

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2012 年 12 月 27 日(27.12.2012)



(10) 国際公開番号
WO 2012/176411 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 21/338 (2006.01) *H01L 29/778* (2006.01)
H01L 21/20 (2006.01) *H01L 29/812* (2006.01)
H01L 21/205 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/003908
- (22) 国際出願日: 2012 年 6 月 14 日(14.06.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2011-140563 2011 年 6 月 24 日(24.06.2011) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 住友化学株式会社 (SUMITOMO CHEMICAL COMPANY, LIMITED) [JP/JP]; 〒1048260 東京都中央区新川二丁目 2 7 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 秦 雅彦 (HATA, Masahiko) [JP/JP]; 〒3003294 茨城県つくば市北原 6 住友化学株式会社内 Ibaraki (JP). 佐沢 洋幸 (SAZAWA, Hiroyuki) [JP/JP]; 〒3003294 茨城県つくば市北原 6 住友化学株式会社内 Ibaraki (JP). 秩父 重英 (CHICHIBU, Shigefusa) [JP/JP]; 〒9810942 宮城県仙台市青葉区貝ヶ森 4-2-6

Miyagi (JP). 島田 和宏 (SHIMADA, Kazuhiro) [JP/JP]; 〒2470009 神奈川県横浜市栄区鍛冶ヶ谷 2-54-A315 Kanagawa (JP).

(74) 代理人: 龍華国際特許業務法人 (RYUKA IP Law Firm); 〒1631522 東京都新宿区西新宿 1-6-1 新宿エルタワー 2 2 階 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

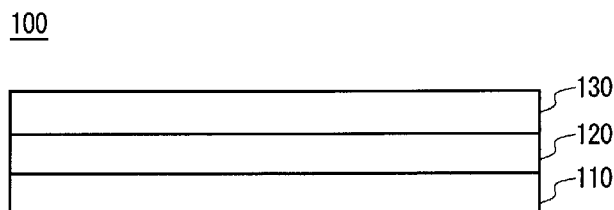
(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーロシヤ (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI

[続葉有]

(54) Title: TRANSISTOR SEMICONDUCTOR SUBSTRATE, TRANSISTOR, AND METHOD OF MANUFACTURING TRANSISTOR SEMICONDUCTOR SUBSTRATE

(54) 発明の名称: トランジスタ用半導体基板、トランジスタ及びトランジスタ用半導体基板の製造方法

【図1】



(57) Abstract: Provided is a semiconductor substrate, comprising: a base substrate; a first epitaxial crystal layer disposed upon the base substrate and formed from a nitride first crystal including a group-IIIa element; and a second epitaxial crystal layer disposed upon the first epitaxial crystal layer, having a larger band gap than the first crystal, and formed from a nitride second crystal including a group-IIIa element and a group-IIIb element which has replaced a portion of the group-IIIa element. In the semiconductor substrate, it is permissible for the second epitaxial crystal layer to conform with the first epitaxial crystal layer in either a lattice or a pseudo-lattice.

(57) 要約: ベース基板と、ベース基板上に設けられた、IIIa 族元素を含む窒化物の第 1 結晶からなる第 1 エピタキシャル結晶層と、第 1 エピタキシャル結晶層上に設けられ、第 1 結晶よりも大きなバンドギャップを有し、かつ、IIIa 族元素及び IIIa 族元素の一部を置換した IIIb 族元素を含む窒化物の第 2 結晶からなる第 2 エピタキシャル結晶層とを備える半導体基板を提供する。上記の半導体基板において、第 2 エピタキシャル結晶層は、第 1 エピタキシャル結晶層に格子整合又は擬格子整合してもよい。



WO 2012/176411 A1

WO 2012/176411 A1



(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG). 添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：

トランジスタ用半導体基板、トランジスタ及びトランジスタ用半導体基板の製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、トランジスタ用半導体基板、トランジスタ及びトランジスタ用半導体基板の製造方法に関する。

背景技術

[0002] 窒化ガリウム系半導体結晶からなるHigh Electron Mobility Transistor (HEMT) の一形態として、ショットキー層がAlGa_Nからなり、チャネル層がInGa_NまたはGa_Nからなるものが知られている（以下においてこの形態をAlGa_N/Ga_N HEMTと呼称することがある）。AlGa_N/Ga_N HEMTではゲートからのリーク電流が大きい。特にノーマリオフ動作（閾値電圧が >0 ）するモードのデバイスでは、AlGa_N層と(In)Ga_N層のヘテロ界面にかかる電界が順方向となるため、その分リーク電流も増大する。

[0003] リーク電流を低減するべく、AlGa_N層の厚みを大きくしてショットキー層の抵抗を増加させる方法、および、AlGa_N層におけるAlの組成比を増大させることでGa_N層あるいはInGa_N層との間のバンドギャップ差を大きくする方法が知られている。また、AlGa_N層とゲートの間に絶縁層を配置することにより、リーク電流を小さくするMetal-Insulator-Semiconductor HEMT (MIS-HEMT) も知られている（例えば、非特許文献1参照）。

非特許文献1 H. Sazawa et al., *physica status solidi (c)*, 4, (2007) 2748

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] AlGa_N/Ga_N HEMTにおいては、AlGa_Nショットキー層とGa_N層またはInGa_N層との間の格子定数の差に起因して、AlGa_N層にピエゾ分極が発生する。ピエゾ

分極が発生すると、当該piezo分極を打ち消すべく、ヘテロ界面のGa_N層側またはInGa_N層側に2次元電子ガスが発生する。

[0005] piezo分極はAlGa_N層の厚み及びAlの組成比が増大すればするほど大きくなり、それに応じ、2次元電子ガスの濃度も増大する。その結果、HEMTの閾値はマイナス側にシフトする。すなわちAlGa_N/Ga_Nヘテロ構造を有するHEMTにおいては、リーク電流の発生を抑制することと、高い閾値を実現することを両立することが困難であった。このため、リーク電流が小さく、且つ、ノーマリオフ動作するHEMTの作製は困難であった。

[0006] AlGa_N層とゲートとの間に絶縁層が配置されたMIS-HEMTにおいては、ノーマリオフ動作とリーク電流の抑制とを両立することができる。しかし、MIS-HEMTを製造するには、絶縁層の形成が必要になるので、製造コストが増大する。また、MIS-HEMTは、AlGa_N層とゲートの間に絶縁層を有するので、閾値のばらつきがショットキー型のHEMTよりも大きいという問題がある。また、絶縁膜とAlGa_N層の界面に発生する界面準位密度を低く抑えることが難しく、デバイスの特性がヒステリシスを示しやすいなどの問題がある。

[0007] AlGa_N/Ga_N HEMTでは、AlGa_NとGa_Nには大きな歪が内在している。そのため電界を印加した際に発生するpiezo応力が加わることにより、両結晶は容易に弾性限界を超え、結晶が破壊される現象、いわゆるpiezo破壊が起こりやすいという問題がある。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明の第1の態様においては、ベース基板と、ベース基板上に設けられた、ⅢⅢⅢa族元素を含む窒化物の第1結晶からなる第1エピタキシャル結晶層と、第1エピタキシャル結晶層上に設けられ、第1結晶よりも大きなバンドギャップを有し、かつ、ⅢⅢⅢa族元素及び当該ⅢⅢⅢa族元素の一部を置換したⅢⅢⅢb族元素を含む窒化物の第2結晶からなる第2エピタキシャル結晶層とを備えるトランジスタ用半導体基板を提供する。上記の半導体基板において、第2エピタキシャル結晶層は、第1エピタキシャル結晶層に格子整合又は擬格子整合してもよい。

[0009] 上記の半導体基板において、一例として、第1結晶は $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）であり、第2結晶が $\text{M}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ であり、Mはスカンジウム、イットリウム及びランタノイド系元素群の中から選ばれる一種以上の元素であり、 $0 < q \leq 0.30$ 、 $0 < z < 1$ 、 $q + z \leq 1$ である。上記の第2結晶は、例えば $\text{Y}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ （ $0 < q \leq 0.30$ 、 $0 < z < 1$ 、 $q + z \leq 1$ ）である。また、第2エピタキシャル結晶層の導電型は、例えばn型又は絶縁型である。上記の第1結晶の一例としてGaNが挙げられ、この場合、 $\text{M}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ におけるMがイットリウムまたはスカンジウムであり、 q/z の値が0.1から0.35の範囲であることが好ましい。第1結晶又は第2結晶の結晶型は、ウルツ鉱型が好ましい。

[0010] 本発明の第2の態様においては、第1の態様の半導体基板を備え、第1エピタキシャル結晶層と第2エピタキシャル結晶層との界面よりも第1エピタキシャル結晶層側に生成される2次元キャリアガスをチャネルとするトランジスタを提供する。上記のキャリアが電子である場合、結晶の上面側がIII族極性であってよく、上記のキャリアがホールである場合、V族極性であってよい。当該トランジスタは、ノーマリオフ動作できる。

[0011] 本発明の第3の態様においては、ベース基板上に、IIIa族元素を含む窒化物の第1結晶をエピタキシャル成長させて第1エピタキシャル結晶層を形成する段階と、第1エピタキシャル結晶層上に、第1結晶よりも大きなバンドギャップを有し、かつ、IIIa族元素及び当該IIIa族元素の一部を置換したIIIb族元素を含む窒化物の第2結晶をエピタキシャル成長させて、第2エピタキシャル結晶層を形成する段階とを備えるトランジスタ用半導体基板の製造方法を提供する。

[0012] なお、本明細書において、IIIa族とはホウ素族を指し、IIIb族とはスカンジウム族を指す。なお、IIIa族およびIIIb族は、旧CAS方式における名称である。

図面の簡単な説明

[0013] [図1]本発明の一実施形態に係る半導体基板100の断面を示す。

[図2]ベガード則に則って算出したGa_Nと格子整合するY_qAl_zGa_{1-q-z}NにおけるGa_Nの組成比とAlN及びYNの組成比との関係の一例を示す。

[図3]Ga_Nの組成比と図2に示したqとzの比を有するY_qAl_zGa_{1-q-z}Nのバンドギャップとの関係を示す。

[図4]Ga_Nと格子整合するSc_qAl_zGa_{1-q-z}NにおけるGa_Nの組成比とAlN及びScNの組成比との関係の一例を示す。

[図5]Ga_Nの組成比と、Y_qAl_zGa_{1-q-z}NおよびSc_qAl_zGa_{1-q-z}Nのそれぞれのバンドギャップ（エネルギーギャップ）との関係を示す。

[図6]Ga_Nの組成比と、Y_qAl_zGa_{1-q-z}NおよびSc_qAl_zGa_{1-q-z}Nのそれぞれの自発分極量との関係を示す。

[図7]半導体基板100を用いて形成されたトランジスタ200の構成例を示す。

発明を実施するための形態

[0014] 図1は、本発明の一実施形態に係る半導体基板100の断面を示す。半導体基板100は、ベース基板110、第1エピタキシャル結晶層120及び第2エピタキシャル結晶層130を備える。ベース基板110は、例えば、Al₂O₃、Si、SiC、ZnO、又はGa_Nからなる基板である。第1エピタキシャル結晶層120は、Ⅲa族元素を含む窒化物の第1結晶から構成される。第1エピタキシャル結晶層120を構成する第1結晶は、例えばIn_xAl_yGa_{1-x-y}N（ただし、0 ≤ x ≤ 1、0 ≤ y ≤ 1）である。

[0015] 第2エピタキシャル結晶層130は、第1エピタキシャル結晶層120上に設けられている。第2エピタキシャル結晶層130は、第1結晶よりも大きなバンドギャップを有する第2結晶で構成される。第2エピタキシャル結晶層130を構成する第2結晶は、例えば、Ⅲa族元素及び当該Ⅲa族元素の一部を置換したⅢb族元素を含む窒化物である。一例として、第1結晶に含まれるⅢa族元素と、第2結晶に含まれるⅢa族元素とにおいて、少なくとも1種類のⅢa族元素は共通しない。また、第1結晶および第2結晶は、共通するⅢa族元素を含んでもよい。例えば

第1結晶は、Ⅲa族元素としてInおよびAlを含み、第2結晶は、Ⅲa族元素としてAlを含みInを含まない。また、第1結晶に含まれるⅢa族元素と、第2結晶に含まれるⅢa族元素とにおいて、共通するⅢa族元素の組成比が異なってよい。第2エピタキシャル結晶層130を構成する第2結晶は、例えば $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ である。ただし、Mはスカンジウム、イットリウム及びランタノイド系元素群の中から選ばれる一種以上の元素であり、 $0 < q \leq 0.30$ 、 $0 < z < 1$ 、 $q + z \leq 1$ である。

[0016] 第2エピタキシャル結晶層130におけるⅢa族元素の一部をⅢb族元素で置換することで、第1エピタキシャル結晶層120と第2エピタキシャル結晶層130との格子定数差を低減できる。その結果、ピエゾ分極により発生する2次元キャリアガスの濃度が減少し、半導体基板100を用いて形成されるHEMTの閾値はキャリアが電子の場合プラス側にシフトし、ホールの場合マイナス側にシフトする。結果としてトランジスタをノーマリオフ動作させることができる。

[0017] 具体的には、第2エピタキシャル結晶層130は、Ⅲa族元素及びⅢb族元素をさまざまな比率で含む窒化物であってよい。例えば、第2エピタキシャル結晶層130は、Ⅲa族元素及びⅢb族元素を $(0.70 \sim 0.95) : (0.30 \sim 0.05)$ の比率で有する。第1エピタキシャル結晶層120がGaN層である場合、第2エピタキシャル結晶層130においてMで示されるⅢb族元素と、Alとの組成比 q/z は、0.1から0.25の範囲であってよい。また、組成比 q/z は、0.1から0.35の範囲であってもよい。第2エピタキシャル結晶層130の導電型は、n型又は半絶縁型であってよい。

[0018] 第2エピタキシャル結晶層130を構成する第2結晶は、第1エピタキシャル結晶層120を構成する第1結晶よりも大きなバンドギャップを有する。したがって、第2エピタキシャル結晶層130は、第1エピタキシャル結晶層120及び第2エピタキシャル結晶層130の積層方向におけるキャリアの移動を抑制する。その結果、半導体基板100を用いて形成されるHEMT

におけるゲートリーク電流を抑制することができ、また、ピエゾ破壊を防ぐことができる。

[0019] 第2エピタキシャル結晶層130は、第1エピタキシャル結晶層120に格子整合又は擬格子整合することが好ましい。ここで、本明細書における「擬格子整合」とは、完全な格子整合ではないが、互いに接する2つの半導体の格子定数の差が小さく、格子不整合による欠陥の発生が顕著でない範囲で、互いに接する2つの半導体を積層できる状態をいう。このとき、各半導体の結晶格子が、弾性変形できる範囲内で変形することで、上記格子定数の差が吸収される。例えば、第1エピタキシャル結晶層120と第2エピタキシャル結晶層130との格子緩和限界厚さ内での積層状態は、擬格子整合した状態である。

[0020] 上述したように、一例として、第1エピタキシャル結晶層120は $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）である。第2エピタキシャル結晶層130は $\text{M}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ である。ここで、Mはスカンジウム、イットリウム及びランタノイド系元素群の中から選ばれる一種以上の元素である。これらの内、イットリウム、ユーロピウムがMとして好ましく、イットリウムがさらに好ましい。q及びzは、 $0 < q \leq 0.30$ 、 $0 < z < 1$ 、 $q + z \leq 1$ の関係を満たす。q及びzの間の関係は、 $q \leq z$ であってもよい。

[0021] 第2エピタキシャル結晶層130が上記の条件を満たす $\text{M}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ で構成される場合には、第2エピタキシャル結晶層130は、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）からなる第1エピタキシャル結晶層120に格子整合又は擬格子整合する。第2エピタキシャル結晶層130が第1エピタキシャル結晶層120に格子整合又は擬格子整合する場合には、第1エピタキシャル結晶層120及び第2エピタキシャル結晶層130にピエゾ分極が発生しない。第1エピタキシャル結晶層120が $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）である場合には、第2エピタキシャル結晶層130は、 $\text{Y}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ （ $0 < q \leq 0.30$ 、 $0 < z < 1$ 、 $q + z \leq 1$ ）であることが好ましい。

- [0022] 第1エピタキシャル結晶層120及び第2エピタキシャル結晶層130に
 ピエゾ分極が発生しない場合には、第1エピタキシャル結晶層120と第2
 エピタキシャル結晶層130との間にピエゾ電荷が発生しない。したがって
 、第1エピタキシャル結晶層120及び第2エピタキシャル結晶層130に
 ピエゾ分極が発生する場合に比べて、第1エピタキシャル結晶層120と第
 2エピタキシャル結晶層130との間に生成される2次元キャリアガスの濃
 度が低下する。
- [0023] 第1エピタキシャル結晶層120と第2エピタキシャル結晶層130との
 間の2次元キャリアガスの濃度が低下すると、当該2次元キャリアガスをチ
 ャネルとするHEMTにおける閾値電圧を、キャリアが電子の場合プラス側に、
 ホールの場合マイナス側にシフトさせることができる。なお、当該HEMTは、
 半導体基板100を用いて形成され、第1エピタキシャル結晶層120と第
 2エピタキシャル結晶層130との間の2次元キャリアガスをチャネルとす
 る。このように、第2エピタキシャル結晶層130が、IIIa族元素及び
 当該IIIa族元素を置換したIIIb族元素を有する窒化物であることで
 、半導体基板100を用いて形成されるHEMTをノーマリオフ動作させること
 ができる。このため、ピエゾ破壊耐性の高いHEMTを構成することができる。
- [0024] ここで、ベガード則によれば、合金の格子定数と組成元素の濃度との間に
 は比例関係が成り立つ。 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ の格子定数を a_{YAlGaN} 、YNの格子定数を
 a_{YN} 、AlNの格子定数を a_{AlN} 、GaNの格子定数を a_{GaN} とすると、 $a_{YAlGaN} = a_{YN} \cdot$
 $q + a_{AlN} \cdot z + a_{GaN} (1 - q - z)$ の関係が成り立つ。
- [0025] $a_{YN} = 3.99$ (Å)、 $a_{AlN} = 3.07$ (Å)、 $a_{GaN} = 3.18$ (Å)であ
 ることが知られているので、上記の関係式を用いると、 $q = 0.11$ 、 $z =$
 0.89 の場合に $a_{YAlGaN} = 3.17$ (Å)となり、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ の格子定
 数がGaNの格子定数と略等しくなる。つまり、上記の格子定数を用いると、 $Y_{0.11}Al_{0.89}N$ の格子定数はGaNの格子定数に等しい。
- [0026] 図2は、ベガード則に則って算出したGaNと格子整合する $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ に
 おけるGaNの組成比とAlN及びYNの組成比との関係の一例を示す。図2によれ

ば、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ にGaNが含まれない場合には、YNとAlNとの組成比が0.14 : 0.86（つまり、 $q/z = 0.14/0.86$ ）であれば、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ がGaNに格子整合することがわかる。

[0027] ただし、実際の結晶においては、結晶中の原子の配列、局所的な組成の揺らぎ、同族元素の秩序化、格子間不純物及び各種欠陥などの影響により、格子定数は微妙に変化する。格子定数を正確に見積もるには、これらの要因を考慮した第一原理計算を使用できる。YNは、結晶形が岩塩構造の場合が最も安定であるが、ウルツ鉱型であるAlGa_{0.14}N又はGa_{0.14}NとYNとの混晶であるYAlGa_{0.14}Nは、ウルツ鉱構造とすることが好ましい。

[0028] YNはAlNあるいはGa_{0.14}Nに比べ、共有結合性が弱く、イオン結合性が強い。したがって、YNとGa_{0.14}N、YNとAlN、又はYNとAlGa_{0.14}Nの混晶は、YNを含まない結晶に比べてバンドギャップが大きい。

[0029] 図3は、GaNの組成比と $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ ($q : z = 1 : 8.9$) のバンドギャップとの関係を示す。バンドギャップは、ブリルアンゾーンのΓ（ガンマ）点におけるバンドギャップである。バンドギャップは、密度汎関数理論に基づく第一原理計算により求めた。イオン-電子相互作用は、ウルトラ疑ポテンシャルで記述した。交換相関エネルギーは一般化勾配近似を適用した。

[0030] 図3から明らかなように、GaNの組成比が1の場合に $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ ($q : z = 1 : 8.9$) のエネルギーギャップが最小となるので、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ ($q : z = 1 : 8.9$) のバンドギャップは、GaNのバンドギャップよりも大きい。したがって、第2エピタキシャル結晶層130が $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ ($q : z = 1 : 8.9$) で構成された半導体基板100では、チャネルとショットキー層界面にはバンドオフセットが存在するため、ゲートリーク電流を抑制することができる。

[0031] 一方、前述の通り、本HEMTではチャネル層とショットキー層が格子整合しているため、ピエゾ分極に起因するチャネル電荷が発生しない状態である。このため本HEMTでは高い閾値が実現でき、ノーマリオフ動作可能である。すなわち本HEMTでは、AlGa_{0.14}N/GaN HEMTに見られた、ゲートリークと高い閾値の

トレードオフが回避される。

[0032] 以上のとおり、半導体基板 100 が、Ⅲa 族元素を含む窒化物の第 1 結晶からなる第 1 エピタキシャル結晶層 120 と、第 1 結晶よりも大きなバンドギャップを有し、かつ、Ⅲa 族元素及びⅢb 族元素を含む窒化物の第 2 結晶からなる第 2 エピタキシャル結晶層 130 とを備えることにより、半導体基板 100 を用いて形成される HEMT のリーク電流が低減するとともに、閾値をプラス側にシフトできる。このため、当該 HEMT にノーマリオフ動作をさせることができる。

[0033] 半導体基板 100 は、公知のエピタキシャル結晶成長法を用いて製造することができる。例えば、GaN からなるベース基板 110 を反応炉に載置した後に、MOCVD 法（有機金属気相成長法）を用いることにより、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）からなる第 1 エピタキシャル結晶層 120 を形成することができる。次に、第 1 エピタキシャル結晶層 120 の上に $\text{Y}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ からなる第 2 エピタキシャル結晶層 130 を形成することができる。具体的には、ベース基板 110 を載置した反応炉に、N 源としてのアンモニア、Al 源としてのトリメチルアルミニウム及び Y 源としてトリシクロペンタジエニルイットリウムを導入して加熱することにより、 $\text{Y}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ を第 1 エピタキシャル結晶層 120 上に形成することができる。

[0034] 図 4 は、GaN と格子整合する $\text{Sc}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ における GaN の組成比と AlN 及び ScN の組成比との関係の一例を示す。なお図 4 においては、ベガード則に沿って算出した組成比を点線で示し、第一原理計算によって算出した組成比を実線で示す。図 4 に示すように、第一原理計算による組成比は、ベガード則による組成比とは異なる値になった。

[0035] 図 4 に示すように、 $\text{Sc}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ に GaN が含まれない場合に、 $\text{Sc}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ が GaN と格子整合する ScN と AlN との組成比をベガード則に沿って算出すると、概ね $0.16 : 0.84$ （つまり、 $q/z = 0.16/0.84$ ）になる。同様に、 $\text{Sc}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ に GaN が含まれない場合に、 $\text{Sc}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ が GaN と格子整合する ScN と AlN との組成比を第一原理計算に沿って算出すると

、概ね $0.23 : 0.77$ （つまり、 $q/z = 0.23/0.77$ ）になる。

[0036] 図5は、GaNの組成比と、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ および $Sc_qAl_zGa_{1-q-z}N$ のそれぞれのバンドギャップ（エネルギーギャップ）との関係を示す。バンドギャップは、ブリルアンゾーンの Γ （ガンマ）点におけるバンドギャップである。当該バンドギャップの算出方法は、図3に示したバンドギャップの算出方法と同様である。

[0037] 図5から明らかなように、GaNの組成比が1の場合に $Sc_qAl_zGa_{1-q-z}N$ のバンドギャップも最小となるので、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ と同様に、GaNの組成比が0の $Sc_qAl_zGa_{1-q-z}N$ のバンドギャップは、GaNのバンドギャップよりも大きい。したがって、第2エピタキシャル結晶層130が $Sc_qAl_zGa_{1-q-z}N$ （但し、GaNの組成比は0）で構成された半導体基板100では、チャネルとショットキー層界面にはバンドオフセットが存在するため、ゲートリーク電流を抑制することができる。また、図5に示すように、GaN組成比の広い範囲に渡って、 $Sc_qAl_zGa_{1-q-z}N$ のほうが、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ よりもバンドギャップが大きい。

[0038] 図6は、GaNの組成比と、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ および $Sc_qAl_zGa_{1-q-z}N$ のそれぞれの自発分極量との関係を示す。図6においても図3と同様に、自発分極量を第一原理計算により算出した。図6に示すように、GaN組成比の広い範囲に渡って、 $Sc_qAl_zGa_{1-q-z}N$ のほうが、 $Y_qAl_zGa_{1-q-z}N$ よりも自発分極量が多い。

[0039] 一般に、光学デバイスにおける光学遷移の効率、および、電子デバイスにおける二次元電子ガスの濃度等は、分極量の影響を受けるが、図6に示すように、 $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ におけるMを選択することによっても、自発分極量を調整することができる。

[0040] 図1に示した半導体基板100の構成は、さまざまな変形例を含む。例えば、第1エピタキシャル結晶層120が $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）であり、第2エピタキシャル結晶層130が $M_qAl_zGa_{1-q-z}$

Nであり、第1エピタキシャル結晶層120と第2エピタキシャル結晶層130との間にスペーサ層を有しても良い。スペーサ層はAlNであっても良い。つまり、半導体基板100は、 $M_qAl_zGa_{1-q-z}N/AlN/In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）で示される構成を有してもよい。半導体基板100が、第1エピタキシャル結晶層120と第2エピタキシャル結晶層130との界面にAlNを有することにより、チャネル電子の合金散乱が抑制されるので、電子移動度が向上する。

[0041] 第2エピタキシャル結晶層130は、第1エピタキシャル結晶層120上に設けられた $M_{q2}Al_{z2}Ga_{1-q2-z2}N$ 層と、当該 $M_{q2}Al_{z2}Ga_{1-q2-z2}N$ 層上に設けられた $M_{q1}Al_{z1}Ga_{1-q1-z1}N$ 層とを有してもよい。つまり、半導体基板100は、 $M_{q1}Al_{z1}Ga_{1-q1-z1}N/M_{q2}Al_{z2}Ga_{1-q2-z2}N/In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）で示される構成を有してもよい。

[0042] $M_{q1}Al_{z1}Ga_{1-q1-z1}N$ が $M_{q2}Al_{z2}Ga_{1-q2-z2}N$ よりも大きな格子定数を有してもよい。 $M_{q1}Al_{z1}Ga_{1-q1-z1}N$ が $M_{q2}Al_{z2}Ga_{1-q2-z2}N$ よりも大きな格子定数を有することにより、第1エピタキシャル結晶層120と第2エピタキシャル結晶層130との界面に生じるピエゾ分極が緩和されるので、半導体基板100を用いて形成されるHEMTの閾値電圧を、キャリアが電子の場合プラス側に、ホールの場合マイナス側にシフトさせることができる。

[0043] 第2エピタキシャル結晶層130は、第1エピタキシャル結晶層120に接する $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ 層と、当該 $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ 層に接するInGa層と、当該InGa層に接するp型InGa層とを有してもよい。つまり、半導体基板100は、p型 $In_{x1}Ga_{1-x1}N/In_{x2}Ga_{1-x2}N/M_qAl_zGa_{1-q-z}N/In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）で示される構成を有してよい。

[0044] 半導体基板100が上記の構成を有することにより、 $In_{x2}Ga_{1-x2}N$ 層と $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ 層との界面に2次元ホールガスが蓄積し、 $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ 層と $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ 層（ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）との界面に2次元電子ガスが蓄積される。したがって、半導体基板100を用いることにより、pチャネルのトランジスタとnチャネルのトランジスタとを有する相補型トラ

ンジスタを1チップで構成することができる。

- [0045] 半導体基板100は、ベース基板110と第1エピタキシャル結晶層120との間に $M_{q3}Al_{z2}Ga_{1-q3-z2}N$ 層をさらに備えてもよい。つまり、半導体基板100は、 $M_{q1}Al_{z1}Ga_{1-q1-z1}N/In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）/ $M_{q3}Al_{z3}Ga_{1-q3-z3}N$ で示される構成を有してもよい。 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ 層（ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）は、 $M_{q1}Al_{z1}Ga_{1-q1-z1}N$ 層及び $M_{q3}Al_{z3}Ga_{1-q3-z3}N$ 層の少なくとも1つに格子整合又は擬格子整合する。
- [0046] 当該構成を有する半導体基板100においては、 $M_{q1}Al_{z1}Ga_{1-q1-z1}N$ 層及び $M_{q3}Al_{z3}Ga_{1-q3-z3}N$ 層から $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ 層（ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）にキャリアが供給されるので、2次元キャリアガスの濃度が高まる。その結果、半導体基板100を用いてトランジスタを形成すると、素子抵抗、ピンチオフ及び相互コンダクタンス特性が改善する。
- [0047] 第2エピタキシャル結晶層130は、第1エピタキシャル結晶層120上に設けられた $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ 層と、当該 $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ 層上に設けられたp型 $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ 層とを有してもよい。つまり、半導体基板100は、p型 $M_qAl_zGa_{1-q-z}N/M_qAl_zGa_{1-q-z}N/In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）で示される構成を有してもよい。当該構成を有する半導体基板100においては、第1エピタキシャル結晶層120にホールが注入されるので、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ 層（ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）と $M_qAl_zGa_{1-q-z}N$ 層との界面に発生する2次元電子ガスの濃度を向上させることができる。したがって、半導体基板100を用いて形成される素子の抵抗を下げるができる。
- [0048] 半導体基板100は、最上層にInGaN層を備えてもよい。当該構成を有する半導体基板100においては、チャネルが形成される、バンドギャップが小さいInGaN層にオーミック電極を形成することができるので、接触抵抗を低減することができる。
- [0049] なお、上記の説明において、 $0 < q \leq 0.30$ 、 $0 < z < 1$ 、 $q + z \leq 1$ 、 $0 < q_1 \leq 0.30$ 、 $0 < z_1 < 1$ 、 $q_1 + z_1 \leq 1$ 、 $0 < q_2 \leq 0.3$

$0, 0 < z_2 < 1, q_2 + z_2 \leq 1, 0 < q_3 \leq 0.3, 0 < z_3 < 1, q_3 + z_3 \leq 1, 0 \leq x_1 \leq 0.1, 0 \leq x_2 \leq 0.1, 0 \leq x_3 \leq 0.5$ である。

[0050] 図7は、半導体基板100を用いて形成されたトランジスタ200の構成例を示す。トランジスタ200は、例えばHEMTである。トランジスタ200は、半導体基板100における第2エピタキシャル結晶層130上に形成されたソース電極210、ゲート電極220及びドレイン電極230を備える。ソース電極210及びドレイン電極230は、Ti/Al、ゲート電極220はNi/Alである。ソース電極210、ゲート電極220及びドレイン電極230は、例えば、電子線蒸着法で金属を積層した後、リソグラフィ法により形成される。

[0051] トランジスタ200においては、第1エピタキシャル結晶層120と第2エピタキシャル結晶層130との間に2次元キャリアガスが生成される。ソース電極210から注入されたキャリアは、当該2次元キャリアガスをチャネルとしてドレイン電極230まで移動する。第1エピタキシャル結晶層120のバンドギャップがベース基板110よりも大きく、ゲート電極220と第1エピタキシャル結晶層120との間をキャリアが移動しにくいので、従来のHEMTに比べてトランジスタ200のゲートリーク電流は低減される。

[0052] また、トランジスタ200においては、第2エピタキシャル結晶層130が第1エピタキシャル結晶層120と格子整合又は擬格子整合するので、ピエゾ電荷による2次元キャリアガスが発生しない。したがって、トランジスタ200は高い閾値が実現できる。閾値電圧は0V以上とすることができ、ノーマリオフ動作をすることができ、また、ピエゾ破壊も起こしにくい。

[0053] 以上、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。上記実施の形態に、多様な変更または改良を加えることが可能であることが当業者に明らかである。その様な変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれ得ることが、請求の範囲の記載から明らかである。

符号の説明

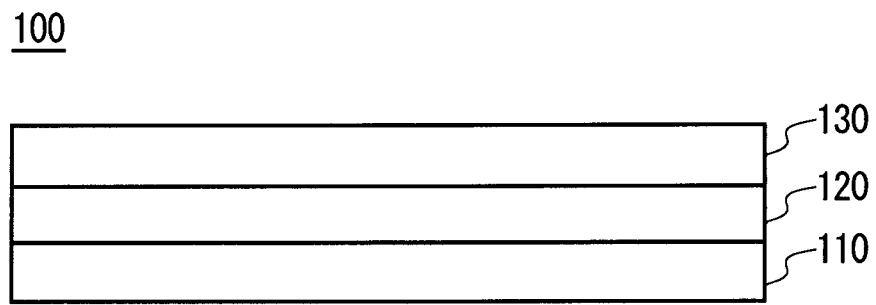
[0054] 100 半導体基板、110 ベース基板、120 第1エピタキシャル結
晶層、130 第2エピタキシャル結晶層、200 トランジスタ、210
ソース電極、220 ゲート電極、230 ドレイン電極

請求の範囲

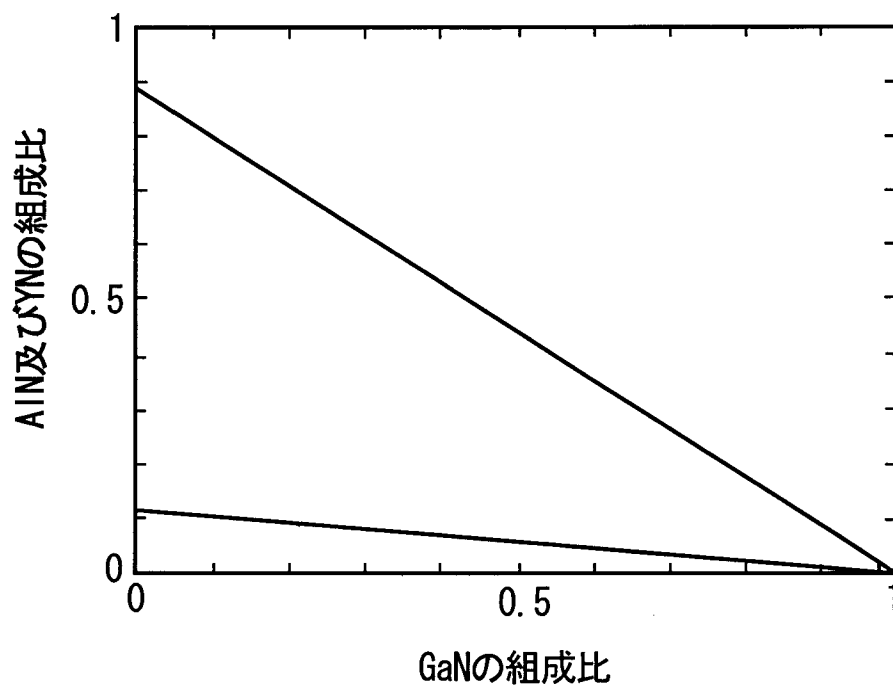
- [請求項1] ベース基板と、
前記ベース基板上に設けられた、ⅢⅢⅢa族元素を含む窒化物の第1結晶からなる第1エピタキシャル結晶層と、
前記第1エピタキシャル結晶層上に設けられ、前記第1結晶よりも大きなバンドギャップを有し、かつ、ⅢⅢⅢa族元素及び前記ⅢⅢⅢa族元素の一部を置換したⅢⅢⅢb族元素を含む窒化物の第2結晶からなる第2エピタキシャル結晶層と
を備えるトランジスタ用半導体基板。
- [請求項2] 前記第2エピタキシャル結晶層が、前記第1エピタキシャル結晶層に格子整合又は擬格子整合する請求項1に記載のトランジスタ用半導体基板。
- [請求項3] 前記第1結晶が $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ ）であり、
前記第2結晶が $\text{M}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ であり、
Mはスカンジウム、イットリウム及びランタノイド系元素群の中から選ばれる一種以上の元素であり、
 $0 < q \leq 0.30$ 、 $0 < z < 1$ 、 $q + z \leq 1$ である請求項1に記載のトランジスタ用半導体基板。
- [請求項4] 前記第2エピタキシャル結晶層の導電型がn型又は絶縁型である請求項1に記載のトランジスタ用半導体基板。
- [請求項5] 前記第1結晶がGaNであり、
前記 $\text{M}_q\text{Al}_z\text{Ga}_{1-q-z}\text{N}$ におけるMがイットリウムまたはスカンジウムであり、
 q/z の値が0.1から0.35の範囲である請求項3に記載のトランジスタ用半導体基板。
- [請求項6] 前記第1結晶又は前記第2結晶の結晶構造がウルツ鉱型である請求項1に記載のトランジスタ用半導体基板。

- [請求項7] 請求項1に記載のトランジスタ用半導体基板を備え、
前記第1エピタキシャル結晶層と前記第2エピタキシャル結晶層との界面よりも前記第1エピタキシャル結晶層側に生成される2次元キャリアガスをチャンネルとするトランジスタ。
- [請求項8] ノーマリオフ動作する請求項7に記載のトランジスタ。
- [請求項9] ベース基板上に、ⅢⅤ族元素を含む窒化物の第1結晶をエピタキシャル成長させて第1エピタキシャル結晶層を形成する段階と、
前記第1エピタキシャル結晶層上に、前記第1結晶よりも大きなバンドギャップを有し、かつ、ⅢⅤ族元素及び前記ⅢⅤ族元素の一部を置換したⅢⅤ族元素を含む窒化物の第2結晶をエピタキシャル成長させて、第2エピタキシャル結晶層を形成する段階と
を備えるトランジスタ用半導体基板の製造方法。

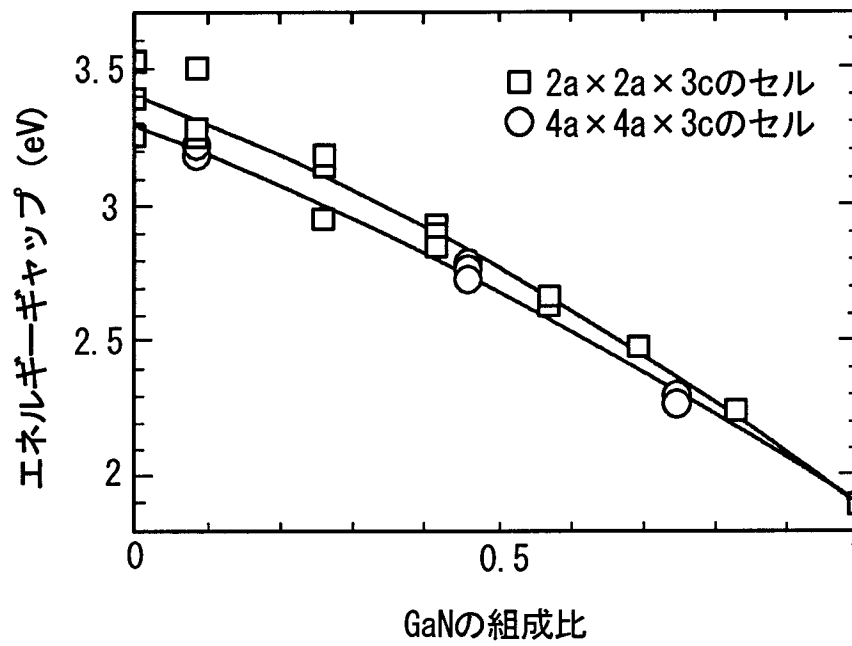
[図1]



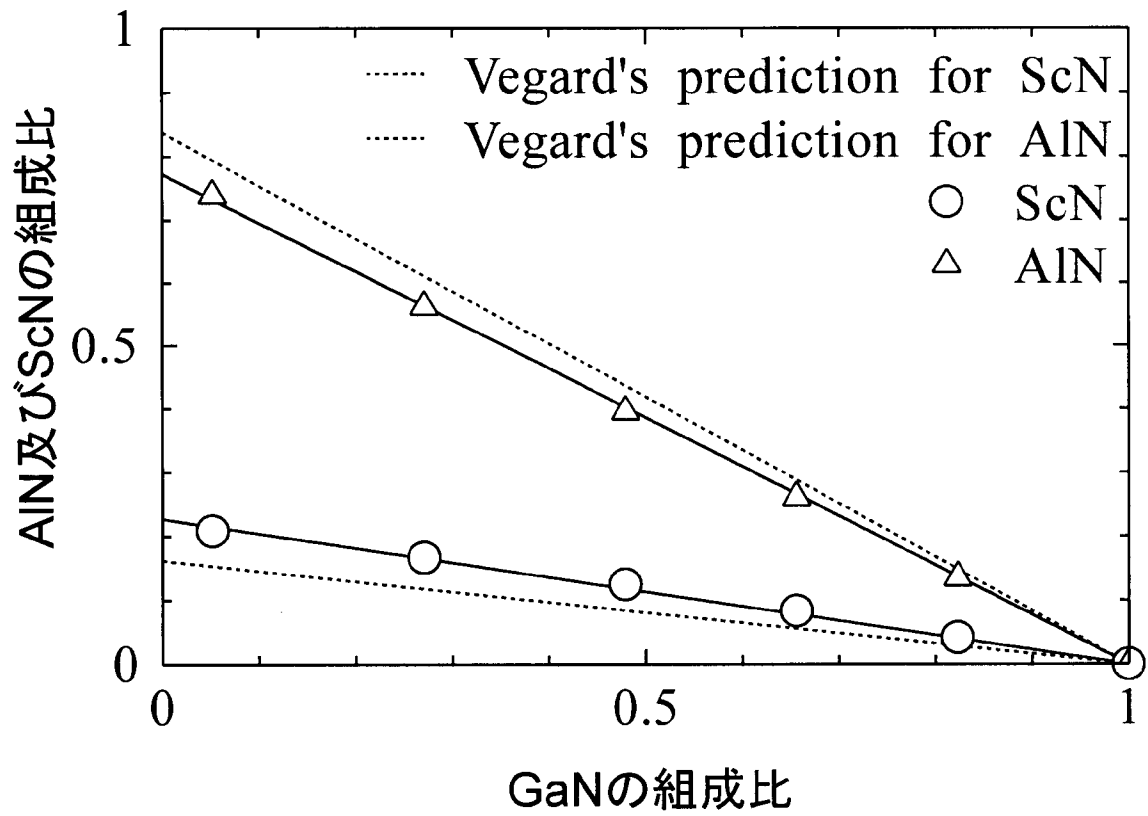
[図2]



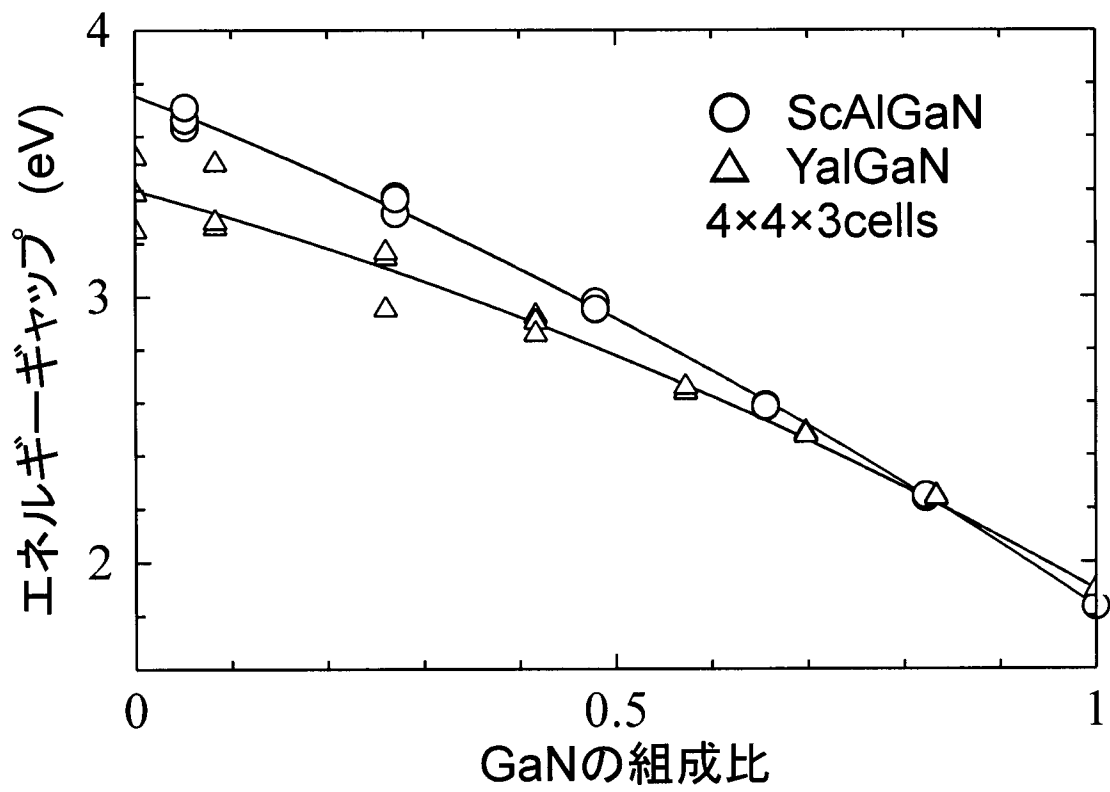
[図3]



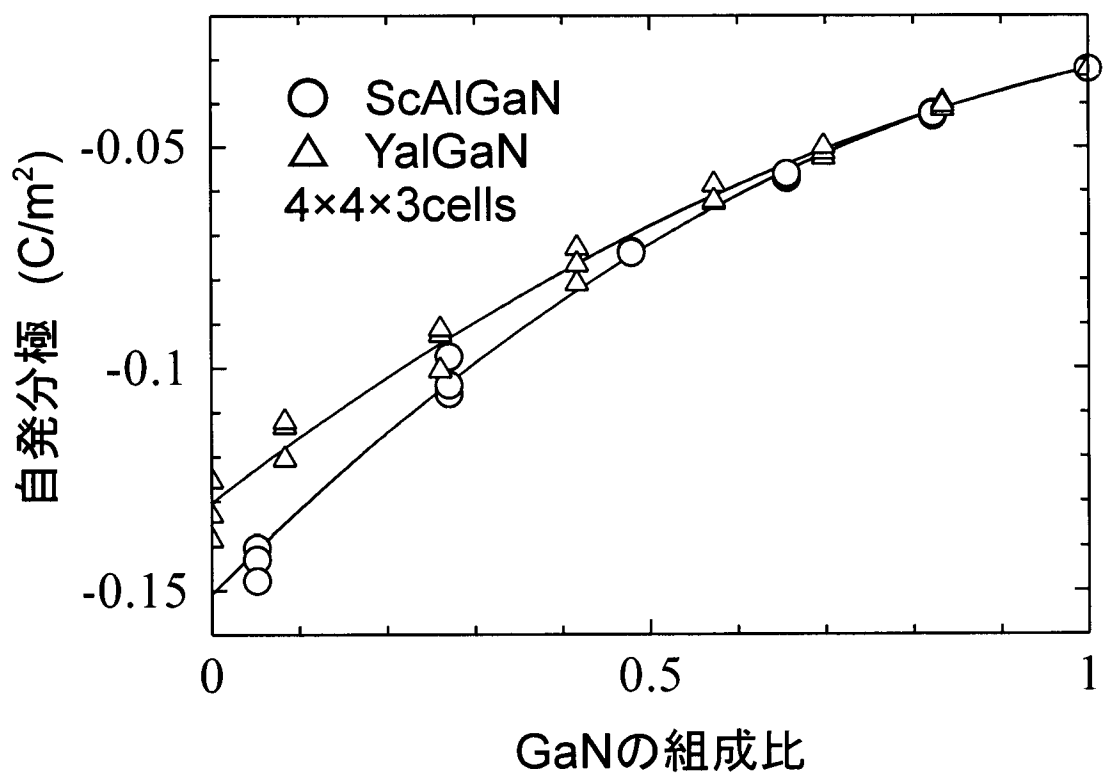
[図4]



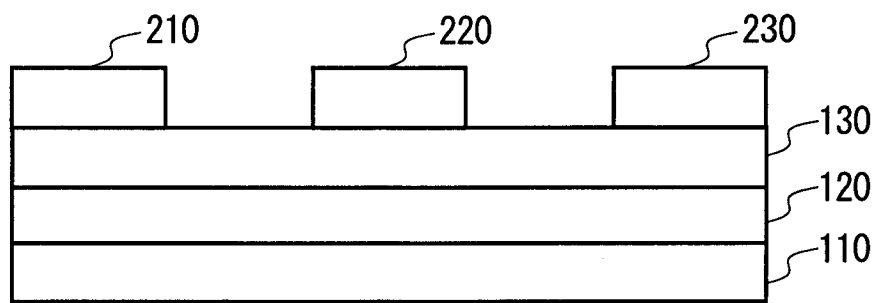
[図5]



[図6]



[図7]

200

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/003908

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L21/338(2006.01)i, H01L21/20(2006.01)i, H01L21/205(2006.01)i,
H01L29/778(2006.01)i, H01L29/812(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L21/338, H01L21/20, H01L21/205, H01L29/778, H01L29/812

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2012
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2012	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2012

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2007-305954 A (Nichia Chemical Industries, Ltd.), 22 November 2007 (22.11.2007), entire text; all drawings (Family: none)	1, 4, 6-9 2, 3, 5
Y	JP 2008-047859 A (Samsung Electro-Mechanics Co., Ltd.), 28 February 2008 (28.02.2008), fig. 4 & US 2008/0042161 A1 & KR 10-0770441 B1	1, 4, 6-9
A	JP 2000-243947 A (Sharp Corp.), 08 September 2000 (08.09.2000), entire text; all drawings (Family: none)	1-9



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
10 September, 2012 (10.09.12)

Date of mailing of the international search report
18 September, 2012 (18.09.12)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/003908

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2011-515861 A (Picogiga International), 19 May 2011 (19.05.2011), entire text; all drawings & US 2011/0012128 A1 & EP 2269212 A & WO 2009/118244 A1 & FR 2929445 A & KR 10-2010-0124334 A & CN 101978470 A	1-9
A	JP 2001-060682 A (Sharp Corp.), 06 March 2001 (06.03.2001), entire text; all drawings & US 6348704 B1	1-9
A	JP 11-054840 A (Toshiba Corp.), 26 February 1999 (26.02.1999), entire text; all drawings (Family: none)	1-9

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L21/338(2006.01)i, H01L21/20(2006.01)i, H01L21/205(2006.01)i, H01L29/778(2006.01)i, H01L29/812(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L21/338, H01L21/20, H01L21/205, H01L29/778, H01L29/812

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 2 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 2 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 2 年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2007-305954 A (日亜化学工業株式会社) 2007.11.22, 全文、全図 (ファミリーなし)	1, 4, 6-9 2, 3, 5
Y	JP 2008-047859 A (三星電機株式会社) 2008.02.28, 図4 & US 2008/0042161 A1 & KR 10-0770441 B1	1, 4, 6-9
A	JP 2000-243947 A (シャープ株式会社) 2000.09.08, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-9

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

1 0 . 0 9 . 2 0 1 2

国際調査報告の発送日

1 8 . 0 9 . 2 0 1 2

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

杵 哲次

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 5 1 6

5 F

3 9 5 2

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2011-515861 A (ピコギガ インターナショナル) 2011.05.19, 全文、全図 & US 2011/0012128 A1 & EP 2269212 A & WO 2009/118244 A1 & FR 2929445 A & KR 10-2010-0124334 A & CN 101978470 A	1-9
A	JP 2001-060682 A (シャープ株式会社) 2001.03.06, 全文、全図 & US 6348704 B1	1-9
A	JP 11-054840 A (株式会社東芝) 1999.02.26, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-9