

# 論文内容要旨（和文）

令和5年度入学 大学院博士後期課程

先進工学専攻 機械システム工学分野

氏 名 岩松 新之輔



論 文 題 目 アモルファスInGaZnO系酸化半導体薄膜トランジスタのセンサ応用に関する研究

アモルファス酸化半導体薄膜トランジスタ (a-InGaZnO TFT) の高い電界効果移動度、外部電界への感受性、高いドレイン耐圧を活かした MEMS センサを実現するため、a-InGaZnO TFT の作製、特性評価、TFT の MEMS センサ構造体への融合、イオンセンサおよび静電気センサへの応用に取り組んだ。

## [第1章 序論]

センサ開発が求められている社会背景について述べ、a-InGaZnO TFT に適した用途を明らかにし、目標とする性能を定めた。

## [第2章 薄膜トランジスタ作製プロセスの開発と光電子分光分析]

センサ応用に適した逆スタガ型ボトムゲート構造 a-InGaZnO TFT を作製し、TFT 特性の評価、a-InGaZnO 膜近傍の光電子分光分析 (XPS 分析) を行った。弱酸を用いた a-InGaZnO のパターニング、SF<sub>6</sub> プラズマエッチングによる S/D 電極のパターニングを作製プロセスに採用し、300°C でアニール処理を行うことで、良好な TFT 特性が得られることを明らかにした。電界効果移動は 7 cm<sup>2</sup>/Vs、オフ電流は 10<sup>-13</sup> A オーダー、V<sub>th</sub> は 0 V であった。XPS 分析により、Ti/a-InGaZnO 界面に酸素欠損 a-InGaZnO と TiO<sub>x</sub> が共存する中間層が存在することを明らかにした。Ti/a-InGaZnO 界面層の役割を明らかにするため、コスパッタ法を用いて Ti/a-InGaZnO 界面と類似の酸素欠損を持つ a-InGaZnTiO 膜を作製した。コスパッタ膜の電気特性の評価から、比抵抗が大幅に低下していることを明らかにし、中間層の低抵抗化が示唆された。以上の結果から、Ti/a-InGaZnO 界面にキャリア濃度が高い n+層または仕事関数が低下した合金層が介在するオーミックコンタクト形成モデルを考案した。

## [第3章 酸化半導体薄膜トランジスタの MEMS 構造体への適用]

a-InGaZnO TFT のセンサ応用を進めるため、センサ基本構造として広く採用されているダイアフラム構造体およびブリッジ構造体へ a-InGaZnO TFT を形成するプロセスを開発した。ダイアフラム型 a-InGaZnO TFT のプロセス開発において、a-InGaZnO の膜応力を成膜圧力とアニール処理により制御できることを見出し、3.0 Pa 以上の成膜圧力かつ 300°C アニールの条件で、無応力膜が得られることを明らかにした。無応力 a-InGaZnO 膜、応力制御された絶縁膜および金属膜を用いてダイアフラム型 a-InGaZnO TFT を作製し、伝達特性として 0 V 付近の V<sub>th</sub> と 10<sup>-7</sup> A オーダーのオン電流を確認した。また、透明絶縁膜を自立膜に用いることで、TFT 素子の両面から視認できる構造を実現した。ブリッジ型 a-InGaZnO TFT のプロセス開発においては、高温環境での運用を目指し、薄膜ヒーターの集積とヒ

ーター加熱状態における TFT 特性を評価した。薄膜ヒーターで TFT 部を局所加熱し、伝達特性を評価した結果、200°C まで正常なスイッチング特性を示すことが確認された。以上の結果から、高温環境における a-InGaZnO TFT の振る舞いを明らかにし、加熱機構と共存する環境で使用する際の設計及び運用指針が得られた。

#### [第4章 酸化物半導体薄膜トランジスタのイオンセンサへの応用]

溶液ゲート型 pH センサ、延長ゲート型 pH センサ、Na イオンセンサ、K イオンセンサの開発に取り組んだ。イオン感応絶縁膜に TaO<sub>x</sub> を用いた溶液ゲート型 pH センサを開発し、ネルンスト電位を超える 273 mV/pH の感度を持つセンサを実現した。トップゲート絶縁膜に ALD-AlO<sub>x</sub> 膜を用いた延長ゲート型 pH センサを開発し、pH 感度 620 mV/pH を実現した。また、ベースライン補正を実施することで、0.001 以下の pH 変化を検出できる可能性を見出し、生体成分分析への応用の目途を得た。a-InGaZnO TFT のトップゲート効果を用いた Na イオンセンサおよび K イオンセンサを開発し、それぞれ、1030 mV/pNa, 860 mV/pK の感度を実現した。Na イオンセンサは、pNa が 1~4 の濃度域で、連続的な濃度変化に対する追従性の高い応答を示し、市販計測器の検出限界以下の低濃度領域で明確な応答を示した。K イオンセンサについても、pK が 1~4 の範囲で明確な応答を示した。以上の高い感度と濃度変化への応答性は、容量比が高い a-InGaZnO TFT、延長ゲート構造、内部液を持たないイオン電極を組み合わせることで実現しており、本研究で初めて考案し、実証したものである。

#### [第5章 酸化物半導体薄膜トランジスタの静電気センサへの応用]

a-InGaZnO の高いドレイン耐圧を利用した 静電気センサへの応用を検討した。ボトムゲート型とデュアルゲート型の2種類の静電気センサを開発し、帯電体の接触および近接に対する応答を評価した。ボトムゲート型センサは、正に帯電したアクリルプローブの接触でドレイン電流が増加し、負に帯電した PTFE プローブの接触でドレイン電流が減少した。この結果から、帯電の極性検知が可能であることがわかった。また、数 kV の帯電体を接触させても破壊に至らず、安定した応答を示した。デュアルゲート型は、トップゲート電極がフローティングの場合、ボトムゲート型と同様に帯電プローブの接触に対し応答したが、トップゲート電極の電位を GND 等に固定すると、外部電界が遮蔽され、応答を示さないことがわかった。このセンサの感応、不感応を制御できる特徴は、駆動 TFT の集積を容易にするため、二次元センサを実現する上で非常に大きなアドバンテージになる。

#### [第6章 結論]

本論文の結論をまとめ、a-InGaZnO TFT センサの社会実装の方向性について述べる。

# 論文内容要旨 (英文)

令和5年度入学 大学院博士後期課程

先進工学専攻 機械システム工学分野

氏 名 岩松 新之輔



論文題目 Study on sensor applications of amorphous InGaZnO-based oxide semiconductor thin-film transistors.

This thesis discusses sensor applications of amorphous indium-gallium-zinc oxide thin-film transistors (a-InGaZnO TFTs). The a-InGaZnO TFTs are promising candidates for MEMS sensor applications due to their high field-effect mobility, a small subthreshold swing voltage, a low off current, and low-temperature process adaptability.

In this thesis, the bottom-gate type a-InGaZnO TFTs are used for sensors. The TFT having Ti and Mo S/D electrodes exhibit good transfer characteristics at a drain voltage of 10 V, with a field-effect mobility of  $7 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . The output curves exhibit good linearity in the low-drain-voltage region, which indicates that both Ti and Mo yield good ohmic contacts. XPS analysis of Ti and a-InGaZnO interface indicated the presence of an oxygen-deficient layer at the interface region. These oxygen-deficient interface regions are believed to play a crucial role in ensuring good ohmic contact in the TFTs. Using bulk micromachining techniques, the InGaZnO TFTs were fabricated on the diaphragm and the bridge structures, which are widely used as basic structures for sensors. Diaphragm type TFTs were fabricated using stress-controlled a-InGaZnO thin films. Bridge type TFTs with microheater showed stable operation up to 200°C.

The concept of pH sensor is based on the threshold-voltage shift of bottom-gate transfer characteristic owing to the charge generation on the top insulators, which were called top-gate effects. Utilizing top-gate effects on a-InGaZnO TFTs, insulated-gate type and extended-gate type pH sensors are developed. The insulated-gate type with  $\text{TaO}_x$  thin-film as an ion-sensitive insulator indicated a high pH sensitivity of 273 mV/pH beyond the Nernst-limit. The extended-gate type indicated a high pH sensitivity of 620 mV/pH and ability to respond to a pH change of 0.001. The high sensitivity sodium ion and potassium ion sensors were realized using an extended-gate structure and a solid-state ion-sensitive membrane. The electrostatic potential sensor consisted a-InGaZnO TFT and dimethylpolysiloxane (PDMS) sensing membrane. The TFT sensing device responds to attaching and detaching charged dielectric materials to the PDMS surface. Drain current of the TFT sensing device changes, depending on the polarity of the charge.

# 学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 6 年 8 月 1 日

理 工 学 研 究 科 長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 西山 宏昭



副査 峯田 貴



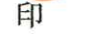
副査 廣瀬 文彦



副査 原田 知親



副査



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

|           |                                            |         |                                     |
|-----------|--------------------------------------------|---------|-------------------------------------|
| 論 文 申 請 者 | 専攻・分野名 先進工学専攻・機械システム工学分野 氏名 岩松 新之輔         |         |                                     |
| 論 文 題 目   | アモルファス InGaZnO 系酸化物半導体薄膜トランジスタのセンサ応用に関する研究 |         |                                     |
| 学位論文審査結果  | 合 格                                        | 論文審査年月日 | 令和 6 年 7 月 22 日～<br>令和 6 年 7 月 30 日 |
| 論文公聴会     | 令和 6 年 7 月 30 日                            | 場 所     | 工学部 5-301 教室                        |
| 最終試験結果    | 合 格                                        | 最終試験年月日 | 令和 6 年 7 月 30 日                     |

## 学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

本論文は、InGaZnO 系のアモルファス酸化物半導体薄膜トランジスタ (a-InGaZnO TFT) の高い電界効果移動度、小リーク電流、高耐圧、低温形成プロセスなどの特徴に着目し、a-InGaZnO TFT の作製と特性評価、MEMS 構造化への融合、イオンセンサ、および静電気センサへの応用に取り組んだ独自性の高い内容である。

第 1 章では、a-InGaZnO TFT をセンサに応用する意義と目的が的確に述べられている。第 2 章では、a-InGaZnO TFT 素子を作製し、界面での原子結合状態の詳細な分析により、ソース(S)およびドレイン(D)の電極との界面における低抵抗の酸素欠損層の存在を明らかにし、半導体層と電極の良好なオーミック接合への効果を示した。また、SD 間の表面では、独自手法の低ダメージのプラズマエッチングにより酸素欠損層を良好に除去することで、リーク電流を抑制した高抵抗バックチャネルが形成可能であることも見出した。第 3 章では、a-InGaZnO 膜のスパッタ成膜圧力の最適化により膜応力の抑制と良好な伝達特性を実現した。歪みのないブリッジ構造等の MEMS センサ形成手法を確立し、また、外部応力による TFT 特性への影響が小さいことも明らかにした。第 4 章では、a-InGaZnO TFT の伝達特性の広範囲での変化に着目した pH センサ開発に取り組み、経時ドリフトが生じるものの、相対的な pH 変化を高範囲で高分解能で検出できることを示した。さらに、世界に先駆けて Na および K イオンセンサへの応用も図り、数 ppm 相当の濃度変化を検出可能であることを見出した。第 5 章では、高耐圧の静電気センサへの応用にも取り組み、 $\pm 3$  kV の帯電物の接触および非接触での応答を確認し、デュアルゲート電極構造による応答の制御性も示した。第 6 章では、研究目的に沿った明確な結論が述べられている。

本学位論文は、研究背景および目的が的確に述べられ、論文の構成も適切で体裁も整っており、各章の研究内容について、各目的、取り組み方法、結果、考察に対する論理的に記述されている。本研究で得られたこれらの成果は、学術論文誌へ英文論文 3 報、和文論文 3 報が掲載され、本研究に対して客観的な評価が得られ、審査基準を満たしている。

以上の通り、本論文により得られた知見と成果は、学術的、工業的に価値あるものと認められ、博士 (工学) の学位論文として合格と判定した。

なお、本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ない。

## 最終試験の結果の要旨

最終試験は、学位論文を中心とした約 50 分の口頭発表の後、関連ある科目も含めて約 40 分の口頭による質疑応答により実施した。その結果、学位論文の内容、研究手法の妥当性、関連科目に関する理解度は十分にあり、この分野における十分な知識と研究能力を持つことが確認された。この最終試験の結果、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断し、最終試験を合格とした。