

## 高耐圧コントロールド・アバランシェダイオード

## High Voltage Controlled Avalanche Diodes

島田 住 男\*  
Sumio Shimada

## I. ま え が き

ここ数年間に大容量半導体素子は高耐圧化・大電流化を目指して急速な進歩を遂げたが、中小容量半導体素子においても高耐圧化および信頼性の向上に多くの研究努力がはらわれ、その結果の一つとして耐圧(PIV)が2,000Vおよび3,000Vの整流ダイオードが実用に供されるようになった。

当社におけるこの種の整流ダイオードはコントロールド・アバランシェダイオード(以下CARと記す)に作られているので、特性上ではアバランシェ電圧が一定の範囲に制限されるとともに、逆方向サージ電力の保証値が明示されている。また構造上ではP-N接合表面にアングルラップ成形を行ない、表面電界強度の集中を緩和して表面耐圧を著しく向上させるとともに、加圧接触機構により整流エレメントを電気的・熱的に接触させている点などが特徴である。

これら数々の特徴を發揮するための接合設計条件ならびにスクリーニング過程を経ることによってCARの安定性はきわめて向上し、結果的には1個のCARに対する信頼性は格段に高まったものとなっている。

CARを高圧整流器に適用すると、従来1,000V~1,200Vの耐圧級の整流ダイオードが多数直列接続されて構成される場合に比べて、直列素子数が減少するので占有容積が縮小化され、配置が簡素化され、また損失が減少するので損失熱の処理が容易で、効率が向上するなどの利点がある。またCARを大電力用高耐圧半導体素子の主回路の保護回路要素に適用すると、ほとんどの場合1対1の対応で使用できるので、直列接続によるストレイキャパシティの影響や逆回復時間の不均一などによる電圧分担上の問題が解決される。

以下CARの詳細につき順次記述する。

## II. 原理および構造

## 1. 逆 電 流

CARの特性上の特徴は逆方向特性にある。

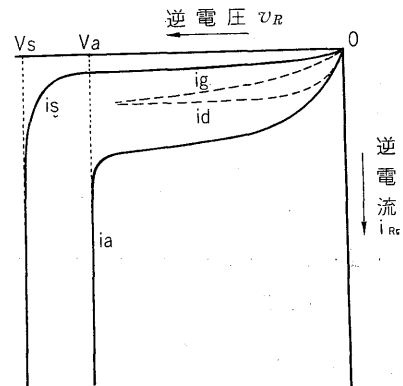
一般に単結晶半導体整流ダイオードの逆電流は

## (1) 接合内部

## (2) 接合表面

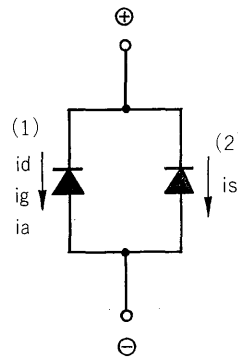
の2部分に分離して考えることができる。

第1図に逆電圧 $v_R$ と逆電流 $i_R$ の関係、第2図に2部分に分離した等価回路を示す。



第1図 逆電圧と逆電流

Fig. 1. Reverse current vs. reverse voltage

第2図 等価回路  
Fig. 2. Equivalent circuit

(1)には逆電圧が数ボルト以上になると飽和してしまう拡散電流 $i_a$ と、逆電圧が加わったときに生ずる空乏層の厚さ、すなわち電界に依存する熱発生電流 $i_g$ とが存在し、 $(i_a+i_g)$ が逆電流として流れる。この電流は逆電圧を増加させると接合設計条件(接合ベース層の厚さと単結晶の比抵抗)によって決まるアバランシェ電圧 $V_a$ に関係する電流 $i_a$ に達する。ここに、

$$i_a = \frac{(i_a + i_g)}{1 - \left(\frac{V_R}{V_a}\right)^n} \quad (n: \text{定数})$$

(2)には接合の表面状態に影響される表面再結合電流 $i_s$ が存在する。この電流は接合表面の耐圧を決定する重要

\* 松本工場

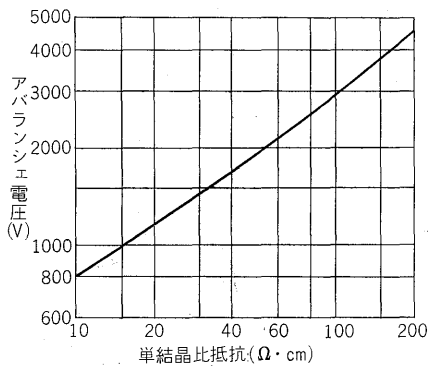
な要素である。

## 2. 接合設計基準

接合表面の耐圧は内部の耐圧ほどに均一にすることが困難であり、もし表面ブレイクダウンを起こした場合は通常接合表面の一点に電流が集中して流れるため、比較的小さな逆電力でホットスポットが生じ、その一点が永久破壊にいたる。

このように素子にとって不利な表面ブレイクダウンを起こさないためには、単結晶の比抵抗を一定の範囲に制限し、接合表面の耐圧よりも低い電圧でしかも内部の全面が均一にブレイクダウンを起こすような接合設計を行なうことが必要である<sup>(2)</sup>。

単結晶精製技術の進歩によって比抵抗の高いシリコン単結晶が容易に得られるようになった現在では、第3図に示すように接合内部の耐圧は3,000V程度まで適当に選定することができるため、アバランシェ電圧を一定の範囲に制限することが可能となった。



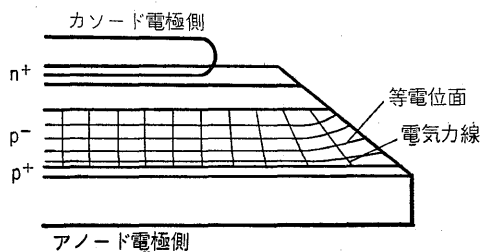
第3図 比抵抗とアバランシェ電圧の関係

Fig. 3. Relationship between resistivity and avalanche voltage

次には接合表面の耐圧向上が重要な問題点となる。

最近では接合表面の電位分布に関する研究解析が進み、表面の形状によって表面における電界強度が著しく異なることが判明し、電界強度を低減させるための接合表面の加工方法が検討されている。

第4図に示すように等電位面が接合表面の斜面全体にほぼ均一に分布している場合は、接合内部に比較して表面における電界強度は著しく低くなることから明らかである、このように電界強度を一様に低減させるためにアン



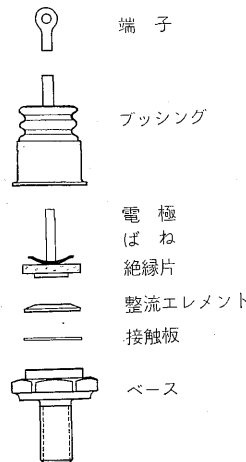
第4図 素子の表面形状

Fig. 4. Surface shape of cells

グルラップ加工を行ない、精度の高い表面を形成している。

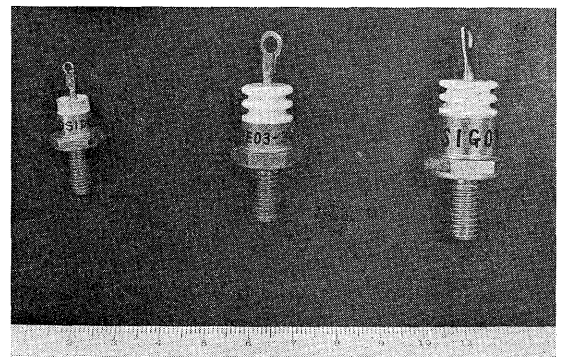
こうして完成されたCARの整流エレメントはシリコンワニス・シリコンゴムなどの塗布によって清浄な表面を保護され、第5図に示すように加圧接触機構を採用して容器内に固定され、窒素ガスを気密封入して経年変化の防止に対する配慮がなされている。

CARの系列として形名 SID 03, SIE 03 および SIG 03 の外観写真を第6図に示す。



第5図 素子の構造

Fig. 5. Construction of a cell



第6図 CARの外観

Fig. 6. Outer view of CAR series

## III. 定格および特性

CARの系列として形名 SID 03, SIE 03 および SIG 03 の3種類に関する主要な定格・特性および大略の外形寸法を第1表に示す。

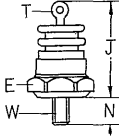
先に述べたようにCARの定格および特性上の特徴は一定の範囲に制限されたアバランシェ特性と逆方向サージ電力の保証にある。

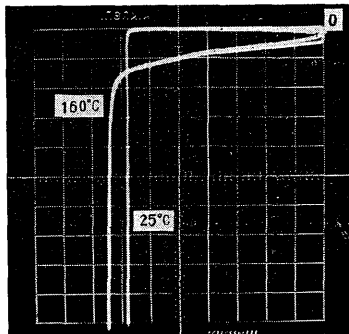
第7図は SIE 03-30 による逆特性曲線の一例である。(X: 500 V/div. Y: 1 mA/div.)

逆方向サージ電力の保証値は電力パルス幅に対して第8図のように表わすことが実用上便利である。

LC分布定数回路により適当な時間幅をもつ矩形波電力を発生させ、最高許容接合部温度に保持されている

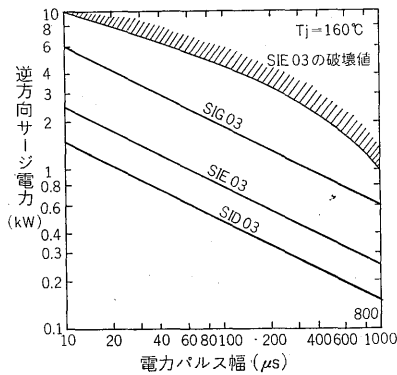
第1表 CAR 系列定格・特性一覧  
Table 1. Ratings and characteristics of CAR series

形 名		SID 03	SIE 03	SIG 03				
CES 登 録 番 号		1S 1927	1S 1928, 1S 1929		1S 1930, 1S 1931			
耐 圧 記 号		20	20	30	20 30			
最 大 定 格	最小アバランシェ電圧	$V_{a\min}$	2,200V	2,200V	3,300V	2,200V	3,300V	
	最大アバランシェ電圧	$V_{a\max}$	2,800V	2,800V	4,200V	2,800V	4,200V	
	接 合 部 温 度	$T_j$	160°C	160°C		160°C		
	逆 方 向 サージ電力 (10 $\mu$ s, $T_j=160^\circ\text{C}$ )	$P_{RS}$	1.5kW	2.5kW		6.0kW		
	平 均 順 電 流 (正弦半波電流 $T_c=120^\circ\text{C}$ )	$I_0$	7A	12A		24A		
静 特 性	1 サイクルサージ電流 (50Hz 定格負荷状態)	$i_{\text{surge}}$	150A	250A		550A		
	順 電 圧 降 下 (25°C, $I_F$ において)	$V_F$	$\leq 1.6V$ $I_F=20A$	$\leq 1.6V$ $I_F=30A$		$\leq 1.6V$ $I_F=60A$		
	逆 も れ 電 流 (25°C, $V_R$ において)	$i_R$	$\leq 0.2\text{mA}$ $V_R=2,000V$	$\leq 0.3\text{mA}$ $V_R=2,000V$   $V_R=3,000V$		$\leq 0.4\text{mA}$ $V_R=2,000V$   $V_R=3,000V$		
	熱 抵 抗 (接合部ケース間)	$R_{th}$	$\leq 2.5 \text{ deg/W}$	$\leq 1.3 \text{ deg/W}$		$\leq 0.8 \text{ deg/W}$		
そ の 他	$V_a$ 測 定 逆 電 流	$i_a$	3mA	5mA		7.5mA		
	標 準 締 付 トルク		15kg·cm	30kg·cm		60kg·cm		
外 形 寸 法	重 量		8g	14g		27g		
		J		25 MAX	30 MAX		33 MAX	
		E		11	14		17	
		N		11	12		14	
		W		M5×0.8	M6×1.0		M8×1.25	
		T		2.3φ	3.6φ		4.2φ	



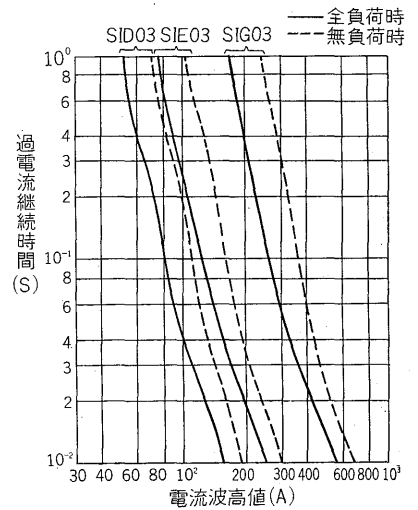
第7図 逆特性曲線

Fig. 7. Reverse characteristic curves



第8図 許容逆方向サージ電力特性

Fig. 8. Allowable reverse surge power characteristics



第9図 過電流特性

Fig. 9. Over current characteristics

CAR の逆方向に 60Hz ベースにおいて毎サイクル連続して加えて破壊調査実験を行なった一例として、SIE 03-30 の逆サージ電力破壊領域を第8図に斜線にて表示する。

第9図は過電流耐量特性である。通常、商用周波数にて使用する場合は過電流保証特性は過電流継続時間が1秒以下の領域において冷却フィンの熱抵抗値の大小や形状にはほとんど影響されず、また正弦半波電流波高値と三相ブリッジ整流電流波高値との間の差もほとんどない

ので、いずれの場合にも適用できる特性曲線である。

CARの安定度に関する調査試験結果のうちから代表的な2項目について紹介する。

(1) 高温逆電圧印加試験

接合部温度を 160°C に保持しながら、商用周波数の正弦半波電圧を CAR の逆方向に毎サイクル印加する試験である。電圧階級 -20 または -30 に対する印加電圧

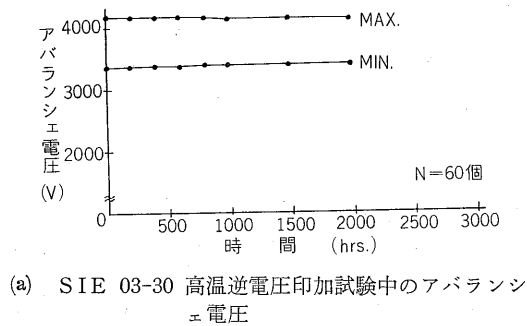
波高値をそれぞれ 1,350V または 2,000V とし、多数の CAR につき 2,000 時間を経過する間の諸特性を観測したが、規格値を越えるものはまったくなく、特にアバランシェ電圧の安定性は良好であった。

(2) 等価負荷試験

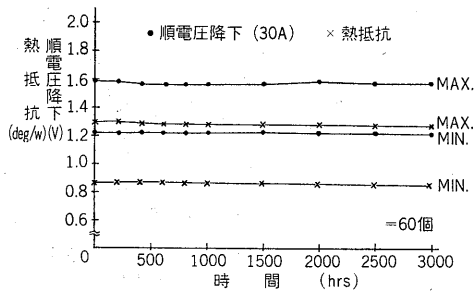
通常半導体素子に対する実負荷試験は電源容量が増大するため比較的小容量で間に合うものについてのみ実施され、他は低圧大電流電源と高圧小電流電源とを組み合わせ半サイクルごとに切換えて、実負荷状態と同等な効果をもつ等価負荷試験が採用される。

逆電圧印加試験の場合に等しい逆電圧を高圧小電流電源から印加し、定格電流に等しい順電流を低圧大電流電源から供給して、連続 3,000 時間の試験を実施した。その間特に逆特性曲線、順電圧降下および熱抵抗などに注目して観測を続けたが、いずれもきわめて安定であり、良好な結果を得た。

第 10 図(a)(b)に測定結果の例を示す。



(a) SIE 03-30 高温逆電圧印加試験中のアバランシェ電圧



(b) SIE 03-30 等価負荷試験中の順電圧降下および熱抵抗

第 10 図 安定度調査試験結果の例

Fig. 10. Stability test results

IV. 高圧整流器への適用

CAR は逆方向サージ電力の吸収能力があるとはいえ許容量には限度があるので、実際の高圧整流器に適用する際はサージアブソーバや分圧器など付属機器の要否に関しそれぞれの場合について検討を加えなければならない。

1. 不規則に発生するサージ電圧

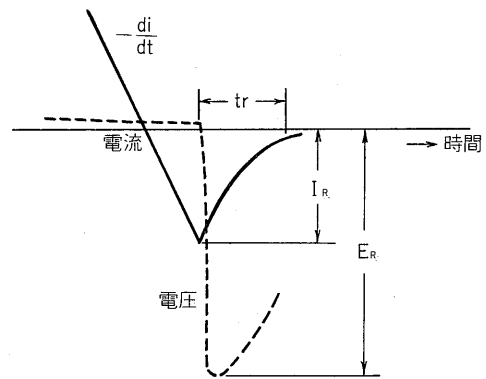
整流器用変圧器の一次側に設けられたしゃ断器を開路する場合は、周知のように励磁電流しゃ断に起因するサ

ージ電圧が発生し、サージアブソーバがなければ直接整流器の逆方向に加わり、全サージエネルギーが整流器の逆損失として消費される。この場合、しゃ断器の性能や励磁電流の大きさなどにより決まるサージ電力継続時間と瞬時電力との関係が CAR の保証範囲を越えていると問題であり、適当なサージアブソーバを設ける必要が生ずる。また雷サージのエネルギーは不測であり CAR の逆方向サージ電力とは比較にならないほど過大であると考えられるから、雷サージが侵入する恐れのある整流器には必ず信頼性の高いサージアブソーバを設けなければならない。

2. 周期的に発生するサージ電圧

整流器の転流時のキャリヤ蓄積効果によって毎サイクル発生するサージ電圧は整流器入力側のインダクタンスによる転流時電流減少率 ( $-di/dt$ ) と CAR の逆回復特性から決まる。

第 11 図に示すように、逆回復直後の逆電圧  $E_R$  (飛躍逆電圧とよぶ) と逆電流  $I_R$  との積は瞬時逆損失の最



第 11 図 逆回復特性

Fig. 11. Reverse recovery characteristics

大値となる。CAR に並列コンデンサを接続し、その容量を大きくするほど飛躍逆電圧の波高値  $E_R$  は小さくなるので、並列コンデンサの選定によって CAR の瞬時逆損失を調整することができる。

CAR の逆回復特性は接合部温度、順電流の大きさおよび  $-di/dt$  などに影響されるので回路設計には注意しなければならないが、最過酷条件において検討した結果からみて並列コンデンサを省略できる場合もあり得る。

3. 直列接続時の分圧

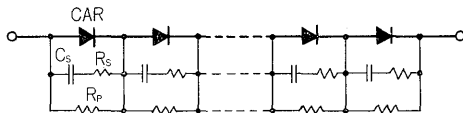
CAR の逆方向サージ電力の保証値と回路設計条件によるサージエネルギーとの間の協調がとれなかったり、回路設計上 CAR に加わるサージエネルギーの予測ができない場合は CAR の動作電圧はアバランシェ電圧よりも低く設定され、不測のサージ電圧の印加に対して充分耐え得るような配慮がなされていなければならない。

このような場合は直列接続された CAR の個々の逆特

性の差異により電圧分担が決まることを避けて、各 CAR に並列に分圧器を接続し、CAR の逆特性には無関係に分圧器によって電圧分担が支配されるようにしなければならない。分圧器の具備すべき条件としては、

- (1) CAR の個々の逆回復時間の差による過渡的な異常電圧分担を十分に補償し得ること。
  - (2) 開閉サージの侵入や転流時の飛躍逆電圧などに対する速応的な分圧作用が充分であること。
  - (3) 過渡的な電圧分担のみならず定常状態や完全平滑直流に対する電圧分担も安定であること。
  - (4) 整流器入力側のインダクタンスとの共振を抑制するための制動作用を有すること。
  - (5) ストレイキャパシタの影響が無視できる程度の静電容量を有すること。
- などがある。

第 12 図に代表的な分圧回路を示す。



第 12 図 代表的な分圧回路  
Fig. 12. Typical circuit of voltage sharing

#### 4. 直列素子数の決定

従来の整流ダイオードにおいては電圧定格の一つとして過渡せん頭逆耐電圧 (サージ破壊電圧)  $V_{Rt}$  が保証されており、直列素子数  $N_1$  は一般に電圧安全率  $S_1$  として、

$$N_1 \geq \frac{\sqrt{2} V_{in}}{V_{Rt}} (1 + \epsilon)(1 + k) S_1 \dots\dots\dots(1)$$

- $V_{in}$ : 定格交流入力電圧実効値
- $\epsilon$ : 電源電圧変動分
- $k$ : 分圧器定数偏差分

と表わされてきた。

CAR においては最小アバランシェ電圧  $V_{a \min}$  と逆方向サージ電力  $P_{RS}$  ( $\Delta t$  時間) が保証されており、アバランシェ電圧  $V_a$  において逆電流  $I_R$  が  $\Delta t$  時間流れても、

$$P_{RS} \geq V_a I_R \dots\dots\dots(2)$$

が成立する限り破壊することがない。

したがって従来の整流ダイオードにおける設計条件に等しい根拠にて電圧安全率  $S_1$  に対して  $S_2 < S_1$  なる電圧安全率  $S_2$  を想定して CAR の直列素子数  $N_2$  を決めることができる。すなわち、

$$N_2 \geq \frac{\sqrt{2} V_{in}}{V_{a \min}} (1 + \epsilon)(1 + k) S_2 \dots\dots\dots(3)$$

と表わされる。

通常は実績による経験的な数値として

$$S_1 \approx 2.0 \sim 2.5$$

$$S_2 \approx 2.0$$

が用いられている。

式(1)と式(3)を用いて  $S_1, S_2$  を代入すれば

$$\begin{aligned} \frac{N_1}{N_2} &= \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{V_{a \min}}{V_{Rt}} \\ &= (1 \sim 1.25) \frac{V_{a \min}}{V_{Rt}} \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

を得る。式(4)は従来のダイオードを用いた場合と CAR を用いた場合の直列素子数の差異を表わしている。

### V. む す び

高耐圧・高信頼度を有する単結晶半導体素子の製造技術は急速な進歩発展を遂げ、大容量素子の分野においては広く 2,500V ~ 3,000V 耐圧級のダイオードやサイリスタが実用に供されている。こうした大容量素子の高耐圧化とあわせて中小容量素子の分野においても高度な製造技術ときびしい試練により培われた豊富な経験とを存分に生かした高耐圧・高信頼度を誇る CAR 系列が開発されて量産されるにいたった。

CAR 系列は比較的小電流容量でありながら高電圧を必要とするような整流装置の設計・製作に参画するとき、性能の優秀性はもとより、外形・構造の点で小形・軽量化が実現し、このような整流装置の運転にあたっては保守・点検が簡単・容易であるなどあらゆる方面においてその有要性が認められ、われわれの期待に充分応えてくれると確信する。

#### 参 考 文 献

- (1) 森, 加藤; 富士時報 38 No.3 (昭 40)
- (2) 田原, 春木; 富士時報 41 No.2 (昭 43)



\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。