

フラットパネルディスプレイ用高移動度、高信頼性酸化物半導体スパッタリングターゲット

Sputtering Target of Oxide Semiconductor with High Electron Mobility and High Stability for Flat Panel Displays

宮永 美紀*
Miki Miyanaga

綿谷 研一
Kenichi Watatani

栗田 英章
Hideaki Awata

フラットパネルディスプレイ (FPD) 用薄膜トランジスタ (TFT) に用いるための半導体材料として、酸化物半導体が注目されており、すでに In-Ga-Zn-O (IGZO) が量産されている。酸化物半導体が FPD に用いられる場合、酸化物セラミックス焼結体を原料 (スパッタリングターゲット) として薄膜が形成される。当社は、原料である酸化物セラミックス焼結体の販売を目指して、8K-TV を実現できる新規の酸化物半導体材料の開発を行ってきた。その結果、In-W-Zn-O 系において、スパッタリングターゲットとして好適な高密度、低電気抵抗の酸化物セラミックス焼結体を合成でき、その焼結体を用いて成膜した TFT は、IGZO 比3倍以上の高い電子移動度を実現すると共に、実用特性として重要な信頼性も IGZO 並以上を実現できた。

Metal oxide semiconductors are expected to be used for the thin film transistor (TFT) of large high-definition flat panel displays (FPDs) and In-Ga-Zn-O (IGZO), in particular, is already being mass-produced. For high-definition 8K FPDs, we have developed a new metal oxide semiconductor with a high electron mobility. Semiconductors used as a film in a TFT are made of oxide ceramics. We sintered the new metal oxide ceramic, In-W-Zn-O, as the base material of the new metal oxide semiconductor film and studied the properties of a TFT that used the new metal oxide semiconductor. The electron mobility of In-W-Zn-O was three times higher than that of IGZO and the stability of a TFT with In-W-Zn-O was superior to that of one with IGZO. In-W-Zn-O sintered material showed a high density and a low electrical resistivity, indicating that it is suitable as a sputtering target. This development will lead to the realization of 8K FPDs.

キーワード：酸化物セラミックス焼結体、薄膜トランジスタ、In-W-Zn-O、電界効果移動度

1. 緒言

FPDには、緑、青、赤の各画素の明暗を制御するために、画素内にそれぞれ TFT^{*1}が配置されている。FPDはFHDから4K、8K^{*2}へと高精細化が進んでおり、TFTの半導体層として高電子移動度^{*3}材料が求められている⁽¹⁾。表1に、学会での情報を基にTFTの半導体層材料についてまとめた^{(2)~(4)}。最も広く用いられている a-Si^{*4}は、電子移動度が低く、8Kへの対応が難しいといわれている。LTPS^{*5}は、大面積ガラス基板への成膜が難しく、製造コストが高いことがネックである。これに対して2004年に細野らが提案した⁽⁵⁾酸化物半導体は、現在はG8.5の基板サイズへの適用実績ではあるが、a-Si並までのサイズアップが可能と言われており、現在量産適用が進んでいる。細野らが提案した酸化物半導体はIGZOと呼ばれるIn-Ga-Zn-O系の材料であるが、電子移動度が10cm²/Vs程度であることから、8K-TVへの対応には更なる高移動度が求められており、量産適用においては、IGZO並の信頼性と高移動度を両立できる材料が求められている。

当社では物質・材料研究機構が報告した高移動度材料であるIn-W-O^{(6),(7)}に着目し開発を進めてきた。酸化物半導

体は、酸素欠陥によって電子が生成するが、TFTとして用いるためには酸素欠陥量を最適範囲に制御する必要がある。GaよりWの方が酸素との結合解離エネルギーが大きいため、微量のW量で酸素欠陥低減の効果が大きい。このため電子伝導パスであるIn元素の含有量が相対的に増加でき、移動度を高めることが可能である。

表1 FPD向け各種半導体材料

		半導体材料		
		a-Si	LTPS	酸化物半導体
TFT特性	電子移動度 (cm ² /Vs)	<1	30-100	10-30
	信頼性	Low	High	Med.
	リーク電流 (A/μm)	10 ⁻¹³	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁶
量産性	適用基板サイズ (m)	2.9×3.1 (G10<)	1.5×1.9 (G6)	2.2×2.5 (G8.5)
	製造マスク枚数 (枚)	4-6	5-9	4-6
	TFT特性均一性	High	Low	High

TFTに使用される酸化物半導体層は、スパッタリング法^{*6}によって形成されており、その原料は酸化物セラミックス焼結体である。粉末冶金技術により酸化物セラミックス焼結体からなるスパッタリングターゲットを作製し、そのスパッタリングターゲットを原料として、実際にTFTを作製、評価することで、優れたTFT特性を発現できるスパッタリングターゲットを実現できた。

2. 酸化物焼結体の開発

これまで高移動度が報告されているIn-W-Oは、高密度の焼結体を得ることが難しかった。In₂O₃は約1500℃で焼結が進行するが、酸化タングステンは約1200℃で分解、蒸発してしまうため、焼結が完了する前に飛散してしまう。Wの蒸発前に焼結を完了させることを目的として、Wとの化合物が低融点となる元素を探索、ZnWO₄が融点約1200℃であったため、ZnOを添加することを試みた。結果、1200℃にてZnWO₄相が溶融することで焼結が進行し、Wの蒸発を抑制した高密度の焼結体を得られた。得られたIn-W-Zn-O焼結体の特性を表2に示す。DCスパッタリングが可能な低電気抵抗の焼結体を得られた。次に、得られた焼結体を用いて、TFTを形成、特性を評価した。

表2 当社開発材の焼結体特性

	当社開発材	従来材
構成元素	In-W-Zn-O	In-Ga-Zn-O
焼結密度 (%)	98<	98<
電気抵抗 (Ωcm)	≤ 10 ⁻²	< 10 ⁻²

3. 開発ターゲットを原料としたTFTの特性

3-1 開発ターゲットを用いたTFTの作製

基板は熱酸化SiO₂膜付きの低抵抗Siウエハを使用した。TFTはメタルマスクを利用したステンシル法で作製した。

まず、基板の上にメタルマスクをセットして、半導体層としてIn-W-Zn-O膜を形成した。半導体層の形成にあたっては、当社開発のIn-W-Zn-O焼結体をスパッタリングターゲットとして用いた。ターゲットサイズはφ2インチ、スパッタ電力60W、基板-ターゲット間 (ST) 距離90mm、圧力0.5Pa、全ガス流量30sccm、酸素分圧10、20%とした。半導体層の膜厚は30nmとした。続いて、メタルマスクを使って、金属Mo層からなるソース (S) 電極とドレイン (D) 電極を形成した。スパッタ条件はAr雰囲気、圧力1Pa、RF電力200W、ST距離90mm、膜厚100nmとした。続いて、保護膜を形成した。保護膜は、プラズマ励起化学的気相堆積 (PECVD) 法で形成したSiO₂ (PECVD-SiO₂) 膜とスパッタリング法で形成したAl₂O₃ (SP-Al₂O₃)

膜を使用した。PECVD-SiO₂膜はSiH₄-N₂O混合ガスを用いて膜厚200nmを成膜し、反応性イオンエッチング (RIE) によりコンタクトホールを形成した。SP-Al₂O₃膜は、4インチAl金属ターゲットを用い、酸素分圧25%、圧力1Pa、RF電力200Wにて、膜厚200nmを成膜し、リフトオフにてコンタクトホールを形成した。RIE、リフトオフ後に、サンプルを窒素雰囲気350℃で1時間アニールした。図1に得られたTFTの上面写真、断面図を示す。基板のSiウエハをゲート電極として用い、チャンネル幅W=1000μm、チャンネル長L=350μmとした。

半導体パラメーターアナライザーB1500A (キーサイト・テクノロジー製) を用いて、TFT特性を評価した。信頼性試験 (NBS、PBS)^{*7}のストレス条件は、V_{ds}=±30V、室温、暗所、ストレス時間3600sとした。

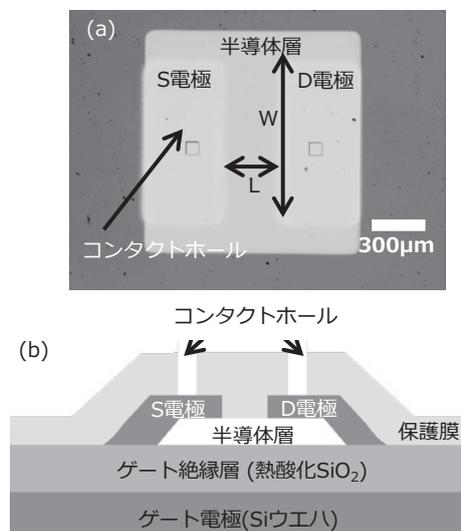


図1 TFTの構造 (a) TFT上面写真、(b) TFT断面図

3-2 開発材料In-W-Zn-OのTFT基礎特性

表3に得られたPECVD-SiO₂を保護膜とした場合のTFT特性をまとめた。出力特性ではV_{ds}=0Vで、I_{ds}=0Aに近く良好な特性であった (図2 (a))。V_{ds}=5.1Vでの伝達特性 (図2 (b)) も、移動度35cm²/Vs、V_{th}^{*8}=0.8V、SS値^{*9} 0.08V/decadeとIGZO (In:Ga:Zn=1:1:1) の移動度である10cm²/Vsを越えた高移動度を得ることができた。また、IGZOと同様の1V付近のV_{th}、低いOFF電流も達成できた。

図3には、移動度、V_{th}の成膜時の酸素分圧依存性を示している。成膜時の酸素分圧が変化しても移動度は高いままで、V_{th}値も一定であった。このことはスパッタリング成膜装置内に酸素濃度分布があってもTFT特性が影響を受けないことを意味しており、大型ガラス基板面内でのTFT特

表3 開発ターゲットを用いて作製したTFTの特性
(保護膜PECVD-SiO₂膜)

		IGZO	当社開発品
移動度 (cm ² /Vs)		10	35
V _{th} (V)		≈ 1.0	0.8
信頼性: ΔV _{th} (V)	PBS	2.00<	0.40
	NBS	0.10<	0.07

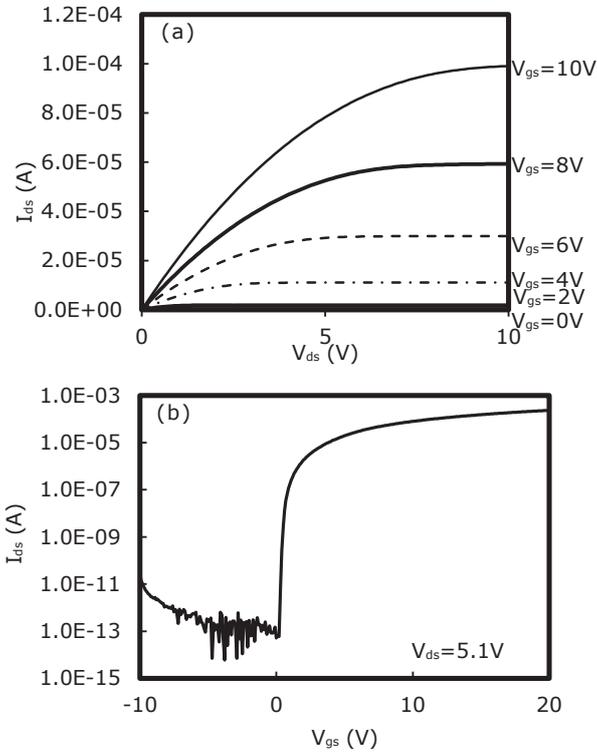


図2 TFT特性 (a) 出力特性、(b) 伝達特性

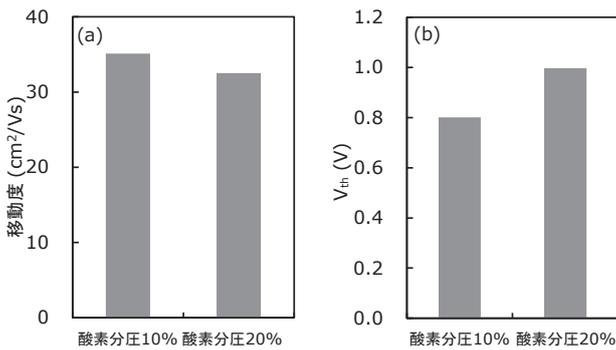


図3 成膜時酸素分圧のTFT特性への影響
(a) 移動度、(b) V_{th}

性バラツキ抑制において優位と考えられる。

次にTFTの繰り返し駆動時の劣化特性を評価するために信頼性試験であるNBS、PBSを実施した。図4にNBS、PBS中の0s、1200s、2400s、3600s時点での伝達特性を示

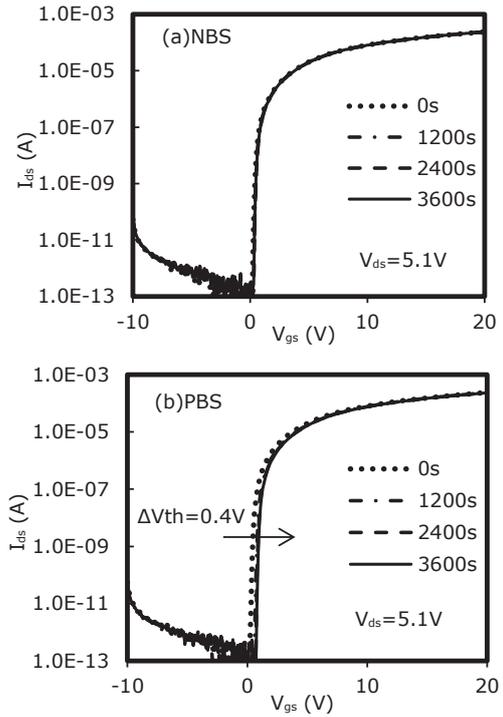


図4 ストレス試験時の特性変化

す。ストレス時間が増加してもNBSではV_{th}はほとんど変化せずV_{th}シフト量は0.07Vと非常に安定であった。PBSでのV_{th}シフト量は正側へ0.40Vであった。同様の検討をIGZOにて行ったところ、NBSでのV_{th}シフト量は0.10V、PBSのV_{th}シフト量は2.00Vであり、当社開発のIn-W-Zn-OはIGZO比同等性能以上であることが確認できた。

3-3 開発材料In-W-Zn-Oのアニール耐性

次に、アニールの温度を上昇させ、TFT特性への影響を調査した。図5には、保護膜をSP-Al₂O₃膜とした場合の移動度のアニール温度依存性IGZOとIn-W-Zn-Oに関して調査した結果を示す。アニールは大気雰囲気にて各温度で1時間処理した。アニール温度の上昇に伴い、IGZOは移動

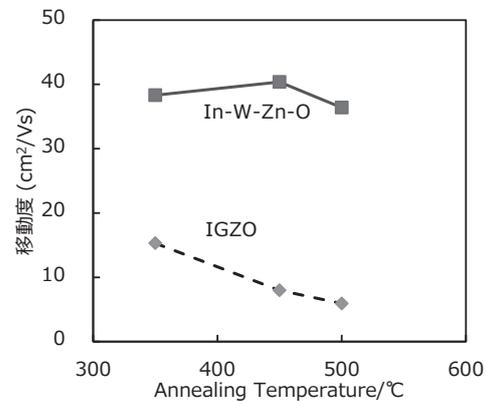


図5 移動度のアニール温度依存性 (保護膜SP-Al₂O₃膜)

度が低下したのに対して、In-W-Zn-Oは移動度の低下がみられなかった。

次に、In-W-Zn-Oに関してPECVD-SiO₂膜を保護層として用いた場合の移動度のアニール温度依存性を図6に示す。アニールは窒素雰囲気にて各温度で1時間処理した。アニール温度を上昇させても移動度の低下はみられなかった。450℃までのNBS、PBSでのV_{th}シフト量を図7に示す。アニール温度の上昇に伴い、V_{th}シフト量が減少しており、信頼性が向上することがわかった。

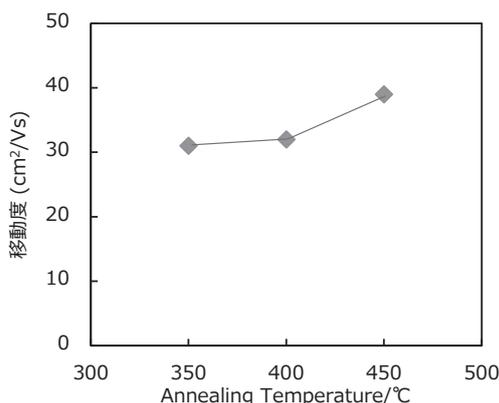


図6 移動度のアニール温度依存性 (保護膜PECVD-SiO₂膜)

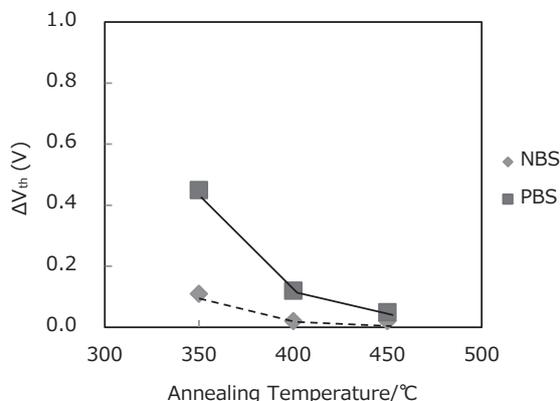


図7 信頼性のアニール温度依存性 (保護膜PECVD-SiO₂膜)

以上のことから、IGZOではアニール温度の上昇に伴い移動度が低下するのに対して、In-W-Zn-Oは移動度の低下はなく、温度耐性が高いことがわかった。有機ELディスプレイ用途では特に高い信頼性が要求されるが、In-W-Zn-Oはアニール温度を高めることで高い信頼性を実現でき、高移動度も保持できる点で優れている。

4. 結 言

今回開発したIn-W-Zn-Oスパッタリングターゲットは、焼結体として従来材料であるIGZOスパッタリングターゲットと同等の高い焼結密度、低い電気抵抗を実現できた。本スパッタリングターゲットを原料としてTFTを作製、評価したところ、IGZO比3倍以上の高い電子移動度を有し、実用特性として重要な信頼性もIGZO並以上を実現できた。また、In-W-Zn-OはIGZOと比較して、より高温のアニールでも移動度が低下せず、結果として信頼性を向上させることができた。

5. 謝 辞

本研究の遂行にあたっては、東京工業大学 細野秀雄 教授、奈良先端科学技術大学院大学 浦岡行治 教授、藤井茉美 助教には多くのご助言を賜りました。また、高知工科大学 古田守 教授には、ご助言と共に、保護膜形成戴きました。記して深く感謝申し上げます。本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の助成事業で得られた成果を活用したものである。

用語集

※1 薄膜トランジスタ (TFT)

電界効果トランジスタの一種であり、ソース電極、ドレイン電極、ゲート電極の3極から主になる。チャンネル層を含めて、膜厚数10～数100nmの薄膜で構成される。

※2 FHDから4K、8K

FPDの画面解像度のこと。画素数はFHD (Full High Definition) : 横1920×縦1080、4K : 横3840×縦2160、8K : 横7680×縦4320と同サイズの画面で考えると画素サイズが微細化する。

※3 電子移動度

半導体中を移動する電子の速度。本論文では、V_{ds}を0.1V一定にて、V_{gs}を変化させたときのI_{ds}の変化から求めた電界効果移動度について議論した。

※4 a-Si

非晶質シリコンのことであり、FPDにもっとも広く用いられている。

※5 LTPS

Low Temperature Poly-Siliconは0.3μm程度の微細なシリコンの結晶からなる。製造時の結晶化温度が低温である。結晶化に使うレーザーの均一性が課題となり、G6サイズより大きなガラス基板への適用が難しいと言われている。

※6 スパッタリング法

減圧下でアルゴンイオンを、負電圧を印加した固体原料に衝突させて原料原子をはじき出し、対向した基板に付着させる成膜方法。固体原料に直流を印加する場合をDCスパッタリングという。

※7 信頼性試験 (NBS、PBS)

Negative Bias Stress (NBS) 試験と Positive Bias Stress (PBS) 試験のこと。ソース電極とゲート電極の間に負または正電圧をかけ続けて、ある時間毎に伝達特性を測定し、 V_{th} のシフト量を求める。シフト量が小さい方が、信頼性が高いと判断される。

※8 V_{th}

閾値電圧といい、本論文ではX軸：ゲート電圧とY軸：ドレイン電流の平方根 (I_{ds})^{1/2} の曲線の接線において、最大傾きを示す接線がX軸と交わる点とした。a-Siと同じ1V付近がFPDには使用しやすい。

※9 SS値

ゲート電圧を変化させたときにドレイン電流の変化量が最大となるときの、ドレイン電流を1桁上げるために必要なゲート電圧の増加量。小さい程、優れている。

参 考 文 献

- (1) Matsueda Y., Required Characteristics of TFTs for Next generation Flat Panel Display Backplanes, The Proceedings of the 6th International Thin-Film Transistor Conference, pp. 314-317 (January 2010)
- (2) Chang Ho Oh, Technology of Large Size OLED Display, 26th ファインテックジャパン専門技術セミナー「次世代ディスプレイの本命！巨大投資が進む有機ELの展望」、pp. 1-10 (April 2016)
- (3) 浦岡行治、酸化物半導体 TFT の高性能化技術、電子ジャーナル 1686th 技術セミナー「酸化協半導体 TFT の高性能化技術徹底解説」、pp. 10-24 (April 2013)
- (4) 松尾拓哉、IGZO技術、シャープ技報、第104号、pp. 13-17 (September 2012)
- (5) Kenji Nomura, Hiromichi Ohta, Akihiro Takagi, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano, and Hideo Hosono, Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors, nature, vol.432, pp. 488-492 (November 2004)
- (6) Shinya Aikawa, Peter Darmawan, Keiichi Yanagisawa, Toshihide Nabatame, Yoshiyuki Abe, and Kazuhito Tsukagoshi, Thin-film transistors fabricated by low-temperature process based on Ga- and Zn-free amorphous oxide semiconductor, Appl. Phys. Lett., 102, 102101 (March 2013)
- (7) Shinya Aikawa, Toshihide Nabatame, and Kazuhito Tsukagoshi, Effects of dopants in InOx-based amorphous oxide semiconductors for thin-film transistor applications, Appl. Phys. Lett., 103, 172105 (October 2013)

執 筆 者

宮永 美紀* : アドバンスドマテリアル研究所 主幹



綿谷 研一 : アドバンスドマテリアル研究所



栗田 英章 : アドバンスドマテリアル研究所
グループ長



*主執筆者