

一般論文

関連するSDGs



酸化物半導体 (IGZO) を用いた薄膜トランジスタへの希ガスイオン注入技術の応用検討

Investigation of Noble-gas-ion Implantation Technique Application for Thin Film Transistor Using Oxide Semiconductor (IGZO)

宇井利昌 Ui Toshimasa	安田圭佑 Yasuta Keisuke
藤本龍吾 Fujimoto Ryugo	松尾大輔 Matsuo Daisuke
酒井敏彦 Sakai Toshihiko	瀬戸口佳孝 Setoguchi Yoshitaka
安東靖典 Andoh Yasunori	立道潤一 Tatemichi Junichi

概要

酸化物半導体であるIGZOを用いたTFTは、次世代ディスプレイへの応用が期待されている。当社と日新電機は、IGZO薄膜への希ガスイオン注入技術の応用を目的とし、代表的な希ガスイオンであるAr⁺イオンを中心にIGZO薄膜へ注入し、光学的・電気的特性を分析・評価し、希ガスイオンの注入技術がIGZO TFTにおいて有用であることを示した。

Synopsis

TFTs using oxide semiconductor IGZO attract much attention for next generation flat panel display. In order to apply noble gas ion implantation technique for IGZO films, we carried out conventional noble gas ion Ar⁺ implantation in IGZO films and investigated optical or electrical properties for the implanted IGZO films. We expected that the knowledges are much useful for IGZO TFT processing.

1. はじめに

次世代ディスプレイ分野のエレクトロニクス技術において、安価、透明性、柔軟性、大面積を実現可能な要素が求められている。それらの実現には、プロセスの簡易化、低エネルギープロセス、透明材料、低温プロセス、柔軟性基板の技術開発が必要である。次世代ディスプレイ用途での使用が期待されている、インジウム (In)、ガリウム (Ga)、亜鉛 (Zn) の各酸化物から成る半導体 (IGZO) は、今後、高集積回路、フレキシブルディスプレイ、透明ディスプレ

イ、軽量ディスプレイの実現に向け、開発が進められている。近年、高真空プロセスで作製されたIGZOを用いた薄膜トランジスタ (以下、TFT: Thin Film Transistor) は、高速動作、低消費電力、高耐圧が実現されている^{(1) (2)}。

さらに、IGZO 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)}によるソースおよびドレイン領域の低抵抗化が検討されており、そのメカニズムと有効性が報告されている。ただし、高性能化するための技術の中で、

本論文は、AM-FPD ' 20で発表した内容 (T. Ui, R. Fujimoto, T. Sakai, D. Matsuo, Y. Setoguchi, Y. Andoh and J. Tatemichi, Proc. the 27th AM-FPD (2020) 115.: 以下、発表論文) に基づき作成した論文である。(公開日: 2020年9月1日)

イオン注入は微細化・集積化・生産性において優れた長所を有するが、低抵抗化のメカニズム解明は充分になされていない。その理由としては、ドナーとなりえない希ガスイオン注入での、IGZO薄膜の低抵抗化が可能であることが挙げられ、IGZO薄膜中の希ガスや電気的特性に強く影響する原子欠損の検出が困難であるためである。

本稿では、希ガスイオンを用い、ガラス基板上に成膜されたIGZO薄膜へのイオン注入および分析を行った研究結果を報告する。

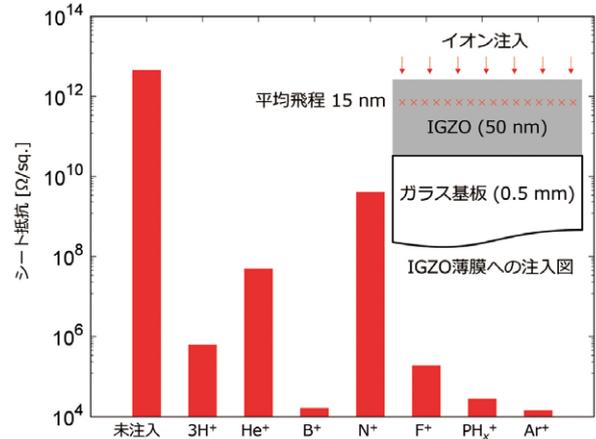
2. イオン注入の要素技術検討

2.1 イオン注入IGZO薄膜のシート抵抗値評価

環境に配慮した透明ガラス基板 (厚み0.5 mm) 上にプラズマスパッタ装置⁽⁷⁾を用いて堆積された厚さ50 nm程度、シート抵抗 10^{12} Ω/sq程度のIGZO薄膜に対し、イオン注入装置⁽⁸⁾を用い、平均飛程15 nm程度、注入量 1×10^{15} cm⁻²でさまざまなイオン種を注入した後、室温のホール測定によりシート抵抗値評価を行った。図1に未注入IGZO薄膜および、各イオン種注入後のIGZO薄膜のシート抵抗測定結果を示す。

本結果から、未注入のIGZO薄膜と比較して、注入後のIGZO薄膜は、注入したイオン種によらず、シート抵抗が低下し、特にB⁺とAr⁺イオンの注入がシート抵抗の低減に有効であることが分かった^{(9)~(12)}。

このうち、Ar⁺イオンの注入結果は、ArそのものがIGZO薄膜中でドナーあるいはアクセプタにはならないが、シート抵抗値は 10^4 Ω/sq.以下を示し、この結果は、評価を行ったイオン種の中で最小の抵抗値であった。このことから、IGZO薄膜の組成比が変化せずに膜質が変化したことが分かるとともに、希ガスイオン注入によるIGZO薄膜の低抵抗化について、その有効性が示唆された。



(PH_x⁺: リン (P) 原子と水素 (H) 原子がくっついた分子のイオン)

図1 未注入および各種希ガスイオン注入後のIGZO薄膜 (50 nm) シート抵抗値 (発表論文のfigure 1 (copyright@FTFMD2020) の和訳)

2.2 X線光電子分光法による評価

Ar⁺イオン注入時のIGZO薄膜のシート抵抗低減メカニズムを解明するため、未注入のIGZO薄膜および、Ar⁺イオンを注入 (イオン加速エネルギー80 keV、注入量 1×10^{15} cm⁻²) したIGZO薄膜に対し、X線光電子分光法 (XPS) を用い、分析・評価を行った。図2に得られたXPSワイドスペクトルを示す。

ここで、まず束縛エネルギーはCl1sピーク (284.6 eV) で補正した。得られたスペクトルから注入前後でIn, Ga, Zn, Oの組成比に明確な違いは見られなかった。

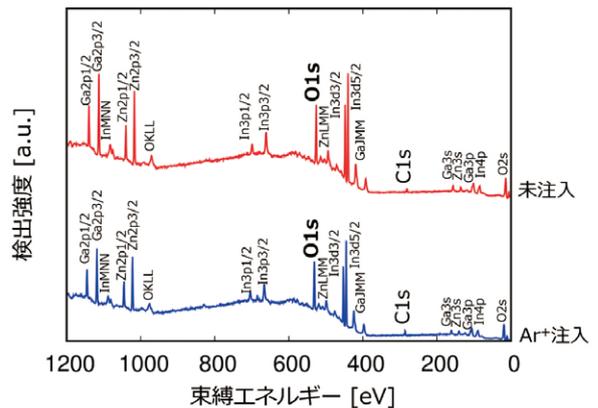


図2 未注入およびAr⁺注入IGZO薄膜のX線光電子分光ワイドスペクトル (発表論文のfigure 2 (copyright@FTFMD2020) の和訳)

次に、O1sスペクトルに着目し分析を行った。

図3にその結果を記す。図3 (a) は、希ガス未注入のIGZO薄膜、図3 (b) Ar⁺注入IGZO薄膜のO1sスペクトル分析結果である。

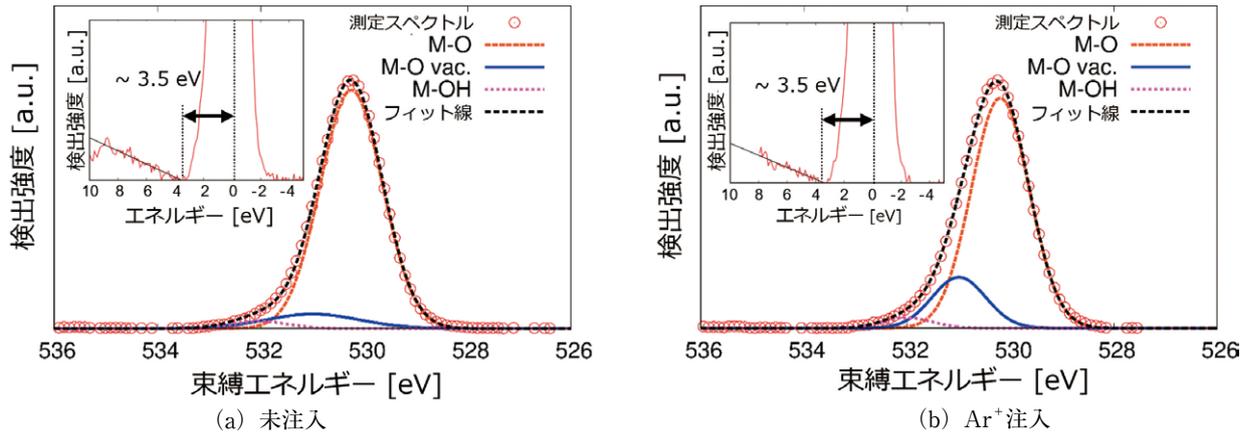


図3 IGZO薄膜のO1sピークスペクトル (発表論文のfigure 3(copyright@FTFMD2020)の和訳)

O1sスペクトル分析では、In, GaおよびZnの金属元素-酸素 (M-O) 結合 (ピーク中心530.2 eV)、酸素欠損 (Vo) に関するM-O (M-O vac.) 結合 (ピーク中心531.0 eV)、および金属-ヒドロキシル基 (M-OH) の結合 (ピーク中心532.0 eV) の3ピークに分離できた⁽¹³⁾。Ar⁺ イオンを注入したIGZO薄膜は、未注入のものに比べて、Voに関するM-O vac.ピークが増大しており、IGZOシート抵抗値低減はVoの増大によることの可能性を示唆している。

図4にて、IGZO薄膜中にAr⁺イオンが注入され、酸素 (O) 元素をはじき出し、Voを生成し、IGZO薄膜のシート抵抗値を下げるモデル図を示す。その際生じたVoにより金属元素に未結合手が生成されるが、この時、電子はその場に局在せず、キャリアとして機能することにより、シート抵抗が低減すると考えられる。

図3 (a)、(b)の内挿図にO1sの電子エネルギー損失分光 (XPS-EELS) の分析結果を示した。注入前後のIGZOバンドギャップは3.5 eV程度であり、これはIGZO薄膜の透過性がAr⁺イオンの注入の有無に依存しないということを示している。ここから、Ar⁺イオンを注入した低抵抗IGZO薄膜が透明ディスプレイに応用可能であることがわかった。

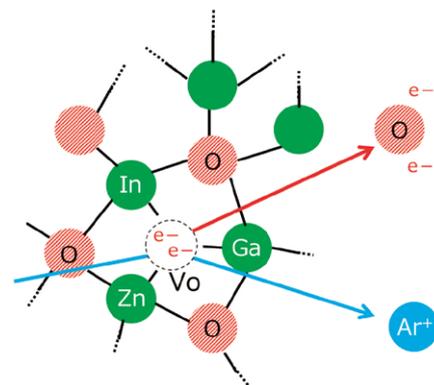
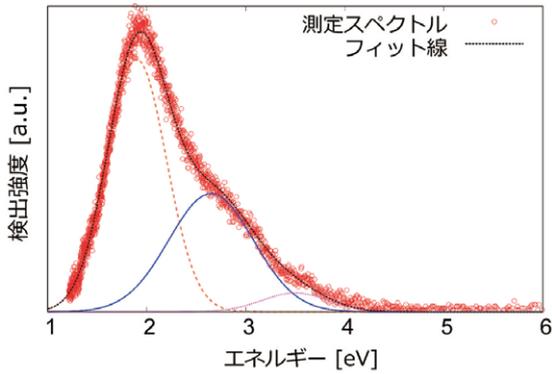


図4 IGZOシート抵抗値が低下するメカニズムモデル

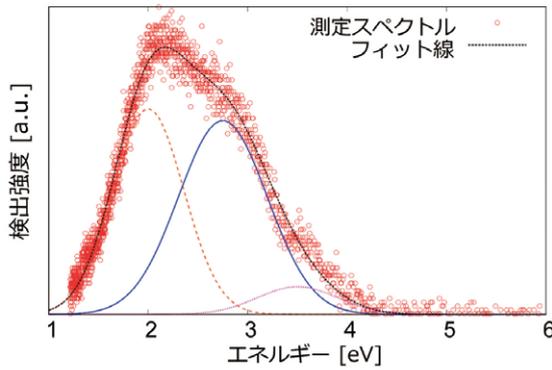
2. 3 カソードルミネッセンス法による評価

未注入のIGZO薄膜および、Ar⁺イオンを注入 (イオンエネルギー80 keV、注入量 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$) したIGZO薄膜に対し、XPS評価に加えて、カソードルミネッセンス (CL) 法による分析・評価を行った。図5にCL法による同一測定時間でのイオン注入前後のスペクトルを示す。得られたスペクトルは1.9 eV、2.7 eV、および3.5 eVをピーク中心として、3ピークに分離できる。ピークの中心が3.5 eVであることについては、価電子帯-伝導体間の遷移による発光によるものであり、このエネルギーは、図3 (a) (b)の内挿図に示すXPS-EELSにより得られたIGZO薄膜のバンドギャップ3.5eVと一致している。一方、1.9 eVあるいは2.7 eVはWangらにより報告されている値⁽¹⁴⁾と一致しており、この報告によると両者ともにVoにより生じる価電子帯-伝導帯間のディープドナーレベルに関係しているとされている。

今回の分析・評価結果から、未注入のIGZO薄膜と比較して、Ar⁺イオン注入後は1.9 eVのピークは少し減少するが、2.7 eVに対応するピークが大きく増大し、結果としてXPS分析結果と同様にVoの総量が増大していることが判明した。



(a) 未注入



(b) Ar⁺注入

図5 IGZO薄膜のCL法分析による分離スペクトル (発表論文のfigure 4 (copyright@FTFMD2020) の和訳)

2. 4 イオン注入IGZO薄膜の電子輸送特性評価

Ar⁺イオン注入条件とIGZO薄膜シート抵抗の関係を得るため、注入された希ガスのプロファイルを実シミュレーター (TRIM: Transport or Ions in Matter⁽¹⁵⁾) を用いて算出した。図6は各イオンエネルギーE_{Acc}におけるIGZO薄膜 (50 nm) /ガラス構造へのHe、NeおよびAr密度の深さプロファイル計算結果である。それぞれのE_{Acc}におけるプロファイルピークはエネルギーの低い順に、IGZO膜中、IGZO/ガラス界面、ガラス中の近傍である。

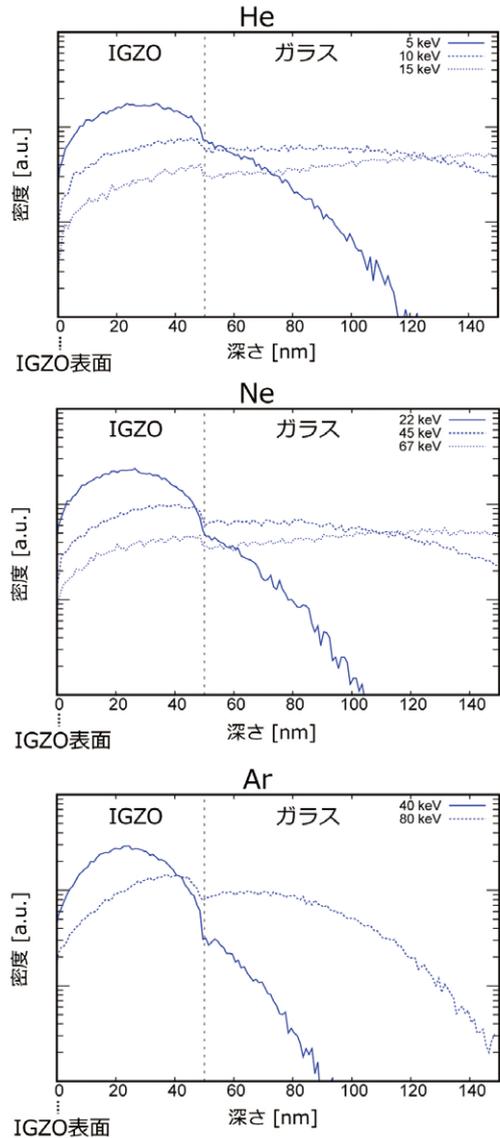


図6 IGZO (50 nm) /ガラス構造に対する、各イオンエネルギーにおけるHe、Ne、Ar注入密度の深さ方向プロファイル計算結果 (発表論文のfigure 5 (copyright@FTFMD2020) の和訳)

TRIMの計算結果を参考に、He⁺、Ne⁺、Ar⁺のそれぞれのイオンをIGZO薄膜 (50 nm) /ガラス構造に注入した。ここで、He⁺、Ne⁺、Ar⁺のE_{Acc}はそれぞれ、5-15 keV、22-67 keV、40-80 keVである。注入深さはイオン質量増大に伴い小さくなる傾向があることが知られている。

希ガスイオン注入量を $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ に揃え、注入後、室温でのホール測定を行い、各イオンエネルギー E_{Acc} におけるシート抵抗、キャリア密度、ホール移動度の測定結果を図7に示す。測定において希ガスイオン未注入のIGZO薄膜については、高シート抵抗値 ($10^{12} \Omega/\text{sq}$.程度) であるため、キャリア密度とホール移動度が得られなかった。

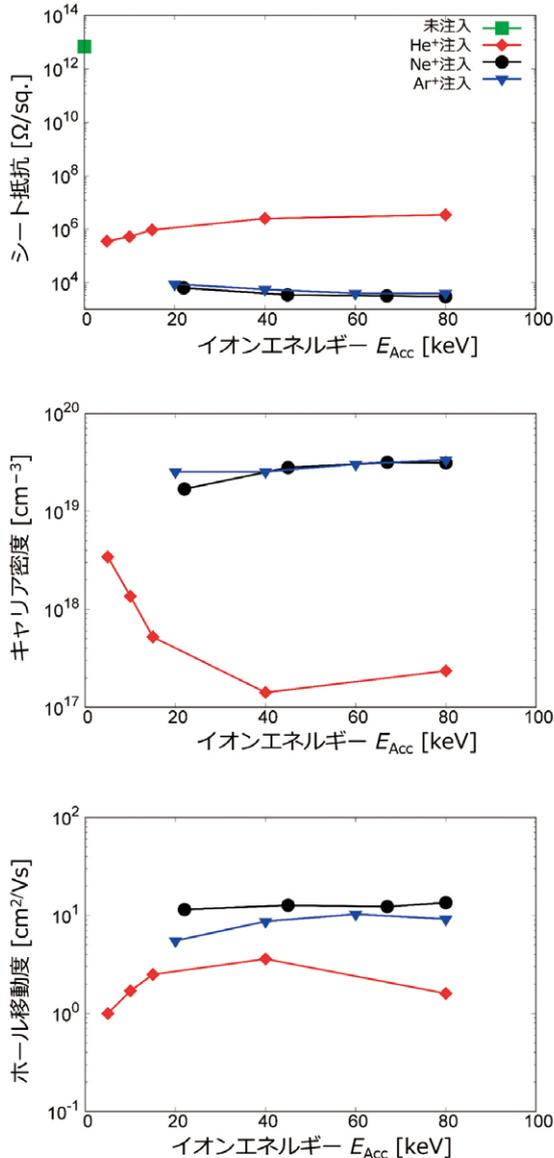


図7 未注入あるいは希ガスイオン注入量を $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ に揃えた場合のシート抵抗、キャリア密度、ホール移動度のイオンエネルギー E_{Acc} 依存性 (発表論文のfigure 6 (copyright@FTFMD2020) の和訳)

測定結果において、希ガスイオン注入後は、いずれの条件においてもシート抵抗値の減少を示した。特に、 Ne^+ および Ar^+ の場合は E_{Acc} の増大に伴い、 $3 \times 10^3 \sim 10^4 \Omega/\text{sq}$.へ急激に低下した。一方、 He^+ の場合、未注入のIGZO薄膜と Ne^+ あるいは Ar^+ 注入IGZO

薄膜の中間のシート抵抗値を示した。また、キャリア密度に着目すると、 Ne^+ および Ar^+ の場合、いずれの E_{Acc} においても 10^{19}cm^{-3} を超える高い電子密度が得られているが、 He^+ の場合は $10^{17} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 程度であり、キャリア密度に大きな違いが認められた。これは、図6に示す各イオンエネルギーの深さプロファイル計算結果より、 Ne^+ あるいは Ar^+ と比較して、 He^+ の質量と散乱断面積が極めて小さいことによって、IGZO薄膜中の V_0 の増加が少なかったことに起因していると考えられている⁽¹⁶⁾。また、ホール移動度については、いずれの E_{Acc} においても Ne^+ および Ar^+ の場合、 $10 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 以下であり、 He^+ の場合、数 cm^2/Vs であることが判明した。

以上の測定結果により、50nm膜厚のIGZO薄膜の低抵抗化について良好と考えられる E_{Acc} が判明したため、 He^+ 、 Ne^+ 、 Ar^+ の E_{Acc} をそれぞれ、5 keV、80 keV、80 keVに固定し、シート抵抗のイオン注入量依存性を調べた。

図8に得られた結果を示す。

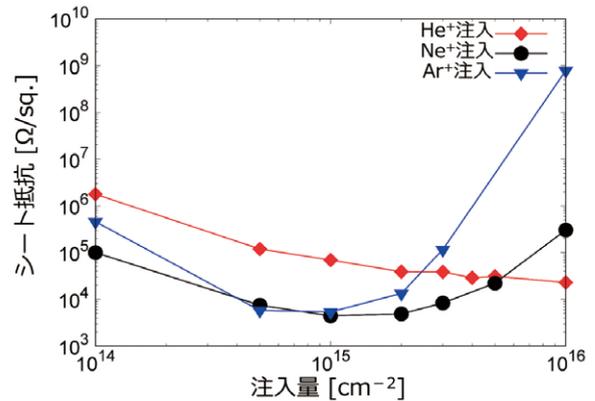


図8 IGZO薄膜への He^+ 、 Ne^+ 、 Ar^+ 注入時のシート抵抗値

図8より、 He^+ 注入の場合、シート抵抗値は注入量の単調減少関数に準じていることがわかった。これは He^+ イオンの注入量増加とともに V_0 が増大し、シート抵抗値が減少することを示している。一方、 Ne^+ あるいは Ar^+ 注入の場合、注入量が $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 近傍でシート抵抗値が最小値となることが判明した。注入量が $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 以下の範囲においては、 He^+ の場合と同様に、注入量とともに増加する V_0 の影響を受け、シート抵抗値は注入量の単調減少関数となる。一方、注入量が $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ を超える範囲においては、シート抵抗値は注入量の単調増加関数となっている。これは、2.2節 図4に示している電子を供給する金属原子の注入イオンとの衝突による V_0 の増大に伴うキャリア電導経路の減少が進むことによるものと考えている。

さらに、 Ne^+ と比較して Ar^+ は質量が大きく、IGZO薄膜分子との衝突散乱断面積が大きくなるため、シート抵抗が最小値となる注入量が少なくなり、かつ、注入量に依存するシート抵抗値増大カーブの傾きも大きいことが分かった。

以上の結果は、図6に示す各希ガスについて、質量が大きいほど散乱断面積が増大し、同じ深さに注入するために必要な E_{Acc} も増大する。一方で、散乱断面積が増大することで、 V_0 が生じやすくなることにより、質量が大きいほど少ない注入量でシート抵抗値が下がることと、 V_0 の増大に伴うキャリア電導経路の減少が進むことについて整合性がある。

3. まとめ

以上、ディスプレイ技術におけるIGZO TFTへのイオン注入装置の応用を目的とし、希ガスイオン注入によるIGZO薄膜シート抵抗値制御技術の検討結果を報告した。XPSでの分析や、CL法による分析およびホール測定により、注入後に V_0 が増大し、シート抵抗値の低減が実現できることが示された。さらに、電子輸送特性評価により、シート抵抗値のイオン注入量依存性を評価した。

上記の知見は、イオン注入法がIGZO薄膜デバイスプロセスにおいて有用であることを示すとともに、さらなる性能改善の可能性を秘めているため、今後も検討を続けていく所存である。

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) D. Matsuo, R. Miyanaga, T. Ikeda, S. Kishida, Y. Setoguchi, Y. Andoh, M. N. Fujii and Y. Uraoka, Proc. the 25th IDW (2018) 560.
- (8) 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.
- (9) T. Ui, R. Fujimoto, K. Yasuta, D. Matsuo, T. Sakai, Y. Setoguchi, E. Takahashi, Y. Andoh and J. Tatemichi, Proc. the 27th IDW (2020) 315.
- (10) K. Yasuta, T. Ui, T. Nagao, D. Matsuo, T. Sakai, Y. Setoguchi, E. Takahashi, Y. Andoh and J. Tatemichi, Proc. the 28th IDW (2021) 956.
- (11) T. Ui, R. Fujimoto, T. Sakai, D. Matsuo, Y. Setoguchi, Y. Andoh and J. Tatemichi, Proc. the 27th AM-FPD (2020) 115.
- (12) K. Yasuta, T. Ui, T. Ikeda, D. Matsuo, T. Sakai, S. Dohi, Y. Setoguchi, E. Takahashi, Y. Andoh and J. Tatemichi, Proc. the 28th AM-FPD (2021) 77.
- (13) H. Kim, Y. Tak, S. Park, J. Na, Y. Kim, S. Hong, P. Kim, G. Kim, B. Kim and H. Kim, Sci Rep 7 (2017) 12469.
- (14) D. Wang and M. Furuta, Beilstein, J. Nanotechnol. 9 (2018) 2573.
- (15) J. Ziegler and J. Biersack, Stopping Power and Range of Ion in Matter (2008) .
- (16) M. Ghorbani-Asl, S. Kretschmer, D. Spearot and A. Krasheninnikov, 2D Mater. 4 (2017) 025078.

執筆者紹介



宇井 利昌 Ui Toshimasa
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部



安田 圭佑 Yasuta Keisuke
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部



藤本 龍吾 Fujimoto Ryugo
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部
主任



松尾 大輔 Matsuo Daisuke
日新電機株式会社
研究開発本部
ビーム・プラズマ技術開発研究所
主任



酒井 敏彦 Sakai Toshihiko
日新電機株式会社
研究開発本部
ビーム・プラズマ技術開発研究所
主査



瀬戸口 佳孝 Setoguchi Yoshitaka
日新電機株式会社
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



安東 靖典 Andoh Yasunori
日新電機株式会社
研究開発本部
ビーム・プラズマ技術開発研究所
技監



立道 潤一 Tatemichi Junichi
日新イオン機器株式会社
イオンビーム機器事業部
技術主幹