

高知工科大学

修士論文

デバイスシミュレーションによる
InGaZnO_x/Ag_xO ヘテロ接合型
ショットキーダイオードの特性解析

**Analysis of Schottky diode properties in
InGaZnO_x/Ag_xO hetero interface
using device simulation**

平成 31 年 3 月 18 日

工学研究科基盤工学専攻

マテリアル工学コース

氏名：濱田 賢一郎

指導教員

古田 守 教授

目次

第1章 序論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 ショットキーダイオードについて.....	1
1.2.1 ショットキーダイオードの歴史.....	1
1.2.2 ショットキー障壁.....	1
1.2.3 ショットキーダイオードの電流-電圧特性.....	3
1.3 酸化物半導体 InGaZnO(IGZO).....	6
1.4 デバイスシミュレーション(Atlas).....	7
1.4.1 デバイスシミュレーションについて.....	7
1.4.2 本研究で用いたモデル.....	8
1.5 本研究の目的.....	8
1.6 本論文の構成.....	9
1.7 参考文献.....	9
第2章 欠陥準位がショットキーダイオードに与える影響.....	12
2.1 はじめに.....	12
2.2 ショットキーダイオードの構造.....	12
2.3 IGZO や Ag_xO の物理定数がショットキーダイオード特性に与える影響.....	13
2.3.1 デバイスシミュレーションの標準条件.....	13
2.4 IGZO の欠陥準位が IGZO/ Ag_xO ショットキーダイオード特性に与える影響.....	20
2.4.1 IGZO に含まれる欠陥準位.....	20
2.4.2 IGZO の欠陥準位がショットキーダイオードに与える影響.....	22
2.5 参考文献.....	26
3章 IGZO の成膜水素流量比やアニール温度がショットキーダイオード特性に与える影響.....	27
3.1 はじめに.....	27
3.2 ショットキーダイオードの作製プロセス.....	27
3.3 ショットキーダイオードの特性評価.....	28
3.4 デバイスシミュレーションによるショットキーダイオード特性の再現結果.....	29
3.4.1 考察.....	29
3.4.2 Refの再現結果.....	29

3.4.3 電子親和力がショットキーダイオード特性に与える影響	32
3.4.4 IGZO の欠陥準位がショットキーダイオード特性に与える影響.....	33
3.4.5 改善したショットキーダイオード特性の再現結果	36
3.4.6 IGZO 成膜時の水素導入及び IGZO 成膜後のアニール温度の増大の効果.....	38
3.5 まとめ.....	39
3.6 参考文献.....	39
第 4 章 デバイスシミュレーションを用いた金属半導体電界効果トランジスタ(MES-FET) の電流-電圧特性の研究.....	41
4.1 はじめに	41
4.2 MES-FET の特徴.....	41
4.3 MES-FET.....	42
4.3.1 MES-FET の研究について.....	42
4.3.2 実験方法.....	42
第 5 章 総括.....	47
研究業績	49
謝辞.....	50

第1章 序論

1.1 はじめに

最近、身の回りに多くの電子機器が発展しており、日常生活において必需品となっている。これらの電子機器にはシリコン(Si)やゲルマニウム(Ge)などを用いた半導体デバイスが搭載されている。半導体デバイスにはトランジスタやダイオードなどが挙げられる。トランジスタの役割は電子機器のスイッチングを行う。ダイオードは電気の流れを整流する。電子機器の発展には半導体デバイスの特性向上が必要不可欠である。

また、電子機器の発展とともに半導体材料に変化が見られる。従来、用いられている半導体材料はアモルファスシリコン(a-Si:H)である。しかし、a-Si:H では性能不足になりつつある。アモルファスインジウム・ガリウム・亜鉛の酸化物(a-In-Ga-Zn-O, a-IGZO)が高移動度材料($10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)と a-Si の 10 倍以上を示す。IGZO はディスプレイのスイッチング素子として用いられている薄膜トランジスタ(Thin Film Transistor, TFT)の新規のチャネル層として期待され、IGZO-TFT の研究が盛んに行われている [1] [2]。一方、IGZO のショットキーダイオードの研究は少ない。本論文では実際に作製した IGZO を活性層に用いたショットキーダイオード特性のデバイスシミュレーションによる解析結果を報告する。

1.2 ショットキーダイオードについて [3] [4]

1.2.1 ショットキーダイオードの歴史

1874 年に Braun によって金属-半導体接合が研究され [5]、整流器として利用された最初のデバイスである。この整流特性は半導体表面にポテンシャルの障壁ができておりと 1938 年に Schottky が提案 [6]し、そのモデルでよく説明できるためにこの障壁はショットキー障壁と呼ばれる。また、金属-半導体接触を用いたダイオードはショットキーダイオードと呼ばれる。次節でショットキー障壁形成の原理について述べる。

1.2.2 ショットキー障壁

ここではショットキー障壁について述べる。後述する IGZO が n 型半導体であることから n 型半導体と金属が接合したときについて述べる。金属と n 型半導体を接触したとき、金属の仕事関数 ϕ_m が n 型半導体の電子親和力 χ よりも大きいとき、バンドが曲り障壁 ϕ_{bn} を形成する。このときショットキー障壁高さ ϕ_{bn} は式(1.1)で表される。

$$\phi_{bn} = \phi_m - \chi \quad (1.1)$$

図 1.1 に孤立した金属と n 型半導体のエネルギーバンド図を示す。図 1.1 に示すように仕事関数とは真空準位とフェルミレベルのエネルギー差で定義される。電子親和力とは真空

準位と伝導帯下端のエネルギー差で表される。

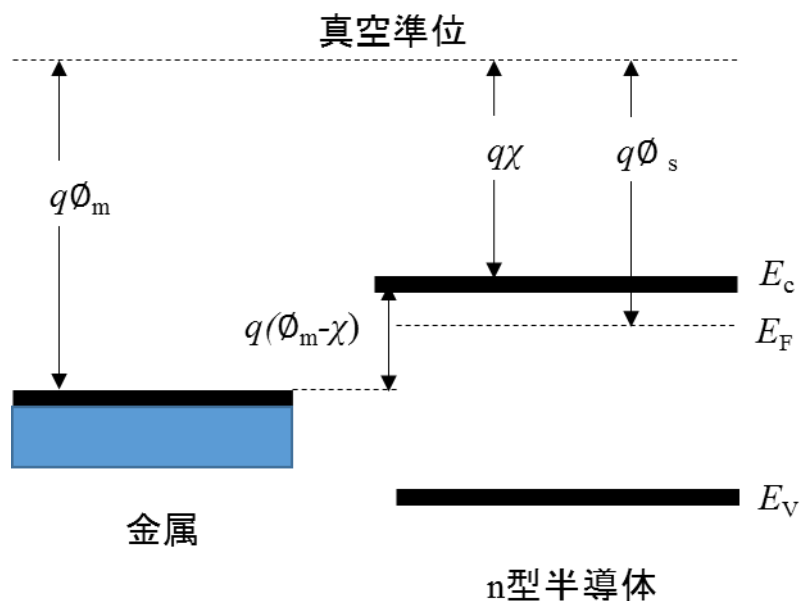


図 1.1 孤立した金属と n 型半導体のエネルギーバンド図

図 1.1 の孤立した金属と n 型半導体を接合することでエネルギーバンドが図 1.2 のように曲り、ショットキー障壁が形成される。

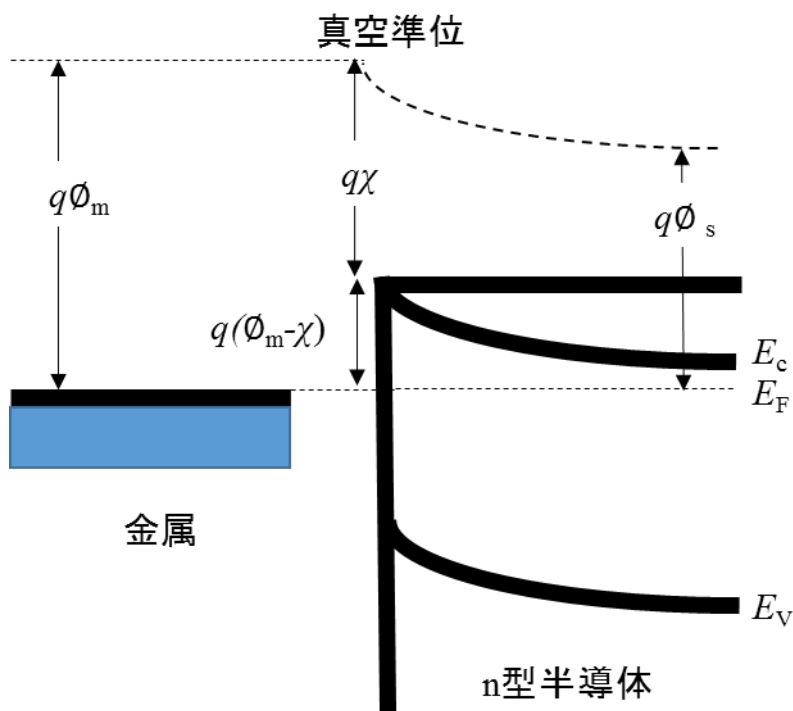


図 1.2 熱平衡状態における金属-半導体接触のエネルギーバンド図

1.2.3 ショットキーダイオードの電流-電圧特性

ここではショットキーダイオードの電流-電圧特性について述べる。ショットキーダイオードが、室温で動作する場合には多数キャリア（電子）が半導体側から金属側への熱電子放出が支配的な輸送過程である。

熱電子放出では半導体表面の電子のエネルギーがショットキー障壁高さより大きいとき、金属中へ熱電子として放出される。熱電子濃度は式(1.2)で表される。

$$n_{th} = N_C \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (1.2)$$

N_C は伝導帯の状態密度、 q は素電荷、 ϕ_{bn} は障壁高さ、 k はボルツマン定数、 T は絶対温度を示す。

熱平衡状態では半導体側から見た障壁と金属側から見た障壁が同じショットキー障壁 ϕ_{bn} であるため、反対方向の二つの電子の流れが打ち消し合って、電流密度はゼロになる。熱平衡状態時の熱電子放出理論による電流輸送を図 1.3 に示す。図 1.3 に示す $J_{m \rightarrow s}$ は金属から半導体へ流れる電流密度、 $J_{s \rightarrow m}$ は半導体から金属へ流れる電流密度を示す。

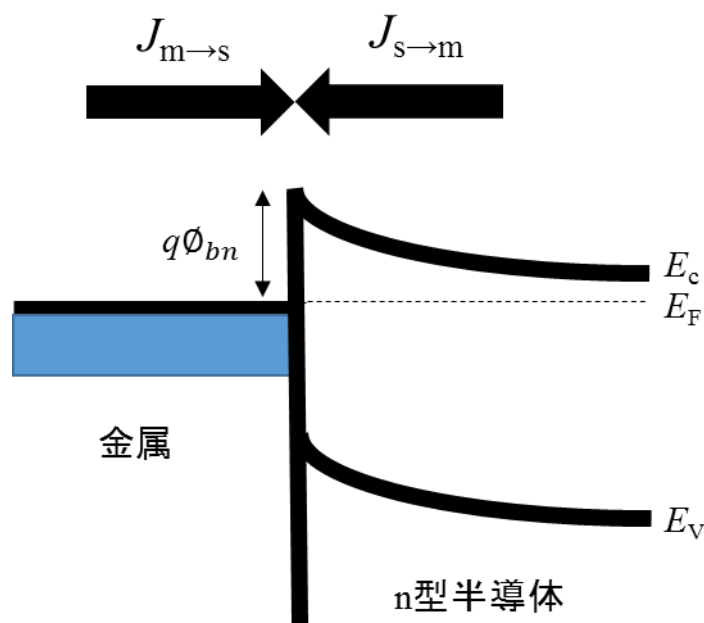


図 1.3 熱平衡状態における熱電子放出理論による電流輸送

よって熱平衡状態での電流密度の関係は式(1.3),(1.3')に示した通りになる。

$$|J_{m \rightarrow s}| = |J_{s \rightarrow m}| \propto n_{th} \quad (1.3)$$

$$|J_{m \rightarrow s}| = |J_{s \rightarrow m}| = C_1 N_c \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (1.3')$$

C_1 は比例定数である。接合に順方向バイアス V_F を印加したとき、障壁でのポテンシャルの差が図 1.4 のように減少する。障壁差が減少した結果、表面での電子密度は式(1.4)のように増加する。

$$n_{th} = N_c \exp\left[-\frac{q(\phi_{bn} - V_F)}{kT}\right] \quad (1.4)$$

電子が式(1.4)で表された分だけ半導体から金属へ流出する電流密度 $J_{s \rightarrow m}$ は増加する。しかし、金属から半導体への電子の流れは障壁の高さ ϕ_{bn} が同じであるため、電流密度は変化しない。したがって、順方向バイアス印加時での実質的な電流密度は $J_{s \rightarrow m}$ と $J_{m \rightarrow s}$ の差から式(1.5)で表される。

$$J = C_1 N_c \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1\right) \quad (1.5)$$

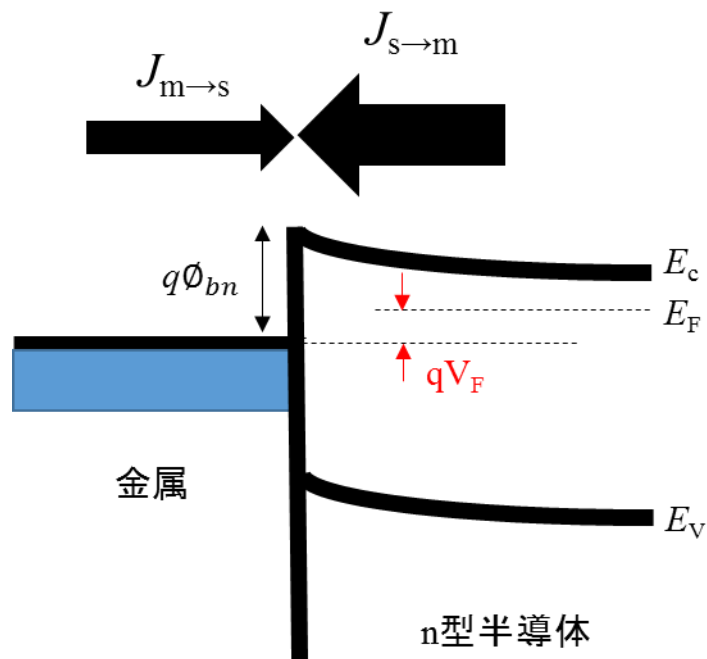


図 1.4 順方向バイアス印加時における熱電子放出理論による電流輸送

逆方向バイアスを印加したとき、式(1.5)の V_F を逆方向バイアス $-V_R$ に置き換えることで表

される。このときの式を式(3.5')に示す。これは逆方向バイアスを印加したときに図 1.5 に示すように半導体側から見た障壁が増大するためである。

$$J = C_1 N_c \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right) \left(\exp\left(-\frac{qV_R}{kT}\right) - 1\right) \quad (1.5')$$

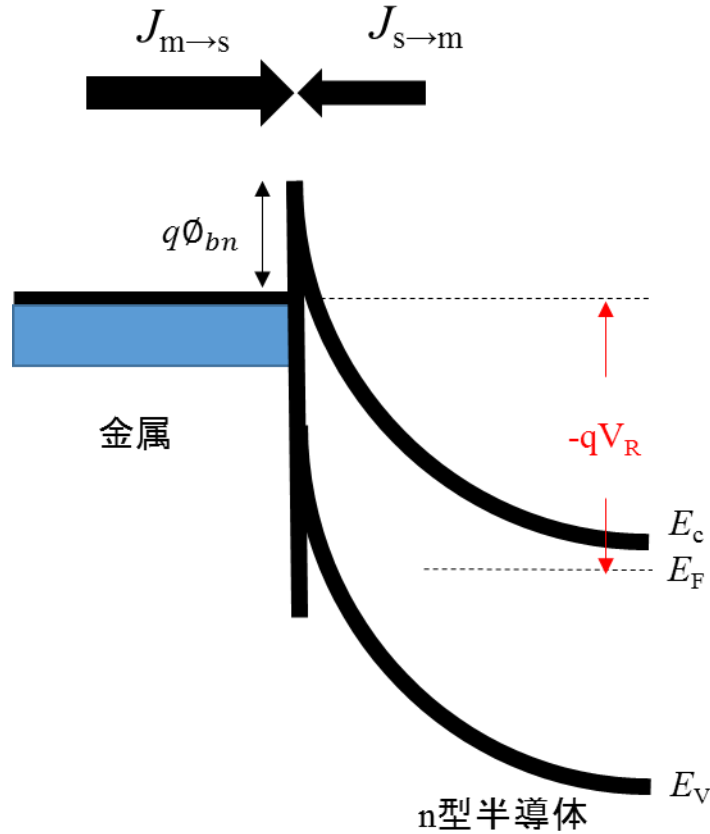


図 1.5 逆方向バイアス印加時における熱電子放出理論による電流輸送

式(1.5)及び式(1.5')の CINC は A^*T^2 に等しい。 A^* はリチャードソン定数を示し、IGZO の場合は $41 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ である。

よって熱電子放出によって支配されているショットキーダイオードの電流-電圧特性は式(1.6)で表される。

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1\right) \quad (1.6)$$

$$J_s = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (1.6')$$

式(1.6)の n は理想因子である。理想因子は $1 < n < 2$ の値をとり、 $n=1$ のときに理想的なショットキーダイオード特性を示す。また、(1.6')で示す J_s は飽和電流密度である。

本研究のショットキーダイオード特性の評価方法として式(1.6)及び式(1.6')を用い、理想因子と障壁高さの算出を行った。式(1.6)を式変形すると

$$\ln J = \ln J_s + \left(\frac{qV}{nkT} \right) \quad (1.6'')$$

式(1.6'')から $\ln J$ - V 特性の傾きから理想因子 n が算出できる。 $V=0$ に外挿することで J_s を求め、式(1.6')を用いることで障壁高さを算出した。

更に、2章では式(1.7)から整流比を求めた。

$$J_{F/R} = \frac{J_{on}(@ + 2V)}{J_{off}(@ - 2V)} \quad (1.7)$$

また、3章では $V=+2V$ 印加時の電流密度を順方向電流密度 J_F とし、再現結果とシミュレーション結果の比較を行った。

1.3 酸化物半導体 InGaZnO(IGZO)

本研究で用いているインジウム、ガリウム、亜鉛の酸素物である InGaZnO_x (IGZO)について述べる。IGZO は AOS(Amorphous Oxide Semiconductor)の一つである。AOS は多くの利点がある。それは高いキャリア移動度($10\text{cm}^2/\text{Vs}$)、光学的に透明であること、大面積で均一性があること、作製温度が低いことが挙げられる [1][2]。そのため、IGZO を活性層に用いた TFT の研究は多い。

一方で、IGZO を活性層に用いたショットキーダイオードの研究は少ない。これは IGZO(AOS)を活性層に用いたとき、酸化物半導体表面は作製条件に対してとても敏感であるため、安定で高品質なショットキー接合を形成することは困難である。しかし、ショットキーゲート電極に金(Au) [7]、銀(Ag) [8]、白金(Pt) [9]、パラジウム(Pd) [10]、Ru-Si-O [11]を用いて IGZO と接合し、ショットキーダイオードの整流性を示した報告もある。本研究室ではショットキー電極に酸化銀(Ag_xO)を用いた IGZO/ Ag_xO 接合型ショットキーダイオードの研究を行っている。 Ag_xO を用いるのは銀を酸化することで銀のフェルミレベルが減少し、仕事関数が増大する。ショットキー障壁高さは式(1-1)で表され、銀は酸化することで容易に物性を変化 [12]し、ショットキーダイオード特性の制御や向上が狙える。

IGZO を活性層に用いたショットキーダイオード特性は式(1.1)で示した障壁高さの計算結果からズレが生じる。なぜなら IGZO はバンドギャップ内に欠陥を含む [2]。IGZO の欠陥がドナーやアクセプタとして働き、電気特性に影響を与えるためである。つまり IGZO の欠陥準位がショットキーダイオード特性に与える影響を調査する必要があるといえる。

1.4 デバイスシミュレーション(Atlas)

1.4.1 デバイスシミュレーションについて

前述したが IGZO は非晶質半導体であり、バンドギャップ内の欠陥がショットキーダイオード特性に与える影響を調査する必要がある。

本研究では Silvaco 社のデバイスシミュレータ(Atlas)を用いた。デバイスシミュレータではデバイス内部を可視化し、デバイス特性の予測を行うことができる。シミュレーションするためには計算サンプルの構造を確定し、半導体領域に仮想的な網(メッシュ)を設定する。図 1.6 に本研究で用いたメッシュを示す。メッシュが細かくなれば、ノードが増えてより詳細な結果が得られる。しかし、計算量が多くなるためシミュレーションが終了するまでに必要な時間は増える。そこで本研究の物理モデルでは x 軸方向は一様であると考え全体的にく、 y 軸方向ではショットキーダイオードは金属/半導体界面が重要であるため、界面付近を細かく設定した。

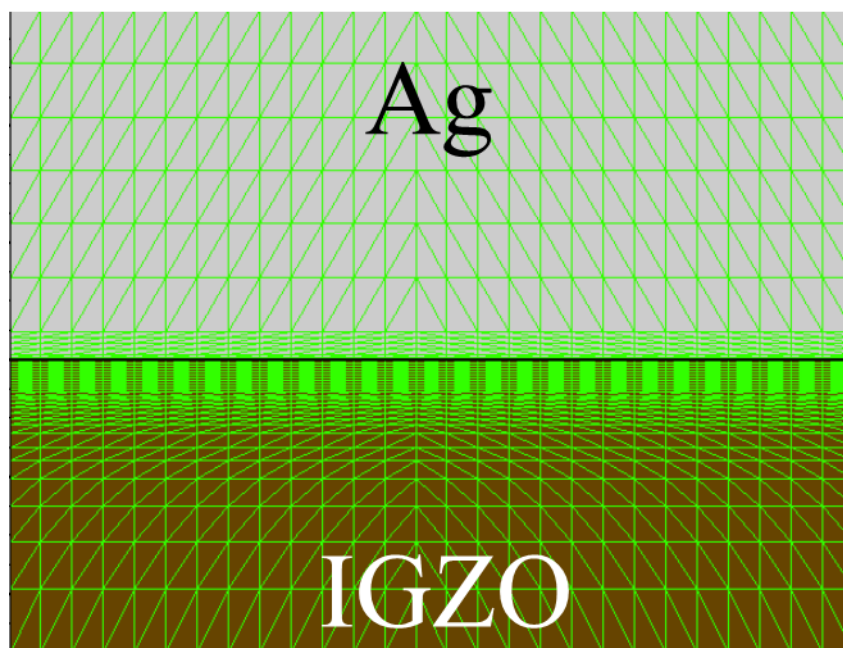


図 1.6 本研究で定義したメッシュ

メッシュを決めると同時に IGZO のキャリア濃度や電子親和力、Ag₂O の仕事関数を決めてシミュレーションのモデルを作製する。シミュレータはメッシュの全ての節点(ノード)でポ

アソン方程式、キャリア連続の式、ボルツマン方程式を基本とし [13][14]、キャリア濃度や電流密度を計算してショットキーダイオード特性を算出する。

1.4.2 本研究で用いたモデル

本研究室で用いたモデルについて述べる。ショットキーダイオードは逆方向バイアス印加時において、ショットキー界面に空乏層を形成する。空乏層は電子が通れないため、逆方向バイアス印加時には電流密度が減少する。

しかし、実際のショットキーダイオードでは電子が空乏層を通り抜けるトンネル現象が起こる。このとき流れる電流をトンネル電流という。デバイスシミュレーションは理想的な場合を考慮しており、逆方向電流はショットキー障壁高さのみで決まる。そこで UST(University Schottky Tunneling)モデル [13] [15] [16]を用いてショットキー界面でトンネル電流が流れるように設定してショットキーダイオード特性の解析を行った。

1.5 本研究の目的

前述した通り IGZO はバンドギャップ内に欠陥を含んでおり、この欠陥がショットキーダイオード特性に与える影響を調べる必要がある。IGZO や Ag_xO の材料物性値がショットキーダイオード特性に与える影響を調べる。また、実際のショットキーダイオード特性をデバイスシミュレーションでフィッティングし、ショットキーダイオードの特性解析を目的とし、実験を行った。

- ① 2章ではショットキーダイオード特性の特性解析を目的とした。実験値とは独立にデバイスシミュレーションで様々な材料物性値を変化させてショットキーダイオード特性に与える影響を調査した。材料物性値は IGZO ではキャリア濃度、電子親和力、欠陥密度、 Ag_xO では仕事関数と抵抗率を指す。材料物性値を変化させてショットキーダイオード特性の変化をデバイスシミュレーションで抽出した IGZO 膜内の電界やキャリア濃度を用いて考察した。
- ② 3章では実際に作製したショットキーダイオードの特性結果を用いた。 $Ar+O_2$ 混合ガスによって IGZO を成膜し、 $150^\circ C$ のアニール処理ではショットキーダイオードの逆方向電流が高い課題があった。そこで IGZO 成膜後に $300^\circ C$ のアニール処理を行う又は IGZO を $Ar+O_2+H_2$ 混合ガスで成膜することでショットキーダイオード特性が改善した。改善した要因を考察するためにアニール処理温度の増大及び成膜水素流量比の増加が IGZO の欠陥準位密度に与える影響を調査した。
- ③ 4章ではショットキーダイオードを利用した金属半導体電界効果トランジスタ (Metal Semiconductor Field Effect Transistor, MES-FET) についてもデバイスシミュレーションで

検討した。これも実験値とは独立にシミュレーションを行った。IGZO の欠陥準位や MES-FET の構造が MES-FET の伝達特性に与える影響を考察した。

1.6 本論文の構成

第1章

本研究の背景や目的について述べた。

第2章

デバイスシミュレーションを用いて IGZO のキャリア濃度や欠陥密度、 Ag_xO の仕事関数や抵抗率がショットキーダイオード特性に与える影響を検討した。更にデバイスシミュレーションから抽出した電界やキャリア濃度からショットキーダイオード特性が変化した要因を考察する。

第3章

実際に作製されたショットキーダイオード特性を基に解析を行った結果を報告する。IGZO 成膜時の成膜水素流量比を増加する又は IGZO 成膜後のアニール温度を増大することでショットキーダイオード特性が向上した。改善した要因をデバイスシミュレーションで考察した。

第4章

ショットキー接合を利用した金属半導体電界効果トランジスタ (Metal Semiconductor Field Effect Transistor, MES-FET) について IGZO の欠陥準位や MES-FET 構造の電極間距離が MES-FET の伝達特性に与える影響を検討した。

第5章

第 2-4 章の結果をまとめ、今後の展望や課題について述べる。

1.7 参考文献

- [1] Kenji Nomura, Hiromichi Ohta, Akihiro Takagi, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano, Hideo Hosono, “Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors,” NATURE VOL 432 25, 2004.
- [2] Toshio Kamiya Hideo Hosono, “Material characteristics and applications of transparent amorphous oxide semiconductors,” NPG Asia Mater. 2(1) 15–22, 2010.

- [3] S.M.ジー, SEMICONDUCTOR DEVICE 2nd Edition Physics and Technology, 産業図書株式会社, 1987.
- [4] B.L.アンダーソン R.L.アンダーソン, 半導体デバイスの基礎(中), 丸善出版株式会社, 2012.
- [5] F.Braun, “Über die Stromleitung durch Schwefelmetalle,” Ann. Phys. Chem.,153 556, 1874.
- [6] W.Schottky, “Halbleitertheorie der Sperrschicht,” Naturwissenschaften, 26 843, 1938.
- [7] Kenji Shiojima and Masato Shingo, “Mapping of Au/a-IGZO Schottky contacts by using scanning internal photoemission microscopy,” Phys. Status Solidi B 254, No. 2, 2017.
- [8] M.Lorenz, A.Lajn, H. Frenzel, H. v. Wenckstern, M. Grundmann, P. Barquinha, R. Martins, and E.Fortunato, “Low-temperature processed Schottkygated field-effect transistors based on amorphous gallium-indium-zinc-oxide thin films,” Appl. Phys. Lett. 97, 243506, 2010.
- [9] Dong Hee Lee, Kenji Nomura, Toshio Kamiya, and Hideo Hosono, “Diffusion-Limited a-IGZO/Pt Schottky Junction Fabricated at 200 °C on a Flexible Substrate,” IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 32, NO. 12, 2011.
- [10] Adrian Chasin, Eddy Simoen, Ajay Bhoolokam, Manoj Nag, Jan Genoe, Georges Gielen, and Paul Heremans, “Deep-level transient spectroscopy on an amorphous InGaZnO₄ Schottky diode,” Appl. Phys. Lett. 104, 082112, 2014.
- [11] Jakub Kaczmarek, Jakub Grochowski, Eliana Kaminska, Andrzej Taube, Wojciech Jung, and Anna Piotrowska, “In–Ga–Zn–O MESFET with transparent amorphous Ru–Si–O Schottky barrier,” Phys. Status Solidi RRL 8, No. 7, 625–628, 2014.
- [12] Yoshio Abe, Tomoaki Hasegawa, Midori Kawahara and Katsutaka Sasaki, “Characterization of Ag oxide thin films prepared by reactive RF sputtering,” Vacuum, 76 1-6, 2004.
- [13] Silvaco, Inc, Atlas User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE, 2016, pp. 101-104.
- [14] 田尾博昭、日野綾、高梨泰幸、林和志、釘宮敏洋, PITS 測定とデバイスシミュレーションによる酸化物半導体 TFT の特性解析, KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS/Vol.64 No.2, 2014.
- [15] Kazuya Matsuzaki, Ken Uchida, and Akira Nishiyama, “A Unified Simulation of Schottky and Ohmic Contacts,” IEEE TRANSACTIONS ELECTRON DEVICES, VOL.47, NO.1,, 2000.

- [16] MeiKei Jeong, Paul M. Solomon, S.E. Laux, Hon-Sum Philip Wong, and Durcseti Chidambarro, "Comparison of Raised and Schottky Source/Drain MOSFETs Using a Novel Tunneling Contact Model," Proceedings of IEDM 733-736, 1998.

第2章 欠陥準位がショットキーダイオードに与える影響

2.1 はじめに

本章では IGZO/Ag_xO 接合型ショットキーダイオードの特性解析について報告する。デバイスシミュレーションで IGZO や Ag_xO の材料物性値がショットキーダイオード特性に与える影響を調査した。

IGZO は非晶質半導体であり、バンドギャップ内に欠陥を多く含む[1]。バンドギャップ内の欠陥はドナーやアクセプタとして働き、電気特性に影響を与える。よって IGZO を半導体層に用いる場合、IGZO の欠陥がショットキーダイオード特性に与える影響を調査する必要がある。そこで本研究では1章で述べたデバイスシミュレータの Atlas を用いて IGZO の欠陥がショットキーダイオード特性に与える影響を調査した。

最後に IGZO の欠陥密度がショットキーダイオード特性に与える影響をデバイスシミュレーションで抽出した電界強度やキャリア濃度から考察した。

2.2 ショットキーダイオードの構造

図 2.1 はデバイスシミュレーションで用いたショットキーダイオードの構造である。ゲート電極の幅と奥行きは実際に測定しているショットキーダイオードの電極面積とほぼ同じになるように設定した。

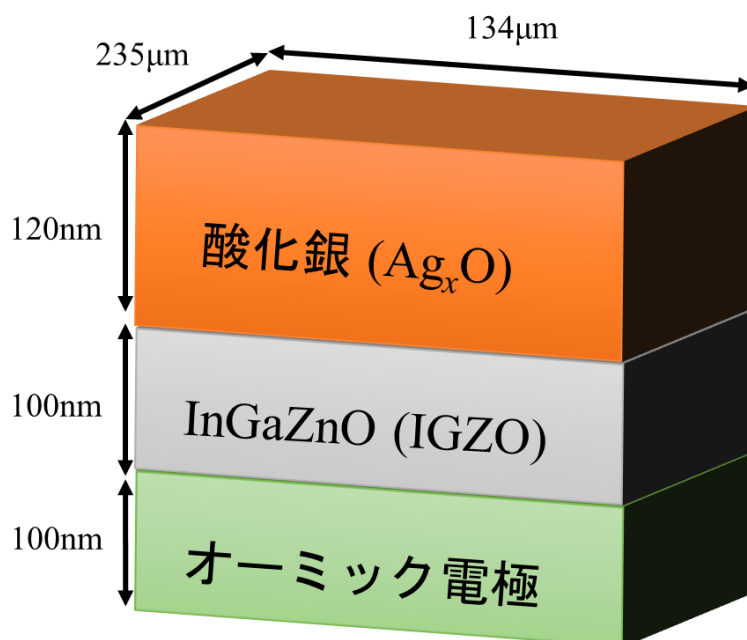


図 2.1 デバイスシミュレーションのショットキーダイオード構造

2.3 IGZO や Ag_xO の物理定数がショットキーダイオード特性に与える影響

2.3.1 デバイスシミュレーションの標準条件

IGZO や Ag_xO の材料物性値を変化させ、ショットキーダイオード特性に与える影響を検討した。ショットキーダイオード特性から障壁高さ、理想因子、整流比を 1 章で述べた方法で算出し、これらの各材料物性値依存性を調査した。障壁高さは 0-2 eV, 理想因子は 1-2, 整流比は 1-10²⁰ の範囲でそれぞれのグラフの縦軸に設定して変化を調査した。そのため、算出した値がこの範囲内でない場合、本論文にはその結果は示していない。

デバイスシミュレーションで一つずつ影響を調査した。他の変化しない材料物性値は表 2.1 の値で固定した。

表 2.1 デバイスシミュレーションの材料物性値

Symbol	Value	Unit	Description
N_{CC}	1.0×10^{17}	/cm ³	Carrier concentration
Φ_m	5.4	eV	Ag _x O work function
E_g	3.04	eV	Band gap
μ	12.5	cm ² /Vs	Electron mobility
χ	4.37	eV	Electron affinity
ρ	4.0×10^{-5}	Ωm	AgxO resistivity
N_{ta}	1.0×10^{21}	/cm ³ eV	Peak of tail state acceptor type trap density
W_{ta}	0.06	eV	Half bandwidth of tail state acceptor type trap density
N_{gd}	1.0×10^{17}	/cm ³ eV	Peak of gaussian state donor type trap density
W_{gd}	0.08	eV	Half bandwidth of gaussian state donor type trap density
E_{gd}	2.8	eV	Energy of N_{gd}
N_{td}	1.0×10^{20}	/cm ³ eV	Peak of tail state donor type trap density
W_{td}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state donor type trap density
N_{ga}	1.0×10^{16}	/cm ³ eV	Peak of gaussian state acceptor type trap density
E_{ga}	2.74	eV	Energy of N_{ga}
W_{ga}	1	eV	Half bandwidth of gaussian state acceptor type trap density

2.3.2 IGZO や Ag_xO の抵抗率が及ぼす影響[2]

IGZO や Ag_xO の抵抗率がショットキーダイオードに与える影響を調査した。半導体の電気抵抗率は式(2.1)のように表すことができる。

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{qn\mu_n} \quad (2.1)$$

q は電子の電荷、n はキャリア濃度、 μ_n は電子移動度を示す。式(2.1)からキャリア濃度や電子移動度は抵抗率に影響を与える。よって IGZO のキャリア濃度や移動度がショットキーダイオード特性に与える影響を調査した。

キャリア濃度がショットキーダイオードに与える影響を図 2.2 に示す。キャリア濃度は逆方向電流密度が大きく増大し、順方向電流密度も増大した。図 2.3(a)はキャリア濃度が障壁高さと理想因子に(b)は整流比に与える影響を示す。キャリア濃度が増加することで障壁高さが減少している。理想因子はキャリア濃度 $N_{CC} \leq 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ では $n \approx 1.2$ であるが、 $N_{CC} = 10^{19}$ になることで $n \approx 1.6$ に増大 (劣化) した。整流比も同様に $N_{CC} \leq 10^{18}$ では同程度の整流比を示すが、 $N_{CC} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ で大きく減少した。

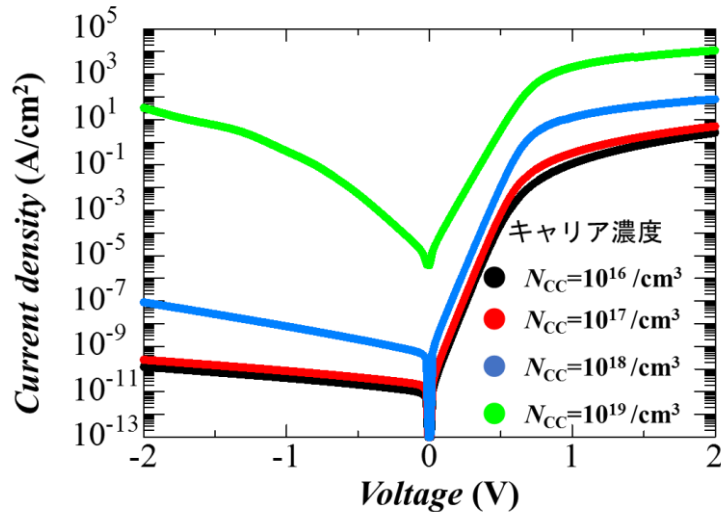


図 2.2 キャリア濃度がショットキーダイオード特性に与える影響

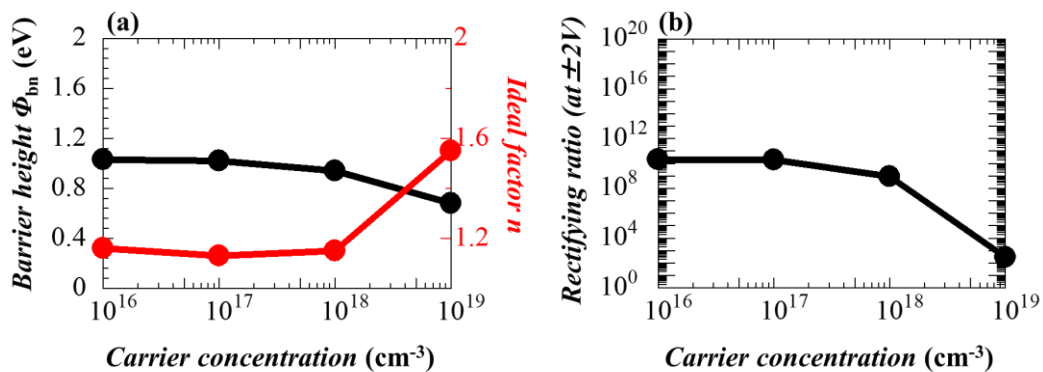


図 2.3 (a)障壁高さと理想因子 (b)整流比のキャリア濃度依存性

図 2.4 に IGZO の電子移動度がショットキーダイオードに与える影響を示す。電子移動度は順方向電流密度を増加させるが、逆方向電流密度にはほとんど変化がない。

図 2.5 に障壁高さ、理想因子、整流比の電子移動度依存性を示す。電子移動度を変化したが、キャリア濃度に比較して変化が小さい。IGZO (In:Ga:Zn=1:1:1 atom%) の移動度はおよそ $10\text{cm}^2/\text{Vs}$ である。

デバイスシミュレーションの結果より、IGZO の電子移動度がショットキーダイオード特性に与える影響は順方向電流密度を増加する。

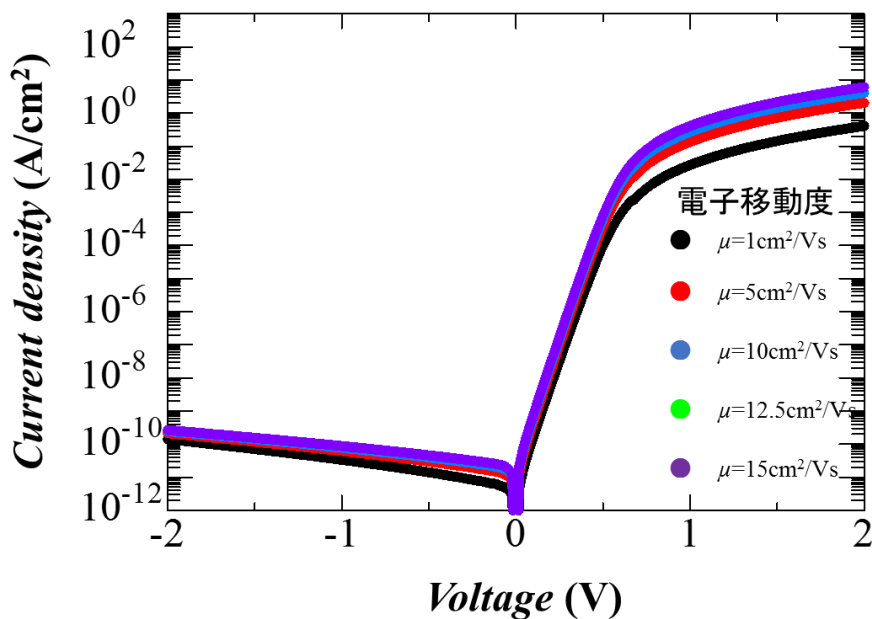


図 2.4 IGZO の電子移動度がショットキーダイオード特性に与える影響

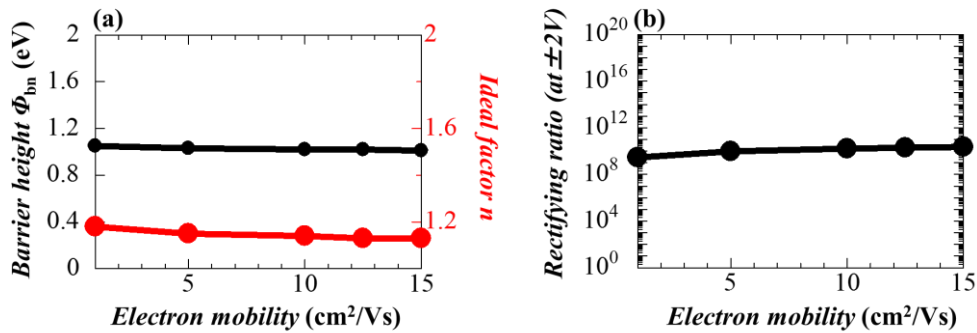


図 2.5 (a)障壁高さ と理想因子 (b)理想因子の IGZO の電子移動度依存性

図 2.6 に Ag_xO の抵抗率がショットキーダイオード特性に与える影響を示す。 Ag_xO の抵抗率はショットキーダイオード特性にほとんど影響を与えない。これは IGZO の抵抗率が Ag_xO に比較して高く、ショットキーダイオード特性は IGZO の抵抗率にて律速するためと考えられる。

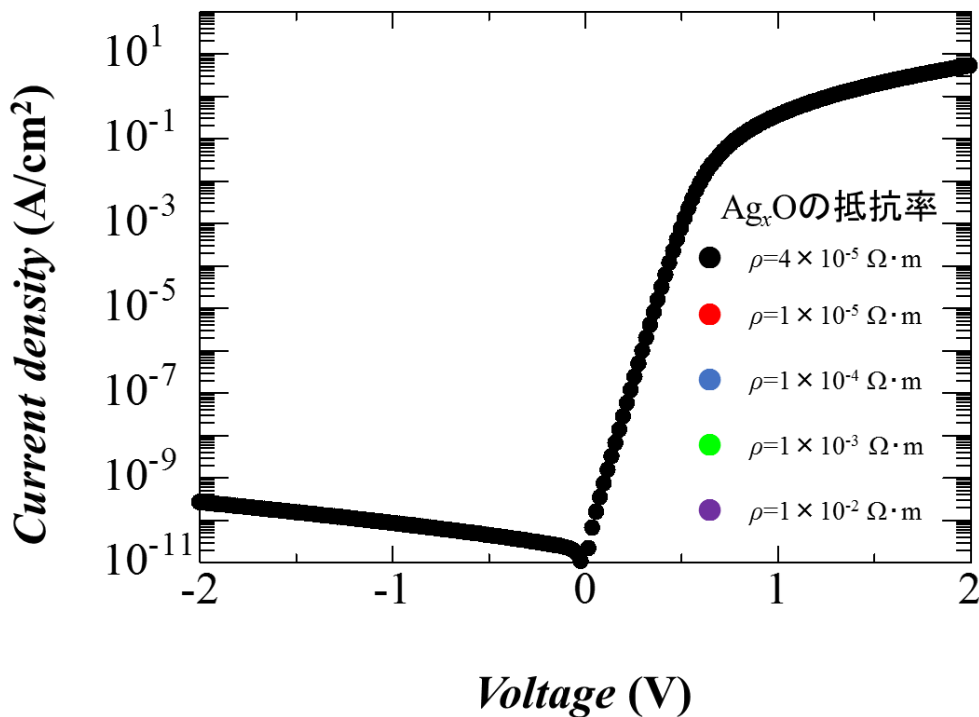


図 2.6 Ag_xO の電気抵抗率がショットキーダイオード特性に与える影響

2.3.4 ショットキー障壁高さがショットキーダイオード特性に与える影響

背景でも述べた通り、ショットキーダイオードは障壁高さ Φ_{bn} が形成されている。 Φ_{bn} は式(2.2)のように表される。

$$\phi_{bn} = \phi_m - \chi \quad (2.2)$$

ϕ_m は金属の仕事関数、 χ は半導体の電子親和力を示す。本節では Ag_xO の仕事関数及び IGZO の電子親和力がショットキーダイオード特性に与える影響を検討した。図 2.7 は酸化銀の仕事関数がショットキーダイオード特性に与える影響を示す。仕事関数が増大することで逆方向電流密度は大きく低減した。

シミュレーションでは、電子親和力は 4.37 eV で固定している。そのため、仕事関数の増大に伴って、ショットキー障壁高さは増大した。ショットキー障壁高さが増大することで金属から半導体へ流れる逆方向電流密度が減少する。図 2.8(a) は障壁高さと理想因子の仕事関数依存性を示している。障壁高さは仕事関数にほぼ比例しており、相関が式(2.2)と一致する。障壁高さの値が式(2.2)と一致しないのは IGZO に含まれている欠陥準位によるものであると考えられる。

理想因子は仕事関数の増大に伴い、理想因子が 1 に近づいており、ショットキーダイオード特性は改善している。

図 2.8(b) は各仕事関数での整流比を示す。仕事関数を増加すると障壁高さが増大するため、逆方向電流密度に大きな低減が見られ、仕事関数と整流比の対数が比例するような関係になっており、仕事関数を増加することで高い整流比のショットキーダイオード特性が得られる。

理想因子や整流比の仕事関数依存性からショットキーダイオードは高い仕事関数を持った金属が良いといえる。

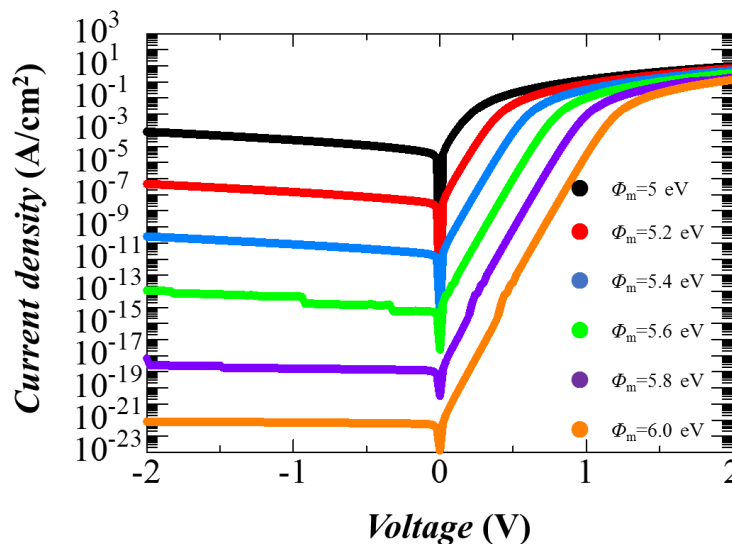


図 2.7 Ag_xO の仕事関数ショットキーダイオード特性に与える影響

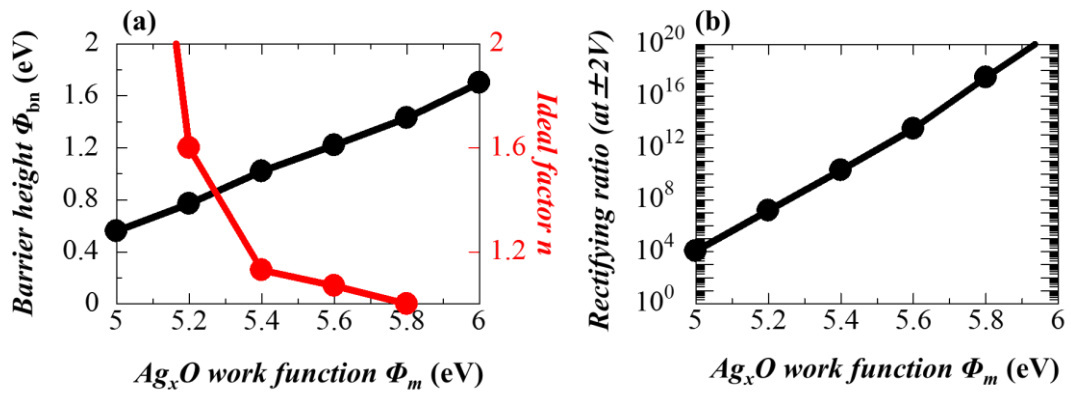


図 2.8 (a)障壁高さと理想因子 (b)整流比の仕事関数依存性

図 2.9 に IGZO の電子親和力がショットキーダイオード特性に及ぼす影響を示す。電子親和力を増加すると、逆方向電流密度が増加する。これは酸化銀の仕事関数を減少したときと同じ振る舞いであり、ショットキー接合の障壁高さが減少し、酸化銀から IGZO へ流れる電子密度が増加し、逆方向電流密度が増大した。

図 2.10 に電子親和力と障壁高さ、理想因子の関係を示す。障壁高さは電子親和力に対して負の相関を示しており、式(2.2)と一致している。また、理想因子は電子親和力が小さくなると急激に増大することも同様である。

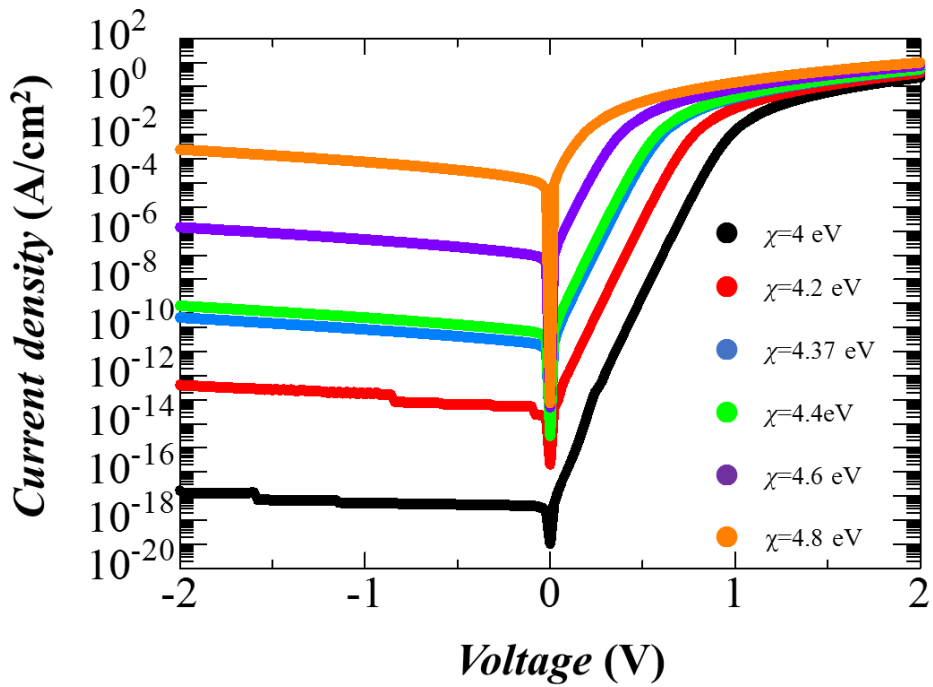


図 2.9 IGZO の電子親和力がショットキーダイオード特性に与える影響

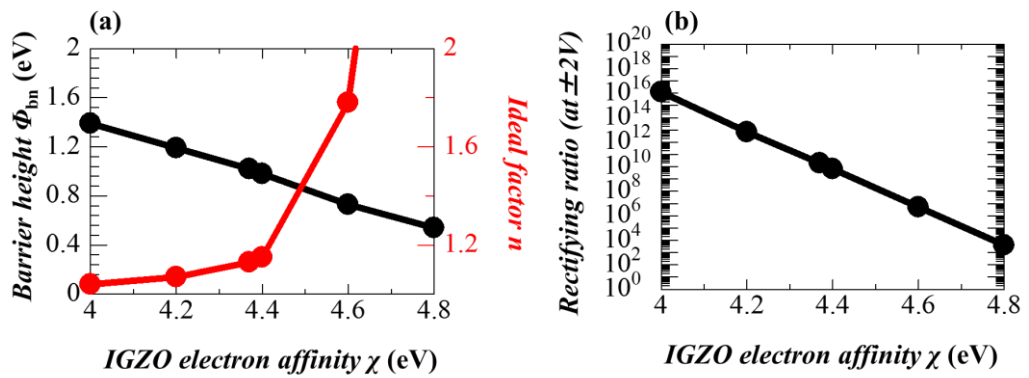


図 2.10 (a)障壁高さ と理想因子 (b)整流比の電子親和力依存性

2.4 IGZO の欠陥準位が IGZO/Ag_xO ショットキーダイオード特性に与える影響

2.4.1 IGZO に含まれる欠陥準位

本節では IGZO の欠陥準位がショットキー特性に与える影響について検討した。IGZO チャネル内に存在する欠陥は、本来電子が存在できないバンドギャップ内に準位（サブギャップ欠陥準位）を形成する。欠陥はドナーやアクセプタとして働き、電気特性に影響を与える。図 2.11 に IGZO の状態密度(DOS, Density of state)のイメージ図を示す。IGZO のバンド内には伝導帯、及び価電子帯に近づくにつれ指数関数的に増加する裾状（テール型）準位と特定のエネルギー準位にピークを持つ局在（ガウス型）準位が存在する。伝導帯近傍に局在する浅いドナーはシャロードナーと呼ばれる。

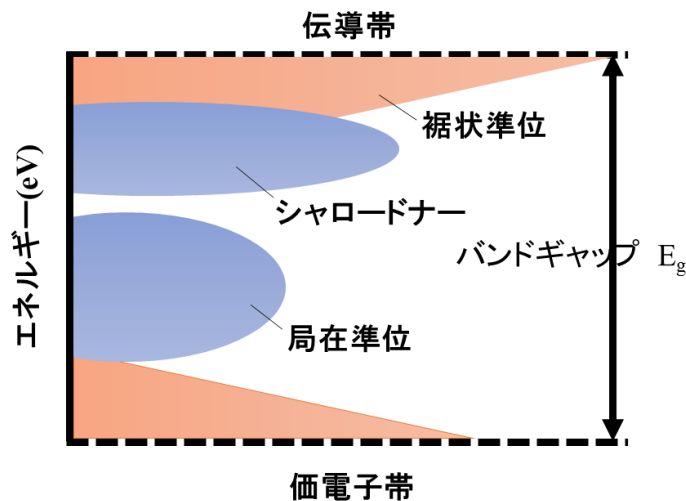


図 2.11 IGZO の DOS のイメージ図

欠陥密度の式を示す。式(2.3)と式(2.4)はそれぞれ裾状準位を示しており、式(2.3)がテールアクセプタ型欠陥密度、式(2.4)がテールドナー型欠陥密度を示している。

$$g_{ta}(E) = N_{ta} \exp \left[\frac{(E - E_c)}{E_a} \right] \quad (2.3)$$

$$g_{td}(E) = N_{td} \exp \left[\frac{(E_v - E)}{E_d} \right] \quad (2.4)$$

E_a は $\log(\text{DOS})$ - E の傾きを示し、欠陥密度に対してエネルギーがどの程度減衰しているかを示している。 E_d も同様に傾きを示す。 E_a, E_d はそれぞれ W_{ta}, W_{td} (それぞれ、 $N_{ta}/2, N_{gd}/2$ となるエネルギー準位) を用いて式(2.5), (2.6)を用いて計算できる。

$$E_a = \frac{W_{ta}}{\log 2} \quad (2.5)$$

$$E_d = \frac{W_{td}}{\log 2} \quad (2.6)$$

式(2.7),(2.8)は裾状準位を示し、式(2.7)はガウスアクセプタ型欠陥密度、式(2.8)はガウストナー型欠陥密度を示している。

$$g_{ga}(E) = N_{ga} \exp \left[\frac{-(E - E_{ga})^2}{2\sigma_a^2} \right] \quad (2.7)$$

$$g_{gd}(E) = N_{gd} \exp \left[\frac{-(E - E_{gd})^2}{2\sigma_d^2} \right] \quad (2.8)$$

裾状準位は特定のエネルギー準位にピークを持つ。アクセプタ、ドナーそれぞれで E_{ga}, E_{gd} がそのエネルギー準位である。これらの値はデバイスシミュレーションで決めることができ、 E_{ga} や E_{gd} の値で浅い準位や深い準位に変えてシミュレーションを行うことができる。

σ_a, σ_d はそれぞれの関数の標準偏差である。ガウス分布関数の場合、標準偏差 σ を用いて半値幅 FWHM が

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \approx 2.354820\sigma \quad (2.9)$$

と表すことができる。

式(2.7)から σ_a, σ_d はそれぞれ式(2.8),(2.9)のように表される。

$$\sigma_a = \frac{W_{ga}}{2\sqrt{2}\ln 2} \quad (2.10)$$

$$\sigma_d = \frac{W_{gd}}{2\sqrt{2}\ln 2} \quad (2.11)$$

ここで W_{ga} 及び W_{gd} はアクセプタとドナーのガウス分布関数の半値幅を示す。

2.4.2 IGZO の欠陥準位がショットキーダイオードに与える影響

本節では欠陥密度がショットキーダイオードに与える影響について記す。伝導帯近傍に存在するテールアクセプタ型欠陥準位とガウズドナー型欠陥準位の影響を報告する。ショットキーダイオードは多数キャリアデバイスであることと IGZO が n 型半導体であることからキャリアは電子であり、伝導帯近傍の欠陥密度がショットキーダイオードに与える影響が大きいと考えられるためである。

図 2.12 に N_{ta} (テールアクセプタ型欠陥密度) がショットキーダイオード特性に与える影響を示す。 N_{ta} はショットキーダイオードの順方向電流密度を減少する。逆方向電流密度はほとんど変化していない。

図 2.13(a)に障壁高さと理想因子、(b)に整流比の N_{ta} 依存性を示す。障壁高さは逆方向電流密度に変化がなく、障壁高さに影響を与えない。理想因子はテールアクセプタの増加に伴い、増加(劣化)する傾向を示した。

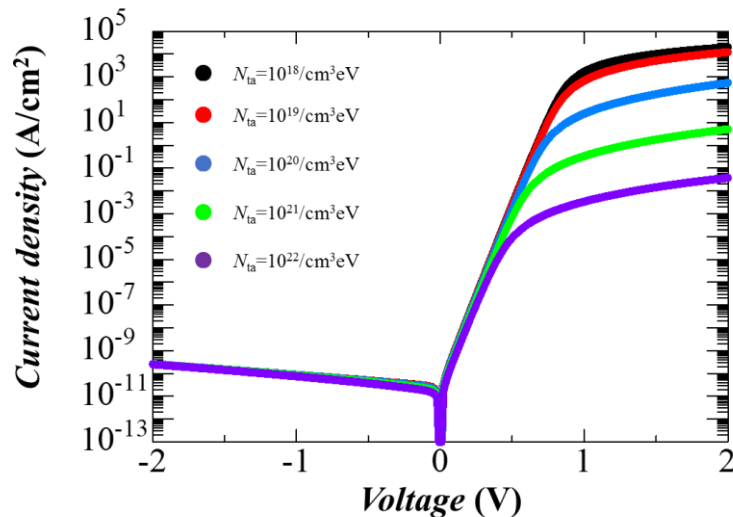


図 2.12 テールアクセプタ(N_{ta})がショットキーダイオード特性に与える影響

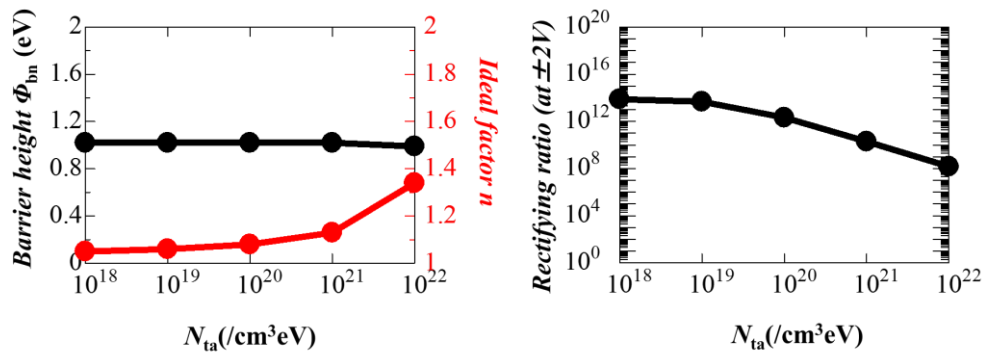


図 2.13 (a)障壁高さと理想因子 (b)整流比の N_{ta} 依存性

テールアクセプタ型欠陥密度が増加したときに順方向電流密度が減少した原因を考察する。図 2.14 はデバイスシミュレーションで $V=+2V$ 印加時の IGZO 深さに対するキャリア濃度を示している。横軸の 0 は IGZO/ Ag_xO 界面を示す。

テールアクセプタ型欠陥密度が増加することで IGZO 膜内のキャリア濃度が減少している。テールアクセプタは電子を捕獲する働きがある。ショットキーダイオードでは順方向バイアス印加時に電子が半導体から金属へ流れる。この電子がテールアクセプタに捕獲されたことで順方向電流密度が減少したと考えられる。

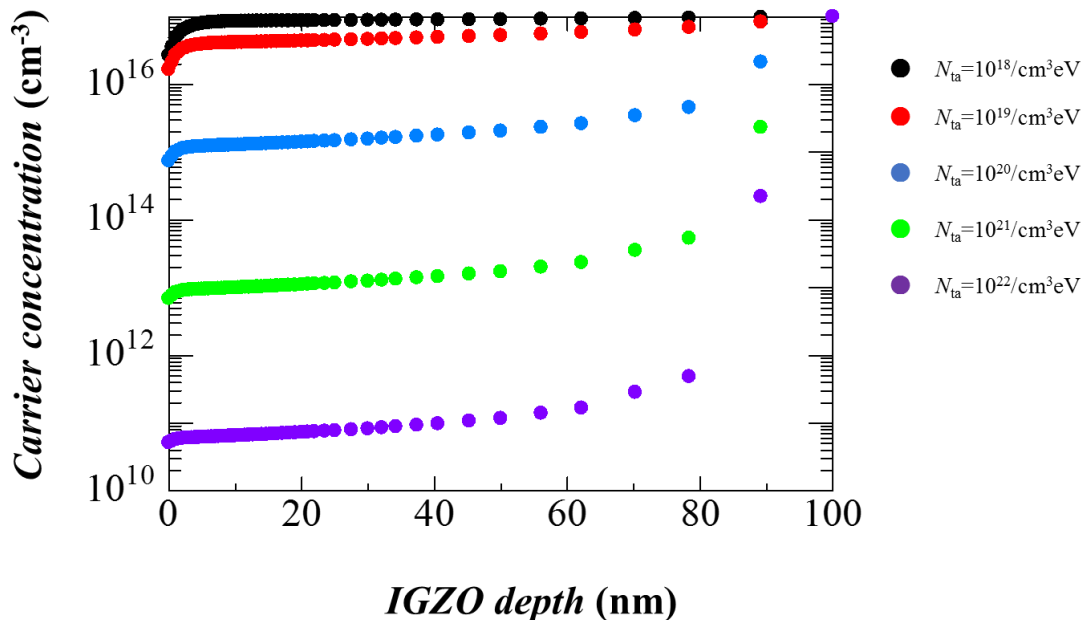


図 2.14 $V=+2V$ 印加時の IGZO 深さに対するキャリア濃度

図 2.14 にガウスドナー型欠陥密度がショットキーダイオード特性に与える影響を示す。ガウスドナーの増加によりは逆方向電流が大きく増加し、順方向電流も増加が見られる。

障壁高さや理想因子は $N_{gd}=10^{19}/\text{cm}^3\text{eV}$ まではほとんど変化がないが、 $N_{gd}=10^{20}/\text{cm}^3\text{eV}$ になると障壁高さは減少し、理想因子は増加した。 $N_{gd}=10^{20}/\text{cm}^3\text{eV}$ のときにショットキーダイオード特性においても逆方向電流密度が大きく増大した影響である。

整流比も順方向電流密度の増大に比較して逆方向電流密度の増大が大きく劣化する傾向にある。

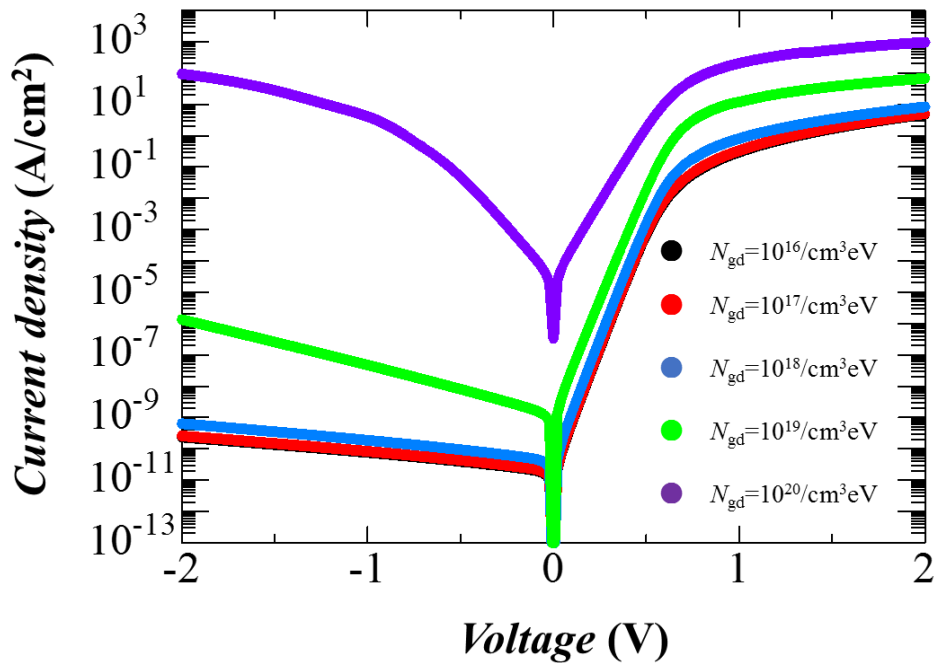


図 2.15 ガウスドナー密度(N_{gd})がショットキーダイオード特性に与える影響

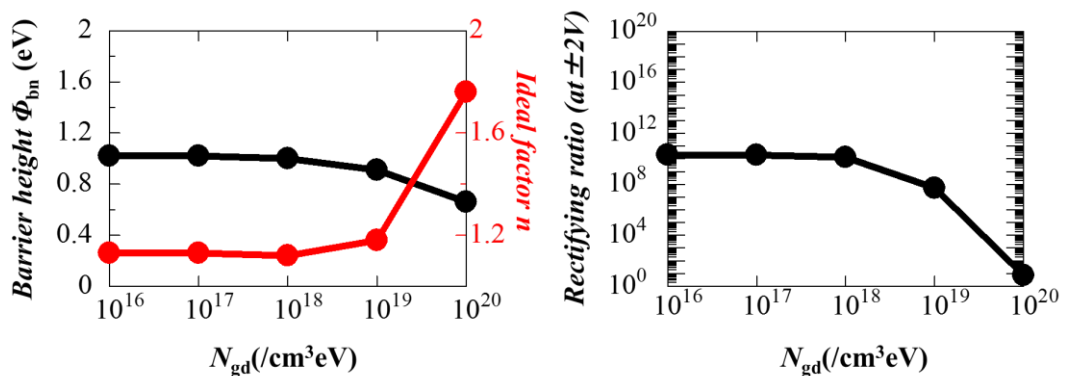


図 2.16 (a)障壁高さと理想因子 (b)整流比の N_{gd} 依存性

次にガウスドナー欠陥密度が増大し、ショットキーダイオード特性に与えた影響について考察する。順方向電流密度が増加したのは電子が増大したためと考えられる。そこで、逆方向電流密度が増大した原因について検討した。

逆方向電流密度が増大した原因を調査するために $V=-2V$ 印加時の電界強度を抽出した。ショットキーダイオードでは逆方向バイアス印加時、金属と半導体の界面（半導体側）に空乏層を形成する。電子が空乏層を通ることはないが、実際のショットキーダイオードでは電子が空乏層幅を通り抜けるトンネル電流が流れている。トンネル電流は式(2.12)で表される。

$$I \sim \exp \left[-2W \sqrt{\frac{2m_n(q\phi_{bn} - qV)}{\hbar^2}} \right] \quad (2.12)$$

W は空乏層幅、 m_n は電子の有効質量、 \hbar は還元プランク定数を示している。式(2.12)からトンネル電流は空乏層幅 W が狭くなることで大きくなるのがわかる。空乏層幅 W は IGZO の深さ x と電界強度 $E(x)$ の関係式(2.13)で表される。

$$|E(x)| = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (W - x) \quad (2.13)$$

N_D はドナー濃度、 ϵ_s は半導体の誘電率を示す。この式はポアソン方程式から導かれる。式(2.13)から $x=W$ のとき $E=0$ となる。よって逆方向バイアス印加時の IGZO 深さに対する電界強度を知ることで、空乏層幅を算出することができる。 $V=-2V$ 印加時の IGZO 深さに対する電界強度を図 2.17 に示す。

ガウスドナー濃度が大きくなることで $E=0$ となる点が IGZO/Ag_xO の界面に近づいている。 $E=0$ の点が空乏層幅 W なので空乏層幅が狭くなっていることを意味している。ガウスドナー型欠陥密度が増加することで空乏層幅が狭まりトンネル電流が増大したことが逆方向電流密度の増大の原因といえる。

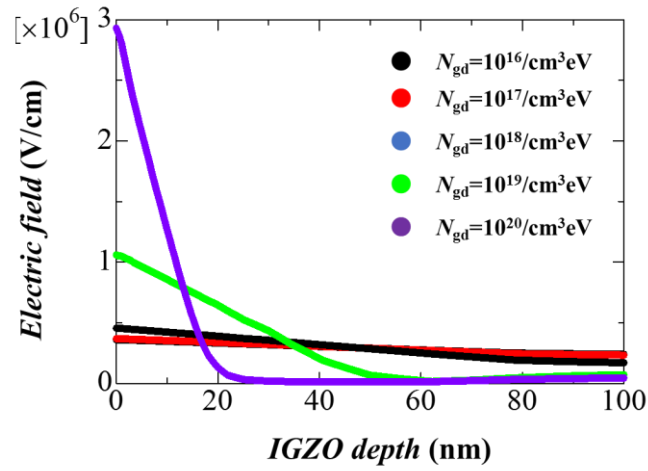


図 2.17 各 N_{gd} における -2V 印加時の電界強度

2.5 参考文献

- [1] Toshio Kamiya Hideo Hosono, "Material characteristics and applications of transparent amorphous oxide semiconductors," NPG Asia Mater. 2(1) 15–22, 2010.
- [2] .M.ジー, SEMICONDUCTOR DEVICE 2nd Edition Physics and Technology, 産業図書株式会社, 1987.

3章 IGZO の成膜水素流量比やアニール温度がショットキーダイオード特性に与える影響

3.1 はじめに

IGZO は 1,2 章で述べるように非晶質半導体であり、多くの欠陥が存在する[1]。2 章ではこの欠陥がショットキーダイオードに与える影響を調査した。欠陥はショットキーダイオード特性に様々な影響を与えることが明らかになった。IGZO の欠陥を減少する必要があるといえる。IGZO は欠陥密度を減少するため、300°C以上の高温アニールが必要とされる[2-4]。しかし、フレキシブル応用などを考慮したとき 300°C以上のアニールは困難である。これはフレキシブル基板の耐熱温度が 150°Cほどであるためである。IGZO に含まれている不純物水素はシャロドナーとして働くといわれている[5-7]。IGZO の欠陥を補償している可能性もある[8]といわれている。そこで本研究では IGZO 成膜時に積極的に水素を導入し、150°Cの低温において IGZO の欠陥を減少しショットキーダイオード特性の改善を試みた。また、IGZO の成膜後に 300°Cのアニール処理を行ってショットキーダイオードを作製した。これは IGZO 成膜時に水素を導入したショットキーダイオード特性と水素未導入 IGZO を 300°Cでアニール処理をしたときの 2 つのショットキーダイオード特性の比較を行った。

3.2 ショットキーダイオードの作製プロセス

ショットキーダイオードの作製プロセスを図 3.1 に示す。①石英基板上に酸化インジウムスズ (Indium Tin Oxide, ITO) 100nm を DC マグネトロンスパッタリング法で 250°Cの高温下で成膜した。次に②IGZO を成膜酸素流量比 $R[O_2]=1\%$ 、成膜水素流量比 $R[H_2]=0\%, 5\%$ でそれぞれ室温成膜した。IGZO を成膜後、③ホットプレート上で大気アニール処理を 2 時間行った。このとき、アニール温度は $R[H_2]=0\%$ で成膜した IGZO 膜を 150°Cでアニール処理を行ったサンプルを標準条件(Sample1)とし、水素を添加した $R[H_2]=5\%$ の IGZO 膜を 150°Cでアニールしたサンプル(Sample2)と $R[H_2]=0\%$ で成膜し、アニール温度を 300°Cに増大したサンプル(Sample3)と 3 条件で IGZO を成膜し、ショットキーダイオードを作製した。最後に④フォトリソグラフィーでゲート電極パターンを形成し、⑤酸化銀(Ag_xO)を Ag のターゲットを用いて $Ar+O_2$ の混合ガスによる反応性スパッタリング法で成膜した。⑥ Ag_xO 成膜後に真空蒸着法によって金(Au)を成膜した。最後に⑦リフトオフでゲートパターンを加工した。成膜条件の詳細を表 3.1 に示す。

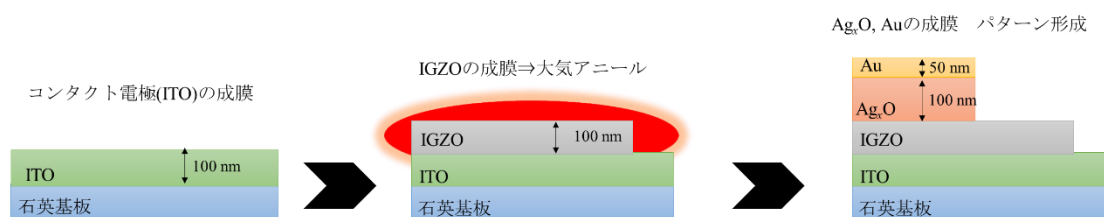


図 3.1 ショットキーダイオードの作製プロセス

表 3.1 ショットキーダイオードの作製条件

	材料	成膜ガス流量	成膜温度	成膜圧力	成膜電力
	ITO	Ar=20 sccm	250 °C	0.4 Pa	150 W
Sample1	IGZO	Ar=29.7 O ₂ =0.3 H ₂ =0 sccm	RT	1 Pa	80 W
Sample2		Ar=28.2 O ₂ =0.3 H ₂ =1.5 sccm			
Sample3		Ar=29.7 O ₂ =0.3 H ₂ =0 sccm			
	Ag _x O	Ar=9.6 O ₂ =0.4 sccm	RT	0.5 Pa	20W

3.3 ショットキーダイオードの特性評価

本研究で作製した Sample1-3 のショットキーダイオード特性を図 3.2 に示す。V<0V 印加時の電流密度を逆方向電流密度と呼ぶ。Sample1(Ref)は逆方向電流密度が高い。ショットキーダイオードは整流性を示すため、逆方向電流密度が高いことは課題となる。一方で、IGZO 成膜時に水素を導入することで 150°Cアニールにおいても逆方向電流密度が減少した。また、水素は導入せずに IGZO 成膜後に 300°Cのアニール処理を行うことでも方向電流密度が減少した。表 3.2 はショットキーダイオード特性から算出した障壁高さ ϕ_{bn} , 理想因子 n , 順方向電流密度 J_F を示す。IGZO 成膜時に水素を導入することで n は 1.45 から 1.14 に向上した。また、IGZO 成膜後に 300°Cでアニール処理をすることで n が 1.45 から 1.06 に向上した。 n は $1 < n$ の値をとり、 $n=1$ の時に理想的なショットキーダイオード特性であることを示す指標である。図 3.2 及び表 3.2 から逆方向電流密度に加えて n も改善した。水素導入 IGZO+150°Cアニールまたは水素未導入 IGZO+300°Cアニール処理でショットキーダイオード特性が改善したことが明らかになった。

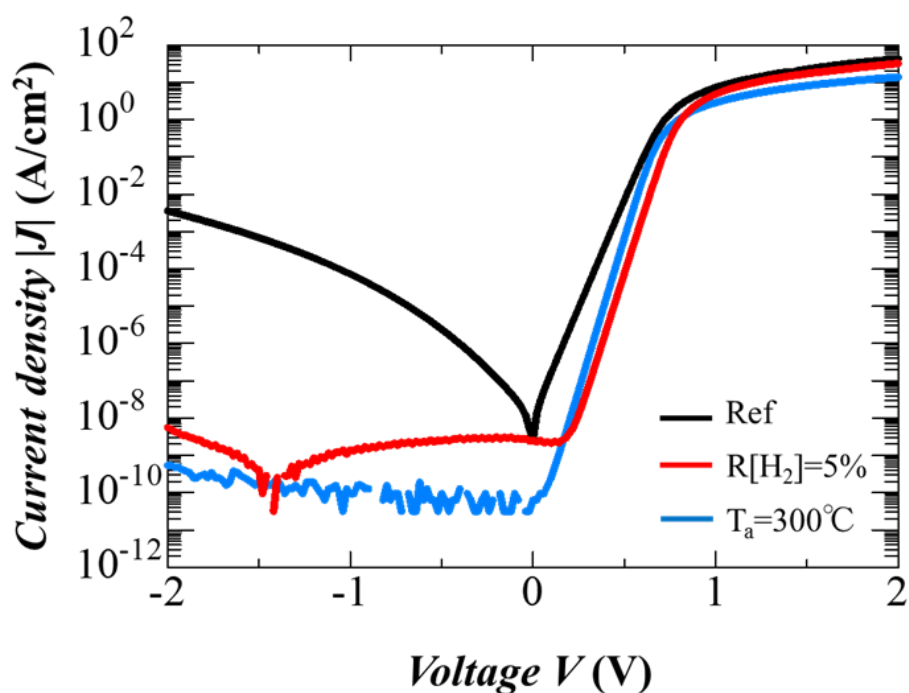


図 3.2 ショットキーダイオード特性

表 3.2 ショットキーダイオード特性評価

R[H ₂]	T _a (°C)	Φ _{bn} (eV)	n	J _F (A/cm ²)
0	150	0.86	1.45	43
5	150	1.08	1.14	32
0	300	1.13	1.06	14

3.4 デバイスシミュレーションによるショットキーダイオード特性の再現結果

3.4.1 考察

前節で水素導入 IGZO+150°Cアニール及び水素未導入 IGZO+300°Cアニールによってショットキーダイオード特性が改善したことが明らかになった。しかし、改善した要因は明らかになっていない。そこでデバイスシミュレーションを用いてショットキーダイオード特性を再現し、ショットキーダイオード特性が改善した要因について考察した。

3.4.2 Refの再現結果

図 3.3 に Ref の再現結果を示す。最初に Ref を再現するのは Ref の特性から変化した材料物性値を調べるためである。表 3.3 には実験とシミュレーションのそれぞれで得られた障壁高さ Φ_{bn}, 理想因子 n, 順方向電流密度 J_F を示す。Ref は Φ_{bn}=0.86 eV, n=1.43, J_F=47 A/cm² であ

り、実験とシミュレーションで近い値がとれている。

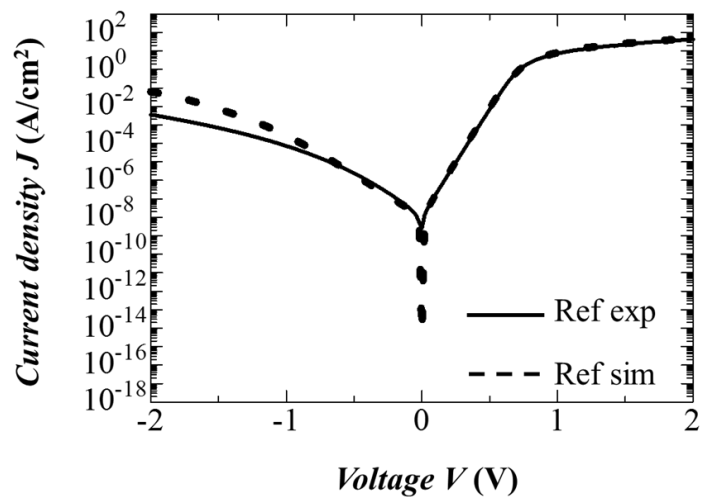


図 3.3 Ref の再現結果

表 3.3Ref の実験結果とシミュレーション結果の評価パラメータ

	exp	sim
障壁高さ ϕ_{bn} (eV)	0.86	0.86
理想因子 n	1.45	1.43
順方向電流密度 J_F (A/cm ²)	43	47

また Ref を再現したときの各材料物性値を表 3.4 にバンドギャップ内の状態密度(DOS)を図 3.4 に示す。

表 3.4 Ref を再現したときの材料物性値

Symbol	Value	Unit	Description
N_{CC}	9.1×10^{17}	$/\text{cm}^3$	Carrier concentration
Φ_m	5.5	eV	AgxO work function
E_g	3.04	eV	Band gap
μ	12.5	cm^2/Vs	Electron mobility
χ	4.37	eV	Electron affinity
ρ	4.0×10^{-5}	Ωm	AgxO resistivity
N_{ta}	8.0×10^{20}	$/\text{cm}^3\text{eV}$	Peak of tail state acceptor type trap density
W_{ta}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state acceptor type trap density
N_{gd}	1.6×10^{19}	$/\text{cm}^3\text{eV}$	Peak of gaussian state donor type trap density
W_{gd}	0.23	eV	Half bandwidth of gaussian state donor type trap density
E_{gd}	2.8	eV	Energy of N_{gd}
N_{td}	1.0×10^{20}	$/\text{cm}^3\text{eV}$	Peak of tail state donor type trap density
W_{td}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state donor type trap density
N_{ga}	1.0×10^{16}	$/\text{cm}^3\text{eV}$	Peak of gaussian state acceptor type trap density
E_{ga}	0.3	Energy of N_{ga}	
W_{ga}	1	eV	Half bandwidth of gaussian state acceptor type trap density

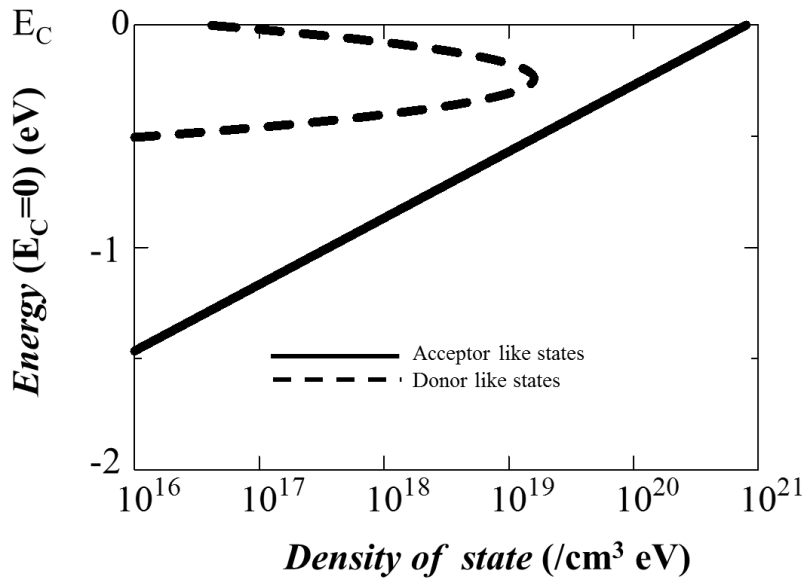


図 3.4 Ref を再現したときの DOS

3.4.3 電子親和力がショットキーダイオード特性に与える影響

本研究で水素導入 IGZO+150°Cアニールと水素未導入 IGZO+300°Cアニールの電子親和力を測定した。IGZO の電子親和力は Ref では 4.37 eV であり、水素導入 IGZO+150°Cアニールの電子親和力は 4.23 eV、水素未導入 IGZO+300°Cアニールの電子親和力は 4.27 eV とどちらの条件下においても電子親和力が減少した。ショットキー障壁高さは式 3.1 で表される。

$$\phi_{bn} = \phi_m - \chi \quad (3.1)$$

ϕ_m は金属の仕事関数を示し、 χ は半導体の電子親和力を示す。式 3.1 から IGZO の電子親和力が減少することでショットキー障壁高さが増大し、逆方向電流が減少したことが示唆された。式 3.1 には金属の仕事関数も含まれているが、本研究では酸化銀は同条件下で成膜したため、金属の仕事関数は全て同じであると考え、電子親和力のみを実験値である 4.23 eV, 4.27 eV に変化し実験結果の再現を試みた。Ref のシミュレーション結果から電子親和力を変化させたときのショットキーダイオード特性を図 3.5 に示す。電子親和力が減少することで障壁高さの増加は見られた。しかし、逆方向電流密度は実験値と比較して高い。これらの結果からショットキーダイオード特性の改善は IGZO の電子親和力の減少だけでは説明できない。

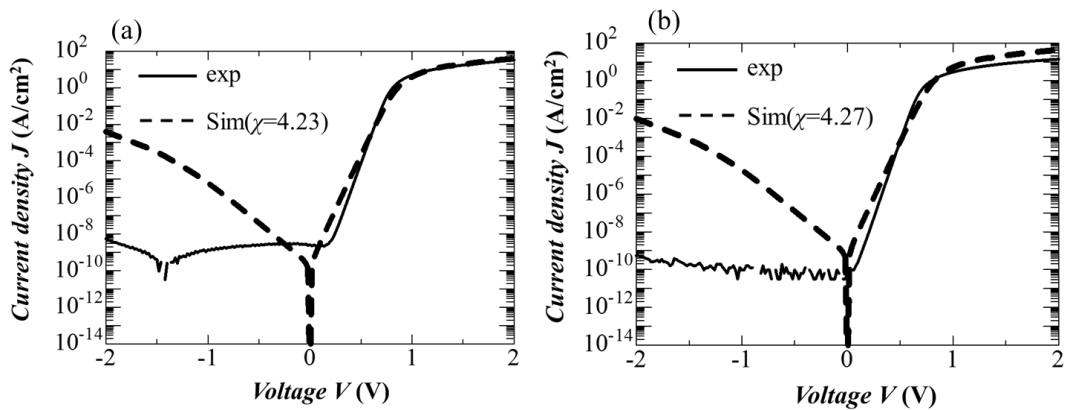


図 3.5 Ref から電子親和力を実験結果に基づき変化させたときのシミュレーション結果

(a) R[H₂]=5%, T_a=150°C (Sample2)

(b) R[H₂]=0%, T_a=300°C (Sample3)

3.4.4 IGZO の欠陥準位がショットキーダイオード特性に与える影響

IGZO はバンドギャップ内にドナーやアクセプタとして働く欠陥準位が存在する。この欠陥準位が減少し、ショットキーダイオード特性が改善したと考え、欠陥準位を減少させ、改善したショットキーダイオード特性の再現を試みた。図 3.6 に IGZO のバンドギャップ内、伝導帯近傍の状態密度のイメージ図を示す。伝導帯近傍の欠陥に着目したのは IGZO が n 型半導体であり、伝導電子がキャリアとなるためである。また、標準条件で課題となっていた逆方向電流密度はショットキー界面に形成された空乏層を電子が通り抜けるトンネル電流が支配的である。トンネル電流は空乏層幅が狭まることや空乏層内に存在する欠陥によるトラップアシストトンネリング(Trap assist tunneling, TAT)[7]によって増大する。このことから本節では Ref のシミュレーション結果を基に伝導帯近傍の欠陥密度がショットキーダイオード特性に与える影響を調査した。

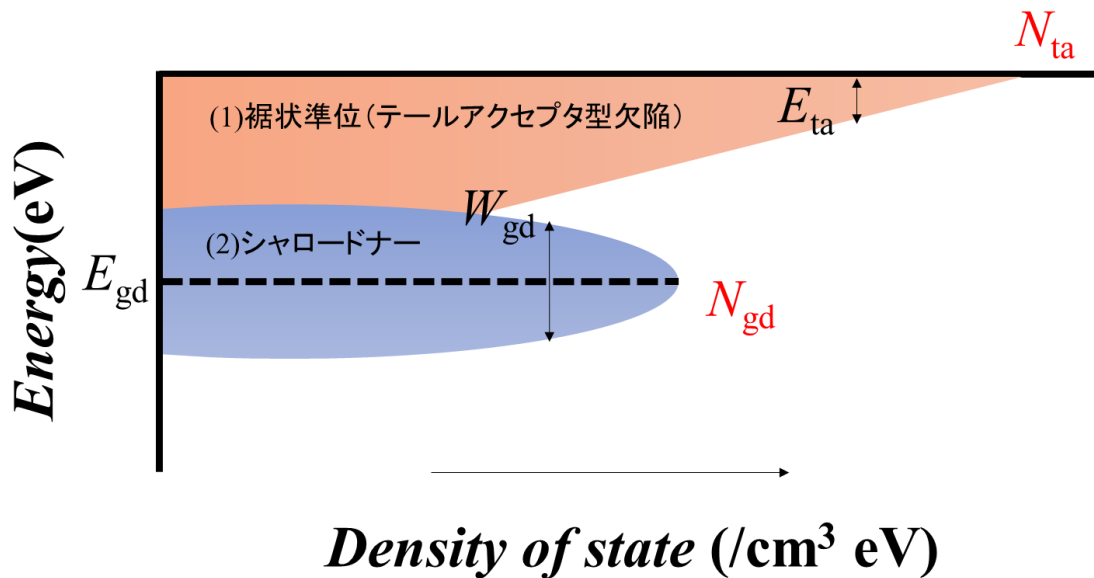


図 3.6 IGZO の状態密度のイメージ図 (伝導帯近傍のみ)

図 3.6 に示す欠陥密度はエネルギーに対してそれぞれ式(3.2),(3.3)で表される。

$$(1) = N_{ta} \exp\left(\frac{E - E_C}{E_{ta}}\right) \quad (3.2)$$

$$(2) = N_{gd} \exp\left[\frac{-(E - E_{gd})^2}{2\sigma_d^2}\right] \quad (3.3)$$

テールアクセプタ型欠陥密度を減少するために伝導帯下端($E=E_C$)で最大値をとる N_{ta} を減少

し、テールアクセプタ型欠陥密度がショットキーダイオード特性に与える影響を調査した。更にシャロードナーを減少するためあるエネルギー準位($E=E_{gd}$)で最大値をとる N_{gd} を減少し、シャロードナーがショットキーダイオード特性に与える影響を調査した。図 3.7 はシャロードナー濃度がショットキーダイオード特性に与える影響を示す。シャロードナーの減少によっては逆方向電流密度が大きく減少し、順方向電流密度も減少した。

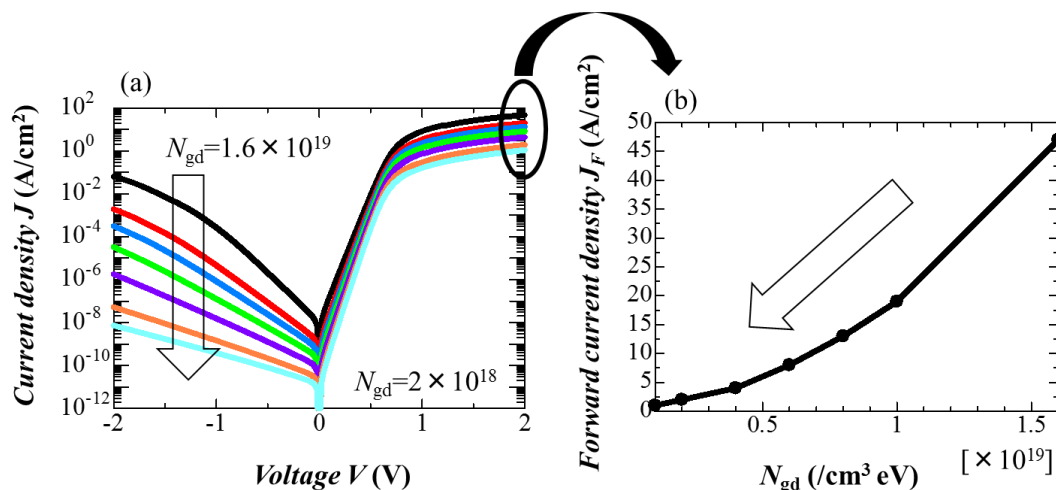


図 3.7 シャロードナー濃度がショットキーダイオード特性に与える影響

(a) ショットキーダイオード特性

(b) シャロードナー濃度が順方向電流密度に与える影響

図 3.8 にテールアクセプタ型欠陥密度がショットキーダイオード特性に与える影響を示す。シャロードナーが減少したときとは異なり、逆方向電流密度 J_R はほとんど影響しない。順方向電流密度 J_F はアクセプタが減少することで増大する。またアクセプタ濃度が J_F に与える影響をみたとき、 $N_{ta} = 7 \times 10^{20}$ では $J_F = 100$ A/cm² だったことに対して $N_{ta} = 2 \times 10^{20}$ まで減少することで $J_F = 1000$ A/cm² を超えた。シャロードナーを変化したときに 5-50 A/cm² の小さな変化しか見られなかったことに対して N_{ta} の変化は J_F に大きな影響を与える。

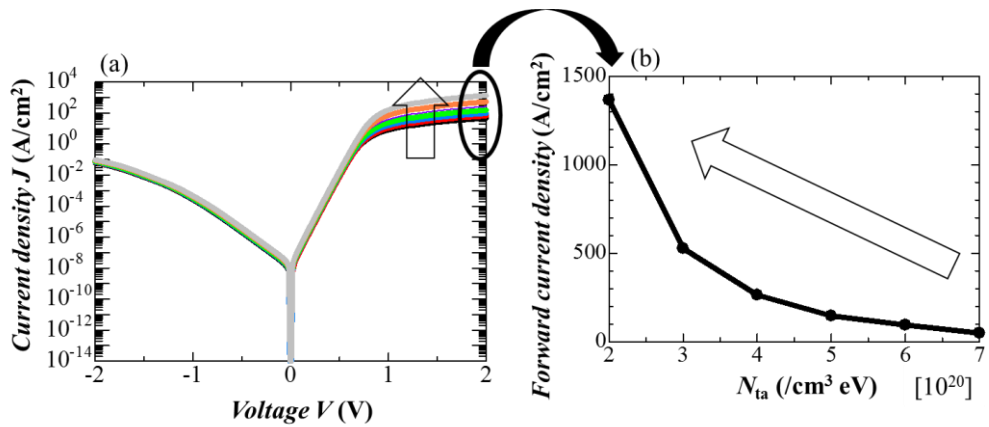


図 3.8 アクセプタ濃度がショットキーダイオード特性に与える影響

(a) ショットキーダイオード特性

(b) アクセプタ濃度が順方向電流密度に与える影響

また、各欠陥密度がショットキーダイオード特性から算出した障壁高さ ϕ_{bn} や理想因子 n に与える影響を図 3.9 に示す。シャロードナーが減少することで、 ϕ_{bn} は増加し n が減少する傾向がある。一方でアクセプタ密度は ϕ_{bn} や n への影響はほとんどない。これらの結果をまとめると J_F はアクセプタとドナーのどちらの影響も受ける。しかし、影響の受け方が異なり、ドナーは減少することで J_F が減少し、アクセプタは減少することで J_F が増加した。

アクセプタは J_F の他に影響を受けないと考えられ、 $J_{R,n}, \phi_{bn}$ はシャロードナーの影響を受けていることが分かった。

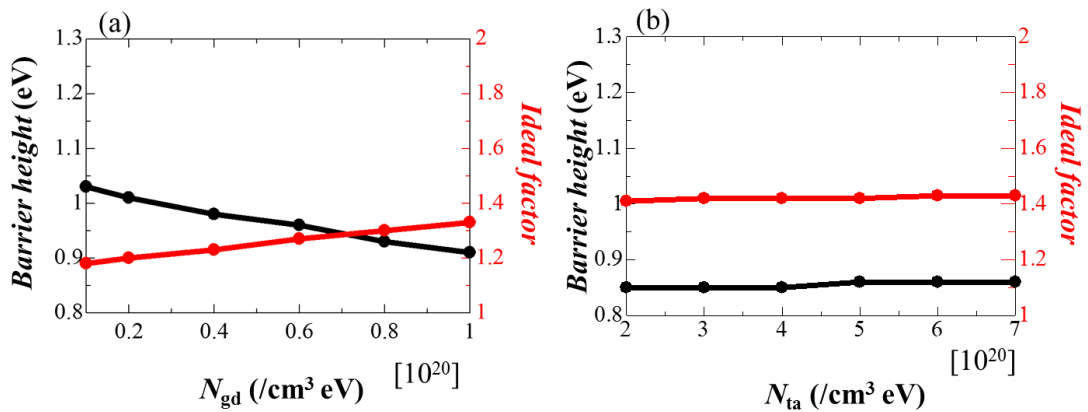


図 3.9 各欠陥濃度が障壁高さと理想因子に与える影響

(a) シャロードナー濃度が与える影響

(b) アクセプタ濃度が与える影響

3.4.5 改善したショットキーダイオード特性の再現結果

シャロードナーやアクセプタがショットキーダイオード特性に与える影響からこれらの欠陥密度を減少する必要があるといえる。そこで IGZO の電子親和力は実験値を入れ、更にショットキーダイオード特性が再現できるように N_{ta} や N_{gd} を減少した。それぞれの再現結果を図 3.10 に示す。更にショットキーダイオード特性から得られた障壁高さ ϕ_{bn} 、理想因子 n 、順方向電流密度 J_F の実験結果とシミュレーション結果を表 3.5、表 3.6 に示す。順方向電流密度と表 3.5 及び 3.6 で示す評価パラメータの差が実験結果とできる限り小さいものをシミュレーション結果としたため本論文では図 3.10(a)を水素導入 IGZO+150°Cアニールの再現結果、図 3.10(b)を水素未導入 IGZO+300°Cアニールの再現結果とした。これらの実験結果を再現したときの材料物性値を表 3.7 及び表 3.8 に示す。

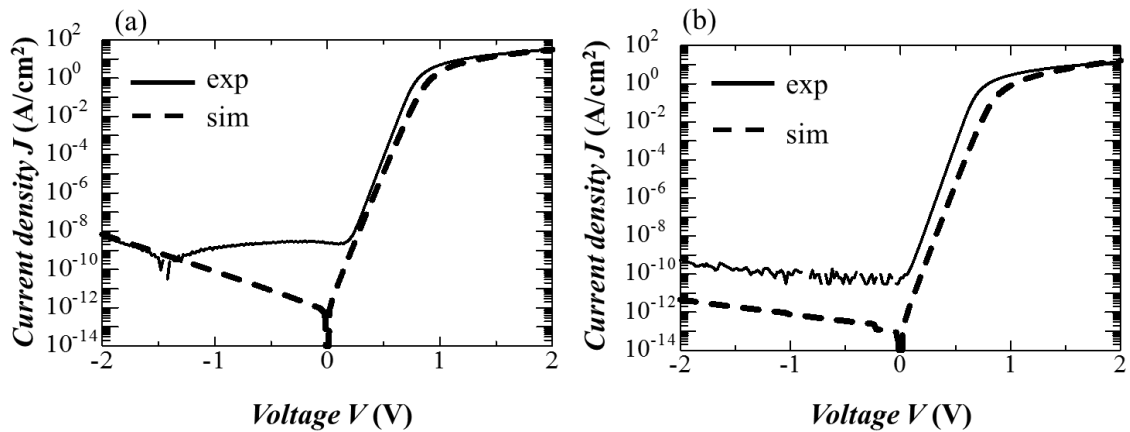


図 3.10 ショットキーダイオード特性の再現結果

(a) R[O₂]=1% R[H₂]=5%, T_a=150°C

(b) R[O₂]=1% R[H₂]=0%, T_a=300°C

表 3.5 水素を導入したショットキーダイオードの評価パラメータ

	exp	sim
障壁高さ ϕ_{bn}	1.08	1.11
理想因子 n	1.14	1.17
順方向電流密度 J_F	32	31

表 3.6 アニール温度が 300°C のショットキーダイオードの評価パラメータ

	exp	sim
障壁高さ ϕ_{bn}	1.13	1.16
理想因子 n	1.14	1.10
順方向電流密度 J_F	14	16

表 3.7 水素を導入したショットキーダイオード特性を再現したときの材料物性値

Symbol	Value	Unit	Description
N_{cc}	1.0×10^{17}	/cm ³	Carrier concentration
Φ_m	5.5	eV	AgxO work function
E_g	3.22	eV	Band gap
μ	12.5	cm ² /Vs	Electron mobility
χ	4.23	eV	Electron affinity
ρ	4.0×10^{-5}	Ωm	AgxO resistivity
N_{ta}	2.8×10^{20}	/cm ³ eV	Peak of tail state acceptor type trap density
W_{ta}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state acceptor type trap density
N_{gd}	5.5×10^{18}	/cm ³ eV	Peak of gaussian state donor type trap density
W_{gd}	0.23	eV	Half bandwidth of gaussian state donor type trap density
E_{gd}	2.98	eV	Energy of N_{gd}
N_{td}	1.0×10^{20}	/cm ³ eV	Peak of tail state donor type trap density
W_{td}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state donor type trap density
N_{ga}	1.0×10^{16}	/cm ³ eV	Peak of gaussian state acceptor type trap density
E_{ga}	0.3	eV	Energy of N_{ga}
W_{ga}	1	eV	Half bandwidth of gaussian state acceptor type trap density

表 3.8 アニール温度が 300°C のショットキーダイオード特性を再現したときの材料物性値

Symbol	Value	Unit	Description
N_{CC}	5.5×10^{16}	/cm ³	Carrier concentration
Φ_m	5.5	eV	AgxO work function
E_g	3.09	eV	Band gap
μ	12.5	cm ² /Vs	Electron mobility
χ	4.27	eV	Electron affinity
ρ	4.0×10^{-5}	Ωm	AgxO resistivity
N_{ta}	1.4×10^{20}	/cm ³ eV	Peak of tail state acceptor type trap density
W_{ta}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state acceptor type trap density
N_{gd}	1.5×10^{18}	/cm ³ eV	Peak of gaussian state donor type trap density
W_{gd}	0.23	eV	Half bandwidth of gaussian state donor type trap density
E_{gd}	2.85	eV	Energy of N_{gd}
N_{td}	1.0×10^{20}	/cm ³ eV	Peak of tail state donor type trap density
W_{td}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state donor type trap density
N_{ga}	1.0×10^{16}	/cm ³ eV	Peak of gaussian state acceptor type trap density
E_{ga}	0.3	eV	Energy of N_{ga}
W_{ga}	1	eV	Half bandwidth of gaussian state acceptor type trap density

3.4.6 IGZO 成膜時の水素導入及び IGZO 成膜後のアニール温度の増大の効果

水素導入 IGZO+150°Cアニール又は水素未導入 IGZO+300°Cアニール処理でショットキーダイオード特性が改善し、それをデバイスシミュレーションにて再現した。それぞれの DOS の変化を図 3.11 に示す。

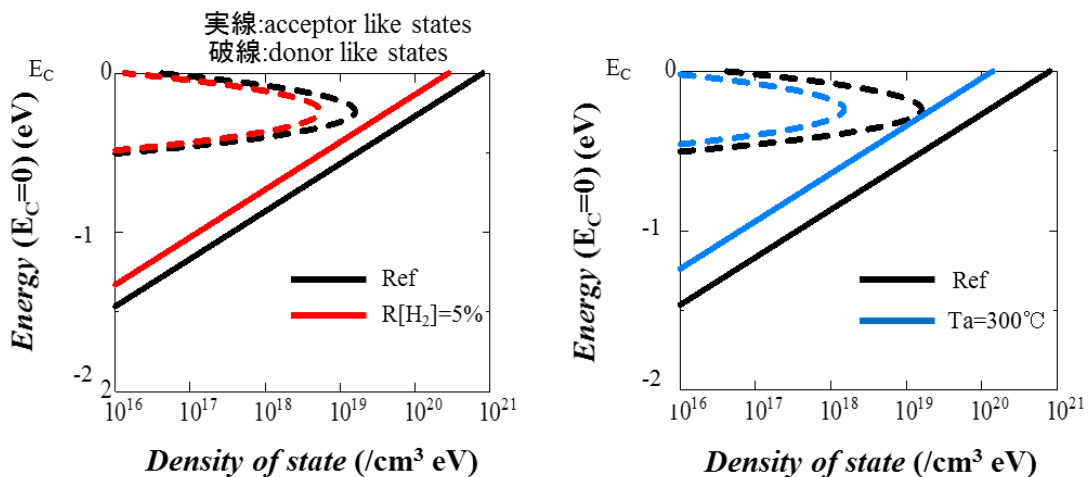


図 3.11 ショットキーダイオード特性を再現したときの DOS の変化

(a) R[O₂]=1% R[H₂]=5%, T_a=150°C

(b) R[O₂]=1% R[H₂]=0%, T_a=300°C

また欠陥密度の減少率を表 3.9 に示す。IGZO 成膜時の水素を導入することでアクセプタ及びドナーは 65%ほどの減少を見せた。成膜後のアニール温度を 300°C にすることでアクセプタは 82%、ドナーは 90%減少した。これらの結果から水素導入 IGZO+150°Cアニールは水素未導入 IGZO+300°Cアニールすることに及ばないが、150°Cの低温においても欠陥密度を減少し、ショットキーダイオード特性を改善するといえる。

表 3.9 IGZO の欠陥密度の減少率

	水素導入IGZO	300°CアニールIGZO
N_{ta} (アクセプタ)	-65%	-82%
N_{gd} (ドナー)	-66%	-90%

3.5 まとめ

得られたショットキーダイオード特性をデバイスシミュレーションで再現し、得られた知見についてまとめる。

① 実験結果

実験結果ではショットキーダイオード特性が改善したのは電子親和力が減少したことが示唆された。そこでデバイスシミュレーションで Ref の再現結果から電子親和力を変化した。電子親和力が減少することで障壁高さは増大したが、シミュレーション結果は実験結果と比較して逆方向電流が高い。ショットキーダイオード特性の改善は障壁高さだけでは説明できない。

② シミュレーション結果

IGZO の伝導帯近傍の欠陥密度を Ref のシミュレーションから減少した。このとき、シャロードナーは順方向電流密度、逆方向電流密度、障壁高さ、理想因子に影響を与える。一方でアクセプタは順方向電流密度にのみ大きな影響を与え、他の要素にはほとんど影響を与えないことが分かった。これらの結果から電子親和力に加えて欠陥密度の減少を試みることで実験結果が再現できた。SDs 特性の改善は電子親和力と欠陥密度の減少が主要因であることを明らかにした。

3.6 参考文献

- [1] Toshio Kamiya et al. "Material characteristics and applications of transparent amorphous oxide semiconductors" NPG Asia Mater. 2(1) 15–22 (2010)

- [2] Kenji Nomura et al. “Origins of threshold voltage shifts in room temperature deposited and annealed a-In-Ga-Zn-O thin-film transistors” *Appl. Phys. Lett.* **95**, 013502 (2009)
- [3] Yutomo Kikuchi et al. “Device characteristics improvement of a-In-Ga-Zn-O TFTs by low-temperature annealing” *Thin Solid Films* **518** (2010) 3017–3021
- [4] Shunho Jeong et al. “Role of Gallium Doping in Dramatically Lowering Amorphous-Oxide Processing Temperatures for Solution-Derived Indium Zinc Oxide Thin-Film Transistors” *Adv. Mater.* **2010**, *22*, 1346–1350
- [5] Ayumu Sato et al. “Amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistor with coplanar homojunction structure” *Thin Solid Films* **518** (2009) 1309–1313
- [6] T. Kamiya, K. Nomura, and H. Hosono, “Origins of high mobility and low operation voltage of amorphous oxide TFTs: electronic structure, electron transport, defects and doping”, *J. Display Technol.*, **5** (2009) 273.
- [7] T. Kamiya, K. Nomura, and H. Hosono, “Subgap states, doping and defect formation energies in amorphous oxide semiconductor a-InGaZnO₄ studied by density functional theory”, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **207** (2010) 1698.
- [8] Y. Hanyu *et al.*, “Hydrogen passivation of electron trap in amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors”, *Appl. Phys. Lett.*, **103** (2013) 202114
- [9] M. Houssa et al. “Trap-assisted tunneling in high permittivity gate dielectric stacks”, *Journal of Applied Physics* **87**, 8615 (2000)

第4章 デバイスシミュレーションを用いた金属半導体電界効果トランジスタ(MES-FET)の電流-電圧特性の研究

4.1 はじめに

3章まではデバイスシミュレーションを用いてショットキーダイオード特性の解析について報告した。本章ではショットキー障壁を利用したトランジスタである金属半導体電界効果トランジスタ(Metal Semiconductor Field Effect Transistor, MES-FET)の伝達特性をデバイスシミュレーションにて調査した。

4.2 MES-FET の特徴

先に述べたがMES-FETはショットキー障壁をゲートに利用したトランジスタである。従来、研究されている薄膜トランジスタ(Thin Film Transistor, TFT)は金属絶縁体半導体電界効果トランジスタ(Metal Insulator Semiconductor Field Effect Transistor, MIS-FET)である。MIS-FETは金属と半導体の間に絶縁膜を挟んだ構造となっている。一方でMES-FETは金属と半導体を直接接合した構造をしている。図4.1にMIS-FETとMES-FETの断面図を示す。

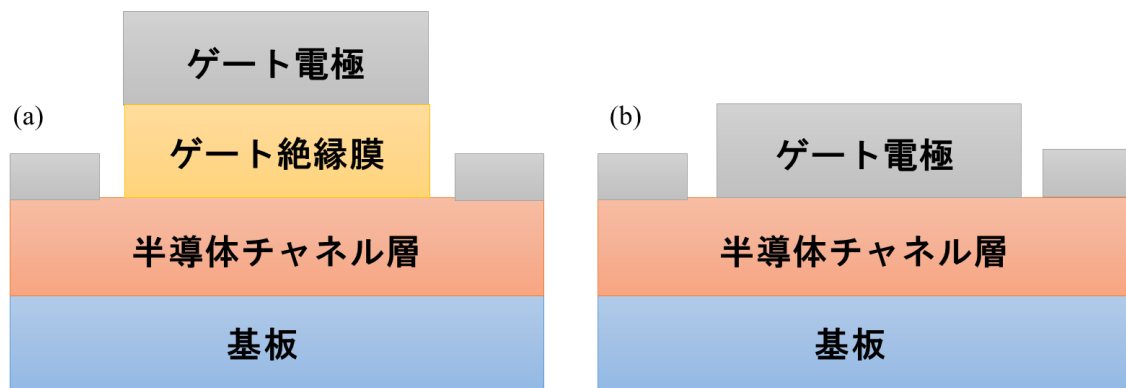


図 4.1 (a)MIS-FET と(b)MES-FET の構造

MES-FETの動作原理について述べる。MES-FETは金属と半導体を直接接合してショットキー接合を形成しており空乏層が形成される。2章で述べたように逆バイアス印加時は金属/半導体界面に空乏層が形成される。ドレイン電極に電圧を印加するとソース-ドレイン間に電位差が生じてソース電極からドレイン電極へ電子が輸送される。しかし、ゲート電極に逆バイアス印加時は空乏層がIGZO全体に形成されており、電子が通れず電流が流れないオフ状態になる。順バイアスを印加することで空乏層幅が狭まり空乏層の下にあるバルク

が導電路となりトランジスタのオンとなる。MES-FET のスイッチング動作を図 4.2 に示す。

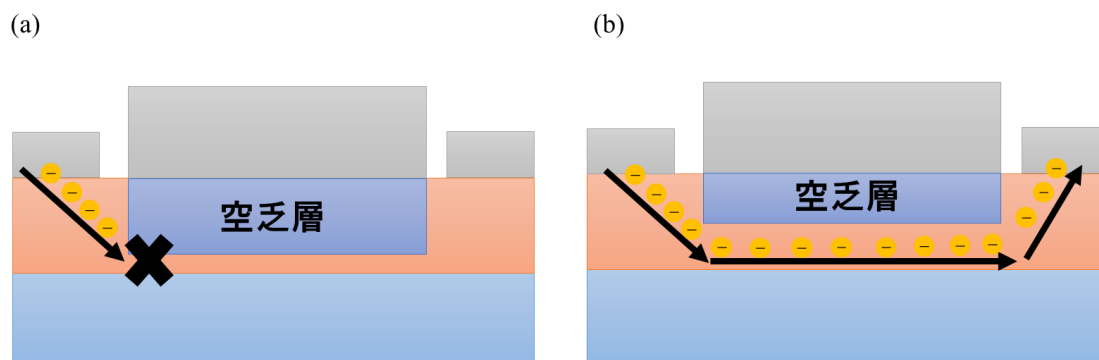


図 4.2 MES-FET のスイッチング状態
(a)オフ状態 (b)オン状態

MES-FET は絶縁膜を必要としないために作製プロセスの低温化に期待できる。他に動作電圧が低い。作製プロセスが比較的簡単など、MIS-FET に比較して様々な利点がある。一方で良好なショットキー接合が形成されないとき、ゲート電極からリーク電流が流れやすい欠点もある。3章までで述べたショットキーダイオード特性を解析し、良好なショットキー障壁を作製することが重要である。

4.3 MES-FET

4.3.1 MES-FET の研究について

本研究室では主に MES-FET の研究を行っていた。前節で述べた通り、MES-FET はショットキー接合が重要であり、ショットキーダイオードの特性解析が必要である。3章まではデバイスシミュレーションにて IGZO の欠陥密度がショットキーダイオード特性に与える影響を調べた。引き続きデバイスシミュレーションを用いて MES-FET の特性も検討した。

4.3.2 実験方法

MES-FET 特性で特に安定性がなかったことは閾値電圧とオフ電流の制御である。同条件で作製したが、閾値電圧やオフ電流に再現がない結果を図 4.3 に示す。

閾値電圧や空乏層幅はショットキー接合によって IGZO/ Ag_xO 界面に形成される空乏層幅によって決まる。

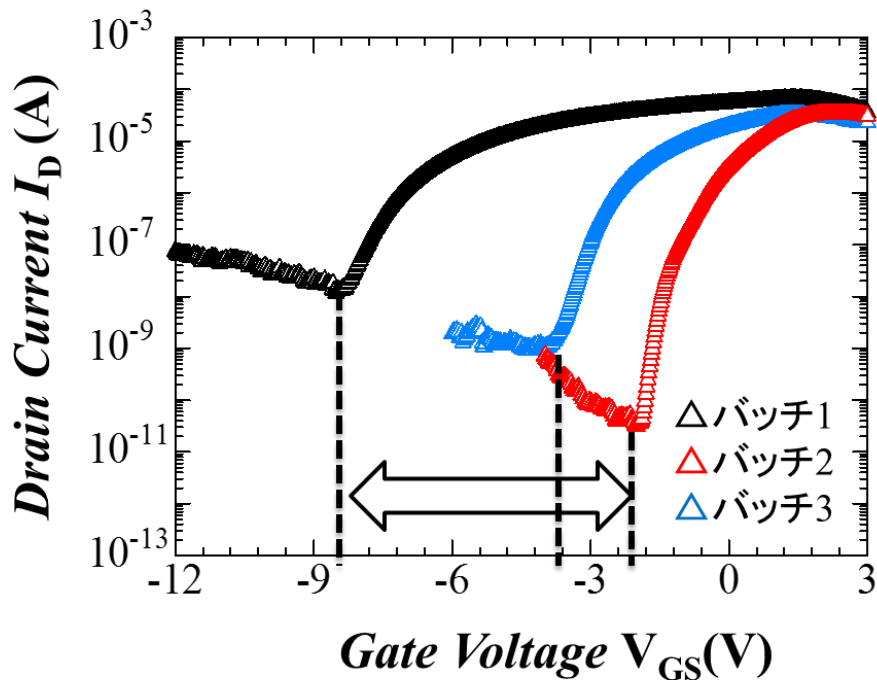


図 4.3 同条件下の MES-FET 特性

$V < 0V$ の時に空乏層幅 W が IGZO の膜厚 t よりも狭くなると、電子は空乏層の下を通り、ドレイン電極には $+3V$ の電圧を印加しているため、空乏層の下を電子が流れ始める。同様にオフ電流に置いても $V < 0V$ で $W \ll t$ となれば、電子が通る導電路が広がるため、多くの電子がドレイン電極へと流れ出て、ドレイン電流が増大する。MES-FET 特性は空乏層幅による影響を強く受けると考えられる。

よって空乏層幅が MES-FET 特性に与える影響を調査する。2 章で述べたが、ガウスドナー型欠陥密度の増加によって同じ大きさの電圧を印加したときの空乏層幅が狭くなる。よってガウスドナー型欠陥密度が MES-FET 特性に与える影響を調査した。このとき標準の材料物性値を表 4.1 に示す。

図 4.4 にガウスドナー型欠陥密度 N_{gd} が MES-FET 特性に与える影響を示す。 N_{gd} が低いときはオフ電流が低いが、 3×10^{18} にすることでオフ電流が 6 桁ほど増大し、閾値電圧はより負シフトした。空乏層幅はドナー濃度に反比例しており、ドナー濃度が増大することで IGZO/Ag_xO 界面の空乏層幅が狭くなった。オフ電流は空乏層幅が狭くなったため、トンネル減少によって電子が空乏層を通り抜けてドレイン電極に流れ、ドレイン電流が増大したと考えられる。閾値電圧の負シフトはドナー濃度を増大することで同じ電圧を印加したとしても空乏層幅がより狭くなり、その下を導電路として電子が通ることができ、立ち上がる電圧がより負側にシフトしたと考えられる。

表 4.1 シミュレーションの材料物性値

Symbol	Value	Unit	Description
N_{cc}	1×10^{17}	/cm ³	Carrier concentration
Φ_m	5.45	eV	AgxO work function
E_g	3.22	eV	Band gap
μ	12.5	cm ² /Vs	Electron mobility
χ	4.23	eV	Electron affinity
ρ	4.0×10^{-5}	Ωm	AgxO resistivity
N_{ta}	1.5×10^{20}	/cm ³ eV	Peak of tail state acceptor type trap density
W_{ta}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state acceptor type trap density
N_{gd}	3×10^{18}	/cm ³ eV	Peak of gaussian state donor type trap density
W_{gd}	0.23	eV	Half bandwidth of gaussian state donor type trap density
E_{gd}	3	eV	Energy of N_{gd}
N_{td}	1.0×10^{20}	/cm ³ eV	Peak of tail state donor type trap density
W_{td}	0.09	eV	Half bandwidth of tail state donor type trap density
N_{ga}	1.0×10^{16}	/cm ³ eV	Peak of gaussian state acceptor type trap density
E_{ga}	0.3	eV	Energy of N_{ga}
W_{ga}	1	eV	Half bandwidth of gaussian state acceptor type trap density

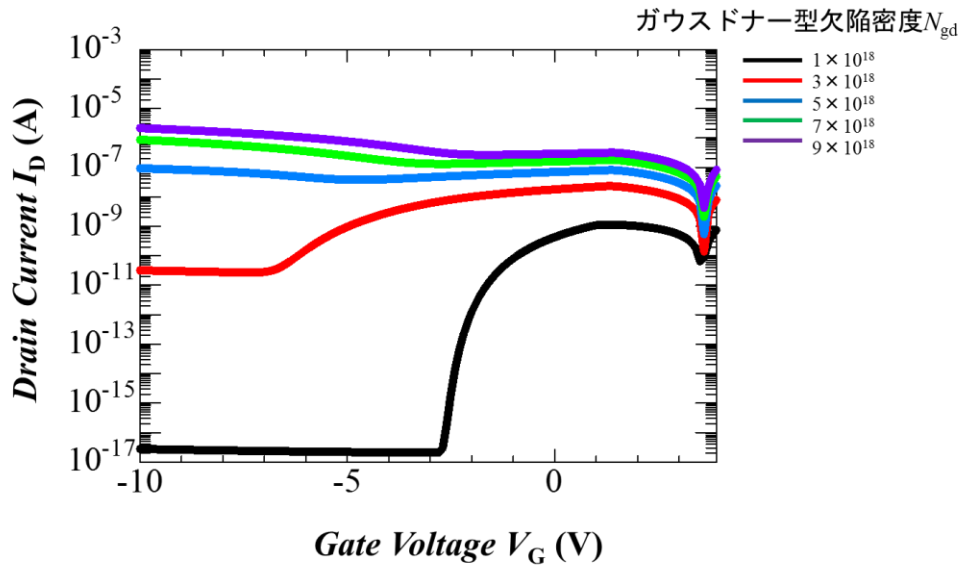


図 4.4 ガウスドナー型欠陥密度が MES-FET 特性に与える影響

次に MES-FET のソース-ゲート間距離が MES-FET の伝達特性に与える影響を検討した。正確にパターンが形成された場合、ソース-ゲート間距離は $7\mu m$ となる。これは本研究で用いているマスクが $7\mu m$ になっているためである。しかし、リソグラフィーを手動でやっていることから場合によってゲート電極がソース側もしくはドレイン側へとずれることもあると考えられる。そこでデバイスシミュレーションで、MES-FET の構造を簡単に変化させて MES-FET の伝達特性を予測できる。そのため、MES-FET のゲートソース間距離を短くして

ゲートソース間距離がMES-FETの伝達特性に与える影響を検討した。

、 図 4.4 にソース-ゲート間距離がMES-FETの伝達特性に与える影響を示す。最初、ソース-ゲート間距離がオフ電流密度に影響していると考えて高いオフ電流を示した $N_{gd}=3 \times 10^{18}$ を標準条件として、ソース-ゲート間距離を変化した。このときメッシュも同時に変化している。メッシュが変化するのはデバイスシミュレーションを行うためにIGZO/Ag_xO界面にメッシュを定義する必要があるためである。しかし、IGZO/Ag_xO界面のy軸方向のメッシュは変化していないため、その影響はほとんどないと考えられる。ソースゲート間の距離はMES-FETの伝達特性に大きく影響を与えないと考えられる。

MES-FET特性の $V_g=+3V$ 辺りからドレイン電流が一度減少してから再び増大している。この変化はドレイン電圧 $V_d=+3V$ の電圧を印加しているが $V_g>3V$ のとき初めて $V_g>V_d$ となりドレイン電極からゲート電極に電子が流れているためであると考えられる。

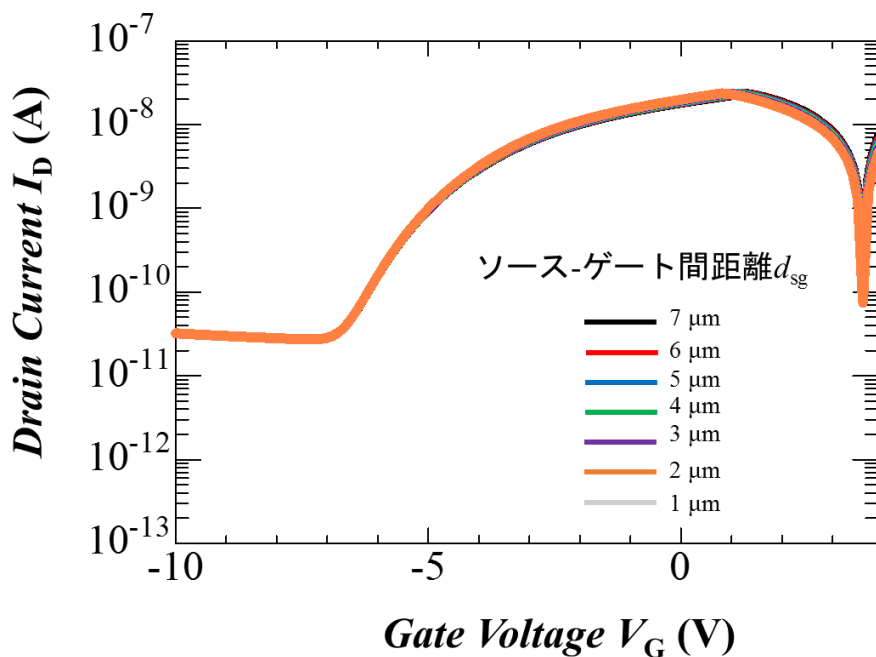


図 4.5 ソース-ゲート間距離がMES-FET特性に与える影響

4.3.2 まとめ

MES-FET はガウストナー型欠陥密度の影響を大きく受けることが分かった。ガウストナー型欠陥密度が増大することでショットキーダイオード特性はショットキー界面に形成される空乏層幅が狭まることが分かっている。MES-FET は空乏層幅の下のバルクを導電路としているため空乏層幅は閾値電圧にも影響を与える。また、ゲート電極から半導体へ流れるトンネル電流も考慮に入れるとオフ電流も大きく増大する。MES-FET 特性を安定化するためにはショットキー界面に形成される空乏層幅を安定させることが重要であるといえる。

次にパターン形成を毎回手動でやっていることからソース-ゲート間の距離が変化することで MES-FET 特性に影響を与えると考えたが、大きな変化はなかった。電子が流れるまでの距離が $1\mu\text{m}$ - $6\mu\text{m}$ の間で変化するだけでは MES-FET の伝達特性に影響を与えないことが明らかになった。

第5章 総括

総括と展望

本研究で得られた知見を総括したものをここに示す。

第2章

IGZO と Ag_xO の材料物性値を変化し、ショットキーダイオード特性に与える影響を検討した。IGZO はバンドギャップ内に存在する欠陥準位がショットキーダイオード特性に与える影響も調査した。

IGZO のキャリア濃度、ガウスドナー型欠陥密度、電子親和力、 Ag_xO の仕事関数はショットキーダイオード特性の逆方向電流密度に大きな影響を与える。一方、IGZO の電子移動度とテールアクセプタ型欠陥密度は順方向電流密度にのみ影響を与え、逆方向電流密度には影響しないことが明らかになった。

第3章

本節では実際に得られたショットキーダイオードの解析を行った。IGZO は一般的な $\text{Ar}+\text{O}_2$ 混合ガス及び IGZO 成膜後に 150°C のアニール処理を行ったところ、逆方向電流密度が高い。一方で IGZO 成膜時に $\text{Ar}+\text{O}_2+\text{H}_2$ 混合ガスで成膜した 150°C アニール IGZO をショットキーダイオードの活性層に用いることでショットキーダイオード特性が改善した。また、 $\text{Ar}+\text{O}_2$ 混合ガスで IGZO を成膜してアニール温度を 300°C に増大することでもショットキーダイオード特性が改善した。改善した原因を調査するためのデバイスシミュレーションを用いた。

本研究で得られた 3 サンプルのショットキーダイオード特性をデバイスシミュレーションで再現した。水素未導入 IGZO+ 150°C アニールでは欠陥密度が高く逆方向電流密度が高い。水素導入 IGZO+ 150°C アニール又は、水素未導入 IGZO+ 300°C アニールのショットキーダイオード特性をデバイスシミュレーションで再現した結果、伝導帯近傍の欠陥密度が減少していることが明らかになった。

また水素導入 IGZO+ 150°C アニールは水素未導入 IGZO+ 300°C アニールに及ばないものの水素未導入+ 300°C アニールに近い欠陥密度の減少が見られた。

第4章

本節では MES-FET の特性解析を行った。MES-FET に関してはガウスドナー型欠陥密度とソース-ゲート間距離が MES-FET の伝達特性に与える影響を検討した。

ショットキーダイオード特性でガウスドナー型欠陥密度がショットキー界面の空乏層幅

に影響を与えるため、MES-FET の伝達特性もガウストナー型欠陥密度を増大した。その結果、伝達特性の閾値電圧やオフ電流が大きく増大した。空乏層幅の変化だけで MES-FET の伝達特性は大きく変化し、空乏層幅に影響を与えるガウストナー型欠陥密度は MES-FET 特性に大きな影響を与える。また、MES-FET のソース-ゲート間距離は MES-FET 特性にほとんど影響を及ぼさない。実際に MES-FET を作製し、パターンがずれていても MES-FET 特性には影響しない。

MES-FET は IGZO のガウストナー型欠陥密度が 10^{18} を超えたとき、大きく変化し閾値電圧の負シフトやオフ電流の増大に繋がるため、IGZO のガウストナー型欠陥密度を同程度にすることが MES-FET 特性を再現するために必要なことといえる。

研究業績

国内学会発表

[1]濱田賢一郎、曲勇作、是友大地、増田健太郎、古田守”デバイスシミュレーションによるInGaZnO/Ag_xO 接合型ショットキーダイオードの特性解析”第66回応用物理学会春季学術講演会,東京工業大学,大岡山キャンパス,2019年3月(ポスター)

謝辞

本研究室に配属されてから現在までの 3 年間で高知工科大学、古田守教授には多大なご指導を賜りました。研究室に配属され、今までの人生で経験したことの無いことをする機会を多く与えていただきました。私自身、至らない点が多くありますが、本研究室に配属され大きく成長できたと感じております。ここで私に培われたものは今後の人生にも大きく貢献すると思っています。3 年間、ご指導くださったことに深く感謝申し上げます。

高知工科大学クリーンルーム維持・管理担当の小松一郎様には装置のメンテナンス等の際にお世話になりました。実験が不自由なく行えたことに感謝致します。

SILVACO Japan 安部勝美様にはショットキーダイオードのデバイスシミュレーションのモデルを提案いただきました。研究を進めるためのご助言ありがとうございました。

古田研究室の皆様とはともに議論し、苦楽を共に過ごした期間はともに人生の中で貴重な時間であったと考えています。

本研究室在籍の博士課程、S.G. Mehadi Aman 氏、是友大地氏、曲勇作氏には研究においてご指導ご助言を頂きました。多大な迷惑を掛けましたが、いつでも優しく接して頂き、誠にありがとうございました。

本論文でまとめたショットキーダイオードや MES-FET の研究に関して、高知工科大学博士課程の曲勇作氏、是友大地氏、元本研究室在籍の橋本慎輔氏、学部 4 年生の増田健太郎氏にご助力及び討論致しました。ここに感謝の意を示します。

また本研究室配属時からともに研究を続けてきた同期の門田堯之氏、東龍之介氏、広田裕也氏とはともに成長し合える良い関係であったことに感謝致します。

最後になりますが、古田守教授および古田守研究室の皆様、多くの方々に支えられました。重ねてここで皆様に心より深く感謝申し上げます。