

近年、身の回りのあらゆる「モノ」にセンサーや通信機能が備わることで「インターネット」上で情報共有を行うことが可能となる IoT (Internet of Things) 社会が急速に普及している。IoT 社会は、これまで以上にネットワークを通じた情報共有化が進み、家電・住宅・自動車といった生活分野や製造・建設・運輸といった産業分野で期待されている。それに伴い IoT 社会を実現するためには新機能デバイスの開発も必要となっている。新機能デバイスの開発にあたり、フレキシブル・ハイブリット・エレクトロニクス (Flexible Hybrid Electronics: FHE) と呼ばれる従来のシリコン (Si) 基板を用いたデバイスとフレキシブル基板を組み合わせたシステムを構成する技術が注目されている。FHE の実現には、フレキシブル基板上への低温での配線やデバイス作製、150℃以下の部品の実装、バッテリーレス化、大面積・大量生産・低コスト化などの問題がある。また、これまで薄膜トランジスタ (Thin-Film Transistors: TFT) を代表とした半導体デバイスには Si が使われているが、近年、Si に比べ低消費電力、高移動度、低リーク電流、高信頼性を有する酸化物半導体が注目され、室温でも形成できることからフレキシブルデバイスやウェアラブルデバイスといった次世代エレクトロニクスへの応用が期待されている材料である。

本研究では、酸化物半導体の FHE 実現に向けて、デバイスの大面積・大量生産・低コスト化プロセス、酸化物薄膜の低温形成プロセスの開発、および酸化物薄膜デバイスの繰り返し曲げ耐性の評価について種々の実験を行った。本論文は、研究成果ならびに得られた新しい知見についてまとめたものであり、全7章で構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、本研究で用いた酸化物半導体の特徴、TFT の動作原理、薄膜形成手法および測定手法について述べている。

第3章では、酸化物半導体デバイスの大面積・大量生産・低コスト化として、溶液プロセスを用いて酸化亜鉛 (ZnO) と Al を添加した ZnO (AZO) を薄膜化し、Al の添加量、焼結雰囲気、基板による薄膜への影響について述べている。Al 添加量と焼結雰囲気を制御し、薄膜の表面観察や結晶性、化学結合状態などの構造解析とシート抵抗や TFT 特性といった電気特性を測定し、Al 添加量と焼

結露雰囲気による依存性を評価した。Al 添加量と焼結雰囲気を制御することで、電気伝導性を 5 桁以上大きく変化させることができ、またディスプレイに求められる 10^6 以上の On/Off 比が得ることに成功した。さらに新規デバイス開発を目指し、基板をガラス基板、Si 基板、サファイア基板の 3 種類の基板上に ZnO および AZO 薄膜を形成し、基板による優位性についても評価した。基板の種類によって ZnO および AZO 薄膜の結晶性や電気特性を向上させることが分かり、溶液プロセスにおいて基板の選択は重要であること明らかにしている。

第 4 章では、閾値電圧やヒステリシスなどのさらなる TFT 特性の向上を目指し、高抵抗化させた AZO バッファ層と ZnO チャンネル層を積層させた ZnO/AZO 積層構造を作製し、諸特性を評価したことについて述べている。AZO バッファ層の焼結雰囲気と膜厚を変化させ、構造解析と電気特性を評価し、AZO バッファ層の最適な条件を調査した。ZnO/AZO 積層構造にすることで、ZnO 単層膜に比べ ZnO チャンネル層の結晶性を向上させ電気特性も改善され、酸化物半導体の積層構造 TFT の特性改善に大きく影響を与えることを明らかにしている。

第 5 章では、溶液プロセスによる $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下の低温でのデバイス作製を目指し、水系前駆体溶液を用いた溶液プロセスで、波長が 172 nm の深紫外線であるエキシマ光と熱処理を組み合わせた低温形成プロセスを提案している。エキシマ光を照射することで水系前駆体溶液中の分子を薄膜化する前に分解し、熱処理により分解された原子・分子を結合させ、より低温で酸化物を形成するプロセスである。この低温形成プロセスにより酸化インジウム (In_2O_3) 薄膜を $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下で形成し、結晶性や構造解析と電気特性を測定し、提案した低温形成プロセスの有効性について明らかにしている。

第 6 章では、酸化物薄膜を用いた FHE が実現した際に必要となる繰り返し曲げ耐性について、フレキシブル基板上に酸化物薄膜を形成し、 $10,000$ 回の繰り返し曲げ試験と種々の実験を行ったことについて述べている。フレキシブル基板としてシクロオレフィンポリマーを採用し、パルスレーザ堆積法を用いて ZnO および AZO 薄膜を形成し、試作した繰り返し曲げ試験機を用いて $10,000$ 回の繰り返し曲げた後の構造解析と電気特性を評価した。繰り返し曲げ耐性が基板膜厚と薄膜の結晶性に大きく影響することを明らかにしている。また、ナノイン

デンテーション法を用いて作製した試料の硬度と弾性率を測定し、曲げた際の破壊メカニズムを電気特性と結晶性を関連付けて評価した結果について述べ、ZnO系材料が弾性率ならびに硬度が高く、曲げ耐性のある材料であることを初めて明らかにしている。

第7章では、本論文の結論について述べている。

以上、本論文では酸化物半導体のFHEの開発に向け、酸化物半導体を用いた薄膜デバイスの大面積・大量生産・低コスト化、低温プロセスによるデバイス作製、繰り返し曲げ耐性に関する新しい知見が今後の展望を含めまとめられている。