

電力用半導体整流素子の電気的特性の試験法

The Method of Testing Electric Characteristics of Semiconductor Elements for Power Use

鴨 志 田 実* 天 野 比 佐 雄*

Minoru Kamoshida

Hisao Amano

内 容 梗 概

電力用半導体整流素子の電気的特性試験法には数多くの項目があるがそのうちの逆特性による定格電圧の決め方、順方向電圧降下の測定、逆電圧印加試験、PN接合部温度の測定、熱抵抗の測定の5項目について主として試験法の説明を行い、試験に当たって注意すべき点とその対策などについて述べた。

1. 緒 言

電力用半導体整流素子が開発されて以来わずか数年に過ぎぬがその発展はまことに目ざましく今や直流電力界のちょう児となった感がある。しかしまだ発展途上にあり今後の進歩は予断を許さぬところである。半導体整流素子を用いた電力用整流装置は現在国内でも1万数千kWのものまで作られているが、個々の整流素子の特性およびその応用の面ではまだ技術的問題点も多く製作に研究に多くの努力が払われている。実際に製作された素子の特性試験に当たってもわが国においてはまだ統一された規定がなく各メーカーで独自に行っている現状である。本文では素子の特性の原理的な面は本誌のほかの論文にゆずり素子の電気的特性を調べるに当たっての多数の項目の中のいくつかについてその特性、測定法、測定上の問題点およびその対策などを述べる。

2. 逆特性と定格電圧の決定

半導体整流素子のVI特性を表わすには有名なShockleyの式

$$I = I_s \left[\exp \left(\frac{eV}{KT} \right) - 1 \right] \dots\dots\dots (1)$$

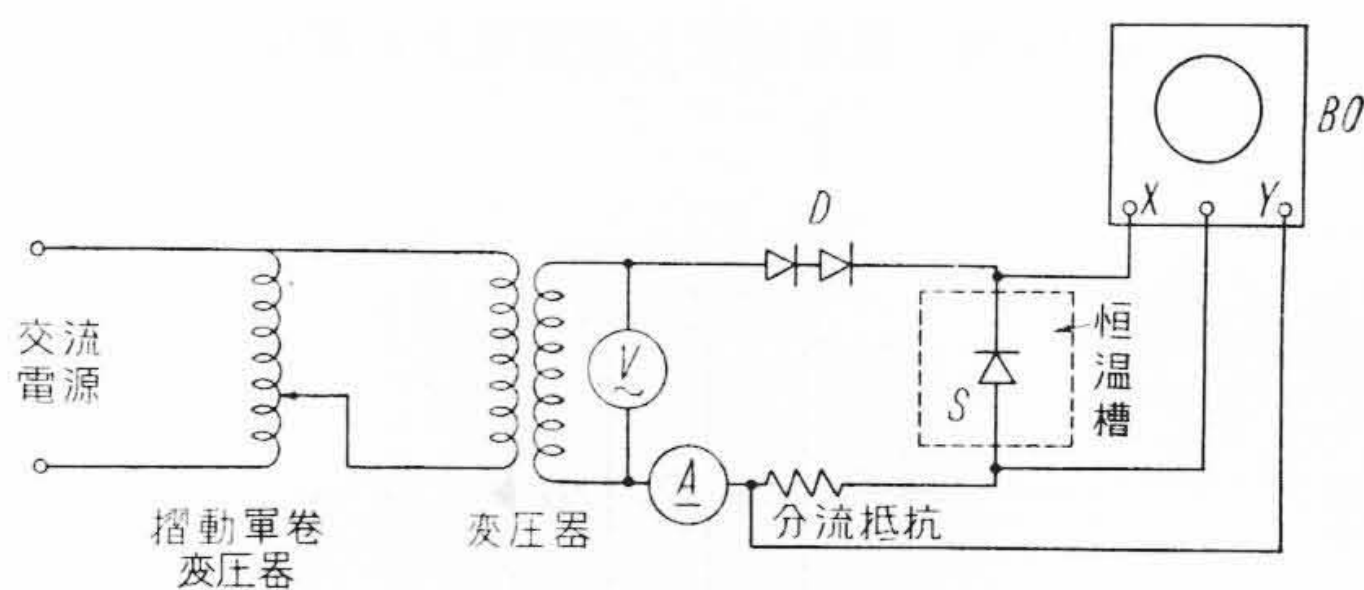
がある。ここに V: PN接合に印加される電圧

T: 絶対温度

e: 電子の電荷

K: Boltzmann 常数

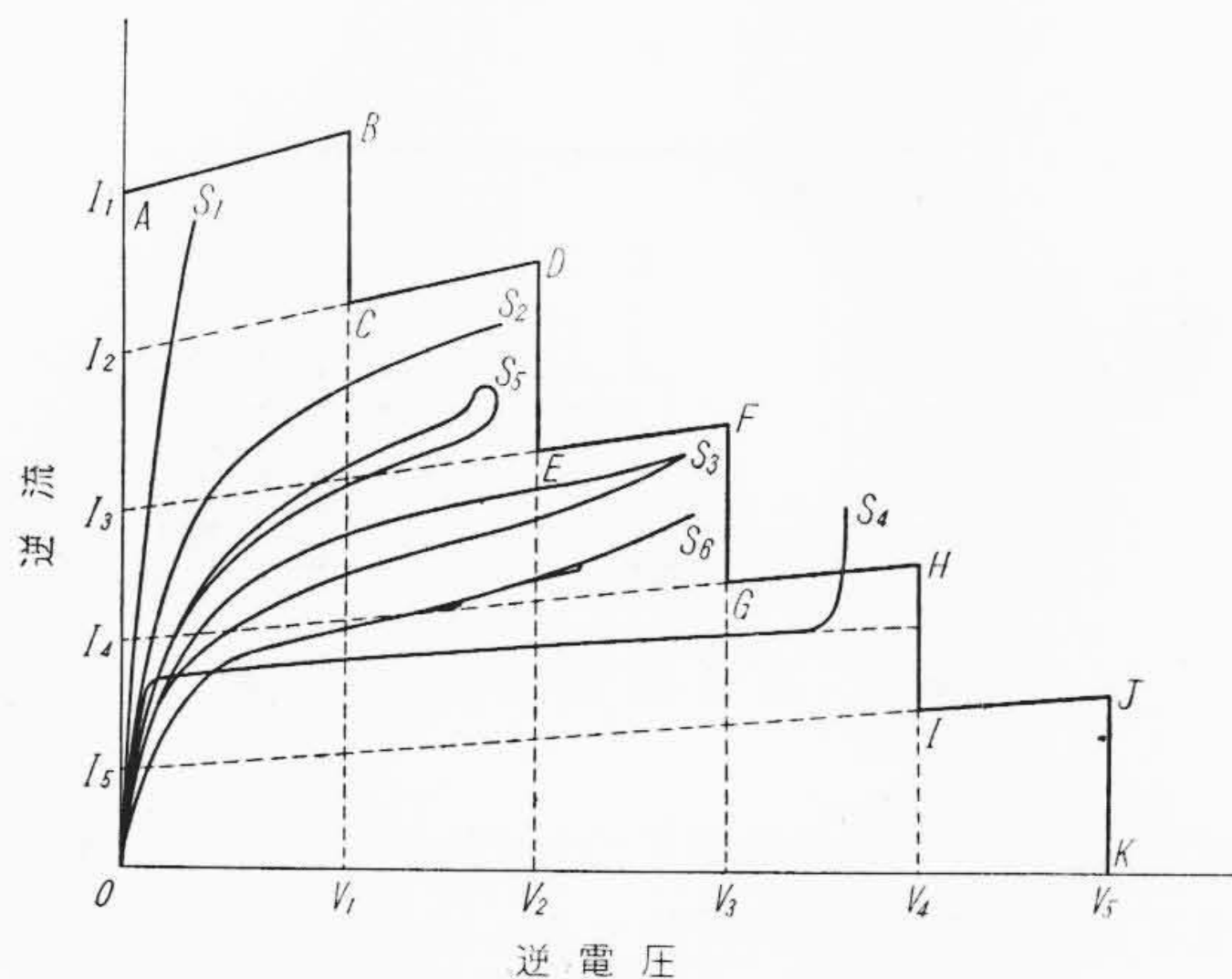
この式はVの絶対値があまり大きくない範囲で適用されVの負の領域ではIは一定値に近づき I_s がその飽和電流である。実際製作される素子の逆特性は材料および製作工程が理想的でない限りある程度の不良特性のものを含むことは避けられない。したがってこれら種々な逆特性をある規準に従ってふるい落とし、残りのものの定格電圧を決定する必要がある。これを級分けと称しているがその方法の一例を示すと第1図のとおりである。す



第1図 逆方向特性測定回路

なわちダイオードDを経て半波整流された商用周波逆電圧を、恒温槽中で規定の温度に保たれた試料Sに加え、そのときの逆電圧と逆流をブラウン管オシロスコープBOに入れてVI曲線をかかせる。この曲線と級分けの例は第2図のようでAB間を過る曲線のもの是不合格とし、それから順にBCD, DEF, FGH, HIJおよびJKと曲線の過ぎる区間の電圧が高くなるに従って試料の定格電圧の級を順に高くする。実際はこの $V_1 \dots V_5$ の値よりある値の電圧を減じた値をもって定格尖頭逆電圧とする、このとき注意すべきことはVI特性の中には電圧が上昇するに従ったたとえば曲線 S_4 のようにHIJの線に到達する前に急激に絶縁破壊を起すもののあることである。これを防ぐためには電源変圧器に十分内部インピーダンスの高いものを使用するかあるいは外部に適当なインダクタンスを直列に挿入して試料に過電流を流さぬようにする必要がある。次にVI特性の中には S_3 のようにループをかくものがある。この原因としては主としてPN接合部に対する水分の吸着⁽¹⁾と推定されているが常温において多く発生し温度上昇とともに消失するものが多い。かかるものはループのないものより耐圧が悪いのは当然であるので級分けのときある限度以上のループのものは除く必要がある。なお S_5 のようにIonic Conductionに起因するループのものがある。これはPN接合周辺のイオンに起因するもので電圧が増すと急激に増大し、破壊に至るので絶対に除外しなければならぬ。また S_6 は局部的に絶縁破壊をしかけているものでこれも避けなけれ

* 日立製作所日立研究所



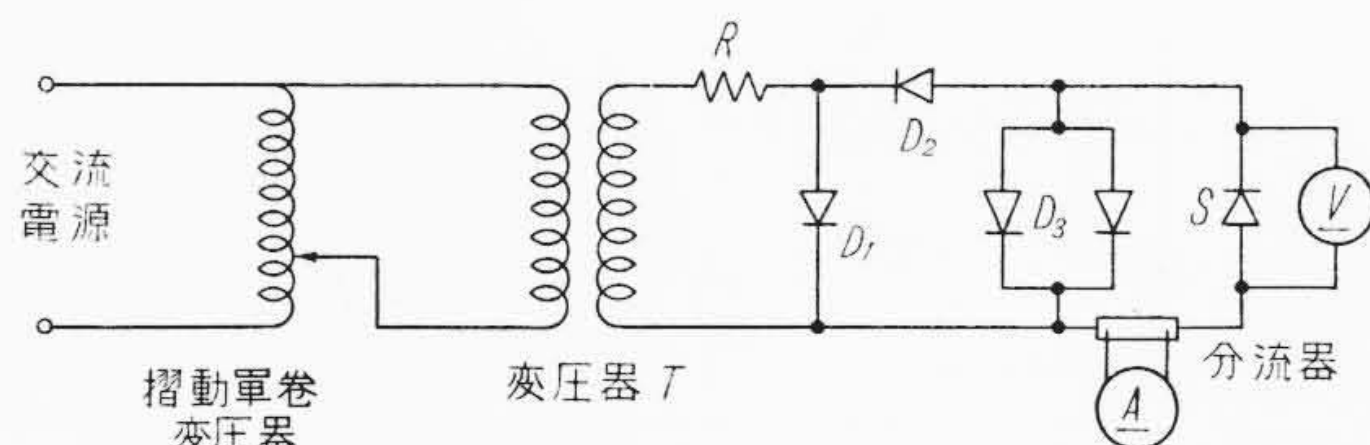
第2図 種々な逆特性曲線と定格電圧級分け法の一例

ばならない。

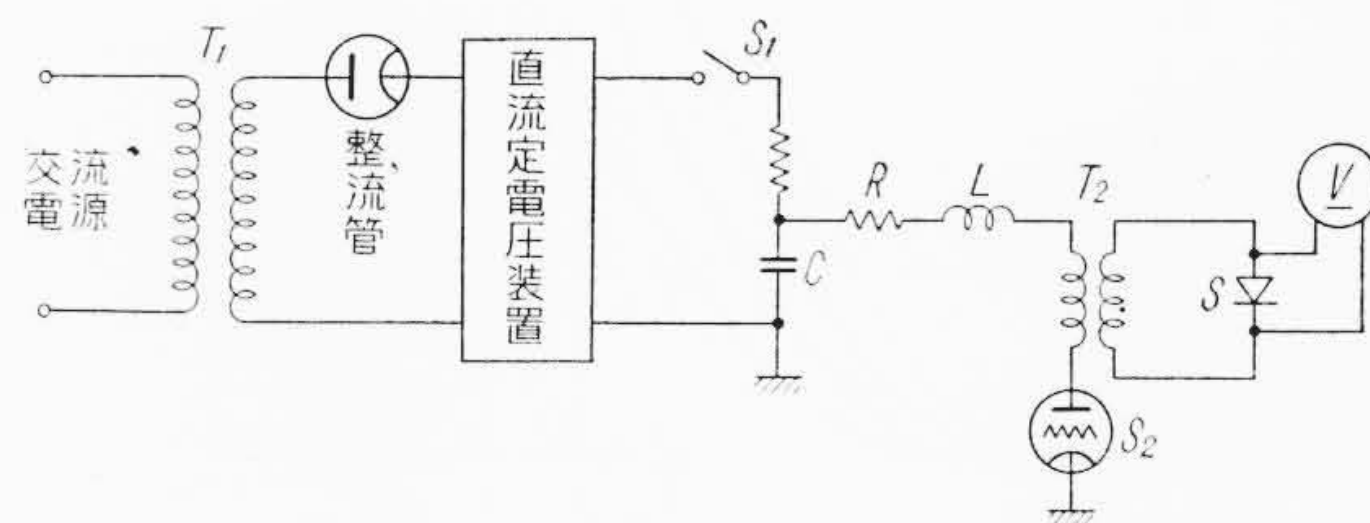
3. 順方向電圧降下

順方向電圧降下特性も前式(1)が適用される。特性の立ち上り部分の順方向電圧降下はゲルマニウム整流素子では約 0.5 V, シリコンでは約 1.0 V といわれているがこれも半導体ウェーハの厚さ, 製造過程中的はんだ作業の巧拙などによる直線抵抗分の増減などにより製作された素子の順方向電圧降下はあるばらつきをもっている。したがってこれもある限度以外のものは試験によりふるい落とし級分けが必要となる。順方向電圧降下を測定する方法は種々あるが最も一般的な試験回路は第3図のとおりである。電源変圧器 T は低圧大電流のもので試料 S には順方向電流のみを流し逆電圧はダイオード D_2 で防ぎ, D_2 の逆流は D_3 で側路する。 D_1 は T に正負両方向に均等な電流を流し偏磁を防ぐためのダイオードである。かくして S に单相半波の順方向電流が流れたときの電流と S の両端の電圧降下を直流計器でよむ。本法は平均値法(あるいは短絡法)といわれているが電源変圧器を短絡するため誘導性の回路となり, 順方向電流の通流期間が変圧器によって変り, したがって同一試料でも回路が変れば順方向電圧降下値が変わってくる。この点を避けるためには適当な抵抗 R を回路に直列に挿入し通流期間が 180° 度に保たれるようにしなければならぬ。本法の欠点としては試料 S は測定中適当な冷却を加えたとしてもおかつ PN 接合部の温度上昇が避けられない。したがってこの温度が正確に分らぬ限り得られた資料の信頼性は薄くなること, および平均値でよんでいるため電源電圧波形のひずむことは極力避けなければならないことである。

試料の加熱をできるだけ少なくして測定する方法として衝撃電流を 1 回だけ試料に流すパルス法がある。第 4



第3図 順方向電圧降下測定回路(平均値法)



第4図 順方向電圧降下測定回路(パルス法)

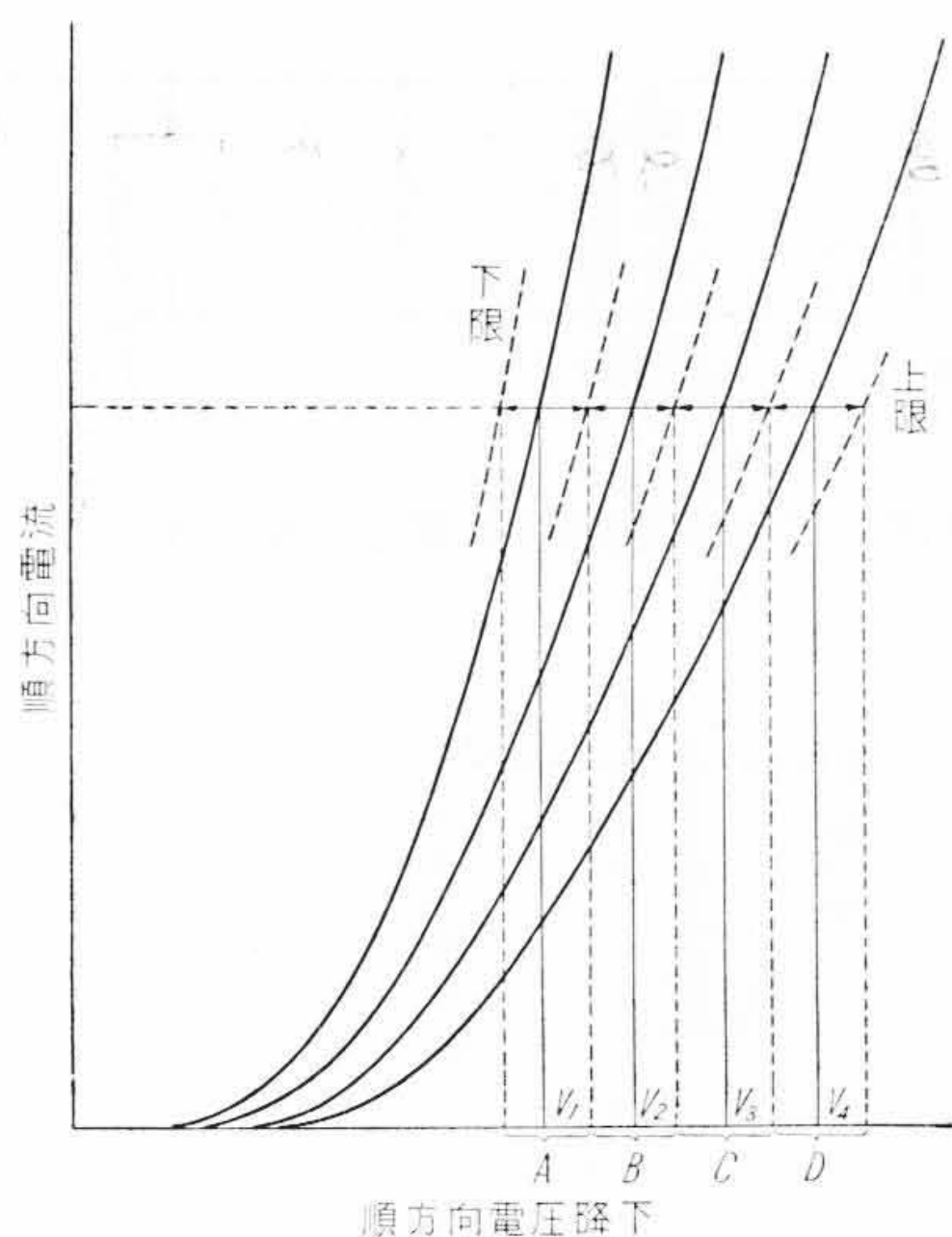
図はその回路の一例である。すなわちあらかじめ蓄電器 C に充電された電荷をスイッチ S_1 を開くと同時に放電管 S_2 を動作せしめて変圧器 T_2 を通じて放電し, 試料 S に衝撃電流を流しそのときの順方向電圧降下を波高値電圧計 V でよむ。この方法によれば試料の加熱は無視しうる程度で順方向電圧降下を波高値でよみとることができる。電流値は前もって更正し蓄電器 C の充電電圧を常に一定値に保つことが緊要である。

順方向電圧降下の級分け法の例を上げると第5図のように, 整流素子の定格電流値(平均値)に相当する順方向電圧降下のばらつきの上限下限間を数等分して A, B, C および D 級というように分ける。G. E. 社のシリコン整流器のように順方向電流波高値 100 mA と 500 A の2点の順方向電圧降下をもって級分けし, この二つの級を組合せて表示している例もある。

4. 逆電圧印加試験

電力用半導体整流素子の製造技術の進歩に伴い定格電圧, 電流ともに次第に大きくなり電圧では 600V RMS, 電流では 500A のものも作られている。数年前整流素子が世に出た当初は一応寿命は半永久とうたわれたが, これは理想的に作られ理想的に使用された場合であって実際はなんらかの形で多少なりとも電気的, 機械的ひずみのかかることは否めない。ここに寿命試験の必要性がある訳である。寿命試験として工場で実際と同じ回路で負荷電流をとって長時間運転することはもちろん重要であるが, それには大きな電源容量を必要とし長時間かかって小数個の試料の試験しかできない。

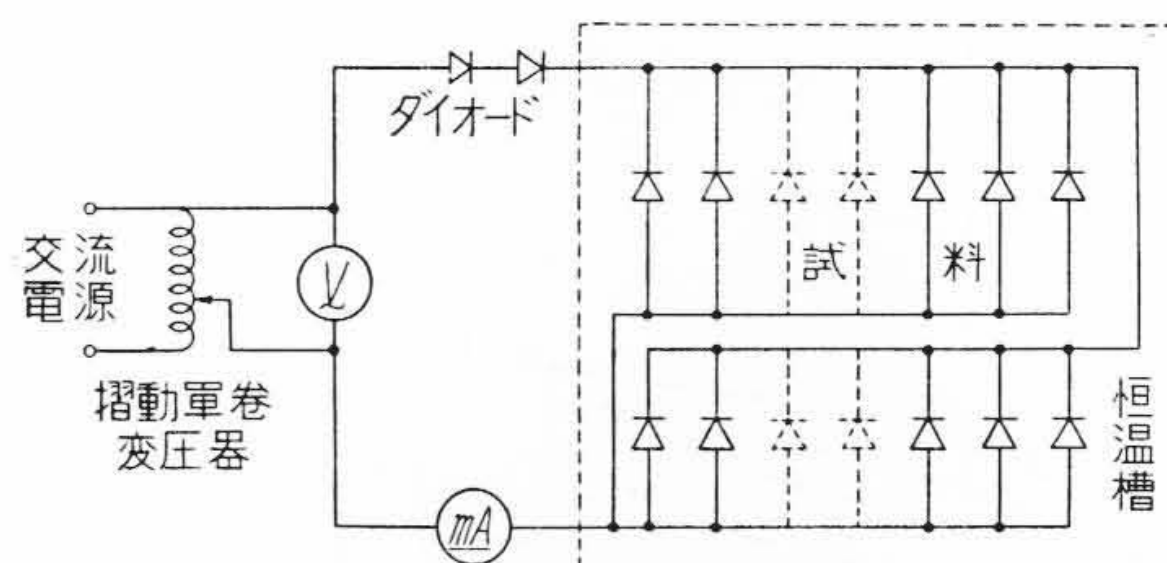
逆電圧印加試験は等価寿命試験ともいうべき方法で第6図のように多数の試料を恒温槽にいれ実負荷運転の場



第5図 順方向電圧降下の級分け

合のPN接合温度と同じ温度に保ち、外部から单相半波あるいは三相半波に整流された逆電圧を全試料に印加する。この逆電圧は実負荷の場合の逆電圧と等しくする。かくして実負荷運転中の温度上昇を恒温槽温度で代替し、同一逆電圧を印加し試料にかかる電圧電流によるひずみを等価的に加えようとするもので多数の試料につき小容量の電源で実施できる大きな利点がある。本方法が実負荷寿命試験に対しどの程度の等価性があるかは今後多数の資料を集積しなければならぬが、実負荷寿命試験との大きな差異と考えられる点は、第一に実際の場合はPN接合部の温度は一様な分布をせず局部的に過熱された部分がありその部分が耐圧の最も弱い点と考えられているが、恒温槽中では試料全体が一様に加熱されてしまうことである。第二に実負荷の場合は転流時の大きなサージが存在するが本法ではあっても小さなサージである。この2点が本法を実負荷試験より楽にすると考えられるが、後者に対してはこのサージに相当するパルスを外から逆電圧に重畳して適当な時間間隔で印加してやることはできる⁽²⁾。本試験は長時間実施するほど結果の信頼性は大きい、寿命試験とは別に1～2時間程度の短時間この方法を全試料について行い、不良品をふるい落とす検収試験に応用しても効果がある。

実負荷あるいは前述の逆電圧印加等価寿命試験結果からその試料の寿命を推定するには次に述べる方法によると比較的容易である。真空管や小容量のダイオードについての実験結果⁽³⁾によると、これらの残存率(破壊せず残っているものの数/全試料数×100%)曲線は略指数関数的に変化することが知られている。したがって電力用半導体整流素子でも同様の傾向をもつものとする。今



第6図 逆電圧印加試験回路

試料全数 N について時間 T だけ試験を行ったとし、 T に至るまでに破壊した試料を $n_1, n_2, \dots, n$ 個としそれまでの時間をそれぞれ $t_1, t_2, \dots, t_n$ とすると延試験時間は $\sum_{i=1}^n t_i + T(N-n)$ となる。平均寿命を L とすると

$$L = \left\{ \sum_{i=1}^n t_i + T(N-n) \right\} \times \frac{1}{n} \dots\dots (2) \text{ で与えられる}$$

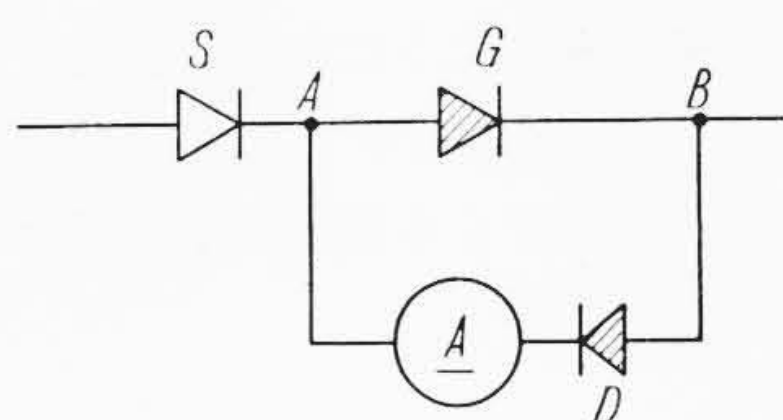
また(延試験時間) $\times 2 \times 1/L$ は自由度 $2n$ の χ^2 分布をすることが知られている⁽⁴⁾。このことより95%信頼限界における平均寿命 $L(95\%)$ は(3)式で求められる

$$L(95\%) = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n t_i + T(N-n) \right\} 2}{\chi^2_{2n}(0.05)} \dots\dots\dots (3)$$

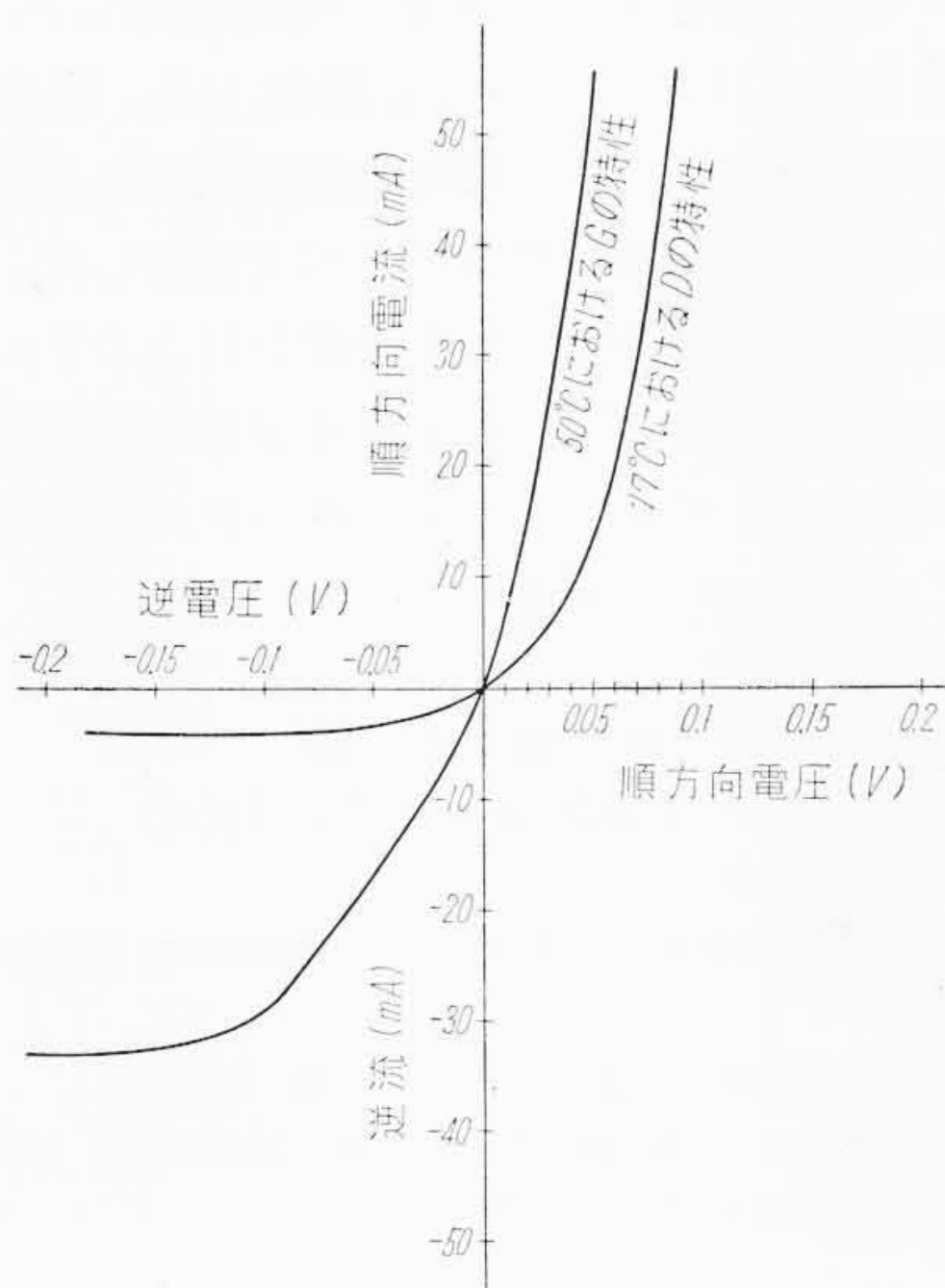
T が長時間になるほど信頼度のますことは当然である。日立ゲルマニウム整流器(GMF 11形)およびシリコン整流器(SMF 12形)についてそれぞれ100%負荷で実負荷寿命試験および逆電圧印加試験を実施中である。前者は数千時間、後者は千数百時間に達したが破壊せるものなく、したがって(3)式の $n=0$ で $L(95\%)$ の推定は求められていない。

5. PN接合部温度の測定

整流素子のPN接合部の温度を直接測定することは構造上できない。しかも周知のとおり半導体整流素子は温度にきわめて鋭敏であり許容最高温度をこえての使用は絶対に避けなければならない。このため運転中のPN接合部温度を推定することが設計上必要となり逆流法という測定法が一般に使われている。これはあらかじめ試料を恒温槽に入れ一定温度に保ち外部から一定逆電圧を印加して温度と逆流の関係を調べておき、運転中試料をその回路から切りはなすと同時に逆電圧を加えて逆流をはかり、前もって更正した逆流—温度の関係からそのときの接合部の温度を知る法であるが、測定中に試料の温度が低下するのであまり良い方法ではない。これを防ぐために第7図に示すような方法がある。図は温度を測定せんとする試料Sで構成する整流回路の一つの腕を示すがSに直列にSと同じかあるいはそれ以上の電流容量のダイオードGを接続しGと逆並列にダイオードDと電流計



第7図 運転中の逆流測定回路

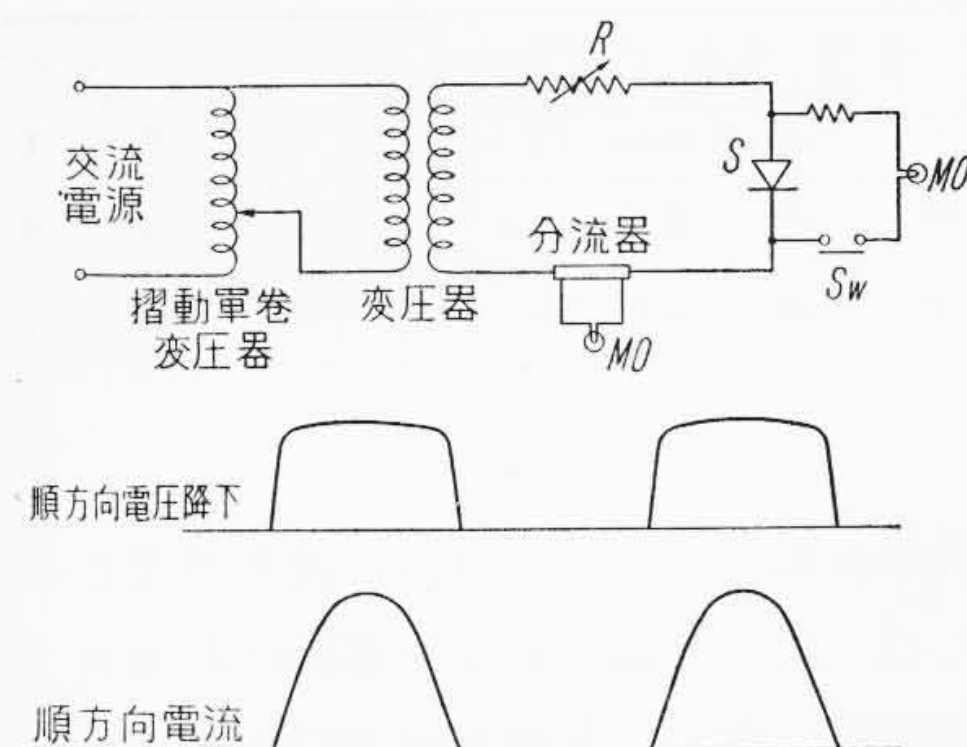


第8図 低電圧印加時のダイオードVIの特性

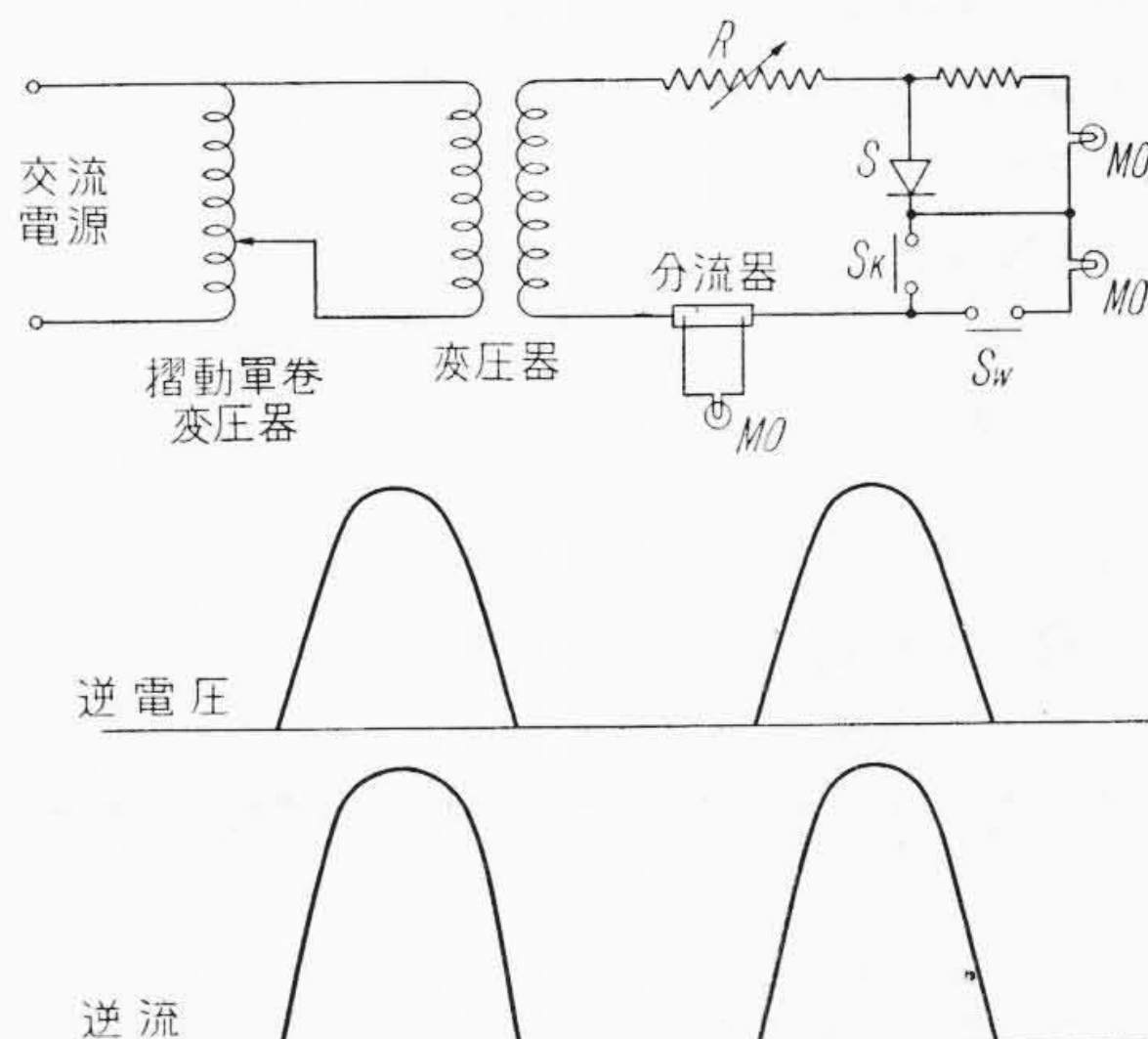
を接続する。Sの順方向電流はGを流れ、Sの逆流はDと電流計を流れ運転中でも逆流をよむことができる。このとき注意すべきはAB間の電圧は、Sに順方向電流の流れているときはGの順方向電圧降下、また逆流のときはDの順方向電圧降下が現れる。GとDにゲルマニウムダイオードを用いたとするとこの電圧はSの順方向で0.5 V、逆方向で約0.2 V以下である。このような低電圧印加時のGとDのVI特性は(1)式で表わされるが一例を上げると第8図のようである。整流比はきわめて小さく順方向、逆方向共同程度の電流が流れる⁽⁵⁾。すなわち電流計を流れるべきSの真の逆流は、Gの回路に分流したSの通流期間中はDの逆流で相殺され数分の一に減少する。これを防ぐためにはGとDには順方向電圧降下を少なくするためできるだけ電流容量の大きなゲルマニウムダイオードを用い、かつ温度変化によるGとDの逆特性の変化をも考慮した十分な更正曲線を作っておく必要がある。

6. 熱抵抗の測定

半導体整流装置の冷却関係の設計の基礎になるものの一つに整流素子の熱抵抗がある。熱抵抗の測定法は種々



第9図 電力損失測定回路と測定した波形



第10図 逆流測定回路と測定した波形

あるが比較的簡単な一方法について述べる。

6.1 損失測定

熱抵抗を知るためにはまずPN接合で発生する電力損失を知らなければならない。第9図はこの測定回路を示すもので、試料Sに一定電圧を印加し負荷Rを調整して一定電流を流す。Sが熱的定常状態になったあとこの順方向電流とSの順方向電圧降下を電磁オシログラフMOで測定する。このときSの逆電圧がMOに侵入するのを防ぐため、オシログラフ回路に機械的接点Sw(たとえばベクトルメータの接点)を挿入し電源周波数に同期して開閉せしめる。かくして得られたオシログラムは第9図のとおりでこれより順方向電力損失 W_F を求めることができる。

6.2 PN接合温度測定

次に前項と同一定常状態において逆流法によりPN接合の温度を測定する。その回路は第10図のとおりで大体第9図と同じであるが主回路にさらに電流容量の十分な機械的接点(たとえば接触変流機の接点)Skを挿入し、電源と同期して開閉しオシログラフ回路に逆流のみを流通する。Swは前記と同じ接点を用いSkの接点による電圧降下がオシログラフにはいるのを防ぐため、電源と同期してかつSkと逆の開閉をさせる。またPN接合で発

第1表 シリコン整流器の熱抵抗測定結果

試料	電源電圧 (V)	電流平均値 (A)	逆流波高値 (mA)	PN接合温度 (°C)	スタッド温度上昇 (°C)	室温 (°C)	順方向損失 (W)	熱抵抗 (°C/W)	冷却風速 (m/s)
GE No.1	70	42	2.0	86.5	30	15.5	50	0.82	6.5
GE No.2	70	42	0.8	79	23	15	53	0.77	6.5

生じた熱が全部スタッドのほうに流れ頭部から逃げるのを防ぐため、素子の頭部および導線は断熱材で十分おおう必要がある。測定した波形は第10図のとおりでこの逆流波高値とあらかじめ前記方法で更正した逆流-温度の関係よりPN接合温度 T_j を知ることができる。

なお試料のスタッドにある温度測定用孔に熱電対を挿入してその部分の温度 T_s を同時に測定する。以上の結果よりPN接合とスタッド間の熱抵抗 R_θ は

$$R_\theta = \frac{T_j - T_s}{W_F} \dots\dots\dots (4) \quad \text{として求まる。}$$

このとき注意すべきことは試料は逆流の温度特性の直線的に変化するもの、およびクリーピングのできるだけ少ないものを選ぶことで、さもないと接合温度の測定値に誤差が入り結局得られた熱抵抗値の信頼性が薄らぐことになる。

本測定法でGE社製4JA60形のシリコン整流素子2

個のPN接合とスタッド間の熱抵抗を実測した結果を一例として示すと第1表のようになる。表より明らかとなり熱抵抗は $0.77 \sim 0.82^\circ\text{C/W}$ となり同社で発表⁽⁶⁾している 0.8°C/W と大差なく本測定法の良好なことを裏書している。

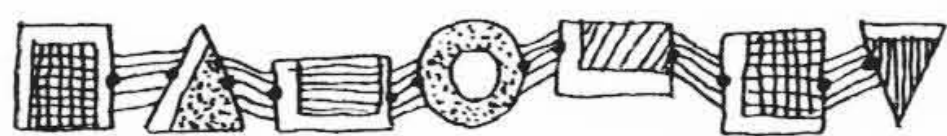
7. 結 言

以上電力用半導体整流素子の電気的特性その試験法の二、三について説明を加え測定上の問題点について述べた。試験としてはこのほかにも温度上昇、耐圧、シール、過負荷、熱サイクル、機械的強度試験など多数の項目があるが今回は紙面の都合ですべて割愛した。

最近国際工芸委員会電力変換装置分科会の手により電力用半導体整流器についての試験規定草案が発表されたが、わが国においても一日も早く統一された規定が制定されることを念願してやまない。

参 考 文 献

- (1) J. T. Law: PIRE 42, 1376 (1954)
- (2) 特許出願中
- (3) N. F. Bechtold: AIEE Conference Paper. June 1957
- (4) 高田, 島田: 通信学会誌 (昭 26-6)
- (5) J. S. Saby: Report of the Meeting on semi-conductors April 1956



新 案 の 紹 介



実用新案 第484127号

前 川 敏 明

静 止 レ オ ナ ー ド 制 御 装 置

この考案は静止レオナード方式における電動機の正逆転切り換えを電動機電機子電流を継電器で検出して行うものである。図で調整抵抗 S のしゅう動子 a が中央より右にある時は正方向検出リレー 1 が動作しその接点 la がとじ線輪 L が付勢されて接点 La_1, La_2, La_3, La_4 は閉路し接点 Lb は開路する。そして正常運転中は零電流検出リレー C の接点 Ca は閉路しているのでリレー 1 が不動作となっても線輪 L の回路は接点 La_4 で自己保持されている。次に電動機 M を減速する場合にはしゅう動子 a を中央より左方に移動すると負方向検出リレー r が動作しその接点 ra がとじる。しかし線輪 R は接点 Lb が開路しているのでまだ付勢されない。電動機 M がさらに減速し遂に電機子電流が零となるとリレー C が動作しその接点 Ca が開路する。そのため線輪 L が消勢され線輪 R が付勢される。その結果接点 Ra_1, Ra_2, Ra_3, Ra_4 が閉路し電動機 M にはダイナミックブレーキがかかり遂に電動機 M は逆方向に回転する。(矢崎)

