

知ってますか??



雑学講座

吸着効果トランジスタIV

作・光藤 裕之 岡山理科大学 名誉教授

〒703-8217 岡山市土田1009-3

TEL/086-279-6011

21 吸着効果トランジスタの特性変動

吸着効果トランジスタ (AET) の焼結体構造を著しく単純化して考える。つまり、ソース電極とドレイン電極を結ぶ方向にほぼ平行な縦ネックと垂直な横ネックによって等半径の n 型半導体球が結合する図 14 のようなモデルを考える。ドレイン電流がネック半径を一定値に収斂させる整形作用は、縦ネックに対してのみ有効である。ドレイン電流がほとんど流れない横ネックには、ネック狭細化過程が働かず、一方的に肥厚化が進行する。

縦ネックの半径は待機状態におけるデバイ長さより小さくピンチオフしている。従って、ソース・ドレイン間抵抗は高抵抗の縦ネックに支配される。肥厚化した横ネックは焼結体の強度を担うが AET 作用には寄与しない。第 13 および 14 節でのべたように等温系でネック成長が進むと、ネックの凸表面半径 x および凹表面半径 ρ はともに大きくなる。その結果、ネック成長速度は小さくなる。しかし、長年月にわたり通電待機させると、横ネックの肥厚化は進む。

一方、大気中で加熱状態で働く AET の材料は n 型酸化物半導体であるが、実際には SnO_2 および In_2O_3 に限られる。 ZnO を実用センサに用いた例は一件も見当たらない。しかし、 ZnO を材料とする実験報告は著しく多いのである。興味ある現象である。

このなぞ解きの鍵となる研究報告がある²⁴⁾。室温で ZnO は大気中の CO_2 と H_2O と徐々に反応して、 $\text{Zn}_5(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_2$ に近い組成比の非晶質を表面につくる。これを加熱すると、 CO_2 と H_2O が放出されて化学的には ZnO に戻るが、表面層は多孔性構造になる。

この研究には次のようなエピソードがある。実験試料として購入した ZnO 粉末を使うときに必要量を毎回瓶から取り出す。そのたびに瓶は密閉される。ところが、取り出すたびに試料の性質に変化のあることに気付いた人がいた。それが誰であるか敬服すべき人物を聞き漏らしているのは残念である。ともかく意識的な研究が実行された。毎回の開封中の時間は短いが、瓶の上部空

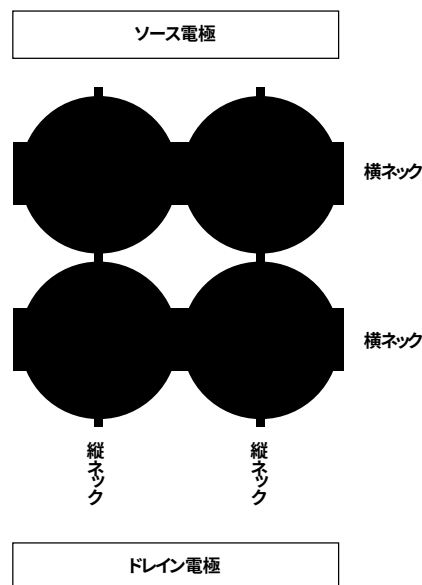


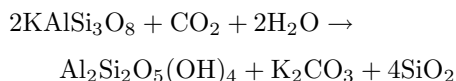
図 14 ソース・ドレイン間電流によるジュール加熱がもたらした立方格子配列した等半径の球粒間の焼結ネックの異方性。縦ネックでは肥厚化と狭細化の両過程が拮抗して空気中でピンチオフし得る一定半径を保つ。横ネックは太くて開放路を形成する。凹面の曲率半径 ρ は大きくなっていてネック部表面圧力の絶対値は小さくネックの肥厚化速度は低下している。

間に新しい室内空気が流入する。その後の密閉保存中に ZnO に異変が進行したのである。

そこで ZnO センサの研究と商品化に関して、次のように推論したくなる。研究室における少数試料は、室温大気に長時間触れる間もなく動作温度に保たれた。量産したときはじめて、室温で大気中に長時間置いた試料の特性が測られ、再現性の悪さが見いだされた。多分、 ZnO センサの製品試作をしたけれども、商品化に踏み切らなかった企業体は複数社に上ると思われる。そして、その正直な事情は公表されなかった。その事情は、少量試作と大量生産の間にある技術の壁というブラックボックスに入れられたであろう。無駄な研究・開発を責

められるべき人々には、その原因メカニズムを追求する余裕はないに違いない。

非酸化物にとって酸素は要注意物質であるから、酸化物が選ばれた。ところが、 CO_2 と H_2O とが連合して酸化物を侵す反応に意表をつかれた。しかし、この反応は珍しいことではない。例えば、花崗岩の主要成分であるカリ長石から主要な粘土鉱物であるカオリナイトを生み出すのは次式の反応とされている。



これは、風化作用として長期・広範囲に進行する。

22 ドレイン抵抗の PTC およびヒステリシス特性²⁵⁾

結晶内部の不純物等の局在準位と違って、表面に吸着した不純物の準位は、吸着により導入され脱離により取り去られる。酸素吸着による表面アクセプタによりネックがピンチオフしている状態（ゲートが閉じている状態）では、吸着による表面ドナがネックをオープンスルーさせる（ゲートを開く）。この吸着効果によるユニポーラトランジスタ作用が大幅なドレイン抵抗変化をもたらす。つまり、電気抵抗が結晶内部よりも強く表面状態に支配される。しかも、この表面準位は着脱自在なのである。

大気中の水蒸気濃度は数千 ppm から数万 ppm におよぶ。水蒸気は吸着して表面ドナ準位をつくる。平衡吸着量は図 6 のように昇温とともに減る。しかも、水の吸着と脱離の過程にはそれぞれ活性化エネルギーを要する（図 5）。従って、平衡状態に達するには一定の緩和時間（time constant）がかかる。表面準位の変化は速度過程である。例えば、温度変化が速すぎると、平衡吸着（脱離）の実現に遅れが生じるのでヒステリシス現象があらわれる。

PTC は Positive Temperature Coefficient の頭字語（acronym）である。図 15 は焼結 AET のドレイン抵抗（対数表示）の傍熱温度依存の一例である。

つまり、ここでの温度は AET 試料の入っている炉内温度であり、ドレイン抵抗はジュール発熱が無視できる弱電流で測られている。全体像の傾向は左下がり、つまり電気抵抗は昇温とともに低下する半導体特性（NTC）を背景にもつ。しかし、300℃を越す付近から PTC の領域が発生し、500℃を越す付近から NTC が復活す

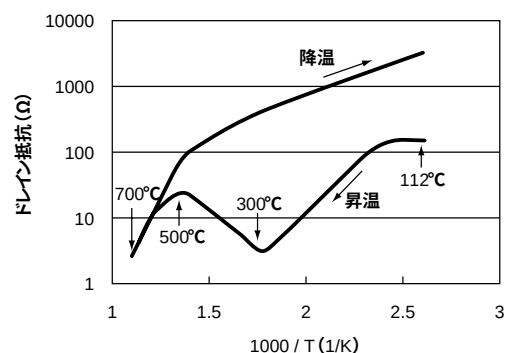


図 15 焼結体吸着効果トランジスタのドレイン抵抗の温度依存の典型的なパターン。ここで T は等温系の温度である。昇温時、300～500℃域に PTC（正の抵抗温度係数）があらわれる。 $T > 600^\circ\text{C}$ 域では昇温曲線と降温曲線は一致する。

る。300～500℃では表面水ドナの脱離による電気抵抗増が、結晶内部準位に起因する通常の NTC を凌駕して PTC を発現する。

500℃付近から低温側では、降温曲線は昇温曲線と異なり、高抵抗側を通る。昇温過程で水ドナを失った表面が降温過程で水ドナを回復するのに遅れが生じるからである。降温速度を速めるならば降温曲線は、表面ドナ準位密度が少ないので、もっと高温側を通り、全域で NTC を呈する。その極限は 700～500℃間の直線の延長線を通る。ゆっくり降温させると曲線は、昇温曲線に近付き PTC 領域もあらわれる。

水素など可燃性ガスは吸着してドナ準位をつくる。従って、表面ドナとして競合する水ドナを取り除いておくことが好ましい。すなわち、ネックの動作温度を約 500℃とすればよい。PTC と NTC の境には $\text{TC} \approx 0$ の領域がある。待機状態で長時間を過ごすデバイスの温度依存を極小にすることができる副産物である。この待機状態にドナ性ガス吸着が生じると、500℃の極大抵抗は図 15 において真下に急落する。

23 吸着効果トランジスタの動特性

動作中の焼結体 AET はドレイン電流 I による直熱方式で加熱され、ネックは約 500℃の一定温度と一定半径を保つ。そのために AET は負荷抵抗 R と直列にして電圧源 E につながる（図 16）。

ここで、AET のドレイン電圧 V_{AET} と I の関係は非線形であり、これを曲線 $V_{AET} = V(I)$ で表わす。

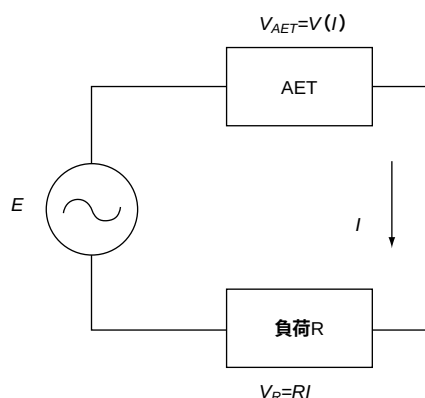


図 16 $V_{AET} + V_R = E$ すなわち, $V(I) = E - RI$ を満足する電流 I は, 負荷直線 $V = E - RI$ と AET 曲線 $V = V(I)$ の交点で与えられる.

一方, 負荷線は $V = E - RI$ で表され, 点 ($V = E$, $I = 0$) と点 ($V = 0$, $I = E/R$) を結ぶ直線である. この曲線と直線の交点が $V(I) = E - RI$ をみたす動作点である.

これを図 17 に示す.

ここで, 破線は $E = 100V$ (実効値), $R = 1.25k\Omega$ としたときの負荷直線である. 細線で描いた双曲線群は等電力線であり, AET のネック温度 T は電力の増加に定性的に対応して上昇する. 図 15 のドレイン抵抗の傍熱式の温度依存曲線は, 直熱式の場合には図 17 に示す電圧-電流関係 ($V_{AET} = V(I)$ 曲線 (動特性)) に相当する.

この図の場合, 消費電力 $P \sim 0.8W$ ($10V$, $80mA$) 付近では $300^\circ C$, $P \sim 1.2W$ ($80V$, $15mA$) 付近では $500^\circ C$ のネック温度となる. この異様に複雑な AET 動特性曲線と負荷直線の交点は 3 つある. $100V$ 印加のあと, 交点は $V_{AET} = V(I)$ 曲線上を原点を出発したものの, $300^\circ C$ を越せない.

いま, 負荷抵抗を減して $R = 1k\Omega$ とすれば, 負荷直線の電流軸との交点は $I = 100mA$ 点に移り, 交点は $300^\circ C$ 付近を越せる. しかし, $500^\circ C$ を越す領域に新たに 2 交点が発生する. $500^\circ C$ 付近の交点が $500^\circ C$ 動作点を越す不安定要因がうまれる. 暴走の危険は避けねばならない.

動作点が $300^\circ C$ 付近の 2 点を通り $500^\circ C$ 点に落ち着くために, 負荷抵抗をエレクトロニクス制御で変化させることが可能であろう. しかし, 以前は傍熱作用をもつ熱源を補助として使った. ただ単に $500^\circ C$ 付

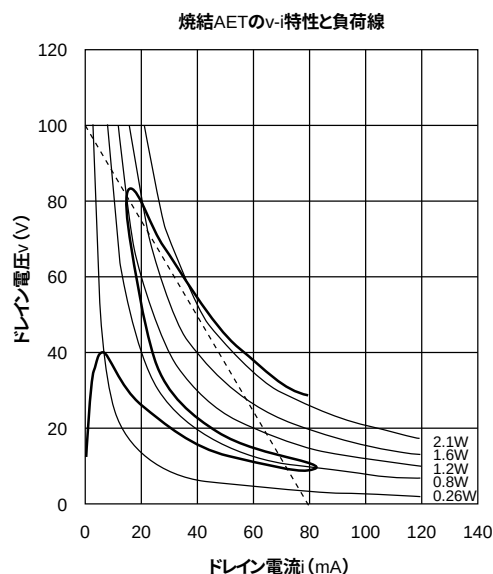


図 17 焼結体吸着効果トランジスタのドレイン電圧-電流特性 $V_{AET} = V(I)$ と負荷直線 $V = E - RI$ (破線). AET の動特性 $V(I)$ 曲線は, ドレイン抵抗の温度依存曲線に基づく. 細い双曲線は等電力線であり, 電力増加は定性的にネック温度の上昇に対応する. 電力 $P \sim 0.8W$ ($10V$, $80mA$) 点は $300^\circ C$, $P \sim 1.2W$ ($80V$, $15mA$) 点は $500^\circ C$ に対応する.

近に加熱するだけが目的ならば, 傍熱法加熱を採用するのが賢い. ユニポーラトランジスタと“ネック整形”の概念がなければ, 複雑怪奇な $V_{AET} = V(I)$ 曲線に翻弄されずにすむ. つまり, 生産コストが安くてすむ.

欠陥ガスもれ警報器が安価に大量に出回ったのは 30 年近くも前のことであつた. しかし, 昨今でも吸着効果トランジスタ概念は表向きでは無視されている²⁶⁾.

ドナ性ガスの分圧に応じて $V_{AET} = V(I)$ 曲線は異なる. しかし, もともと図 17 の曲線は平衡状態のものではない. これにドナ性ガスの存在下での曲線を加えると複雑この上ない図になり, 説明上のメリットはない.

参考文献

- 24) M. Nagao, K. Morishige, T. Takeshita & T. Morimoto, *Bulletin Chem. Soc. Jpn.* **47** (9), (1974) 2107~2110.
- 25) M. Nakagawa & H. Mitsudo, *Surf. Sci.* **175** (1986) 157~176.
- 26) 清水康博, 江頭誠, “酸化物半導体を用いたガスセンシングの基礎および最近のセンサー材料の開発状況”, セラミックス **38** (6), (2003) 407~420.