

論文内容の要旨

In-Ga-Zn-O (IGZO) に代表される非晶質酸化物半導体 (Amorphous oxide semiconductor: AOS) は、スパッタリングによる大面積成膜が可能かつ室温で成膜しても $10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ を超える電子移動度 (以降、移動度と表記) を示すことから、次世代フラットパネルディスプレイ (Flat Panel Display: FPD) に向けた半導体材料の有力候補である。AOS の伝導帯下端 (Conduction band minimum: CBM) は空間的に広がった球対称な金属の軌道で形成されていることから、In のような広がった 5s 軌道を最低非占有準位にもつ金属を用いれば高い移動度が得られることが報告されている。一方で、高移動度 AOS は酸素欠損由来の欠陥準位を生成しやすい。これは TFT 応用時における閾値電圧の制御性が低下することに加えて、バイアスストレスによる特性劣化を誘発するなど実用化へ向けた課題である。従って、高移動度・高信頼性 AOS TFT の実現には、移動度と信頼性のトレード・オフをいかに解決するかが重要となる。

現在、デバイス作製時における各層の成膜条件最適化や AOS ヘテロ構造による高移動度・高信頼性 TFT の試作が報告されているが、移動度と信頼性を両立する統一的な見解は得られていない。特に AOS ヘテロ接合チャネルはヘテロ界面に形成されるエネルギーの不連続性が TFT の移動度・信頼性に影響を及ぼす可能性が示唆されているが、積層構造であるために界面の物性評価とキャリア輸送経路の解析が難しく、詳細な解析が行われていないのが現状である。

そこで本研究では、AOS TFT における移動度と信頼性の両立を目的とし、1) キャリア抑制元素をドーブした材料組成のアプローチと、2) ヘテロ接合界面の形成により発現する量子効果が、TFT の移動度・信頼性に与える影響についてそれぞれ検討した。AOS における移動度と信頼性の両立手法の提案およびそのメカニズムの解明は AOS 開発の重要な基盤技術となり、AOS のデバイス応用を拓げることに繋がる。本研究の特徴は、材料組成およびデバイス構造といった二つの視点に着目し、AOS TFT における高移動度・高信頼性の指針を検討し、電気特性評価とデバイスシミュレーション解析を融合した相補的研究によってそのメカニズム解明に取り組んだ点にある。

2. 本論文の構成

本論文は、AOS の次世代デバイス応用拡大のために高移動度・高信頼性化の両立手法を検討し、そのメカニズムを解明することを目的として行ったものであり、第1章から第6章により構成される。

第1章 序論

本論文の背景として AOS のデバイス応用に触れ、その特徴を示した。また、これまでの研究動向に関してまとめ、現状課題における本研究の位置づけを明確にすることで目的と意義を示した。

第2章 酸化物半導体における材料組成の違いが TFT の特性・信頼性に与える影響

In 組成が高い AOS TFT の高性能・高信頼性化に関する研究成果について示した。

検討した AOS 組成比率は以下の三種類、①In:Ga:Zn=1:1:1 atm.% (IGZO-111)、②In リッチ IGZO (IGZO-high-In)、③W ドープ In-Zn-O (IWZO) である。IWZO は従来のキャリア抑制元素である Ga の代わりに、酸素結合解離エネルギーが高い W を採用した高移動度 AOS 材料である。元素添加によるキャリア制御、すなわち欠陥準位の生成を抑制する効果は、移動度と信頼性のトレード・オフ解決に有効な手法であると考えられる。本章では三種類の AOS を用いて TFT を作製し、電気特性および信頼性を比較することで材料組成が移動度と信頼性に与える影響を検討する。

IGZO-high-In および IWZO 薄膜は、 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度の熱処理でキャリア濃度が $\sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度まで増大し、欠陥準位密度の低減に不可欠である高温熱処理 ($300\sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$) の適用が困難であることが確認された。CrK α 線

源を有する硬 X 線光電子分光 (HAXPES) による結合状態の解析を行った結果、膜内からの酸素脱離がキャリア生成の起源であることを明らかにした。また、 SiO_2 保護膜の応用を検討した結果、保護膜の応用は熱処理時におけるキャリア濃度制御に効果的であることを明らかにした。さらに、このキャリア濃度の制御性向上は IGZO-high-In および IWZO 薄膜への高温熱処理 (350°C) を可能とし、正ゲートバイアス熱ストレス (Positive bias temperature stress: PBTS) における信頼性を大幅に向上できることを確認した。三種類の AOS TFT を比較した結果、IGZO-high-In TFT および IWZO TFT の移動度は、IGZO-111 と比較してそれぞれ 2 倍、3 倍高い値が得られ、In 組成増大に起因する移動度の向上が確認された。しかしながら、IGZO-high-In は PBTS 時の閾値変化量 $\Delta V_{th}=+7.0\text{ V}$ と、IGZO-111 TFT の信頼性結果 $\Delta V_{th}=+1.0\text{ V}$ と比較して大きな劣化がみられた。一方で IWZO TFT は IGZO-111 と同等以上の信頼性を示し、高移動度組成においても W ドープによって信頼性が向上できることを見出した。しかしながら、IGZO-high-In および IWZO 薄膜におけるキャリア制御性には依然として課題が確認され、欠陥準位が生成されやすいことが示唆された。

第 3 章 非晶質酸化物半導体ヘテロ接合トランジスタにおける伝達特性と信頼性

AOS ヘテロ接合 TFT による高移動度・高信頼性化に関する研究成果を示した。

キャリア抑制元素をドープした材料組成のアプローチでは、依然としてキャリア制御性に課題が確認され、欠陥準位が生成されやすいことが示唆された。そのため、一種類の AOS にて移動度と信頼性の両立を目指す従来の手法ではなく、二種類の AOS を用いることで移動度と信頼性を分離して制御する手法が効果的だと考え、AOS ヘテロ構造の研究を開始した。従来報告より、AOS ヘテロ接合チャンネルは TFT の高移動度化に効果的であると報告されてきた。しかしながら、その多くは高移動度 AOS の閾値制御性を向上する目的であり、信頼性の議論が詳細に行われていなかった。一方で、ヘテロ接合界面に形成されるエネルギーの不連続性が TFT の移動度・信頼性に影響を及ぼす可能性が示唆されており、TFT に対する AOS ヘテロ接合界面の量子効果は議論の途上である。従って、本章では IGZO-111 および IGZO-high-In を用いて AOS ヘテロ接合 TFT を作製し、ヘテロ接合界面に発現する量子効果が TFT の移動度および信頼性に与える影響について検討した。

ヘテロ接合において重要な材料物性であるバンドアライメントを評価したところ、各 IGZO の伝導帯下端 (Conduction band minimum: CBM) バンドオフセットの値は -0.4 eV が得られた。ヘテロ接合界面に CBM ポテンシャル障壁が形成されるチャンネル構造 (下層 IGZO-111/上層 IGZO-high-In) を用いて TFT を作製・評価した結果、ゲート絶縁膜/半導体界面が移動度の低い IGZO-111 で形成されているにも関わらず、電界効果移動度が向上することを確認した。一方で逆構造 (下層 IGZO-high-In/上層 IGZO-111) TFT では、高い移動度を示すが IGZO-high-In 単層 TFT と同様に信頼性の劣化が確認された。また、上層および下層膜厚が移動度および信頼性に与える影響を検討した結果、上層膜厚 (IGZO-111) の増大に伴う移動度の増大、また下層膜厚 (IGZO-high-In) の増大に伴い信頼性が向上することを明らかにした。これらの結果から、AOS ヘテロ接合界面で量子効果が発現し、TFT の移動度と信頼性を分離して制御できることが示唆された。

第 4 章 非晶質酸化物半導体ヘテロ接合トランジスタのキャリア輸送特性の解析

AOS ヘテロ接合 TFT におけるキャリア輸送特性の解析に関する研究成果を示した。

AOS ヘテロ接合チャンネルは TFT の移動度および信頼性の両立に効果的であることが予想されたが、デバイス内部のキャリア輸送を直接観測することは極めて困難であった。従って、本章では ATLAS による TCAD シミュレーションを用いてキャリア輸送特性の解析を実施し、量子効果がデバイス特性に与える影響のメカニズム解明に取り組んだ。ヘテロ接合界面に形成される CBM のポテンシャル障壁は、ヘテロ接合界面に電子閉じ込めを誘発し、キャリア輸送経路を変化させることで TFT の移動度を向上させる事を明らかにした。加えて、その効果はポテンシャル障壁高さに依存することを確認した。また、シミュレーション解析から電界強度を抽出し、信頼性向上メカニズムを考察した結果、AOS ヘテロ接合界面はゲート絶縁膜/半導体界面と比較して欠陥準位の少ない良質な界面が形成されていることが示唆された。

第 5 章 硬 X 線光電子分光法によるヘテロ界面欠陥準位密度の解析

HAXPES を用いたヘテロ接合界面における結合状態の解析結果を示した。

HAXPES の特徴はその検出感度の深さにある。一般的な光電子分光法に比べて励起 X 線のエネルギーが

高く、非破壊で試料バルクの結合状態を評価することが可能である。第3章、第4章の結果より、AOS ヘテロ接合の界面状態は、ゲート絶縁膜/半導体界面と比較して欠陥準位の少ない良質な界面が形成されていることが示唆された。しかしながら、その直接観測には至っておらず、詳細な物理現象の解明が必要であった。電子分光法は材料の結合状態を評価する有効なツールであるが、極めて表面敏感な測定であることから、ヘテロ接合界面の結合状態を観測するのは困難である。一方で、イオンスパッタによる深さ分解方向の評価手法もあるが、スパッタ時の衝突ダメージは新たな欠陥準位を生成する可能性も否定できない。本章では、Spring-8 の HAXPES 装置による角度分解測定によってヘテロ接合界面およびゲート絶縁膜/半導体界面の結合状態を同定し、比較することで信頼性向上メカニズムに関する考察についてまとめた。

第6章 総括

本研究で得られた成果を総括し、高性能・高信頼性 AOS TFT を作製するための指針を示した。

AOS TFT における高移動度・高信頼性の両立手法に関して、1) キャリア抑制元素をドーピングした材料組成のアプローチ、2) ヘテロ接合界面の形成により発現する量子効果、二つの視点を検討した。1) の研究結果より、キャリア抑制元素のドーピングによって高移動度・高信頼性 AOS TFT の実現に成功したが、キャリア制御性には依然として課題が確認され、欠陥準位が生成されやすいことが明らかとなった。この研究成果は、キャリア抑制元素のドーピングが移動度と信頼性の両立に有用であることを示すと同時に、一種類の AOS 材料で移動度と信頼性を両立することの難しさが示唆された。2) の研究結果より、AOS ヘテロ接合界面に形成されるポテンシャル障壁は、量子効果を発現させ、チャンネル内のキャリア輸送経路を変化させることを明らかにした。また、そのキャリア輸送経路の変化は二種類の AOS 材料によって移動度と信頼性を分離して制御できることを明らかにし、AOS ヘテロ接合が TFT の移動度と信頼性の両立に効果的な手法であることを示した。