

# 酸化亜鉛粉末による2端子および3端子素子の特性

## — 大電力デバイスのための —

関根 佳宏, 横井 亮, 北村 岩雄, 池田 長康

### 1. はじめに

雷放電などによるサージ電圧を防止する電力用避雷器は酸化亜鉛 (ZnO) の粉末を焼結したもので、非線形の抵抗を示す特性に基づいている。この非線形特性は、本質的にはいまだ不明なところが多いが、半導体素子であるダイオードの特性に酷似している。我々はこの非線形特性に注目し、この特性を利用して、酸化亜鉛粉末による新しい大電流用トランジスタの機能をもつ素子、特に大電力 (数MW, 数GW) に使用することが可能な素子の開発を目標に基礎研究を行い検討した。

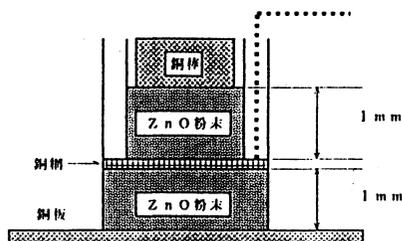
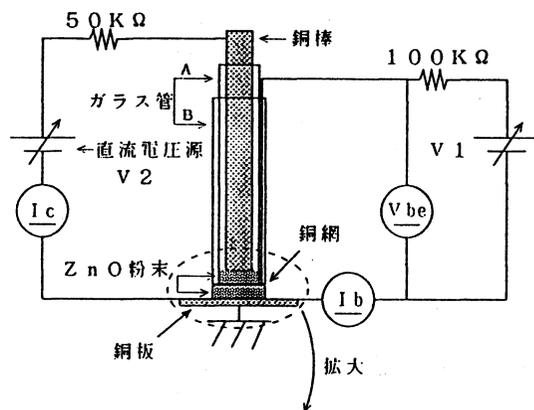
### 2. 室温における酸化亜鉛粉末3端子素子

#### 2.1 実験装置および実験方法

初めに酸化亜鉛粉末を使用して、酸化亜鉛粉末3端子素子を作り、その特性を調べるため実験および検討を行った。

実験装置を図1に示す。トランジスタのコレクターに相当する陽極として銅棒を、ベースに相当する中間電極として銅網を、エミッターに相当する陰極として銅板を使用し、陽極と中間電極の間および中間電極と陰極の間に酸化亜鉛粉末を図1のようにセットした装置を作り実験を行った。中間電極に銅網を使用した理由は、中間電極と陰極間の電子を中間電極で引き寄せて加速、増幅させ、中間電極の網目を通過させることにより増幅作用を期待するためである。

実験方法は直流電圧源  $V_2$  を一定に保ち、直流電圧源  $V_1$  によって、中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  と中間電極電流  $I_b$  をコントロールして、そのときの陽極電流  $I_c$  の値を測定した。



ガラス管A: 高さ130mm, 外形9mm, 内径6.5mm  
ガラス管B: 高さ100mm, 外形13mm, 内径10.5mm  
銅棒: 高さ155mm, 直径6mm, 重さ40g  
銅板: 50mm×50mm, 厚さ2mm  
銅網: 直径10.5mm, 1mm間隔

図1 実験装置

## 2.2 実験結果

1) 電圧  $V_2$  をパラメーターとして中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  と陽極電流  $I_c$  の関係を調べたものを図2に示す。

中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  の増加と共に陽極電流  $I_c$  の急激な減少が見られる。

2) 電圧  $V_2$  をパラメーターとして中間電極電流  $I_b$  と陽極電流  $I_c$  の関係を調べたものを図3に示す。中間電極電流  $I_b$  の増加と共に陽極電流  $I_c$  は減少しているが、途中にプラトー領域を持つ。

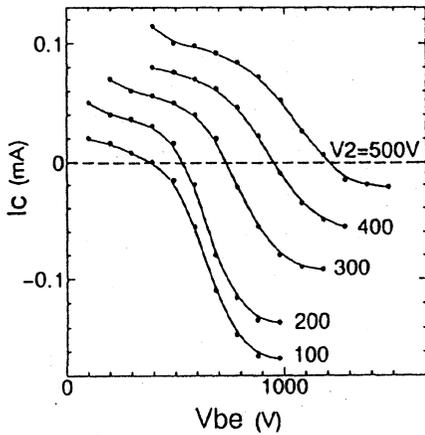


図2  $V_{be}-I_c$  特性

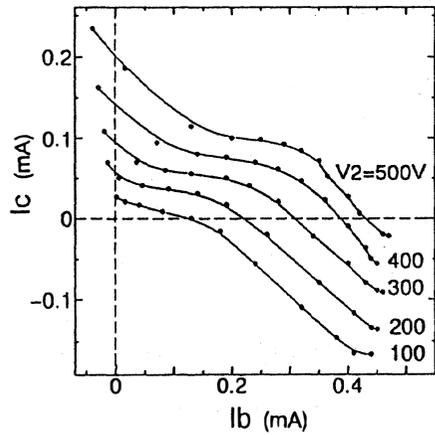


図3  $I_b-I_c$  特性

## 2.3 実験結果の検討

2.1の実験結果はトランジスターの増幅作用に見られるように、陽極電流  $I_c$  が右上がりの結果になることを期待したが、その結果は得られず、逆に右下がりの結果となった。実験結果がなぜ右下がりになるかを検討してみる。

図4に示すように、電圧源  $V_1$  によって電流  $I_1$  と  $I_2$  が流れ、電圧源  $V_2$  によって電流  $I_3$  が流れる。電圧源  $V_2$  は一定値にしてあるので電流  $I_3$  は一定値であるが、電圧源  $V_1$  を大きくしていくと電流  $I_1$  と  $I_2$  が大きくなり、陽極電流  $I_c$  は

$$I_c = I_3 - I_2$$

であるから結果として陽極電流  $I_c$  は減少していくと考えられる。

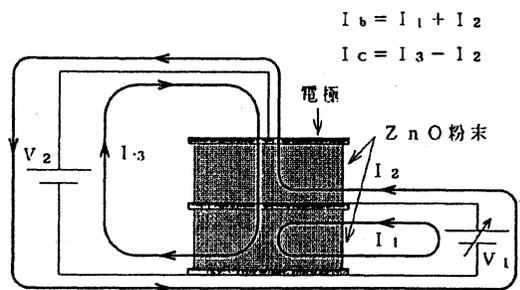


図4 酸化亜鉛粉末3端子素子を流れる電流

我々はトランジスターに相当する素子の開発を目的としているため、以上に述べた電流  $I_2$  は不必要であり、この電流を陽極側でなく陰極側に流したいわけである。つまり図5 a) に示すNPN型トランジスターでは電流は図に示す方向にしか流れないが、酸化亜鉛粉末3端子素子では図5 b) に示すような方向に電流が流れ、トランジスターのような特性を期待するならば③と④の電流は不必要である。すなわち電流の流れに方向性を持たせたいのである。そこで次に述べる実験を行った。

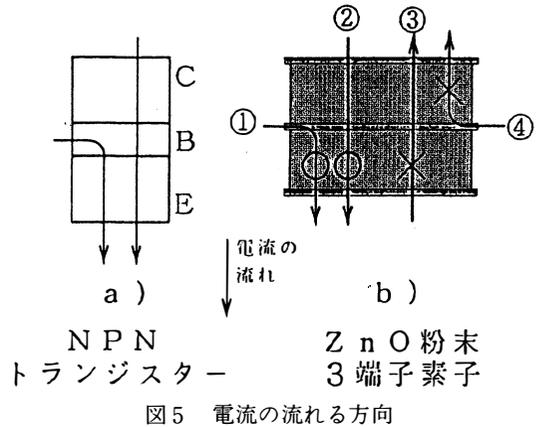


図5 電流の流れる方向

### 3. 酸化亜鉛-酸化バリウム粉末2端子素子

#### 3.1 実験装置および実験方法

この実験では半導体素子であるダイオードに相当する2端子素子の特性を調べる。このとき素子を流れる電流に方向性を持たせるため図6に示すように仕事関数の小さい酸化バリウム (BaO) 粉末をおき、その上に酸化亜鉛粉末を配し、銅棒と銅板をセットし、下方にバーナーを置き、加熱が可能な装置を作った。

実験方法は下方よりバーナーで素子を加熱し、2端子素子の銅棒を陽極、銅板を陰極とした順方向と、銅板を陽極、銅棒を陰極とした逆方向についての電圧-電流特性を測定した。

順方向の時は仕事関数の小さい電子放出物質である酸化バリウムを陰極に接して置く。これを加熱することにより、上方向へ電子を放出させ電流が大きく流れる。一方、逆方向の時はより大きい仕事関数をもつ酸化亜鉛が陰極部となるため電流が流れにくくなる。このように2種類の粉末を用いることにより、素子を流れる電流に方向性をもたせるように考慮した。

#### 3.2 実験結果

温度をパラメーターとして順方向と逆方向の電圧-電流特性を調べたものを図7に示す。

250°Cでは順方向、逆方向共に電流がそれほど流れない。350°Cでは順方向で約500Vでブレイクダウンを起こして、250V-12mA 付近の領域に遷

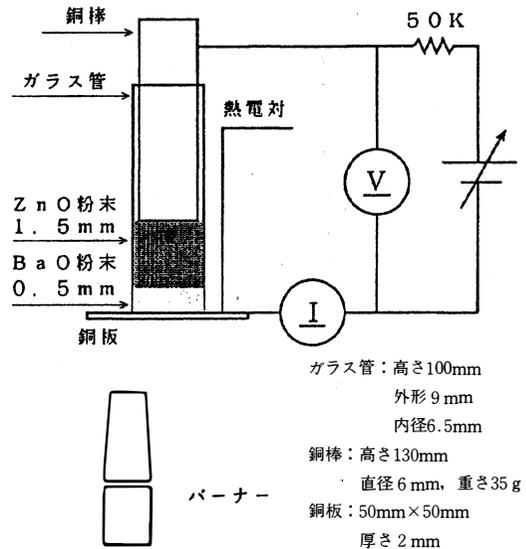


図6 実験装置

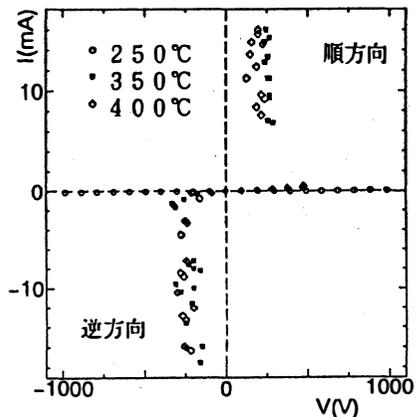


図7 電圧-電流特性

移し、大きな電流が流れるようになる。逆方向では順方向より電流が流れやすく、はっきりとしたブレイクダウン点が見られず、素子の特性に方向性が現れる。

しかしながら、粉体であるため特性が安定せず、実験毎にブレイクダウン点は高低があり、順方向と逆方向の特性が対称になる場合もある。その例を図8に示す。ここで注目すべき点は図7、図8共に半導体素子であるサイリスターの特性に似た結果が得られたということである。

またこのブレイクダウンを起こす現象は酸化バリウム粉末を入れずに酸化亜鉛粉末だけの2端子素子でまったく同様の実験を行っても現れるが、比較的高い温度でブレイクダウンを起こし、順方向と逆方向の特性が対称になる。その例を図9に示す。

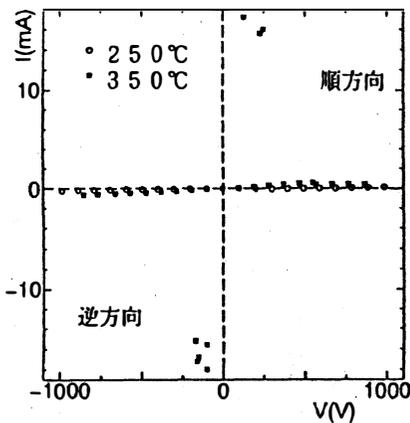


図8 順方向、逆方向が対称となる例

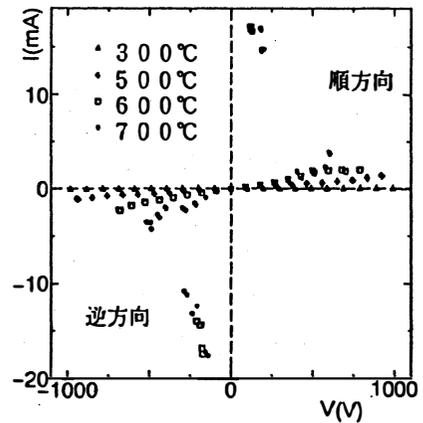


図9 酸化亜鉛粉末だけの電圧-電流特性

### 3.3 実験結果の検討

素子を流れる電流の特性に方向性を持たせるために以上の実験を行った。図7の結果に方向性が現れていると思える。しかし図8の例のように方向性が現れず、順方向と逆方向の特性が対称となる時もある。明確な方向性は得られず、今後の検討すべき課題となる。

粉体は常に一定の状態に保つことが難しくデータ値（電流値、ブレイクダウン電圧など）が実験毎に変化し、不安定であるが、サイリスターのPNPNスイッチ型に似た特性（図7）、SSS型に似た特性（図8）のいずれかの特性が確実に現れることは注目すべき点であると思われる。

## 4. 酸化亜鉛-酸化バリウム粉末3端子素子

### 4.1 実験装置および実験方法

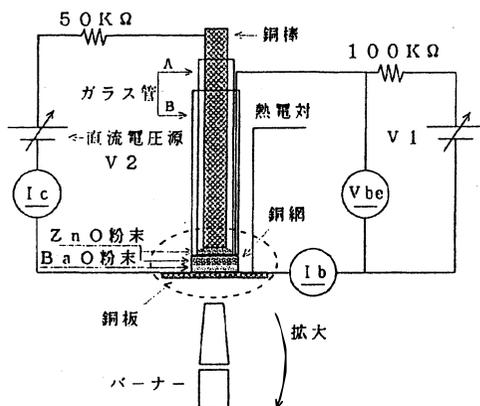
酸化バリウム粉末を使用し、加熱することで素子に方向性を持たせようとしたが明確な方向性は得られなかった。しかしブレイクダウンを起こし注目すべき結果が得られた。次にこのブレイクダウンが3端子素子にどのような影響を与えるかを調べるため酸化亜鉛粉末と酸化バリウム粉末を使用して、トランジスターに相当する3端子素子を作り実験及び検討を行った。

実験装置は図1と同じであるが、下方にバーナーを設置し、中間電極と陰極の間に、陰極に接して酸化バリウム粉末を0.5mm、その上に酸化亜鉛粉末を1.5mmを入れ、陽極と陰極の間に酸化亜鉛粉

末を1mm入れた素子について実験を行った。その様子を図10に示す。

実験方法も2. 1で述べたものと同じであるが、下方よりバーナーで素子を加熱し、直流電圧源  $V_2$  を一定に保ち、直流電圧源  $V_1$  によって、中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  と中間電極電流  $I_b$  をコントロールして、そのときの陽極電流  $I_c$  の値を測定した。

- ガラス管A：高さ130mm，外形9mm，内径6.5mm
- ガラス管B：高さ100mm，外形13mm，内径10.5mm
- 銅棒：高さ155mm，直径6mm，重さ40g
- 銅板：50mm×50mm，厚さ2mm
- 銅網：直径10.5mm，1mm間隔



## 4.2 実験結果

- 1)  $V_2=300V$  とし、温度をパラメーターとして中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  と陽極電流  $I_c$  の関係を調べたものを図11に示す。

中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  の増加と共に陽極電流  $I_c$  は減少しているが、 $350^\circ C$  では中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  が約650Vで中間電極と陰極間でブレイクダウンが生じ、それと同時にA点からB点(100V 0.1mA)付近の領域に遷移し、陽極電流  $I_c$  は増加した。

この時 ( $V_2=300V$ ,  $350^\circ C$ ) の中間電極と陰極間のブレイクダウンの様子を示すため、中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  と中間電極電流  $I_b$  の関係を図12に示す。中間電極-陰極間電圧  $V_{be}$  が約650Vの時ブレイクダウンが生じ、100V-7.5mA付近の領域に遷移し、中間電極電流  $I_b$  が大きく流れる。この時に図11に示したように陽極電流  $I_c$  が増加する。

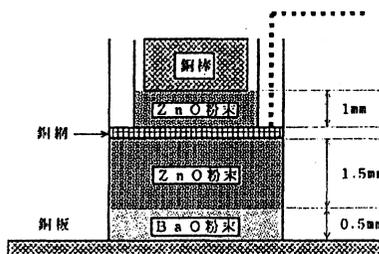


図10 実験装置

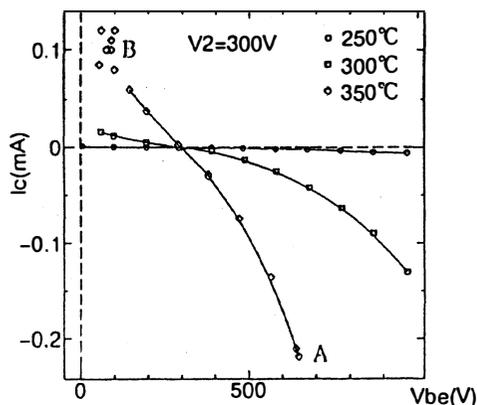


図11  $V_{be}-I_c$  特性

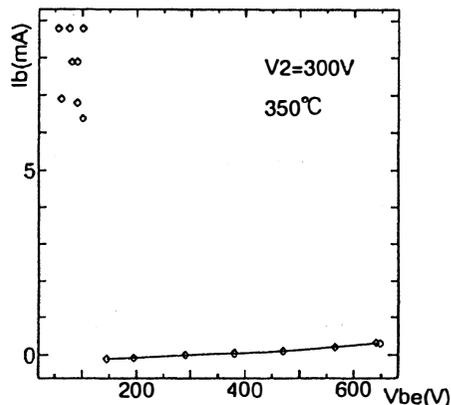


図12  $V_{be}-I_b$  特性

2)  $V_2=300V$ ,  $350^\circ C$  における中間電流  $I_b$  と陽極電流  $I_c$  の関係を図13に示す。

中間電極電流  $I_b$  の増加と共に陽極電流  $I_c$  は減少しているが、図12に示した中間電極と陰極間のブレイクダウンと同時にA点からB点付近の領域に遷移して、中間電極電流  $I_b$  が大きく増加し、陽極電流  $I_c$  も増加する。このとき、 $I_b$  は約7mA、 $I_c$  は約0.1mA となり、 $I_c$  に対して  $I_b$  が非常に大きい。

$V_2=300V$ ,  $250^\circ C$  と  $300^\circ C$  の時の中間電極電流  $I_b$  と陽極電流  $I_c$  の関係を図14に示す。この温度ではブレイクダウンが生じないため陽極電流  $I_c$  の増加はなく、中間電極電流  $I_b$  の増加と共に陽極電流  $I_c$  は減少している。中間電極電流  $I_b$  の値の範囲も図13に比べて非常に小さい。

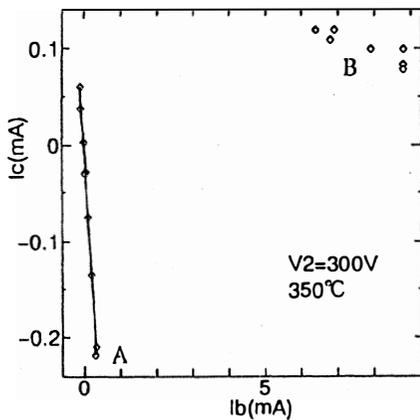


図13  $I_b - I_c$  特性

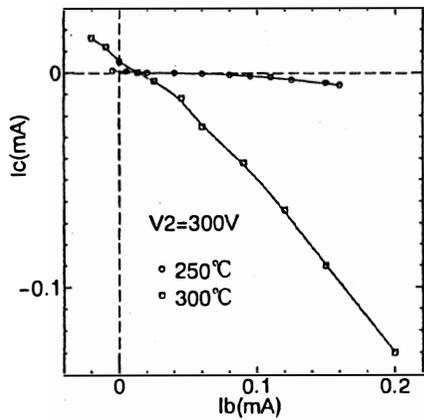


図14  $I_b - I_c$  特性

### 4.3 実験結果の検討

室温における酸化亜鉛粉末3端子素子では、陽極電流  $I_c$  の値は右下がりであった。ここで行った酸化亜鉛-酸化バリウム粉末3端子素子でもやはり陽極電流  $I_c$  の値は右下がりの結果となっているが、 $350^\circ C$  では中間電極と陰極の間でブレイクダウンが起これ、この時陽極電流  $I_c$  の値が増加した。ブレイクダウンは3端子素子に明らかに影響を与えていることが分かり、注目すべき結果が得られたと思われる。中間電極と陰極間がブレイクダウンを起こした時、陽極電流  $I_c$  が増加するのは、ブレイクダウンを起こすことにより中間電極と陰極間の抵抗値が下がり、図4に示した陽極方向への電流  $I_2$  が陰極方向へ流れたためと考えることができる。この特性も粉体のため実験毎に値が変化するのが確実に現れる特性である。

## 5. ま と め

酸化亜鉛粉末および酸化バリウム粉末を用いて、トランジスターに相当する3端子素子、ダイオードに相当する2端子素子を作成し実験をおこなってみた。その結果は

1) 室温における酸化亜鉛粉末3端子素子では、陽極電流  $I_c$  の値はトランジスターの特性に見られるような右上がりの結果に反し、右下がりの結果が得られた。しかし、途中でプラトーをもつ非

線形の特性となっている。

- 2) 酸化亜鉛-酸化バリウム粉末2端子素子では、電流の流れに、再現性に乏しく、明確ではないが、方向性が現れサイリスタ-の特性に似た結果が得られたことは、注目すべき点であると思われる。
- 3) 酸化亜鉛-酸化バリウム粉末3端子素子では、中間電極と陰極間がブレイクダウンを起こすと陽極電流  $I_c$  が増加した。

酸化亜鉛粉末などによる新しい大電流用素子の開発のために基礎実験を行い、再現性などに問題があるが、注目すべき特性が得られた。今後は粉末の配置、構成などを考慮しつつ、この特性をさらに追求し、検討を行っていきたいと思っている。

#### 参考文献

- 1) 藤田 宏 著, 電気機器, 森北出版株式会社.
- 2) ニューセラミックス懇話会 編, ニューセラミックス 材料とその応用, 日刊工業新聞社.
- 3) 中 重治, 早川 茂 共編, ファイセラミクステクノロジーシリーズ3, 電子材料セラミクスオーム社.
- 4) 堂山昌男・山本良一 編, 材料テクノロジー13, セラミック材料, 東京大学出版会.
- 5) 社団法人日本セラミックス協会編, セラミックコンポジット.

## Properties of 2 or 3 terminal element used ZnO powder for a high electric power device

Yoshihiro Sekine, Ryou Yokoi, Iwao Kitamura, Nagayasu Ikeda

Since an arrester which consists of a sinter material of ZnO powder, has a nonlinear property, it is used widely for the protection the surge voltage in electric power transmission lines. This property is also expected useful for high power elements. We examine the high temperature properties of 2 or 3 terminal element consisted of ZnO and BaO mixed powder layer with 2 or 3 electrodes. It is found that 2 terminal element consisting of ZnO and BaO mixed layers shows almost the same break down property at the temperature above 350°C as that of thyristor (Silicon controlled rectifier).

〔英文和訳〕

### 大電力デバイスのための 酸化亜鉛粉末による2端子および3端子素子の特性

関根 佳宏, 横井 亮, 北村 岩雄, 池田 長康

酸化亜鉛粉末の焼結材料からなる避雷器は非線形の特性を持つので、これは送電線のサージ電圧を防ぐために広く使用されている。この特性は大電力用素子に利用できることが期待できる。我々は酸化亜鉛粉末と酸化バリウム粉末の2層から成り、2つおよび3つの電極を持つ2端子および3端子素子の特性を温度を高くした状態で調べた。酸化亜鉛粉末と酸化バリウム粉末の2層から成る2端子素子は、350°C以上の温度で、サイリスタ（SCR）とほとんど同じブレイクダウン特性を示すことが分かった。