

PCM 用ダイオード・トランジスタ

Diodes and Transistors for PCM Use

阿 部 亨* 井 出 重 喜
Tôru Abe Shigeki Ide
辻 伸 浩 海 保 隆
Nobuhiro Tsuji Takashi Kaiho

内 容 梗 概

製造方法の概説、実用範囲内における電気的特性の温度依存性の実測値および素子の信頼度試験結果について述べてある。

本素子は安定した表面処理と十分管理された製造技術により、PCM 用として満足なスイッチ特性を有し、強制寿命試験における Failure Rate $5 \times 10^{-6}/h$ すなわち実用寿命では $10^{-8}/h$ 程度の高信頼度が得られた。本素子の開発に当たって日本電信電話公社通信研究所固体研究室のご指導、ご要求により高信頼度を達成するため信頼度機構および製法について各種の改良が加えられている。

1. 緒 言

PCM 用の半導体素子については、研究当初の 35 年にはまずゲルマニウムドットメサ形の高速スイッチングトランジスタ 2SA247 を開発して試用した。その後信頼度とスイッチ速度の改良を中心に研究試作を続けた結果、本報に述べるシリコンエピタキシャル結晶を用い、プレーナ形処理を行なったトランジスタ 2SC321 ⑩ およびダイオード 1S1219 ⑩ を完成した。この間日立中央研究所および戸塚工場のシステム開発のグループの間に常に密接な連絡を保ち開発を進めた。

PCM 用として特に留意した点をあげると次のとおりである。

- (1) スwitching 素子として所望の高速性能を満たすこと。将来のシステム開発の要求と経済性を考慮しダイオードは t_{rr} 3 ns, トランジスタは t_{sig} 15 ns を基準とした。
- (2) 高信頼であること。端局用のみならず中継用として満足な信頼度を得るため Failure Rate 10^{-8} を基準とした。保証方法としては強制度を 100 とし、実際の強制劣化試験で 10^{-6} を検出することとした。
- (3) 標準化を進めつとめて共通用途に用いられるように考慮した。Comander 用ダイオードなど、特殊用途の素子も同一系統の製法になるようつとめた。なお電子交換系との共用を考え、通信系として統一する計画を進めた。
- (4) チャンネル当たりのシステム原価を満たすため、素子単価は将来にわたり低減見通しを立てて進めることとした。
- (5) つとめて独自の技術を採用できるように考慮した。特に素子表面の安定化処理に関しては、電気的特性がまったく変わらず、回路的には変化のないことから考え、将来プレーナ形に代わる Passivated Mesa 方式も検討しうる余地を残した。

本報告では特に信頼度を重視して代表的な開発 2 品種に関し、まず製法をおもに説明する。次に各種強制寿命試験の結果を述べる。

なお、PCM にはこのほか、22 品種のトランジスタおよびダイオードが用いられているが、これらの代表品種についても信頼度に関し強制試験と長期にわたる実用試験との対応について説明する。

これら素子の信頼度向上を達成するには、開発当初はまず実際の強制劣化試験で合否を判定しながらこれを指針として改良を重ねるわけであるが、この間に得た基本的な問題を現象的に究明することがきわめて重要である。現在中央研究所の基礎研究グループとともに

* 日立製作所武蔵工場

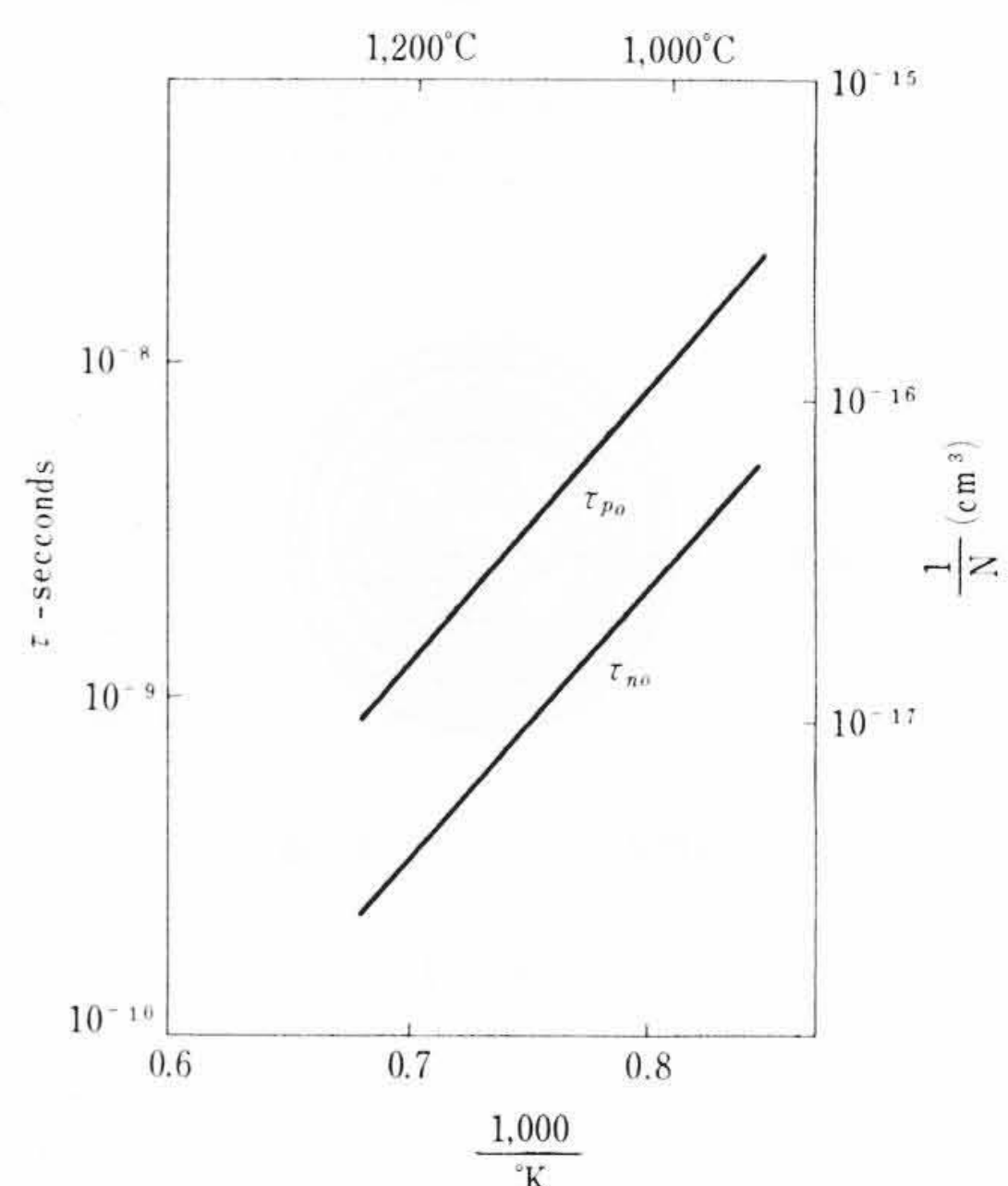
に素子表面の Passivation あるいは Epitaxial 結晶などについて進めている。しかし一方信頼度を維持するには、実際作業にたずさわるひとりびとりの作業員の訓練と厳密な工程品質管理を伴わねばならない。このようにして得た品質は最終的には field data との対応結果を得なければならないと考える。

2. 設 計 の 概 要

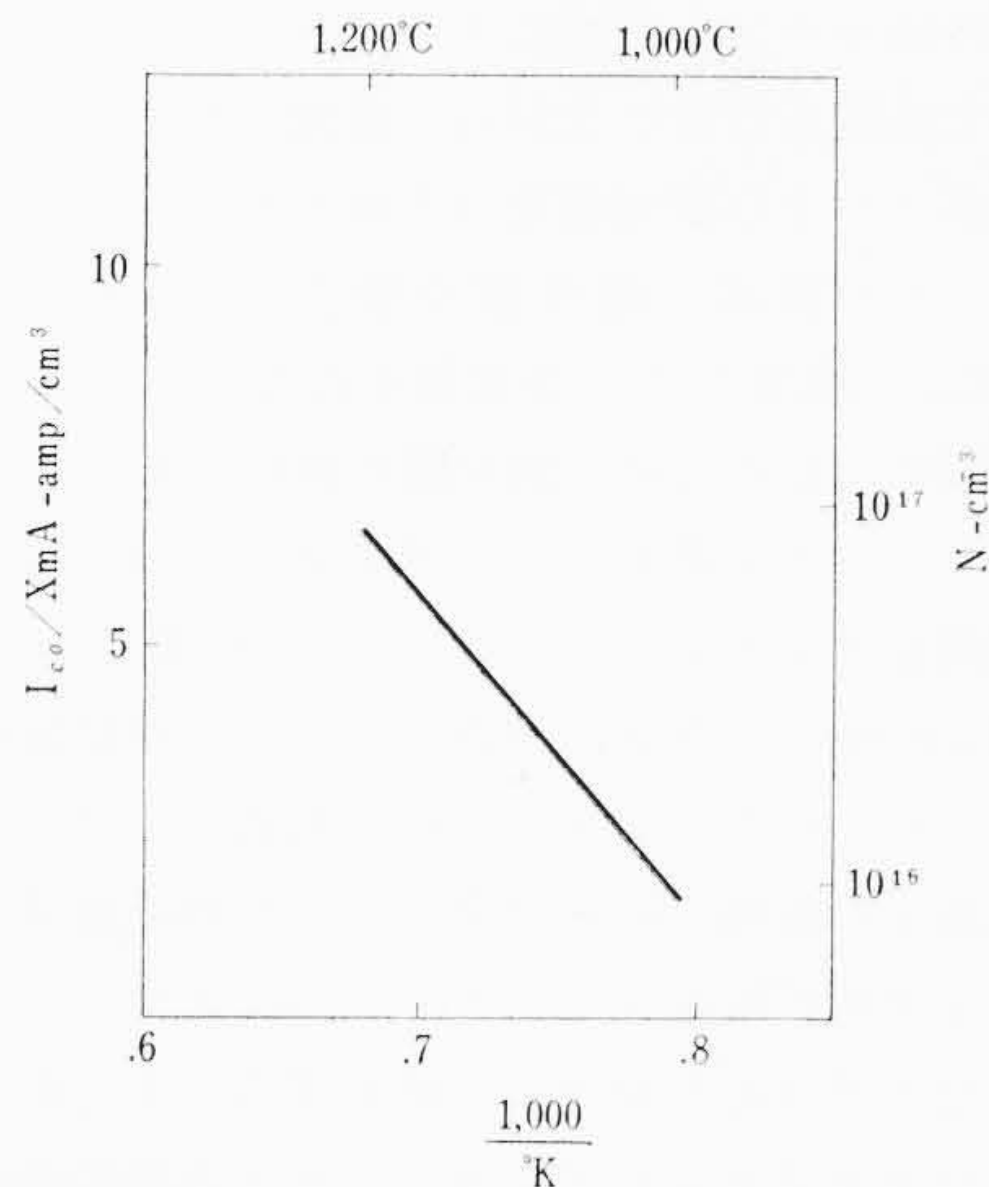
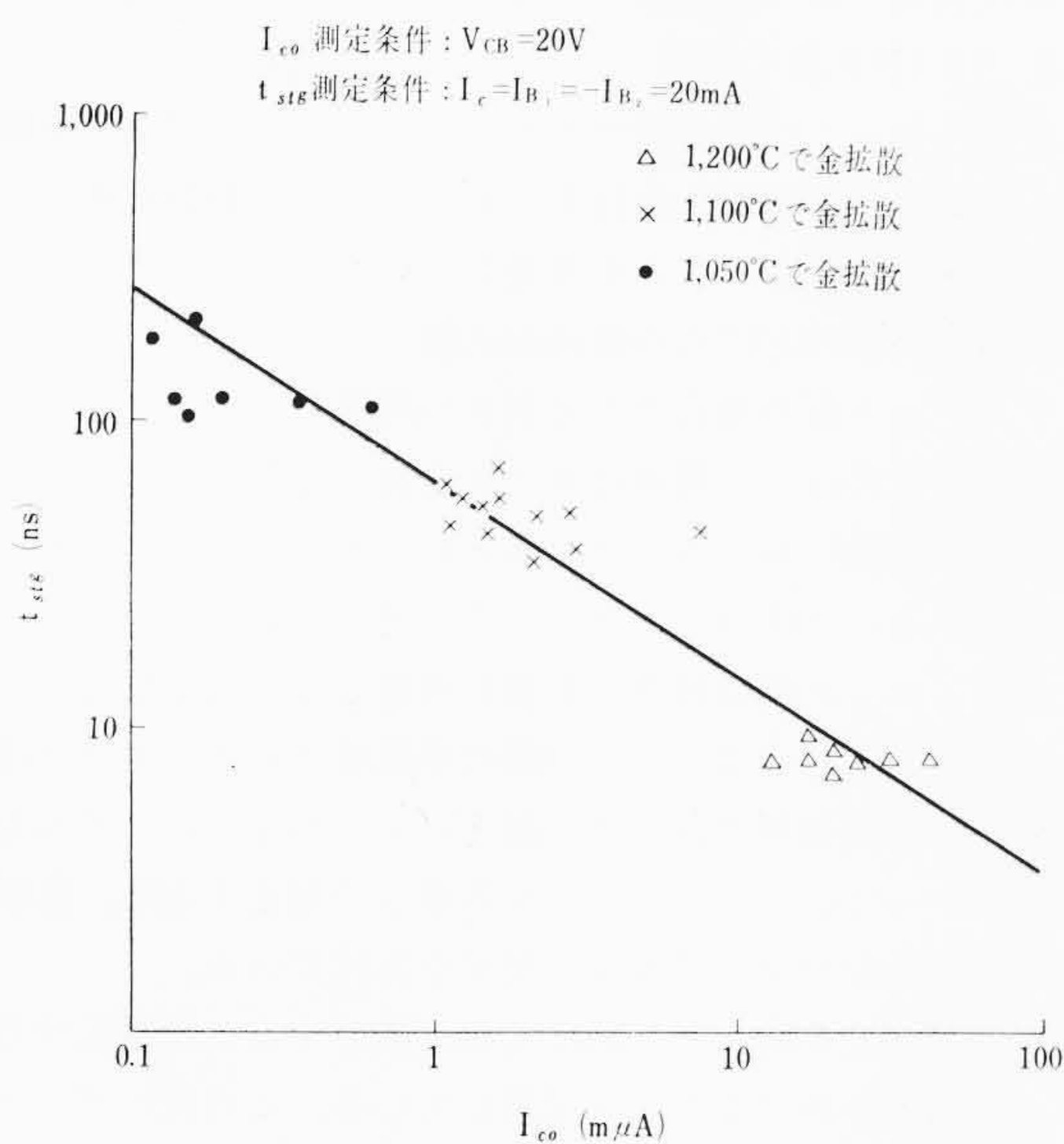
スイッチ素子として考えるべきことはパルス特性・遮断特性および飽和特性が良好であることに加えて、信頼度特性が高いことである。高信頼度を達成するには目標特性をもつ素子の設計開発力によることはもちろんであるが、その工場がもつ製造技術の総合力により決まるのである。ここではまず基本的なスイッチ素子設計の骨子を説明する。

パルス特性はダイオードでは逆回復時間、トランジスタでは蓄積時間の測定により評価されるが、これらの値を小さくするためにシリコン結晶中に少数キャリア捕獲の不純物（一般には金）を拡散する。スイッチ速度を左右する金不純物は 0.54 eV と 0.35 eV の二つのトラップレベルを持ち、P 形と N 形シリコンの比抵抗を変えるので、金濃度は他の電気特性にも影響することになる。スイッチ素子設計の要点はスイッチ速度と他の電気特性の調整をどのように決めるかにあるといっても過言でない。

n または P 形結晶に注入された正孔または電子の寿命は金濃度 (N) が大きいほど小さくなる⁽¹⁾ (第 1 図参照)。



第 1 図 τ_{p0} , τ_{n0} および金濃度—金拡散温度の関係⁽¹⁾

第2図 金濃度および遮断電流—金拡散温度の関係⁽²⁾

(測定試料 2SC321⑩)

第3図 蓄積時間 (t_{stg})—遮断電流 (I_{c0}) の関係

$$\tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_{p0} v_p N}$$

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_{n0} v_n N}$$

 τ_{p0} , τ_{n0} : 正孔および電子寿命 σ_{p0} , σ_{n0} : 正孔および電子捕獲断面積 v_p , v_n : 熱平衡状態の正孔および電子速度

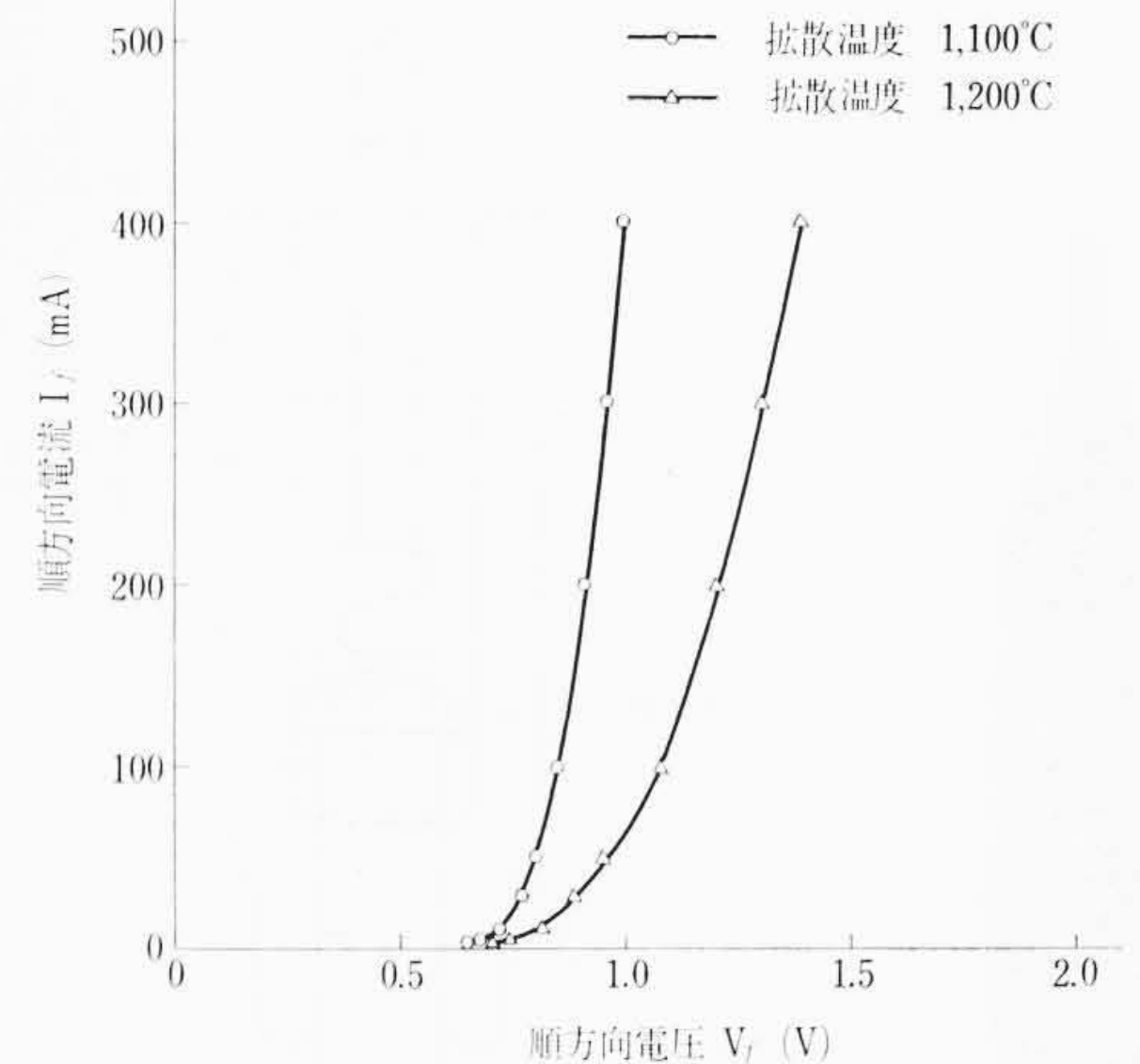
しかるに、金を拡散した P-N 接合部の遮断電流 (I_R) は金濃度が
高いほど大きくなる⁽²⁾(第2図参照)。

$$I_R = q X_m A \frac{n_i}{\tau_{n0} + \tau_{p0}}$$

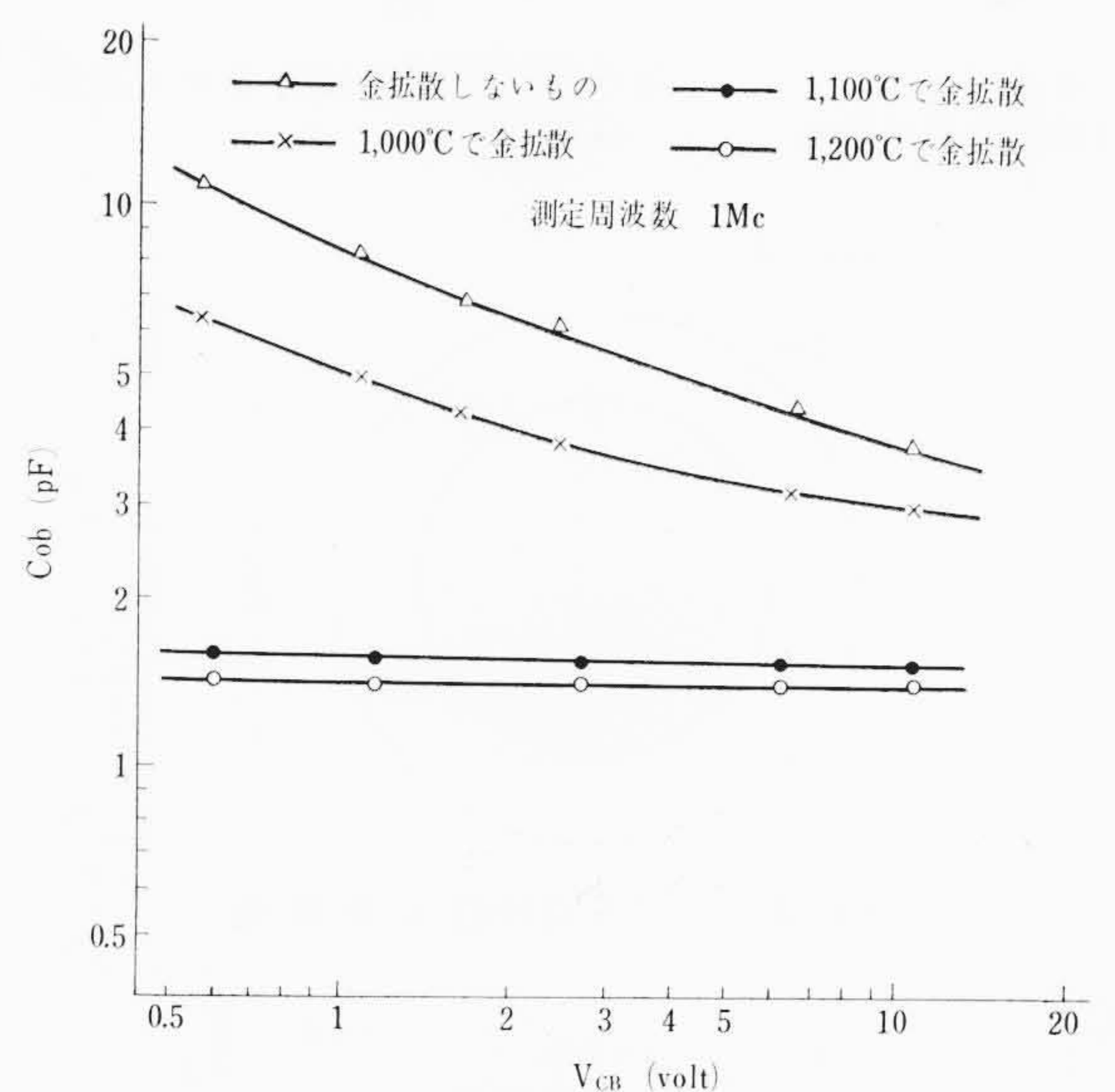
 X_m : 空間電荷領域の厚さ A : 接合面積 n_i : 真性領域電子正孔密度

このようにパルス特性と遮断特性とは相反関係にあり、逆回復時間と遮断電流との実測値を第3図に示す。

パルス特性が設計値と異なる場合の主要原因は、 $10^{16} \sim 10^{17}$ 個/cc 入れた金が有効に働らく金イオンとして結晶中に分布していないためであり、金拡散終了時の急冷処理・金拡散後の拡散条件およびエピタキシャル層の積層欠陥の影響などの製造技術に注意すべきである。

金拡散時間を 60 分としたとき拡散温度による V_f - I_f 特性の変化を示す。
(測定試料 1S1219⑩)

第4図 金拡散温度と順方向特性

エピタキシャル層比抵抗 $1 \Omega\text{-cm}$ エピタキシャル層厚さ 10μ

(測定試料 2SC321⑩)

第5図 金拡散温度と C_{ob} の関係

飽和特性に最も寄与する拡がり抵抗は、エピタキシャル結晶を使用することにより飽和抵抗を小さくすることができるが、高い金濃度は同一比抵抗の結晶では飽和抵抗を大きくし、パルス特性と飽和特性も相反関係にある。この性質をダイオードの順方向特性により第4図に示す。ペレット付きなどの組立技術にも注意する必要があり、熱抵抗の減少と相まって許容損失を有効に利用し動作寿命の信頼度を高める。

接合容量も金濃度が大きくなるに従い小さくなり、しかも電圧依存性も減少する傾向にある(第5図参照)。

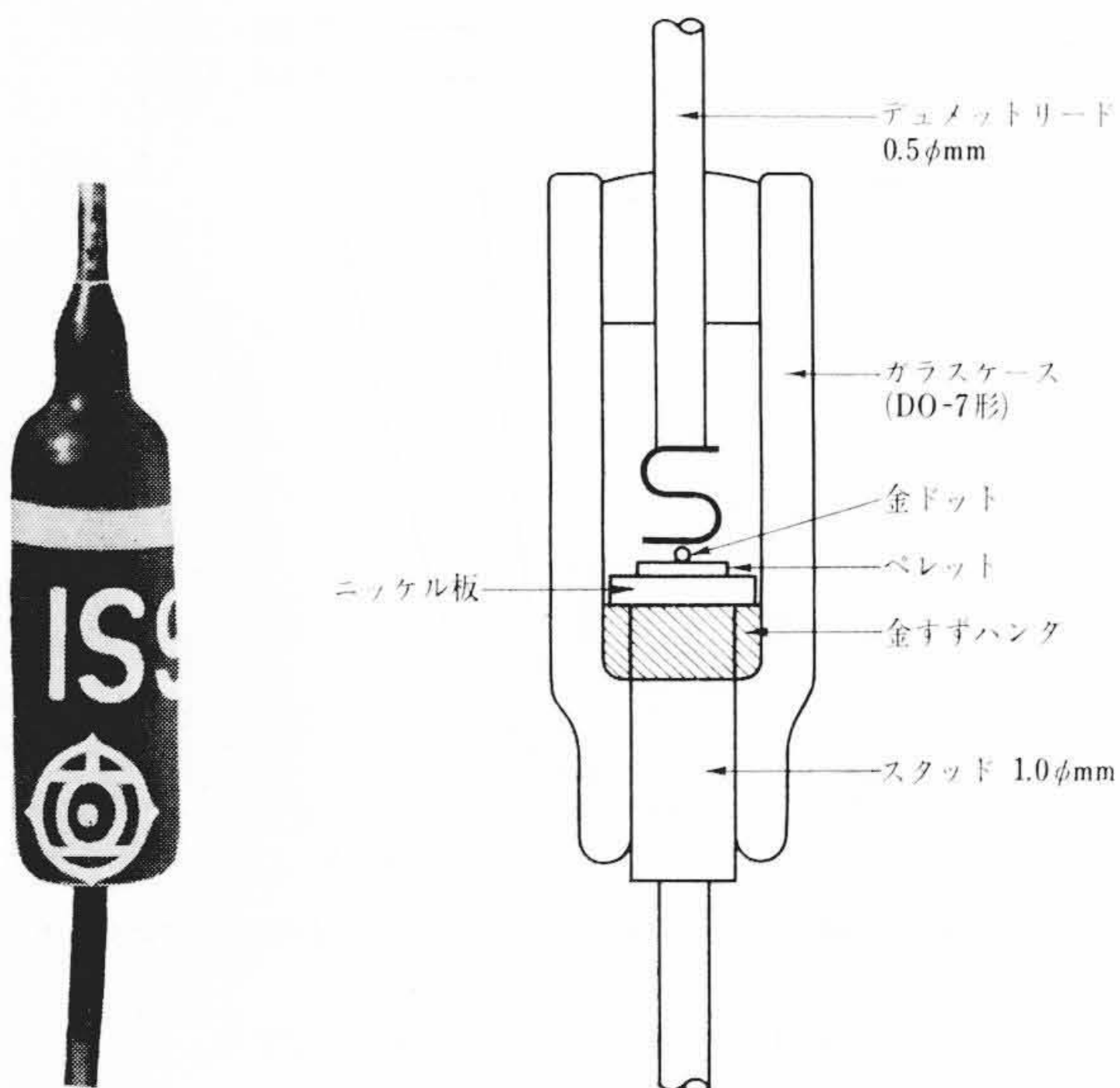
高信頼度を保証するために拡散完了ウェーハ工程と組立完了工程における十分なエージング処理を施す必要がある。プレーナ処理に対しては安定した表面が得られるという通念があるが、特に強制動作寿命試験および高温放置寿命試験における電流増幅率の減少や遮断電流の思わぬ増加の原因が表面チャンネル層に起因することがあるので Planar Passivation 処理には特別の注意が必要である。

3. 製造方法

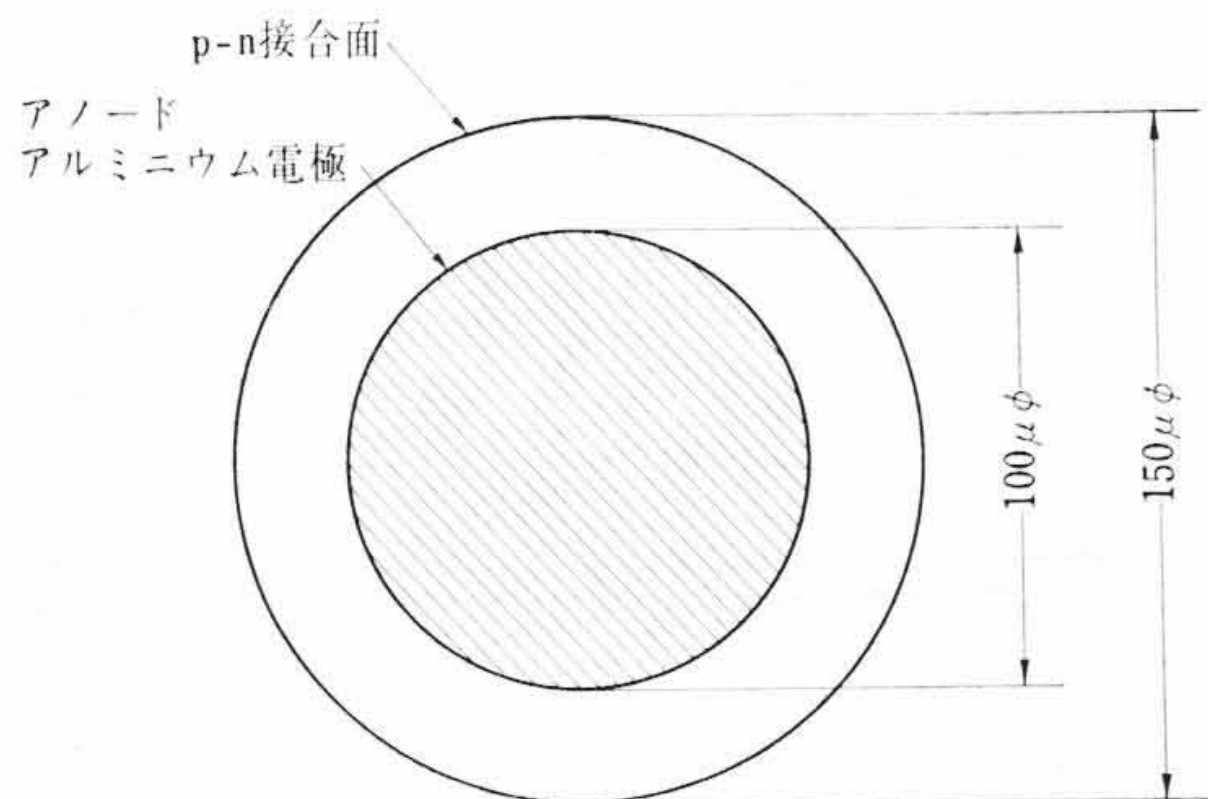
3.1 ダイオード (1S1219 ⑩)

3.1.1 製造技術

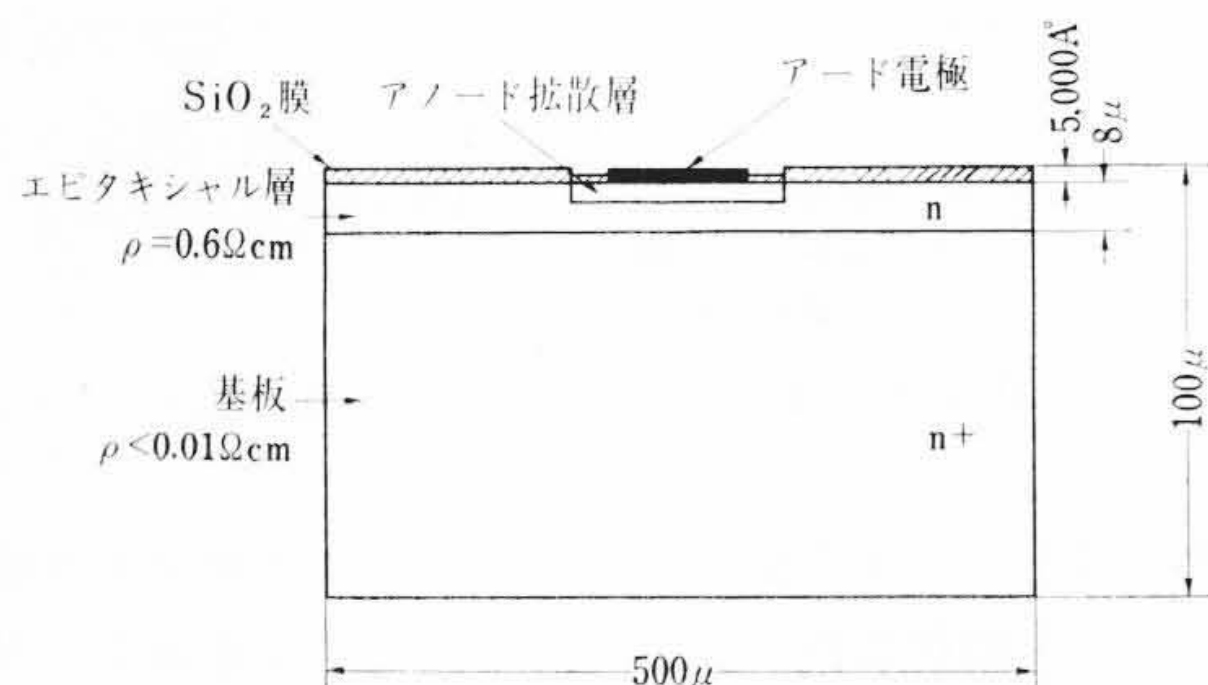
第6図に 1S1219⑩の外観および構造を示す。製造工程のフロ



第6図(a) 1S1219 ⑩ 外観写真
第6図(b) 1S1219 ⑩ 断面構造 (DO-7形)



第6図(c) 1S1219 ⑩ 電極構造



第6図(d) 1S1219 ⑩ ペレット断面構造



第7図 1S1219 ⑩ 製造工程フローチャート

ーチャートを第7図に掲げる。N形エピタキシャルウエーハを1,200℃酸素ふん囲気中で酸化し、厚さ8,000Åの酸化膜を作る。光彫刻の技術を用い円形(直径150μ)に酸化膜を除去し、酸化膜のマスク効果を利用して選択的にボロン拡散を行ない、その部分をP形に変換せしめアノードを形成させる。ボロン拡散は白金ボックスによるB₂O₃の気相拡散法を用いる。まず970℃窒素ふん

囲気中で短時間ボロンを表面にデポジションし、次に1,200℃酸素ふん囲気中で拡散を行ないながら、表面を酸化する。このとき拡散層の拡散深さおよび表面濃度はそれぞれ約4μ, 5×10¹⁸cm⁻³となる。ウエーハの裏面の酸化膜を除去し、金蒸着を行なった後1,100℃酸素ふん囲気中で、金拡散を行なう。光彫刻技術を用いアノード電極取出しのために酸化膜に直径100μの穴をあける。さらにアルミニウムを蒸着、メタライズし電極を形成する。メタライズ後裏面をエッチングし、ウエーハの厚さを100μにした後、0.5×0.5mmの大きさに分割しペレットの状態にする。ペレットは金メッキされたニッケル円板に溶着し、アノード側のアルミニウム電極上に直径150μの金ドットを熱圧着する。ドット付終了後のニッケル円板をガラスケース内に入れ、スタッドとニッケル板とを金スズはんだを用いて溶着する。あらかじめガラスビードの付いたコネクタリードをガラスケース内に入れ、タングステンヒータで加熱しガラスビードとケースを溶着封止する。最後に厳重な検査を経て完成品とする。

3.1.2 1S1219 ⑩ の特長

このダイオードは高信頼性ダイオードとして、プレーナ構造をしている。さらに信頼性を向上させるために、製造技術上および部品の吟味上特に次のことを考慮している。

強制寿命試験における高温高湿試験については明らかに、ガラスとデュメット線の溶着の不完全さが問題となるので、この部品の検査を厳重に行ない精密なリーク検査を行なっている。

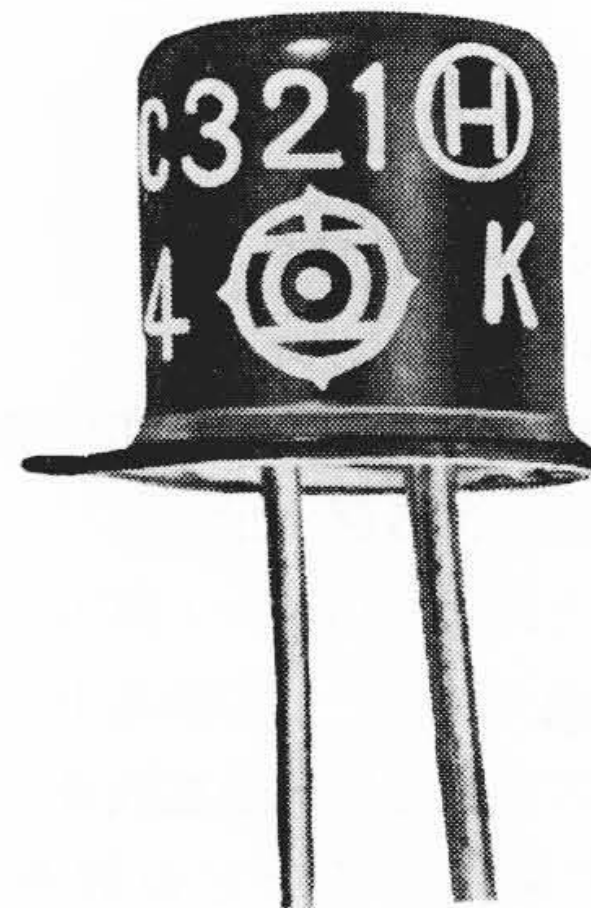
高温放置試験における不良内容としてガラス封止ダイオードの場合注意することはガラスクラックの発生である。これはガラスおよびデュメット線の材質、形状を考慮しなければならないが、最も注意を要する点は、封止の際の熱履歴である。ガラスは400～500℃の温度範囲で急冷する際その中にかなりのひずみを残すことがわかっている。このことを考慮して封止する際、自動的に徐冷する方法を行っており、効果をあげている。

機械的な強度を向上し、耐圧劣化を無くするには封止する際コネクタに荷重をかける方法を採用している。この種のダイオードの封止方法として、コネクタをソフトスプリングとし接合部へ軽く接触させる方法では断線しやすく好ましい方法とはいえない。われわれの採用した加圧する方法においても封止時、加熱によるコネクタの弾性の変化に注意しコネクタ材質を選ぶ必要がある。鉄ニッケル合金が望ましい。すべての製品は厳密な品質管理のもとに製造されている。最終工程として厳密な全数検査を行ない、さらにロット別に動作エージング試験、衝撃試験など各種の強制試験を行ない信頼度の確認をする。以上が高信頼ダイオードとして特に考慮された事柄の概要である。

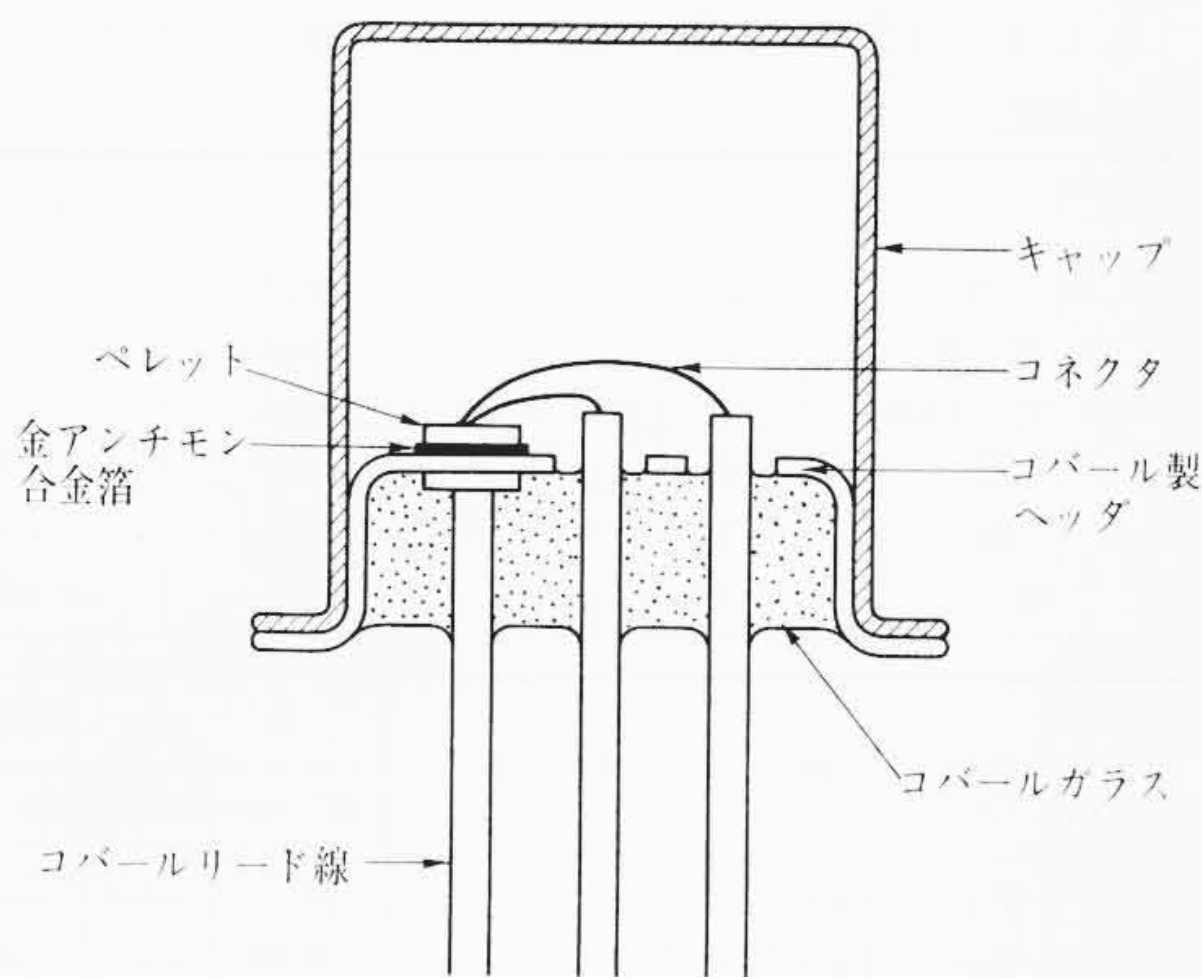
3.2 トランジスタ (2SC321 ⑩)

3.2.1 製造技術

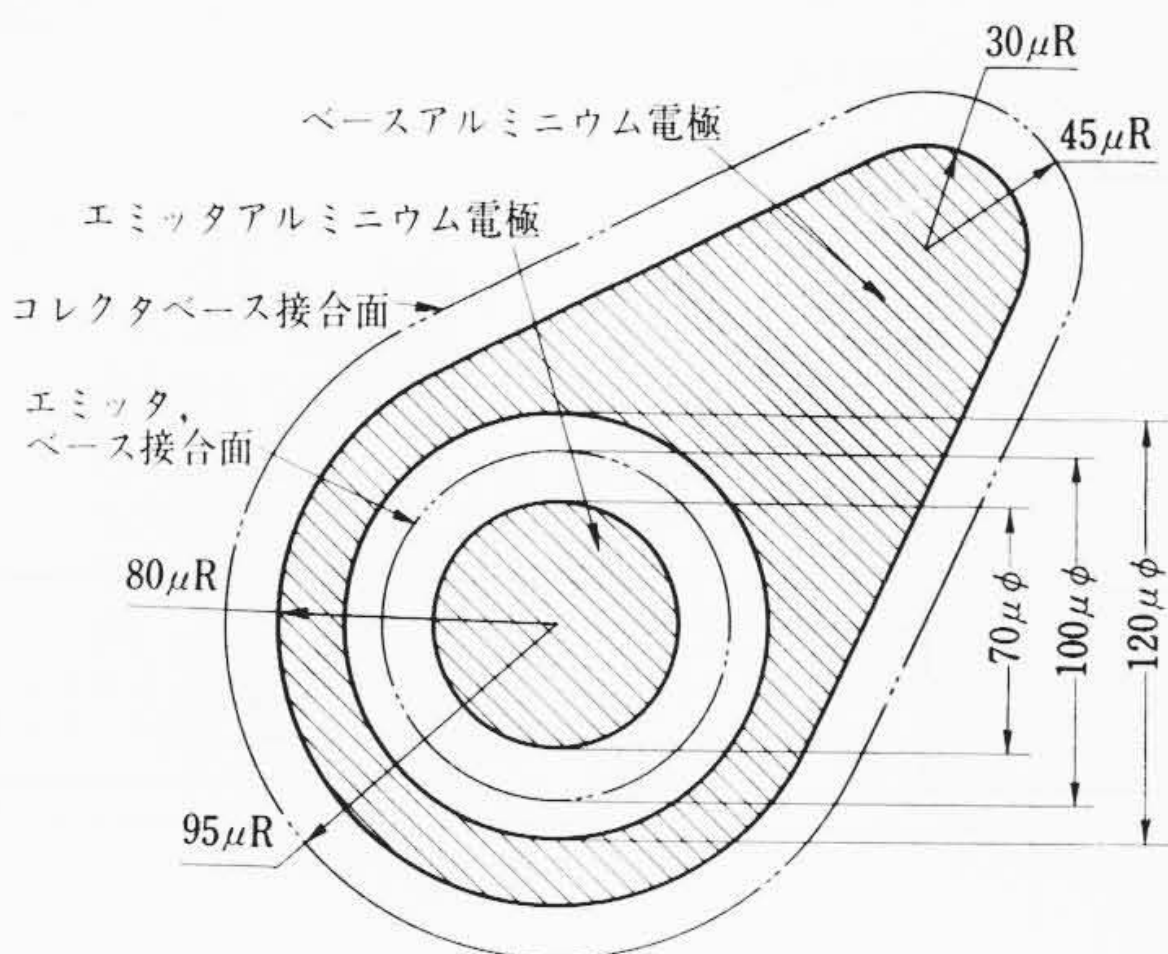
第8図に2SC321 ⑩の外観および構造を示す。製造工程のフ



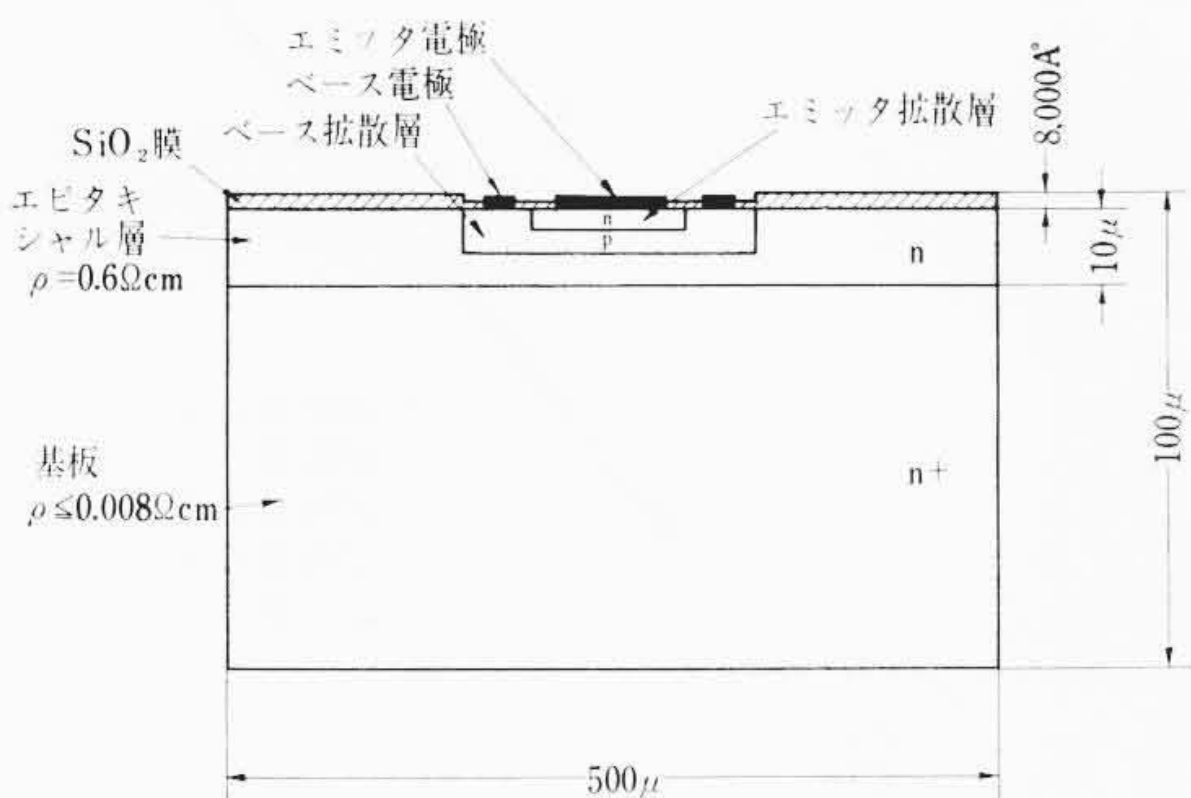
第8図(a) 2SC321 ⑩ 外観写真



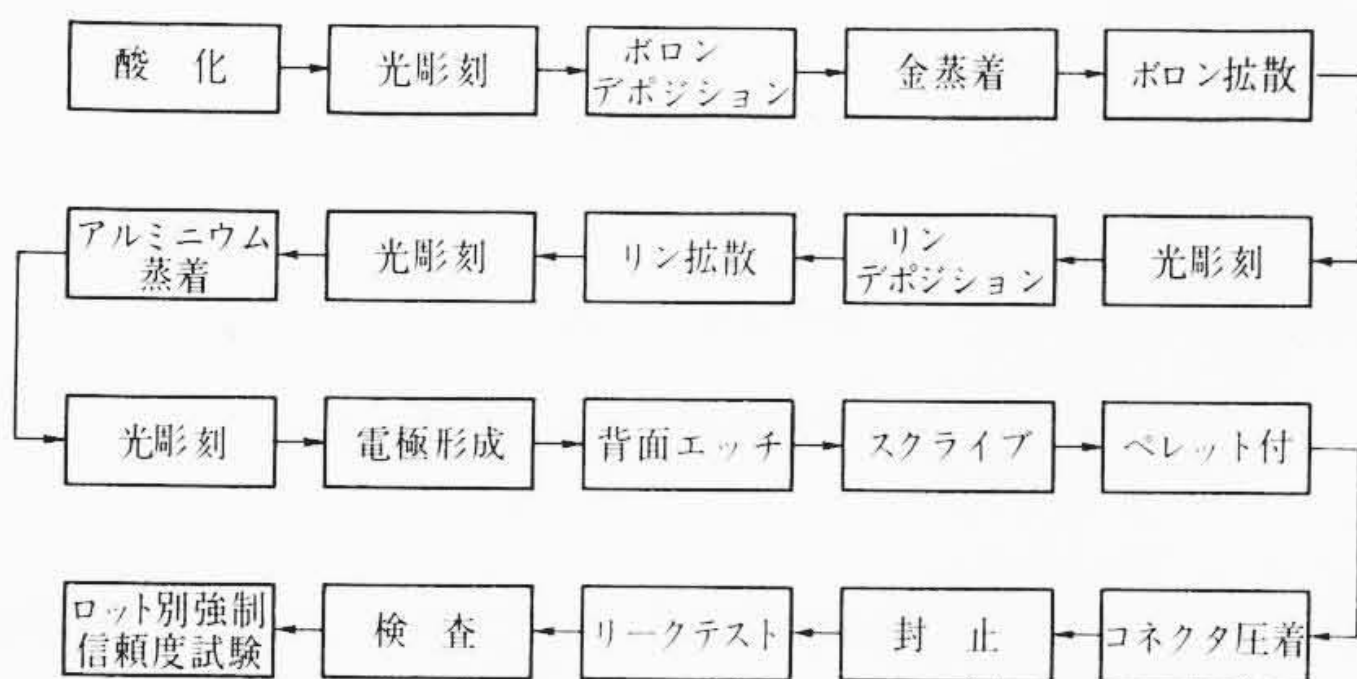
第8図(b) 2SC321 ⑩ 断面構造図(TO-18形)



第8図(c) 2SC321 ⑩ 電極構造



第8図(d) 2SC321 ⑩ ペレット断面構造



第9図 2SC321 ⑩ 製造工程フローチャート

ローチャートを第9図に掲げる。ダイオードのアノード形成と同じ方法を用いて拡散深さ 2.5μ 表面比抵抗 $200\Omega/\square$ のP形ベース層を作る。光彫刻技術を用いてベース表面に穴をあける。次に $1,100^\circ\text{C}$ でリンを拡散し深さ 1.6μ のN形エミッタ層を形成する。ふたたび光彫刻技術によりベース、エミッタ両表面の酸化膜に穴をあけ全面にアルミニウムを真空蒸着し、穴をあけた部分だけを残してアルミニウムを取り去る。さらに高温でアルミニウムシリ

コンの合金化を行ない電極付を完成する。P形のベースはもちろんN形のエミッタもリン濃度が非常に高いため良好なオーム接合ができる。このようにして1枚のシリコンウェーハ上に約1,000個の素子が同時に製作される。次にカッターで1個1個に分割する。組立はまず 450°C に加熱した金メッキシステムの上に素子のをせAu-Siの共晶を利用して溶着したあとステムリードとアルミニウム電極との間にいわゆる熱圧着法によりアルミニウム線を連絡する。次いで高温で表面の安定化を行なったあと直ちに封止される。封止気密に対しては液中でのリークテストによりまずリーク大のものを除きさらにラジフロリークテストを行ない、 10^{-9}cc/s 以上のリークを除去する。

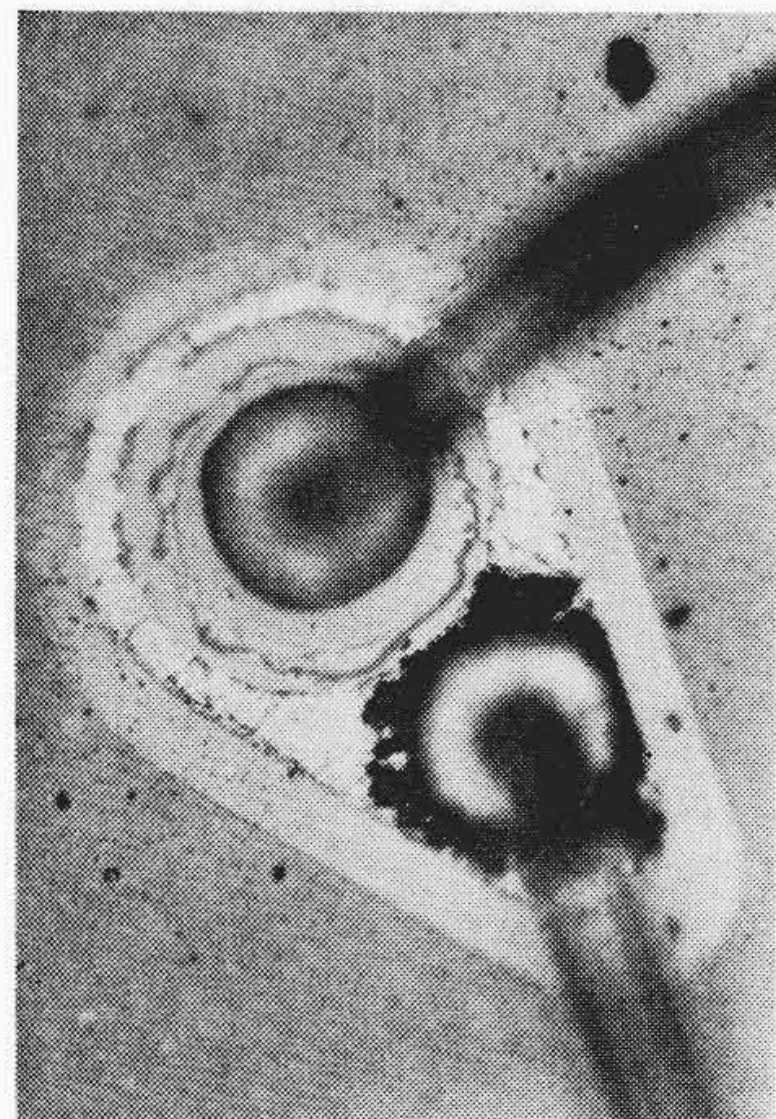
3.2.2 2SC321 ⑩ の特長

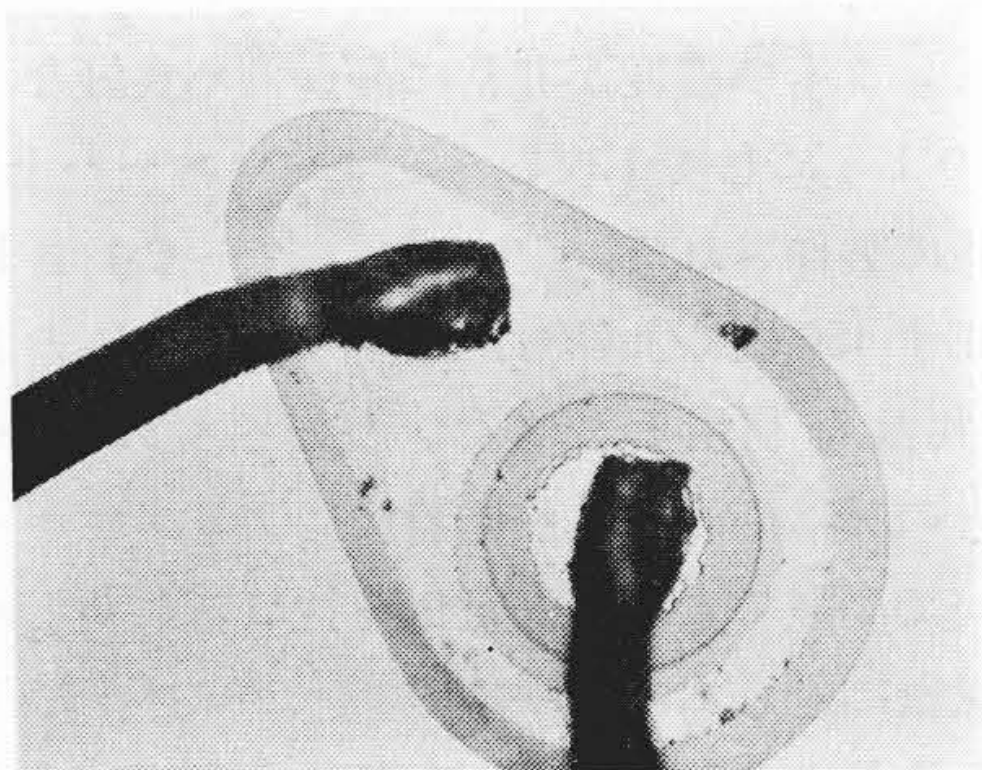
(1) 表面 Passivation

ストライプ構造のプレーナトランジスタでは、ベース層と SiO_2 の境界付近は高温動作中にn変換を起こしやすくエミッタとコレクタ間にN形のチャンネルができやすい。また反対にコレクタ表面にPチャンネルを形成しコレクタ耐圧の低下、逆電流の増加などを伴う場合がある。2SC321 ⑩ では Planar 処理およびそれ以降の工程で厳密な管理を行ない、表面層の Passivation 特性の安定を図った。このため高温での動作も安定している。

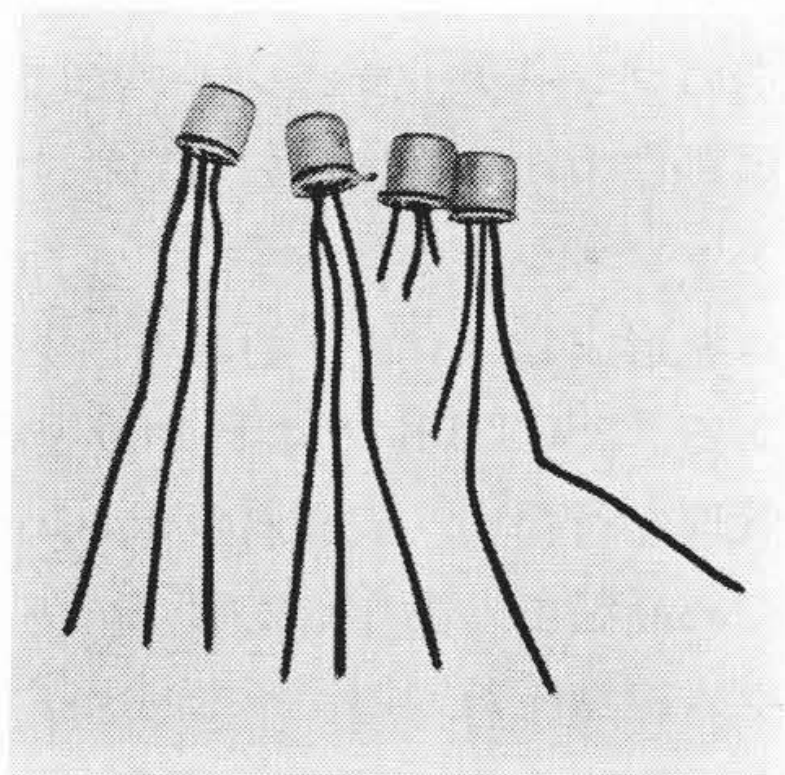
(2) アルミニウム線熱圧着

ステムポストと電極間のリード線としては数十μの太さの金線が一般には用いられている。ステップストレス試験あるいは強制寿命試験などで素子の信頼度を推定する方法が行なわれるようになり、 300°C あるいはそれ以上の温度にさらされると金線を使用したものは第10図に示すようにアルミニウム電極と金線との間に purple plaque を生ずることが知られている。高温下で purple plaque は時間とともに生長し接触抵抗が増大したり、さらにはしばしば断線を生ずる。この解決方法としてアルミニウム線の使用が考えられるが、周知のとおりアルミニウムの表面はきわめて酸化されやすく従来の熱圧着法では金線と同程度の圧着強度を得ることが困難であった。2SC321 ⑩ では、圧着時に超音波振動を加えてアルミニウム酸化被膜を破り素地と接着させることにより金線と同程度の強度を得ることができた。第11図は超音波圧着法によって組立てた 2SC321 ⑩ を 300°C 中に500時間放置したあとのものである。なおアルミニウム線を使ってもステムのポストに金メッキがほどこされておりここで同様の劣化が考えられるが、電極の場合が黒色に近い purple plaque に対しポストは紫色で発生も前者より遅い。また後者は発生してもなお機械的強度は前者

第10図 $25\mu\phi$ の金線で組立て 300°C 中に650時間放置したもの。ベース電極に黒く広がっているのが Purple Plaque



第11図 25 $\mu\phi$ のアルミニウム線を超音波圧着法によって電極につけ 300℃ 中に 500 時間放置したもの



第12図 80℃ 相対湿度 95% 以上の高温高湿中に 1,000 時間放置したあとのすずメッキ品 (左 2 本) と金メッキ品 (右 2 本)

ほど劣化しないことがわかっている⁽³⁾⁽⁴⁾。これらの差は前者が Al-Au に Si が加わった現象であるのに対し、後者は結晶性の AuAl₂ であろうと考えられている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また AuAl₂ は 300°K で比抵抗 $8 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ くらいの伝導性の良い物質である⁽⁶⁾。

(3) Sn メッキ

金メッキをしたシステムを高温高湿下に長時間放置しておくとき金のイオン化傾向が低いためメッキのピンホールあるいは割れなどの部分で局部電池の現象が起こり、リード線素地は著しく腐食される。金メッキなどでピンホールを完全に防ぐことは困難で、できてなおリード線を曲げたときにメッキのき裂ができる。2SC 321 ⑩ では完成したトランジスタ全体に Sn メッキを 5~10 μ かけることによって高温高湿中でも十分耐えうるものが可能になった。第12図は 80℃ で相対湿度 95% 以上のふん囲気中に 1,000 時間放置したあとの金メッキ品および Sn メッキ品の写真である。

4. 電気的特性

4.1 1S1219 ⑩ の電気的特性

規格表を第1表に示す。論理用、クランプ用およびコンパンダー用ダイオードとして十分な特性をもっている。

ここでは、実際に使用する場合に必要と思われるいろいろな特性のうち、おもに温度特性に重点をおいて紹介する。

4.1.1 I_R 特性

I_R 特性はダイオード遮断時の漏えい電流であるから、静的動作の設計に必要な特性の一つである。 I_R の温度特性を第13図に示す。高温側でバラツキが少なくなる傾向は 2SC 321 ⑩ の I_{CBO} より著しい。

4.1.2 V_F 特性

順方向電圧 V_F の温度特性を第14図に示す。この傾斜は約 $-1.9 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ である。

4.1.3 t_{rr} 特性

逆回復時間はスイッチング特性として最も必要な特性の一つで

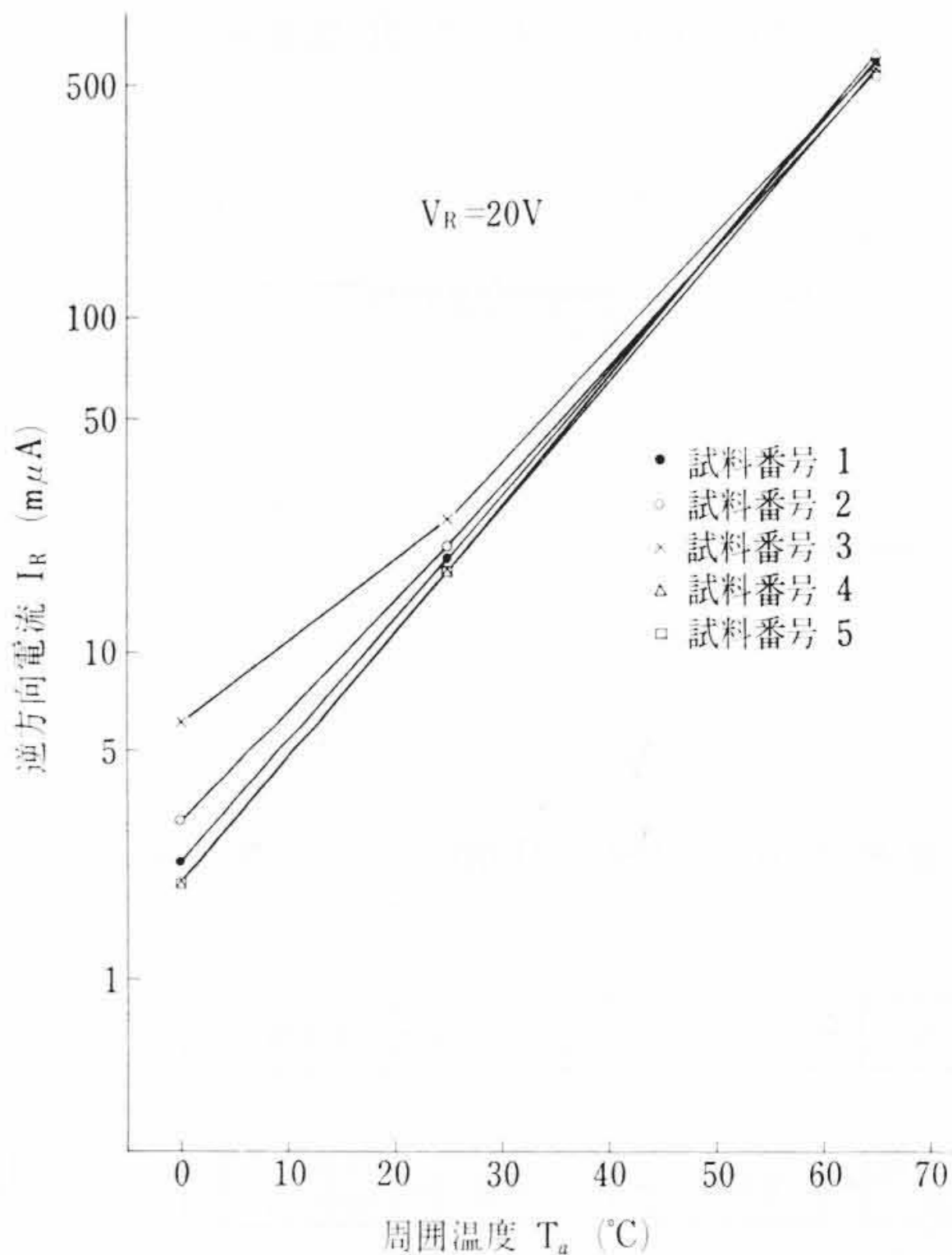
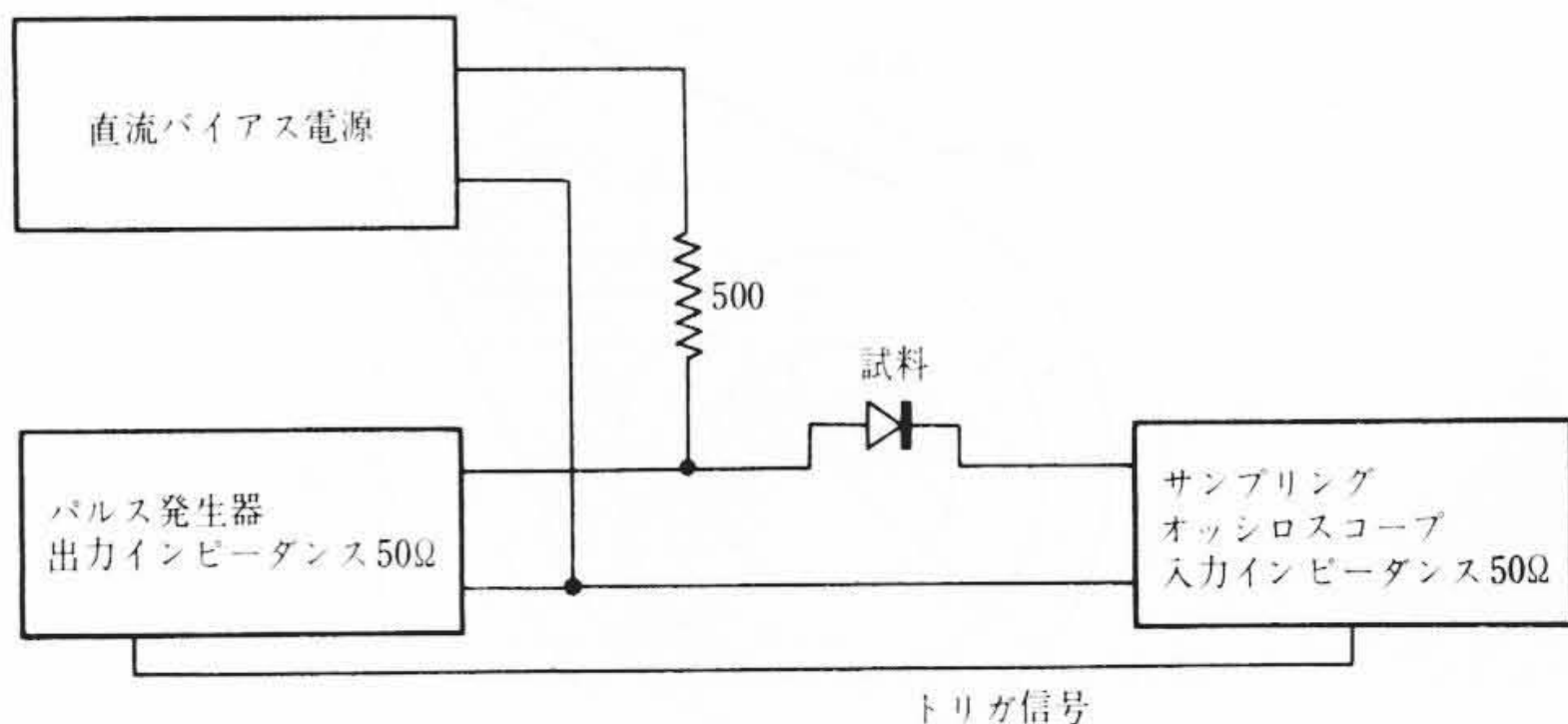
第1表 1S1219 ⑩ の最大定格と電気的特性

最大定格 ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

項目	記号	単位	定格
平均整流電流	I_0	mA	100
繰返しせん頭電流	i_f	mA	300
サージ電流 (1sec)	i_f (サージ)	mA	500
接合部損失	P	mW	250
接合部温度	T_j	℃	175
保存温度	T_{stg}	℃	-65~200

項目	記号	測定条件	特性値			単位
			最小	標準	最大	
逆方向電圧	V_R	$I_R = 5 \mu\text{A}$	30	—	—	V
順方向電圧	V_F	$I_F = 10 \text{ mA}$	0.64	—	0.8	V
逆方向電流	I_R	$V_R = 20 \text{ V}$	—	—	100	mA
逆回復時間	t_{rr}	$I_F = I_R = 10 \text{ mA}$ (注) $I_R = 1 \text{ mA}$ に回復する時間	—	—	4	ns
容量	C	$V_R = 1 \text{ V}$ $f = 1 \text{ Mc}$	—	—	3.5	PF

注：(1) t_{rr} 測定回路下記



第13図 1S1219 ⑩ の I_R の温度特性

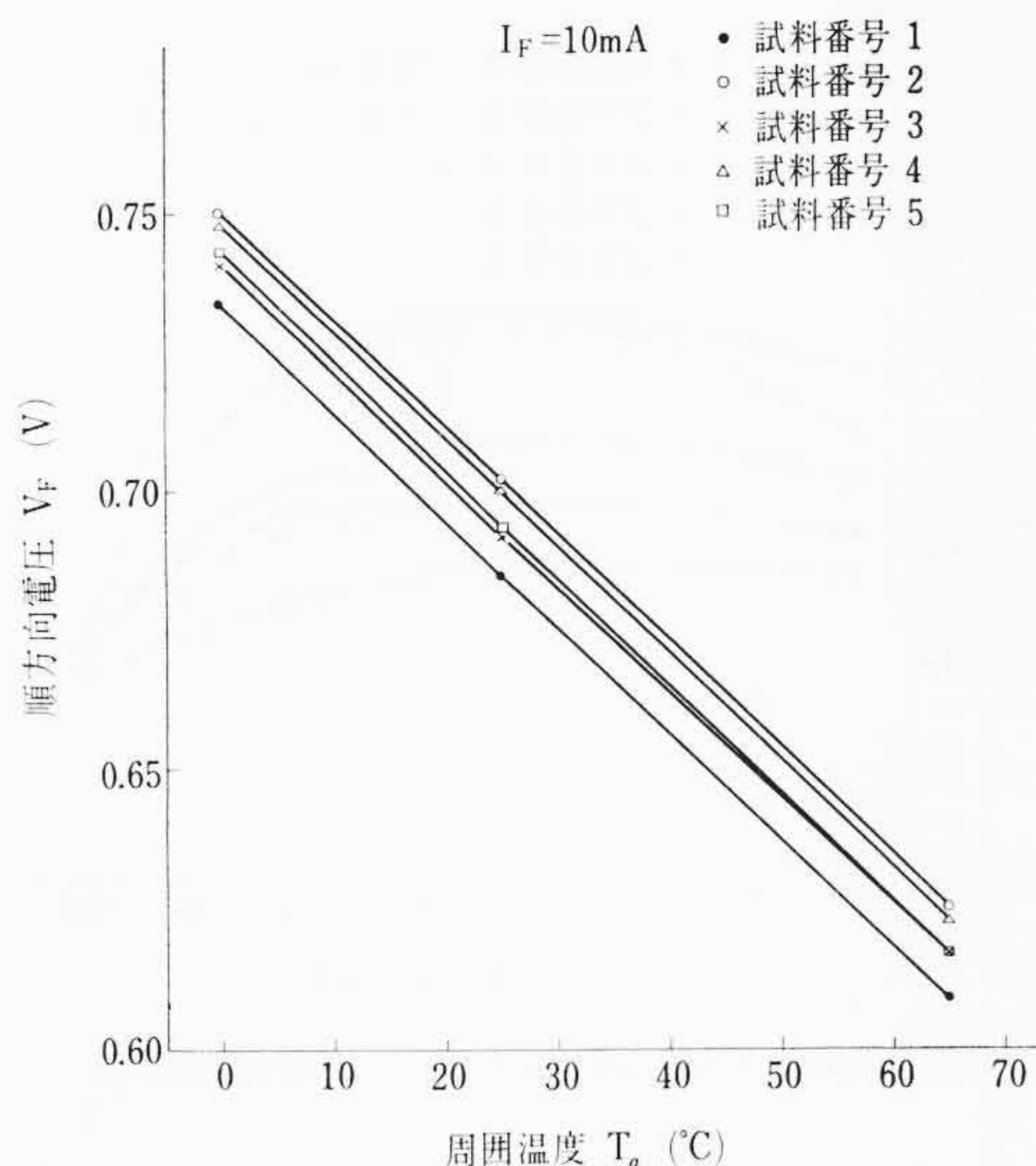
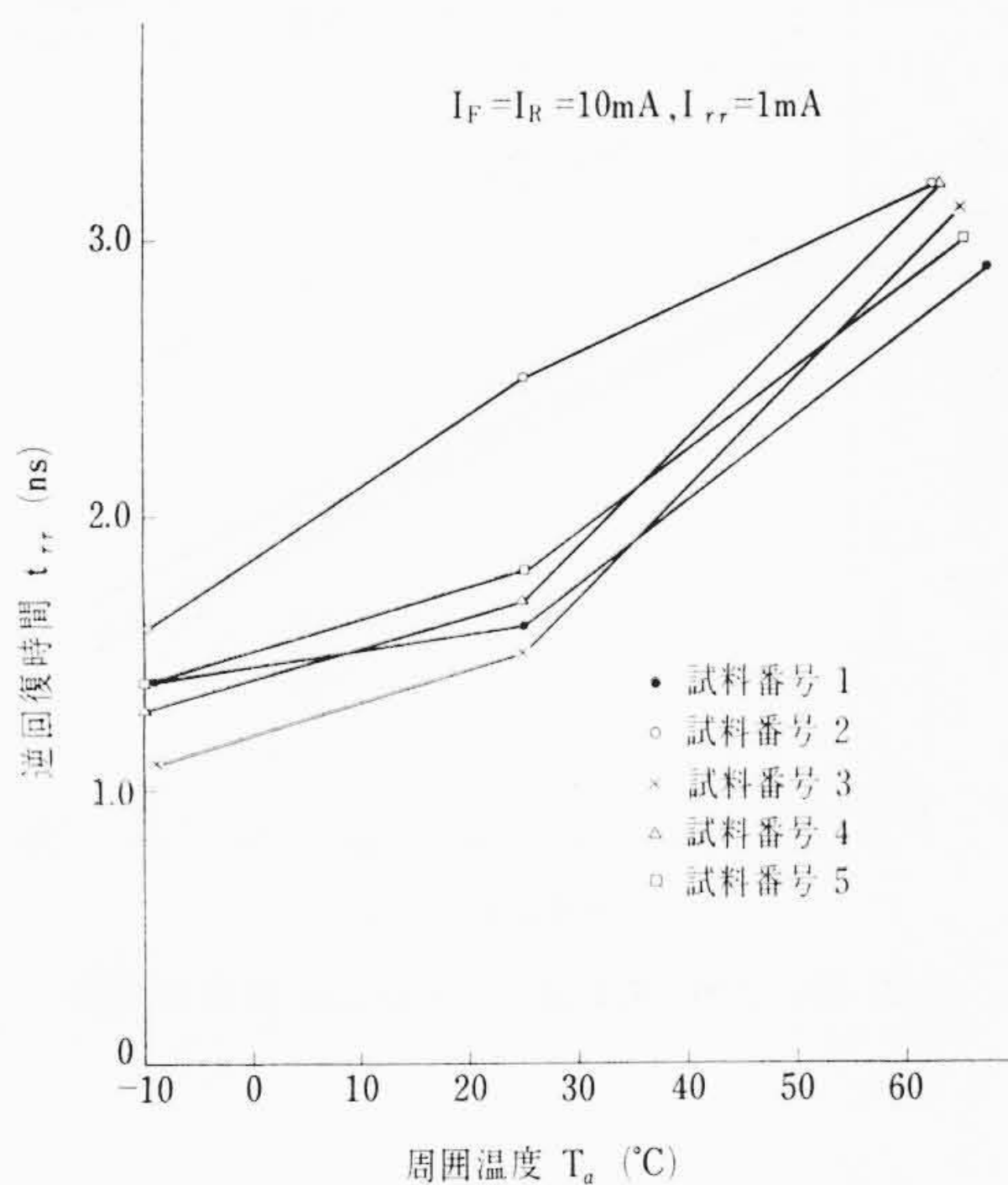
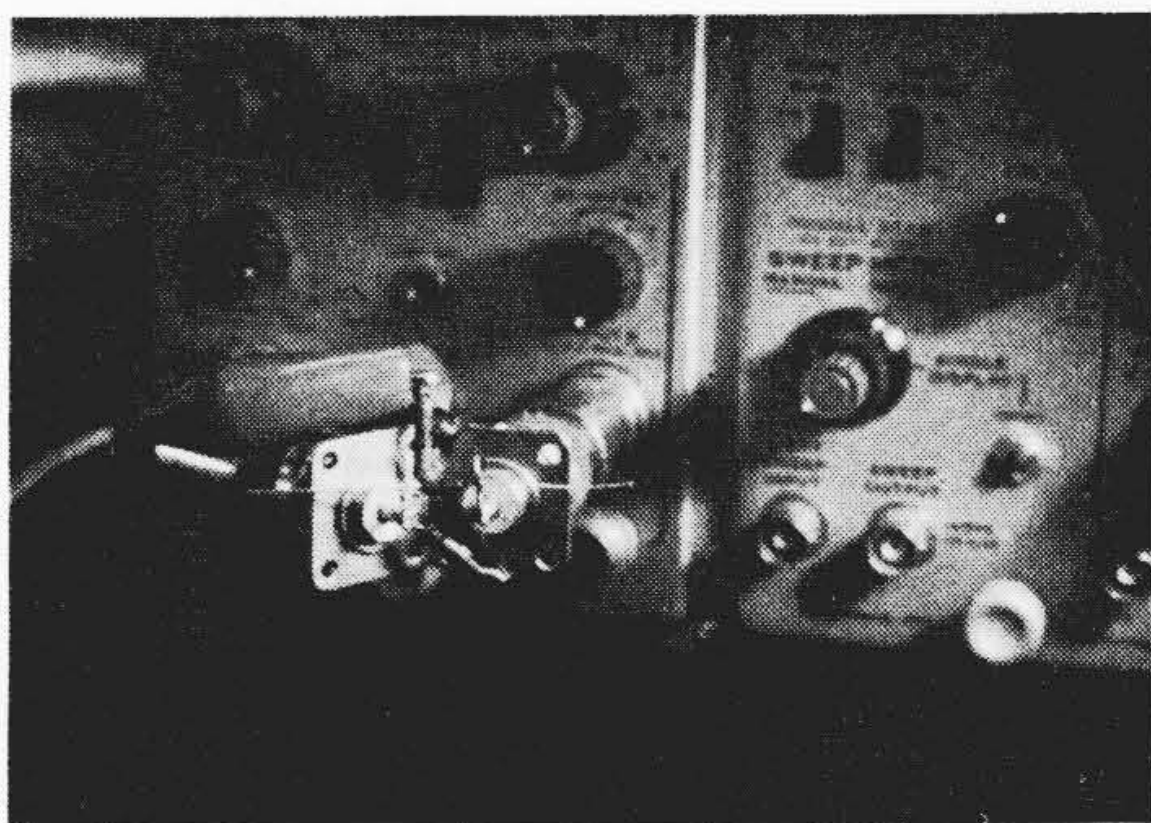
ある。この温度特性を第15図に示す。この t_{rr} の測定回路図は第1表に示されており、その測定装置を第16図に示す。

4.1.4 C 特性

接合容量 C も DTL の場合 fan out の数を制限する大きな要素である。 C の温度特性を第17図に示す。ダイオードの場合エピタキシャルプレーナ形だけでなく、メサ形でもはっきりした温度依存性を示している。

4.2 2SC 321 ⑩ の電気的特性

規格を第2表に示す。10 Mc 程度までの飽和スイッチ用として最適である。もちろん電流スイッチ回路でさらに高速スイッチングを行なわせることができる。この場合も許容コレクタ損失が同程度の

第 14 図 1S1219 ⑧ の V_F の温度特性第 15 図 1S1219 ⑧ の t_{rr} の温度特性第 16 図 1S1219 ⑧ の t_{rr} 測定装置

Ge トランジスタの 2 倍以上あるので余裕をもった回路設計が可能である。ここでもトランジスタ特性の温度依存性について述べる。

4.2.1 I_{CBO} 特性

シリコントランジスタの本来の I_{CBO} は非常に小さい。しかし、エピタキシャル層をベース領域に用いる形では、結晶欠陥の多少により I_{CBO} の値が大きく影響される。スイッチング用途では後に述べるような $V_{BE(off)}$ というような規定のほうが遮断特性を示すには実際のではあるけれども、もっと一般的に見てトランジスタのできの良さを見るのに重要な特性の一つである。さて、この

第 2 表 2S321 ⑧ の最大定格と電気的特性

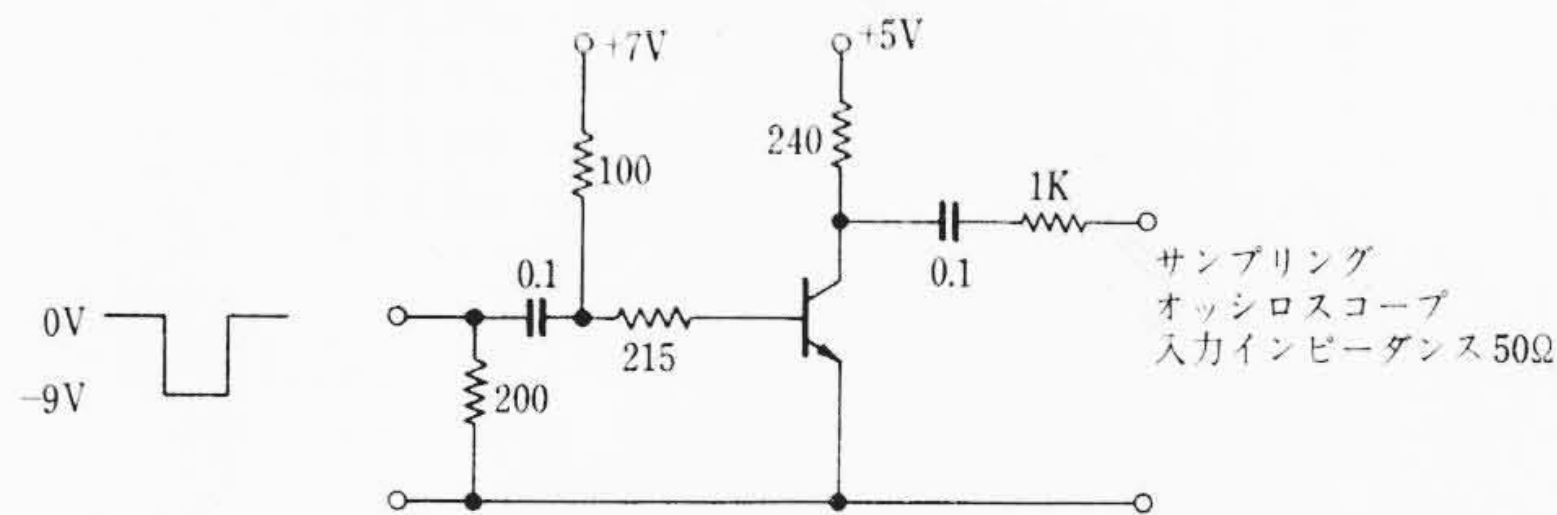
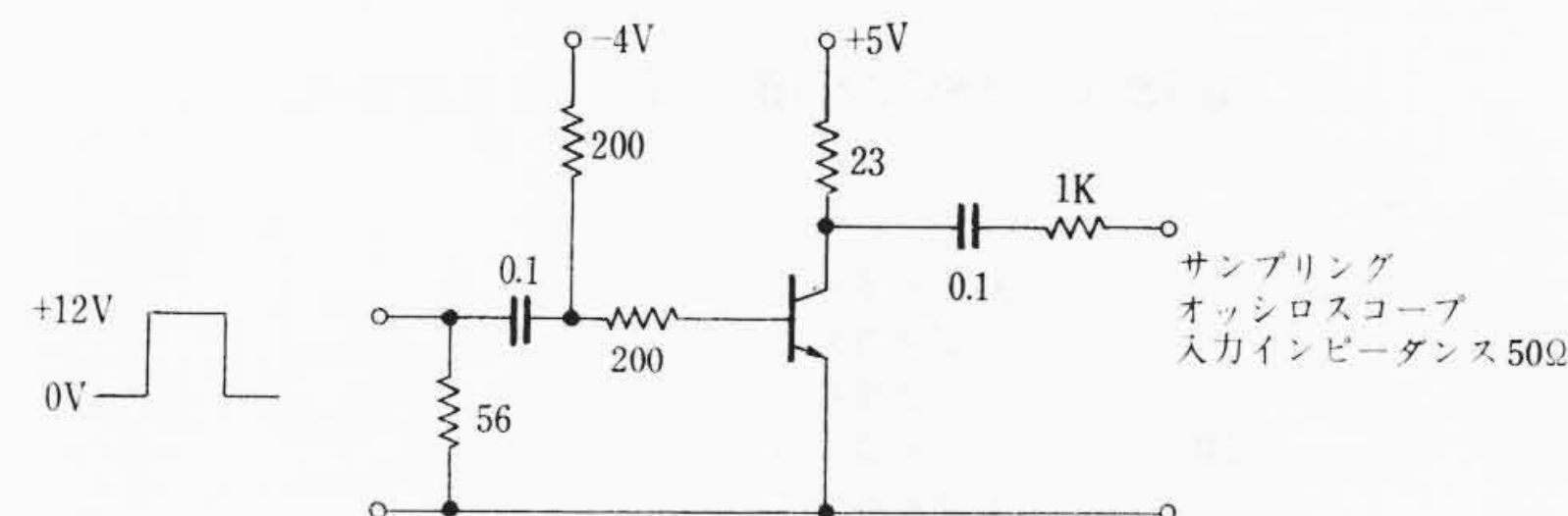
最大定格 ($T_a=25^\circ\text{C}$)

項 目	記 号	単 位	定 格
コレクタ・ベース電圧	V_{CBO}	V	40
エミッタ・ベース電圧	V_{EBO}	V	5
コレクタ・エミッタ電圧	V_{CER}	V	20
コレクタ・エミッタ電圧	V_{CEO}	V	15
コレクタ損失 $T_a=25^\circ\text{C}$	P_c	mW	360
$T_c=100^\circ\text{C}$	P_c	mW	680
$T_c=25^\circ\text{C}$	P_c	mW	1,200
接 合 部 温 度	T_j	$^\circ\text{C}$	175
保 存 温 度	T_{stg}	$^\circ\text{C}$	-65~200

電気的特性 ($T_a=25^\circ\text{C}$)

項 目	記 号	測 定 条 件	特 性 値			単 位
			最小	標準	最大	
コレクタ・ベース電圧	BV_{CBO}	$I_o=1\mu\text{A}, I_E=0$	40	—	—	V
エミッタ・ベース電圧	BV_{EBO}	$I_E=10\mu\text{A}, I_C=0$	5	—	—	V
コレクタ・エミッタ電圧	V_{CER}	$R_{BE}\leq 10\Omega, I_C=30\text{mA}$	20	—	—	V
コレクタ・エミッタ電圧	V_{CEO}	$I_o=30\text{mA}, I_B=0$ (注1)	15	—	—	V
コレクタ遮断電流	I_{CBO}	$V_{OB}=20\text{V}, I_E=0$	—	—	0.25	μA
エミッタ遮断電流	I_{EBO}	$V_{EB}=4\text{V}, I_C=0$	—	—	1	μA
直流電流増幅率	h_{FE}	$V_{OE}=1\text{V}, I_C=10\text{mA}$	30	—	120	—
直流電流増幅率	h_{FE}	$V_{OE}=5\text{V}, I_C=500\text{mA}$	—	15	—	—
コレクタ飽和電圧	$V_{CE}^{(sat)}$	$I_C=200\text{mA}, I_B=20\text{mA}$ (注2)	—	0.4	0.7	V
コレクタ飽和電圧	$V_{CE}^{(sat)}$	$I_C=20\text{mA}, I_B=2\text{mA}$	—	—	0.25	V
ベース電圧	$V_{BE}^{(sat)}$	$I_C=10\text{mA}, I_B=1\text{mA}$	—	—	0.8	V
高周波電流増幅率	h_{fe}	$V_{CE}=10\text{V}, I_C=20\text{mA}, f=100\text{Mc}$	3	—	—	—
コレクタ容量	C_{ob}	$V_{CB}=10\text{V}, I_B=0$	—	—	6	PF
蓄 積 時 間	t_{stg}	$I_C=I_{B1}=I_{B2}=20\text{mA}$ (注3)	—	—	30	ns
オン 時 間	t_{on}	$I_C=200\text{mA}, I_{B1}=2I_{B2}=40\text{mA}$ (注4)	—	20	—	ns
オフ 時 間	t_{off}	$I_C=200\text{mA}, I_{B1}=2I_{B2}=40\text{mA}$ (注4)	—	25	—	ns

注：(1) パルス測定
(2) パルス測定
(3) パルス幅 $\geq 200\text{ns}$ 測定回路下記

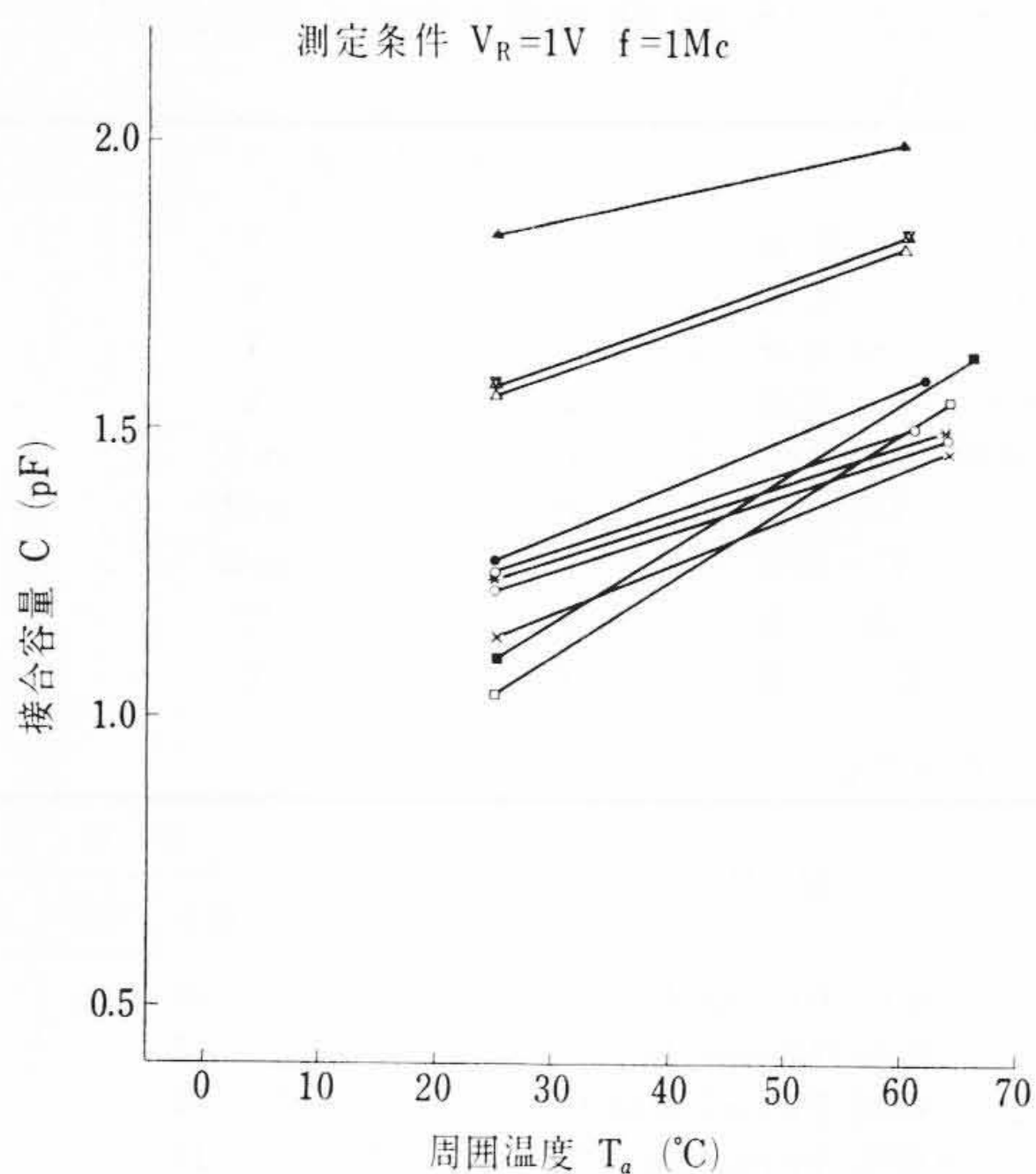
(4) パルス幅 $\geq 200\text{ns}$ 測定回路下記

I_{CBO} の温度特性を第 18 図に示す。高温側では低温で見られるバラツキが少なくなる傾向が見られる。

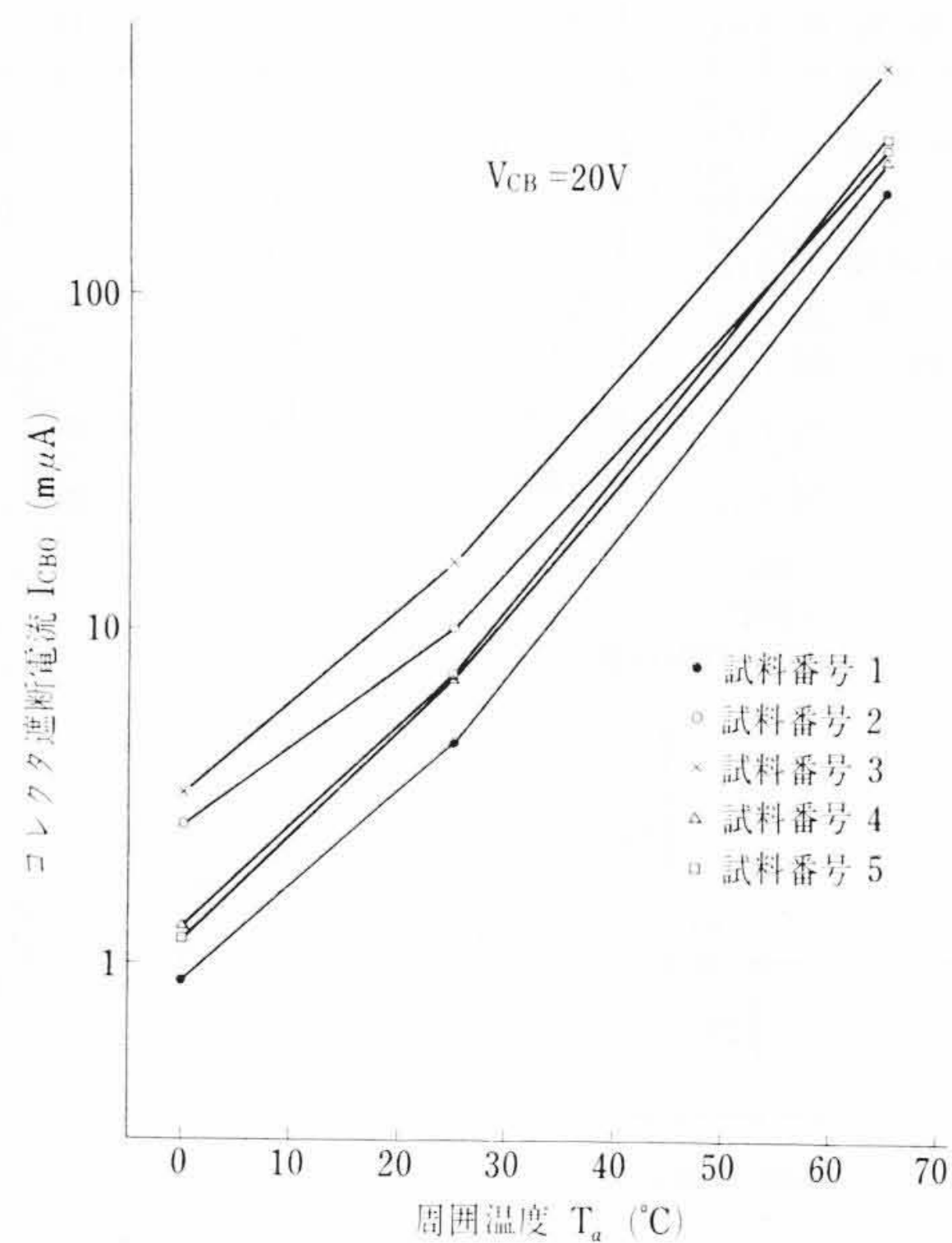
4.2.2 h_{FE} , $V_{BE(sat)}$ および $V_{CE(sat)}$ 特性

これらの特性はトランジスタの導通時の静的設計に必要な特性である。

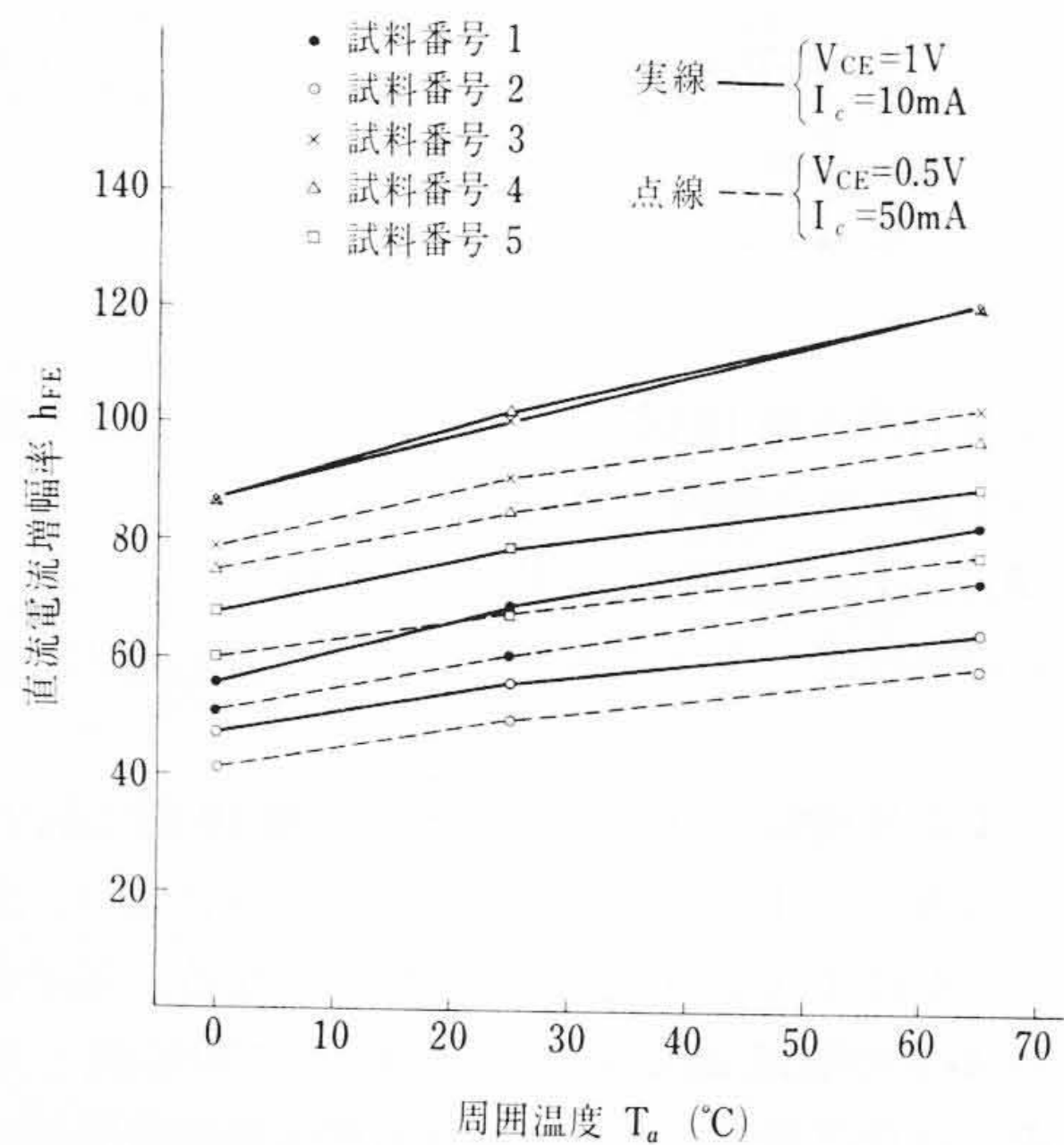
まず直流電流増幅率 h_{FE} の温度特性を第 19 図に示す。飽和スイッチでは h_{FE} が小さくなると飽和が不十分になり、出力信号のオンレベルがはずれるので誤動作の原因となる。接合温度が 0°C のときの h_{FE} の値は 25°C のときの約 25~30% 減と考えればよい。実際には自己発熱のため、接合温度は周囲温度より高くなるので周囲温度に対応する h_{FE} よりも実際の h_{FE} は高くなる。高温側では h_{FE} が大きくなり、飽和が深くなり、スイッチング速度に影響する。 h_{FE} の電流依存性を第 20 図に示す。エミッタベース間飽和電圧 $V_{BE(sat)}$ の温度特性を第 21 図に示す。曲線の傾斜は



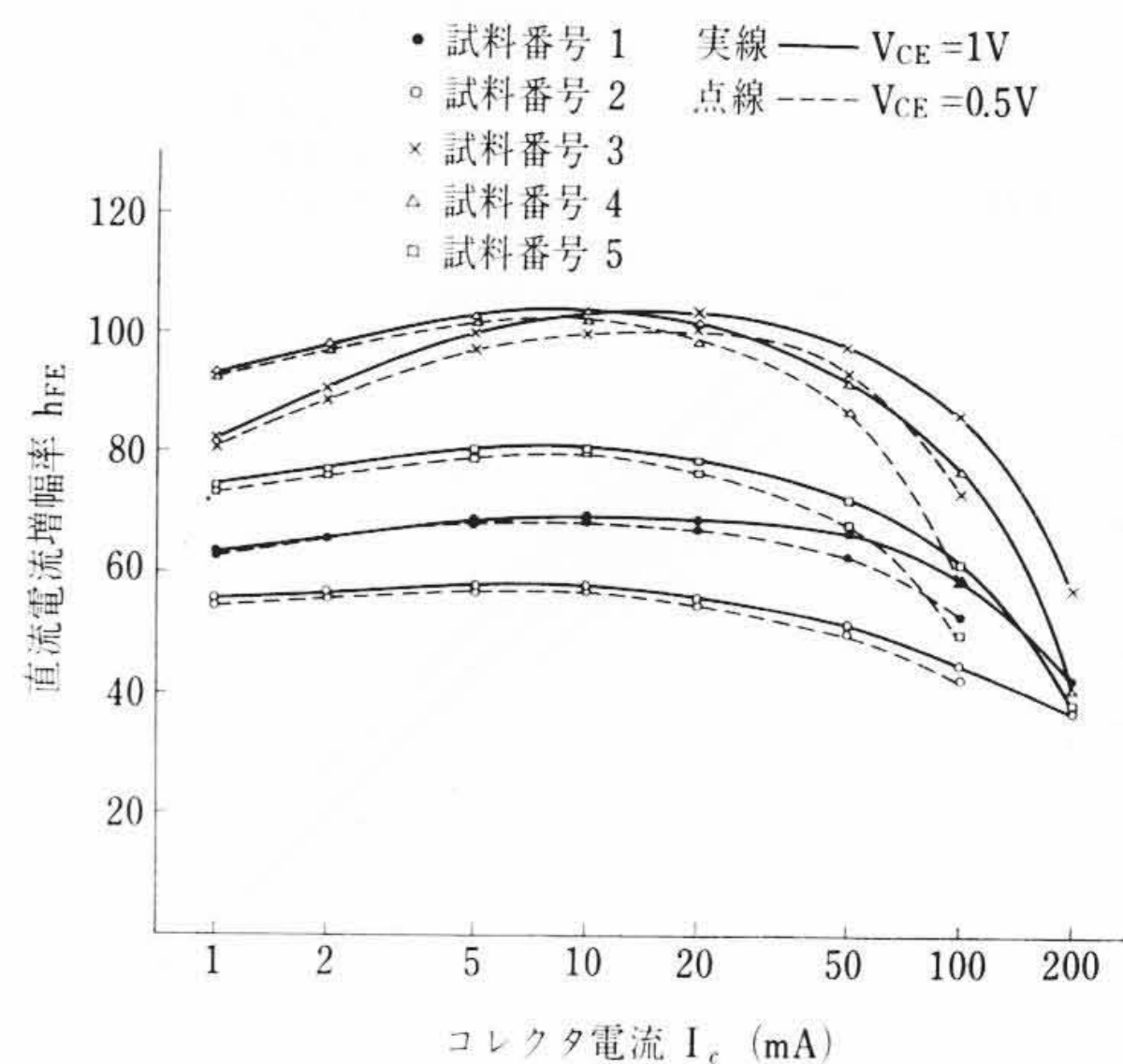
第17図 1S1219 ⑨ の C の温度特性



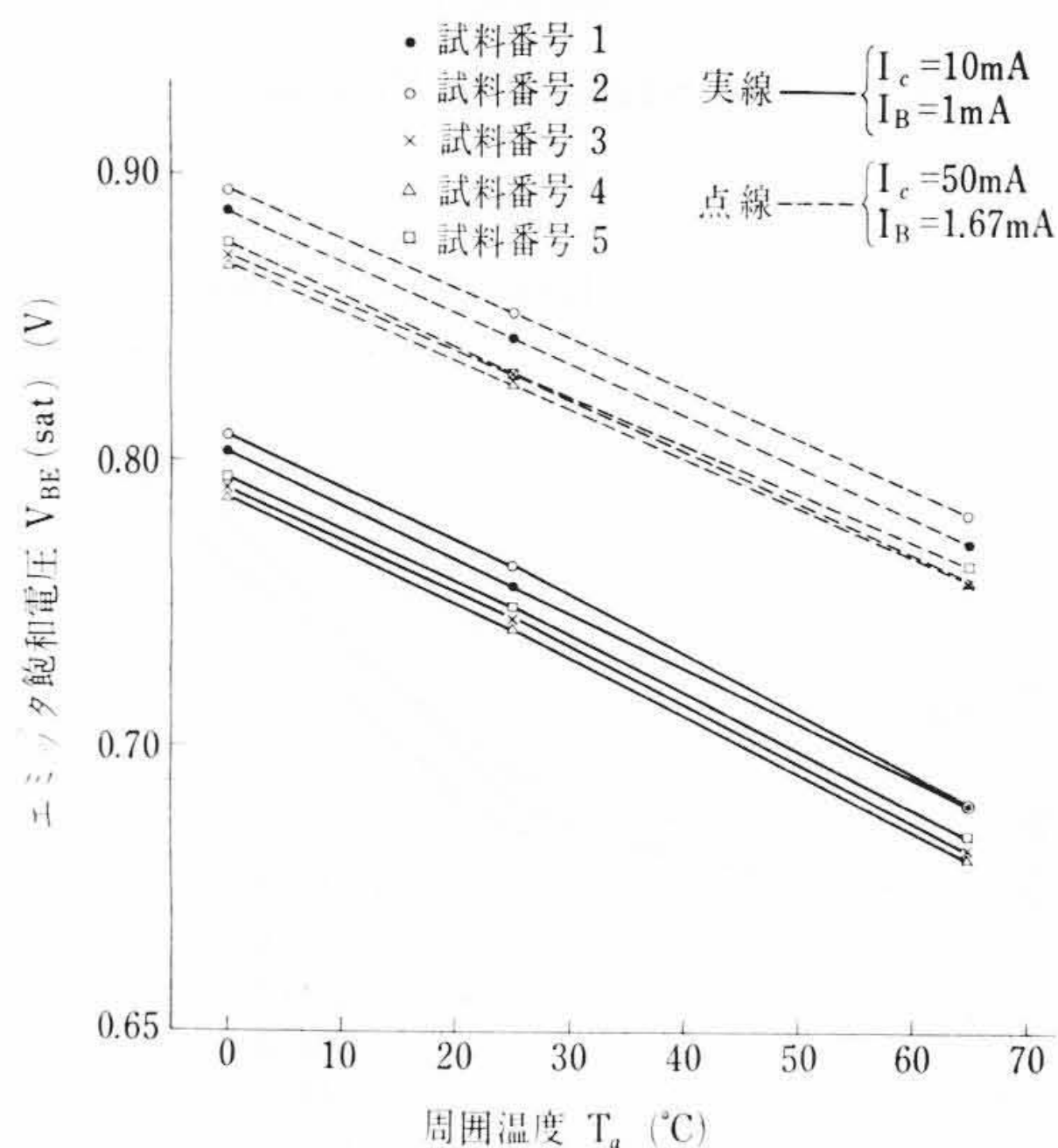
第18図 2SC321 ⑨ の I_{CBO} の温度特性



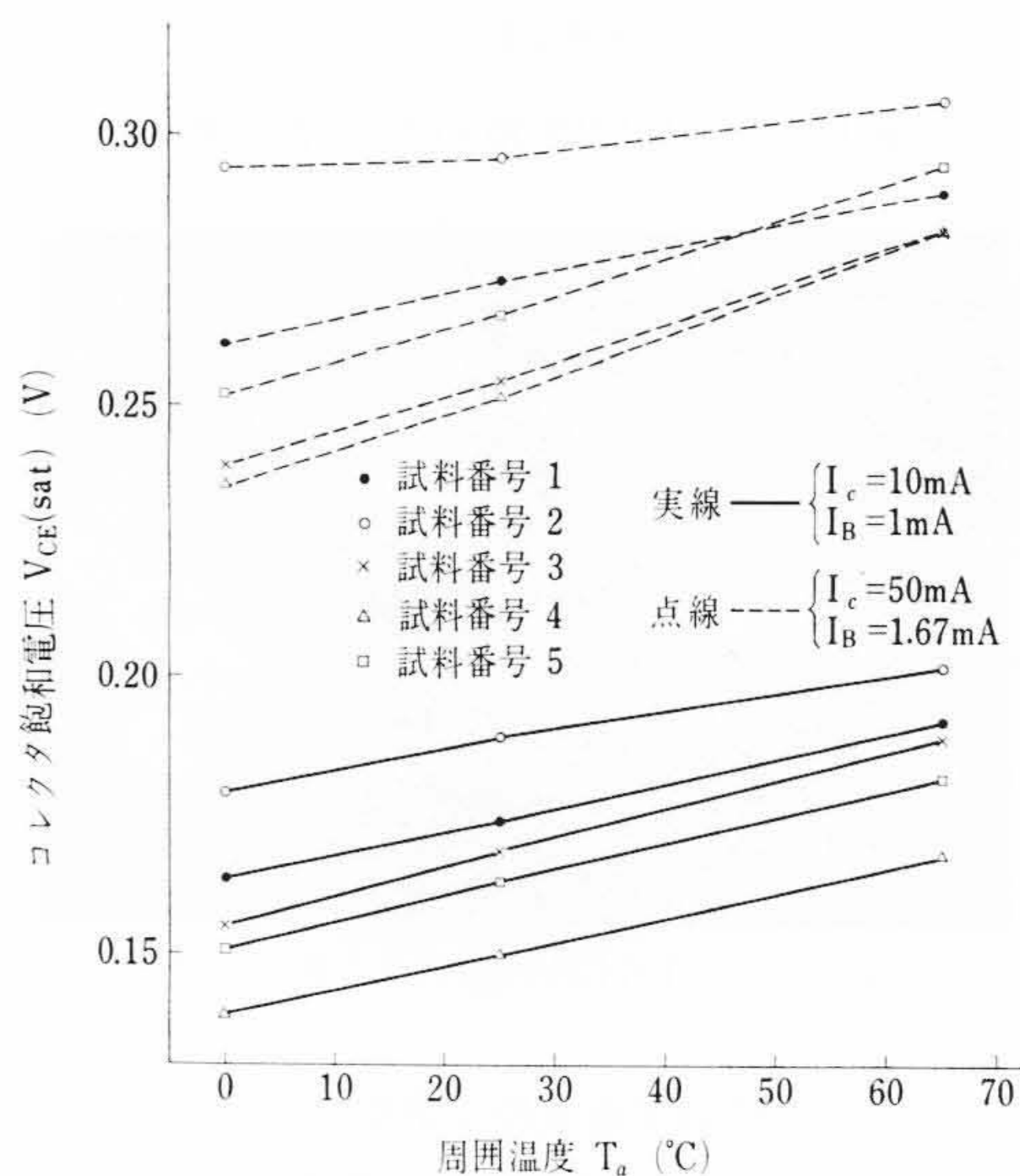
第19図 2SC321 ⑨ の h_{FE} の温度特性



第20図 2SC321 ⑨ の h_{FE} の電流依存性



第21図 2SC321 ⑨ の $V_{BE(sat)}$ の温度特性



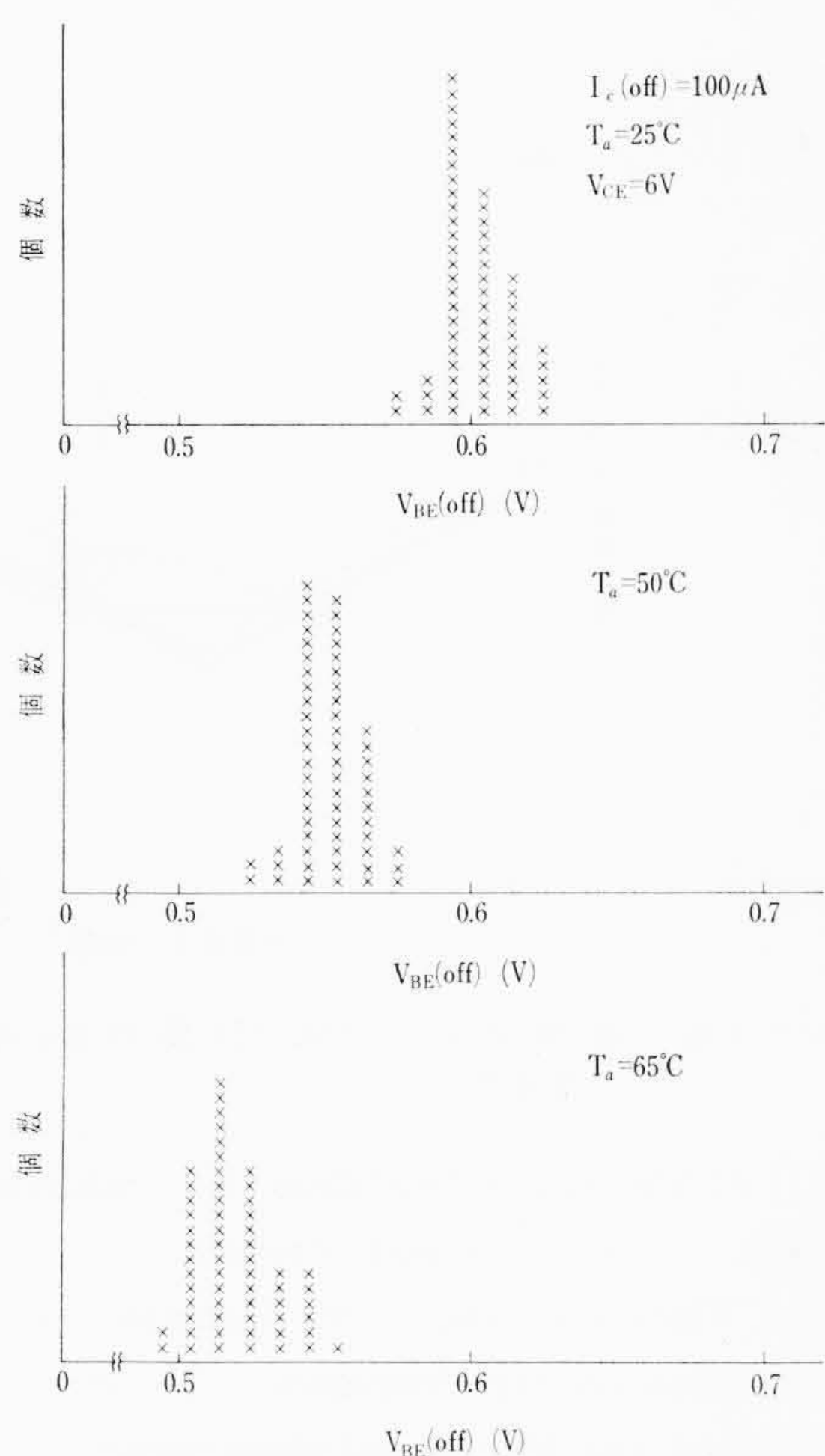
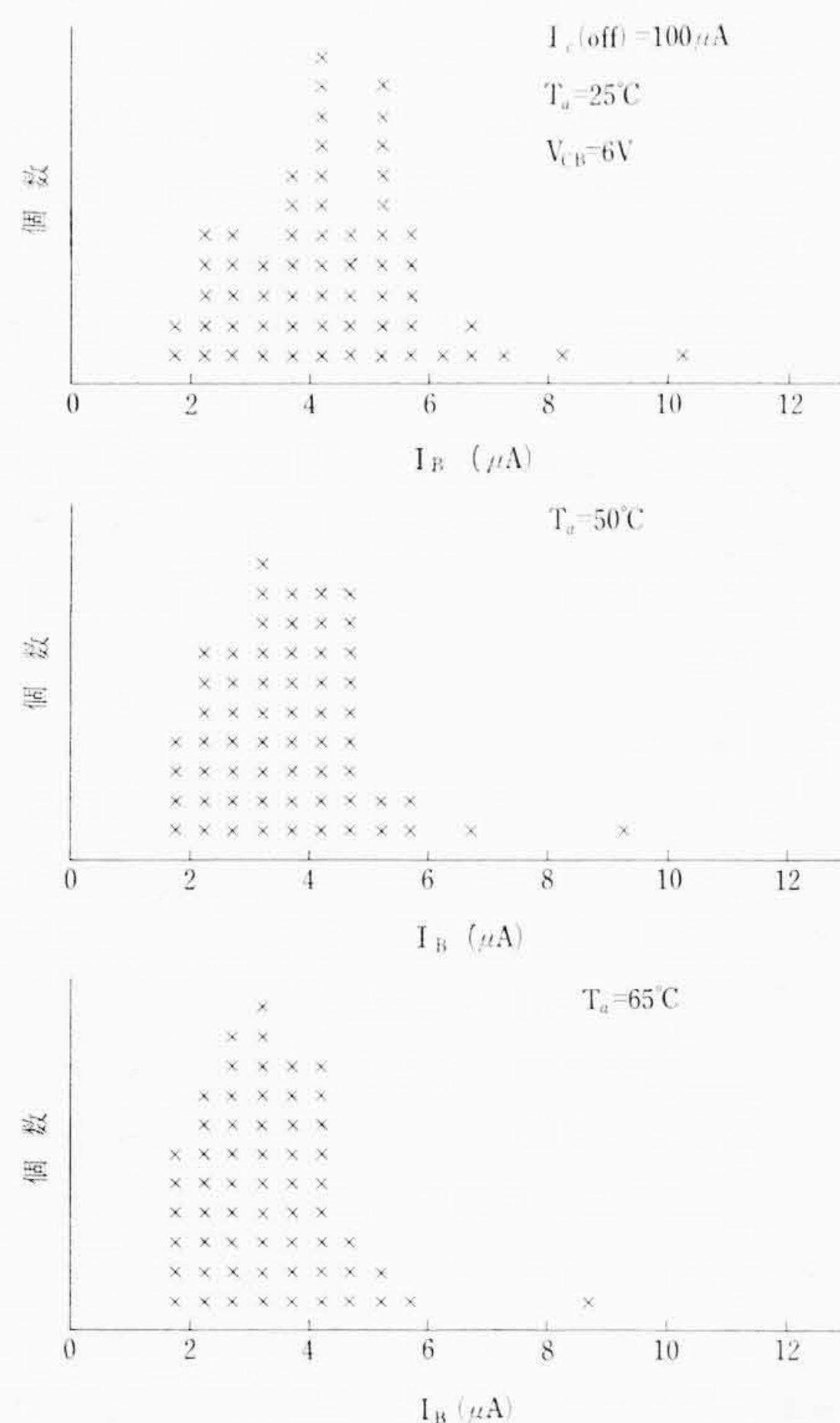
第22図 2SC321 ⑨ の $V_{CE(sat)}$ の温度特性

非常によくそろっていて、 0°C から 65°C の間の平均傾斜は $-1.7 \sim -1.9 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ である。コレクタエミッタ間飽和電圧の温度特性を第

22図に示す。 $V_{CE(sat)}$ が高温側で高くなるということは、高温側で次段のトランジスタの $V_{BE(sat)}$ が下がる現象とともに高温側における回路の安定動作を設計するうえに重要な要因となる。

4.2.3 $V_{BE(off)}$ および $I_{B(off)}$ の特性

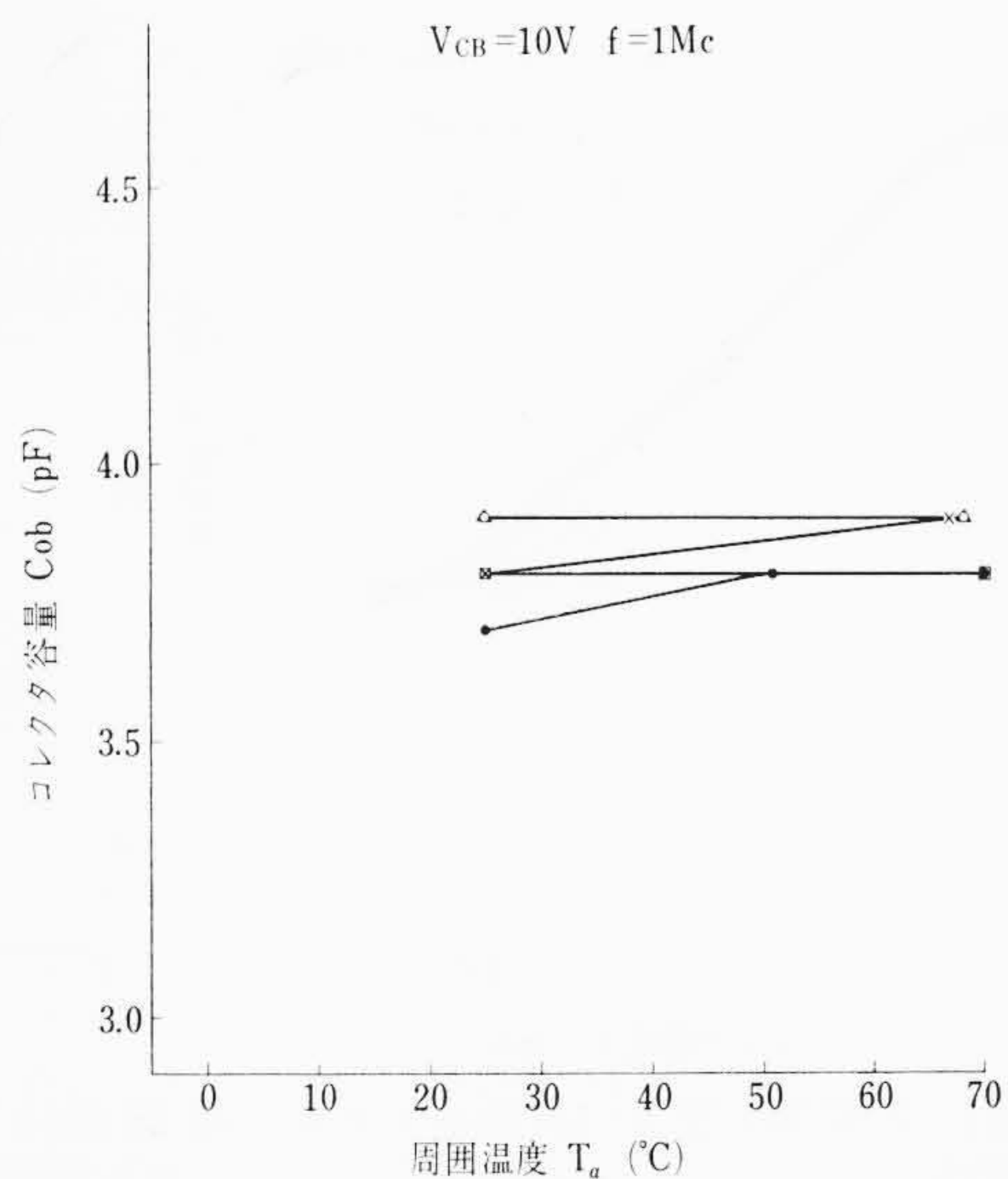
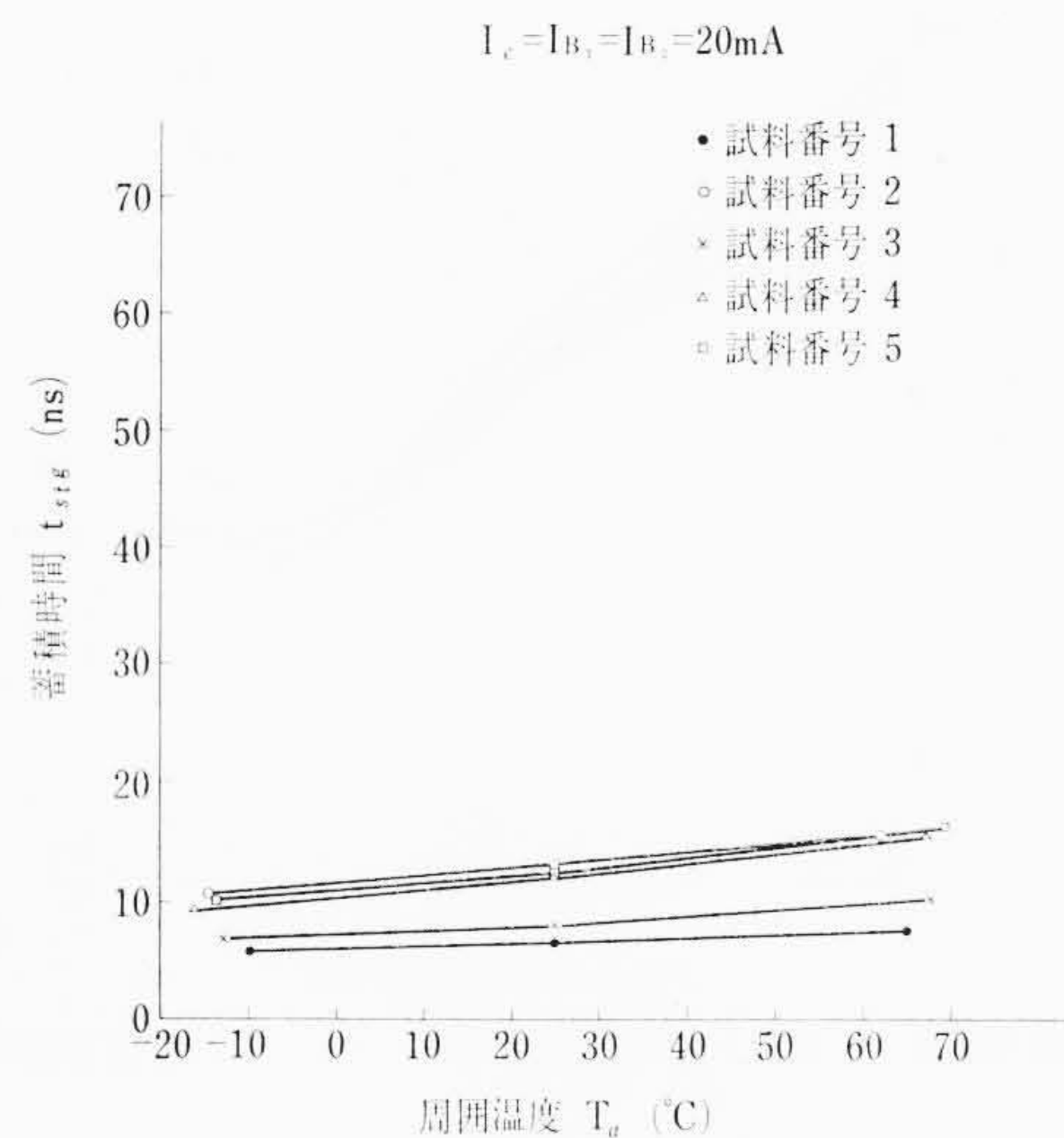
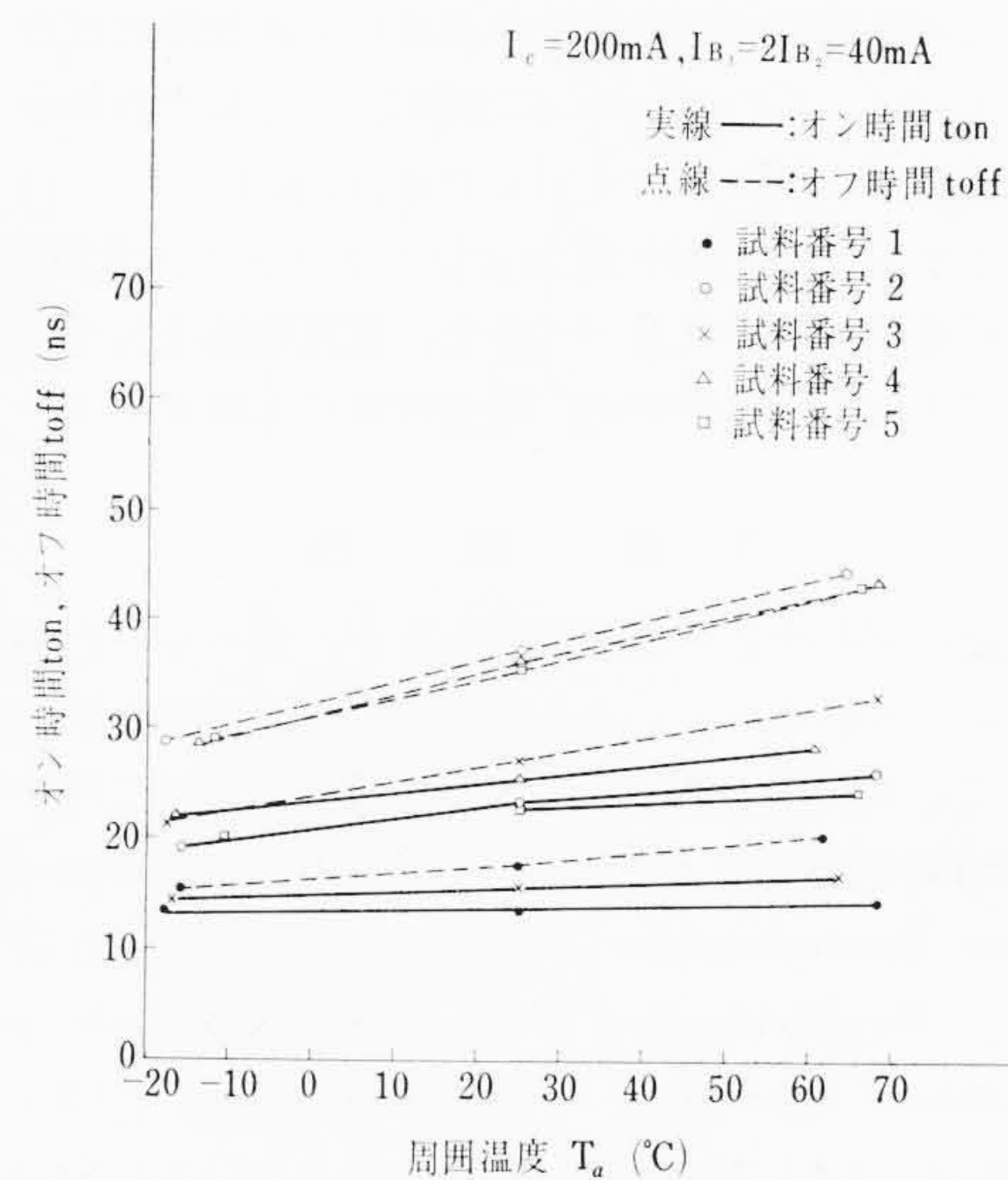
この二つの値はトランジスタの遮断条件として重要である。ま

第 23 図 2SC321 ⑩ の $V_{BE(off)}$ の温度特性第 24 図 2SC321 ⑩ の $I_{B(off)}$ の温度特性

ず $V_{BE(off)}$ の温度特性を第 23 図に示す。これはコレクタ電流が $100 \mu A$ になるときの V_{BE} の値を $V_{BE(off)}$ と呼び、その分布が温度とともにどう変わるかを示している。この $V_{BE(off)}$ も約 $-2 mV/^{\circ}C$ で変化することが第 23 図からわかる。第 24 図は $V_{BE(off)}$ 測定時における I_B の値すなわち $I_{B(off)}$ の分布を示したものである。

4.2.4 C_{ob} 特 性

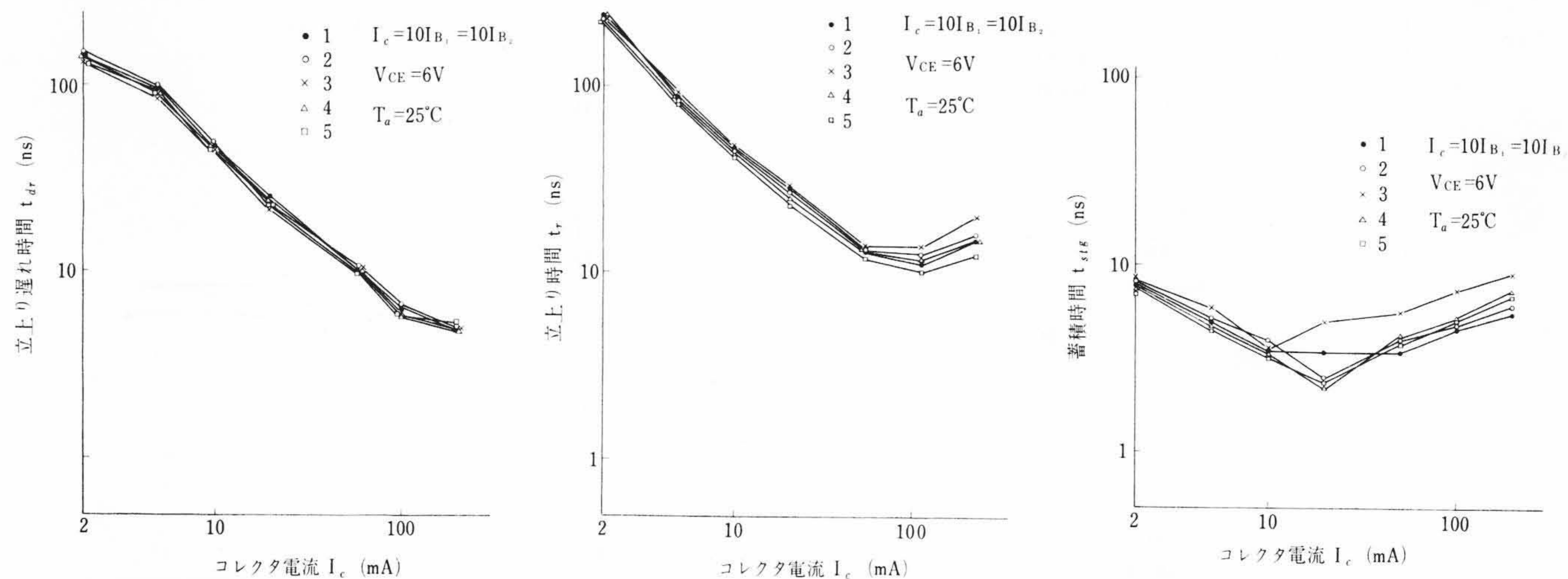
コレクタ容量 C_{ob} はオンオフ動作をさせる場合にこれを充放電しなければならず、信号を遅らせる一つの原因となる。この C_{ob} の温度特性を第 25 図に示す。図よりほとんど変化しないものと

第 25 図 2SC321 ⑩ の C_{ob} の温度特性第 26 図 2SC321 ⑩ の t_{stg} の温度特性第 27 図 2SC321 ⑩ の t_{on} , t_{off} のコレクタ温度特性

みてよいことがわかる。

4.2.5 t_{stg} , t_{on} および t_{off} の特性

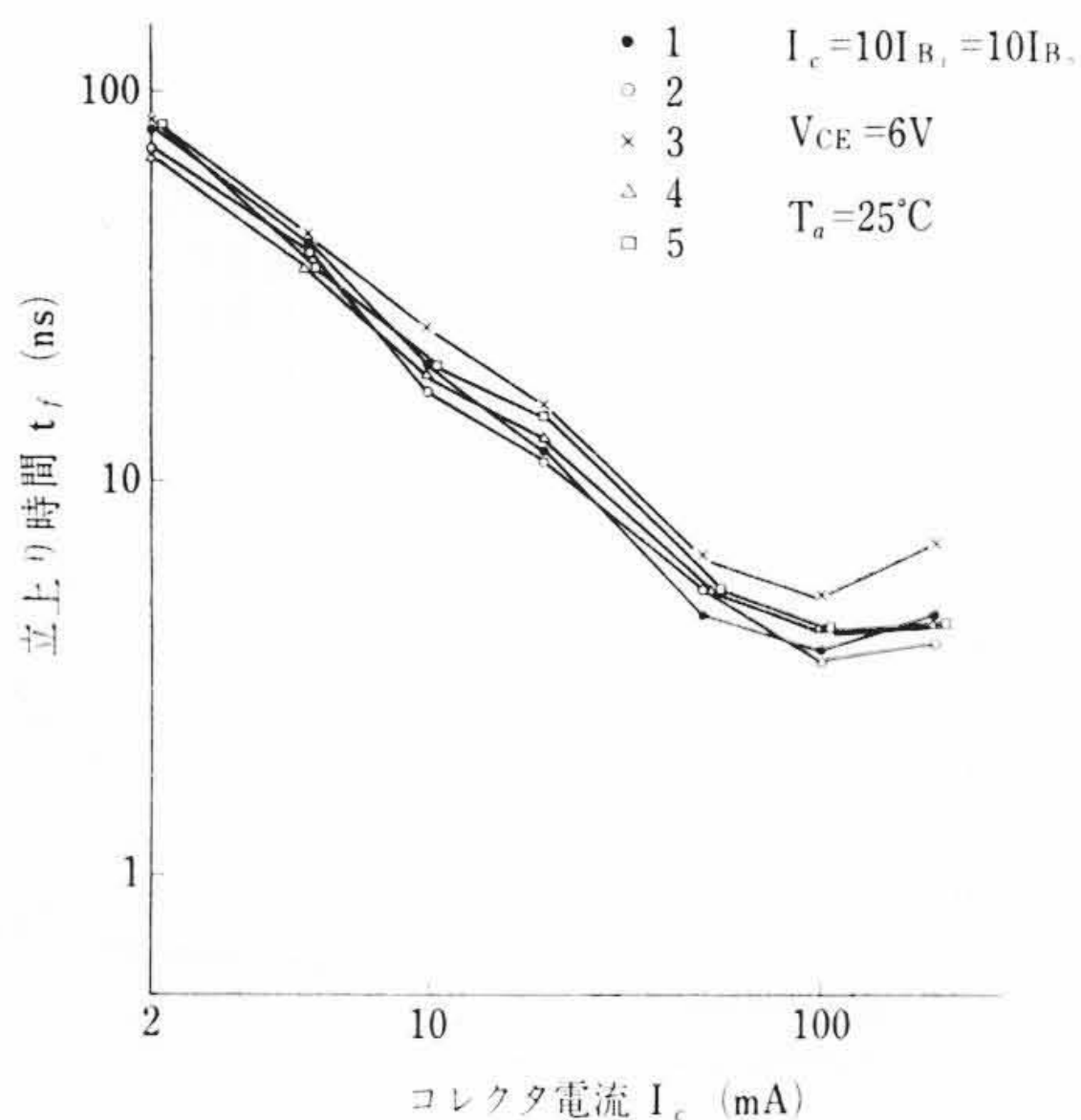
静的動作だけでなく、動特性が温度でどう変化するかは重要な



第28図(a) 2SC321Ⓜの t_{dr} のコレクタ電流依存性

第28図(b) 2SC321Ⓜの t_r のコレクタ電流依存性

第28図(c) 2SC321Ⓜの t_{stg} のコレクタ電流依存性



第28図(d) 2SC321Ⓜの t_f のコレクタ電流依存性

点である。蓄積時間 t_{stg} 、オン時間 t_{on} 、オフ時間 t_{off} の温度特性をそれぞれ第26図および第27図に示す。高温側で t_{stg} 、 t_{off} が増加するので回路設計の際には十分考慮に入れなければならない。また $t_{on} = t_{dr} + t_r$ 、 $t_{off} = t_{stg} + t_f$ に分解し、それぞれのコレクタ電流の依存性を第28図(a)(b)(c)(d)に示す。

以上ダイオード1S1219Ⓜおよびトランジスタ2SC321Ⓜの温度特性に重点をおいて述べてきた。温度特性はおもに素子の材料によって支配されるが構造、製造技術にも関係する。

5. 信 頼 性

半導体製品にどれほどの信頼性があるか、定められた時に所期の特性を発揮してくれるかということを評価する試験方法はいろいろ規格化されているが、一例として米軍の半導体素子に対する規格である MIL-STD-750 (19, JANUARY, 1962), Military Standard Methods for Semiconductor Devices には次のような項目があげられている。Environmental Tests. (1) Barometric pressure, reduced (altitude operation). (2) Immersion. (3) Insulation resistance. (4) Moisture Resistance. (5) Steady state operation life. (6) High temperature life (non operating). (7) Intermittent operation life. (8) Salt atmosphere. (9) Salt spray. (10) Temperature cycling. (11) Thermal shock (glass strain). (12) Temperature measurement, case and stud. (13) Dew point. Mechanical Tests. (1) Constant acceleration.

(2) Shock. (3) Shock, simulated drop (4) Solderability (5) Soldering heat. (6) Terminal strength. (7) Vibration fatigue. (8) Vibration noise. (9) Vibration, variable frequency. (10) Vibration, high frequency. (11) Physical dimensions. (12) Visual and Mechanical examination.

高信頼を要求される軍用の半導体素子にどんな試験項目が課せられているか一つの参考になろう。上述のような各試験項目において故障率の低いもの、はじめに設定したいかなる環境においても耐える確率の高いものほど Reliable といえよう。PCM 装置には日立半導体製品が約22種にわたり多数使用されており、中には長い歴史のあるゲルマニウムトランジスタ2SA18Ⓜ、2SA210Ⓜなどもあるが、新たに2SC321Ⓜ、1S1219Ⓜが開発された。新製品を開発する場合その製品の信頼性を評価するための一連のテストが繰り返されるわけであるが、2SC321Ⓜ、1S1219Ⓜに対して行なわれたテストの概要を次に示す。寿命試験も広い意味では環境試験のうちの一つであるが、信頼度といえは“寿命”と言われるくらいであるから特に一項に分けてのべる。

5.1 寿 命 試 験

トランジスタ、ダイオードが実用回路に組み込まれたときの寿命(故障率)を推定するための試験を寿命試験と総称するならば実用回路そのままの実装試験、電力を消費させて接合温度を上昇させる動作寿命試験、高温恒温槽に放置する高温設置寿命試験、高温動作寿命試験、高温高湿放置寿命試験、高温逆電圧印加試験などの強制劣化試験、ステップストレス試験などがある。次に2SC321Ⓜと1S1219Ⓜの動作寿命試験と高温放置寿命試験の結果を示す。試験条件を第3表に示す。いずれも両品種の最大定格である。測定した項目と寿命終止点 (life test and point, 寿命不良と判定する限界の規格値) は第4表に示すとおりである。1,000時間までの不良数/試料数と Failure Rate は第5表のようになる。1S1219Ⓜの200°C高温放置の不良率が少し高いので改善を要するが、動作寿命では不良なく良好な結果といえよう。次に各特性の経時変化はどの程度であるかを図示する。1S1219Ⓜの逆方向電流 I_R の変動を第29～32図に示す。2SC321Ⓜにつき第33～36図に I_{CBO} 関係を示す。シリコン

第3表 試 験 条 件

品 名	動 作 寿 命 試 験	高 温 放 置 寿 命 試 験
1S1219Ⓜ	$P_c = 250 \text{ mW}$	$T_a = 200^\circ\text{C}$
2SC321Ⓜ	$P_c = 360 \text{ mW}$	$T_a = 200^\circ\text{C}$

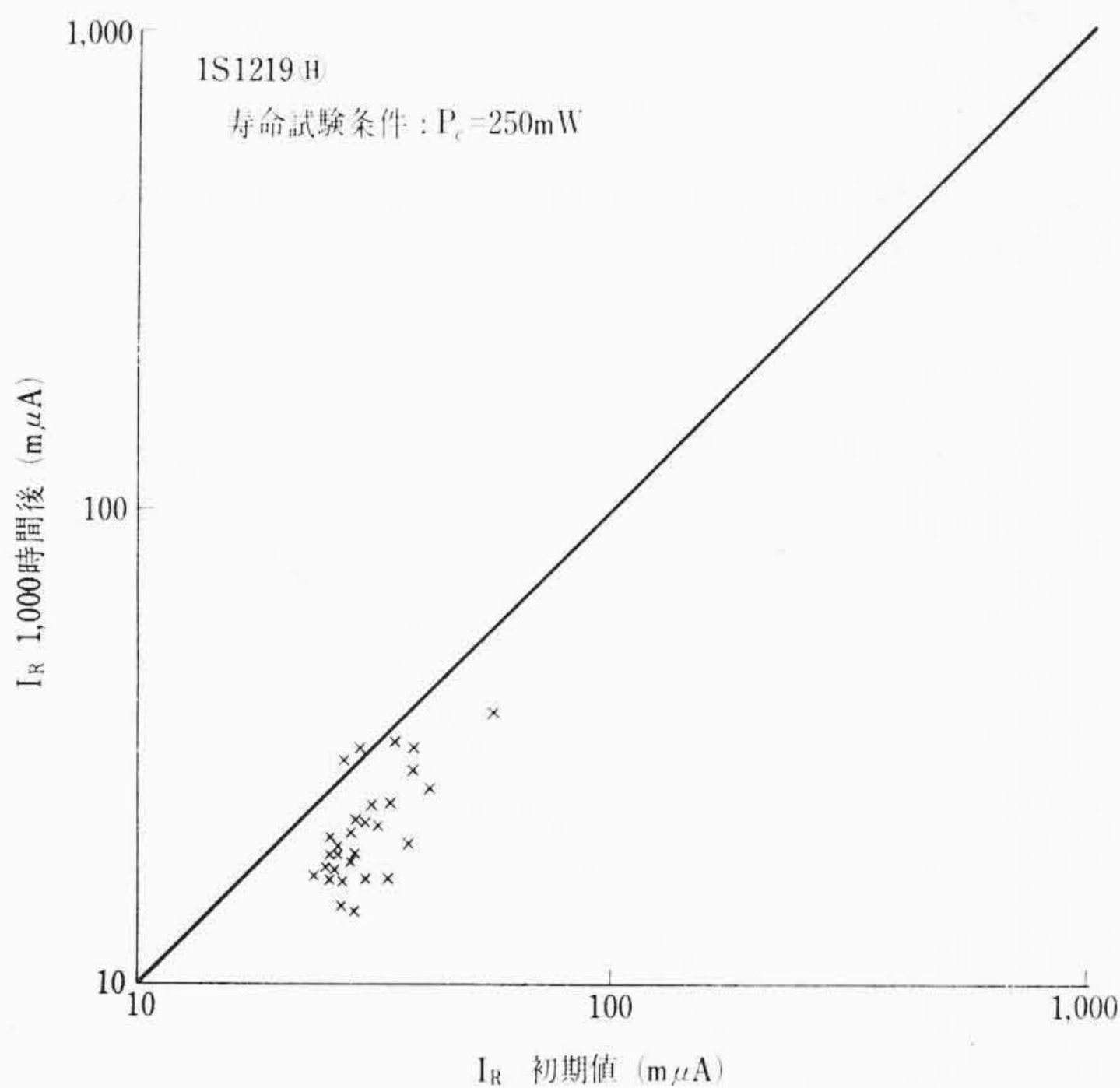
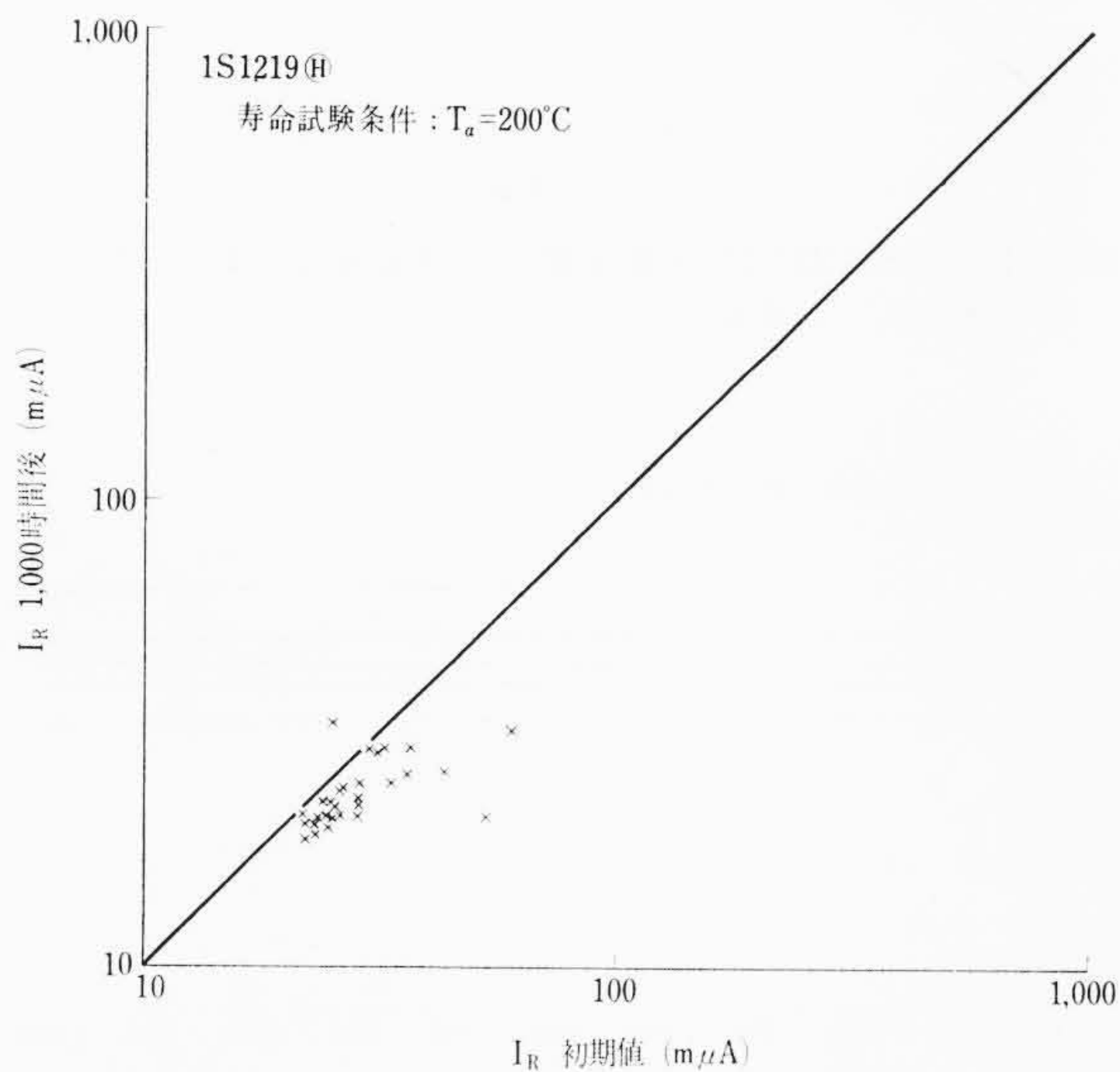
第 4 表 測定項目と寿命終止点

品 名	測定項目	試 験 条 件	初 期 規 格		寿命終始点		
			MIN	MAX	MIN	MAX	
1S1219⑩	V_R	$I_R=5\mu A$	30 V	100m μA	24 V	500 m μA	
	I_R	$V_R=20\text{ V}$					
	V_F	$I_F=10\text{ mA}$					0.64
2SC321⑩	I_{CBO}	$V_{CB}=20\text{ V}$	30	0.25 μA	22	0.5 μA	
	I_{EBO}	$V_{EB}=4\text{ V}$		1.0 μA		2.0 μA	
	h_{FE}	$V_{CE}=1\text{ V}$		120		150	
		$I_C=10\text{ mA}$					

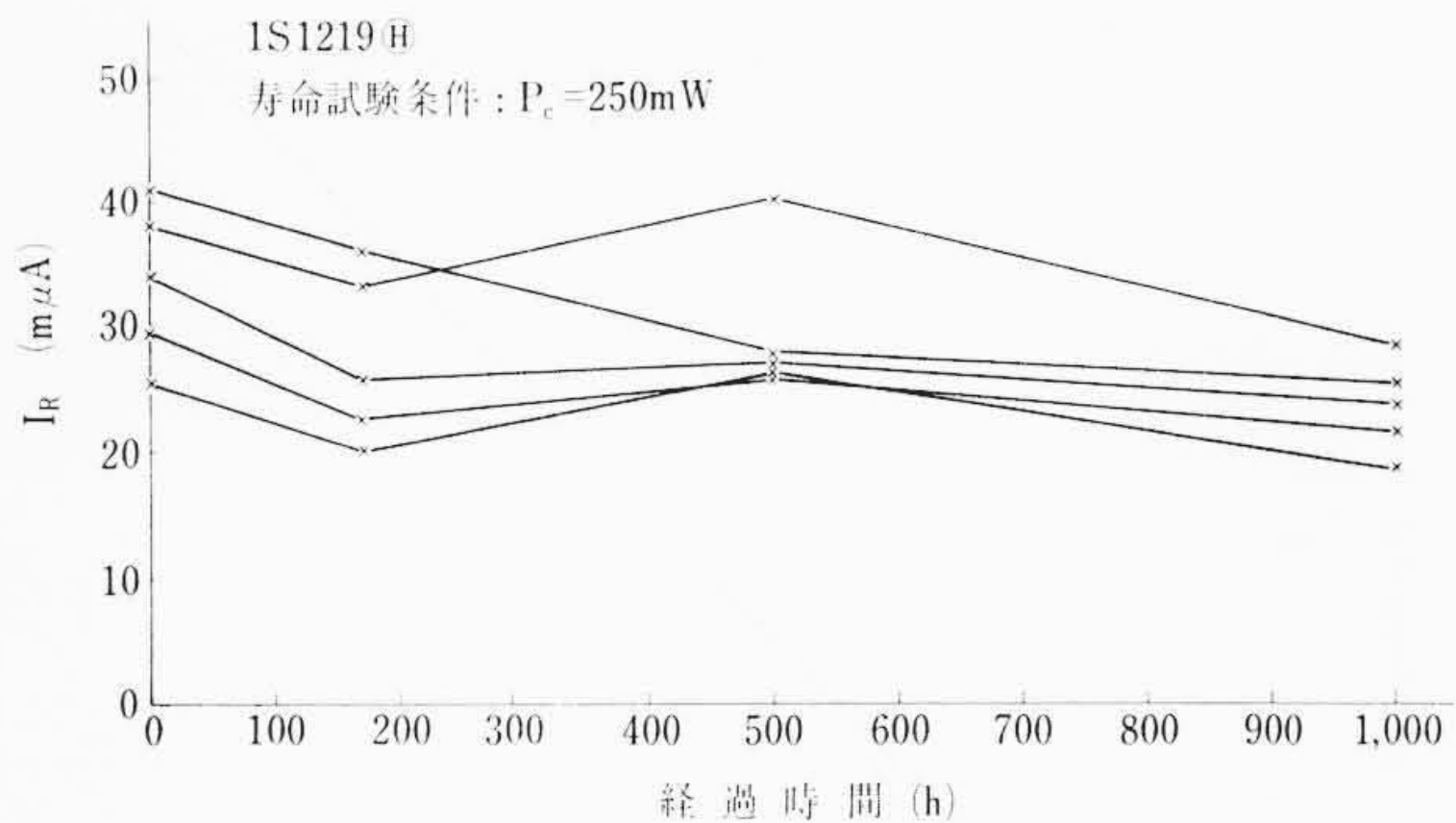
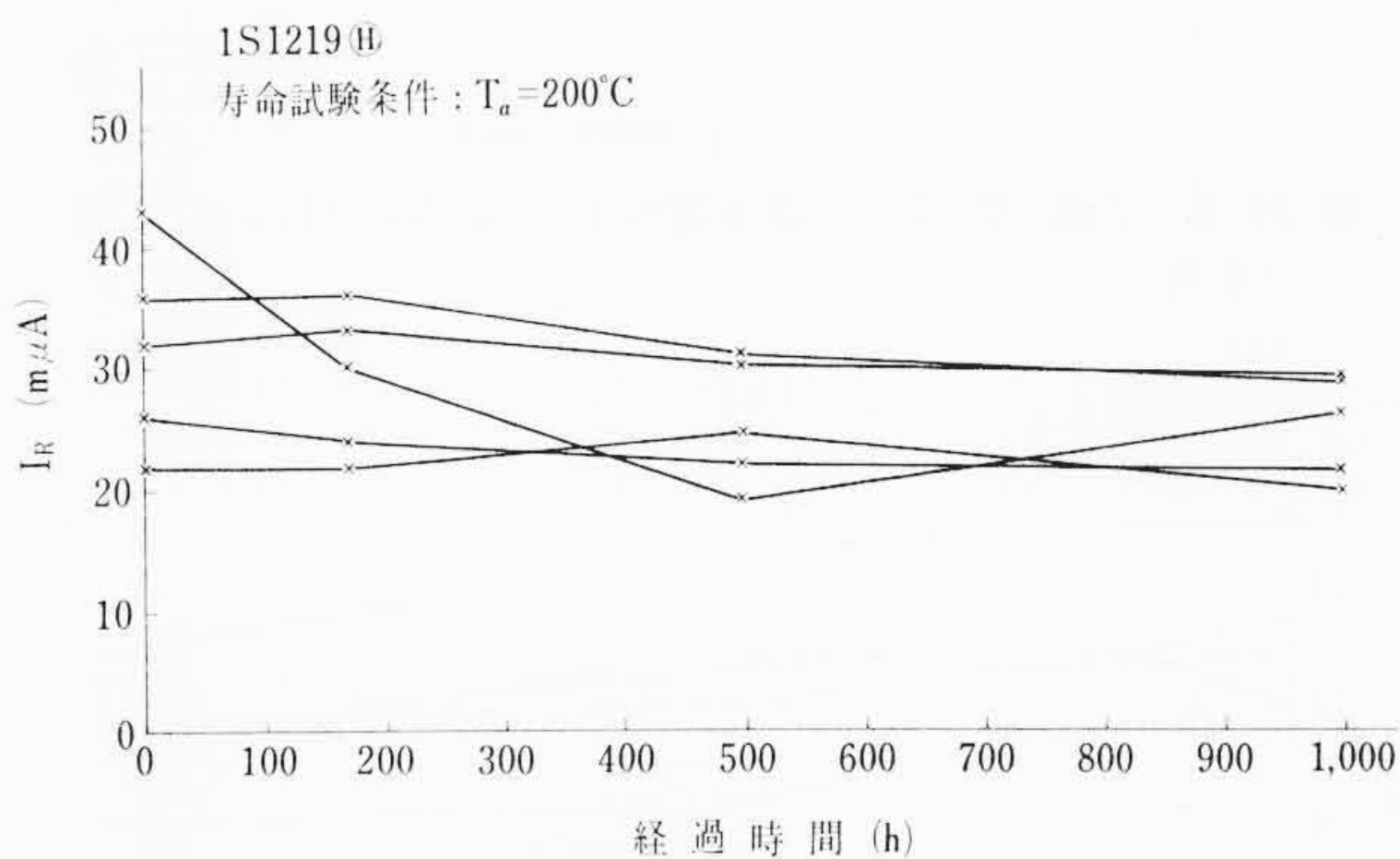
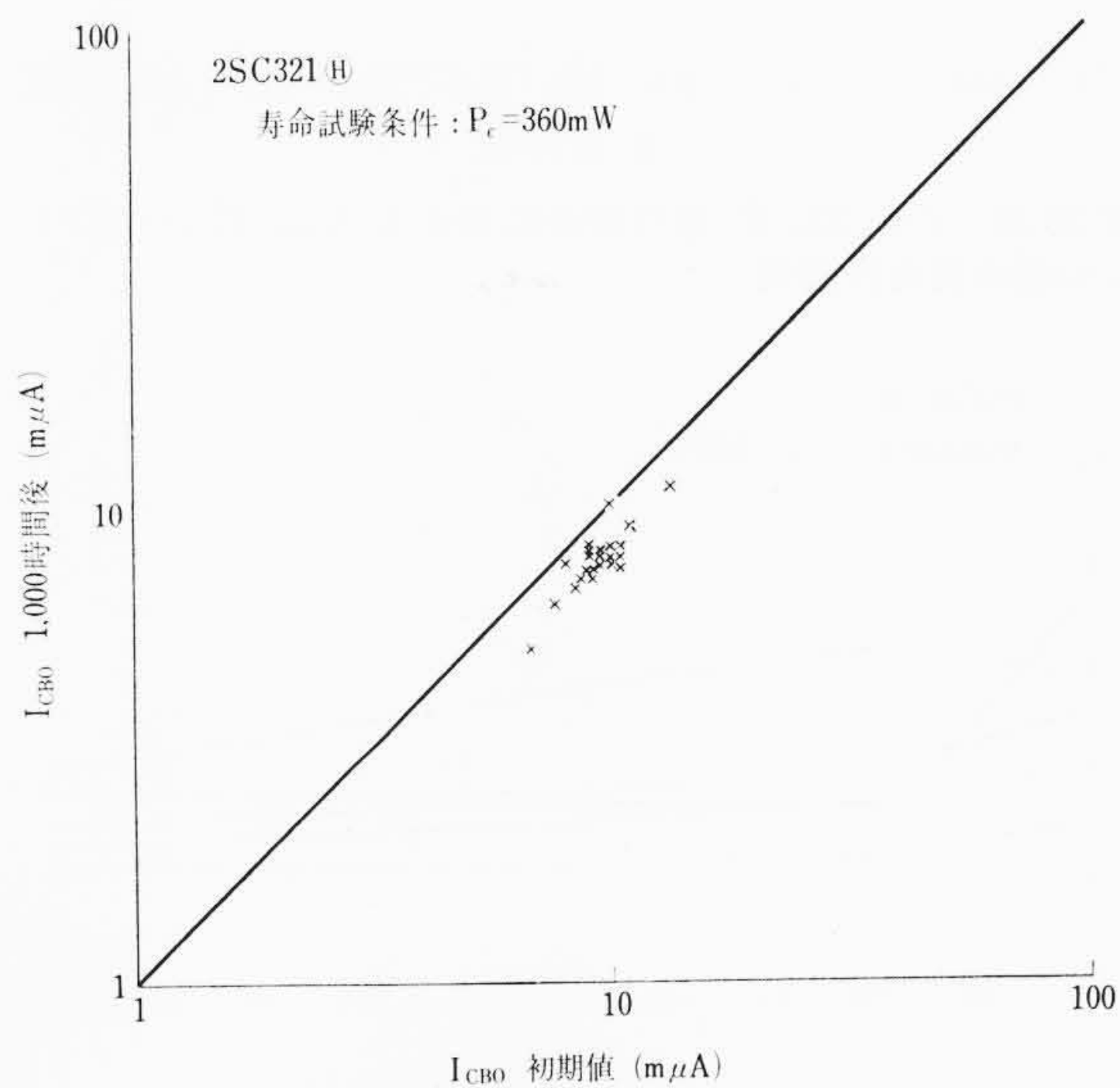
第 5 表 1,000 時間までの不良数/試料数と Failure rate

品 名	動作寿命試験			高温放置寿命試験		
1S1219⑩	0/200	$5\times 10^{-6}/\text{h}$	以下*	2/200	$1\times 10^{-5}/\text{h}$	(I_R 大)
2SC321⑩	0/200	$5\times 10^{-6}/\text{h}$	以下*	1/200	$5\times 10^{-6}/\text{h}$	(I_{CBO} 大)

* 不良 1 個を仮定した時の値

第 29 図 1S1219⑩ 動作寿命における $I_R(V_R=20\text{ V})$ の変動第 30 図 1S1219⑩ 高温放置における $I_R(V_R=20\text{ V})$ の変動

であるため $\text{m}\mu\text{A}$ オーダーであるが十分な安定性を示している。第 37～40 図は h_{FE} 関係であるが動作寿命ではわずかに上昇しているが安定であり、高温放置では上昇して下降する傾向があるが、 $\pm 20\%$ には十分はいる安定性を示している。ダイオード、トランジスタともプレーナ構造をとっているため特性の安定性はよく、十分表面が

第 31 図 1S1219⑩ 動作寿命における $I_R(V_R=20\text{ V})$ の経時変化代表例第 32 図 1S1219⑩ 高温放置における $I_R(V_R=20\text{ V})$ の経時変化代表例第 33 図 2SC321⑩ 動作寿命における $I_{CBO}(V_{CB}=20\text{ V})$ の変動

安定化されていることを示している。

5.2 環境試験および機械的強度試験

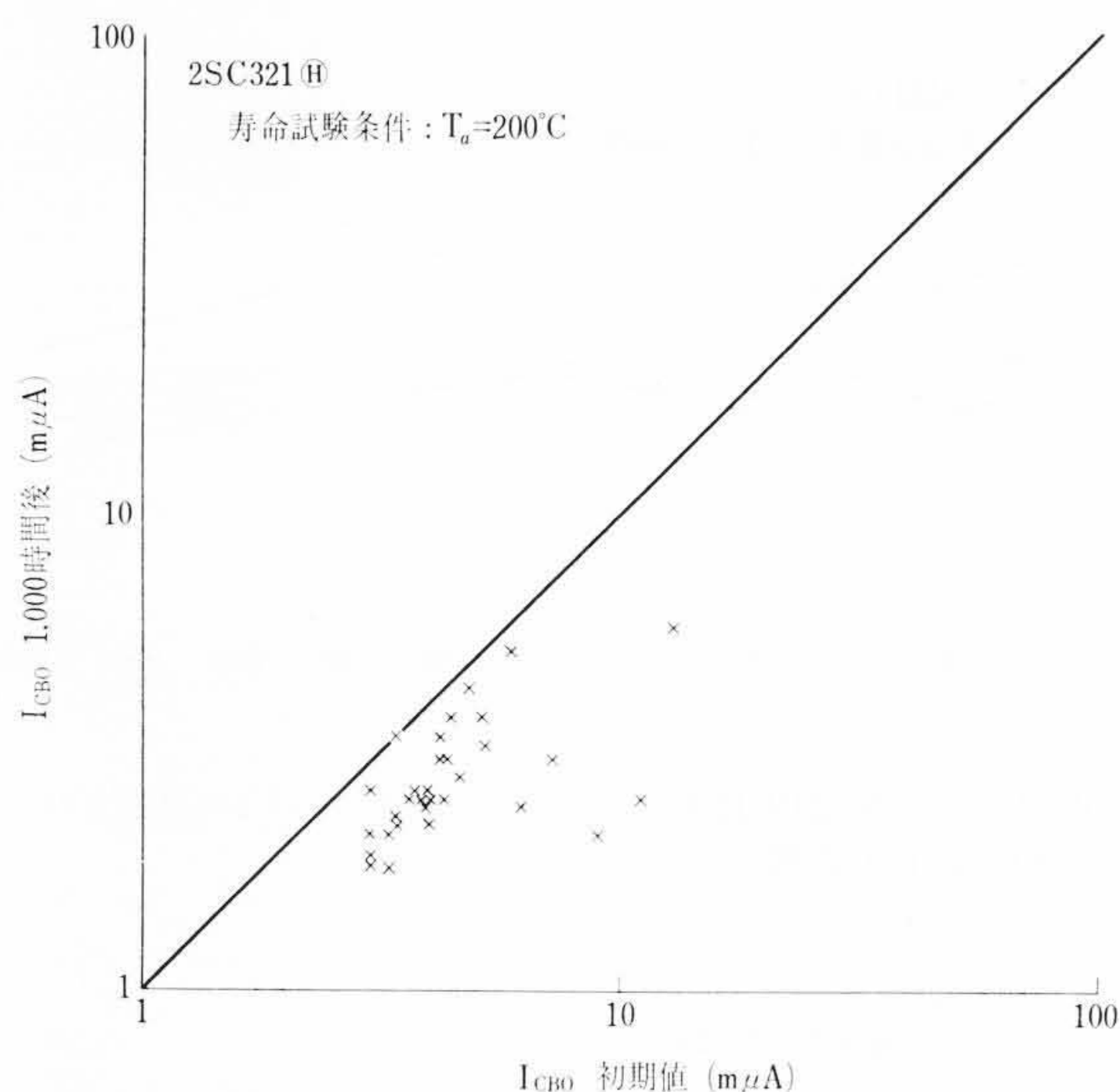
外部ふん囲気に対する耐性および機械的強度を調べるために次のような試験項目がテストされた。

(1) はんだ熱試験

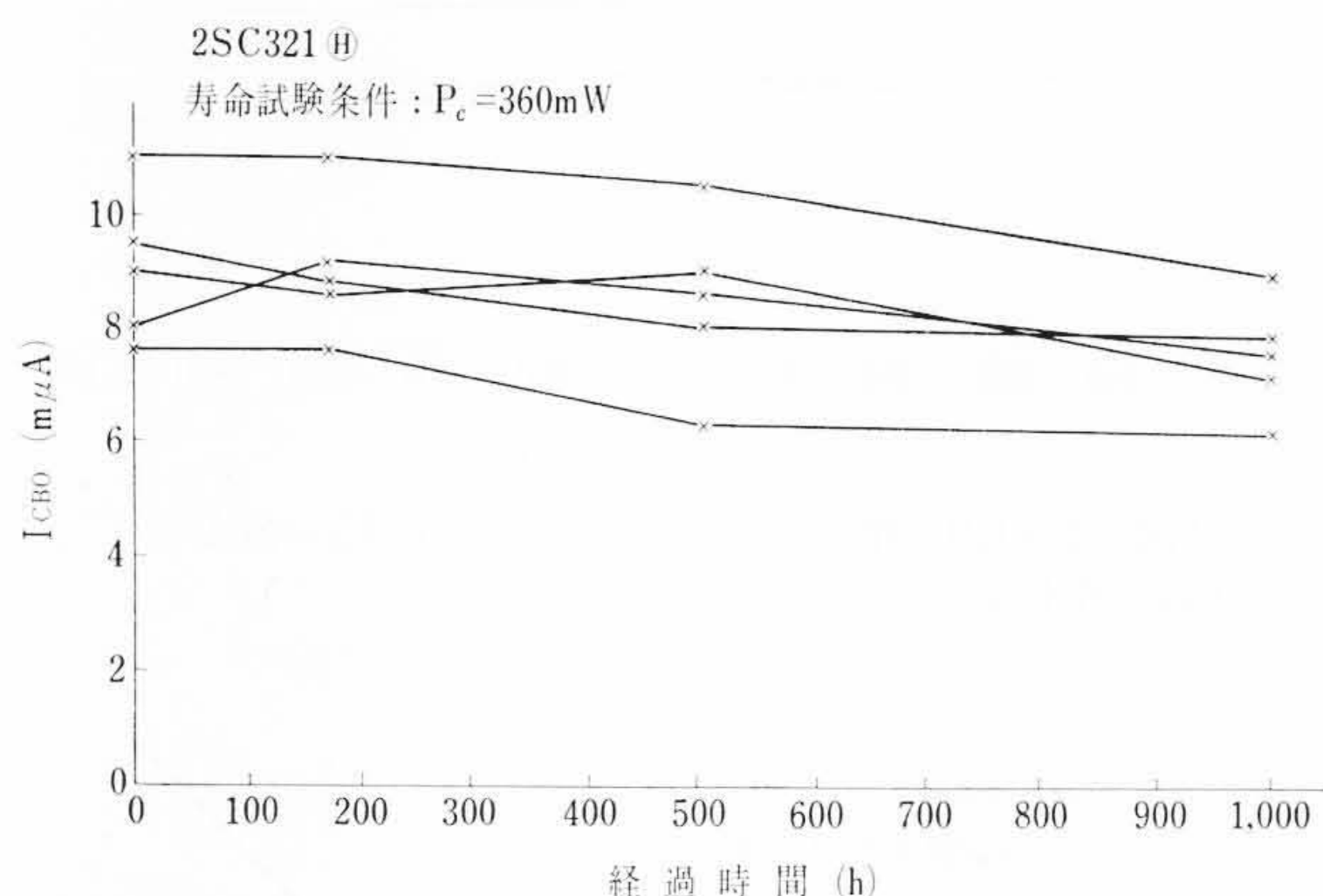
リードを 230°C の 4 分 6 はんだに 10 秒間浸漬する。

(2) 温度サイクル試験

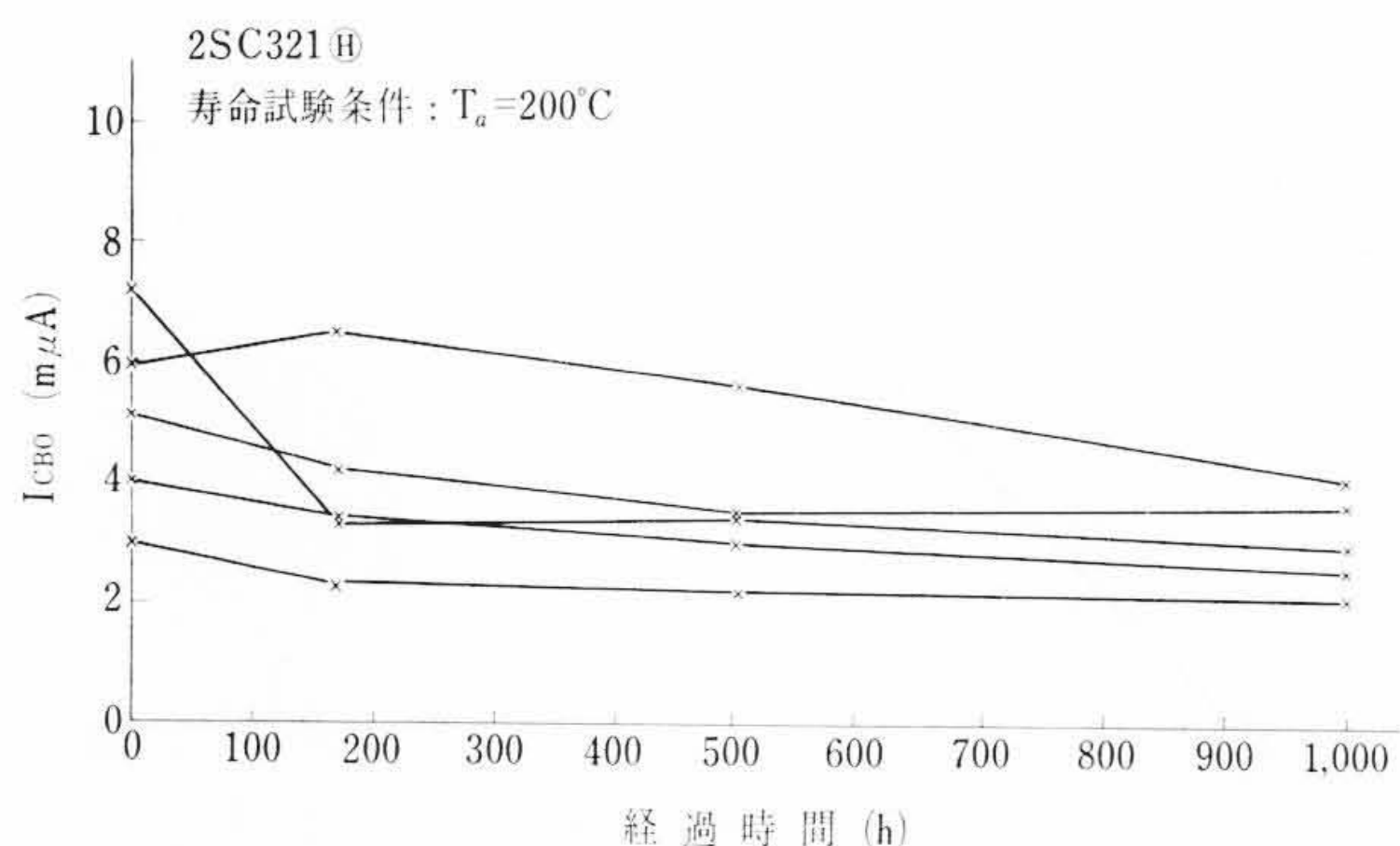
-65°C 中に 20 分間、 $+25^\circ\text{C}$ 中に 15 分間、 $+200^\circ\text{C}$ 中に 20 分間、 $+25^\circ\text{C}$ 中に 15 分間入れる作業を 1 サイクルとし 5 サイクル行なう。



第34図 2SC321 H 高温放置における I_{CBO} ($V_{CB}=20V$) の変動



第35図 2SC321 H 動作寿命における I_{CBO} ($V_{CB}=20V$) の経時変化代表例



第36図 2SC321 H 高温放置における I_{CBO} ($V_{CB}=20V$) の経時変化代表例

(3) 熱衝撃試験

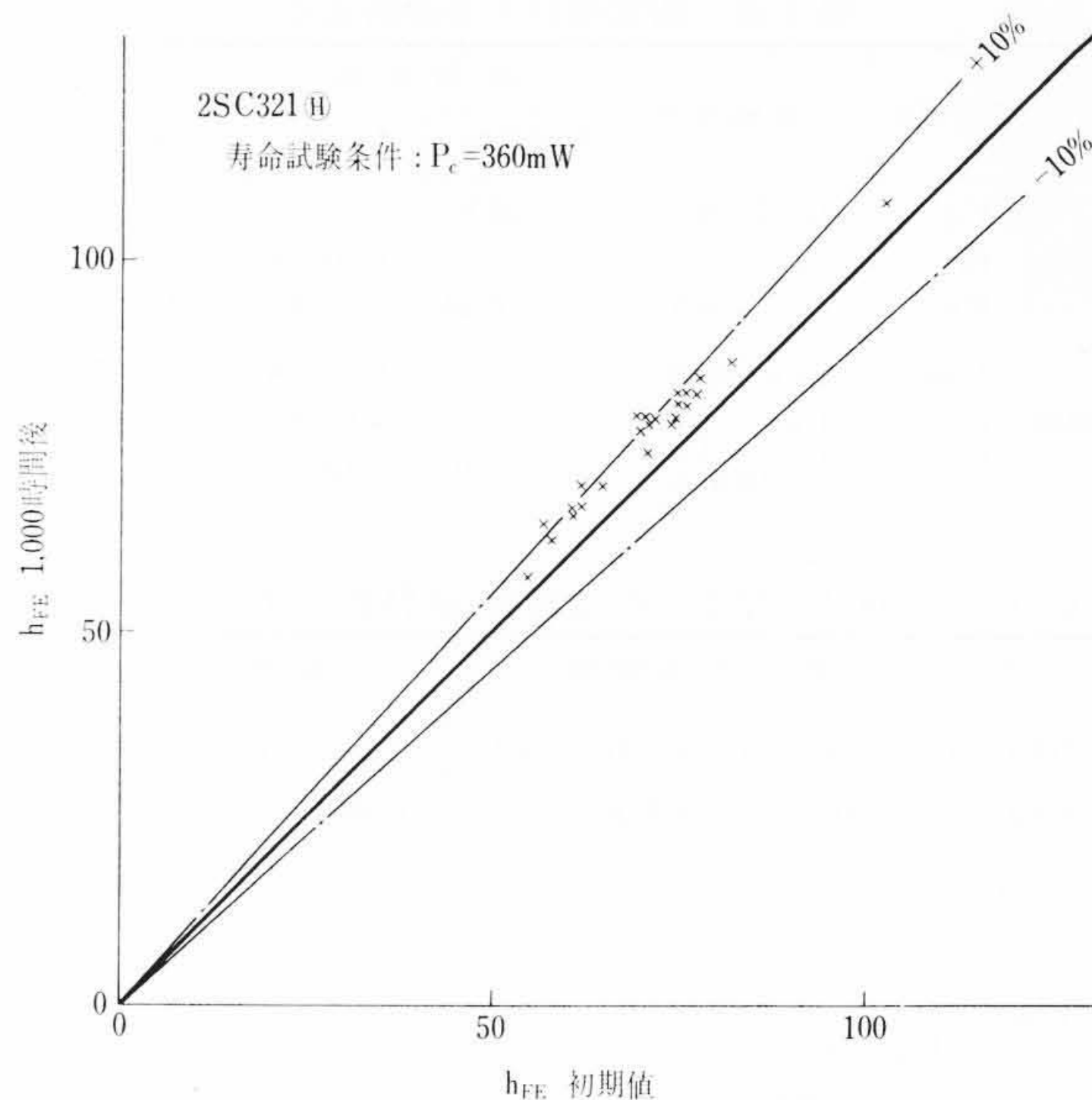
100°Cの温水中に5分以上、次に0°Cの水中に5分以上、次に100°Cの温水中に5分以上入れる。入れかえに要する時間は10秒以内とし5サイクル実施する。

(4) 耐湿性試験

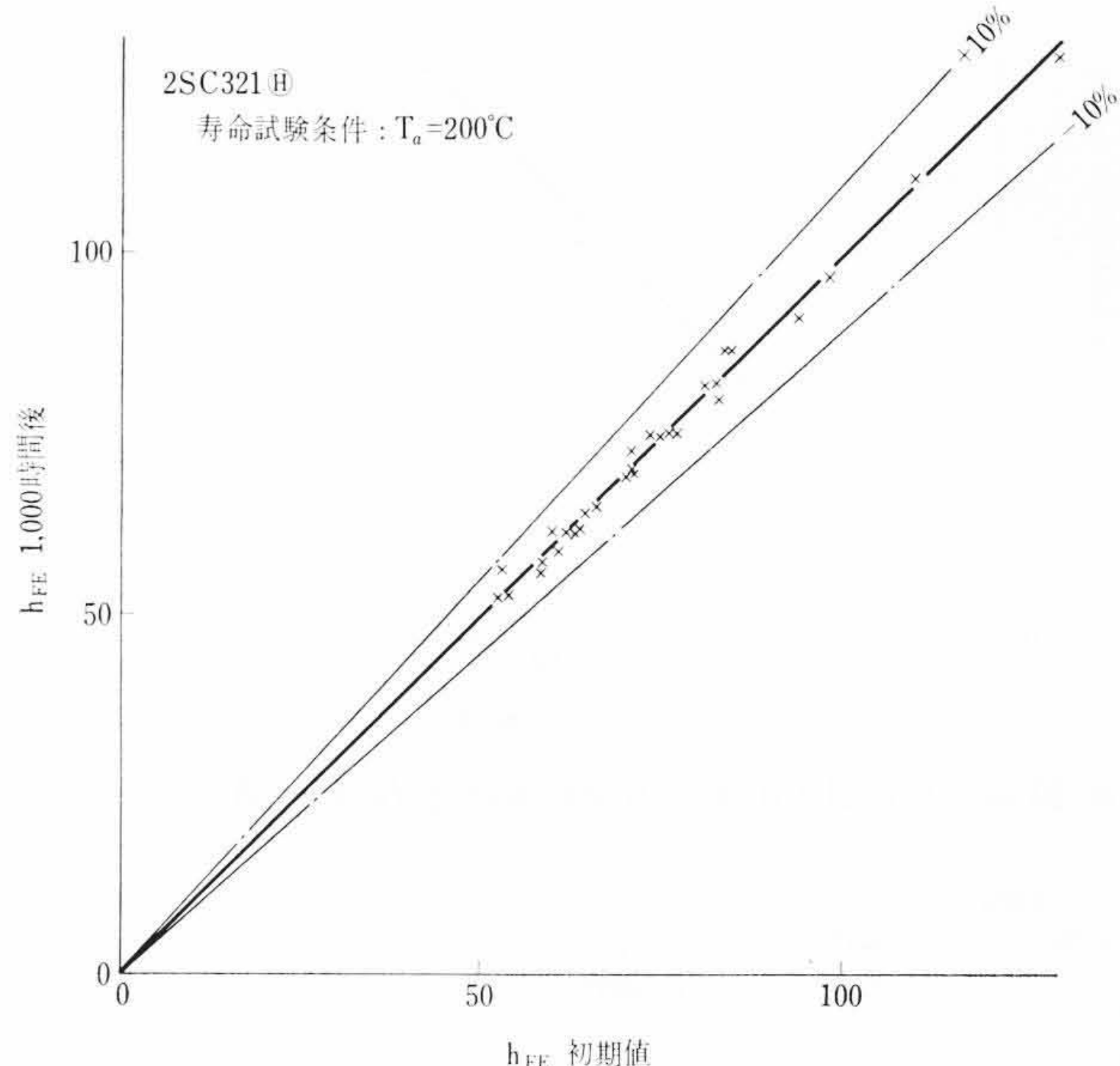
24時間を1サイクルとする10サイクルの耐湿性試験 ($T_a = -10^{\circ}C \sim +65^{\circ}C$, $RH=80 \sim 98\%$ の温湿度サイクル, MIL-STD-202 方法106)を行なう。

(5) 塩水噴霧

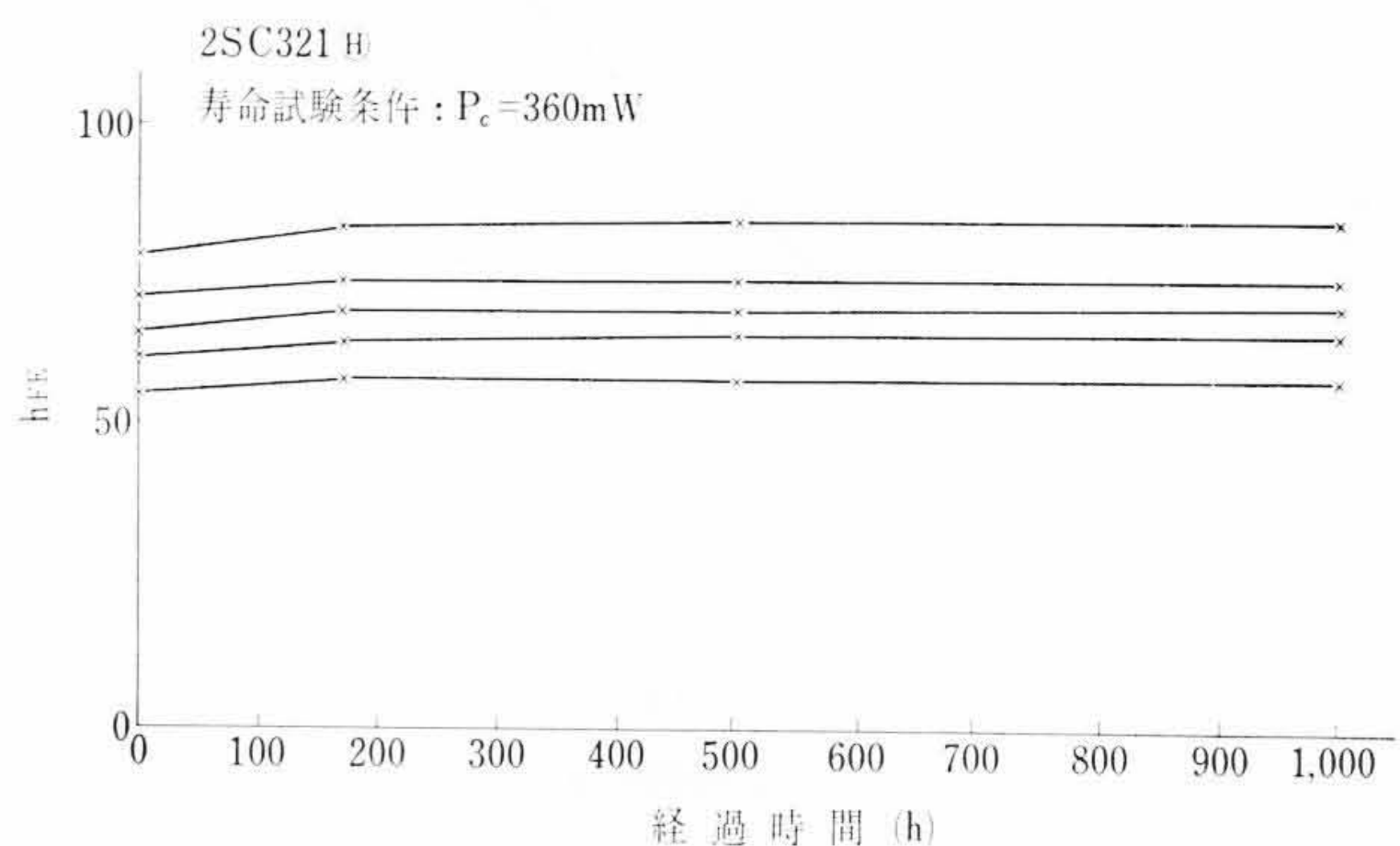
塩水濃度5%, 温度35°Cの塩水噴霧中に48時間放置する。



第37図 2SC321 H 動作寿命における h_{FE} ($V_{CE}=1V$, $I_C=10mA$) の変動



第38図 2SC321 H 高温放置における h_{FE} ($V_{CE}=1V$, $I_C=10mA$) の変動



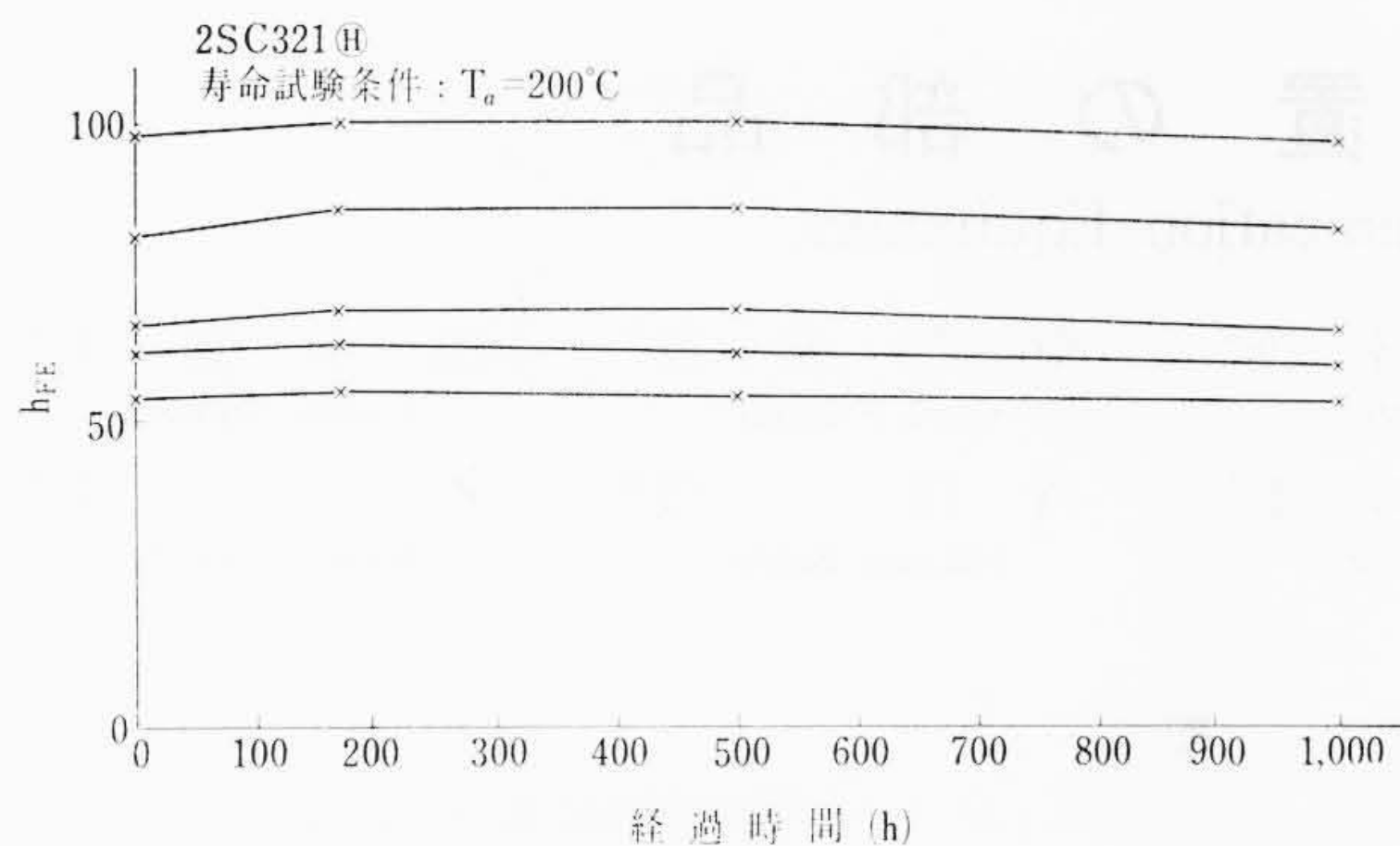
第39図 2SC321 H 動作寿命における h_{FE} ($V_{CE}=1V$, $I_C=10mA$) の経時変化代表例

(6) 落下試験

厚さ3cm以上のかえで板上に75cmより3回自然落下させる。

(7) 衝撃落下試験

トランジスタは X_1 , Y_1 , Z_1 , ダイオードは X_1 , Y_1 , Y_2 の三



第40図 2SC321 ⑩ 高温放置における h_{FE} ($V_{CE}=1V$, $I_C=10mA$) の経時変化代表例

方向に 500 G の衝撃を各 3 回加える。

(8) 遠心加速試験

衝撃落下と同じ方向に 1 分間 20,000 G の遠心加速を加える。

(9) 振動試験

全振幅 2 mm, 周波数 25 c/s の一定せん頭加速度 2.5 G の振動をトランジスタは X_1 , Y_1 , Z_1 に, ダイオードは X_1 , Y_1 の各方向に対し最低 24 時間加える。

以上九項目のほかに独自のテストを各種行なったが特性変動も少なく, 断線, ショートなどの不良率もきわめて低く 2SC321 ⑩, 1S1219 ⑩とも通信工業用品種として十分な品質を持っていることが確認された。

5.3 強制度の問題

従来までの半導体素子の寿命試験結果とフィールドデータなどからトランジスタ, ダイオードの寿命は定格より下げて使用するすなわち Derating すると非常にのびることが知られている。このうち寿命にいちばん直接的に影響を与えるものとして接合温度がある。これは劣化現象に化学反応が寄与していると考えればアレニウスの式 $R \propto e^{-B/T}$ (R =反応速度, B =活性エネルギー, T =絶対温度) により平均寿命 L_m と接合温度 T_j との間に $\log L_m = A + B/T_j$ (A , B 定数) なる関係が推定される。Derating Rate に相当する B の値としては寿命終了点, 品種により変わるが, だいたい 5,000~7,000 °K という値になる場合が多いようである。ゲルマニウムトランジスタの強制寿命試験の結果とフィールド実績の例を第6表に示す。 B の値はシリコントランジスタ, ダイオードに対しては十分裏づけデータがまだとられていないが, $T_j=200^\circ\text{C}$ のデータよりみてシリコン半導体素子により Failure Rate $10^{-8} \sim 10^{-9}/h$ のオーダーの実用寿命は十分達成できる可能性を示している。

また最近信頼度試験法として注目されているステップストレス法

第6表 ゲルマニウムトランジスタの強制寿命試験の結果とフィールドライフデータ

トランジスタの種類	用途	使用数	使用期間	実用機器におけるフィールドライフデータ	最大定格寿命試験における Failure rate
PNP Ge 合金 高周波 80 mW	電子交換	4,000本	36年10月 ~38年11月	$1.4 \times 10^{-8}/h$	$3 \times 10^{-5}/h$
PNP Ge 合金 低周波 150 mW	制御装置	17,000本	37年7月 ~39年3月	$1.5 \times 10^{-8}/h$	$4 \times 10^{-5}/h$

においても, シリコン半導体素子では $200 \sim 300^\circ\text{C}$ における不良率がそれほど高くないので, ストレスに対する不良発生分布をとるためにさらにストレスを上げて $350 \sim 450^\circ\text{C}$ のテストをすることが必要になる。しかしいたずらに接合温度を上昇させると, ある点から上の温度では通常使用時の劣化現象とはまったく別の現象 (たとえば purple plague の問題) などがおこり不良発生分布が不連続になるということになる。上述のようにシリコン半導体素子では通常のゆるい使用状態では不良発生率が少なく膨大な試料と時間が必要になるが, さりとて温度のみにより強制度をあげると上述のような問題があり寿命推定の困難さが今後の課題となろう。

6. 結 言

PCM 用として新たにシリコンエピタキシャルプレーナ形のダイオード 1S1219 ⑩ およびトランジスタ 2SC321 ⑩を開発した。これは通信用として標準的な素子であり, 信頼度に関しては Failure rate 10^{-8} を保証しうるように努力している。

そのほか通信工業用としてすでに製品化されているゲルマニウムトランジスタに関しては field data と強制試験との対応を確認した。試作 PCM システムに実用される信頼度は十分保証しうる。

PCM システムグループとは今後とも, 密接な関係を保ち改良開発を重ねる所存である。

なお, 通信用半導体素子の信頼度については日本電信電話公社電気通信研究所の関係各位からご指導をいただいている。本稿を借り深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) H. Kressel et al: Design Considerations for double-diffused silicon switching transistors RCA Review Vol. 23, No. 4 (1962), 587~616
- (2) A. E. Bakanowski and J. E. Foster: Electrical Properties of Gold Doped Diffused Silicon Computer Diodes Bell. Sys. Tech. Jour. Vol. 39 Aug. (1959) 87
- (3) M. C. McKinnon et al: IEE International Convention Record. 6 1963 93~103
- (4) T. A. Longo and Eeliksm: Semi. Prod. 1963 Nov. 27~31
- (5) C. Weuver and L. C. Brown: Phil Mag. 7 1962 1~16
- (6) J. P. Jan and W. B. Pearson: Phil. Mag. 8 1963 279~284