

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2013-247363

(P2013-247363A)

(43) 公開日 平成25年12月9日(2013.12.9)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
<b>H O 1 L 21/338 (2006.01)</b>	H O 1 L 29/80 H	5 F 1 0 2
<b>H O 1 L 29/778 (2006.01)</b>	H O 1 L 29/80 F	5 F 1 4 0
<b>H O 1 L 29/812 (2006.01)</b>	H O 1 L 29/78 3 O 1 B	
<b>H O 1 L 21/336 (2006.01)</b>	H O 1 L 29/06 3 O 1 F	
<b>H O 1 L 29/78 (2006.01)</b>		

審査請求 未請求 請求項の数 31 O L (全 23 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2013-108851 (P2013-108851)	(71) 出願人	599034594
(22) 出願日	平成25年5月23日 (2013. 5. 23)		トライクイント・セミコンダクター・インコーポレイテッド
(31) 優先権主張番号	13/481, 198		TriQuint Semiconductor, Inc.
(32) 優先日	平成24年5月25日 (2012. 5. 25)		アメリカ合衆国オレゴン州97124・ヒルスボロ・ノースイーストブルックウッドパークウェイ 2300
(33) 優先権主張国	米国 (US)		2300 NE Brookwood Parkway, Hillsboro, Oregon 94124, U. S. A.
		(74) 代理人	100105924 弁理士 森下 賢樹

最終頁に続く

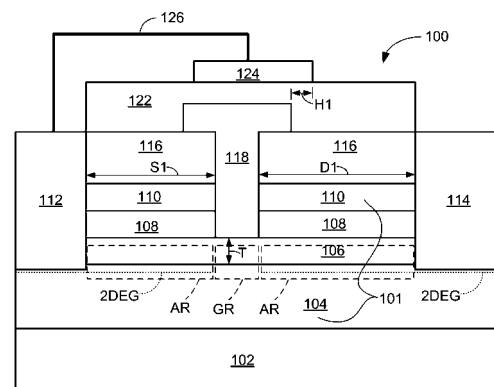
(54) 【発明の名称】 電荷誘導層を有する I I I 族窒化物トランジスタ

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 オン抵抗の小さい、ノーマリオフ型窒化ガリウム系 H E M T を提供する。

【解決手段】 デバイスは、トランジスタのチャネルとして機能するように構成されガリウム (Ga) と窒素 (N) とを含む、基板 102 上に配置されたバッファ層 104、該チャネルに可動電荷キャリアを供給するように構成されアルミニウム (Al)、ガリウム (Ga) および窒素 (N) を含む、バッファ層 104 上に配置されたバリア層 106 と、該チャネル内で電荷を誘導するように構成されアルミニウム (Al) と窒素 (N) を含む、バリア層上に配置された電荷誘導層 108 と、該電荷誘導層 108 に配置され、該バリア層 106 に接続されてチャネルを制御するゲート端子 118 と、を備える。

【選択図】 図 1



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

トランジスタのチャンネルとして機能するように構成されガリウム (Ga) と窒素 (N) とを含む、基板上に配置されたバッファ層と、

前記チャンネルに可動電荷キャリアを供給するように構成されアルミニウム (Al)、ガリウム (Ga) および窒素 (N) を含む、前記バッファ層上に配置されたバリア層と、

前記チャンネル内で電荷を誘導するように構成されアルミニウム (Al) と窒素 (N) を含む、前記バリア層上に配置された電荷誘導層と、

前記電荷誘導層に配置され、前記バリア層に接続されて前記チャンネルを制御するゲート端子と、を備えたことを特徴とする装置。

10

## 【請求項 2】

前記電荷誘導層は第 1 のバンドギャップエネルギーを有し、

前記バリア層は第 2 のバンドギャップエネルギーを有し、

前記第 1 のバンドギャップエネルギーは第 2 のバンドギャップエネルギーより大きいことを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 3】

前記電荷誘導層は第 1 の分極を有し、

前記バリア層は第 2 の分極を有し、

前記第 1 の分極は前記第 2 の分極より大きいことを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 4】

20

前記バリア層の厚みは、前記ゲート端子と前記バッファ層間に配置されたゲート領域における二次元電子ガス (2DEG) の形成を阻止するものであり、

前記ゲート端子は、電力増幅のエンハンスメントモード (e モード) 高電子移動度トランジスタ (HEMT) スイッチデバイスのスイッチングを制御するように構成されていることを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 5】

アルミニウム (Al) と窒素 (N) を含み、前記電荷誘導層上に配置されたキャップ層を更に備えることを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 6】

前記バッファ層は窒化ガリウム (GaN) を含み、

30

前記バリア層と前記キャップ層は窒化アルミニウムガリウム ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ) ( $x$  はそれぞれの成分の相対量を表わし、0.2 以下) を含み、

前記電荷誘導層は窒化アルミニウムインジウム ( $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}$ ) ( $y$  はそれぞれの成分の相対量を表し、0.2 以下) を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 7】

前記バリア層の厚みは 30 nm 以上であり、

前記電荷誘導層の厚みは 30 nm 以下であり、

前記キャップ層の厚みは 10,000 nm 以下であることを特徴とする請求項 6 に記載の装置。

## 【請求項 8】

40

前記ゲート端子は、前記バリア層の材料に接続されてショットキー接合を形成するゲート電極を備えることを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 9】

前記ゲート端子は、ゲート電極と、前記バリア層の材料に接続されて金属 - 絶縁体 - 半導体 (MIS) 接合を形成するゲート絶縁体と、を備えることを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

## 【請求項 10】

前記電荷誘導層に接続されたソースと、

前記電荷誘導層に接続されたドレインと、をさらに備え、前記ソースと前記ドレインは、前記電荷誘導層と前記バリア層を経由して前記バッファ層内に延在することを特徴とす

50

る請求項 1 に記載の装置。

【請求項 1 1】

前記電荷誘導層上に配置されて前記ゲート端子の一部分を封入する誘電体材料をさらに備えることを特徴とする請求項 1 0 に記載の装置。

【請求項 1 2】

前記ゲート端子は T 形フィールドプレートゲートであり、ニッケル (Ni)、プラチナ (Pt)、イリジウム (Ir)、モリブデン (Mo) または金 (Au) を含むことを特徴とする請求項 1 1 に記載の装置。

【請求項 1 3】

前記誘電体材料上に配置され、それを経由して、前記ソースに電氣的に接続され、また、前記ゲート端子に容量接続されたフィールドプレートをさらに備えることを特徴とする請求項 1 2 に記載の装置。

【請求項 1 4】

シリコン (Si)、炭化ケイ素 (SiC)、サファイア ( $Al_2O_3$ )、窒化ガリウム (GaN)、ダイヤモンド (C)、酸化シリコン ( $SiO_2$ ) または窒化アルミニウム (AlN) を含む基板をさらに備えることを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

【請求項 1 5】

前記バッファ層は前記基板にエピタキシャル接続され、

前記バリア層は前記バッファ層にエピタキシャル接続され、

前記電荷誘導層は前記バリア層にエピタキシャル接続されることを特徴とする請求項 1 4 に記載の装置。

【請求項 1 6】

前記バッファ層、前記バリア層あるいは前記電荷誘導層は、複数の槽で構成されることを特徴とする請求項 1 5 に記載の装置。

【請求項 1 7】

トランジスタのチャンネルとして機能するように構成されガリウム (Ga) と窒素 (N) とを含むバッファ層を基板上に形成するステップと、

前記チャンネルに可動電荷キャリアを供給するように構成されアルミニウム (Al)、ガリウム (Ga) および窒素 (N) を含むバリア層を前記バッファ層上に形成するステップと、

前記チャンネル内で電荷を誘導するように構成されアルミニウム (Al) と窒素 (N) を含む電荷誘導層を前記バリア層上に形成するステップと、

前記電荷誘導層に配置され、前記バリア層に接続されて前記チャンネルを制御するゲート端子を形成するステップと、を備えることを特徴とする方法。

【請求項 1 8】

前記バッファ層を形成するステップは、バッファ層材料を前記基板上にエピタキシャル堆積するステップを備え、

前記バリア層を形成するステップは、バリア層材料を前記バッファ層上にエピタキシャル堆積するステップを備え、

前記電荷誘導層を形成するステップは、電荷誘導層材料を前記バリア層上にエピタキシャル堆積するステップを備え、前記電荷誘導層は第 1 の分極を有し、前記バリア層は第 2 の分極を有し、前記第 1 の分極は前記第 2 の分極より大きいことを特徴とする請求項 1 7 に記載の方法。

【請求項 1 9】

前記電荷誘導層を形成するステップは、電荷誘導層材料を前記バリア層上にエピタキシャル堆積するステップを備え、前記電荷誘導層は第 1 のバンドギャップエネルギーを有し、前記バリア層は第 2 のバンドギャップエネルギーを有し、前記第 1 のバンドギャップエネルギーは第 2 のバンドギャップエネルギーより大きいことを特徴とする請求項 1 8 に記載の方法。

【請求項 2 0】

10

20

30

40

50

キャップ層材料を前記電荷誘導層上にエピタキシャル堆積することによって、アルミニウム ( $Al$ )、ガリウム ( $Ga$ ) および窒素 ( $N$ ) を含むキャップ層を前記電荷誘導層上に形成するステップをさらに備えることを特徴とする請求項 18 に記載の方法。

【請求項 21】

前記バッファ層材料は窒化ガリウム ( $GaN$ ) を含み、

前記バリア層材料および前記キャップ層材料は、窒化アルミニウムガリウム ( $Al_xGa_{1-x}N$ ) ( $x$  は、それぞれの成分の相対量を表わし、 $0.2$  以下) を含み、

前記電荷誘導層材料は、窒化アルミニウムインジウム ( $In_yAl_{1-y}N$ ) ( $y$  はそれぞれの成分の相対量を表し、 $0.2$  以下) を含むことを特徴とする請求項 20 に記載の方法。

10

【請求項 22】

前記バリア層を形成するステップによって、 $60$  以下のバリア層厚みが得られ、

前記電荷誘導層を形成するステップによって、 $30$  以下の電荷誘導層厚みが得られ、

前記キャップ層を形成するステップによって、 $10,000$  以下のキャップ層厚みが得られることを特徴とする請求項 21 に記載の方法。

【請求項 23】

前記バリア層厚みによって、前記ゲート端子と前記バッファ層間に配置されたゲート領域における二次元電子ガス ( $2DEG$ ) の形成が阻止され、

前記ゲート端子は、エンハンスメントモード ( $e$  モード) 高電子移動度トランジスタ ( $HEMT$ ) デバイスのスイッチングを制御するように構成されていることを特徴とする請求項 22 の方法。

20

【請求項 24】

前記ゲート端子を形成するステップは、前記キャップ層の一部を除去して電荷誘導層を露出させるステップを備えることを特徴とする請求項 20 の方法。

【請求項 25】

前記キャップ層の材料を除去するステップは、ホウ素塩化物 ( $BCl_3$ ) または塩素 ( $Cl_2$ ) を用いて、前記キャップ層材料を選択的にエッチングするステップを備え、

前記電荷誘導層の一部を除去するステップは、水酸化カリウム ( $KOH$ ) または水酸化テトラメチルアンモニウム ( $TMAH$ ) を用いて、前記電荷誘導層材料を選択的にエッチングするステップを備えることを特徴とする請求項 24 に記載の方法。

30

【請求項 26】

前記電荷誘導層の一部を除去するステップによって前記バリア層を露出させ、

前記バリア層は、電荷誘導層材料の選択的エッチングのためのエッチング停止層として機能することを特徴とする請求項 25 に記載の方法。

【請求項 27】

前記ゲート端子を形成するステップは、キャップ層材料と前記電荷誘導層が除去された領域に、前記バリア層の材料に接続されてショットキー接合を形成するゲート電極材料を堆積するステップをさらに備えることを特徴とする請求項 25 に記載の方法。

【請求項 28】

前記ゲート端子を形成するステップは、前記電荷誘導層の一部を除去してゲート絶縁体を形成することにより露出される前記電荷誘導層材料を選択的に酸化させるステップと、

40

ゲート電極材料を前記ゲート絶縁体上に堆積するステップであって、前記ゲート電極と前記ゲート絶縁体は前記バリア層材料に接続されて金属 - 絶縁体 - 半導体 ( $MIS$ ) 接合を形成するステップと、をさらに備えることを特徴とする請求項 25 に記載の方法。

【請求項 29】

前記電荷誘導層に接続されたソースおよびドレインを形成するステップであって、前記ソースと前記ドレインは、前記電荷誘導層と前記バリア層を経由して前記バッファ層内に延在するステップをさらに備えることを特徴とする請求項 17 に記載の方法。

【請求項 30】

50

前記ゲート端子の一部分を封入する誘電体材料を前記電荷誘導層上に堆積するステップをさらに備えることを特徴とする請求項 29 に記載の方法。

【請求項 31】

請求項 30 に記載の方法であって、前記ゲート端子は T 形フィールドプレートゲートであり、

前記方法は、前記誘電体材料を経由して、前記ソースに電氣的に接続され、また、前記ゲート端子に容量接続されたフィールドプレートを、前記誘電体材料上に形成するステップをさらに備える方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本開示の実施形態は、広くは集積回路分野に関し、具体的には電荷誘導層を有する III 族窒化物トランジスタおよびその製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

現在、窒化ガリウム (GaN) 系高電子移動度トランジスタ (HEMT) などの III 族窒化物系トランジスタは、典型的には、トランジスタ内の電流を低減するために、電源電圧に対して負のゲート電圧が用いられるデプレッションモード (D モード) デバイスである。しかしながら、トランジスタ内に電流を供給するあるいはその電流を高めるために、電源電圧に対して正のゲート電圧が用いられるエンハンスメントモード (E モード) デバイス (「常時オフデバイス」とも呼ばれる) は、パワースwitching などの用途には好適であり得る。E モードデバイスは、供給層の厚みが臨界厚みより小さくなるようにして、二次元電子ガス (2DEG) がゲート下の導電性チャネル内に生じないように制御する (例えば、トランジスタのゲートの外部電圧が印加されていない場合、あるいはゲート電圧とソース電圧とが等しい場合) ことによって製造される。該ゲートに隣接する領域内のより高い電荷密度は、こうしたトランジスタのオン抵抗の低減化には好適であり得る。しかしながら、高電荷密度が得られる供給層を用いて電荷密度を上げるには、例えば GaN 系 HEMT などにおける供給層の臨界厚みを小さくすることが必要であり得る。例えば、高電荷密度を得るように供給層を設計する場合、その層の臨界厚みより小さい厚みは余りにも小さすぎて、現在の製造設備では信頼性を持って製造することはでき得ない。

20

30

【図面の簡単な説明】

【0003】

以下の詳細な説明と添付図面とによって実施形態は容易に理解されるであろう。説明を容易にするために、同じ符号は同じ構成要素を示す。実施形態は例示として示されるものであり、添付図面の形状を限定するものではない。

【0004】

【図 1】種々の実施形態によるデバイスの横断面図である。

【図 2】種々の実施形態による、広範なバリア層材料例に対するチャネル電荷密度 ( $n_s$ ) とバリア厚みとの関係を示すグラフである。

【図 3】種々の実施形態による、基板上への層スタック形成後のデバイスの概略横断面図である。

40

【図 4】種々の実施形態による、ソースとドレイン形成後のデバイスの概略横断面図である。

【図 5】種々の実施形態による、ゲート形成後のデバイスの概略横断面図である。

【図 6】種々の実施形態による、一体型フィールドプレートを有するゲート形成後のデバイスの概略横断面図である。

【図 7】種々の実施形態による、付加的なソース - 接続フィールドプレート形成後のデバイスの概略横断面図である。

【図 8】種々の実施形態による、デバイスの製造方法を示すフローチャートである。

【図 9】種々の実施形態による、デバイスを備えるシステム例の概略図である。

50

## 【発明を実施するための形態】

## 【0005】

本開示の実施形態によって、電荷誘導層を有するⅢ族窒化物トランジスタの技術および方法が提供される。以下の詳細な説明では、本明細書の一部を成す添付図面を参照する。図面中、同じ符号は同じ部品を示し、本開示の主題が実施され得る実施形態が例示される。他の実施形態を用いることも可能であり、また、構造や論理的な変更が本開示の範囲を逸脱することなく可能であることは理解されるべきである。従って、以下の詳細な説明は限定的な意味で捉えられるものではなく、実施形態の範囲は、添付の請求項およびその均等物によって画定されるものである。

## 【0006】

本開示の目的のために、「AおよびまたはB」は、(A)、(B)または(AおよびB)を意味する。本開示の目的のために、「A、BおよびまたはC」は、(A)、(B)、(C)、(AおよびB)、(AおよびC)、(BおよびC)または(A、BおよびC)を意味する。

## 【0007】

以下の説明では、「ある実施形態では」または「実施形態では」が使用されるが、これらはそれぞれ、1つまたは複数の同じであっても異なってもよい実施形態を指す。また、本開示の実施形態に関して使用される「備える」、「含む」、「有する」などは同意語である。また、「接続された」は、直接接続、間接接続あるいは間接的な伝達を指す。

## 【0008】

「接続された」とその派生語も本明細書で使用されるが、この「接続された」は、以下の1つまたは複数の指す。すなわち、2つ以上の要素が直接物理的または電氣的に接触しているか、あるいは、2つ以上の要素が互いに間接的に接触し、さらには互いに協働もしくは相互作用しているか、あるいは、互いに接続されているとされる要素間に、1つまたは複数の他の要素が接続されていることを意味する。

## 【0009】

種々の実施形態において、「第2の層上に形成、配置または構成された第1の層」とは、前記第2の層の上部に前記第1の層が形成、配置または構成されており、第1の層の少なくとも一部が、第2の層の少なくとも一部と直接接触（例えば、物理的およびまたは電氣的な直接接触）しているか、あるいは間接接触（例えば、第1の層と第2の層間に、他の1層または複層を有するなど）していることを意味する。

## 【0010】

図1は、種々の実施形態によるデバイス100の概略横断面図である。一部の実施形態では、デバイス100は、トランジスタなどの集積回路デバイスであってもよい。デバイス100は、基板102上に形成されてもよい。基板102は一般に、その上に層スタック（あるいは単に「スタック101」）が堆積される支持材を含む。ある実施形態では、基板102の材料として、シリコン(Si)、炭化ケイ素(SiC)、酸化アルミニウム( $Al_2O_3$ )、ダイヤモンド(C)、ガラス( $SiO_2$ )、「サファイア」、窒化ガリウム(GaN)およびまたは窒化アルミニウム(AlN)が挙げられる。他の実施形態では、基板102用として、好適なⅢ～Ⅴ族半導体材料系およびⅢ～Ⅴ族半導体材料系を含む他の材料も使用される。ある実施形態では、その上にバッファ層104の材料がエピタキシャル成長できる任意の材料または材料の任意の組み合わせで基板102を構成してもよい。一部の実施形態では、基板102の材料は(0001)方向に成長させてもよい。

## 【0011】

基板102上に形成されるスタック101は、1つまたは複数のヘテロ接合/ヘテロ構造を形成する異なる材料系で構成されるエピタキシャル堆積層を備えていてもよい。スタック101の層は、その場(in-situ)で形成されてもよい。すなわち、スタック101は、基板102を取り出さずにその構成層を形成する（例えばエピタキシャル成長させる）製造装置（例えばチャンバ）内で、基板102上に形成されてもよい。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 1 2 】

一実施形態では、デバイス 1 0 0 のスタック 1 0 1 は、基板 1 0 2 上に形成されたバッファ層 1 0 4 を備える。バッファ層 1 0 4 は、デバイス 1 0 0 の基板 1 0 2 と他の構成要素（例えばバリア層 1 0 6）間に結晶構造転移を与えてもよく、それによって、これら 2 つの間のバッファ層または絶縁層として作用する。例えば、バッファ層 1 0 4 によって、基板 1 0 2 と他の格子不整合材料（例えばバリア層 1 0 6）間の応力が緩和され得る。一部の実施形態では、バッファ層 1 0 4 は、トランジスタの可動電荷キャリア用のチャネルとして機能させてもよい。一部の実施形態では、バッファ層 1 0 4 は非ドーブであってもよい。バッファ層 1 0 4 は、基板 1 0 2 にエピタキシャル接続されてもよい。他の実施形態では、核形成層（図示せず）を基板 1 0 2 とバッファ層 1 0 4 間に介在させてもよい。一部の実施形態では、バッファ層 1 0 4 を複数の堆積膜あるいは層で構成してもよい。

10

## 【 0 0 1 3 】

一部の実施形態では、バッファ層 1 0 4 は、例えば窒化ガリウム（GaN）、窒化インジウム（InN）または窒化アルミニウム（AlN）などの III 族窒化物系材料を含んでいてもよい。バッファ層 1 0 4 の厚みは、その下の基板 1 0 2 の表面に実質的に垂直な方向において 0 . 1 ~ 1 0 0 0 μm であってもよい。他の実施形態では、バッファ層 1 0 4 は、他の好適な材料およびまたは厚みを有していてもよい。

## 【 0 0 1 4 】

スタック 1 0 1 は、バッファ層 1 0 4 上に形成されたバリア層 1 0 6（「供給層」とも呼ぶ）をさらに備えていてもよい。バリア層 1 0 6 とバッファ層 1 0 4 間には、ヘテロ接合が形成されていてもよい。バリア層 1 0 6 のバンドギャップエネルギーは、バッファ層 1 0 4（例えば、バッファ層 1 0 4 の最上層）のそれより大きくてもよい。バリア層 1 0 6 は、可動電荷キャリアを供給するより広いバンドギャップ層であってもよく、バッファ層 1 0 4 は、可動電荷キャリアのチャネルまたは経路を提供するより狭いバンドギャップ層であってもよい。一部の実施形態では、バリア層 1 0 6 を、電荷誘導層 1 0 8 の材料を除去する選択的なエッチングプロセスのためのエッチング停止層として機能させてもよい。一部の実施形態では、バリア層 1 0 6 は非ドーブであってもよい。一部の実施形態では、バリア層 1 0 6 を複数の堆積膜あるいは層で構成してもよい。

20

## 【 0 0 1 5 】

広範な好適な材料系の任意のものでバリア層 1 0 6 を構成してもよい。バリア層 1 0 6 は、例えばアルミニウム（Al）、インジウム（In）、ガリウム（Ga）およびまたは窒素（N）を含んでいてもよい。一実施形態では、バリア層 1 0 6 は、窒化アルミニウムガリウム（ $Al_xGa_{1-x}N$ ）（ $x$  は、アルミニウムとガリウムとの相対量を表わす 0 ~ 1 の値）を含んでいてもよい。一部の実施形態では、 $x$  は 0 . 2 以下である。他の実施形態では、 $x$  は他の値とすることができる。種々の実施形態では、バリア層 1 0 6 のアルミニウム含量は、デバイス 1 0 0 の電荷誘導層 1 0 8 のそれより低くてもよい。

30

## 【 0 0 1 6 】

二次元電子ガス（2DEG）は、バッファ層 1 0 4（例えばバッファ層 1 0 4 の最上層）とバリア層 1 0 6 の界面（例えばヘテロ接合）に形成されてもよく、それによって、ソース端子（以後、ソース 1 1 2）とドレイン端子（以後、ドレイン 1 1 4）間に電流が流れる。一部の実施形態では、デバイス 1 0 0 は、その中の電流を供給するあるいはその電流を高めるために、電源電圧に対して正のゲート電圧が用いられるエンハンスメントモード（Eモード）デバイスであってもよい。一部の実施形態では、バリア層 1 0 6（あるいはバリア層 1 0 6 と電荷誘導層 1 0 8 などの供給層の組み合わせ）の厚み  $T$  は、2DEG 形成のための臨界厚み  $T_0$ （例えば、臨界厚み  $T_0$  未満では、2DEG は形成され得ない）未満であってもよい。例えば、厚み  $T$  は、図 1 に示されるように、ゲート 1 1 8 とバッファ層 1 0 4 間に配置されたゲート領域（GR）での 2DEG 形成を阻止するように構成されてもよい。2DEG の形成は、図 1 に示されるように、ゲート領域 GR とソース 1 1 2 間およびゲート領域 GR とドレイン 1 1 4 間のアクセス領域（例えば図 1 の AR）で生じ得る。

40

50

## 【0017】

一部の実施形態では、バリア層106の厚みとアルミニウム含量は、ショットキー（Schottky）ゲートデバイスか金属-絶縁体-半導体（MIS）ゲートデバイスのいずれかであるデバイス100に対して、ゲート領域GRにおける2DEGをすべて確実に除去するように選択されてもよい。他の実施形態では、デバイス100は、その中の電流を低減するために、電源電圧に対して負のゲート電圧が用いられるデプレッションモード（Dモード）デバイスであってもよい。

## 【0018】

一部の実施形態では、バリア層106の厚み $T$ は30以上である。例えば、バリア層106の厚み $T$ は、30以上であり臨界厚み $T_0$ 未満である。アルミニウム含量が低い（例えば、 $Al_xGa_{1-x}N$ の $x$ が0.2以下）バリア層106では、その厚みを30以上にでき得る。バリア層106の厚みを30以上とすることによって、その厚みの均一性を向上させることができ、あるいは、薄膜製造装置を使用した信頼性のあるバリア層106の製造が容易になる。他の実施形態では、バリア層106は、他の好適な材料およびまたは厚みを有していてもよい。

## 【0019】

スタック101は、バリア層106上に形成された電荷誘導層108をさらに備えていてもよい。電荷誘導層108は、バリア層106にエピタキシャル接続されてもよい。一部の実施形態では、電荷誘導層108は、バッファ層104、バリア層106およびまたはキャップ層110と格子整合していてもよい。電荷誘導層108のバンドギャップエネルギーは、バリア層106のそれより大きくてもよい。電荷誘導層108は、バリア層106の分極（例えば単位面積当たりの正味の分極）より大きい分極を有していてもよい。電荷誘導層108は、それがバリア層106に接続されたアクセス領域（例えば図1のAR）において電荷を誘導してもよい。電荷誘導層108は、アクセス領域（例えば図1のAR）の2DEG密度を増加させることによって、デバイス100のオン抵抗をさらに低減させ得る。デバイス100のゲート領域GRでの2DEGの形成を阻止するために、バリア層106の厚み $T$ を臨界厚み $T_0$ 未満とした一部の実施形態では、電荷誘導層108によって、アクセス領域における2DEGの形成が可能となりあるいは許可される。

## 【0020】

種々の実施形態では、電荷誘導層108をしきい値電圧（ $V_{TH}$ ）制御層として機能させてもよい。例えば、電荷誘導層108のアルミニウム含量がバリア層106のそれより低い実施形態では、電荷誘導層108は、バリア層の厚み $T$ とその均一性を得るためのゲート端子（以後、「ゲート118」）の形成中に選択的にエッチングされてもよく、それによって、 $V_{TH}$ に影響を及ぼし得るあるいはそれを制御し得る。例えば、該選択的エッチングをバリア層106で停止させてもよく、あるいは、選択的エッチングを（例えば時限エッチングによって）臨界厚み $T_0$ 未満となる厚み $T$ を得るように構成してもよい。

## 【0021】

広範な好適な材料系の任意のもので電荷誘導層108を構成してもよい。電荷誘導層108は、例えばアルミニウム（Al）、インジウム（In）、ガリウム（Ga）およびまたは窒素（N）を含んでいてもよい。一部の実施形態では、電荷誘導層108は、窒化アルミニウムインジウム（ $In_yAl_{1-y}N$ ）（ $y$ はそれぞれの成分の相対量を表し、0.2以下）を含んでいてもよい。例えば、 $y$ は、インジウムとアルミニウムとの相対量を表わす0~1の値であり得る。実施形態では、 $y$ は0.2以下である。一実施形態では、 $y$ は $In_yAl_{1-y}N$ に対して0.18である。他の実施形態では、 $y$ を他の値とすることができる。種々の実施形態では、電荷誘導層108のアルミニウム含量は、デバイス100のバリア層108のそれより高くてもよい。

## 【0022】

種々の実施形態では、電荷誘導層108の厚み（例えば、その上にバッファ層104が形成されている基板102の表面に実質的に垂直な方向における）は、電荷誘導層108とバリア層106間に寄生チャネルが形成できる厚みより小さい。一部の実施形態では、

電荷誘導層 108 の厚みは 60 nm 以下である。例えば、電荷誘導層 108 が  $\text{In}_{0.18}\text{Al}_{0.82}\text{N}$  で構成される実施形態では、バリア層 106 は  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  で構成され、キャップ層 110 は  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  で構成され、電荷誘導層 108 の厚みは、寄生チャネルの形成を阻止するために 3 nm 以下であってもよい。電荷誘導層 108 が  $\text{AlN}$  で構成される実施形態では、バリア層 106 は  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  で構成され、キャップ層 110 は  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  で構成され、電荷誘導層 108 の厚みは、寄生チャネルの形成を阻止するために 1 nm 以下であってもよい。他の実施形態では、電荷誘導層 108 は、他の好適な材料およびまたは厚みを有していてもよい。一部の実施形態では、複数の堆積膜あるいは層で電荷誘導層 108 を構成してもよい

#### 【0023】

スタック 101 は、電荷誘導層 108 上に形成されたキャップ層 110 をさらに備えていてもよい。一部の実施形態では、キャップ層 110 は電荷誘導層 108 にエピタキシャル接続されてもよい。キャップ層 110 のバンドギャップエネルギーは、電荷誘導層 108 のそれより大きくてもよい。一部の実施形態では、キャップ層 110 は、その厚みにかかわらず、チャネル電荷密度への影響が小さいかあるいは最小となるように構成された材料を含む。他の実施形態では、キャップ層 110 は、その厚みの上昇に対して、チャネル電荷を消耗させるかあるいは増加させるように構成された材料を含んでいてもよい。キャップ層 110 が、その厚み上昇と共にチャネル電荷を消耗させるように構成された実施形態では、電荷誘導層 108 の厚み（例えば、その上にバッファ層 104 が形成されている基板 102 の表面に実質的に垂直な方向における）は、電荷消耗を補うために増加されてもよい。キャップ層 110 が、その厚み上昇に対してチャネル電荷を増加させるように構成された実施形態では、電荷誘導層 108 の厚みは、電荷誘導を補うために低減されてもよい。

#### 【0024】

広範な好適な材料系の任意のものでキャップ層 110 を構成してもよい。キャップ層 110 は、例えばアルミニウム (Al)、インジウム (In)、ガリウム (Ga) およびまたは窒素 (N) を含んでいてもよい。一部の実施形態では、キャップ層 110 は、アルミニウム、ガリウムおよび窒素を含んでいてもよい。一実施形態では、キャップ層 110 は、窒化アルミニウムガリウム ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ) ( $x$  は、アルミニウムとガリウムとの相対量を表わす 0 ~ 1 の値) を含んでいてもよい。実施形態では、 $x$  は 0.2 以下である。他の実施形態では、 $x$  は他の値とすることができる。種々の実施形態では、キャップ層 110 のアルミニウム含量は、デバイス 100 の電荷誘導層 108 のそれより低くてもよい。種々の実施形態では、バリア層 106 とキャップ層 110 の組成は、同様あるいは同じであってもよい。

#### 【0025】

種々の実施形態では、キャップ層 110 の厚み（例えば、その上にバッファ層 104 が形成されている基板 102 の表面に実質的に垂直な方向における）は、10,000 nm より小さくてもよい。一部の実施形態では、キャップ層 110 は、その 10,000 nm の範囲の厚みの変動によるバリア層 106 のチャネル電荷密度への影響がほとんどないかまたは最小となる材料で構成されていてもよい。他の実施形態では、キャップ層 110 は、他の好適な材料およびまたは厚みを有していてもよい。一部の実施形態では、複数の堆積膜あるいは層でキャップ層 110 を構成してもよい。一部の実施形態では、デバイス 100 はキャップ層 110 を全く備えていなくてもよい。

#### 【0026】

デバイス 100 は、図示のように、キャップ層 110 内およびまたは電荷誘導層 108 内に形成されたゲート 118 をさらに備えていてもよい。ゲート 118 は、チャネルを制御（例えば、デバイス 100 のオン/オフ状態）するために、図示のように、電荷誘導層 108 内に配置されてバリア層 106 に接続されてもよい。ゲート 118 はデバイス 100 の接続端子として機能し、図示のように、バリア層 106、電荷誘導層 108 およびキャップ層 110 と直接物理的に接触していてもよい。一部の実施形態では、ゲート 118

10

20

30

40

50

は、図示のように、例えば窒化ケイ素などの誘電体層 116 上に、あるいは、キャップ層 110 上に形成された別の誘電体材料上に形成されてもよい。

【0027】

ゲート 118 は、図示のように、バリア層 106 に接続されたトランク部すなわち底部と、該トランク部から、その上にスタック 101 が形成された基板 102 の表面に実質的に平行な逆方向に離れるように延在する頂部と、を有していてもよい。ゲート 118 のトランク部および頂部のこうした構造を T 形フィールドプレートゲートと呼んでもよい。すなわち、一部の実施形態では、ゲート 118 は、ゲート 118、ソース 112 およびまたはドレイン 114 間の絶縁破壊電圧を上昇させ得るおよびまたはその電界を低減させ得る一体型フィールドプレート（例えばゲート 118 の頂部）を有していてもよい。該フィールドプレートによって、デバイス 100 の高電圧動作が容易になるか、あるいは、所与の動作電圧に対してゲート - ドレイン間隔が狭いデバイスが可能になり得る。

10

【0028】

ゲート 118 は、デバイス 100 のしきい値電圧に対する電気経路を提供するゲート電極（例えば、図 5 ~ 図 7 のゲート電極 118 a）と、ゲート電極とバリア層 106 間に配置され得るゲート誘電体すなわちゲート絶縁体（以後、「ゲート絶縁体膜」と呼ぶ、例えば図 5 ~ 7 のゲート絶縁体膜 118 b）と、を備えていてもよい。ゲート 118 のゲート電極は一般に、金属などの導電性材料で構成される。一部の実施形態では、ゲート電極は、ニッケル（Ni）、プラチナ（Pt）、イリジウム（Ir）、モリブデン（Mo）、金（Au）、タングステン（W）、パラジウム（Pd）およびまたはアルミニウム（Al）で構成されてもよい。ある実施形態では、バリア層 106 とのゲートコンタクトを得るために、ゲート 118 のトランク部には Ni、Pt、Ir または Mo を含む材料が配置され、ゲート 118 の導電性と低抵抗を確実にするために、ゲート 118 の頂部には Au を含む材料が配置される。種々の実施形態では、ゲート 118 は、高電子移動度トランジスタ（HEMT）デバイスの一部である。

20

【0029】

種々の実施形態では、ゲート 118 は、デバイス 100 のショットキー接合または MIS 接合が得られるように構成されてもよい。例えば、ゲート絶縁体膜が全く使用されない場合には、ショットキー接合が形成されてもよく、ゲート絶縁体膜が使用される場合には、MIS 接合が形成されてもよい。一部の実施形態では、ゲート誘電体は、厚みがゲート絶縁体より小さい薄膜であってもよい。ゲート絶縁体膜は、例えば窒化ケイ素（SiN）、酸化シリコン（SiO<sub>2</sub>）、酸化アルミニウム（Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）、フッ化カルシウム（CaF<sub>2</sub>）、酸化ジルコニウム（ZrO<sub>2</sub>）およびまたは酸化ハフニウム（HfO<sub>2</sub>）を含んでいてもよい。他の実施形態では、ゲート絶縁体膜は他の材料を含んでいてもよい。一部の実施形態では、該ゲート絶縁体膜は、単一膜かまたは複層膜（例えば、誘電体膜のスタック）で構成されていてもよい。

30

【0030】

デバイス 100 は、キャップ層 108 上に形成されたソース 112 とドレイン 114 を備えていてもよい。ソース 112 およびドレイン 114 は、図示のように、電荷誘導層 108 に接続されてもよい。ソース 112 およびドレイン 114 は、図示のように、キャップ層 110、電荷誘導層 108 およびバリア層 106 を経由してバッファ層 104 に延在してもよい。種々の実施形態では、ソース 112 とドレイン 114 はオーミックコンタクトである。ソース 112 とドレイン 114 は、標準の成長コンタクトより接触抵抗が比較的小さい再成長コンタクトであってもよい。

40

【0031】

金属などの導電性材料でソース 112 とドレイン 114 を構成してもよい。ある実施形態では、ソース 112 とドレイン 114 は、チタン（Ti）、アルミニウム（Al）、モリブデン（Mo）、金（Au）およびまたはシリコン（Si）を含んでいてもよい。他の実施形態では、他の材料が用いられる。

【0032】

50

ある実施形態では、ドレイン 114 とゲート 118 間の距離 D1 は、ソース 112 とゲート 118 間の距離 S1 より大きい。一部の実施形態では、距離 D1 は、ドレイン 114 とゲート 118 間の最短距離であってもよく、距離 S1 は、ソース 112 とゲート 118 間の最短距離であってもよい。距離 S1 を距離 D1 より短くすることによって、ゲート 118 - ドレイン 114 間の絶縁破壊電圧を上昇させ得およびまたはソース 112 の抵抗を低減させ得る。

#### 【0033】

一部の実施形態では、図示のように、誘電体層 122 をゲート 118 およびまたは誘電体層 116 上に形成してもよい。誘電体層 122 は、例えば窒化ケイ素 (SiN) を含んでいてもよい。他の実施形態では、誘電体層 122 には他の材料が使用できる。誘電体層 122 は、ゲート 118 の頂部を実質的に封入してもよい。一部の実施形態では、誘電体層 122 をデバイス 100 の保護層として機能させてもよい。

#### 【0034】

デバイス 100 は、ゲート 118 とドレイン 114 間の絶縁破壊電圧の上昇およびまたは電界低減のために、誘電体層 122 上に形成されたフィールドプレート 124 を備えていてもよい。フィールドプレート 124 は、導電性材料 126 を用いて、ソース 112 に電氣的に接続されていてもよい。導電性材料 126 は、例えば、図 7 に示されるような誘電体層 122 またはソース 112 の材料上に、電極あるいはトレース状の (trace-like) 構造物として配置される金 (Au) などの金属を含んでいてもよい。他の実施形態では、他の好適な材料が導電性材料 126 に使用されてもよい。

#### 【0035】

フィールドプレート 124 は、金属などの導電性材料で構成され、ゲート 118 に関連して説明した材料を含んでいてもよい。フィールドプレート 124 は、誘電体層 122 を通してゲート 118 に容量接続されてもよい。一部の実施形態では、フィールドプレート 124 とゲート 118 間の最短距離は 1 ~ 10,000 である。フィールドプレート 124 は、図示のように、オーバーハング領域が得られるように、その一部分がゲート 118 上に直接形成されないようにしてゲート 118 上に形成されてもよい。一部の実施形態では、フィールドプレート 124 のオーバーハング領域は、ゲート 118 の頂部端部より距離 H1 だけ延在する。一部の実施形態では、距離 H1 は 0.2 ~ 1 μm であってもよい。他の実施形態では、H1 は他の値であってもよい。

#### 【0036】

種々の実施形態では、デバイス 100 は HEMT であってもよい。一部の実施形態では、デバイス 100 はショットキーデバイスであってもよい。他の実施形態では、デバイス 100 は、MIS 電界効果トランジスタ (MISFET) であってもよい。一部の実施形態では、ゲート 118 は、例えば、E モードスイッチデバイスのスイッチング制御を行うように構成されてもよい。デバイス 100 は、無線周波数 (RF) 用途、ロジック用途、エンベロップトラッキング用途およびまたは電力変換用途に使用されてもよい。例えば、デバイス 100 によって、例えば交流 (AC) - 直流 (DC) 変換器、DC - DC 変換器、DC - AC 変換器などの電力調整用途を含む電力スイッチ用途用の効果的なスイッチデバイスが提供され得る。

#### 【0037】

図 2 は、種々の実施形態による、GaN の広範なバリア層材料例に対するチャネル電荷密度とバリア厚みとの関係を示すグラフ 200 である。グラフ 200 において、チャネル電荷密度 ( $n_s$ ) は、1 平方センチメートル当たり ( $\text{cm}^{-2}$ ) の電荷キャリア数を示すものとして縦軸で示される。一部の実施形態では、該チャネル電荷密度は、デバイス (例えば図 1 のデバイス 100) の 2DEG 密度に相当し得る。バリア厚みは、ナノメートル (nm) 単位で横軸で示される。

#### 【0038】

グラフ 200 では、種々の  $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_z\text{N}$  (バリア層) / GaN HEMT 構造 ( $x$ 、 $y$  および  $z$  は、それぞれの成分の相対量を表し、0 ~ 1 の値である) に対するチャ

10

20

30

40

50

ネル電荷密度とバリア厚みの関係が示される。グラフ200には、窒化アルミニウム（例えばAlN）、窒化アルミニウムガリウム（例えばAl<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N、Al<sub>0.4</sub>Ga<sub>0.6</sub>N、Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>N、Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N）および窒化アルミニウムインジウム（例えばIn<sub>0.18</sub>Al<sub>0.82</sub>N）を含むバリア層材料系が示される。グラフからわかるように、各材料系の曲線は、バリア厚み値が異なる点で横軸（ns = 0）と交わる。ns = 0における各材料系のバリア厚みは、2DEG形成の臨界厚みT<sub>0</sub>に相当する。

#### 【0039】

デバイスの低オン抵抗を実現するためには、電荷密度が高いほど望ましいものであり得る。グラフからわかるように、より高い電荷密度は、アルミニウム含量がより高い材料系に対応する。さらにグラフからわかるように、アルミニウム含量が高い材料系ほど、2DEG形成の臨界厚みT<sub>0</sub>がより小さくなり得る。アルミニウム含量が高い材料系、特にエッチング停止層がない場合は、臨界厚みより小さなバリア層（例えばE-モード動作用に）を、信頼性ある均一性を有して制御または製造することは困難であり得る。デバイス上の歪み誘導などの他の技術を用いて、2DEG形成の臨界厚みT<sub>0</sub>を増加させてもよい。

#### 【0040】

図3～7は、種々の製造作業後のデバイス（例えば図1のデバイス100）を示す。図3～7に関連して説明する方法と構成は、図1に関連して説明した実施形態に適合し、逆もまたそうである。

#### 【0041】

図3は、種々の実施形態による、基板102上への層スタック（例えばスタック101）形成後のデバイス300の概略横断面図である。種々の実施形態では、デバイス300は、基板102上にパッファ層104を堆積し、パッファ層104上にバリア層106を堆積し、バリア層106上に電荷誘導層108を堆積して製造されてもよい。一部の実施形態では、キャップ層110を電荷誘導層108上に堆積してもよい。一部の実施形態では、堆積プロセスは、例えば分子線エピタキシャル法（MBE）、原子層エピタキシャル法（ALE）、化学ビームエピタキシャル法（CBE）およびまたは有機金属化学蒸着法（MOCVD）などのエピタキシャル堆積プロセスである。他の実施形態では、他の堆積プロセスが用いられ得る。種々の実施形態では、バリア層106および電荷誘導層108の厚みおよび原料組成によって、図示されるように、パッファ層104とバリア層106の界面で2DEGが形成される。

#### 【0042】

図4は、種々の実施形態による、ソース112とドレイン114形成後のデバイス400の概略横断面図である。種々の実施形態において、ソース112とドレイン114はキャップ層110上に形成されてもよい。ある実施形態では、ソース112とドレイン114が、例えば蒸発プロセスを用いて形成されるべき領域内のキャップ層110上に、1つまたは複数の金属などの材料が堆積される。ソース112とドレイン114形成のための材料は、下記順序で堆積される金属が含まれ得る。チタン（Ti）、その後アルミニウム（Al）、その後モリブデン（Mo）、その後チタン（Ti）、その後金（Au）。前記堆積材料を加熱（例えば、高速熱アニールプロセスを用いて約850℃で約30秒間）し、この材料を貫通させて、下部のキャップ層110、電荷誘導層108、バリア層106およびまたはパッファ層104と溶融させてもよい。実施形態では、ソース112とドレイン114はそれぞれ、キャップ層110を経由してパッファ層104内に延在する。ソース112およびドレイン114の厚みは1000～2000Åの範囲であってもよい。他の実施形態では、ソース112とドレイン114の厚みはこれ以外であってもよい。

#### 【0043】

ソース112とドレイン114を再成長プロセスで形成し、低減された接触抵抗または低減されたオン抵抗を有するオーミックコンタクトを得てもよい。該再成長プロセスでは、ソースとドレインが形成される領域において、キャップ層110、電荷誘導層108、バリア層106およびまたはパッファ層104の材料が選択的に除去される（例えば、エ

10

20

30

40

50

ッティングされる)。これらの層が選択的に除去された領域に、高濃度ドーブ材料(例えば  $n++$  材料)を堆積してもよい。ソース 112 とドレイン 114 の高濃度ドーブ材料は、バッファ層 104 またはバリア層 106 に使用した材料と同様の材料であってもよい。例えば、バッファ層 104 が GaN を含むシステムでは、シリコン(Si)または酸素(O)で高濃度にドーブした GaN 系材料を、前記選択的に除去した領域に厚みが 400 ~ 700 になるまでエピタキシャルに堆積してもよい。該高濃度ドーブ材料は、分子線エピタキシャル法(MBE)、原子層エピタキシャル法(ALE)、化学ビームエピタキシャル法(CBE)、有機金属化学蒸着法(MOCVD)またはこれらの好適な組み合わせによってエピタキシャルに堆積できる。他の実施形態では、該高濃度ドーブ材料に対して、他の材料、厚みあるいは堆積法が用いられる。例えば、チタン(Ti)およびまたは金(Au)を含む 1 つまたは複数の金属を、例えばリフトオフプロセスを用いて 1000 ~ 1500 の厚みで、該高濃度ドーブ材料上に形成/堆積できる。他の実施形態では、該 1 つまたは複数の金属に対して、他の材料、厚みおよびまたは方法が用いられる。

10

20

30

40

50

#### 【0044】

一部の実施形態では、不純物(例えばシリコンまたは酸素)を導入してソース 112 とドレイン 114 に高濃度ドーブ材料を提供する注入法を用いた注入プロセスによって、ソース 112 とドレイン 114 を形成してもよい。注入後、ソース 112 とドレイン 114 を高温(例えば 1100 ~ 1200 )でアニールする。前記再成長プロセスでは、該注入後アニールに伴う高温を好適に避け得る。キャップ層 110 が用いられない実施形態では、ここに説明したものと同様の方法を用いて、ソース 112 およびドレイン 114 を電荷誘導層 108 上に形成してもよい。

#### 【0045】

図 5 は、種々の実施形態による、ゲート(例えばゲート電極 118 およびゲート絶縁体膜 118b)形成後のデバイス 500 の概略横断面図である。該ゲートは、ゲート電極 118a と、一部の実施形態では、ゲート絶縁体膜 118b と、を備えていてもよい。

#### 【0046】

図示のように、前記ゲートは、電荷誘導層 108 およびまたはキャップ層 110 に形成されてもよい。フォトリソグラフィプロセスおよびまたはエッチングプロセスを用いて)堆積およびパターン化して、キャップ層 110 およびまたは電荷誘導層 108 の材料の選択的な除去を可能とし、前記ゲート形成のためにゲート材料が堆積されるトレンチなどの開口部を形成してもよい。該フォトリソグラフィ材料は、例えば、フォトリソグラフィ材料またはハードマスク材料を含んでいてもよい。一部の実施形態では、誘電体層(例えば図 6 の誘電体層 116)を堆積およびパターン化して、ゲート形成用の開口部を得てもよい。一部の実施形態では、該誘電体層をハードマスクとして機能させてもよい。

#### 【0047】

本開示の実施形態によって、ゲート(例えばゲート電極 118a およびまたはゲート絶縁体膜 118b)とバッファ層 104 間のバリア層 106 の厚みの均一性を向上させる技術が提供され得、この技術によって、デバイス 500 の  $V_{TH}$  制御が向上し得る。例えば、バリア層 106 の厚みおよび従って  $V_{TH}$  の均一性は、開口部を形成するゲート凹部エッチングプロセスでのエッチング深さと、該エッチングプロセス後のバリア層 106 およびまたは電荷誘導層 108 の残りの厚みと、ゲート絶縁体膜 118b の厚みおよびその均一性と、該プロセスにおける任意の変動と、によって決定され得る。

#### 【0048】

一実施形態では、エッチングプロセスを用いて、キャップ層 110 の材料および電荷誘導層 108 の少なくとも一部を除去してもよい。該エッチングプロセスは、時限エッチングプロセスまたは選択的エッチングプロセスであってもよい。該選択的エッチングプロセスは例えば、選択的な乾燥およびまたはプラズマエッチングを備えていてもよい。塩化ホウ素( $BCl_3$ )およびまたは塩素( $Cl_2$ )を含むエッチング化学あるいは同様なエッチング化学用のアルミニウム含量が低い材料でのエッチング速度は、アルミニウム含量が高い材料でのそれより大きくてもよい。従って、キャップ層 110 のアルミニウム含量が

電荷誘導層 108 のそれより低い実施形態では、キャップ層 110 の材料は、電荷誘導層 108 の材料に対して選択的に除去され得る。

【0049】

前記時限エッチングプロセスまたは選択的エッチングプロセス後のゲート凹部領域に残り得る電荷誘導層 108 の材料を、別の選択的エッチングプロセスによって除去してもよい。例えば、ウェットエッチングプロセスを用いてもよい。水酸化カリウム ( $\text{KOH}$ ) およびまたは水酸化テトラメチルアンモニウム ( $\text{TMAH}$ ) を含むエッチング化学あるいは同様なエッチング化学用のアルミニウム含量が高い材料でのエッチング速度は、アルミニウム含量が低い材料でのそれより大きくてもよい。従って、電荷誘導層 108 のアルミニウム含量がバリア層 106 のそれより高い実施形態では、電荷誘導層 108 の材料は、バリア層 106 の材料に対して選択的に除去され得る。一部の実施形態では、電荷誘導層 108 の材料を除去する選択的エッチングによって、バリア層 106 を露出させてもよい。この点で、バリア層 106 は、エッチング停止層として機能し、 $V_{TH}$  に対する厚みを制御し得る。該エッチングプロセスは、バリア層 106 の露出直後に停止されるため、バリア層 106 の厚み (例えば図 1 の厚み  $T$ ) は主として、バリア層 106 の堆積厚みによって制御され得る。

10

【0050】

他の実施形態では、時限エッチングプロセスまたは選択的エッチングプロセス後にゲート凹部領域に残り得る電荷誘導層 108 の材料 (例えば  $\text{BCl}_3 / \text{Cl}_2$ ) を選択的に酸化して、ゲート絶縁体膜 118b を形成してもよい。例えば、酸化プロセスは、酸素 ( $\text{O}_2$ ) 雰囲気下またはプラズマ処理によって行なわれる熱プロセスを備えていてもよい。アルミニウムを含む層を酸化して (例えば窒素を酸素で置換することによって)、酸化アルミニウム (例えば  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) が形成される。一部の実施形態では、付加的な電気絶縁材料を堆積してゲート絶縁体膜 118b を形成してもよい。さらに別の実施形態では、他の技術を用いて、バリア層 106、電荷誘導層 108 およびキャップ層 110 上に電気絶縁材料を堆積し、ゲート絶縁体膜 118b を形成してもよい。

20

【0051】

導電性材料をスタック 101 の凹部開口部内に堆積して前記ゲート電極 118a を形成してもよい。ゲート絶縁体膜 118b が用いられる実施形態では、ゲート電極 118a をゲート絶縁体膜 118b の上に堆積してもよい。例えば、蒸発、原子層蒸着 ( $\text{ALD}$ ) およびまたは化学気相蒸着 ( $\text{CVD}$ ) を含む任意の好適な堆積プロセスによって、該導電性材料を堆積してもよい。

30

【0052】

図 6 は、種々の実施形態による、一体型フィールドプレートを有するゲート (例えば、ゲート電極 118a およびゲート絶縁体膜 118b) の形成後のデバイス 600 の概略横断面図である。該フィールドプレートは、T 形フィールドゲートの頂部で一体化されていてもよく、導電性材料 (例えば、ゲート電極 118a と同じかまたは同様の材料) で構成してもよい。

【0053】

一部の実施形態では、デバイス 600 は、スタック 101 上に堆積した  $\text{SiN}$  などの誘電体層 116 をさらに備え、デバイス 600 のチャネル/ゲート領域を不動態化してもよい。任意の好適な技術を用い、ゲート形成プロセスの一部として、誘電体層 116 をパターン化あるいは凹部としてもよい。一部の実施形態では、図示のように、スタック 101 の領域に対して、誘電体層 116 の領域内でゲートの側面をより先細にしてもよい。材料によるエッチングプロセスの変動およびまたはエッチング技術により、こうした相対的な先細化が可能になり得る。金属蒸着/エッチングプロセスあるいはリフトオフプロセスにより、該 T 形フィールドプレートゲート頂部のトランク部を形成してもよい。

40

【0054】

図 7 は、種々の実施形態による、付加的なソース-接続フィールドプレート 124 形成後のデバイス 700 の概略横断面図である。図示のように、誘電体層 116 およびゲート

50

電極 118a 上に誘電体層 122 を形成してもよい。導電性材料をソース 112 上に堆積して、フィールドプレート 124 に電氣的に接続させてもよい。

【0055】

図 8 は、種々の実施形態による、デバイス（例えば、図 1、図 3～7 のデバイス 100、300、400、500、600 または 700）の製造方法 800 を示すフローチャートである。方法 800 は、図 1～7 に関して説明した技術と構成に適合していてもよい。

【0056】

方法 800 は、802 において、基板（例えば図 1 の基板 102）上にバッファ層（例えば図 1 のバッファ層 104）を形成するステップを備える。該基板上にバッファ層材料を堆積するエピタキシャル堆積プロセスを用いて、該バッファ層を形成してもよい。

10

【0057】

方法 800 は、804 において、前記バッファ層上にバリア層（例えば図 1 のバリア層 106）を形成するステップをさらに備えてもよい。該バッファ層上にバリア層材料を堆積するエピタキシャル堆積プロセスを用いて、該バリア層を形成してもよい。

【0058】

方法 800 は、806 において、該バリア層上に電荷誘導層（例えば図 1 の電荷誘導層 108）を形成するステップをさらに備えてもよい。バリア層上に電荷誘導層を堆積するエピタキシャル堆積プロセスを用いて、該電荷誘導層を形成してもよい。

【0059】

方法 800 は、808 において、該電荷誘導層上にキャップ層（例えば図 1 のキャップ層 110）を形成するステップをさらに備えてもよい。該電荷誘導層上にキャップ層材料を堆積するエピタキシャル堆積プロセスを用いて、該キャップ層を形成してもよい。

20

【0060】

方法 800 は、810 において、ソースおよびドレイン（例えば図 1 のソース 112 およびドレイン 114）を形成するステップをさらに備えてもよい。一部の実施形態では、該ソースとドレインは前記電荷誘導層に接続され、該電荷誘導層とバリア層を経由して前記バッファ層内に延在していてもよい。

【0061】

方法 800 は、812 において、ゲート（例えば図 1 のゲート 118）を形成するステップをさらに備えてもよい。該ゲートは、前記キャップ層の一部を除去して電荷誘導層の一部分を露出させることによって、また、電荷誘導層の一部分を除去してゲート材料堆積用の開口部またはゲート凹部を形成することによって形成してもよい。電気絶縁材料を該開口部に堆積して、ゲート絶縁体膜（例えば図 7 のゲート絶縁体膜 118b）を形成してもよい。一部の実施形態では、該ゲート絶縁体膜の材料をチャネルのアクセス領域上に堆積して、販売または顧客へ出荷される最終製品におけるそうした領域に残存していてもよい。一部の実施形態では、該キャップ層の一部分およびまたは電荷誘導層の一部分の除去は、時限エッチングプロセス、ドライ/プラズマエッチングプロセスおよびまたはウェットエッチングプロセスにより行ってもよい。一部の実施形態では、該電荷誘導層の一部分を除去することによって、バリア層を露出させてもよい。該バリア層を電荷誘導層材料の選択的エッチングのためのエッチング停止層として機能させてもよい。他の実施形態では、該電荷誘導層の一部分に除去によってバリア層を露出させなくてもよく、酸化プロセスによって窒素を酸素に置換し、これによって、層スタックに形成された前記凹部開口部内の露出層上にゲート絶縁体膜 118b を形成してもよい。

30

40

【0062】

導電性材料を前記凹部内に堆積してゲート電極（例えば図 7 のゲート電極 118a）を形成してもよい。ゲート絶縁体膜が用いられる実施形態では、該導電性材料をゲート絶縁体膜上に堆積してもよい。

【0063】

方法 800 は、814 において、前記ゲート上に誘電体層（例えば図 1 の誘電体層 116 およびまたは 122）を形成するステップをさらに備えてもよい。任意の好適な堆積プ

50

ロセスによって該誘電体層を堆積してもよい。

【0064】

方法は、816において、前記誘電体層上にフィールドプレートを形成するステップをさらに備えてもよい。任意の好適な堆積技術を用いて導電性材料を前記誘電体層上に堆積することにより、該フィールドプレートを形成してもよい。リソグラフィプロセスおよびまたはエッチングプロセスなどのパターン化プロセスを用いて前記堆積した導電性材料部分を選択的に除去し、前記フィールドプレートを形成できる。他の実施形態では、他の好適な技術を用いてもよい。

【0065】

特許請求された主題の理解に最も有用な順番と方法で、種々の操作が複数の別個の操作として説明される。しかしながら、説明の順番は、これらの操作が必ず順番依存であることを示唆するように解釈されるべきでない。これらの操作は、特に提示の順番に行われなくてもよい。記載の実施形態と異なる順番で、記載された操作を行ってもよい。追加の実施形態では、種々の付加的な操作を行ってもよく、およびまたは記載の操作を省略してもよい。

【0066】

本明細書に記載のデバイス（例えば、図1および図5～7それぞれのデバイス100、500、600および700）およびこうしたデバイスを備える装置の実施形態を、種々の他の装置およびシステムに組込んでもよい。図9は、種々の実施形態による、デバイスを備えるシステム例の概略図である。システム900は、図示のように、一部の実施形態では無線周波数（RF）PAモジュールであり得る電力増幅器（PA）モジュール902を備える。システム900は、図示のように、電力増幅器モジュール902に接続されたトランシーバ904を備えていてもよい。電力増幅器モジュール902は、本明細書に記載のデバイス（例えば、図1および図5～7それぞれのデバイス100、500、600および700）を備えていてもよい。

【0067】

電力増幅器モジュール902は、トランシーバ904からRF入力信号（RF<sub>in</sub>）を受信してもよい。電力増幅器モジュール902は、該RF入力信号（RF<sub>in</sub>）を増幅してRF出力信号（RF<sub>out</sub>）を出力してもよい。RF入力信号（RF<sub>in</sub>）およびRF出力信号（RF<sub>out</sub>）は、それぞれ図9のTx - RF<sub>in</sub>およびTx - RF<sub>out</sub>で示され、共に送信チェーンの一部であり得る。

【0068】

前記増幅されたRF出力信号（RF<sub>out</sub>）は、アンテナスイッチモジュール（ASM）906に与えられてもよく、このモジュールによって、アンテナ構造908経由で、RF出力信号（RF<sub>out</sub>）の無線（OTA）送信が実現される。ASM906はさらに受け取ってもよい。また、ASM906は、アンテナ構造908経由でRF信号を受信し、その受信RF信号（Rx）を受信チェーンに沿ってトランシーバ904に接続され得る。

【0069】

種々の実施形態では、アンテナ構造908は、例えば、ダイポールアンテナ、モノポールアンテナ、パッチアンテナ、ループアンテナ、マイクロストリップアンテナ、あるいはRF信号のOTA送信/受信に好適な任意の他の形式のアンテナを含む指向性アンテナおよびまたは全方向性アンテナの1つまたは複数を含んでもよい。

【0070】

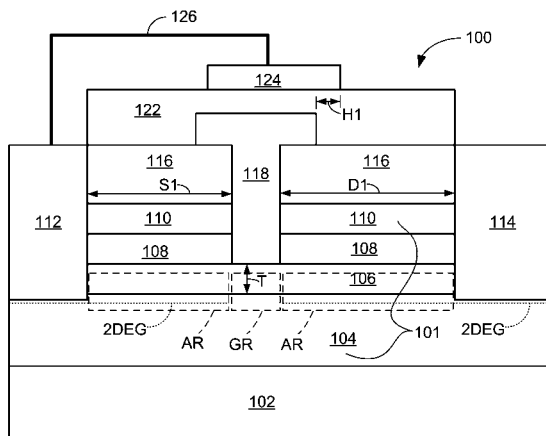
システム900は、電力増幅を含む任意のシステムであってもよい。前記デバイス（例えば、図1および図5～7それぞれのデバイス100、500、600および700）によって、例えば交流（AC）-直流（DC）変換器やDC - DC変換器、DC - AC変換器などの電力調整用途を含む電力スイッチ用途用の効果的なスイッチデバイスが提供され得る。種々の実施形態では、システム900は、高無線周波数電力と周波数における電力増幅には特に有用であり得る。システム900は、例えば、陸上および衛星通信、レーダーシステム、および恐らく種々の産業および医学用途におけるいずれか1つまたは複数に

対して好適であり得る。より具体的には、種々の実施形態において、システム 900 は、レーダー装置、衛星通信装置、携帯電話、携帯電話基地局、ラジオ放送あるいはテレビ増幅器システムから選択された 1 つであり得る。

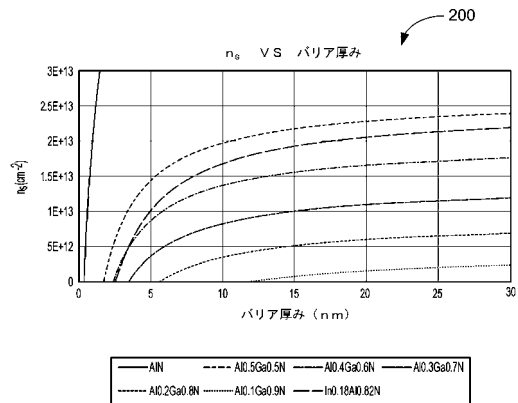
【0071】

説明の目的で実施形態を例示し記載したが、同じ目的を実現するように意図された、広範な代替となるおよびまたは均等な実施形態あるいは実施によって、本開示の範囲を逸脱することなくこれらの実施形態を置換できる。本出願は、本明細書で検討した実施形態に対するいかなる適応や変形もカバーするように意図される。従って、本明細書に記載された実施形態は、請求項とその均等物によってのみ限定されることは明らかである。

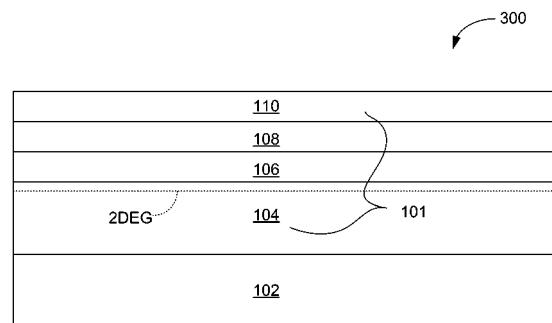
【図 1】



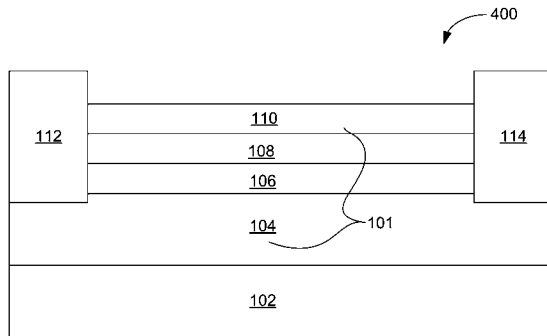
【図 2】



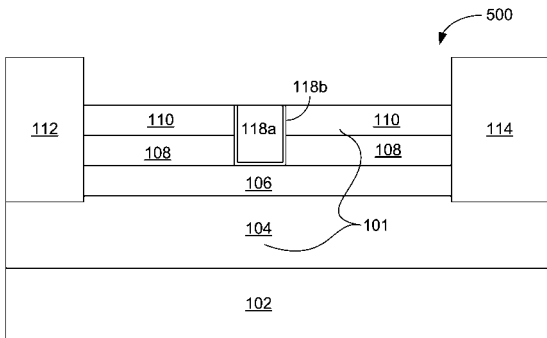
【図 3】



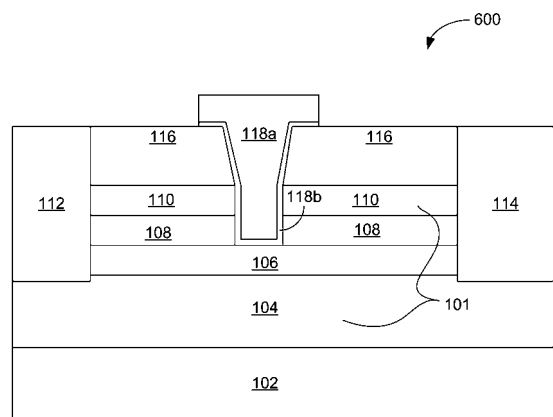
【図 4】



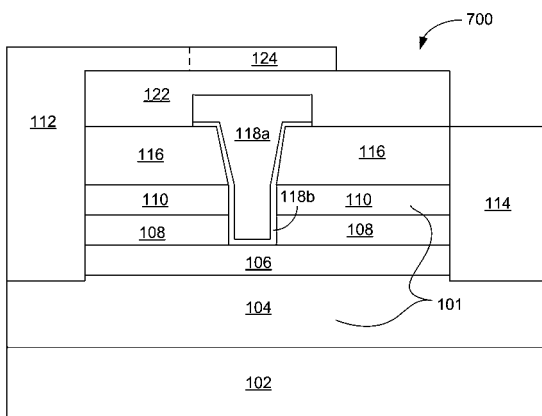
【図 5】



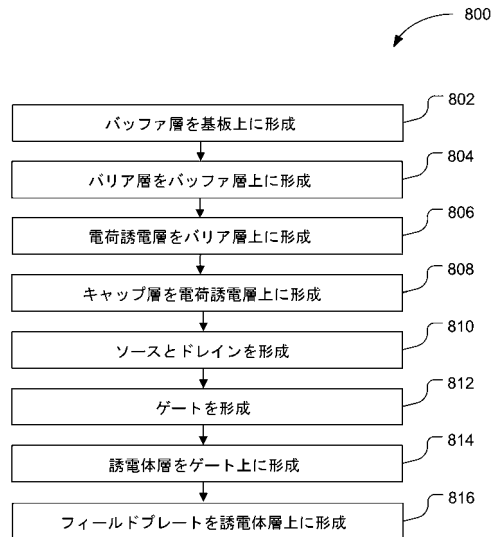
【図 6】



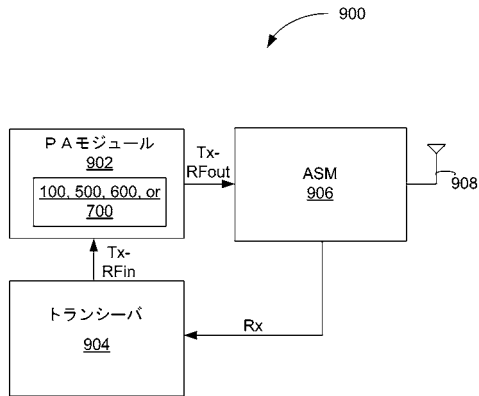
【図 7】



【図 8】



【 図 9 】



## 【 手続補正書 】

【 提出日 】平成25年6月11日 (2013.6.11)

## 【 手続補正 1 】

【 補正対象書類名 】特許請求の範囲

【 補正対象項目名 】全文

【 補正方法 】変更

【 補正の内容 】

【 特許請求の範囲 】

【 請求項 1 】

トランジスタのチャンネルとして機能するように構成されガリウム (Ga) と窒素 (N) とを含む、基板上に配置されたバッファ層と、

前記チャンネルに可動電荷キャリアを供給するように構成されアルミニウム (Al)、ガリウム (Ga) および窒素 (N) を含む、前記バッファ層上に配置されたバリア層と、

前記チャンネル内で電荷を誘導するように構成されアルミニウム (Al) と窒素 (N) を含む、前記バリア層上に配置された電荷誘導層と、

前記電荷誘導層に配置され、前記バリア層に接続されて前記チャンネルを制御するゲート端子と、を備えたことを特徴とする装置。

【 請求項 2 】

前記電荷誘導層は第 1 のバンドギャップエネルギーを有し、

前記バリア層は第 2 のバンドギャップエネルギーを有し、

前記第 1 のバンドギャップエネルギーは第 2 のバンドギャップエネルギーより大きいことを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

【 請求項 3 】

前記電荷誘導層は第 1 の分極を有し、

前記バリア層は第 2 の分極を有し、

前記第 1 の分極は前記第 2 の分極より大きいことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の装置。

【請求項 4】

前記バリア層の厚みは、前記ゲート端子と前記バッファ層間に配置されたゲート領域における二次元電子ガス ( 2 D E G ) の形成を阻止するものであり、

前記ゲート端子は、電力増幅のエンハンスメントモード ( e モード ) 高電子移動度トランジスタ ( H E M T ) スイッチデバイスのスイッチングを制御するように構成されていることを特徴とする請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項 に記載の装置。

【請求項 5】

アルミニウム ( A l ) と窒素 ( N ) を含み、前記電荷誘導層上に配置されたキャップ層を更に備えることを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか 1 項 に記載の装置。

【請求項 6】

前記バッファ層は窒化ガリウム ( G a N ) を含み、

前記バリア層と前記キャップ層は窒化アルミニウムガリウム ( A l <sub>x</sub> G a <sub>1-x</sub> N ) ( x はそれぞれの成分の相対量を表わし、 0 . 2 以下 ) を含み、

前記電荷誘導層は窒化アルミニウムインジウム ( I n <sub>y</sub> A l <sub>1-y</sub> N ) ( y はそれぞれの成分の相対量を表し、 0 . 2 以下 ) を含むことを特徴とする請求項 1 に記載の装置。

【請求項 7】

前記バリア層の厚みは 3 0    以上であり、

前記電荷誘導層の厚みは 3 0    以下であり、

前記キャップ層の厚みは 1 0 , 0 0 0    以下であることを特徴とする請求項 6 に記載の装置。

【請求項 8】

前記ゲート端子は、前記バリア層の材料に接続されてショットキー接合を形成するゲート電極を備えることを特徴とする請求項 1 乃至 7 のいずれか 1 項 に記載の装置。

【請求項 9】

前記ゲート端子は、ゲート電極と、前記バリア層の材料に接続されて金属 - 絶縁体 - 半導体 ( M I S ) 接合を形成するゲート絶縁体と、を備えることを特徴とする請求項 1 乃至 8 のいずれか 1 項 に記載の装置。

【請求項 1 0】

前記電荷誘導層に接続されたソースと、

前記電荷誘導層に接続されたドレインと、をさらに備え、前記ソースと前記ドレインは、前記電荷誘導層と前記バリア層を経由して前記バッファ層内に延在することを特徴とする請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項 に記載の装置。

【請求項 1 1】

前記電荷誘導層上に配置されて前記ゲート端子の一部分を封入する誘電体材料をさらに備えることを特徴とする請求項 1 0 に記載の装置。

【請求項 1 2】

前記ゲート端子は T 形フィールドプレートゲートであり、ニッケル ( N i ) 、プラチナ ( P t ) 、イリジウム ( I r ) 、モリブデン ( M o ) または金 ( A u ) を含むことを特徴とする請求項 1 1 に記載の装置。

【請求項 1 3】

前記誘電体材料上に配置され、それを経由して、前記ソースに電氣的に接続され、また、前記ゲート端子に容量接続されたフィールドプレートをさらに備えることを特徴とする請求項 1 2 に記載の装置。

【請求項 1 4】

シリコン ( S i ) 、炭化ケイ素 ( S i C ) 、サファイア ( A l <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) 、窒化ガリウム ( G a N ) 、ダイヤモンド ( C ) 、酸化シリコン ( S i O <sub>2</sub> ) または窒化アルミニウム ( A l N ) を含む基板をさらに備えることを特徴とする請求項 1 乃至 1 3 のいずれか 1 項 に記載の装置。

## 【請求項 15】

前記バッファ層は前記基板にエピタキシャル接続され、

前記バリア層は前記バッファ層にエピタキシャル接続され、

前記電荷誘導層は前記バリア層にエピタキシャル接続されることを特徴とする請求項 14 に記載の装置。

## 【請求項 16】

前記バッファ層、前記バリア層あるいは前記電荷誘導層は、複数の槽で構成されることを特徴とする請求項 15 に記載の装置。

## 【請求項 17】

トランジスタのチャンネルとして機能するように構成されガリウム (Ga) と窒素 (N) とを含むバッファ層を基板上に形成するステップと、

前記チャンネルに可動電荷キャリアを供給するように構成されアルミニウム (Al)、ガリウム (Ga) および窒素 (N) を含むバリア層を前記バッファ層上に形成するステップと、

前記チャンネル内で電荷を誘導するように構成されアルミニウム (Al) と窒素 (N) を含む電荷誘導層を前記バリア層上に形成するステップと、

前記電荷誘導層に配置され、前記バリア層に接続されて前記チャンネルを制御するゲート端子を形成するステップと、を備えることを特徴とする方法。

## 【請求項 18】

前記バッファ層を形成するステップは、バッファ層材料を前記基板上にエピタキシャル堆積するステップを備え、

前記バリア層を形成するステップは、バリア層材料を前記バッファ層上にエピタキシャル堆積するステップを備え、

前記電荷誘導層を形成するステップは、電荷誘導層材料を前記バリア層上にエピタキシャル堆積するステップを備え、前記電荷誘導層は第 1 の分極を有し、前記バリア層は第 2 の分極を有し、前記第 1 の分極は前記第 2 の分極より大きいことを特徴とする請求項 17 に記載の方法。

## 【請求項 19】

前記電荷誘導層を形成するステップは、電荷誘導層材料を前記バリア層上にエピタキシャル堆積するステップを備え、前記電荷誘導層は第 1 のバンドギャップエネルギーを有し、前記バリア層は第 2 のバンドギャップエネルギーを有し、前記第 1 のバンドギャップエネルギーは第 2 のバンドギャップエネルギーより大きいことを特徴とする請求項 18 に記載の方法。

## 【請求項 20】

キャップ層材料を前記電荷誘導層上にエピタキシャル堆積することによって、アルミニウム (Al)、ガリウム (Ga) および窒素 (N) を含むキャップ層を前記電荷誘導層上に形成するステップをさらに備えることを特徴とする請求項 18 に記載の方法。

## 【請求項 21】

前記バッファ層材料は窒化ガリウム (GaN) を含み、

前記バリア層材料および前記キャップ層材料は、窒化アルミニウムガリウム ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ) ( $x$  は、それぞれの成分の相対量を表わし、0.2 以下) を含み、

前記電荷誘導層材料は、窒化アルミニウムインジウム ( $\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{N}$ ) ( $y$  はそれぞれの成分の相対量を表し、0.2 以下) を含むことを特徴とする請求項 20 に記載の方法。

## 【請求項 22】

前記バリア層を形成するステップによって、60 nm 以下のバリア層厚みが得られ、

前記電荷誘導層を形成するステップによって、30 nm 以下の電荷誘導層厚みが得られ、

前記キャップ層を形成するステップによって、100 nm 以下のキャップ層厚みが得られることを特徴とする請求項 21 に記載の方法。

## 【請求項 23】

前記バリア層厚みによって、前記ゲート端子と前記バッファ層間に配置されたゲート領域における二次元電子ガス（２ＤＥＧ）の形成が阻止され、

前記ゲート端子は、エンハンスメントモード（eモード）高電子移動度トランジスタ（HEMT）デバイスのスイッチングを制御するように構成されていることを特徴とする請求項２２の方法。

【請求項２４】

前記ゲート端子を形成するステップは、前記キャップ層の一部を除去して電荷誘導層を露出させるステップを備えることを特徴とする請求項２０の方法。

【請求項２５】

前記キャップ層の材料を除去するステップは、ホウ素塩化物（ $\text{BCl}_3$ ）または塩素（ $\text{Cl}_2$ ）を用いて、前記キャップ層材料を選択的にエッチングするステップを備え、

前記電荷誘導層の一部を除去するステップは、水酸化カリウム（ $\text{KOH}$ ）または水酸化テトラメチルアンモニウム（ $\text{TMAH}$ ）を用いて、前記電荷誘導層材料を選択的にエッチングするステップを備えることを特徴とする請求項２４に記載の方法。

【請求項２６】

前記電荷誘導層の一部を除去するステップによって前記バリア層を露出させ、

前記バリア層は、電荷誘導層材料の選択的エッチングのためのエッチング停止層として機能することを特徴とする請求項２５に記載の方法。

【請求項２７】

前記ゲート端子を形成するステップは、キャップ層材料と前記電荷誘導層が除去された領域に、前記バリア層の材料に接続されてショットキー接合を形成するゲート電極材料を堆積するステップをさらに備えることを特徴とする請求項２５に記載の方法。

【請求項２８】

前記ゲート端子を形成するステップは、前記電荷誘導層の一部を除去してゲート絶縁体を形成することにより露出される前記電荷誘導層材料を選択的に酸化させるステップと、

ゲート電極材料を前記ゲート絶縁体上に堆積するステップであって、前記ゲート電極と前記ゲート絶縁体は前記バリア層材料に接続されて金属－絶縁体－半導体（ $\text{MIS}$ ）接合を形成するステップと、をさらに備えることを特徴とする請求項２５に記載の方法。

【請求項２９】

前記電荷誘導層に接続されたソースおよびドレインを形成するステップであって、前記ソースと前記ドレインは、前記電荷誘導層と前記バリア層を経由して前記バッファ層内に延在するステップをさらに備えることを特徴とする請求項１７乃至２８のいずれか１項に記載の方法。

【請求項３０】

前記ゲート端子の一部を封入する誘電体材料を前記電荷誘導層上に堆積するステップをさらに備えることを特徴とする請求項２９に記載の方法。

【請求項３１】

請求項３０に記載の方法であって、前記ゲート端子はＴ形フィールドプレートゲートであり、

前記方法は、前記誘電体材料を経由して、前記ソースに電氣的に接続され、また、前記ゲート端子に容量接続されたフィールドプレートを、前記誘電体材料上に形成するステップをさらに備える方法。

---

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I テーマコード(参考)  
H 0 1 L 29/06 (2006.01)

(72)発明者 スー、チャン スー  
アメリカ合衆国オレゴン州 9 7 1 2 4 ・ ヒルスボロ ・ ノースイーストブルックウッドパークウェイ  
2 3 0 0

F ターム(参考) 5F102 GB01 GC01 GD01 GJ02 GJ03 GJ04 GJ10 GL04 GM04 GN04  
GN08 GQ01 GR01 GR04 GR12 GS04 GT02 GT03 HC15  
5F140 AC02 BA01 BA02 BA04 BA06 BA09 BA16 BA17 BC12 BC15  
BD01 BD04 BD07 BD11 BE07 BE09 BF05 BF07 BF43 BG27  
BG28 BG30 BH47 BJ01 BJ04 BJ05 BJ07 BJ25 BK13 BK20  
BK26 BK38 CD09 CE02