(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第5309452号
(P5309452)
(45)発行日　平成25年10月9日(2013.10.9)　(24)登録日　平成25年7月12日(2013.7.12)

(51)Int.Cl.　　　　　　　　　　　　　ＦＩ
HO1L 21/20 (2006.01)　　HO1L 21/20
HO1L 21/338 (2006.01)　　HO1L 29/80 H
HO1L 29/778 (2006.01)
HO1L 29/812 (2006.01)

請求項の数 14　(全 28 頁)

(21)出願番号　特願2007-49792(P2007-49792)
(22)出願日　平成19年2月28日(2007.2.28)
(65)公開番号　特開2008-218479(P2008-218479A)
(43)公開日　平成20年9月18日(2008.9.18)
審査請求日　平成22年2月1日(2010.2.1)

（出願人による申告）国等の委託研究の成果に係る特許出願（平成１３年度新エネルギー・産業技術総合開発機構基盤技術研究促進事業に係る委託研究、産業活力再生特別措置法第３０条の適用を受けるもの）

(73)特許権者　000106276
サンケン電気株式会社
埼玉県新座市北野３丁目６番３号
(74)代理人　100072154
弁理士　高野　則次
(72)発明者　柳原　将貴
埼玉県新座市北野三丁目６番３号　サンケン電気株式会社内

審査官　河合　俊英

最終頁に続く

(54)【発明の名称】半導体ウエーハ及び半導体素子及び製造方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

基板（２）と、前記基板（２）の一方の主面上に配置され且つ化合物半導体で形成されたバッファ領域（３又は3a又は３ｂ又は３ｃ又は３ｄ）と、前記バッファ領域（３又は3a又は３ｂ又は３ｃ又は３ｄ）の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）とを有する半導体ウエーハであって、

前記バッファ領域（３又は3a又は３ｂ又は３ｃ又は３ｄ）は、第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）と、該第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の上に配置された第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）とから成り、

前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）はサブ多層構造バッファ領域（６）と単層構造バッファ領域（７）との交互積層体から成り、

前記サブ多層構造バッファ領域（６）は交互に配置された複数の第１及び第２の層（６１、６２又は６２a～６２d）を含み、

前記第１の層（６１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記第２の層（６２）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記単層構造バッファ領域（７）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）

の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第１の層（６１）及び前記第２の層（６２）よりも厚く形成され、
前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は交互に配置された複数の第３及び第４の層（８１、８２又は８2a～８２ｄ）を含み、
　前記第３の層（８１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
　前記第４の層（８２又は８2a～８２ｄ）は前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）は前記主半導体領域（４）の平均的に見た格子定数よりも小さい平均的に見た格子定数を有し、
前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は、前記主半導体領域（４）と前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）との間の平均的に見た格子定数を有していることを特徴とする半導体ウエーハ。
【請求項２】
　前記基板（２）はシリコン、シリコン化合物、及びサファイアから選択された１つからなることを特徴とする請求項１記載の半導体ウエーハ。
【請求項３】
　前記第１の層（６１）はアルミニウムを第１の割合で含む窒化物半導体から成り、
　前記第２の層（６２）はアルミニウムの含有割合が前記第１の割合よりも小さい第２の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体から成り、
　前記単層構造バッファ領域（７）はアルミニウムの含有割合が前記第１の割合よりも小さい第３の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体から成り、
　前記第３の層（８１）はアルミニウムを第４の割合で含む窒化物半導体から成り、
　前記第４の層（８２又は８2a～８２ｄ）はアルミニウムの含有割合が前記第４の割合よりも小さい第５の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体から成ることを特徴とする請求項１又は２記載の半導体ウエーハ。
【請求項４】
前記第４の層（８２又は８2a～８２ｄ）は前記第２の層（６２）よりも厚く形成されていることを特徴とする請求項３記載の半導体ウエーハ。
【請求項５】
前記主半導体領域（４）は平均的に見たアルミニウムの含有割合が前記第４の割合よりも小さい第６の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体から成ることを特徴とする請求項３記載の半導体ウエーハ。
【請求項６】
前記第１の多層構造バッファ領域の前記サブ多層構造バッファ領域（６）の数は、前記第１の多層構造バッファ領域の前記単層構造バッファ領域（７）の数よりも１個多く、前記第１の多層構造バッファ領域の最も上に前記サブ多層構造バッファ領域（６）が配置され、
前記第２の多層構造バッファ領域は、前記第１の多層構造バッファ領域の最も上の前記サブ多層構造バッファ領域（６）の上に直接に配置されていることを特徴とする請求項１記載の半導体ウエーハ。
【請求項７】
基板（２）と、前記基板（２）の一方の主面上に配置され且つ化合物半導体で形成されたバッファ領域（３ｂ）と、前記バッファ領域（３ｂ）の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）とを有する半導体ウエーハであって、
　前記バッファ領域（３ｂ）は、第１の多層構造バッファ領域（５）と、該第１の多層構造バッファ領域（５）の上に配置された第２の多層構造バッファ領域（８ａ）とから成り、
　前記第１の多層構造バッファ領域（５）はサブ多層構造バッファ領域（６）と単層構造

バッファ領域（７）との交互積層体から成り、
前記サブ多層構造バッファ領域（６）は交互に配置された複数の第１及び第２の層（６１、６２）を含み、
前記第１の層（６１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記第２の層（６２）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記単層構造バッファ領域（７）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第１の層（６１）及び前記第２の層（６２）よりも厚く形成され、
前記第２の多層構造バッファ領域（８ａ）は複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）と該複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）の相互間に配置された第２の単層構造バッファ領域（９０）とから成り、
前記複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）は交互に配置された複数の第３及び第４の層（８１、８２）をそれぞれ含み、
前記第３の層（８１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
前記第４の層（８２）は前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
前記第１の多層構造バッファ領域（５）は前記主半導体領域（４）の平均的に見た格子定数よりも小さい平均的に見た格子定数を有し、
前記第２の多層構造バッファ領域（８ａ）は、前記主半導体領域（４）と前記第１の多層構造バッファ領域（５）との間の平均的に見た格子定数を有していることを特徴とする半導体ウエーハ。
【請求項８】
基板（２）と、前記基板（２）の一方の主面上に配置され且つ化合物半導体で形成されたバッファ領域（３ｃ）と、前記バッファ領域（３ｃ）の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）とを有する半導体ウエーハであって、
前記バッファ領域（３ｃ）は、第１の多層構造バッファ領域（５ａ）と第２の多層構造バッファ領域（８ｂ）とから成り、
前記第１の多層構造バッファ領域（５ａ）は第１のサブ多層構造バッファ領域（６）と第１の単層構造バッファ領域（７）との交互積層体から成り、
前記第１のサブ多層構造バッファ領域（６）の数は、前記第１の単層構造バッファ領域（７）の数よりも１個多く、前記第１の多層構造バッファ領域(５a)の最も上に前記第１のサブ多層構造バッファ領域（６）が配置され、
前記第１のサブ多層構造バッファ領域（６）は交互に配置された複数の第１及び第２の層（６１、６２又は６２a～６２d）を含み、
前記第１の層（６１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記第２の層（６２）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記単層構造バッファ領域（７）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第１の層（６１）及び前記第２の層（６２）よりも厚く形成され、
前記第２の多層構造バッファ領域（８ｂ）は、複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）と、該複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）の相互間

に配置された第２の単層構造バッファ領域（９０）及び第３のサブ多層構造バッファ領域（９１）とを有し、
前記複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）は交互に配置された複数の第３及び第４の層（８１、８２）をそれぞれ含み、
　前記第３の層（８１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
　前記第４の層（８２）は前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
前記第３のサブ多層構造バッファ領域（９１）は、交互に配置された複数の第５及び第６の層（６１´，６２´）を含み、
　前記第５の層（６１´）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
　前記第６の層（６２´）は前記第５の層（６１´）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
前記第１の多層構造バッファ領域（５ａ）は前記主半導体領域（４）の平均的に見た格子定数よりも小さい平均的に見た格子定数を有し、
前記第２の多層構造バッファ領域（８ｂ）は、前記主半導体領域（４）と前記第１の多層構造バッファ領域（５ａ）との間の平均的に見た格子定数を有していることを特徴とする半導体ウエーハ。
【請求項９】
前記第１の多層構造バッファ領域に含まれる複数の第２の層（６２a～６２ｄ）は、前記基板から前記主半導体領域（４）に向かって徐々に増大するように互いに異なる厚み(Ｔ1～Ｔ4)を有していることを特徴とする請求項１乃至８のいずれか１つに記載の半導体ウエーハ。
【請求項１０】
前記第２の多層構造バッファ領域に含まれる複数の第４の層（８２ａ～８２ｄ）は、前記第１の多層構造バッファ領域から前記主半導体領域（４）に向かって徐々に増大するように互いに異なる厚み（Ｔ11～Ｔ14）を有していることを特徴とする請求項１乃至９のいずれか１つに記載の半導体ウエーハ。
【請求項１１】
　前記単層構造バッファ領域（７）と前記第２の層（６２又は６２ａ～６２ｄ）と前記第４の層（８２又は８２ａ～８２ｄ）とは互いに同一の窒化物半導体で形成されていることを特徴とする請求項１乃至１０のいずれか１つに記載の半導体ウエーハ。
【請求項１２】
　前記サブ多層構造バッファ領域は５～１０００nmの厚さを有し、前記単層構造バッファ領域は１００～４００nmの厚さを有していることを特徴とする請求項１乃至１１のいずれか１つに記載の半導体ウエーハ。
【請求項１３】
　基板（２）と、前記基板（２）の一方の主面上に配置され且つ化合物半導体で形成されたバッファ領域（３又は３ａ又は３ｂ又は３ｄｃ）と、前記バッファ領域の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）と、前記主半導体領域（４）上に配置された少なくとも第１及び第２の主電極と、前記主半導体領域（４）上に配置され且つ前記第１及び第２の主電極間の電流の流れを制御する機能を有している制御電極と、前記基板の他方の主面に形成され且つ前記第１又は第２の主電極に電気的にされている補助電極とを備えた半導体素子であって、
前記バッファ領域（３又は３ａ又は３ｂ又は３ｄｃ）は、第１の多層構造バッファ領域（

５又は５ａ又は５ｂ）と、該第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の上に配置された第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）とから成り、

前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）はサブ多層構造バッファ領域（６）と単層構造バッファ領域（７）との交互積層体から成り、

前記サブ多層構造バッファ領域（６）は交互に配置された複数の第１及び第２の層（６１、６２）を含み、

前記第１の層（６１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記第２の層（６２）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記単層構造バッファ領域（７）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第１の層（６１）及び前記第２の層（６２）よりも厚く形成され、

前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は交互に配置された複数の第３及び第４の層（８１、８２又は８２a～８２ｄ）を含み、

前記第３の層（８１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記第４の層（８２又は８２a～８２ｄ）は前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）は前記主半導体領域（４）の平均的に見た格子定数よりも小さい平均的に見た格子定数を有し、

前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は、前記主半導体領域（４）と前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）との間の平均的に見た格子定数を有していることを特徴とする半導体素子。

【請求項１４】

基板（２）の一方の主面上に化合物半導体から成るバッファ領域と、前記バッファ領域の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）とを有する半導体ウエーハを製造する方法において、

前記基板（２）を構成する材料の格子定数よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成る第１の層（６１）と前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成る第２の層（６２）との交互積層体から成るサブ多層構造バッファ領域（６）を前記基板（２）の一方の主面上に形成する第１の工程と、

前記サブ多層構造バッファ領域（６）の上に、前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成る単層構造バッファ領域（７）を前記第２の層（６２）よりも厚く形成する第２の工程と、

前記第１及び第２の工程と同一の方法で前記サブ多層構造バッファ領域（６）と実質的に同一の構成を有する別のサブ多層構造バッファ領域（６）及び前記単層構造バッファ領域（７）と実質的に同一の構成を有する別の単層構造バッファ領域（７）を繰り返して形成して第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）を得る第３の工程と、

前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の上に、前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄い第３の層（８１）と前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄い第４の層（８２）との積層体を含み、且つ平均的に見た格子定数が、前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の平均的に見た格子定数よりも大きい第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）を形成する第４の工程と、

前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）の上に化合物半導体から成り且つ平均的に見た格子定数が、前記第１及び第２の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ、８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）の平均的に見た格子定数よりも大きい主半導体領域（４）を形成する第５の工程と
を有している半導体ウエーハの製造方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、シリコン又はシリコン化合物から成る基板上に窒化物半導体をエピタキシャル成長させた半導体ウエーハ、及びこの半導体ウエーハで形成されたＨＥＭＴ、ＭＥＳＦＥＴ、ＳＢＤ（ショットキーバリアーダイオード）、ＬＥＤ（発光ダイオード）等の半導体素子に関する。
【背景技術】
【０００２】
シリコン基板上に窒化物半導体をエピタキシャル成長させた半導体ウエーハは、特開２００３-５９９４８号公報（特許文献１）等に開示されている。シリコン基板はサファイア基板に比べて低コストであるという特長を有する。しかし、シリコン基板の線膨張係数は約４．７０×１０$^{-6}$／Ｋ、窒化物半導体としてのＧａＮの線膨張係数は約５．５９×１０$^{-6}$／Ｋであり、両者の間に比較的大きな差がある。なお、ＧａＮ以外の窒化物半導体の線膨張係数もシリコン基板の線膨張係数よりも大きい。また、シリコンと窒化物半導体は格子定数が互いに相違する。このため、シリコン基板上に窒化物半導体を形成すると、窒化物半導体に応力が加わり、ここにクラックや転位が発生し易い。この問題を解決するために上記特許文献１の技術では、シリコン基板上に多層構造バッファ領域が設けられ、このバッファ領域の上に半導体素子形成用の窒化物半導体領域がエピタキシャル成長されている。上記多層構造バッファ領域は良好な応力緩和効果を有するので、バッファ領域上の半導体素子形成用の窒化物半導体領域のクラックや転位が減少する。
【０００３】
しかし、シリコン基板の上に比較的厚いバッファ領域を介して窒化物半導体から成る素子用の主半導体領域を形成すると、半導体ウエーハに反りが生じる。この半導体ウエーハの反りは、窒化物半導体領域の厚みが増大するに従って増大する。また、半導体ウエーハの面積（直径）が増大するに従って反りも増大する。なお、窒化物半導体領域の厚みを増大させることは、半導体素子の縦方向（厚み方向）における耐圧を高めるために要求される。周知のように窒化物半導体領域の厚みが厚いほど窒化物半導体領域の一方の主面と他方の主面との間の耐圧が高くなる。半導体ウエーハの面積（直径）を増大させることは、半導体素子のコストを低減するために要求される。半導体ウエーハの面積（直径）が増大すると、一枚の半導体ウエーハから形成できる半導体素子の個数が多くなり、半導体素子のコストを低減することが可能になる。
シリコン基板の上に窒化物半導体を形成する別の方法として、ＡｌＧａＮ層とＧａＮ層とを繰り返し積層した構成をそれぞれ有する第１及び第２の超格子層とこれ等の間に配置したＧａＮ層とから成るバッフア領域をシリコン基板の上に設け、このバッフア領域の上に主半導体領域のためのＧａＮ層を設ける方法が非特許文献１に開示されている。また、非特許文献２には特許文献３のＡｌＧａＮ層とＧａＮ層とから成る超格子層の代わりにＡｌＮ層とＧａＮ層とから成る超格子層を設けることが開示されている。
非特許文献１及び２の方法を採用すると、主半導体領域のためのＧａＮ層のクラック及び結晶性が改善される。しかし、半導体ウエーハを厚く形成すると反りの問題が発生する。
【特許文献１】特開２００３-５９９４８号公報
【非特許文献１】Applied Physics Letters, Volume 75,Number 14, October 4,1999, S.A.Nikishin, High quality GaN grown on Si(111) by gas source molecular beam epitaxy with ammonia

【非特許文献２】Applied Physics Letters, Volume 79, Number 20, November 12, 2001, Eric Feltin, et.al.「Stree control in GaN grown on Si(111) by metalorganic vapor phase epitaxy」
【発明の開示】
【発明が解決しようとする課題】
【０００４】
従って、本発明が解決しようとする課題は、シリコン又はシリコン化合物から成る基板の上に窒化物半導体領域をエピタキシャル成長させせた半導体ウエーハに反りが生じることであり、本発明の目的は反りを良好に低減することができる半導体ウエーハ及び半導体素子及びその製造方法を提供することである。
【課題を解決するための手段】
【０００５】
上記課題を解決するための本発明を図面の参照符号を伴って説明する。なお、特許請求の範囲及びここでの参照符号は、本発明の理解を助けるためのものであって、本発明を限定するものではない。
本発明は、基板（２）と、前記基板（２）の一方の主面上に配置され且つ化合物半導体で形成されたバッファ領域（３又は3a又は３ｂ又は３ｃ又は３ｄ）と、前記バッファ領域（３又は3a又は３ｂ又は３ｃ又は３ｄ）の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）とを有する半導体ウエーハであって、
前記バッファ領域（３又は3a又は３ｂ又は３ｃ又は３ｄ）は、第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）と、該第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の上に配置された第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）とから成り、
前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）はサブ多層構造バッファ領域（６）と単層構造バッファ領域（７）との交互積層体から成り、
前記サブ多層構造バッファ領域（６）は交互に配置された複数の第１及び第２の層（６１、６２又は６２a～６２d）を含み、
前記第１の層（６１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記第２の層（６２）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記単層構造バッファ領域（７）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第１の層（６１）及び前記第２の層（６２）よりも厚く形成され、
前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は交互に配置された複数の第３及び第４の層（８１、８２又は８２a～８２ｄ）を含み、
前記第３の層（８１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記第４の層（８２又は８２a～８２ｄ）は前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）は前記主半導体領域（４）の平均的に見た格子定数よりも小さい平均的に見た格子定数を有し、
前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は、前記主半導体領域（４）と前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）との間の平均的に見た格子定数を有していることを特徴とする半導体ウエーハに係わるものである。
【０００６】
なお、請求項２に示すように、前記基板（２）はシリコン、シリコン化合物、及びサファイアから選択された１つからなることが望ましい。

また、請求項３に示すように、前記第１の層（６１）はアルミニウムを第１の割合で含む窒化物半導体から成り、前記第２の層（６２）はアルミニウムの含有割合が前記第１の割合よりも小さい第２の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体から成り、前記単層構造バッファ領域（７）はアルミニウムの含有割合が前記第１の割合よりも小さい第３の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体から成り、　前記第３の層（８１）はアルミニウムを第４の割合で含む窒化物半導体から成り、　前記第４の層（８２又は８２a～８２ｄ）はアルミニウムの含有割合が前記第４の割合よりも小さい第５の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体から成ることが望ましい。

また、請求項４に示すように、前記第４の層（８２又は８２a～８２ｄ）は前記第２の層（６２）よりも厚く形成されていることが望ましい。

また、請求項５に示すように、前記主半導体領域（４）は平均的に見たアルミニウムの含有割合が前記第４の割合よりも小さい第６の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体から成ることが望ましい。

また、請求項１のバッファ領域の変形として、請求項６に示すように、前記第１の多層構造バッファ領域の前記サブ多層構造バッファ領域（６）の数を、前記第１の多層構造バッファ領域の前記単層構造バッファ領域（７）の数よりも１個多くし、前記第１の多層構造バッファ領域の最も上に前記サブ多層構造バッファ領域（６）を配置し、前記第２の多層構造バッファ領域を、前記第１の多層構造バッファ領域の最も上の前記サブ多層構造バッファ領域（６）の上に直接に配置することができる。

また、請求項７に示すように、基板（２）と、前記基板（２）の一方の主面上に配置され且つ化合物半導体で形成されたバッファ領域（３ｂ）と、前記バッファ領域（３ｂ）の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）とを有する半導体ウエーハにおいて、

前記バッファ領域（３ｂ）は、第１の多層構造バッファ領域（５）と、該第１の多層構造バッファ領域（５）の上に配置された第２の多層構造バッファ領域（８ａ）とから成り、

前記第１の多層構造バッファ領域（５）はサブ多層構造バッファ領域（６）と単層構造バッファ領域（７）との交互積層体から成り、

前記サブ多層構造バッファ領域（６）は交互に配置された複数の第１及び第２の層（６１、６２）を含み、

前記第１の層（６１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記第２の層（６２）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記単層構造バッファ領域（７）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第１の層（６１）及び前記第２の層（６２）よりも厚く形成され、

前記第２の多層構造バッファ領域（８ａ）は複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）と該複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）の相互間に配置された第２の単層構造バッファ領域（９０）とから成り、

前記複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）は交互に配置された複数の第３及び第４の層（８１、８２）をそれぞれ含み、

前記第３の層（８１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、

前記第４の層（８２）は前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、

前記第１の多層構造バッファ領域（５）は前記主半導体領域（４）の平均的に見た格子定

数よりも小さい平均的に見た格子定数を有し、
前記第２の多層構造バッファ領域（８ａ）は、前記主半導体領域（４）と前記第１の多層構造バッファ領域（５）との間の平均的に見た格子定数を有していることが望ましい。
また、請求項８に示すように、基板（２）と、前記基板（２）の一方の主面上に配置され且つ化合物半導体で形成されたバッファ領域（３ｃ）と、前記バッファ領域（３ｃ）の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）とを有する半導体ウエーハにおいて、
　前記バッファ領域（３ｃ）は、第１の多層構造バッファ領域（５ａ）と第２の多層構造バッファ領域（８ｂ）とから成り、
前記第１の多層構造バッファ領域（５ａ）は第１のサブ多層構造バッファ領域（６）と第１の単層構造バッファ領域（７）との交互積層体から成り、
前記第１のサブ多層構造バッファ領域（６）の数は、前記第１の単層構造バッファ領域（７）の数よりも１個多く、前記第１の多層構造バッファ領域(5a)の最も上に前記第１のサブ多層構造バッファ領域（６）が配置され、
前記第１のサブ多層構造バッファ領域（６）は交互に配置された複数の第１及び第２の層（６１、６２又は６2a～６２d）を含み、
　前記第１の層（６１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
　前記第２の層（６２）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
　前記単層構造バッファ領域（７）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第１の層（６１）及び前記第２の層（６２）よりも厚く形成され、
前記第２の多層構造バッファ領域（８ｂ）は、複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）と、該複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）の相互間に配置された第２の単層構造バッファ領域（９０）及び第３のサブ多層構造バッファ領域（９１）とを有し、
前記複数の第２のサブ多層構造バッファ領域（８´、８´´）は交互に配置された複数の第３及び第４の層（８１、８２）をそれぞれ含み、
　前記第３の層（８１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
　前記第４の層（８２）は前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
前記第３のサブ多層構造バッファ領域（９１）は、交互に配置された複数の第５及び第６の層（６１´，６２´）を含み、
　前記第５の層（６１´）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
　前記第６の層（６２´）は前記第５の層（６１´）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第２の単層構造バッファ領域（９０）よりも薄く形成され、
前記第１の多層構造バッファ領域（５ａ）は前記主半導体領域（４）の平均的に見た格子定数よりも小さい平均的に見た格子定数を有し、
前記第２の多層構造バッファ領域（８ｂ）は、前記主半導体領域（４）と前記第１の多層構造バッファ領域（５ａ）との間の平均的に見た格子定数を有していることが望ましい。
また、請求項９に示すように、前記第１の多層構造バッファ領域に含まれる複数の第２の層（６2a～６２ｄ）は、前記基板から前記主半導体領域（４）に向かって徐々に増大す

るように互いに異なる厚み(Ｔ1～Ｔ4)を有していることが望ましい。
また、請求項１０に示すように、前記第２の多層構造バッファ領域に含まれる複数の第４の層（８２ａ～８２ｄ）は、前記第１の多層構造バッファ領域から前記主半導体領域（４）に向かって徐々に増大するように互いに異なる厚み（Ｔ11～Ｔ14）を有していることが望ましい。

また、請求項１１に示すように、前記単層構造バッファ領域（７）と前記第２の層（６２又は６２ａ～６２ｄ）と前記第４の層（８２又は８２ａ～８２ｄ）とは互いに同一の窒化物半導体で形成されていることが望ましい。

また、請求項１２に示すように、前記サブ多層構造バッファ領域は５～１０００nmの厚さを有し、前記単層構造バッファ領域は１００～４００nmの厚さを有していることが望ましい。

また、請求項１３に示すように、基板（２）と、前記基板（２）の一方の主面上に配置され且つ化合物半導体で形成されたバッファ領域（３又は３ａ又は３ｂ又は３ｄｃ）と、前記バッファ領域の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）と、前記主半導体領域（４）上に配置された少なくとも第１及び第２の主電極と、前記主半導体領域（４）上に配置され且つ前記第１及び第２の主電極間の電流の流れを制御する機能を有している制御電極と、前記基板の他方の主面に形成され且つ前記第１又は第２の主電極に電気的にされている補助電極とを備えた半導体素子において、
前記バッファ領域（３又は３ａ又は３ｂ又は３ｄｃ）は、第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）と、該第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の上に配置された第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）とから成り、

前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）はサブ多層構造バッファ領域（６）と単層構造バッファ領域（７）との交互積層体から成り、
前記サブ多層構造バッファ領域（６）は交互に配置された複数の第１及び第２の層（６１、６２）を含み、

前記第１の層（６１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記第２の層（６２）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記単層構造バッファ領域（７）は前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記第１の層（６１）及び前記第２の層（６２）よりも厚く形成され、
前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は交互に配置された複数の第３及び第４の層（８１、８２又は８2a～８２ｄ）を含み、

前記第３の層（８１）は前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、

前記第４の層（８２又は８2a～８２ｄ）は前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄く形成され、
前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）は前記主半導体領域（４）の平均的に見た格子定数よりも小さい平均的に見た格子定数を有し、
前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は、前記主半導体領域（４）と前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）との間の平均的に見た格子定数を有していることことが望ましい。
また、請求項１４に示すように、基板（２）の一方の主面上に化合物半導体から成るバッファ領域と、前記バッファ領域の上に配置され且つ化合物半導体で形成された主半導体領域（４）とを有する半導体ウエーハを、
前記基板（２）を構成する材料の格子定数よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成る第１の層（６１）と前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数

との間の格子定数を有する化合物半導体から成る第２の層（６２）との交互積層体から成るサブ多層構造バッファ領域（６）を前記基板（２）の一方の主面上に形成する第１の工程と、
前記サブ多層構造バッファ領域（６）の上に、前記第１の層（６１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成る単層構造バッファ領域（７）を前記第２の層（６２）よりも厚く形成する第２の工程と、
前記第１及び第２の工程と同一の方法で前記サブ多層構造バッファ領域（６）と実質的に同一の構成を有する別のサブ多層構造バッファ領域（６）及び前記単層構造バッファ領域（７）と実質的に同一の構成を有する別の単層構造バッファ領域（７）を繰り返して形成して第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）を得る第３の工程と、
前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の上に、前記基板（２）を構成する材料よりも小さい格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄い第３の層（８１）と前記第３の層（８１）の格子定数と前記基板（２）の格子定数との間の格子定数を有する化合物半導体から成り且つ前記単層構造バッファ領域（７）よりも薄い第４の層（８２）との積層体を含み、且つ平均的に見た格子定数が、前記第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の平均的に見た格子定数よりも大きい第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）を形成する第４の工程と、
前記第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）の上に化合物半導体から成り且つ平均的に見た格子定数が、前記第１及び第２の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ、８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）の平均的に見た格子定数よりも大きい主半導体領域（４）を形成する第５の工程とを有して製造することが望ましい。
【発明の効果】
【０００７】
　本発明は次の効果を有する。
（１）第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の他に、平均的に見た格子定数が第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）よりも大きい第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）を設けることにより、半導体ウエーハの反りが改善されるのみでなく、バッファ領域（３又は３ａ）及び主半導体領域（４）を厚くすることができる。これにより、半導体ウエーハの厚み方向の耐圧を向上させることが可能になる。
（２）第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は、主半導体領域（４）における圧縮応力と第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）における引張応力との相殺を助ける。即ち、第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）の第３及び第４の層（８１，８２）の積層数を調整することによって、主半導体領域（４）における圧縮応力とバッファ領域（３又は３ａ又は３ｂ又は３ｄｃ）における引張応力との相殺が良好に達成され、半導体ウエーハの反りが低減する。
（３）　第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）の平均的に見た格子定数は第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）よりも大きい。このため、第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）の引張応力が第１の多層構造バッファ領域５よりも小さくなり、バッファ領域の厚みの増大に伴う反りの増大の傾きが小さくなる。これにより、第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）を形成した後における反りの最大値が小さくなり、主半導体領域（４）における転位が低減する。また、量産時において、半導体ウエーハの反りのバラツキが小さくなる。
（４）第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）を設けることにより、主半導体領域４を厚く形成することが可能になり、耐圧を高めることができる。また、所望厚みにおける反りのバラツキを小さくすることができる。
（５）第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）におけるサブ多層構造バッファ領域（６）は、比較的格子定数の小さい第１の層（６１）を有しているので巨視的に見て引張応力（伸張性歪力）を発生する。また、サブ多層構造バッファ領域（６）の相互間

に配置された単層構造バッファ領域（７）は、第１の層（６１）よりも大きい格子定数を有しているので、圧縮応力（圧縮性歪力）を発生する。従って、サブ多層構造バッファ領域（６）の引張応力を単層構造バッファ領域（７）の圧縮応力である程度打ち消すことができ、第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の引張応力を低減することができ、第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）を比較的厚く形成することができる。
（６）第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）の中に単層構造バッファ領域（７）を設けるので、第１の多層構造バッファ領域（５又は５ａ又は５ｂ）における応力の調整を細かく行うことができる。
（７）複数のサブ多層構造バッファ領域（６）のそれぞれが比較的薄い第１及び第２の層（６１，６２）を交互に積層した構造であり、且つ第２の多層構造バッファ領域（８又は８ａ又は８ｂ又は８ｃ）は比較的薄い第３及び第４の層（８１，８２）を交互に積層した構造であるので、ただ１つの層で構成するバッファ領域に比べてクラックを抑制でき、且つバッファ領域を厚く形成することができる。
【発明を実施するための最良の形態】
【０００８】
次に、図面を参照して本発明の実施形態を説明する。
【実施例１】
【０００９】
本発明の実施例１に従う半導体素子としての高電子移動度トランジスタ即ちＨＥＭＴ（High Electron Mobility Transistor ）を形成するための半導体ウエーハ１は、図１に概略的に示すようにシリコン基板２と、この基板２の一方の主面上に配置され且つ窒化物半導体で形成されたバッファ領域３と、バッファ領域３の上に配置され且つ窒化物半導体で形成された半導体素子形成用の主半導体領域４とを有する。この半導体ウエーハ１は複数個のＨＥＭＴを形成できる面積を有する。
【００１０】
基板２は例えば３５０～１２００μｍの厚みを有し且つバッファ領域３及び主半導体領域４よりも大きい格子定数（例えば０．５４３ｎｍ）を有し且つバッファ領域３の線膨張係数（例えば５．６０×１０$^{-6}$／Ｋ）及び主半導体領域４の線膨張係数（例えば５．５９×１０$^{-6}$／Ｋ）よりも小さい線膨張係数（例えば４．７０×１０$^{-6}$／Ｋ）を有する単結晶シリコンから成り、バッファ領域３及び主半導体領域４の成長基板としての機能と機械的支持基板としての機能とを有し、更に主半導体領域４に形成される半導体素子の動作を安定化させるための補助電極を支持する機能を有する。なお、このシリコン基板２に、必要に応じてボロン（Ｂ）等の３族元素又はリン（Ｐ）等の５族元素からなる導電型決定不純物を添加することができる。また、基板２をＳｉＣ等のシリコン化合物で形成することもできる。
【００１１】
図１の半導体ウエーハ１をその厚み方向に拡大してバッファ領域３及び主半導体領域４を詳しく示した半導体ウエーハ１が図２に示され、図３に図２のバッファ領域３の一部を更に拡大したものが示されている。なお、図１及び図２における基板２及び各領域３，４の厚み、及び図３における多層構造バッファ領域の厚みは説明的に示されており、実際の厚みとは異なる。
【００１２】
バッファ領域３は、図２に示すように厚みＴａの第１の多層構造バッファ領域５とこれよりも薄い厚みＴｂの第２の多層構造バッファ領域８を有する。第１の多層構造バッファ領域５は、図２において斜線を付して示すサブ（下位又は副）多層構造バッファ領域６と単層構造バッファ領域７との交互積層体から成る。図２では図示の都合上第１の多層構造バッファ領域５の一部が省かれ、６個のサブ多層構造バッファ領域６と６個の第１の単層構造バッファ領域７とで示めされているが、実際にはサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアを８個積層することによって第１の多層構造バッファ領

域５が構成されている。なお、第１の多層構造バッファ領域５におけるサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアの数を任意に変えることができる。しかし、第１の多層構造バッファ領域５におけるサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアの数を、好ましくは４～５０にすることが望ましい。このペア数が４よりも少ない場合、及び５０よりも大きい場合には半導体ウエーハの反り及び主半導体領域４の結晶性の改善効果が低下する。

図２においては、各サブ多層構造バッファ領域６が互いに同一の厚さＴｄを有し且つ同一の構成を有するが、本発明の目的を達成できる範囲で厚さ及び構成を互いに相違させることもできる。また、図２においては、各単層構造バッファ領域７が互いに同一の厚さＴｅを有し且つ同一の構成を有するが、本発明の目的を達成できる範囲で厚さ及び構成を互いに相違させることもできる。

【００１３】

図２の１つのサブ多層構造バッファ領域６が図３に更に詳しく示されている。図３から明らかようにサブ多層構造バッファ領域６は、第１及び第２のサブレイヤーと呼ぶこともできる第１及び第２の層６１、６２の交互積層体から成る。なお、サブ多層構造バッファ領域６を超格子バッファとなるように形成することもできる。図３では１つのサブ多層構造バッファ領域６が第１の層６１と第２の層６２とのペアを４つ積層することによって形成されているが、このペア数を任意に変えることができる。しかし、１つのサブ多層構造バッファ領域６における第１の層６１と第２の層６２とのペアを４～５０にすることが望ましい。サブ多層構造バッファ領域６の厚みＴｄは、好ましくは５～１０００ｎｍ、より好ましくは２０～４００nmである。

【００１４】

サブ多層構造バッファ領域６の第１の層６１はアルミニウムを第１の割合で含む窒化物半導体から成り、例えば、

化学式　$Al_xM_yGa_{1-x-y}N$

ここで、前記Mは、Ｉｎ（インジウム）とＢ（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記ｘ及びｙは、　$0<x\leqq 1$、

$0\leqq y<1$、

$x+y\leqq 1$

を満足する数値、

で示される窒化物半導体材料から成る。即ち、第１の層６１は、例えばＡｌＮ（窒化アルミニウム）、ＡｌＩｎＮ（窒化インジウム　アルミニウム）、ＡｌＧａＮ（窒化ガリウム　アルミニウム）及びＡｌＩｎＧａＮ（窒化ガリウム　インジウム　アルミニウム）から選択された窒化半導体材料から成る。

第１の層６１の厚さＴｆは１～２０nmであることが望ましい。第１の層６１の厚さＴｆが１nmよりの薄い場合、及び２０nmよりの厚い場合には、半導体ウエーハの反り及び主半導体領域４の結晶性の改善効果が低下する。本実施例では第１の層６１がＡｌＮから成り、この厚さＴｆは５ｎｍに設定されている。

図３では全部の第１の層６１が同一の材料（ＡｌＮ）で形成されているが、複数の第１の層６１を互いに異なる材料で形成することができる。また、図３では全部の第１の層６１が同一の厚みに形成されているが、複数の第１の層６１を互いに異なる厚みに形成することができる。

ＡｌＮから成る第１の層６１の結晶軸ａ及びｃの格子定数はシリコンから成る基板２の格子定数よりも小さい値（例えばａ軸で０．３１１ｎｍ、ｃ軸で０．４９８ｎｍ）である。また、第１の層６１の線膨張係数は基板２の線膨張係数よりも大きい値（例えば$5.64\times 10^{-6}/K$）である。

なお、第１の層６１に必要に応じてｎ型又はｐ型の導電型決定不純物をドープすることができる。

【００１５】

第１の層６１の上に配置された第２の層６２は、アルミニウムの含有割合が第２の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体からなり、例えば、

化学式　$Al_{a}M_{b}Ga_{1-a-b}N$

ここで、前記ＭはＩｎ（インジウム）とＢ（ボロン）とから選択された少なくとも１種の元素、

前記ａ及びｂは、　$0 \leqq a \leqq 1$、
$0 \leqq b < 1$、
$a + b \leqq 1$
$a < x$

を満足させる数値、

で示される窒化物半導体材料から成る。即ち、第２の層６２は、例えばＧａＮ（窒化ガリウム）、ＩｎＧａＮ（窒化ガリウム　インジウム）、ＡｌＩｎＮ（窒化インジウム　アルミニウム）、ＡｌＧａＮ（窒化ガリウム　アルミニウム）及びＡｌＩｎＧａＮ（窒化ガリウム　インジウム　アルミニウム）から選択された窒化半導体材料から成る。上記の化学式から明らかなように第２の層６２はＡｌ（アルミニウム）を含んでも良いし、含まなくとも良い。第２の層６２にＡｌ（アルミニウム）を含める場合には、第１の層６１のＡｌ（アルミニウム）の割合よりも小さい第２の割合とする。本発明においてＡｌの第２の割合はゼロを含むものとして定義されている。

第２の層６２の厚みＴｇは、好ましくは１～１０nmであり、より好ましくは３～７nmである。第２の層６２の厚みＴｇが１よりも薄い場合、及び１０nmよりも厚い場合、半導体ウエーハの反り及び主半導体領域４の結晶性の改善効果が低下する。本実施例では第２の層６２がＧａＮから成り、この厚さＴｇは３．５ｎｍに設定されている。第２の層６２の厚みＴｇは、好ましくは第１の層６１の厚みＴｆよりも薄く決定される。

なお、第１及び第２の層６１、６２を超格子バッファを構成するように形成することができる。

また、図３では全部の第２の層６２が同一の材料で形成されているが、本発明の効果を得ることができる範囲内で、複数の第２の層６２を互いに異なる材料で形成することができる。また、図３では全部の第２の層６２が同一の厚みに形成されているが、本発明の効果を得ることができる範囲内で、複数の第２の層６２を互いに異なる厚みに形成することができる。

第２の層６２は、Ａｌ（アルミニウム）を含まないか、又は第１の層６１の第１の割合よりも少ない第２の割合で含む。従って、ＧａＮからなる第２の層６２の結晶軸ａ及びｃの格子定数は、第１の層６１の格子定数よりも大きく且つ基板２の格子定数よりも小さい値（例えばａ軸で０．３１８ｎｍ、ｃ軸で０．５１８ｎｍ）である。また、第２の層６２の線膨張係数は基板２の線膨張係数よりも大きい値（例えば5.59×10^{-6}／Ｋ）である。

第２の層６２に必要に応じてｎ型又はｐ型の導電型決定不純物をドープすることができる。

【００１６】

単層構造バッファ領域７は、アルミニウムの含有割合が第３の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体からなり、例えば、

化学式　$Al_{a}M_{b}Ga_{1-a-b}N$

ここで、前記ＭはＩｎ（インジウム）とＢ（ボロン）とから選択された少なくとも１種の元素、

前記ａ及びｂは、　$0 \leqq a \leqq 1$、
$0 \leqq b < 1$、
$a + b \leqq 1$
$a < x$

を満足させる数値、

で示される窒化物半導体材料からなる。

上記化学式から明らかなように、この単層構造バッファ領域７は、アルミニウムを含んでも良いし、含まなくとも良い。単層構造バッファ領域７がアルミニウムを含む場合には、第１の層６１のアルミニウムの第１の割合よりも小さく且つサブ多層構造バッファ領域６の平均的（又は巨視的）に見たＡｌの含有割合よりも小さい第３の割合とする。なお、本発明においてＡｌの第３の割合はゼロを含むものとして定義されている。

単層構造バッファ領域７のアルミニウムの含有割合が第１の層６１よりも小さいので、単層構造バッファ領域７の結晶軸ａ及びｃの格子定数は、第１の層６１の格子定数及びサブ多層構造バッファ領域６の平均的（又は巨視的）に見た　　　格子定数よりも大きく且つ基板２の格子定数よりも小さい。例えば単層構造バッファ領域７がGaNから成る場合には、この格子定数は、ａ軸で０．３１８ｎｍ、ｃ軸で０．５１８ｎｍである。また、単層構造バッファ領域７の線膨張係数は基板２の線膨張係数よりも大きい値（例えば５．５９×１０$^{-6}$／Ｋ）である。

第１の単層構造バッファ領域７に必要に応じてｎ型又はｐ型の導電型決定不純物をドープすることができる。

製造工程を簡略化するために単層構造バッファ領域７を第２の層６２と同一の半導体材料（例えばGaN ）で形成することが望ましい。

単層構造バッファ領域７がサブ多層構造バッファ領域６の第２の層６２と同一の半導体材料である場合には、単層構造バッファ領域７がサブ多層構造バッファ領域６の最も上の第２の層６２に連続的に形成される。このため、サブ多層構造バッファ領域６の最も上の第２の層６２と単層構造バッファ領域７との境界は実質的に存在しない。従って、サブ多層構造バッファ領域６の最も上の第２の層６２を単層構造バッファ領域７に含めて示すこともできる。このようにサブ多層構造バッファ領域６の最も上の第２の層６２を単層構造バッファ領域７に含めて示す場合には、サブ多層構造バッファ領域６に含まれる第１の層６１の合計は第２の層６２の合計よりも１つ多くなる。

単層構造バッファ領域７の厚みＴｅは、第２の層６２の厚みＴｇよりも厚い好ましくは２０～４００nm、より好ましくは１００～４００nmに決定される。単層構造バッファ領域７の厚さ２０nmよりも薄い場合、及び４００nmよりも厚い場合には、半導体ウエーハの反り及び主半導体領域４の結晶性の改善効果が低下する。本実施例では単層構造バッファ領域７がＧａＮから成り、この厚さＴｅは２００ｎｍに設定されている。

なお、図２では全部の単層構造バッファ領域７が同一の材料で形成されているが、本発明の効果を得ることができる範囲内で、複数の単層構造バッファ領域７を互いに異なる材料で形成することができる。また、図２では全部の単層構造バッファ領域７が同一の厚みに形成されているが、本発明の効果を得ることができる範囲内で、複数の単層構造バッファ領域７を互いに異なる厚みに形成することができる。

【００１７】

第２の多層構造バッファ領域８は、本発明に従って主半導体領域４に生じる応力を緩和するためのものであり、図３に示すように第３及び第４のサブレイヤーと呼ぶこともできる第３及び第４の層８１、８２の交互積層体から成る。この第２の多層構造バッファ領域８は、平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率が第１の多層構造バッファ領域５よりも小さく且つ主半導体領域４と第１の多層構造バッファ領域５との間の値を有し、且つ平均的又は巨視的に見た格子定数が第１の多層構造バッファ領域５よりも大きく且つ主半導体領域４と第１の多層構造バッファ領域５との間の値を有するように形成されている。

ここで、第２の多層構造バッファ領域８の平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率とは、第２の多層構造バッファ領域８の全重量に対する第２の多層構造バッファ領域８に含まれるＡｌの全重量の割合である。また、第１の多層構造バッファ領域５の平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率とは、第１の多層構造バッファ領域５の全重量に対する第１の多層構造バッファ領域５に含まれるＡｌの全重量の割合である。また、第２の多層構造バッファ領域８の平均的又は巨視的に見た格子定数とは、第２の多層構造バッファ領域８の第３及び第４の層８１，８２の各格子定数（Ｃ３，Ｃ４）に各層の厚み（Ｔｈ，Ｔｉ）を乗算した値（Ｃ３×Ｔｈ、Ｃ４×Ｔｉ）をそれぞれ求め、この乗算で得られた各

値の合計値｛ｍ（Ｃ３×Ｔｈ）＋ｎ（Ｃ４×Ｔｉ）｝を求め、この合計値を第２の多層構造バッファ領域８の全体の厚み（Tb）で除算した値に相当する。なお、mは第３の層８１の数、ｎは第４の層８２の数を示す。また、第１の多層構造バッファ領域５の平均的又は巨視的に見た格子定数とは、サブ多層構造バッファ領域６の第１及び第２の層６１、６２並びに単層構造バッファ領域７の各格子定数（Ｃ１，Ｃ２、Ｃ５）に各層の厚み（Ｔｆ，Tg、Ｔｅ）を乗算した値（Ｃ１×Ｔｆ、Ｃ２×Ｔｇ、Ｃ５×Ｔｅ）をそれぞれ求め、この乗算で得られた各値の合計値｛ａ（Ｃ１×Ｔｆ）＋ｂ（Ｃ２×Tg）＋ｃ（Ｃ５×Ｔｅ）｝を求め、この合計値を第１の多層構造バッファ領域５の全体の厚み（Ｔａ）で除算した値に相当する。なお、ａは第１の層６１の数、ｂは第２の層６２の数、ｃは単層構造バッファ領域７の数を示す。また、主半導体領域４の平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率、及び平均的又は巨視的に見た格子定数も、第１及び第２の多層構造バッファ領域５、８におけるこれらと同様に定義されている。

【００１８】

図３には図示を簡略化するために第２の多層構造バッファ領域８が第３の層８１と第２の層８２とのペアを５つ積層することによって示されているが、実際には２０ペアの積層によって形成されている。なお、第３及び第４の層８１、８２のペア数を任意に変えることが可能である。しかし、第３及び第４の層８１、８２のペア数を３～５０にすることが望ましい。このペア数が３より少ない場合、及び５０よりも多い場合には、半導体ウエーハの反り及び主半導体領域４の結晶性の改善効果が低下する。

第２の多層構造バッファ領域８の厚みＴｂの好ましい値は５～１０００nm、より好ましい値は２０～４００ｎｍである。

なお、この第２の多層構造バッファ領域８を超格子バッファとして機能する様に構成することもできる。

【００１９】

第２の多層構造バッファ領域８の第３の層８１はアルミニウムを第４の割合で含む窒化物半導体から成り、例えば、

化学式　$Al_{x'}M_{y'}Ga_{1-x'-y'}N$

ここで、前記Mは、Ｉｎ（インジウム）とＢ（ボロン）とから選択された少なくとも1種の元素、

前記ｘ’及びｙ’は、０＜ｘ’≦１、
０≦ｙ’＜１、
ｘ’＋ｙ’≦１
ｘ’≦ｘ

を満足する数値、

で示される窒化物半導体材料から成る。即ち、第３の層８１は、例えば、ＡｌＮ（窒化アルミニウム）、ＡｌＩｎＮ（窒化インジウム　アルミニウム）、ＡｌＧａＮ（窒化ガリウム　アルミニウム）及びＡｌＩｎＧａＮ（窒化ガリウム　インジウム　アルミニウム）から選択された窒化半導体材料から成る。

上記化学式から明らかなように、前記ｘ’に相当する第３の層８１におけるアルミニウムの含有割合（第４の割合）を、サブ多層構造バッファ領域６の第１の層６１におけるアルミニウムの含有割合（前記ｘに相当する第１の割合）と同一にすることができる。しかし、既に説明したように平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率がサブ多層構造バッファ領域６よりも小さく、且つ平均的又は巨視的に見た格子定数がサブ多層構造バッファ領域６よりも大きくなるように第２の多層構造バッファ領域８を形成することが要求される。第２の多層構造バッファ領域８の第３の層８１におけるアルミニウムの含有割合（第４の割合）が、サブ多層構造バッファ領域６の第１の層６１におけるアルミニウムの含有割合（前記ｘに相当する第１の割合）と同一であっても、第２の多層構造バッファ領域８の厚みＴｂに対する第３の層８１の厚みＴｈの合計の割合（ｍ×Ｔｈ／Ｔｂ）がサブ多層構造バッファ領域６の厚みTdに対する第１の層６１の厚みＴfの合計の割合（ａ×Ｔf／Td）よりも小さい場合には、第２の多層構造バッファ領域８の平均的に見たアルミニ

ウムの含有割合はサブ多層構造バッファ領域６の平均的に見たアルミニウムの含有割合よりも小さくなる。
第３の層８１の厚さＴｈは単層構造バッファ領域７よりも薄い例えば１～２０nmであることが望ましい。この実施例では、厚さ５ｎｍのＡｌＮで第３の層８１が形成されている。図３では全部の第３の層８１が同一の材料で形成されているが、本発明の効果を得ることができる範囲内で、複数の第３の層８１を互いに異なる材料で形成することができる。また、図３では全部の第３の層８１が同一の厚みに形成されているが、本発明の効果を得ることができる範囲内で、複数の第３の層８１を互いに異なる厚みに形成することができる。また、第３の層８１に必要に応じてｎ型又はｐ型の導電型決定不純物をドープすることができる。
【００２０】
　第３の層８１の上に配置された第４の層８２は、アルミニウムの含有割合が第５の割合（ゼロを含む）の窒化物半導体からなり、例えば、
化学式　$Al_{a'}M_{b'}Ga_{1-a'-b'}N$
　　　　　ここで、前記ＭはＩｎ（インジウム）とＢ（ボロン）とから選択された少なくとも１種の元素、
　　　　　前記ａ及びｂは、　$0 \leqq a' \leqq 1$、
　　　　　　　　　　　　　　$0 \leqq b' < 1$、
　　　　　　　　　　　　　　$a' + b' \leqq 1$
　　　　　　　　　　　　　　$a' < x'$
　　　　　　　　　　　　　　を満足させる数値、
で示される窒化物半導体材料から成る。即ち、第４の層８２は、例えばＧａＮ（窒化ガリウム）、ＩｎＧａＮ（窒化ガリウム　インジウム）、ＡｌＩｎＮ（窒化インジウム　アルミニウム）、ＡｌＧａＮ（窒化ガリウム　アルミニウム）及びＡｌＩｎＧａＮ（窒化ガリウム　インジウム　アルミニウム）から選択された窒化半導体材料から成る。
上記の化学式から明らかなように第４の層８２はＡｌ（アルミニウム）を含んでも良いし、含まなくとも良い。第４の層８２にＡｌ（アルミニウム）を含める場合には、第３の層８１のＡｌ（アルミニウム）の割合よりも小さい第５の割合とする。本発明においてＡｌの第５の割合はゼロを含むものとして定義されている。なお、第４の層８２にＡｌ（アルミニウム）を含める場合には、第２の層６２のＡｌ（アルミニウム）の割合と同一又はこれよりも少ないことが望ましい。
第４の層８２は、Ａｌ（アルミニウム）を含まないか、又は第３の層８１の第４の割合よりも少ない第５の割合で含む。従って、第４の層８２の結晶軸ａ及びｃの格子定数は、第３の層８１の格子定数よりも大きく且つ基板２の格子定数よりも小さい。第４の層８２がＧａＮの場合には、この格子定数はａ軸で０．３１８ｎｍ、ｃ軸で０．５１８ｎｍである。第２の多層構造バッファ領域８の平均的又は巨視的に見た格子定数は、第１の多層構造バッファ領域５よりも主半導体領域４の平均的又は巨視的に見た格子定数に近い。
また、第４の層８２の線膨張係数は基板２の線膨張係数よりも大きい値（例えば5.59×10^{-6}／Ｋ）である。
第２の多層構造バッファ領域８の第４の層８２の厚みＴｉは単層構造バッファ領域７よりも薄い１～５０nmであることが望ましい。本発明に従って第２の多層構造バッファ領域８を、平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率が第１の多層構造バッファ領域５よりの小さく、且つ平均的又は巨視的に見た格子定数が第１の多層構造バッファ領域５よりも大きくなるように形成するために、第２の多層構造バッファ領域８の第４の層８２の厚みＴｉを、第１の多層構造バッファ領域６の第２の層６２の厚みＴｇよりも厚くすることが望ましい。
なお、第２の多層構造バッファ領域８の第３及び第４の層８１、８２を超格子バッファを構成するように形成することが望ましい。また、図３では全部の第４の層８２が同一の材料で形成されているが、本発明の効果を得ることができる範囲内で、複数の第４の層８２を互いに異なる材料で形成することができる。また、図３では全部の第４の層８２が同一

の厚みに形成されているが、本発明の効果を得ることができる範囲内で、複数の第４の層８２を互いに異なる厚みに形成することができる。また、第４の層８２に必要に応じてｎ型又はｐ型の導電型決定不純物をドープすることができる。

【００２１】

図１の実施例１に従う主半導体領域４は、ＨＥＭＴを形成するために不純物非ドープのＧａＮから成る電子走行層４１と、不純物非ドープの$Al_{0.2}Ga_{0.8}N$から成る電子供給層４２とを有している。なお、電子供給層４２にｎ型不純物をドープすることもできる。また、電子供給層４２のＡｌの割合を任意に変えることができる。バッファ領域３の上に配置された電子走行層４１はチャネル層とも呼ぶことができるものであり、例えば、１８００ｎｍ（１．８μｍ）の厚みを有する。

この実施例では、電子走行層４１が第２の多層構造バッファ領域８の第４の層８２と同一のＧａＮから成るので、第２の多層構造バッファ領域８の最も上の第４の層８２と電子走行層４１との境界は実質的に存在しない。従って、第２の多層構造バッファ領域８の最も上の第４の層８２を電子走行層４１の一部として示すこともできる。この場合には、第２の多層構造バッファ領域８における第４の層８２の合計が第３の層８１の合計よりも１つ少なくなる。

電子走行層４１の上に配置された電子供給層４２は電子走行層４１とのヘテロ接合に基づくピエゾ分極によって電子走行層４１と電子供給層４２との界面近傍に周知の２次元電子ガス層を形成させるものであって、例えば３０ｎｍの厚みを有する。

Ａｌを含む電子供給層４２はＡｌを含まない電子走行層４１に比べて極めて薄い。従って、主半導体領域４における平均的に見たＡｌの割合は電子走行層４１におけるＡｌの割合とほぼ同一になり、多層構造バッファ領域５よりも小さい。主半導体領域４における平均的に見た格子定数は、電子走行層４１における格子定数とほぼ同一になり、多層構造バッファ領域５よりも大きく且つ基板２よりも小さい。

主半導体領域４は、ＧａＮから成る電子走行層４１とＡｌＧａＮから成る電子供給層４２とに限定されるものでなく、種々の化合物半導体、好ましくは窒化物半導体で形成することができる。しかし、主半導体領域４における平均的に見たＡｌの割合は、第１及び第２の多層構造バッファ領域５、８よりも小さいことが望ましい。また、主半導体領域４における平均的に見た格子定数は、第１及び第２の多層構造バッファ領域５、８よりも大きいことが望ましい。図２の主半導体領域４のＧａＮから成る電子走行層４１はＡｌＧａＮから成る電子供給層４２よりも大幅に厚いので、主半導体領域４の平均的に見たＡｌの割合、及び平均的に見た格子定数は上記の要求を満たしている。

【００２２】

図４は、図１～図３に示した半導体ウエーハ１を使用して製作したＨＥＭＴを示す。説明を簡略化するために図４において図１と実質的に同一の部分に同一の符号を付し、その説明を省略する。第１の電極としてのソース電極９１及び第２の電極としてのドレイン電極９２は電子供給層４２にオーミック（低抵抗）接触し、制御電極としてのゲート電極９３は電子供給層４２にショットキー接触している。なお、ソース電極９１及びドレイン電極９２と電子供給層４２との間にｎ型不純物濃度の高いコンタクト層を設けることができる。ＨＥＭＴの動作の安定化を図るために基板２の下面に補助電極９４が設けられ、これが導体９５によってソース電極９１に接続されている。従って、図４のＨＥＭＴにおいてドレイン電極９２と基板２の下面に設けられた補助電極９４との間の耐圧が重要になる。基板２はシリコン半導体であるので、ここに耐圧をさほど期待できない。そこで、この実施例では耐圧向上のためにバッファ領域３及び主半導体領域４が比較的厚く形成されている。

【００２３】

次に、図１の半導体ウエーハ１の製造方法の一例を説明する。

まず、ミラー指数で示す結晶の面方位において（１１１）面とされた主面を有し、シリコン基板２を用意する。

【００２４】

次に、基板２を周知のMOCVD（Metal Organic Chemical Depositioｎ）即ち有機金属気相成長装置の反応室に投入し、基板２の表面の酸化膜を取り除いた後、反応室にＴＭＡ（トリメチルアルミニウム）、及びアンモニアを流して、シリコン基板２の上にＡｌＮ（窒化アルミニウム）から成る第１の層６１をエピタキシャル成長させる。その後、ＴＭＡの供給を止め、アンモニアの供給は継続し、これと共にＴＭＧ（トリメチルガリウム）を流してＧａＮから成る第２の層６２をエピタキシャル成長させる。第１及び第２の層６１，６２の形成工程を所望回数繰返して図３に示すサブ多層構造バッファ領域６を得る。

【００２５】

次に、反応室にアンモニアとＴＭＧ（トリメチルガリウム）を流してＧａＮから成る単層構造バッファ領域７をエピタキシャル成長させる。

【００２６】

次に、単層構造バッファ領域７の上にサブ多層構造バッファ領域６及び単層構造バッファ領域７を所望回数繰り返して形成して第１の多層構造バッファ領域５を得る。

【００２７】

次に、反応室にアンモニアとＴＭＡ（トリメチルアルミニウム）及びアンモニアとＴＭＧ（トリメチルガリウム）を交互に流してＡｌＮから成る第３の層８１とＧａＮから成る第４の層８２との交互積層体から成る第２の多層構造バッファ領域８を形成する。

【００２８】

この実施例では、第２の多層構造バッファ領域８の第３の層８１と第１の多層構造バッファ領域５のサブ多層構造バッファ領域第６に含まれる第１の層６１が共に５ｎｍのＡｌＮから成る。しかし、第２の多層構造バッファ領域８の第４の層８２がサブ多層構造バッファ領域第６に含まれる第２の層６２よりも厚く形成されている。これにより、この第２の多層構造バッファ領域８の平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率は第１の多層構造バッファ領域５よりも小さい。

【００２９】

しかる後、周知のエピタキシャル成長法で主半導体領域４を第２の多層構造バッファ領域８の上に形成し、半導体ウエーハを完成させる。

【００３０】

図５は、半導体ウエーハ１の各領域５、８、４に生じる応力（歪力）を模式的に示す。第１の多層構造バッファ領域５は図２に示すように複数のサブ多層構造バッファ領域６と単層構造バッファ領域７を含むが、平均的に見てＡｌの割合(含有率)が主半導体領域４よりも大きく、平均的に見て格子定数が主半導体領域４よりも小さいので、図５で外向きの矢印で示すように引張応力（伸張応力）を生じる。第２の多層構造バッファ領域８は図３に示すようにＡｌを含む第３の層８１とＡｌを含まない又は第３の層８１よりも少なく含む第４の層８２との積層体であるが、平均的に見てＡｌの割合が主半導体領域４よりも大きく且つ第１の多層構造バッファ領域５よりも小さく、また平均的に見て格子定数が主半導体領域４よりも小さく且つ第１の多層構造バッファ領域５よりも大きいので、第２の多層構造バッファ領域８に図５で外向きの矢印で示すように引張応力（伸張応力）を生じる。しかし、第２の多層構造バッファ領域８の平均的に見たＡｌの含有率が第１の多層構造バッファ領域５の平均的に見たＡｌの含有率よりも低いので、第２の多層構造バッファ領域８の引張応力（伸張応力）は第１の多層構造バッファ領域５のそれよりも小さい。これに対して、平均的に見て格子定数が第１及び第２の多層構造バッファ領域５、８よりも大きい主半導体領域４には図５で内側に向いている矢印で示すように圧縮応力を生じる。第２の多層構造バッファ領域８は、主半導体領域４における圧縮応力と第１の多層構造バッファ領域５における引張応力との相殺を助ける。即ち、第２の多層構造バッファ領域８の第３及び第４の層８１，８２の積層数を調整することによって、主半導体領域４における圧縮応力とバッファ領域３全体の引張応力との相殺が良好に達成され、半導体ウエーハ１の反りが低減する。

【００３１】

図６の実線Ａは本発明に従ってシリコン基板２の上に第１の多層構造バッファ領域５、

第２の多層構造バッファ領域８及び主半導体領域４のＧａＮから成る電子走行層４１を順次に形成した場合における各段階の半導体ウエーハの反りの変化を巨視的に示す。点線Ｂは従来例（比較例）における半導体ウエーハの反りの変化を巨視的に示す。なお、図６の横軸は、シリコン基板２の一方の主面を基準位置（ゼロ）とした半導体ウエーハの厚みを示し、縦軸の０よりも上は負の反り即ち凹状反りの大きさを示し、縦軸の０よりも下は正の反り即ち凸状反りの大きさを示す。

【００３２】

図６の実線Ａにおける第１～第８の点Ａ１～Ａ８におけるシリコン基板２の上に成長させた窒化物の膜厚Ｔと反りＷとの関係は次の通りである。なお、シリコン基板２及び半導体ウエーハの直径は１２５ｍｍ（５インチ）であり、シリコン基板２の厚みは７００μｍである。また、図６の点Ａ０及びＢ０は窒化物の膜厚Ｔがゼロの時のシリコン基板２の反りＷがゼロであることを示している。また、第１の多層構造バッファ領域５を構成するサブ多層構造バッファ領域６に含まれる第１の層６１、第２の多層構造バッファ領域８を構成する第３の層８１はＡｌＮから成り、第１の多層構造バッファ領域５を構成するサブ多層構造バッファ領域６に含まれる第２の層６２と単層構造バッファ領域７と第２の多層構造バッファ領域８を構成する第４の層８２と電子走行層４１はＧａＮからそれぞれ成る。

第１の点Ａ１における膜厚Ｔは０．６２μｍ、反りＷは－５０μｍであり、

第２の点Ａ２における膜厚Ｔは１．２２μｍ、反りＷは－６０μｍであり、

第３の点Ａ３における膜厚Ｔは１．８２μｍ、反りＷは－７０μｍであり、

第４の点Ａ４における膜厚Ｔは２．１２μｍ、反りＷは－７５μｍであり、

第５の点Ａ５における膜厚Ｔは２．４２μｍ、反りＷは－８０μｍであり、

第６の点Ａ６における膜厚Ｔは２．７２μｍ、反りＷは－７６μｍであり、

第７の点Ａ７における膜厚Ｔは３．５２μｍ、反りＷは－２５μｍであり、

第８の点Ａ８における膜厚Ｔは４．５２μｍ、反りＷは＋３０μｍである。

図６において、第５、第６及び第８の点Ａ５、Ａ６，Ａ８は図２の高さ位置Ｐ１，Ｐ２，Ｐ３´に対応している。従って、第５の点Ａ５は図２の第１の多層構造バッファ領域５のみを形成した状態の半導体ウエーハの反りを示し、第６の点Ａ６は図２の第１の多層構造バッファ領域５及び第２の多層構造バッファ領域８のみを形成した状態の半導体ウエーハの反りを示し、第８の点Ａ８は図２の第１の多層構造バッファ領域５、第２の多層構造バッファ領域８及び主半導体領域４の電子走行層４１の全部を形成した状態の半導体ウエーハの反りを示す。なお、図６の第８の点Ａ８は主半導体領域４の電子供給層４２を形成する前の半導体ウエーハの反りを示しているが、電子供給層４２は電子走行層４１よりも大幅に薄いので、電子供給層４２の半導体ウエーハの反りへの影響は極めて小さく、電子供給層４２を形成した後の半導体ウエーハの反りは図６の第８の点Ａ８とほぼ同一である。

【００３３】

図６の点線Ｂは、本発明に従う図２の第２の多層構造バッファ領域８に相当するものを設けないで、図２のバッファ領域３の全体を図２の第１の多層構造バッファ領域５で形成したものに相当する従来の半導体ウエーハの反りを示す。この点線Ｂにおける第１～第８の点Ｂ１～Ｂ８における窒化物の膜厚Ｔと反りＷとの関係は次の通りである。

第１の点Ｂ１における膜厚Ｔは０．６２μｍ、反りＷは－５０μｍであり、

第２の点Ｂ２における膜厚Ｔは１．２２μｍ、反りＷは－６０μｍであり、

第３の点Ｂ３における膜厚Ｔは１．８２μｍ、反りＷは－７０μｍであり、

第４の点Ｂ４における膜厚Ｔは２．１２μｍ、反りＷは－７５μｍであり、

第５の点Ｂ５における膜厚Ｔは２．４２μｍ、反りＷは－８０μｍであり、

第６の点Ｂ６における膜厚Ｔは２．７２μｍ、反りＷは－８５μｍであり、

第７の点Ｂ７における膜厚Ｔは３．５２μｍ、反りＷは＋３０μｍであり、

第８の点Ｂ８における膜厚Ｔは４．５２μｍ、反りＷは＋１５０μｍである。

図６において、点線Ｂにおける第１～第５の点Ｂ１～Ｂ５は実線Ａにおける　第１～第５の点Ａ１～Ａ５と同一の値を示している。また、点線Ｂにおける第１の点Ｂ１は図２のサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアに相当するものを２

回繰り返して形成した半導体ウエーハの反りを示し、第２の点Ｂ２は図２のサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアに相当するものを４回繰り返して形成した半導体ウエーハの反りを示し、第３の点Ｂ３は図２のサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアに相当するものを６回繰り返して形成した半導体ウエーハの反りを示し、第４の点Ｂ４は図２のサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアに相当するものを７回繰り返して形成した半導体ウエーハの反りを示し、第５の点Ｂ５は図２のサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアに相当するものを８回繰り返して形成した半導体ウエーハの反りを示し、第６の点Ｂ６は図２のサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアに相当するものを９回繰り返して形成した半導体ウエーハの反りを示す。なお、前記第６の点Ｂ６はバッファ領域の全体を図２のサブ多層構造バッファ領域６と第１の単層構造バッファ領域７とのペアに相当するものの繰り返しで形成した直後の半導体ウエーハの反りを示している。点線Ｂにおける第６～第８の点Ｂ６～Ｂ８は図２の主半導体領域４の電子走行層４１に相当するＧａＮ層を形成した場合の反りを示している。

【００３４】

図６の点線Ｂで示すようにバッファ領域の全部を第１の多層構造バッファ領域５に相当するもののみで構成した場合には、シリコン基板２の影響を受けて図６の点線Ｂの第１の点Ｂ１から第６の点Ｂ６に示すようにバッファ領域厚みの増大に応じて負の反りが増大する。従って、点線Ｂで示す従来のバッファ領域の場合にはバッファ領域の厚さを増大させても、反りは改善されない。図６の点線Ｂの第６の点Ｂ６から第８の点Ｂ８に示すように電子走行層のためのＧａＮ層をバッファ領域の上に形成すると、負の反りが徐々に少なくなり、その後正の反りが徐々に大きくなる。もし従来方法でバッファ領域と主半導体領域との合計の厚みを点線Ｂの第８の点Ｂ８に示すように４．５２μｍにすれば比較的大きい正の反り１５０μｍが生じる。

【００３５】

これに対して、本発明に従って図６の実線Ａに示すようにバッファ領域３及び電子走行層４１のためのＧａＮ層を形成すると、実線Ａの第８の点Ａ８に示すようにバッファ領域３及び電子走行層４１のためのＧａＮ層との合計の厚みが比較的厚い４．５２μｍの場合の反りは極めて小さい３０μｍである。これを詳しく説明すると、実線Ａの第５の点Ａ５と第６の点Ａ６との間に示すように第１の単層構造バッファ領域７よりも平均的に見た格子定数が大きい第２の多層構造バッファ領域８を設けると、負の反りが小さくなる。即ち、第２の多層構造バッファ領域８には図５で既に説明したように引張応力が加わる。しかし、この引張応力は第１の多層構造バッファ領域５よりも小さく且つ第２の多層構造バッファ領域８が第１の多層構造バッファ領域５よりも基板２から離れているため、第２の多層構造バッファ領域８と基板２との格子定数差に伴う応力の影響が小さくなり、反りの増大の傾きが小さくなる。このため、実線Ａの第５の点Ａ５と第６の点Ａ６との間で負の反りの増大が制限され、負の反りが低下する。しかる後、主半導体領域４の電子走行層４１のためのＧａＮ層を設けると、主半導体領域４には既に説明したように圧縮応力が生じ、バッファ領域３の引張応力の打ち消しが生じ、実線Ａの第６の点Ａ６と第８の点Ａ８との間に示すように点線Ｂの第６の点Ｂ６と第８の点Ｂ８との間よりも緩い傾きで負の反りが徐々に少なくなり、第８の点Ａ８では極めて小さい+３０μｍになる。実線Ａの第８の点Ａ８の膜厚４．５２μｍにおける反り+３０μｍは、点線Ｂの第８の点Ｂ８の膜厚４．５２μｍにおける反り+１５０μｍよりも大幅に小さい。

なお、図６の実線Ａ及び点線Ｂの各点間が直線で結ばれているが、微視的に見ると、第１の多層構造バッファ領域５及び第２の多層構造バッファ領域８の中に第１の単層構造バッファ領域７が間欠的に存在するので、各区間の反りは階段的に変化する。

【００３６】

反りをゼロ又はこれに近い値に抑制するということのみを目的とする場合には、図６で点線Ｂで示す従来例であっても第６の点Ｂ６と第７の点Ｂ７との間で反りをゼロにすることができる。しかし、点線Ｂで示す第６の点Ｂ６と第７の点Ｂ７との間では所望の厚みの

半導体ウエーハを得ることができない。
　また、図６の実線Ａにおける反りの最大値は第５の点Ａ５であり、点線Ｂにおける第６の点Ａ６点の反りの最大値よりも小さくなる。反りの最大値が小さくなると、主半導体領域４における転位が低減する。また、図６の実線Ａの第６～第８の点Ａ６～Ａ８に示すように反りの傾きが小さくなると、半導体ウエーハの量産時に生じる厚み方向位置Ｐ３における反りのバラツキを容易に小さくすることができる。
【００３７】
実施例１は上記の効果の他に、次の効果も有する。
（１）半導体ウエーハ１の反りが抑制されると、半導体ウエーハ１を使用した半導体素子の製造が容易になるばかりでなく、主半導体領域４のクラック及び転位が抑制される。
（２）半導体ウエーハ１が厚くなると、半導体素子の耐圧が向上する。
（３）複数のサブ多層構造バッファ領域６のそれぞれが比較的薄い第１及び第２の層６１，６２の積層体であるので、反りの調整が容易であり、且つバッファ領域３を厚く形成することができる。
（４）第１の多層構造バッファ領域５におけるサブ多層構造バッファ領域６はアルミニウムを含み且つ比較的格子定数が小さい第１の層６１を有しているので巨視的に見て引張応力を発生する。また、サブ多層構造バッファ領域６の相互間に配置された単層構造バッファ領域７は、アルミニウムを含まないか又は第１の層６１よりも低い割合で含み且つ比較的大きい格子定数を有しているので、圧縮応力を発生する。従って、サブ多層構造バッファ領域６の引張応力を単層構造バッファ領域７の圧縮応力である程度打ち消すことができ、第１の多層構造バッファ領域５の引張応力を低減することができ、第１の多層構造バッファ領域５を比較的厚く形成することができる。
（５）第２の多層構造バッファ領域８は、比較的薄い第３及び第４の層８１，８２の積層体であるので、反りの調整が容易であり、且つ第２の多層構造バッファ領域８を厚く比較的形成することができる。
【実施例２】
【００３８】
　次に、図７を参照して第２の実施例の半導体ウエーハ１ａを説明する。但し、図７において図２と実質的に同一の部分には同一の参照符号を付してその説明を省略する。
【００３９】
　図７の半導体ウエーハ１ａは、変形された第１の多層構造バッファ領域５ａを含む変形されたバッファ領域３ａ有する他は、図２の半導体ウエーハ１と同様に形成されている。図７の変形された第１の多層構造バッファ領域５ａは、図２の第１の多層構造バッファ領域５の最も上に配置された単層構造バッファ領域７を省き、この他は図２と同一に構成したものである。従って、図７の第１の多層構造バッファ領域５ａの単層構造バッファ領域７の数はサブ多層構造バッファ領域６の数よりも１個少ない。
【００４０】
　図７の半導体ウエーハ１ａにおいても、第２の多層構造バッファ領域８は、平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率が第１の多層構造バッファ領域５ａよりも小さく、且つ平均的又は巨視的に見た格子定数が第１の多層構造バッファ領域５ａよりも大きくなるように形成されている。従って、実施例２によっても実施例１と実質的に同一の効果を得ることができる。
【実施例３】
【００４１】
　次に、図８を参照して実施例３の半導体ウエーハ１ｂを説明する。但し、図８において図２と実質的に同一の部分には同一の参照符号を付してその説明を省略する。
【００４２】
　図８の半導体ウエーハ１ｂは、変形された第２の多層構造バッファ領域８ａを含む変形されたバッファ領域３ｂ有する他は、図２の半導体ウエーハ１と同様に形成されている。図８において、第１の多層構造バッファ領域５は、図２と同様に複数の第１のサブ多層構

造バッファ領域６と複数の第１の単層構造バッファ領域７とから成り、図８の変形された第２の多層構造バッファ領域８ａは、複数の第２のサブ多層構造バッファ領域８´、８″と該複数の第２のサブ多層構造バッファ領域８´、８″の相互間に配置された第２の単層構造バッファ領域９０とから成る。図８の複数の第２のサブ多層構造バッファ領域８´、８″は、図３に示す第２の多層構造バッファ領域８と同様にそれぞれ形成されている。第２の単層構造バッファ領域９０は第１の多層構造バッファ領域５の第１の単層構造バッファ領域７と実質的に同一に形成されている。図８では、第２の多層構造バッファ領域８ａのために２個の第２のサブ多層構造バッファ領域８´、８″が設けられているが、３個以上にし、これらの相互間に第２の単層構造バッファ領域９０をそれぞれ配置することができる。

【００４３】

図８の半導体ウエーハ１ｂにおいても、第２の多層構造バッファ領域８ａは、平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率が第１の多層構造バッファ領域５よりも小さく、且つ平均的又は巨視的に見た格子定数が第１の多層構造バッファ領域５よりも大きくなるように形成されている。従って、実施例３は実施例１と同様な効果を有する。更に、図８の半導体ウエーハ１ｂは、第２の単層構造バッファ領域９０を有するので第２の多層構造バッファ領域８ａを比較的厚く形成できるという効果を有する。

【実施例４】

【００４４】

次に、図９を参照して実施例４の半導体ウエーハ１ｃを説明する。但し、図９において図２、図７、図８と実質的に同一の部分には同一の参照符号を付してその説明を省略する。

【００４５】

図９の半導体ウエーハ１ｃは、変形された第１及び第２の多層構造バッファ領域５ａ、８ｂを含む変形されたバッファ領域３ｃ有する他は、図２の半導体ウエーハ１と同様に形成されている。図９の第１の多層構造バッファ領域５ａは、図７と同様に形成されている。また、図９の第２の多層構造バッファ領域８ｂは、図８で同一の参照符号で示すものと同様に形成された複数の第２のサブ多層構造バッファ領域８´、８″と第２の単層構造バッファ領域９０の他に、第３のサブ多層構造バッファ領域９１を有する。第３のサブ多層構造バッファ領域９１は第２のサブ多層構造バッファ領域８´と第２の単層構造バッファ領域９０との間に配置されている。

【００４６】

第３のサブ多層構造バッファ領域９１は、図１０に示すように交互に配置された複数の第５及び第６の層６１´，６２´の積層体から成る。第５の層６１´はアルミニウムを第３の層８１のアルミニウムの割合（第３の割合）と同じ又はそれよりも小さい第５の割合で含む窒化物半導体から成り、第６の層６２´はアルミニウムを含まない又は第４の層８２のアルミニウムの割合（第４の割合）よりも小さい第６の割合で含む窒化物半導体から成る。製造を容易にするために第５の層６１´を図３の第１の層６１と同一の窒化物半導体（例えばＡｌＮ）で形成し、且つ第６の層６２´を図３の第２の層６２と同一の窒化物半導体（例えばＧａＮ）で形成することが望ましい。

【００４７】

図９の変形された第２の多層構造バッファ領域８ｂは、平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率が第１の多層構造バッファ領域５ａよりも小さく、且つ平均的又は巨視的に見た格子定数が第１の多層構造バッファ領域５ａよりも大きくなるように形成されている。従って、変形された第２の多層構造バッファ領域８ｂは、第２の多層構造バッファ領域８と同様な効果を有し、更に、第２の単層構造バッファ領域９０を有するので第２の多層構造バッファ領域８ｂを比較的厚く形成できるという効果を有する。

【実施例５】

【００４８】

次に、図１１を参照して実施例５の半導体ウエーハ１ｄを説明する。但し、図１１にお

いて図２及び図３と実質的に同一の部分には同一の参照符号を付してその説明を省略する。

【００４９】

図１１の変形されたバッファ領域３ｄは、変形された第１及び第２の多層構造バッファ領域５ｂ、８ｃを有する。その一部のみが示されている変形された第１の多層構造バッファ領域５ｂは、図２の複数のサブ多層構造バッファ領域６に含まれている図３に示す複数の第２の層６２の厚みを互いに同一とせずに異なる値にし、この他は図２及び図３の第１の多層構造バッファ領域５と同一に形成したものである。変形された第１の多層構造バッファ領域５ｂは、変形されたサブ多層構造バッファ領域６ａと単層構造バッファ領域７とを、図２のサブ多層構造バッファ領域６と単層構造バッファ領域７と同様に交互に複数有する。変形されたサブ多層構造バッファ領域６ａは複数の第１の層６１と互いに厚みの異なる複数の第２の層６２ａ～６２ｄとの交互積層体である。第２の層６２ａ～６２ｄは図３に示す第２の層６２と同一の窒化物半導体（例えばＧａＮ）で形成され、基板２から主半導体領域４に向って徐々に厚くなる厚みＴ１，Ｔ２，Ｔ３，Ｔ４を有する。なお、第２の層６２ａ～６２ｄの内の最大の厚みＴ４は単層構造バッファ領域７の厚みＴｅよりも薄く設定されている。図１１では、複数のサブ多層構造バッファ領域６ａが同一に構成されているが、複数のサブ多層構造バッファ領域６ａを互いに異なる構成とすることができる。例えば、複数のサブ多層構造バッファ領域６ａの中の第２の層６２ａ～６２ｄの厚みを基板２から主半導体領域４に向って徐々に厚くなるように互いに異なる値に設定することができる。

【００５０】

図１１の変形された第２の多層構造バッファ領域８ｃは、図３に示す第２の多層構造バッファ領域８の第４の層８２の厚みを互いに同一とせずに互いに異なる厚みＴ１１，Ｔ１２，Ｔ１３，Ｔ１４に変形した第４の層８２ａ～８２ｄを設け、この他は図３と同一に構成したものである。第４の層８２ａ～８２ｄの厚みＴ１１，Ｔ１２，Ｔ１３，Ｔ１４は第1の多層構造バッファ領域５ｂから主半導体領域４に向って徐々に厚くなるように設定されている。なお、図１１の第３の層８１及び第４の層８２ａ～８２ｄの材料は図３の第３の層８１及び第４の層８２と同一である。

【００５１】

図１１の半導体ウエーハ１ｄの基本的構成は図２及び図３と同一であるので、図１１の実施例５によっても実施例１と同様な効果を得ることができる。即ち、図１１の半導体ウエーハ１ｄにおいて、第２の多層構造バッファ領域８ｃは、平均的又は巨視的に見たアルミニウムの含有率が第１の多層構造バッファ領域５ｂよりも小さく、且つ平均的又は巨視的に見た格子定数が第１の多層構造バッファ領域５ｂよりも大きくなるように形成されている。従って、実施例５によっても実施例１と実質的に同一の効果を得ることができる。

更に、Ａｌの含有率が比較的低く且つ格子定数が第１及び第３の層６１，８１よりも主半導体領域４の格子定数に近い第２の層６２ａ～６２ｄの厚み及び第４の層８２ａ～８２ｄの厚みが基板２から主半導体領域４に向って徐々に厚くなるように設定されているので、バッファ領域３ｄの巨視的にみた格子定数が基板２から主半導体領域４に向って徐々に大きくなり、主半導体領域４の格子定数に徐々に近づく。従って、主半導体領域４の反り、クラック、転位が良好に改善される。

【００５２】

　本発明は上述の実施例１～６に限定されるものでなく、例えば次変形が可能なものである。

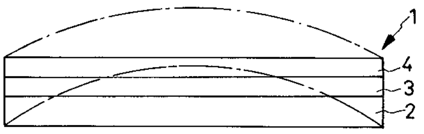
（１）主半導体領域４をＨＥＭＴ以外のＭＥＳＦＥＴ，ＳＢＤ，ＬＥＤ等の別の半導体素子を構成するように形成することができる。

（２）製造を簡略化するために単層構造７とサブ多層構造バッファ領域６の第２の層６２を同一の半導体材料で形成することが望ましいが、これ等を互いに別な半導体材料で形成することもできる。

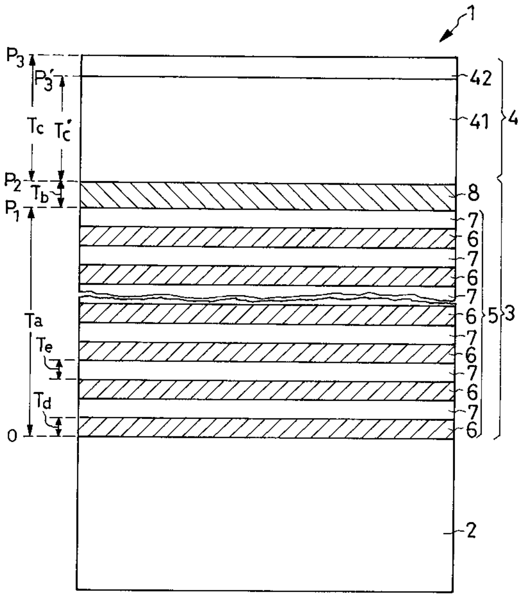
（３）　補助電極９４をソース電極９１に接続する代わりにドレイン電極９２に接続する

こともできる。
（４）シリコン基板２とバッファ領域３、３ａ～３ｄとの間に例えばＡｌＮ等の別のバッファ層を設けることができる。
（５）主半導体領域４の中に例えばＡｌＮ層等の別の層を付加することができる。
（６）主半導体領域４、及びバッファ領域３、３ａ～３ｄを窒化物半導体以外の化合物半導体、例えば３－５族化合物半導体で構成することができる。
【図面の簡単な説明】
【００５３】
【図１】本発明の実施例１に従う半導体ウエーハを概略的に示す断面図である。
【図２】図１の半導体ウエーハを詳しく示す断面図である。
【図３】図２の一部を更に詳しく示す断面図である。
【図４】図１の半導体ウエーハに基づいて形成したＨＥＭＴを概略的に示す断面図である。
【図５】反りを説明するための半導体ウエーハの断面図である。
【図６】反りを説明するための主半導体領域及びバッファ領域の厚みと反りとの関係を示す図である。
【図７】本発明の実施例２に従う半導体ウエーハを概略的に示す断面図である。
【図８】本発明の実施例３に従う半導体ウエーハを概略的に示す断面図である。
【図９】本発明の実施例４に従う半導体ウエーハを概略的に示す断面図である。
【図１０】図９の第３のサブ多層構造バッファ領域を詳しく示す断面図である。
【図１１】本発明の実施例５に従う半導体ウエーハの一部を概略的に示す断面図である。
【符号の説明】
【００５４】
　１，１ａ～１ｅ　半導体ウエーハ
　２　　　シリコン基板
　３、３ａ～３ｄ　バッファ領域
　４　主半導体領域
　５，５ａ、５ｂ、５ｃ　　第１の多層構造バッファ領域
６　　　　　　サブ多層構造バッファ領域
７　　　　　　単層構造バッファ領域
　８，８ａ、８ｂ、８ｃ、８ｄ　第２の多層構造バッファ領域
　６１，６２　　　第１及び第２の層
　８１，８２　　　第３及び第４の層

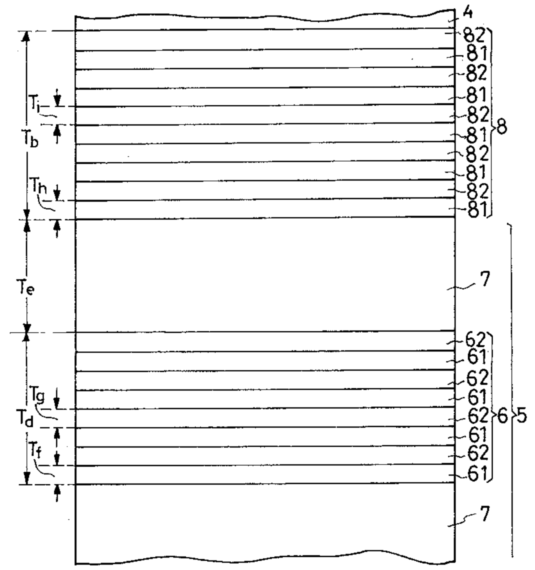
【図１】



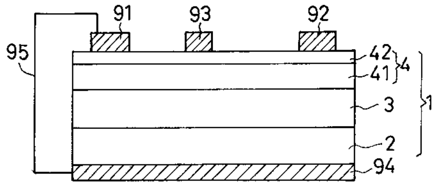
【図２】



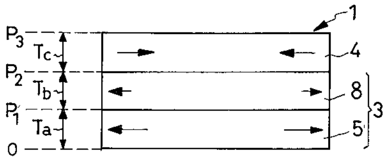
【図３】



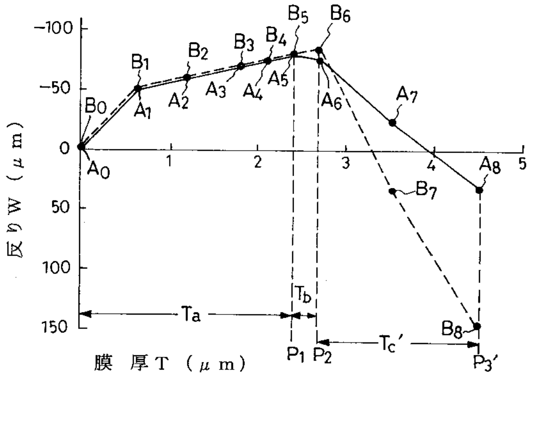
【図４】



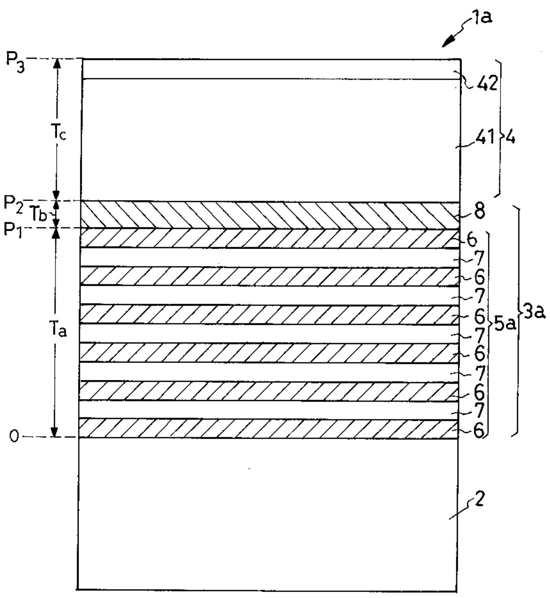
【図５】



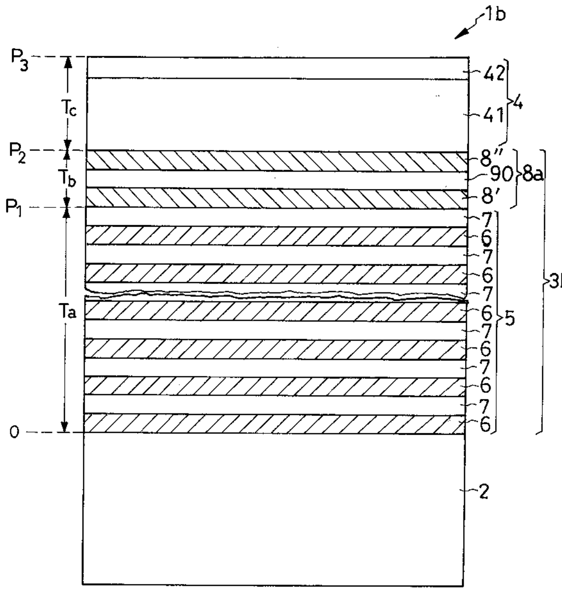
【図６】



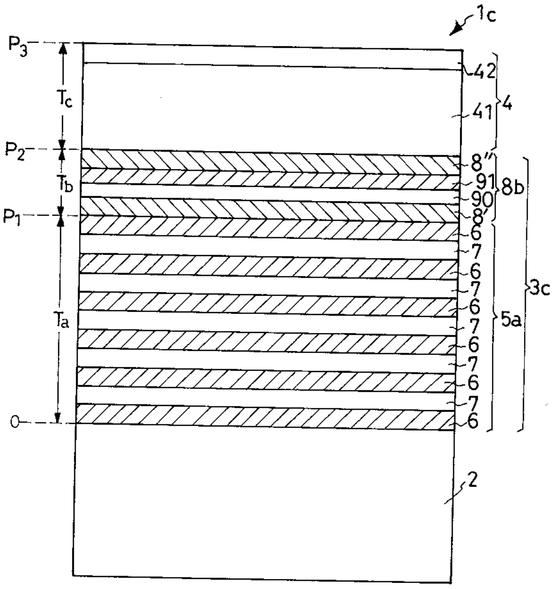
【図７】



【図８】


1b
P3
Tc
P2
Tb
P1
Ta
0
42
41
4
8″
90
8a
8′
7
6
5
3b
2

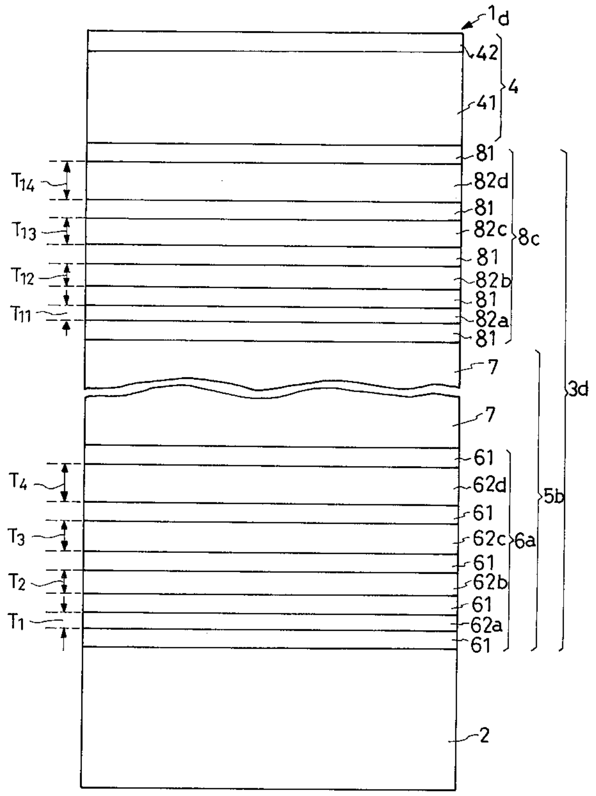
【図９】


1c
P3
Tc
P2
Tb
P1
Ta
0
42
41
4
8″
91
90
8b
8′
6
7
5a
3c
2

【図１０】

62′
61′
62′
61′
62′
61′
91

【図１１】


1d
42
41
4
81
82d
82c
82b
82a
8c
T14
T13
T12
T11
7
3d
61
62d
62c
62b
62a
6a
5b
T4
T3
T2
T1
2

フロントページの続き

(56)参考文献　特表２００６－５２３０３３（ＪＰ，Ａ）
特表２００５－５２７９８８（ＪＰ，Ａ）
特開平０９－１９９７５９（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－３１６２４３（ＪＰ，Ａ）
特開２００６－１００５０１（ＪＰ，Ａ）
特開２００３－０１７７４２（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
ＨＯ１Ｌ　２１／２０
ＨＯ１Ｌ　２１／３３８
ＨＯ１Ｌ　２９／７７８
ＨＯ１Ｌ　２９／８１２