

トランジスタの劣化に就いて

中 野 朝 安*

信州大学工学部 通信工学教室
(昭和 31年 9月 26日 受理)

The Deterioration of the Transistor

Tomoyasu NAKANO

Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering
(Received Sept. 26, 1956.)

Synopsis. This paper deals with the deterioration of the transistor caused by the water vapor or gases in atmosphere and the heat generated by the backward current. It is said that the life of transistor is very long, but as the affair now stands, the characteristics are gradually changed. Its cause is mainly due to water vapor, but we have assumed that it is due to the effects of oxygen and water vapor diffusing into Ge. From these results, surface conductance is changed and deterioration is occurred.

The large current deterioration is due to the same reason. And so one of its counter-measures is the spread of the insulator solvent on the barrier. The cooling of the transistor in market is so insufficient that the effect of this technic may be covered by increasing the backward saturation current. But this technic is of no use, so we must examine the diffusing effects of gases which may be considered as the true cause of the deterioration.

1. 緒 言

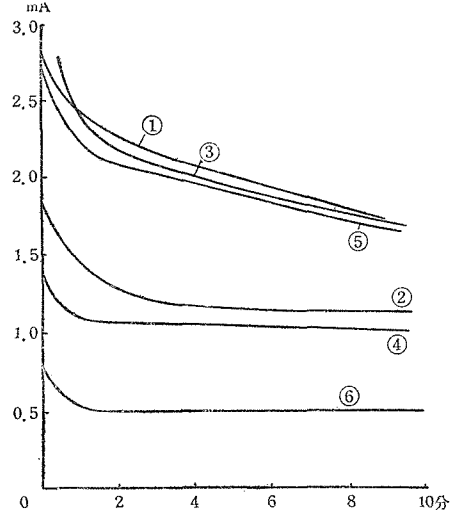
トランジスタの寿命は極めて長いといわれて来たが、現実には色々の原因のために特性が次第に変化してきて安定性、信頼性が乏しい。その原因を究明する目的で劣化を解析した結果の一部を述べ、その対策を考案した。試料は合金型の p-n~p のものに就いて実験を行った。劣化の現象を正孔注入の割合の減少、再結合速度の変化、コレクタの電子電流の増大による逆電流の増大、逆耐電圧の変化等に分けられる。その変化の原因として大気の影響と電流によるものに就いて述べる。これは劣化の主因と考えるがこれが総てであるかは不明ではある。

* 信州大学助教授

2. 大気による劣化

2.1. 逆電流のクリーピング

トランジスタを大気中にさらしておくとき逆方向の電流が次第に増大してくる。しかし通電してやると時間とともに電流が減少してくる。即ち負のクリーピングを示す。しかしその後長時間通電せずに放置しておくとき次第に元の状態にもどる。水浸しをすればすぐ元の状態になり真空中に置けば電流値は極めて少くなり繰返しても同じようなクリーピングを生ずる。これを第1図に示す。これから分るように大気中での劣化は殆んど水蒸気に依るものであるということは分るが、真空中でのことを考えると放置したことによつて、水蒸気が単に表面に附着したために依るものばかりではなく、水蒸気の内部への拡散とか酸素の影響とかがGe表面に与える現象を考察しなければなるまい。



第1図 大気による劣化のクリーピング

電圧は 20Volt, 一定室温

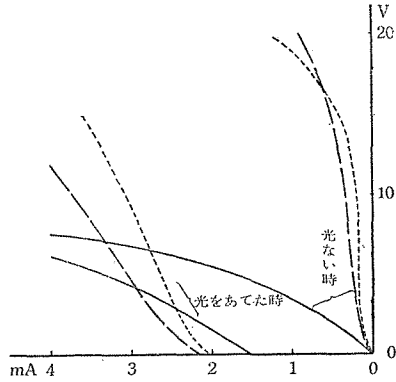
1. 始め 2. 1時間後 3. 2の後15分において
4. 48時間後 5. 水浸 6. 真空中

2.2. 大気的光電効果に及ぼす影響

裸の p~n 接合を空気中に放置すると障壁の附近にチャンネルを生ずる。このため光電効果を生ずる障壁有効面積が増大したことになるので、エミッタに生ずる光電効果による電力は空気中に放置することに依つて増大することが分る。しかしエミッタとコレクタ間に電圧を加えるとその電流変化は逆になる。しかも α (電流増巾率) は前と同様である。これより劣化により生じたチャンネルの障壁は不完全であることと表面再結合速度が大気により増大するのであることが推測出来る。以上のことを第1表と第2図に示す。

第1表 光電効果とチャンネルの関係

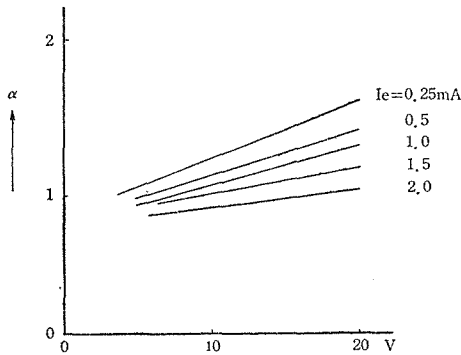
	P (μ W)	ΔI_c (mA)	$K = \Delta I_c / P$	β	$k' (= k/\beta)$
	P~N Junction Input power	Output current	10^{-3} Volt $^{-1}$	Emitter earth 電流増巾率 $\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)$	
放置後	5.5	1.5	0.3	15	20
CP ₄ エッチ後	1.2	2.5	2	12	150



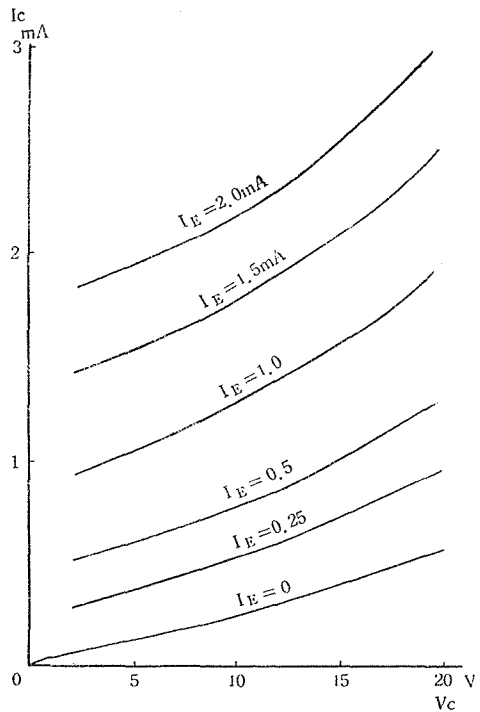
第2図 光電効果のエッチによる変化
実線は始め、点線はエッチ後

2.3. 劣化による電流増巾率 α の変化

始め $\alpha \approx 0.9$ あつたが大気中放置のため次第に減少し 0.75~0.8 程度になる。同時に逆方向の抵抗も 100K Ω より 10K Ω に減少する。これを C.P.4. でエッチすると、40K Ω に増大する。このときのエッチの具合で第3図に示すように α が1を越えることが起る。このように普通の合金型も雪崩型のように α が1を越えることがあることが分つた。このことを考えるとそれは障壁の表面部分の劣化とリーク電流に関係するよう思



第3図 電流増幅率 α とエミッタ電流の関係



第4図 ベース接地の時の $Vc-Ic$ 特性
エッチ後 (α が1を越すこともある例)

う。その考えにもとづいて考察する。第4図を解析すると、 $\alpha > 1$ の場合は

$$\begin{aligned} I_C &= I_E + I_B \\ &= I_E + I_{BO} + V_C \times Y \end{aligned}$$

I_C ; コレクタ電流 (単位 mA)

I_E ; エミッタ電流 (同 上)

I_B ; ベース電流 (同 上)

V_C ; コレクタ電圧 (Volt)

$I_{BO}; I_B$ の $V_C = 0$ の時の値

$$I_{BO} = 0.04 - 0.15 \times I_E$$

$$Y = \left(\frac{\partial I_C}{\partial V_C} \right) I_E = \text{const}$$

$$\therefore Y = A - B \times e^{-C \times I_E}$$

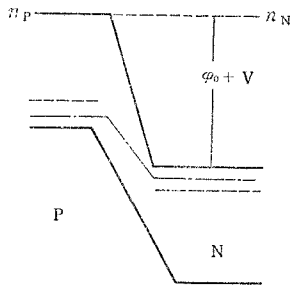
$$= 0.06 \left(1.6 - e^{-1.26 \times I_E} \right)$$

$$\therefore I_C = I_E - 0.15 I_E + 0.04 + V_C \times 0.1 \left(1 - 0.6 \times e^{-1.26 I_E} \right) \quad (1)$$

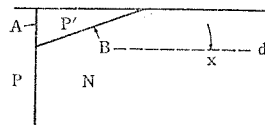
(1) は実験式である。これより α を求めて見ると

$$\alpha = \left(\frac{\partial I_C}{\partial I_E} \right) = 0.85 + 0.76 \times V_C \times e^{-1.26 \times I_E} \quad (2)$$

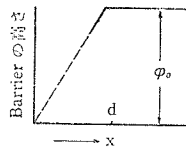
となり、 α が1を越えることも考えられ、第3図をほぼ満足する。



第5図 a. p~n 接合の模型



第5図 b. チャンネルの模型



第5図 c. チャンネルの障壁の高さの模型

このような現象を説明するために第5図 a, b, c の模型を考えた。障壁が劣化のため AよりBに移り表面障壁の高さが低いと考えると表面はほぼ抵抗となる。又 I_E の中

の正孔はこの附近で再結合速度が大のため表面は電流密度が増大する。このため表面附近の障壁の高さが正孔電流のトラップにより下る。⁽¹⁾この下りのため電子密度に差を生じて、表面の抵抗部分を通じて電流が流れると推測すれば

$$n_p = n_{n0} \times e^{-\phi/kT}$$

ϕ が正孔のトラップにより変化して ϕ_1 となる。

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_0 + \Delta\phi \\ &= \phi + K \times \alpha \times I_E\end{aligned}$$

となる。このため電子密度の差を生じて

$$\begin{aligned}\Delta n &= n_p - n_n \\ &= n_{n0} e^{-\phi_0/kT} \left(1 - e^{-K \times \alpha \times I_E/kT}\right) \\ &= n^* \left(1 - e^{-K \times \alpha \times I_E/kT}\right) \\ n^* &= N_{n0} e^{-\phi_0/kT}\end{aligned}$$

この Δn の増加により電流が増大する。

$$I = enb V/d$$

b ; モビリティ

d ; 障壁の厚さ

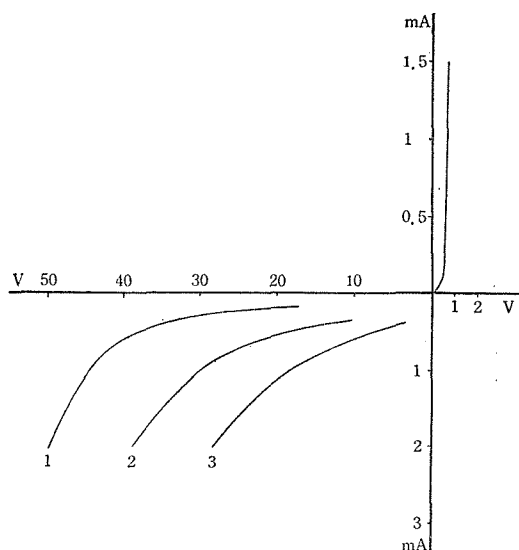
$$\begin{aligned}\therefore \Delta I_C &= ebV/d \times n^* \left(1 - e^{-K \times \alpha \times I_E/kT}\right) \\ \therefore I_C &= \alpha I_C + I_{C0} + ebV/d \times n^* \left(1 - e^{-K \times \alpha \times I_E/kT}\right)\end{aligned}\quad (3)$$

この (3) 式は (1) 式とほぼ同型であり実験現象を満足に説明出来る。このように正孔電流密度が大になると A 型と同様に p~n 接合型も α が 1 を越えることも充分考えられる。

3. 電流による劣化

3.1. 逆耐電圧 V_B の変化

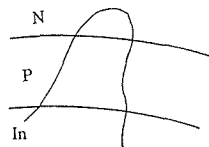
逆電流を過大に流すと逆耐電圧が減少して来る。またその時逆抵抗も減少し雪崩電流も増大して来るがその基本的なものは耐電圧でありその変化が少い限り他は大きな変化は見ないので耐電圧を主眼として逆方向特性の電流劣化を考察する。第 6 図に示すように始め (1) の特性が 3.5 A/cm^2 の電流を流すと (2) の特性になり耐電圧が下る。この程度ならば C.P.4 でエッチすると (1) にもどるが 7 A/cm^2 を流すと (3) の特性に大きく劣化する。このように劣化するとエッチでは (1) にもどることが困難ではあるが、第 7



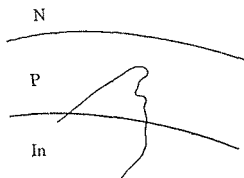
第6図 電流による逆特性の劣化

1. 始め
2. 1.に 3.5 A/cm^2 のためなるC.P.4でエッチで1にもどる。
3. 7 A/cm^2 のため劣化したもの 電解研磨で1にもどる。

図のような電解研磨を行うと(1)にもどることができる。この場合の劣化電流値は冷却の度合に依つて異なる。このことから電流劣化の殆どは表面に於いて行われると見なせる。それを顕微鏡で見ると第8図のようである。(a)は電流劣化したときである。 I_n か

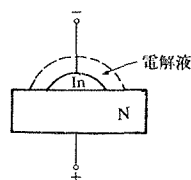


第8図 a. 接合部の顕微鏡図劣化直後



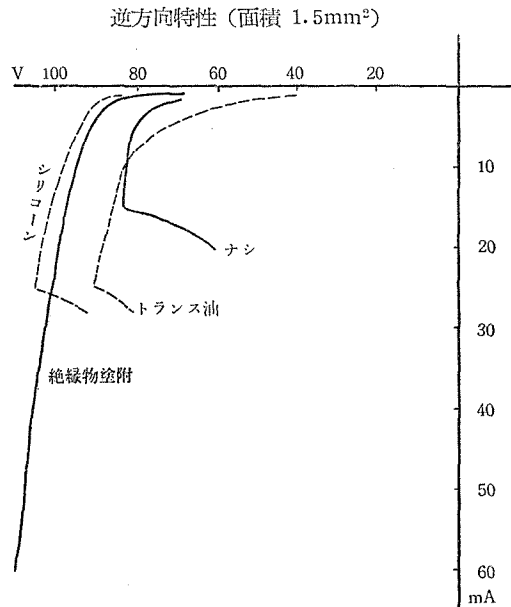
第8図 b. 電解研磨後

ら p~n 接合部分を越えて橋状のものでできている。これを電解研磨すると(b)のようになり橋が切れて(1)にもどるので、電流劣化は表面に於ける I_n から流れ出る橋によるものが主因と推測出来る。一様な障壁で一様な電流分配ならば熱放散の悪い内部で劣化すべきなのにかえつて表面で劣化するのは表面層の障壁の抵抗が小さいため電流密度が多いと思われる。これは表面の Ge の変化に根本的には基づいている。しかしそれを何等かの方法で保護することより劣化する電力の値を一様な電流分配による劣化の値ま

第7図 電解研磨の方法
NaOH の溶液

で増大せしめることができると思う。

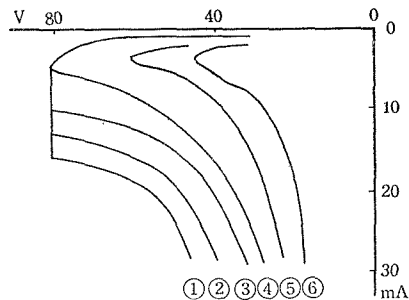
その対策として絶縁物を塗附した。それを第9図に示す。無処理の時は 15mA で負性抵抗を生じた。それを真空中に入れても左程変化はしない。またシリコン油やトランス油に浸してやると負性特性の生ずる電流値はわずかに上昇する。(負性特性を生ずる電流から電流劣化は急に大きくなるので、その電流を基準にする。) しかるにポリスチロールをトルロールに溶かした液体を塗り干すと、その電流値は増し 60~100mA までになる。これに依つて無処理のときの電流劣化をある程度保護することができる。これから推測すると、この絶縁物塗附は単なる空気の遮断ではなく、固体で密着しているために I_n からの橋状のものができのをおさえて、電流分配をくずす表面的な破壊を守ることができたと考える。



第9図 逆特性の電流劣化と塗附物の関係

3.2. 負性抵抗と劣化

第10図に示すように zener 電流がある程度流れると熱に依り 負性抵抗を生ずる。その電流値は全電流が増大すると減少し、zener 電流を示さなくなる。このときの全電流による熱のために次第に劣化を生じて逆耐電圧を減少して劣化する。即ち第10図の(4)の特性になると次第に(5) (6)の特性に順次変化してゆく。このように負性特性のピーク電流値より電流劣化が急増する。即ち点接触型の逆特性になるまでは割に安定でありこれを越えると劣化が激しくなる。



第10図 負性抵抗と劣化の関係

1. 30mA (1.5mm²)
2. 50 "
3. 60 "
4. 100 "
5. } 4が時間と共に変化してなる。
6. }

3.3 市販のトランジスタに就いて

3で以上述べてきたのは実験室の試作品によるものであるので冷却が良好であったので zener 電流が明瞭に分るが市

販のものは Ge 片が薄く又リード線が細く冷却に意を用いていない。このために zener 電流を示すほどの電流 ($10\text{mA}/1.5\text{mm}^2$) になると熱のために逆飽和電流値が次第に増大して来て逆特性が全く変つてしまう。これは劣化ではなく可逆的な変化である。このために前述の 3.1, 3.2 に述べた現象が見られない。即ち前述のことが問題になる以前に飽和電流の急増のため前者の効果を無価値にしてしまう。しかし飽和電流が急増する現象の起る前に逆耐電圧が急減し逆抵抗の減少するような現象に対しては 3.1 の手段が有効と思われる。それ故に 3.1 のような手段と同時に トランジスタの冷却方法を考えることが劣化に対して有効な手段ではないかと思う。電力用のものと限らずに普通のトランジスタも構造を考えて冷却を良好にすることは電流劣化を防止する一つの手段と想うのである。

4. 結 言

劣化の問題として大気によるものと電流による熱によるものを考察したが、根本的な劣化の原因は現在の製造工程ではさけ得ないものが最後に残るように思う。大気を遮断するとしても一度大気にさらされた Ge が内蔵するものに対する研究とその対策を考えねば根本的なものは望めないように思う。電流劣化も最後はその点に帰するように思う。又現在の市販のものは構造を考えることは劣化に対する一つの手段と考えられる。

材料に就いてお世話になつた電試菊地君、東通工に感謝する。この研究は文部省科学研究費による。

参 考 文 献

- (1) Proc. Phys. Soc, Vol. 67, P.636 (1954) Hogarth
Vol 66. P.845 (1953)