

SCRの静電容量と転流特性

石原 裕史 後藤 淳

Relation between Junction Capacitance of SCR and its Turn on Characteristics

Yuji ISHIHARA Atsushi GOTO

When a SCR is turned on by a gate trigger pulse current under applying forward voltage, the current through it is a typical space charge limited current.

The quantities of space charge at middle junction of SCR under various biasing may be calculated by its capacitance between anode and cathode. Then the capacitance of a SCR can be used as the measure of its turn on characteristics.

A SCR having extraordinary large value of junction capacitance compared to same rating one has poor turn on performance.

1. ま え が き

SCRが順電圧阻止状態からゲートトリガパルス電流でタンオンされる時、その中央接合面は同時に一樣な導通状態に入ることができない。最初電流は接合のゲート近くの小部分に集中⁽¹⁾⁽²⁾し、時間の経過とともに急速に導通面は接合全面に拡がる。接合面の導通部分の拡散に対応して、SCR両端の電圧も次第に低下し、全接合面が完全導通に入ると、SCRの端子電圧は約1Vの正規の低い値になる。

従ってSCRを順電圧阻止状態よりタンオンに入る場合、端子電圧と電流との積で示される損失が、中央接合の電流導通の小部分に集中し、これによる熱破壊の発生の危険を生ずる。熱破壊防止の対策としては、電流の増加率を抑えるとか、阻止順電圧値を低く制限するとか種々云われているが、基準については未だ明らかにされていない。

この問題を解明する手掛りとして空間電荷制限電流の考え方が発表⁽³⁾されている。

SCRが完全導通に入るには、中央接合両側の空乏層内の空間電荷が注入キャリアによって中和され、さらに注入キャリアの蓄積によって順バイアス状態になる必要がある。従って順電圧阻止状態の中央接合の空間電荷量がタンオン特性を支配すると考えられる。

われわれはSCRのバイアス時の静電容量を測定し、実際の転流特性との関係について調べ、静電容量が異常に大きい素子は、転流特性も悪く、熱破壊、電圧破壊も起し易いことを確かめた。

2. 中央接合の空間電荷制限電流

SCRに順電圧を加え、ゲートトリガパルスでタンオンした直後の中央接合層両側の模型を考えると図1のようになる。

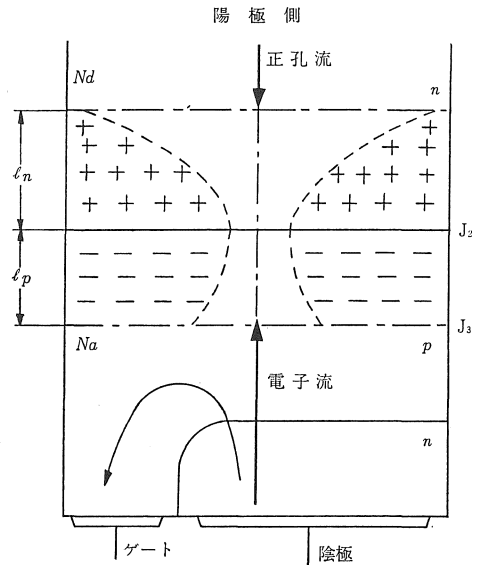


図-1 タンオン開始時のSCR中央接合部の模型

接合をはさむ不純物分布は階段的とし、熱的平衡にあるキャリア密度も無視すると、空乏層の厚さ l_p 、 l_n 内の空間電荷密度はその不純物密度 N_a 、 N_d に等しいと考えられる。陽極陰極間に加えられた電圧 V は阻止状態ではその大部分が中央接合に加わるとみなされる。半導体の誘電率を ϵ 、電子電荷を e とすると、空乏層の厚さは

$$l_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} \sqrt{\frac{N_d}{N_a}} \sqrt{\frac{V}{N_a + N_d}}} \quad (1)$$

$$l_n = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} \sqrt{\frac{N_a}{N_d}} \sqrt{\frac{V}{N_a + N_d}}} \quad (2)$$

でそれぞれ表わされ、空乏層の空間電荷は、

$$Q = eAl_pN_a = eAl_nN_d \quad (3)$$

となる。 A は素子の断面積である。

中央接合に空間電荷がつくられた状態で、ゲート、陰

極間にトリガ電流を流すと、陰極からの電子流はトランジスタ作用によって、*p* 形側の空乏層内に注入される。注入された電子は、負の空間電荷で反撥され、その通路が圧縮されながら、*n* 形側の空乏層に電界によってドリフトされると、その正の空間電荷によって吸引され、接合面に沿う方向に発散し、その一部は正の空間電荷と再結合して、次第に正の空間電荷を中和すると考えられる。

陰極からの電子の注入に対応して誘導作用により正孔が陽極側からも注入される。これに対しても同様に *n* 形内では集束、*p* 形内では発散をうけて、*p* 形側の空乏層の負の空間電荷を次第に中和する。これらを空間電荷の中和に応じて、接合に加わる逆バイアスも次第に低下し SCR の端子電圧も低下し、最終的には注入キャリアが蓄積されて、正バイアス状態になると端子電圧は約 1 V の正規の値になると考えられる。

空乏層内の電磁界の分布は三次元であるが簡単のため一次元として考える。*p* 形側の空乏層内の注入電子密度 n は $n \gg N_a$ とすると、この部の電子流密度 J_n は

$$J_n = \left(-\frac{9}{8}\right) \epsilon \mu_n V_{lp}^2 / l_p^3 \quad (4)$$

μ_n は電子の移動度、 V_{lp} は l_p に加わる電圧である。

n 形側の空乏層内の正孔電流密度 J_p に対しても、 μ_p を正孔の移動度、 V_{ln} を l_n に加わる電圧とすると同様に

$$J_p = \left(-\frac{9}{8}\right) \epsilon \mu_p V_{ln}^2 / l_n^3 \quad (5)$$

となる。この式は Mott⁽⁴⁾ 等が固体絶縁物中の導電機構として導いた式と同様である。

n 形側の空乏層内の電子流および *p* 形側の空乏層内の正孔流は何れも接合面に沿って拡がって流れるから、これらのキャリア密度は N_d 、 N_a に比しはるかに小さいとみなすことができる。従って空間電荷による電流の集中は図 1 に示すように、キャリアが等しい極性の空間電荷層を通る場合である。(4)(5)式の示すように、電流密度はそれぞれの空乏層に加わる電圧の 2 乗に比例し、その厚さの 3 乗に逆比例するから、タンオン初期の電流値の小さいところでも、電流密度はかなり大きいことが推定される。

3. SCR の静電容量

p-n 接合において不純物分布が階段状の場合、空乏層の空間電荷 Q は

$$Q = A \left(\frac{2e\epsilon N_a N_d}{N_a + N_d} \right)^{\frac{1}{2}} V^{\frac{1}{2}}$$

その微分静電容量を C とすると

$$C = \frac{dQ}{dV} = A \left[\frac{e\epsilon N_a N_d}{2(N_a + N_d)} \right]^{\frac{1}{2}} V^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

即ち不純物が階段状に分布している *p-n* 接合の静電容量

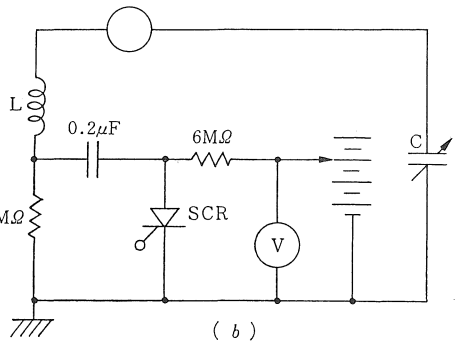
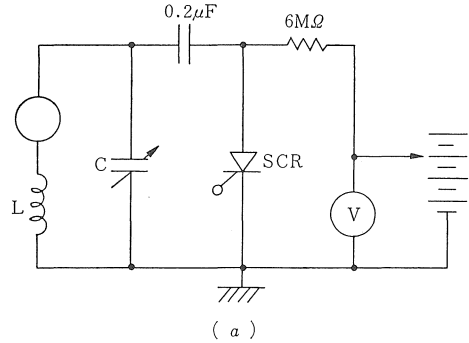
量は、つくられた電位に比し十分大きい電圧を外部から加える場合、電圧の $\frac{1}{2}$ 乗に逆比例する。

次に接合付近で不純物が次のように直線状に分布している場合は

$$\begin{aligned} N_d(x) - N_a(x) &= Kx \\ Q &= \frac{(Ke)^{\frac{1}{2}} \epsilon^{\frac{3}{2}} A 3^{\frac{2}{3}}}{2^{\frac{5}{3}}} V^{\frac{2}{3}} \\ C &= \frac{(Ke)^{\frac{1}{2}} \epsilon^{\frac{3}{2}} A}{2^{\frac{2}{3}} 3^{\frac{1}{3}}} V^{-\frac{1}{3}} \end{aligned} \quad (7)$$

となり、接合静電容量は電圧の $\frac{1}{3}$ 乗に逆比例する。

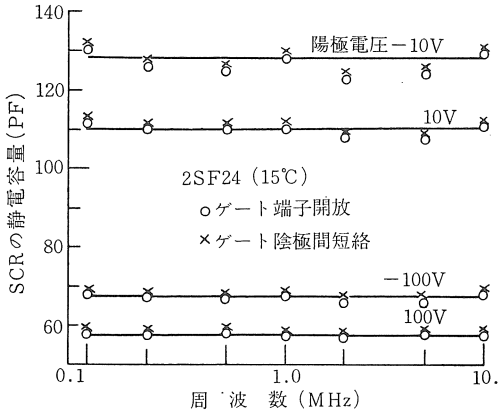
4. 電圧供給時の SCR の静電容量



図—2 SCR のバイアス下の静電容量の測定回路

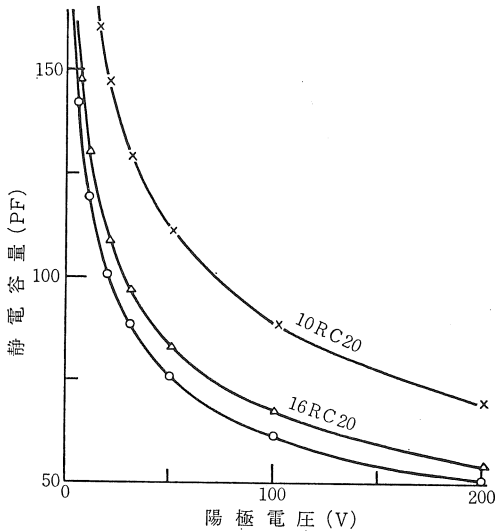
図 2 に示す回路にて、SCR 両端に種々の順あるいは逆の直流電圧を加えた状態の静電容量を Q メータにより測定した。電流容量の小さい素子は静電容量も小さいので、(a)の並列方式で、電流容量の大きい素子はその静電容量も大きいので(b)の直列方式により、周波数 50KHz より 10MHz の範囲で測定した。

図 3 は 10, 100 V の順、逆のバイアス下の SCR 素子の接合容量の周波数特性の例である。この図の示すように、SCR のバイアス時の静電容量は、この範囲の周波数においては、特異な変化はみられないので、大体様とみなすことができる。順バイアス時に比し、逆バイアス時は少し静電容量は大きい。順バイアス時の静電容量



図一三 SCRの静電容量の周波数特性

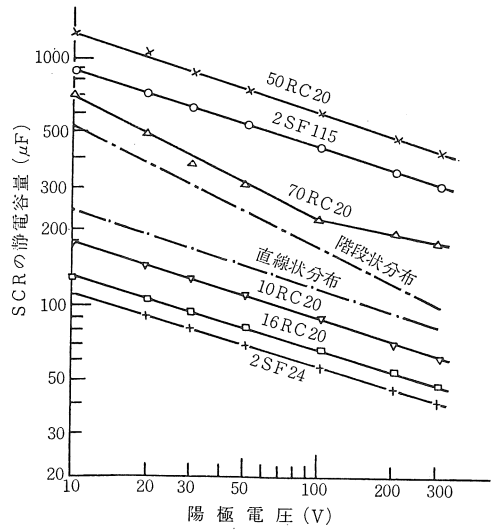
はSCRの中央接合の静電容量を表わし、逆バイアス時は陽極側の接合の静電容量を表わす。(6)式よりp形の不純物密度がn形のそれより大きい場合は、静電容量は大きくなることが推察されるようにこの差異は、接合における不純物密度の差を表わしている。



図一四 順電圧値と静電容量との関係

図4は周波数500KHzにおける順方向のバイアス値と静電容量との関係曲線の例である。逆方向のバイアスに対しても同様の曲線が得られる。各種の電流定格、同一定格の数個の素子についての測定結果より、(1)同一定格の素子でもその静電容量には差異がみられる、(2)順バイアスよりも逆バイアスの方が若干静電容量が大きい、(3)電流容量の大きい素子は小さい素子に比し、静電容量比は大きくなる、等が明らかになった。

図5は横軸にバイアス値の対数をとって、縦軸に静電容量の対数をとって、これら測定結果を示したものである。何れも直線となる。(6)(7)式に示すように接合の不純

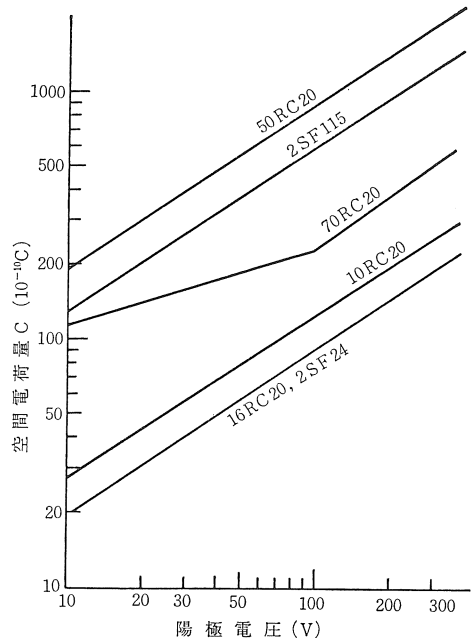


図一五 陽極電圧とSCRの静電容量との関係

物分布が階段状の場合は、この直線の傾斜は $-1/2$ であり直線的な分布の場合は $-1/3$ となる。70RC20を例外として、他の素子は図中の点線で示した $-1/3$ の傾斜の直線と殆んど平行している。逆バイアスの場合は70RC20でもこのような屈曲はみられないが、殆んどが $-1/3$ の傾斜に平行する程度は若干おちる。この事から、SCRの中央接合の不純物分布は直線的であり、陽極側の接合の不純物分布も大体これに近いことが判る。

空乏層の空間電荷量

$$Q = \int_0^V CdV \quad (8)$$



図一六 陽極電圧と空間電荷量との関係

より求めることができる。図6は図5に対応するバイアス値と空間電荷量との関係である。不純物分布が直線的な場合、空間電荷量は電圧の $\frac{1}{3}$ 乗で増加し、又定格電流の大きい、即ち接合面積の大きいものは当然空間電荷量も大きくなる。図6で50RC20 (50A 定格) は200Vで $0.14\mu\text{C}$ になるが、16RC20 (16A 定格) はその約 $\frac{1}{4}$ の $0.0142\mu\text{C}$ に過ぎない。静電容量の大きな素子はタンオンの過渡時間がながくなる。50RC20 は200Vの順電圧を単にスイッチで加えただけで破壊した。

5. 転流時の電圧波形

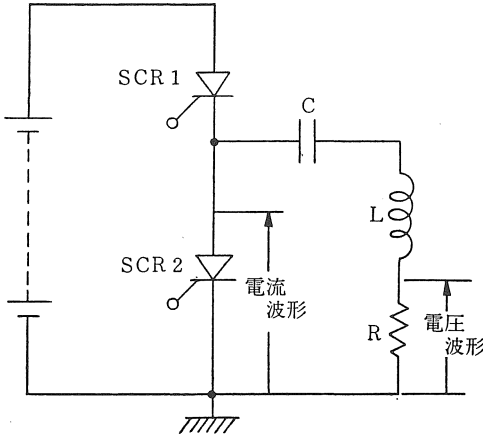


図-7 SCR 試験回路

図7のように直列インバータ方式の試験回路⁶⁾で、SCR2を被試験素子として、その端子電圧波形ならびに抵抗R両端の電流波形を種々の電源電圧、素子、回路条件で調べた。

回路のL、Cでできる発振周期に比し、くり返しのゲートトリガパルスの周期を2倍程度大きくとり、トリガパルスは振幅1.8V、パルス幅 $12\mu\text{s}$ 一定とした。ゲートトリガ発生器より波形観測用の二現象シンクロスコープの周期をとった。

図8はCの充電電圧を変えて同一素子 (10RC20) の

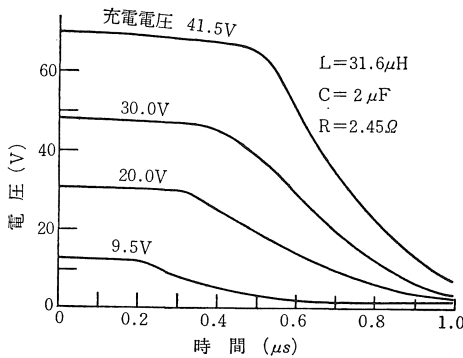


図-8 阻止電圧値と端子電圧低下との関係

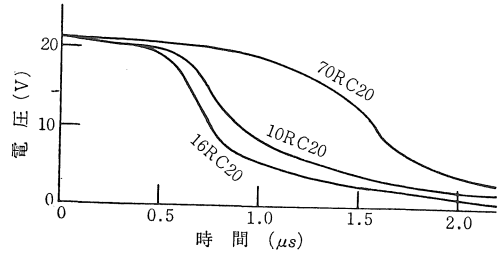


図-9 SCRによる電圧低下の相違

端子電圧の低下の状況を調べた例である。SCR2で放電されるCの充電電圧が高くなると、未だ通電阻止状態の中央接合層の空乏層の空間電荷量も大きくなるので、図に示すように端子電圧低下に時間を要する。

図9は静電容量の違う素子について比較したもので、図5から判るように、静電容量の大きいものは、タンオン時の端子電圧の低下速度が遅い。

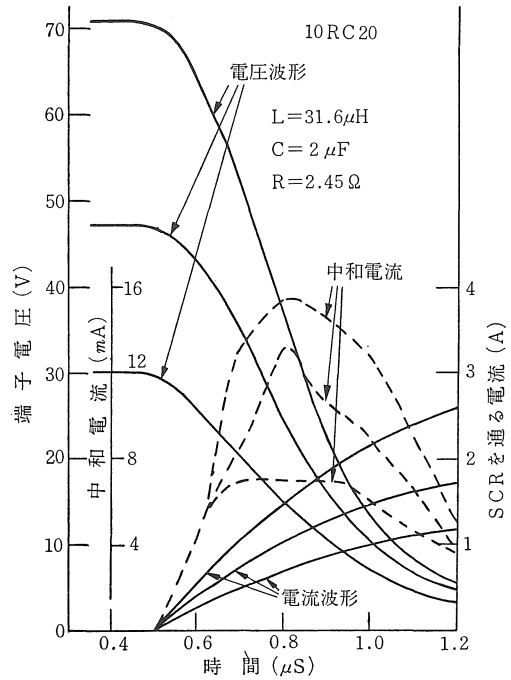


図-10 タンオン時の電圧、電流波形と中和電流

図10は放電開始電圧を変えた場合の端子電圧、放電電流波形の例であるが、点線で示した曲線は、端子電圧の低下に対応する空間電荷も中和するに要する電流を、素子の実測静電容量より計算で求めたものである。これを見るにSCRに注入されたキャリアの約 $\frac{1}{4}$ 程度が接合層に拡がって空間電荷を中和するに過ぎず、大部分のキャリアは中央の接合層を突き抜けて行くことが判る。回路の抵抗、インダクタンス、等の素子で決る電流が流れ出すのは、空間電荷が大体60%ぐらい中和されるところ

で、端子電圧から云えば導通前の電圧約20%に低下する附近である。それまではS C R 自体の高抵抗によって殆んど電流が制限されると考えられる。電流波形の始めの立ち上りが大きいのは、ゲート電流が接合 J_2 , J_3 よりなるトランジスタ作用によるものである。

なおS C R のタンオフ時には中央接合の蓄積電荷の再結合による消滅の際、S C R が回路に直列に入る等価静電容量となる。かなりの高い周波数 ($1MHz$ 程度) の発振が回路のQ値によっては発生し、特に最初の振動は異状に高くなって、電圧破壊を生ずる危険がある。

6.あ と が き

以上述べたように、S C R の転流特性とその端子静電容量は密接な関係があり、同一定格の素子の転流特性を比較する目安としてそのバイアス時の端子静電容量を使うことができる。

タンオン時の局部加熱は中央接合の空間電荷制限電流による機構が原因と考えられ、ゲートからの注入キャリアが主体となる。従って電流増加率を制限する事は、S C R の抵抗が高い間は余り意味がない。

ゲート電流を過大にしても、大部分は中央接合層を突き抜けて流れ、ただゲート附近の損失を増すのみである。

S C R の接合における不純物は殆んど直線的な分布と考えられる。

終りに本研究について、種々御援助をいただいた本学竹松教授に厚く謝意を表する。

文 献

- (1) N. Mapham Electronics, Vol. 35, Aug. 17, 1962.
 - (2) N. Mapham Trans., A.I.E., Sep., 1967.
 - (3) 大鳥, 立木, 篠原, 昭和43年電気四学会連合大会
 - (4) N. F. Mott and R. W. Gurney, Electronic Processes in Ionic cuptals Oxford Uniersity Press, 1940.
- ㊦ 大鳥, 立木, 篠原 昭和41年電気四学会連合大会