

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6306615号  
(P6306615)

(45) 発行日 平成30年4月4日(2018.4.4)

(24) 登録日 平成30年3月16日(2018.3.16)

(51) Int.Cl.	F 1
H01L 21/205 (2006.01)	H01L 21/205
C30B 29/38 (2006.01)	C30B 29/38
C30B 25/16 (2006.01)	C30B 25/16
H01L 21/338 (2006.01)	H01L 29/80
H01L 29/778 (2006.01)	H

請求項の数 11 (全 12 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2015-558994 (P2015-558994)
(86) (22) 出願日	平成26年2月21日 (2014.2.21)
(65) 公表番号	特表2016-511545 (P2016-511545A)
(43) 公表日	平成28年4月14日 (2016.4.14)
(86) 国際出願番号	PCT/US2014/017658
(87) 国際公開番号	W02014/130802
(87) 国際公開日	平成26年8月28日 (2014.8.28)
審査請求日	平成28年3月31日 (2016.3.31)
(31) 優先権主張番号	13/775,661
(32) 優先日	平成25年2月25日 (2013.2.25)
(33) 優先権主張国	米国(US)

(73) 特許権者	592054856 クリー インコーポレイテッド CREE INC. アメリカ合衆国 ノースカロライナ州 2 7703 ダラム シリコン ドライブ 4600
(74) 代理人	110000578 名古屋国際特許業務法人
(72) 発明者	ハリン クリスト アメリカ合衆国 ノースカロライナ州 2 7514 チャペル ヒル ミールス ロード 2122

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】半絶縁性III族窒化物の混合ドーピング

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項1】

第1ドーパントでドープされた第1のドープ部分と、  
 前記第1のドープ部分の上側にある第2のドープ部分であって、前記第1ドーパントとは異なる第2ドーパントでドープされた第2のドープ部分と、  
 を備え、前記第1のドープ部分における第1ドーパントの濃度は、前記第1のドープ部分と前記第2のドープ部分との境界における第2ドーパントの濃度より高く、  
 前記第2ドーパントの濃度は、前記第2のドープ部分の少なくとも上側部分において第1ドーパントの濃度より高く、  
 前記第2のドープ部分は、前記第2ドーパントの傾斜したドーピング濃度を有し、  
 前記第1ドーパントは鉄であり、  
 前記第2ドーパントは炭素である半絶縁性III族窒化物。

## 【請求項2】

前記第1のドープ部分は鉄ドープ部分であり、前記第2のドープ部分は炭素ドープ部分である請求項1に記載の半絶縁性III族窒化物。

## 【請求項3】

前記鉄ドープ部分の鉄のドーピング濃度は、1立方センチメートルあたりの原子数で、 $10^{17}$ 個及び $10^{19}$ 個を含む $10^{17}$ 個から $10^{19}$ 個までの範囲にあり、前記炭素ドープ部分の少なくとも上側部分の炭素のドーピング濃度は、1立方センチメートルあたりの原子数で、 $10^{18}$ 個以上である請求項2に記載の半絶縁性III族窒化物。

## 【請求項 4】

前記炭素ドープ部分の少なくとも上側部分の前記炭素のドーピング濃度は、1立方センチメートルあたりの原子数で、 $10^{19}$ 個以上である請求項3に記載の半絶縁性III族窒化物。

## 【請求項 5】

前記第2のドープ部分の上側部分における鉄のドーピング濃度は、1立方センチメートルあたりの原子数で、 $5 \times 10^{15}$ 個及び $2 \times 10^{16}$ 個を含む $5 \times 10^{15}$ 個から $2 \times 10^{16}$ 個までの範囲にある請求項2に記載の半絶縁性III族窒化物。

## 【請求項 6】

請求項1記載の半絶縁性III族窒化物を、半絶縁性III族窒化物バッファ層として備える半導体デバイスであって、

前記半導体デバイスは、電界効果トランジスタであり、

前記半絶縁性III族窒化物バッファ層は、前記第1のドープ部分とは反対側の前記第2のドープ部分上に、チャネル部分をさらに備え、

前記電界効果トランジスタは、

前記第2のドープ部分とは反対側で、前記チャネル部分に隣接する、前記半絶縁性III族窒化物バッファ層の表面上のバリア層と、

前記半絶縁性III族窒化物バッファ層とは反対側の、前記バリア層上に位置するソースコンタクトと、ゲートコンタクトと、ドレインコンタクトと、  
をさらに備える半導体デバイス。

## 【請求項 7】

前記半絶縁性III族窒化物バッファ層は、半絶縁性窒化ガリウムバッファ層であり、

前記第1のドープ部分は鉄ドープ部分であり、

前記第2のドープ部分は炭素ドープ部分である

請求項6に記載の半導体デバイス。

## 【請求項 8】

第1ドーパントでドープされた第1のドープ部分と、

前記第1のドープ部分の上側にある第2のドープ部分であって、前記第1ドーパントとは異なる第2ドーパントでドープされた第2のドープ部分と、

を備え、前記第1のドープ部分における第1ドーパントの濃度は、前記第1のドープ部分と前記第2のドープ部分との境界における第2ドーパントの濃度より高く、

前記第2ドーパントの濃度は、前記第2のドープ部分の少なくとも上側部分において第1ドーパントの濃度より高く、

前記第2のドープ部分は、前記第2ドーパントの傾斜したドーピング濃度を有し、

前記第1のドープ部分及び前記第2のドープ部分の組合せが、前記第1ドーパントに起因するメモリ効果を低減し、前記第2ドーパントに起因する欠陥を低減する半絶縁性III族窒化物。

## 【請求項 9】

前記第1ドーパント及び前記第2ドーパントは、夫々、前記第2のドープ部分において傾斜したドーピング濃度を有する請求項1又は請求項8記載の半絶縁性III族窒化物。

## 【請求項 10】

前記第2のドープ部分において、前記第1ドーパントの前記傾斜したドーピング濃度は、前記第1のドープ部分からの距離が増加するにつれて減少し、前記第2ドーパントの前記傾斜したドーピング濃度は、前記第1のドープ部分からの距離が増加するにつれて増加する請求項9記載の半絶縁性III族窒化物。

## 【請求項 11】

前記第2のドープ部分は、前記第1のドープ部分からの距離が増加するにつれて増加する前記第2ドーパントの傾斜したドーピング濃度を有する請求項1又は請求項8記載の半絶縁性III族窒化物。

## 【発明の詳細な説明】

10

20

30

40

50

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

## [技術分野]

本開示は、半絶縁性III族窒化物及びその製造方法に関し、特に、半絶縁性III族窒化物（例えば、窒化ガリウム等）、とりわけ半導体デバイスのバッファ層として有用な半絶縁性III族窒化物の混合ドーピングに関する。

## 【0002】

## [背景]

窒化ガリウム（GaN）等のIII族窒化物、及び、関連するIII-V族合金は、半導体デバイス、特に高温用途や高周波用途に非常に望ましい材料である。例えば高周波用途の横型電界効果トランジスタ（FETs）等の、多くの半導体デバイスにおいて、半絶縁性GaNバッファ層は、非常に望ましい。大面積の天然GaN基板が不足しているため、ほとんどの場合、半絶縁性GaNは、炭化ケイ素（SiC）又はサファイア等のヘテロエピタキシャル基板上で成長させられる。ヘテロエピタキシャル基板の使用には、ヘテロエピタキシャル基板とGaNとの間の格子不整合によって生じる問題がある。よって、GaNは、格子不整合によって生じるテンション又は応力に打ち勝つのに十分な厚さまで成長させられなければならない。また、エピタキシャル成長したGaNは不純物を含むため、半絶縁性を持たせるために、GaNは、十分にドープされなければならない。例えば、2007年1月30日に発行され、その全内容が本出願に参照によって援用される「半絶縁性GaN及びその作成方法」と題された米国特許第7,170,095には、GaNに含まれるドナー不純物に対する補償のために、例えば、マンガン（Mn）、鉄（Fe）、コバルト（Co）、ニッケル（Ni）、銅（Cu）等のような準位の深いアクセプタードーパントを用いる、半絶縁性GaNの作成方法が記載されている。各ドーパントは、一般的に利点と欠点を有する。よって、半絶縁性III族窒化物に対する改良ドーピング、特に、半絶縁性GaNに対する改良ドーピングが必要である。

## 【0003】

## [概要]

半絶縁性III族窒化物及びその製造方法の実施形態を開示する。一実施形態では、半絶縁性III族窒化物層は、第1ドーパントでドープされた第1のドープ部分と、第1ドーパントとは異なる第2ドーパントでドープされた第2のドープ部分とを備える。第1のドープ部分は、半絶縁性III族窒化物層の第1の厚さまで延在する。第2のドープ部分は、半絶縁性III族窒化物層の第1の厚さ辺りから半絶縁性III族窒化物層の第2の厚さまで延在する。一実施形態では、第1ドーパントは鉄（Fe）であり、第2ドーパントは炭素である（C）。別の実施形態では、半絶縁性III族窒化物層は、半絶縁性窒化ガリウム（GaN）層であり、第1ドーパントはFeであり、第2ドーパントはCである。

## 【0004】

一実施形態では、半絶縁性III族窒化物層は、半絶縁性GaN層であり、第1ドーパントはFeであり、第2ドーパントはCである。成長プロセスに起因して、Feドーピングは、Cドープ部分に残留し、Cドープ部分の厚さが増すにつれてFeドーピングの残留量は減少する。Cドープ部分の厚さは、Cドープ部分における残留Feドーピング濃度を、Cドープ部分を通じてFeドーピングの所定許容残留濃度にまで低減するのに十分な厚さである。Cドープ部分が、Feドーピングの結果として生じるメモリー効果又はトラップの量を低減する一方、Feドープ部分は、半絶縁性GaN層を低い転位密度で所望の厚さに成長させることを可能にする。これは、半絶縁性GaN層が横型電界効果トランジスタ（FET）（例えば、横型高電子移動度トランジスタ（HEMT））等の半導体デバイスの半絶縁性GaNバッファ層である場合に、特に有利である。

## 【0005】

一実施形態では、半導体デバイスは、半絶縁性III族窒化物層と、半絶縁性III族窒化物層上のバリア層と、半絶縁性III族窒化物層とは反対側のバリア層上のソースコ

10

20

30

40

50

ンタクト、ゲートコンタクト、及びドレインコンタクトとを備える。半絶縁性II族窒化物層は、第1ドーパントでドープされた第1のドープ部分と、第1ドーパントとは異なる第2ドーパントでドープされた第2のドープ部分とを備える。第1のドープ部分は、半絶縁性II族窒化物層の第1の厚さまで延在する。第2のドープ部分は、半絶縁性II族窒化物層の第1の厚さ辺りからバリア層へ向けて、半絶縁性II族窒化物層の第2の厚さまで延在する。一実施形態では、第1ドーパントはFeであり、第2ドーパントはCである。別の実施形態では、半絶縁性II族窒化物層はGaNであり、第1ドーパントはFeであり、第2ドーパントはCである。

#### 【0006】

当業者は、添付の図面に関連する、以下に記載の好ましい実施形態の詳細な説明を読むことで、本開示の範囲を十分理解し、本開示のさらなる側面を認識するであろう。 10

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0007】

本明細書に組み込まれ、本明細書の一部を成す添付の図面は、本開示のいくつかの側面を例示するものであり、明細書中の記載とともに本開示の原理を説明する役割を果たす。

【図1】半絶縁性窒化ガリウム(GaN)基層を備える従来の電界効果トランジスタ(FET)の一例を示す。

【図2A-2B】有機金属化学気相成長法(MOCVD)成長プロセスにおいて、鉄(Fe)をドーピングすることによって半絶縁性GaN基層に半絶縁性を持たせた場合の、図1に示す半絶縁性GaN基層のドーピングプロファイルの例を2つ示す。 20

【図3】本開示の一実施形態により、混合ドーピングを行った半絶縁性GaN基層を備えるFETの一例を示す。

【図4】本開示の一実施形態による、図3に示す半絶縁性GaN基層のドーピングプロファイルの一例を示す。

#### 【図5A】本開示の一実施形態による図3に示すFETの製造方法を図式的に示す。

#### 【図5B】本開示の一実施形態による図3に示すFETの製造方法を図式的に示す。

#### 【図5C】本開示の一実施形態による図3に示すFETの製造方法を図式的に示す。

#### 【図5D】本開示の一実施形態による図3に示すFETの製造方法を図式的に示す。

#### 【図5E】本開示の一実施形態による図3に示すFETの製造方法を図式的に示す。

#### 【図5F】本開示の一実施形態による図3に示すFETの製造方法を図式的に示す。 30

#### 【図5G】本開示の一実施形態による図3に示すFETの製造方法を図式的に示す。

#### 【発明を実施するための形態】

#### 【0008】

#### 【詳細な説明】

以下に記載する実施形態は、当業者が本実施形態を実施するのに必要な情報を説明するものであり、本実施形態を実施する最良の態様を例示するものである。当業者は、添付の図面に照らして以下の説明を読むことで本開示の概念を理解し、本明細書で特に述べられていない本開示の概念の応用を認識するであろう。本開示の概念及びその応用は、本開示及び添付の請求項の範囲に含まれるものと理解されるべきである。

#### 【0009】

本明細書では、種々の要素を説明するために、第1、第2等の用語を用いることがあるが、これらの要素はこれらの用語によって限定されるべきではないと理解されよう。これらの用語は、ある要素を別の要素と区別する目的でのみ用いられる。例えば、本開示の範囲から逸脱することなく、第1の要素が第2の要素と称されることもあり、同様に、第2の要素が第1の要素と称されることもある。本明細書内で用いられているとおり、「及び/又は(a and/or)」という用語には、列挙された関連項目の1つ又は複数による任意の全ての組み合わせが含まれる。

#### 【0010】

層、領域、又は基板等の要素が、別の要素の「上に(on)」ある、又は別の要素の「上へ(onto)」延在していると記載される場合、この要素は、別の要素の上に直接あ 50

つてもよく、又は、別の要素の上へ直接延在してもよく、或いは、介在する要素が存在してもよいと理解されよう。これに対して、ある要素が別の要素の「上に直接 (directly on)」ある、又は、別の要素の「上へ直接 (directly onto)」延在していると記載されている場合、介在する要素は存在しない。同様に、層、領域、又は基板等の要素が、別の要素の「上方に (over)」ある、又は、別の要素の「上方へ (over)」延在していると記載される場合、この要素は、別の要素の直接上方にあってもよく、又はその直接上方へ延在してよく、或いは、介在する要素が存在してもよいと理解されよう。これに対して、ある要素が別の要素の「直接上方に (directly over)」ある、又は、別の要素の「直接上方へ (directly over)」延在している、と記載される場合には、介在する要素は存在しない。また、ある要素が別の要素に「接続される (connected)」、又は、「連結される (coupled)」と記載される場合、この要素は、別の要素と直接接続されてもよく、又は、直接連結されてもよく、或いは、介在する要素が存在してもよいと理解されよう。これに対して、ある要素が別の要素と「直接接続される (directly connected)」、又は、別の要素と「直接連結される (directly coupled)」と記載される場合、介在する要素は存在しない。  
10

#### 【0011】

本明細書において、「～の下に (below)」、「～の上に (above)」、「上部の (upper)」、「下部の (lower)」、「水平な (horizontal)」、又は「垂直な (vertical)」等の相対的な用語は、図面に示されるような、ある要素、層、又は領域と、別の要素、層、又は領域との関係を説明するために用いられることがある。これらの用語、及び上記で論じられた用語は、図面に描かれた装置の向きに加えて、異なる向きをも包含することを意図していると理解されよう。  
20

#### 【0012】

本明細書で用いる専門用語は、特定の実施形態を説明する目的でのみ用いられ、本開示を制限することを意図しない。本明細書では、単数形である「a」、「an」及び「the」は、文脈が明らかにそうでないことを示していない限りは、複数も含むことを意図する。本明細書で用いられる「備える (comprises)」、「備える (comprising)」、「含む (includes)」、及び／又は「含む (including)」という用語は、記載された特徴、整数 (integers)、工程、作業、要素、及び／又は、構成要素が存在することを明示しているが、1つ又は複数の別の特徴、整数、工程、作業、要素、構成要素、及び／又はこれらの群が存在すること、又は追加されることを除外するものではないと、さらに理解されよう。  
30

#### 【0013】

別途定義されない限りは、本明細書で使用される全ての用語（技術的用語及び科学的用語を含む）は、本開示が属する技術分野の当業者によって一般に理解されるのと同じ意味を有する。本明細書で使用される用語の意味は、本明細書の文脈及び関連技術におけるその意味と一致するものと解釈されるべきであり、本明細書で明らかにそう定義されない限りは、理想化された意味、又は過度に形式的な意味に解釈されないことが、さらに理解されよう。  
40

#### 【0014】

本開示は、半絶縁性ⅢⅢ族窒化物及びその製造方法の実施形態に関する。下記の議論では窒化ガリウム (GaN) が中心となるが、本開示はこれに限定されない。本開示は、他のⅢⅢ族窒化物、及び、特に (Ga、Al、In)N 等の他のⅢⅢ - V 族窒化物に適用でき、「(Ga、Al、In)N」は、金属部分が、適正な化学量論比の、ガリウム (Ga)、アルミニウム (Al)、及びインジウム (In) の 1つ、2つ、又は 3つ全てである金属窒化物組成物を示す（例えば、GaN、AlN、InN、AlGaN、InGaN、AlInN、又は AlGaInN）。ⅢⅢ - V 族多元金属窒化物組成物における金属の化学量論比は、整数の値に加えて非整数の値をも包含すると理解されよう。例えば、AlGaN という用語は、 $0 \leq x \leq 1$  である場合の  $Al_xGaN_{1-x}$  をさすと理解さ  
50

れる。

【0015】

半絶縁性GaN及びその製造方法の実施形態を説明する前に、従来の半絶縁性GaN、及び、特に横型電界効果トランジスタ(FET)における従来の半絶縁性GaNバッファ層について議論するのが有益である。これに関して、横型FETの一種である従来の高電子移動度トランジスタ(HEMT)10を図1に示す。図に示すとおり、HEMT10は、半絶縁性部分14とチャネル16とを含む、半絶縁性GaNバッファ層12を備える。また、HEMT10は、半絶縁性GaNバッファ層12の上に、チャネル16に隣接して窒化アルミニウムガリウム(A1GaN)バリア層18をも備える。最後に、HEMT10は、半絶縁性GaNバッファ層12とは反対側のA1GaNバリア層18上に、ソースコンタクト20と、ゲートコンタクト22と、ドレインコンタクト24とを備える。半絶縁性GaNバッファ層12の半絶縁性部分14は、バックバリアとして機能し、これに対してゲートコンタクト22は、チャネル16を空乏化できる。  
10

【0016】

純粋なGaN(半絶縁性となるであろう)を成長させることが難しいため、通常は、半絶縁性GaNバッファ層12を、ヘテロエピタキシャル基板(例えば、炭化ケイ素(SiC)基板、サファイア基板等)上に成長させ、GaNが半絶縁性となるように、又は負に帯電するように、適切なドーパントでドープしてGaN内の不純物を補償する。半絶縁性GaNに用いられる最も一般的な2つのドーパントは、鉄(Fe)及び炭素(C)である。しかしながら、本発明者は、これらのドーパント(Fe及びC)それぞれに、重大な問題があることに気づいた。とりわけ、Feドーピングはメモリー効果が大きく、メモリー効果はとりわけ高周波(例えば、無線周波(RF))用途において望ましくない。その一方で、Cドーピングでは、厚い(例えば、0.5マイクロメートルより大きい、又は1マイクロメートルより大きい)GaNを成長させるときに、相当な量の欠陥が生じる。当業者には当然のことながら、ヘテロエピタキシャル基板に半絶縁性GaNバッファ層12を成長させるときの格子不整合に起因する応力を緩和するために、半絶縁性GaNバッファ層12は厚いことが望ましい。  
20

【0017】

より具体的には、半絶縁性GaNバッファ層12を成長させるときに、半絶縁性部分14とチャネル16との境界で、ドーピングが急に停止されることが望ましい。しかしながら、有機金属化学気相成長法(MOCVD)成長プロセスでFeドーピングを用いる場合は、Feドーピングの急な停止は不可能、又は実現が難しい。結果として、Feドーピングを停止した後、成長したGaNに、Feドーピングが残留する。したがって、チャネル16内のFeドーピング残留量が高いことに起因する、より大きいメモリー効果(つまり、より多量のトラップ)、又は、半絶縁性GaNバッファ層12の半絶縁性部分14のチャネル16近くにおけるFeドーピング残留量が低いことに起因する、半絶縁性GaNバッファ層12の半絶縁性部分14内へのより大きいリーク電流、のいずれかを選択しなければならない。  
30

【0018】

このトレードオフ関係を、図2A及び2Bに示す。チャネル16の境界でのFeドーピング残留量が、このケースでは1立方センチメートル( $\text{cm}^3$ )あたりの原子数で $10^{16}$ 個である所定許容レベルより少なくなるように、チャネル16の十分に手前でFeドーピングが停止される場合を、図2Aに示す。この場合には、結果として、チャネル16において低いメモリー効果が見られる一方、半絶縁性GaNバッファ層12の半絶縁性部分14のチャネル16近くにおけるFeドーピング量が低いために、半絶縁性GaNバッファ層12の半絶縁性部分14内へのリーク電流がより大きくなる。これとは対照的に、チャネル16により近い地点でFeドーピングが停止される場合を、図2Bに示す。この場合には、チャネル16におけるFeドーピング残留量がより高くなり、したがって、半絶縁性GaNバッファ層12の半絶縁性部分14内へのリーク電流はより小さくなる。しかしながら、チャネル16におけるFeドーピング残留量がより高いと、チャネル16における40

るメモリー効果が増大する(つまり、チャネル16におけるトラップの量が増大する)。このように、Feドーピングを用いる場合は、より大きいリーク電流、又は、より大きいメモリー効果、のいずれかを選択しなければならない。

#### 【0019】

Feドーピングとは対照的に、Cドーピングでは、MOCVD、又は同様の成長方法によって半絶縁性GaNバッファ層12を成長させる場合、半絶縁性部分14とチャネル16との境界においてドーピングの急停止ができる。しかしながら、高いCドーピングに必要とされる成長条件は、半絶縁性GaNバッファ層12において、特に0.5マイクロメートルを超える厚さの場合、より具体的には1マイクロメートルを超える厚さの場合、相当な量の転位、又は欠陥を生じさせる。半絶縁性GaNバッファ層12と、半絶縁性GaNバッファ層12が成長するヘテロエピタキシャル基板との格子不整合に起因する応力を緩和するためには、半絶縁性GaNバッファ層12の厚さは、好ましくは0.5マイクロメートルよりも大きく、1マイクロメートルよりも大きいのがより好ましい。厚いGaN層が望まれるために、高いCドーピングは、半絶縁性GaNバッファ層12に相当な量の欠陥を生じさせ、結果として電流コラプスのリスクが高まる。

10

#### 【0020】

本明細書に開示する半絶縁性GaN及びその製造方法は、メモリー効果の低減、リーク電流の低減、及び欠陥の量の低減をもたらす。これに関して、図3は、本開示の一実施形態に従う半絶縁性GaNバッファ層28を備えるHEMT26を示す。先に進む前に、この実施形態ではHEMT26を説明するが、半絶縁性GaNバッファ層28が、半絶縁性GaNバッファ層が所望される別の種類の半導体デバイスで利用されてもよいことを述べておく。また、この実施形態では、上記で論じたように半絶縁性GaNを利用しているが、別のIII族窒化物が用いられてもよい。

20

#### 【0021】

図示のとおり、半絶縁性GaNバッファ層28は、半絶縁性部分30と、半絶縁性部分30上のチャネル部分32とを備える。また、半絶縁性部分30は、Feドープ部分34と、Cドープ部分36とを備える。Feドープ部分34は、半絶縁性GaNバッファ層28の底面から、半絶縁性GaNバッファ層28内の第1の厚さ(t1)まで延在する。Cドープ部分36は、Feドープ部分34の上にあり、半絶縁性GaNバッファ層28内の第1の厚さ(t1)から、半絶縁性GaNバッファ層28内の第2の厚さ(t2)まで延在する。とりわけ、半絶縁性GaNバッファ層28と半絶縁性GaNバッファ層28が成長するヘテロエピタキシャル基板との格子不整合に起因する、半絶縁性GaNバッファ層28における応力を緩和するために、Feドープ部分34の厚さは、0.5マイクロメートル以上(例えば、0.5及び10マイクロメートルを含む0.5から10マイクロメートルまでの範囲)、より好ましくは1マイクロメートル以上(例えば、1及び10マイクロメートルを含む1から10マイクロメートルまでの範囲)である。Feドープ部分34のFeのドーピング濃度は、1cm<sup>3</sup>あたりの原子数で、10<sup>17</sup>個及び10<sup>19</sup>個を含む10<sup>17</sup>個から10<sup>19</sup>個までの範囲である。Feドープ部分34のFeのドーピング濃度は、Feドープ部分34の厚さにわたって一定でもよく、又は変化してもよい。

30

#### 【0022】

40

MOCVD、又は同様の方法を用いてFeドープ部分34を成長させる場合、半絶縁性GaNバッファ層28が第1の厚さ(t1)に到達する地点で、Feドーピングが停止される。しかしながら、成長方法に起因して、Cドープ部分36及びチャネル部分32にわたってFeドーピングが残留する。残留したFeドーピングの残留Feドーピング濃度は、厚さとともに低減され、換言すれば、Cドープ部分36及びチャネル部分32を通じて低減される。好ましい一実施形態では、Feドーピングが停止されるのとほぼ同時にCドーピングが開始される。しかしながら、別の実施形態では、Feドーピングが停止される前にCドーピングが開始されてもよい。

#### 【0023】

Cドープ部分36の厚さは、Cドープ部分36とチャネル部分32との境界における残

50

留 Fe ドーピング濃度が、所定許容 Fe ドーピングレベル未満であり、C ドープ部分 3 6 の成長によって生じた欠陥の量が、欠陥の所定閾値未満であるような厚さである。一実施形態では、C ドープ部分 3 6 とチャネル部分 3 2 との境界における所定許容 Fe ドーピングレベルは、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で  $2 \times 10^{16}$  個未満である。例えば、ある特定の実施形態では、C ドープ部分 3 6 とチャネル部分 3 2 との境界における所定許容 Fe ドーピングレベルは、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で、 $5 \times 10^{15}$  個及び  $2 \times 10^{16}$  個を含む  $5 \times 10^{15}$  個から  $2 \times 10^{16}$  個までの範囲の値である（例えば、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で  $5 \times 10^{15}$  個又は  $1 \times 10^{16}$  個）。しかしながら、いくつかの実施形態では、所定許容 Fe ドーピングレベルは、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で  $5 \times 10^{15}$  個未満であってもよい。一実施形態では、欠陥の所定閾値は、 $1 \text{ cm}^2$ あたりの欠陥が  $1 \times 10^9$  個である。しかし、これは一例にすぎない。ある特定の実施形態では、C ドープ部分 3 6 の厚さは 0.1 及び 1.5 マイクロメートルを含む 0.1 から 1.5 マイクロメートルまでの範囲であり、さらに好ましくは、0.1 及び 1 マイクロメートルを含む 0.1 から 1 マイクロメートルまでの範囲である。しかしながら、C ドープ部分 3 6 の厚さは、Fe ドープ部分 3 4 の、特に Fe ドープ部分 3 4 と C ドープ部分 3 6 との境界における Fe のドーピング濃度によって変化してもよい。特に、一実施形態では、C ドープ部分 3 6 の C のドーピング濃度は、勾配付けられる（graduated）。特に、C ドープ部分 3 6 の C のドーピング濃度は、Fe ドープ部分 3 4 近くの低濃度から、C ドープ部分 3 6 とチャネル部分 3 2 との境界における高濃度へと増大してもよい。この場合、C ドープ部分 3 6 の高ドープ部分の厚さを、所定最大厚さであって、その厚さを超えると、C ドープ部分 3 6 における欠陥の量が所定閾値を超えて増大する所定最大厚さ未満に維持することが望ましい。10

#### 【0024】

Fe ドープ部分 3 4 は、望ましくない多量の転位を生じさせることなく、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 を大きな厚さ（例えば、0.5 マイクロメートル以上、より好ましくは、1 マイクロメートル以上）に成長させることを可能にする。C ドープ部分 3 6 は、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 の半絶縁性部分 3 0 内へのリーク電流を低く保ちながら、チャネル部分 3 2 におけるメモリー効果（つまり、トラップ）を低減する。したがって、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 は、HEMT 2 6 の改善された性能を提供する。20

#### 【0025】

半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 に加えて、HEMT 2 6 は、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 の上に、チャネル部分 3 2 に隣接する AlGaN バリア層 3 8 を備える。AlGaN バリア層 3 8 は、バリア層の一例にすぎない。バリア層 3 8 は、AlGaN 以外の材料（例えば、窒化アルミニウム（AlN））から形成されてもよい。最後に、HEMT 2 6 は、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 とは反対側の、AlGaN バリア層 3 8 の上で、ソースコンタクト 4 0 、ゲートコンタクト 4 2 、及びドレインコンタクト 4 4 を備える。30

#### 【0026】

図 4 に、本開示の一実施形態に従う図 3 に示す半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 のドーピングプロファイルの一例を示す。図示のとおり、この例では、チャネル部分 3 2 の表面から約 1.2 マイクロメートルの地点で、Fe ドーピングが停止され、C ドーピングが開始される。Fe ドープ部分 3 4 における Fe のドーピング濃度は、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で約  $5 \times 10^{18}$  個である。さらに、この実施形態では、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 は MOCVD によって成長させられる。よって、Fe ドーピングが停止された後も Fe ドーピングが残り、厚さとともに低減する。この例では、C ドープ部分 3 6 の厚さにわたって、残留 Fe ドーピングは、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で約  $5 \times 10^{18}$  個から、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で約  $1 \times 10^{16}$  個まで低減する。反対に、C ドーピングは、C ドープ部分 3 6 の厚さにわたって、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で約  $5 \times 10^{16}$  個から、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で約  $5 \times 10^{19}$  個まで増大した後、チャネル部分 3 2 との境界で停止される。図示のとおり、MOCVD を用いた場合には、C ドーピングの急な停止がある。このドーピングプロファイルを利用すると、チャネル部分 3 2 の残留 Fe ドーピングは低く、したがって、チャネル部分 3 2 におけるメモリー効果（つまり、トラップの量）は低い。また、C ドープ部分 3 6 の厚さにわたって、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で約  $5 \times 10^{16}$  個から、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で約  $5 \times 10^{19}$  個まで増大した後、チャネル部分 3 2 との境界で停止される。図示のとおり、MOCVD を用いた場合には、C ドーピングの急な停止がある。このドーピングプロファイルを利用すると、チャネル部分 3 2 の残留 Fe ドーピングは低く、したがって、チャネル部分 3 2 におけるメモリー効果（つまり、トラップの量）は低い。40

部分 3 6 は、結果的に、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 の半絶縁性部分 3 0 内へのリーク電流を少なくする。

【 0 0 2 7 】

図 5 A から 5 G に、本開示の実施形態に従う図 3 に示す HEMT 2 6 の製造方法を図示する。まず、図 5 A に示す成長基板 4 6 からプロセスを開始する。成長基板 4 6 は、例えば、SiC 基板、又はサファイア基板でもよい。次に、図 5 B に示すように、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 の Fe ドープ部分 3 4 が、成長基板 4 6 上に成長する。この実施形態では、成長方法は MOCVD とする。上記で論じたように、Fe ドープ部分 3 4 のドーピング濃度は、好ましくは  $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で、 $10^{17}$  個及び  $10^{19}$  個を含む  $10^{17}$  個から  $10^{19}$  個までの範囲であり、Fe ドープ部分 3 4 の厚さは、好ましくは 0.5 及び 10  $10$  マイクロメートルを含む 0.5 から 10 マイクロメートルまでの範囲であり、より好ましくは、1 及び 10 マイクロメートルを含む 1 から 10 マイクロメートルまでの範囲である。Fe ドーピング濃度は、Fe ドープ部分 3 4 の厚さにわたって一定であってもよく、Fe ドープ部分 3 4 の厚さにわたって変化してもよい。

【 0 0 2 8 】

次に、図 5 C に示すように、C ドープ部分 3 6 を成長させるために Fe ドーピングを停止させ、C ドーピングを開始させる。ここでも上記で論じたように、C ドープ部分 3 6 の C のドーピング濃度は、好ましくは  $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で  $10^{18}$  個より多く（例えば、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で、 $10^{18}$  個及び  $10^{20}$  個を含む  $10^{18}$  個から  $10^{20}$  個までの範囲）、より好ましくは、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で  $10^{19}$  個より多い（例えば、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で、 $10^{19}$  個及び  $10^{20}$  個を含む  $10^{19}$  個から  $10^{20}$  個までの範囲）。C ドープ部分 3 6 の厚さは、C ドープ部分 3 6 の残留 Fe ドーピングを許容レベル（例えば、 $1 \text{ cm}^3$ あたりの原子数で  $10^{16}$  個未満）まで低減させるのに十分大きく、且つ、許容できない量の欠陥が生じない程度に十分小さい。次に、図 5 D に示すように、C ドーピングが停止され、チャネル部分 3 2 が成長させられる。チャネル部分 3 2 の厚さは、ゼロ（0）（つまり、チャネル部分 3 2 がない状態）から約 0.6 ミクロンまでの範囲であり得る。

【 0 0 2 9 】

ひとたび半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 の成長が完了すると、図 5 E に示すように、半絶縁性 GaN バッファ層 2 8 の上で、チャネル部分 3 2 に隣接して、AlGaN バリア層 3 8 が成長させられる。図 5 F に示すように、AlGaN バリア層 3 8 の上には、ソースコンタクト 4 0、ゲートコンタクト 4 2、及びドレインコンタクト 4 4 が形成される。最後に、図 5 G に示すように、HEMT 2 6 が成長基板 4 6 から取り外される。なお、個別の実施に応じて、プロセスの早い段階で成長基板 4 6 が取り外されてもよい。また、HEMT 2 6 が、図示されない別の層を備えてもよいことを述べておく。

【 0 0 3 0 】

当業者は、本開示の好ましい実施形態の改良及び変更を見出すであろう。このような改良及び変更は全て、本明細書及び添付の請求項に開示する概念の範囲のものであると考えられる。

【図1】

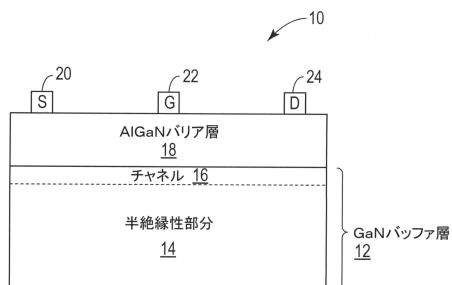


FIG. 1

【図2 A - 2 B】

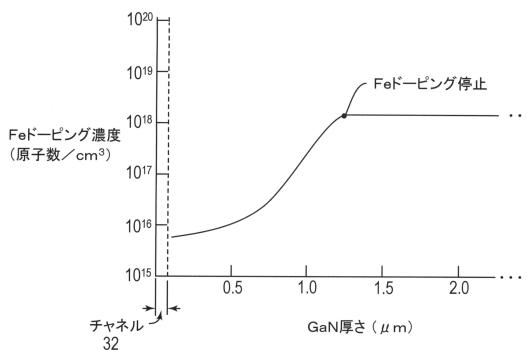


FIG. 2A

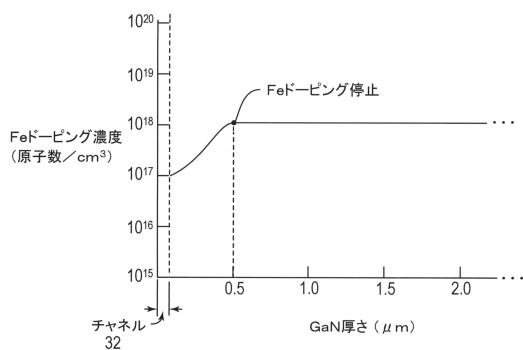


FIG. 2B

【図3】

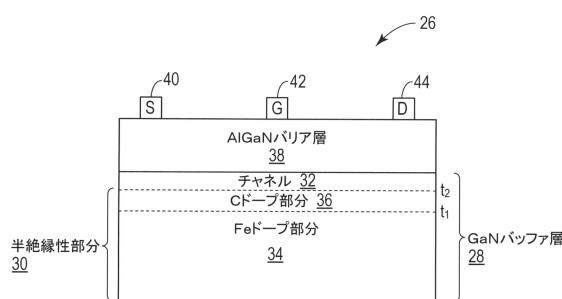


FIG. 3

【図4】

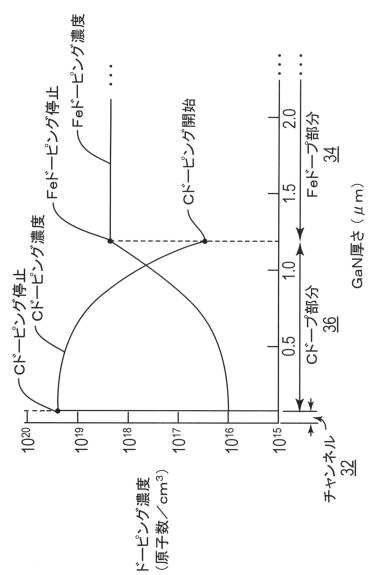


FIG. 4

【図5 A】



FIG. 5A

【図 5 B】



FIG. 5B

【図 5 E】

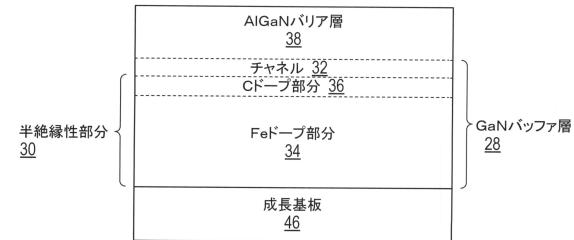


FIG. 5E

【図 5 C】

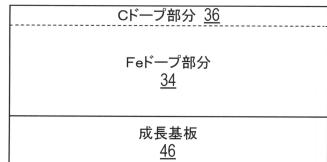


FIG. 5C

【図 5 F】

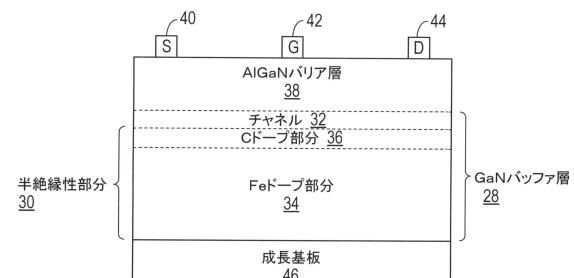


FIG. 5F

【図 5 D】

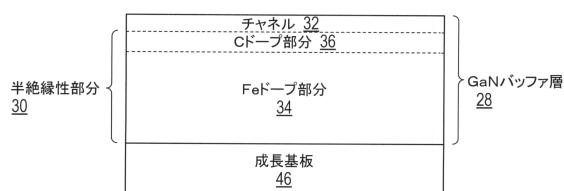


FIG. 5D

【図 5 G】

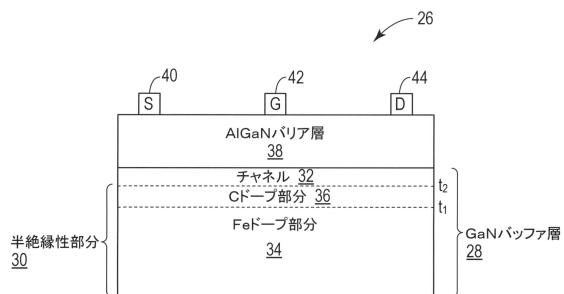


FIG. 5G

---

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I  
H 01 L 29/812 (2006.01)

(72)発明者 スリラム サプタリシ  
アメリカ合衆国 ノースカロライナ州 27513 ケーリー ティンバー ヒッチ ロード 1  
07

審査官 河合 俊英

(56)参考文献 特開2012-033646 (JP, A)  
特開2010-258441 (JP, A)  
特開2012-243886 (JP, A)  
特開2011-199222 (JP, A)  
特開2005-235935 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 01 L 21/205  
C 30 B 25/16  
C 30 B 29/38  
H 01 L 21/338  
H 01 L 29/778  
H 01 L 29/812