

電力用シリコン整流素子の問題点

Some Problems on High Power Silicon Rectifier Cells

中 戸 川 武* 小 川 卓 三**
Takeshi Nakatogawa Takuzō Ogawa

内 容 梗 概

電力用シリコン整流器製作上の立場から高純度シリコンなど材料上の問題点, 合金形整流素子, 拡散形整流素子, 制御極付整流素子の製作技術および特性上の問題点について概説した。

1. 緒 言

電力用整流器は今までゲルマニウム整流器の独占場であったが, 最近シリコン整流器が急速に進出してきた。これは高純度シリコン製造法の進歩によって良質のシリコンが比較的安価に得られるようになったのが大きな原因であるが, また実際の大容量整流装置は100V以上のものが多く効率上シリコン整流器を有利とするのも理由の一つである。シリコン整流器の特長はいろいろあげられるが, やはり耐電圧が高いことが最大の魅力で, 製造技術の研究もこの点がおもな目標になっている。

耐電圧向上の必要条件としてまずシリコン結晶の高純度化をあげねばならないが, 最近では従来の固有抵抗 100 Ωcm 程度から一躍 1,000 Ωcm 台に向上しつつあって, 整流器特性改善に大いに期待が寄せられる一方, 接合部製作技術も従来の合金法に種々改良が加えられるとともに, 拡散法が急速に進歩しつつあり, 電力用整流器として両者競合の勢にある。またこれらの技術的進歩は大電力用 pnpn 接合の開発をもたらし, これを利用した制御極付整流器の発展は半導体整流器の将来をますます洋々たらしめるものといえよう。以下, 当研究室の試作結果を基にして将来につながる問題点の二, 三をひろってみることにする。

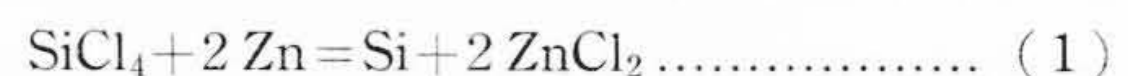
2. シリコン結晶

2.1 高純度シリコンの製造法

シリコンの 300°K における真性担体濃度⁽¹⁾ は $1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ で固有抵抗 230,000 Ωcm に相当する。したがって真性シリコンをうるためには不純物原子を $10^{10}/\text{cm}^3$ 以下, すなわち 12 nines 以上の純度まで精製する必要がある。しかしシリコンの場合主要不純物のホウ素の分配係数が 1 に近く, 物理的な帯域精製が困難であるので, 結局化学的方法によらねばならず, このため実際に得られるものは上の純度にはるか遠く Du Pont 社のホウ素含有量 3 p. p. b. P 形 100 Ωcm のものが従来の市販の最高

級品であった。したがって各所で精製法の研究が盛んに行われているが, 最近に至り Siemens 社および Du Pont 社でホウ素含有量 0.2~0.3 p. p. b. P 形 1,000 Ωcm シリコンの工業的製造に成功し, 昭和34年を境にして高純度シリコンの純度水準が一けた上ることになりそうである。

高純度シリコンの製法は原料として通常 SiCl_4 , SiHCl_3 , SiH_4 , SiI_4 のような揮発性化合物を使用し, 蒸留その他によって精製後, 還元剤によりあるいは熱分解によって Si を生成せしめる。最も一般的な原料は SiCl_4 で Du Pont 社の亜鉛還元法⁽²⁾

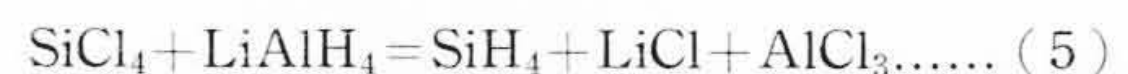


が工業的製法としてよく知られているが, 還元剤 Zn のため純度向上に限度があり, 将来性のある方法ではないようである。これに対し水素還元法は還元剤による汚染が低減されるので有利であり, Bell Tel. Labs. の Theuerer 氏⁽³⁾ は SiCl_4 と H_2 の混合物を加熱したタンタルテープ上に通じて Si を析出させ, さらに物理精製を行って 3,000 Ωcm を得ている。しかしこの水素還元法は反応速度遅く収率が悪いので広く採用されるに至っていない。

Siemens 社の Spence⁽⁴⁾ は通電加熱したシリコン棒上に SiHCl_3 と H_2 の混合物を通す方法を採用した。 SiHCl_3 は SiCl_4 に比し還元温度が低く収率もよいので上の欠点はかなり改善される。しかし SiCl_4 の場合も次の(2), (3), (4)の反応が起りうるので反応ガスを循環させればかなり収率を上げることができる。



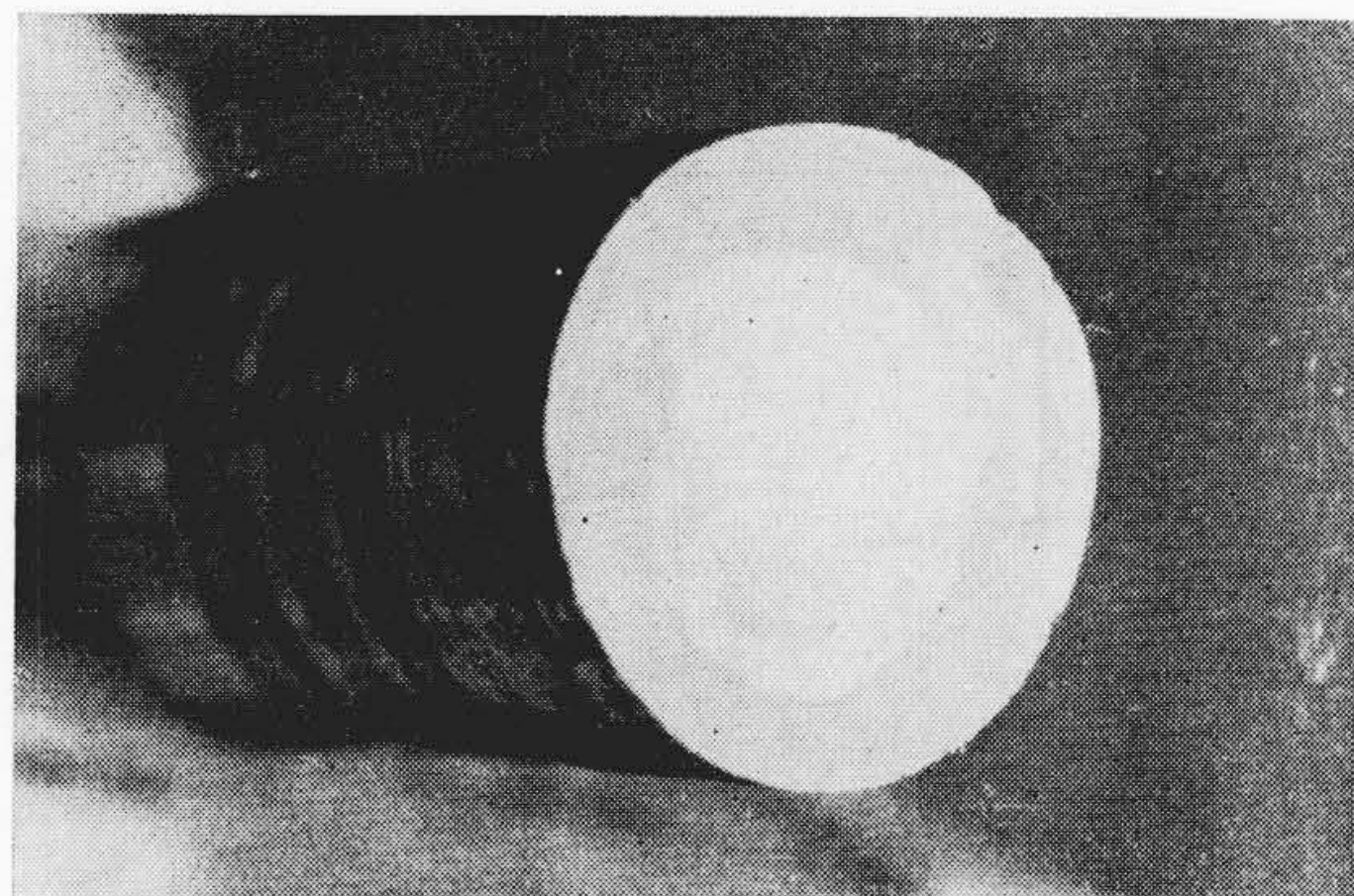
Du Pont 社では最近シラン SiH_4 の熱分解による工業的生産を開始した。 SiH_4 は熱分解温度が 500°C で収率きわめてよく, 還元剤による汚染もなく有利な方法のようである。この場合シランは次の方法⁽⁵⁾によって製造される。



この際不純物を不揮発性化合物として分離しうる利点がある。たとえば BCl_3 は(6)および(7)の二段の反応

* 日立製作所日立研究所工博

** 日立製作所日立研究所



黒い部分がp形，白い部分がn形
第1図 シリコン単結晶中の不純物の偏析(×1.4)

によりジボランガスとなるが，中間生成物 LiBH_4 が不揮発性であるので，(5)の反応は過剰の LiAlH_4 中に SiCl_4 を加える方法がとられる。



しかし本法は爆発の危険を伴い，テトラヒドロフランのような引火点の高い溶媒を使用するなどの注意が払われている。

このほか SiH_4 を使用する方法⁽⁶⁾ も広く研究されている。いずれにしても原料のうちに十分精製する必要があるが，最近浮遊帯域精製法が発達し分配係数の小さな不純物はあまり問題でなくなってきた。したがって分配係数の大きなもの特にホウ素の化学的あるいは物理的除去法の研究が今後の問題点として残されている。

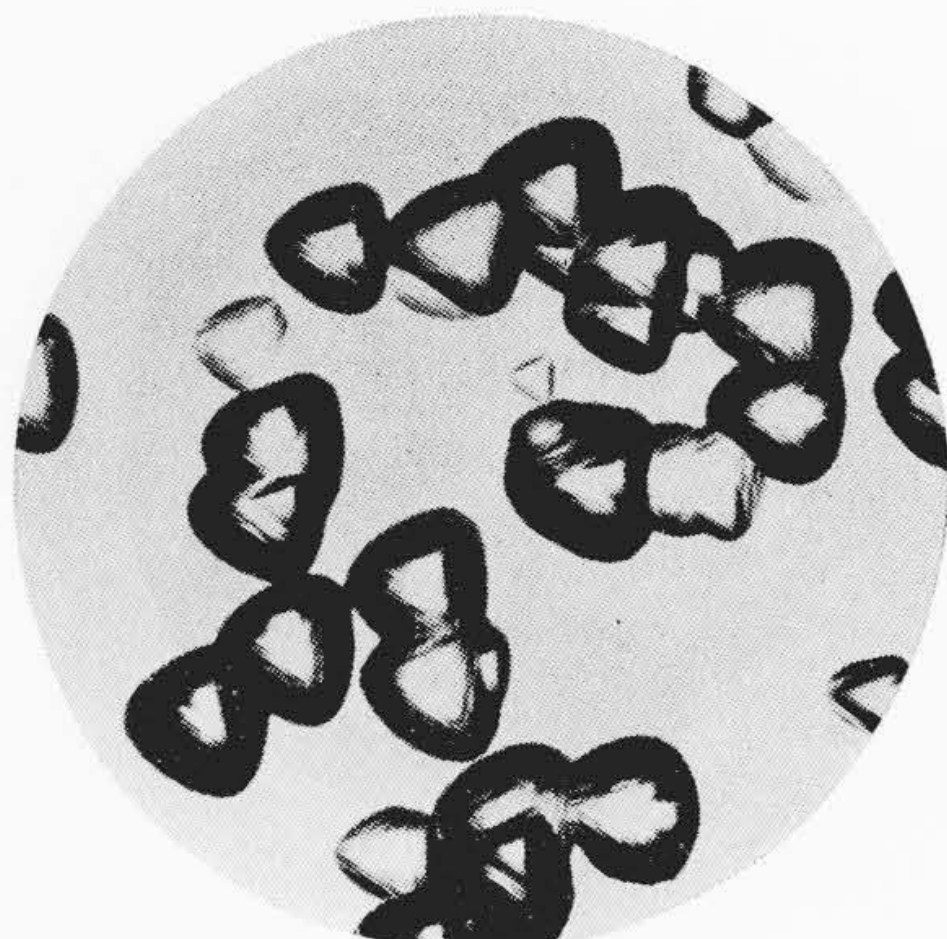
2.2 シリコン単結晶

単結晶の一般的事項に関してはほか⁽⁷⁾に譲り，ここでは整流器の製造上きわめて重要な影響を及ぼす問題について述べることにする。

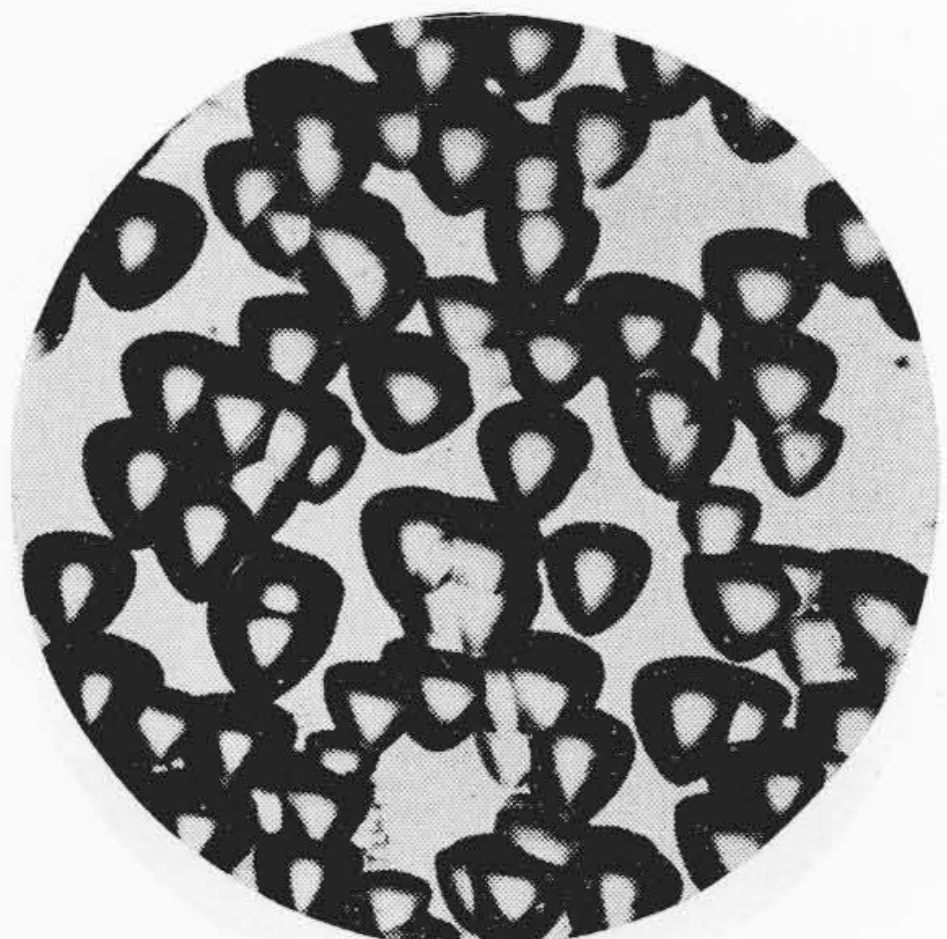
2.2.1 結晶の欠陥

シリコン単結晶の性質も最近ではかなりうまくコントロールされるようになってきているが，もちろん十分とはいいいにくく，整流器の製造に関しては常に素材結晶の管理を厳重に行わなければならない。たとえば最近 $1,000 \Omega \text{ cm}$ にも及ぶきわめて高純度の単結晶が得られているが，このようなものでは当然ドナーとアクセプタ濃度の差が少ないので，製作時の条件によっては偏析によって単結晶中に p, n 両形の部分を含むものがみられることがある。第1図がその一例である。このような単結晶はもちろん使用することはできない。

周知のように単結晶では転位密度が完全性の目安にされている。第2図はシリコン単結晶の (111) 面にあられるエッチピットである。合金形接合を作る場合転位密度が異なるとぬれの状態が異なり合金条件を変えねばならないことがある。引上法による単結晶では



(a) 引上法



(b) 浮遊帯域法
第2図 転位のエッチピット (×650)

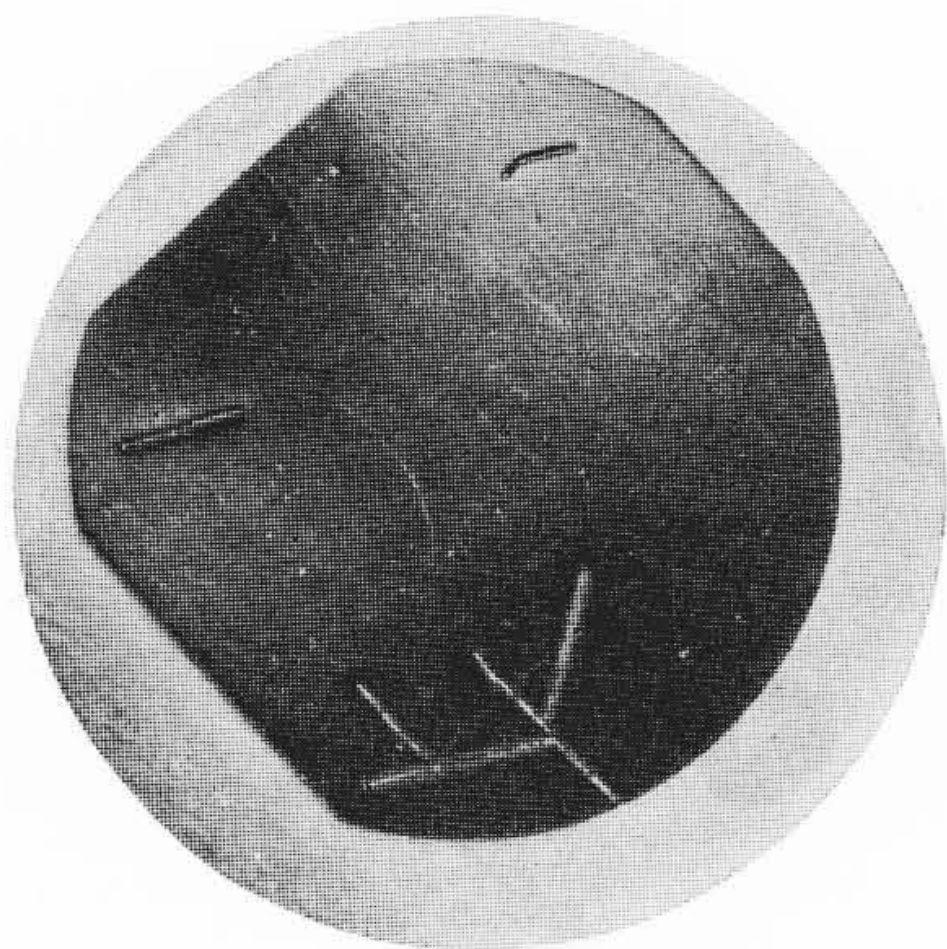
転位は周辺部に密に分布しているのに対し，浮遊帯域法による単結晶では比較的一様であるが，第2図にもみられるように一般に後者のほうが密度が高い。

Chnoweth 氏⁽⁸⁾らの拡散形接合に対する研究によれば転位の存在する部分で選択的になだれ破壊がおりやすいといわれている。しかし実用面での転位の影響は真の役割を抽出するのが困難であって，今後の基礎的研究の発展によって解明されることが望まれる。

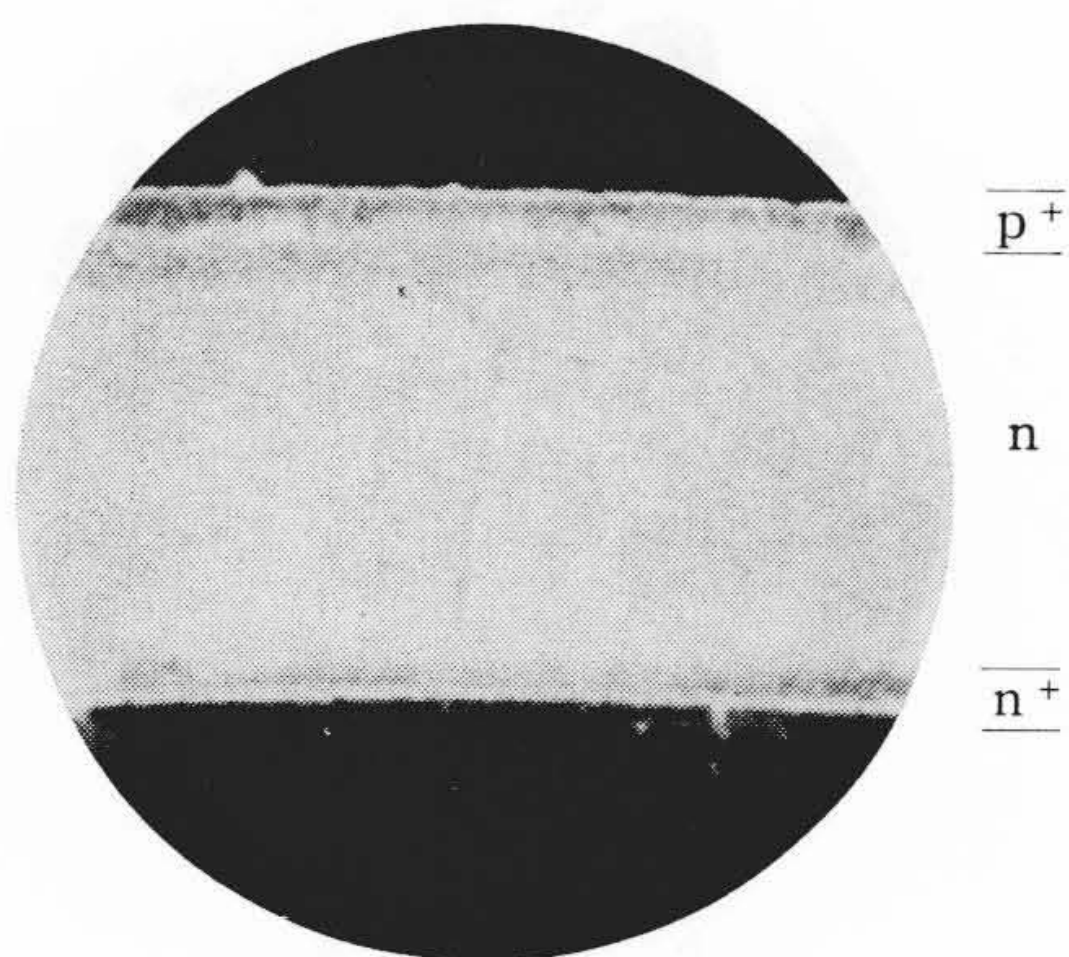
転位のエッチピットを現出するにはエッチング速度のおそい溶液が一般に用いられているが，速いエッチングを行うと第3図のような直線状の深い溝を生ずることがしばしばある。第3図の結晶面は (111) 面で溝の方向も同様な対称性を示している。この欠陥は接合の製作にあたって特に有害であり，第4図は拡散形接合におけるこの線状欠陥の影響を示したもので，n 形素地中に p 形領域が黒く直線状に走っているのが認められる。かかるものはほとんど短絡に近い。

2.2.2 熱処理の影響

シリコンは多かれ少なかれ熱処理によって担体濃度に変化する性質がある。その一般的様相については Fuller 氏⁽⁹⁾らのくわしい報告があり，通常 450°C の加熱によりドナーを生成し， 500°C 以上の加熱によりド



第3図 直線状のエッチ模様(×1.4)



5度傾斜断面

第4図 拡散形接合における欠陥の影響(×6)

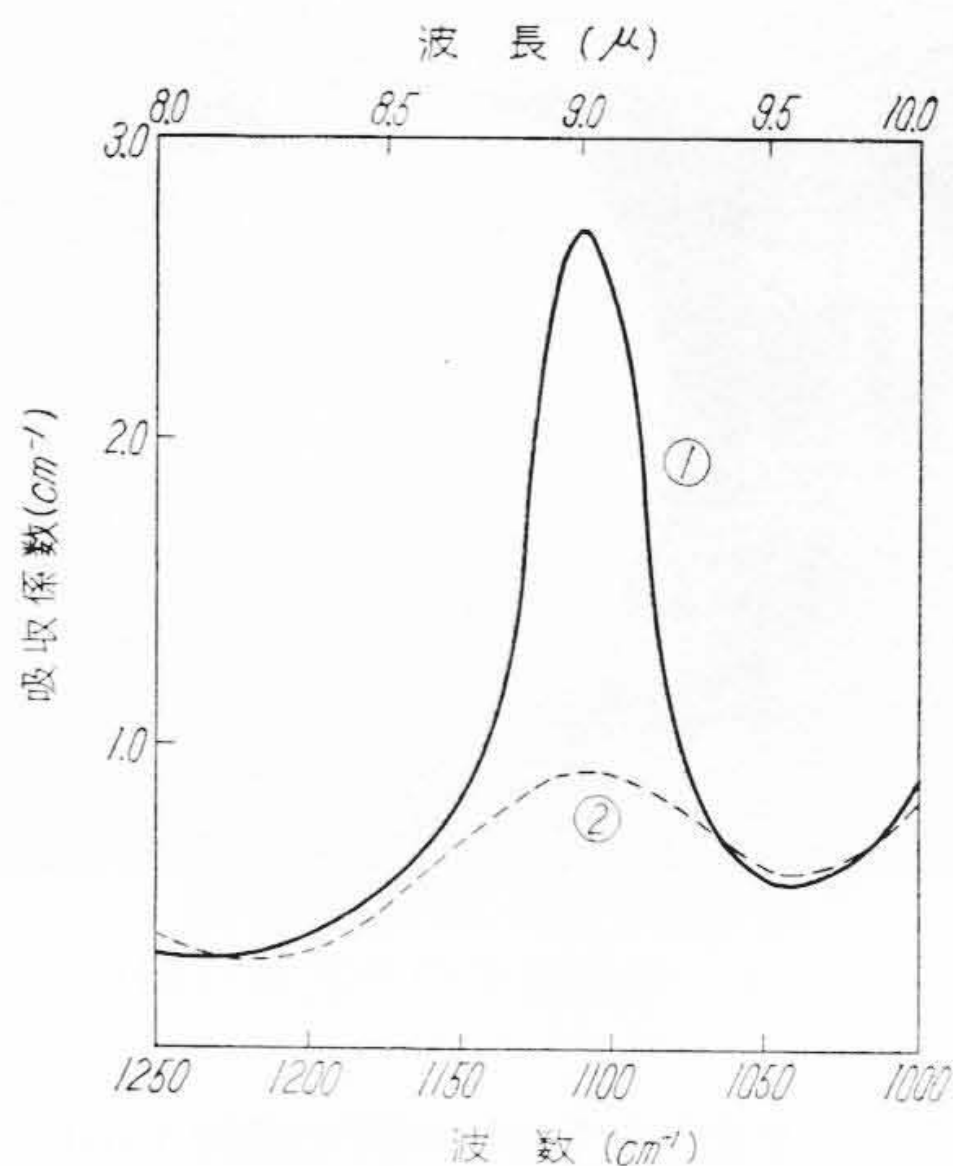
ナーが消滅する。Kaiser 氏⁽¹⁰⁾はこの現象を結晶中の酸素原子に帰した。シリコン中の酸素は 9μ の赤外線吸収によって定量することができる。第5図は引上法および浮遊帯域法による単結晶の吸収曲線を比較したもので、引上法によるものが著しく吸収が大きく酸素含量が多いことを示している。引上法では石英るつぼを使用する限り酸素の侵入を避けることはできない。第6図は偏析によって生ずるうず模様が $1,100^{\circ}\text{C}$ および 450°C の熱処理によって出現したり消失したりする例である。黒い部分が p 形である。

合金法や拡散法で整流器を作る場合数百度ないし千数百度に結晶を加熱する。かかる際結晶の抵抗や導電形が変化しては良好な pn 接合をうることが困難である。したがって熱処理による変化の少ない結晶すなわち浮遊帯域法による単結晶の使用が望ましい。

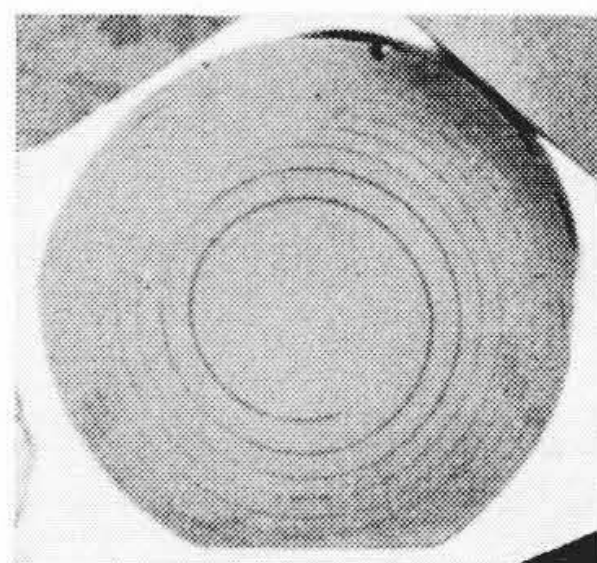
なお熱処理性については必ずしも Kaiser Model では説明できない場合もある。熱処理の効果は実用上影響が大きいのでさらに研究を進める必要がある。

3. 接合部の製作法

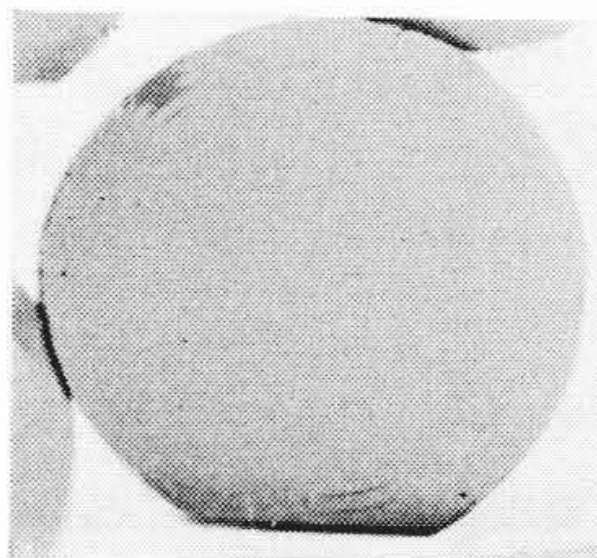
既報⁽¹¹⁾において pn 接合の一般的検討を行ったので、



① 引上法 ② 浮遊帯域法
第5図 シリコンの赤外線 (9μ) 吸収



(a) うず模様は最初からなかったが、 $1,100^{\circ}\text{C}$, 1時間の処理で出現した。



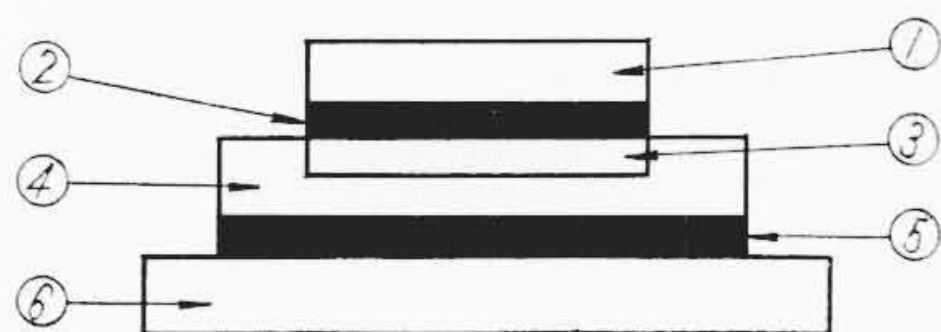
(b) さらに 450°C , 10時間の処理をしたらうず模様はほとんど消失した。

黒い部分が p 形、白い部分が n 形
第6図 熱処理の影響(×1.2)

ここでは接合部製作上の問題点を簡単に述べることにする。

3.1 合金法

合金法は pn 接合製作法として最も広く用いられており、現在の電力用整流器はほとんど合金形接合によっている。対電極用ろう材としては n 形シリコンに対してはアルミニウム、p 形シリコンに対しては金・アンチモン合金が用いられるのが普通である。n 形を使用するか p 形を使用するかはメーカーによって異なるが従来は n 形を使用するものが多い。第7図は典型的な接合部の構造の例である。この場合は電極、ろう材、シリコン結晶板を重ねて、真空または水素中で比較的急熱急冷で $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ に加熱して pn 接合を作ることができる。ここで特に問題となるのはシリコンとほかの材料の間の熱膨脹差に基



- ①,⑥ 電 極 板
② Al-Si
③ 再結晶 p 形 層
④ n 形 単 結 晶
⑤ オーミック・ソルダ

第7図 合金形接合の構成

くひずみであって、ゲルマニウムの場合と異なり、ろう材の凝固温度が高いから材料の選定を誤ると接合部にきれつを生じ実用にならなくなる。Si-Alの凝固温度は577°C、Si-Auは370°Cで、電極としては通常モリブデン、ファーンニコなどが用いられる。シリコン板のひずみの大きさを決定するのは第7図の各層の弾性率、熱膨脹係数、厚さ、ろう材の凝固温度などであるが、特にろうの材質および厚さが特性に及ぼす影響が大きい。また結晶とろうが一樣にぬれることが必要で、不均一であると金属接触による逆流増大や、きれつの発生によって特性を著しく悪くする。このぬれをよくする手段として結晶板、電極板特別の表面処理が施される。

3.2 拡散法

拡散法は高温で不純物をシリコン結晶中に拡散させてpn接合を形成せしめるのであるが、表面の不純物濃度が一定のときはその濃度分布はほぼ次式で与えられる。

$$N(x) = N_s \operatorname{erfc}(x / \sqrt{4Dt}) \dots\dots\dots (8)$$

$N(x)$: 深さ x の不純物濃度

D : 拡散係数

x : 結晶表面よりの深さ

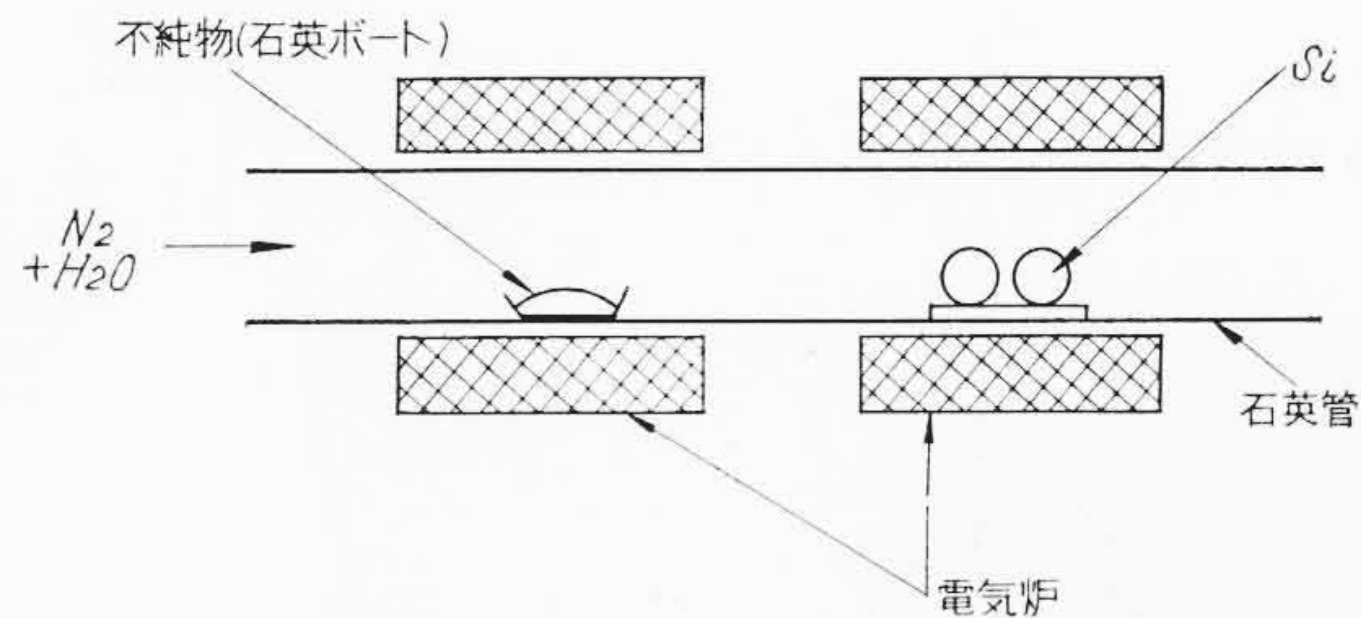
t : 拡散時間

N_s : 表面の不純物濃度

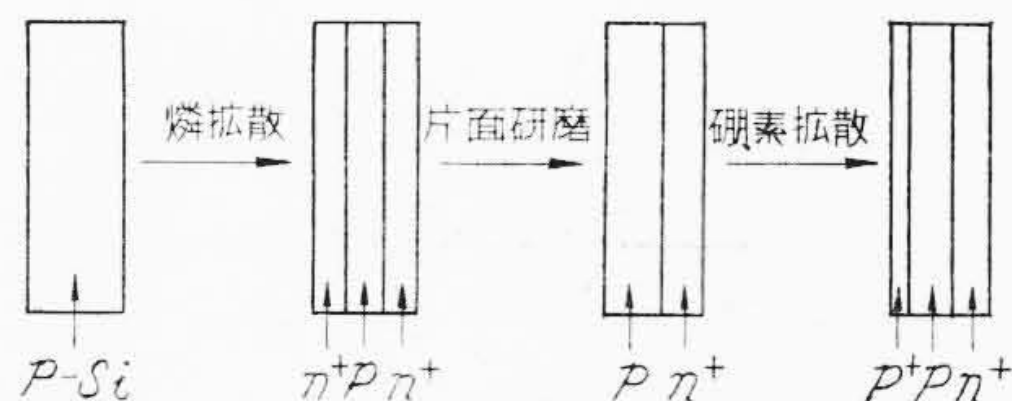
第8図は拡散装置の一例で不純物源として酸化物 (B_2O_3 , P_2O_5 など) を用いた場合を示す。キャリアガスとしては窒素などが用いられ、その流量と酸化物の温度を変化せしめることにより N_s を調節することができる。一般に拡散温度としては 1,200~1,300°C が用いられ、不純物源は種類によって適切な温度を選ぶ必要がある。素材シリコン結晶中の不純物濃度を N_0 とすると、 N_0/N_s は 10^{-3} ~ 10^{-5} とするのが普通で、pn接合のできる深さ x_j は近似的に次式のようになる。

$$x_j = 0.92(2.0 - \log_{10} N_0/N_s) \sqrt{Dt} \dots\dots\dots (9)$$

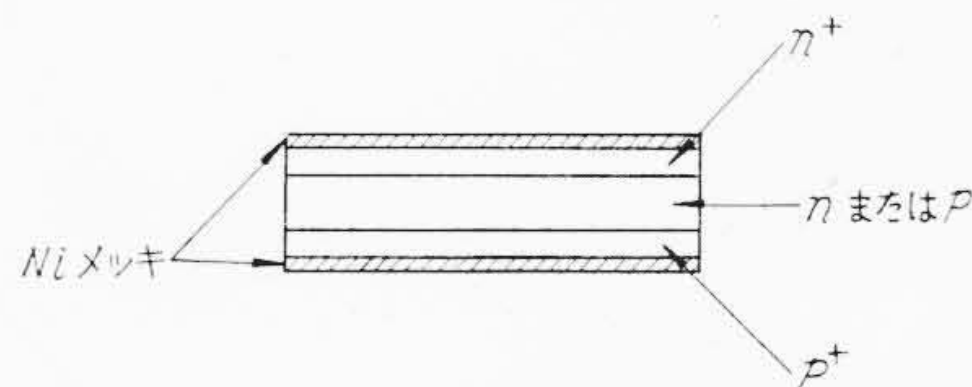
実際に整流器をつくるには素材シリコンとしてp形を用いる場合は第9図のようにまずリンを拡散させて n^+p にした結晶板の片面を研磨して n^+p とし、オーミック接続を行うために B_2O_3 を片面に塗布して、もう一



第8図 拡散方法



第9図 拡散法による整流器接合部の製作手順



第10図 拡散形整流器の構成

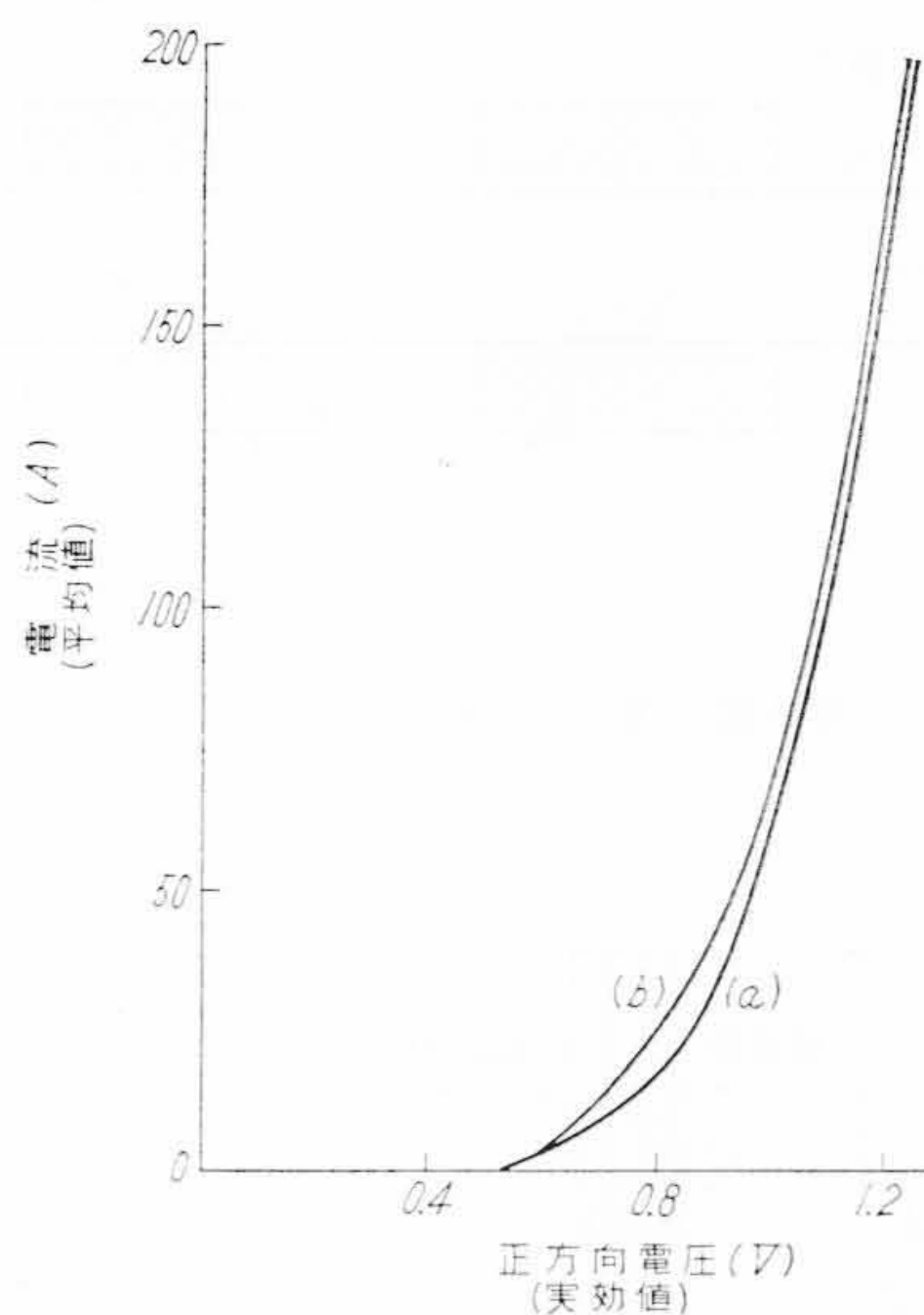
度拡散を行って n^+pp^+ とし、次に電極としてニッケルメッキを行う。したがって接合部の構成は第10図のとおりになる。

以上の方法では拡散を2回行わなければならないので、片面にドナー不純物、他面にアクセプタ不純物を塗布し、同時に拡散させる方法も可能である。拡散法は合金法に比し条件が多く、まだ十分検討されていない因子もあるが、一樣な高耐電圧の接合が得られるので今後が期待される。

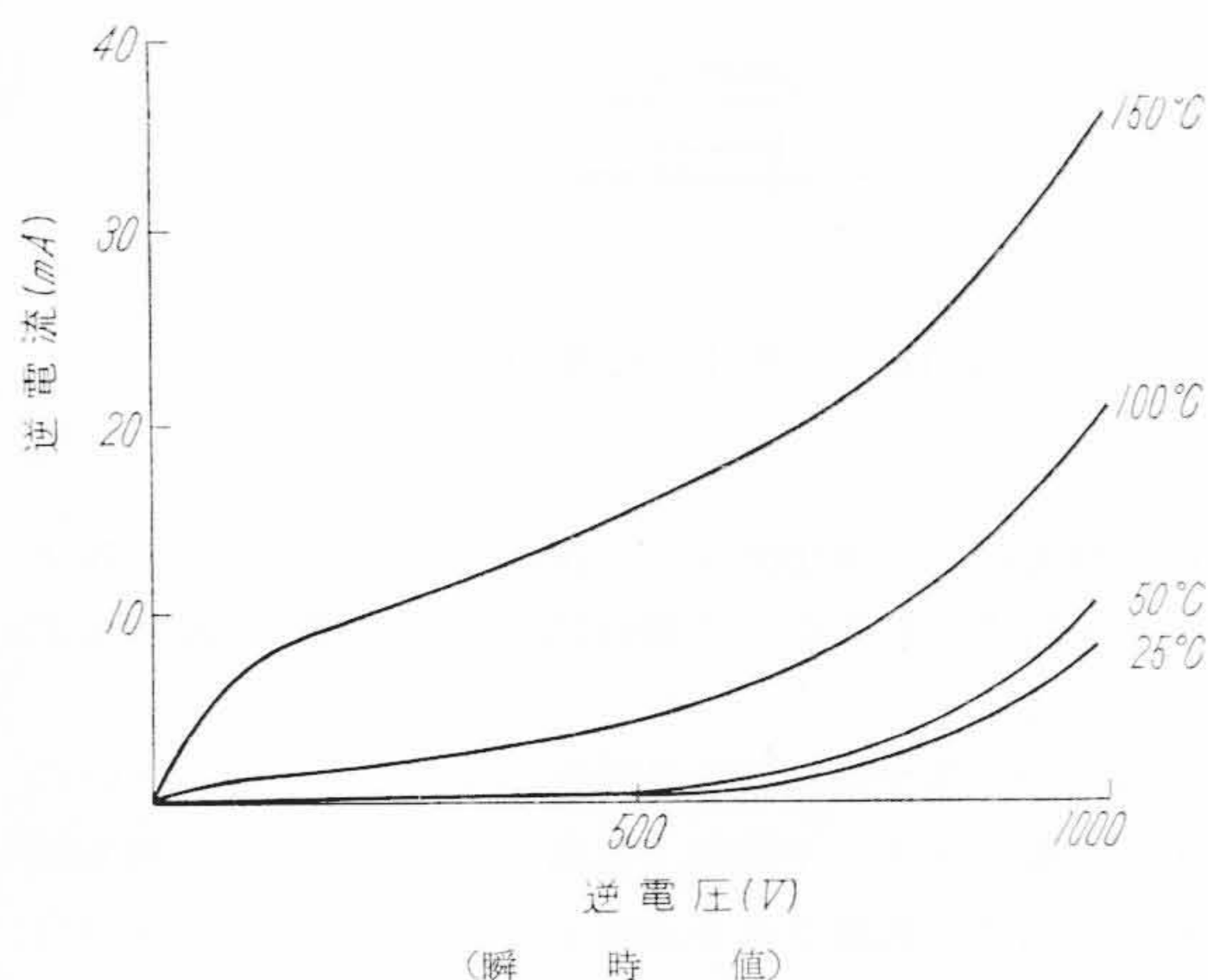
4. 特 性

4.1 V-I 特性

第11~13図は合金形および拡散形シリコン整流器の正方向および逆方向特性の一例である。正方向特性については既報⁽¹¹⁾で述べたように合金形でも拡散形でもほぼ同様に $I \propto \exp(eV/2kT)$ に従う。逆方向特性は通常拡散形接合の方が逆電流が少ない。破壊電圧は実際にはおおざっぱに言って逆電流が少ないほど高い。しかし合金形と拡散形を比較すると合金形の破壊電圧は必ずしも拡散形に劣らないから製造法の異なった整流器を逆流だけで比較すると判断を誤ることがある。



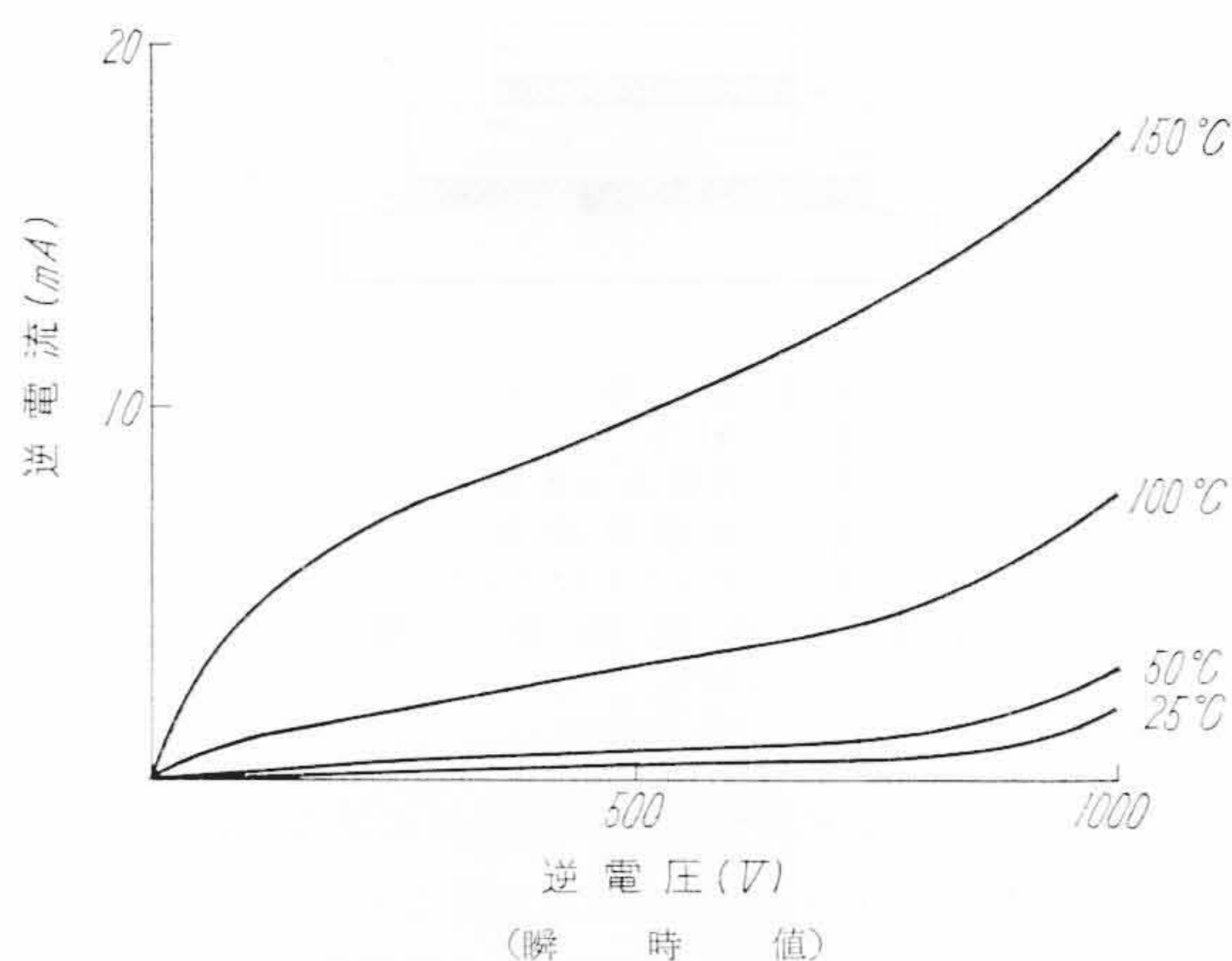
(25°C, 接合面積 1.5 cm²)
第11図 合金形(a)および拡散形整流器(b)
の正方向特性の一例



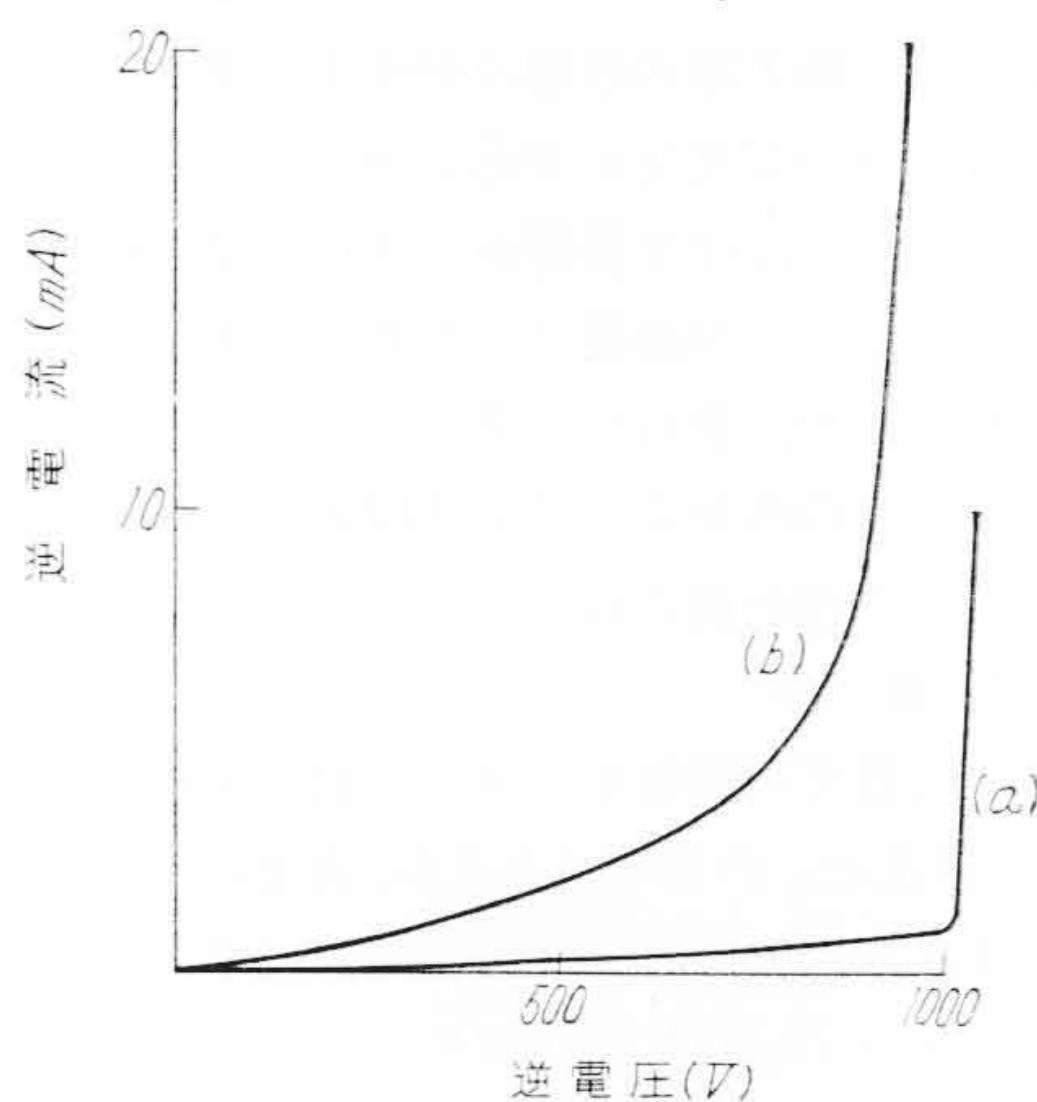
(瞬 時 値)
第12図 大容量合金形整流器
(接合面積 1.5 cm²) の逆特性の一例

4.2 破壊電圧

破壊の原因としては電気的効果と並んで熱的効果が考えられるが、いずれが先行するかは整流器の特性自体ひいては製造方法にも関係し、また冷却条件、および印加電圧波形によっても影響される。第14図は单相半波の逆電圧を破壊に至るまで印加した場合のV-I特性である。図中(a)は電気的破壊の例であって、なだれ破壊を示している。この場合には既報⁽¹¹⁾で示したように温度とともに破壊電圧が上昇するのが認められる。(b)は Soft breakdown の例で電気的効果と熱的効果を分離しにくい。電圧が1,000 V 付近になると逆流による熱損失がかなり大きくなって、thermal run away をおこしやすく



(瞬 時 値)
第13図 大容量拡散形整流器
(接合面積 1.5 cm²) の逆特性の一例



第14図 破壊時のV-I特性

なり、冷却条件が影響するから、測定には特に注意が必要である。また接合端部の強電界による周辺部の絶縁破壊が破壊電圧を低める原因になることがある。

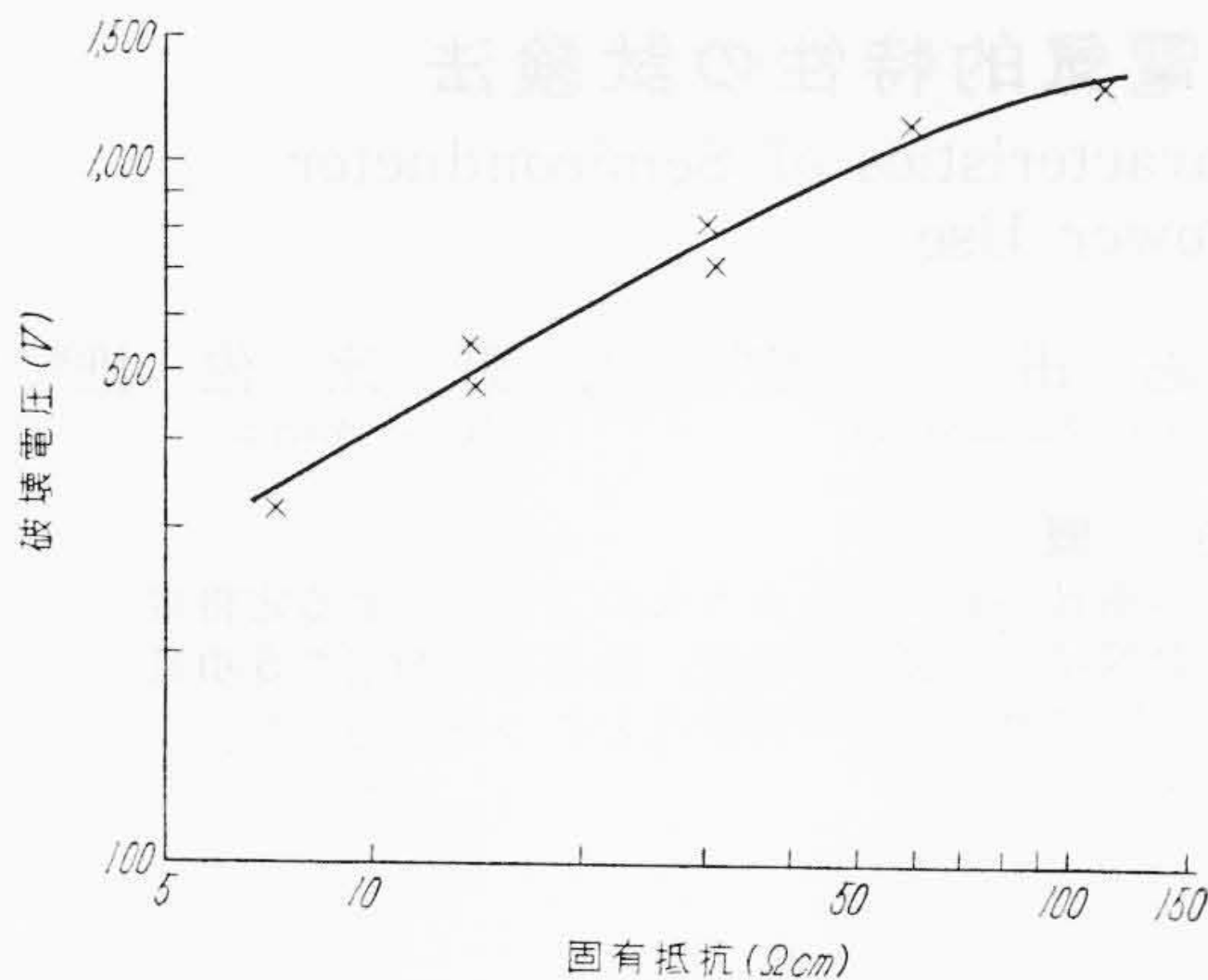
結晶の固有抵抗が高いほど破壊電圧が上がることはすでに知られているが⁽¹²⁾、実験的に確めた結果は第15図のとおりである。これはn形ベースの拡散形接合について得たもので、抵抗が高くなるとともに曲線が昇ってくる傾向を示している。電圧が高くなると前記のように構造、表面などの外部条件が影響してくる。

4.3 pnpn 接合の制御特性

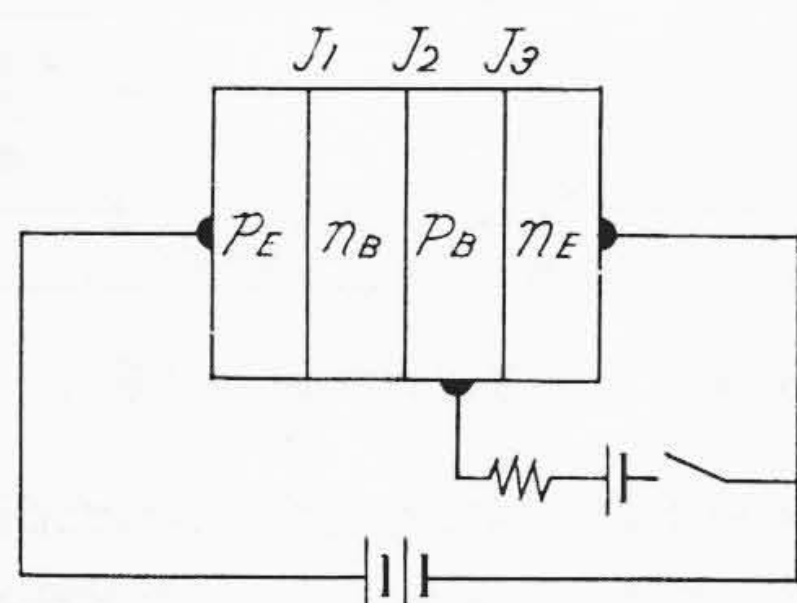
pnpn 接合の実際の構成は設計上からも製作手順からも問題があるが、図式的に示すと第16図のとおりである。2端子動作の場合は J_2 をコレクタ、 J_1 および J_3 をエミッタとしたときのアルファを α_{1N} および α_{2N} とするとスイッチの条件は

$$\alpha_{1N} + \alpha_{2N} \geq 1 \dots\dots\dots (10)$$

である。また制御極を付けて3端子動作をさせるときは



第15図 固有抵抗と破壊電圧の関係



第16図 制御極付シリコン整流器の構成

(10)式の代り(11)式のようになる。

$$\alpha_1 N + \alpha_2 N (1 + I_b/I) \geq 1 \quad \text{..... (11)}$$

ただし I_b は制御電流である。

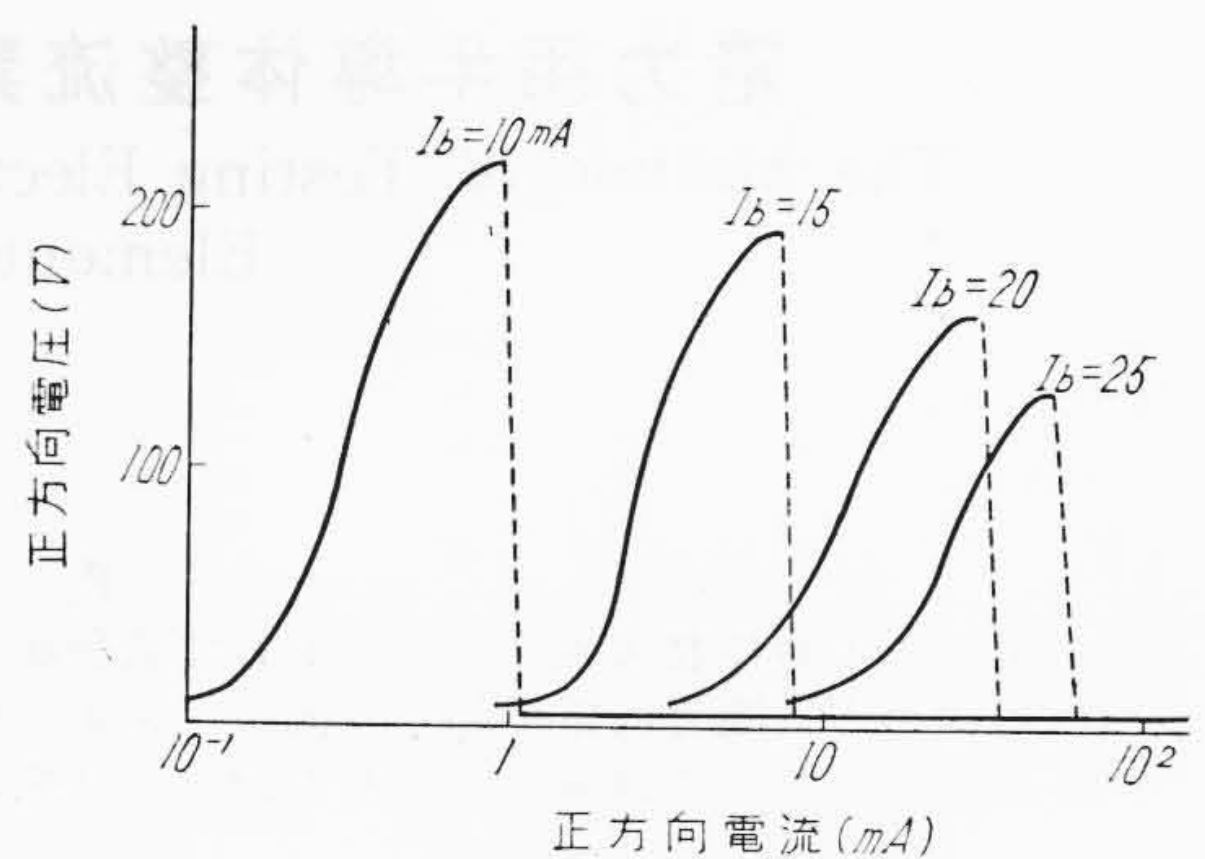
第17図は拡散法と合金法を併用して試作した pnpn 接合のスイッチに要する電圧, すなわち breakover voltage が I_b によって変化する様子を示したものである。

5. 結 言

シリコン整流器に関する若干の問題点について述べた。シリコン整流器は材料ならびに製作技術の急速な進歩によりいまや電力用整流器の本命たる地位を獲得するに至った。現在の製品は特性, 寿命, 経済性の点からみて実用にはもはやなんらの不安も残していない。今後の応用分野の拡大が期待される。しかしなにごと製品化されてから日が浅く, 性能改善に関する問題点はなお幾多存在する。差当ってあげられるものにシリコンの純度向上, 整流器の耐電圧向上, 制御極付整流器の実用化があり, たゆまざる研究が必要である。

参 考 文 献

- (1) E. M. Conwell: Proc. I. R. E. **46**, 1281 (1958)
- (2) D. W. Lyon, C. M. Olson, E. D. Lewis: Trans. Electrochem. Soc. **96**, 359 (1949)



第17図 試作制御極付シリコン整流器の正方向特性 (25°C)

- (3) H. C. Theuerer: Bell Labs. Record **33**, 327 (1955)
- (4) A. F. Gibson, Airgrain, R. F. Burgess: Progress in Semiconductors **3**, 40 (Heywood, London, 1958)
- (5) J. M. Wilson: British Patent Specification 793, 718 (1958)
- (6) G. Szekely: J. Electrochem. Soc. **104**, 663 (1957)
- (7) 伴野, 田内: 日立評論
- (8) A. G. Chnoweth, G. L. Pearson: J. Appl. Phys. **28**, 1103 (1958)
- (9) C. S. Fuller, R. A. Logan: J. Appl. Phys. **28**, 1427 (1958)
- (10) W. Kaiser: Phys. Rev. **105**, 1751 (1957)
- (11) 中戸川, 小川: 日立評論 **41**, 345 (昭 34-3)
- (12) R. W. Aldrich, N. Holonyak: Proc. I. R. E. **46**, 1236 (1958)

目 次

- ◎ラン芯工場のはなし.....坪田 譲治
 ◎都市をホコリからまもる電気集塵装置の話
 ◎バン コ ッ ク だ よ り
 ◎印 旛 沼 の 干 拓
 ◎新 し い 照 明 施 設
 ◎明 日 へ の 道 標 (印旛沼の排水ポンプ)
 ◎日 立 だ よ り
 ◎日 立 ハ イ ラ イ ト (暖房器具)
 ◎万 能 イン タ ホ ー ン (日立ホーム交換機)
 ◎新 し い 人 工 の 目 “日立ビジコン”
 ◎釜石地区のテレビジョン共同聴視
 ◎暖房器具のニューフェース

発行所 日立評論社
 東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地
 振替口座 東京 71824 番
 取次店 株式会社オーム社書店
 東京都千代田区神田錦町3の1
 振替口座 東京 20018 番