



# Ar<sup>+</sup> イオン注入されたアモルファス IGZO の特性

Characteristics of Ar<sup>+</sup>-ion-implanted Amorphous-IGZO

安田 圭佑\*  
Keisuke Yasuta

宇井 利昌  
Toshimasa Ui

山根 裕也  
Yuya Yamane

酒井 敏彦  
Toshihiko Sakai

安東 靖典  
Yasunori Andoh

立道 潤一  
Junichi Tatemichi

Ar<sup>+</sup>イオン注入されたガラス基板上アモルファスInGaZnO (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、Ar<sup>+</sup>イオン注入によりa-IGZO膜の表面から深い領域まで高密度の電子が生成され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。

We conducted research on electron transport properties of an argon-ion-implanted amorphous IGZO (a-IGZO) film deposited on a glass substrate. Our research obtained valuable data on electron concentration and Hall mobility of the film at various depth from the surface. The result shows that the a-IGZO film has a high electron concentration in deep regions compared with an argon plasma treated a-IGZO film. In addition, we estimated argon 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 for a-IGZO device processing.

キーワード：フラットパネルディスプレイ (FPD)、酸化物半導体、IGZO、イオン注入

## 1. 緒言

フラットパネルディスプレイ (FPD) 向け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InGaZnO (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<sup>(1),(2)</sup>、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<sup>(3)</sup>、エキシマレーザー照射<sup>(4)</sup>およびイオン注入<sup>(5),(6)</sup>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、ディスプレイの更なる高性能化、高精細化が期待できることから、日新イオン機器㈱は本分野に注力して研究開発を進めている。

日新イオン機器㈱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<sup>(7),(8)</sup>。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<sup>+</sup>イオン注入と、比較として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。

## 2. 実験手順および結果

### 2-1 Ar<sup>+</sup>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0.5 mmのガラス基板上に、厚さ50 nm、シート抵抗 $\sim 10^{12} \Omega/\text{sq.}$ 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=95/5 sccm、圧力0.9 Pa、RFパワー7 kW、ターゲットInGaZnO<sub>4</sub>、ターゲット電圧-400 Vで成膜した<sup>(9)</sup>。 $R_s$ 低減のため、日新イオン機器㈱のイオン注入装置<sup>(10)</sup>を用い、Ar<sup>+</sup>イオンをイオンエネルギー $E_{\text{ion}}$  20-80 keV、ドーズ量 $1 \times 10^{15} \text{ ions/cm}^2$ で注入した。比較として、圧力20 Pa、RFパワー10-30 W、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<sup>+</sup>イオン注入後あるいはArプラズマ照射後に、大気中で300°C、1 hの熱処理を実施した。

図1(a)にAr<sup>+</sup>イオン注入後、およびイオン注入後300°C熱処理したa-IGZO膜の $R_s$ の $E_{\text{ion}}$ 依存性を示す。イオン注入後、a-IGZO膜の $R_s$ は $3 \times 10^3 - 1 \times 10^4 \Omega/\text{sq.}$ に減少した。一方、イオン注入後の300°C熱処理により、 $R_s$ は $1 \times 10^4 - 2 \times 10^6 \Omega/\text{sq.}$ に増加した。また、注入後、300°C熱処理後ともに $R_s$ は $E_{\text{ion}}$ の減少関数であり、特に熱処理後において $R_s$ の $E_{\text{ion}}$ 依存性が大きいことが確認できた。

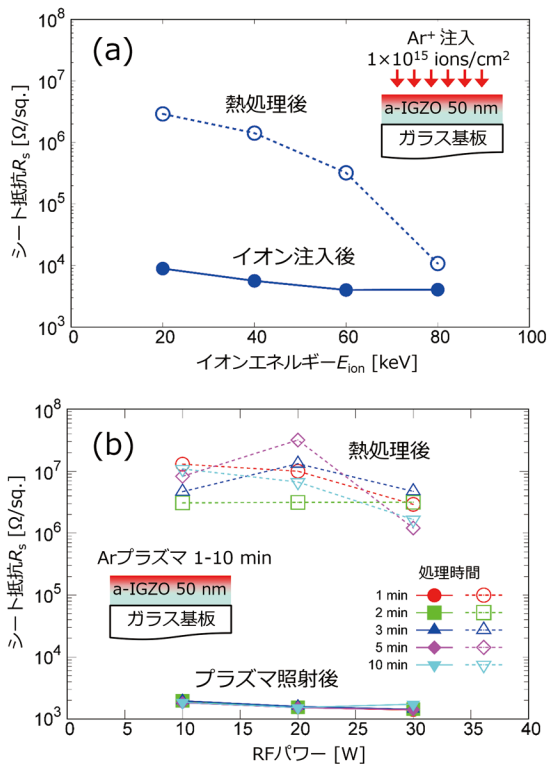


図1 300℃熱処理前後におけるa-IGZO膜シート抵抗\$R\_s\$の (a) イオンエネルギー\$E\_{ion}\$依存性および (b) RFパワー依存性 (発表論文<sup>(8)</sup>のFigure 2 (copyright@FTFMD2021))

図1 (b) にAr プラズマ照射後、およびプラズマ照射後300℃熱処理したa-IGZO膜の\$R\_s\$のRFパワー依存性を示す。プラズマ照射後、a-IGZO膜の\$R\_s\$はプラズマ照射条件によらず\$2 \times 10^3\$ Ω/sq.に減少した。一方、プラズマ照射後の熱処理後により、照射条件によらず\$R\_s\$は\$1 \times 10^6\$-\$1 \times 10^7\$ Ω/sq.に増加した。

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O<sub>2</sub>およびH<sub>2</sub>Oと反応して減少しやすいのに対し、Ar<sup>+</sup>イオン注入の場合、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唆している。

2-2 電子輸送特性の深さ方向解析

Ar<sup>+</sup>イオン注入、Ar プラズマ照射における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<sup>+</sup>イオン注入および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。a-IGZO膜 (厚さ170 nm) / ガラス基板構造に対し、Ar<sup>+</sup>イオン注入80 keV、\$1 \times 10^{15}\$ ions/cm<sup>2</sup>あるいはAr プラズマ照射20 Pa、30 W、10 min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\$、

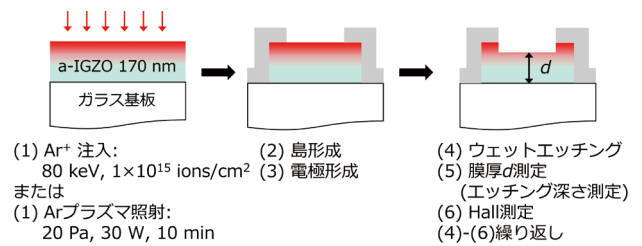


図2 Ar<sup>+</sup>イオン注入およびAr プラズマ照射されたa-IGZO膜の深さ方向解析の概要 (発表論文<sup>(8)</sup>のFigure 1(copyright@FTFMD2021))

Hall移動度\$\mu\$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。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。一方、Ar プラズマ照射と比較すると、Ar<sup>+</sup>注入されたa-IGZO膜の\$n\_s\$および\$\mu\$は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Voが生成されていることがわかる。

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\$\mu\_j\$の深さ方向プロファイルを計算した。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。

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

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

ここで、図3の結果より、a-IGZO膜のHall移動度\$\mu = 1\$-\$10\$ cm<sup>2</sup>/Vs、磁束密度\$B \sim 0.5\$ Tであるため弱磁場近似は成り立つ。なお、\$\sigma\_{meas}\$、\$n\_{meas}\$および\$\mu\_{meas}\$はそれぞれHall測定で得られたコンダクタンス、電子密度および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\$\mu\_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\$\mu\_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より、Ar プラズマ照射では0-\$20\$ nmの領域で、また、Ar<sup>+</sup>イオン注入では0-\$60\$ nmの領域で電子密度が高くなっている。また、Ar自身はドナーにならないため、Vo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<sup>(11)</sup>) を用いてVo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Vo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 2-3 eV である<sup>(12),(13)</sup>。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。

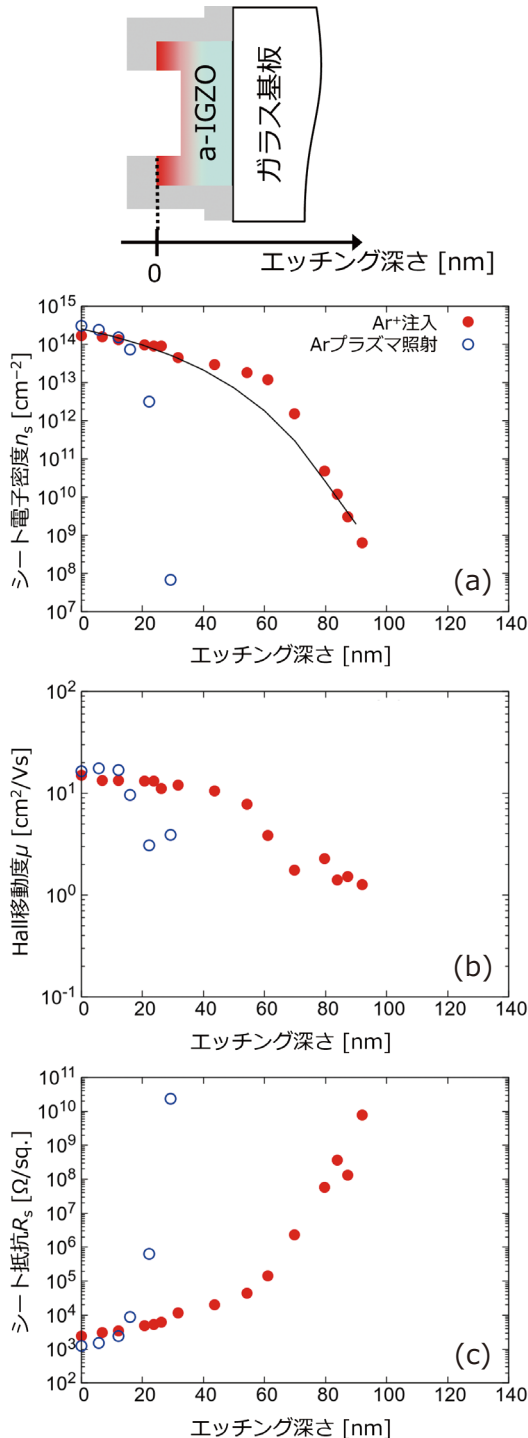


図3 Ar<sup>+</sup>イオン注入およびArプラズマ照射されたa-IGZO膜の (a) シート電子密度  $n_s$ 、(b) Hall 移動度  $\mu$ 、(c) シート抵抗  $R_s$  とエッチング深さの関係 (発表論文<sup>(8)</sup>のFigure 3 (copyright@FTFMD2021))

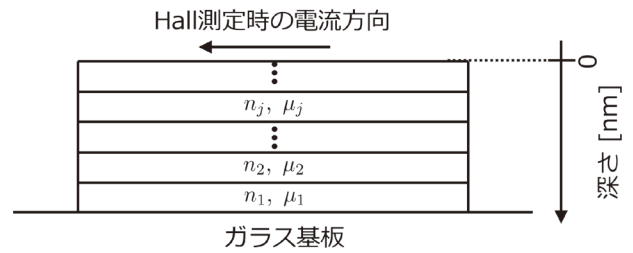


図4 並列コンダクタンスモデル (発表論文<sup>(8)</sup>のFigure 4 (copyright@FTFMD2021))

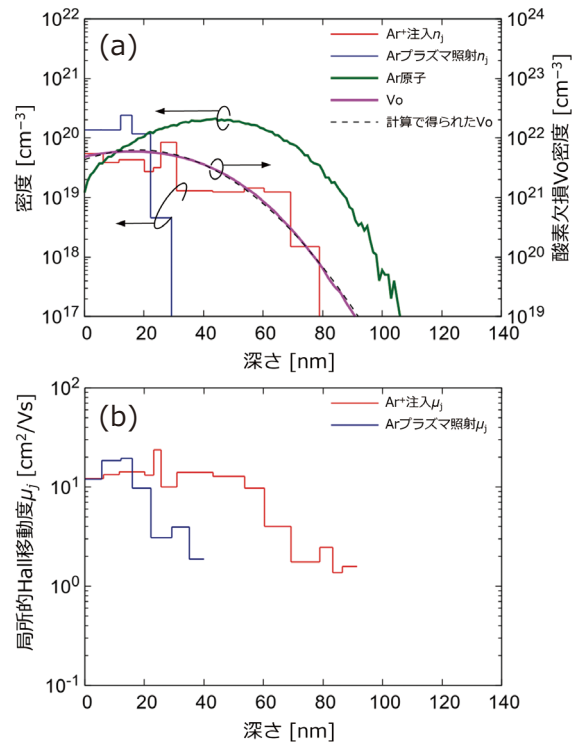


図5 (a) 局所的電子密度  $n_j$  および (b) 局所的 Hall 移動度  $\mu_j$  の深さ方向プロファイル (発表論文<sup>(8)</sup>のFigure 5 (copyright@FTFMD2021))

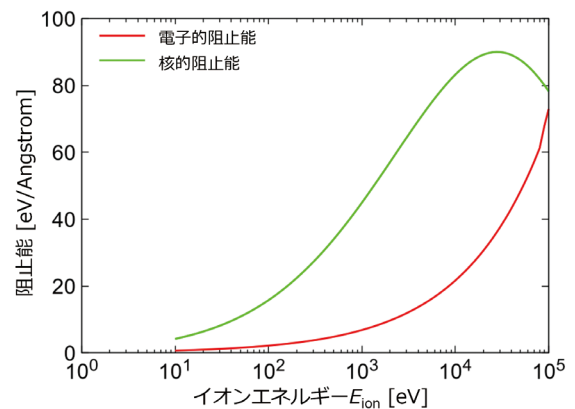


図6 a-IGZO膜のArに対する電子的および核的阻止能のイオンエネルギー  $E_{ion}$  依存性 (発表論文<sup>(8)</sup>のFigure 6 (copyright@FTFMD2021))

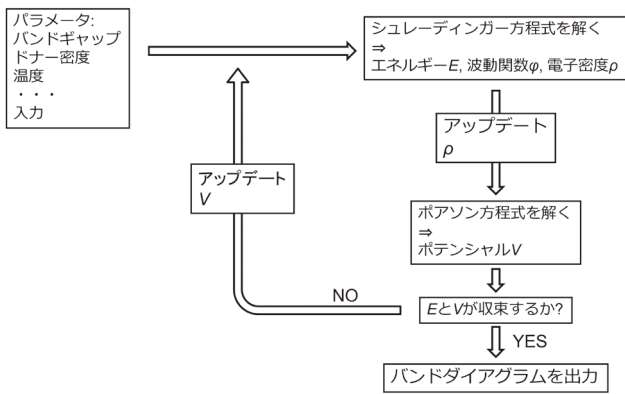


図7 Poisson-Schrödinger 計算フロー

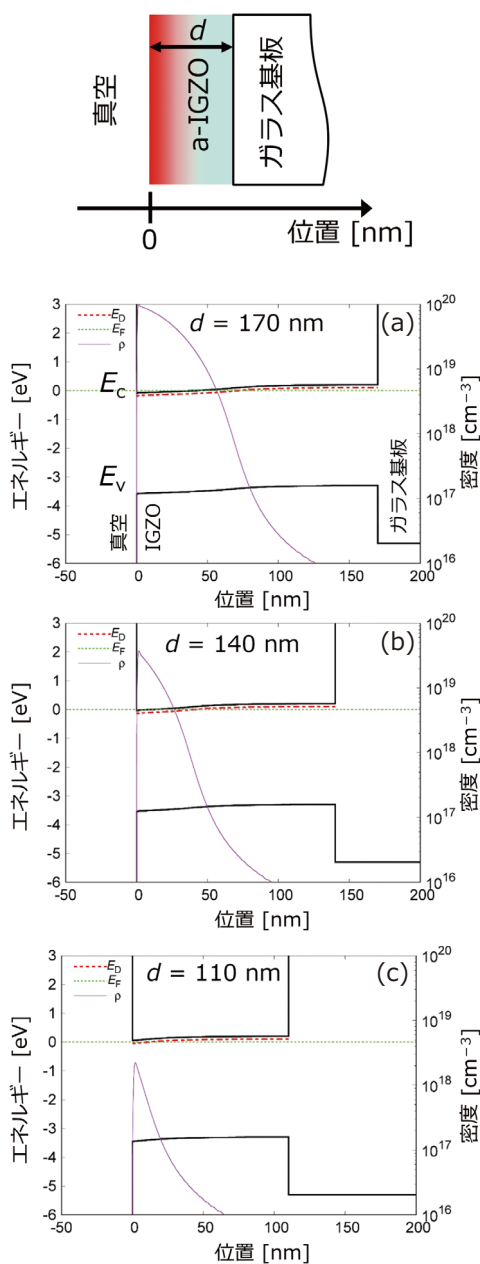


図8 計算で得られた、a-IGZO/ガラス基板構造におけるエネルギーバンドプロファイルと300 Kでの電子分布の例 (発表論文<sup>(8)</sup>の Figure 7 (copyright@FTFMD2021))

### 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<sup>(14)</sup>を実施した。計算フローを図7に示す。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う仮定から、図8に示すエネルギーバンドプロファイルおよび300 K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、 $\rho$ 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 $\sim 3.5$  eVおよび $\sim 8.4$  eVである<sup>(7)</sup>。

計算から、ドナー準位 $E_c - E_D = 0.05-0.1$  eV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。

## 4. 結 言

Ar<sup>+</sup>イオン注入および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<sup>+</sup>イオン注入によりa-IGZO膜表面から深い位置にVo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0.05-0.1 eV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, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature* 432 (2004) 488
- (2) T. Kamiya, K. Nomura, and H. Hosono, *J. Disp. Technol.* 5 (2009) 273
- (3) H. Jeong, B. Lee, Y. Lee, J. Lee, M. Yang, I. Kang, M. Mativenga, and J. Jang, *Appl. Phys. Lett.* 104 (2014) 022115
- (4) M. Nakata, H. Tsuji, Y. Fujisaki, H. Sato, Y. Nakajima, T. Takei, T. Yamamoto, and T. Kurita, *Appl. Phys. Lett.* 103 (2013) 142111
- (5) R. Chowdhury, M. Kabirb, R. Manleyc, and K. Hirschman, *ECS Transactions* 92 (2019) 135
- (6) L. Qian, W. Tang, and P. Laia, *ECS Solid State Lett.* 3 (2014) 87
- (7) T. Ui, R. Fujimoto, T. Sakai, D. Matsuo, Y. Setoguchi, Y. Andoh, and J. Tatemichi, the 27th AM-FPD '20 (2020) 115
- (8) K. Yasuta, T. Ui, T. Ikeda, D. Matsuo, T. Sakai, S. Dohi, Y. Setoguchi, E. Takahashi, Y. Andoh, and J. Tatemichi, the 28th AM-FPD (2021) 77
- (9) D. Matsuo, R. Miyanaga, T. Ikeda, S. Kishida, Y. Setoguchi, Y. Andoh, M. N. Fujii, and Y. Uraoka, the 25th IDW '18, *FMCP7 - 2L* (2018) 560
- (10) S. Dohi, H. Kai, T. Nagao, T. Matsumoto, M. Onoda, K. Nakao, Y. Inouchi, J. Tatemichi, and M. Nukayama, *The Nissin Electric Review* 62 (2017) 17
- (11) J. Ziegler and J. Biersack, *Stopping Power and Range of Ion in Matter* (2008)
- (12) K. Takechi, Y. Kuwahara, J. Tanaka, and H. Tanabe, *Jpn. J. Appl. Phys.* 58 (2019) 038005
- (13) H.-W. Park, J. Bae, H. Kang, D. H. Kim, P. Jung, H. Park, S. Lee, J. U. Bae, S. Y. Yoon, and I. Kang, *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 50 (2019) 1222
- (14) G. L. Snider, *Computer Program 1D Poisson/Schrödinger: A Band Diagram Calculator* (University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana (1995))

## 執 筆 者

安田 圭佑\* : 日新イオン機器(株)  
AM-FPD '21 Poster Paper Award



宇井 利昌 : 日新イオン機器(株)  
マテリアルサイエンス博士  
AM-FPD '20 Best Paper Award



山根 裕也 : 日新イオン機器(株)



酒井 敏彦 : 日新電機(株) 主査  
IDW '18 Outstanding Poster Paper Award



安東 靖典 : 特別フェロー  
日新電機(株) 技監  
工学博士



立道 潤一 : 日新イオン機器(株) 技術主幹



\* 主執筆者

本論文はAM-FPD '21で発表した内容 (the 28th AM-FPD, 2021, 77) に基づき作成した論文である: 以下、発表論文。発表論文より引用した部分はCopyrightがInternational Society of Functional Thin Film Materials & Devicesに帰属し、copyright@FTFMD2021と記述する。同様に、本論文は日新電機技報 vol. 68で報告した内容に基づき作成している。