

一般論文

関連するSDGs



Ar⁺イオン注入されたアモルファスIGZOの特性

Characteristics of Argon-ion-implanted Amorphous-IGZO

安田 圭 佑 Yasuta Keisuke	宇井 利 昌 Ui Toshimasa
山根 裕 也 Yamane Yuya	松尾 大 輔 Matsuo Daisuke
池田 拓 弥 Ikeda Takuya	酒井 敏 彦 Sakai Toshihiko
瀬戸口 佳 孝 Setoguchi Yoshitaka	高橋 英 治 Takahashi Eiji
安東 靖 典 Andoh Yasunori	立道 潤 一 Tatemichi Junichi

概要

Ar⁺イオン注入されたガラス基板上アモルファスIGZO (a-IGZO) 膜の電子輸送特性を調査した。電子密度とHall移動度の深さ方向プロファイルの測定結果から、Arプラズマ照射と比較して、a-IGZO膜の表面から深い領域まで高密度の電子が存在していることが明らかになった。さらに、a-IGZOのArに対する阻止能および伝導帯下端から0.05~0.1 eV下のドナー準位を推定した。これらの知見は、a-IGZOデバイスプロセスのための抵抗値制御技術において有用である。

Synopsis

We investigated electron transport properties of an argon-ion-implanted amorphous IGZO (a-IGZO) film on glass. As a result, we obtained electron concentration and Hall mobility as a function of the a-IGZO depth from the surface, which shows high electron-concentration exists in deep position from the surface compared with an argon plasma treated a-IGZO. In addition, we estimated Ar stopping powers of a-IGZO and the donor level of 0.05-0.1 eV below conduction band bottom energy, which can be applied to resistance control technique for a-IGZO device processing.

本論文は、AM-FPD'21で発表した内容に基づき作成した論文である。(プロシーディング公開日：2021年6月29日)

1. はじめに

フラットパネルディスプレイ (FPD) 向けの次世代エレクトロニクス分野において、ワイドバンドギャップ、透明性、柔軟性、良好な膜厚均一性等を特徴に持つ、アモルファスIGZO (a-IGZO) の研究・開発が広く進められている。

真空プロセスで作製されたa-IGZO薄膜トランジスタ (TFT) は、高速動作、低消費電力、高耐圧を実現しており⁽¹⁾⁽²⁾、フレキシブルディスプレイ、透明ディスプレイ、低消費電力ディスプレイといった次世代FPDへの応用が期待されている。また、酸化物半導体TFTを高性能化するため、プラズマ照射⁽³⁾、エキシマレーザー照射⁽⁴⁾ およびイオン注入⁽⁵⁾⁽⁶⁾ によるソース/ドレイン領域の低抵抗化技術が検討されている。これらの技術の中で、イオン注入は深さ方向制御性、微細加工性、生産性において優れた長所を有しており、ディスプレイのさらなる高性能化、高精細化が期待できることから、当社は本分野に注力して研究開発を進めている。

当社はこれまでに、希ガスイオン注入により生成された酸素欠損 (Vo) が、酸化物半導体であるa-IGZOのシート抵抗 R_s の低減に寄与していることを報告した⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかしながら、a-IGZO膜中に注入された希ガスの元素密度およびイオン化断面積は小さいため、希ガス元素およびVoのa-IGZO膜中における密度分布を測定することは困難である。

今回、これらのプロファイルを推定し、希ガスイオン注入によるa-IGZO膜の抵抗値制御技術を確認するため、一般的な希ガスであるArのイオン (Ar⁺) 注入と、比較対象としてArプラズマ照射を行い、電子輸送特性の評価および比較検討を行った。さらに、a-IGZO膜のArに対する阻止能およびドナー準位を得られた結果をもとに推定したので、それらの結果を報告する。

2. 実験手順および結果

2. 1 Ar⁺注入およびArプラズマ照射a-IGZO膜のシート抵抗値評価

厚さ0.5mmのガラス基板上に、厚さ50nm、シート抵抗 $1 \times 10^{12} \Omega/\text{sq}$ 程度のa-IGZO薄膜を誘導結合プラズマスパッタリングにより、ガス流量Ar/O = 95/5sccm、圧力0.9Pa、RFパワー7kW、ターゲット InGaZnO₄、ターゲット電圧-400Vで成膜した⁽⁹⁾。 R_s 低減のため、当社のイオン注入装置⁽¹⁰⁾を用い、Ar⁺をイオンエネルギー E_{ion} 20~80 keV、ドーズ量 $1 \times 10^{15} \text{ ions}/\text{cm}^2$ で注入した。比較として、圧力20Pa、RFパワー10~30W、処理時間1~10 minのArプラズマ処理も行った。さらに、熱安定性比較の

ため、Ar⁺イオン注入後あるいはArプラズマ照射後に、大気中で300℃、1hの熱処理を実施した。

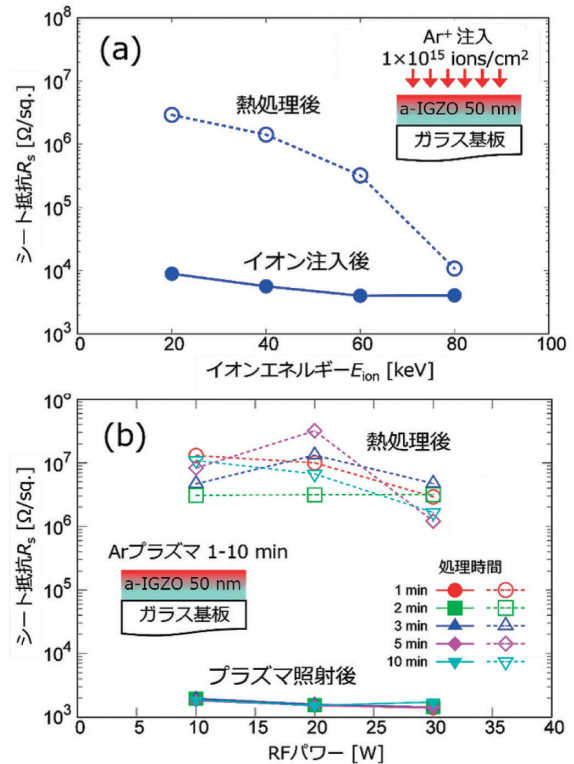


図1 300℃熱処理前後におけるa-IGZO膜シート抵抗 R_s の
(a) イオンエネルギー E_{ion} 依存性および
(b) RFパワー依存性

(発表論文⁽⁸⁾のFigure 2 (copyright©FTFMD2021))

図1 (a)にAr⁺注入後、および注入後300℃熱処理したa-IGZO膜の R_s の E_{ion} 依存性を示す。300℃熱処理をしていないAr⁺注入された膜の R_s は $3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \Omega/\text{sq.}$ に低下した。一方、Ar⁺注入後の300℃熱処理により、 R_s は $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^6 \Omega/\text{sq.}$ にまで増加した。また、注入後、300℃熱処理後ともに R_s は E_{ion} の増加に対して減少傾向を示し、特に熱処理後において R_s の E_{ion} 依存性が大きいことが確認できた。

続いて、図1 (b)にArプラズマ照射後、および照射後300℃熱処理したa-IGZO膜の R_s のRFパワー依存性を示す。熱処理していないArプラズマ照射された膜の R_s はプラズマ照射条件によらず $2 \times 10^3 \Omega/\text{sq.}$ 程度に低下した。一方、熱処理後の膜の R_s は照射条件によらず $1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7 \Omega/\text{sq.}$ にまで増加した。

以上の結果は、Arプラズマ照射の場合、電子を供与するVoが、a-IGZO膜の表面近傍に生成されるため、大気中のO₂およびH₂Oと反応して減少し易いものに対し、Ar⁺注入の場合、表面から離れた深い領域にVoが生成されるため、表面からの影響を受け難く、熱安定性が高いことを示しているものと考えられる。

2. 2 電子輸送特性の深さ方向解析

前述の実験結果より示唆された熱安定性の違いを明らかにするため、ウェットエッチングとHall測定を組み合わせ、電子輸送特性の深さ方向解析を行った。

図2にAr⁺注入およびArプラズマ照射されたa-IGZO膜の電子輸送特性深さ方向解析の概要を示す。ガラス基板上a-IGZO膜(厚さ170nm)に対し、Ar⁺注入80keV、 1×10^{15} ions/cm²あるいはArプラズマ照射20Pa、30W、10minを実施した。また、Hall測定用素子作製のため、島形成とオーミック電極形成を行った。ウェットエッチング、分光エリプソメトリによる膜厚測定、Hall測定を繰り返して得られたシート電子密度 n_s 、Hall移動度 μ および R_s とa-IGZO膜表面からのエッチング深さの関係を図3に示す。

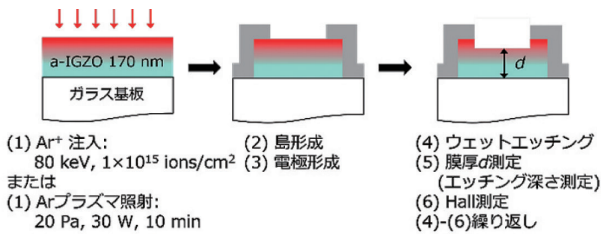


図2 Ar⁺注入およびArプラズマ照射されたa-IGZO膜の深さ方向解析の概要
(発表論文⁽⁸⁾のFigure 1 (copyright@FTFMD2021))

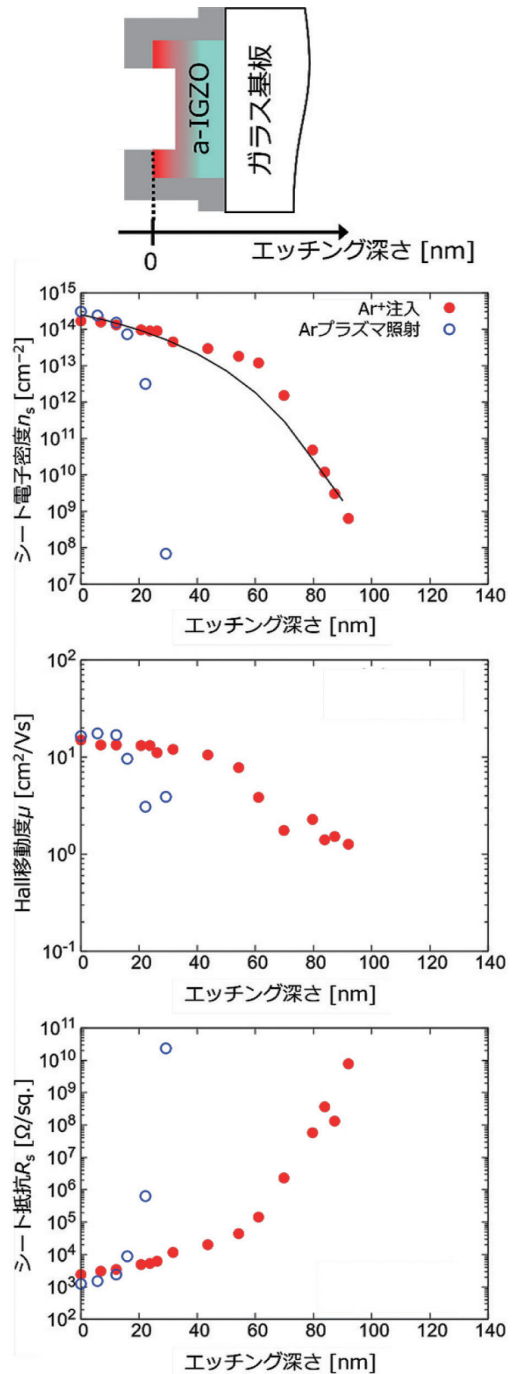


図3 Ar⁺注入およびArプラズマ照射されたa-IGZO膜のシート電子密度 n_s 、Hall移動度 μ 、シート抵抗 R_s とエッチング深さの関係
(発表論文⁽⁸⁾のFigure 3 (copyright@FTFMD2021))

Arプラズマ照射されたa-IGZO膜の n_s は、エッチング深さの増加に伴い大きく減少しており、大部分のVoがa-IGZO膜表面近傍に生成されていることが分かる。一方、Ar⁺注入されたa-IGZO膜の n_s および μ は、Arプラズマ照射と比較するとエッチング深さの増加に伴い緩やかに減少しており、a-IGZO膜表

面から深い領域まで高密度のV_oが生成されていることが分かる。

より定量的に深さ方向の電子輸送特性を評価するため、図4に示す並列コンダクタンスモデルを用い、a-IGZO膜中の局所的電子密度 n_j および局所的Hall移動度 μ_j の深さ方向プロファイルを計算した。

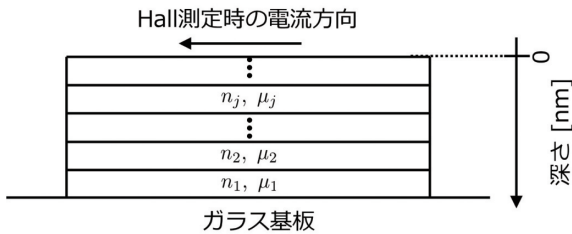


図4 並列コンダクタンスモデル
(発表論文⁽⁸⁾のFigure 4 (copyright@FTFMD2021))

このモデルではHall測定においてIGZO薄膜を流れる電子の導電率が、各層の並列接続の合成で記述される。さらに、弱磁場近似 ($\mu B \ll 1$) が成り立つ時、並列コンダクタンスおよびHall係数を考慮すると以下の2式が成り立つことが知られている。

$$\sigma_{\text{meas}} \simeq \sum_j \sigma_j \quad (\sigma_{\text{meas}} = n_{\text{meas}} \cdot \mu_{\text{meas}}, \sigma_j = n_j \cdot \mu_j) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{meas}} \cdot \mu_{\text{meas}}^2 \simeq \sum_j \sigma_j \cdot \mu_j^2 \quad (2)$$

ここで、図3の結果より、a-IGZO膜のHall移動度 $\mu = 1 \sim 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 、磁束密度 B は0.5T程度であるため弱磁場近似は成り立つ。なお、 σ_{meas} 、 n_{meas} および μ_{meas} はそれぞれHall測定で得られたコンダクタンス、電子密度、Hall移動度である。よって、式(1)、(2)を用いることで、各区間における n_j および μ_j を推定することができる。

図5は計算で得られた n_j および μ_j の深さ方向プロファイルを示しており、深さ0はa-IGZO膜表面に対応している。

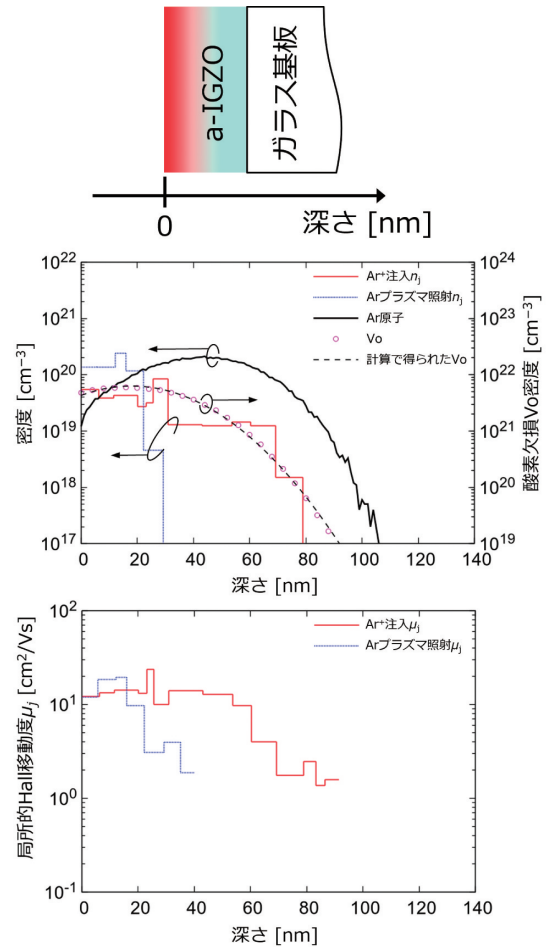


図5 局所的電子密度 n_j および局所的Hall移動度 μ_j の深さ方向プロファイル。
(発表論文⁽⁸⁾のFigure 5 (copyright@FTFMD2021))

図5より、Arプラズマ照射では0~20 nmの範囲で、また、Ar⁺注入では0~60nmの領域で電子密度が高くなっていることがわかる。また、Ar自身はドナーにならないため、V_oのみが電子を生成すると仮定すると、 n_j プロファイルからシミュレータ(Transport of Ions in Matter, TRIM⁽¹¹⁾)を用いてV_oプロファイルを推定することができる。ここで、図5に示すV_oプロファイルと n_j プロファイルは概ね一致しており、これらの関係から図6に示すa-IGZO膜のArに対する電子のおよび核的阻止能のイオンエネルギー依存性が得られた。ここで、In、Ga、ZnおよびOの結合エネルギーは2~3eVである⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

さらに、得られた阻止能を用いてa-IGZO膜中に注入されたAr原子の深さ方向プロファイルも推定した。

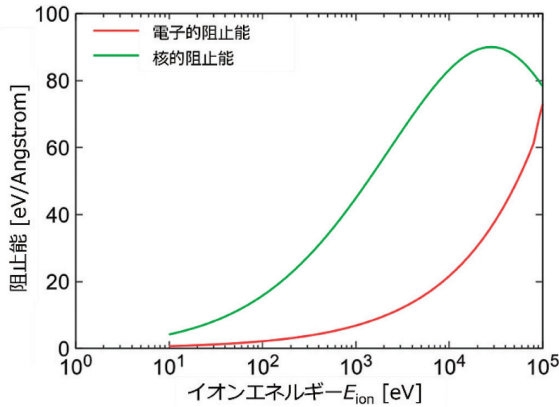


図6 a-IGZO膜のArに対する電子のおよび核的阻止能のイオンエネルギー E_{ion} 依存性
(発表論文⁽⁸⁾のFigure 6 (copyright@FTFMD2021))

2. 3 Voドナー準位の解明

Voドナー準位を明らかにするため、Poisson-Schrödinger計算⁽¹⁴⁾を実施した。計算フローを図7に示す。

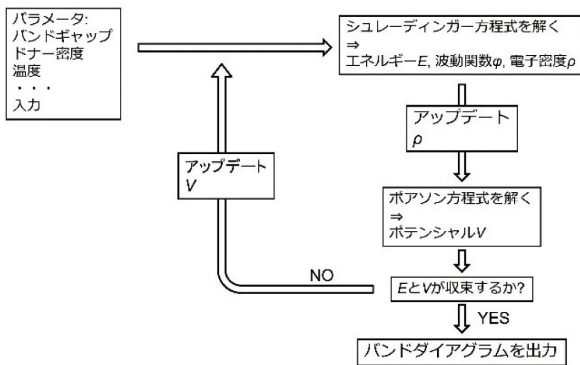


図7 Poisson-Schrödinger計算フロー

図5に示した計算で得られたVoフィッティング線と、各Voから2つの電子が生成されるとい仮定から、図8に示すエネルギーバンドプロファイルおよび300Kにおける電子分布が得られた。ここで、 E_c は伝導帯下端のエネルギー、 E_v は価電子帯上端のエネルギー、 E_D は平均Voドナー準位、 E_F はフェルミエネルギー、 ρ は電子密度、 d は図2に示した膜厚である。a-IGZO膜およびガラス基板のバンドギャップはそれぞれ3.5eV程度および8.4eV程度である⁽⁷⁾。

計算から、ドナー準位 $E_c - E_D = 0.05 \sim 0.1eV$ が得られた。図3に示すように、計算で得られた n_s (実線) と実験結果はよく一致しており、計算の妥当性を示している。

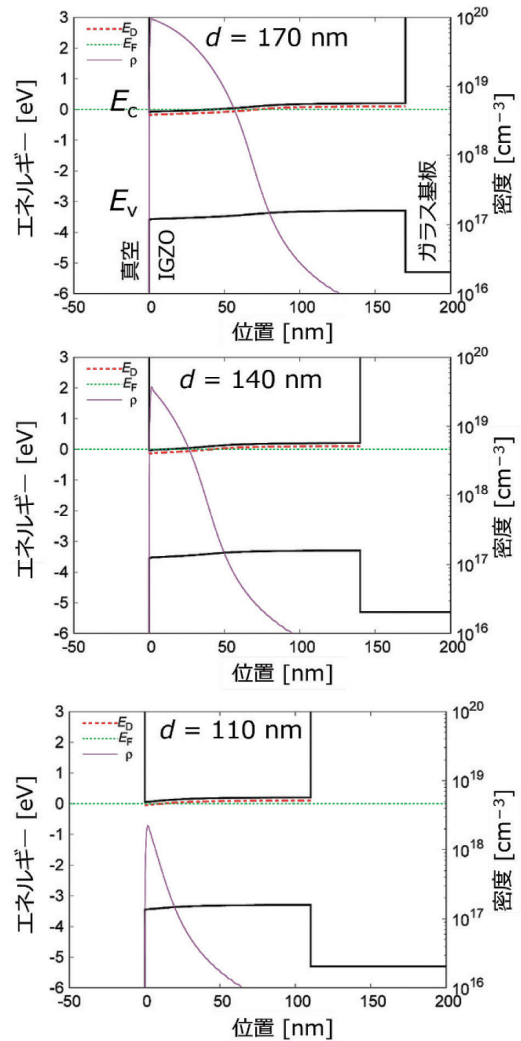
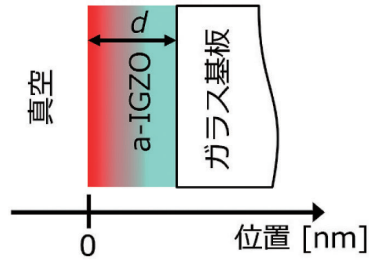


図8 計算で得られた、a-IGZO/ガラス基板構造におけるエネルギーバンドプロファイルと300Kでの電子分布の例
(発表論文⁽⁸⁾のFigure 7 (copyright@FTFMD2021))

■ 3. まとめ

Ar⁺注入およびArプラズマ照射されたガラス基板上a-IGZO膜の特性を調査した。Hall測定とウェットエッチングを組み合わせることで、電子輸送特性の深さ方向の情報から、局所的電子密度および局所的Hall移動度の深さ方向プロファイルが得られた。Ar⁺注入によりa-IGZO膜表面から深い位置にV₀による高密度の電子が生成されることで、熱安定性が高くなることが明らかになった。さらに、a-IGZOのArに対する阻止能および伝導帯下端から0.05~0.1eVの位置にあるドナー準位を推定した。これらの知見は、a-IGZOデバイスプロセスのためのイオン注入を用いた抵抗値制御技術として有用である。

参考文献

- (1) K. Nomura *et al.*, "Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors" *Nature* 432 (2004) 488.
- (2) T. Kamiya *et al.*, "Origins of High Mobility and Low Operation Voltage of Amorphous Oxide TFTs: Electronic Structure, Electron Transport, Defects and Doping" *J. Disp. Technol.* 5 (2009) 273.
- (3) H. Jeong *et al.*, "Coplanar amorphous-indium-gallium-zinc-oxide thin film transistor with He plasma treated heavily doped layer" *Appl. Phys. Lett.* 104 (2014) 022115.
- (4) M. Nakata *et al.*, "Fabrication method for self-aligned bottom-gate oxide thin-film transistors by utilizing backside excimer-laser irradiation through substrate" *Appl. Phys. Lett.* 103 (2013) 142111.
- (5) R. Chowdhury *et al.*, "Self-Aligned IGZO TFTs with Boron Implanted Source/Drain Regions" *ECS Transactions* 92 (2019) 135.
- (6) L. Qian *et al.*, "Improved Characteristics of InGaZnO Thin-Film Transistor by Using Fluorine Implant" *ECS Solid State Lett.* 3 (2014) 87.
- (7) T. Ui *et al.*, "Characteristics of noble-gas-ion-implanted amorphous-InGaZnO films on glass" *"27th AM-FPD '20"* (2020) 115.
- (8) K. Yasuta *et al.*, "Characteristics of argon-ion-implanted amorphous-InGaZnO" *the 28th AM-FPD* (2021) 77.
- (9) D. Matsuo *et al.*, "Deposition of Crystalline InGaZnO Film at Low Temperature Process by Inductively Coupled Plasma Sputtering System" *the 25th IDW '18, FMCp7 - 2L* (2018) 560.
- (10) 土肥 他:「フラットパネルディスプレイ用イオン注入機の技術動向」, *日新電機技報*, 62 (2017) 17,
- (11) J. Ziegler and J. Biersack, *Stopping Power and Range of Ion in Matter* (2008).
- (12) K. Takechi *et al.*, "Depth-profiling XPS analysis of He-plasma treated amorphous InGaZnO thin films for use in top-gate coplanar thin-film transistors" *Jpn. J. Appl. Phys.* 58 (2019) 038005.
- (13) H.-W. Park *et al.*, "A Study on the Hot Carrier Effect in InGaZnO Thin Film Transistors" *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 50 (2019) 1222.
- (14) G. L. Snider *et al.*, *Computer Program 1D Poisson/Schrödinger: A Band Diagram Calculator*, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana (1995).

執筆者紹介



安田 圭佑 Yasuta Keisuke
日新イオン機器株式会社
イオンビーム事業本部 装置事業部



宇井 利昌 Ui Toshimasa
日新イオン機器株式会社
イオンビーム事業本部 装置事業部
(マテリアルサイエンス博士)



山根 裕也 Yamane Yuya
日新イオン機器株式会社
イオンビーム事業本部 装置事業部



松尾 大輔 Matsuo Daisuke
日新イオン機器株式会社
イオンビーム事業本部 装置事業部
主任(工学博士)



池田 拓弥 Ikeda Takuya
研究開発本部
ビーム・プラズマ技術開発研究所



酒井 敏彦 Sakai Toshihiko
研究開発本部
ビーム・プラズマ技術開発研究所
グループ長



瀬戸口 佳孝 Setoguchi Yoshitaka
研究開発本部
ビーム・プラズマ技術開発研究所
参事



高橋 英治 Takahashi Eiji
研究開発本部
ビーム・プラズマ技術開発研究所長
(工学博士)



安東 靖典 Andoh Yasunori
特別フェロー
研究開発本部
ビーム・プラズマ技術開発研究所
技監(工学博士)



立道 潤一 Tatemichi Junichi
日新イオン機器株式会社
イオンビーム事業本部
装置事業部
技術主幹