

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-184663

(P2016-184663A)

(43) 公開日 平成28年10月20日 (2016. 10. 20)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 21/338 (2006. 01)	HO 1 L 29/80 H	4 G O 7 7
HO 1 L 29/778 (2006. 01)	C 3 O B 29/38 D	4 K O 3 0
HO 1 L 29/812 (2006. 01)	HO 1 L 21/205	5 F O 4 5
C 3 O B 29/38 (2006. 01)	C 3 O B 25/16	5 F 1 0 2
HO 1 L 21/205 (2006. 01)	C 2 3 C 16/34	

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 12 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2015-64107 (P2015-64107)
 (22) 出願日 平成27年3月26日 (2015. 3. 26)

(71) 出願人 000003609
 株式会社豊田中央研究所
 愛知県長久手市横道41番地の1
 (71) 出願人 000004260
 株式会社デンソー
 愛知県刈谷市昭和町1丁目1番地
 (74) 代理人 110000110
 特許業務法人快友国際特許事務所
 (72) 発明者 成田 哲生
 愛知県長久手市横道41番地の1 株式会
 社豊田中央研究所内
 (72) 発明者 井口 絃子
 愛知県長久手市横道41番地の1 株式会
 社豊田中央研究所内

最終頁に続く

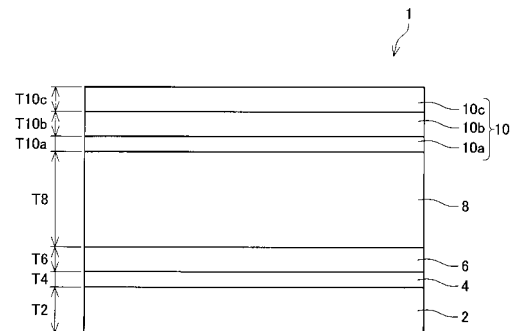
(54) 【発明の名称】 半導体ウエハ、半導体装置及び半導体ウエハの製造方法

(57) 【要約】

【課題】リーク電流が流れることを防止しながら、III族窒化物半導体層の表面が平滑な半導体ウエハを実現する。

【解決手段】半導体ウエハ1は、基板2上にバッファ層8を介してIII族窒化物半導体層10が設けられている。バッファ層8は、III族窒化物半導体層10より格子定数が小さい。III族窒化物半導体層10は、炭素を含んでいる。III族窒化物半導体層10の炭素濃度のピークは、III族窒化物半導体層10の表面と裏面の双方から離れた位置にある。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板上にバッファ層を介してIII族窒化物半導体層が設けられている半導体ウエハであって、

前記バッファ層は、前記III族窒化物半導体層より格子定数が小さく、

前記III族窒化物半導体層は、炭素を含んでおり、

前記III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークが、前記III族窒化物半導体層の表面と裏面の双方から離れた位置にある半導体ウエハ。

【請求項 2】

前記III族窒化物半導体層の表面の炭素濃度が、前記裏面の炭素濃度より低い請求項 1 に記載の半導体ウエハ。

10

【請求項 3】

前記III族窒化物半導体層は、前記バッファ層側から順に、第 1 層、第 2 層、第 3 層を備えており、

前記第 2 層の炭素濃度の平均値が、前記第 1 層の炭素濃度の平均値及び前記第 3 層の炭素濃度の平均値の双方より高い請求項 1 又は 2 に記載の半導体ウエハ。

【請求項 4】

前記第 3 層の炭素濃度の平均値が、前記第 1 層の炭素濃度の平均値より低い請求項 3 に記載の半導体ウエハ。

【請求項 5】

前記第 1 層の材料が、窒化ガリウムである請求項 3 または 4 に記載の半導体ウエハ。

20

【請求項 6】

前記III族窒化物半導体層の c 軸が、成長面の垂線に対して傾斜している請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の半導体ウエハ。

【請求項 7】

前記基板の材料が、シリコンである請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の半導体ウエハ。

【請求項 8】

基板上にバッファ層を介してIII族窒化物半導体層が設けられており、そのIII族窒化物半導体層の表面側に半導体素子が形成されている半導体装置であって、

30

前記バッファ層は、前記III族窒化物半導体層より格子定数が小さく、

前記III族窒化物半導体層は、炭素を含んでおり、

前記III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークが、前記III族窒化物半導体層の表面と裏面の双方から離れた位置にある半導体装置。

【請求項 9】

基板上にIII族窒化物半導体層が設けられた半導体ウエハの製造方法であり、

前記基板上に、前記III族窒化物半導体層より格子定数が小さいバッファ層を気相成長するバッファ層形成工程と、

前記バッファ層上に、前記III族窒化物半導体層を気相成長するIII族窒化物半導体層形成工程と、

40

を備えており、

前記III族窒化物半導体形成工程の途中で前記III族窒化物半導体層の成長圧力を最小にする半導体ウエハの製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本明細書は、半導体ウエハ、半導体装置及び半導体ウエハの製造方法を開示する。

【背景技術】

【0002】

50

基板上にIII族窒化物半導体層を気相成長させて半導体ウエハを製造する技術の研究が行われている。特許文献1には、シリコン基板上にバッファ層を成長させ、バッファ層上にIII族窒化物半導体層（主機能層）を成長する技術が開示されている。また、特許文献1は、バッファ層、及び/又は、III族窒化物半導体層のバッファ層側に高濃度（ $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ）の炭素を導入する。炭素を導入した半導体ウエハを用いて半導体装置を製造すると、半導体装置をオフしているときにリーク電流が流れることを防止することができる。なお、III族窒化物半導体層を成長させる基板としてIII族窒化物半導体より熱膨張係数が小さい材料を用いると、III族窒化物半導体が高温（気相成長中）から低温（典型的に室温）に冷却されるときに、III族窒化物半導体に引張歪みが生じることが知られている。特許文献1は、圧縮歪みを有するバッファ層上にIII族窒化物半導体層を成長することによって、III族窒化物半導体層に生じる引張歪みを相殺している。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2010-287882号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、バッファ層、及び/又は、III族窒化物半導体層（主機能層）のバッファ層側に高濃度の炭素を導入すると、III族窒化物半導体層は、圧縮歪みを内在したまま成長する。その結果、III族窒化物半導体層に歪み誘因ステップバンチングが発生しやすくなり、III族窒化物半導体層の表面を平滑にすることができない。本明細書では、リーク電流が流れることを防止することができるとともに、III族窒化物半導体層の表面が平滑な半導体ウエハを実現する技術を提供する。

20

【課題を解決するための手段】

【0005】

本明細書で開示する半導体ウエハは、基板上にバッファ層を介してIII族窒化物半導体層が設けられている。バッファ層は、III族窒化物半導体層より格子定数が小さい。III族窒化物半導体層は、炭素を含んでいる。本明細書が開示する半導体ウエハでは、III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークが、III族窒化物半導体層の表面と裏面の双方から離れた位置にある。

30

【0006】

上記半導体ウエハでは、III族窒化物半導体層が炭素を含んでいることにより、上記半導体ウエハを用いて製造した半導体装置のリーク電流を防止することができる。また、III族窒化物半導体層の中間部分（表面と裏面の双方から離れた位置）の炭素濃度を最も高くすることにより、リーク電流を防止するために必要な炭素濃度をIII族窒化物半導体層内に導入しつつ、バッファ層側（III族窒化物半導体層の裏面）においてはIII族窒化物半導体層の炭素濃度を低くすることができる。バッファ層側の炭素濃度を低く抑えることにより、III族窒化物半導体層に歪み誘因ステップバンチングが発生することを抑制することができる。上記の半導体ウエハは、リーク電流が流れることを防止しながら、III族窒化物半導体層の表面を平滑にすることができる。

40

【0007】

なお、本明細書でいう「バッファ層」とは、基板とIII族窒化物半導体層の間の格子定数差を緩和するための所謂「低温バッファ層」を意味するものではなく、III族窒化物半導体層に面方向の力を加え、III族窒化物半導体層が成膜後に高温から低温に変化するときIII族窒化物半導体層に生じる熱歪みを緩和するためのものである。また、「歪み誘因ステップバンチング」とは、Tersoffらが発見し、提唱したステップバンチング発生のメカニズムであり、「Physical Review Letters Volume 75 2730 (1995)」に開示されている。そのメカニズムは、周期的なステップ・テラスで形成される半導体表面に歪みが発生すると、歪みの2乗に比例し、ス

50

ステップ間の距離に反比例したステップ間引力が働くというものである。ステップ間引力がステップの束（ステップバンチング）を次々と形成し、半導体ウエハの表面に段差が形成され、半導体ウエハの表面平滑性が低下する。そのため、半導体表面の歪みを小さくすることにより、ステップバンチングの発生を抑制することができる。

【0008】

また、歪み誘因ステップバンチングは、成長面の垂線に対して主軸が微傾斜したウエハ（所謂オフ角を有するウエハ）において、より顕著となる。例えばIII族窒化物半導体の場合、一般的にc軸が主軸となる。そのため、III族窒化物半導体場合、c軸が成長面の垂線に対して傾斜している状態がオフ角を有するといえる。典型的に、オフ角を設けることにより、成長表面をステップ・テラスが規則的に繰り返す周期構造となり、ウエハ表面の平坦性を向上させることができる。また、オフ角を設けることにより、急峻なヘテロ接合を実現したり、ウエハ上に形成する半導体素子の界面特性が向上するといった利点も得られる。しかしながら、歪み誘因ステップ間引力が働く状況下では、オフ角を有するウエハ表面のステップ間距離が小さい。ステップ間引力が無視できない働きをするので、歪み誘因ステップ間引力が働く状況下では、ステップバンチングが発生しやすい。

10

【0009】

また、窒化物半導体層における歪み誘因ステップバンチングは、III族元素としてガリウムを主成分とするIII族窒化物半導体でより顕著である。ステップバンチングは、テラス上のIII族原子種が表面拡散してステップ端に取り込まれる過程で起こる。そのため、ステップバンチングは、「ステップ間平均距離×(1/2) III族原子種の表面拡散長」の条件を満足する環境下で起こりやすい。III族原子種において、ガリウムは、アルミニウムやインジウムと比較して表面拡散長が長いことが知られている。そのため、歪み誘因ステップバンチングは、ガリウムを主成分とするIII族窒化物半導体、特に窒化ガリウムで発生しやすい。なお、本明細書でいう「窒化ガリウム」には、1%未満の不純物（Al, In, Mg, Si, Ge, C, Fe等）を含有している窒化ガリウムも含まれる。

20

【0010】

また、「バッファ層は、III族窒化物半導体層より格子定数が小さい」とは、バッファ層の全体とIII族窒化物半導体層の全体を比較したときに、バッファ層の格子定数（平均格子定数）が、III族窒化物半導体層の格子定数（平均格子定数）より小さいことを意味する。そのため、バッファ層の一部分とIII族窒化物半導体層の一部分とを比較したときに、バッファ層の一部分の格子定数が、III族窒化物半導体層の一部分の格子定数より大きくなることもある。

30

【0011】

本明細書で開示する半導体装置は、基板上にバッファ層を介してIII族窒化物半導体層が設けられており、そのIII族窒化物半導体層の表面側に半導体素子が形成されている。この半導体装置では、バッファ層の格子定数（平均格子定数）は、III族窒化物半導体層の格子定数（平均格子定数）より小さい。III族窒化物半導体層は、炭素を含んでいる。III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークは、III族窒化物半導体層の表面と裏面の双方から離れた位置にある。

【0012】

本明細書では、基板上にIII族窒化物半導体層が設けられた半導体ウエハの製造方法も開示する。その製造方法は、バッファ層形成工程と、III族窒化物半導体層形成工程を備えている。バッファ層形成工程では、基板上に、III族窒化物半導体層より格子定数が小さいバッファ層を気相成長する。III族窒化物半導体層形成工程では、バッファ層上に、III族窒化物半導体層を気相成長する。本明細書で開示する製造方法では、III族窒化物半導体層形成工程の途中でIII族窒化物半導体層の成長圧力を最小にする。

40

【0013】

III族窒化物半導体層の成長圧力を小さくすると、III族窒化物半導体層に導入される炭素濃度が高くなる。そのため、上記の製造方法によると、III族窒化物半導体層の中間部分において炭素濃度が最も高くなる半導体ウエハを製造することができる。

50

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】実施例1の半導体ウエハの断面図を模式的に示す。

【図2】III族窒化物半導体層内の位置と炭素濃度の関係を示す。

【図3】実施例1の半導体ウエハの表面写真を示す。

【図4】比較例1の半導体ウエハの表面写真を示す。

【図5】III族窒化物半導体層内の位置と炭素濃度の関係を示す。

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下、本明細書で開示される技術の特徴を整理する。なお、以下に記す事項は、各々単独で技術的な有用性を有している。

10

【0016】

半導体ウエハは、基板と、基板上に設けられているバッファ層と、バッファ層上に設けられているIII族窒化物半導体層を備えている。基板は、III族窒化物半導体層より熱膨張係数が小さい。具体的には、基板は、300～1300Kの線膨張係数の温度積分値が、III族窒化物半導体層を構成する材料のa軸方向の300～1300Kの線膨張係数の温度積分値より小さい。より具体的には、基板の材料は、シリコン(Si)、シリコンカーバイド(SiC)である。基板の厚みは0.1～2mmである。好ましくは、基板とバッファ層の間に、界面層、窒化アルミニウム(AlN)層を設ける。界面層の材料は、酸化アルミニウム(Al₂O₃)を用いることができる。界面層を設けることにより、バッファ層、III族窒化物半導体層の結晶性を向上させることができる。なお、界面層は省略することもできる。窒化アルミニウム層の厚みは10～500nmである。なお、基板がシリコンの場合、窒化アルミニウム層の厚みは50～500nmであることが好ましい。基板がシリコンカーバイドの場合、窒化アルミニウム層の厚みは10～100nmであることが好ましい。窒化アルミニウムは、III族窒化物半導体の中で最も格子定数が小さい。そのため、窒化アルミニウム層を設けることにより、バッファ層に必要な量の圧縮歪みを与えることができる。なお、上記したように、界面層、窒化アルミニウム層を省略し、基板の表面に直接バッファ層を形成することもできる。

20

【0017】

バッファ層は、III族窒化物半導体層より格子定数が小さい。具体的には、バッファ層の全体とIII族窒化物半導体層の全体を比較したときに、バッファ層の格子定数(平均格子定数)が、III族窒化物半導体層の格子定数(平均格子定数)より小さい。バッファ層は、圧縮歪みを有している。好ましくは、バッファ層の材料は、Al_xGa_{1-x}N(0<x<1)である。Al_xGa_{1-x}N(0<x<1)を材料とするバッファ層は、「x」の値が異なる多層構造を用いることができる。また、好ましくは、「x」の値は、表面(III族窒化物半導体層側)に向かうに従って小さくなる。すなわち、Al_xGa_{1-x}N(0<x<1)を材料とするバッファ層は、表面に向かうに従ってAl組成が小さくなるのが好ましい。バッファ層は、異なる材料を繰り返し積層した多層構造を用いることができる。例えば、バッファ層は、AlNとGaNの積層構造が繰り返し設けられていることがある。あるいは、バッファ層は、AlNとAlGaNの積層構造が繰り返し設けられていることがある。バッファ層の厚みは0.5～10μmにすることができる。バッファ層を設けることにより、III族窒化物半導体層の温度が成長温度(高温)から室温(低温)に変化するときに、III族窒化物半導体層に生じる引張歪みを相殺することができる。

30

40

【0018】

III族窒化物半導体層は、炭素を含んでいる。III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークは、III族窒化物半導体層の表面と裏面(バッファ層と接する面)の双方から離れた位置にある。また、III族窒化物半導体層の表面の炭素濃度は、裏面の炭素濃度より低いことが好ましい。具体的には、III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークが存在する部分を中間部とし、中間部分より表面側を表面部とし、中間部分より裏面側を裏面部としたときに

50

、炭素濃度は、中間部 > 裏面部 > 表面部の関係を満足していることが好ましい。例えば、表面部には、電流が流れる機能層が作りこまれることがある。III族窒化物半導体層の表面（表面部）の炭素濃度を低くすると、機能層の炭素濃度を低く抑えることができ、損失（抵抗）の小さい半導体素子を得ることができる。なお、機能層に炭素が多く含まれていると、炭素の存在により電流の流れが阻害されることがある。

【0019】

III族窒化物半導体層は、含まれる炭素の濃度が異なる複数の層を備えることが好ましい。具体的には、窒化物半導体層は、バッファ層側から第1層、第2層、第3層の順に積層された積層構造を備え、炭素濃度の平均値が第2層 > 第1層の関係を満足することが好ましい。各層の炭素濃度の平均値は、第2層 > 第1層 > 第3層の関係を満足することが特に好ましい。なお、少なくとも第1層及び第2層は、バッファ層より格子定数が大きいことが好ましい。

10

【0020】

第1層及び第2層の材料は、ガリウム（Ga）を主体とするIII族窒化物半導体であることが好ましい。なお、「ガリウムを主体とするIII族窒化物半導体」とは、典型的には窒化ガリウム（GaN）を意味し、不純物としてGaNに対して1%未満の原子%のオーダーでB、Al、In、S、As、Sb等の元素を含むものも「ガリウムを主体とするIII族窒化物半導体」である。第1層の材料としてガリウムを主体とするIII族窒化物半導体を用いることにより、薄い第1層を用いて、バッファ層と第2層の間で効率的に歪み緩和を起こすことができる。例えば第1層を構成するIII族窒化物半導体がアルミニウムを多く含む場合、バッファ層と第1層の格子定数の差が小さくなり、薄い第1層ではバッファ層と第2層の間で十分な歪み緩和が起こりにくくなる。また、第2層の材料としてガリウムを主体とするIII族窒化物半導体を用いることにより、第1層と第2層の間で新たな歪みが生じることを抑制することができる。すなわち、第1層の格子定数に近い材料が第2層として積層されるので、第1層と第2層の間で新たな歪みが生じにくい。

20

【0021】

第1層の厚みは、0.05 ~ 0.5 μmであることが好ましい。第1層の厚みが0.05 μmより薄い場合、歪み緩和が十分に起こりにくくなる。また、第1層の厚みが0.5 μmより厚い場合、リーク電流の抑制効果が十分に得られない。リーク電流を抑制するという観点より、より好ましくは、第1層の厚みは、0.05 ~ 0.2 μm未満である。なお、第1層が第2層より十分に膜厚が薄ければ、リーク電流の抑制効果が低下することを防止できる。第1層の炭素濃度は、 $1 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であることが好ましい。より好ましくは、第1層の炭素濃度は、 $1 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ である。第1層の炭素濃度を第2層より低くすることにより、バッファ層が内在する圧縮歪みを緩和することができる。

30

【0022】

第2層の厚みは、0.2 ~ 3.0 μmであることが好ましい。第2層の炭素濃度は、 $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ であることが好ましい。リーク電流を抑制するという観点より、より好ましくは、第2層の炭素濃度は、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ である。第2層の厚みが第1層より十分に厚ければ、リーク電流の抑制効果を十分に発揮することができる。第3層の材料として、窒化ガリウムを用いることができる。また、第3層は、機能層（半導体素子を構成する層）として利用することができる。第3層の炭素濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 未満であることが好ましい。より好ましくは、第3層は実質的に炭素を含んでいないことである。第3層の厚みは、目的とする半導体装置に応じて適宜調整することができる。なお、第3層の表面にさらに複数の層（第4層、第5層等）を設けることもできる。例えば、窒化ガリウム層（第3層）の表面にAlGaN層（第4層）を形成し、ヘテロ接合を備えるHEMT（High Electron Mobility Transistor）を製造することもできる。

40

【実施例】

【0023】

50

(第1実施例)

図1及び図2を参照し、半導体ウエハ1について説明する。半導体ウエハ1は、シリコン基板2と、シリコン基板2上に形成された界面層4と、界面層4上に形成されたAlN層6と、AlN層6上に形成されたバッファ層8と、バッファ層8上に形成されたIII族窒化物半導体層10を備えている。シリコン基板2の厚みT2は675 μm である。界面層4の材料は酸化アルミニウムである。界面層4の厚みT4は3nm未満に調整されている。AlN層6の厚みT6は0.3 μm に調整されている。バッファ層8の材料はAl_xGa_{1-x}Nである。バッファ層8の厚みT8は2.5 μm に調整されている。バッファ層8は多層構造であり、AlN層6側に向かうに従って「x」の値が大きな層が形成されている。

10

【0024】

III族窒化物半導体層10は、第1GaN層10a、第2GaN層10b、第3GaN層10cを備えている。III族窒化物半導体層10の材料は、窒化ガリウム(GaN)である。第1GaN層10aは、炭素を $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 含んでいる。第2GaN層10bは、炭素を $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 含んでいる。第3GaN層10cは、実質的に炭素を含んでいない(不可避の炭素を含んでいることはある)。III族窒化物半導体層10は、有機金属気相成長法を用いて形成されている。第1GaN層10aの厚みT10aは0.1 μm に調整されており、第2GaN層10bの厚みT10bは0.5 μm に調整されており、第3GaN層10cの厚みT10cは0.4 μm に調整されている。なお、第3GaN層10cの表面に、さらに他の窒化物半導体層を形成することもある。また、第3GaN層10cの内部にn型不純物(Si等)、p型不純物(Mg等)が含まれていることもある。第1GaN層10a、第2GaN層10b、第3GaN層10cは、各々第1層、第2層、第3層の一例である。

20

【0025】

一例として、III族窒化物半導体層10の表面(第3GaN層10cの表面)に、ヘテロ接合を有する窒化物積層体(典型的にAlGaN)が形成される。それにより、ヘテロ接合の2次元電子ガスとチャネルとして動作するHEMT構造を備える半導体装置を製造することができる。

【0026】

半導体ウエハ1の製造方法を説明する。まず、原子層堆積法(ALD法)を用いて、シリコン基板2上に、界面層4を形成する。その後、有機金属気相成長法(MOCVD法)を用いて、界面層4上に、AlN層6、バッファ層8をこの順に形成する(バッファ層形成工程)。バッファ層形成工程では、Al原料としてトリメチルアルミニウム、Ga原料としてトリメチルガリウム、N原料としてアンモニアを用いる。また、成長温度はおよそ1000である。

30

【0027】

次に、バッファ層8上に、第1GaN層10aを成長圧力300Torrで形成する。その後、第1GaN層10a上に、第2GaN層10bを成長圧力50Torrで形成する。これにより、第2GaN層10bの炭素濃度($4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)が、第1GaN層10aの炭素濃度($2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)より高くなる。次に、第2GaN層10b上に、第3GaN層10cを成長圧力300Torrで形成する。第3GaN層10cの炭素濃度(実質的に炭素が含まれていない)は、成長圧力以外のパラメータを用いて第1GaN層10a及び第2GaN層10bの炭素濃度より低く調整される。

40

【0028】

上記したように、バッファ層8の格子定数(a面方向の格子定数)は、III族窒化物半導体層(GaNのa面方向の格子定数)10の格子定数より小さい。そのため、バッファ層8は、III族窒化物半導体層10に圧縮歪みを加える。III族窒化物半導体層10には、成長後、降温の過程で引張歪みが生じようとする。バッファ層8は、III族窒化物半導体層10に生じる引張歪みを相殺し、III族窒化物半導体層10に反り、クラック等が発生することを抑制する。

50

【0029】

半導体ウエハ1の利点を説明する。図2は、III族窒化物半導体層10の炭素濃度を示している。グラフの横軸は炭素濃度(cm^{-3})を示し、縦軸は各層(第1GaN層10a~第3GaN層10c)を示している。なお、図2に示している炭素濃度は、各層の平均値を示している。上記したように、第2GaN層10bの炭素濃度は $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ である。GaN層に含まれる炭素濃度を $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ より濃くすると、リーク電流を抑制することができる。そのため、半導体ウエハ1を用いて半導体装置を作製したときに、III族窒化物半導体層10とシリコン基板2間にリーク電流が流れることを抑制できる。また、上記したように、第1GaN層10aの厚みT10aは、第2GaN層10bの厚みT10bより薄い。厚みT10aが厚くなると、リーク電流の抑制効果が低下することがある。厚みT10aを厚みT10bより薄くすることにより、リーク電流の抑制効果を向上させることができる。

10

【0030】

図2に示しているように、第1GaN層10aの炭素濃度($2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)は、第2GaN層10bの炭素濃度($4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)より低い。すなわち、第1GaN層10aは、リーク電流を抑制するのに十分な濃度の炭素を含んでいない。炭素濃度が低い第1GaN層10aをバッファ層8上に形成すると、効果的な歪み緩和が起こる。なお、仮に第1GaN層10aの炭素濃度が高い(例えば、リーク電流の抑制に効果を奏する $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上)場合、バッファ層8の圧縮歪みを内在したままIII族窒化物半導体層10が成長する。その結果、歪み誘因ステップバンチングが発生し、半導体ウエハ1の表面を平滑にすることができない。表面平滑性が悪い半導体ウエハを用いて半導体装置を製造すると、半導体装置の特性が低下することがある。

20

【0031】

半導体ウエハ1は、第1GaN層10aの炭素濃度を第2GaN層10bの炭素濃度より低くすることにより、第1GaN層10aにおいてバッファ層8の圧縮歪みが緩和される。第1GaN層10aにおいてバッファ層8の圧縮歪みを緩和することにより、第2GaN層10bに高濃度の炭素が含まれていても、歪み誘因ステップバンチングが発生することを抑制することができる。半導体ウエハ1の表面を平滑にすることができ、良好な特性を示す半導体装置を製造することができる。

【0032】

なお、上記したように、III族窒化物半導体層10の炭素の濃度は、III族窒化物半導体層の成長圧力で制御することができる。他の成長条件が同じ場合、成長圧力が低くなるに従ってIII族窒化物半導体層の炭素濃度は高くなる。第1GaN層10aを結晶成長させた後に成長圧力を低く調整することにより、第2GaN層10bの炭素濃度を高くすることができる。

30

【0033】

例えば、バッファ層8上に、第1GaN層10aを形成することなく第2GaN層10bを厚く結晶成長させても、第2GaN層10bの厚みが増加するに従い、バッファ層8の圧縮歪みを緩和することができる。しかしながら、半導体ウエハの反りは、III族窒化物半導体層10「歪み」と「膜厚」の積に応じて変化する。すなわち、バッファ層8上に直接第2GaN層10bを形成すると、「歪み」が大きいので、僅かな「膜厚」の変化によって半導体ウエハの反り量が大きく変化する。そのため、高濃度の炭素を含む第2GaN層10bを厚く形成する方法では、半導体ウエハの反り量を制御することが困難になる。上記したように、半導体ウエハ1では、第1GaN層10aでバッファ層8の圧縮歪みを緩和した後に、高濃度の炭素を含む第2GaN層10bを結晶成長させる。そのため、III族窒化物半導体層10の膜厚に誤差が生じて、バッチ間の反り量のばらつきを抑制することができる。半導体ウエハ1は、反り量の制御のロバスト性を向上させることもできる。

40

【0034】

(実験例)

50

図3は、シリコン基板上に、界面層、AlN層、バッファ層、第1Ga₂N層、第2Ga₂N層をこの順に成長させた半導体ウエハの表面の光学顕微鏡写真である(実験例1)。第1Ga₂N層の炭素濃度は $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (成長圧力300 Torr)であり、第2Ga₂N層の炭素濃度は $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (成長圧力50 Torr)である。炭素濃度を第1Ga₂N層<第2Ga₂N層にすることにより、ステップフロー成長が確認され、表面が平滑な半導体ウエハが得られることが確認された。なお、X線逆格子マップ測定の結果、Ga₂N層のa軸方向の残留歪みは、0.11%であった。また、第1Ga₂N層10aのc軸は、成長面の垂線に対してm軸方向に0.26度傾斜していた。

【0035】

図4は、シリコン基板上に、界面層、AlN層、バッファ層、第2Ga₂N層、第1Ga₂N層をこの順に成長させた半導体ウエハの表面の光学顕微鏡写真である(実験例2)。実験例1の半導体ウエハとは、第1Ga₂N層と第2Ga₂N層を成長する順序が反対である。すなわち、実験例2の半導体ウエハは、バッファ層の表面に、高濃度の炭素を含む第2Ga₂N層を成長させている。図4から明らかのように、第2Ga₂N層、第1Ga₂N層の順に成長させると、表面に縞状の模様が形成されており、ステップの束(ステップバンチング)が形成されていることが確認できる。100μm視野角の原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope)で測定した結果、ステップの束の段差は、最大で80nmであった。X線逆格子マップ測定によるGa₂N層のa軸方向の残留歪みは、0.42%であった。また、第1Ga₂N層10aのc軸は、成長面の垂線に対してm軸方向に0.26度傾斜していた。

【0036】

上記実験例1, 2の結果より、炭素を含むGa₂N層を備える半導体ウエハにおいて、Ga₂N層の炭素濃度をバッファ層の接する部分で低くすることにより、Ga₂N層の歪みを抑制し、半導体ウエハの表面に歪み誘因ステップバンチングが形成されることを抑制できることが確認された。

【0037】

上記実施例ではIII族窒化物半導体層が第1Ga₂N層10a, 第2Ga₂N層10b, 第3Ga₂N層10cを備えている例について説明した。しかしながら、本明細書で開示する技術は、第3Ga₂N層10cの表面に、さらに別の窒化物半導体層が形成されている半導体ウエハにも適用することができる。また、第1Ga₂N層10a, 第2Ga₂N層10b, 第3Ga₂N層10cはIII族窒化物半導体層の一例であり、第1Ga₂N層10a, 第2Ga₂N層10b, 第3Ga₂N層10cはGa₂Nを主体とするIII族窒化物半導体で構成することもできる。

【0038】

また、図5に示すように、III族窒化物半導体層は、炭素濃度が裏面(バッファ層側)から表面に向けて連続的に変化する構造も取り得る。この場合、III族窒化物半導体層は、明確な層構造を形成していない場合もあり得る。このような場合であっても、III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークがIII族窒化物半導体層の表面と裏面の双方から離れた位置にあることにより、リーク電流を抑制しつつ、半導体ウエハの表面を平滑にすることができる。

【0039】

上記実施例では、III族窒化物半導体層10の炭素濃度が、第2Ga₂N層10b>第1Ga₂N層10a>第3Ga₂N層10cである半導体ウエハ1について説明した。しかしながら、本明細書で開示する技術は、III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークが、表面と裏面の双方から離れた位置にあれば効果を奏する。すなわち、第2Ga₂N層10bの炭素濃度がIII族窒化物半導体層10の中で最も高いという条件を満たしていれば、炭素濃度は、第2Ga₂N層10b>第3Ga₂N層10c>第1Ga₂N層10aであっても効果を奏する。III族窒化物半導体層の炭素濃度のピークが表面と裏面の双方から離れた位置にあれば、リーク電流を抑制しつつ、歪み誘因ステップバンチングを抑制することができる。

【0040】

10

20

30

40

50

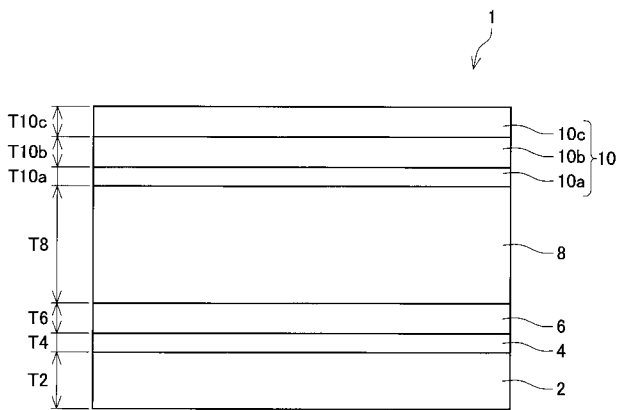
以上、本発明の具体例を詳細に説明したが、これらは例示に過ぎず、特許請求の範囲を限定するものではない。特許請求の範囲に記載の技術には、以上に例示した具体例を様々に変形、変更したものが含まれる。また、本明細書または図面に説明した技術要素は、単独であるいは各種の組合せによって技術的有用性を発揮するものであり、出願時請求項記載の組合せに限定されるものではない。また、本明細書または図面に例示した技術は複数目的を同時に達成し得るものであり、そのうちの一つの目的を達成すること自体で技術的有用性を持つものである。

【符号の説明】

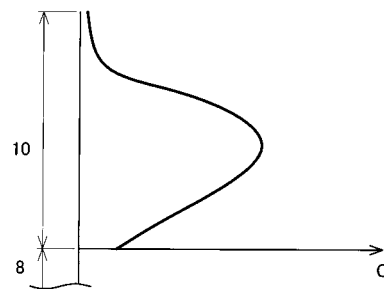
【 0 0 4 1 】

- 1 : 半導体ウエハ
- 2 : 基板
- 8 : パッファ層
- 10 : III族窒化物半導体層

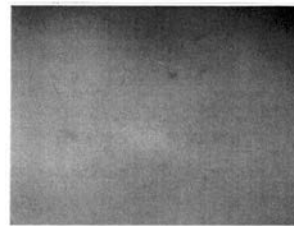
【 図 1 】



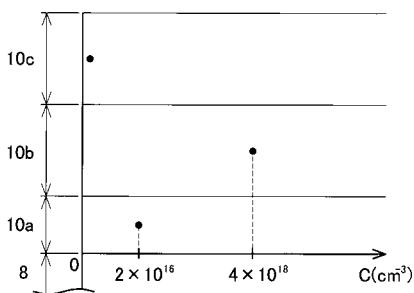
【 図 5 】



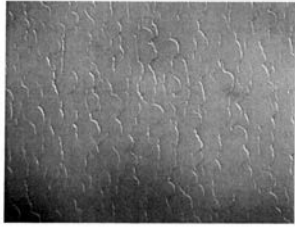
【 図 3 】



【 図 2 】



【 図 4 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード(参考)
C 3 0 B 25/16 (2006.01)
C 2 3 C 16/34 (2006.01)

(72)発明者 伊藤 健治
 愛知県長久手市横道 4 1 番地の 1 株式会社豊田中央研究所内

(72)発明者 大竹 伸幸
 愛知県刈谷市昭和町 1 丁目 1 番地 株式会社デンソー内

(72)発明者 星 真一
 愛知県刈谷市昭和町 1 丁目 1 番地 株式会社デンソー内

F ターム(参考) 4G077 AA02 AA03 AB02 BE15 DB05 EA04 EB01 ED06 EF03 HA12
 TB04 TC08 TC14 TC19 TJ04 TK01
 4K030 AA11 AA13 BA02 BA08 BA38 BB01 BB12 CA04 CA12 FA10
 LA14
 5F045 AB09 AB14 AB17 AF02 AF03 BB16 CA07 DA52 DA53 DA57
 DA69
 5F102 GB01 GC01 GD01 GJ02 GJ03 GK04 GK08 GL04 GM04 GQ01