

(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2004-103957
(P2004-103957A)

(43) 公開日 平成16年4月2日(2004.4.2)

(51) Int. Cl. ⁷	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 29/786	HO 1 L 29/78 6 1 8 B	5 F 1 0 3
HO 1 L 21/363	HO 1 L 21/363	5 F 1 1 0

審査請求 未請求 請求項の数 4 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願2002-266012 (P2002-266012)	(71) 出願人 396020800 科学技術振興事業団 埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(22) 出願日 平成14年9月11日 (2002.9.11)	(71) 出願人 500037942 太田 裕道 神奈川県川崎市高津区千年1184 グラ ンドールB・202
特許法第30条第1項適用申請有り 2002年9月9日 日本経済新聞社発行の「日経先端技術2002年9月9日号」に発表	(74) 代理人 100108671 弁理士 西 義之
	(72) 発明者 太田 裕道 神奈川県川崎市高津区千年1184 グラ ンドールB-202
	(72) 発明者 細野 秀雄 神奈川県大和市下鶴間2786-4-21 2

最終頁に続く

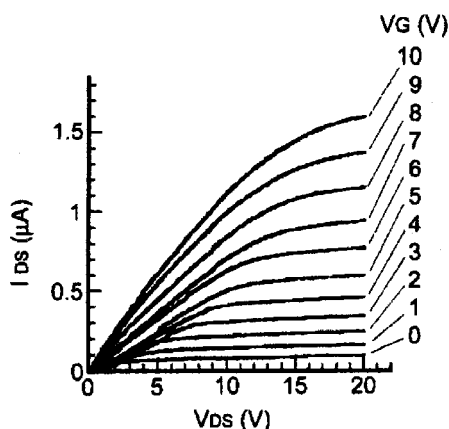
(54) 【発明の名称】 ホモロガス薄膜を活性層として用いる透明薄膜電界効果型トランジスタ

(57) 【要約】

【課題】 Si に替わって、透明酸化物半導体である ZnO を用いて、電界効果型トランジスタを作製する試みがなされている。しかし、ZnO は、電気伝導度を小さくすることが難しく、ノーマリーオフの電界効果型トランジスタを構成できないなどの欠点がある。また、アモルファス状態を作り難いので、大面積に適したアモルファストランジスタを作製することができない。

【解決手段】 反応性固相エピタキシャル法により製造したホモロガス化合物 $InMO_3 (ZnO)_m$ ($M = In, Fe, Ga$, 又は Al , $m = 1$ 以上 50 未満の整数) 単結晶薄膜は化学量論組成からのずれが極めて小さく、室温付近では良質な絶縁体であり、ホモロガス化合物単結晶 $InMO_3 (ZnO)_m$ ($M = In, Fe, Ga$, 又は Al , $m = 1$ 以上 50 未満の整数) 薄膜を活性層として用いることにより、ノーマリーオフ作動で、スイッチング特性の良い透明薄膜電界効果型トランジスタを作製できる。

【選択図】 図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ホモロガス化合物 $InMO_3 (ZnO)_m$ ($M = In, Fe, Ga$, 又は Al , $m = 1$ 以上 50 未満の整数) 薄膜を活性層として用いることを特徴とする透明薄膜電界効果型トランジスタ。

【請求項 2】

表面が原子レベルで平坦である単結晶又はアモルファスホモロガス化合物薄膜を用いることを特徴とする請求項 1 記載の透明薄膜電界効果型トランジスタ。

【請求項 3】

ホモロガス化合物が耐熱性、透明酸化物単結晶基板上に形成された単結晶薄膜であることを特徴とする請求項 1 記載の透明薄膜電界効果型トランジスタ。 10

【請求項 4】

ホモロガス化合物がガラス基板上に形成されたアモルファス薄膜であることを特徴とする請求項 1 記載の透明薄膜電界効果型トランジスタ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、可視光に対して透明で、透明電子回路を構成する素子として用いることができる、 ZnO を主たる構成成分として含有するホモロガス化合物の単結晶膜又はアモルファス膜を活性層として用いる透明電界効果型トランジスタに関する。 20

【0002】

【従来の技術及びその課題】

電界効果型トランジスタは、半導体メモリ集積回路の単位電子素子、高周波信号増幅素子、液晶駆動用素子等として用いられており、現在、最も多く実用化されている電子デバイスである。材料としては、シリコン半導体化合物が最も広く使われている。高速動作が必要な高周波増幅素子、集積回路用素子等には、シリコン単結晶が用いられ、また、低速動作で十分な液晶駆動用には、大面積化の要求から、アモルファスシリコンが使われている。

【0003】

シリコンを用いた電界効果型トランジスタは、多くの用途に対して、十分な性能を有している。しかし、該トランジスタは、シリコンの光学的特性に基づいて、可視光に対して不透明で、透明回路を構成することができない。また、可視光照射により、伝導キャリアを生じるために、高光照射下ではトランジスタ特性が劣化してしまう。例えば、該トランジスタを液晶ディスプレイの液晶駆動用スイッチング素子として応用した場合、該デバイスは、可視光に対して不透明なため、ディスプレイ画素の開口比が小さくなる。また、バックライト照射により光誘起電流が発生し、スイッチング特性が劣化してしまう。こうした劣化を防ぐため、バックライト光をカットするための遮光膜を設ける必要がある。 30

【0004】

シリコン電界効果型トランジスタのこうした問題点は、シリコンに替わって、エネルギーバンド幅の大きな半導体材料を用いることにより、原理的に、解決することができる。実際に、透明酸化物半導体である ZnO を用いて、電界効果型トランジスタを作製する試みがなされている（例えば、非特許文献 1）。しかし、 ZnO は、電気伝導度を小さくすることが難しく、ノーマリーオフの電界効果型トランジスタを構成できない等の欠点がある。また、アモルファス状態を作り難いので、大面積に適したアモルファストランジスタを作製することができない。 40

【0005】

【非特許文献 1】

七種ら、応用物理学会 2000 年春季学術講演会予稿集, 2000.3, 29p - YL - 16

【0006】

【課題を解決するための手段】

本発明者らは、先に、パルスレーザー薄膜堆積法を用い、室温での成膜により、アモルファス状態で、 n -型電気伝導を示す、 ZnO を主たる構成成分として含有する $InGaO_3$ (ZnO) $_m$ (m は自然数)等のホモロガス化合物透明薄膜を育成した(特開2000-44236号公報、細野他 *Philosophical Magazine B*, 81, 501-515 (2001))。

【0007】

さらに、本発明者らは、 YSZ (イットリア安定化ジルコニア)基板上に育成した ZnO 単結晶極薄膜上に、アモルファスのホモロガス薄膜を堆積し、得られた多層膜を高温で加熱拡散処理する「反応性固相エピタキシャル法」により、ホモロガス単結晶薄膜を育成する方法を開発し、「自然超格子ホモロガス単結晶薄膜とその製造方法」と名付け、特許出願した(特願2001-340066)。

10

【0008】

本発明者は、上記のホモロガス単結晶薄膜の製造方法と同様に、 ZnO 薄膜上にエピタキシャル成長した複合酸化物薄膜を加熱拡散する手段を用いることにより従来のシリコンを用いた電界効果型トランジスタに代わる新たな優れた電界効果型トランジスタを提供できることを見出した。

【0009】

本発明は、反応性固相エピタキシャル法により育成した、 ZnO を主たる構成成分として含有するホモロガス化合物単結晶薄膜又は ZnO を主たる構成成分として含有するホモロガスアモルファス薄膜を活性層とした電界効果型トランジスタを提供する。

20

【0010】

すなわち、本発明は、(1)ホモロガス化合物 $InMO_3$ (ZnO) $_m$ ($M = In, Fe, Ga$, 又は Al , $m = 1$ 以上50未満の整数)薄膜を活性層として用いることを特徴とする透明薄膜電界効果型トランジスタである。また、(2)表面が原子レベルで平坦である単結晶又はアモルファスホモロガス化合物薄膜を用いることを特徴とする上記(1)の透明薄膜電界効果型トランジスタである。また、(3)ホモロガス化合物が耐熱性、透明酸化物単結晶基板上に形成された単結晶薄膜であることを特徴とする上記(1)の透明薄膜電界効果型トランジスタである。また、(4)ホモロガス化合物がガラス基板上に形成されたアモルファス薄膜であることを特徴とする上記(1)の透明薄膜電界効果型トランジスタである。

30

【0011】

1. 反応性固相エピタキシャル法により製造したホモロガス化合物単結晶 $InMO_3$ (ZnO) $_m$ ($M = In, Fe, Ga, Al$, $m = 1$ 以上50未満の整数)薄膜は、 $InO_{1.5}$ 層が原子レベルで平坦な薄膜表面を形成することから、ゲートと活性層の界面に欠陥が介在しにくく、ゲートリーク電流の少ない薄膜電界効果型トランジスタを作製できる。 $InMO_3$ (ZnO) $_m$ の m の値は1以上50未満の整数が好ましい。原理的には、 m の値は、無限大まで可能であるが、実用上、 m の値が大きくなりすぎると、膜内での m のばらつきが大きくなることと、酸素欠陥が生じやすくなり、その結果、膜の電気伝導度が大きくなり、ノーマリオフ型のFETが作り難くなる。

40

【0012】

2. ZnO を主たる構成成分として含有するホモロガス化合物 $InMO_3$ (ZnO) $_m$ ($M = In, Fe, Ga$, 又は Al , $m = 1$ 以上50未満の整数)のバンドギャップエネルギーは、3.3 eVより大きいので、波長が400 nm以上の可視光に対して透明である。したがって、ホモロガス化合物単結晶 $InMO_3$ (ZnO) $_m$ ($M = In, Fe, Ga$, 又は Al , $m = 1$ 以上50未満の整数)薄膜を活性層として用いることにより、可視光透過率が高く、可視光による光誘起電流の発生がない、薄膜電界効果型トランジスタを作製できる。

【0013】

3. さらに、反応性固相エピタキシャル法により製造したホモロガス化合物 $InMO_3$

50

(ZnO)_m (M = In, Fe, Ga, 又は Al, m = 1 以上 50 未満の整数) 単結晶薄膜は化学量論組成からのずれが極めて小さく、室温付近では良質な絶縁体であることから、ホモロガス化合物単結晶 $InMO_3$ (ZnO)_m (M = In, Fe, Ga, 又は Al, m = 1 以上 50 未満の整数) 薄膜を活性層として用いることにより、ノーマリーオフ作動で、スイッチング特性の良い透明薄膜電界効果型トランジスタを作製できる。

【0014】

ZnOを含むホモロガス化合物を反応性固相エピタキシャル法により室温で成膜したアモルファス状態は、1000 程度の高温まで安定であり、その状態での電子キャリア移動度は、アモルファスシリコンに比較して、10倍以上大きい。したがって、ホモロガスアモルファス薄膜を活性層として用いた電界効果型トランジスタは、シリコンアモルファス電界効果型トランジスタに比較して、可視光透過率が高く、光照射に対して安定に動作し、さらに、高速動作することが期待できる。

10

【0015】

【発明の実施の形態】

本発明で用いる ZnO を主たる構成成分として含有するホモロガス化合物単結晶薄膜の基板には、耐熱性があり、透明な酸化物単結晶基板、例えば、YSZ (イットリア安定化ジルコニア)、サファイア、MgO、ZnO 等を用いる。中でも、ZnO を含むホモロガス化合物と格子定数が近く、該化合物と 1400 以下の温度では、化学反応しない YSZ が、最も好ましい。これらの基板の表面平均二乗粗さ Rms は、1.0 nm 以下のものを用いることが好ましい。Rms は原子間力顕微鏡で、例えば、1 μm 角を走査することによって算出できる。

20

【0016】

ZnO を含むホモロガス化合物アモルファス薄膜を用いる場合には、基板は耐熱性を有する必要がなく、安価なガラス基板を用いることができる。平坦度も、アモルファスシリコン電界効果型トランジスタ用に用いられるガラス基板程度で良い。

【0017】

YSZ 等の酸化物単結晶基板を、大気中もしくは真空中で 1000 以上に加熱することによって超平坦化した表面が得られる。超平坦化した酸化物単結晶基板の表面には結晶構造を反映した構造が現れる。すなわち、数 100 nm 程度の幅を持つテラスとサブ nm 程度の高さを持つステップからなる構造で、一般に原子状に平坦化された構造と呼ばれる。

30

【0018】

テラス部分は平面上に配列した原子からなり、若干存在する欠陥の存在を無視すれば、完全に平坦化された表面である。ステップの存在により、基板全体で完全平坦化された表面とはならない。この構造を平均二乗粗さ測定方法による粗さ Rms で表現すれば、Rms は 1.0 nm 以下のものである。Rms は、例えば、原子間力顕微鏡で、例えば、1 μm 角の範囲を走査することによって算出した値である。

【0019】

得られた原子平坦面を持つ耐熱性透明酸化物基板上に、MBE 法、パルスレーザー蒸着法 (PLD 法) 等により、原子平坦面を有する ZnO 単結晶薄膜をエピタキシャル成長させる。次に、該 ZnO 薄膜上に、 $InMO_3$ (ZnO)_m (M = In, Fe, Ga, Al, m = 1 以上 50 未満の整数) と記述されるホモロガス化合物薄膜を、ターゲットとして、該酸化物の多結晶焼結体を使用して、MBE 法、パルスレーザー蒸着法 (PLD 法) 等により成長させる。

40

【0020】

得られた薄膜は、単結晶膜である必要はなく、多結晶膜でも、アモルファス膜でも良い。最後に、薄膜全体をカバーできるように高融点化合物、例えば YSZ や Al₂O₃ を被せ、1300 以上の高温で、ZnO 蒸気を含む大気圧中で加熱拡散処理を行なう。高融点化合物を被せる理由は、後述の ZnO 蒸気と該薄膜表面との接触を避けるためである。

【0021】

50

ZnOは蒸気圧が高いので、大気中にZnO蒸気を加えないと、加熱拡散処理中に、膜からZnOが蒸発し、加熱拡散処理後の膜組成が大幅に変化してしまい、良質な結晶膜が得られない。そのため、容器体積に対し5容積%以上のZnOを反応容器に充填しておく。充填する該ZnOは粉末あるいは焼結体であることが好ましい。高温での加熱拡散処理によりZnO粉末からZnOが蒸発し、反応容器内部のZnO蒸気圧を高め、薄膜中のZnOの蒸発を抑制することができる。

【0022】

$\text{InMO}_3(\text{ZnO})_m$ ($M = \text{In}, \text{Fe}, \text{Ga}$, 又は Al , $m = 1$ 以上50未満の整数)とZnO膜が相互に拡散・反応し、温度を適切に設定すれば、均一組成 $\text{InMO}_3(\text{ZnO})_{m'}$ ($M = \text{In}, \text{Fe}, \text{Ga}$, 又は Al , $m' = 1$ 以上50未満の整数)となる。 m' は、 $\text{InMO}_3(\text{ZnO})_m$ ($M = \text{In}, \text{Fe}, \text{Ga}$, 又は Al , $m = 1$ 以上50未満の整数)とZnO膜厚比から決まるが、ZnO膜厚が5nm未満で、 $\text{InMO}_3(\text{ZnO})_m$ ($M = \text{In}, \text{Fe}, \text{Ga}$, 又は Al , $m = 1$ 以上50未満の整数)膜厚が100nmを越える場合には、 $m = m'$ である。

10

【0023】

適切な温度は800以上、1600以下、より好ましくは1200以上、1500以下である。800未満では拡散が遅く、均一組成の $\text{InMO}_3(\text{ZnO})_m$ ($M = \text{In}, \text{Fe}, \text{Ga}$, 又は Al , $m = 1$ 以上50未満の整数)が得られない。また、1600を越えるとZnOの蒸発が抑えられなくなり均一組成の $\text{InMO}_3(\text{ZnO})_m$ ($M = \text{In}, \text{Fe}, \text{Ga}$, 又は Al , $m = 1$ 以上50未満の整数)が得られない。

20

【0024】

得られた単結晶薄膜は、 $\text{MO}_3(\text{ZnO})_m$ 層を $\text{InO}_{1.5}$ 層で挟んだ自然超格子構造とみなすことができるので、 $\text{MO}_3(\text{ZnO})_m$ 層と $\text{InO}_{1.5}$ 層との界面に存在する電子に、量子効果が生じる。このため、得られた単結晶薄膜は、人工超格子構造と同様に、高周波電子デバイス材料として使用することができる。

【0025】

また、反応性固相エピタキシャル成長法で得られたZnOを含むホモロガス単結晶膜は、化学量論組成に近く、室温では、 $10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}$ 以上の高い絶縁性を示し、ノーマリーオフ電界効果型トランジスタに適している。

30

【0026】

得られたZnOを主たる構成成分として含有するホモロガス単結晶薄膜を活性層とした、トップゲート型MIS電界効果型トランジスタを作製することができる。

図3に示すように、まず、基板1上にエピタキシャル成長したZnOを主たる構成成分として含有するホモロガス単結晶薄膜2上にゲート絶縁膜3及びゲート電極4用の金属膜を形成する。ゲート絶縁膜3には、 Al_2O_3 が最も適している。ゲート電極4用金属膜は、 Au , Ag , Al 、又は Cu 等を用いることができる。光リソグラフィ法及びドライエッチング、又はリフトオフ法により、ゲート電極4を作製し、最後に、ソース電極5及びドレイン電極6を作成する。本発明の電界効果型トランジスタの形状は、トップゲート型MIS電界効果型トランジスタ(MIS-FET)に限られるものではなく、J-FET等も含まれる。

40

【0027】

ZnOを主たる構成成分として含有するホモロガスアモルファス薄膜を用いても、同様に、トップゲート型MIS電界効果型トランジスタを作成することができる。また、アモルファス薄膜の場合は、エピタキシャル成長させる必要はないので、ZnOエピタキシャル成長及び高温アニールプロセスを除くことができる。このために、ゲート電極を基板と膜の間に作りつけることが可能で、ボトムゲート型MIS電界効果型トランジスタも作製することができる。

【0028】

【実施例】

50

以下に実施例を挙げて本発明を詳細に説明する

実施例 1

1. 単結晶 $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ 薄膜の作製

YSZ (111) 単結晶基板上に PLD 法により厚み 2 nm の ZnO 薄膜を基板温度 700 でエピタキシャル成長させた。次に、基板温度を室温まで冷却し、該 ZnO エピタキシャル薄膜上に PLD 法により、厚み 150 nm の多結晶 $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ 薄膜を堆積させた。こうして作製した二層膜を大気中に取り出し、電気炉を用いて、大気中、1400、30 min 加熱拡散処理した後、室温まで冷却した。

【0029】

XRD 測定の結果、図 1 に示すように、加熱して得られた薄膜は単結晶 $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ であり、また、図 2 に示すように、AFM 観察の結果、薄膜表面は原子レベルで平坦なテラスと、高さ 2 nm のステップからなる原子レベルで平坦な面であった。

単結晶 $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ 薄膜の導電率を直流四端子法により測定しようとしたが、膜の絶縁性が高いために測定できなかった。作製した単結晶 $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ 薄膜は絶縁体であると言える。室温で測定した光吸収スペクトルから $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ のバンドギャップは約 3.3 eV と見積もられた。

【0030】

2. MISFET 素子の作製

フォトリソグラフィ法により、トップゲート型 MISFET 素子を作製した。

ソースとドレイン電極及びゲート絶縁膜には Au 及びアモルファス Al_2O_3 をそれぞれ用いた。チャンネル長及びチャンネル幅はそれぞれ 0.05 mm 及び 0.2 mm である。

【0031】

3. MISFET 素子の特性評価

図 4 に、室温下で測定した MISFET 素子の電流 - 電圧特性を示す。ゲート電圧 $V_G = 0$ V 時には $I_{DS} = 10^{-8}$ A ($V_{DS} = 2.0$ V) であり、いわゆるノーマリーOFF特性が得られた。また、 $V_G = 10$ V 時には、 $I_{DS} = 1.6 \times 10^{-6}$ A の電流が流れた。これはゲートバイアスにより絶縁体の $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ 単結晶薄膜内にキャリアを誘起できたことに対応する。作製した素子に可視光を照射して同様の測定を行なったが、数値の変化は認められなかった。可視光での光誘起電流の発生は認められなかった。

【0032】

【発明の効果】

本発明の透明薄膜電界効果型トランジスタは、波長 400 nm 以上の可視光・赤外光に対して透明である上、ノーマリーOFFのスイッチングが可能である。本発明の透明薄膜電界効果型トランジスタをLCDのスイッチング素子として応用することにより、バックライト光をロスなく有効に使うことができる上、シースルー型のディスプレイへの発展が期待できる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】図 1 は、実施例 1 で作製した単結晶 $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ 薄膜の XRD 測定の結果を示すグラフである。

【図 2】図 2 は、実施例 1 で作製した単結晶 $\text{InGaO}_3(\text{ZnO})_5$ 薄膜の表面構造を示す図面代用 AFM 観察写真である。

【図 3】図 3 は、本発明の一実施形態の MISFET 素子の構造を示す模式図である。

【図 4】図 4 は、実施例 1 で作製した MISFET 素子の室温下で測定した電流 - 電圧特性を示すグラフである。

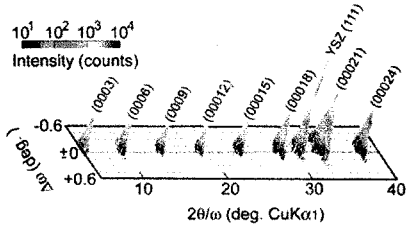
10

20

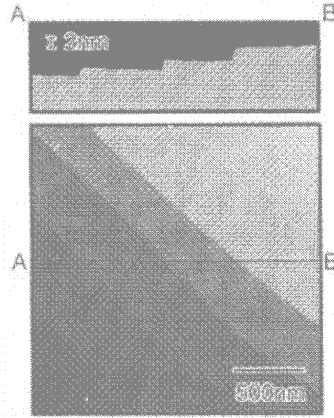
30

40

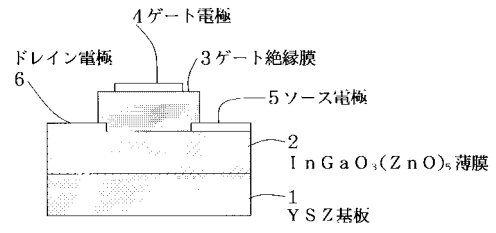
【 図 1 】



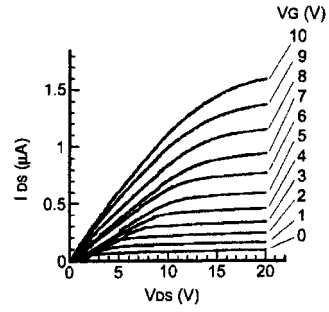
【 図 2 】



【 図 3 】



【 図 4 】



フロントページの続き

(72)発明者 神谷 利夫

神奈川県川崎市高津区溝口 2 - 2 3 - 5 モナーク溝の口 I I I 2 0 7 号

(72)発明者 平野 正浩

東京都世田谷区松原 5 - 5 - 6

Fターム(参考) 5F103 AA10 DD01 GG03 LL07

5F110 AA06 AA24 AA30 BB01 CC01 DD02 DD04 EE02 EE03 FF01

GG04 GG12 GG13 GG15 GG41