

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	TFT Modeling of Amorphous IGZO and Quantum Effect in Its Superlattice
著者(和文)	安部勝美
Author(English)	Katsumi Abe
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9306号, 授与年月日:2013年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:細野 秀雄,神谷 利夫,平山 博之,真島 豊,須崎 友文,平松 秀典
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9306号, Conferred date:2013/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

本論文は，“TFT Modeling of Amorphous IGZO and Quantum Effect in Its Superlattice”（アモルファス IGZO の TFT モデリングとその超格子による量子効果）と題し、8 章から構成されている。

本論文では、透明アモルファス酸化物半導体 In-Ga-Zn-O（a-IGZO）を活性層とする薄膜トランジスタ（TFT）について、a-IGZO 特有の移動度モデルを考慮した新たな TFT モデルを構築するとともに、その超格子における量子効果を観測した。その TFT モデルは、a-IGZO のキャリア密度に依存する移動度を用いたオン動作モデルと、その移動度とトラップ準位を用いた閾値下動作モデルで構成され、広い温度（250-393K）・電圧範囲における TFT 特性を精度良く再現できた。次に、a-IGZO を井戸層とする超格子を作製し、その光学特性から、a-IGZO は、アモルファスであるにも関わらず 5 nm 以下で量子干渉性を維持し、Krönig-Penny model で定量的に説明できる量子準位を形成することを見出した。さらに、その量子井戸を活性層とする TFT の特徴的なオン動作特性を、前記 TFT モデルを用いて解析し、a-IGZO の伝導帯の量子化とパーコレーション伝導により説明できることを示した。

以下に、各章の概要を述べる。

Chapter 1 “General Introduction（序論）” では、透明アモルファス酸化物半導体を活性層とする TFT とその動作モデル、及び、アモルファス半導体超格子に関する既往の報告をまとめ、本研究の背景および研究意義を記し、目的を述べた。

Chapter 2 “a-IGZO Gated-Four-Probe TFT and Bias-Dependent Mobility（a-IGZO GFP TFT とバイアス電圧に依存する移動度）” では、a-IGZO を活性層とする Gated-Four-Probe (GFP) TFT の特性から、移動度がゲート電圧のべき乗関数（指数 γ ）で表されることを見出し、それを用いた解析モデルを構築した。そのモデルは、水素化アモルファス Si（a-Si:H）TFT モデルと数学的に同形であり、オン動作におけるドレイン電流と、ソース・ドレイン間の電圧分布を再現した。

Chapter 3 “Carrier-Density Dependent Mobility Model for a-IGZO TFT（a-IGZO TFT のキャリア密度依存性を有する移動度モデル）” では、a-IGZO 膜の Hall 移動度のキャリア密度依存性から、キャリア密度のべき乗関数（指数 $\gamma/2$ ）で表される移動度を仮定し、Chapter 2 のモデルと数学的に同形の解析モデルを得た。そのモデルにより、a-IGZO TFT のオン特性と Hall 移動度のキャリア密度依存性を矛盾なく説明できることを示した。

Chapter 4 “TFT Modeling of a-IGZO Including Bias and Temperature Effects（バイアス、及び、温度効果を含む a-IGZO の TFT モデル化）” では、Chapter 3 の移動度がオン動作を、その移動度とトラップ密度が閾値下動作を決定する TFT モデルを構築した。そのモデルの近似として、低ドレイン電圧時に成り立つ解析モデルを定式化し、その解析モデルを用いて TFT モデルのパラメータとトラップ密度分布を得た。そのモデルを用いたデバイスシミュレーションにより、253-393 K における TFT の閾値下～オン特性を精度良く再現できた。

Chapter 5 “Modeling and Electrical Instability of a-IGZO Dual-Gate TFT（a-IGZO DG TFT のモデル化と電気的不安定性）” では、前章までの結果に基づき、a-IGZO dual-gate (DG) TFT の TFT モデルを構築し、トップゲート界面近傍のトラップがバイアスストレス不安定性の主な原因と考えられることを示した。

Chapter 6 “Optical Evidence of Quantization in a-IGZO Superlattice（a-IGZO 超格子における量子化の光学的な証拠）” では、a-IGZO（Tauc gap=3.1 eV）を井戸層、a-Ga₂O₃（Tauc gap=4.3 eV）を障壁層とする超格子構造を室温スパッタリング法にて作製し、その光学特性を調べた。その特性から、a-IGZO 井戸層は、伝導帯において厚さ 5 nm まで量子干渉性を維持し、Krönig-Penny モデルで定量的に説明できる量子準位を形成することを見出した。

Chapter 7 “Quantum Effects in a-IGZO Single-Well TFT (単一井戸 a-IGZO TFT における量子効果)” では、a-IGZO 単一井戸 (a-Ga₂O₃/a-IGZO/a-Ga₂O₃) を活性層に含む TFT の移動度特性から、量子化した a-IGZO 井戸層のキャリア輸送特性を検討した。単一井戸層の a-IGZO 井戸層厚さが 5 nm 以下において、その TFT 移動度とゲート電圧の関係は、平坦領域を含み、井戸層厚さに依存することを見出した。Chapter 4 の TFT モデルを用いた検討から、量子化による伝導帯の階段的な状態密度の形成とパーコレーション伝導モデルにより、その移動度の特徴的な特性を説明できることを示した。

Chapter 8 “General Conclusions (結論)” では、本研究の結果を総括し、これからの展開を展望した。

これらの研究により、a-IGZO の TFT モデリングとその超格子の量子効果の検証ができ、その結果、透明アモルファス酸化物半導体の電子状態とキャリア輸送機構に関する理解を深められた。

This thesis is entitled “TFT Modeling of Amorphous IGZO and Quantum Effect in Its Superlattice,” and consists of 8 chapters.

In Chapter 1 “General Introduction,” backgrounds and objectives of this thesis were described.

In Chapter 2 “a-IGZO Gated-Four-Probe TFT and Bias-Dependent Mobility,” an analytical model with a bias-dependent mobility, which reproduces electrical properties of gated-four-probe a-IGZO TFTs under on-operation, was developed.

In Chapter 3 “Carrier-Density Dependent Mobility Model for a-IGZO TFT,” a mobility model represented by a power function of the carrier density was proposed. The model can explain both the on operation of a-IGZO TFTs and the carrier-density dependence of Hall mobility of a-IGZO films.

In Chapter 4 “TFT Modeling of a-IGZO Including Bias and Temperature Effects,” a TFT model with the subgap traps and the carrier-density dependent mobility was developed. Device simulation employing the model reproduced the TFT characteristics over a wide range of bias voltage and temperature (253-393 K).

In Chapter 5 “Modeling and Electrical Instability of a-IGZO Dual-Gate TFT,” an operation of a-IGZO dual-gate TFT was studied based on the above TFT model. It suggested that the electrical instability was dominated by subgap traps near the top-gate interface.

In Chapter 6 “Optical Evidence of Quantization in a-IGZO Superlattice,” optical properties of a-IGZO superlattices with a-IGZO well and a-Ga₂O₃ barrier layers were investigated. An energy quantization of the a-IGZO well with the thickness at ≤ 5 nm was observed in the Tauc gap shifts, which were quantitatively explained by the Krönig-Penny model.

In Chapter 7 “Quantum Effects in a-IGZO Single-Well TFT,” a carrier transport in the quantized a-IGZO well of a-IGZO single-well TFTs was discussed. Novel relations between the field-effect mobility and the gate voltage for the TFTs were observed. An investigation with the TFT model in chapter 4 indicated that the relations can be explained by the quantized DOS and the percolation conduction model.

In Chapter 8 “General Conclusion,” all conclusions were summarized.

The studies grew further understandings on electronic structure and carrier transport of a-IGZO.