

ZnO 単結晶の極性面と金 (Au) との接触による電気的特性

山下 誠*・坂上 登

Electrical Properties by A Gold (Au) Metal Contact with Polar Faces of ZnO Single Crystals

Makoto YAMASHITA* and Noboru SAKAGAMI

(1999年11月30日受理)

There is currently great interest in ZnO for a variety of electronic and optical application. Growth of large high quality single crystals of ZnO is important not only basic studies but also for the application. On such a viewpoint we have grown bulk ZnO crystals by hydrothermal method and studied their electrical properties.

Several seeds and sintered ZnO nutrient together of a mixture of KOH, LiOH and H₂O₂ aqueous solution were put into a Pt lining tube. It was sealed and put in an autoclave to hold at 400°C and 1000 atm. As-grown crystals were obtained about 10 mm in dimension after 2 weeks, and surrounded by (0001), (10 $\bar{1}$ 1), (10 $\bar{1}$ 0), (10 $\bar{1}$ $\bar{1}$) and (000 $\bar{1}$) faces. They were transparent and pale yellow in color. The colors almost disappeared when the crystals were grown in an oxygen rich condition. This suggests that these colors originate in the oxygen deficiency in the crystal and that oxygen rich condition compensates the deficiency.

On the basic of the Schottky barrier model, the electrical properties of the crystals were studied by a Au metal contact with a polar face on growth sectors, i.e. the +c, m and -c sector. Variation of $I-V$ and I/C^2-V characteristics was observed in the polar face on their sectors. In the -c (000 $\bar{1}$) face (O-face) on the -c sector, strong rectifying action was observed with the $I-V$ curve, while by the I/C^2-V characteristics, the depletion layer distance (d) and donor concentration (N_D) were estimated about 0.1 μm and from 10^{18} to 10^{19} cm^{-3} , respectively. In the +c (0001) face (Zn-face) on all sectors, the $I-V$ curves indicated weak rectifying action or nearly ohmic characteristics. In (0001) face on the +c sector and the m sector the I/C^2-V almost indicated nonlinear characteristics, and the d and N_D were estimated from 0.3 to 0.6 μm and about 10^{17} cm^{-3} , respectively.

These electrical properties are related to above the three growth sectors and explained in terms of the surface species. The Zn surface tend to form a metallic face during crystal growth and so that the Au contact with this surface make for ohmic conduction. The O surface, on the other hand, tend to induce the intrinsic defects such as O vacancies, and rectifying characteristics is the strongest. In the (10 $\bar{1}$ 0) faces, where both Zn and O are facing to the growth surface, the electrical characteristics are intermediate among these three sectors. Similar dependence on the growth sectors was observed in chemical etching patterns.

1. まえがき

ZnO は、六方晶系のウルツ鉱型構造をもつII-VI

族化合物半導体であり、バンドギャップは3.3 eV と広く、その化学組成が Zn 過剰であるため、n 形半導体の伝導性を示している。また、その結晶構造 (6 mm) から圧電体としても注目され、粉体、薄膜、焼結体などはその物性の応用が検討されている重要な

* 秋田高専専攻科学生

ZnO 単結晶の極性面と金 (Au) との接触による電気的特性

電子材料となっている。しかし、多結晶の場合一般的にその物性値が単結晶と異なる場合が見られ、IC等の電子部品の集積技術の発達により、均一で高純度な単結晶とその物性値の確定が必要とされている。

以前より人工水晶の育成にも用いられている方法で、ZnO単結晶の水熱育成法が試みられている。育成溶媒にアルカリ溶液のみを用いた場合、その育成環境が還元性雰囲気になるため、育成された単結晶は黄色味を帯び、Zn原子の過剰量は数十ppm程度の値で検出され、電気抵抗値は $10^0 \sim 10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ を示した^{1),2)}。そこで育成環境を酸素雰囲気にするため、育成溶媒に酸素発生剤として H_2O_2 を添加してZnO単結晶の高純度化を試み、同時に Li^+ イオンをドーピングして育成を行ったところ、Zn原子の過剰量は数ppm~数十ppmで、抵抗値が $10^2 \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ の単結晶を得ることが出来た^{3),4)}。

本研究では、半導体と金属との接触における電気的特性の概要を述べ、育成実験で得られた高純度ZnO単結晶について、以下に示す実験を行い、その電気的特性から結晶性について評価した。

- (1) 育成方法および結晶の概要
- (2) 極性面のエッチピット観察
- (3) 極性面とAuとの接触における電気的特性の測定、評価

2. 半導体と金属との接触の電気的特性⁵⁾

一般に、半導体と金属が接触するとショットキー接触となり、その順方向電流密度 J の理論式は、

$$J = J_0 e^{qV/kT} \quad (1)$$

となる。しかし実際には、印加電圧に対する電流密度の増加の割合は(1)式よりも小さい。そこで理想係数 n を用いて、

$$J = J_0 e^{qV/nkT} \quad (2)$$

という実験式が用いられている。ここで $n = 1$ ならば(2)式は(1)式と一致し、ショットキーの理論通り電流が流れていることになるが、通常は $n > 1$ となることが多く、本研究のZnO単結晶の場合でも殆どが $n > 1$ となり、 $n = \infty$ ならば、 $J = J_0$ となり、 V - I 特性は直線となり、オーミック接触となる。

図1.(a)は電流値が印加電圧に対して片対数で示されている I - V 特性である。このグラフの直線の傾き S は次式で与えられる。

$$S = \Delta(\log_{10} I) / \Delta V = q \log_{10} e / nkT \quad (3)$$

q : 電子の電荷 $1.6022 \times 10^{-19} [\text{C}]$

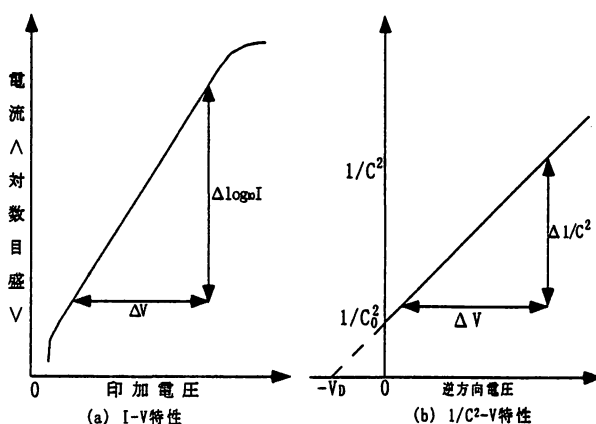


図1. 定性的な電気的特性図

k : ボルツマン定数 $1.38 \times 10^{-23} [\text{J/K}]$

T : 絶対温度 $300 [\text{K}]$

この(3)式から、理想係数 n を求めて、その n の値を整流特性の評価に用いた。

接触によって生じる空乏層幅 d は、 N_D をドナー密度とし、

$$d = (2\epsilon_0\epsilon_s(V_D + V) / qN_D)^{1/2} \quad (4)$$

ϵ_0 : 真空の誘電率 $8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}]$

ϵ_s : 半導体比誘電率 (ZnO単結晶: $\epsilon_s \approx 10$)

で与えられ、空乏層中の全電荷を $Q = qN_D d$ とすると空乏層容量 C は、

$$C = dQ/dV = (q\epsilon_0\epsilon_s N_D / 2(V_D + V))^{1/2} \quad (5)$$

となり、この(5)式から $1/C^2$ を計算すると、

$$1/C^2 = 2(V_D + V) / q\epsilon_0\epsilon_s N_D \quad (6)$$

となり、 $1/C^2$ は V に対して直線的に変化する。図1.(b)はこれを図示したもので、直線の外挿が電圧軸と交わる $1/C^2 = 0$ となる点の電圧から接触電位 V_D の値が得られる。この直線の傾きは $2/(q\epsilon_0\epsilon_s N_D)$ であり、傾きから N_D の値が算出できる。単位面積当たりの容量 C を平行平板キャパシタと同様に $C = \epsilon_0\epsilon_s/d$ とすると、(4)式を用いて、

$$C = \epsilon_0\epsilon_s/d = (q\epsilon_0\epsilon_s N_D / 2(V_D + V))^{1/2} \quad (7)$$

となり、これは(5)式と同じである。これより図1.(b)から $V = 0$ のときの容量を C_0 とすると、実際の空乏層幅 d は次式で与えられる。

$$d = \epsilon_0\epsilon_s A / C_0 \quad (8)$$

A : 接触金属の面積 $[\text{m}^2]$

3. 実験方法及び結果

3.1 育成方法および結晶の概要

3.1.1 育成方法³⁾

水熱育成法は、水の存在下 100°C 以上の高温、高圧

の反応環境の下で育成させる方法である。育成装置に用いたオートクレーブの断面図を図2.に示す。

オートクレーブの中にはライニング管を設置した。これは酸素発生剤 H_2O_2 を添加した際、化学的に安定で、オートクレーブの内壁の酸化を防ぎ、オートクレーブより溶失する Fe 分の混入を防止する目的で白金 (Pt) で製作した。

ライニング管内は、対流制御板を境にして、下部は高温で原料を溶かす溶解部、上部は下部より約 $10^\circ C$ 低温で種結晶を白金で吊り下げた育成部に分かれている。育成溶媒はアルカリ溶液を用い、酸素発生剤として H_2O_2 を添加し溶接によって密封した。

ライニング管外壁とオートクレーブ内壁間には、ライニング管内外の圧力を一定に保つために充填量

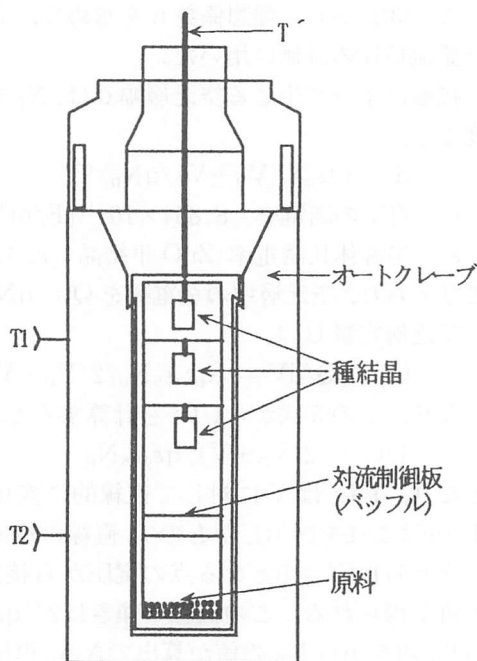
の水を入れている。

3.1.2 育成条件

表1.に高純度 ZnO 単結晶の育成条件を示す。ここで育成に用いる原料は、Merck 製 ZnO 試薬を加圧成形し、 $1100^\circ C$ で24時間焼結したものを $1\sim 3$ mm 程度の粒状態に粉碎したものをを用いている。

3.1.3 育成結晶

表1.の条件で実際に育成した ZnO 単結晶を図3.の写真に示す。図からも判るとおり ZnO 単結晶は縦軸方向の c 軸方向に強い極性をもった形態をしている。図4.はこの単結晶を模式的に表したもので



T1, T2: 上部、下部制御用温度計
T: 育成溶液温度モニター用温度計

図2. オートクレーブ断面図

表1. 高純度 ZnO 単結晶の育成条件

育成温度	370~415 °C
温度差	~10 °C
圧力	700~1000kg/cm ²
酸素分圧	10~30kg/cm ²
溶媒濃度	KOH 3.0mol+LiOH 1.5mol
酸素発生剤	H ₂ O ₂ 0.25mol/l
原料	ZnO焼結体(1100 °C、24h)
ライニング管	Pt(0.3t)

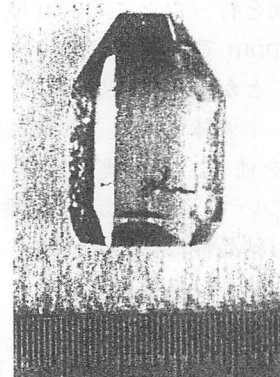


図3. 育成 ZnO 単結晶

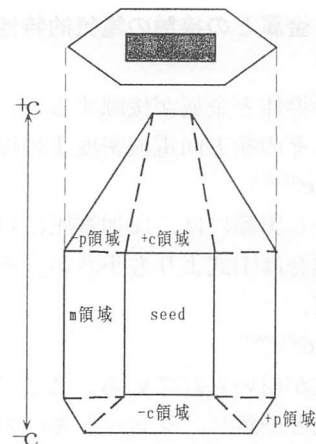


図4. ZnO 単結晶形態の模式図

ある。縦軸方向を c 軸方向とし、種結晶を挟んで上の領域を +c 領域、下の領域を -c 領域といい、種結晶を取り囲むように成長している領域を m 領域とする。

3.2 極性面のエッチピット観察

各領域を c 軸方向に垂直に板状の面に切り出し、

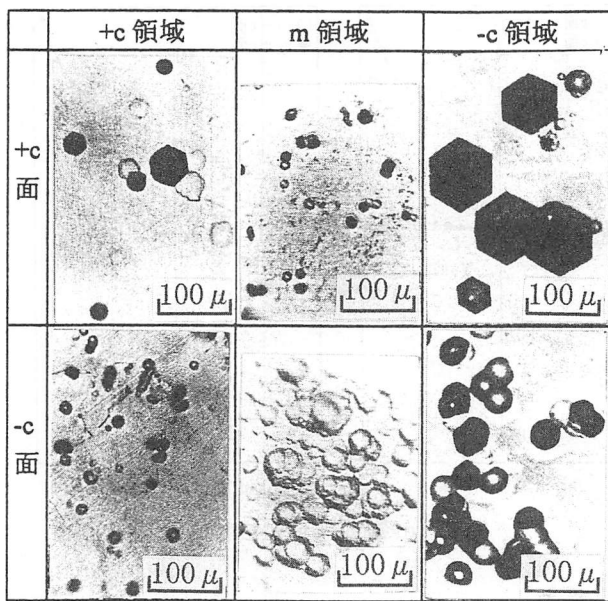


図 5. 成長領域別の極性面に現れたエッチピット

研磨微粉 C #800 によって厚さを約 0.5 mm まで研磨する。更にその表面をダイヤモンドペーストで 6 μm, 3 μm, 1 μm, 1/4 μm の順で研磨して試料とした。次にその試料を化学試薬濃リン酸 (H₃PO₄) でおよそ 5 分間室温でエッチングした。

エッチングした試料の極性面に現れたエッチピットを微分干渉顕微鏡により観察した。図 5. より +c 面 (0001) に現れたエッチピットはシャープな六角形をしており、-c 面 (000 $\bar{1}$) に現れたエッチピットはブロードな六角形の形状をしており、このエッチピットの形状により方位判定をした⁶⁾。またその密度は不均一さはあるが、-c 面が +c 面に比べ、およそ数十倍大きいことが観察された。

3.3 極性面と金 (Au) の接触における電気的特性の測定および評価

3.3.1 測定方法

上述のエッチピットによる極性面の判定の後、図 6. に示す手順に従って、電気的特性の測定用試料を作成した。真空蒸着は 10⁻⁵ Torr 中で試料の目的の極性面に Au を蒸着し、その対向面にオーミック電極 (InGa 合金) を付けたものを測定試料とした。

(1) 電流-電圧特性

直流 I-V 二端子法により、Au 側から ZnO 単結晶側に流れる電流を順方向として、順方向、逆方向電圧を印加したときに流れる電流値を測定した。

(2) 空乏層容量-電圧特性

LCR メーター (HP 4285A) を用いて、周波数を

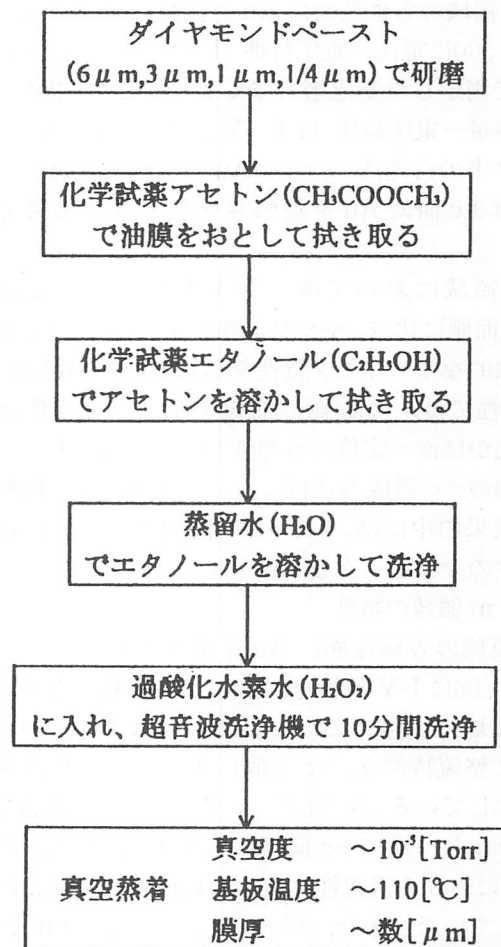


図 6. 測定試料の作成手順

f = 500 [kHz] 一定で、逆方向電圧を印加したときの空乏層容量の変化を測定した。

3.3.2 測定結果

(1) +c 領域の特性

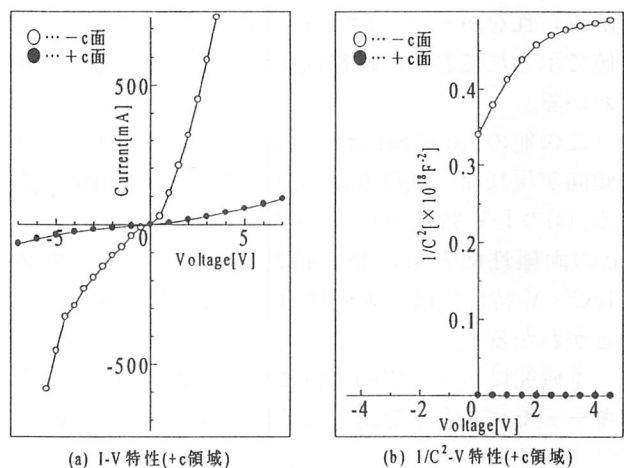


図 7. +c 領域 (+c1) の特性

+c領域の各極性面に Au を接触させたときの例を図 7.(a)に電流—電圧特性 (I-V 特性) を, (b)には実験で測定した空乏層容量 C から $1/C^2$ を求めて空乏層容量—電圧特性 ($1/C^2$ -V 特性) の関係を示す。グラフ中の白丸は -c 面に Au を接触させたとき, 黒丸は +c 面に Au を接触させたときの結果である。

+c領域において(a)の I-V 特性より, -c 面側は +c 面側に比べ, やや整流性が現れ, 逆に +c 面側は直線的なオーミック特性を示している。(b)の $1/C^2$ -V 特性では, -c 面側に曲線を示し, +c 面側はその変化がほぼ一定値で直線性が悪かった。しかし, その他の +c 領域の試料においては(a), (b)と同様な特性結果の中には, +c, -c の両極性面ともにほぼ直線性のオーミックな関係を示している。

(2) m 領域の特性

m 領域の各極性面に Au を接触させたときの例を図 8.(a)に I-V 特性を, (b)に $1/C^2$ -V 特性を示す。

m 領域の試料においては(a)の I-V 特性より -c 面側に整流特性を, +c 面側にオーミック特性を顕著に示している。(b)の $1/C^2$ -V 特性では -c 面側に直線性を示し, 逆に +c 面側は曲線性を示した。特に -c 面における直線性は他の領域に比べて非常によく現れていた。また, 以上の(a), (b)に示す傾向は, 他の m 領域の試料においてもほぼ同様の結果を得ている。

(3) -c 領域の特性

-c 領域の各極性面に Au を接触させたときの例を図 9.(a)に I-V 特性, (b)に $1/C^2$ -V 特性を示す。

(a)の I-V 特性では m 領域と同様, -c 面側に整流特性を示し, +c 面側にオーミック特性を示している。(b)の $1/C^2$ -V 特性からは, -c 面はやや直線的な傾向がみられるが, m 領域のような明らかな直線性はみられなかった。また, +c 面側は図中でほぼ一定値で示されており, 直線性が悪くなっていることがわかる。

この他の -c 領域においては, 図 9. に示すような傾向が現れない試料もあった。その一例が図 10. である。(a)の I-V 特性からは, 図 9. の試料と違い +c, -c の両極性面ともに整流特性を示している。(b)の $1/C^2$ -V 特性では, 両極性面ともに曲線性を示すことがわかる。

本研究における実験試料について 2. のショットキー・モデルより算出した特性値を表 2. に示す。

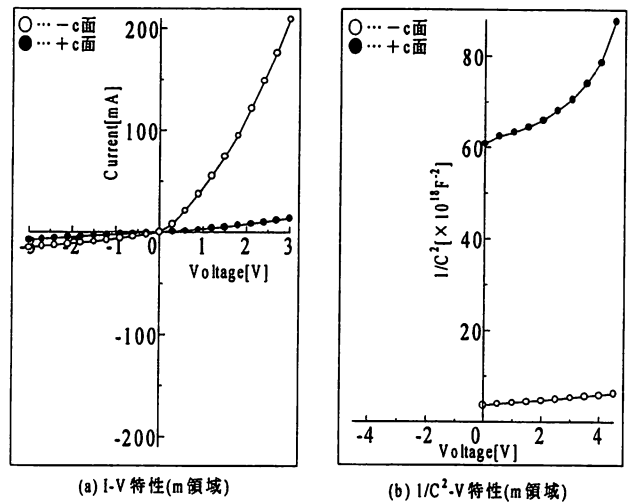


図 8. m 領域 (m3) の特性

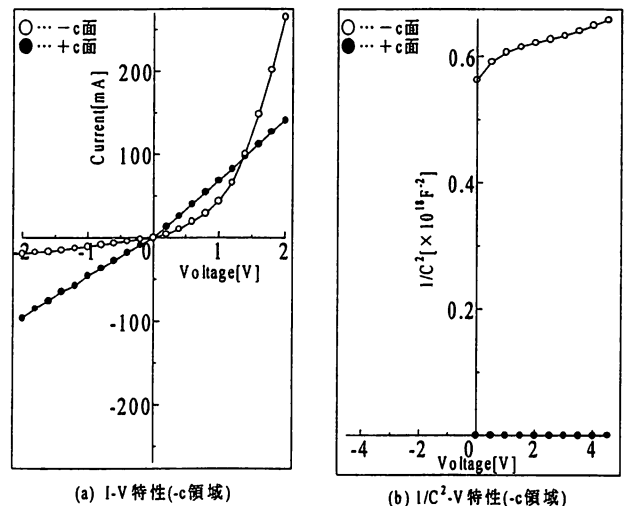


図 9. -c 領域 (-c5) の特性

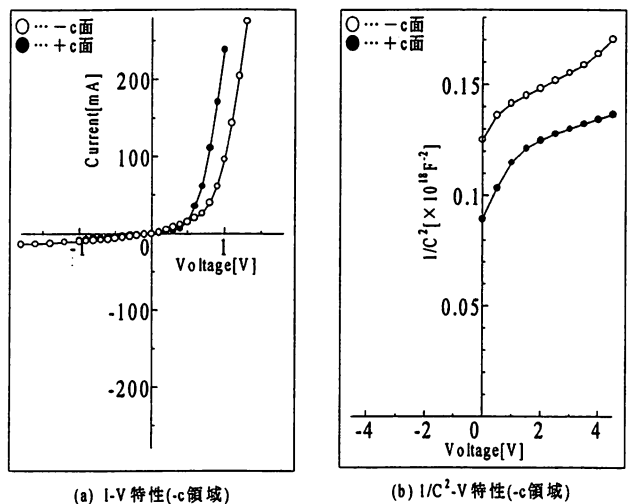


図 10. -c 領域 (-c2) の特性

表 2. 実験結果より求めた特性値

極性面	試料名 (領域)	理想係数 n	空乏層幅 d[μm]	ドナー密度 $N_D[\text{cm}^{-3}]$
+c	+c1	∞	—	$6.73 \times 10^{17} \sim 5.64 \times 10^{17}$
	+c2	∞	—	
	+c3	∞	—	
	m1	∞	—	$9.46 \times 10^{17} \sim 1.96 \times 10^{17}$
	m3	∞	—	$4.87 \times 10^{17} \sim 1.23 \times 10^{17}$
	m4	∞	—	1.55×10^{17}
	m5	∞	—	$4.64 \times 10^{17} \sim 8.57 \times 10^{17}$
	-c1	∞	—	$1.07 \times 10^{18} \sim 3.56 \times 10^{17}$
	-c2	2.31	0.18	$1.23 \times 10^{18} \sim 6.98 \times 10^{17}$
	-c5	∞	—	$2.81 \times 10^{18} \sim 2.36 \times 10^{17}$
-c	+c1	9.9	0.29	$1.41 \times 10^{17} \sim 1.81 \times 10^{17}$
	+c2	∞	—	
	+c3	∞	—	
	m1	12.4	0.25	4.26×10^{17}
	m2	28.5	0.46	2.30×10^{17}
	m3	9.03	0.63	1.62×10^{17}
	m4	9.83	0.62	2.64×10^{17}
	m5	6.38	0.49	9.06×10^{17}
	-c1		21.05	$3.90 \times 10^{18} \sim 6.12 \times 10^{17}$
	-c2	2.49	0.16	8.09×10^{18}
-c3	30.42	2.77	$5.50 \times 10^{18} \sim 1.68 \times 10^{18}$	
-c4	1.63	0.16	3.44×10^{19}	
-c5	5.84	0.32	3.58×10^{18}	

註: N_D は図 12. の A ~ B の値で標記した。

4. 考 察

4.1 理想係数

表 2. の理想係数 n をまとめると次のようになる。

(1) +c 領域において両極性面 (+c, -c 面) とともに $n \approx \infty$ となり, I-V 特性は直線となり, オーミック特性を示した。

(2) m 領域において, +c 面側で $n = \infty$ となるためオーミック特性を示し, -c 面側では $n = 6.38$ (m5), $n = 9.03$ (m3) 等の値から, 整流特性を示した。

(3) -c 領域においては +c 面側に $n = \infty$ (-c1, -c5) と, $n = 2.31$ (-c2), $n = 3.76$ (-c6) の二例を示し, これらの値から整流特性, あるいはオーミック特性の両方の特性を示した。-c 面側では, $n = 1.63$ (-c4), $n = 2.49$ (-c2) 等から整流特

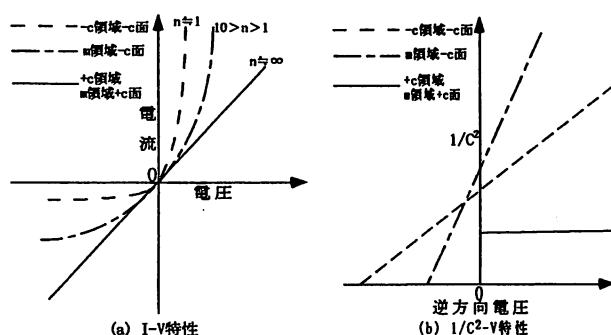


図 11. 電気的特性の考察図

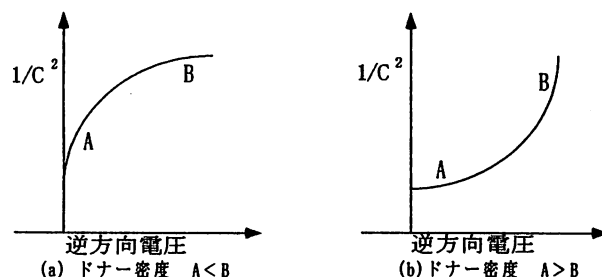


図 12. $1/C^2$ -V 特性の曲線関係

性が優勢である。

以上の結果より, -c 領域の -c 面側が $n \approx 1$ になっていることから整流性が強く, ショットキー接触による理論通りの電流が流れている。m 領域の -c 面側は $10 > n > 1$ で整流性が弱くなっている。+c 領域, m 領域の +c 面で $n \approx \infty$ となり, (2) 式の指数項に依存しなくなるため, 順方向電流は印加電圧に対して直線的になり, オーミック特性を示すことが判る。これらの関係を図 11. (a) の I-V 特性に示した。

4.2 空乏層幅とドナー密度

(1) I-V 特性から整流性が示された試料について, 接触によって生ずる空乏層幅 d を求めたところ, ほぼ $10^{-1} \mu\text{m}$ オーダーであった。m 領域の -c 面側で $d = 0.46 \mu\text{m}$ (m2), $d = 0.62 \mu\text{m}$ (m4), 一方, -c 領域で $d = 0.16 \mu\text{m}$ (-c2, -c4) と求められ, -c 領域の空乏層幅が m 領域の d に比べて狭いことがわかった。

(2) ドナー密度 N_D は領域別で比較すると m 領域の -c 面側で約 10^{17}cm^{-3} (m1~m5), -c 領域のそれでは約 $10^{18} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ (-c2, -c4, -c5) となり, -c 領域の N_D は m 領域のそれよりも約数十~数百倍の値を示した。次に極性面で比較すると m3 の試料は +c 面側で $\sim 10^{16} \text{cm}^{-3}$, -c 面側で $\sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$, および -c2 の試料は +c 面側で

$1.23 \sim 6.98 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $-c$ 面側で $8.09 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ と求められ、いずれも $-c$ 面が $+c$ 面側に比べ、数～数十倍の値を示した。

以上の結果より、 m 領域の $-c$ 面側に生じる空乏層幅が $-c$ 領域の $-c$ 面側よりも広いが、反対にドナー密度は低い。このことは(4)式に示される関係と一致している。これらを図11.(b)の $1/C^2-V$ 特性に示す。図より接触電位差 V_D は $-c$ 領域 $-c$ 面側(点線)において最も大きいことがわかり、そこから接触によって生じるショットキー障壁も一番高いと考えられる。

また、図7.(b), および図10.(b)において $1/C^2-V$ 特性が上に凸になっており、これを説明図にすると図12.(a)となる。この図の傾きから、AよりBでドナー密度が逆方向電圧と共に増加する傾向を示し、図7.(b)の結果である表2.の $+c1$ にも示されている。

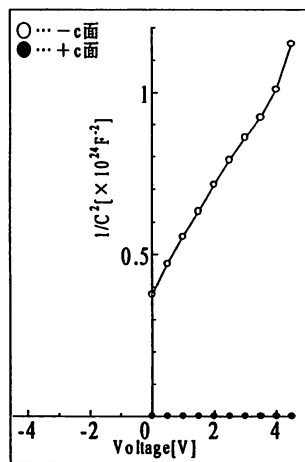


図13. $1/C^2-V$ 特性 (m の $-c$ 面)

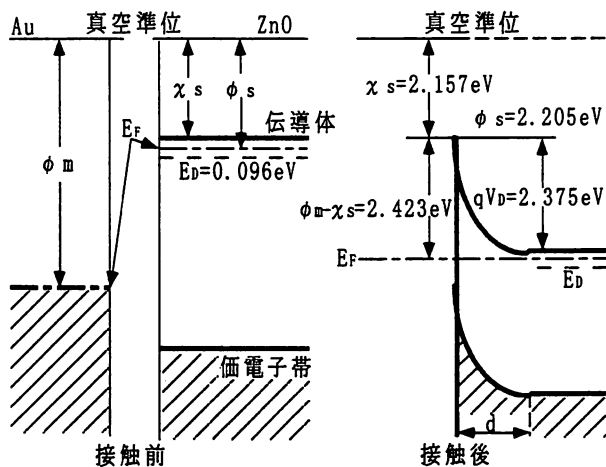


図14. ZnO 単結晶のエネルギーバンド図 (m , $-c$ 面)

逆に図8.(b)の $+c$ 面側は、 $1/C^2-V$ 特が下に凸になり、これを説明図にすると図12.(b)になる。この図の傾きから、AよりBでドナー密度が逆方向電圧の増加と共に減少し、図8.(b)の結果である表2.の ($m1$)~($m5$)等にも示されている。このような傾向になるのは、半導体としての ZnO 単結晶の内部と表面のドナー密度の差が影響していると考えられる⁵⁾。つまり(a)の例では、表面近くよりも半導体内部のほうがドナー密度が高い場合であり、(b)の例では逆に、内部よりも半導体表面のほうが表面欠陥による表面準位等の影響によるドナー密度が高い場合を示していると考えられる。

4.3 接触電位差からのエネルギーバンド図

本研究により実際に求めることができた接触電位差から、エネルギーバンド図を考えてみる。

図13. が実際に直線近似が可能で接触電位差が求めることのできた m 領域(試料名: $m1$)の $-c$ 面の $1/C^2-V$ 特性である。これより接触電位差は $V_D = 2.375 \text{ eV}$ と求まる。Auの仕事関数 ϕ_m を 4.58 eV とし⁷⁾、ドナー準位 E_D はこれまでの研究で求められている値、 0.096 eV を採用した⁸⁾。また ZnO 単結晶のフェルミ準位 E_{FS} は、伝導体の下縁のエネルギー E_c とドナー準位 E_D の中間に一致するものとして計算をしている。

ZnO 単結晶の仕事関数 ϕ_s , 電子親和力 χ_s , 障壁高さは以下のように算出した。

$$\phi_s = \phi_m - qV_D = 4.58 - 2.375 = 2.205 [\text{eV}]$$

$$\chi_s = \phi_s - E_{FS} = 2.205 - 0.048 = 2.157 [\text{eV}]$$

Au 側からみた障壁高さ

$$\phi_m - \chi_s = 2.423 [\text{eV}]$$

これらの数値から実際のエネルギーバンド図を図

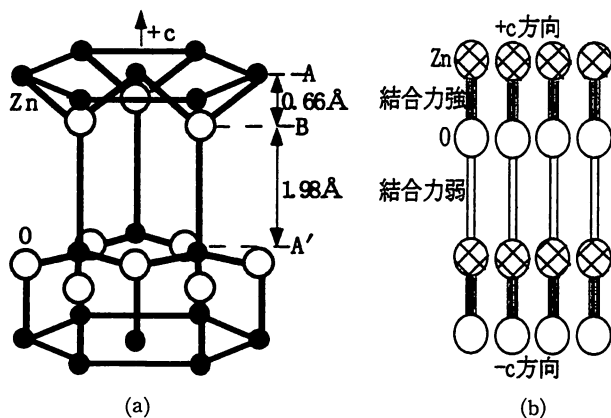


図15. ZnO 単結晶の結晶構造

14. に示した。

4.4 結晶構造からの考察

ZnO 単結晶は図15. (a)に示すような, Zn 層(A 層)と O 層 (B 層) が層状に重なり合ったウルツ鉱型の結晶構造をしており, AB 間距離が 0.66 \AA , BA'間距離が 1.98 \AA となり, 約 1 : 3 の距離の比になる。各層間の結合力はその距離の二乗に反比例するため, AB 間の結合力は BA'間に比べて 9 倍の強さをもっていることがわかる。これを模式的に示したものが (b)になる。従って試料を切り出すとき, この結合力の関係から+c 面に Zn 層が, -c 面に O 層が現れると考えられる。ZnO 単結晶は化学組成が Zn 過剰の結晶であり, 言い換えれば O 欠陥を含む結晶である。つまり-c 面には O 欠陥を含んだ O 層が現れることになるため, 相対的に考えた場合, +c 面に比べて-c 面の n 型半導体としての性質が強くなることになる。この差が理想係数, 空乏層幅およびドナー密度の差に現れたものと考えられる。

5. まとめ

本研究では, 水熱育成法によって高純度 ZnO 単結晶を育成し, 成長領域別の各極性面に Au を接触させ, ショットキー障壁の理論より, 順方向電流密度の理想係数 n , 空乏層幅 d およびドナー密度 N_D 等を求めた。その結果, 以下のことがわかった。

(1) 理想係数 $n \approx 1$ となる -c 領域の -c 面側で整流特性が強くなり, $10 > n > 1$ となる m 領域の -c 面側で整流特性が弱くなり, $n \approx \infty$ となる +c 領域の +, -c 面と m 領域の +c 面側ではオーミック特性を示した。

(2) Au との接触で生ずる ZnO 単結晶の空乏層幅は $10^{-1} \mu\text{m}$ オーダーとなることがわかった。空乏層幅は m 領域のほうが -c 領域よりも広く, ここでのドナー密度は -c 領域のほうが m 領域よりも数十~数百倍高くなることから, この両者が正反対の関係があることが確かめられた。同一試料の極性面におけるドナー密度を比較してもやや -c 面側が +c 面側よりも高いことがわかった。

この大小関係は, エッチピット密度の関係にも同様の傾向を示した。

(3) $1/C^2-V$ 特性が曲線になるのは, 半導体とし

ての ZnO 単結晶の表面近傍の内部, あるいは表面の欠陥に起因するドナー密度が変化するものと考えられる。以上のことは ZnO 単結晶構造における各領域の極性面の組成によるものと考えられる。特に O 欠陥を含む O 層が現れる -c 領域 -c 面側においては (1), (2)の傾向が顕著に示された。

また, 本報告において $1/C^2-V$ 特性の直線性から実際に求めることができた ZnO 単結晶の仕事関数は一例だけだった。この問題解決として, 育成の段階で O 欠陥の少ない高純度な ZnO 単結晶を育成させ, 表面状態を同一の条件でより清浄な状態に保ち, そして仕事関数の大きい他の金属, 例えば, 白金 Pt ($\phi_m = 5.48 \text{ eV}^{7)}$)等を用いて数多く実験を行い, 統計性を高めることで電気的特性のより正確な評価が可能となるであろう。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり, 御指導, ご鞭撻頂いた本校電気工学科, 浅野清光教授ならびに自然科学系, 成田章教授に深く謝意を表します。また, 本研究の一部は東北大学金属材料研究所の共同研究 (平成10~11年度) の助成ならびに日本電波工業株式会社の研究助成を得た。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 坂上, 和田: 窯業協会誌, 82 巻, 8 号, 405 (1974)
- 2) N. Sakagami: Proceedings of the 1st International Symposium on Hydrothermal Reactions, Yokohama, March 22-26, 576 (1982)
- 3) N. Sakagami: Journal of Crystal Growth, 99, 905 (1990)
- 4) 坂上: 素材物性学会誌, 5 巻, 2 号, 77 (1992)
- 5) 國岡, 上村: 新版 基礎半導体工学, 朝倉書店, 109 (1996)
- 6) N. Sakagami and S. Hasegawa and G. Ohara: SCI. REP. RITU, B-(Elect. Comm.) Vol. 19, No. 4. 199 (1967)
- 7) 石田, 清水: 改訂 半導体素子, コロナ社, 88 (1980)
- 8) 山下, 沢木, 坂上: 秋田高専 卒業研究資料 (1998年 3 月)