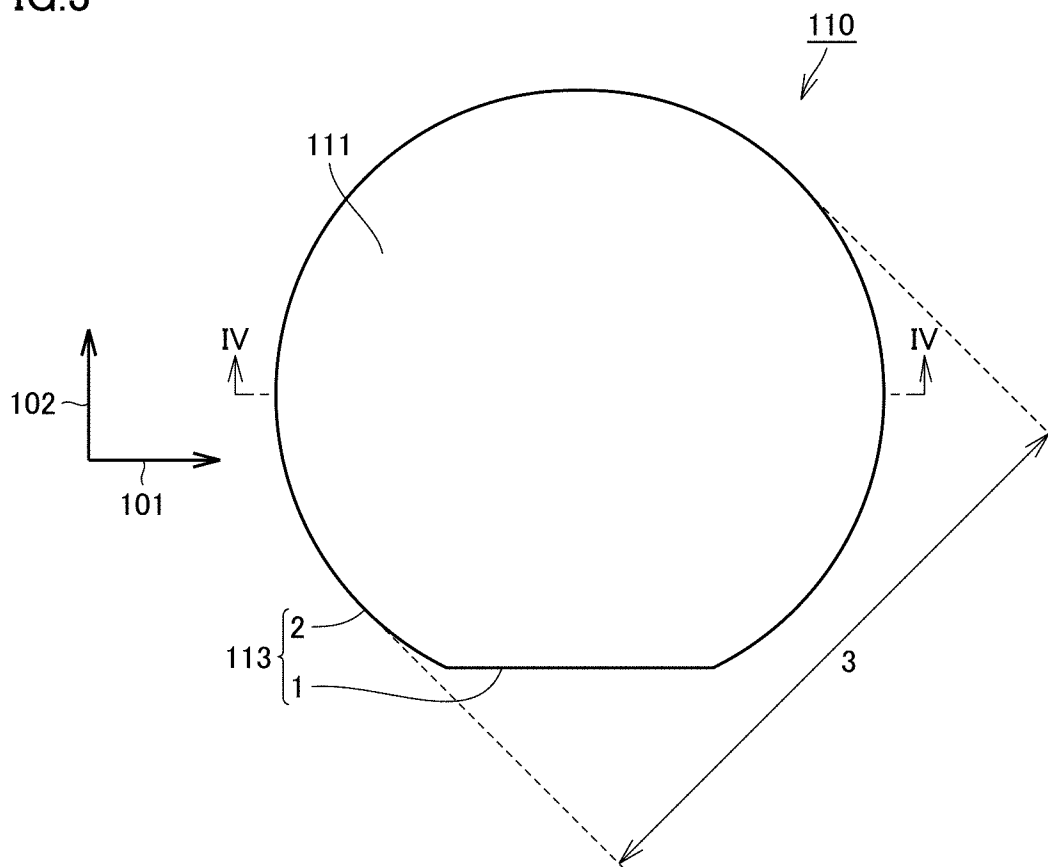
[図2]

FIG.2



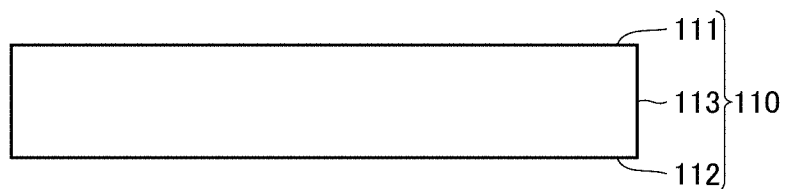
[図3]

FIG.3



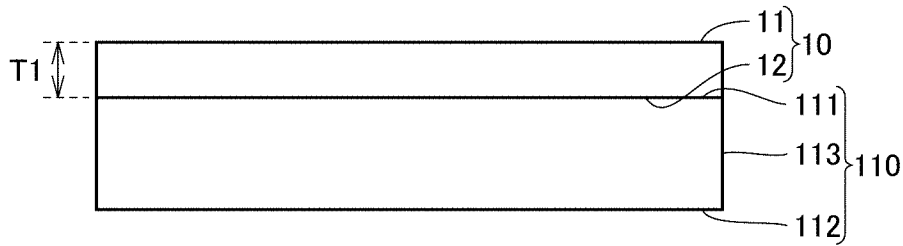
[図4]

FIG.4



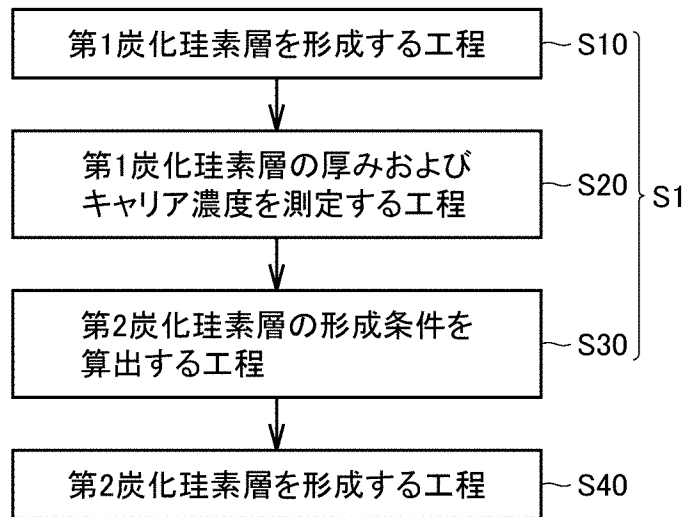
[図5]

FIG.5



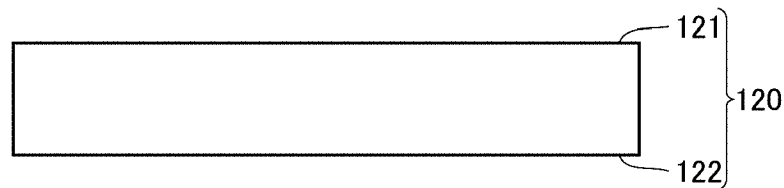
[図6]

FIG.6



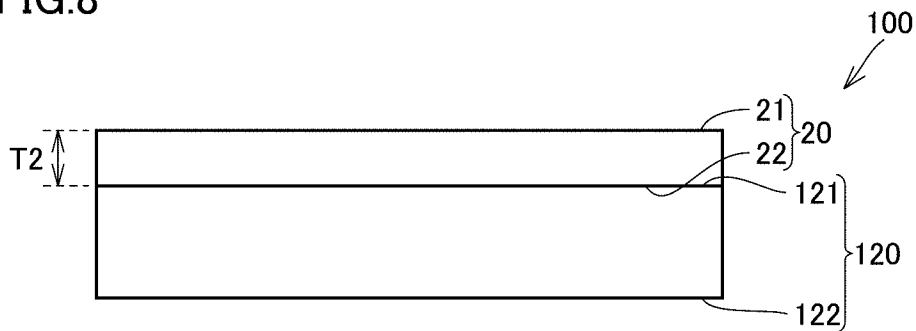
[図7]

FIG.7



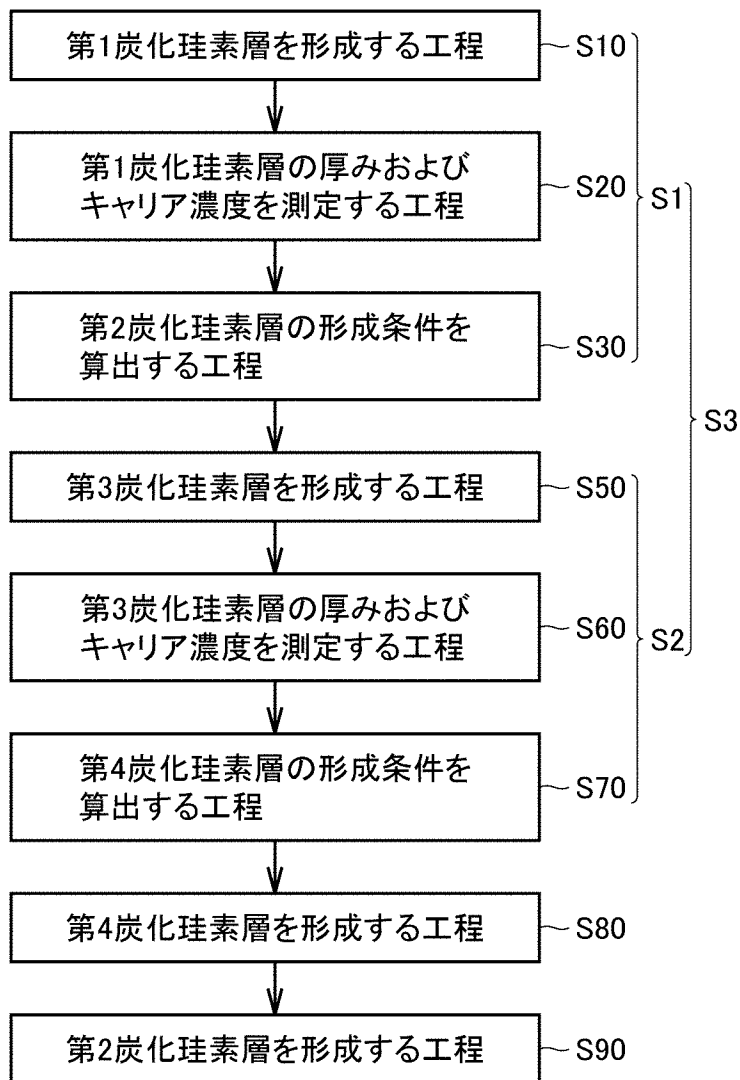
[図8]

FIG.8



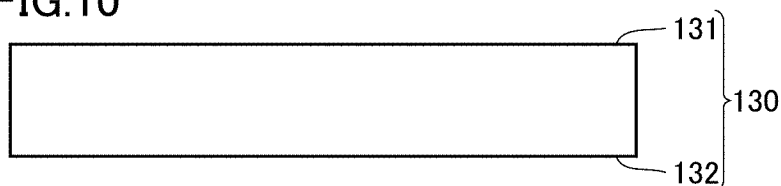
[図9]

FIG.9



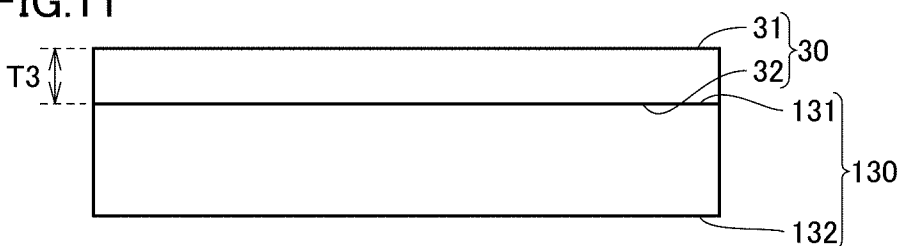
[図10]

FIG.10



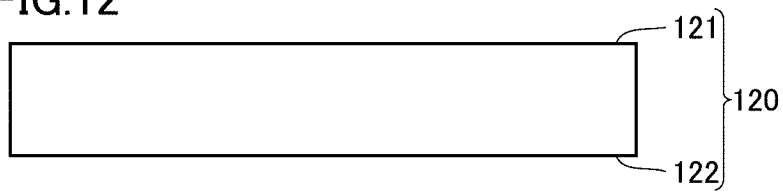
[図11]

FIG.11



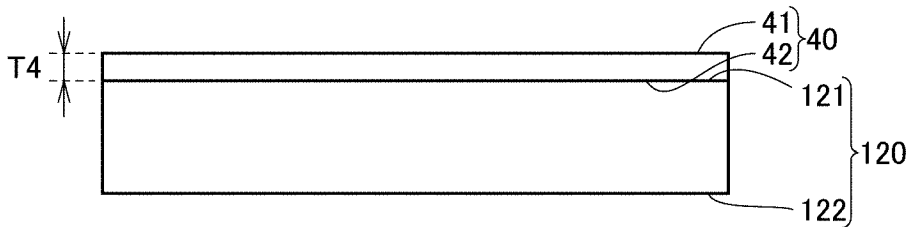
[図12]

FIG.12



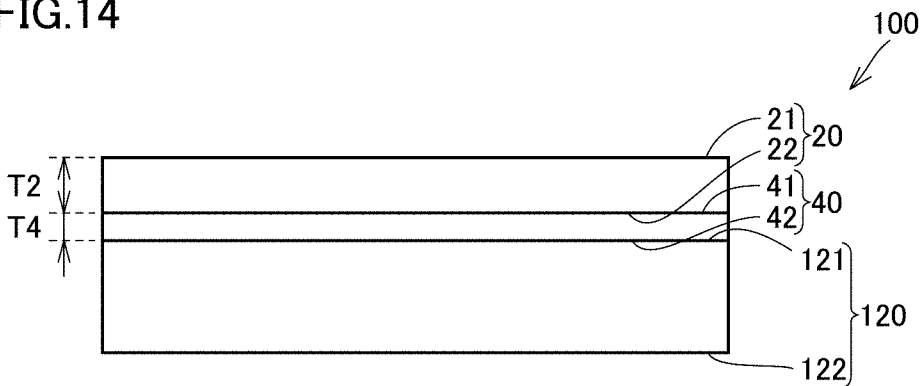
[図13]

FIG.13



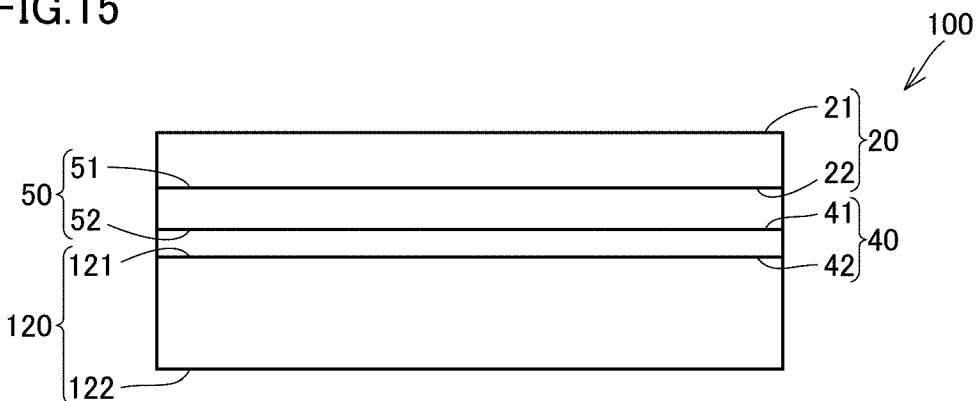
[図14]

FIG.14



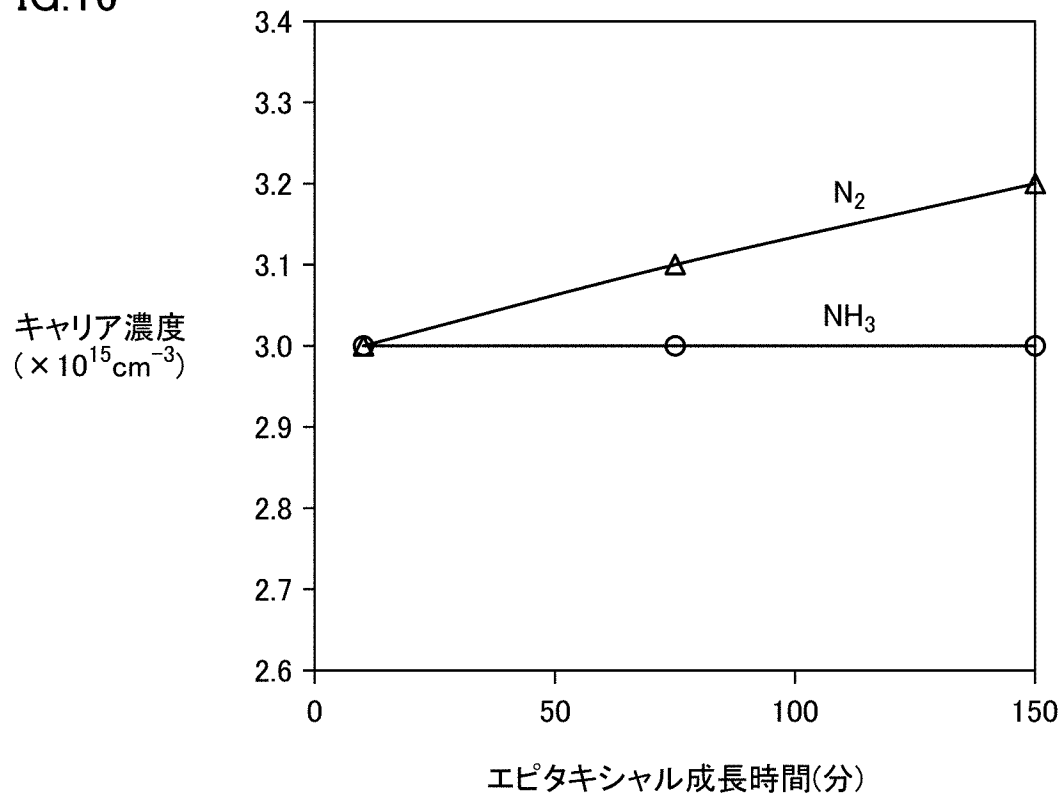
[図15]

FIG.15



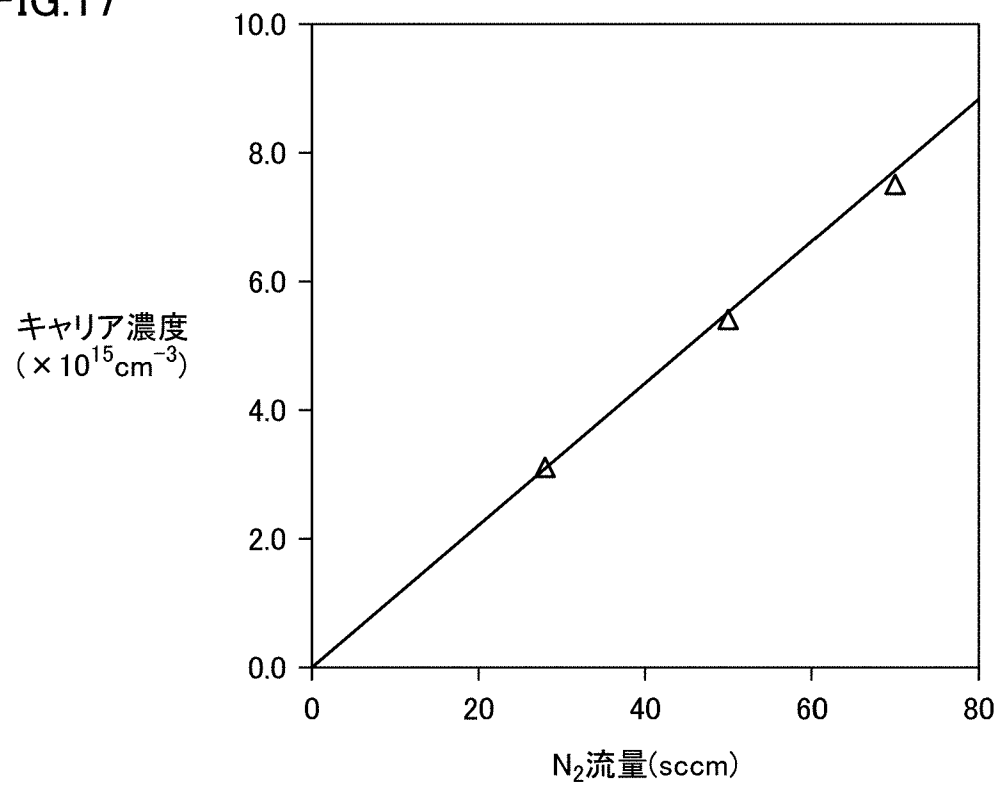
[図16]

FIG.16



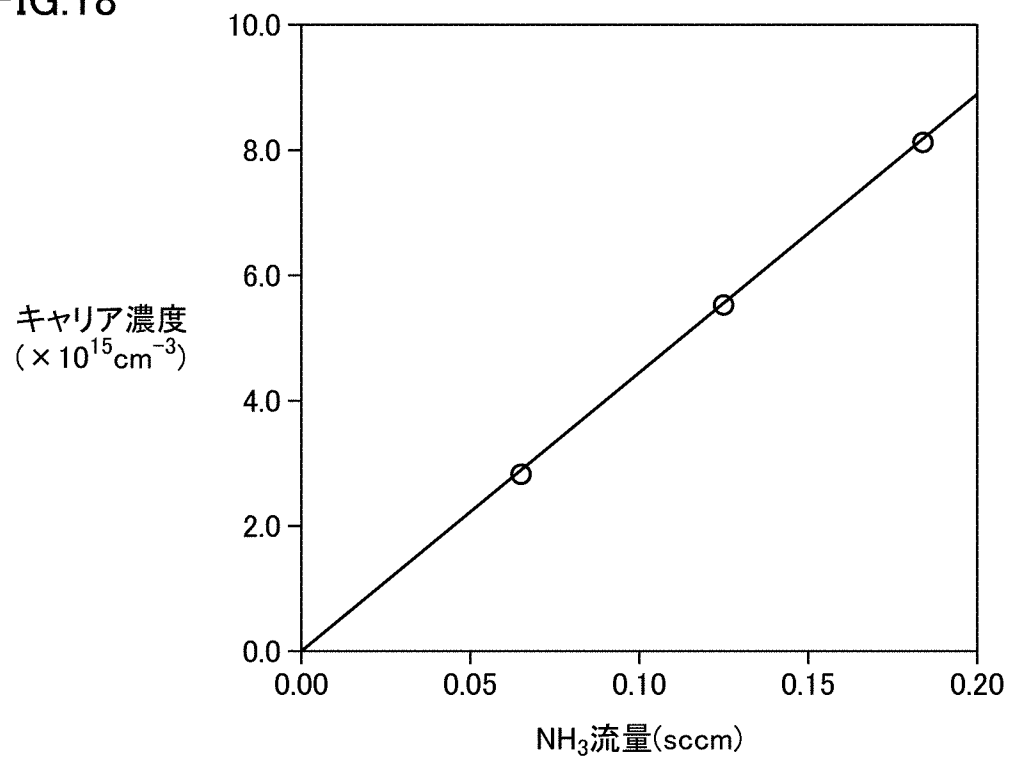
[図17]

FIG.17



[図18]

FIG.18



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/031349

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int. Cl. H01L21/205(2006.01)i, C23C16/42(2006.01)i, C23C16/52(2006.01)i, C30B25/16(2006.01)i, C30B29/36(2006.01)i, H01L21/66(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. H01L21/205, C23C16/42, C23C16/52, C30B25/16, C30B29/36, H01L21/66

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)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2018-022853 A (FUJI ELECTRIC CO., LTD.) 08 February 2018, paragraphs [0029]-[0043], fig. 1-4 & US 2018/0040480 A1, paragraphs [0019]-[0035]	1-8
Y	JP 2014-154666 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) 25 August 2014, paragraphs [0019]-[0032], [0039], fig. 1, 2 & US 2015/0221498 A1, paragraphs [0026]-[0039], [0046] & WO 2014/122854 A1 & EP 2955743 A1 & CN 104885197 A & KR 10-2015-0114461 A	1-8
Y	WO 2018/078944 A1 (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) 03 May 2018, paragraph [0045], fig. 9 (Family: none)	1-8



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
25.10.2019

Date of mailing of the international search report
05.11.2019

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/JP2019/031349
--

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2010-037643 A (CANON INC.) 18 February 2010, paragraphs [0027]-[0034], fig. 3 (Family: none)	1-8
Y	JP 2015-042602 A (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) 05 March 2015, paragraphs [0015], [0036] (Family: none)	3-8
Y	JP 2017-152487 A (DENSO CORP., TOYOTA MOTOR CORP.) 31 August 2017, paragraph [0018] & US 2019/0013392 A1, paragraph [0026] & WO 2017/145593 A1	4-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L21/205(2006.01)i, C23C16/42(2006.01)i, C23C16/52(2006.01)i, C30B25/16(2006.01)i, C30B29/36(2006.01)i, H01L21/66(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 (I P C))

Int.Cl. H01L21/205, C23C16/42, C23C16/52, C30B25/16, C30B29/36, H01L21/66

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 9 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 9 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 9 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	JP 2018-022853 A (富士電機株式会社) 2018.02.08, 段落[0029]-[0043], 図 1-4 & US 2018/0040480 A1, 段落[0019]-[0035]	1-8
Y	JP 2014-154666 A (住友電気工業株式会社) 2014.08.25, 段落[0019]-[0032], [0039], 図 1, 2 & US 2015/0221498 A1, 段落[0026]-[0039], [0046] & WO 2014/122854 A1 & EP 2955743 A1 & CN 104885197 A & KR 10-2015-0114461 A	1-8

☒ 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

2 5 . 1 0 . 2 0 1 9

国際調査報告の発送日

0 5 . 1 1 . 2 0 1 9

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)
郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5
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)

長谷川 直也

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 5 5 9

5 0

4 5 4 9

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
Y	WO 2018/078944 A1 (住友電気工業株式会社) 2018.05.03, 段落[0045], 図9 (ファミリーなし)	1-8
Y	JP 2010-037643 A (キャノン株式会社) 2010.02.18, 段落[0027]-[0034], 図3 (ファミリーなし)	1-8
Y	JP 2015-042602 A (住友電気工業株式会社) 2015.03.05, 段落[0015], [0036] (ファミリーなし)	3-8
Y	JP 2017-152487 A (株式会社デンソー, トヨタ自動車株式会社) 2017.08.31, 段落[0018] & US 2019/0013392 A1, 段落[0026] & WO 2017/145593 A1	4-8