

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5830274号
(P5830274)

(45) 発行日 平成27年12月9日(2015. 12. 9)

(24) 登録日 平成27年10月30日(2015. 10. 30)

(51) Int.Cl.

F I

H O 1 L 29/786 (2006.01)

H O 1 L 29/78 6 1 8 E

H O 1 L 29/78 6 1 8 B

請求項の数 2 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2011-132842 (P2011-132842)
 (22) 出願日 平成23年6月15日(2011. 6. 15)
 (65) 公開番号 特開2012-23352 (P2012-23352A)
 (43) 公開日 平成24年2月2日(2012. 2. 2)
 審査請求日 平成26年3月31日(2014. 3. 31)
 (31) 優先権主張番号 特願2010-136705 (P2010-136705)
 (32) 優先日 平成22年6月16日(2010. 6. 16)
 (33) 優先権主張国 日本国(JP)

(73) 特許権者 000153878
 株式会社半導体エネルギー研究所
 神奈川県厚木市長谷398番地
 (72) 発明者 竹村 保彦
 神奈川県厚木市長谷398番地 株式会社
 半導体エネルギー研究所内

審査官 宇多川 勉

(56) 参考文献 特開2009-231613 (JP, A)
)
 特開2009-170905 (JP, A)
)

(58) 調査した分野(Int.Cl., DB名)
 H O 1 L 29/786

(54) 【発明の名称】 電界効果トランジスタ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

インジウムを主要成分とする第1の酸化物半導体よりなる第1の半導体層と、
 前記第1の半導体層の一方の面に接して設けられ、前記第1の酸化物半導体よりもバンドギャップが大きく、酸素以外の元素におけるガリウムの比率が80%以上でありI型である第2の酸化物半導体よりなる第2の半導体層と、
 前記第1の半導体層の他方の面に接して設けられ、前記第1の酸化物半導体よりもバンドギャップが大きく、酸素以外の元素におけるガリウムの比率が80%以上でありI型である第3の酸化物半導体よりなる第3の半導体層と、
 前記第1の半導体層の他方の面側に設けられたゲート電極として機能する導電層と、
 前記導電層と前記第3の半導体層の間に、ゲート絶縁膜として機能する絶縁層と、
 ソース電極と、ドレイン電極と、を有し、
 前記ソース電極及び前記ドレイン電極は、前記第1の半導体層の一方の面に接して設けられ、

前記第2の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差が、前記第1の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差よりも大きく、

前記第3の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差が、前記第1の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差よりも大きいことを特徴とする電界効果トランジスタ。

【請求項 2】

10

20

インジウムを主要成分とする第 1 の酸化物半導体よりなる第 1 の半導体層と、
前記第 1 の半導体層の一方の面に接して設けられ、前記第 1 の酸化物半導体よりもバンドギャップが大きく、I 型である第 2 の酸化物半導体よりなる第 2 の半導体層と、
前記第 1 の半導体層の他方の面に接して設けられ、前記第 1 の酸化物半導体よりもバンドギャップが大きく、I 型である第 3 の酸化物半導体よりなる第 3 の半導体層と、
前記第 1 の半導体層の他方の面側に設けられたゲート電極として機能する導電層と、
前記導電層と前記第 3 の半導体層の間に、ゲート絶縁膜として機能する絶縁層と、
ソース電極と、ドレイン電極と、を有し、
前記ソース電極及び前記ドレイン電極は、前記第 1 の半導体層の一方の面に接して設けられ、

10

前記第 2 の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差が、前記第 1 の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差よりも大きく、

前記第 3 の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差が、前記第 1 の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差よりも大きいことを特徴とする電界効果トランジスタ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、酸化物半導体を用いた電界効果トランジスタ (FET) に関する。

【背景技術】

20

【0002】

電界効果トランジスタ (FET) とは、半導体にソース、ドレインという領域を設け、それぞれに電極を設けて、電位を与え、絶縁膜あるいはショットキーバリアを介してゲートとよばれる電極より半導体に電界をかけ、半導体の状態を制御することにより、ソースとドレイン間に流れる電流を制御するものである。用いられる半導体としては、珪素やゲルマニウム等の IV 族元素 (14 族元素とも言う) やガリウムヒ素、インジウムリン、窒化ガリウム等の III-V 族化合物、硫化亜鉛、カドミウムテルル等の II-VI 族化合物等が挙げられる。

【0003】

近年、酸化インジウム (特許文献 1)、酸化亜鉛 (特許文献 2、4) や酸化インジウムガリウム亜鉛系化合物 (特許文献 3) 等の酸化物を半導体として用いた FET が報告された。これらの酸化物半導体を用いた FET では、比較的大きな移動度が得られると共に、これらの材料が 3 電子ボルト以上の大きなバンドギャップを有するが故に、酸化物半導体を用いた FET をディスプレイやパワーデバイス等に応用することが検討されている。

30

【0004】

特に、酸化亜鉛や酸化インジウムガリウム亜鉛系化合物を用いた FET の電界効果移動度が最大でも $20 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ であるのに対し、酸化インジウムを主成分に用いた FET では $50 \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ 以上もの電界効果移動度が報告されている。経験的に酸化物におけるインジウムの比率の高いもので、より高い電界効果移動度が得られることが明らかとなっている。

40

【0005】

一般に、亜鉛もしくはインジウムを主要成分 (含まれる元素のうち原子番号が 11 以上の元素の比率を比較し、その比率が 50 原子% 以上を占める元素を主要成分という) とする酸化物半導体においては、これまで、P 型の導電性を示すものはほとんど報告されていない。そのため、珪素の FET のような PN 接合を用いたものは報告されておらず、特許文献 1 乃至特許文献 4 にあるように、N 型あるいは I 型 (本明細書では、キャリア濃度が $1 \times 10^{14} / \text{cm}^3$ 以下の半導体を I 型という) の酸化物半導体に導電性電極を接触させた金属半導体接合によって、ソース、ドレインを形成していた。

【0006】

図 7 (A) には従来の酸化物半導体を用いた FET の例を示す。ここで、酸化物半導体よ

50

りなる半導体層 1 1 の一方の面に接してゲート絶縁膜 1 4 と、さらにその上にゲート 1 5 が設けられる。また、半導体層 1 1 の他方の面には、ソース電極 1 3 a、ドレイン電極 1 3 b が設けられる。

【 0 0 0 7 】

半導体層 1 1 の厚さについては、多くの場合、特別に考慮されることはなかった。また、ゲート絶縁膜 1 4 の材料としては、酸化珪素、窒化珪素等が用いられ、また、その厚さも特別に考慮されることはなかった。ソース電極 1 3 a、ドレイン電極 1 3 b の材料としても、特別に考慮されることはなく、チタン、モリブデン等が報告されている。

【 0 0 0 8 】

実際には、半導体層 1 1 に接して、図 7 (B) に示すような保護絶縁膜 1 6 が設けられる。その材料としては、ゲート絶縁膜 1 4 に用いられているような材料が用いられる。

10

【 0 0 0 9 】

一般に、F E T においては、ソース電極と半導体層、あるいはドレイン電極と半導体層の接合部ではオーミック接合であることが好まれる。その目的のためには、ソース電極 1 3 a、ドレイン電極 1 3 b の材料としては、半導体層 1 1 に用いる酸化物半導体の電子親和力よりも仕事関数が小さな材料が好ましい。例えば、チタンやモリブデンの仕事関数は、酸化インジウムの電子親和力 (4 . 8 eV 程度) より小さいのでオーミックコンタクトを形成する上では好ましい。

【 0 0 1 0 】

また、これらの金属が半導体層 1 1 と接する部分では、金属から半導体層 1 1 への電子の注入がおこなわれるため、半導体層 1 1 の電子濃度が高くなる。このことは、特にチャネル長 (ソース電極 1 3 a とドレイン電極 1 3 b の間の距離) が 0 . 3 μ m 以下の短チャネル F E T では、電子濃度が高い領域がつながってしまうため F E T の特性の低下 (例えば、しきい値のマイナスシフトや S 値の上昇、オフ状態でもソースとドレインの間に電流が流れてしまう現象 (オフ電流)) の要因となる。

20

【 0 0 1 1 】

また、金属半導体接合によって、ソース、ドレインを形成した F E T では、用いる半導体のキャリア濃度が大きいとオフ電流が大きくなる。すなわち、ソースゲート間の電圧 (以下、ゲート電圧、という) を 0 V としても、ソースドレイン間に相当量の電流 (以下、ドレイン電流、という) が流れる (このような F E T 特性をノーマリーオンという) 。そこで、半導体中のキャリア濃度を低減させて、I 型とすることにより、オフ電流を低減し、ゲート電圧を 0 V としたときのドレイン電流を 1×10^{-9} A 以下、好ましくは、 1×10^{-12} A 以下、さらに好ましくは 1×10^{-15} A 以下とすることが望まれる。

30

【 0 0 1 2 】

しかしながら、酸化インジウム、あるいはインジウムを主要成分とする酸化物半導体は、酸素欠損が生じやすく、キャリア濃度を $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下とすることは困難であった。そのため、インジウムを主要成分とする酸化物半導体を用いた F E T は、高移動度であるもののノーマリーオンであり、その傾向はインジウムの濃度が高ければ高いほど顕著であり、例えば、酸化インジウムでは、ゲート電圧を - 1 0 V 以下としなければ、ドレイン電流を 1×10^{-9} A 以下にできない。

40

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 1 3 】

【 特許文献 1 】 特開平 5 - 2 5 1 7 0 5

【 特許文献 2 】 米国特許公開 2 0 0 5 / 0 1 9 9 8 7 9 号公報

【 特許文献 3 】 米国特許公開 2 0 0 7 / 0 1 9 4 3 7 9 号公報

【 特許文献 4 】 米国特許公開 2 0 0 9 / 0 2 8 3 7 6 3 号公報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 1 4 】

50

本発明は、以下の課題のうち少なくとも一つを解決する。課題の一はインジウムを主要成分とする酸化物半導体を用いた高移動度かつノーマリーオフ（しきい値が0 V以上）あるいはそれに近い特性が得られるFETを提供することである。また、課題の一は酸素以外の元素におけるインジウムの比率が50%以上、好ましくは75%以上の酸化物半導体を用い、ノーマリーオフあるいはそれに近い特性が得られるFETを提供することである。また、課題の一はインジウムを主要成分とし、金属半導体接合を有する新規のFET、新規の半導体装置、新規のFETの製造方法、あるいは新規の半導体装置の製造方法のいずれかひとつを提供することである。

【0015】

なお、これらの課題の記載は、他の課題の存在を妨げるものではない。本発明の一態様は、これらの課題の全てを解決する必要はない。さらに、これら以外の課題は、明細書、図面、請求項などの記載から、自ずと明らかとなるものであり、明細書、図面、請求項などの記載から、これら以外の課題を抽出することが可能である。

【課題を解決するための手段】

【0016】

以下、本発明の説明をおこなうが、本明細書で用いる用語について簡単に説明する。なお、定義されていない文言（専門用語又は学術用語などの科学技術文言を含む）は、通常の当業者が理解する一般的な意味と同等の意味として用いることが可能である。辞書等により定義されている文言は、関連技術の背景と矛盾がないような意味に解釈されることが好ましい。また、発明の一態様は、専門用語によって、限定して解釈されるものではない。

【0017】

FETのソースとドレインについては、本明細書においては、Nチャネル型FETにおいては、高い電位を与えられる方をドレイン、他方をソースとし、Pチャネル型FETにおいては、低い電位を与えられる方をドレイン、他方をソースとする。いずれの電位もおなじであれば、いずれか一方をソース、他方をドレインとする。また、ソース電極、ドレイン電極という用語のかわりに第1の電極、第2の電極とも表現することがある。その場合は、電位の高低によって呼び名を変えない。

【0018】

また、本明細書で、主要成分とは、対象となる物体に含まれる元素のうち原子番号が11以上の元素の比率を比較し、その比率が50原子%以上を占める元素をいう。例えば、見かけの組成式が、 $Ga_3Al_2In_5O_{12}N_2$ で表示される化合物があるとすると、この化合物でもっとも多い元素は酸素（O）であるが、酸素の原子番号は8なので主要成分の対象とはならない。同様に窒素（N）も対象とはならない。主要成分の対象となるのはガリウム（Ga）、アルミニウム（Al）、インジウム（In）であり、その比率は、 $Ga:Al:In=3:2:5$ である。すなわち、主要成分の対象となる元素に対するガリウムの比率は30原子%、アルミニウムの比率は20原子%、インジウムの比率は50原子%である。したがって、上記の定義では、インジウムは主要成分であるが、ガリウムとアルミニウムは主要成分ではない。

【0019】

また、見かけの組成比、見かけの組成を有する化合物、見かけの化学式（あるいは見かけの組成式）とは、ある領域に存在する元素の比率、そのような元素の比率を有する物体、あるいは、そのような元素の比率に基づく化学式のことであり、その微視的なあるいは局所的な比率や物体の化学的な意味や安定性等は考慮されない。上記の例では、それらの元素が上記の比率を有する固溶体のこともあるし、1分子の Ga_2O_3 と2分子の AlN と2分子の In_2O_3 と1分子の $InGaO_3$ の混晶あるいは混合物の可能性もある。

【0020】

なお、本明細書等において、第1、第2、第3などの語句は、様々な要素、部材、領域、層、区域を他のものと区別して記述するために用いられる。よって、第1、第2、第3などの語句は、要素、部材、領域、層、区域などの数を限定するものではなく、また、順序を限定するものでもない。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 1 】

本発明の一態様は、インジウムを主要成分とする第 1 の酸化物半導体よりなる第 1 の半導体層と、前記第 1 の半導体層の一方の面に接して設けられ、前記第 1 の酸化物半導体よりもバンドギャップが大きく、I 型である第 2 の酸化物半導体よりなる第 2 の半導体層と、前記第 1 の半導体層の他の面に設けられたゲート電極としても機能する導電層とを有し、前記導電層と前記第 1 の半導体層の間には、ゲート絶縁膜としても機能する絶縁層を有し、前記第 2 の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差が、前記第 1 の酸化物半導体の真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差よりも大きいことを特徴とする F E T である。

【 0 0 2 2 】

10

また、本発明の一態様は、インジウムを主要成分とする第 1 の酸化物半導体よりなる第 1 の半導体層と、前記第 1 の半導体層の一方の面に接して設けられ、前記第 1 の酸化物半導体よりもバンドギャップが大きく、ガリウムを主要成分とする I 型の第 2 の酸化物半導体よりなる第 2 の半導体層と、前記第 1 の半導体層の他の面に設けられたゲート電極としても機能する導電層とを有し、前記導電層と前記第 1 の半導体層の間には、ゲート絶縁膜としても機能する絶縁層を有することを特徴とする F E T である。

【 0 0 2 3 】

また、本発明の一態様は、インジウムを主要成分とする第 1 の酸化物半導体よりなる第 1 の半導体層と、前記第 1 の半導体層の一方の面に接して設けられ、酸素以外の元素におけるガリウムの比率が 8 0 % 以上である I 型の第 2 の酸化物半導体よりなる第 2 の半導体層と、前記第 1 の半導体層の他の面に設けられたゲート電極としても機能する導電層とを有し、前記導電層と前記第 1 の半導体層の間には、ゲート絶縁膜としても機能する絶縁層を有することを特徴とする F E T である。

20

【 0 0 2 4 】

上記の各態様において、第 1 の半導体層の厚さは、後で説明する理由から 0 . 1 n m 以上 1 0 0 n m 以下であることが好ましい。また、第 2 の半導体層の厚さは、1 0 n m 以上 1 0 0 n m 以下であることが好ましい。

【 0 0 2 5 】

さらに、第 2 の半導体層は、第 1 の半導体層と接している面と反対の面に、アルミニウムを主要成分とするバンドギャップが 8 電子ボルト以上の酸化物よりなる絶縁膜が接して設けられていてもよい。

30

【 0 0 2 6 】

また、第 1 の半導体層は、第 2 の半導体層と接している面と反対の面に、アルミニウムを主要成分とするバンドギャップが 8 電子ボルト以上の酸化物よりなる絶縁膜が接して設けられていてもよい。

【 0 0 2 7 】

第 1 の酸化物半導体としては、インジウムを主要成分とする酸化物を適用できるが、例えば、構成する元素の 9 0 原子 % 以上、好ましくは 9 5 原子 % 以上が、インジウム、ガリウム、アルミニウム、亜鉛、酸素のいずれかであり、それらの見かけの組成式が $I n_a G a_b A l_c Z n_d O_e$ と表現できる材料を用いればよい。ここで、 $a + b + c + d = 2$ 、 a 40
1、2、 $5 < e < 3.5$ 、である。なお、移動度を高める目的では、インジウムの濃度が高い方が好ましく、 $a > 1.6$ とするとよい。同じ目的で、ガリウムの濃度はアルミニウムよりも高いことが好ましく、 $b > c$ 、より好ましくは、 $b > 10c$ とするとよい。

【 0 0 2 8 】

また、第 1 の酸化物半導体としては、インジウムを主要成分とし、酸素欠損が $1 \times 10^{18} / c m^3$ 以上である酸化物半導体を用いることもできる。

【 0 0 2 9 】

第 2 の酸化物半導体としては、各種の酸化物を適用できるが、例えば、構成する元素の 9 0 原子 % 以上、好ましくは 9 5 原子 % 以上が、インジウム、ガリウム、アルミニウム、亜鉛、酸素のいずれかであり、それらの見かけの組成式が $I n_a G a_b A l_c Z n_d O_e$ と 50

表現できる材料を用いればよい。ここで、 $a + b + c + d = 2$ 、 $b = 1$ 、 $2.5 < e < 3.5$ 、である。なお、第2の酸化物半導体をI型とする目的では、インジウムや亜鉛の濃度がアルミニウムよりも低いことが好ましく、 $a < c$ 、 $d < c$ 、より好ましくは、 $10a < c$ 、 $10d < c$ とするとよい。また、第2の酸化物半導体のバンドギャップは6電子ボルト以下であることが好ましい。

【0030】

第1の酸化物半導体および第2の酸化物半導体を上記のような組成の材料とすると、第2の酸化物半導体のバンドギャップは、第1の酸化物半導体のバンドギャップよりも大きくなる。

【0031】

また、第1の酸化物半導体は、上記の組成においてはN型となり、フェルミ準位は伝導帯の下端とほとんど同じであるので、真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差は、第1の酸化物半導体の電子親和力とほとんど同じである。

【0032】

一方、第2の酸化物半導体はI型であるので、フェルミ準位は伝導帯と価電子帯のほぼ中央に位置する。そして、第1の酸化物半導体および第2の酸化物半導体を上記のような組成の材料とすると第2の酸化物半導体の仕事関数は第1の酸化物半導体の電子親和力より大きいという関係を満足する。

【0033】

本発明の一態様は、図1(A)に示されるように、第1の酸化物半導体よりなる第1の半導体層1が、第2の酸化物半導体よりなる第2の半導体層2とゲート絶縁膜としても機能する絶縁膜4に挟まれた構造を有する。ここで、第1の半導体層1は第2の半導体層2に接していることが求められる。一方、第1の半導体層1と絶縁膜4とは、必ずしも接している必要はないが、接することによって後述するような効果が得られることがある。

【0034】

また、絶縁膜4は、ゲートとして機能する導電層5と第1の半導体層1に挟まれており、ゲート絶縁膜としても機能する。さらに、第1の半導体層1に接して、ソース電極やドレイン電極として機能する第1の電極3aと第2の電極3bが設けられる。

【0035】

第1の酸化物半導体および第2の酸化物半導体としては、上記に示した材料を用いればよい。また、第1の半導体層1の厚さは0.1nm以上100nm以下、第2の半導体層2の厚さは10nm以上100nm以下とすればよい。また、絶縁膜4としては、酸化珪素、酸化窒化珪素、酸化アルミニウム、酸化窒化アルミニウム、窒化アルミニウム等を用いればよいが、構成する元素の90原子%以上、好ましくは98原子%以上が珪素、アルミニウム、硼素、窒素、酸素のいずれかであり、それらの見かけの組成式が、 $Si_a Al_b B_c N_d O_e$ と表現できる材料を用いればよい。ここで、 $0.9 < (4a + 3b + 3c) / (3d + 2e) < 1.1$ であることが好ましく、 $b > a$ であることが好ましい。特に、第1の半導体層1と絶縁膜4が接している場合には、 $b > 5a$ であることが好ましい。

【0036】

なお、図1(B)に示されるように、第2の半導体層2が、第1の半導体層1と絶縁膜6で挟まれる構造としてもよい。ここで、絶縁膜6と第2の半導体層2は接していることが好ましい。絶縁膜6としては、酸化珪素、酸化窒化珪素、酸化アルミニウム、酸化窒化アルミニウム、窒化アルミニウム等を用いればよいが、構成する元素の90原子%以上、好ましくは98原子%以上が珪素、アルミニウム、硼素、窒素、酸素のいずれかであり、それらの見かけの組成式が、 $Si_a Al_b B_c N_d O_e$ と表現できる材料を用いればよい。ここで、 $0.9 < (4a + 3b + 3c) / (3d + 2e) < 1.1$ であることが好ましく、 $b > 10a$ 、 $d < 5e$ であることが好ましい。このような条件の材料では、バンドギャップを8電子ボルト以上とできる。

【0037】

また、図1(C)に示されるように、第1の半導体層1を第2の半導体層2aと、第3の

10

20

30

40

50

酸化物半導体よりなる第3の半導体層2bで挟まれる構成としてもよい。図1(C)が図1(A)と異なる点は、第3の半導体層2bが第1の半導体層1と絶縁膜4の間に挿入されている点である。ここで、第3の半導体層2bと絶縁膜4が接している必要はないが、第3の半導体層2bは第1の半導体層1と接していることが求められる。第3の酸化物半導体は、第2の酸化物半導体に適している材料を用いればよいし、第2の酸化物半導体と同じ材料を用いてもよい。また、第3の半導体層2bの厚さは0.1nm以上100nm以下、好ましくは、0.1nm以上20nm以下とするとよい。

【0038】

また、本発明の一態様は、図2(A)に示されるように、第1の酸化物半導体よりなる第1の半導体層1が、第2の酸化物半導体よりなる第2の半導体層2とゲート絶縁膜としても機能する絶縁膜4に挟まれた構造を有する。ここで、第1の半導体層1と絶縁膜4とは、必ずしも接している必要はないが、第1の半導体層1は第2の半導体層2に接していることが求められる。

10

【0039】

また、絶縁膜4は、ゲートとして機能する導電層5と第1の半導体層1に挟まれており、ゲート絶縁膜としても機能する。さらに、第1の半導体層1は、第1の酸化物半導体にドーピング処理を施すことにより導電性の高められた領域(ドーピングされた領域8a、8b)に接しており、また、ソース電極やドレイン電極として機能する第1の電極3aと第2の電極3bがドーピングされた領域8a、8bに設けられる。

【0040】

20

なお、第2の半導体層2に接して、第2の酸化物半導体にドーピングされた領域7a、7bが設けられる。第1の酸化物半導体および第2の酸化物半導体、絶縁膜4の材料としては、上記に示した材料を用いればよい。また、第1の半導体層1の厚さ、第2の半導体層2の厚さも上記に示したものを用いればよい。

【0041】

また、第1の電極3aと第2の電極3bは、図2(B)に示されるように、ドーピングされた領域8a、8bの、絶縁膜4が設けられる面と逆の面に設けられてもよい。また、ドーピングされた領域7a、7bの導電性が十分であれば、第1の電極3aと第2の電極3bはドーピングされた領域7a、7bに接するように設けられてもよい。また、第1の半導体層1を第2の半導体層2と第3の酸化物半導体よりなる第3の半導体層(図示せず)で挟まれる構成としてもよい。

30

【0042】

さらに、図2(C)に示されるように、第2の半導体層2が、第1の半導体層1と絶縁膜6で挟まれる構成としてもよい。ここで、絶縁膜6と第2の半導体層2は接していることが好ましい。絶縁膜6としては上記に示した材料を用いればよい。

【0043】

なお、図2(A)乃至図2(C)において、ドーピングされた領域7a、7b、8a、8bは特定の条件が満たされる場合には設けなくてもよい。例えば、図2(D)に示すように、第1の電極3aと導電層5との間の間隔x(あるいは第2の電極3bと導電層5との間の間隔)が50nm以下であれば、ドーピングされた領域7a、7b、8a、8b等を設けなくてもよい。

40

【発明の効果】

【0044】

上記の構成により、ノーマリーオフ特性あるいはそれに近い特性を示すFETが得られる理由について、図3を用いて説明する。最初に、上記のような条件を満たす第1の酸化物半導体と第2の酸化物半導体の接合を考える。図3(A)には接合する前の第1の酸化物半導体と第2の酸化物半導体の状態(バンド図)を示す。

【0045】

図3(A)の左側は、第1の酸化物半導体の、右側は第2の酸化物半導体の、それぞれバンド図を示す。第1の酸化物半導体は、典型的には、酸化インジウムのようなN型半導体

50

であり、キャリアである電子が伝導帯に供給されるため、フェルミ準位は、伝導帯の直下に存在する。図では、伝導帯とフェルミ準位とのエネルギー差を誇張して書いてあるが、実際には数mVほどしか変わらない。場合によっては、フェルミ準位の方が伝導帯の下端よりも上にあると分析されている。酸化インジウムのバンドギャップは3.7電子ボルト程度である。

【0046】

第2の酸化物半導体は、典型的には、酸化ガリウムのようなバンドギャップの広いI型半導体であり、キャリアはほとんど存在せず、フェルミ準位は、価電子帯と伝導帯のほぼ中央に存在する。単結晶の酸化ガリウムはバンドギャップが4.8電子ボルトであるが、非晶質の薄膜では4.2電子ボルトという数値が観測される。

10

【0047】

ここで、第1の酸化物半導体の電子親和力（真空準位と伝導帯の下端のエネルギー差）が第2の酸化物半導体の電子親和力より大きいことが求められる。好ましくは、前者と後者の差は0.3電子ボルト以上であるとよい。例えば、酸化インジウムの電子親和力4.8電子ボルトに対して、単結晶酸化ガリウムでは、電子親和力は3.5電子ボルト、非晶質酸化ガリウムでは4.3～4.5電子ボルトである。よって、酸化インジウムの電子親和力は酸化ガリウムよりも大きく、その差は0.3電子ボルト以上である。

【0048】

また、第2の酸化物半導体の仕事関数は第1の酸化物半導体の電子親和力よりも大きいことが好ましい。好ましくは、前者と後者の差は0.5電子ボルト以上であるとよい。例えば、仕事関数は、単結晶酸化ガリウムでは、5.5電子ボルト、非晶質酸化ガリウムでは6.4～6.6電子ボルトであり、いずれも酸化インジウムの電子親和力よりも大きく、その差は0.7電子ボルト以上である。

20

【0049】

このような物性の異なる第1の酸化物半導体と第2の酸化物半導体を接合すると、フェルミ準位を同じレベルに揃えようとキャリアの移動が起こり、図3(B)に示すように、接合部近傍のバンドがゆがめられる。すなわち、接合部近傍では、第1の酸化物半導体の伝導帯はフェルミ準位より離れ、価電子帯はフェルミ準位に近づく。このように、本来の状態とは異なる状態を呈する部分を遷移領域と呼ぶ。接合面から離れば、離れるほど、バンドの状態は、本来の第1の酸化物半導体および第2の酸化物半導体の特性に近づく。

30

【0050】

図3(B)では遷移領域でのみバンドのゆがみが直線的に生じているように描かれているが、実際には、かなりの距離にまでその影響が及び、バンドのゆがみも直線的なものではない。しかし、顕著に物性面で影響が現れるのは、接合面近傍の領域であるので、図3(B)で遷移領域以外の部分の半導体の物性は、それぞれの本来のものとみなして差し支えない。

【0051】

遷移領域の幅は、第1の酸化物半導体と第2の酸化物半導体の電子親和力、バンドギャップおよび誘電率、第1の酸化物半導体の電子濃度等に依存するが、例えば、第1の酸化物半導体として、電子濃度 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ の酸化インジウム、第2の酸化物半導体としてI型の酸化ガリウムを考えると、遷移領域として考えられる部分は、接合面から第1の酸化物半導体側に50nm程度の部分である。

40

【0052】

このような遷移領域は、第1の酸化物半導体の接合面近傍の電子が移動して、電子濃度が低下し、空乏化することによって形成される。したがって、特に遷移領域のうち、接合面に近い部分は電子濃度が低く、準I型という状態である。また、第2の酸化物半導体は、キャリア（電子）がほとんど存在しないため、その部分での電子の移動は無視でき、主として第1の酸化物半導体でバンドのゆがみが生じる。

【0053】

例えば、図3(B)の例では、接合面における第1の酸化物半導体の伝導帯下端とフェル

50

ミ準位の間のエネルギー差は1.3電子ボルト程度である。これだけのエネルギー差があれば室温で熱励起する電子は無視できる。すなわち、接合面近傍では極めて電子濃度が低い状態となる。

【0054】

このようなバンドのゆがみは第2の半導体層2の仕事関数と第1の半導体層1の電子親和力の差に依存し、前者から後者を差し引いた差が0.5電子ボルト以上であることが好ましく、前者と後者の差が1電子ボルト以上であるとさらに好ましい。

【0055】

また、第1の酸化物半導体の電子親和力が第2の酸化物半導体の電子親和力より大きいと、図3(B)に示すように、第1の酸化物半導体と第2の酸化物半導体との接合面において、伝導帯に不連続点(ギャップ、ステップ)が発生する。このような不連続点があると、第1の酸化物半導体がFETのチャネルとして使用されている際に、第1の酸化物半導体にある電子が第2の酸化物半導体に移ることが困難となる。すなわち、遷移領域の特に接合面近傍をチャネルとして用いる場合には、第2の酸化物半導体に電子が流れることを考慮する必要がない。

10

【0056】

ところで、このような遷移領域は、接合面における化学反応が無いと仮定すると、電子濃度が低いということ以外は、電界効果移動度を含む第1の酸化物半導体の物性のほとんどを維持していると考えられる。したがって、第1の酸化物半導体として、電界効果移動度の高い材料を用いれば、遷移領域では電子濃度が低く電界効果移動度が高いという特性が得られる。

20

【0057】

図3(B)では、第1の酸化物半導体の厚さが十分にある例を示したが、第1の酸化物半導体を薄膜化して、その厚さを遷移領域と同じあるいはそれ以下としても事情は変わらず、接合面近傍では、準I型領域が形成される。

【0058】

すなわち、第1の酸化物半導体の厚さを遷移領域と同じあるいはそれ以下とすることにより、第1の酸化物半導体の電子濃度を低減できる。かつ、電界効果移動度は、第1の酸化物半導体本来のものである。そのため、このような構造を用いてFETを作製すると、ノーマリーオフあるいはそれに近い特性の高電界効果移動度を達成できる。

30

【0059】

図3(C)は、図1(B)に示すFETの点Aから点Bに到る断面でのバンド図を模式的に描いたものである。ここで、第1の半導体層1を構成する第1の酸化物半導体として酸化インジウムを、第2の半導体層2を構成する第2の酸化物半導体としては酸化ガリウムを、絶縁膜4および絶縁膜6としては酸化アルミニウムを、導電層5としてタングステンを用いた場合を示す。

【0060】

図3(C)に示されるように、第1の半導体層1は、N型の酸化インジウム等の酸化物半導体を用いても、そのほとんどの部分を準I型領域とすることができる。準I型領域における電子濃度を直接、観察することは困難であるが、 $1 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 以下とすることが可能と算出される。したがって、このような構造のFETのしきい値を十分に大きな値とすることができる。すなわち、ノーマリーオフあるいはそれに近い特性を呈するFETが得られる。

40

【0061】

また、図3(C)を注意深く観察すると、第1の半導体層1は、絶縁膜4との界面近傍でもバンドがゆがんでいる。これは、上記に示した酸化ガリウムと酸化インジウムの接合面で遷移領域が生じるのと同じ理由により生じている。このようなバンドのゆがみを有するFETでは、キャリアは伝導帯の下端近傍を流れるので、キャリアは第1の半導体層1と絶縁膜4の界面からやや離れた(典型的には1nm以上10nm以下)部分を流れることとなる。

50

【0062】

通常のMISFETでも、ゲート絶縁膜と半導体との界面にはトラップ準位等が発生し、FETの特性を劣化させるが、キャリアがゲート絶縁膜から離れた部分を流れる構造（埋め込みチャネル）とすることにより、上記界面による影響を低減できる。同じ理由で、図3（C）にバンド図が示される構造のFETでは、絶縁膜4と第1の半導体層1との界面の影響を低減できる。

【0063】

なお、このようなバンドのゆがみは絶縁膜4の仕事関数（絶縁膜4は通常、I型と見なせるので、仕事関数とは、真空準位とフェルミ準位の差に相当する）と第1の半導体層1の電子親和力の差に依存し、図3（C）のようなゆがみとするには、前者が後者より大きいことが好ましく、前者と後者の差が1電子ボルト以上であることがさらに好ましい。

10

【0064】

N型の酸化インジウムの電子親和力は4.8電子ボルト程度であるのに対し、酸化アルミニウムの仕事関数は、5.7電子ボルトであり、酸化珪素の仕事関数は5.1電子ボルトである。したがって、酸化アルミニウムの方が上記の目的に適している。さらに、非晶質酸化ガリウムの仕事関数は、6.4～6.6電子ボルトであるので、酸化インジウムの電子親和力より1.6～1.8電子ボルト大きく、より好ましい。そのため、図1（C）に示すように、酸化インジウム等の第1の半導体層1を酸化ガリウム等の第2の半導体層2aおよび第3の半導体層2bで挟んでもよい。

20

【図面の簡単な説明】

【0065】

【図1】本発明のFETの例を示す図である。

【図2】本発明のFETの例を示す図である。

【図3】本発明のFETの原理を示す図である。

【図4】実施の形態1のFETの作製工程を示す図である。

【図5】実施の形態2のFETの作製工程を示す図である。

【図6】実施の形態3のFETの作製工程を示す図である。

【図7】従来のFETの例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0066】

30

以下、実施の形態について図面を参照しながら説明する。但し、実施の形態は多くの異なる態様で実施することが可能であり、趣旨及びその範囲から逸脱することなくその形態及び詳細を様々に変更し得ることは当業者であれば容易に理解される。従って本実施の形態の記載内容に限定して解釈されるものではない。なお、以下に説明する構成において、同様のものを指す符号は異なる図面間で共通の符号を用いて示し、同一部分又は同様な機能を有する部分の詳細な説明は省略する。

【0067】

（実施の形態1）

本実施の形態では、FETの作製方法について図4（A）乃至図4（F）を用いて説明する。まず、図4（A）に示すように、基板101上に、導電層102を形成する。基板101としては、様々なものが用いられるが、その後の処理に耐えられる物性を有していることが必要である。また、その表面は絶縁性であることが好ましい。すなわち、基板101は絶縁体単独、あるいは絶縁体や金属や半導体の表面に絶縁層を形成したもの等であることが好ましい。

40

【0068】

絶縁体としては、各種ガラスやサファイヤ、石英、セラミックス、プラスチック等を用いることができる。金属としては、アルミニウム、銅、ステンレス鋼、銀等を用いることができる。半導体としては、珪素、ゲルマニウム、炭化珪素、窒化ガリウム等を用いることができる。本実施の形態では、基板101としてバリウム硼珪酸ガラスを用いる。

【0069】

50

導電層 102 は、その一部がゲートとして機能するので、その材料としては、白金、金、タングステン等の仕事関数の大きな金属を用いるとよい。導電層 102 はそのような材料単独で構成してもよいし、多層構造とし、後に設けられる半導体層に面する部分を、上記の材料で構成してもよい。本実施の形態では、厚さ 100 nm のチタン膜上に厚さ 100 nm のタングステン膜をスパッタリング法で形成し、これをエッチングして、導電層 102 を形成する。

【0070】

次に、図 4 (B) に示すように、絶縁膜 103 と第 1 の酸化物半導体膜 104 を形成する。絶縁膜 103 はゲート絶縁膜としても機能する。例えば、酸化珪素、酸化アルミニウム、酸化窒化珪素、窒化アルミニウム、酸化窒化アルミニウム、酸化ハフニウム、酸化ランタン、酸化イットリウム等を用いればよい。また、その厚さは主として、プロセス上の事情や FET で使用される電圧を考慮して決定されるが、可能な限り薄い方が FET の特性をノーマリーオフあるいはそれに近い特性とする上で好ましい。例えば、10 nm 乃至 200 nm とするとよい。成膜方法としては、CVD 法あるいはスパッタリング法が用いられるが、膜中の水素の混入を可能な限り低減することが好ましい。

10

【0071】

第 1 の酸化物半導体膜 104 の材料としては、酸化インジウムを用いる。もちろん、その他のインジウムを主要成分とする酸化物半導体を用いてもよい。また、その成膜方法はスパッタリング法を用いればよい。さらに、膜中の水素の混入を可能な限り低減することが好ましい。その厚さは 10 nm 乃至 50 nm とするとよい。なお、絶縁膜 103 の表面を大気に曝すことなく、第 1 の酸化物半導体膜 104 を形成すると、両者の界面の清浄度を向上させる上で好ましい。

20

【0072】

第 1 の酸化物半導体膜 104 上に、第 2 の酸化物半導体膜を形成する。第 2 の酸化物半導体膜としては、酸化ガリウムを用いる。もちろん、その他のガリウムを主要成分とする酸化物半導体を用いてもよい。また、その成膜方法はスパッタリング法を用いればよい。さらに、膜中の水素の混入を可能な限り低減することが好ましい。スパッタリング法によって形成された酸化ガリウム膜の組成をラザフォード後方散乱法により分析すると、見かけの組成は酸素が過剰に存在するような結果が得られる。すなわち、 Ga_2O_{3+x} において、 x が 0.01 以上 0.15 以下の値を取る。

30

【0073】

第 2 の酸化物半導体膜の厚さは 10 nm 乃至 100 nm とするとよい。また、第 2 の酸化物半導体膜上に、エッチングストッパとなるような材料の膜を設けてもよい。あるいは、第 2 の酸化物半導体膜上に、層間絶縁物となるような絶縁膜を設けてもよい。

【0074】

なお、第 1 の酸化物半導体膜 104 の表面を大気に曝すことなく、第 2 の酸化物半導体膜を形成すると、両者の界面の清浄度を向上させる上で好ましい。さらには、絶縁膜 103、第 1 の酸化物半導体膜 104 および第 2 の酸化物半導体膜を連続的に形成すると、これらの界面の清浄度を向上させる上で好ましい。

【0075】

その後、第 2 の酸化物半導体膜を選択的にエッチングして、第 2 の半導体層 105 を島状に形成する。第 2 の半導体層 105 の一部は、図 4 (C) に示すように、導電層 102 上に形成されるようにするとよい。また、図示していないが、第 2 の半導体層 105 の他の部分は導電層 102 と重ならないように設けてもよい。また、第 2 の半導体層 105 が、導電層 102 が上層の配線と交差する部分に設けられていると、層間絶縁物としての機能も有する。

40

【0076】

また、第 2 の酸化物半導体膜上に、別途、厚い絶縁膜を設け、第 2 の半導体層 105 上に残しておく、それを、導電層 102 が上層の配線と交差する部分で層間絶縁物としての使用することもできる。

50

【0077】

第2の半導体層105はエッチングストッパとしても機能する。なお、第2の酸化物半導体膜をエッチングするに際しては、アルカリ性の溶液（例えば、アンモニア過水等）を用いればよい。第1の酸化物半導体膜104として酸化インジウムを用いた場合には、酸化インジウムのアルカリ性溶液への溶解度は著しく低いので、選択的に第2の酸化物半導体膜をエッチングできる。

【0078】

その後、第1の酸化物半導体膜104および第2の半導体層105上に、導電膜106を形成する（図4（D）参照）。導電膜106は、後にFETのソース電極あるいはドレイン電極としての機能も必要とされるので、その目的に適した材料を用いて構成する。例えば、チタン、モリブデン、窒化チタン、窒化モリブデン、タングステン等である。導電膜106はそのような材料単独で構成してもよいし、多層構造とし、第1の半導体層に接する部分を、上記の材料で構成してもよい。

10

【0079】

その後、導電膜106を選択的にエッチングして、導電層106a、導電層106bを形成する。このエッチングは、ウェットエッチングでもドライエッチングでもよい。いずれにしても、このエッチングに際して、第2の半導体層105を過剰にエッチングしないことが必要である。そのため、第2の半導体層105上にエッチングストッパを設けておく。また、このエッチングで、第1の酸化物半導体膜104をエッチングしてもよい。

20

【0080】

上記のエッチングで、第1の酸化物半導体膜104がエッチングできなかった場合には、引き続き、エッチング方法等を変えてエッチングをおこなう。この際には、第2の半導体層105のエッチングレートに比べて、第1の酸化物半導体膜104のエッチングレートが大きくなるような条件を採用する。例えば、このエッチングをウェットエッチングでおこなうのであれば、シュウ酸やリン酸を含むエッチャントを用いればよい。かくして、図4（E）に示すように、第1の半導体層104aを島状に形成する。

【0081】

その後、図4（F）に示すように、全面に酸化物絶縁膜107を形成する。酸化物絶縁膜107の材料としては、酸化珪素、酸化アルミニウム、酸化窒化珪素、窒化アルミニウム、酸化窒化アルミニウム、酸化ハフニウム、酸化ランタン、酸化イットリウム等を用いればよい。また、その厚さは10nm以上1μm以下とすることができる。酸化物絶縁膜107に保護膜としての機能も要求するのであれば、厚い方が好ましい。

30

【0082】

（実施の形態2）

本実施の形態では、FETの作製方法について図5（A）乃至図5（E）を用いて説明する。まず、図5（A）に示すように、基板201上に、導電膜202と絶縁膜203、第1の酸化物半導体膜204、第2の酸化物半導体膜205、酸化物絶縁膜206を積層する。これらの成膜は、膜の界面を清浄に保つため、途中で大気に曝すことなく連続的におこなうとよい。また、これらの多層膜中の水素濃度を 1×10^{18} 原子/cm³以下、好ましくは 1×10^{16} 原子/cm³以下とするためにも、連続的に成膜することは効果的である。

40

【0083】

基板201、導電膜202、絶縁膜203、第1の酸化物半導体膜204、第2の酸化物半導体膜205、酸化物絶縁膜206としては、実施の形態1において、それぞれ、基板101、導電層102、絶縁膜103、第1の酸化物半導体膜104、第2の酸化物半導体膜、酸化物絶縁膜107に用いるのに適しているとして示された材料、厚さおよび成膜方法で形成すればよい。

【0084】

そして、酸化物絶縁膜206上にレジストを塗布し、図5（A）に示すように、多階調マ

50

スクを用いて、２段階の厚さを有するレジストマスク２０７を形成する。

【００８５】

レジストマスク２０７を用いて、導電膜２０２、絶縁膜２０３、第１の酸化物半導体膜２０４、第２の酸化物半導体膜２０５、酸化物絶縁膜２０６をエッチングして、導電層２０２ａ、絶縁層２０３ａ、第１の半導体層２０４ａ、第２の半導体層２０５ａ、酸化物絶縁層２０６ａを形成する（図５（Ｂ）参照）。これらのエッチングには異方性ドライエッチング法を用いることが好ましいが、ウェットエッチング法でも、等方的なドライエッチング法でもよい。

【００８６】

次にレジストマスク２０７をアッシングして、その厚さを減らし、レジストマスク２０７

10

【００８７】

そして、このレジストマスク２０７ａを用いて、絶縁層２０３ａ、第１の半導体層２０４ａ、第２の半導体層２０５ａ、酸化物絶縁層２０６ａをエッチングして、絶縁層２０３ｂ、第１の半導体層２０４ｂ、第２の半導体層２０５ｂ、酸化物絶縁層２０６ｂを、概略同形状かつ島状に形成する（図５（Ｄ）参照）。これらのエッチングには異方性ドライエッチング法を用いることが好ましいが、ウェットエッチング法でも、等方的なドライエッチング法でもよい。

【００８８】

導電層２０２ａは必ずしもエッチングする必要はないが、上記のエッチングの際に全くエッチングされない条件を見いだすことは難しいので、多少の差はあれエッチングされ、表面の一部がエッチングされた導電層２０２ｂとなる。特に、エッチングの選択比を十分に大きくできない場合には、導電膜２０２を十分に厚くしておくといよい。例えば、導電膜２０２の厚さを２００ｎｍ以上１μｍ以下とするとよい。

20

【００８９】

あるいは、導電膜２０２の厚さを、絶縁膜２０３の厚さと第１の酸化物半導体膜２０４の厚さと第２の酸化物半導体膜２０５の厚さと酸化物絶縁膜２０６の厚さの和の５０％以上５００％以下としてもよい。このように導電膜２０２が十分に厚ければ、多少のオーバーエッチングがあったとしても、必要な厚さを確保できる。

【００９０】

本実施の形態では、導電膜２０２が厚くても、その後に積層される薄膜の形状に影響を与えることは少なく、むしろ、導電膜２０２を厚くすると、導電層２０２ｂの抵抗が低く抑制されるというメリットがある。

30

【００９１】

その後、レジストマスク２０７ａを除去する。この方法は剥離液を用いてもよいが、酸化ガリウムはアルカリ性の溶液に溶解する性質もあるため、剥離液の水素イオン濃度は適切なものを選択する必要がある。

【００９２】

あるいは、レジストマスク２０７ａをアッシング法によって除去してもよい。アッシング法を使用する場合には、残渣が問題となることがあるが、本実施の形態では、残渣があったとしても、酸化物絶縁層２０６ｂ上であり、酸化物絶縁層２０６ｂを十分に厚くすれば、ＦＥＴ特性への影響は低減できる。特に、本実施の形態では、酸化物絶縁層２０６ｂは層間絶縁物としての機能もあるので、厚く形成する方が好ましい。

40

【００９３】

その後、平坦な表面を有する層間絶縁物２０８を形成して、層間絶縁物２０８、酸化物絶縁層２０６ｂ、第２の半導体層２０５ｂをエッチングして、第１の半導体層２０４ｂに達する開口部を設ける。開口部は、絶縁層２０３ｂと重なるように設ける。好ましくは、開口部は、その外周が絶縁層２０３ｂの外周から、２００ｎｍ以上、より好ましくは、１μｍ以上離れるように設ける。

【００９４】

50

開口部の形成にはウェットエッチング法、ドライエッチング法いずれをも用いることができる。なお、いずれの場合においても、エッチングに際して、第1の半導体層204bに化学的な影響を与えることがある。

【0095】

次に、導電膜を形成し、これを所望の形状にエッチングして導電層209a、209bを形成する。導電膜は、実施の形態1の導電膜106に用いるのに適した材料、厚さおよび成膜方法を用いて形成すればよい。

【0096】

導電層209a、209bは、第1の半導体層204bと接する部分においてFETのソース電極、ドレイン電極として機能する。この段階を図5(E)に示す。導電層209aと導電層209bが、それぞれ第1の半導体層204bと接する部分の間隔がFETのチャンネル長となる。

10

【0097】

なお、導電層209a、209bを形成した後、400以上の高温の処理をおこなう場合には、導電層209a、209bを構成する元素が、第1の半導体層204bに拡散し、その特性に悪影響を及ぼすことがある。したがって、導電層209a、209bを形成した後は、そのような高温での処理を避けることが好ましい。一方で、導電層209a、209bはFETの最終段階で形成されるので、その後高温での処理が必要となることはほとんど無い。

【0098】

20

また、第1の半導体層204bの端部(外周部)の特性は好ましいものでないことが多い。これらの領域は、しばしば導電性が他の部分よりも高く、例えば、図4(F)に示すような形状のFETにおいては、これらの領域はリーク電流の要因となり得た。それは、図4(F)に示すような形状のFETにおいては、第1の半導体層104aの端部とソース電極およびドレイン電極として機能する導電層106a、導電層106bが接しているためである。

【0099】

しかしながら、図5(E)に示されるFETにおいては、ソース電極やドレイン電極として機能する導電層209aと209bは上述の通り、第1の半導体層204bの端部と重ならないので、仮に、第1の半導体層204bの端部の導電性が高くとも、導電層209aと209bの間にリーク電流は流れない。そのため、オフ電流の十分に低いFETを得ることができる。

30

【0100】

また、図5(E)から明らかなように、第1の半導体層204bは平坦面に形成される。例えば、図4(F)の第1の半導体層104aのように、半導体層に凹凸があるとFETの特性は凹凸の影響を受ける。そのような凹凸を有する素子を均一に形成することは困難なため、FET特性のばらつきの原因となる。

【0101】

例えば、図4(E)においては、導電層106a、106bは第1の半導体層104aおよび導電層102に対して左右対称に設けられているが、全ての素子をこのような形状に形成することは困難である。マスクあわせの際の誤差のため、導電層106a、106bが、図の右側(あるいは左側)に少しだけ平行移動しても、導電層106a、106bと第1の半導体層104aの湾曲している部分との位置関係が異なり、FETとしての特性が変動することがある。すなわち、FETの特性のばらつきが生じる。

40

【0102】

特に第1の半導体層が何らかの結晶成分を含んでいる場合にはばらつきが大きくなる傾向がある。それは、第1の半導体層の平面部分と局面部分とで結晶の方位や大きさ等に大きな差があるためである。そのような結晶成分は、酸化インジウムでは比較的低温でアニールした場合でも生じる。

【0103】

50

これに対し、平坦な面上に、均一に平面状の半導体層を形成することは容易である。そして、マスクあわせの際の誤差のため、図5(E)の導電層209a、209bが、図の右側(あるいは左側)に少しだけ平行移動しても、第1の半導体層204bに対する位置関係は変わらない。すなわち、FETの特性のばらつきは限定的となる。

【0104】

したがって、本実施の形態で示したFETは半導体層の凹凸が大きなFETに比べて特性のばらつきが少ない。このようなFETは、しきい値ばらつきの小さいことが要求される回路に用いるのに好適である。

【0105】

例えば、アクティブマトリクス型有機エレクトロルミネッセンス表示装置では、表示のむらをなくすために、駆動トランジスタのしきい値のばらつきが小さいことが望まれる。また、抵抗損失を減らすため、駆動トランジスタの電界効果移動度の高いFETが望まれる。そのような目的には、図5(E)に示す構成を有し、インジウムを主要成分とする酸化物半導体を半導体層に用いて作製したFETが好適である。そのようなFETは、例えば、 $50\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上、好ましくは、 $70\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 以上の電界効果移動度が得られる。

【0106】

さらに、本実施の形態では、第1の半導体層204b、絶縁層203bは平坦面に設けられるのであるから、これらの薄膜の段差被覆性等を考慮する必要がない。このため第1の半導体層204b、絶縁層203bを可能な限り薄くできる。

【0107】

第1の半導体層204b、絶縁層203bを薄くすることは、FETのしきい値のマイナスシフトを抑制し、オフ電流を低減する上で効果がある。特にチャネル長が $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 以下のFETでは、第1の半導体層204b、絶縁層203bを薄くすることが求められる。

【0108】

FETのしきい値のマイナスシフトを抑制するには、 $(\text{チャネル長}) > 5 \times (\text{第1の半導体層204bの厚さ} + (\text{絶縁層203bの厚さ}) \times (\text{誘電率比}))$ 、という関係を満たすことが求められる。ここで、誘電率比は、第1の半導体層204bの誘電率を、絶縁層203bの誘電率で除した数値である。

【0109】

例えば、チャネル長 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ で、第1の半導体層204bの厚さを 30 nm 、第1の半導体層204bとして酸化インジウム(比誘電率18)、絶縁層203bとして酸化珪素(比誘電率4)を用いた場合、絶縁層203bの厚さを 10 nm 以下とすることが必要である。

【0110】

凹凸のある面にそのような薄膜を被覆性よく形成することは困難であり、歩留まりの低下の要因となる。一方、平坦面であれば比較的容易に形成できる。その点で、本実施の形態に示される構造のFETは有利である。

【0111】

なお、本実施の形態で示した作製工程では、必要なマスク合わせの回数は2回であり、図4に示す方法(3回のマスクあわせが必要)よりも少ない。そのため、ミスアライメントによる不良の確率を低減でき、歩留まりを向上させる上で効果がある。

【0112】

(実施の形態3)

本実施の形態では、FETの作製方法について図6(A)乃至図6(D)を用いて説明する。まず、図6(A)に示すように、基板301上に、酸化物絶縁膜302と第2の酸化物半導体膜303と第1の酸化物半導体膜304と絶縁膜305を積層する。これらの成膜は、それぞれの膜と膜の間の界面を清浄に保つため、途中で大気に曝すことなく連続的におこなうとよい。

10

20

30

40

50

【0113】

例えば、基板301として珪素ウェハ、酸化物絶縁膜302として厚さ200nmの酸化珪素、第2の酸化物半導体膜303として厚さ50nmの酸化ガリウム、第1の酸化物半導体膜304として厚さ1nmの酸化インジウム、絶縁膜305として厚さ2nmの酸化珪素を用いればよい。また、酸化物絶縁膜302は基板301を熱酸化して形成し、第2の酸化物半導体膜303、第1の酸化物半導体膜304、絶縁膜305は、原子積層法(ALD)により形成すればよい。これらの膜は成膜装置内で連続的に形成するとよい。

【0114】

そして、第2の酸化物半導体膜303、第1の酸化物半導体膜304、絶縁膜305を選択的にエッチングして、第2の半導体層303a、第1の半導体層304a、絶縁層305aを形成する。

10

【0115】

さらに、絶縁層305aの外周部を覆うように厚さ100nm以上500nm以下の酸化珪素等を用いて絶縁体306を形成する。そして、導電層307を形成する(図5(B)参照)。導電層307は、実施の形態1の導電層102を参考にその材料と作製方法を決定すればよい。なお、厚さは、第1の半導体層304aの厚さと絶縁層305aの厚さの和の2倍以上とするとよい。

【0116】

図示されていないが、導電層307が絶縁層305aの外周部において、絶縁体306を乗り越えるような形状となっている。そのため、導電層307は、第1の半導体層304aと直接、接触することはない。

20

【0117】

また、導電層307はFETのゲートとなるので、その幅はFETのチャネル長を決定する。ここでは、第1の半導体層304aの厚さと絶縁層305aの厚さに第1の半導体層304aと絶縁層305aの誘電率比(第1の半導体層304aの誘電率/絶縁層305aの誘電率)を乗じたものの和の5倍以上、好ましくは10倍以上とすると、しきい値のマイナスシフトを抑制し、オフ電流を低減できる。

【0118】

例えば、酸化インジウムの比誘電率は1.8程度であり、酸化珪素の比誘電率は4程度である(これらの値は成膜方法によって微妙に異なる)ので、誘電率比は4.5程度である。上記の膜厚から、導電層307の幅は、(第1の半導体層304aの厚さ1nm)+(絶縁層305aの厚さ2nm) $\times$ (誘電率比4.5)の5倍以上、好ましくは10倍以上であるとよい。すなわち、50nm以上、好ましくは、100nm以上とするとよい。

30

【0119】

上記の計算から明らかなように、絶縁層305aに高誘電率材料を用いれば、導電層307の幅をより狭くできる。例えば、酸化ハフニウムのように比誘電率が30程度のものであれば、導電層307の幅は10nm以上、好ましくは20nm以上とできる。

【0120】

通常の珪素半導体を使用したMOSFETと異なり、インジウムを主要成分とする酸化物半導体に接して酸化ハフニウムのような異種材料を形成しても、第1の半導体層304aと絶縁層305aとの界面の欠陥準位がFET特性にほとんど問題を及ぼさない。特に酸化ハフニウムの場合、その仕事関数(5.7電子ボルト)が、酸化インジウムの電子親和力(4.8電子ボルト)より大きいため、酸化インジウムのバンドがゆがめられ、埋め込みチャンネルのような形状になり、より一層、絶縁層305aと第1の半導体層304aの界面の影響が小さくなる。

40

【0121】

次に、還元性のイオンを照射する(図6(C)参照)。この際のイオンのエネルギーは、第1の半導体層304aと第2の半導体層303aの界面から第2の半導体層303aと酸化物絶縁膜302の界面の間にピークを有するように設定すればよい。この条件では、導電層307をイオンが透過することはないので、第1の半導体層304aおよび第2の

50

半導体層 303a に、導電層 307 をマスクとして、自己整合的にイオンが注入されることとなる。

【0122】

酸化インジウムを主要成分とする酸化物半導体に還元性のイオンを注入すると、イオンが酸素と化合して酸化物半導体を還元する。その結果、イオンが注入された部分の電子濃度が高くなり導電性が向上する。注入するイオンの量は、目的とする導電率に応じて設定すればよいが、第1の半導体層 304a 中に、 $2 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以上含まれるようにすればよい。

【0123】

還元性のイオンとしては硼素、炭素、リン、珪素、アルミニウム、ガリウムのように酸化物の結合力が酸化インジウムよりも強いものを用いればよい。なかでも、リンや硼素は、通常の半導体プロセスでも用いられているので使用しやすい。

10

【0124】

イオンの注入の際に注意すべきことは、同時に水素が注入されないことである。したがって、イオン源として水素化物（ジボラン B_2H_6 やホスフィン PH_3 等）を用いることは好ましくない。酸化物半導体中に導入された水素は、電子濃度を高めるが、同時に酸化物半導体中を移動して、FET の特性の変動をもたらすため、信頼性を低下させる。イオン中の水素の濃度は1原子%以下とすることが望まれる。

【0125】

なお、このイオン注入の際に、第2の半導体層 303a にもイオンが注入され、やはり、イオンによって酸化ガリウムが還元され、第2の半導体層 303a に導電率の高い領域 303b、303c が形成される。

20

【0126】

ここで、第2の半導体層 303a の厚さ（すなわち、第2の酸化物半導体膜 303 の厚さ）が薄すぎると、導電率が高くとも電気抵抗が十分に低減できないので、適切な厚さとしておくとよい。また、第2の半導体層 303a に注入されるイオンの濃度は、第1の半導体層 304a に注入されるイオンの濃度よりも大きくして、縮退半導体とすることが好ましい。例えば、第2の半導体層 303a 中に、 $5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以上含まれるようにすればよい。

【0127】

次に、例えば、200nm 以上 1 μm 以下の窒化珪素等で保護絶縁膜 308 をプラズマ CVD 法等で形成する。ここで、保護絶縁膜 308 は第1の半導体層 304a に圧縮するような応力を与えるような膜質であってもよい。このような応力があると第1の半導体層は圧縮され、酸化インジウム中のインジウム原子間の距離が縮められる。その結果、第1の半導体層の輸送特性（典型的には、電界効果移動度）が向上する

30

【0128】

さらに、厚さ 200nm 以上 2 μm 以下の酸化珪素等を堆積し、これを化学的機械的研磨法により平坦化して、平坦な表面を有する層間絶縁物 309 を得る。さらに、層間絶縁物 309、保護絶縁膜 308、絶縁層 305a をエッチングして、第1の半導体層 304a あるいは第2の半導体層 303a に達する開口部を形成する。そして、開口部を埋めるように導電層 310a、310b を形成する（図6（D）参照）。

40

【0129】

上述の通り、第1の半導体層 304a は厚さが1nm であるので、オーバーエッチングの結果、開口部が第1の半導体層 304a を貫通することもある。しかし、そのような場合であっても、第2の半導体層 303a の導電性が十分であるので、導電層 310a、310b は FET の電極として機能する。すなわち、導電層 310a - 第2の半導体層の導電率の高い領域 303b - 第1の半導体層 304a - 第2の半導体層の導電率の高い領域 303c - 導電層 310b、という経路で電流が流れる。

【0130】

なお、第2の半導体層 303a のオーバーエッチングを防止する上でも、第2の半導体層

50

303aは適切な厚さを有することが好ましい。本実施の形態では厚さを50nmとしたが、30nm以上であることが好ましい。

【0131】

(実施の形態4)

上記実施の形態1乃至実施の形態3で示した半導体装置は、さまざまな電子機器に用いることができる。例えば、液晶ディスプレイ、ELディスプレイ、FE(Field Emission)ディスプレイ等の表示装置およびその駆動回路、イメージセンサの駆動回路、半導体メモリ、マイクロプロセッサ等である。また、それらを用いた各種電子機器、例えば、テレビジョン、パーソナルコンピュータ、携帯電話等の通信機器、電子手帳、携帯音楽プレーヤ等である。

10

【符号の説明】

【0132】

1 第1の半導体層

2 第2の半導体層

2a 第2の半導体層

2b 第3の半導体層

3a 第1の電極

3b 第2の電極

4 絶縁膜

5 導電層

20

6 絶縁膜

7a ドーピングされた領域

7b ドーピングされた領域

8a ドーピングされた領域

8b ドーピングされた領域

11 半導体層

13a ソース電極

13b ドレイン電極

14 ゲート絶縁膜

15 ゲート

30

16 保護絶縁膜

101 基板

102 導電層

103 絶縁膜

104 第1の酸化物半導体膜

104a 第1の半導体層

105 第2の半導体層

106 導電膜

106a 導電層

106b 導電層

40

107 酸化物絶縁膜

201 基板

202 導電膜

202a 導電層

202b 導電層

203 絶縁膜

203a 絶縁層

203b 絶縁層

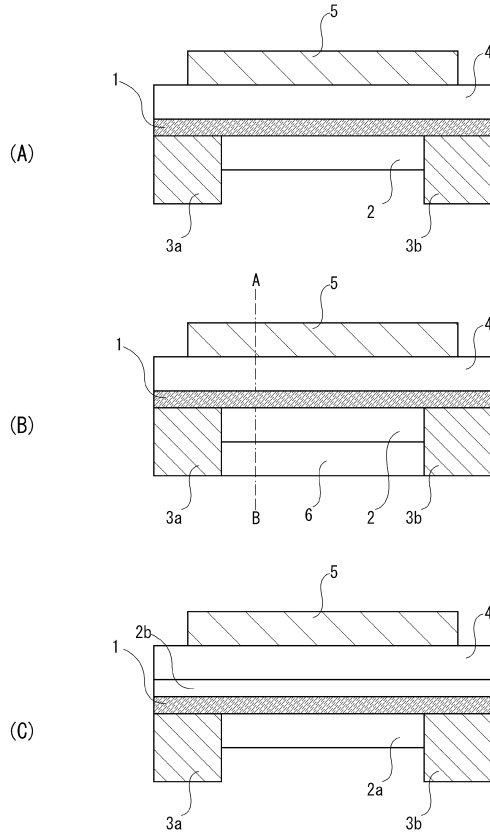
204 第1の酸化物半導体膜

204a 第1の半導体層

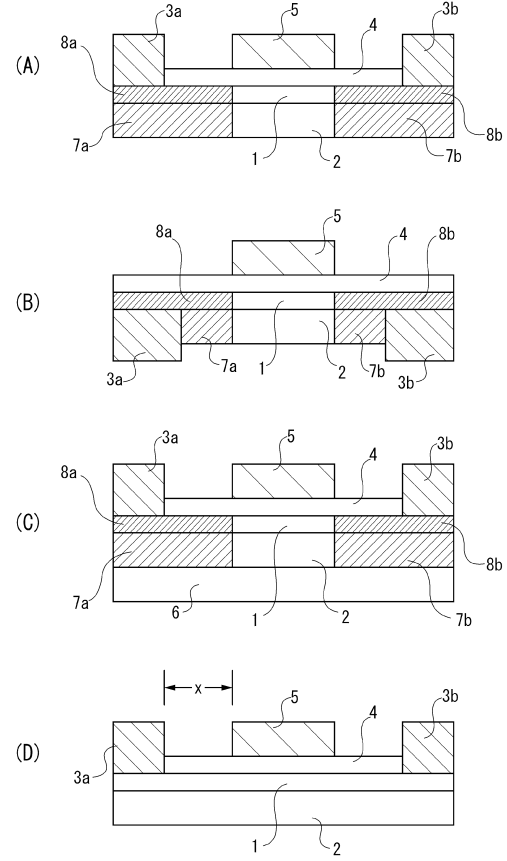
50

2 0 4 b	第 1 の半導体層	
2 0 5	第 2 の酸化物半導体膜	
2 0 5 a	第 2 の半導体層	
2 0 5 b	第 2 の半導体層	
2 0 6	酸化物絶縁膜	
2 0 6 a	酸化物絶縁層	
2 0 6 b	酸化物絶縁層	
2 0 7	レジストマスク	
2 0 7 a	レジストマスク	
2 0 8	層間絶縁物	10
2 0 9 a	導電層	
2 0 9 b	導電層	
3 0 1	基板	
3 0 2	酸化物絶縁膜	
3 0 3	第 2 の酸化物半導体膜	
3 0 3 a	第 2 の半導体層	
3 0 3 b	導電率の高い領域	
3 0 3 c	導電率の高い領域	
3 0 4	第 1 の酸化物半導体膜	
3 0 4 a	第 1 の半導体層	20
3 0 5	絶縁膜	
3 0 5 a	絶縁層	
3 0 6	絶縁体	
3 0 7	導電層	
3 0 8	保護絶縁膜	
3 0 9	層間絶縁物	
3 1 0 a	導電層	
3 1 0 b	導電層	

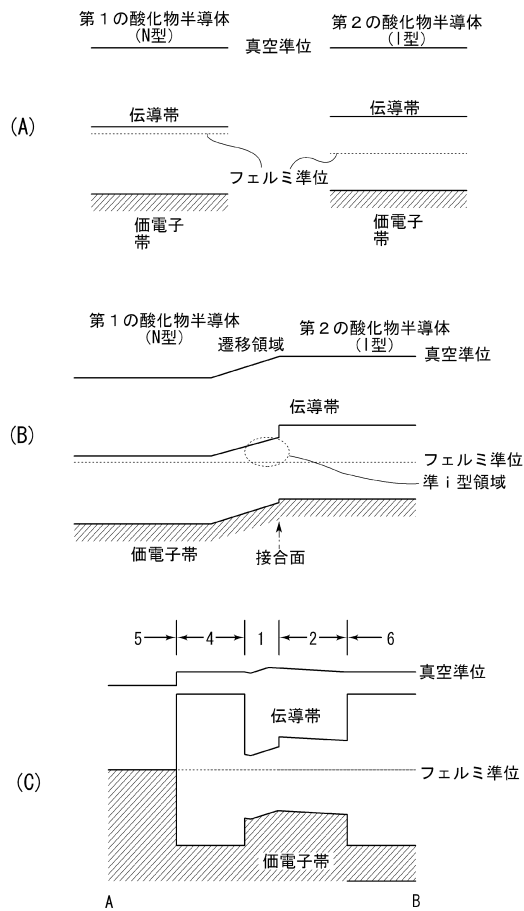
【図 1】



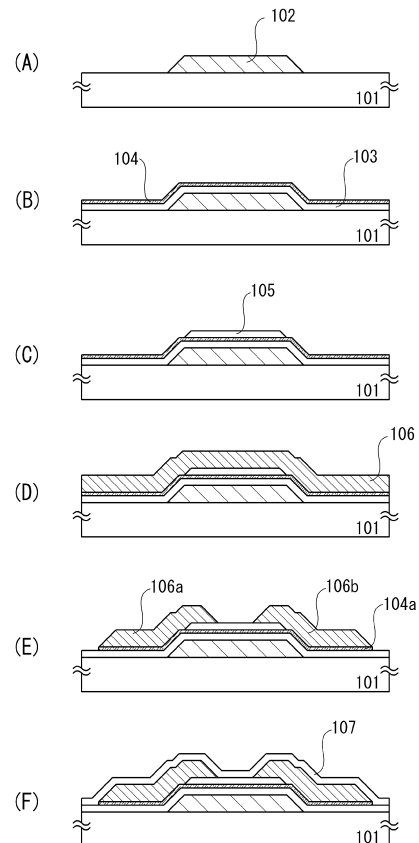
【図 2】



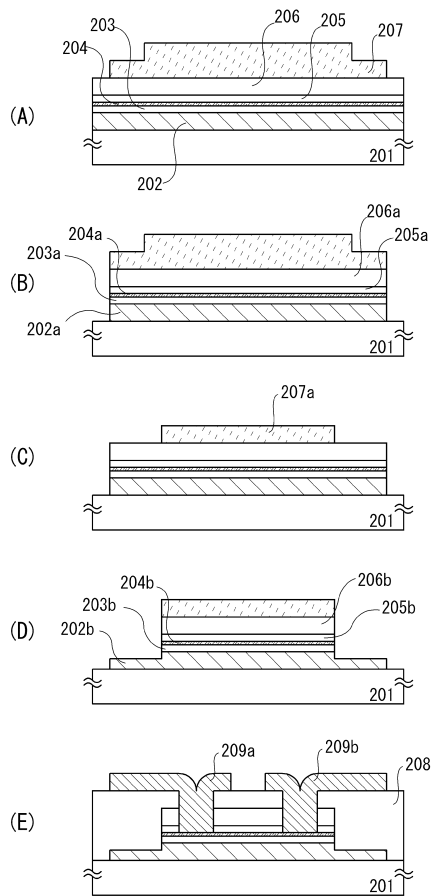
【図 3】



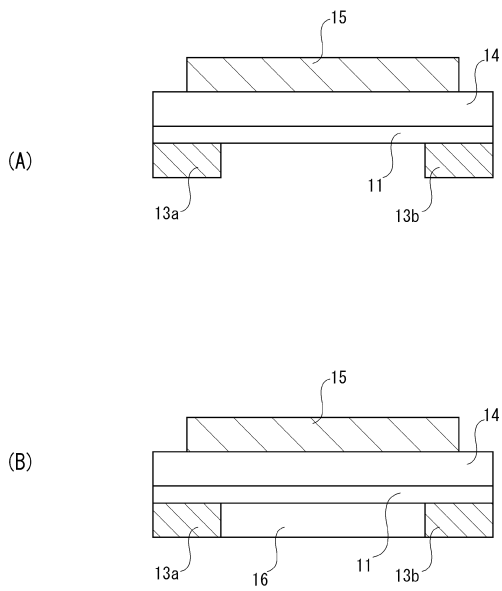
【図 4】



【図 5】



【図 7】



【図 6】

