

高 耐 圧 シ リ コ ン 整 流 素 子

High-voltage Silicon Rectifier Cells

佐々木 威*
Takeshi Sasaki長谷 二郎*
Jirô Hase

要 旨

300A, 3,000Vという世界最大級のシリコン整流素子を完成した。

pn接合の形成には拡散法が用いられた。この方法を検討して、均一なpn接合を得、また接合部の小数キャリアライフタイムを十分長い値にすることができた。表面処理を検討するとともに表面の電界強度を中央部より低下させたアバランシェ形に接合を形成した。これによって電圧3,000V印加しての安定な動作が可能になった。この素子を過酷な長期寿命試験に投入し、従来品にまさる良好な信頼性を確認することができた。

1. 緒 言

電力用シリコン整流素子の単体容量の増大は整流装置の小形軽量化という見地からその開発当時より絶え間なく推進されてきた。シリコン単結晶製法の進歩、素子設計技術、製造方法の向上により最近では250A 1,800V, 500A 1,300V (いずれもGE製)といった素子が量産されるようになった。特に素子の逆耐電圧は図1に示すようにその向上は著しい。

日立製作所はその総合技術を結集して絶えずその先頭を歩んできた。さきに完成したDJ16形素子⁽¹⁾は東海道新幹線用電車にも用いられているが、この素子は不良率 $10^{-9}/h$ というすぐれた信頼度で運転されている。これの製作技術を土台として今回開発したシリコン整流素子H03DAは300A 3,000Vという容量において世界最大級の製品であり特に耐圧3,000Vは今まで実用されたものでは類例のないものでシリコン整流素子の耐圧の壁をやぶった飛躍的なものである。

この素子は車両用、電鉄用、化学用など大容量の整流装置に最適であり、装置の小形軽量化に貢献するところきわめて大である。

工場での過酷な寿命試験で高い信頼度が確認され量産化が完成した。昭和40年9月にはこの素子を使用した電鉄用地上変電所電源が組み立てられ納入されることになっている。

2. 素子の仕様と特性

2.1 素子 定 格

H03の定格は下記のとおりである。

形 式		C F	D A
定格せん頭逆耐電圧	(V_{peak})	2,500	3,000
定格過渡せん頭逆耐電圧	(V_{peak})	2,800	3,300
定格平均順電流	(A_{ave})	300	
定格瞬時過電流	1 c/s (A_{peak})	5,500	
動作温度	($^{\circ}C$)	-25~+150	
保管温度	($^{\circ}C$)	-25~+150	
重 量	(g)	460	

2.2 外形と構造

素子の外観を図2に示す。素子のシール部は高耐圧のためにひだつきのセラミックシール構造となっている。セラミックシールは振動や機械的な衝撃に強く堅ろうである。また封かんは接着強固で気密度を良好に保つに最も安全な構造および作業法で製作されている。

素子の外形寸法を図3に示す。ネジはDJ16と同じで互換性を有している。また国鉄標準素子の仕様、および現在審議中のIEC外形

* 日立製作所日立工場

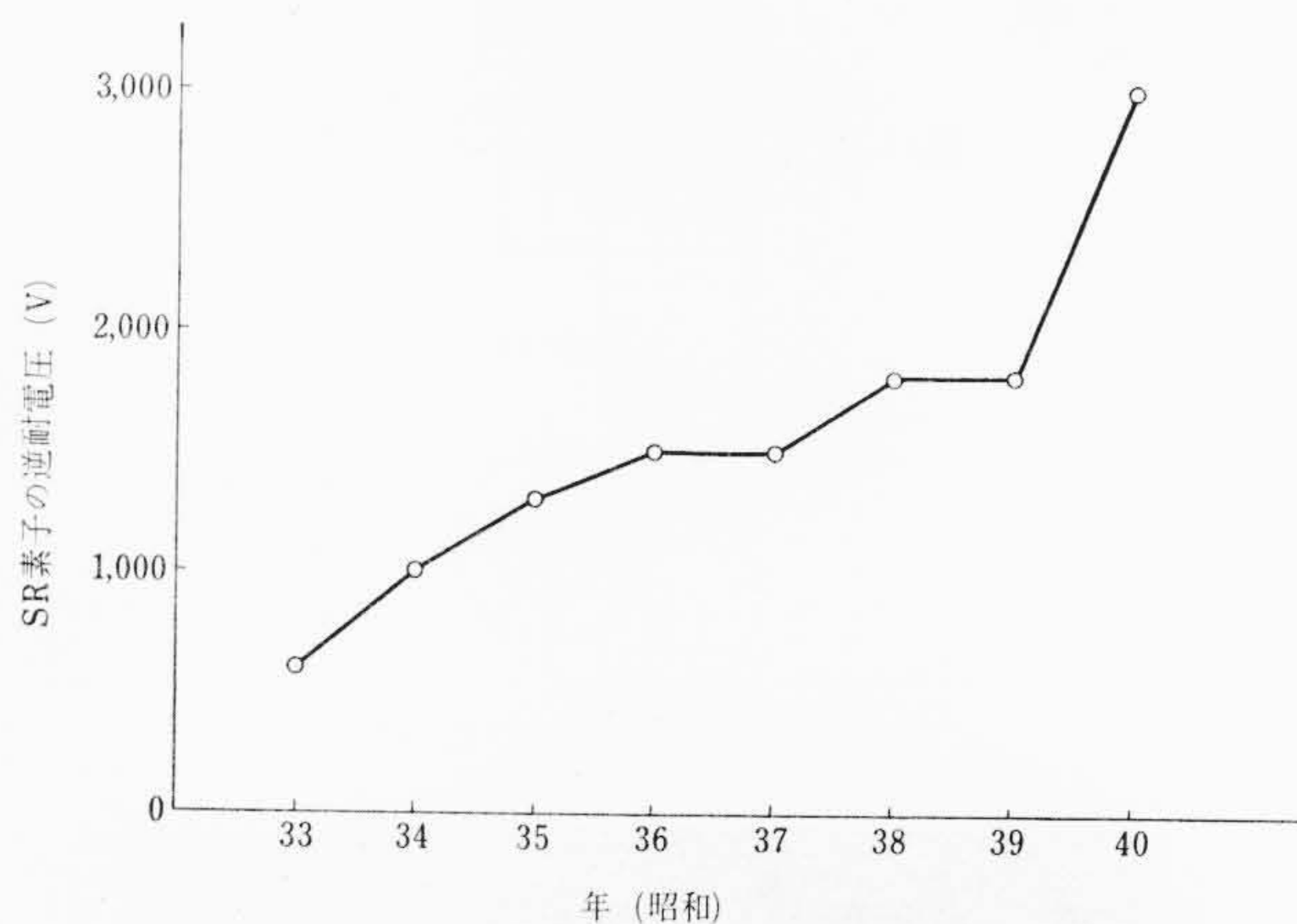


図1 量産SR素子逆耐電圧の発達

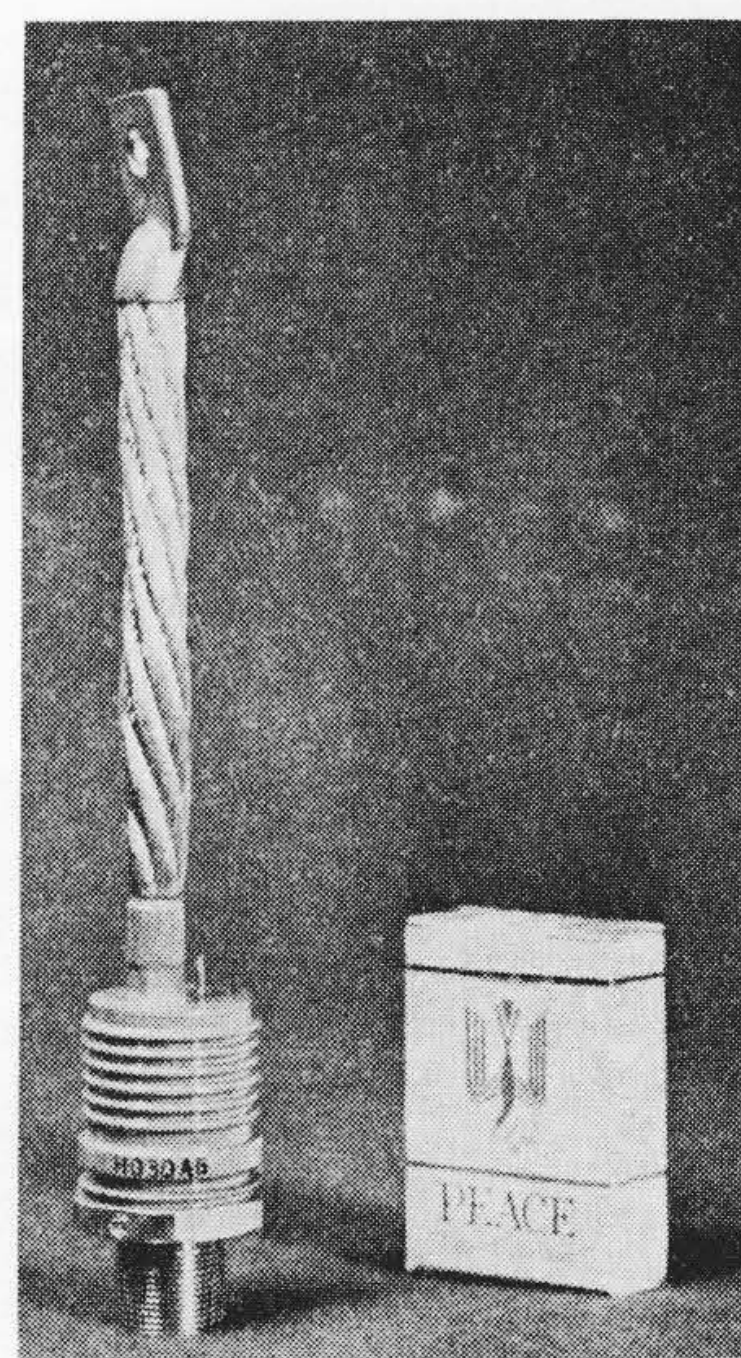


図2 H03 素子

寸法標準に合致している。

2.3 外部特性

(1) 逆 特 性

図4は室温の逆特性を、図5は150 $^{\circ}C$ の逆特性を示した写真である。図6は3,000Vの逆流値の温度依存性を、図7はなだれ電圧の温度依存性を示している。

図4で逆特性波形は3,600Vより鋭い折れ曲りを示している。これはこの電圧でなだれ現象があらわれるためである。図5では波形の折曲はない。これは図7のようになだれ発生電圧は温度に比例的に大きくなるためである。すなわちH03ではジャ

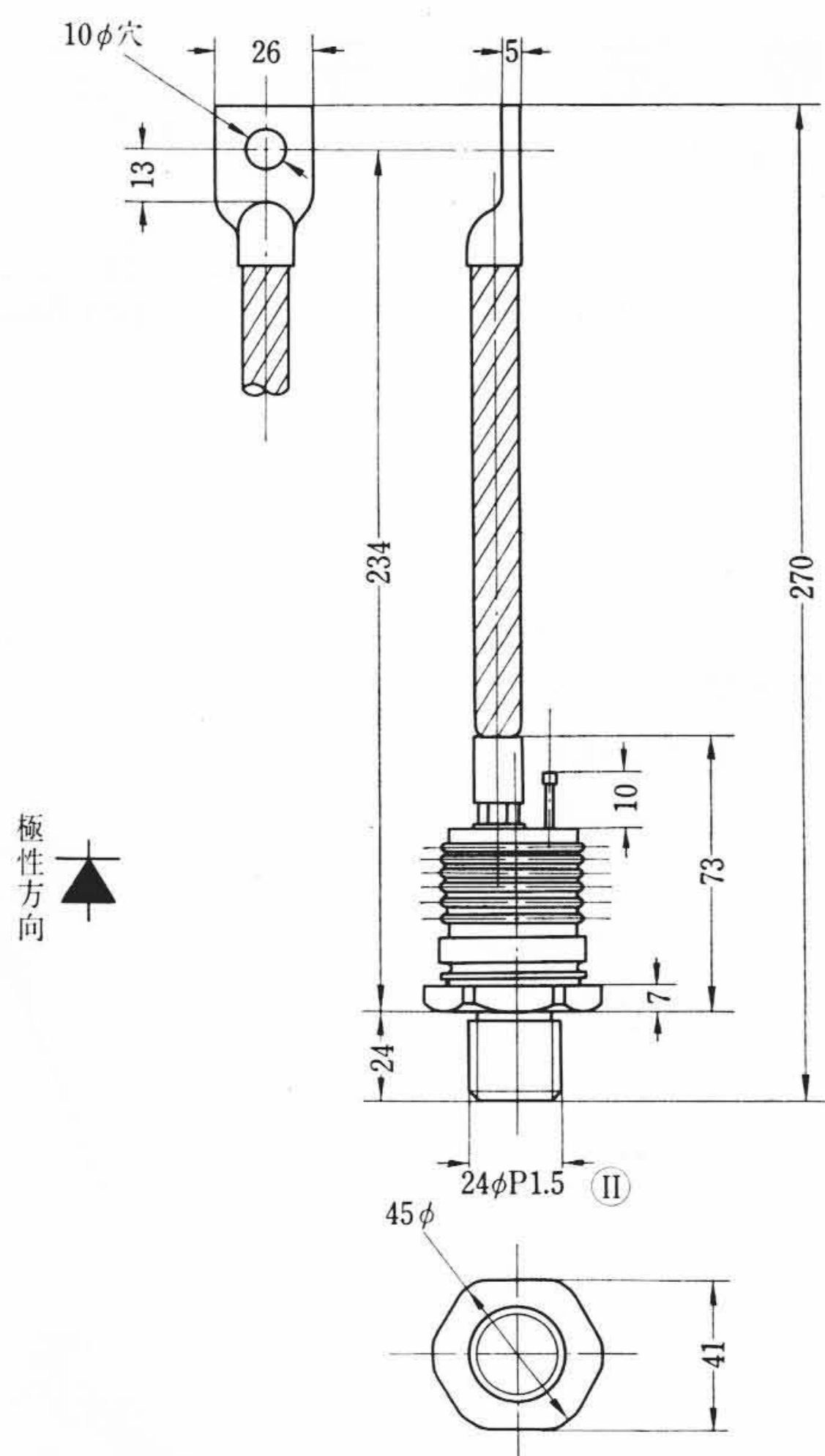
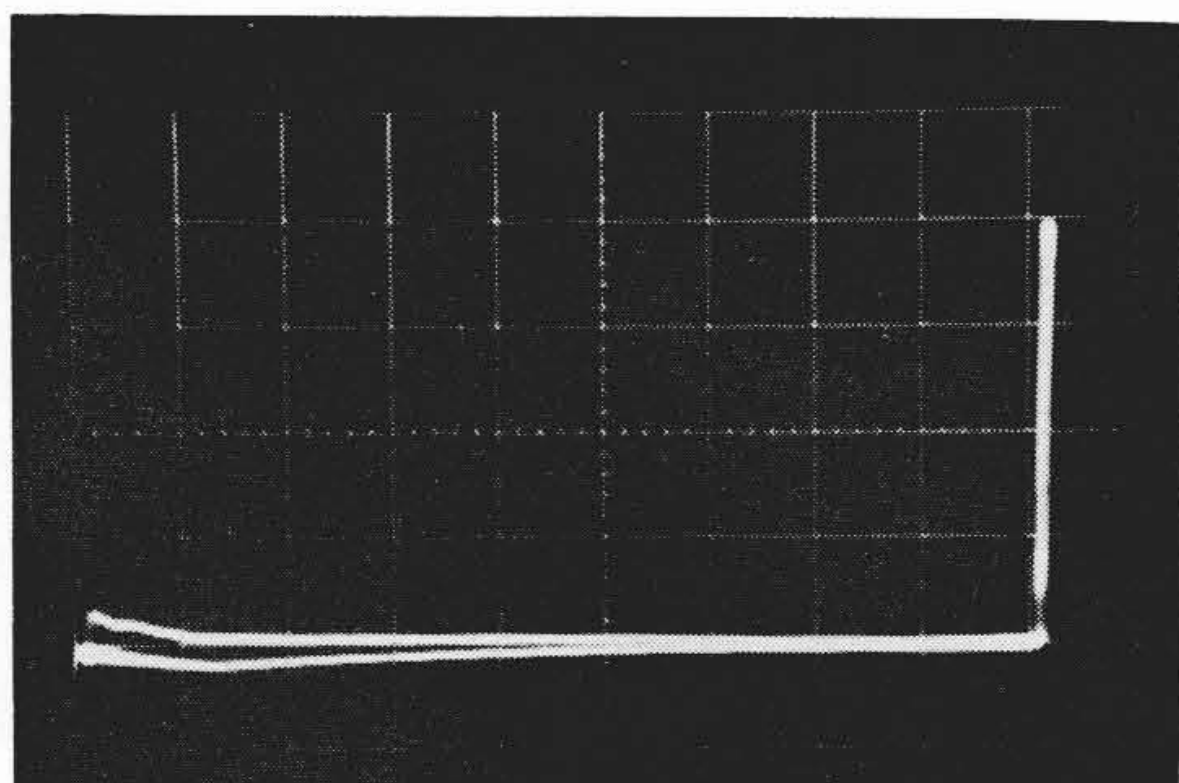
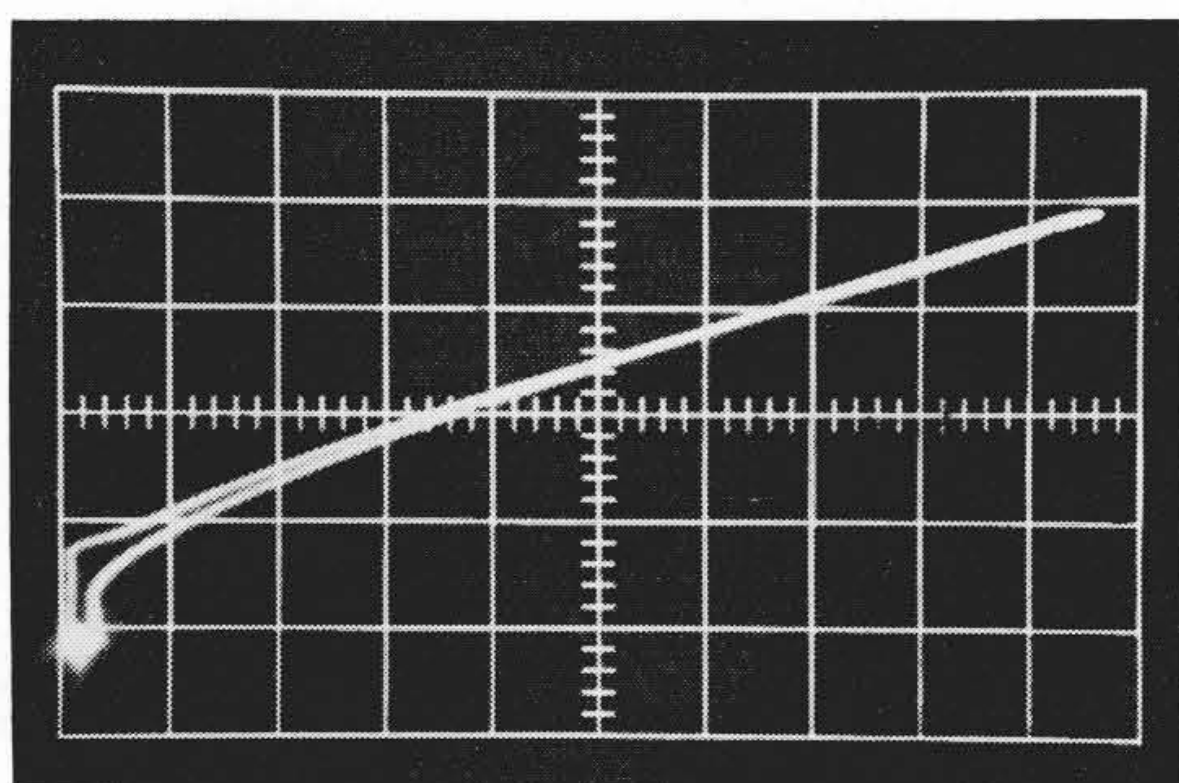


図3 H03 外形寸法図



縦軸 逆流 1 mA/div
横軸 逆電圧 400 V/div

図4 H03 DA 室温の逆特性



縦軸 逆流 1 mA/div
横軸 逆電圧 400 V/div

図5 H03 DA 150°C の逆特性

ンクシヨ温度が高いほど高い電圧に耐えうるといふ特長を有している。150°Cにおいては、ほとんどの素子が4,000 Vまで印加できる。

図6では活性化エネルギーはほぼ0.5 eVである。これは逆流発生機構の理論によくあっており、拡散や表面処理技術がうまく行なわれていることを示すにほかならない。

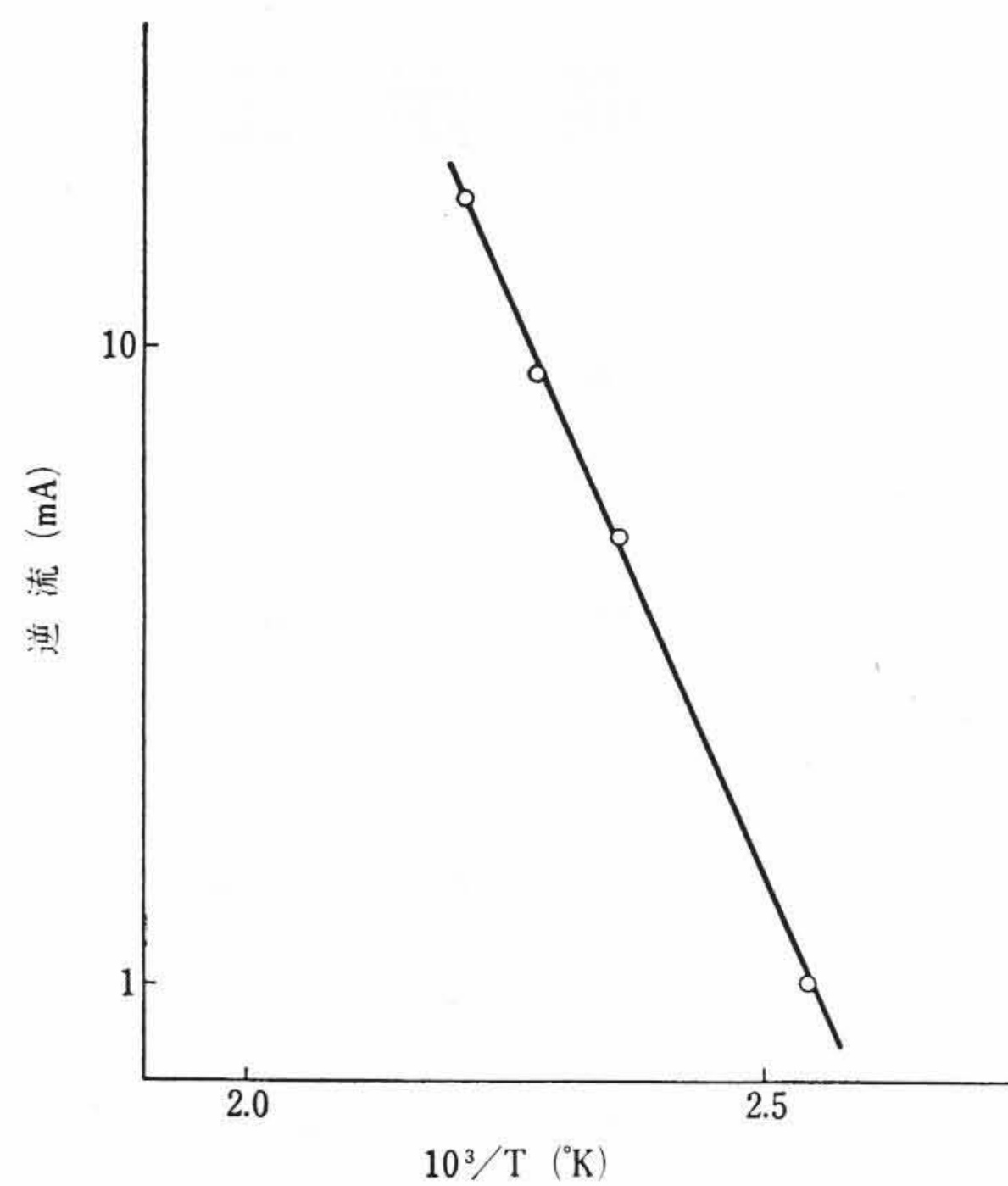


図6 3,000 V の逆流の温度依存性

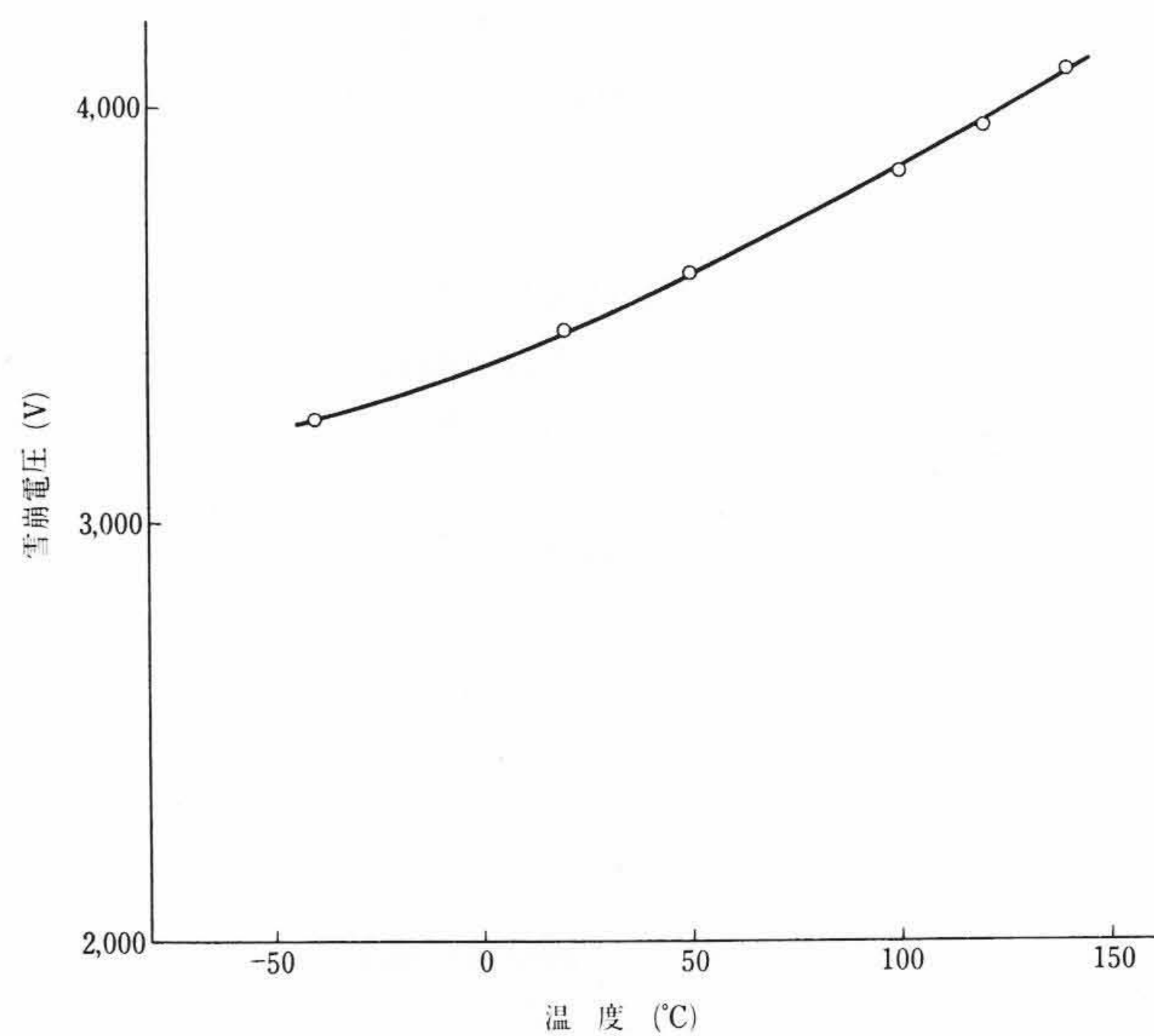


図7 雪崩電圧の温度依存性

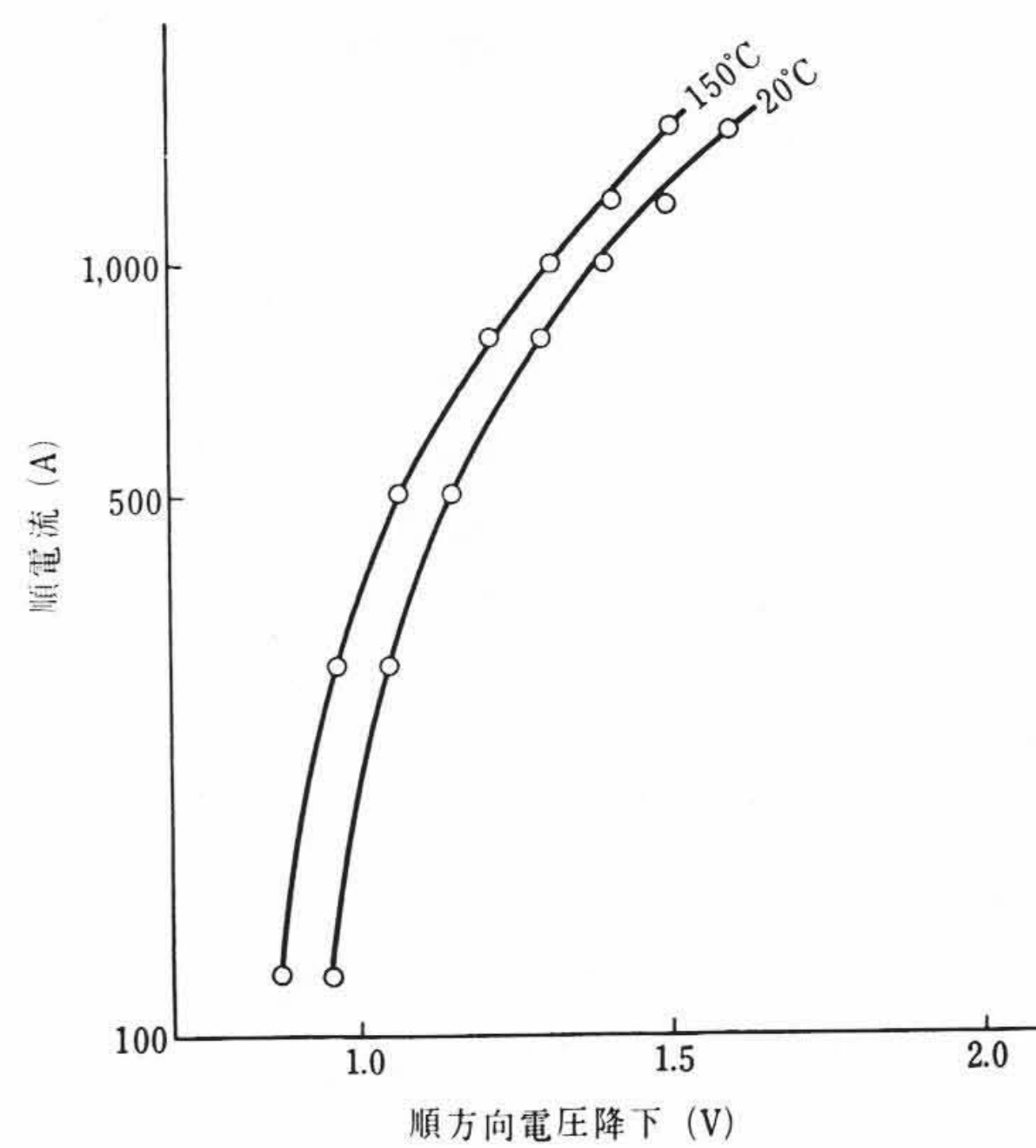


図8 順方向 V-I 特性

(2) 順特性

図8に順方向の V-I 特性を示す。この場合、高比抵抗層の少数キャリアのライフタイムは順方向電圧降下に影響を与えなくなる

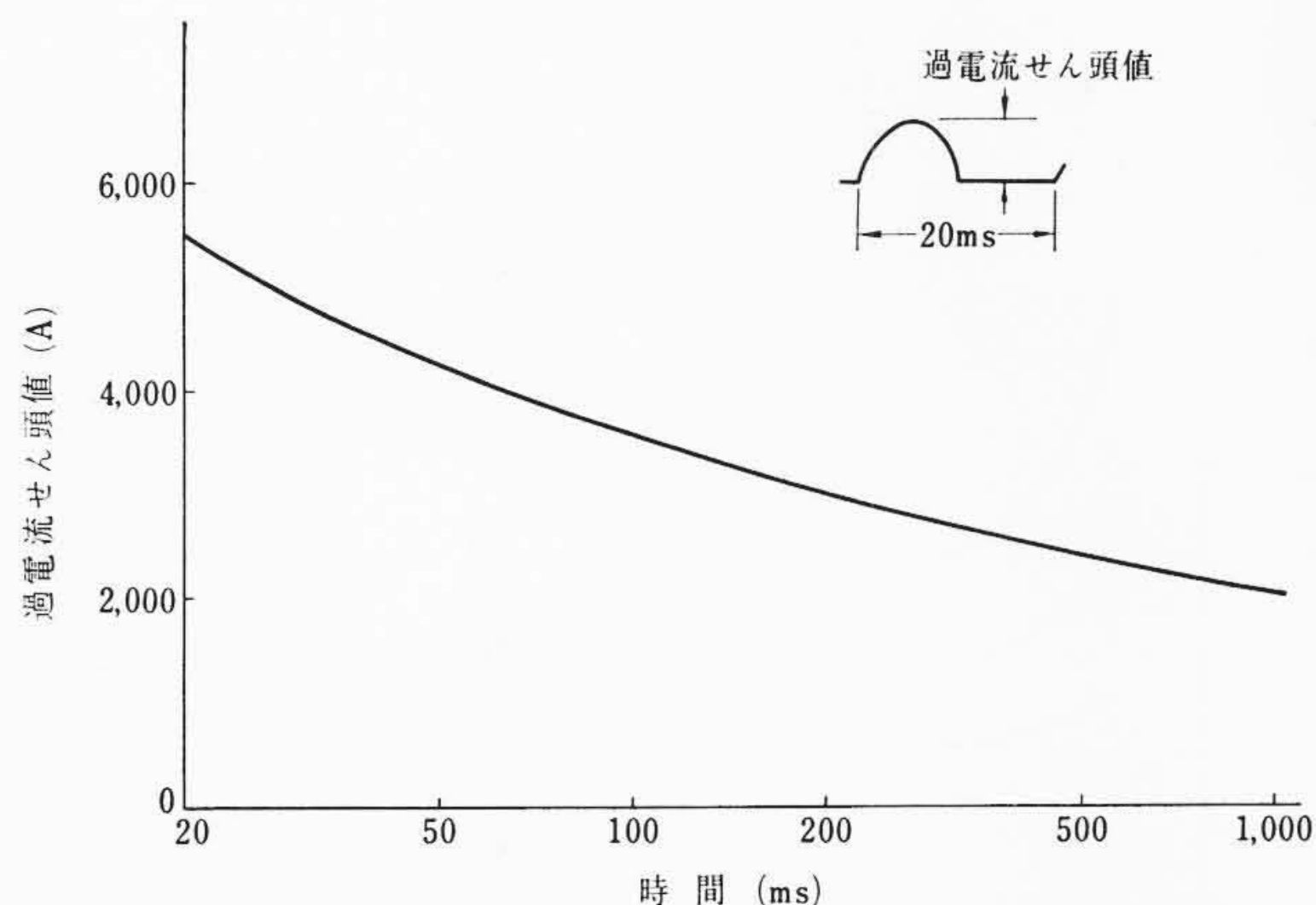


図9 過電流特性 (非繰返し)

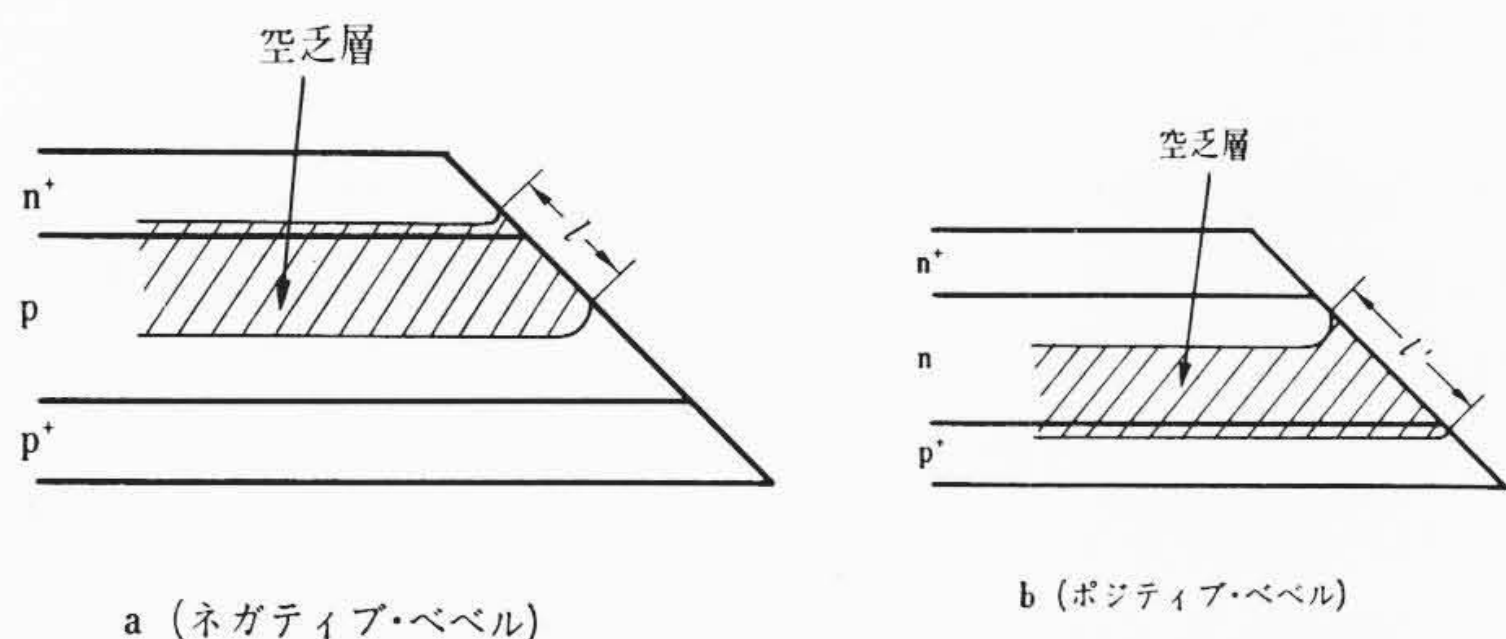


図11 ベベルと空乏層の広がり

まで十分に長くなっている。

(3) 過電流特性

図9に過電流特性を示す。これはジャンクション温度 150°C で定格電流を通電後に過電流が流れる場合の通電可能な非繰返し電流 (Non repetitive over current) を示す。

3. 素子高耐圧化の問題点

素子高耐圧化のキーポイントとして以下の4項があげられる。

- (1) 均一な整流接合を製作すること
- (2) 接合表面の強化
- (3) 逆流の低減
- (4) 接合部少数キャリアのライフタイム向上

それぞれの問題点と H03 での問題の解決法を以下にのべる。

3.1 pn接合の均一性

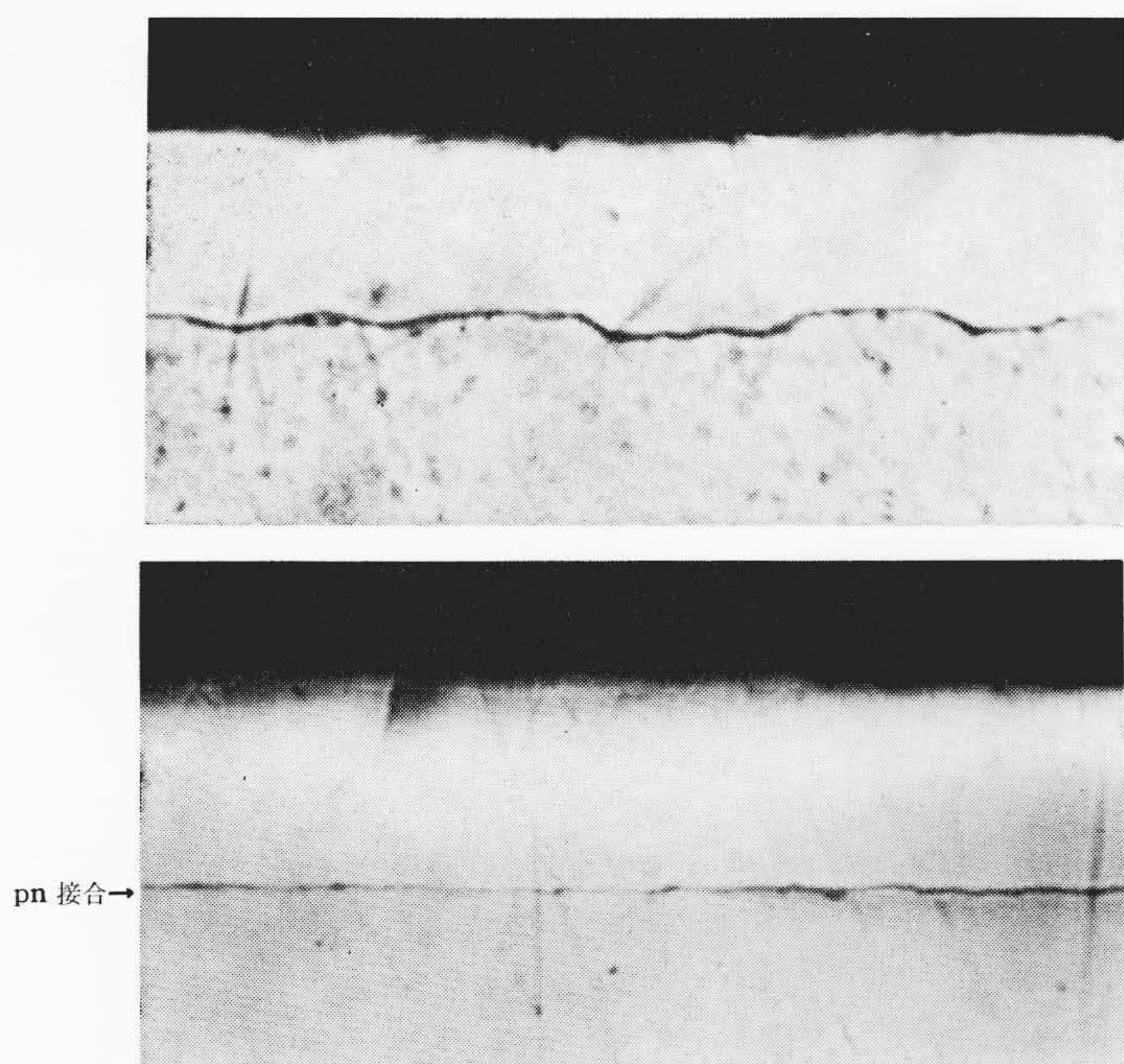
pn接合が均一で平坦でないと高耐圧特性は得られない。凹凸部に電界が集中し破壊の原因となる。接合が不斉一であると逆特性波形はソフトになり長期間の高電圧印加で劣化しやすく素子寿命は短い。

整流接合の形成には一般に拡散法、合金法あるいはエピタキシャルグロース法などいろいろあるが H03 には拡散法が用いられた。

拡散法による接合面は合金法に比べると欠陥がなく均一、平坦であるが接合面のできぐあいには拡散法によっても相当差がある。特に拡散すべき不純物の種類の選択、拡散方式の選定は均一な接合製作の根本を決定する。H03 ではこれらの方法を種々検討して接合面の凹凸が従来 $2\sim 3\mu$ あったものを、 1μ 以下にまで減少させることができた。図10に異なる2種の拡散による接合面の凹凸の状況を示す。aは実際の素子には適用されなかったが拡散技術の検討を始めた当初に出来たもので凹凸の高さは 5μ もある。bは H03 の接合である。aに比べ格段にすぐれていることがわかる。これによって高い電圧まで安定に電圧印加が可能になった。

3.2 接合表面の強化

従来シリコン整流素子の弱点はシリコンの端面であった。逆特性

図10 拡散法の差によるpn接合の均一性
(倍率 $\times 10^3$)

の劣化した素子はそのほとんどが表面をふたたび清浄化処理することにより特性が回復する。すなわち劣化は接合の内部ではなく表面で生じていることが多い。これはシリコンの誘電率12に対し空気の誘電率は1と小さいため表面の電界強度は内部に比べて非常に大きくなること、表面であるから不純物の付着などの外部条件に影響されることが避けられずそれによって局部に電流が集中するといった問題があるからである。耐圧向上のためにはこれの解決が重要なポイントになる。

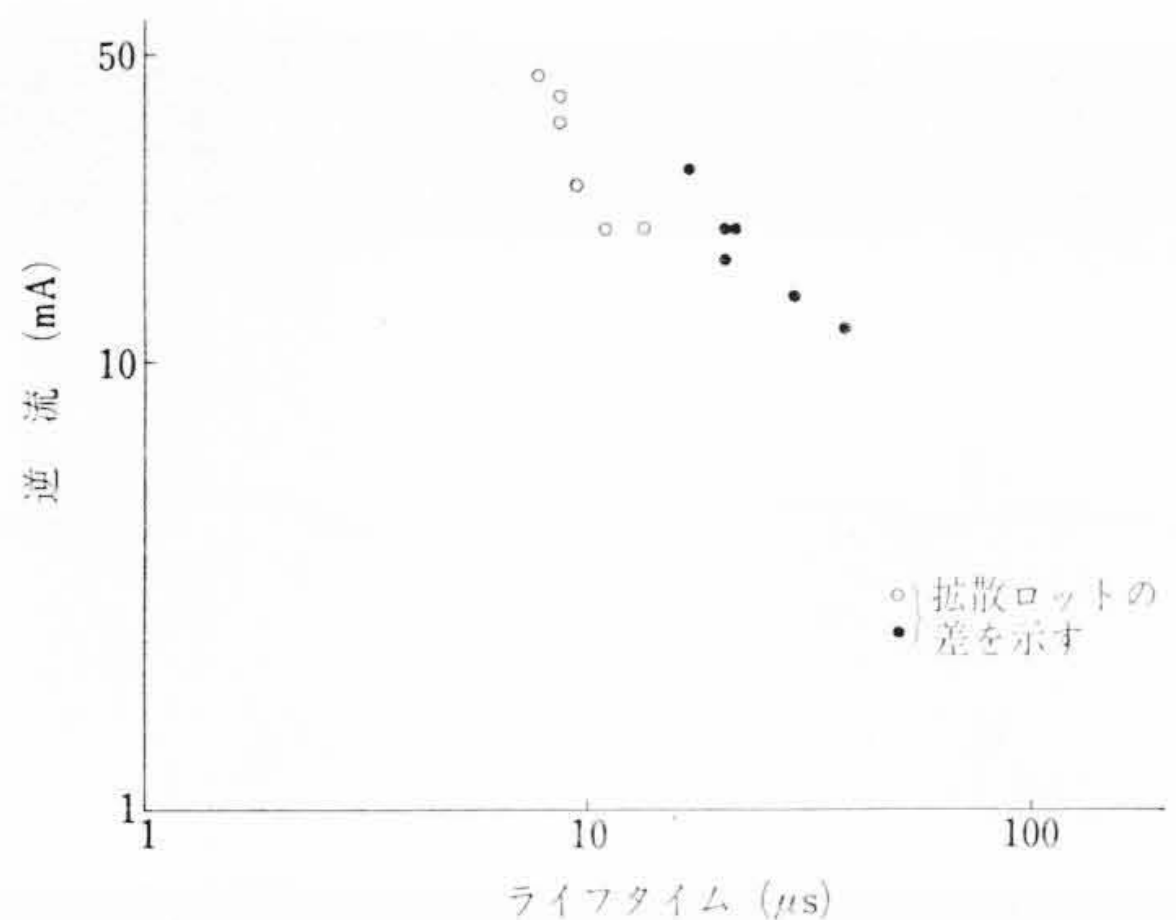
これに対しては表面の清浄化の徹底、不活性化処理ももちろん大切であるがまず電界強度の低減があげられる。そのほかひとつの方法として接合を内部なだれ発生形にすることが挙げられる。これは表面に対して内部を1種のサージアブソーバとして作用させ内部でパワーを吸収して表面で非可逆的な変化の生じることを防ごうとするものでいわゆるコントロールド・アバランシェ・レクチファイア (Controlled Avalanche Rectifier) ⁽²⁾ の考えかたをとるものである。

(1) 接合電界強度の低減

表面電界強度は不純物濃度分布、シリコン厚み、端部形状⁽³⁾、さらには表面に吸着するイオンの極性や数によって影響される。これの低減にはジャンクションの形状を検討しなければならない。シリコンウエハ端面を垂直のままにしておかないで斜めに成形する。これをベベルと言っているが、これによって表面の電界強度を低減できる。これは図11に示すように端部を斜めに切断することにより、表面の空乏層の幅が中央に比べて大きくなるためにほかならない。このベベルは図のa、bで比較して示されるように、bのように端部を切ったほうが同じ角度の場合電界強度は小さくなる。このような点からジャンクションの整流方向、シリコンの導電形はきめられねばならない。

また表面電界強度は不純物濃度分布、シリコンウエハ厚みによっても影響される。電界強度はポアソンの式に適切な境界条件を入れて解くことによっていろいろな場合について求めることができる。

H03においては電子計算機による計算を繰返し、最適な不純物濃度、厚み、ベベル角度を求めた。この最適値は電界強度のみより求まるものではなく順方向電圧降下、工作上の費用まで加味して総合的にきめられなければならない。



試料 200A 級コントロールアパランジェダイオード
温度 200°C

図 12 逆流のライフタイム依存性

(2) なだれタイプについて

なだれ現象により素子の逆方向の V-I 特性は急激に立上るがこれは他の破壊と異なり可逆的な変化である。この現象が接合内部の全面にわたり均一に生じると表面に対してサーミアブソーバのようになる。したがって表面の局部にパワーが集中して非可逆的な破壊を生ずることがなくなるのである。

これは試験電圧以上のある電圧で一様になだれが生じるように接合内部を設定しておき、この電圧までは表面の電界強度は内部より小さくなるようにベベルなどの技術で表面を処理することによって実現することができる。この際問題になるのはシリコンウェハの直径方向の比抵抗分布である。これの良否が均一になだれが生じるかいか、すなわちこの形の接合の破壊のパワーに関係する。比抵抗分布の悪い単結晶では接合をなだれ形にする意味がなくなる。

3.3 逆流の低減

電圧 3 kV 級の素子になると電圧が高いため逆方向の電力損失が無視できなくなる。高電圧まで熱逸走をおこすことなく安定に電圧を印加するためには逆方向の電流を極力小さくする必要がある。

逆流は以下の式で近似できる⁽⁴⁾。

$$I = I_0 + I_{sc} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 I_0 : 拡散電流密度

I_{sc} : 空乏層発生電流密度

第 1 項は室温で 10^{-12} A のオーダーであり 200°C 以下では無視してよく逆流は第 2 項で考えてよい。逆流の温度依存性(図 6)をみてもこのことは明らかである。 I_{sc} は次式で示される。

$$I_{sc} = q_w G M \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 q : 電子の電荷

W : 空乏層の幅

G : 電子、正孔対の発生率

M : 増倍係数

I_{sc} を小さくするには W を減らすこと、 G を減らすことの二つの方法がある。前者のためにはシリコンの厚み、不純物分布に考慮が払われねばならない。後者のためには接合の少数キャリア寿命(ライフタイム)を延長することが必要となる。図 12 はライフタイムと逆流の関係の一例を示したものである。

G は接合の清浄化処理、不活性化処理の方法によって大幅に異なる。またなだれ電圧を高くとるため高比抵抗層の比抵抗は相当高くなっておりそのため表面は吸着イオンの性質や量によって敏感に影響をうけ、反転層や蓄積層を生じやすい。これによって表面の W も変わってくる⁽⁶⁾。表面の W が変わるということは逆流のみならず 3.2 に述べた表面の電界強度にも影響するものであり、そういった点でも接合の表面処理は非常に問題である。

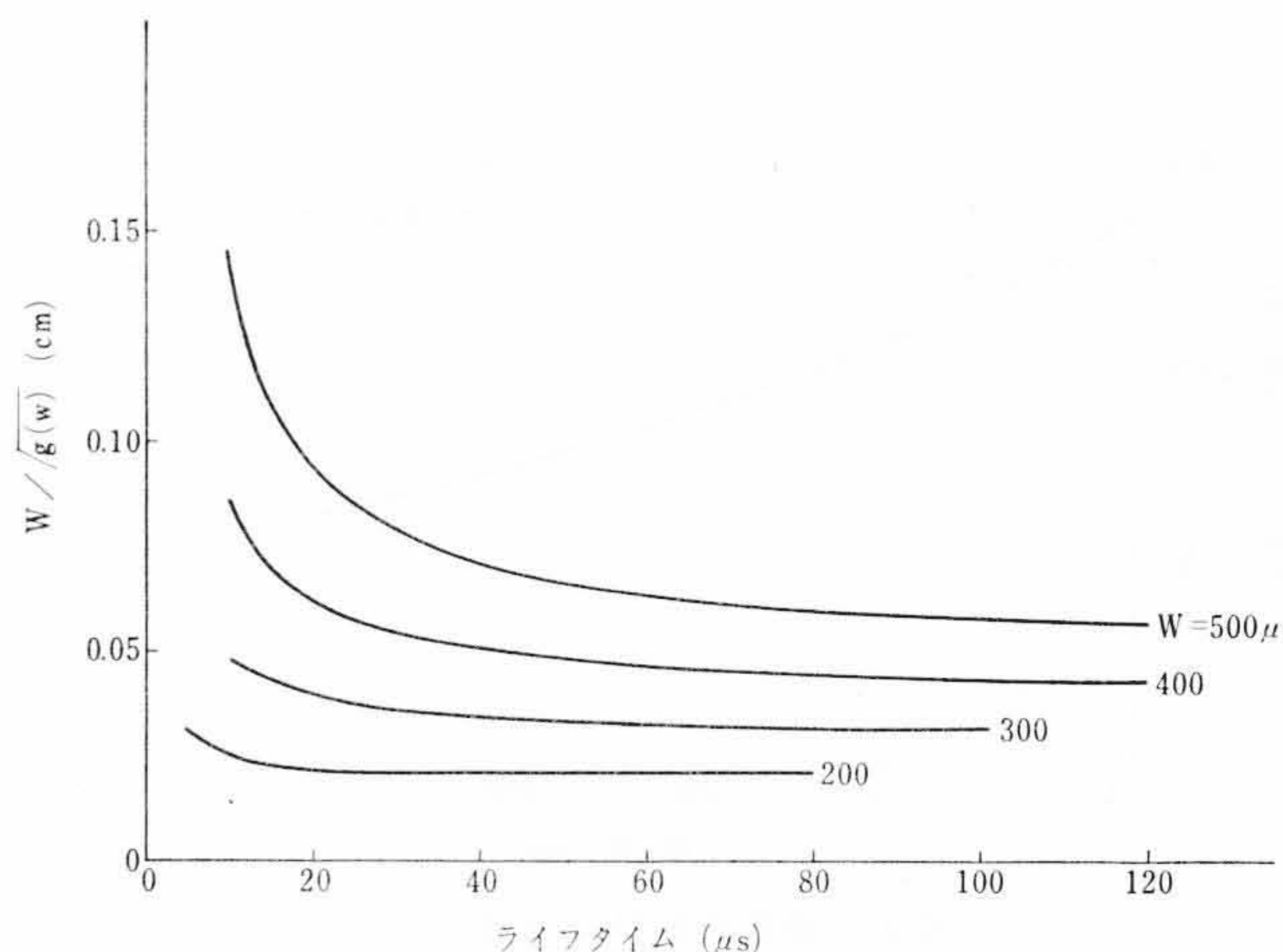


図 13 ライフタイムの順方向電圧降下におよぼす影響

H03 では接合清浄化処理後の不活性化処理の条件について特に綿密な検討をくりかえし、逆特性が安定で逆流の小さい作業条件を確立した。

3.4 ライフタイムの向上

接合部の少数キャリアライフタイムは 3.3 で述べたように逆流について問題であるばかりでなく順方向の V-I 特性にも影響する。

素子の順方向特性は通常動作の電流領域では以下の式で近似できる⁽⁵⁾。

$$V = V_0 + V_1 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 V_0 : 接合部分の電圧降下

V_1 : 高比抵抗層の電圧降下

$$V_0 = \frac{1}{\beta} \ln \frac{I}{I_s}$$

$$V_1 = \frac{aW}{\beta} \sqrt{\frac{I}{g(w)}}$$

ここに、 I : 電流密度

W : 高比抵抗層厚み

$\beta = q/kT$

I_s, a : 定数

V に対するライフタイムの依存性は V_1 項の $g(w)$ として以下で示される。

$$g(w) = \frac{\left(\frac{\omega}{2}\right)^2}{\left[\cos h \frac{\omega}{2} \tan^{-1} \left(\sin h \frac{\omega}{2}\right)\right]^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$\omega = W/L \quad L = \sqrt{D\tau} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 D : 拡散距離

τ : ライフタイム

τ と $g(w)$ の関係を図 13 に示す。すなわち順方向電圧降下を小さくするため高比抵抗層の厚みごとにライフタイムはある程度以上の値が必要である。高耐圧素子の場合高比抵抗層の厚みから、順方向電圧降下を下げ素子の電流容量を増大させるためには非常に長いライフタイムが必要である。拡散後のライフタイムを 50 μ s, 100 μ s といった長い値に保つことは技術的に非常にむずかしいことであって、拡散において不純物濃度を任意に再現性よく制御することとならんでライフタイムの制御が製造技術上ひとつのキーポイントになる。これは拡散時に生じる結晶中の欠陥や、好むと好まざるにかかわらずドナーやアクセプタと同時に拡散される微量の Au⁽⁷⁾ などの重金属不純物によるものである。

H03 においては拡散の前処理、拡散方法に詳細な検討を加えて

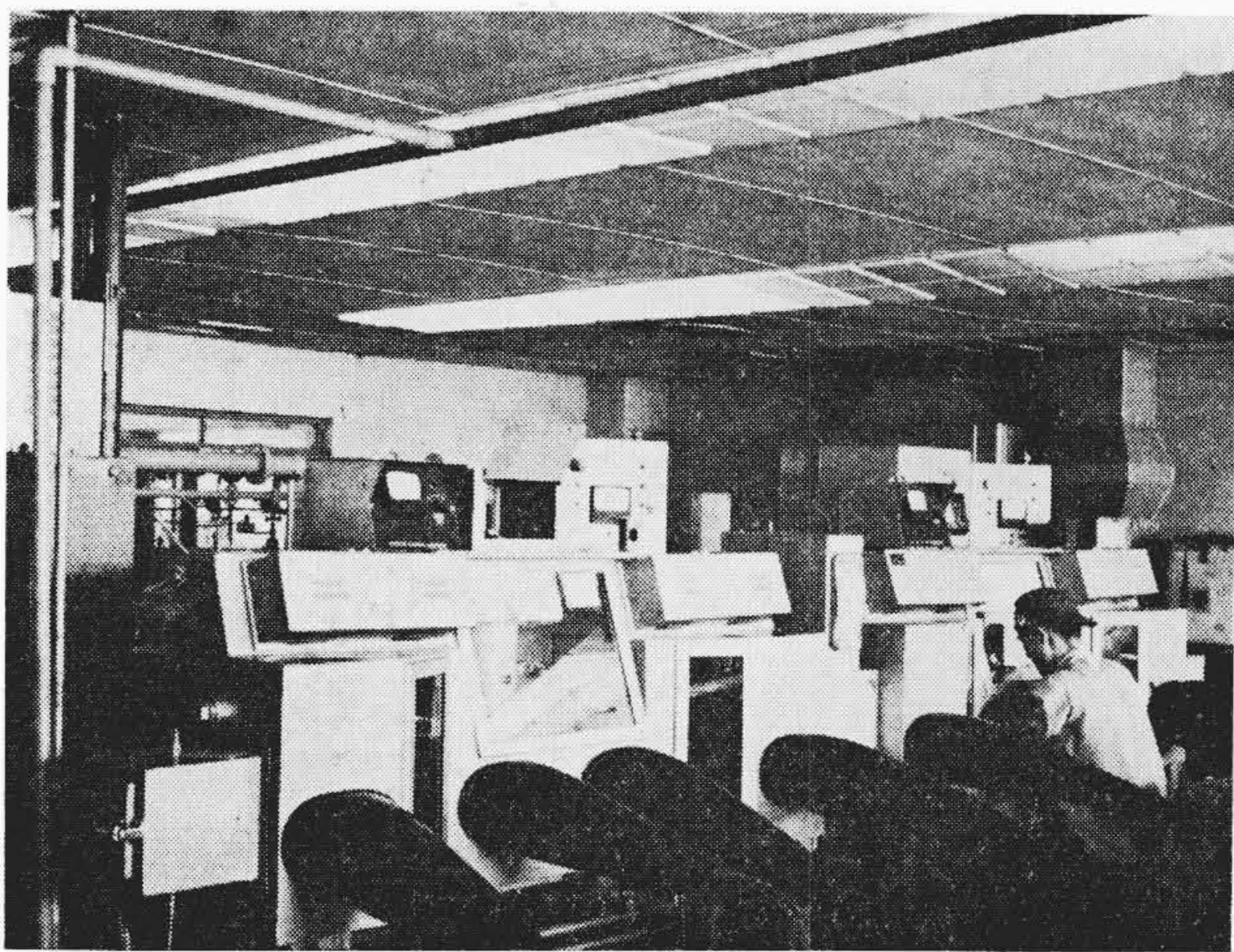


図 14 作業に用いられるドライボックス

拡散の後に $100\ \mu\text{s}$ 以上のライフタイムを得る方法を確立した。

またいったん拡散された重金属不純物を外へ取り出す方法もあわせ検討し作業方法を確立した。これによって高い歩留で素子の生産が可能になった。

4. 素子の製法

H03の製法は概略下記のとおりである。

スライシング	単結晶を(111)面で切断する
↓	
ラッピング	シリコンウェハを一定厚みの平行板に仕上げる
↓	
拡散前処理	シリコン表面の脱脂、および重金属不純物を除去する
↓	
拡散	接合を形成する。不純物の濃度、拡散深さ、高比抵抗層中のライフタイムが厳格に制御される
↓	
コンタクト形成	シリコン表面にオーミックコンタクトを形成する。この際、シリコンと銅の熱膨張係数の差によるシリコンへのひずみ減少のための電極も同時に取り付ける
↓	
端面処理	ベベルなど表面電界強度低減のための処理を行なう
↓	
パッシベーション	表面の清浄化処理を行なったのち不活性化処理を行なう
↓	
ベース、リード接着	耐熱疲労性のソルダでジャンクションにベース、内部リード線を取り付ける
↓	
シール溶接	セラミックシールを素子本体へ溶接する
↓	
封じ切り	真空加熱によりアウトガスを行なったのち、シール内に乾燥ふん囲気を導入し封じ切る。パッシベーションよりこの工程まですべて露点を厳重に管理したドライボックス中で作業が行なわれる
↓	
シールテスト	ヘリウムテストおよび発泡テストを全素子について行なう
↓	
デバッグ	初期不良の性質をもつ素子をピックアップするため、冷熱サイクルテスト、高温放置、高温逆電圧印加などを全素子について行なう
↓	
外リード線接着	外リード線を素子本体に取り付ける
以上ののち最終検査工場を経て、塗装、マーキングが行なわれて	

素子は完成する。

5. 素子の信頼度

5.1 逆特性について

H03は特に開発された高級拡散技術により拡散層がきわめて均一であること、シリコンウェハの厚みが大きいこと、表面の電界強度が低いこと、およびなだれ形になっていることなどから素子の逆特性に関する信頼度は従来の素子より格段に高い水準にある。

工場で高温逆電圧印加試験、高温放置試験などの長期寿命試験を行なったが劣化発生は全くなかった。

5.2 熱疲労について

H03はさきに関した耐熱疲労性ソルダ、熱ひずみ減少構造などの技術に加えて、さらにその後の検討結果が採用されている。特に電極とソルダ間の接着に新しい材料と作業方法が開発され接着がいったん強固になった。またソルダリングの方法を改良し接着層をいったん均一に形成することにより熱抵抗のバラツキを小さくした。

寿命試験として長期の間欠負荷試験、冷熱サイクル試験を行なったが、大容量素子であるにもかかわらず従来の素子にまさるとも劣らぬ水準にあることを確認した。

5.3 その他

振動試験、衝撃試験、締付試験も行なったが異常はなかった。

現在までの標準素子 DJ16 は約1年間に 50,000 個以上出荷しているが、現在までの不良は指数分布モデルで考えると不良率が $4 \times 10^{-9}/\text{h}$ である。これは内外の信頼性に関する諸資料と比較して第1級の値と言える。H03は長期寿命試験の結果 DJ16 と同じかまたはそれ以上であることが示されている。

6. 結 言

3,000 V 300 A のシリコン整流素子を完成し量産化した。われわれは本素子の開発にあたり接合の形成には拡散、合金、エピタキシャルグロース、接着にはソルダリング、加圧接触などほとんどすべての半導体素子製作技術を入念に検討した。その結果、性能、コストの点で現時点での理想的なものとして H03 の製造方法を確立した。なお需要と原料入手の条件が許せばさらに高耐圧の素子の製造を行なう用意がある。

ここで問題になるのはシリコン単結晶を含む原料の質と価格であり工業的に採算があうかどうかはこの点にかかっている。

外国では耐圧 5,000 V の素子⁽⁸⁾が報告されているが電流容量は小さいようである。われわれも電圧の向上より電流容量の増大のほうが問題が多いと考える。特に接合のライフタイム向上が最大の問題になろう。

終わりにあたってご指導をたまわった日立製作所日立工場整流器部毛利部長、浅野課長、守田氏、試験を担当された吉村氏、また試作作業を担当された佐藤二美夫君に厚く謝意を述べる。

参 考 文 献

- (1) 川上、佐々木、ほか：日立評論 46, 91 (昭 39-5)
- (2) F. W. Gutzwiller: Direct Current, Dec. 1962, 335
- (3) R. L. Davis, F. E. Gentry: Control of Electric Field at the Surface of P-N Junction, IRE. Electron Devices Meeting Paper (1962)
- (4) H. S. Veloric, M. B. Prince: B. S. T. J., 36 975 (1957)
- (5) D. A. Kleinmann: B. S. T. J., 35 (May 1956)
- (6) C. G. B. Garrett, W. H. Brattain: J. Appl. Phys., 27 (March 1956)
- (7) 小杉、小川：日立評論 46, 1 (昭 39-9)
- (8) N. R. Howard, A. K. Jones: Direct Current, Nov. 1964 157