

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5529420号  
(P5529420)

(45) 発行日 平成26年6月25日 (2014. 6. 25)

(24) 登録日 平成26年4月25日 (2014. 4. 25)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 L 21/205 (2006. 01)

H O 1 L 21/205

H O 1 L 29/872 (2006. 01)

H O 1 L 29/48 D

H O 1 L 29/47 (2006. 01)

H O 1 L 29/91 F

H O 1 L 29/868 (2006. 01)

H O 1 L 29/80 H

H O 1 L 29/861 (2006. 01)

H O 1 L 29/78 6 5 2 T

請求項の数 20 (全 21 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2009-27640 (P2009-27640)  
 (22) 出願日 平成21年2月9日 (2009. 2. 9)  
 (65) 公開番号 特開2010-183026 (P2010-183026A)  
 (43) 公開日 平成22年8月19日 (2010. 8. 19)  
 審査請求日 平成24年2月2日 (2012. 2. 2)

(73) 特許権者 000002130  
 住友電気工業株式会社  
 大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号  
 (73) 特許権者 000153236  
 株式会社光波  
 東京都練馬区向山2丁目6番8号  
 (74) 代理人 100088155  
 弁理士 長谷川 芳樹  
 (74) 代理人 100092657  
 弁理士 寺崎 史朗  
 (74) 代理人 100113435  
 弁理士 黒木 義樹  
 (74) 代理人 100108257  
 弁理士 近藤 伊知良

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 エピタキシャルウエハ、窒化ガリウム系半導体デバイスを作製する方法、窒化ガリウム系半導体デバイス、及び酸化ガリウムウエハ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

窒化ガリウム系半導体デバイスのためのエピタキシャルウエハであって、  
 単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハと、  
 前記酸化ガリウムウエハの前記主面上に設けられIII族窒化物からなるバッファ層と、  
 前記バッファ層上に設けられ第1の窒化ガリウム系半導体からなる第1のエピタキシャル層と、  
 を備え、

前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上の角度で傾斜すると共に4度以下の角度で傾斜する、ことを特徴とするエピタキシャルウエハ。

【請求項 2】

前記酸化ガリウムウエハの前記主面における傾斜の方向は、前記単斜晶系酸化ガリウムの[001]軸の方向である、ことを特徴とする請求項1に記載されたエピタキシャルウエハ。

【請求項 3】

前記第1の窒化ガリウム系半導体の結晶構造は六方晶であり、  
 前記第1のエピタキシャル層の主面の法線は、前記第1の窒化ガリウム系半導体のc軸に対して1度以下の角度を成す、ことを特徴とする請求項1又は請求項2に記載されたエピタキシャルウエハ。

## 【請求項 4】

前記第 1 のエピタキシャル層の主面における表面粗さ (RMS) は 5 マイクロメートル角のエリアにおいて 0.5 nm 以下である、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 3 のいずれか一項に記載されたエピタキシャルウエハ。

## 【請求項 5】

前記第 1 の窒化ガリウム系半導体は GaN からなる、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 4 のいずれか一項に記載されたエピタキシャルウエハ。

## 【請求項 6】

前記第 1 の窒化ガリウム系半導体は AlGa<sub>x</sub>N からなる、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 4 のいずれか一項に記載されたエピタキシャルウエハ。

10

## 【請求項 7】

前記第 1 の窒化ガリウム系半導体は InGa<sub>x</sub>N からなる、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 4 のいずれか一項に記載されたエピタキシャルウエハ。

## 【請求項 8】

前記第 1 の窒化ガリウム系半導体は AlN からなる、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 4 のいずれか一項に記載されたエピタキシャルウエハ。

## 【請求項 9】

前記バッファ層は、GaN からなる、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 8 のいずれか一項に記載されたエピタキシャルウエハ。

## 【請求項 10】

20

前記傾斜の角度は前記酸化ガリウムウエハの前記主面において分布しており、前記酸化ガリウムウエハの前記主面の全体にわたって 2 度以上 4 度以下の角度範囲にある、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 9 のいずれか一項に記載されたエピタキシャルウエハ。

## 【請求項 11】

前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの (100) 面に対して 2.5 度以上の角度で傾斜すると共に 3.5 度以下の角度で傾斜する、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 10 のいずれか一項に記載されたエピタキシャルウエハ。

## 【請求項 12】

窒化ガリウム系半導体デバイスであって、  
単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウム支持基体と、  
III 族窒化物からなる積層構造と、  
を備え、

30

前記積層構造は、前記酸化ガリウム支持基体の前記主面上に設けられ III 族窒化物からなるバッファ層と、前記バッファ層上に設けられ第 1 の窒化ガリウム系半導体からなる第 1 のエピタキシャル層とを含み、

前記酸化ガリウム支持基体の前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの (100) 面に対して 2 度以上の角度で傾斜すると共に 4 度以下の角度で傾斜する、ことを特徴とする窒化ガリウム系半導体デバイス。

## 【請求項 13】

前記積層構造は、前記バッファ層上に設けられ第 2 の窒化ガリウム系半導体からなる第 2 のエピタキシャル層と、前記第 1 のエピタキシャル層と前記第 2 のエピタキシャル層との間に設けられた活性層とを更に含み、

40

前記酸化ガリウム支持基体は導電性を有しており、

前記第 1 のエピタキシャル層は第 1 導電型を有しており、

前記第 2 のエピタキシャル層は前記第 1 導電型と反対の第 2 導電型を有しており、

前記活性層は量子井戸構造を有しており、

当該窒化ガリウム系半導体デバイスは半導体発光素子である、ことを特徴とする請求項 12 に記載された窒化ガリウム系半導体デバイス。

## 【請求項 14】

前記積層構造は、前記酸化ガリウム支持基体上に設けられた第 2 のエピタキシャル層を

50

更に含み、

前記第2のエピタキシャル層は前記第1のエピタキシャル層にヘテロ接合を成し、

前記第2の窒化ガリウム系半導体のバンドギャップは前記第1の窒化ガリウム系半導体のバンドギャップよりも大きく、

前記ヘテロ接合により、前記第1のエピタキシャル層と前記第2のエピタキシャル層との界面に二次元電子ガスが生成され、

当該窒化ガリウム系半導体デバイスは二次元電子ガストランジスタである、ことを特徴とする請求項12に記載された窒化ガリウム系半導体デバイス。

【請求項15】

第1導電型の窒化ガリウム系半導体領域からなるソース領域と、

第2導電型の窒化ガリウム系半導体領域からなり前記ソース領域を前記第1のエピタキシャル層から隔てるウエル領域と、

を更に備え、

前記酸化ガリウム支持基体は導電性を有しており、

前記第1のエピタキシャル層は第1導電型を有しており、

当該窒化ガリウム系半導体デバイスは縦型電界効果トランジスタである、ことを特徴とする請求項12に記載された窒化ガリウム系半導体デバイス。

【請求項16】

前記積層構造の最上層の主面における表面粗さ(RMS)は5マイクロメートル平方において0.5nm以下である、ことを特徴とする請求項12～請求項15のいずれか一項に記載された窒化ガリウム系半導体デバイス。

【請求項17】

窒化ガリウム系半導体デバイスを作製する方法であって、

単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハを準備する工程と、

前記酸化ガリウムウエハの前記主面上にIII族窒化物からなるバッファ層を成長する工程と、

第1の窒化ガリウム系半導体からなる第1のエピタキシャル層を前記バッファ層上に成長する工程と、

を備え、

前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上の角度で傾斜すると共に4度以下の角度で傾斜する、ことを特徴とする方法。

【請求項18】

前記バッファ層の成長温度は、摂氏400度以上であり、摂氏600度以下である、ことを特徴とする請求項17に記載された方法。

【請求項19】

単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハであって、

前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上の角度で傾斜すると共に4度以下の角度で傾斜する、ことを特徴とする酸化ガリウムウエハ。

【請求項20】

前記酸化ガリウムウエハの前記主面における傾斜の方向は、前記単斜晶系酸化ガリウムの[001]軸の方向である、ことを特徴とする請求項19に記載された酸化ガリウムウエハ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、エピタキシャルウエハ、窒化ガリウム系半導体デバイスを作製する方法、窒化ガリウム系半導体デバイス、及び酸化ガリウムウエハに関する。

【背景技術】

## 【 0 0 0 2 】

非特許文献 1 には、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板の (100) 面上に GaN 層をエピタキシャル成長することが記載されている。また、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板の (100) 面上には発光ダイオードが作製されており、この発光ダイオードは  $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N} / \text{In}_{0.03}\text{Ga}_{0.97}\text{N}$  多重量子井戸構造を含む。

## 【 先行技術文献 】

## 【 非特許文献 】

## 【 0 0 0 3 】

【 非特許文献 1 】 Kiyoshi SHIMAMURA, et al. Japanese. Journal of Applied Physics, Vol.44, No. 1 2005, pp L7-L8

10

## 【 発明の概要 】

## 【 発明が解決しようとする課題 】

## 【 0 0 0 4 】

非特許文献 1 では、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板の (100) 面上に摂氏 600 度で GaN バッファ層を成長した後に、摂氏 1070 度で 1000 nm の GaN 層を成長している。

## 【 0 0 0 5 】

しかしながら、発明者らの実験によれば、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板のジャスト (100) 面上への窒化ガリウム系半導体の堆積では、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板の全体にわたって平坦な c 面を有する窒化ガリウム系半導体膜が得られない。これ故に、窒化ガリウム系半導体膜の表面には、望まれないモフォロジが生じる。

20

## 【 0 0 0 6 】

本発明は、このような事情を鑑みてなされたものであり、酸化ガリウムウエハ上に設けられ平坦な表面を有する窒化ガリウム系半導体膜を含むエピタキシャルウエハを提供することを目的とする。また、本発明は、酸化ガリウムウエハ上に設けられた窒化ガリウム系半導体膜を含む窒化ガリウム系半導体デバイスを提供することを目的とする。さらに、本発明は、この窒化ガリウム系半導体デバイスを作製する方法を提供することを目的とする。さらにまた、本発明は、エピタキシャルウエハ、窒化ガリウム系半導体デバイスを作製する方法、及び窒化ガリウム系半導体デバイスのための酸化ガリウムウエハを提供することを目的とする。

## 【 課題を解決するための手段 】

30

## 【 0 0 0 7 】

本発明の一側面は、窒化ガリウム系半導体デバイスのためのエピタキシャルウエハである。このエピタキシャルウエハは、(a) 単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハと、(b) 前記酸化ガリウムウエハの前記主面上に設けられ III 族窒化物からなるバッファ層と、(c) 前記バッファ層上に設けられ第 1 の窒化ガリウム系半導体からなる第 1 のエピタキシャル層とを備える。前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの (100) 面に対して 2 度以上の角度で傾斜すると共に 4 度以下の角度で傾斜する。

## 【 0 0 0 8 】

このエピタキシャルウエハによれば、酸化ガリウムウエハの主面が単斜晶系酸化ガリウムの (100) 面に対して 2 度以上 4 度以下の角度で傾斜する。酸化ガリウムウエハの主面に窒化ガリウム系半導体を堆積するとき、上記の傾斜により、平坦な表面を有するエピタキシャル層が提供される。

40

## 【 0 0 0 9 】

本発明に係るエピタキシャルウエハでは、前記酸化ガリウムウエハの前記主面における傾斜の方向は、前記単斜晶系酸化ガリウムの [001] 軸の方向であることができる。

## 【 0 0 1 0 】

このエピタキシャルウエハによれば、酸化ガリウムが単斜晶系なので、[001] 軸への傾斜により、良好なモフォロジのエピタキシャル層が提供される。

## 【 0 0 1 1 】

50

本発明に係るエピタキシャルウエハでは、前記第1の窒化ガリウム系半導体の結晶構造は六方晶であり、前記第1のエピタキシャル層の主面の法線は、前記第1の窒化ガリウム系半導体のc軸に対して1度以下の角度を成すことができる。

【0012】

このエピタキシャルウエハによれば、ウエハ主面の傾斜により、エピタキシャル層の表面には、該エピタキシャル層の窒化ガリウム系半導体のc軸に対して1度以下の角度の傾斜が提供される。

【0013】

本発明に係るエピタキシャルウエハでは、前記第1のエピタキシャル層の主面における表面粗さ(RMS)は5マイクロメートル角のエリアにおいて0.5nm以下であることができる。

10

【0014】

このエピタキシャルウエハによれば、エピタキシャル層の主面の平坦性は、5マイクロメートル角のエリアにおいて0.5nm以下である表面粗さ(RMS)に低減される。

【0015】

本発明に係るエピタキシャルウエハでは、前記第1の窒化ガリウム系半導体は、GaN、AlGaN、InGaN、及びAlNのいずれかからなることができる。このエピタキシャルウエハは、上記の半導体を用いる窒化ガリウム系半導体デバイスに適用可能である。

【0016】

20

本発明に係るエピタキシャルウエハでは、前記バッファ層はGaNからなることができる。このエピタキシャルウエハによれば、GaNといった二元系III族窒化物系半導体をバッファ層の材料として用いることができる。

【0017】

本発明に係るエピタキシャルウエハでは、前記傾斜の角度は前記酸化ガリウム基板の前記主面において分布しており、前記酸化ガリウムウエハの前記主面の全体にわたって2度以上4度以下の角度範囲にあることができる。

【0018】

このエピタキシャルウエハによれば、ウエハの主面の全体にわたって良好なモフォロジのエピタキシャル膜が提供される。

30

【0019】

本発明に係るエピタキシャルウエハでは、前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2.5度以上の角度で傾斜すると共に3.5度以下の角度で傾斜することができる。

【0020】

このエピタキシャルウエハによれば、より高い平坦性エピタキシャル層主面を得ることができる。

【0021】

本発明の別の側面は、窒化ガリウム系半導体デバイスである。この窒化ガリウム系半導体デバイスは、(a)単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウム支持基体と、(b)III族窒化物からなる積層構造とを備える。前記積層構造は、前記酸化ガリウム支持基体の前記主面上に設けられIII族窒化物からなるバッファ層と、前記バッファ層上に設けられ第1の窒化ガリウム系半導体からなる第1のエピタキシャル層とを含む。前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上の角度で傾斜すると共に4度以下の角度で傾斜する。

40

【0022】

この窒化ガリウム系半導体デバイスは、酸化ガリウム支持基体上に設けられた積層構造を含む。上記の角度で傾斜する主面を有する酸化ガリウム支持基体上に積層構造を形成するとき、この傾斜により、平坦な表面を有するエピタキシャル層が提供される。これ故に、窒化ガリウム系半導体デバイスの特性がエピタキシャル表面の悪い平坦性に煩わされな

50

い。

【 0 0 2 3 】

本発明の窒化ガリウム系半導体デバイスでは、前記積層構造は、前記バッファ層上に設けられ第2の窒化ガリウム系半導体からなる第2のエピタキシャル層と、前記第1のエピタキシャル層と前記第2のエピタキシャル層との間に設けられた活性層とを更に含み、前記酸化ガリウムウエハは導電性を有しており、前記第1のエピタキシャル層は第1導電性を有しており、前記第2のエピタキシャル層は前記第1導電性と反対の第2導電性を有しており、前記活性層は量子井戸構造を有しており、当該窒化ガリウム系半導体デバイスは半導体発光素子である。

【 0 0 2 4 】

この窒化ガリウム系半導体デバイスは、酸化ガリウム支持基体上に設けられた発光デバイスのための積層構造を含む。これ故に、窒化ガリウム系半導体デバイスの特性がエピタキシャル表面の悪い平坦性に煩わされることなく、良好な特性を有する窒化ガリウム系半導体発光デバイスが提供される。

【 0 0 2 5 】

本発明の窒化ガリウム系半導体デバイスでは、前記積層構造は、前記酸化ガリウムウエハ上に設けられた第2のエピタキシャル層を更に含み、前記第2のエピタキシャル層は前記第1のエピタキシャル層にヘテロ接合を成し、前記第2の窒化ガリウム系半導体のバンドギャップは前記第1の窒化ガリウム系半導体のバンドギャップよりも大きく、前記ヘテロ接合により、前記第1のエピタキシャル層と前記第2のエピタキシャル層との界面に二次元電子ガスが生成され、当該窒化ガリウム系半導体デバイスは二次元電子ガストランジスタである。

【 0 0 2 6 】

この窒化ガリウム系半導体デバイスは、酸化ガリウム支持基体上に設けられた二次元電子ガストランジスタのための積層構造を含む。これ故に、窒化ガリウム系半導体デバイスの特性がエピタキシャル表面の悪い平坦性に煩わされることなく、良好な特性を有する二次元電子ガストランジスタが提供される。

【 0 0 2 7 】

本発明の窒化ガリウム系半導体デバイスは、第1導電性の窒化ガリウム系半導体領域からなるソース領域と、第2導電性の窒化ガリウム系半導体領域からなり前記ソース領域を前記第1のエピタキシャル層から隔てるウエル領域とを更に備えることができる、前記酸化ガリウムウエハは導電性を有しており、前記第1のエピタキシャル層は第1導電性を有しており、当該窒化ガリウム系半導体デバイスは縦型電界効果トランジスタである。

【 0 0 2 8 】

この窒化ガリウム系半導体デバイスは、酸化ガリウム支持基体上に設けられた縦型電界効果トランジスタのための構造を含む。これ故に、窒化ガリウム系半導体デバイスの特性がエピタキシャル表面の悪い平坦性に煩わされることなく、良好な特性を有する縦型電界効果トランジスタが提供される。

【 0 0 2 9 】

本発明の窒化ガリウム系半導体デバイスでは、前記積層構造の最上層の主面における表面粗さ(RMS)は5マイクロメートル角のエリアにおいて0.5nm以下であることができる。

【 0 0 3 0 】

この窒化ガリウム系半導体デバイスによれば、エピタキシャル層主面は良好な平坦性を示す。

【 0 0 3 1 】

本発明の更なる別の側面は、窒化ガリウム系半導体デバイスを作製する方法である。この方法は、(a)単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハを準備する工程と、(b)前記酸化ガリウムウエハの前記主面上にIII族窒化物からなるバッファ層を成長する工程と、(c)第1の窒化ガリウム系半導体からなる第1のエピタキシャ

10

20

30

40

50

ル層を前記バッファ層上に成長する工程とを備えることができる。前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上の角度で傾斜すると共に4度以下の角度で傾斜する。

【0032】

この方法によれば、酸化ガリウムウエハの主面が単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上4度以下の角度で傾斜する。この傾斜により、平坦な表面を有するエピタキシャル層が提供される。故に、窒化ガリウム系半導体デバイスの特性がエピタキシャル表面の悪い平坦性に煩わされない。

【0033】

本発明に係る方法では、前記バッファ層の成長温度は、摂氏400度以上であり、摂氏600度以下であることができる。

10

【0034】

本発明のまた更なる別の側面は、単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハであって、前記酸化ガリウムウエハの前記主面は、前記単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上の角度で傾斜すると共に4度以下の角度で傾斜する。

【0035】

この酸化ガリウムウエハによれば、酸化ガリウムウエハの主面が単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上4度以下の角度で傾斜する。この傾斜により、酸化ガリウムウエハ主面上にエピタキシャル成長された窒化ガリウム系半導体は平坦な表面を有する。

20

【0036】

本発明の更なる別の側面では、前記酸化ガリウムウエハの前記主面における傾斜の方向は前記単斜晶系酸化ガリウムの[001]軸の方向であることができる。

【0037】

この酸化ガリウムウエハによれば、酸化ガリウムが単斜晶系なので、[001]軸への傾斜により、良好なモフォロジのエピタキシャル層が提供される。

【0038】

本発明の上記の目的および他の目的、特徴、並びに利点は、添付図面を参照して進められる本発明の好適な実施の形態の以下の詳細な記述から、より容易に明らかになる。

【発明の効果】

30

【0039】

以上説明したように、本発明の一側面によれば、酸化ガリウムウエハ上に設けられ平坦な表面を有する窒化ガリウム系半導体膜を含むエピタキシャルウエハが提供される。また、本発明に係る別の側面によれば、酸化ガリウムウエハ上に設けられた窒化ガリウム系半導体膜を含む窒化ガリウム系半導体デバイスが提供される。さらに、本発明に係る更なる別の側面によれば、この窒化ガリウム系半導体デバイスを作製する方法が提供される。加えて、本発明に係るまた更なる別の側面によれば、エピタキシャルウエハ、窒化ガリウム系半導体デバイス、並びにエピタキシャルウエハ及び窒化ガリウム系半導体デバイスを作製する方法のための酸化ガリウムウエハが提供される。

【図面の簡単な説明】

40

【0040】

【図1】図1は、本実施の形態に係る、窒化ガリウム系半導体デバイス及びエピタキシャルウエハを作製する方法の主要な工程を示す図面である。

【図2】図2は単斜晶系酸化ガリウムウエハ及び単斜晶系酸化ガリウムの結晶格子を示す図面である。

【図3】図3は、工程S101～S103によって作製される窒化ガリウム系半導体デバイスを概略的に示す図面である。

【図4】図4は、酸化ガリウム基板の基板主面の傾斜角(オフ角)とGaNエピタキシャル膜の表面のモフォロジとの関係を示す図面である。

【図5】図5は、オフ角ゼロの酸化ガリウム基板を用いてエピタキシャルウエハの表面を

50

表す走査型電子顕微鏡像を示す図面である。

【図6】図6は、本実施の形態に係る、窒化ガリウム系半導体デバイス及びエピタキシャルウエハを作製する方法の主要な工程を示す図面である。

【図7】図7は、実施例2における発光ダイオードの構造を示す図面である。

【図8】図8は、酸化ガリウム基板主面のオフ角と、活性層成長の下地となる半導体層の表面粗さ及びオフ角並びにLED構造の光出力との関係を示す図面である。

【図9】図9は、本実施の形態に係る、高電子移動度トランジスタ及びエピタキシャルウエハを作製する方法の主要な工程を示す図面である。

【図10】図10は、図9の工程フローに従って作製される高電子移動度トランジスタ及びエピタキシャルウエハを概略的に示す図面である。

10

【図11】図11は、本実施の形態に係る、縦型電界効果トランジスタ及びエピタキシャルウエハを作製する方法の主要な工程を示す図面である。

【図12】図12は、図11の工程フローに従って作製される縦型電界効果トランジスタ及びエピタキシャルウエハを概略的に示す図面である。

【発明を実施するための形態】

【0041】

本発明の知見は、例示として示された添付図面を参照して以下の詳細な記述を考慮することによって容易に理解できる。引き続いて、添付図面を参照しながら、本発明のエピタキシャルウエハ、窒化ガリウム系半導体デバイス、窒化ガリウム系半導体デバイス及びエピタキシャルウエハを作製する方法、並びに酸化ガリウムウエハに係る実施の形態を説明する。可能な場合には、同一の部分には同一の符号を付する。

20

【0042】

図1は、本実施の形態に係る、窒化ガリウム系半導体デバイス及びエピタキシャルウエハを作製する方法の主要な工程を示す図面である。図1(a)に示される工程フローの工程S101では、単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハ11を準備する。図2(a)を参照すると、酸化ガリウムウエハ11が示される。このウエハ11は、例えば  $\text{-Ga}_2\text{O}_3$  単結晶からなる。ウエハ11は主面11a及び裏面11bを含み、主面11a及び裏面11bは互いに平行である。ウエハ11の主面11aは、単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上の角度で傾斜すると共に4度以下の角度  $A_{OFF}$  で傾斜する。

30

【0043】

この酸化ガリウムウエハ11によれば、該ウエハ11の主面11aが単斜晶系酸化ガリウムの(100)面に対して2度以上4度以下の角度で傾斜する。この傾斜により、酸化ガリウムウエハ主面11a上にエピタキシャル成長された窒化ガリウム系半導体は平坦な表面を有する。

【0044】

また、酸化ガリウムウエハ主面の角度  $A_{OFF}$  は該主面11aの全体にわたって分布していることができる。酸化ガリウムウエハ主面11a上にエピタキシャル成長された窒化ガリウム系半導体の表面は、ウエハ主面11aの全体にわたって良好なモフォロジを有する。

40

【0045】

図2(a)を参照すると、ウエハ11の主面11aに対して傾斜する代表的な(100)面  $S_{100}$  及び結晶座標系CRが示されており、結晶座標系CRはa軸、b軸及びc軸を有する。図2(b)を参照すると、単斜晶系酸化ガリウムの結晶格子が示されている。単斜晶系酸化ガリウムの結晶格子のa軸、b軸及びc軸の格子定数は、それぞれ、 $1.223\text{ nm}$ であり、 $0.304\text{ nm}$ 及び $0.58\text{ nm}$ である。ベクトルVa、Vb、Vcは、それぞれ、a軸、b軸及びc軸の方向を示す。ベクトルVa及びVbは(001)面を規定し、ベクトルVb、Vcは(100)面を規定し、ベクトルVc及びVaは(010)面を規定する。ベクトルVa及びVbの成す角度 及びベクトルVb及びVcの成す角度 は90度であり、ベクトルVc及びVaの成す角度 は103.7度である。ウエハ

50



主面 11a の傾斜角  $A_{OFF}$  を示すために、図 2 (b) には、ウエハ主面 11a が一点鎖線で示されている。このウエハ 11 によれば、酸化ガリウムが単斜晶系なので、 $[001]$  軸への傾斜により、ウエハ主面 11a 上に、良好なモフォロジのエピタキシャル層を成長できる。

【0046】

図 1 に示される工程 S102 では、複数の III 族窒化物膜を含む積層構造を形成して、エピタキシャルウエハを作製する。III 族窒化物膜の成長は、例えば有機金属気相成長 (MOVPE) 法等で行われる。

【0047】

まず、図 1 (b) に示されるように、成長炉 10 のサセプタ上にウエハ 11 を配置する。次いで、図 1 (c) に示されるように、ウエハ 11 の主面 11a 上に、バッファ層 13 を成長する。バッファ層 13 は、例えば GaN 等といった III 族窒化物からなる。バッファ層 13 が GaN からなるとき、成長炉 10 には、トリメチルガリウム (TMG) 及びアンモニア ( $NH_3$ ) を含む原料ガス G0 が供給される。バッファ層 13 の成長温度 T1 は、例えば摂氏 400 度以上摂氏 600 度以下の範囲になり、バッファ層 13 はいわゆる低温バッファ層と呼ばれる。バッファ層 13 の膜厚は、例えば 10 ナノメートル以上 50 ナノメートル以下の範囲であることができる。続けて、成長温度 T1 より高い温度 T2 に成長炉 10 の温度を上昇した後に、図 2 (d) に示されるように、バッファ層 13 の主面 13a 上に、第 1 の窒化ガリウム系半導体からなるエピタキシャル層 15 を成長する。エピタキシャル層 15 は、例えば GaN、AlGaN、InGaN、AlN 等といった六方晶系の III 族窒化物からなる。エピタキシャル層 15 の膜厚は、例えば 300 ナノメートル以上 10 マイクロメートル以下の範囲であることができる。エピタキシャル層 15 が GaN からなるとき、成長炉 10 には、トリメチルガリウム (TMG) 及びアンモニア ( $NH_3$ ) を含む原料ガス G1 が供給される。エピタキシャル層 15 の成長温度 T2 は例えば GaN の場合、摂氏 900 度以上摂氏 1200 度以下の範囲になり、エピタキシャル層 15 は、窒化ガリウム系半導体デバイスを構成する半導体層であり、またアンドープ、p 型ドーパント添加、及び n 型ドーパントであることができる。エピタキシャル層 15 に p 導電性または n 導電性を付与するために、エピタキシャル層 15 を成長する際に、原料ガスに加えてドーパントガスを供給する。ドーパントとしては、p 型導電性のために例えばシクロペンタジエニルマグネシウム ( $Cp_2Mg$ ) を使い、n 型導電性のために例えばシラン ( $SiH_4$ ) を用いることができる。

【0048】

これまでの窒化ガリウム系半導体の堆積により、エピタキシャルウエハ E が得られる。エピタキシャルウエハ E は、酸化ガリウムウエハ 11、バッファ層 13 及びエピタキシャル層 15 を含む。

【0049】

エピタキシャルウエハ E では、ウエハ主面 11a の傾斜範囲が単斜晶系酸化ガリウムの (100) 面に対して 2 度以上 4 度以下であるとき、エピタキシャル層 15 の主面 15a の法線  $VN_E$  は、エピタキシャル層 15 の窒化ガリウム系半導体の c 軸に対して 1 度以下の角度を成している。ウエハ主面 11a の傾斜を有する単斜晶系酸化ガリウム基板上に窒化ガリウム系半導体をエピタキシャル成長するとき、エピタキシャル層表面のモフォロジが改善されて、該エピタキシャル層 15 の窒化ガリウム系半導体の c 軸を示すベクトル VC と法線ベクトル  $VN_E$  との成す角度  $AE_{OFF}$  は 1 度以下にまで低減される。

【0050】

また、エピタキシャルウエハ E では、エピタキシャル層 15 の主面 15a の平坦性は 5 マイクロメートル角のエリアにおいて 0.5 nm 以下である表面粗さ (RMS) に低減される。この表面粗さは、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて測定される。

【0051】

図 1 に示される工程 S103 では、エピタキシャルウエハ E 上に複数の電極を形成する。図 3 (a) を参照すると、第 1 の電極 17a が、エピタキシャルウエハ E のエピタキシ

10

20

30

40

50

ヤル層主面 15 a 上に形成される。第 1 の電極 17 a は、例えばショットキ電極であり、ショットキ電極は例えば金 (Au) から成る。第 1 の電極 17 a は、エピタキシャル層にショットキ接合 19 を成す。第 2 の電極 17 b が、エピタキシャルウエハ E の酸化ガリウム基板裏面 11 b 上に形成される。第 2 の電極 17 b は例えばオーミック電極である。工程 S 101 ~ S 103 によって、図 3 (a) に示される窒化ガリウム系半導体デバイスが作製される。この窒化ガリウム系半導体デバイスはショットキ接合ダイオードである。

#### 【0052】

必要な場合には、エピタキシャルウエハ E は、エピタキシャル層 15 上に順に成長された一又は複数の窒化ガリウム系半導体層を含むことができる。これらの窒化ガリウム系半導体層は、例えば工程 S 102 において有機金属気相成長法で成長される。

10

#### 【0053】

図 3 (b) を参照すると、エピタキシャルウエハ E は、例えばエピタキシャル層 15 上に成長された別のエピタキシャル層 23 を含むことができる。エピタキシャル層 15 はアンドープ又は n 型導電性を示し、またエピタキシャル層 23 は p 型窒化ガリウム系半導体層からなる。エピタキシャル層 23 はエピタキシャル層 15 に p n 接合 25 を成す。第 1 の電極 27 a が、エピタキシャルウエハ E のエピタキシャル層主面 23 a 上に形成される。第 1 の電極 27 a は、例えば p オーミック電極である。第 2 の電極 17 b が、エピタキシャルウエハ E の酸化ガリウム基板裏面 11 b 上に形成される。工程 S 101 ~ S 103 によって、図 3 (b) に示される窒化ガリウム系半導体デバイスが作製される。この窒化ガリウム系半導体デバイスは p n 接合ダイオードである。

20

#### 【0054】

本実施の形態に係るエピタキシャルウエハは、p n 接合ダイオードの他にも、後ほど説明されるように、発光素子やトランジスタ等のための窒化ガリウム系半導体積層構造を提供できる。

#### 【0055】

##### (実施例 1)

11 枚の単斜晶系酸化ガリウム基板を準備した。これらの酸化ガリウム基板の主面は、酸化ガリウム基板の単結晶の (100) 面に対して 0 度以上 5 度以下の範囲で傾斜していた。傾斜角度のピッチは 0.5 度であった。傾斜の方向は、酸化ガリウム基板の単結晶の [001] 軸方向であった。傾斜角及び傾斜の方向は、X 線回折法によって決定された。

30

#### 【0056】

酸化ガリウム基板の基板主面の傾斜角 (オフ角) と GaN エピタキシャル膜の表面のモフォロジとの関係を調べるために、これらの酸化ガリウム基板上に、以下のように、MOVPE 法を用いて、GaN バッファ層及び GaN エピタキシャル膜を堆積した。酸化ガリウム基板を成長炉に配置した後に、成長炉に NH<sub>3</sub>、TMG 及び SiH<sub>4</sub> を含む原料ガスを供給して、摂氏 500 度の温度で低温 GaN バッファ層を酸化ガリウム基板上に成長した。GaN バッファ層の厚さは 25 ナノメートルであった。次いで、基板温度を摂氏 1050 度に変更した後に、成長炉に NH<sub>3</sub>、TMG 及び SiH<sub>4</sub> を含む原料ガスを供給して、バッファ層上に GaN エピタキシャル層を成長した。GaN エピタキシャル層の厚さは 3 マイクロメートルであった。

40

#### 【0057】

準備した全ての酸化ガリウム基板に同様のエピタキシャル成長を行って 11 枚のエピタキシャルウエハを作製した。図 4 は、酸化ガリウム基板の基板主面の傾斜角 (オフ角) と GaN エピタキシャル膜の表面のモフォロジとの関係を示す図面である。

#### 【0058】

図 5 は、オフ角ゼロの酸化ガリウム基板を用いてエピタキシャルウエハの表面を表す走査型電子顕微鏡像を示す図面である。図 5 に示されるように、オフ角ゼロ又は微小なオフ角の酸化ガリウム基板上の GaN エピタキシャル膜には、数マイクロメートル程度の段差が形成されており、これ故に、GaN エピタキシャル膜の表面粗さは大きい。一方、段差の間にはテラス状の平坦な領域が形成されている。表面モフォロジは、いわゆる段々畑状

50

の外観を示す。このため、原子間力顕微鏡を用いて表面粗さ（RMS）を測定する際には、GaNエピタキシャル膜表面上の異なる位置で表面粗さを測定した後に、これらの測定値の最大値を求めた。

【0059】

なお、低温GaNバッファ層の成膜温度を摂氏400度以上摂氏600度以下の温度範囲内のいくつかの温度で成長した後に、この低温GaNバッファ層上に、上記の成膜条件でGaNエピタキシャル層を成長した。これらのエピタキシャルウエハのいずれも、図5に示される波状モフォロジと同様のモフォロジを示した。故に、オフ角ゼロ度におけるエピタキシャル膜の走査型電子顕微鏡像は、バッファ層の成膜温度に起因するものではなく、酸化ガリウム基板主面のゼロオフ角に因るものと考えられる。図4に示されたエピタキシャルウエハの作製では、低温GaNバッファ層を摂氏500度で成膜した。

10

【0060】

表面粗さの測定は、原子間力顕微鏡を用いて5マイクロメートル角のエリアで行われた。図4を参照すると、エピタキシャル膜の表面粗さ及びオフ角は、酸化ガリウム基板主面のオフ角がジャスト（100）面から増加するにつれて一旦減少する。しかしながら、エピタキシャル膜の表面粗さ及びオフ角は、3度を超えるオフ角の範囲において、酸化ガリウム基板主面のオフ角が増加するについて増加する。オフ角3度近傍の角度範囲で、表面粗さ及び表面モフォロジが大幅に改善された。

【0061】

基板表面のオフ角1.5度以上4.5度以下の範囲で、表面粗さが1.3以下であった。また、基板表面のオフ角2.0度以上4.0度以下の範囲で、表面粗さが0.5未満（0.47以下）であった。さらに、基板表面のオフ角2.5度以上3.5度以下の範囲で、表面粗さが0.35以下であった。発明者らの検討によれば、オフ角2.0度以上4.0度以下の範囲における表面粗さは、半導体発光デバイスや半導体電子デバイスの作製において、サファイア基板上的GaNエピタキシャル膜の表面粗さが0.20ナノメートルであることに比較して、十分に許容可能な値である。オフ角が2.5度以上3.5度以下の範囲であるとき、表面モフォロジに起因するデバイス特性劣化が低減される。

20

【0062】

また、GaNエピタキシャル膜におけるc軸の方向とGaNエピタキシャル膜表面の法線軸との成す角度をX線回折法を用いて見積もった。基板表面のオフ角1.5度以上4.5度以下の範囲で、GaN膜のオフ角が1.5度以下であった。また、基板表面のオフ角2.0度以上4.0度以下の範囲で、GaN膜のオフ角が1度未満（0.9度以下）であった。さらに、基板表面のオフ角2.5度以上3.5度以下の範囲で、GaN膜のオフ角が0.6度以下であった。発明者らの検討によれば、酸化ガリウム基板のオフ角が2～4度であるとき、GaNエピタキシャル膜のオフ角が1度未満となり、良好な表面平坦性のエピタキシャル成長が可能である。

30

【0063】

大きな段差または表面粗さを有するGaNエピタキシャル膜上に、多重量子井戸構造の多層膜を成長するとき、井戸層の組成や厚さの均一性が乱れる。このため、発光強度の低下や発光スペクトルの半値全幅の増加といった特性低下が現れる。また、大きな段差または表面粗さを有するGaNエピタキシャル膜を高耐圧デバイスに用いるとき、電界の不均一等によりデバイス逆耐圧が低下する可能性がある。

40

【0064】

以上、実施例を参照しながら説明したように、エピタキシャルウエハEでは、酸化ガリウム基板主面の全体にわたって2度以上4度以下の角度範囲にあるとき、エピタキシャルウエハEの主面の全体にわたって良好なモフォロジのエピタキシャル膜が提供される。また、酸化ガリウムウエハの主面における傾斜角は、単斜晶系酸化ガリウムの（100）面に対して2.5度以上の角度で傾斜すると共に3.5度以下の角度で傾斜するとき、より高い平坦性エピタキシャル層主面を得ることができる。

【0065】

50

本実施例では、GaN膜を含むエピタキシャルウエハを説明したけれども、発明者らの検討によれば、酸化ガリウム基板主面におけるオフ角の寄与はGaNに限定されることなく、酸化ガリウム基板主面上のエピタキシャル膜は、AlGaN、InGaN、InAlGaN及びAlN等からなることができる。故に、このエピタキシャルウエハEは窒化ガリウム系半導体デバイスに適用可能である。

#### 【0066】

図6は、本実施の形態に係る、窒化ガリウム系半導体デバイス及びエピタキシャルウエハを作製する方法の主要な工程を示す図面である。図6に示されるフローチャートの工程S101では、単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハ11を準備する。工程S102では、複数のIII族窒化物膜を含む積層構造を形成して、エピタキシャルウエハを作製する。III族窒化物膜の成長は、例えば有機金属気相成長(MOVPE)法等で行われる。この実施の形態では、図1(d)に示される積層構造と異なる積層構造を形成する。図2(b)と同様に、工程S105では、成長炉10のサセプタ上にウエハ11を配置する。次いで、ウエハ11の主面11a上に、バッファ層13を成長する。

10

#### 【0067】

成長温度T1より高い温度T2に成長炉10の温度を上昇した後に、工程S106では、バッファ層13の主面13a上に、第1導電型エピタキシャル層を成長する。このエピタキシャル層は窒化ガリウム系半導体からなる。第1導電型エピタキシャル層は、例えばn型GaN、n型AlGaN、n型InAlGaN、n型InAlN等といった六方晶系のIII族窒化物からなる。第1導電型エピタキシャル層がGaNからなるときは、成長炉10には、TMG、NH<sub>3</sub>及びSiH<sub>4</sub>を含む原料ガスを供給して、n型GaN膜を成長する。第1導電型エピタキシャル層がGaNからなるとき、第1導電型エピタキシャル層の成長温度T2は例えば摂氏900度以上摂氏1200度以下の範囲になり、第1導電型エピタキシャル層は、窒化ガリウム系半導体デバイスを構成する半導体層である。

20

#### 【0068】

次いで、工程S107において、第1導電型エピタキシャル層上に活性層を形成する。活性層は、交互に配列された井戸層及び障壁層を含む。井戸層は、例えばGaN、InGaN、InAlGaN等からなる。障壁層は、例えばGaN、InGaN、InAlGaN等からなる。井戸層の成長温度は例えば摂氏500度以上摂氏900度以下の範囲にあり、障壁層の成長温度は例えば摂氏550度以上摂氏950度以下の範囲にある。

30

#### 【0069】

この後に、工程S108において、第2導電型エピタキシャル層を活性層上に形成する。第2導電型エピタキシャル層は、例えばp型電子ブロック層及びp型コンタクト層を含むことができる。

#### 【0070】

これまでの窒化ガリウム系半導体の堆積により、エピタキシャルウエハが得られる。エピタキシャルウエハは、酸化ガリウムウエハ11と、酸化ガリウムウエハ11上に成長された半導体積層とを含む。この半導体積層は、第1導電型エピタキシャル層、第2導電型エピタキシャル層および活性層を含み、活性層は、第1導電型エピタキシャル層と第2導電型エピタキシャル層との間に設けられている。

40

#### 【0071】

工程S109において、エピタキシャルウエハをエッチングして半導体メサを形成する。このエッチングにより半導体積層の一部が除去されて、半導体積層内の第1導電型エピタキシャル層の一部が露出されている。このエピタキシャルウエハ加工の後に、導電型エピタキシャル層の露出部分上に第1の電極を形成すると共に半導体メサの上面に第2の電極を形成する。これらの工程により、窒化ガリウム系半導体発光デバイスのための基板生産物が作製される。

#### 【0072】

(実施例2)

50

図7は、実施例2における発光ダイオードの構造を示す図面である。発光ダイオードLEDは、単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウム支持基体31と、III族窒化物からなる積層構造33とを備える。積層構造33は、半導体メサの形状を成している。半導体メサは、低温GaNバッファ層35と、n型GaN層37と、量子井戸構造の活性層39と、p型窒化ガリウム系半導体層41とを含む。p型窒化ガリウム系半導体層41は、例えばp型AlGaN電子ブロック層及びp型GaNコンタクト層を含む。

#### 【0073】

一例のLED構造は以下のものである。

低温GaNバッファ層35：25ナノメートル

n型GaN層37：3マイクロメートル

活性層39：6つの井戸層のMQW

障壁層39a：GaN層、厚さ15nm

井戸層39b：InGaN層、厚さ3nm

窒化ガリウム系半導体層41のp型AlGaN電子ブロック層：20nm

窒化ガリウム系半導体層41のp型GaNコンタクト層：50nm。

#### 【0074】

実施例1と同様に、11枚の単斜晶系酸化ガリウム基板を準備した、これらの酸化ガリウム基板の主面は、酸化ガリウム基板の単結晶の(100)面に対して0度以上5度以下の範囲で傾斜していた。傾斜の角度のピッチは0.5度であった。傾斜の方向は、酸化ガリウム基板の単結晶の[001]軸方向であった。傾斜角及び傾斜の方向は、X線回折法によって決定された。

#### 【0075】

酸化ガリウム基板の基板主面の傾斜角(オフ角)とGaNエピタキシャル膜の表面のモフォロジ及びエレクトロルミネッセンスとの関係を調べるために、これらの酸化ガリウム基板上に、上記のように、MOVPE法を用いて、LED構造を形成した。このLED構造の半導体メサの上面にp側電極を形成すると共に、n型半導体の露出領域にn側電極を形成した。

#### 【0076】

表面粗さの測定は、原子間力顕微鏡を用いて5マイクロメートル角のエリアで行われた。図8を参照すると、活性層成長の下地となる半導体層の表面粗さ及びオフ角は、酸化ガリウム基板主面のオフ角がジャスト(100)面から増加するにつれて一旦減少する。しかしながら、エピタキシャル膜の表面粗さ及びオフ角は、3度を超えるオフ角の範囲において、酸化ガリウム基板主面のオフ角が増加するにつれて増加する。オフ角3度近傍の角度範囲で、表面粗さ及びモフォロジが大幅に改善された。

#### 【0077】

基板表面のオフ角1.5度以上4.5度以下の範囲で、表面粗さが1.3以下であった。また、基板表面のオフ角2.0度以上4.0度以下の範囲で、表面粗さが0.5未満(0.47以下)であった。さらに、基板表面のオフ角2.5度以上3.5度以下の範囲で、表面粗さが0.35以下であった。発明者らの検討によれば、オフ角2.0度以上4.0度以下の範囲における表面粗さは、サファイア基板上的のGaNエピタキシャル膜の表面粗さが0.20ナノメートルであることに比較して、発光ダイオードの作製において十分に許容可能な値である。オフ角が2.0度以上4.0度以下の範囲であるとき、モフォロジに起因する発光特性の劣化が低減される。

#### 【0078】

また、活性層成長の下地となるエピタキシャル膜におけるc軸の方向とGaNエピタキシャル膜表面の法線軸との成す角度をX線回折法を用いて見積もった。基板表面のオフ角1.5度以上4.5度以下の範囲で、GaN膜のオフ角が1.5度以下であった。また、基板表面のオフ角2.0度以上4.0度以下の範囲で、GaN膜のオフ角が1度未満(0.9度以下)であった。さらに、基板表面のオフ角2.5度以上3.5度以下の範囲で、GaN膜のオフ角が0.6度以下であった。発明者らの検討によれば、酸化ガリウム基板

のオフ角が2～4度であるとき、GaNエピタキシャル膜のオフ角が1度未満となり、良好な表面平坦性のエピタキシャル成長が可能である。

【0079】

さらに、基板生産物に配列されたp側電極（電極サイズ：0.4mm×0.4mm）の一つとn側電極との間に電源を接続して、発光ダイオードLEDに順方向のバイアスを与えた。印加電流20mAにおける光出力を測定した。基板表面のオフ角1.5度以上4.5度以下の範囲で、光出力が3.1mW以上であった。また、基板表面のオフ角2.0度以上4.0度以下の範囲で、光出力が4.3mW以上であった。さらに、基板表面のオフ角2.5度以上3.5度以下の範囲で、光出力が4.7mW以上であった。酸化ガリウム基板のオフ角が2～4度であるとき、本実施例におけるLED構造からの光出力は、サファイア基板上に作製された同様のLED構造における光出力の8割程度である、このLED構造は良好な発光特性を示した。

10

【0080】

この発光ダイオードLEDは、酸化ガリウム基板32から分離された酸化ガリウム支持基体31上に設けられた発光デバイスのための積層構造33を含む。これ故に、発光ダイオードLEDの特性がエピタキシャル表面の悪い平坦性に煩わされることなく、良好な発光特性を有する発光ダイオードLEDが提供される。

【0081】

図9は、本実施の形態に係る、高電子移動度トランジスタ、及びこの素子のためのエピタキシャルウエハを作製する方法の主要な工程を示す図面である。図10は、図9の工程フローに従って作製される高電子移動度トランジスタ及びエピタキシャルウエハを概略的に示す図面である。図9に示されるフローチャートの工程S101では、単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハ51を準備する。工程S105では、図2(b)と同様に、成長炉のサセプタ上にウエハ51を配置する。次いで、ウエハ51の主面51a上に低温パフ層53を成長する。パフ層53の成長温度T1より高い温度T2に成長炉の温度を上昇した後に、工程S110では、パフ層53の主面53a上に、エピタキシャル層55を成長する。このエピタキシャル層55は窒化ガリウム系半導体からなる。エピタキシャル層55は、例えばアンドープGaN、アンドープAlGaN、アンドープInAlGaN、アンドープInGaN等といった六方晶系のIII族窒化物からなる。エピタキシャル層55がGaNからなるときは、成長炉には、TMG及びNH<sub>3</sub>を含む原料ガスを供給して、アンドープGaN膜を成長する。エピタキシャル層55がGaNからなるとき、エピタキシャル層55の成長温度T2は例えば摂氏900度以上摂氏1200度以下の範囲である。続けて、工程S111では、エピタキシャル層55の主面55a上に別のエピタキシャル層57を成長する。このエピタキシャル層57は窒化ガリウム系半導体からなり、エピタキシャル層57のバンドギャップはエピタキシャル層55のバンドギャップよりも大きい。エピタキシャル層57は、例えばアンドープGaN、アンドープAlGaN、アンドープInAlGaN、アンドープInAlN等といった六方晶系のIII族窒化物からなる。エピタキシャル層57がAlGaNからなるときは、成長炉には、トリメチルアルミニウム(TMA)、TMG及びNH<sub>3</sub>を含む原料ガスを供給して、アンドープAlGaN膜を成長する。エピタキシャル層57がAlGaNからなるとき、エピタキシャル層57の成長温度は例えば摂氏900度以上摂氏1300度以下の範囲である。エピタキシャル層57はエピタキシャル層55にヘテロ接合61aを成しており、ヘテロ接合61aに沿ってエピタキシャル層55内には、二次元電子ガス層61bが生成される。これらの工程により、高電子移動度トランジスタHEMTのためのエピタキシャルウエハE<sub>HEMT</sub>が得られる。

20

30

40

【0082】

工程S112では、エピタキシャルウエハE<sub>HEMT</sub>に、ゲート電極63a、ソース電極63bおよびドレイン電極63cを形成する。ゲート電極63aはショットキ電極からなり、ソース電極63b及びドレイン電極63cはオーミック電極からなる。ゲート電極63aは、ゲート電圧に応じて、ヘテロ接合61aに沿ったチャネルの電子密度を変化さ

50

せて、ドレイン電極 6 3 c からソース電極 6 3 b へ流れる電流を制御する。

【 0 0 8 3 】

この高電子移動度トランジスタ H E M T は、酸化ガリウム基板 5 1 から分離された酸化ガリウム支持基体 5 2 上に設けられた積層構造 5 9 を含む。酸化ガリウム支持基体 5 2 の主面 5 2 a は上記の角度で傾斜するので、この傾斜により、平坦な表面を有するエピタキシャル層 5 7 が提供される。これ故に、窒化ガリウム系半導体からなる高電子移動度トランジスタ H E M T の特性がエピタキシャル表面の悪い平坦性に煩わされない。

【 0 0 8 4 】

図 1 1 は、本実施の形態に係る、縦型電界効果トランジスタ及びエピタキシャルウエハを作製する方法の主要な工程を示す図面である。図 1 2 は、図 1 1 の工程フローに従って作製される縦型電界効果トランジスタ及びエピタキシャルウエハを概略的に示す図面である。図 1 1 に示されるフローチャートの工程 S 1 0 1 では、単斜晶系酸化ガリウムからなる主面を有する酸化ガリウムウエハ 5 1 を準備する。工程 S 1 0 5 では、図 2 ( b ) と同様に、成長炉のサセプタ上にウエハ 5 1 を配置する。次いで、ウエハ 5 1 の主面 5 1 a 上に低温バッファ層 5 3 を成長する。バッファ層 5 3 の成長温度 T 1 より高い温度 T 2 に成長炉の温度を上昇した後に、工程 S 1 1 0 では、バッファ層 5 3 の主面 5 3 a 上に、エピタキシャル層 6 5 を成長する。このエピタキシャル層 6 5 は窒化ガリウム系半導体からなる。エピタキシャル層 6 5 は、例えば n 型 G a N 、 n 型 A l G a N 、 n 型 I n A l G a N 、 n 型 I n A l N 等といった六方晶系の III 族窒化物からなる。エピタキシャル層 6 5 が n 型 G a N からなるときは、成長炉には、T M G 、 N H <sub>3</sub> 及び S i H <sub>4</sub> を含む原料ガスを供給して、n 型 G a N 膜を成長する。n 型 G a N 膜の多数キャリアは電子である。エピタキシャル層 5 5 が G a N からなるとき、エピタキシャル層 6 5 の成長温度は例えば摂氏 9 0 0 度以上摂氏 1 2 0 0 度以下の範囲である。続けて、工程 S 1 1 3 では、エピタキシャル層 6 5 の表面に、n 型ソース半導体領域 6 7 と、p 型ウエル半導体領域 6 9 とを形成する。この形成は、フォトリソグラフィ、エッチング、及び選択成長等を用いて n 型ソース半導体領域 6 7 及び p 型ウエル半導体領域 6 9 は、例えば G a N といった窒化ガリウム系半導体からなることができる。n 型ソース半導体領域 6 7 は、p 型ウエル半導体領域 6 9 によってエピタキシャル層 6 5 から隔離される。p 型ウエル半導体領域 6 9 の一端は、半導体積層 7 1 の表面に現れている。これらの工程により、縦型電界効果トランジスタ F E T のためのエピタキシャルウエハ E <sub>F E T</sub> が得られる。

【 0 0 8 5 】

工程 S 1 1 5 では、p 型ウエル半導体領域 6 9 の一端上には、絶縁膜 7 3 を介してゲート電極 7 5 a を形成すると共に、n 型ソース半導体領域 6 7 上にソース電極 7 5 b を形成し、ウエハ 5 1 の裏面にドレイン電極 7 5 c を形成する。ゲート電極 7 5 a は、ゲート電圧に応じて、絶縁膜 7 3 を介して p 型ウエル半導体領域 6 9 の一端に表面反転層 7 7 を形成して、n 型ドリフト層領域のエピタキシャル層 6 5 と n 型ソース半導体領域 6 7 との間の電気経路を制御する。

【 0 0 8 6 】

この縦型電界効果トランジスタ F E T は、酸化ガリウム基板 5 1 から分離された酸化ガリウム支持基体 5 2 上に設けられた積層構造 5 9 を含む。酸化ガリウム支持基体 5 2 の主面 5 2 a は上記の角度で傾斜するので、この傾斜により、平坦な表面を有するエピタキシャル層 6 5 が提供される。これ故に、窒化ガリウム系半導体からなる縦型電界効果トランジスタ F E T の特性がエピタキシャル表面の悪い平坦性に煩わされない。

【 0 0 8 7 】

好適な実施の形態において本発明の原理を図示し説明してきたが、本発明は、そのような原理から逸脱することなく配置および詳細において変更され得ることは、当業者によって認識される。本発明は、本実施の形態に開示された特定の構成に限定されるものではない。したがって、特許請求の範囲およびその精神の範囲から来る全ての修正および変更権利を請求する。

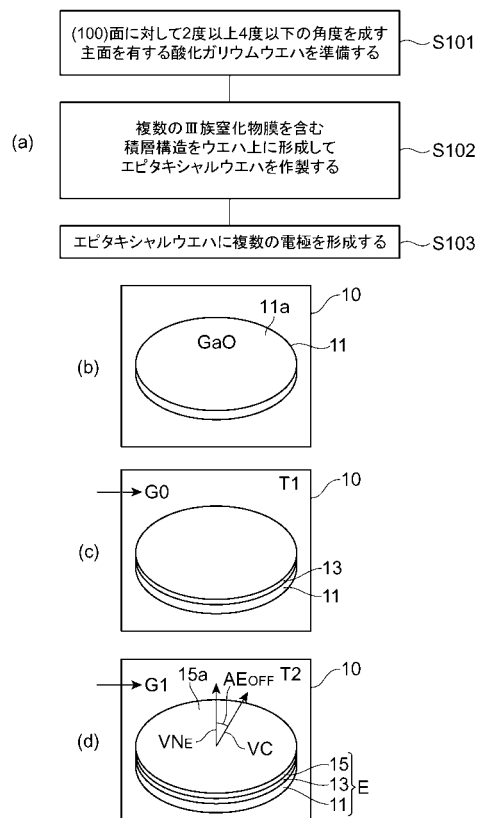
【 符号の説明 】

## 【 0 0 8 8 】

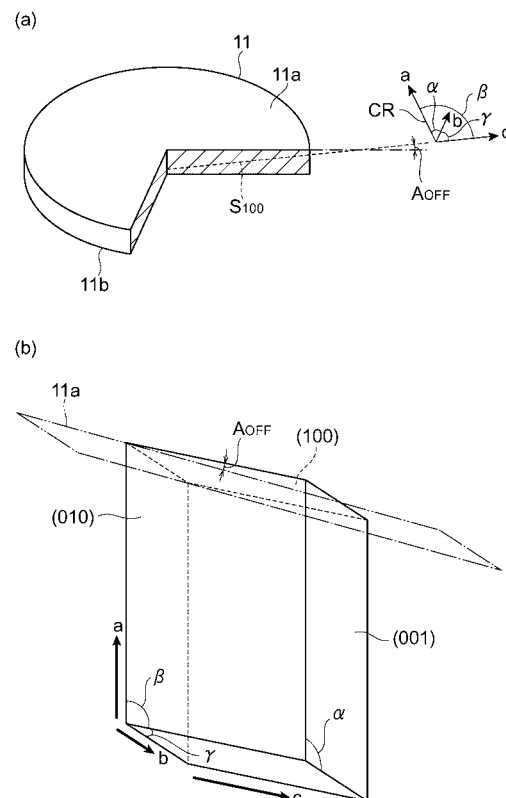
1 1 ... 酸化ガリウムウエハ、1 1 a ... 酸化ガリウムウエハ主面、1 1 b ... 酸化ガリウムウエハ裏面、 $A_{OFF}$  ... 角度、 $S_{100}$  ... (100) 面、1 3 ... バッファ層、1 5 ... エピタキシャル層、 $VN_E$  ... 法線、 $VC$  ... c 軸ベクトル、 $AE_{OFF}$  ... 角度、1 7 a、1 7 b ... 電極、E ... エピタキシャルウエハ、2 3 ... エピタキシャル層、2 5 ... p n 接合、2 7 a、2 7 b ... 電極、3 1 ... 酸化ガリウム支持基体、3 2 ... 酸化ガリウム基板、3 3 ... 積層構造、3 5 ... 低温 GaN バッファ層、3 7 ... n 型 GaN 層、3 9 ... 活性層、3 9 a ... 障壁層、3 9 b ... 井戸層、4 1 ... 窒化ガリウム系半導体層、5 1 ... ウエハ、5 2 ... 酸化ガリウム支持基体、5 3 ... バッファ層、5 5 ... エピタキシャル層、5 7 ... エピタキシャル層、6 1 a ... ヘテロ接合、6 1 b ... 二次元電子ガス層、 $E_{HEMT}$  ... エピタキシャルウエハ、6 3 a ... ゲート電極、6 3 b ... ソース電極、6 3 c ... ドレイン電極、5 9 ... 積層構造、6 5 ... エピタキシャル層、6 7 ... n 型ソース半導体領域、6 9 ... p 型ウエル半導体領域、7 1 ... 半導体積層、 $E_{FET}$  ... エピタキシャルウエハ、7 3 ... 絶縁膜、7 5 a ... ゲート電極、7 5 b ... ソース電極、7 5 c ... ドレイン電極

10

【 図 1 】

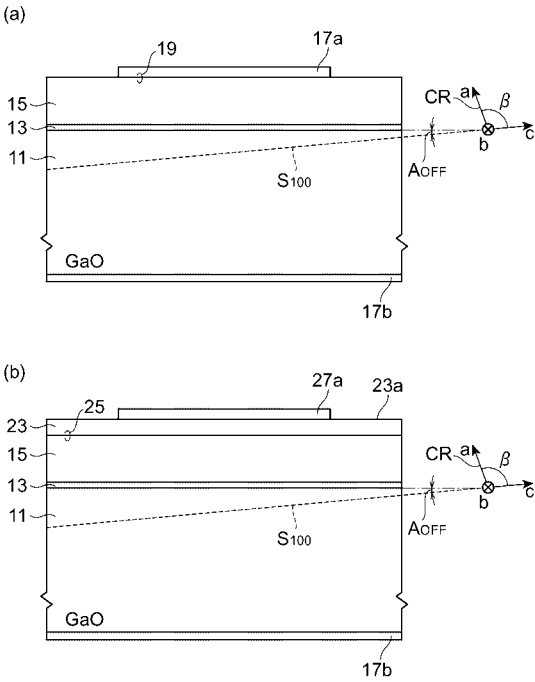


【 図 2 】





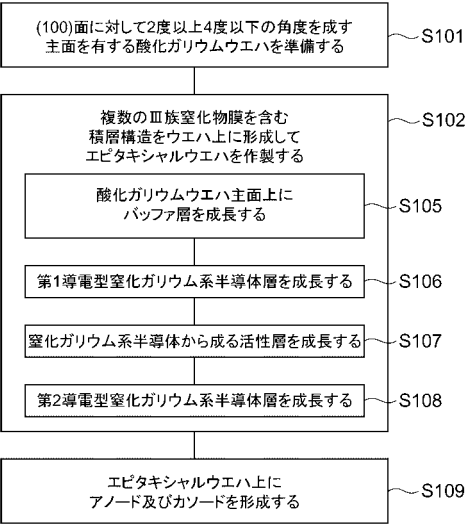
【図 3】



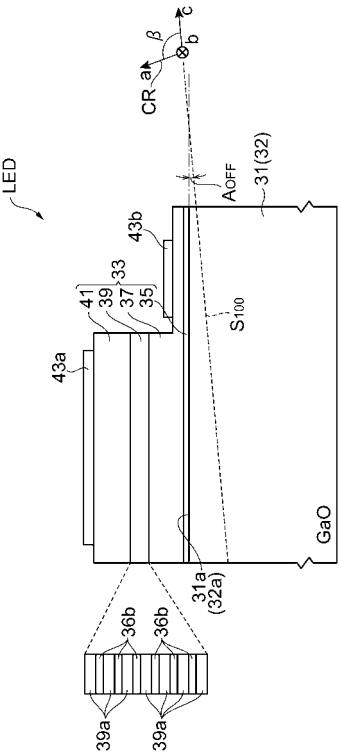
【図 4】

酸化ガリウム基板の オフ角(度)	GaNエピの オフ角(度)	RMSの最大値 (nm)
0.0	3.0	約8
0.5	2.4	約5
1.0	2.1	約2
1.5	1.5	1.1
2.0	0.9	0.47
2.5	0.6	0.35
3.0	0.0	0.23
3.5	0.4	0.31
4.0	0.9	0.49
4.5	1.6	1.3
5.0	1.9	約2

【図 6】



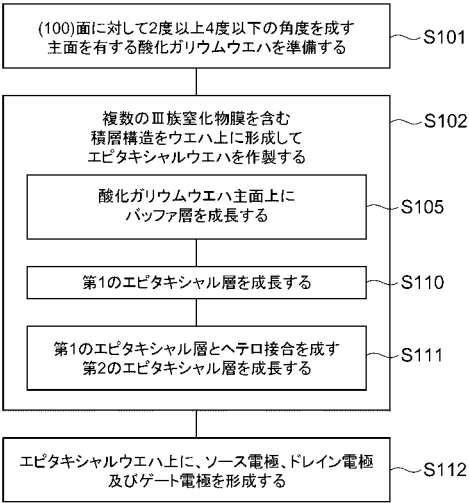
【図 7】



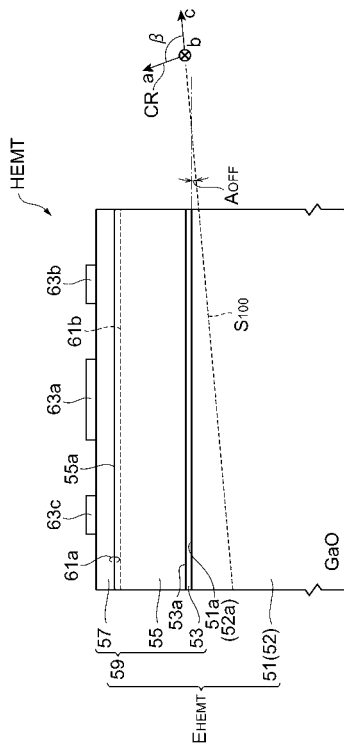
【図 8】

酸化ガリウム基板の オフ角(度)	GaNエピの オフ角(度)	光出力(mW) (20mA注入時)	RMSの最大値 (nm)
0.0	3.0	1.7	約8
0.5	2.4	2.0	約5
1.0	2.1	2.5	約2
1.5	1.5	3.2	1.1
2.0	0.9	4.4	0.47
2.5	0.6	4.7	0.35
3.0	0.0	5.2	0.23
3.5	0.4	4.9	0.31
4.0	0.9	4.3	0.49
4.5	1.6	3.1	1.3
5.0	1.9	2.4	約2

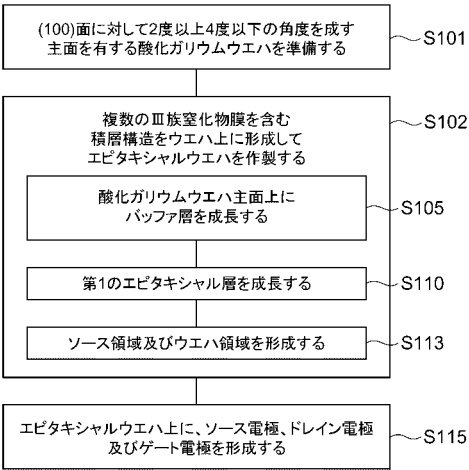
【図 9】



【図 10】

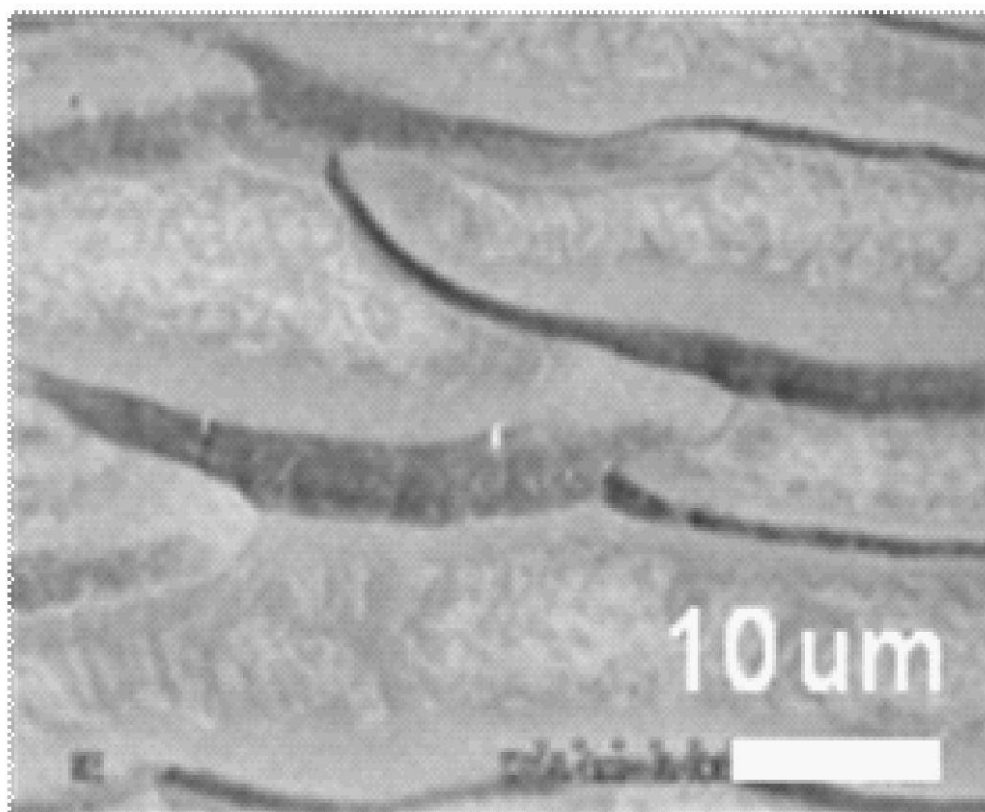


【図 11】



A cross-sectional diagram of a GaO-based FET device. The substrate is labeled 75c. A layer of GaO is shown at the bottom right. A channel region 51(52) is defined by a dashed line S100. Above the channel, there are gate electrodes 69 and 67, and source/drain regions 71 and 73. The gate stack includes layers 65 and 53. A contact layer 75b is shown above the source/drain regions. An arrow labeled CR indicates a crystallographic direction, and angles  $\alpha$  and  $\beta$  are indicated relative to the surface normal.

【図 5】



## フロントページの続き

(51)Int.Cl.		F I
H 0 1 L 29/812 (2006.01)		H 0 1 L 29/78 6 5 8 E
H 0 1 L 29/778 (2006.01)		H 0 1 L 33/00 1 6 0
H 0 1 L 21/338 (2006.01)		
H 0 1 L 29/78 (2006.01)		
H 0 1 L 29/12 (2006.01)		
H 0 1 L 21/336 (2006.01)		
H 0 1 L 33/16 (2010.01)		

(72)発明者 橋本 信  
 兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

(72)発明者 秋田 勝史  
 兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

(72)発明者 藤原 伸介  
 兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

(72)発明者 中幡 英章  
 兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

(72)発明者 元木 健作  
 兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

審査官 今井 淳一

(56)参考文献 特開2008-207968(JP,A)  
 特開2002-274997(JP,A)  
 特開2005-340308(JP,A)  
 特開2008-235961(JP,A)  
 特開2008-156141(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

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