

# ゲルマニウム・パワー・トランジスタの二次降伏現象

## Second Breakdown in Germanium Power Transistors

笹山 隆生\* 大西 和夫\*  
Takao Sasayama Kazuo Onishi

### 要 旨

近年、パワー・トランジスタの開発が進み、その応用分野も多方面にわたるようになって、信頼性の裏づけとして使用電力限界のデータおよびその適切な評価が要求されるようになった。

ここではトランジスタの過渡過大電力を規制する二次降伏現象を、拡散ベース形ゲルマニウム・パワー・トランジスタについて究明し、二次降伏現象の測定法、諸パラメータの特性、温度依存性ならびに劣化現象を究明することにした。その結果、二次降伏現象はコレクタ接合の局部が110~140°Cの温度に達した時点で発生することが確かめられた。

### 1. 緒 言

トランジスタの二次降伏現象 (Second Breakdown—以下、S. Bと略称する) は、現象発見<sup>(1)</sup>以来、多くの研究者により究明され、定性的にはかなり明確になった<sup>(2)</sup>。

この現象は逆バイアスされた p-n 接合に流れる電流が、なだれ増倍 (Avalanche Multiplication) を伴う動作領域において、印加エネルギーがある値をこえると、導電度が急激に増大するもので、トランジスタにあってはコレクタ耐圧の急速な低下として観測される。S. B へ突入後大電流状態が長く続くと、トランジスタは特性低下し、さらに破壊 (コレクタ・エミッタ間短絡) に至る。

トランジスタの S. B に対する耐量は、誘導性負荷のスイッチングなど、過渡的な消費電力の大きい回路の設計には必要であるにもかかわらず S. B 発生時の物理的な裏づけが不完全である現在、個々の素子に対する S. B 特性のデータは十分得られていない。

ここでは S. B パラメータの諸特性ならびに測定法を、拡散ベース形ゲルマニウム・パワー・トランジスタを試料として提示し、S. B およびその耐量について究明した。

### 2. トランジスタの S. B

図1はエミッタ接地されたトランジスタの降伏特性を示したものである。

コレクタ・エミッタ電圧の低い状態から高い状態へ移るにつれ、トランジスタの  $V_{CE}-I_C$  特性は定電流領域から定電圧領域へと変化し、電流が急増するようになる。これはコレクタ電流におけるなだれ増倍の占める割合が多くなるからである。なだれ増倍状態にはいる電圧値はエミッタ・ベース・バイアスに依存し、逆バイアス状態から順バイアス状態へはいるにしたがって低下する。このようななだれ増倍による降伏状態を一次降伏と呼ぶ。

一次降伏状態にはいり、さらに過大な電力が印加されると、ある時間経過したのち、図のA~Fに示す点から破線、矢印で示す電圧の急激な低下が観測され、トランジスタは高導電状態にはいる。これを二次降伏現象 (S. B) と呼ぶ。

S. B の成因については現在のところ、その発生の機構に理論的裏づけがなされていないが、その諸性質から、コレクタ接合における熱的不安定性に基づく電流集中による見方が支配的である<sup>(3)</sup>。こうしてできた高温の電流集中部分を hot-spot と呼んでいる。S. B 突入後、印加電力がすみやかに取り除かれれば素子は劣化、破壊からのがれ、特性は復帰する。

S. B に対する強度は、突入点の電流:  $I_M$ 、電圧:  $V_M$ 、および突

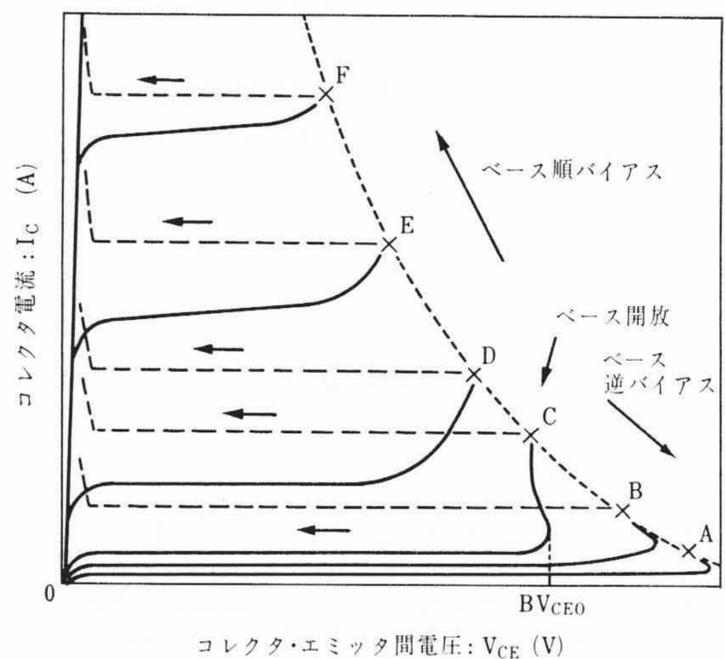


図1 エミッタ接地されたトランジスタの降伏特性

入までの遅れ時間:  $\tau_d$  の大小で表わすことができる。遅れ時間をパラメータに各バイアス条件のもとで S. B 突入点を計測して求められた突入点軌跡より小電力領域 (図1において A, B……F 点の軌跡の原点側) は S. B に対して安全な領域で、これを S. B に対しての安全動作領域 (Area of Safe Operation—以下 A. S. O と略称する) と呼ぶ。A. S. O および  $V_M$ ,  $I_M$ ,  $\tau_d$  の関係は、印加電圧波形や測定方法により異なるため、これらを一定にしなければ S. B 耐量の比較、評価はできない。

### 3. S. B の測定

S. B、あるいはその耐量を測定するには、なんらかの方法でトランジスタに大電力を与える必要がある、それにはカット・オフ領域から大電力パルスコレクタに与えて S. B に至らせる Turn-over 法と、飽和領域から誘導エネルギーによって過渡的に大電力を与える Latching 法とがある。ベース・バイアス条件を任意に変えること、エネルギー的検討が容易なことなどの理由から、われわれは前者を採用し、ゲルマニウム・パワー・トランジスタの S. B を検討した。

図2に S. B 測定回路の概略を示す。

試料トランジスタにはパルス電源より負荷抵抗:  $R_L$  を通してパルス電力が与えられる。パルスは水銀リレーの開閉により加えられ、トランジスタは図3に示すように負荷直線と一次降伏電圧で決められる一動作状態: P にはいる。

\* 日立製作所日立研究所

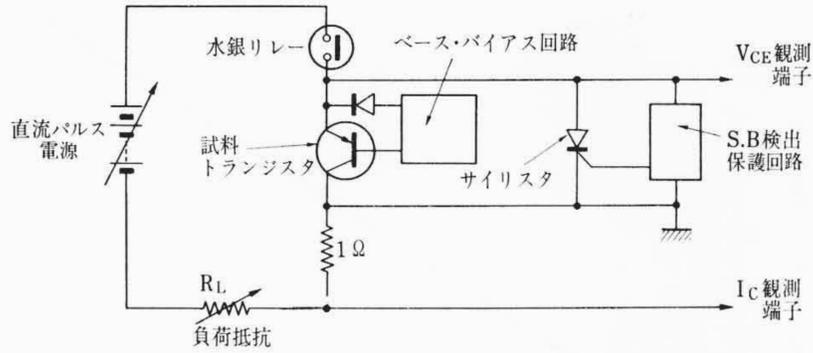


図2 Turn-over 法二次降伏現象 (S. B.) 測定回路

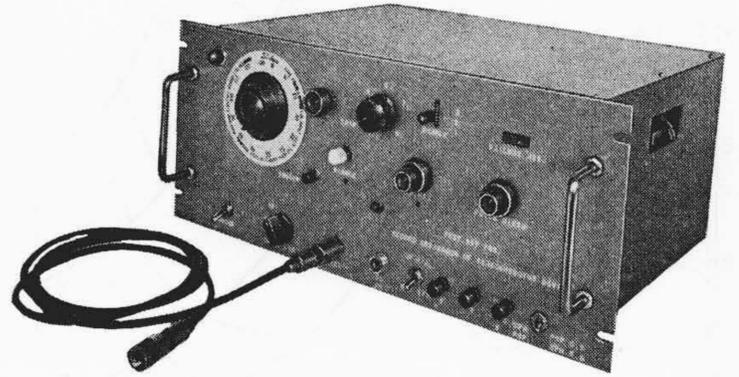


図5 二次降伏現象測定装置

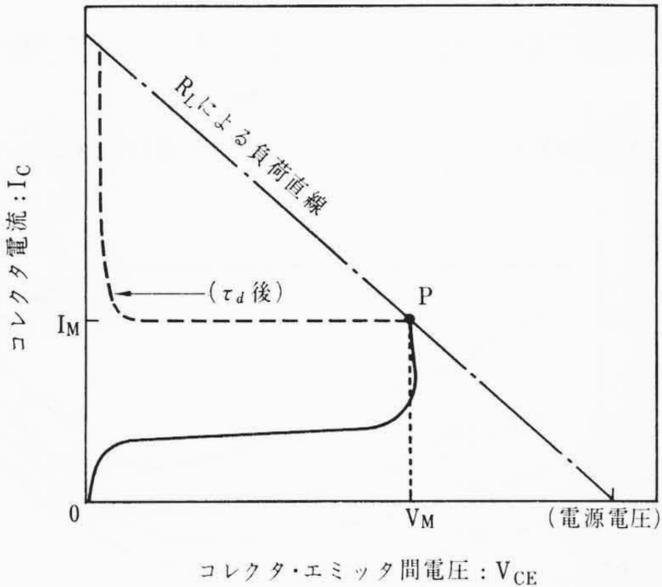


図3 二次降伏現象測定における電流、電圧の関係

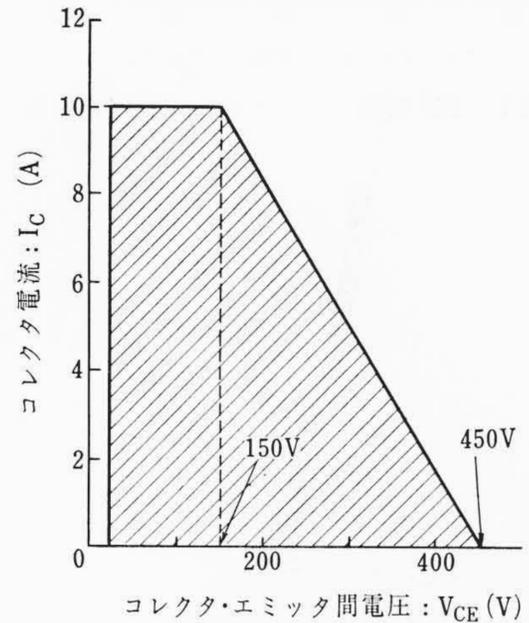
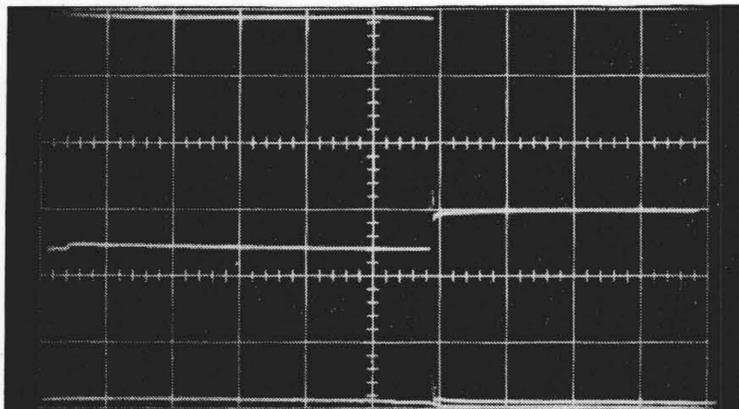


図6 二次降伏現象測定装置の測定可能範囲



上: コレクタ・エミッタ間電圧:  $V_{CE}$  (50V/div)  
下: コレクタ電流:  $I_C$  (2A/div)  
時間:  $t$  (100  $\mu$ s/div)

図4 観測される  $V_{CE}$ ,  $I_C$  波形の一例

一次降伏電圧値はそのときのバイアス条件で決まるので、 $V_{CE}$  観測端子、 $I_C$  観測端子には図4で示すようにいずれも方形波があらわれる。

トランジスタはP点である時間とどまると、図3に示した電圧の急下降を示す。すなわち S. B に突入する。このようにして観測される電流、電圧および経過時間がそれぞれ  $I_M$ ,  $V_M$ ,  $\tau_d$  である。

すでに述べたように、トランジスタは S. B 突入後、長時間その状態を維持させると特性の劣化や素子の破壊をおこす。これを防ぎ試料を保護するため、S. B 発生に伴うコレクタ・エミッタ間の電圧の降下を検出してサイリスタを働かせ、すみやかに印加電力をとり除くよう考慮した。図4の波形の終端は S. B 発生により印加電力がサイリスタの動作で除去されたことを示している。

われわれはこのような測定方法により、容易に、しかも広範囲にわたる S. B 突入点を測定できる装置を製作した。図5はその外観である。

この装置は特にパワー・トランジスタ用に設計したもので、図6

の斜線で示される範囲のコレクタ電流、電圧における S. B を、遅れ時間  $5 \mu$ s ~  $500$  ms の範囲で測定可能であり、試料の劣化、破壊は数種の保護回路により防止している。

本測定は、トランジスタをパルス印加後すみやかに一次降伏領域の一点に固定するため、遅れ時間:  $\tau_d$  の期間中は一定の電流、電圧条件となる。このため  $\tau_d$  はこの動作点での hot-spot 形成に要する時間をそのまま表わすことになり十分な物理的意味をもつ。正弦波などによりパルスを加える方法では、遅れ時間の期間中、電流、電圧状態が変化するので  $\tau_d$  の物理的意味は薄れる。

#### 4. 拡散ベース形 Ge パワー・トランジスタの S. B 特性

##### 4.1 EB 間順バイアス特性と A. S. O

拡散ベース形ゲルマニウム・パワー・トランジスタについて、エミッターベース間順バイアス条件のもとで S. B 特性を測定した。

図7はその一例である。図において実線は遅れ時間  $\tau_d$  をパラメータにした S. B 突入点軌跡、点線はベース電流:  $I_B$  をパラメータとしたコレクタ電流、電圧軌跡である。

同図に示したこのトランジスタの直流最大定格:  $P_{C, max}$  と比較すると、過渡電力に対しては数倍の耐力が保証されている。A. S. O を決める S. B 突入点軌跡は、S. B エネルギーが一定という仮説から予想されるような直角双曲線ではない。この相違については S. B がコレクタ接合の局部で起こっていることを考慮し、キャリア分布、温度分布の集中、不均一性を見込まなければならず、明確な回答は出されていない。

カット・オフに近い領域で過大電力のかかる回路においては、ベース開放時の S. B 耐量のほかに入力回路抵抗の S. B に対する影響も無視しえない。図8はエミッターベース間に並列に接続された

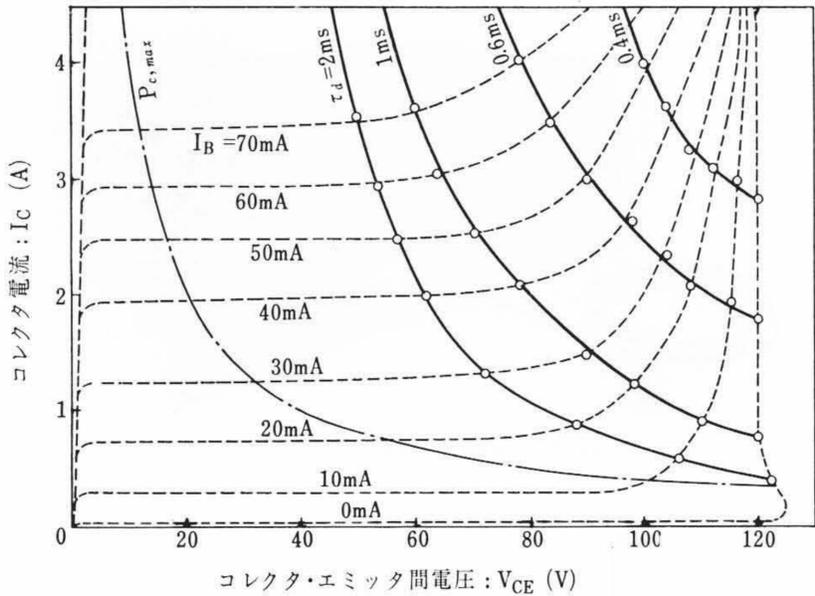


図7 EB間順バイアス時の二次降伏特性

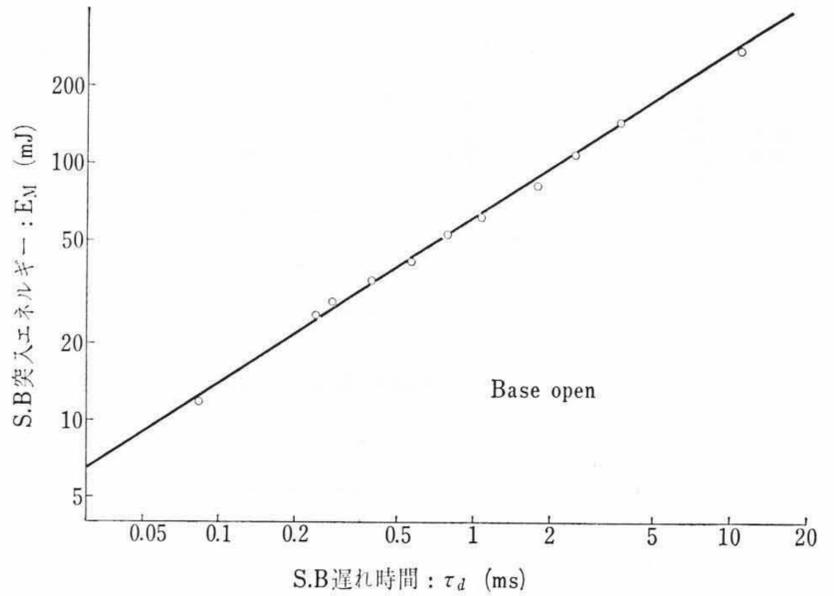


図9 二次降伏(S.B)突入エネルギー:  $E_M$  と遅れ時間:  $\tau_d$  の関係

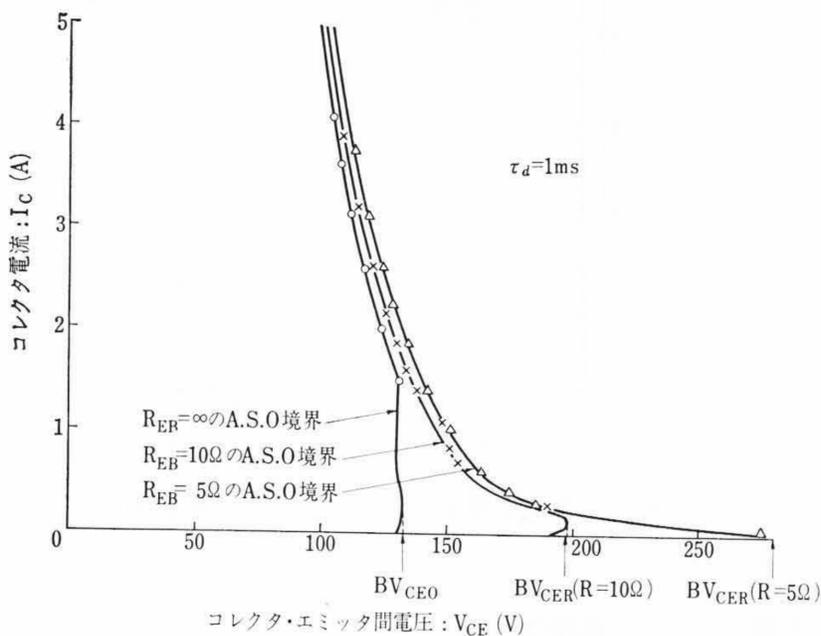


図8 エミッタ・ベース間抵抗:  $R_{EB}$  による安全動作領域 (A.S.O.) 境界の変化

入力回路抵抗:  $R_{EB}$  の S. B への影響を調べた一例である。並列抵抗接続によってブレイク・オーバー電圧が  $BV_{CEO}$  から  $BV_{CER}$  に上がるため、カット・オフに近い領域の A. S. O は広げられるが  $BV_{CEO}$  以下の A. S. O に対してはほとんど変化はみられない。また入力サージ電圧のエネルギーに対する強さから考えると、その電圧値が  $BV_{CER}$  をこえない場合は並列抵抗のない場合よりもより安全となるが、それをこえる場合はより小エネルギーで S. B に突入することになるので危険なことがわかる。

4.2  $V_M, I_M, \tau_d$  の関係

方形波パルス印加による方法では S. B 発生までにトランジスタに加えらるエネルギー:  $E_M$  は、簡単に、

$$E_M = V_M \cdot I_M \cdot \tau_d \dots\dots\dots(1)$$

であらわされる。

S. B が熱的效果であるとすれば、 $E_M$  は S. B 突入条件として重要な量をあらわすであろう。拡散ベース形ゲルマニウム・パワー・トランジスタについて、ベース開放の状態では  $E_M$  と  $\tau_d$  の関係を求めた結果を図9に示す。

$E_M$  は  $\tau_d$  に対して一定とならず、ほぼその2/3乗に比例して増大する。これは hot-spot の形成に起因し、短時間で S. B 突入を行なうときは  $E_M$  はほとんど hot-spot, あるいはその近傍の温度上昇にのみ寄与するのに対し、S. B 突入までに長時間を要した場合においては  $E_M$  により加熱される体積は増大するからである。

4.3 S. B の温度依存性と接合温度

S. B の周囲温度への依存性をベース開放で  $\tau_d$  をパラメータに調

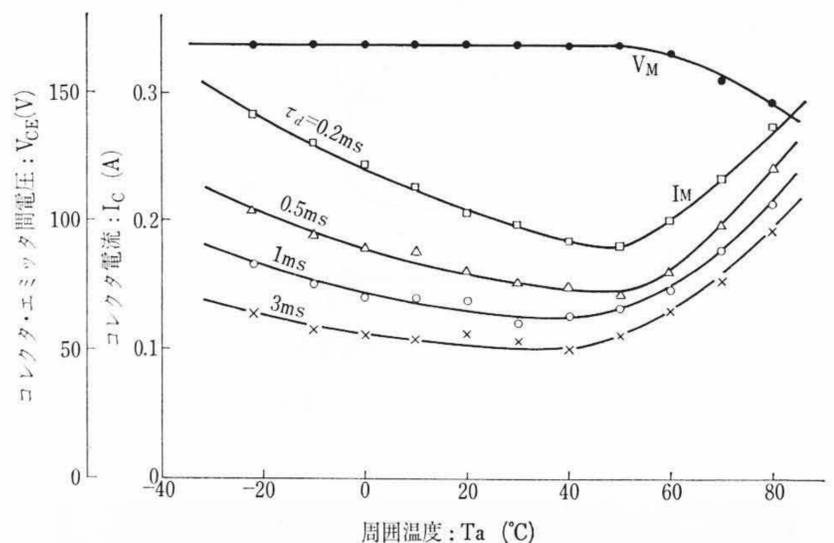


図10  $V_M, I_M$  の周囲温度依存性

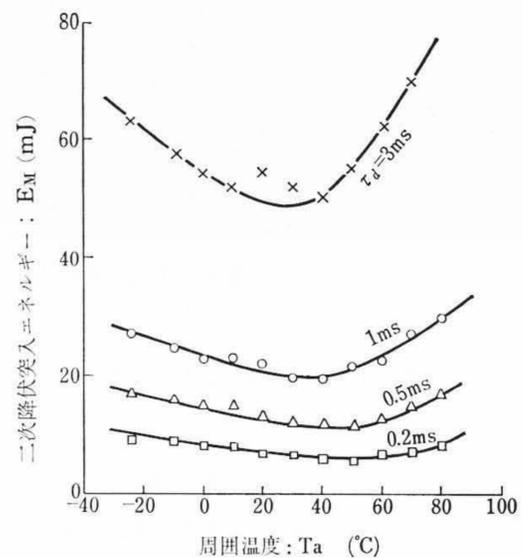


図11  $E_M$  の周囲温度依存性

べた。図10はその結果である。

この試料では  $T_a=40\sim50^\circ\text{C}$  で  $I_M$  が最小値をとる傾向を示している。高い温度域での  $I_M$  の上昇は熱励起電流の増加によるものと考えられる。このことは  $\tau_d$  をパラメータとした  $I_M$  実測値の相互差が高温になるにしたがって小さくなることから理解できる。

図10の結果より、(1)式によって  $E_M$  を計算し、その温度依存性を調べた結果を図11に示す。

$E_M$  はやはり  $T_a=40\sim50^\circ\text{C}$  で最小値を有する特性を示すが、高温域での増大は  $I_M$  の熱励起電流による増大によるものとみなしてよい<sup>(5)</sup>。低温において  $E_M$  が高くなるのは熱的に低いポテンシャルから S. B 所要の温度まで引き上げる必要が生ずるからである。

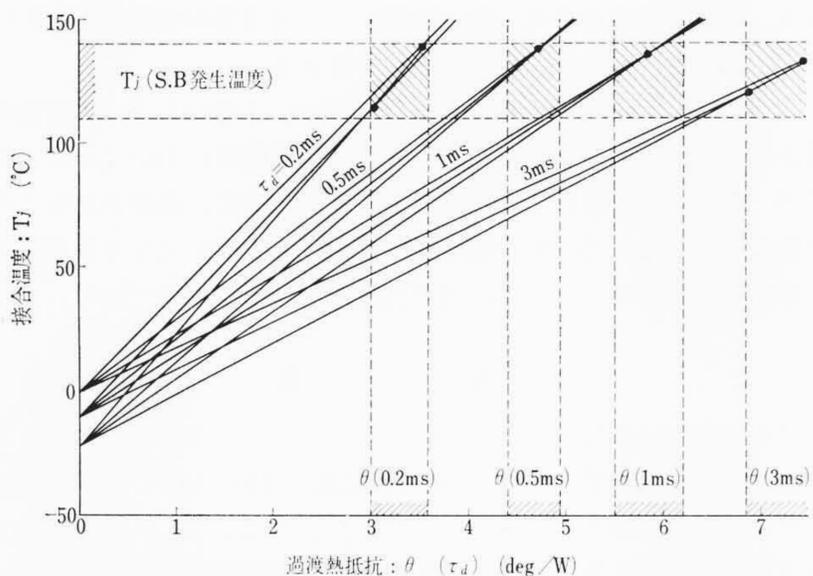


図12 二次降伏(S. B)突入時の接合温度, 過渡熱抵抗の算定

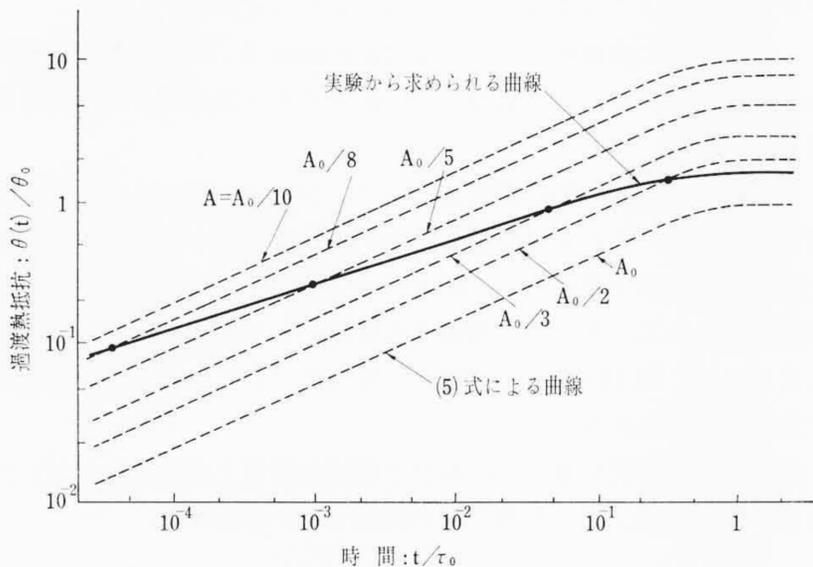


図13 有効加熱面積と過渡熱抵抗変化の関係

これらの事実から S. B 発生時の hot-spot における温度は一定であろうとの推論を得る。この温度値を推定するため印加電力と温度の関係式は(2)式のようになる。

$$T_j - T_a = P_c \cdot \theta(t) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $T_j$ : 接合温度 (°C)

$T_a$ : 周囲温度 (°C)

$P_c$ : 接合消費電力 (W)

$\theta(t)$ : 過渡熱抵抗 (deg/W)

を用いる。

すでに述べたように本測定方法では S. B 突入までの電流, 電圧値はパルス印加直後より一定に保たれるから, S. B 突入のための接合消費電力:  $P_M$  は,

$$P_M = V_M \cdot I_M \dots\dots\dots (3)$$

となる。

(3)式により図10の実測値のうち, 熱励起電流の影響の少ない  $T_a = 0^\circ\text{C}$  以下のものについて各  $\tau_d$  ごとに  $P_M$  を計算し, そのときの  $T_a$  とともに次式に代入して  $\theta(\tau_d)$  と  $T_j$  の関係を求めると図12に示す直線群が得られる。

$$T_j - T_a = P_M \cdot \theta(\tau_d) \dots\dots\dots (4)$$

各  $\tau_d$  に対する直線群はほぼ一定の範囲内に交点を結ぶ。この交点の  $T_j$  および  $\theta(\tau_d)$  が, それぞれの遅れ時間に対する接合温度, および過渡熱抵抗の値となる。

興味深いことは, 各  $\tau_d$  に対する  $T_j$  の値はおおよそ  $110 \sim 140^\circ\text{C}$  の間に分布している。これにより本試料では S. B 突入温度がほぼこの値であることが推定できる。S. B 突入温度はほかの研究者の報告によると基体の不純物伝導から直性伝導への転移温度値に等しいといわれている<sup>(6)</sup>。ここで求められた値は試料のそれに比べて若

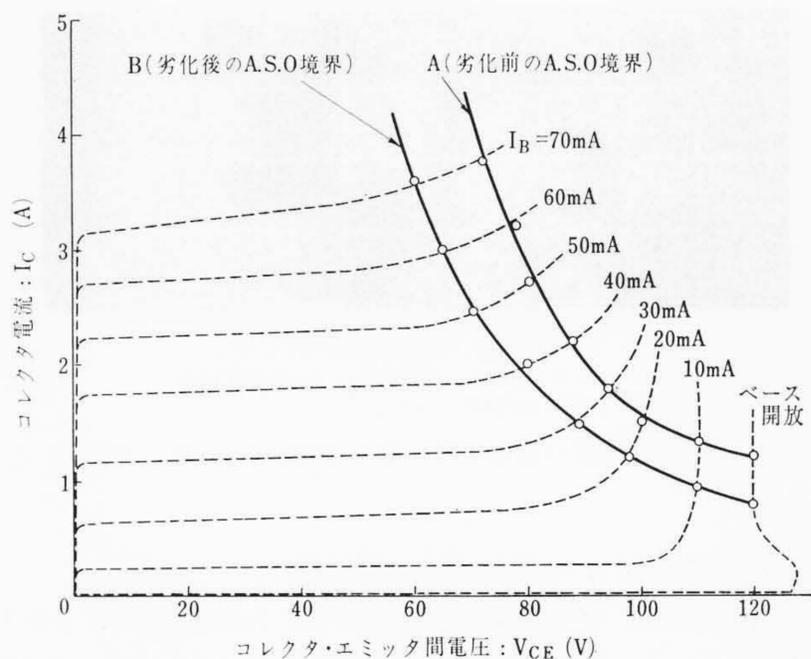


図14 二次降伏に伴う特性劣化

干高いが構造的な因子を含めて考えれば妥当な値であり, 上述の理論を裏づけている。

また  $\theta(\tau_d)$  についてみると  $\tau_d$  が小さいほど小さな値を示しており, その  $\tau_d$  に対する変化の割合は  $\tau_d$  の約  $1/3$  乗に比例する。

こうして得られた  $\theta(\tau_d)$  の値およびその変化は, 低電圧領域で通常求められるものと異なる。すなわち, 低電圧領域では, 過渡熱抵抗はこの時間域で  $0.01 \sim 0.1 \text{ deg/W}$  であり, 変化の割合は時間の約  $1/2$  乗に比例する。これは Mortenson 氏の行なった解析の結果と一致する<sup>(7)</sup>。この相違は hot-spot により生ずると考えられ, 理論的には(5)式に示す Mortenson 氏の解析結果において有効加熱面積:  $A$  を小さくすることで説明できる。すなわち,

$$\theta(t) = \frac{L}{8.36kA} \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{t}{\tau_i}}}{(2i-1)^2} \right] \text{ (deg/W)} \dots (5)^*$$

ここに、 $L$ : モデル・バーの長さの  $1/2$  (cm)

$k$ : 熱伝導率 (cal/s·cm·deg)

$A$ : 加熱面積 (cm<sup>2</sup>)

$\tau_i$ : 熱時定数  $\left( = \left( \frac{2L}{\alpha\pi(2i-1)} \right)^2 \right)$  (s)

$\alpha$ : 熱拡散係数 (cm<sup>2</sup>/s)

において  $A$  を変えた結果は図13に点線で示される。同図上に実線で示した S. B 発生時の過渡熱抵抗の実測値はこれらの点線と交点を作り, 短時間で S. B に突入する際の有効加熱面積が小さくなることわかる。(図では時間, 過渡熱抵抗ともに正規化してある。)

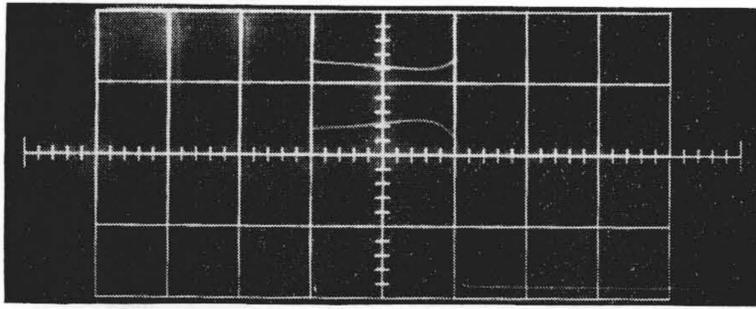
以上のことから低電圧のもとで測定された過渡熱抵抗を用いて S. B に対する設計を行なうことは, 温度上昇を低く見積る危険性があるといえる。

#### 4.4 S. B に伴う特性劣化

S. B 突入後瞬時に入力断ればトランジスタは劣化, 破壊から保護されるが, 比較的長時間降伏状態にとどまり, しかも降伏後の hot-spot の電流密度が大きい場合, トランジスタの S. B 耐量は劣化する。

図14は S. B 特性の劣化の一例を示したもので,  $A$  は図2の回路により完全に劣化, 破壊から保護されたうえで測定された A. S. O 境界,  $B$  は特性劣化後, 再び測定された A. S. O 境界で, いずれも遅れ時間:  $\tau_d$  は  $1 \text{ ms}$  である。特性劣化は, エミッタ・ベース間を短絡した状態で  $V_M = 263 \text{ V}$ ,  $I_M = 0.07 \text{ A}$ ,  $\tau_d = 1 \text{ ms}$  で S. B に入れ,

\* 長さ  $2L$ , 断面積が  $A$  (一定) のバーの両端温度を  $T_a$  (一定) とし, その中央を初期値  $T_a$  から加熱したときの中央部 (接合部に対応) の過渡熱抵抗。



上: コレクタ電流:  $I_C$  (1A/div)  
下: コレクタ・エミッタ間電圧:  $V_{CE}$  (50V/div)  
時間:  $t$  (500 $\mu$ s/div)

図15 接合局部の温度上昇に伴う Avalanche 電圧の変化

以後2 $\mu$ sの間0.1Aの電流を流しておこした。

劣化後のA.S.O境界は等ベース・バイアス曲線に沿って全体的に低下している。このような現象は誘導性負荷のスイッチング回路などで素子が数回S.Bを経験したのちも観測される。A.S.Oの縮小はS.B後の放置状態により接合の一部が変化したためと考えられる。

## 5. 考 察

上記の諸実験の結果から本実験に用いたゲルマニウム・拡散ベース形トランジスタのS.Bは110~140°Cの温度をもつ接合局部のhot-spotで発生していることが明らかである。このようにhot-spotが一定温度に達したときS.Bに突入するという思想はMelchoir氏らも指摘するところで<sup>(6)</sup>、究極のところトランジスタをS.Bに対して安全に動作させるにはコレクタ接合のいかなる個所においてもその温度をこえないようにしなければならない。しかし温度上昇はきわめて局所化されたところでおこるため、その上昇を外部から知ることはきわめて困難である。また過渡熱抵抗を求めて間接的に温度上昇を計算することも図13の結果から安全性に対しては危険な方向となることが予想される。

本実験に用いた測定方法によると、電流が当初よりきわめて集中した状態でS.Bを測定することが可能で、図7に示すように外部ベース抵抗を下げたり、あるいはE.B間を逆バイアスして有効エミッタ面積を小さくするか、電流の絶対値を上げて短時間にS.Bをおこさせることにより電流集中した状態をつくりうる。図15はこのような状態における $V_{CE}$ ,  $I_C$ の波形である。パルス印加時より局部の温度上昇が始まり、Avalanche電圧のそれに伴う上昇がみら

れる。かような波形変化より、当初からの電流集中状態のS.Bに対してある程度の知見を得ることができよう。

S.Bに伴う特性劣化はA.S.Oの縮小、すなわちS.B耐量の減少という形であられる。このことは実用回路において、ひとたびS.Bにトリガされると素子は加速度的に劣化、破壊されることを意味する。またS.Bの測定にあたっては上記の点を十分留意して行なう必要がある。ここに掲げた測定法はその一例である。

## 6. 結 言

ゲルマニウム拡散ベース形パワー・トランジスタについてS.B特性を検討した結果、S.Bが接合の局部で110~140°Cの温度に達したとき発生することが明らかになった。また、S.Bはきわめて小さい局所で起こるが、S.B発生領域での過渡熱抵抗は低電圧の測定で予想されるものよりも相当大きい。このことはA.S.Oの境界が定電力線よりはずれている原因ともなっている。

ここで掲げた直流パルスによるTurn-over S.B測定装置は試料を損傷することなく、広範囲のS.B突入点を測定できるので有効である。

S.B諸特性を簡明に表現し、トランジスタの諸パラメータとの関連を明確にすることは容易ではないが、電流集中と熱的不均一性を考慮して実験を重ねることによりS.B耐量に対し相当明らかな知識が得られると考える。実用上の問題としてはS.Bに伴う特性劣化があり、図14に示した特性の変化については今後さらに検討を加える必要がある。

終わりに本研究を進めるにあたり懇切な助言と援助をいただいた日立製作所武蔵工場、多賀工場の関係各位に深謝する。

## 参 考 文 献

- (1) C. G. Thornton, C. D. Simons: IRE Trans., ED-5, 6 (Jan. 1958)
- (2) H. A. Schafft, J. C. French: IEEE Trans., ED-13, 613 (Aug/Sept. 1966)
- (3) W. Scarlett, W. Schockley: IEEE Intern. Conven. Rec., 11, (pt. 3), 3 (March 1963)
- (4) 半導体研究振興会: 半導体研究 I, 92 (昭39, 産報)
- (5) 笹山: 昭和42年電気四学会連合大会資料, No.1727 (昭42-4)
- (6) H. Melchior, M. J. O. Strutt: Proc. IEEE, 52, 439 (Apr. 1964)
- (7) K. E. Mortenson: Proc. IRE, 45, 504 (Apr. 1957)

### 昭和42年度における日立技術の成果 ——新年特集増大号——

本誌の新年号は、毎年「日立技術の成果」として、愛読者諸兄から多大のご好評をいただいております。昭和43年の新年特集増大号 (Vol. 50, No. 1) も恒例により“昭和42年度における日立技術の成果”号として発行することになりました。

なにとぞ、ひきつづきご愛読くださいますようお願い申し上げます。