

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	
Title(English)	Study on defects in amorphous oxide semiconductor, a-In-Ga-Zn-O
著者(和文)	井手啓介
Author(English)	Keisuke Ide
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:乙第4146号, 授与年月日:2017年9月30日, 学位の種別:論文博士, 審査員:神谷 利夫,細野 秀雄,真島 豊,大場 史康,大友 明,節原 裕一
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:乙第4146号, Conferred date:2017/9/30, Degree Type:Thesis doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

論文審査の要旨及び審査員

(2000字程度)

報告番号	乙 第 号	学位申請者	井手 啓介	
	氏 名	職 名	氏 名	職 名
論文審査員	主査 神谷 利夫	教授	大友 明	教授
	細野 秀雄	教授	節原 裕一	教授 (大阪大学)
	真島 豊	教授		
	大場 史康	教授		

本論文は、東京工業大学で発明され、薄型ディスプレイの駆動用薄膜トランジスタ (TFT) に実用化されたアモルファス酸化物半導体 (AOS) a-In-Ga-Zn-O (a-IGZO) を対象に、複数の欠陥の存在を見出し、それらが電子物性、TFT 特性に与える影響を明らかにし、高品質・高安定 a-IGZO TFT を作製する指針を提案したものである。

第一章 “General introduction (緒論)” では、1996年のアモルファス酸化物半導体の提案から2004年の薄膜トランジスタ実現までの歴史、そして現在の課題と将来の新規応用について俯瞰し、本研究の背景、研究意義および目的を述べている。

第二章 “Effects of low-temperature ozone annealing on operation characteristics of a-IGZO TFTs (低温オゾン熱処理が a-IGZO TFT の動作特性に与える影響)” では、酸素分子よりも酸化速度が大きいオゾンを用いた熱処理を行うことで a-IGZO TFT を安定化するプロセス温度の低温化を試みている。オゾン処理により、200 °C 以下の低温でも残存キャリア濃度を十分に抑えられ、150 °C でも閾値下電圧勾配 S 値が 217 mV/decade、飽和移動度が ~11.4 cm²/Vs、閾値電圧が 0.1 V の良好な特性を達成している。

第三章 “Effects of excess oxygen on operation characteristics of a-IGZO TFTs (過剰酸素が a-IGZO TFT の動作特性に与える影響)” では、アモルファス酸化物半導体へ 300°C の高温でオゾン処理を施すと過剰酸素を導入して TFT 特性を劣化させることを見出し、その起源について調査している。この TFT は立ち上がり電圧が ~0 V ではあるが、S 値が非常に大きいという悪い特性を示した。高い正バイアスがかかることによって S 値の小さい鋭い立ち上がりを見せるようになったが、立ち上がり電圧が 40 V 以上へと大きく上昇した。この遷移した状態は 2.3 eV 以上のフォトン照射により初期特性と同等の状態へ戻るといふ双安定状態を示した。電圧-静電容量特性から求めた電子トラップ状態密度とあわせ、negative-U モデルを提唱している。

第四章 “Effects of strong oxidation on chemical states of weakly-bonded oxygen and hysteresis of a-IGZO TFTs (強酸化条件処理が弱結合酸素の化学状態と a-IGZO TFT のヒステリシスに与える影響)” では、なぜ高い酸素分圧で作製した a-IGZO TFT が動作しないのかという、従来解決されていなかった問題について調査するとともに、不安定性を利用した新規デバイスについて検討している。A-IGZO TFT では酸素流量比が 3 % の場合に最適なトランジスタ動作を示すが、10 % 程度まで増加させると第三章の高温オゾン処理と同様にバイアス-光照射による双安定状態が観測された。光電子分光法により、高温オゾン処理膜では a-IGZO のホストネットワーク中の酸素イオンと異なる結合状態の酸素が膜中に多く含まれていることを確認した。さらに、これら特有の negative-U 欠陥を積極的に用いたメモリー機能をもつ新規デバイスも開発した。

第五章 “Structural relaxation in a-IGZO (a-IGZO の構造緩和)” では、アモルファス酸化物半導体薄

膜の構造緩和の直接測定を試みている。アモルファス酸化物半導体は、アモルファスであるために回折法が使えないこと、薄膜でしか試料が得られないために高感度構造評価が難しいという問題がある。そこで光干渉を利用して nm 以下の膜厚測定精度を持ち、アモルファス-結晶混合材料の結晶分率の解析が可能な分光エリプソメトリーと、分子動力学計算による構造シミュレーションを行っている。酸素分圧が低いほど結晶化温度が低温化し、最適酸素流量比 3%でも 600℃程度から結晶化が始まり、温度が高くなるにしたがって結晶分率が高くなり、同時に緻密化が起こることを観測している。一方、結晶化が始まっていない 600℃以下でも 1.2%もの緻密化が起こっていることを確認し、300~400℃の熱処理で TFT 特性が改善する理由の一つが構造緩和であることを実証している。

第六章 “Effects of working pressure and thermal annealing on bulk density and nanopore structures in a-IGZO (製膜圧力と熱処理が a-IGZO の膜密度とナノ空孔構造に与える影響)” では、異なる膜密度を持つ a-IGZO の微構造の観察を行い、TFT 特性への影響を調査している。成膜時圧力 0.55 Pa において高い膜密度 $\sim 6.1 \text{ g/cm}^3$ が得られたが、5.0 Pa の高圧力では $\sim 5.5 \text{ g/cm}^3$ と低くなった。HAADF-STEM 観察から基板近傍に高密度層が確認され、さらに高い成膜時圧力の場合には柱状成長して粒界に空孔が生じて極端な低密度膜となっていることが明らかになった。昇温脱離ガスの定量分析により空孔の内部表面に大量の水や酸素が含まれていることを見出し、これが TFT 動作を阻害していることが示唆された。この低密度膜に 300℃程度の熱処理を施すことにより、不純物ガス種の除去および TFT 特性の改善が見られたが、STEM 観察では空孔の残留が確認された。この結果から、安定な a-IGZO TFT を作製するには、膜密度が高くなるように成膜時圧力を最適化することが重要であることを明らかにしている。

第七章 “Defect analysis for a-IGZO by hard x-ray photoelectron spectroscopy (硬 X 線光電子分光法による a-IGZO の欠陥解析)” では、弱結合酸素および構造的因子がバンドギャップ内の欠陥準位へ与える影響を定量的に評価するために、真空、オゾン、酸素雰囲気および水素処理を行い、硬 X 線光電子分光測定を行っている。まず、オゾン処理を行うことで価電子帯直上の欠陥を除去できることを明らかにした。一方で、この膜にさらに真空アニールを施すと、弱結合酸素が段階的に脱離するとともに、価電子帯直上欠陥が再生成された。再生成された価電子帯直上欠陥量と脱離酸素量には定量的相関が確認された。また、水素処理を行うことで価電子帯直上欠陥が増加することを確認し、オゾン処理膜との差分解析により、構造、弱結合酸素および水素の与える欠陥準位への影響を明らかにしている。

第八章 “General Conclusions” では、本研究を総括し、今後の展望を述べている。

以上を要するに本論文は、新しい種類の半導体である AOS について、アモルファス薄膜に有効な構造・欠陥評価法を検討し、それらによって特に酸素関連および構造関連の欠陥を発見し、TFT 特性との関係を明らかにしたものである。これらの成果は、AOS の欠陥を明らかにするという材料科学上の貢献だけでなく、良好な AOS TFT を作製する指針を与え、その実用化に大きく貢献したと判断できる。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。