

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7678247号
(P7678247)

(45)発行日 令和7年5月16日(2025.5.16)

(24)登録日 令和7年5月8日(2025.5.8)

(51)国際特許分類

F I

C 3 0 B 29/36 (2006.01)

C 3 0 B 29/36 A

C 3 0 B 25/20 (2006.01)

C 3 0 B 25/20

H 0 1 L 21/205 (2006.01)

H 0 1 L 21/205

請求項の数 22 (全32頁)

(21)出願番号	特願2021-548983(P2021-548983)	(73)特許権者	503092180
(86)(22)出願日	令和2年9月24日(2020.9.24)		学校法人関西学院
(86)国際出願番号	PCT/JP2020/036004		兵庫県西宮市上ヶ原一番町1番155号
(87)国際公開番号	WO2021/060369	(73)特許権者	000241485
(87)国際公開日	令和3年4月1日(2021.4.1)		豊田通商株式会社
審査請求日	令和5年9月12日(2023.9.12)		愛知県名古屋市中村区名駅4丁目9番8号
(31)優先権主張番号	特願2019-178020(P2019-178020)	(74)代理人	100137338
(32)優先日	令和1年9月27日(2019.9.27)		弁理士 辻田 朋子
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)	(74)代理人	100196313
			弁理士 村松 大輔
		(72)発明者	金子 忠昭
			兵庫県三田市学園二丁目一番地 関西学院大学理工学部内
		審査官	山本 一郎

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 S i C基板、S i C基板の製造方法、S i C半導体装置およびS i C半導体装置の製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

下地基板と、

前記下地基板上に形成された転位変換層と、

前記転位変換層の直上に形成されたエピタキシャル成長層と、を備え、

前記転位変換層は、基底面転位から貫通刃状転位への変換率が95%より大きく、

前記転位変換層のドーピング濃度は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上であるとともに、前記エピタキシャル成長層のドーピング濃度よりも高い、S i C基板。

【請求項2】

前記転位変換層のドーピング濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上である、請求項1に記載のS i C基板。

【請求項3】

前記転位変換層は、1 μm 以上の厚みを有する、請求項1又は請求項2に記載のS i C基板。

【請求項4】

前記転位変換層は、基底面転位から貫通刃状転位への変換率が100%である、請求項1～3の何れか一項に記載のS i C基板。

【請求項5】

前記下地基板は、加工変質層が除去されている、請求項1～4の何れか一項に記載のS i C基板。

【請求項 6】

前記下地基板のステップ高さは、1ユニットセルの高さである、請求項1～5の何れか一項に記載のSiC基板。

【請求項 7】

下地基板上に、ドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上の転位変換層を、テラス幅が増大する条件で成長させる結晶成長工程と、

前記転位変換層の直上に、前記転位変換層よりドーピング濃度が低いエピタキシャル成長層を成長させるエピタキシャル成長工程と、を含む、SiC基板の製造方法。

【請求項 8】

前記結晶成長工程は、SiC-C平衡蒸気圧環境下で成長させる工程である、請求項7に記載のSiC基板の製造方法。

10

【請求項 9】

前記結晶成長工程は、マクロステップバンチングが形成されていない表面に対して結晶成長させる工程である、請求項7又は請求項8に記載のSiC基板の製造方法。

【請求項 10】

前記下地基板の加工変質層を除去する加工変質層除去工程を含む、請求項7～9の何れか一項に記載のSiC基板の製造方法。

【請求項 11】

前記下地基板の表面のマクロステップバンチングを分解するバンチング分解工程を含む、請求項7～10の何れか一項に記載のSiC基板の製造方法。

20

【請求項 12】

下地基板と、

前記下地基板上に形成された転位変換層と、

前記転位変換層の直上に形成されたエピタキシャル成長層と、を備え、

前記転位変換層は、基底面転位から貫通刃状転位への変換率が95%より大きく、

前記転位変換層のドーピング濃度は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上であるとともに、前記エピタキシャル成長層のドーピング濃度よりも高い、SiC半導体装置。

【請求項 13】

前記転位変換層のドーピング濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上である、請求項12に記載のSiC半導体装置。

30

【請求項 14】

前記転位変換層は、1 μm 以上の厚みを有する、請求項12又は請求項13に記載のSiC半導体装置。

【請求項 15】

前記転位変換層は、基底面転位から貫通刃状転位への変換率が100%である、請求項12～14の何れか一項に記載のSiC半導体装置。

【請求項 16】

前記下地基板は、加工変質層が除去されている、請求項12～15の何れか一項に記載のSiC半導体装置。

【請求項 17】

前記下地基板のステップ高さは、1ユニットセルの高さである、請求項12～16の何れか一項に記載のSiC半導体装置。

40

【請求項 18】

下地基板上に、ドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上の転位変換層を、テラス幅が増大する条件で成長させる結晶成長工程と、

前記転位変換層の直上に、前記転位変換層よりドーピング濃度が低いエピタキシャル成長層を成長させるエピタキシャル成長工程と、を含む、SiC半導体装置の製造方法。

【請求項 19】

前記結晶成長工程は、SiC-C平衡蒸気圧環境下で成長させる工程である、請求項18に記載のSiC半導体装置の製造方法。

50

【請求項 20】

前記結晶成長工程は、マクロステップバンチングが形成されていない表面に対して結晶成長させる工程である、請求項 18 又は請求項 19 に記載の S i C 半導体装置の製造方法。

【請求項 21】

前記下地基板の加工変質層を除去する加工変質層除去工程を含む、請求項 18 ～ 20 の何れか一項に記載の S i C 半導体装置の製造方法。

【請求項 22】

前記下地基板の表面のマクロステップバンチングを分解するバンチング分解工程を含む、請求項 18 ～ 21 の何れか一項に記載の S i C 半導体装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、S i C 基板、S i C 基板の製造方法、S i C 半導体装置および S i C 半導体装置の製造方法。

【背景技術】

【0002】

S i C（炭化珪素）は、S i（シリコン）に比べて絶縁破壊電界が 1 桁大きく、バンドギャップが 3 倍大きく、熱伝導率が 3 倍程度高い。そのため、S i C は、パワーデバイス、高周波デバイス、高温動作デバイス等への応用が期待されている。

【0003】

S i C 半導体デバイスに致命的な欠陥を引き起こすデバイスキラ欠陥の一つとして、基底面転位（B a s a l p l a n e d i s l o c a t i o n : B P D）が知られている。

【0004】

S i C 基板中における B P D の多くは、エピタキシャル成長層（ドリフト層）が形成される際に貫通刃状転位（T h r e a d i n g e d g e d i s l o c a t i o n : T E D）に変換される。しかしながら、一部の B P D は、エピタキシャル成長層にそのまま引き継がれるという問題があった。

【0005】

デバイスに順電流を印加した際に、B P D に少数キャリアが到達すると、B P D が拡張して高抵抗な積層欠陥（S t a c k i n g F a u l t : S F）となる。すなわち、少数キャリアであるホール（正孔）が電子と再結合する際に生じるエネルギーにより、B P D を起点として S F が発生してしまう。デバイス内に高抵抗部が生じると、デバイスの信頼性が低下してしまう。

【0006】

このような問題に対し、下地基板とエピタキシャル成長層との間に、B P D → T E D 変換を行う転位変換層を設ける技術が提案されている（例えば、特許文献 1 参照）。このように、下地基板とエピタキシャル成長層との間に、転位の変換効率が高い転位変換層を設けることにより、エピタキシャル成長層に B P D が引き継がれることを抑制している。

【0007】

また、この転位変換層とエピタキシャル成長層との間に、少数キャリアの再結合を促進させる再結合促進層を設ける技術が提案されている（例えば、特許文献 2 参照）。このように、転位変換層とエピタキシャル成長層との間に、少数キャリアを消滅させる再結合促進層を設けることにより、再結合により発生するエネルギーが B P D に与えられて S F が発生することを抑制している。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【文献】特開 2009-88223 号公報

【文献】特開 2018-166196 号公報

【発明の概要】

10

20

30

40

50

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

図17は、積層欠陥を抑制する従来の処理を施したSiC基板の構成を示す断面図である。図17に示すように、このSiC基板100は、n型SiC下地基板101と、n型転位変換層102と、n型再結合促進層103と、n型エピタキシャル成長層104と、を備える。

【0010】

この従来のn型転位変換層102は、BPD→TED変換の変換率（以下、BPD→TED変換率という。）を向上させるため、ドーピング濃度を低く設定する必要があった。例えば、特許文献1には、転位変換層のドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが望ましいと記載されている。

10

【0011】

しかしながら、特許文献1に記載されているような、低いドーピング濃度に設定したn型転位変換層102を設ける場合には、SiC半導体装置の抵抗が増大してしまうという問題があった。すなわち、BPD→TED変換率と、SiC半導体装置の抵抗とは、トレードオフの関係にあり両立することが難しかった。

【0012】

また、積層欠陥を抑制する従来の処理においては、SFの発生を抑制するためのn型再結合促進層103を形成する。そのため、n型SiC下地基板101上に、n型転位変換層102と、n型再結合促進層103と、n型エピタキシャル成長層104と、を成長させる必要があり、成長条件の設定等のプロセスが複雑化してしまうという問題があった。

20

【0013】

上述した問題に鑑み、本発明の解決しようとする課題は、抵抗を低減可能な転位変換層を有するSiC基板およびSiC半導体にかかる新規の技術を提供することにある。

また、抵抗を低減可能な転位変換層を有するSiC基板およびSiC半導体を製造するための新規の技術を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0014】

上述した課題を解決する本発明は、ドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上である転位変換層を備える、SiC基板である。

30

このようなドーピング濃度の転位変換層を備えることにより、転位変換層における抵抗を低減することができる。

【0015】

本発明の好ましい形態では、ドーピング濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上である転位変換層を備える。

このようなドーピング濃度の転位変換層を備えることにより、BPD→TED変換を行う転位変換層としての機能に加え、少数キャリアの再結合を促進させる再結合促進層としての機能を果たすことができる。

【0016】

本発明の好ましい形態では、前記転位変換層は、 $1 \mu\text{m}$ 以上の厚みを有する。

40

このように、従来の転位変換層と比較して厚く形成することにより、転位の変換率を向上させるとともに、少数キャリアの再結合を促進させることができる。

【0017】

本発明の好ましい形態では、前記転位変換層は、基底面転位から貫通刃状転位への変換率が95%より大きい。

また、本発明の好ましい形態では、前記転位変換層は、基底面転位から貫通刃状転位への変換率が100%である。

このように、高い変換率と高いドーピング濃度を両立することにより、従来法と比較して、下地基板上に成長させる層を削減することができる。これにより、SiC基板の製造手順の削減やコストを低減することができる。

50

【0018】

本発明の好ましい形態では、下地基板と、エピタキシャル成長層と、をさらに備え、前記転位変換層は、前記下地基板と前記エピタキシャル成長層との間に設けられ、前記転位変換層のドーピング濃度は、前記エピタキシャル成長層のドーピング濃度よりも高い。

【0019】

また、本発明はSiC基板の製造方法にも関する。すなわち、上述した課題を解決する本発明は、ドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上の転位変換層を、テラス幅が増大する条件で成長させる結晶成長工程を含む、SiC基板の製造方法である。

【0020】

本発明の好ましい形態では、前記結晶成長工程は、SiC-C平衡蒸気圧環境下で成長させる工程である。

10

【0021】

本発明の好ましい形態では、前記結晶成長工程は、マクロステップバンチングが形成されていない表面に対して結晶成長させる工程である。

【0022】

また、本発明はSiC半導体装置にも関する。すなわち、上述した課題を解決する本発明は、ドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上である転位変換層を備える、SiC半導体装置である。

【0023】

本発明の好ましい形態では、ドーピング濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上である転位変換層を備える。

20

【0024】

本発明の好ましい形態では、前記転位変換層は、 $1 \mu\text{m}$ 以上の厚みを有する。

【0025】

本発明の好ましい形態では、前記転位変換層は、基底面転位から貫通刃状転位への変換率が95%より大きい。

また、本発明の好ましい形態では、前記転位変換層は、基底面転位から貫通刃状転位への変換率が100%である。

【0026】

本発明の好ましい形態では、下地基板と、エピタキシャル成長層と、をさらに備え、前記転位変換層は、前記下地基板と前記エピタキシャル成長層との間に設けられ、前記転位変換層のドーピング濃度は、前記エピタキシャル成長層のドーピング濃度よりも高い。

30

【0027】

また、本発明はSiC半導体装置の製造方法にも関する。すなわち、上述した課題を解決する本発明は、テラス幅が増大する条件で、ドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上の転位変換層を成長させる結晶成長工程を含む、SiC半導体装置の製造方法である。

【0028】

本発明の好ましい形態では、前記結晶成長工程は、SiC-C平衡蒸気圧環境下で成長させる工程である。

【0029】

本発明の好ましい形態では、前記結晶成長工程は、マクロステップバンチングが形成されていない表面に対して結晶成長させる工程である。

40

【発明の効果】

【0030】

開示した技術によれば、抵抗を低減可能な転位変換層を有するSiC基板およびSiC半導体にかかる新規の技術を提供することができる。

また、開示した技術によれば、抵抗を低減可能な転位変換層を有するSiC基板およびSiC半導体を製造するための新規の技術を提供することができる。

【0031】

他の課題、特徴および利点は、図面および特許請求の範囲と共に取り上げられる際に、

50

以下に記載される発明を実施するための形態を読むことにより明らかになるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0032】

【図1】実施の形態にかかるS i C基板の構成を示す断面図である。

【図2】他の実施の形態にかかるS i C基板の構成を示す断面図である。

【図3】実施の形態にかかるS i C基板の製造工程を示す説明図である。

【図4】本発明にかかる加工変質層除去工程を示す説明図である。

【図5】実施の形態にかかる加工変質層除去工程を示す説明図である。

【図6】本発明にかかる結晶成長工程を示す説明図である。

【図7】実施の形態にかかる結晶成長工程を示す説明図である。

10

【図8】本発明にかかるエピタキシャル成長工程を示す説明図である。

【図9】実施の形態にかかるエピタキシャル成長工程を示す説明図である。

【図10】実施の形態にかかるS i C基板の製造装置の説明図である。

【図11】実施例1にかかるS i C基板の製造装置の説明図である。

【図12】実施例1にかかるS i C基板のS I M Sの分析結果である。

【図13】B P D→T E D変換率を求める手法を示す説明図である。

【図14】B P D→T E D変換率とテラス幅増大率の関係を示すグラフである。

【図15】エッチング時および結晶成長時のアレニウスプロットである。

【図16】エッチング後および結晶成長後のS i C基板表面のS E M像である。

【図17】積層欠陥を抑制する従来の処理を施したS i C基板の構成を示す断面図である。

20

【発明を実施するための形態】

【0033】

以下に添付図面を参照して、この発明にかかるS i C基板、S i C基板の製造方法、S i C半導体装置およびS i C半導体装置の製造方法の好適な実施の形態を詳細に説明する。本発明の技術的範囲は、添付図面に示した実施の形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲に記載された範囲内において、適宜変更が可能である。本明細書および添付図面においては、nまたはpを冠記した層や領域では、それぞれ電子または正孔が多数キャリアであることを意味する。また、nやpに付す+および-は、それぞれそれが付されていない層や領域よりも高不純物濃度および低不純物濃度であることを意味する。+および-を含めたnやpの表記が同じ場合は近い濃度であることを示し濃度が同等とは限らない。なお、以下の実施の形態の説明および添付図面において、同様の構成には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

30

【0034】

《S i C基板》

図1は、実施の形態にかかるS i C基板10の構成を示す断面図である。図1に示すように、実施の形態にかかるS i C基板10は、n+型基板である下地基板11と、n+型層である転位変換層12と、n型層であるエピタキシャル成長層13と、を備える。

【0035】

本明細書では、S i C基板10の半導体装置を作る側の面（具体的にはエピタキシャル成長層13を堆積する側の面）を主面といい、この主面に相対する面を裏面という。また、主面および裏面を合わせて表面という。

40

【0036】

主面としては、(0001)面や(000-1)面から数度（例えば、0.4〜8°）のオフ角を設けた表面を例示することができる。なお、本明細書では、ミラー指数の表記において、“-”はその直後の指数につくバーを意味する。

【0037】

通常、原子レベルで平坦化された単結晶S i Cの表面には、ステップ-テラス構造が形成される。このステップ-テラス構造は、1分子層以上の段差部位であるステップ14と、{0001}面が露出した平坦部位であるテラス15と、が交互に並んだ階段構造となっている。

50

【0038】

ステップ14は、1分子層（0.25nm）が最小高さ（最小単位）であり、この1分子層が複数層重なることで、様々なステップ高さを形成している。本明細書では、ステップ14が束化（バンチング）して巨大化し、各ポリタイプの1ユニットセルを超えた高さを有するものをマクロステップバンチング（Macro Step Bunching：MSB）という。

【0039】

すなわち、MSBとは、4H-SiCの場合には4分子層を超えて（5分子層以上）バンチングしたステップ14であり、6H-SiCの場合には6分子層を超えて（7分子層以上）バンチングしたステップ14である。

【0040】

この下地基板11は、単結晶SiCを板状に加工してものであればよい。例えば、昇華法等で作製したSiCインゴットからスライスされたSiCウエハである。なお、単結晶SiCの結晶多型としては、何れのポリタイプのものも採用することができる。

【0041】

通常、機械的な加工（スライスや研磨・研削）を経た下地基板11は、加工ダメージが導入された加工変質層111と、このような加工ダメージが導入されていないバルク層112と、を有する。

【0042】

加工変質層111は、例えば、歪み113や傷114、潜傷115を含む（図4参照）。この加工変質層111の有無は、SEM-EBSDやTEM、μXRD等で確認することができる。

【0043】

下地基板11は、例えば、窒素がドーピングされたSiC単結晶基板である。下地基板11のドーピング濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、好ましくは $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、より好ましくは $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上である。

【0044】

転位変換層12は、例えば、窒素がドーピングされたSiC層である。転位変換層12のドーピング濃度は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、好ましくは $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、より好ましくは $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、さらに好ましくは $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、さらに好ましくは $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上である。

【0045】

転位変換層12のBPD→TED変換率は、95.00%より大きく、好ましくは96.00%以上であり、より好ましくは97.00%以上であり、さらに好ましくは98.00%以上であり、さらに好ましくは99.00%以上である。

【0046】

言い換えれば、5000個のBPDが存在する下地基板11の主面上に転位変換層12を成長させる場合には、転位変換層12の主面に存在するBPDは250個以下となる。また、10000個のBPDが存在する下地基板11の主面上に転位変換層12を成長させる場合には、転位変換層12の主面に存在するBPDは500個以下となる。

また、20000個のBPDが存在する下地基板11の主面上に転位変換層12を成長させる場合には、転位変換層12の主面に存在するBPDは1000個以下となる。

【0047】

また、転位変換層12のBPD→TED変換率は、99.95%より大きく、好ましくは99.96%以上であり、より好ましくは99.97%以上であり、さらに好ましくは99.98%以上であり、さらに好ましくは99.99%以上であり、さらに好ましくは100%である。

【0048】

すなわち、下地基板11に存在していたBPDは、転位変換層12の形成時にTEDに全て変換され、転位変換層12の主面には、BPDが存在しないことが望ましい。

10

20

30

40

50

【0049】

転位変換層12の厚みは、 $1\mu\text{m}$ 以上であり、好ましくは $3\mu\text{m}$ 以上であり、より好ましくは $5\mu\text{m}$ 以上であり、さらに好ましくは $7\mu\text{m}$ 以上であり、さらに好ましくは $10\mu\text{m}$ 以上である。

【0050】

エピタキシャル成長層13は、例えば、窒素がドーピングされたSiC層である。エピタキシャル成長層13のドーピング濃度は、転位変換層12のドーピング濃度よりも低い。言い換えれば、転位変換層12のドーピング濃度は、エピタキシャル成長層13のドーピング濃度よりも大きく、デバイス作動時の抵抗が小さい。

【0051】

なお、エピタキシャル成長層13の主面に酸化膜を形成し、製造されるようなMOSFETにおいて、MSBの存在は動作性能および信頼性に致命的な影響を与えることが知られている。

そのため、エピタキシャル成長層13の主面は、MSBが形成されていないことが望ましい。また、エピタキシャル成長層13の主面は、1ユニットセル高さのステップ14が配列していることが望ましい。このステップ14高さやテラス幅Wは、AFMや特開2015-179082号公報に記載のSEM像コントラストを評価する手法により確認することができる。

【0052】

本発明にかかるSiC基板10は、ドーピング濃度が $1\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 以上である転位変換層12を備える。このように、BPD→TED変換を行う転位変換層12を、従来のn型転位変換層102よりも高いドーピング濃度に設定することで、SiC半導体装置の抵抗を低減することができる。

【0053】

また、本発明にかかるSiC基板10は、ドーピング濃度が $1\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 以上である転位変換層12を備える。すなわち、形成されるエピタキシャル成長層13よりも高いドーピング濃度に設定することにより、少数キャリアの再結合を促進させることができる。これにより、転位変換層12は、転位の変換に加えて、再結合促進層としての機能を果たすことができる。

すなわち、転位変換層12のドーピング濃度は、エピタキシャル成長層13のドーピング濃度よりも高いことが望ましい。

【0054】

また、本発明にかかるSiC基板10の転位変換層12は、 $1\mu\text{m}$ 以上の厚みを有する。少なくとも $1\mu\text{m}$ 以上の厚みを有することにより、BPD→TED変換率を向上させることができる。

さらに、このように $1\mu\text{m}$ 以上の厚みを設けることにより、少数キャリアが再結合する領域を拡大するとともに、再結合の頻度が高い領域（転位変換層12の主面側）と、BPDが多く存在する領域（転位変換層12の裏面側）と、の距離を大きくすることができる。そのため、再結合により発生するエネルギーがBPDに与えられることを抑制することができる。

【0055】

また、本実施の形態にかかるSiC基板10は、n+型基板である下地基板11と、n+型層である転位変換層12と、n型層であるエピタキシャル成長層13と、の3層構造である。一方で、従来のSiC基板100は、n+型SiC下地基板101と、n型転位変換層102と、n+型再結合促進層103と、n型エピタキシャル成長層104の4層構造であった（図17参照）。本実施の形態にかかるSiC基板10によれば、従来のSiC基板100と比較して、成長する層を削減でき、工程数を減らすことができる。これにより、成長条件の簡易化やコストの削減等行うことができる。

【0056】

図2は、他の実施の形態にかかるSiC基板10の構成を示す断面図である。図2に示

10

20

30

40

50

すように、他の実施の形態にかかるS i C基板10は、n +型層である下地基板11と、n +型層である転位変換層12、を備えるエピレディ基板である。

このように、エピタキシャル成長層13形成前のS i C基板10を製造しても良い。

【0057】

なお、MSBが形成された表面にエピタキシャル成長層13を形成すると、エピタキシャル成長層13中にMSB起因の欠陥が発生する場合があることが知られている。

そのため、転位変換層12の主面は、MSBが形成されていないことが望ましい。また、転位変換層12の主面は、1ユニットセル高さのステップ14が配列していることが望ましい。

【0058】

本発明によれば、積層欠陥を抑制する従来の処理を施したS i C基板100のn型転位変換層102よりも、ドーピング濃度が高いn +型層である転位変換層12を備える。このような新規の構造により、SF発生抑制に加えて、S i C半導体装置の抵抗の低減、S i C基板の構造の簡略化、プロセスの簡素化、といった顕著な効果を奏することができる。

【0059】

《S i C基板の製造方法》

次に、実施の形態にかかるS i C基板の製造方法について詳細に説明する。図3は、実施の形態にかかるS i C基板の製造工程を示す説明図である。

【0060】

本実施の形態にかかるS i C基板の製造方法は、下地基板11の加工変質層111を除去する加工変質層除去工程S1と、テラス幅Wが増大する条件で、ドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上の転位変換層12を成長させる結晶成長工程S2と、エピタキシャル成長層13を成長させるエピタキシャル成長工程S3と、を含む。

【0061】

また、加工変質層除去工程S1の後に、下地基板11の主面に形成されたMSBを除去するバンチング分解工程S4を含んでも良い。また、結晶成長工程S2の後に、転位変換層12の主面に形成されたMSBを除去するバンチング分解工程S4を含んでも良い。また、エピタキシャル成長工程S3の後に、エピタキシャル成長層13の主面に形成されたMSBを除去するバンチング分解工程S4を含んでも良い。

【0062】

以下、各工程について詳細に説明する。

なお、バンチング分解工程S4は、何れの順序で実施する場合でも、共通の手法を採用することができる。そのため、バンチング分解工程S4については、加工変質層除去工程S1、結晶成長工程S2、エピタキシャル成長工程S3の後に説明する。

【0063】

<加工変質層除去工程>

図4は、本発明にかかる加工変質層除去工程S1を示す説明図である。加工変質層除去工程S1は、n +型の下地基板11に導入された加工変質層111を除去する工程である。

【0064】

加工変質層除去工程S1は、加工変質層111を除去可能な手法であれば採用することができる。例えば、S i 蒸気圧下で加熱することで単結晶S i CをエッチングするS i 蒸気圧エッチング(S i - V a p o r E t c h i n g : S i V E)法や、水素ガスをエッチングガスとして用いる水素エッチング法、化学機械研磨(C h e m i c a l M e c h a n i c a l P o l i s h i n g : C M P)等を例示できる。

以下、本工程の好ましい実施の形態について、詳細に説明する。

【0065】

図5は、実施の形態にかかる加工変質層除去工程S1を示す説明図である。

本実施の形態にかかる加工変質層除去工程S1は、S i 元素供給源およびC元素供給源を含む準閉鎖空間内にS i C基板10を収容し、加熱することでエッチングする工程であ

10

20

30

40

50

る。

【0066】

なお、本明細書における「準閉鎖空間」とは、容器内の真空引きやドーパントガスの供給は可能であるが、容器内に発生した蒸気の少なくとも一部を閉じ込め可能な空間のことをいう。この準閉鎖空間は、後述する本体容器30内や高融点容器50内に形成することができる。

【0067】

具体的には、加工変質層除去工程S1は、SiC材料体20（Si元素供給源およびC元素供給源）を露出させた本体容器30内に、SiC材料体20と相対するようにSiC基板10を配置して加熱する工程である（図5（a）参照）。

10

【0068】

SiC基板10と、このSiC基板10よりも温度が低いSiC材料体20とを相対して配置することにより、これらの間にエッチング空間Xが形成される。

このエッチング空間Xでは、加熱炉40が形成する温度勾配を駆動力として原子の輸送が起こり、結果として、SiC基板10をエッチングすることができる。

【0069】

また、本体容器30内に配置する原子数比Si/Cを制御することにより、SiC-Si平衡蒸気圧環境下での熱処理と、SiC-C平衡蒸気圧環境下での熱処理とを選択することができる。

【0070】

20

本明細書における「SiC-Si平衡蒸気圧環境」とは、SiC（固体）とSi（液相）とが気相を介して相平衡状態となっているときの蒸気圧の環境を指す。

SiC-Si平衡蒸気圧環境は、原子数比Si/Cが1を超える準閉鎖空間が熱処理されることで形成される。具体的には、化学量論比1：1を満たすSiC製の本体容器30内に、化学量論比1：1を満たすSiC基板10と、化学量論比1：1を満たすSiC材料体20と、Si蒸気供給源35（Siペレット等）と、を配置した場合には、本体容器30内の原子数比Si/Cは1を超える。

【0071】

また、本明細書における「SiC-C平衡蒸気圧環境」とは、SiC（固相）とC（固相）とが気相を介して相平衡状態となっているときの蒸気圧の環境を指す。

30

SiC-C平衡蒸気圧環境は、原子数比Si/Cが1以下である準閉鎖空間が熱処理されることで形成される。具体的には、化学量論比1：1を満たすSiC製の本体容器30内に、化学量論比1：1を満たすSiC基板10と、化学量論比1：1を満たすSiC材料体20と、を配置した場合には、本体容器30内の原子数比Si/Cは1となる（図5（a）参照）。また、C蒸気供給源（Cペレット等）を配置して原子数比Si/Cを1以下としても良い。

【0072】

また、加工変質層除去工程S1は、Si蒸気供給源54を露出させた高融点容器50内に、上述した本体容器30を配置して加熱する工程である（図5（a）参照）。

【0073】

40

このように、準閉鎖空間を形成する高融点容器50内に、Si蒸気供給源54とともに本体容器30を配置して加熱することにより、本体容器30内からSi元素を含む気相種が排気されることを抑制することができる。すなわち、本体容器30内のSi元素を含む気相種の蒸気圧と、本体容器30外のSi元素を含む気相種の蒸気圧と、をバランスさせることにより、本体容器30内の環境を維持することができる。

【0074】

SiC材料体20は、SiC基板10と相対させて加熱することで、SiC基板10との間で、Si元素とC元素の受け取りまたは受け渡しが可能で構成される。例えば、SiC製の容器（本体容器30）やSiC製の基板（SiC材料基板）を採用することができる。なお、このSiC材料体20の結晶多形としては、何れのポリタイプのもの

50

も採用することができ、多結晶 SiC を採用しても良い。

また、SiC 材料体 20 として、Si 元素供給源および C 元素供給源を焼結させた焼結体を採用しても良い。

【0075】

このエッチングにおける Si 元素および C 元素を輸送する駆動力としては、SiC 基板 10 と SiC 材料体 20 間の温度勾配や化学ポテンシャル差を採用することができる。

【0076】

本実施の形態にかかる加工変質層除去工程 S1 は、SiC 基板 10 と SiC 材料体 20 を相対させて配置し、SiC 基板 10 が高温側、SiC 材料体 20 が低温側となるよう 1400℃ 以上 2300℃ 以下の温度範囲で加熱する。

これにより、以下 1) ～ 5) の反応が持続的に行われ、結果として SiC 基板 10 のエッチングが進行すると考えられる。(図 5 (b) 参照)。

【0077】

- 1) $\text{SiC (s)} \rightarrow \text{Si (v)} + \text{C (s)}$
- 2) $2\text{C (s)} + \text{Si (v)} \rightarrow \text{SiC}_2 \text{ (v)}$
- 3) $\text{C (s)} + 2\text{Si (v)} \rightarrow \text{Si}_2\text{C (v)}$
- 4) $\text{Si (v)} + \text{SiC}_2 \text{ (v)} \rightarrow 2\text{SiC (s)}$
- 5) $\text{Si}_2\text{C (v)} \rightarrow \text{Si (v)} + \text{SiC (s)}$

【0078】

1) の説明: SiC 基板 10 (SiC (s)) が加熱されることで、熱分解によって SiC 基板 10 表面から Si 原子 (Si (v)) が脱離する (Si 原子昇華工程)。

2) および 3) の説明: Si 原子 (Si (v)) が脱離することで、SiC 基板 10 表面に残存した C 原子 (C (s)) は、準閉鎖空間内の Si 蒸気 (Si (v)) と反応する。その結果、C 原子 (C (s)) は、Si₂C または SiC₂ 等となって SiC 基板 10 表面から昇華する (C 原子昇華工程)。

4) および 5) の説明: 昇華した Si₂C または SiC₂ 等が、温度勾配によって準閉鎖空間内の SiC 材料体 20 に到達し、結晶成長する。

【0079】

このように、本実施の形態にかかる加工変質層除去工程 S1 は、SiC 基板 10 の表面から Si 原子を熱昇華させる Si 原子昇華工程と、SiC 基板 10 の表面に残存した C 原子と準閉鎖空間内の Si 蒸気を反応させることで SiC 基板 10 の表面から昇華させる C 原子昇華工程と、を含む。

【0080】

本実施の形態にかかるエッチング温度は、好ましくは 1400～2300℃ の範囲で設定される。

本実施の形態にかかるエッチング速度は、上述した温度領域によって制御することができ、0.001～2 μm/min の範囲で選択することが可能である。

本実施の形態にかかるエッチング時間は、所望のエッチング量となるよう任意の時間に設定することができる。例えば、エッチング速度が 1 μm/min の時に、エッチング量を 1 μm としたい場合には、エッチング時間は 1 分間となる。

本実施の形態にかかる温度勾配は、例えば、0.1～5℃/mm の範囲に設定される。

なお、エッチング中に不活性ガスを導入することも可能である。この不活性ガスは、Ar や He、N₂ 等を選択することができ、この不活性ガスを 10⁻⁵～10000 Pa の範囲で導入することによって、加熱炉 40 (本加熱室 41) の真空度を調整することができる。

【0081】

なお、加工変質層除去工程 S1 の後に、下地基板 11 の表面に形成された MSB を除去するバンチング分解工程 S4 を含んでも良い。

また、加工変質層除去工程 S1 において、SiC 基板 10 の主面に MSB が形成されない SiC-Si 蒸気圧環境下でエッチングを施した場合には、バンチング分解工程 S4 を

10

20

30

40

50

含まなくても良い。言い換えれば、加工変質層除去工程 S 1 とバンチング分解工程 S 4 とを同時に行ってもよい。

【0082】

＜結晶成長工程＞

図 6 は、本発明にかかる結晶成長工程 S 2 を示す説明図である。結晶成長工程 S 2 は、 $n +$ 型の下地基板 1 1 の上に、 $n +$ 型の転位変換層 1 2 をテラス幅 W が増大する条件で成長させる工程である。

【0083】

このように、テラス幅 W が増大する条件で転位変換層 1 2 を成長させることにより、高い $BPD \rightarrow TED$ 変換率と高いドーピング濃度を両立することができる。なお、テラス幅 W が増大する条件は、 $SiC-C$ 平衡蒸気圧環境下や C リッチ環境下を例示できる。

【0084】

そのため、結晶成長工程 S 2 は、 SiC 基板 1 0 を $SiC-C$ 平衡蒸気圧環境下や C リッチ環境下で結晶成長可能な手法であれば採用することができる。例えば、昇華法や化学蒸着法 ($CVD: Chemical Vapor Deposition$) 等を例示できる。

以下、本工程の好ましい実施の形態について、詳細に説明する。

【0085】

図 7 は、実施の形態にかかる結晶成長工程 S 2 を示す説明図である。

本実施の形態にかかる結晶成長工程 S 2 は、 Si 元素供給源および C 元素供給源を含む準閉鎖空間内に SiC 基板 1 0 を収容し、加熱することで結晶成長させる工程である (図 7 (a) 参照)。

【0086】

具体的には、結晶成長工程 S 2 は、加工変質層除去工程 S 1 と同様に、 SiC 材料体 2 0 (Si 元素供給源および C 元素供給源) を露出させた本体容器 3 0 内に、 SiC 材料体 2 0 と相対するように SiC 基板 1 0 を配置して加熱する工程である (図 7 (b) 参照)。

【0087】

上述した加工変質層除去工程 S 1 は、 SiC 基板 1 0 から SiC 材料体 2 0 に Si 元素および C 元素を輸送して SiC 基板 1 0 をエッチングする工程であった。

これとは逆に、結晶成長工程 S 2 は、 SiC 材料体 2 0 から SiC 基板 1 0 に Si 元素および C 元素を輸送して SiC 基板 1 0 を結晶成長させる工程である。

【0088】

SiC 基板 1 0 と、この SiC 基板 1 0 よりも温度が高い SiC 材料体 2 0 とを相対して配置することにより、これらの間に結晶成長空間 Y が形成される。

この結晶成長空間 Y では、加熱炉 4 0 が形成する温度勾配を駆動力として原子の輸送が起こり、結果として、 SiC 基板 1 0 の上に結晶成長させることができる。

【0089】

結晶成長工程 S 2 は、 $SiC-C$ 平衡蒸気圧環境下で転位変換層 1 2 を成長させる工程である。そのため、原子数比 Si/C が 1 以下である準閉鎖空間が熱処理されることで形成される。

すなわち、結晶成長工程 S 2 は、原子数比 Si/C が 1 を超える準閉鎖空間内に SiC 基板 1 0 と SiC 材料体 2 0 を相対させて配置し、 SiC 基板 1 0 と SiC 材料体 2 0 との間に温度勾配が形成されるよう加熱する工程である。

【0090】

また、結晶成長工程 S 2 は、加工変質層除去工程 S 1 と同様に、 Si 蒸気供給源 5 4 を露出させた高融点容器 5 0 内に、上述した本体容器 3 0 を配置して加熱することで、本体容器 3 0 内の環境を維持する。

【0091】

本実施の形態にかかる結晶成長工程 S 2 は、 SiC 基板 1 0 と SiC 材料体 2 0 を相対させて配置し、 SiC 基板 1 0 が低温側、 SiC 材料体 2 0 が高温側となるよう $1400^{\circ}C$ 以上 $2300^{\circ}C$ 以下の温度範囲で加熱する。

10

20

30

40

50

これにより、以下1)～5)の反応が持続的に行われ、結果としてSiC基板10の結晶成長が進行すると考えられる。(図7(b)参照)。

【0092】

- 1) $\text{Poly-SiC(s)} \rightarrow \text{Si(v)} + \text{C(s)}$
- 2) $2\text{C(s)} + \text{Si(v)} \rightarrow \text{SiC}_2(\text{v})$
- 3) $\text{C(s)} + 2\text{Si(v)} \rightarrow \text{Si}_2\text{C(v)}$
- 4) $\text{Si(v)} + \text{SiC}_2(\text{v}) \rightarrow 2\text{SiC(s)}$
- 5) $\text{Si}_2\text{C(v)} \rightarrow \text{Si(v)} + \text{SiC(s)}$

【0093】

1)の説明:SiC材料(Poly-SiC(s))が加熱されることで、熱分解によってSiCからSi原子(Si(v))が脱離する。

10

2)および3)の説明:Si原子(Si(v))が脱離することで残存したC原子(C(s))は、準閉鎖空間内のSi蒸気(Si(v))と反応する。その結果、C原子(C(s))は、Si₂CまたはSiC₂等となって準閉鎖空間内に昇華する。

4)および5)の説明:昇華したSi₂CまたはSiC₂等が、温度勾配(または化学ポテンシャル差)によってSiC基板10のテラスに到達・拡散しステップに到達することで、下地のSiC基板10の多型を引き継いで成長する(ステップフロー成長)。

【0094】

この時、SiC材料体20のドーパントが原料(Si元素およびC元素)と共に輸送されるため、SiC材料体20のドーピング濃度を引きついで転位変換層12が成長する。

20

そのため、SiC材料体20のドーパントの種類やドーピング濃度を選択することにより、転位変換層12のドーパントおよびドーピング濃度を制御することができる。

【0095】

すなわち、窒素のドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上の転位変換層12を得たい場合には、窒素のドーピング濃度が $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上のSiC材料体20を用いればよい。また、窒素のドーピング濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上の転位変換層12を得たい場合には、窒素のドーピング濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上のSiC材料体20を用いればよい。

【0096】

そのため、SiC材料体20のドーピング濃度は、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、好ましくは $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、より好ましくは $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、さらに好ましくは $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、さらに好ましくは $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上である。

30

また、加熱処理中にドーパントガスを供給することにより、ドーピングすることも可能である。

【0097】

本実施の形態にかかる成長温度は、好ましくは $1400 \sim 2300^\circ\text{C}$ の範囲で設定される。

本実施の形態にかかる成長速度は、上述した温度領域によって制御することができ、 $0.001 \sim 2 \mu\text{m}/\text{min}$ の範囲で選択することが可能である。

40

本実施の形態にかかる成長時間は、所望の成長量となるよう任意の時間に設定することができる。例えば、成長速度が $1 \mu\text{m}/\text{min}$ の時に、成長量を $1 \mu\text{m}$ としたい場合には、成長量は1分間となる。

本実施の形態にかかる温度勾配は、 $0.1 \sim 5^\circ\text{C}/\text{mm}$ の範囲で設定される。

本手法においては、ドーパントガス(N₂等)を供給することができ、本加熱室41に $10^{-5} \sim 10000 \text{ Pa}$ の範囲で導入することができる。

【0098】

また、結晶成長工程S2は、MSBが形成されていない表面に対して結晶成長させることが好ましい。そのため、加工変質層除去工程S1において、SiC基板10の主面にMSBが形成されないSiC-Si蒸気圧環境下でエッチングを施すことが望ましい。

50

また、加工変質層除去工程 S 1 において、S i C 基板 1 0 の主面に M S B が形成される条件でエッチングを施した場合には、結晶成長工程 S 2 の前段に後述するバンチング分解工程 S 4 を施すことが望ましい。

【0099】

なお、結晶成長工程 S 2 の後に、転位変換層 1 2 の表面に形成された M S B を除去するバンチング分解工程 S 4 を含んでも良い。

【0100】

<エピタキシャル成長工程>

図 8 は、本発明にかかるエピタキシャル成長工程 S 3 を示す説明図である。エピタキシャル成長工程 S 3 は、転位変換層 1 2 上に、n 型のエピタキシャル成長層 1 3 を成長させる工程である。

10

【0101】

エピタキシャル成長工程 S 3 は、エピタキシャル成長層 1 3 を成長可能な手法であれば採用可能である。例えば、化学気相堆積法 (Chemical Vapor Deposition: CVD) や物理的気相輸送法 (Physical Vapor Transport: PVT)、準安定溶媒エピタキシー法 (Metastable Solvent Epitaxy: MSE) 等が挙げられる。

以下、本工程の好ましい実施の形態について、詳細に説明する。

【0102】

本実施の形態にかかるエピタキシャル成長工程 S 3 は、結晶成長工程 S 2 と同様に、S i 元素供給源および C 元素供給源を含む準閉鎖空間内に S i C 基板 1 0 を収容し、加熱することで結晶成長させる工程である。

20

【0103】

具体的には、結晶成長工程 S 2 は、S i C 基板 1 0 と S i C 材料体 2 0 を相対させて配置し、S i C 基板 1 0 が低温側、S i C 材料体 2 0 が高温側となるよう 1 4 0 0 °C 以上 2 3 0 0 °C 以下の温度範囲で加熱する (図 7 参照)。

【0104】

このエピタキシャル成長工程 S 3 は、n + 型層である転位変換層 1 2 よりも低いドーピング濃度、すなわち、n 型層であるエピタキシャル成長層 1 3 を結晶成長させる工程である。

30

【0105】

そのため、エピタキシャル成長工程 S 3 で用いる S i C 材料体 2 0 のドーピング濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、好ましくは $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下であり、より好ましくは $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。

【0106】

本実施の形態にかかる成長温度は、好ましくは 1 4 0 0 ~ 2 3 0 0 °C の範囲で設定される。

本実施の形態にかかる成長速度は、上述した温度領域によって制御することができ、0 . 0 0 1 ~ 2 $\mu\text{m}/\text{min}$ の範囲で選択することが可能である。

本実施の形態にかかる成長時間は、所望の成長量となるよう任意の時間に設定することができる。例えば、成長速度が 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ の時に、成長量を 1 μm としたい場合には、成長量は 1 分間となる。

40

本実施の形態にかかる温度勾配は、0 . 1 ~ 5 °C / mm の範囲で設定される

【0107】

また、エピタキシャル成長工程 S 3 は、M S B が形成されていない表面に対して結晶成長させる工程である。そのため、エピタキシャル成長工程 S 3 の前段に、後述するバンチング分解工程 S 4 を施すことが望ましい。

【0108】

なお、エピタキシャル成長工程 S 3 の後に、エピタキシャル成長層 1 3 の表面に形成された M S B を除去するバンチング分解工程 S 4 を含んでも良い。

50

【0109】

＜バンチング分解工程＞

バンチング分解工程 S 4 は、S i C 基板 1 0 の表面に形成された M S B を分解可能な手法であれば採用することができる。例えば、S i 蒸気圧下で加熱することで単結晶 S i C をエッチングする S i 蒸気圧エッチング (S i - V a p o r E t c h i n g : S i V E) 法等を例示できる。

以下、本工程の好ましい実施の形態について、詳細に説明する。

【0110】

図 9 は、実施の形態にかかるバンチング分解工程 S 4 を示す説明図である。

本実施の形態にかかるバンチング分解工程 S 4 は、S i 元素供給源および C 元素供給源を含む準閉鎖空間内に S i C 基板 1 0 を収容し、S i C - S i 平衡蒸気圧環境下でエッチング若しくは結晶成長させる工程である。

【0111】

具体的には、バンチング分解工程 S 4 は、加工変質層除去工程 S 1 および結晶成長工程 S 2 と同様に、S i C 材料体 2 0 (S i 元素供給源および C 元素供給源) を露出させた本体容器 3 0 内に、S i C 材料体 2 0 と相対するように S i C 基板 1 0 と S i 蒸気供給源 3 5 を配置して加熱する工程である (図 9 参照)。

【0112】

また、加工変質層除去工程 S 1 および結晶成長工程 S 2 と同様に、S i 蒸気供給源 5 4 を露出させた高融点容器 5 0 内に、上述した本体容器 3 0 を配置して加熱することで、本体容器 3 0 内の環境を維持する。

【0113】

図 9 (a) は、S i C - S i 平衡蒸気圧環境下でエッチングすることで S i C 基板 1 0 の表面に形成された M S B を分解する形態を示している。

すなわち、原子数比 S i / C が 1 を超える準閉鎖空間内に、S i C 基板 1 0 と S i C 材料体 2 0 を相対させて配置し、S i C 基板 1 0 が高温側、S i C 材料体 2 0 が低温側となるよう加熱する形態である。

【0114】

一方、図 9 (b) は、S i C - S i 平衡蒸気圧環境下で結晶成長させることで S i C 基板 1 0 の表面に形成された M S B を分解する形態を示している。

すなわち、原子数比 S i / C が 1 を超える準閉鎖空間内に、S i C 基板 1 0 と S i C 材料体 2 0 を相対させて配置し、S i C 基板 1 0 が低温側、S i C 材料体 2 0 が高温側となるよう加熱する形態である。

【0115】

本実施の形態のバンチング分解工程 S 4 によれば、S i C - S i 平衡蒸気圧環境下で S i C 基板 1 0 を熱処理することにより、S i C 基板 1 0 の表面に形成された M S B を分解することができる。

なお、エッチング条件および成長条件は、加工変質層除去工程 S 1 または結晶成長工程 S 2 で説明した条件を採用することができる。

【0116】

＜S i C 基板の製造装置＞

次に、上述した S i C 基板の製造方法を実現する製造装置について詳細に説明する。

本実施の形態にかかる S i C 基板の製造装置は、図 1 0 に示すように、S i C 基板 1 0 を収容可能な本体容器 3 0 と、S i C 基板 1 0 と S i C 材料体 2 0 との間に温度勾配が形成されるよう加熱可能な加熱炉 4 0 と、を備える。

【0117】

(本体容器)

本体容器 3 0 は、互いに嵌合可能な上容器 3 1 および下容器 3 2 と、を備える嵌合容器である。上容器 3 1 と下容器 3 2 の嵌合部には、微小な間隙 3 3 が形成されており、この間隙 3 3 から本体容器 3 0 内の排気 (真空引き) が可能なよう構成されている。

10

20

30

40

50

【0118】

本実施の形態にかかる上容器31および下容器32は、多結晶SiCで構成されている。そのため、本体容器30自体をSiC材料体20としても良い。また、本体容器30のSiC基板10と相対する部分のみをSiC材料体20で構成しても良い。その場合、SiC材料体20以外の部分は高融点材料（後述する高融点容器50と同様の材料）を採用することができる。

【0119】

また、図5，図7，図9に示すように、基板状のSiC材料体20を別途収容する構成を採用しても良い。その場合には、基板状のSiC材料体20とSiC基板10の間にスペーサー（基板保持具34等）を配置して、エッチング空間Xまたは結晶成長空間Yを形成しても良い。基板保持具34は、高融点容器50と同様の高融点材料で構成されていることが望ましい。

10

【0120】

すなわち、本体容器30は、SiC基板10を収容した状態で加熱した際に、内部空間にSi元素およびC元素を含む雰囲気を発生させる構成となっている。本実施の形態においては、多結晶SiCで構成されたSiC材料体20を加熱することで、内部空間内にSi元素およびC元素を含む雰囲気を形成している。

【0121】

また、加熱された本体容器30内の空間は、Si元素を含む気相種およびC元素を含む気相種の混合系の蒸気圧環境となることが望ましい。このSi元素を含む気相種としては、Si，Si₂，Si₃，Si₂C，SiC₂，SiCが例示できる。また、C元素を含む気相種としては、Si₂C，SiC₂，SiC，Cが例示できる。すなわち、SiC系ガスが準閉鎖空間に存在している状態となるのが好ましい。

20

【0122】

エッチング空間Xまたは結晶成長空間Yは、SiC基板10とSiC材料体20との間に設けられる温度勾配を駆動力として、SiC基板10からSiC材料体20へ原料を輸送する空間であり、また、SiC材料体20からSiC基板10へ原料を輸送する空間である。

【0123】

例えば、SiC基板10の表面の温度と、この表面に相対するSiC材料体20の温度と、を比較した際に、SiC基板10側の温度が高く、SiC材料体20の温度が低くなるよう、SiC基板10を配置した場合を考える（図9（a）参照）。このように、SiC基板10とSiC材料体20とを相対させて配置し、SiC基板10が高温側、SiC材料体20が低温側となるよう加熱した場合には、SiC基板10からSiC材料体20へ原料が輸送され、SiC基板10がエッチングされる。すなわち、SiC材料体20とSiC基板10の間に、エッチング空間Xが形成される。

30

【0124】

一方で、SiC基板10の表面の温度と、この表面に相対するSiC材料体20の温度を比較した際に、SiC基板10側の温度が低く、SiC材料体20の温度が高くなるよう、SiC基板10を配置した場合を考える（図9（b）参照）。このように、SiC基板10とSiC材料体20とを相対させて配置し、SiC基板10が低温側、SiC材料体20が高温側となるよう加熱した場合には、SiC材料体20からSiC基板10へ原料が輸送され、SiC基板10上に単結晶SiCが成長する。すなわち、SiC材料体20とSiC基板10の間に、結晶成長空間Yが形成される。

40

【0125】

（加熱炉）

加熱炉40は、図10に示すように、被処理物（SiC基板10等）を1000℃以上2300℃以下の温度に加熱することが可能な本加熱室41と、被処理物を500℃以上の温度に予備加熱可能な予備加熱室42と、本体容器30を収容可能な高融点容器50と、この高融点容器50を予備加熱室42から本加熱室41へ移動可能な移動手段43（移

50

動台) と、を備えている。

【0126】

本加熱室41は、平面断面視で正六角形に形成されており、その内側に高融点容器50が配置される。

本加熱室41の内部には、加熱ヒータ44(メッシュヒーター)が備えられている。また、本加熱室41の側壁や天井には多層熱反射金属板が固定されている(図示せず。)。この多層熱反射金属板は、加熱ヒータ44の熱を本加熱室41の略中央部に向けて反射させるように構成されている。

【0127】

これにより、本加熱室41内において、被処理物が収容される高融点容器50を取り囲むように加熱ヒータ44が配置され、さらにその外側に多層熱反射金属板が配置されることで、1000℃以上2300℃以下の温度まで昇温させることができる。

なお、加熱ヒータ44としては、例えば、抵抗加熱式のヒータや高周波誘導加熱式のヒータを用いることができる。

【0128】

また、加熱ヒータ44は、高融点容器50内に温度勾配を形成可能な構成を採用しても良い。例えば、加熱ヒータ44は、上側に多くのヒータが配置されるよう構成しても良い。また、加熱ヒータ44は、上側に向かうにつれて幅が大きくなるように構成しても良い。あるいは、加熱ヒータ44は、上側に向かうにつれて供給される電力を大きくすることが可能なよう構成しても良い。

【0129】

また、本加熱室41には、本加熱室41内の排気を行う真空形成用バルブ45と、本加熱室41内に不活性ガスを導入する不活性ガス注入用バルブ46と、本加熱室41内の真空度を測定する真空計47と、が接続されている。

【0130】

真空形成用バルブ45は、本加熱室41内を排気して真空引きする真空引ポンプと接続されている(図示せず。)。この真空形成用バルブ45および真空引きポンプにより、本加熱室41内の真空度は、例えば、10Pa以下、より好ましくは1Pa以下、さらに好ましくは 10^{-3} Pa以下に調整することができる。この真空引きポンプとしては、ターボ分子ポンプを例示することができる。

【0131】

不活性ガス注入用バルブ46は、不活性ガス供給源と接続されている(図示せず。)。この不活性ガス注入用バルブ46および不活性ガス供給源により、本加熱室41内に不活性ガスを 10^{-5} ~10000Paの範囲で導入することができる。この不活性ガスとしては、ArやHe、N₂等を選択することができる。

【0132】

また、不活性ガス注入用バルブ46は、本体容器30内にドーパントガスを供給可能なドーパントガス供給手段である。すなわち、不活性ガスにドーパントガス(例えば、N₂等)を選択することにより、成長層のドーピング濃度を調整することができる。

【0133】

予備加熱室42は、本加熱室41と接続されており、移動手段43により高融点容器50を移動可能に構成されている。なお、本実施の形態の予備加熱室42には、本加熱室41の加熱ヒータ44の余熱により昇温可能なよう構成されている。例えば、本加熱室41を2000℃まで昇温した場合には、予備加熱室42は1000℃程度まで昇温され、被処理物(SiC基板10や本体容器30、高融点容器50等)の脱ガス処理を行うことができる。

【0134】

移動手段43は、高融点容器50を載置して、本加熱室41と予備加熱室42を移動可能に構成されている。この移動手段43による本加熱室41と予備加熱室42間の搬送は、最短1分程で完了するため、1~1000℃/minでの昇温・降温を実現することが

10

20

30

40

50

できる。

このように急速昇温および急速降温が行えるため、従来の装置では困難であった、昇温中および降温中の低温成長履歴を持たない表面形状を観察することが可能である。

また、図10においては、本加熱室41の下方に予備加熱室42を配置しているが、これに限られず、何れの方に配置しても良い。

【0135】

また、本実施の形態にかかる移動手段43は、高融点容器50を載置する移動台である。この移動台と高融点容器50の接触部から、微小な熱を逃がしている。これにより、高融点容器50内（および本体容器30内）に温度勾配を形成することができる。

すなわち、本実施の形態の加熱炉40は、高融点容器50の底部が移動台と接触しているため、高融点容器50の上容器51から下容器52に向かって温度が下がるように温度勾配が設けられる。この温度勾配は、SiC基板10の表裏方向に沿って形成されていることが望ましい。

また、上述したように、加熱ヒータ44の構成により、温度勾配を形成してもよい。また、この加熱ヒータ44により、温度勾配を逆転可能に構成しても良い。

【0136】

（高融点容器）

加熱炉40は、Si元素を含む雰囲気を形成し、この雰囲気内で本体容器30を加熱可能であることが好ましい。本実施の形態にかかる加熱炉40内のSi元素を含む雰囲気は、高融点容器50およびSi蒸気供給源54を用いて形成している。

なお、本体容器30の周囲にSi元素を含む雰囲気を形成可能な方法であれば、当然に採用することができる。

【0137】

高融点容器50は、高融点材料を含んで構成されている。例えば、汎用耐熱部材であるC、高融点金属であるW、Re、Os、Ta、Mo、炭化物であるTa₉C₈、HfC、TaC、NbC、ZrC、Ta₂C、TiC、WC、MoC、窒化物であるHfN、Ta₂N、BN、ZrN、TiN、ホウ化物であるHfB₂、TaB₂、ZrB₂、Nb₂、TiB₂、多結晶SiC等を例示することができる。

【0138】

この高融点容器50は、本体容器30と同様に、互いに嵌合可能な上容器51と下容器52とを備える嵌合容器であり、本体容器30を収容可能に構成されている。上容器51と下容器52の嵌合部には、微小な間隙53が形成されており、この間隙53から高融点容器50内の排気（真空引き）が可能なよう構成されている。

【0139】

高融点容器50は、高融点容器50内にSi元素を含む気相種の蒸気圧を供給可能なSi蒸気供給源55を有していることが好ましい。Si蒸気供給源55は、加熱時にSi蒸気を高融点容器50内に発生させる構成であれば良く、例えば、固体のSi（単結晶Si片やSi粉末等のSiペレット）やSi化合物を例示することができる。

【0140】

本実施の形態にかかるSiC基板の製造装置は、高融点容器50の材料としてTaCを採用し、Si蒸気供給源55としてタンタルシリサイドを採用している。すなわち、図5、図7、図9に示すように、高融点容器50の内側にタンタルシリサイド層が形成されており、加熱時にタンタルシリサイド層からSi蒸気が容器内に供給されることにより、Si蒸気圧環境が形成されるように構成されている。

この他にも、加熱時に高融点容器50内にSi元素を含む気相種の蒸気圧が形成される構成であれば採用することができる。

【0141】

《SiC半導体装置およびSiC半導体装置の製造方法》

実施の形態にかかるSiC基板10から、pinダイオードを製造する場合を例に説明する。例えば、実施の形態にかかるSiC基板10をn型とし、nチャネル型pinダイ

10

20

30

40

50

オードを製造する場合を考える。この時、下地基板 11 はカソード領域となり、転位変換層 12 はバッファ層として機能し、エピタキシャル成長層 13 は真性半導体層 (i 層) として機能する。

【0142】

まず、エピタキシャル成長層 13 の主面側の表面層に p 型の不純物、例えばアルミニウム (Al) をイオン注入法により注入することにより p+ 型のアノード領域を形成する。

次に、アノード領域の上面に、ニッケル (Ni) 等を成膜し熱処理する等してアノード電極を形成し、カソード領域の上面にカソード電極を形成する。これにより、n チャネル型 pin ダイオードが製造できる。

【0143】

ここでは、n チャネル型 pin ダイオードを例にして、SiC 半導体装置の製造方法の説明を行ったが、本発明の SiC 基板は、パイポーラ素子、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 素子、MOS (Metal Oxidized Semiconductor) 構造の寄生ダイオード等にも適用可能である。

【0144】

また、実施の形態では、n+ 型の SiC 基板 10 の主面に、n+ 型層の転位変換層 12 および n 型層のエピタキシャル成長層 13 を積層した例を示したが、p+ 型の SiC 基板の主面に、p+ 型層の転位変換層 12 および p 型層のエピタキシャル成長層 13 を積層した構成であってもよい。

【実施例】

【0145】

以下、実施例 1、実施例 2、実施例 3、比較例 1、比較例 2、比較例 3 を挙げて、本発明をより具体的に説明する。

【0146】

〈実施例 1〉

加工変質層 111 除去後の SiC 基板 10 を、本体容器 30 および高融点容器 50 に収容し (図 11 参照)、以下の熱処理条件で熱処理した。なお、この実施例 1 においては、本体容器 30 を多結晶 SiC で形成することにより、本体容器 30 自体が SiC 材料体 20 (Si 元素供給源および C 元素供給源) として機能するよう構成されている。

【0147】

〔SiC 基板 10〕

多型: 4H-SiC

基板サイズ: 横幅 10 mm × 縦幅 10 mm × 厚み 0.45 mm

オフ方向およびオフ角: <11-20> 方向 4° オフ

成長面: (0001) 面

加工変質層 111 の有無: 無し

MSB の有無: 無し

ステップ 14 高さ: 1.0 nm

テラス幅 W1: 14 nm

【0148】

なお、加工変質層 111 の有無および深さは SEM-EBSD 法にて確認した。また、この加工変質層 111 の有無および深さは、TEM や μ XRD、ラマン分光法で確認することもできる。

また、MSB の有無は、AFM および特開 2015-179082 号公報に記載の SEM 像コントラストを評価する手法により確認した。

また、ステップ 14 高さは、AFM により測定した。

また、テラス幅 W (テラス幅 W1 およびテラス幅 W2 含む) の値としては、撮影した SEM 像のステップ 14 に対して垂直なラインを引き、このライン上に存在するステップ 14 数をカウントすることで、テラス幅の平均値を採用した (テラス幅 W = ライン長さ / ライン上のステップ数)。

10

20

30

40

50

【0149】

[本体容器30 (SiC材料体20)]

材料:多結晶SiC

容器サイズ:直径60mm×高さ4mm

SiC基板10と本体容器30天面との距離:2mm

容器内の原子数比Si/C:1以下

ドーパント:N

ドーピング濃度: $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

【0150】

[高融点容器50]

材料:T a C

容器サイズ:直径160mm×高さ60mm

Si蒸気供給源54 (Si化合物):T a S i₂

【0151】

[熱処理条件]

上述した条件で配置したSiC基板10を、以下の条件で熱処理した。

加熱温度:1800℃

加熱時間:8min

成長量:0.5μm

温度勾配:1℃/mm

【0152】

上述した熱処理条件で加熱することにより、SiC基板10上に転位変換層12を成長させた(結晶成長工程S2)。なお、実施例1においては、転位変換層12を0.5μm成長させたが、加熱時間を長くすることで、1μm以上成長させることが可能である。

図12は、実施例1にかかるSiC基板のSIMSの分析結果である。この図12に示すように、実施例1にかかる転位変換層12のドーピング濃度は $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であり、下地基板11のドーピング濃度は $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であった。

実施例1にかかる結晶成長工程S2にて成長した転位変換層12は、以下の通りである。

【0153】

[転位変換層12]

ドーパント:N

ドーピング濃度: $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

MSBの有無:有り

ステップ14高さ:>1.0nm

ステップ端形状:ジグザグ形状

テラス幅W2:55nm

BPD→TED変換率:100%

【0154】

図13は、結晶成長工程S2中にBPDから他の欠陥・転位(TED等)に変換した変換率を求める手法の説明図である。

図13(a)は、加工変質層111を有した下地基板11を示している。この段階ではバルク層112から加工変質層111まで、BPDが存在している。

図13(b)は、加工変質層除去工程S1により加工変質層111を除去した下地基板11を示している。この段階では、下地基板11(バルク層112)にBPDが存在している。

図13(c)は、結晶成長工程S2により転位変換層12を成長させたSiC基板10を示している。この工程でバルク層112に存在していたBPDが、ある確率でTEDに変換される。ここで転位変換層12の表面には、100%変換されない限り、TEDとBPDが混在していることとなる。

図13(d)は、結晶成長工程S2後のSiC基板10に対し、KOH溶解エッチング

10

20

30

40

50

法を用いて転位変換層 12 中の欠陥を確認した様子を示している。この KOH 溶解エッチング法は、約 500℃ に加熱した溶解塩 (KOH 等) に SiC 基板を浸し、転位や欠陥部分にエッチピットを形成し、そのエッチピットの大きさ・形状により転位の種類を判別する手法である。この手法により、結晶成長工程 S2 後の転位変換層 12 中を伝播した BPD の数を得る。

図 13 (e) は、KOH 溶解エッチング法後に転位変換層 12 を除去する様子を示している。本手法では、エッチピット深さまで機械研磨や CMP 等により平坦化した後、SiVE 法等により転位変換層 12 を除去し、下地基板 11 (バルク層 112) を表出させている。

図 13 (f) は、転位変換層 12 を除去した下地基板 11 に対し、KOH 溶解エッチング法を用いて下地基板 11 中の欠陥を確認した様子を示している。この手法により、転位変換層 12 直下の下地基板 11 に存在している BPD の数を得る。

【0155】

図 13 に示した一連の順序により、図 13 (d) における転位変換層 12 中を伝播した BPD の数と、図 13 (f) における下地基板 11 の表面に存在した BPD の数と、を比較することで、結晶成長工程 S2 中に、BPD から他の欠陥・転位に変換した BPD → TED 変換率を得ることができる。

【0156】

実施例 1 によれば、MSB が形成されていない表面に対して、SiC-C 平衡蒸気圧環境下で転位変換層 12 を成長させることにより、ドーピング濃度が $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上であり、BPD → TED 変換率が高い転位変換層 12 を備える SiC 基板を製造することができる。

また、実施例 1 においては、ドーピング濃度が $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \sim 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の SiC 材料体 20 を用いて、ドーピング濃度 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以上の転位変換層 12 を形成したが、ドーパントガスを導入してドーピング濃度を高めることも可能である。

【0157】

〈実施例 2 および実施例 3〉

次に、実施例 2，実施例 3，比較例 1，比較例 2，比較例 3 を参照して、BPD → TED 変換率が向上する熱処理条件について詳細に説明する。

【0158】

表 1 に示す条件で、実施例 2，実施例 3，比較例 1，比較例 2，比較例 3 の SiC 半導体基板を製造した。なお、これらの実施例および比較例にて使用した SiC 基板 10 の加工変質層 111 の深さは、SEM-EBSD により 5 μm 程度と確認した。また、使用した高融点容器 50 のサイズは直径 160 mm × 高さ 60 mm であり、本体容器 30 のサイズは直径 60 mm × 高さ 4 mm である。

【0159】

10

20

30

40

50

【表 1】

		実施例2	実施例3	比較例1	比較例2	比較例3
	ポリタイプ	4H-SiC	4H-SiC	4H-SiC	4H-SiC	4H-SiC
	オフ角 (オフ方向)	4度オフ (〈11-20〉方向)	4度オフ (〈11-20〉方向)	4度オフ (〈11-20〉方向)	4度オフ (〈11-20〉方向)	4度オフ (〈11-20〉方向)
加工変質層除去工程 S1前 SiC基板10	基板サイズ[mm]	10×5	10×5	10×5	10×5	10×5
	MSB有無	無し	無し	無し	無し	無し
	表面仕上げ	CMP	CMP	CMP	CMP	CMP
	ステップ14高さ[nm]	0.25~1	0.25~1	0.25~1	0.25~1	0.25~1
	テラス15幅[nm]	7	7	7	7	7
	加工変質層111有無	有り	有り	有り	有り	有り
SiVE条件 (加工変質層除去工 程S1)	加熱温度[℃]	1800	1800	-	1945	1800
	エッチング時間[min]	60	600	-	15	30
	エッチング量[μm]	20	8	-	10	10
	タンタルシサイド層	TaSi ₃	TaSi ₃	-	TaSi ₂	TaSi ₃
	Arガス[Pa]	-	10000	-	-	-
結晶成長工程S2前 SiC基板10	加工変質層111有無	無し	無し	有り	無し	無し
	MSB有無	無し	有り	無し	有り	無し
	ステップ14高さ[nm]	1.0	>1.0	0.25~1	>1.0	1.0
	テラス幅W1[nm]	14	26	7	50	14
昇華法条件 (結晶成長工程S2)	成長温度[℃]	1800	1800	1800	1800	1800
	成長時間[min]	360	360	360	360	360
	成長量[μm]	10	10	10	10	10
	Si基板量[g]	無し	無し	無し	無し	0.45
	容器内の原子数比Si/C	1以下	1以下	1以下	1以下	1を超える
	成長環境	SiC-C平衡 蒸気圧環境	SiC-C平衡 蒸気圧環境	SiC-C平衡 蒸気圧環境	SiC-C平衡 蒸気圧環境	SiC-Si平衡 蒸気圧環境
	条件	MSB形成	MSB形成	MSB形成	MSB形成	MSB分解
結晶成長工程S2後 SiC基板10	MSB有無	有り	有り	有り	有り	無し
	ステップ14高さ[nm]	>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	1.0
	ステップ端形状	ジグザグ形状	ジグザグ形状	ジグザグ形状	ジグザグ形状	ストレート形状
	テラス幅W2[nm]	55	40	45	48	14
BPD数	転位変換層12表面 BPD数[個]	0	2	12	2	15
	下地基板11表面 BPD数[個]	1200	669	276	62	222
テラス幅増減率[%]		292.86	53.85	542.86	-4.00	0.00
BPD→TED変換率		100.00	99.70	95.65	96.77	93.24

【0160】

実施例2は、Si蒸気圧エッチング法を用いてMSBが形成されない条件で加工変質層111を除去し（加工変質層除去工程S1）、昇華法を用いてSiC-C平衡蒸気圧環境下で成長させた（結晶成長工程S2）。その結果、転位変換層12のBPD→TED変換率は、100%であった。この時、結晶成長工程S2前のテラス幅W1は14nmであり、結晶成長工程S2後のテラス幅W2は55nmであった（テラス幅増減率=292.86%）。

【0161】

実施例3は、Si蒸気圧エッチング法を用いてMSBが形成される条件で加工変質層111を除去し（加工変質層除去工程S1）、実施例2と同じ条件下（SiC-C平衡蒸気圧環境下）で成長させた（結晶成長工程S2）。その結果、転位変換層12のBPD→TED変換率は、99.7%であった。この時、結晶成長工程S2前のテラス幅W1は26nmであり、結晶成長工程S2後のテラス幅W2は40nmであった（テラス幅増減率=53.85%）。

【0162】

この結果から、転位変換層12成長前のSiC基板10表面にMSBが形成されている場合には、実施例2と比較してBPD→TED変換率が低下していることがわかる。

【0163】

比較例1は、加工変質層111を除去する加工変質層除去工程S1を行わずに、実施例2および実施例3と同じ条件下（SiC-C平衡蒸気圧環境下）で成長させた（結晶成長工程S2）。その結果、転位変換層12のBPD→TED変換率は、95.65%であった。この時、結晶成長工程S2前のテラス幅W1は7nmであり、結晶成長工程S2後のテラス幅W2は45nmであった（テラス幅増減率=542.86%）。

【0164】

この結果から、転位変換層 1 2 前の S i C 基板 1 0 に加工変質層 1 1 1 が残存している場合には、実施例 2 および実施例 3 と比較して B P D → T E D 変換率が低下していることがわかる。

【0165】

比較例 2 は、M S B が形成される条件で加工変質層 1 1 1 を除去し（加工変質層除去工程 S 1）、実施例 2 および実施例 3 と同じ条件下（S i C - C 平衡蒸気圧環境下）で成長させた（結晶成長工程 S 2）。その結果、転位変換層 1 2 の B P D → T E D 変換率は、96.77% であった。この時、結晶成長工程 S 2 前のテラス幅 W 1 は 50 nm であり、結晶成長工程 S 2 後のテラス幅 W 2 は 48 nm であった（テラス幅増減率 = -4.00%）。

【0166】

この結果から、結晶成長工程 S 2 において、S i C 基板のテラス幅が減少する条件で成長させる場合には、実施例 2 および実施例 3 と比較して B P D → T E D 変換率が低下していることがわかる。

【0167】

なお、実施例 3 の加工変質層除去工程 S 1 では、A r ガスを 10000 Pa 導入することで M S B を形成しているのに対し、この比較例 2 の加工変質層除去工程 S 1 ではタンタルシリサイド層に T a S i ₂ を採用することで M S B を形成している。

【0168】

比較例 3 は、実施例 2 と同様に M S B が形成されない条件で加工変質層 1 1 1 を除去し（加工変質層除去工程 S 1）、昇華法を用いて S i C - S i 平衡蒸気圧環境下で成長させた（結晶成長工程 S 2）。なお、この S i C - S i 平衡蒸気圧環境は、本体容器 30 内に S i 基板を配置することで形成している。その結果、転位変換層 1 2 の B P D → T E D 変換率は、93.24% であった。

【0169】

この結果から、S i C - S i 平衡蒸気圧環境下で成長させた場合には、実施例 2 と比較して B P D → T E D 変換率が低下していることがわかる。

【0170】

また、本発明者等は、B P D → T E D 変換率に法則性がないか鋭意検討・実験したところ、図 1 4 に示すように、B P D → T E D 変換率はエピタキシャル成長前とエピタキシャル成長後のテラス幅 W の増減率（テラス幅増大率）に大きく関係していることを見出した。

【0171】

図 1 4 は、横軸にテラス幅増大率（（成長前のテラス幅 W 2 - 成長後のテラス幅 W 1）／成長後のテラス幅 W 1）を、縦軸に B P D → T E D 変換率をプロットしたグラフである。この図 1 4 に示したプロットは、加工変質層 1 1 1 を除去した異なるテラス幅 W 1 を有する複数の S i C 基板 1 0 に対し、1700℃、1800℃、1900℃の何れかの成長温度で、かつ、S i C - S i 平衡蒸気圧環境下または S i C - C 平衡蒸気圧環境下で、3 μ m 成長させた複数の実験結果を示している。

【0172】

この結果によれば、テラス幅増大率が 0 より大きい場合、すなわち、加工変質層 1 1 1 を除去した S i C 基板 1 0 に対して、結晶成長中にテラス幅 W が増大する条件で成長させた場合には、B P D → T E D 変換率が 99.00% 以上であった。

【0173】

すなわち、本発明にかかる S i C 基板の製造方法によれば、S i C 基板 1 0 の加工変質層 1 1 1 を除去する加工変質層除去工程 S 1 と、S i C 基板 1 0 のテラス幅 W が増大する条件で成長させる結晶成長工程 S 2 と、を含むことにより、転位変換層 1 2 中の B P D → T E D 変換率を向上させることができる。

【0174】

また、本発明にかかる S i C 基板の製造方法によれば、結晶成長工程 S 2 は、M S B が形成されていない S i C 基板 1 0 に対して転位変換層 1 2 を成長させることにより、転位変換層 1 2 中の B P D → T E D 変換率を略 100% とすることができる。

10

20

30

40

50

【0175】

〔熱力学計算〕

図15(a)は、本発明のエッチング工程における、加熱温度とエッチング速度の関係を示すグラフである。このグラフの横軸は温度の逆数であり、このグラフの縦軸はエッチング速度を対数で表示している。

【0176】

図15(b)は、本発明の結晶成長工程における、加熱温度と成長速度の関係を示すグラフである。このグラフの横軸は温度の逆数であり、このグラフの縦軸は成長速度を対数で表示している。

【0177】

この図15のグラフにおいては、SiC基板10を原子数比Si/Cが1を超える空間（本体容器30内）に配置して、SiC基板10を熱処理した結果を○印で示す。また、SiC基板10を原子数比Si/Cが1以下である空間（本体容器30内）に配置して、SiC基板10を熱処理した結果を×印で示す。

【0178】

なお、○印箇所のSiC基板10表面は何れもMSBが形成されておらず、ステップ14高さは1ユニットセルの高さであった。一方、×印箇所のSiC基板10表面は何れもMSBが形成されていた。

【0179】

また、図15のグラフでは、SiC-Si平衡蒸気圧環境における熱力学計算の結果を破線（アレニウスプロット）で、SiC-C平衡蒸気圧環境における熱力学計算の結果を二点鎖線（アレニウスプロット）にて示している。

以下、エッチング工程の熱力学計算と、結晶成長工程の熱力学計算と、に分けて詳細に説明する。

【0180】

(エッチング工程の熱力学計算)

エッチング工程の熱力学計算においては、本体容器30を加熱した際に、SiC基板10から発生する蒸気量（Si元素を含む気相種およびC元素を含む気相種）をエッチング量に換算できる。その場合、SiC基板10のエッチング速度は以下の数1で求められる。

【0181】

【数1】

$$\text{エッチング速度 (m/s)} \propto \sum_{i=\text{SiC, Si}_2\text{C, SiC}_2} \frac{P_i}{\sqrt{2\pi m_i k T}}$$

【0182】

ここで、TはSiC基板10の温度、 m_i は気相種（ Si_xC_y ）の1分子の質量、kはボルツマン定数である。

また、 P_i は、SiC基板10が加熱されることで本体容器30内に発生する蒸気圧を足し合わせた値のことである。なお、 P_i の気相種としては、SiC、 Si_2C 、 SiC_2 等が想定される。

【0183】

図15(a)の破線は、SiC（固体）とSi（液相）とが気相を介して相平衡状態となっているときの蒸気圧の環境において、単結晶SiCをエッチングした際の熱力学計算の結果である。具体的には、数1を用いて、以下の条件(i)～(iv)で熱力学計算を行った。(i)体積一定のSiC-Si平衡蒸気圧環境であること、(ii)エッチング駆動力は、本体容器30内の温度勾配であること、(iii)原料ガスは、SiC、 Si_2C 、 SiC_2 であること、(iv)原料がステップ14から昇華する脱離係数は0.001であること。

【0184】

10

20

30

40

50

図15(a)の二点鎖線は、SiC(固相)とC(固相)とが気相を介して相平衡状態となっているときの蒸気圧の環境において、単結晶SiCをエッチングした際の熱力学計算の結果である。具体的には、数1を用いて、以下の条件(i)～(iv)で熱力学計算を行った。(i)体積一定のSiC-C平衡蒸気圧環境であること、(ii)エッチング駆動力は、本体容器30内の温度勾配であること、(iii)原料ガスはSiC, Si₂C, SiC₂であること、(iv)原料がステップ14から昇華する脱離係数は0.001であること。

なお、熱力学計算に用いた各化学種のデータはJANAF熱化学表の値を採用した。

【0185】

この図15(a)のグラフによれば、SiC基板10を原子数比Si/Cが1を超える空間(本体容器30内)に配置して、SiC基板10をエッチングした結果(O印)は、SiC-Si平衡蒸気圧環境における単結晶SiCエッチングの熱力学計算の結果と傾向が一致していることがわかる。

【0186】

また、SiC基板10を原子数比Si/Cが1以下である空間(本体容器30内)に配置して、SiC基板10をエッチングした結果(X印)は、SiC-C平衡蒸気圧環境における単結晶SiCエッチングの熱力学計算の結果と傾向が一致していることがわかる。

【0187】

なお、SiC-Si平衡蒸気圧環境下でエッチングされたO印箇所の条件においては、MSBの形成が分解・抑制されており、SiC基板10表面に1nm(1ユニットセル)高さのステップ14が整列していた。

一方で、SiC-C平衡蒸気圧環境下でエッチングされたX印箇所の条件においては、MSBが形成されていた。

【0188】

(結晶成長工程の熱力学計算)

次に、結晶成長工程の熱力学計算においては、本体容器30内の加熱した際に、SiC原料とSiC基板から発生する蒸気分圧差を成長量に換算できる。この時の、成長駆動力としては、化学ポテンシャル差や温度勾配を想定できる。なお、この化学ポテンシャル差は、多結晶SiC(SiC材料体20)と単結晶SiC(SiC基板10)の表面で発生する気相種の分圧差を想定できる。その場合、SiCの成長速度は以下の数2で求められる。

【0189】

【数2】

$$\text{成長速度 (m/s)} \propto \sum_{i=\text{SiC}, \text{Si}_2\text{C}, \text{SiC}_2} \frac{(P_{\text{原料}i} - P_{\text{基板}i})}{\sqrt{2\pi m_i k T}}$$

【0190】

ここで、TはSiC原料側の温度、m_iは気相種(Si_xC_y)の1分子の質量、kはボルツマン定数である。

また、P_{原料i} - P_{基板i}は、原料ガスが過飽和な状態となって、SiCとして析出した成長量であり、原料ガスとしてはSiC, Si₂C, SiC₂が想定される。

【0191】

すなわち、図15(b)の破線は、SiC(固体)とSi(液相)とが気相を介して相平衡状態となっているときの蒸気圧環境において、多結晶SiCを原料として単結晶SiCを成長させた際の熱力学計算の結果である。

【0192】

具体的には、数2を用いて、以下の条件(i)～(iv)で熱力学計算を行った。(i)体積一定のSiC-Si平衡蒸気圧環境であること、(ii)成長駆動力は、本体容器3

10

20

30

40

50

0 内の温度勾配と、多結晶 SiC と単結晶 SiC の蒸気圧差（化学ポテンシャル差）であること、(iii) 原料ガスは SiC, Si₂C, SiC₂ であること、(iv) 原料が SiC 基板 10 のステップに吸着する吸着係数は 0.001 であること。

【0193】

また、図 15 (b) の二点鎖線は、SiC (固相) と C (固相) とが気相を介して相平衡状態となっているときの蒸気圧環境において、多結晶 SiC を原料として単結晶 SiC を成長させた際の熱力学計算の結果である。

【0194】

具体的には、数 2 を用いて、以下の条件 (i) ~ (iv) で熱力学計算を行った。(i) 体積一定の SiC-C 平衡蒸気圧環境であること、(ii) 成長駆動力は、本体容器 30 内の温度勾配と、多結晶 SiC と単結晶 SiC の蒸気圧差（化学ポテンシャル差）であること、(iii) 原料ガスは、SiC, Si₂C, SiC₂ であること、(iv) 原料が SiC 基板 10 のステップに吸着する吸着係数は 0.001 であること。

なお、熱力学計算に用いた各化学種のデータは JANAF 熱化学表の値を採用した。

【0195】

この図 15 (b) のグラフによれば、SiC 基板 10 を原子数比 Si/C が 1 を超える空間（本体容器 30 内）に配置して、SiC 基板 10 に成長層を成長させた結果（○印）は、SiC-Si 平衡蒸気圧環境における SiC 成長の熱力学計算の結果と傾向が一致していることがわかる。

【0196】

また、SiC 基板 10 を原子数比 Si/C が 1 以下である空間（本体容器 30 内）に配置して、SiC 基板 10 に成長層を成長させた結果（×印）は、SiC-C 平衡蒸気圧環境における SiC 成長の熱力学計算の結果と傾向が一致していることがわかる。

【0197】

図 16 (a) は、本体容器 30 内の原子数比 Si/C が 1 以下となるよう配置し、1800℃で結晶成長させた 4H-SiC (0001) 面側の SEM 像である。すなわち、図 15 (b) の×印箇所の一例であり、SiC 基板 10 を SiC-C 平衡蒸気圧環境下で結晶成長させた表面の一例である。この条件で得られる表面形状は、例えば、テラス幅 W が 40~200 nm、ステップ 14 高さが 3~14 nm のステップ-テラス構造が形成されており、ステップ端の形状がジグザグ形状の MSB が形成されていることがわかる。

【0198】

一方で、図 16 (b) は、本体容器 30 内の原子数比 Si/C が 1 を超えるよう配置し、1800℃で結晶成長させた 4H-SiC (0001) 面側の SEM 像である。すなわち、図 15 (b) の○印箇所の一例であり、SiC-Si 平衡蒸気圧環境下で結晶成長させた表面の一例である。この条件で得られる表面形状では、テラス幅が 14 nm、ステップ高さが 1.0 nm（フルユニットセル）のステップ-テラス構造が形成されており、MSB は形成されていないことがわかる。

【0199】

なお、このステップ高さやテラス幅は、AFM や特開 2015-179082 号公報に記載の SEM 像コントラストを評価する手法により確認することができる。

【符号の説明】

【0200】

- 10 SiC 基板
- 11 下地基板
- 111 加工変質層
- 112 バルク層
- 113 歪み
- 114 傷
- 115 潜傷
- 12 転位変換層

10

20

30

40

50

- 1 3 エピタキシャル成長層
- 1 4 ステップ
- 1 5 テラス
- 2 0 S i C 材料体
- 3 0 本体容器
- 3 1 上容器
- 3 2 下容器
- 3 3 間隙
- 3 4 基板保持具
- 3 5 S i 蒸気供給源
- 4 0 加熱炉
- 4 1 本加熱室
- 4 2 予備加熱室
- 4 3 移動手段
- 4 4 加熱ヒータ
- 4 5 真空形成用バルブ
- 4 6 不活性ガス注入用バルブ
- 4 7 真空計
- 5 0 高融点容器
- 5 1 上容器
- 5 2 下容器
- 5 3 間隙
- 5 4 S i 蒸気供給源
- X エッチング空間
- Y 結晶成長空間
- S 1 加工変質層除去工程
- S 2 結晶成長工程
- S 3 エピタキシャル成長工程
- S 4 バンチング分解工程

10

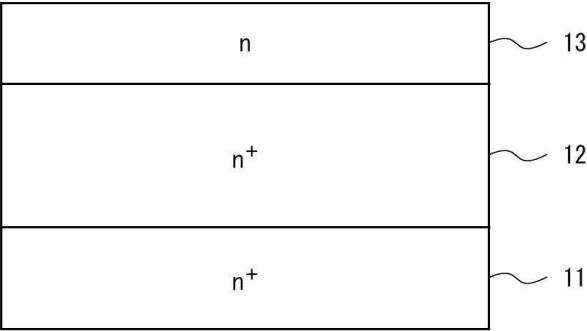
20

30

【図面】

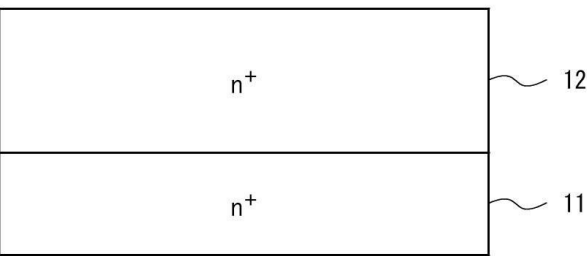
【図 1】

10



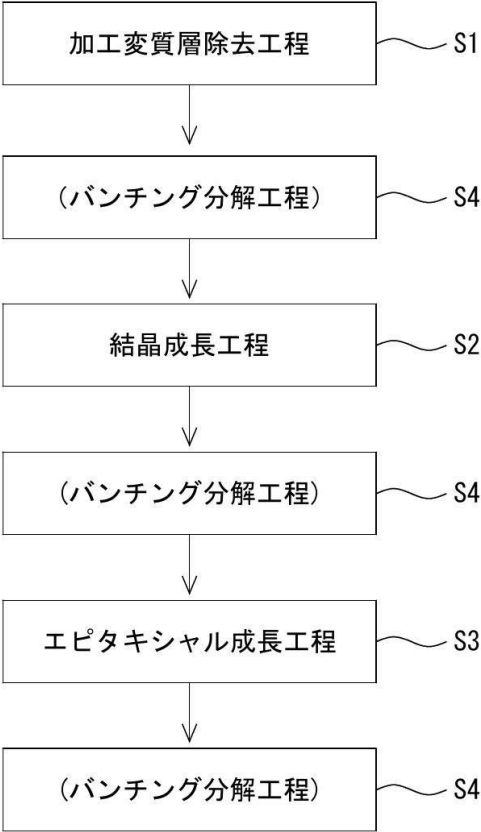
【図 2】

10

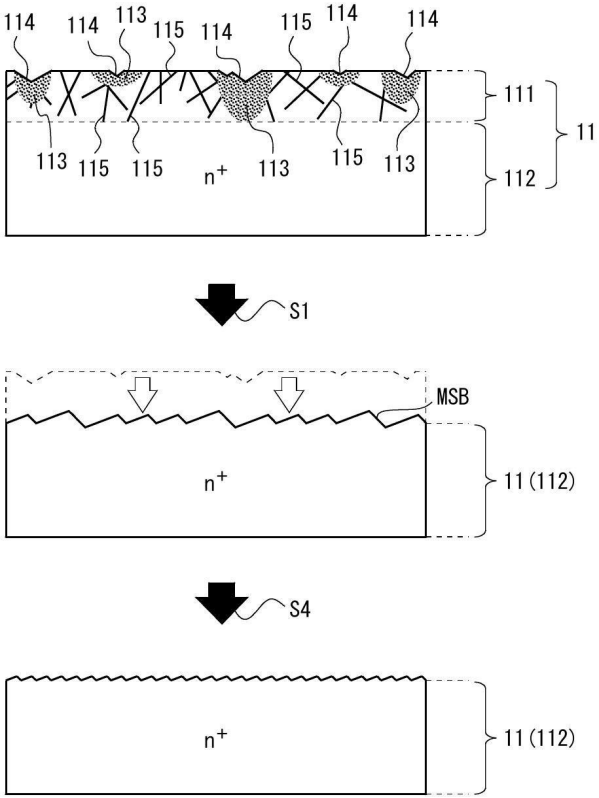


40

【図 3】



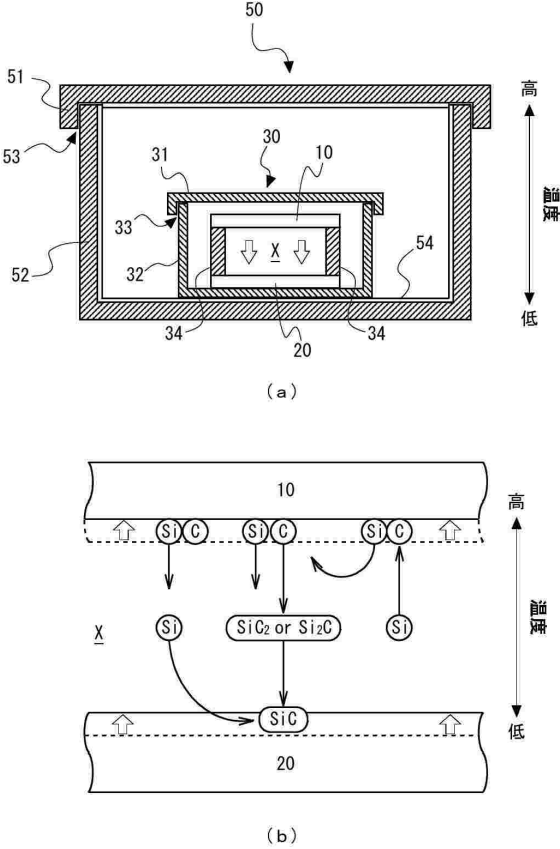
【図 4】



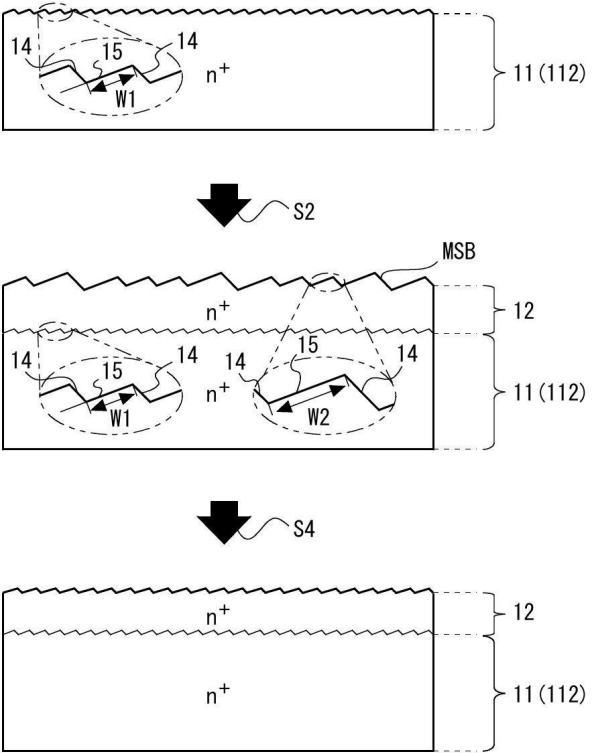
10

20

【図 5】



【図 6】

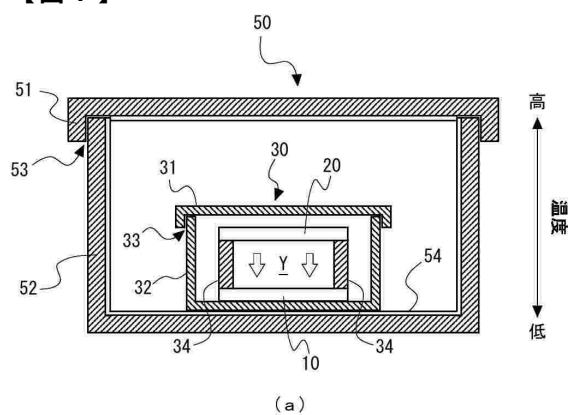


30

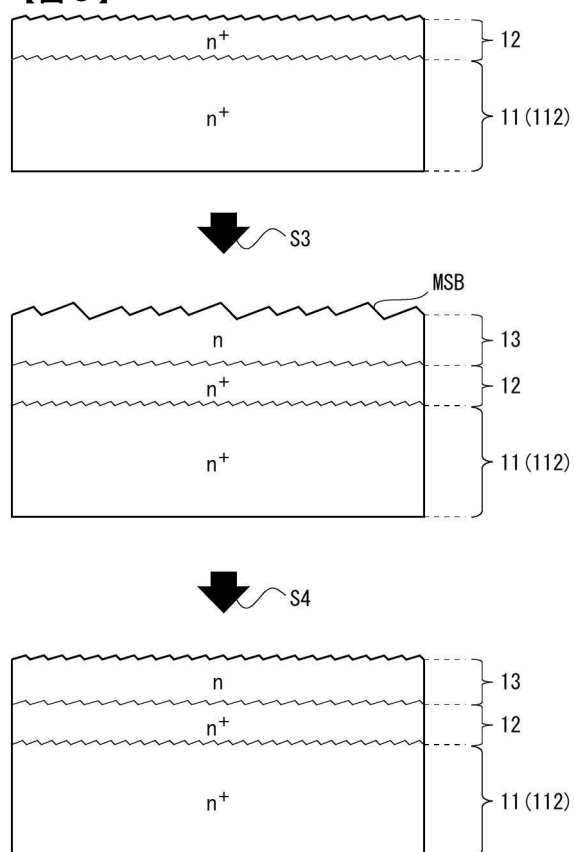
40

50

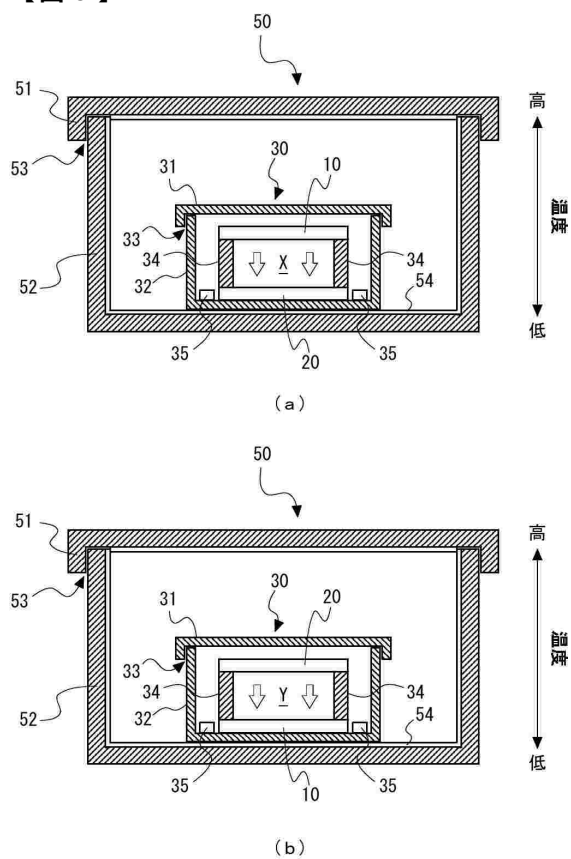
【圖 7】



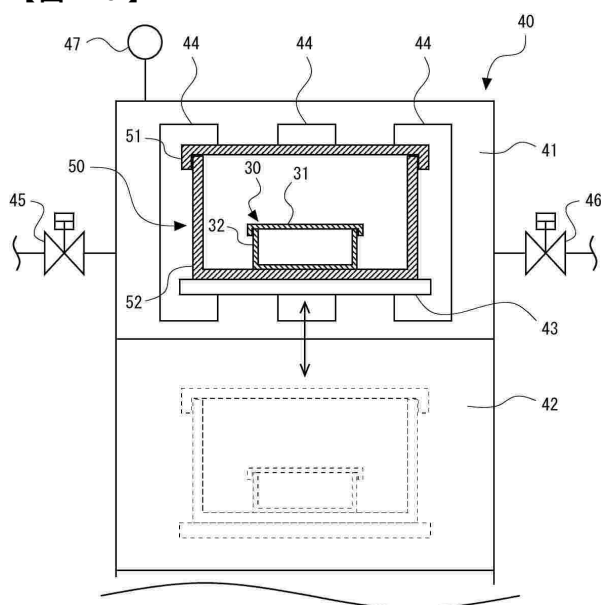
【圖 8】



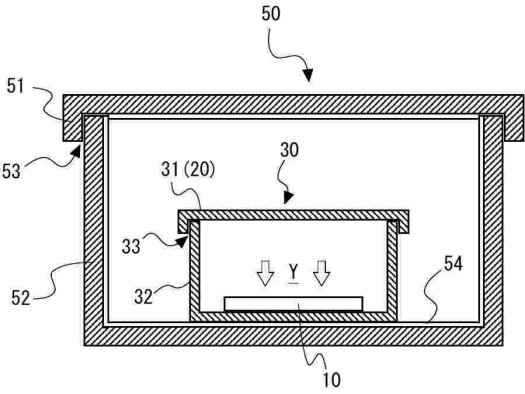
【図 9】



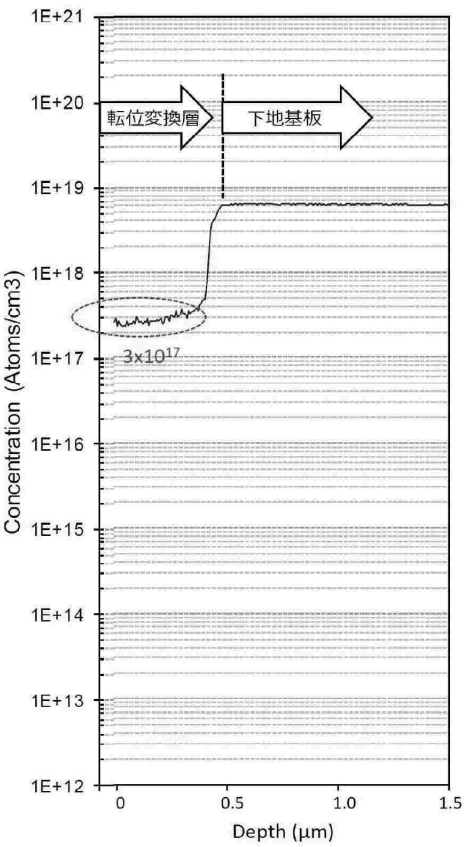
【図 10】



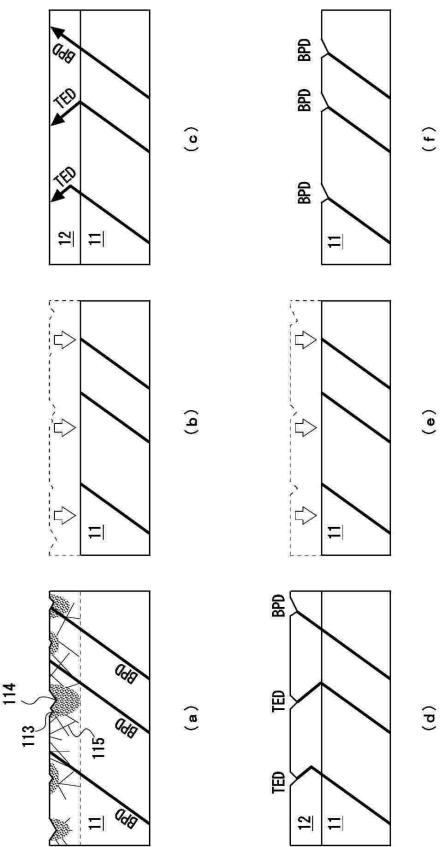
【図 1 1】



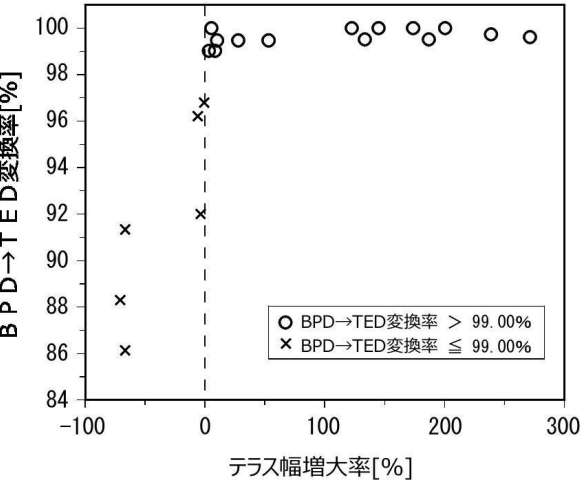
【図 1 2】



【図 1 3】



【図 1 4】



10

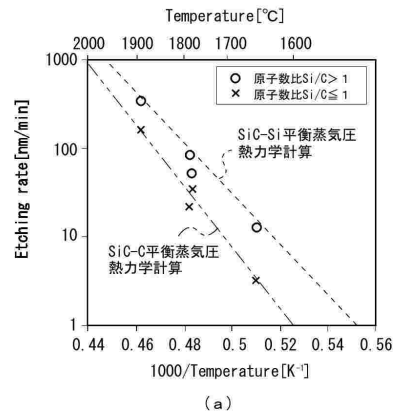
20

30

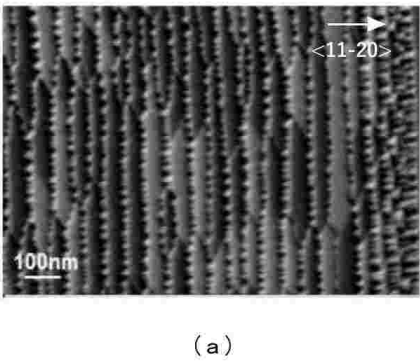
40

50

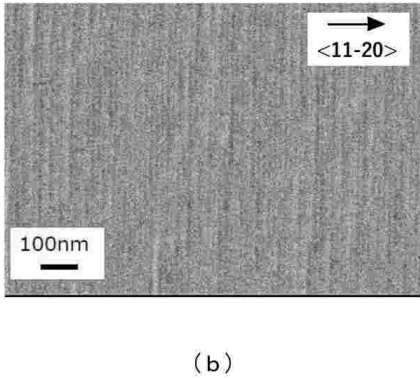
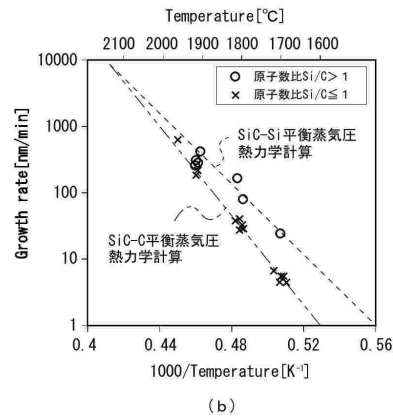
【図 1 5】



【図 1 6】

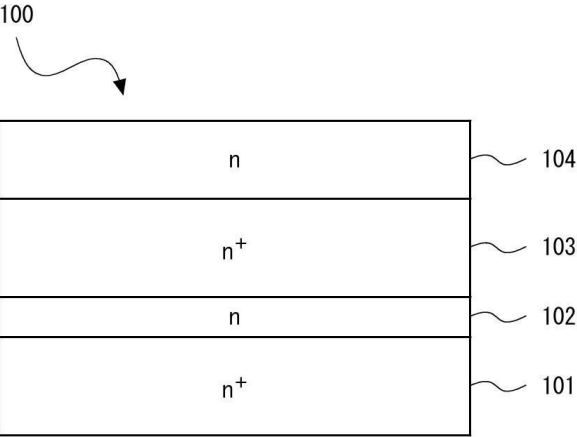


10



20

【図 1 7】



30

40

50

フロントページの続き

- (56)参考文献 国際公開第2018/150861 (WO, A1)
国際公開第2017/018533 (WO, A1)
特開2018-113303 (JP, A)
特開2015-002207 (JP, A)
OHNO, T. 他, Influence of growth conditions on basal plane dislocation in 4H-SiC epitaxial layer, Journal of Crystal Growth, 2004年09月13日, vol. 271, pp. 1 - 7, doi:10.1016/j.jcrysgro.2004.04.044
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
C30B 29/36
C30B 25/20
H01L 21/205