

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7137557号

(P7137557)

(45)発行日 令和4年9月14日(2022.9.14)

(24)登録日 令和4年9月6日(2022.9.6)

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 L 21/205 (2006.01)

H 0 1 L 21/205

C 3 0 B 29/38 (2006.01)

C 3 0 B 29/38

D

C 3 0 B 25/02 (2006.01)

C 3 0 B 25/02

Z

C 3 0 B 23/08 (2006.01)

C 3 0 B 23/08

M

C 2 3 C 16/34 (2006.01)

C 3 0 B 23/08

Z

請求項の数 21 (全20頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2019-512274(P2019-512274)

(73)特許権者 502209109

(86)(22)出願日 平成29年8月31日(2017.8.31)

アイキューイー ピーエルシー

(65)公表番号 特表2019-532500(P2019-532500
A)

I Q E p l c

イギリス国 シーエフ3 0エルダブリュ

ー カーディフ, セント メロンズ, パ

スカル クローズ

(43)公表日 令和1年11月7日(2019.11.7)

(86)国際出願番号 PCT/US2017/049783

(87)国際公開番号 WO2018/045251

(74)代理人 100078282

(87)国際公開日 平成30年3月8日(2018.3.8)

弁理士 山本 秀策

審査請求日 令和2年8月28日(2020.8.28)

(74)代理人 100113413

(31)優先権主張番号 15/256,170

弁理士 森下 夏樹

(32)優先日 平成28年9月2日(2016.9.2)

(74)代理人 100181674

(33)優先権主張国・地域又は機関

弁理士 飯田 貴敏

米国(US)

(74)代理人 100181641

前置審査

弁理士 石川 大輔

(74)代理人 230113332

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 I I I 族窒化物構造の成長のための核生成層

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

半導体であって、前記半導体は、

基板と、

前記基板を覆っている核生成層であって、前記核生成層は、深準位ドーパントを有する、核生成層と、

前記核生成層を覆って形成される I I I - V 層と

を備え、

前記基板および前記核生成層のうちの少なくとも1つは、イオン化された汚染物質を含み、

前記深準位ドーパントの濃度は、少なくとも前記イオン化された汚染物質の濃度と同程度に高く、

前記イオン化された汚染物質は、第 I I I 族種またはイオン化アクセプタ汚染物質のうちの少なくとも1つを備えている、半導体。

【請求項2】

前記基板は、基板材料を備え、

前記深準位ドーパントは、前記基板材料の伝導帯および価電子帯から 0 . 3 e V ~ 0 . 6 e V 分離されている深準位状態を有する深準位ドーパント種を備えている、請求項1に記載の半導体。

【請求項3】

前記基板と前記核生成層との間にヘテロ構造をさらに備える、請求項 1 または請求項 2 のいずれか一項に記載の半導体。

【請求項 4】

前記深準位ドーパントは、バナジウム、鉄、または、硫黄のうちの少なくとも 1 つを備えている、請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載の半導体。

【請求項 5】

前記深準位ドーパントの濃度は、 $10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ または $10^{16} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である、請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載の半導体。

【請求項 6】

前記基板内および前記核生成層内の自由正孔の濃度は、 10^{16} cm^{-3} 未満または 10^{15} cm^{-3} 未満である、請求項 1 ~ 5 のいずれか一項に記載の半導体。

10

【請求項 7】

前記核生成層の厚さは、 $1 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$ 、 $10 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 、または、 $100 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ である、請求項 1 ~ 6 のいずれか一項に記載の半導体。

【請求項 8】

前記基板に最も近い前記核生成層の表面における前記深準位ドーパントの第 1 の濃度は、前記 III - V 層に最も近い表面における前記深準位ドーパントの第 2 の濃度より高い、請求項 1 ~ 7 のいずれか一項に記載の半導体。

【請求項 9】

前記基板は、基板材料を備え、

20

前記基板材料は、シリコンである、請求項 1 ~ 8 のいずれか一項に記載の半導体。

【請求項 10】

前記 III - V 層は、III 族窒化物層である、請求項 1 ~ 9 のいずれか一項に記載の半導体。

【請求項 11】

半導体を成長させる方法であって、前記方法は、

基板を覆って核生成層を成長させることであって、前記核生成層は、深準位ドーパントを有する、ことと、

前記核生成層を覆って III - V 層を成長させることと

を含み、

30

前記基板および前記核生成層のうちの少なくとも 1 つは、イオン化された汚染物質を含み、

前記深準位ドーパントの濃度は、少なくとも前記イオン化された汚染物質の濃度と同程度に高く、

前記イオン化された汚染物質は、第 III 族種またはイオン化アクセプタ汚染物質のうちの少なくとも 1 つを備えている、方法。

【請求項 12】

前記基板は、基板材料を備え、

前記深準位ドーパントは、前記基板材料の伝導帯および価電子帯から $0.3 \text{ eV} \sim 0.6 \text{ eV}$ 分離されている深準位状態を有する深準位ドーパント種を備えている、請求項 11 に記載の方法。

40

【請求項 13】

前記基板と前記核生成層との間にヘテロ構造を成長させることをさらに含む、請求項 11 または請求項 12 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 14】

前記深準位ドーパントは、バナジウム、鉄、または、硫黄のうちの少なくとも 1 つを備えている、請求項 11 ~ 13 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 15】

前記深準位ドーパントの濃度は、 $10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ または $10^{16} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である、請求項 11 ~ 14 のいずれか一項に記載の方法。

50

【請求項 16】

前記基板内および前記核生成層内の自由正孔の濃度は、 10^{16} cm^{-3} 未満または 10^{15} cm^{-3} 未満である、請求項 11 ~ 15 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 17】

前記核生成層の厚さは、 $1 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$ 、 $10 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 、または、 $100 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ である、請求項 11 ~ 16 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 18】

前記基板に最も近い前記核生成層の表面における前記深準位ドーパントの第 1 の濃度は、前記 III - V 層に最も近い表面における前記深準位ドーパントの第 2 の濃度より高い、請求項 11 ~ 17 のいずれか一項に記載の方法。

10

【請求項 19】

前記基板は、基板材料を備え、

前記基板材料は、シリコンである、請求項 11 ~ 18 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 20】

前記 III - V 層は、III 族窒化物層である、請求項 11 ~ 19 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 21】

有機金属気相成長法、分子ビームエピタキシ、ハライド気相エピタキシ、または、物理蒸着によって、前記核生成層および III - V 層を成長させることを含む、請求項 11 ~ 20 のいずれか一項に記載の方法。

20

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

(関連出願の引用)

本願は、米国特許出願第 15 / 256 , 170 号 (2016 年 9 月 2 日出願) に対する優先権を主張し、上記出願の全内容は、参照により本明細書に引用される。

【背景技術】**【0002】**

高抵抗シリコン (Si) 上で成長させられる高電子移動度トランジスタ (HEMT) は、製作中の汚染に起因する劣化した性能を有し得る。III 族窒化物層が、HEMT 構造内での使用のために高抵抗 Si 基板上で成長させられるとき、アクセプタ汚染物質種が、Si 基板の表面上に堆積および / またはそれに拡散し、アクセプタのイオン化時に p 型領域がそこに生じることを引き起こし得る。p 型領域は、高自由正孔濃度を有し、寄生導電性チャネルをもたらす。寄生チャネルは、高周波数におけるトランジスタ性能を低減させる寄生容量をもたらす。

30

【0003】

加えて、Si 基板の表面は、酸素、炭素、および他の元素で汚染され得る。汚染物質および不純物は、チャンバ壁から脱着した後に基板の表面上に堆積される種、環境内に存在する種から生じる偶発的な炭素含有種、および / または、周囲環境内に存在する酸素による基板の酸化から結果として生じる自然酸化物を含み得る。これらの汚染物質および不純物は、Si 層と III 族窒化物層との間の非常に欠陥のある界面の形成につながり得る。この表面汚染および関連する欠陥は、後続の III 族窒化物エピタキシャル層ならびに構造の品質を低減させ得る。この低減させられた品質は、特に高電圧および高電流条件において、低減させられた電子移動度をもたらす、トランジスタ性能を劣化させる。

40

【発明の概要】**【課題を解決するための手段】****【0004】**

故に、III - V および III 族窒化物構造の成長のための核生成層および核生成層を成長させる方法が、本明細書に説明される。半導体は、基板と、基板を覆う核生成層とを含み得る。核生成層は、深準位ドーパントを含み得る。半導体は、核生成層を覆って形成

50

されるⅠⅠⅠ-V層を含み得る。基板および核生成層のうちの少なくとも1つは、イオン化された汚染物質を含み得る。加えて、深準位ドーパントの濃度は、少なくともイオン化された汚染物質の濃度と同程度に高い。

【0005】

基板は、基板材料を含み得、深準位ドーパントは、基板材料の伝導帯および価電子帯から0.3 eV ~ 0.6 eV分離された深準位状態を有する深準位ドーパント種を含み得る。半導体は、基板と核生成層との間にヘテロ構造を含み得る。

【0006】

深準位ドーパントは、バナジウム、鉄、硫黄、および他の化学元素のうちの1つ以上のものを含み得る。イオン化された汚染物質は、第ⅠⅠⅠ族種を含み得る。イオン化された汚染物質は、イオン化アクセプタ汚染物質を含み得る。

10

【0007】

深準位ドーパントの濃度は、 $10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ および/または $10^{16} \text{ cm}^{-3} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であり得る。基板内および核生成層内の自由正孔の濃度は、 10^{16} cm^{-3} 未満および/または 10^{15} cm^{-3} 未満であり得る。

【0008】

核生成層の厚さは、1 nm ~ 100 nm、10 nm ~ 1 μm、および/または 100 nm ~ 10 μm であり得る。

【0009】

基板に最も近い核生成層の表面における深準位ドーパントの第1の濃度は、ⅠⅠⅠ-V層に最も近い表面における深準位ドーパントの第2の濃度より高くあり得る。基板材料は、シリコンであり得る。ⅠⅠⅠ-V層は、ⅠⅠⅠ族窒化物層であり得る。

20

【0010】

核生成層およびⅠⅠⅠ-V層は、有機金属気相成長法、分子ビームエピタキシ、ハライド気相エピタキシ、および物理蒸着のうちの1つ以上のものによって成長させられ得る。本発明は、例えば、以下を提供する。

(項目1)

半導体であって、前記半導体は、

基板と、

前記基板を覆っている核生成層であって、前記核生成層は、深準位ドーパントを有する、核生成層と、

30

前記核生成層を覆って形成されるⅠⅠⅠ-V層とを備え、

前記基板および前記核生成層のうちの少なくとも1つは、イオン化された汚染物質を含み、

前記深準位ドーパントの濃度は、少なくとも前記イオン化された汚染物質の濃度と同程度に高い、半導体。

(項目2)

前記基板は、基板材料を備え、

前記深準位ドーパントは、前記基板材料の伝導帯および価電子帯から0.3 eV ~ 0.6 eV分離されている深準位状態を有する深準位ドーパント種を備えている、項目1に記載の半導体。

40

(項目3)

前記基板と前記核生成層との間にヘテロ構造をさらに備える、項目1に記載の半導体。

(項目4)

前記深準位ドーパントは、バナジウムを備えている、項目1に記載の半導体。

(項目5)

前記深準位ドーパントは、鉄を備えている、項目1に記載の半導体。

(項目6)

前記深準位ドーパントは、硫黄を備えている、項目1に記載の半導体。

50

(項目 7)

前記イオン化された汚染物質は、第Ⅲ族種を備えている、項目 1 に記載の半導体。

(項目 8)

前記イオン化された汚染物質は、イオン化アクセプタ汚染物質を備えている、項目 1 に記載の半導体。

(項目 9)

前記深準位ドーパントの濃度は、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である、項目 1 に記載の半導体。

(項目 10)

前記深準位ドーパントの濃度は、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \sim 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である、項目 1 に記載の半導体。

10

(項目 11)

前記基板内および前記核生成層内の自由正孔の濃度は、 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 未満である、項目 1 に記載の半導体。

(項目 12)

前記基板内および前記核生成層内の自由正孔の濃度は、 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 未満である、項目 1 に記載の半導体。

(項目 13)

前記核生成層の厚さは、 $1 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$ である、項目 1 に記載の半導体。

(項目 14)

前記核生成層の厚さは、 $10 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ である、項目 1 に記載の半導体。

20

(項目 15)

前記核生成層の厚さは、 $100 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ である、項目 1 に記載の半導体。

(項目 16)

前記基板に最も近い前記核生成層の表面における前記深準位ドーパントの第 1 の濃度は、前記Ⅲ-V層に最も近い表面における前記深準位ドーパントの第 2 の濃度より高い、項目 1 に記載の半導体。

(項目 17)

前記基板材料は、シリコンである、項目 1 に記載の半導体。

(項目 18)

前記Ⅲ-V層は、Ⅲ族窒化物層である、項目 1 に記載の半導体。

30

(項目 19)

半導体を成長させる方法であって、前記方法は、

基板を覆って核生成層を成長させることであって、前記核生成層は、深準位ドーパントを有する、ことと、

前記核生成層を覆ってⅢ-V層を成長させることとを含み、

前記基板および前記核生成層のうちの少なくとも 1 つは、イオン化された汚染物質を含み、

前記深準位ドーパントの濃度は、少なくとも前記イオン化された汚染物質の濃度と同程度に高い、方法。

40

(項目 20)

前記基板は、基板材料を備え、

前記深準位ドーパントは、前記基板材料の伝導帯および価電子帯から $0.3 \text{ eV} \sim 0.6 \text{ eV}$ 分離されている深準位状態を有する深準位ドーパント種を備えている、項目 19 に記載の方法。

(項目 21)

前記基板と前記核生成層との間にヘテロ構造を成長させることをさらに含む、項目 19 に記載の方法。

(項目 22)

50

前記深準位ドーパントは、バナジウムを備えている、項目 19 に記載の方法。

(項目 23)

前記深準位ドーパントは、鉄を備えている、項目 19 に記載の方法。

(項目 24)

前記深準位ドーパントは、硫黄を備えている、項目 19 に記載の方法。

(項目 25)

前記イオン化された汚染物質は、第 III 族種を備えている、項目 19 に記載の方法。

(項目 26)

前記イオン化された汚染物質は、イオン化アクセプタ汚染物質を備えている、項目 19 に記載の方法。

(項目 27)

前記深準位ドーパントの濃度は、 $1.0 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-3}$ である、項目 19 に記載の方法。

(項目 28)

前記深準位ドーパントの濃度は、 $1.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$ である、項目 19 に記載の方法。

(項目 29)

前記基板内および前記核生成層内の自由正孔の濃度は、 $1.0 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-3}$ 未満である、項目 19 に記載の方法。

(項目 30)

前記基板内および前記核生成層内の自由正孔の濃度は、 $1.0 \times 10^{-15} \text{ cm}^{-3}$ 未満である、項目 19 に記載の方法。

(項目 31)

前記核生成層の厚さは、 $1 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$ である、項目 19 に記載の方法。

(項目 32)

前記核生成層の厚さは、 $10 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ である、項目 19 に記載の方法。

(項目 33)

前記核生成層の厚さは、 $100 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ である、項目 19 に記載の方法。

(項目 34)

前記基板に最も近い前記核生成層の表面における前記深準位ドーパントの第 1 の濃度は、前記 III - V 層に最も近い表面における前記深準位ドーパントの第 2 の濃度より高い、項目 19 に記載の方法。

(項目 35)

前記基板材料は、シリコンである、項目 19 に記載の方法。

(項目 36)

前記 III - V 層は、III 族窒化物層である、項目 19 に記載の方法。

(項目 37)

前記核生成層および III - V 層を有機金属気相成長法によって成長させることを含む、項目 19 に記載の方法。

(項目 38)

前記核生成層および前記 III - V 層を分子ビームエピタキシによって成長させることを含む、項目 19 に記載の方法。

(項目 39)

前記核生成層および前記 III - V 層をハライド気相エピタキシによって成長させることを含む、項目 19 に記載の方法。

(項目 40)

前記核生成層および前記 III - V 層を物理蒸着によって成長させることを含む、項目 19 に記載の方法。

【図面の簡単な説明】

【0011】

10

20

30

40

50

その性質およびその種々の利点を含む本開示の上記および他の特徴は、付随する図面と併せて以下の発明を実施するための形態を考慮すると、より明白であろう。

【0012】

【図1】図1は、例証的実装による有機金属気相成長法(MOCVD)を使用する補償型核生成層の初期成長を描写する。

【0013】

【図2】図2は、例証的実装による図1に描写された初期核生成の後のある時点におけるエピタキシャル核生成層の形成を描写する。

【0014】

【図3】図3は、例証的実装による図2に描写された時間の後のある時点における基板上のIII族窒化物層の形成を描写する。

10

【0015】

【図4】図4は、例証的実装による本明細書に説明される方法を使用して製造された半導体を描写する。

【0016】

【図5】図5は、例証的実装による高電子移動度トランジスタ(HEMT)を製造するために使用され得るIII族窒化物層を伴う半導体を描写する。

【0017】

【図6】図6は、例証的実装による本明細書に説明される方法を使用して製造されたHEMTを描写する。

20

【0018】

【図7】図7は、例証的実装による補償深準位ドーパントを含む核生成層を伴う半導体を成長させる方法のフローチャートを描写する。

【発明を実施するための形態】

【0019】

本明細書に説明されるシステム、デバイス、および方法は、とりわけ、改良された性能を達成し得る核生成層を有する半導体を含む。理論または提案される作用メカニズムによって拘束されるわけではないが、明確化および指示の目的のために、核生成層が、少なくとも2つの方法で寄生チャネルおよび汚染によって引き起こされる問題を軽減し得ることに留意されたい。第1に、核生成層を深準位ドーパント種でドーブすることは、イオン化アクセプタドーパントによって生成される自由正孔を補償し得る。第2に、核生成層の成長は、基板表面を清浄にし得、核生成層は、汚染物質および不純物ならびに転位等の関連する欠陥を物理的に埋め得る。半導体は、半導性、導電性、および絶縁性材料を含み得る。半導体は、1つ以上のブランケット層で被覆されるウエハ、1つ以上のパターン化された層を伴うウエハ、金属相互接続を伴うウエハ、機能するトランジスタを伴うウエハ、集積回路を伴うウエハ、ダイもしくは複数のダイ等のウエハの1つ以上の分離された部分、およびパッケージ化されたダイまたは複数のダイを含み得る。

30

【0020】

本明細書に説明されるシステム、デバイス、および方法は、いかなる特定の作用メカニズムにも限定されないが、明確化の目的のために、深準位ドーパントが、深準位トラップとしての役割を果たし得、基板表面上に堆積し、またはそれに拡散するイオン化アクセプタドーパントを補償し得ることに留意されたい。深準位トラップとして、深準位ドーパントは、再結合中心を提供し、イオン化アクセプタ汚染物質によって引き起こされる自由正孔を捕捉し、局所に制限する。正孔は、深準位ドーパントに拘束され、基板または核生成層全体を通して局所から解放されない(自由ではない)。この捕捉は、基板の表面近傍の自由正孔濃度を低下させ、領域をより抵抗性にする理解される。

40

【0021】

明確化の目的のために、核生成層が、基板の上面上に堆積する汚染物質および不純物、または基板と反応したそれらを物理的に埋め得ることも、理解かつ留意されたい。核生成層の成長の前およびその間に生じる(典型的には、H₂ガスを含む)還元雰囲気は、炭素

50

および酸素を含む汚染物質および不純物の一部または全てを除去すると理解されるが、核生成層は、残存するいかなる汚染物質および不純物も埋める。加えて、核生成層は、十分に厚いことが可能であり、それによって、転位は、その中で終端し、核生成層の上側表面は、低減した転位密度を有する。汚染物質、不純物、およびそれらが引き起こす転位を埋めることによって、核生成層が、後続のⅢ族窒化物層の成長のための清浄な表面を提供することを理解されたい。Ⅲ族窒化物層は、第Ⅲ族種と、窒素とを備えている層である。第Ⅲ族種は、B、Al、Ga、In、およびTlを含む、元素周期表の第Ⅲ族内の1つ以上の元素を含み得る。Ⅲ族窒化物層は、複数の第Ⅲ族元素を含む、化合物であり得る。Ⅲ族窒化物層は、 GaN 等の二元化合物、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) および $In_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) 等の三元化合物、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x, y < 1$) 等の四元化合物、ならびに $Ga_xIn_{(1-x)}As_ySb_zN_{(1-y-z)}$ ($0 < x, y, z < 1$) 等の五元化合物を含み得る。Ⅲ族窒化物層は、ドーピングされていないこと、非意図的にドーピングされていること、またはドナーもしくはアクセプタドーパントでドーピングされていることができる。本開示全体を通して、Ⅲ族窒化物層は、Ⅲ-V層の例として詳細に説明される。しかしながら、Ⅲ族窒化物材料は、Ⅲ-V材料の一部にすぎず、本明細書でⅢ族窒化物層および材料として説明される層および材料は、他のⅢ-V層および材料と置換されることができる。Ⅲ-V層および材料は、(上でリストアップされる例等の) 元素周期表の第Ⅲ族からの1つ以上の種と、(N、P、As、Sb、およびBi等の) 元素周期表の第Ⅴ族からの1つ以上の種とを含む。図4を参照して後に説明されるように、他のⅢ-V材料の例は、 $GaAs$ 、 InP 、 $InAs$ 、 $InSb$ 、 $InGaAs$ 、 $GaAsP$ 、 $InGaAsP$ 等のうちの1つ以上のものを含む。

【0022】

図1は、有機金属気相成長法(MOCVD)を使用する補償型核生成層の初期成長を描写する。図1は、基板102、チャンバ壁104、チャンバ壁104上の残留層114、および前駆体入口106を描写する。基板102は、Ⅲ族窒化物材料の成長のために使用される任意の基板であり得る。基板102は、シリコン基板、高抵抗シリコン基板、シリコン・オン・インシュレータ(SOI)基板、および/または上面がシリコンを備えている任意のタイプの複合基板であり得る。上記基板および他の基板は、ドーピングされていないか、非意図的にドーピングされているか、またはドナーもしくはアクセプタドーパントでドーピングされている単結晶ウエハを含み得る。高抵抗シリコン基板の例では、基板は、1,000オームセンチメートルを上回る、2,000オームセンチメートルを上回る、3,000オームセンチメートルを上回る、6,000オームセンチメートルを上回る、または10,000オームセンチメートルを上回る抵抗率を有し得る。基板102は、Ⅲ族窒化物材料のエピタキシャル成長を促進するためのシリコン(111)基板であり得るか、または、基板102は、シリコン(100)等の別の結晶配向を有するシリコンを含み得る。

【0023】

前駆体入口106は、シリコンおよびⅢ族窒化物層を基板102上に堆積させるために要求される種々の前駆体を注入する前駆体送達システムを図式的に表す。図1に描写されるように、前駆体注入器106が、気相シリコン前駆体120および気相ドーパント前駆体121を注入している。

【0024】

チャンバ壁104の温度を上昇させることは、残留層114の成分が気相汚染物質種116として脱着することを引き起こすと理解される。残留層114は、堆積システムの以前の動作中にチャンバ壁104上に堆積されたⅢ族窒化物材料であり得る。したがって、汚染物質種116は、シリコン内でp型ドーパントとして作用するであろう第Ⅲ族種であり得る。気相種120、121、および116の一部が、それぞれ、表面種124、125、および118として基板102上に堆積する。表面種124、125、および118は、物理吸着または化学吸着され得、亀裂が入っていることも、亀裂が入ってい

ないこともある。シリコン表面種 1 2 4 は、基板 1 0 2 の表面上の優勢種であるが、ドーパント表面種 1 2 5 および汚染物質表面種 1 1 8 は、その後に基板 1 0 2 上で成長させられる膜のドープレベルに影響を及ぼすために十分に高い濃度で存在する。いくつかの例では、気相前駆体種 1 2 1 の前駆体注入器 1 0 6 からの流動は、基板 1 0 2 上のドーパント種 1 2 5 の濃度が、基板 1 0 2 上の汚染物質種 1 1 8 の濃度と実質的に同一であるように調節される。その後に堆積される層からの拡散が予期される場合、気相前駆体種 1 2 1 の流動は、汚染物質種 1 1 8 の濃度より高いドーパント種 1 2 1 の濃度をもたらすように調節され得る。加えて、シリコン前駆体種 1 2 0 およびドーパント種 1 2 1 の一部が、それぞれ、表面種 1 2 2 および 1 2 3 として残留層 1 1 4 上に堆積する。

【 0 0 2 5 】

シリコン前駆体種 1 2 0 は、1 つ以上のシリコン C V D 前駆体を含み得る。シリコン C V D 前駆体の例は、シラン、ジシラン、トリシラン、ジクロロシラン、トリクロロシラン、メチルシラン、ジ第三級ブチルシラン、四塩化ケイ素、4 フッ化ケイ素、四臭化ケイ素、テトラエトキシシラン、ケイ素元素、および高次シラン類ならびにクロロシラン類を含む。

【 0 0 2 6 】

ドーパント種 1 2 1 は、深準位ドーパントを送達する 1 つ以上の C V D 前駆体を含み得る。深準位ドーパントの例は、硫黄、セレン、バナジウム、鉄、タンタル、テルル、クロム、マンガン、または他の化学元素を含む。硫黄を送達する C V D 前駆体の例は、硫化水素 (H_2S)、ジ - t e r t - ブチルスルフィド、ビス (トリメチルシリル) スルフィド、(R) - (+) - t - ブチルスルフィンアミド、ジエチルスルフィド、ポリプロピレンスルフィド、ジイソプロピルスルフィド、硫黄元素、および有機物、シクロペンタジエニル類、アミン類、アミニデート類、ハロゲン化合物、ならびに硫黄を含む芳香族化合物を含む。

【 0 0 2 7 】

セレンを送達する C V D 前駆体の例は、セレン化水素 (H_2Se)、ジメチルセレニド、ジ - t e r t - ブチルセレニド、セレン元素、およびセレンを含む他の化学化合物を含む。

【 0 0 2 8 】

バナジウムを送達する C V D 前駆体の例は、ビス (シクロペンタジエニル) バナジウム (I I)、バナジウム (V) オキシトリイソプロポキシド、テトラキス (ジメチルアミノ) バナジウム (I V)、テトラキス (ジエチルアミノ) バナジウム (I V)、バナジウム元素、および有機金属類、ならびにシクロペンタジエニル類、アミン類、アミニデート類、ハロゲン化合物、およびバナジウムを含む芳香族化合物を含む。

【 0 0 2 9 】

鉄を送達する C V D 前駆体の例は、(フェロセンとしてとしても公知である) ビス (シクロペンタジエニル) 鉄、ブチルフェロセン、ジクロロホスフィノフェロセン、エチルフェロセン、鉄元素、およびシクロペンタジエニル類、アミン類、アミニデート類、ハロゲン化合物、バナジウム元素、ならびに鉄を含む芳香族化合物を含む。

【 0 0 3 0 】

汚染物質種 1 1 8 の例は、ホウ素、アルミニウム、ガリウム、インジウム、タリウム、および窒素を含む。

【 0 0 3 1 】

図 2 は、図 1 に描写された初期核生成の後のある時点におけるエピタキシャル核生成層 2 3 6 の形成を描写する。図 1 に描写される表面種 1 2 4、1 2 5、および 1 1 8 は、核生成層 2 3 6 に合体している。核生成層 2 3 6 は、基板 1 0 2 と格子整合した、または少なくともそれと疑似形態であるエピタキシャル層である。核生成層 2 3 6 は、シリコン層であり得る。基板 1 0 2 がシリコン基板である場合、および / または基板材料としてシリコンを含む場合、核生成層 2 3 6 は、ホモエピタキシャルシリコン層であり得る。ホモエピタキシは、少なくとも同一材料の上面を有する基板上での材料のエピタキシャル成長を

10

20

30

40

50

指す。しかしながら、ホモエピタキシャル層は、下方の材料と異なる（ドーパント種および濃度等の）ドーパ特性を含み得る。核生成層 236 は、表面種 124、125、および 118 の組み込みからそれぞれ結果として生じるシリコン 225、深準位ドーパント種 227、およびイオン化アクセプタ汚染物質種 226 を含む。イオン化アクセプタ汚染物質種 226 は、B、Al、Ga、In、および Tl 等の第 III 族種を含み得る。深準位ドーパント種 227 は、S、Se、V、Fe、Ta、Te、Cr、Mn、および他の化学元素のうちの 1 つ以上のものを含み得る。深準位ドーパント種 227 およびイオン化アクセプタ汚染物質種 226 は、格子間不純物または置換型不純物であり得る。いくつかの例では、種 226 および 227 の一方または両方は、堆積されると格子間不純物であり、焼鈍の後、置換型不純物になる。焼鈍は、堆積チャンバ内または別個のチャンバ内で生じ得る。

10

【0032】

高抵抗シリコンウエハを基板 102 として使用するとき、p 型ドーパントの汚染物質種 118 としての存在が、基板 102 の p 型ドーパにつながり得る。この p 型ドーパから結果として生じる自由正孔は、基板 102 内での低抵抗（高移動度）寄生チャネルの形成につながり得る。しかしながら、ドーパント種 121 として深準位ドナー状態を含む深準位ドーパントを供給することは、自由正孔を捕捉し、したがって、p 型ドーパを補償する深準位ドーパント種 227 をもたらす。深準位ドーパント種 227 の濃度が、少なくともイオン化アクセプタ汚染物質種 226 の濃度と同程度に高いとき、深準位ドーパント種 227 は、イオン化アクセプタ汚染物質種 226 によって生成された自由正孔を補償し、寄生チャネルの形成を防止し、基板 102 の高抵抗率を維持する。

20

【0033】

本明細書に説明されるように、深準位ドーパントおよびアクセプタ汚染物質の両方の電気活性度は、約 1 である。種の電気活性度は、イオン化されるその種の原子の割合を指す。したがって、アクセプタおよび深準位ドーパントのほぼ全てが、イオン化され、イオン化アクセプタまたは深準位ドーパントの濃度は、アクセプタ汚染物質種または深準位ドーパントの濃度とほぼ同等である。しかしながら、いくつかの例では、深準位ドーパントおよび/またはアクセプタの電気活性度は、1 未満である。これらの例では、イオン化された深準位ドーパントの濃度は、少なくともイオン化アクセプタの濃度と同程度に高い。ドーパントおよび電荷キャリアの濃度は、時として、電子 cm^{-3} 、正孔 cm^{-3} 、または原子 cm^{-3} の単位で表されるが、より多くの場合、同じ数量を参照する一が、粒子の名称が省略され、そのような濃度は、単純に cm^{-3} の単位で表される。少なくともイオン化アクセプタ汚染物質種の濃度と同程度に高い深準位ドーパント種の濃度は、イオン化アクセプタ汚染物質種の濃度より 10% 超低い、それより約 10% 低い、それより約 5% 低い、それとほぼ等しい、それより約 5% 上回る、それより約 10% 上回る、またはそれより 10% 超上回る深準位ドーパント種の濃度を含み得る。

30

【0034】

イオン化アクセプタ汚染物質種の濃度が、深準位ドーパント種の濃度より高い場合、核生成層および基板の近傍部分内の自由正孔濃度は、イオン化アクセプタ汚染物質種の濃度と深準位ドーパント種の濃度との間の差であるであろう。したがって、イオン化アクセプタ汚染物質種の濃度より 10% 低い深準位ドーパント種の濃度は、深準位ドーパントのない半導体と比較して、自由正孔濃度の 1 桁の低減をもたらすであろう。

40

【0035】

深準位ドーパント種の濃度が、イオン化アクセプタ汚染物質種の濃度と正確に等しい場合、完全に補償される条件が、存在し、核生成層および基板の近傍部分内の自由正孔および電子濃度は、熱的に生成されるキャリアのみに起因して、ごくわずかであろう。

【0036】

深準位ドーパント種の濃度が、イオン化アクセプタ汚染物質種の濃度より高い場合にも、完全に補償される条件が、存在し、核生成層および基板の近傍部分内の自由正孔および電子濃度も、熱的に生成されるキャリアのみに起因して、ごくわずかであろう。深準位ドーパント種は、シリコンの伝導帯または価電子帯のいずれか一方からの数倍の kT （最高

50

0.3 ~ 0.6 eV) 内でいかなる電子エネルギー状態も有していないので、完全に補償される条件における熱的に生成されるキャリアの濃度は、ごくわずかである。ここで、 k は、ボルツマン定数を指し、 T は、ケルビンにおける半導体の温度を指す。

【0037】

図2に描写される時点において、表面種122および123は、残留層114を被覆する残留層228に合体している。残留層228は、シリコン材料229と、ドーパント種233とを含む。

【0038】

気相前駆体種120および121は、基板102に進行し続け、それぞれ、表面種224および225として堆積する。加えて、気相種120および121は、壁104に進行し、それぞれ、表面種222および223として残留層228上に堆積する。

【0039】

残留層228は、成長条件に起因して高温状態にあり、したがって、その成分種の一部が、シリコン種230およびドーパント種231として脱着する。脱着種230および231も、基板102に進行し、表面種として堆積し得る。しかしながら、残留層228が残留層114を被覆するので、汚染物質種116等の汚染物質種は、脱着しない。したがって、残留層228が形成すると、第III族元素等のさらなるp型ドーパントが基板102上に堆積することを防止する。さらに、深準位ドーパント種227の濃度が、少なくともイオン化アクセプタ汚染物質種226の濃度と同程度に高いので、基板102は、寄生チャネルを含まない。

【0040】

図3は、図2に描写された時間の後のある時点における基板102上のIII族窒化物層の形成を描写する。図3では、前駆体注入システム106は、III族窒化物前駆体340を送達する。III族窒化物前駆体340は、複数の種の前駆体を含み得、異なる前駆体送達ラインによって注入されることができる。III族窒化物前駆体は、ホウ素、アルミニウム、ガリウム、インジウム、およびタリウム、および/または窒素等の第III族元素を送達する前駆体を含み得る。

【0041】

アルミニウムを送達する前駆体の例は、トリメチルアルミニウム、トリエチルアルミニウム、ジメチルアルミニウムヒドリド、ジメチルエチルアミンアラン、トリイソブチルアルミニウム、トリス(ジメチルアミド)アルミニウム(III)、三塩化アルミニウム、アルミニウム元素、およびアルキル類、アルキルアミド類、アルコキシド類、アミジナート類、 β -ジケトナート類、カルボニル類、シクロペンタジエニル類、ならびにアルミニウムを含む有機金属類を含む。

【0042】

ガリウムを送達する前駆体の例は、トリメチルガリウム、トリエチルガリウム、トリス(ジメチルアミド)ガリウム(III)、三塩化ガリウム、塩化ジエチルガリウム、トリイソブチルガリウム、ガリウム元素、およびアルキル類、アルキルアミド類、アルコキシド類、アミジナート類、 β -ジケトナート類、カルボニル類、シクロペンタジエニル類、ならびにガリウムを含む有機金属類を含む。

【0043】

インジウムを送達する前駆体の例は、トリメチルインジウム、トリエチルインジウム、ジメチルエチルインジウム、三塩化インジウム、インジウム元素、およびアルキル類、アルキルアミド類、アルコキシド類、アミジナート類、 β -ジケトナート類、カルボニル類、シクロペンタジエニル類、ならびにインジウムを含む有機金属類を含む。

【0044】

窒素を送達する前駆体の例は、アンモニア、1,1-ジメチルヒドラジン、tert-ブチルアミン、フェニルヒドラジン、窒素元素、および窒素を含む他のガス類ならびに有機金属類を含む。

【0045】

10

20

30

40

50

III族窒化物前駆体は、基板102に進行し、表面種342として堆積する。前駆体種340は、壁104にも進行し、表面種343として堆積する。堆積が進行するにつれて、表面種343が、残留層228を覆ってIII族窒化物層341を形成する。同様に、表面種342は、基板102上のシリコン層236を覆ってIII族窒化物層348を形成する。III族窒化物層346は、1つ以上の第III族元素を含み得る。

【0046】

壁104の高温状態により、III族窒化物種345は、III族窒化物層341から脱着するであろう。そして、III族窒化物種345は、表面種342として基板102上に堆積し得る。しかしながら、III族窒化物層341が、連続的かつ高密度となると、それは、残留層228からのシリコン種の昇華を防止する。したがって、連続的かつ高密度のIII族窒化物層341からの脱着は、III族窒化物層348の組成に有意に影響を及ぼさない。しかしながら、III族窒化物層341が連続的かつ高密度となる前、残留層228からのいくつかの種が、昇華し得、シリコン種346およびドーパント種347としてIII族窒化物層348の下側部分内に堆積され得る。後続のウエハが、チャンバの中に装填されると、III族窒化物層341は、残留層114が基板102に対して作用するのと類似する様式で、後続のウエハに対して汚染物質種源としての役割を果たし得る。

【0047】

残留層114からの脱着に起因してシリコン層236内に堆積されるイオン化アクセプタ種に加えて、シリコン層236は、III族窒化物層348から拡散するイオン化アクセプタ汚染物質種350も含み得る。この拡散は、基板102が、堆積プロセス中に高温状態であるので、有意な速度で生じ得る。特に、ガリウムおよびアルミニウムは、シリコン層236の中に拡散し、イオン化アクセプタドーパントとして作用し、シリコン層236をよりp型かつより導電性にし得る。しかしながら、シリコン層236の成長中のドーパント種121の流束は、残留層114内で生じるイオン化アクセプタ汚染物質種226および隣接する層から拡散したイオン化アクセプタ汚染物質種350の両方を補償するために十分である、ある濃度の深準位ドーパントをシリコン層236内に生成するように選択されることができる。

【0048】

深準位ドーパント種227は、深準位トラップとしての役割を果たすことによって、シリコン層236内に存在するp型ドーパントを補償する。深準位トラップとして、深準位ドーパント種227は、イオン化アクセプタ汚染物質種226および350によって引き起こされる自由正孔を捕捉し、局所に制限する再結合中心を提供する。この捕捉は、シリコン層236内の自由正孔濃度を低下させ、それをより抵抗性にする。いくつかの例では、イオン化アクセプタ汚染物質種226は、約 10^{17} cm^{-3} の濃度でシリコン層236内に存在する。イオン化アクセプタ汚染物質種226は、 $10^{15} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、 $10^{14} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、および/または $10^{11} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の濃度で存在し得る。これらのp型ドーパントによって生成される自由正孔を補償するために、シリコン層236は、少なくとも同等の濃度の深準位ドーパント種227を含み得る。したがって、この例では、シリコン層236は、少なくとも 10^{17} cm^{-3} 、 $10^{15} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、または 10^{18} cm^{-3} より高い濃度の深準位ドーパント種227を含むべきである。自由正孔の存在を補償する深準位ドーパント種227を用いると、自由正孔濃度は、 10^{18} cm^{-3} 未満、 10^{17} cm^{-3} 未満、 10^{16} cm^{-3} 未満、および/または 10^{15} cm^{-3} 未満であり得る。いくつかの例では、深準位ドーパント種227は、たとえ最初の深準位トラップ状態が自由正孔によって補償されていても、再結合中心としての役割を果たし得る。例えば、シリコン層236内の深準位ドーパント種は、次いで、他の自由正孔と再結合する伝導帯からの電子を再捕捉し得る。深準位ドーパント種227が自由正孔を直接捕捉することも、可能である。

【0049】

深準位トラップとしての役割を果たすために、深準位ドーパント種227は、バンドエ

ッジから遠く離れた、シリコン層 2 3 6 のバンドギャップの十分に内側に電子状態をもたらすイオン化エネルギーを有するべきである。これらの深準位状態は、伝導帯および価電子帯のエッジから、室温における電子の熱エネルギー (kT) を有意に上回る程度に分離されるべきである。例えば、深準位状態は、バンドエッジの一方または両方から $0.3 \sim 0.5 \text{ eV}$ 分離され得る。いくつかの例では、深準位状態は、バンドエッジの一方または両方から $0.2 \sim 0.6 \text{ eV}$ 、および / または 0.6 eV 超分離され得る。硫黄 (S)、バナジウム (V)、鉄 (Fe)、セレン (Se)、タンタル (Ta)、テルル (Te)、クロム (Cr)、マンガン (Mn)、および他の化学元素のうちの 1 つ以上のものは、シリコン内で深準位トラップとしての役割を果たし、深準位ドーパント種 2 2 7 として使用され得る。

10

【0050】

図 4 は、本明細書に説明される方法を使用して製造された半導体 4 0 0 を描写する。半導体 4 0 0 は、基板 4 0 2 (例えば、1 0 2) と、基板 4 0 2 を覆う核生成層 4 3 6 (例えば、2 3 6) と、核生成層 4 3 6 を覆う III 族窒化物層 4 4 8 (例えば、3 4 8) とを含む。いくつかの例では、III 族窒化物層 4 4 8 は、III - V 層と置換され得る。III - V 材料の例は、GaAs、InP、InAs、InSb、InGaAs、GaAsP、InGaAsP 等のうちの 1 つ以上のものを含む。基板 4 0 2 は、シリコン基板または高抵抗シリコン基板であり得る。高抵抗シリコン基板の例では、基板は、1, 0 0 0 オームセンチメートルを上回る、2, 0 0 0 オームセンチメートルを上回る、3, 0 0 0 オームセンチメートルを上回る、6, 0 0 0 オームセンチメートルを上回る、または 10, 0 0 0 オームセンチメートルを上回る抵抗率を有し得る。基板 1 0 2 は、III 族窒化物層 4 4 8 のエピタキシャル成長を促進するためのシリコン (1 1 1) 基板であり得る。核生成層 4 3 6 の厚さは、約 $1 \mu\text{m}$ 、 $1 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ (ミクロンまたはマイクロメートル)、 $1 \text{ nm} \sim 100 \text{ nm}$ 、 $10 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 、 $100 \text{ nm} \sim 1 \mu\text{m}$ 、および / または $100 \text{ nm} \sim 10 \mu\text{m}$ であり得る。

20

【0051】

核生成層 4 3 6 は、基板 4 0 2 の表面上に存在する汚染物質および不純物を埋める。汚染物質および不純物は、図 1 の種 1 1 8 によって例証されるように、チャンバ壁から脱着した後、基板の表面上に堆積される種を含み得る。汚染物質および不純物は、環境内に存在する種から生じる偶発的な炭素含有種、および / または、周囲環境内に存在する酸素による基板 4 0 2 の酸化から結果として生じる自然酸化物も含み得る。核生成層 4 3 6 の成長の前およびその間に (典型的には、 H_2 ガスから成る) 還元雰囲気は、炭素および酸素を含む汚染物質および不純物の一部または全てを除去し得るが、核生成層は、残存するいかなる汚染物質および不純物も埋める。いくつかの例では、核生成層 4 3 6 は、転位および他の欠陥がその中で終端し、核生成層 4 3 6 の上側表面が低減させられた欠陥密度を有するように十分に厚い。

30

【0052】

さらに、核生成層 4 3 6 は、汚染物質および不純物を物理的に埋め、III 族窒化物層 4 4 8 の成長のための清浄な表面を提供する。いくつかの例では、核生成層 4 3 6 は、深準位ドーパントを含まない。これらの例では、核生成層 4 3 6 は、III 族窒化物層 4 4 8 の成長のための清浄な表面を提供する役割を果たすが、存在し得る不純物を補償することによってキャリア濃度に影響を及ぼすことはない。汚染物質および不純物を物理的に埋めることによって、核生成層 4 3 6 は、III 族窒化物層 4 4 8 の膜質を改良し、半導体 4 0 0 を使用して作製された HEMT デバイスの性能を改良する。イオン化アクセプタ汚染物質種を補償することによって、核生成層 4 3 6 は、寄生導電性チャネルの形成を低減または排除し、半導体 4 0 0 を使用して作製された HEMT デバイスの性能を改良する。

40

【0053】

III 族窒化物層 4 4 8 は、1 つ以上の構成層を含み得る。半導体 4 0 0 は、エピウエハ、すなわち、ブランケットエピタキシャル層で被覆され、横方向パターンングでは被覆されていない半導体ウエハであり得る。エピウエハは、1 つ以上の非エピタキシャルキャ

50

ッピング層も含み得る。エピウエハは、トランジスタを作成するために横方向パターンニングによってさらに処理されることができる。いくつかの例では、半導体 400 は、そのようなパターンニングを受けたウエハである。半導体 400 は、III 族窒化物層 448 を覆って（接点および／または相互接続としての役割を果たす金属層等の）他の層も含み得る。いくつかの例では、半導体 400 は、エピウエハからダイカットされているチップ等のエピウエハの一部である。

【0054】

図 5 は、高電子移動度トランジスタ（HEMT）を製造するために使用され得る III 族窒化物層を有する半導体 500 を描写する。半導体 500 は、基板 502（例えば、402、102）と、基板 502 を覆う核生成層 536（例えば、436、236）とを含む。半導体 500 は、III 族窒化物層 548（例えば、348、448）も含む。III 族窒化物層 548 は、遷移層 550、緩衝層 552、窒化ガリウム（GaN）層 554、およびインジウムアルミニウムガリウム窒化物（ $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$; $0 < x, y < 1$ ）層 558 を含む複数の層を備えている。 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 層 558 は、その厚さを通して一定の組成（すなわち、一定の値の x および y ）を有し得るか、またはその厚さを通して種々の組成（すなわち、種々の値の x および y ）を有し得る。いくつかの例では、III 族窒化物層は、III 族窒化物以外の材料を含む 1 つ以上の層を備え得る。遷移層 550 は、AlN および／または $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 等の他の合金を含み得、シリコンから作製され得る核生成層 536 と、GaN を備え得る緩衝層 552 との間で遷移するために役立つことができる。緩衝層 552 は、その上側表面において完全に弛緩されるために十分に厚い、比較的厚い GaN 層を備えていることができる。緩衝層 552 はまた、格子不整合に起因する欠陥の密度を低減させるように作用し得る。緩衝層は、GaN、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 、および／または AlN 等の任意の III 族窒化物材料を備え得る。いくつかの例では、緩衝層の組成は、その厚さ全体を通して変動し得る。緩衝層は、1 つ以上の超格子または III 族窒化物材料の交互層を有する複数層構造も備え得る。

【0055】

GaN 層 554 と $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 層 558 との間のヘテロ接合に起因して、2 次元電子ガス（2DEG）が、GaN/ $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 界面近傍の GaN 層 554 内に生じる。2DEG 556 は、HEMT 内に高電子移動度チャネルを提供し得る。キャッピング層、メタライゼーション層、および絶縁層のうちの 1 つ以上のものを含む他の層も、半導体 500 を覆って堆積されることができる。横方向パターンニングが、半導体 500 内のトランジスタ等の横方向特徴を画定するために使用されることができる。半導体 500 は、エピウエハであり得、1 つ以上の非エピタキシャルキャッピング層を含み得る。いくつかの例では、半導体 500 は、トランジスタ等の 1 つ以上のパターン化された特徴を含む。半導体 500 は、III 族窒化物層 548 を覆って（接点および／または相互接続としての役割を果たす金属層等の）他の層も含み得る。いくつかの例では、半導体 500 は、チップ等のエピウエハの一部である。

【0056】

汚染物質および不純物を物理的に埋めることによって、核生成層 536 は、III 族窒化物層 548 の膜質を改良し、半導体 500 を使用して作製された HEMT デバイスの性能を改良する。イオン化アクセプタ汚染物質種を補償することによって、核生成層 536 は、寄生導電性チャネルの形成を低減または排除し、半導体 500 を使用して作製された HEMT デバイスの性能を改良する。

【0057】

図 6 は、本明細書に説明される方法を使用して製造された HEMT 600 を描写する。HEMT 600 は、半導体 500 から製造され得る。HEMT 600 は、基板 602（例えば、102、402、502）と、核生成層 636（例えば、236、436、536）とを含む。HEMT 600 は、核生成層 636 を覆って III 族窒化物層 648（例えば、348、448、548）も含む。III 族窒化物層 648 は、核生成層 636 を覆

10

20

30

40

50

う遷移層 650 (例えば、550) と、A1N 層 650 を覆う緩衝層 652 (例えば、552) と、緩衝層 652 を覆う GaN 層 654 (例えば、554) と、GaN 層 654 を覆う $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 < x, y < 1$) 層 658 (例えば、558) とを含む。 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 層 658 は、その厚さを通して一定の組成 (すなわち、一定の値の x および y) またはその厚さを通して種々の組成 (すなわち、種々の値の x および y) を有し得る。HEMT 600 は、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ 層 658 とのその界面近傍の窒化ガリウム層 654 内に 2DEG 656 (例えば、556) も含む。III 族窒化物層 648 は、図 6 に描写されるものと異なる組成を有し得る。HEMT 600 内の III 族窒化物層 648 は、フォトリソグラフィおよびエッチング技法を使用して横方向にパターン化される。金属接点、ソース接点 660、ドレイン接点 662、およびゲート接点 664 を形成するために、III 族窒化物層上に堆積される。相互接続部 (図示せず) が、接点 660、662、および 664 を回路に接続し得る。ゲート接点 664 に印加されるゲート電圧は、ソース接点 660 とドレイン接点 662 との間のチャネルの導電性を変調し得る。

【0058】

2DEG 656 が、高移動度を伴うチャネルを提供するので、HEMT 600 は、高周波数切り替えのために使用されることができる。切り替えは、1GHz、50GHz、または 60GHz より高い周波数におけるものであり得る。これらの高周波数において、基板 602 のいかなる寄生容量も、HEMT 600 の性能を低減させ得る。しかしながら、HEMT 600 の核生成層 636 は、トラップとしての役割を果たし、イオン化アクセプタの存在を補償し、寄生チャネルを低減または実質的に防止し、したがって、基板 602 の寄生容量を低減もしくは実質的に防止する深準位ドーパント (例えば、227) を含む。故に、核生成層 636 内の深準位ドーパント (例えば、227) は、高周波数における HEMT 600 の性能を改良し得る。性能の増加は、より高周波数における動作および所与の周波数における増加された利得の一方または両方として実現され得る。汚染物質および不純物を物理的に埋めることによって、核生成層 636 は、III 族窒化物層 648 の膜質を改良し、半導体 600 を使用して作製された HEMT デバイスの性能を改良する。

【0059】

図 7 は、補償深準位ドーパントを含む核生成層を有する半導体を成長させる方法 700 のフローチャートを描写する。方法 700 は、MOCVD プロセスおよび/または有機金属気相エピタキシ (OMVPE) プロセスであり得る。いくつかの例では、方法 700 は、MOCVD の代わりに、分子ビームエピタキシ (MBE)、ハライド気相エピタキシ (HVPE)、パルスレーザ堆積 (PLD)、および/または物理蒸着 (PVD) を使用して実装されることができる。基板は、エピタキシャルチャンバの中に直接装填されることができるか、または移送 (ロードロック) チャンバを使用して装填されることができる。702 において、エピタキシャルチャンバまたはロードロックチャンバ内の条件は、ウエハ装填条件に調節される。基板ホルダは、室温に冷却される。 N_2 パージガス流動は、0 近傍に調節される。704 において、1 つ以上の基板 (例えば、102、402、502、602) が、エピタキシャルチャンバの中に装填されるか、またはロードロックチャンバの中に装填され、次いで、エピタキシャルチャンバの中に移送される。ロードロックチャンバが使用される場合、エピタキシャルチャンバは、ベース状態条件下に留まる。

【0060】

706 において、エピタキシャルチャンバ条件は、核生成層 (例えば、236、436、536、636) のための成長条件に調節される。1 つ以上の基板 (例えば、102、402、502、602) は、550 ~ 1,200 の温度に加熱される。エピタキシャルチャンバ内の圧力は、40 ~ 760 トルに調節される。非常に低い圧力技法 (< 50 トル) も、採用され得る。 H_2 、 N_2 、または両方の混合物のパージガス流動は、1 ~ 1,000 s1m (1 分あたりの標準リットル) に調節される。いくつかの例では、キャリアガスは、使用されない。核生成層成長のための前駆体流速は、1 ~ 500 $\mu\text{mol}/\text{分}$ の範囲内に制御される。所望される成長率に応じて、前駆体流速も、0.1 ~ 5,000 μmol

10

20

30

40

50

ル / 分の幅広い範囲内に調節され得る。

【 0 0 6 1 】

7 0 8 において、核生成層（例えば、2 3 6、4 3 6、5 3 6、6 3 6）は、1 つ以上の基板を覆って成長させられる。ステップ 7 0 8 は、核生成層の所望される厚さに対応して所定の時間にわたって継続される。所望される厚さは、約 1 μm 、1 nm ~ 1 0 μm 、1 nm ~ 1 0 0 nm、1 0 nm ~ 1 μm 、1 0 0 nm ~ 1 μm 、および / または 1 0 0 nm ~ 1 0 μm であり得る。核生成層は、チャンバ汚染および / または拡散に起因して存在する汚染物質種（例えば、1 1 8、3 5 0）を補償するための深準位ドーパント（例えば、2 2 7）を含む。深準位ドーパント前駆体（例えば、1 2 1）の流速は、典型的には、核生成層の主要組成のための前駆体流速より低く、核生成層の成長中、一定であり得るか、または成長中に調節され得る。この流速は、チャンバ壁が、シリコンでコーティングされ、チャンバ壁上の残留層（例えば、1 1 4）からの汚染物質種の脱着を阻止するにつれて、0 にまでも低減させられ得る。これらの条件は、1 つ以上の基板（例えば、1 0 2、4 0 2、5 0 2、6 0 2）に最も近い核生成層（例えば、2 3 6、4 3 6、5 3 6、6 3 6）の表面において、III 族窒化物層（例えば、3 4 8、4 4 8、5 4 8、6 4 8）に最も近い核生成層の表面における濃度より高い濃度の深準位ドーパントを生成する。したがって、深準位ドーパントの濃度は、イオン化アクセプタ濃度が高い領域中で高く、かつイオン化アクセプタ濃度が低い領域中で低くなるように段階的であり、調整される。

10

【 0 0 6 2 】

いくつかの例では、方法 7 0 0 は、エピタキシャルチャンバの中に深準位ドーパント前駆体（例えば、1 2 1）を流入させることを含まず、核生成層（例えば、2 3 6、4 3 6、5 3 6、6 3 6）は、深準位ドーパントを含まない。これらの例では、核生成層は、III 族窒化物層（例えば、3 4 8、4 4 8、5 4 8、6 4 8）の成長のための清浄な表面を提供する役割を果たすが、存在する不純物を補償しない。核生成層は、1 つ以上の基板（例えば、1 0 2）の表面上に存在する不純物および欠陥を埋めることによって、清浄な表面を提供し得る。

20

【 0 0 6 3 】

7 1 0 において、エピタキシャルチャンバ条件は、III 族窒化物成長のための条件に調節される。ウエハ（例えば、1 0 2、4 0 2、6 0 5、6 0 2）は、約 5 5 0 ~ 1 , 1 0 0 の温度に加熱される。チャンバ内の圧力は、4 0 ~ 7 6 0 トルに調節される。非常に低い圧力技法（< 5 0 トル）も、採用され得る。H₂、N₂、または両方の混合物のパーシガス流動は、1 ~ 1 , 0 0 0 s l m に調節される。いくつかの例では、パーシガスは、使用されることができない。III 族元素前駆体流速は、1 0 ~ 5 0 0 μmol / 分の範囲内に制御される。V 族元素前駆体流速は、0 . 0 0 1 ~ 1 0 mol / 分の範囲内に制御される。7 1 2 において、III 族窒化物層（例えば、3 4 8、4 4 8、5 4 8、6 4 8）は、核生成層を覆って成長させられる。III 族窒化物層は、複数の層を含み得、非 III - V 成分を含み得る。

30

【 0 0 6 4 】

7 1 4 において、エピタキシャルチャンバ条件は、1 つ以上の基板を装填解除するために調節される。ロードロックチャンバが、基板装填のために使用される場合、エピタキシャルチャンバ条件は、ベース状態条件に調節される。基板装填解除が、直接エピタキシャルチャンバから実行される場合、ウエハ（例えば、1 0 2、4 0 2、6 0 5、6 0 2）は、約室温または少なくとも約 4 5 0 を下回るまで冷却される。N₂ パーシガス流動は、0 近傍に調節される。7 1 6 において、1 つ以上の基板は、成長チャンバから装填解除される。

40

【 0 0 6 5 】

上記説明は、シリコンを含む基板を覆う III 族窒化物層を開示するが、他の材料組み合わせも可能である。基板は、シリコン以外の 1 つ以上の材料から作製されることができ。例えば、基板は、サファイア、GaAs、GaN、InP、および他の材料のうちの 1 つ以上のものを含み得る。基板は、核生成層と III 族窒化物層との間にヘテロ構造を

50

含み得る。ヘテロ構造は、異なる材料の複数の層を含み得る。

【0066】

ヘテロ構造の例は、Si・オン・インシュレータ(SOI)基板と、Si・オン・サファイア(SOS)基板とを含む。核生成層は、SOIまたはSOS基板を覆って成長させられ得る。核生成層は、SOIまたはSOS基板内で、酸化物層とSi層との間、もしくはSi層の上方に存在し得る。SOIまたはSOS基板のSi層は、それ自体が、核生成層であり得る。核生成層は、サファイアまたはハンドルウエハの直上に成長させられ得る。核生成層は、同一材料の層と均一に成長させられ得るが、エピタキシャル層移送プロセス等のヘテロ構造成長プロセスに類似するプロセスに関与し得る。そのようなエピタキシャル層移送プロセスでは、エピタキシャル層は、核生成層を備え得る。したがって、エピタキシャル層は、深準位ドーパントを伴う第1の部分と、非意図的にドーピングされた第2の部分とを含み得る、またはエピタキシャル層の全ては、一定もしくは種々の濃度の深準位ドーパントでドーピングされ得る。

10

【0067】

一般的に、核生成層は、深準位ドナーまたは深準位アクセプタのいずれか一方を含むことによって、それぞれ、アクセプタもしくはドナー汚染物質のいずれか一方を補償し得る。アクセプタ汚染物質およびイオン化アクセプタ汚染物質は、半導体に自由電子を提供するドナー汚染物質およびイオン化されたドナー汚染物質と置換され得る。そして、深準位ドーパントは、自由電子を捕捉し、したがって、半導体内の自由電子の濃度を低減させる深準位アクセプタ状態を含み得る。

20

【0068】

第2の層「上」またはそれを「覆う」として本明細書に説明および/または描写される第1の層は、第2の層に直接隣接し得る、または1つ以上の介在層が、第1の層と第2の層との間に存在し得る。第2の層または基板の「直上」もしくはそれに「直接覆う」として本明細書に説明および/または描写される第1の層は、おそらく、第2の層もしくは基板との第1の層の混合に起因して形成し得る介在合金層以外に介在層が存在せず、第2の層または基板に直接隣接する。加えて、第2の層または基板「上」、それを「覆う」、その「直上」、もしくはそれに「直接覆う」として本明細書に説明および/または描写される第1の層は、第2の層もしくは基板全体、または第2の層もしくは基板の一部を被覆し得る。

30

【0069】

基板は、層成長中、基板ホルダ上に設置され、従って、上面または上側表面は、基板ホルダから最も遠い基板もしくは層の表面である一方、底面または下側表面は、基板ホルダの最近傍の基板もしくは層の表面である。

【0070】

方法の上記説明から、種々の技法が、その範囲から逸脱することなく方法の概念を実装するために使用され得ることが、明白である。説明される実施形態は、あらゆる点において制限的ではなく例証的と見なされるものである。方法が本明細書に説明される特定の例に限定されず、請求項の範囲から逸脱することなく、他の例で実装され得ることも理解されたい。同様に、動作が、特定の順序で図面内に描写されているが、これは、望ましい結果を達成するために、そのような動作が、示される特定の順序で、または連続順序で実施されること、もしくは全ての図示される動作が実施されること要求するものではないと理解されたい。

40

【図 5】

500

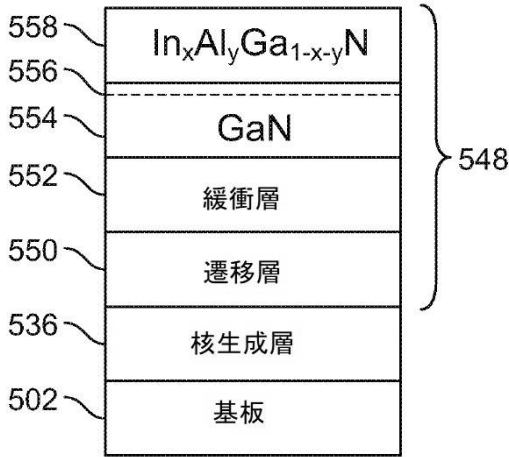


FIG. 5

【図 6】

600

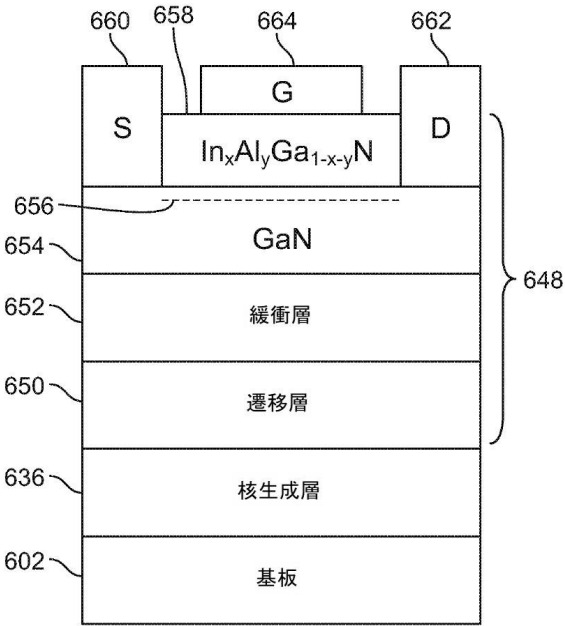


FIG. 6

【図 7】

700

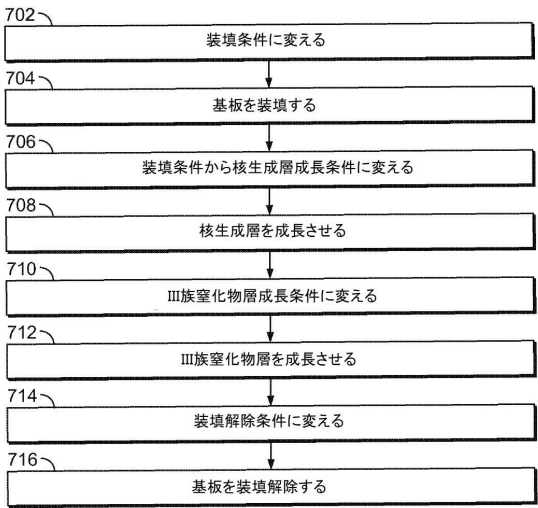


FIG. 7

10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類

F I

H 0 1 L	21/20 (2006.01)	C 2 3 C	16/34	
H 0 1 L	21/338 (2006.01)	H 0 1 L	21/20	
H 0 1 L	29/778 (2006.01)	H 0 1 L	29/80	H
H 0 1 L	29/812 (2006.01)			

弁護士 山本 健策

- (72)発明者 ラボウティン, オレグ
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 7 8 0, トーントン, ジョン ハンコック ロード 2 0
0, アイキューイー ケーシー, エルエルシー
- (72)発明者 カオ, チェン - カイ
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 7 8 0, トーントン, ジョン ハンコック ロード 2 0
0, アイキューイー ケーシー, エルエルシー
- (72)発明者 ロー, チェン - フォン
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 7 8 0, トーントン, ジョン ハンコック ロード 2 0
0, アイキューイー ケーシー, エルエルシー
- (72)発明者 ジョンソン, ウェイン
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 7 8 0, トーントン, ジョン ハンコック ロード 2 0
0, アイキューイー ケーシー, エルエルシー
- (72)発明者 マーチャンド, ヒューグース
アメリカ合衆国 マサチューセッツ 0 2 7 8 0, トーントン, ジョン ハンコック ロード 2 0
0, アイキューイー ケーシー, エルエルシー

審査官 加藤 芳健

- (56)参考文献 特開 2 0 1 4 - 2 3 2 8 0 5 (J P , A)
特開 2 0 1 1 - 1 9 9 2 2 2 (J P , A)
特開昭 5 5 - 1 4 1 6 5 9 (J P , A)
特開 2 0 0 3 - 2 2 9 3 6 6 (J P , A)
特表 2 0 0 9 - 5 1 9 2 0 2 (J P , A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)

H 0 1 L 2 1 / 2 0 5
C 3 0 B 2 9 / 3 8
C 3 0 B 2 5 / 0 2
C 3 0 B 2 3 / 0 8
C 2 3 C 1 6 / 3 4
H 0 1 L 2 1 / 2 0
H 0 1 L 2 1 / 3 3 8
H 0 1 L 2 9 / 7 7 8
H 0 1 L 2 9 / 8 1 2