



アモルファス酸化物半導体の多次元評価と薄膜トランジスタ特性の制御

安野, 聡

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2013-03-25

(Date of Publication)

2013-08-23

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5776

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005776>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 安野 聡

専 攻 電気電子工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

アモルファス酸化物半導体の多次元評価と

薄膜トランジスタ特性の制御

指導教員 喜多 隆 教授

本論文は6章から構成され、各章の概要は以下に示す通りである。

第1章では本論文の導入章として、アモルファス酸化物半導体に関する基礎物性について述べ、続いてアモルファス酸化物半導体の現状の研究や課題についての説明を行った後、本研究の目的と研究方法を述べる。

アモルファス InGaZnO(a-IGZO)を主としたアモルファス酸化物半導体による薄膜トランジスタ(TFT)の研究開発が近年盛んに実施されている。現在もフラットパネルディスプレイ(FPD)向け TFT の実用化に対する課題は多いが、様々なアプローチや改善策によってこれらの課題を克服する動きは活発であり酸化物半導体 TFT を使ったディスプレイの試作品の発表が相次いでいる。また、第8世代マザーガラス基板対応の a-IGZO スパッタターゲットや成膜装置も市販され始め、酸化物半導体は次世代 FPD 向け TFT の最有力候補として定着しつつあり、また実用化から量産化のフェーズに移行している状況である。量産化に当たっては材料や製造装置が整備される事に加えて、インラインにおける酸化物半導体の膜質や欠陥を評価(モニタ)する手法も必要となるが、これまでに有効な手法は見出されていなかった。このような状況のもと、本研究ではアモルファス酸化物半導体 TFT 作製プロセスに適用可能な膜質評価手法の開発を検討することで、アモルファス酸化物半導体 TFT の実用化・量産化の進展に寄与する立場を採った。また加えて、上記プロセス評価に対比しつつ相補的となるプロセス改善にも目を向け、多次元的な評価(キャラクタリゼーション)による a-IGZO 薄膜の物理的機構の解明から、プロセス改善や材料開発へのフィードバックを行うことを目的とした研究も行った。

第2章では、本研究において a-IGZO 薄膜の膜質や TFT プロセス評価手法の要となるマイクロ波光導電減衰法(μ -PCD)について、原理や装置構成とその特徴を述べている。さらに、多次元評価のために使用した様々な評価手法についてまとめた。いずれの評価においても、a-IGZO 薄膜の膜質や成膜条件などに関する重要なデータを与えるとともに、物理分析の評価事例が極めて少ない a-IGZO に関する有効な評価手法を確認できたことも意義が大きく、アモルファス酸化物半導体を多次元的に評価する体制を構築することにも繋がっている。

第3章では μ -PCDにより得られる a-IGZO 薄膜の過渡光応答特性を構成する成分や各成分とトランジスタ特性、a-IGZO 薄膜の膜質(欠陥密度、準位)の相関性を明らかにした。特にマイクロ波のピーク反射率成分がトランジスタ特性との相関性が非常に強いことを見出したのは、アモルファス酸化物半導体 TFT を使用した FPD の実用化、量産化の進展に対して、評価手法の観点から大きな発見であったと言える。過渡応答特性を構成する3成分の概要を示す。

(1)ピーク反射率

ピーク反射率は μ -PCD 測定時のレーザー照射時における過剰キャリアの生成過程と再結合過程によって構成される。このピーク反射率の強度は再結合過程に影響のする伝導帯のテイルステートを強く反映したものであることがわかり、これが要因となってトランジスタ特性との良い相関性が得られる。このため、ピーク反射率強度をモニタすることでトランジスタ特性=膜質を評価することが可能となり、実用面(インライン)で膜質管理へ展開されることが期待できる。

(2)遅い減衰成分

励起レーザー照射直後(ピーク反射率の後)に、時定数数十 ns オーダーの早い時定数をもつ減衰成分が認められた。本成分については温度依存性が認められず、SRH 理論に基づく考察から深い準位を介した再結合過程が支配的なメカニズムであることがわかった。

(3)遅い減衰成分

速い減衰成分後に現れる数 μ s オーダーの遅い減衰成分が認められた。捕獲キャリアの放出率を使ったアレニウス・プロットからバンド端から 0.2eV のエネルギー位置でのトラップ準位が関与したメカニズムと推定され、また Isothermal Capacitance Transient Spectroscopy(ICTS)の結果などから電子トラップによるものが優勢と考えられた。一方で本成分については、光劣化、Persistent Photocurrent(PPC)に関係すると考えられている準安定状態を介したメカニズムである可能性も否定はできず、遅い減衰成分については今後とも系統的な検討が必要である。

第4章では前章で明らかにした μ -PCD のピーク反射率強度とトランジスタ特性の係に着目し、様々な a-IGZO TFT プロセスの評価へ μ -PCD を応用展開することを目的とした検証を行った。その結果、以下に示す TFT プロセスへ μ -PCD が応用できることを実証した。

(1)組成依存性評価

a-IGZO 薄膜の In:Ga:Zn 比率に依存したピーク反射率強度の変化が認められ、さらに同組成比の TFT 特性から求まる飽和移動度、S 値との相関が良いことがわかった。また特に μ -PCD マッピングと TFT 移動度のマッピング特性は完全に一致した傾向を示しており、インラインでの組成バラツキなどの膜質管理へ適用できることを実証した。さらにコスバツ法と μ -PCD マッピングを組み合わせることで材料開発、材料探索における開発ツールとしての有効性も見出した。

(2)Ar+プラズマダメージの評価

Ar+プラズマ暴露時間に依存したピーク反射率強度の変化が認められ、a-IGZO 薄膜表面に形成される酸素欠損起因の表面準位量を評価できることがわかった。これにより、コストメリットの大きい 4 マスクプロセスにおけるドライエッチング工程へのプロセス管理に有用であることが示された。一方で実際のプラズマに使用されるプロセスガスには様々なものがあり、近年はウェットエッチングによる検討も進んでいることから、今後他のガス

種やエッチャントについての適用も検証する必要がある。

(3)SiO₂保護膜形成プロセス評価

保護膜/a-IGZO 界面準位の低減に起因して、ピーク反射率強度が増加する傾向が認められた。界面準位の低減が要因と推定され、また上層に SiO₂ 層(保護膜)を形成しても問題なく、過渡光応答特性を得ることもできていることから、幅広いプロセス工程に μ -PCD が応用できることが示された。先述の Ar+プラズマ暴露や第3章の結果と併せて、ピーク反射率成分がバルク状態だけではなく、表面や界面状態も反映した結果を示すことが明らかになった。

(4)熱処理依存性評価

熱処理温度の増加に伴ってピーク反射率強度が増加する傾向が確認され、熱処理によって a-IGZO のサブギャップ(テイルステートや深い準位など)が改善された結果を反映したものであることがわかった。

(5)膜厚依存性評価

膜厚の増加に伴ったピーク反射率強度が増加する傾向が認められた。膜厚が厚いほどマイクロ波を反射する励起キャリア数が増加することを反映した結果と推定され、 μ -PCD が a-IGZO 膜厚変化を検出できることを実証した。一方で、ピーク反射率が先述した複数のパラメータを含んだ結果を反映していることも示しており、それぞれの成分の判別や、適用させる工程を見極め評価に用いていく必要があることもわかった。

第5章では、a-IGZO TFT の電界効果移動度や負バイアス光ストレスなどトランジスタ特性への影響の大きい成膜時のガス圧力依存性に着目した多次元的な評価を実施し、ガス圧力メカニズムを明らかにした。ガス圧の低い 0.13Pa で成膜した a-IGZO を用いて作製した TFT の方が 1.33Pa に比べて電界効果移動度や S 値が改善され、さらに負バイアスストレス試験ではしきい値変動が少なくなり良好な特性を示した。その他、膜密度、ラフネス、水素濃度や状態密度の評価結果と併せて考察すると、ガス圧力依存性のメカニズムとして、スパッタ粒子の運動エネルギーやチャンバー内不純物との反応時間(スパッタリングレート)の寄与が大きいことがわかった。また、ガス圧を低くし過ぎると、Ar 粒子や O₂ イオンによるダメージが懸念されることもわかった。このため、成膜時のガス圧力には最適な領域があると予測され、これらを正確に求めるためにガス種、ターゲットと基板の距離、そしてガス圧力、ベース圧力などを総合的かつ系統的に調べることで、トランジスタ特性を改善できる可能性のあることがわかった。特に、近年問題となっている負バイアス光ストレスなどに関しては、ガス圧力による改善効果が非常に大きいことから、実用化や特性改善のための重要なパラメータの一つであることを見出したのは意義が大きい。

また加えて a-IGZO の欠陥の主要因とされる酸素欠損の生成機構について、放射光による XAFS 分析を実施し、a-IGZO 薄膜を構成する各金属元素(In, Ga, Zn)の特性を明らかにした。この結果、Ga-O が最も結合距離が短いことに起因して、酸素との結合エネルギーが大きいことがわかり、これまでに第一原理計算などにより予測されている結果と矛盾しない

(氏名：安野 聡 NO. 4)

ことがわかった。XAFS 解析がアモルファス酸化物半導体の含有元素の特質を調べることに適している事を示しており、材料探索や物理機構解明に有効な手法であることがわかった。

第 6 章では本論文を総括している。

以上のように、本研究では μ -PCD を主としたアモルファス酸化物半導体 TFT 作製プロセスに適用可能な膜質評価手法を確立することに成功した。特にピーク反射率強度をモニタすることで、様々な TFT プロセス(組成分布、プラズマダメージ、保護膜形成)の工程管理に適用させることが可能であり、現在量産化のフェーズにある酸化物半導体 TFT の進展に一層の寄与をもたらすことができるものと考えられる。また、研究開発、プロセス改善の点においても、本手法を応用することで、TFT を作製することなく、トランジスタ特性を予測することが可能で、開発や最適プロセスの抽出の迅速化が可能となることが期待される。

(別紙 1)

論文審査の結果の要旨

氏名	安野 聡		
論文 題目	アモルファス酸化物半導体の多次元評価と薄膜トランジスタ特性の制御		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	喜多 隆 印
	副 査	教授	林 真至
	副 査	教授	水畑 穰
	副 査		印
	副 査		印
要 旨			
アモルファス InGaZnO (α -IGZO) を主としたアモルファス酸化物半導体による薄膜トランジスタ (TFT) は可視域で透明であるため、ディスプレイ応用を中心に近年盛んに研究されている。現状ではフラットパネルディスプレイ (FPD) 向け TFT の実用化に対する課題は多いが、様々なアプローチや改善策によってこれらの課題を克服する動きは活発であり酸化物半導体 TFT を使ったディスプレイの試作品の発表が相次いでいる。また、第 8 世代マザーガラス基板対応の α -IGZO スパッタターゲットや成膜装置も市販され始め、酸化物半導体は次世代 FPD 向け TFT の最有力候補として定着しつつあり、また実用化から量産化のフェーズに移行している状況である。量産化に当たっては材料や製造装置が整備される事に加えて、インラインにおける酸化物半導体の膜質や欠陥を評価(モニタ)する手法が不可欠である。本学位論文では、これまでになかったアモルファス酸化物半導体 TFT 作製プロセスに適用可能な膜質評価手法の開発成果について具体的にかつ詳細に述べている。			
第 1 章では本論文の導入章として、アモルファス酸化物半導体の基礎物性について概説し、続いてアモルファス酸化物半導体が直面している課題について明らかにして、本研究の目的と研究方法を述べている。このような状況のもと、本研究では、アモルファス酸化物半導体 TFT 作製プロセスに適用可能な膜質評価手法の開発を検討することで、アモルファス酸化物半導体 TFT の実用化・量産化技術の基礎を確立することを目指した。また、プロセス評価に対比しかつ相補的となるプロセス改善にも注目し、多次元的な評価による α -IGZO 薄膜の物理的機構を解明し、プロセス改善や材料開発へのフィードバックの可能性についても検討を加えている。			
第 2 章では、本研究において α -IGZO 薄膜の膜質や TFT プロセス評価手法の要となるマイクロ波光導電減衰法 (μ -PCD) について、原理や装置構成とその特徴を述べている。さらに、多次元評価のために使用した様々な評価手法についてまとめた。いずれの評価においても、 α -IGZO 薄膜の膜質や成膜条件などに関する重要なデータを与えると同時に、物理分析の評価事例が極めて少ない α -IGZO に関する有効な評価手法を確認できたことも意義が大きく、アモルファス酸化物半導体を多次元的に評価する体制を構築することにも繋がっている。			
第 3 章では μ -PCD により得られる α -IGZO 薄膜の過渡光応答特性を構成する成分や各成分とトランジスタ特性、 α -IGZO 薄膜の膜質(欠陥密度、準位)の相関性を明らかにしている。特にマイクロ波のピーク反射率成分がトランジスタ特性との相関性が非常に強いことを見出したのは、アモルファス酸化物半導体 TFT を使用した FPD の実用化、量産化の進展に対して、評価手法の観点から大きな発見であったと言える。過渡応答特性を構成する 3 つ成分の概要は以下の通りである：			
(1) ピーク反射率 ピーク反射率は μ -PCD 測定時のレーザー照射時における過剰キャリアの生成過程と再結合過程によって構成される。このピーク反射率の強度は再結合過程に影響のする伝導帯のテイルステートを強く反映したものであることがわかり、これが要因となってトランジスタ特性との良い相関性が得られた。このため、ピーク反射率強度をモニタすることでトランジスタ特性=膜質を評価することが可能となり、実用面(インライン)で膜質管理へ展開されることが期待できる。			
(2) 数 10ns オーダーの速い減衰成分 励起レーザー照射直後(ピーク反射率の後)に、時定数数 10 ns オーダーの早い時定数をもつ減衰成分が認められた。本成分については温度依存性が認められず、理論に基づく考察から深い準位を介した再結合過程が支配的なメカニズムであることを明らかにしている。			

氏名

安野 聡

(3) 数 μs オーダーの遅い減衰成分

遅い減衰成分後に現れる数 μs オーダーの遅い減衰成分を区別して観測することに成功している。捕獲キャリアの放出率を使ったアレニウス・プロットからバンド端から 0.2eV のエネルギー位置でのトラップ準位が関与したメカニズムと推定され、また ICTS の結果などから電子トラップであることを明らかにした。

第 4 章では前章で明らかにした μ -PCD のピーク反射率強度とトランジスタ特性の關係に着目し、a-IGZO TFT プロセス評価へ μ -PCD を応用展開することを目的とした検証を行った。その結果、以下に示す様々な TFT プロセスへ μ -PCD が応用できることを実証した。

(1) 組成依存性

a-IGZO 薄膜の In:Ga:Zn 比率に依存したピーク反射率強度の変化が認められ、さらに同組成比の TFT 特性から求まる飽和移動度、S 値との相関が良いことがわかった。また特に μ -PCD マッピングと TFT 移動度のマッピング特性は完全に一致した傾向を示しており、インラインでの組成バラツキなどの膜質管理へ適用できることを実証した。さらにコスバック法と μ -PCD マッピングを組み合わせることで材料開発、材料探索における開発ルーツとしての有効性を見出した。

(2) Ar⁺プラズマダメージの評価

Ar⁺プラズマ暴露時間に依存したピーク反射率強度の変化が認められ、a-IGZO 薄膜表面の酸素欠損量が要因となっていることがわかった。これにより、コストメリットの大きい 4 マスクプロセスにおけるドライエッチング工程へのプロセス管理に有用であることを示した。

(3) SiO₂保護膜形成プロセス評価

保護膜/a-IGZO 界面準位の低減に起因して、ピーク反射率強度が増加する傾向が認められた。これは界面準位の低減が要因であり、幅広いプロセス工程に μ -PCD が応用できることが示された。先述の Ar⁺プラズマ暴露や第 3 章の結果と併せて、ピーク反射率はバルク状態だけではなく、表面や界面状態も反映した結果を示すことが明らかにした。

(4) 熱処理依存性

熱処理温度の増加に伴ってピーク反射率強度が増加する傾向が確認され、熱処理によって a-IGZO のサブギャップ(テイルステートや深い準位など)が改善された結果を反映したものであることを明らかにした。

第 5 章では、a-IGZO TFT の電界効果移動度や負バイアス光ストレスなどトランジスタ特性への影響の大きい成膜時のガス圧力依存性に着目した多次元的な評価を実施し、ガス圧力メカニズムを明らかにした。ガス圧の低い 0.13Pa で成膜した a-IGZO を用いて作製した TFT の方が 1.33Pa で成膜した a-IGZO を用いて作製した TFT に比べて電界効果移動度や S 値が改善され、さらに負バイアスストレス試験ではしきい値変動が少なくなり良好な特性を示した。他方、ガス圧を低くし過ぎると、Ar 粒子や O₂ イオンによるダメージが懸念されることもわかった。このため、成膜時のガス圧力には最適な領域があると予測され、これらを正確に求めるためにガス種、ターゲットと基板の距離、そしてガス圧力、ベース圧力などを総合的かつ系統的に調べることで、さらにトランジスタ特性を改善できる可能性のあることがわかった。特に、近年問題となっている負バイアス光ストレスなどに関しては、ガス圧力による改善効果が非常に大きいことから、実用化や特性改善のための重要なパラメーターの一つであることを突き止めた。

a-IGZO の欠陥の主要とされる酸素欠損の生成機構について、放射光による X 線吸収微細構造 (XAFS) 分析を実施し、a-IGZO 薄膜を構成する各金属元素(In, Ga, Zn)の特性を明らかにした。この結果、Ga-O が最も結合距離が短いことに起因して、酸素との結合エネルギーが大きいことがわかり、これまでに第一原理計算などにより予測されている結果と矛盾しないことがわかった。XAFS 解析がアモルファス酸化物半導体の含有元素の特質を調べることに適している事を示しており、材料探索や物理機構解明に有効な手法であることを明らかにした。

第 6 章では本論文を総括している。

これまで述べたように、本論文ではアモルファス酸化物半導体薄膜の結晶構造とトランジスタ動作特性について、インライン評価(モニタ)技術である μ -PCD 法を開発し、系統立てた詳細な評価を実施することによって、組成分布、プラズマダメージ等の影響を明らかにし、トランジスタ特性の関係を明らかにした。

以上のように、本研究では μ -PCD を主としたアモルファス酸化物半導体 TFT 作製プロセスに適用可能な膜質評価手法を確立することに成功した。これにより、TFT プロセス(組成分布、プラズマダメージ、保護膜形成)の工程管理だけでなく、これまで不可能であった TFT を作製すること無しにトランジスタ特性を予測することを可能にし、開発や最適プロセスの抽出の迅速化を実現した。よって学位申請者の 安野 聡は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。