

薄膜バリスタ

大久保 明 伸*・山口 勝 也**

Thin Film Varistor

Akinobu OKUBO and Katsuya YAMAGUCHI

Abstract

Voltage and current characteristics of metal-oxide-metal thin film varistor prepared by vacuum evaporation method are discussed with the theory of R. Stratton on tunneling currents through thin insulating films.

The results of experiments show the symmetric non-linear voltage and current characteristics.

A brief discussion about the structure of insulating film is given and the model of insulating film is also proposed.

1. 緒 言

二つの金属、又は半導体の間に薄い絶縁体膜をはさんで両側に電極をとりつけ、両電極間に電圧を印加した時流れる電流は印加電圧に対して非直線的であることが知られているがこのとき流れる電流はショットキー電流¹⁾とトンネル電流²⁾であることが知られている。

素子の電圧電流特性の非直線性が著しければバリスタとして利用できるわけであるが筆者等は数種の金属及び半導体を用いてバリスタとしての特性を示す素子を試作したので以下それについて報告する。

2. ストラットンの理論

筆者等は試作した素子の電圧電流特性を解析するのにストラットンの理論に従ったのでそれについて述べる。

金属と絶縁体とを接触させると両者のフェルミ準位が一致するので金属のフェルミ準位と絶縁体の導電帯の底との間にずれが生ずる、Fig. 1に示すように金属1および金属2のフェルミ準位から見たこの差をそれぞれ x_1 , x_2 とする、またイメージ効果を考えるならば接触部においてバンドは不連続的に変化せずFig. 1に示すような形となる、絶縁体膜の厚さが薄く、中央部においても両側からのイメージ効果の影響を受けているとするならばこの障壁の高さはひくめられる、もし障壁として対称性のあるものを取り、イメージ・ポテンシャルとしてペーテの式を用いるならば障壁の高

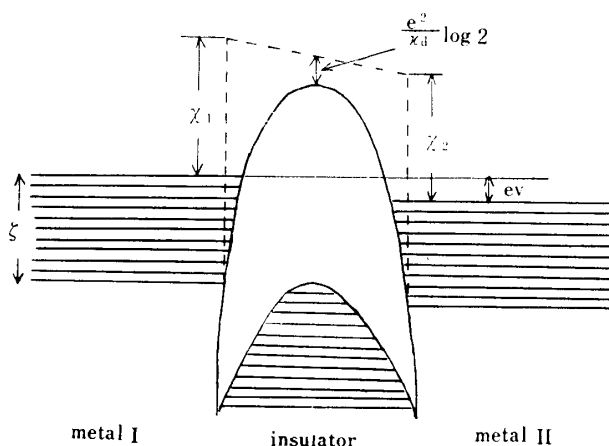


Fig. 1 Band model of metal-insulator-metal device

さがひくくなる大きさは $(e^2 / \kappa d) \log 2$ である、ここに κ は絶縁体薄膜の光学的誘電率でこれは屈折率の二乗に相当し d は絶縁体薄膜の厚さである。

障壁中を電子がトンネル効果により透過する確率 $P(E_x)$ は WKB 近似法により

$$P(E_x) = \exp\left[-\alpha \int_{x_1}^{x_2} \{\phi(x) - E_x\}^{1/2} dx\right] \quad (1)$$

と書かれる、ここで障壁に対し垂直な方向に x 軸をとり平行な方向に y , z 軸をとっている、また

$$E_x = \frac{P_x^2}{2m}$$

* 宇部工業高等専門学校電気科

** 山口大学工学部応用物理教室

Px_1 : 電子の金属1内における運動量の x 方向成分

$\phi(x)$: 障壁ポテンシャル

x_1, x_2 : $\phi(x) - Ex = 0$ となる点の x 座標

$$\alpha = \frac{2^{5/2}\pi m^*1/2}{h} \quad (2)$$

m^* : 電子の有効質量

この $P(E_x)$ に対して、障壁に衝突する電子数を乗じ Ex について積分し金属1より金属2に、および金属2より金属1に、それぞれ流れ込む電子流の大きさを計算して両者の差を求め電子電荷 e を乗じたならばトンネル電流 i の大きさが得られる、すなわち

$$i = \frac{4\pi em}{h^3} \int_0^\infty \{f_1(E) - f_2(E)\} dE \int_0^\infty P(E_x) dE_x \quad (3)$$

ここに $E = \frac{1}{2m}(P_x^2 + P_y^2 + P_z^2)$

$f_1(E)$ および $f_2(E)$ は金属1と金属2についてのフェルミの分布函数である。

いまこの素子に電圧が印加されていないときの障壁ポテンシャルを $\phi_0(x)$ とすれば V なる電圧が金属1に対し金属2に与えられたときの障壁ポテンシャルは

$$\phi(x) = \phi_0(x) - \frac{x}{d} eV \quad (4)$$

またトンネル電子は主としてフェルミ準位近傍のものが障壁を透過してくるものと考え、透過係数 $P(E_x)$ の対数が以下のように展開できるとする。

$$\log P(E_x) = -(b_1 + e_1 \varepsilon_x + f_1 \varepsilon_x^2 + \dots) \quad (6)$$

$$\varepsilon_x = \zeta_1 - E_x$$

ζ_1 : 金属1におけるフェルミ準位の高さ

ここに現われた係数 b_1, c_1, f 等は(1)式より求められ

$$b_1 = \alpha \int_{x_{11}}^{x_{21}} (\phi_1 - \zeta_1)^{1/2} dx$$

$$c_1 = \frac{\alpha}{2} \int_{x_{11}}^{x_{21}} (\phi_1 - \zeta_1)^{1/2} dx$$

x_{11}, x_{21} : $\phi_1 - \zeta_1 = 0$ となる点の x 座標

印加電圧 V があまり大きくなく、 b_1, c_1 が V のべき級数に展開可能とし、またその三次以上の項を無視して

$$b_1 = b_0 - b_{11}V + b_{12}V^2$$

$$c_1 = c_{10} - c_{11}V + c_{12}V^2$$

とおく、また実験から得られた結果から判断すれば c_1 については $c_1 \approx c_{10}$ とおくことが許される、このようにして(3)及び(5)式よりトンネル電流 i の表示式を導くと

$$i = i_{10} \frac{\pi c_{10} kT}{\sin(\pi c_{10} kT)} \left\{ \exp(b_{11}V - b_{12}V^2) \right\} \left[1 - \exp(-c_{10}V) \right] \quad (6)$$

$$i_{10} = \frac{4\pi me}{h^3} \cdot \frac{\exp(-b_{10})}{c_{10}^2} \quad (7)$$

(6)式より $V \rightarrow 0$ として零バイアス・コンダクタンスを求めると

$$cT = i_{10} \cdot C_{10} \frac{\pi c_{10} kT}{\sin(\pi c_{10} kT)} \quad (8)$$

とくに $\phi_0(x)$ が $x=d/2$ に対して対称な形であるときは、

$$i = i_{10} \frac{2\pi c_{10} kT}{\sin(\pi c_{10} kT)} \exp(-b_{12}V^2) \sinh\left(\frac{c_{10}}{2} V\right) \quad (9)$$

$$c_{10} = 2b_{11}$$

また障壁の高さを x_r とすると

$$\left. \begin{aligned} x_r &= \frac{1}{2} \cdot \frac{b_{10}}{b_{11}} \quad (\text{障壁が放物線型の場合}) \\ x_r &= \frac{1}{4} \cdot \frac{b_{10}}{b_{11}} \quad (\text{障壁が矩形型の場合}) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

となる。

3. 試料の製作

3.1 Al-Al₂O₃-Al 素子の製作

化学的洗浄をほどこした透明平滑ガラス基板上に純度99.99%のAlを 5×10^{-5} mmHgの真空中で幅1mmの帯状にまず蒸着した、蒸着終了後一定時間空气中に放置しておくとも表面にAl₂O₃の膜が生ずるがその上にふたたびAlを蒸着した、電圧および電流端子としては極く細いCuのリード線を銀ペーストで接着させた、素子の構造を Fig. 2 に示し、空气中に放置した時間と生じたAl₂O₃膜の厚さの関係を Table. 1 に示す。

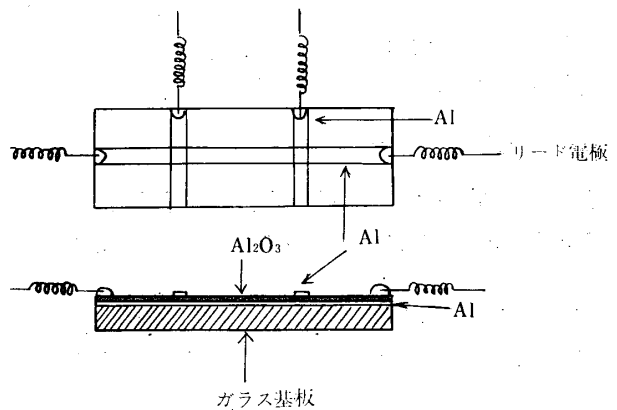


Fig. 2 Specimen (Al-Al₂O₃-Al)

筆者等はまたガラス基板を用いないでその代りにAl板を用いた素子を試作した、重クロム酸カリ(2.5g)と苛性ソーダ(0.5g)とを100ccの蒸溜水とともに沸騰(100°C)させ、その中にあらかじめクレンザーで洗浄しておいたAl板を入れると一定時間後Al板の表面にAl₂O₃の膜ができる、このようにしてAl₂O₃膜を

Table. 1

放置時間 (hrs)	Al ₂ O ₃ 膜厚 (Å)
48	49
51	50
300	61
350	61

生成させ、その膜の上に Al を蒸着して金属 2 とした。

3.2 Ta-Ta₂O₅-PbS 素子の製作

三光特殊金属(株)より購入した純度 99.9%厚み 0.1mm のタンタル板を Fig. 3 に示すような寸法に切

り取りその一端を温度約 700°C の電気炉(発熱体非

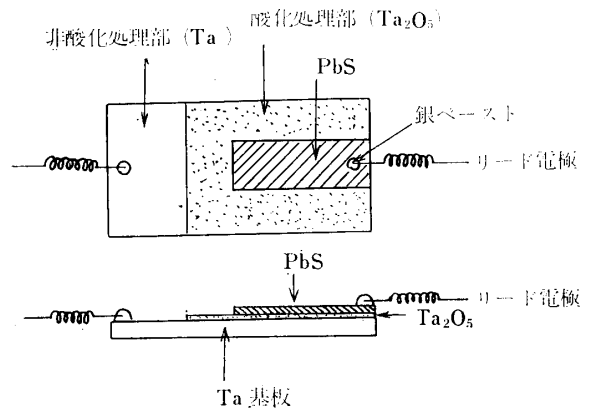


Fig. 3 Specimen (Ta-Ta₂O₅-PbS)

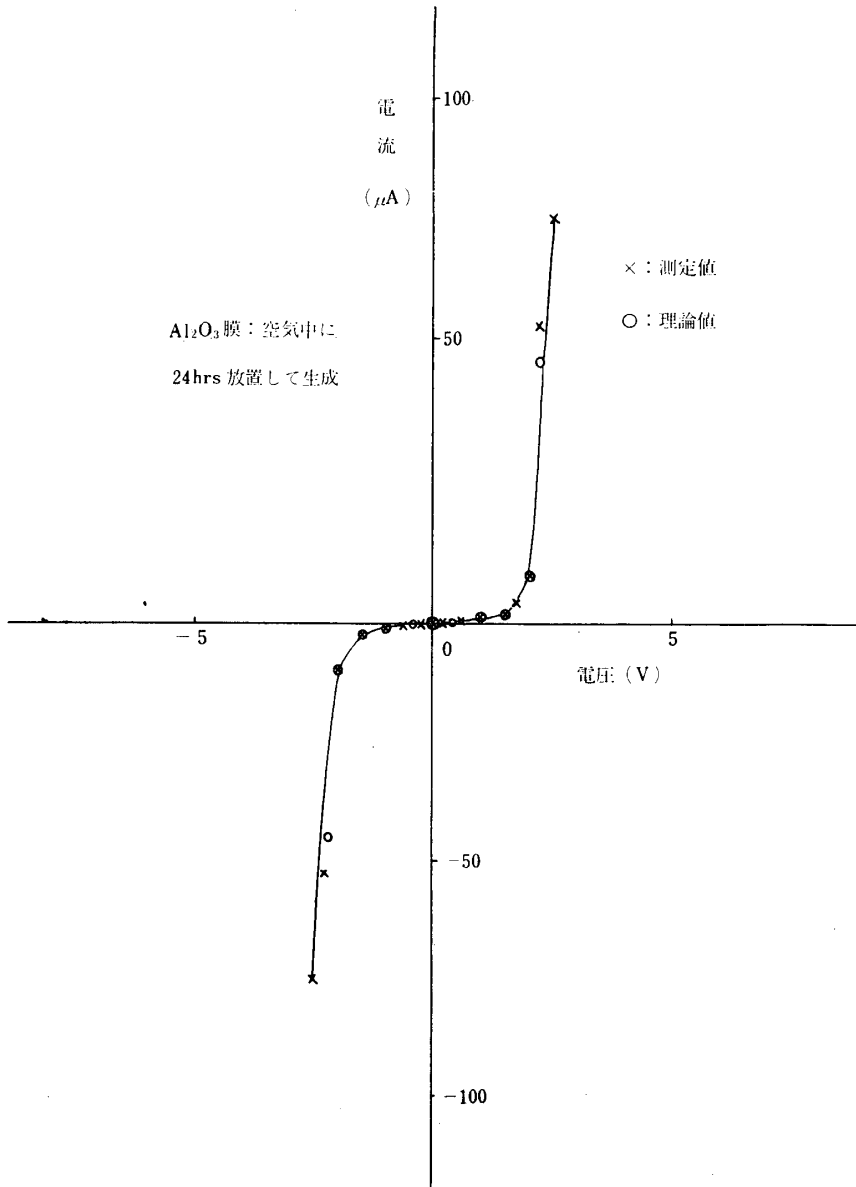


Fig. 4 Voltage-current characteristics

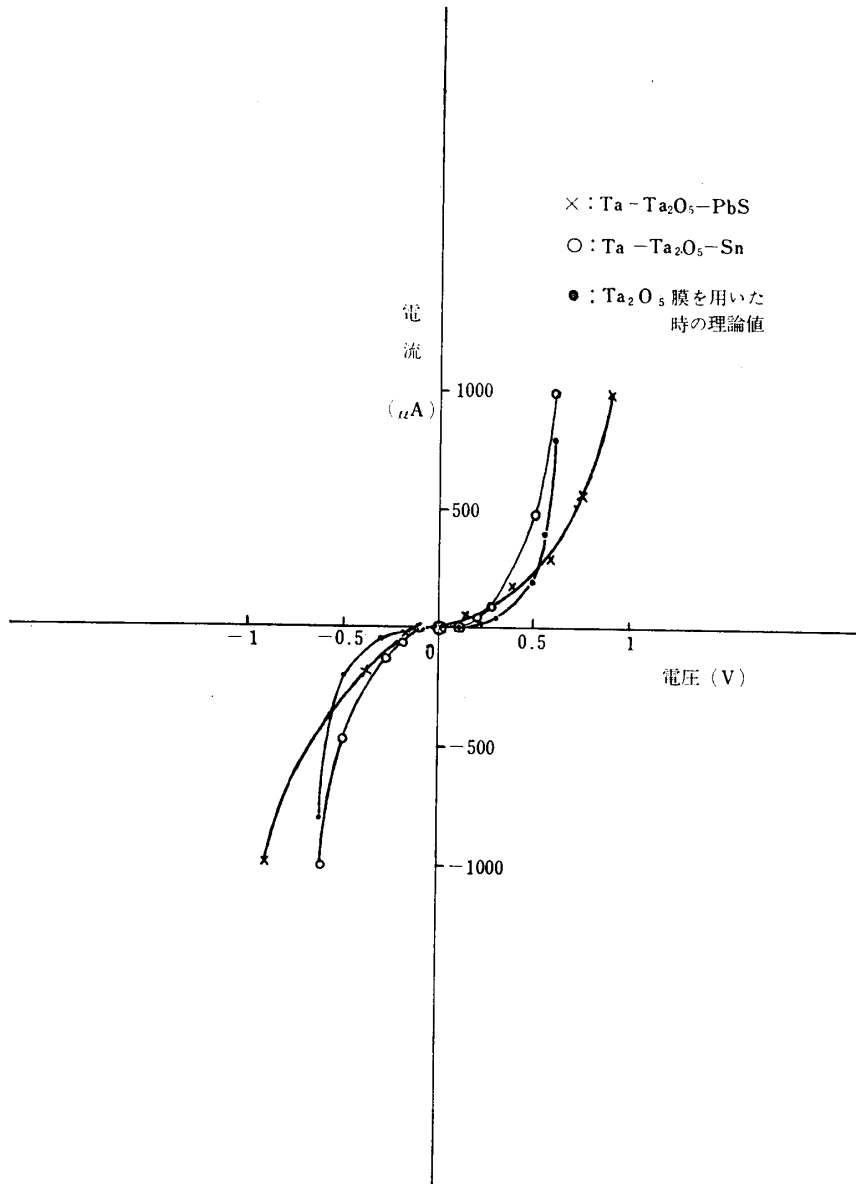


Fig. 5 Voltage-current characteristics

露出)に挿入して約10秒間加熱し酸化被膜 Ta_2O_5 を化成させその酸化被膜の上に PbS を蒸着(蒸着時の真空度は $5 \times 10^{-5} mmHg$)した, 電極は加熱処理による酸化被膜を生じていないタンタル板表面部分と PbS 膜表面とからとりだされている。

また筆者等は金属2として Sn を用いた素子も製作して PbS を用いた場合と比較した。

4. 実験結果

4.1 $Al-Al_2O_3-Al$ 素子の特性

Fig. 4 に $Al-Al_2O_3-Al$ 素子の電圧電流特性を示す, Fig. 4 から知られるように電圧電流特性は良好な非直線性を示し順, 逆両方向の特性はほぼ完全に

対称であつた, また理論値と実測値は良い一致を示している。

4.2 $Ta-Ta_2O_5-PbS$ 素子の特性

Fig. 5 に $Ta-Ta_2O_5-PbS$ 素子の電圧電流特性を示す, 電圧電流特性の非直線性及び対称性は良好であったが理論値と実測値の間にずれを生じた, この原因が何であるかは不明である。

4.3 絶縁膜の構造

Al_2O_3 及び Ta_2O_5 膜は多孔性であると考えられているからトンネル電流のみでなくピンホール部分を直接流れるものも考えられ, これが素子の特性に関係すると思われる説³⁾もある。

Al_2O_3 及び Ta_2O_5 膜は酸素過剰の部分はP型, 酸素

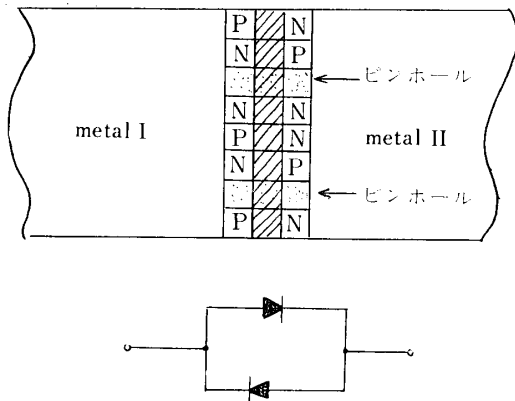


Fig. 6 Proposed model of insulating film

不足の部分は N 型となりこの P 型, N 型の生ずる割合はほぼ同じであるとすれば Fig. 6 に示すようなモデルを考えることが可能あるから電圧電流特性の非直線

性及び対称性を容易に理解することができる。

5. 結 言

筆者等が製作した Al-Al₂O₃-Al 素子及び Ta-Ta₂O₅-PbS 素子は何れも良好な非直線的電圧電流特性及び対称性を示しバリスタとして動作することを示した, 今後更に工夫を重ね特性の改善を行なう考えである。

文 献

- (1) P. R. Entange et al : Phys. Rev. Letter. **8**, 267 (1962)
- (2) J. C. Fisher et al : J. Appl. Phys. **32**, 172 (1961)
- (3) R. F. Schwarz et al : Proc. IRE. **50**, 467 (1962)

(昭和41年6月2日受理)