

# 論文内容の要旨

## 研究背景・目的

酸化物半導体である InGaZnO (IGZO) は、スパッタ法により室温成膜された非晶質薄膜においても、結合の乱れに起因したサブギャップ欠陥準位密度が小さい為に、薄膜トランジスタ (TFT) のチャネル材料として用いた場合、非晶質 Si に比べ良好な特性を示す。この従来の非晶質半導体材料には無いユニークな点が注目され、IGZO はプラスチック等の低融点フレキシブル基板上に作製されるフレキシブル TFT のチャネル材料として期待されている。しかしながら、通常 IGZO TFT では実用に十分な TFT 特性・信頼性を得る為に、300 °C 以上でのポストアニール処理による IGZO バルク、及び絶縁膜界面に存在するサブギャップ欠陥準位密度の低減が必要である。従って IGZO TFT を用いたフレキシブルデバイスの実現には、プラスチック基板のガラス転移温度以下のプロセスで、効果的にサブギャップ欠陥準位密度を低減させることによる、TFT 特性・信頼性の制御が求められる。

従来研究により、実際に作製した TFT の IGZO チャネル中には、絶縁膜からの拡散、及び成膜時における取り込みによって、意図していない不純物水素が存在していることが報告されていた。また IGZO に対し水素がシャロードナーとして働くことがよく知られている一方で、水素が IGZO 膜中の電子トラップを末端している可能性も示唆されており、IGZO の電子物性に対する不純物水素の影響は議論の途上であった。従って、IGZO TFT 特性・信頼性を制御する為には、IGZO の電子物性に対する不純物水素の影響を明らかにし、膜中水素量の制御を行うことが重要であると考えた。そこで本研究では、水素が IGZO の電子物性に与える影響の解明、及び膜中水素量の制御による IGZO TFT の特性・信頼性制御を試みる為に、①チャネル保護絶縁膜から IGZO チャネル中に拡散した水素と、②成膜中に取り込まれた水素が、IGZO 薄膜物性、及び TFT 特性・信頼性に与える影響についてそれぞれ研究を行った。

また、実際にプラスチック基板上に IGZO TFT を作製する為には、低温形成可能な絶縁膜材料が求められる。低温形成可能かつ、無機材料に比べフレキシビリティに優れる塗布型有機絶縁膜は、フレキシブル IGZO TFT の絶縁膜として期待できる。しかしながら、塗布型有機絶縁膜を用いたフレキシブル IGZO TFT の作製は報告されていたものの、その特性は無機絶縁膜を用いた場合と比較すると劣り、信頼性に関する議論も不十分であった。従って本研究では、150 °C 以下の低温プロセスによる③塗布型有機ゲート絶縁膜を用いたトップゲート・セルフアライン型 IGZO TFT の作製、及び特性・信頼性の制御に取り組んだ。それぞれの研究で得られた知見について下記①、②、③にまとめる。

- ① チャネル保護絶縁膜から IGZO チャネル中に拡散した水素が TFT 特性・信頼性に与える影響

ボトムゲート型 IGZO TFT において、IGZO チャンネル上にプラズマ支援化学堆積 (PECVD) 法により成膜した  $\text{SiO}_x$  エッチングストッパー層 (ESL) からの拡散水素が、IGZO TFT 特性・信頼性に与える影響について評価を行った。その結果、 $\text{SiO}_x$  ESL から IGZO チャンネル中へ拡散した水素は、IGZO 膜内、及びフロントチャンネル界面の電子トラップを終端し、TFT 特性・信頼性を向上させることが明らかとなった。一方で、二次イオン質量分析 (SIMS) により評価した拡散水素量と、TFT 特性、及び CV 特性との量的関係性について考察した結果、 $\text{SiO}_x$  ESL から拡散した水素はそのほぼ全てがシャロードナーとして働き IGZO のキャリア密度を増加させる為、閾値電圧の負シフトを招くという結論を得た。さらに、IGZO バックチャンネル領域に過剰な水素が存在した場合、TFT のスイッチングメカニズムが変化することにより、閾値電圧が大幅に負シフトすることを明らかにした。

## ② 成膜中に取り込まれた水素が IGZO 薄膜物性、及び TFT 特性・信頼性に与える影響

DC スパッタ法による IGZO 薄膜の成膜時に  $\text{H}_2$  ガスを導入することにより、意図的に膜中に取り込ませた水素が IGZO 薄膜物性、及び TFT 特性・信頼性に与える影響について評価を行った。成膜時の  $\text{H}_2$  ガス導入により、IGZO 膜中水素濃度は大幅に増大し、それに伴い IGZO 薄膜の体積抵抗率は減少した。しかしながら、 $300\text{ }^\circ\text{C}$  で一時間のアニール処理を行った後には、膜中水素プロファイルの変化はほとんど見られなかったにもかかわらず、体積抵抗率が大幅に増大した。この結果は、アニールにより IGZO 膜中の水素の結合状態に何らかの変化があったことを示唆している。また  $\text{H}_2$  ガス導入有り・無しで成膜した IGZO チャンネルを用いた TFT 特性を比較したところ、上記①に記した様な、IGZO 膜中水素濃度増加に伴う TFT 特性の向上は見られなかった。

一方で IGZO 膜中水素濃度の増加に伴い、光学バンドギャップが増大し、それに伴って光照射負ゲートバイアスストレス (NBIS) 信頼性試験における閾値電圧の負シフトは減少した。この結果は、成膜時に IGZO 膜中に多量に取り込まれた水素によって価電子帯近傍の裾状準位が終端されたことを示唆していると考えられる。しかしながら、 $\text{H}_2$  ガスを導入し IGZO チャンネルの成膜を行った TFT では、NBIS 試験における S 値の劣化が顕著に見られた。これは成膜時に過剰な水素が取り込まれたことによって、IGZO 膜中の弱結合状態の水素が増加し、その弱結合水素が光照射により新たな欠陥準位を生成した為であると考えられる。

## ③ 塗布型有機ゲート絶縁膜を用いたトップゲート・セルフアライン型 IGZO TFT の作製と特性・信頼性の向上

フレキシブル TFT のゲート絶縁膜として、低温形成が可能であり、無機材料と比較してフレキシビリティに優れる塗布型有機絶縁膜に着目し、ポストアニール処理を含む最大プロセス温度  $150\text{ }^\circ\text{C}$  での IGZO TFT 作製に取り組んだ。その際 TFT 構造としては、ソース・ドレイン (S/D) 電極とゲート電極の重なり合いを無くし、寄生容量を最小化することにより回路動作速度の高速化が可能なトップゲート・セルフアライン構造を採用した。

チャンネルパターンニング時の汚染・ダメージから IGZO チャンネル表面を保護するチャンネル保護層 (PL) を導入することにより、良好なスイッチング特性を示す IGZO TFT の作製を達成した。しかしながら作製した TFT は、大気環境下で保管・測定を行った場合、時間経過に伴い閾値電圧が負シフトすることが確認された。またこの閾値電圧の負シフトは、正ゲートバイアスストレス (PBS) 試験により加速された。真空チャンバー内に TFT を静置し測定した場合、この時間経過、また PBS 試験による閾値電圧の負シフトが抑制されたことから、水などの大気分子の吸着がこの大気環境下における TFT 特性劣化の主要因であることが考えられた。そこで、大気分子吸着の抑制を目的に、TFT 上に更にパッシベーション層として有機絶縁膜層を形成したところ、大気環境下での特性不安定性を改善で出来ることを示した。

## 総括

上記①に記した研究結果より、IGZO チャンネル内に拡散した水素は、IGZO 膜内、及び絶縁膜界面の電子トラップを終端し、TFT 特性・信頼性を向上させる一方で、同時にシャロードナーとして働くために、閾値電圧の負シフトを招くことを明らかにした。TFT の閾値電圧は適切な範囲内に制御する必要がある為、水素拡散による電子トラップの終端効果は実用上有限であるといえるが、本研究成果は IGZO TFT の特性・信頼性を制御する上で、絶縁膜からの拡散水素量の制御が非常に重要であることを示した。また上記②に記した研究成果から、DC マグネトロンスパッタ法による IGZO 成膜時に H<sub>2</sub> ガスを導入した場合、IGZO 膜中に多量の水素が取り込まれ、その結果光学バンドギャップが増大し、それに応じて NBIS 信頼性試験における閾値電圧の負シフトが低減することが明らかとなった。しかしながら、同時に IGZO 膜内で増加した弱結合水素に起因すると考えられる、光照射による特性の劣化が確認された。以上の結果から、成膜時の H<sub>2</sub> ガス導入は必ずしも IGZO TFT 特性・信頼性を向上するとは言えないものの、H<sub>2</sub> ガスを導入しない通常の条件で成膜した IGZO 膜中にも、真空チャンバー内の残留水分由来の不純物水素が取り込まれている。本研究成果は成膜時の積極的 H<sub>2</sub> ガス導入による、IGZO 膜中水素量の安定化 (制御性向上) の可能性を示しており、量産を考慮した場合、有用な技術になり得る可能性を示唆している。

また上記③に記した研究では、塗布型有機絶縁膜を用いることにより、150 °C 以下のプロセスで良好な特性を示すトップゲート・セルフアライン型 IGZO TFT の作製を達成した。また PL 層を導入することにより、チャンネルパターンニング時の汚染、ダメージフリーなフロントチャンネル界面形成を行うことが、TFT 特性を向上させる上で効果的であることを示した。また、有機絶縁膜は無機絶縁膜に比べて大気中の水分の影響を受けやすい為、大気環境下での安定性向上の為には、良質なパッシベーション層の形成が重要であることを示した。

本研究で得られた以上の知見が、IGZO TFT を用いたフレキシブルデバイスの実現・発展に寄与することを願い、本論文の総括とする。