シリコン整流素子の残留蓄積キャリヤ

On The Residual Stored Carriers of Silicon Rectifiers

岩田幸二*小川卓三** Kôji Iwata Takuzô Ogawa

内 容 梗 概

シリコン整流器は順電流が流れているとき存在するキャリヤは、電流が0になっても直ちに消滅しない。こ れを残留蓄積キャリヤという。このキャリヤがほとんど0になったとき逆方向の阻止能力を持つ(これを回復 するという)ようになる。この残留蓄積キャリヤは素子の性質を知るうえにも必要であるが、素子を直列に接 続して用いる場合、その分担電圧の決定に不可欠の量である。残留蓄積キャリヤの実験結果とそれに対する解 析結果につき述べる。

1. 緒 言

シリコン整流器の順電流が0になり,直ちに逆電圧が印加される 場合,理想的整流器では逆方向電流は阻止するが,実際にはキャリ ヤ蓄積効果のため,ジャンクション内部のキャリヤがなくなるまで は整流器はほぼ短絡状態のままで,整流器には回路により定まる逆 電流が流れる。ジャンクション内部のキャリヤが内部の再結合およ び逆電流の流れることによって消滅すると,整流器は本来の逆電圧



阻止能力を持つようになる。この現象を回復する (Recovery) と呼ぶ。

この回復現象はパルス回路に用いる場合には、スイッチングタイムの点で問題になり、また高周波の整流回路では整流効率の低下として問題になってくる。また、残留キャリヤのため流れる逆電流がのになるとき、この電流変化がかなり急激に生ずるので回路のインダクタンスのため発生する電圧 $L \frac{di}{dt}$ は相当に大きくなり素子に危害を与える。

電力用整流回路では,転流時にこの現象が生ずるので特に重要と なる。さらに,電力用整流回路では使用する回路電圧と素子の耐圧 の関係から,素子を直列に接続して使用することが多い。この場 合,各素子の残留蓄積キャリヤには一般に差異があるため,直列素 子おのおのの分担逆電圧が不平衡になる。そして,この分担電圧を 均等にするためには,素子に並列にコンデンサを接続するのが普通 である。従来,この分担電圧平衡用に接続すべきコンデンサは経験 的に決められていた。

上記からわかるように,分担電圧平衡用コンデンサの容量は各素 子の残留キャリヤと密接な関係がある。そこで整流素子の逆電圧回 復特性について検討した結果,逆特性を回復するまでに流れる逆電 流の時間積分値 *Q*r を考えることにより,分圧用コンデンサ容量が 簡単に求められることがわかった。本報告ではこの *Q*r を recovered charge と呼ぶことにする。

一般に回復の問題は接合中の各時点におけるキャリヤの分布を求 めることに帰着するが,特殊の場合を除き,その解析は困難であ る。しかし,接合中の全電荷量に着目すると,解析が比較的簡単 で,実験結果に対しても近似的な解釈が可能である。

本報告ではこれらの実験結果や計算の結果に基づき、電力用シリ

第1図 単相整流器回路



第2図 単相整流回路の電流電圧波形

図の e_{AK_1} は SR₁の陽極一陰極間電圧である。Aの時点で SR₂ に順 電圧が印加されるから、SR₂には電流 i_2 が流れ始める。ここでよく 知られているように変圧器のインダクタンスのために、電流は図の ように変化してB点で i_1 は0となる。このAB間の期間を重なり期 間と称し、電気角で表わし重なり角uと呼び、このように電流の変 化して行くことを転流と呼んでいる。このようにして、B点で SR₁ には相電圧 E_2 の B 点における電圧 e_{2B} 以後の電圧が加わる。この e_{2B} を飛躍逆電圧と称する。

ところが、B点以後SR1の逆特性が回復するまでは外部回路によってきまる大きい逆電流が流れる。すなわち、B点における残留蓄

コン整流器の残留蓄積キャリヤについて述べる。

2. 回復電流電圧波形

第1図の単相整流器回路において,平滑リアクタLが十分大きく 電流は平滑であると考えると各素子の電流は第2図のようになる。

* 日立製作所日立研究所 工博 ** 日立製作所日立研究所 積電荷 Q₀の一部 Q_rは逆電流として接合の外に流出し,一部は接合 内で再結合によって消滅する。そして,残留蓄積電荷の大部分が消 滅し,C点に達すると,素子のバイアスは正から逆に転じ,逆電流 は急速に減少する。第3 図はその有様を示す。 Q_rは次式の電流積分値として求められる。

$$Q_r = \int_{B}^{t=\infty} (i_r - i_{r_0}) dt \dots (1)$$

コン整流素子の残留蓄積キャリヤ シリ

ここで, in は回復後の逆電流で, C 点の電流に比べてきわめて小 さい。後に示すように Qr は電流変化率,正方向電流および接合中 のキャリヤのライフタイム (lifetime) できまるので、 整流器回路の 設計上,素子の耐圧,電流容量,熱抗抵と同様,素子の性能を示す 基本量であるといえる。

3. Recovered Charge Qr の測定回路

実際の整流器回路では変圧器などの回路定数により, 転流時の電 流電圧の変化状態は違うので、Qrも違ってくる。しかし実際の整 流回路で,これらの定数を広範囲に調べることは困難である。

一般の整流回路では飛躍逆電圧に付随する振動をおさえ,また第 3図のC"の電圧のように残留キャリヤの作用に基づく異常電圧吸 収のために, 整流器の陽極陰極間にコンデンサを接続する。

したがって、転流終期における電圧は飛躍的に e_{B2} にならないで コンデンサの充電時の形をとり,近似的には直線的に逆電圧が上昇 していく。また、重なり角期間の電流 i_1 、 i_2 も変圧器2次端子の短 絡電流で直線的ではないが,重なり角期間のみを考える場合には, 直線的に変わると考えてもさしつかえないであろう。

これらの点を考えて、電流電圧の変化状態を整流回路の転流時と 同様にして残留キャリヤを測定するため第4図の回路を用いた。図 において, SCR₁のゲートにパルスを加え, 順電流源から試料素子 に順電流 IFを流す。その大きさは R1 によって調整する。続いて

時間 t=0 とすると、試料を流れる全電流 i は

$$i = I_F - \frac{E_R}{R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_2}{L_2}t} \right) \dots \left(2 \right)$$

そのこう配は

特に $L_2/R_2 \gg t$ のときは

$$\frac{di}{dt} = -\frac{E_R}{L_2} = \alpha_I....(4)$$

このように転流期間中の電流に相当する電流波形は ER と L2 によっ て調整する。

また, 転流終期の電圧に相当する回復逆電圧波形は試料と並列に コンデンサと抵抗を接続して調整する。試料に順電流を通流する時 間は接合部が加熱されないように短くしなければならない。

しかし,この時間が短かすぎると接合部におけるキャリヤが定常 状態に達しないため, 通流期間の影響が現われるのでキャリヤのラ イフタイムに比し、十分大きくしなければならない。また、回復電 流の時間変化率が大きいので, 電流波形測定用シャントは無誘導形 のものを用い、シャントからシンクロスコープなどの測定器に接続 する配線は、誘導電圧などがはいらないように注意しなければなら

SCR2のゲートにパルスを加え、逆電圧源から試料に逆電圧ERを加 えて逆耐圧回復特性を測定する。

素子が逆耐圧を回復する(以下単に回復するという)まで、その 等価抵抗は非常に小さいから,これを0とみなすと逆電圧回路は $L_2 \ge R_2$ の直列回路になる。したがって、SCR₂が導通したときを



逆電流が流れる。C 点以後の電流変化が大きい ため振動電圧が生ずる



第5図は第4図の測定回路で測定したシリコン整流素子の回復電 流,電圧波形を示す。これについて簡単に説明する。第5図におい て時点 T₁で順電流が減少しはじめ,時点 T₂ で0になり, T₄ で最 大値に達する。T₁~T₃の領域における電流は(3)式で表わされる。 時点 T₄ 以後電流は減少して T₆ で定常時の漏れ電流に達する。

これに対して素子電圧は、T₃まで順方向でT₃から逆方向に変わ り,電流が最大値になる T₄ で電圧は逆印加電圧 E_R とほぼ等しくな る。それ以後,素子電圧は逆印加電圧に回路インダクタンス L₂ に よる電圧 $L_2 \frac{di}{dt}$ の和になる。T₅ において逆電圧が最大となってい るのは第3図のC"に相当する部分である。

第5図は第3図の波形と多少相異するが、回路のインダクタンス の影響と逆バイアスに移る時点のわずかの差による差異である。 回復時間は図に示す Tr1(T2, T3間)と Tr2(T3, T6間)の和となる。 この回路を用い電流波形を写真撮影して T₁~T₆ の逆電流波形か ら面積をプラニメータで測定し、電流積分値を求めれば Qrを得る。 しかし,実用的に多くの素子についてQ,を測定する場合,これはは なはだしく非能率的である。そこで,第6図のように改良し,電圧 計でQrを直接測定する装置を試作した。第7図は試作したQr測定 装置である。第6図において SR₁ は, その recovered charge Q_{r_1} が, 試料のそれ, Qr2よりも小さいものを用いる。 試料と SR1 の直





日立製作所日立研究所創立三十周年記念論文集



第 6 図 シリコン整流器 Recovered Charge Q, 測定装置の原理図

列回路に逆電圧が印加されると試料の回復電流は,最初 のうち SR₁を通るが, SR₁がさきに回復し,その後はコ ンデンサCを通りCを充電する。したがって,試料が回 復した後のCの電圧を E_c とすると,試料の recovered charge Q_{r_2} は次式によって求められる。

 $Q_{r_2} = E_c \cdot C + Q_{r_1} \quad \dots \quad (5)$

電圧 *E*_c を測定する間, *C*の電荷は放電によって減少 しないように, 電圧計の内部抵抗は十分大きく, また SR₂の逆漏れ 電流はできるだけ小さくなければならない。コンデンサCは SR₁の 回復後, 試料の回復電流にじょう乱を与えないようにできるだけ大 容量のものを用いることが望ましい。



4. Recovered Charge Qr の測定結果

すでに述べたように recovered charge Q_r は逆電圧印加前の順 電流 I_F , 電流変化率 α_I および温度により変わる。

これらのパラメータを変え,第4図の回路によりQ,を測定した。 第8図は回復前の順電流 I_F をパラメータにしたときの電流変化率 $\alpha_I \ge Q_r$ の関係を,第9図は α_I をパラメータにして $I_F \ge Q_r$ の関 係,第10図は I_F , α_I を一定とし接合温度と Q_r の関係を示す。

 I_F , α_I を一定にして逆電圧波形を変えて Q_r を求めると,回復電流波形は変わるが Q_r はほとんど変化しない。

このように, Q, は I_F および α_I が大きいほど大きくなり, 接合 温度が高いほど大きくなることがわかった。 もちろん, この Q, は 使用している Si 結晶の特性, 接合構造, 接合条件などいろいろの 影響を受けるので形式の違った素子はもちろんのこと同一形式のも のでも相当のばらつきは当然生ずる。

5. 残留蓄積キャリヤの解析

5.1 接合中の電荷に対する方程式

第11図のような pin 接合において n⁺ 領域から i 領域に注入され た電子に対して次の連続の式が成り立つ。

 $q \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial i_n(x,t)}{\partial x} - q \frac{n(x,t)}{\tau}$ (6) ただし, n: 過剰電子濃度 i_n : 電 子 電 流 q: 素 電 荷 τ : 実効的なキャリヤの lifetime⁽¹⁾ いま, i領域中の電荷の総量をQとすれば

$$Q(t) = q \int_0^W n(x, t) \, dx.....(7)$$

(6)式をi領域全体 ($0 \le x \le W$) にわたって積分すると(7)式に よって(8)式が得られる。

ここで, n+および p+領域は完全なエミッタで, n+i および p+i 接

第10図 SR の 温度 と Qr の 関係







合ではそれぞれ電子および正孔電流のみが流れるとすれば

 $i_n(0, t) = i(t), i_n(W, t) = 0$(9) としてよい。ただし、i(t): 外部電流

また,接合容量は無視した。したがって,(8)式は次のような簡 単な形に書きかえられる。

5.2 蓄積電荷と Recovery Time

接合を流れる電流が正から負に階段的に変化する場合は、すでに Kingston 氏⁽²⁾ らによって取り扱われている。しかし、前章で述べ





に比し, 逆バイアスになってから流れる電気量が十分小さいことか ら, 簡単のために

t'=t,に対しQ(t')=0.....(17) と近似する。これより次の関係が得られる。

たように一般の整流回路では第3図のように変化する。

第3図おいてA点を時間の原点とし、B点では $t=t_0$ とする。また、 $t \leq 0$ では通流時間が lifetime τ に比して十分大きく定常状態になっているとすると、(10)式でdQ/dt=0であるからt=0では

 $Q_{t=0} = I_F \tau \qquad (11)$

ただし, IF: 順方向電流

1 .

また,第3章で述べたように $0 \leq t \leq t_r$ では電流は一定の傾斜 α_I で 変化するとすれば

 $i(t) = I_F - \alpha_I t$ (12) (11)および(12)式の条件のもとで(10)式を解くと

Q(t) の(13)式による時間変化の様子は第12図のようになる。 電流の逆転する B 点における残留蓄積キャリヤの電荷を Q₀とす ると(13)式より次の関係を得る。

また, t=t₀+t'とおいて原点をt₀に移すと(13)式は次のように表 わされる。

$$Q(t') = \alpha_I \tau^2 \left(\frac{Q_0 \left(\exp(-\frac{t'}{\tau}) \right)}{\alpha_I \tau^2} + \left(1 - \frac{t'}{\tau} - \exp(-\frac{t'}{\tau}) \right) \right)$$
.....(15)

接合中の電荷は以上のようにして消滅してゆくが,その量が少な くなり, n(0, t₀+t_r)=0となるような時間 t_r に達すると,素子のバ イアスは正から逆に転じ,逆方向の阻止能力を回復するために逆電 流は急に減少するようになる。Kuno氏⁽³⁾によると階段形の電流変

この近似では t_i は直接測定される t_1 よりは当然やや大きくな る。実験との比較のためには上式の t_i としては t_1 ではなく Q_r の実 測値より (19) 式によって得られる値を用いるほうが合理的である。 第 13 図 は図中の測定条件に対し、 τ をパラメータとして (14) およ び(18) 式により t_i および Q_0 を計算した結果と測定結果の比較であ る。図中に \odot で示される t_r の値は Q_r の実測値から求めた。これに 対応する τ は $\alpha_i = 20$ A/ μ s, $I_F = 200$ A および 20 A の場合にそれぞ れ 8.3 および 17 μ s となる。これらの τ の値は低レベルで測定された lifetime に比しかなり小さく、また、 I_F の大きいほど小さい。 τ が 電流 I_F の増加とともに減少する傾向は低レベルでも認められ、ま た、Somos⁽⁴⁾ らも指摘している。 τ は i 領域の厚さなど接合の構成 の影響を受けるほか、注入レベルによっても変わるから回復現象の 期間中、場所的、時間的な lifetime の平均値と考えるべきもので、 その物理的意味は必ずしも単純ではない。

以上のようにして求めた τ と対応する Q₀ は 第13 図 より得られ るが,実測の Q_r と Q₀の差は再結合によって消滅した電荷と考えら れる。t_r が τ に比して十分小さければ(18)式より

となるが, 第13図より明らかなようにこの近似は十分でない。しかし, 第13図の場合, Qrは Qoの約60~80%を占めているから定

 化の場合には $n(0, t_0+t_r) = 0$ なる条件は実験的に次の条件とほぼ同
 性的には α_1 および $I_F i$

 等であることが見いだされている。
 えられる。実際にも第

 $Q(t_r) = i_R \tau_R$ (16)

 ただし, i_R : 逆
 電

 τ_R : 定
 数

 しかし、第3回の場合には(16) 式の関係で t_r が決定されるか否
 6. 直

 すでに述べたように見

 ---31

性的には α_I および I_F に対する両者の依存性はほぼ同様になると考 えられる。実際にも第8,9 図の α_I および I_F と Q_r の関係は定性的 には(14)式によって説明される。また,第10 図の Q_r の温度依存 性は(14)式の τ が温度とともに増加するためと考えられる。

6. 直列接続素子の分担逆電圧 すでに述べたように電力用整流装置では、2個以上のシリコン整 日立製作所日立研究所創立三十周年記念論文集





第14図 直列接続, SR₁ が回復したあ と点線のように逆電流が流れる

第15図 並列コンデンサ接合, SR₁ が回復 したあと逆電流は点線のように流れ(b)と 等価となる

第16図 第15図(a)におけるSR2の電流, C点でSRが回復し電流は並列コンデンサ で定まる値となる

流素子を直列に接続して用いる場合が相当多い。この場合,各シリ コン整流素子に加わる逆電圧が不均等になると,直列接続数が多く なり不経済となる。

そこで,定常時の逆電圧の分担を均一にするため,素子に並列に 抵抗を接続する。この抵抗を素子の逆方向の等価抵抗に比し十分小 さく,分担電圧を均一にしている。

定常時はこれで十分であるが,転流直後の逆電圧は次に述べるように並列抵抗で均一分担にすることはできない。

直列に接続した2個の素子の残留蓄積キャリヤは一般に相違する。第14図のように2個の素子を直列に接続した場合を考える。 第3図のA点で転流が開始し、今まで転流 *I_F*の流れていた素子の 電流は減少し(電流変化率 α_I)、B点で0になり、さらに逆電流が



流れる。この電流 I_F と電流変化率 α_I における 2 個の素子 SR_1 , SR_2 の recovered charge Q_r を Q_{r1} , Q_{r2} とする。そして今, $Q_{r1} < Q_{r2}$ とする。 Q_{r1} のほうが小さいので SR_1 がC 点で残留キャリヤを消費 し、逆電圧を回復する。

 SR_1 が回復しても SR_2 には $Q_{r_2}-Q_{r_1}=4Q_r$ のキャリヤが残存しているので SR_2 はほとんど短絡状態である。したがって, 第14 図のAB間の電圧は SR_2 が回復するまでほとんど SR_1 に印加される。

ところが、 SR_2 が回復するためには 4Q,のキャリヤを逆電流と内 部の再結合により消費しなくてはならない。 SR_1 が回復した後 SR_2 の逆電流は 第 14 図 の並列抵抗 Rにより制限された電流で、これは 両者の回復する前の電流に比し小さい。また、再結合によりキャリ ヤを消費するには相当の時間を要する。したがって、 SR_2 の回復は 両者の残留キャリヤの差 4Q,がわづかでも相当に遅れることにな り、この間 第 14 図の A B 間の電圧は SR_1 が分担することになる。 これは SR_1 に過電圧が印加されることになり SR_1 に損傷を与える ことになる。

上記の説明からわかるように,この現象は重なり角が大きくて転 流終了時の飛躍逆電圧が大きい場合問題になる。さらに直列素子の 数が多い場合は,最初に回復した素子に印加される電圧がますます 大きくなるので過電圧になりやすく,次々に破壊されてゆくおそれ がある。

7. 直列接続における分圧回路

前章で述べたように、残留キャリヤの影響で転流時の分担電圧が 不均一になるのを防ぐため、一般に並列コンデンサを接続する(普 通直列素子に加わるインパルス状電圧の分担を均一にするため、並 列にCを接続するが、この目的のみを対象としたコンデンサでは容 量が不足するのが普通である)。この並列コンデンサと転流直後の 分担電圧の関係につき述べる。 7.1 キャリヤの再結合を考えない場合 第14 図の SR₁ が回復した後、SR₂ は *ΔQ_r*=*Q_{r1}−<i>Q_{r2}*のキャリヤ が残存している。これが逆電流と内部の再結合で消費され、SR₂ が 回復するわけであるが、この過程において、再結合を考慮しない場 合について考える。

10 2 3 5 10² 2 3 5 10³ 2 3 5 10⁴ 計算値 T_1 (μ s) $T_0 \ge T \sigma$ 関係

第17図 後から回復する素子の回復おくれ時間 T₁の 実験値と計算値の比較

第15図(a)のように SR₁, SR₂ に並列にコンデンサCを接続した 場合の分担電圧を考える。いま整流素子の等価抵抗は回復逆電流が 流れている間は0とし、回復した後は無限大と考える。

第15図(a)でSR₁がさきに回復すると、その後は同図(b)の回路で表わされる。

今,転流後の逆電圧 e_r は一定の変化率 αv で時間とともに増加す るものとし、SR₁が回復したときを t=0 とすれば、t=0 以後 SR₂ の逆電流はCを通って流れる。

 $t=T_1$ で SR₂ が回復したとすると、この間の電流電圧は**第16**図のようになるであろう。

ここで電圧変化率が αv(一定値)とすれば t=0 以後の逆電流 i, は i,=C αv(20) である。t=T₁ で SR₂ が回復したとすると

 $\int_0^{T_1} i_r \cdot dt = \varDelta Q_r.....(21)$

 $\therefore C \alpha_V T_1 = C \varDelta E = \varDelta Q_r \quad \dots \qquad (22)$

 T_1 時点における SR₁の電圧は ΔE となり、 T_1 以後 SR₁, SR₂の 分担差電圧は ΔE のまま変化して行く。もちろん相当長時間の後に は、両者の分担電圧は並列 R が支配的となって平衡する。

(22)式は分担差電圧と残留キャリヤ,並列コンデンサの関係を示す基本式である。

普通は振動減衰用にCに直列に抵抗をそう入する。n個直列にしたときも同様の考え方ができる⁽⁵⁾。

また第16図のような電流変化をするから SR₂ 回復おくれ時間は 単独で測定した回復時間t,の差より一般にはるかに大きい。 今,2個直列の場合の遅れて回復する素子の回復時点 T_1 を測定 し,(22)式により計算した値と比較すると第17図のようになる。 T_1 の小さいところでは,両者はよく一致しているが T_1 の大きい ところでおくれ時間の測定値が計算値より小さくなっている。これ は SR₁ が回復した後,SR₂ に残った残留キャリヤ 4Q,をすべて逆 電流によって引きだされ消滅すると考えたが,実際には内部で再結 合により消費されるためと考えられる。

7.2 キャリヤの再結合を考慮した場合

第16図のC点でSR₁が回復し、その後、 T_1 点でSR₂の残留キャリヤが内部の再結合と逆電流によりほぼ消滅し、SR₂が回復する。この場合、 T_1 を求めるには電荷の分布が問題であるが、簡単のために"recoveryの途中のある時点でQ(t)が同じであれば、その時点以後の電荷分布はそれ以前の外部電流には無関係にきまる"と仮定する。この仮定は本実験のように T_1 がてに比して十分大きく、接合中の電荷が再分布する余裕のあるときは妥当なものと考えられる。

SR₁が回復した時点をt=0とすれば、t=0における SR₂の電荷 は 4Q, である。

上述の仮定によれば $t \ge 0$ における SR₂の状態は t=0 において, ΔQ なる蓄積電荷をもった接合において階段形に順方向から逆方向 に電流が変化し、逆流 *i*, が流れる場合と同様である。 この場合の recovery time T_1 は Kuno 氏⁽³⁾ によると次のように表わされる。

 $T_1 = \tau_2 \left(\ln \left(1 + \frac{\varDelta Q_r}{\tau_2} i_r \right) - \ln \left(1 + \frac{\tau_{R_2}}{\tau_2} \right) \right) \quad \dots \dots \dots (23)$

ただし、サフィックスの2はSR-2に関することを表わす。また τ_{R_2} は(16)で定義される定数である。いま、 $\Delta Q_r/i_r \equiv \Delta t_0$ と表わせば

 $\langle i \rangle \langle t_c \rangle \langle \tau_{R_c} \rangle$

値的には一致しない。

7.3 キャリヤの再結合を考えたときの等価回路

いま,回復中の整流素子を第19図のように,キャパシタンス C_s と抵抗 R_s の並列電気回路とみなす。 ΔQ_r は C_s にたくわえられて いる電気量とし,再結合で減少する分は抵抗 R_s を通る電流 i_r で放 電すると考える。外部回路には回復電流と同じ電流 i_r が C_s から流 れるものとすれば C_s の電流 i_0 は

*i*₀=*i*_r+*i*_s.....(25) **第19** 図の等価回路については次式が成り立つ。

t=0 で

$$i_s = \frac{\varDelta Q_r}{C_s} \cdot \frac{1}{R} = \frac{\varDelta Q_r}{\tau_s}, \ \tau_s = C_s R_s$$

を初期条件として(26)式をとき $t=T_2$ で C_s の電荷が 0 になったと き SR₂ が回復するものとして T_2 を求めると

となる。

ここで $\tau_s \ vert (24)$ における $\tau_2 \ vert$ 同等のものと考えれば(27)は(24) において第2項を省略したものと一致する。すでに述べたように (24)を導出するとき残留キャリヤが(23)式になったとき、逆バイア スになるとしているため第2項はでてきたが、これは第18図から 省略してもよいから、実用的には第19図のような等価回路で残留 キャリヤの消滅過程を考え、電荷 Q=0のとき、後の素子が回復す ると考えてよいことになる。

第 18 図は実測の $T_1 \ge 1 + \Delta t_0/\tau_2$ の関係を示す。実線は $\tau_2 = 27,35 \mu s$ としたときの(24)式の計算値で、(24)式の関係がよく成り立つ。ま た、図より(24)式の第2項は省略してよいことがわかる。この τ_2 は SR₂の t=0 以後の等価的なライフタイムであり、この中には本章 のはじめに述べた仮定を含んでいるもので、前章における τ とは数



第18図 $T_1 \ge 1 + \Delta t_0 / \tau_2$ の関係



8. 結 言

シリコン整流器は残留蓄積キャリヤのため,順電流通電中に接合 部には順電流で定まるキャリヤがあり,電流が0になった後逆電圧 を加えると,このキャリヤの一部が逆電流として外部回路に流れ る逆電流および内部の再結合により,このキャリヤがほとんど消滅 するまでこの状態が続き,シリコン整流器本来の性質である逆方向 阻止能力がない。

この現象が電力用シリコン整流回路の転流時の電流,電圧の変化 過程に及ぼす影響に関し,特に,回復までに逆電流として接合から 流出する recovered charge *Q*,に着目し,研究した結果から,

- (1) 整流素子を2個以上直列接続した場合の逆電圧の分担を均 等にするために接続するコンデンサCと Qr と分担逆電圧 の関係を示す基本式(22)を確立した。
- (2) 電流,電流変化率,温度などを変えて Q,を測定した。そして,接合内部の電荷量の変化について解析し,実験結果と比較検討したところ定性的に両者が一致する。

ことなどについて述べた。

33 —

終わりにのぞみ,本研究を行なうに当たり種々のご教示,ご激励を 賜った東京大学山田教授,日立製作所日立工場毛利部長,日立製作 所日立研究所田口所長,木村,中戸川両部長に深甚の謝意を表する とともに,直接研究に協力された天野,小斯波両研究員に感謝する。

参考文献



第19図 第15図(a)においてSR₁,回復後SR₂が回復 する過程でSR₂内部の再結合を考えたときの等価回路

R. N. Hall: Proc. I. R. E., 40, 1512 (1952)
 R. H. Kingston: Proc. I. R. E., 42, 829 (1954)
 H. J. Kuno: I. E. E. E., Trans ED-11, 8 (1964)
 Somos: Comm. and Electronics, No. 54, 162 (1961)
 天野,小斯波: 電気学会誌 (印刷中)