

氏 名	たか 高	ぎ 樹	けい 慶	じ 次
授 与 学 位	工 学 博 士			
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 3 9 年 3 月 2 5 日			
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項			
研 究 科 , 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 気 及 通 信 工 学 専 攻			
学 位 論 文 題 目	パルス動作におけるダイオードおよび トランジスタの破壊に関する研究			
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授	真	野	国 夫
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授	真	野	国 夫
	東 北 大 学 教 授	和	田	正 信
	東 北 大 学 教 授	高	橋	正
	東 北 大 学 教 授	西	沢	潤 一

論 文 内 容 要 旨

研 究 目 的

本研究の目的は、現在広く用いられているパルス動作におけるダイオードおよびトランジスタの破壊について、これを使用する立場より、その機構を究明し、その使用限界を見出し、また、その破壊に対する改良を試みて工学的に貢献しようとするものである。なお、実際に、これら素子を使用するにあつては、劣化ということが問題となるが、これも破壊の一部と考え、その一部の研究結果についても述べることにする。

第 1 編 従来の研究の概要と本研究の意義

第 1 章 従来の研究の概要

近年、半導体素子の開発はめざましく、高周波用あるいは、大電力用へと急激な発展をとげている。しかし、その破壊は、使用中非常にひんぱんに起こつていて、特に、パルス動作においては重大な問題となつているにもかかわらず、この方面の研究は、それに関係のあるものとして、Matz 氏¹⁾や岡氏など²⁾による熱的ターンオーバー現象とThornton氏ら³⁾が発見し、Lin 氏ら⁴⁾の表現による二次降伏特性くらいで、この破壊の問題を直接にとりあげた研究はないといつてよい現状である。

第 2 章 本研究の意義

そこで、本研究では、半導体素子として、基本的にダイオードおよびトランジスタを取りあげて、広く利用されているパルス動作での破壊につき究明したものである。そうして、その意義は、単にダイオードおよびトランジスタの破壊機構が判明したのみならず、パルス動作での最大定格を推定する基礎資料が得られたことであり、また、他の素子もダイオードおよびトランジスタの組合せと考えられるので、この結果は、他の素子の破壊機構を推定し、最大定格決定の基礎となりうるどころにある。

第 2 編 ダイオードの破壊

第 3 章 結 論

まず最初に、ダイオードの破壊の問題をとりあげるが、これは、トランジスタなど他の半導体素子の構成の基礎となつているにもかかわらず、その破壊は、それに関係のある熱的ターンオーバー現象が判明しているくらいで、深くは究明されていない。そこで、本編では、まず、接合温度上昇を求め、次にダイオードの逆方向および順方向破壊について述べ、最後に、蓄積キャリア回復によるダイオードの破壊について述べる。

第4章 従来の研究

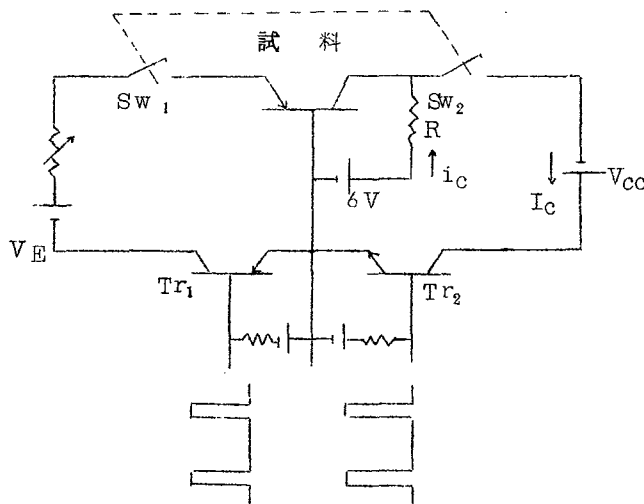
従来、逆方向破壊については、Matz 氏¹⁾、岡氏²⁾などにより、熱的ターンオーバーが起こること、また順方向では、山口氏⁵⁾や、Gentry 氏⁶⁾などの実験が行われているが、まだ定説はない現状である。また、最後にとりあげる小数キャリア回復による破壊については、古くから、たとえば Somos 氏⁷⁾により指摘されているが、あまり細かい解析はなされていない。

第5章 接合の過渡温度上昇

半導体素子の破壊は、熱による影響が最も大きいと考えられる。したがって、まず接合の温度上昇について検討する。

従来、接合温度上昇の決定には、Diebold 氏⁸⁾による計算、また Strickland 氏⁹⁾による等価回路による計算法などが提案され、また測定では、成長形接合で冷却の特性から求めたもの¹⁰⁾などがあるが、熱が輻射によっても伝達される場合は正しくないので、著者は、接合温度上昇を実測する新しい方法を提案した。

実験は、温度測定のパラメータとして、直線性が良く、また実験の再現性の良いダイオードの順方向の電圧降下を用いた。その測定回路を第5.1図に示す。同図において、スイッチ Sw_1 、



第5.1図

Sw_2 を閉じると、電力が接合に印加され、温度が上昇するが、トランジスタ Tr_1 , Tr_2 はスイッチ用トランジスタであり、このオフ期間に、コレクタ接合の順方向電圧降下をシンクロスコープで測定し(写真5.1参照)、これと順方向電圧降下の温度依存性により、温度上昇を求め、さらに、これを熱抵抗 $\theta [^{\circ}C/w]$ に換算すると、たとえば、第5.2図のごとくなる。その結果、一般に合金形トラ

ンジスタでは、時間が短い部分で θ が従来発表されているより急峻に上昇することがわかり、これは、リード線が細いので、熱が、コレクタおよびエミッタのドットで断熱されていると仮定した方が正しいと考えられ、この考により計算すると¹¹⁾、第5.2図中の破線のごとくなる。すなわち、理論的にこのように急峻に上昇することがわかると共に、 θ を下げるためには、リード線を太くするだけでもかなりの効果のあることがわかった。

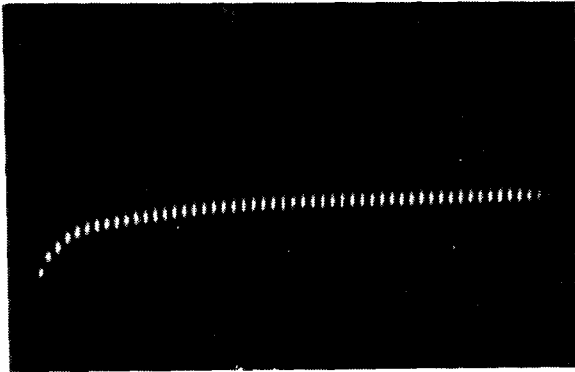
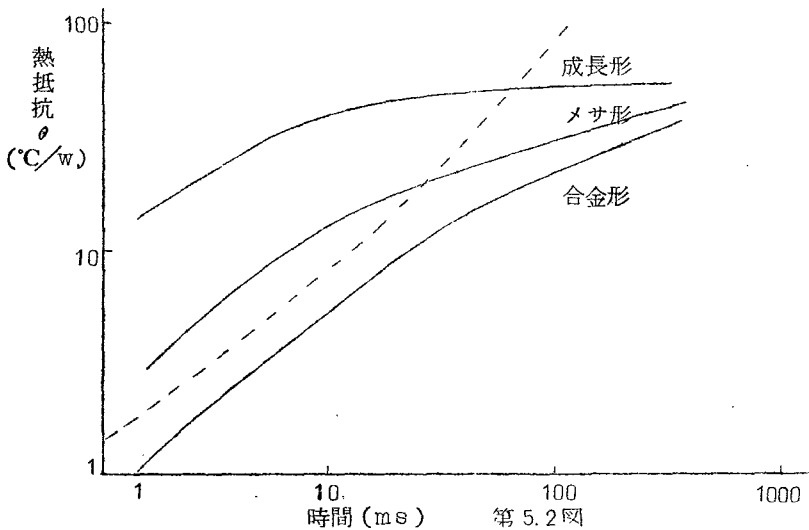


写真 5.1 よこ軸：5 ms/div
たて軸：50 mV/div
印加電力：1.1 W



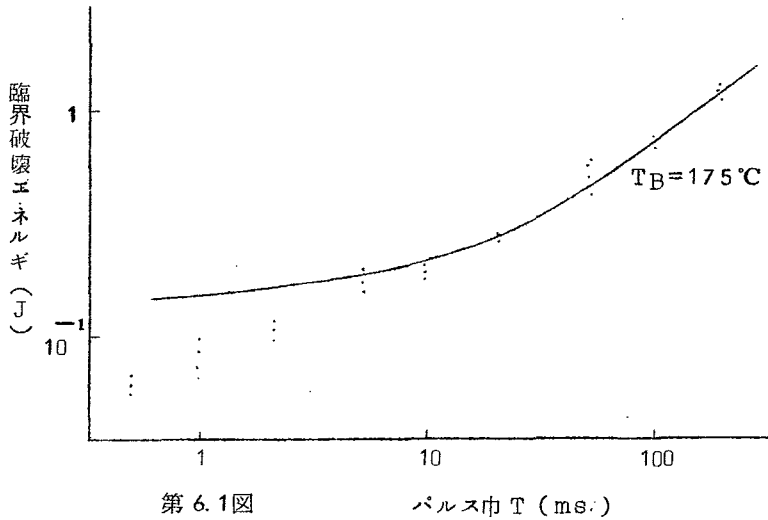
7割程度に低下した場合を劣化と称することにした。そこで、破壊しなかつた場合のエネルギーと、さらに電力を増加して破壊した場合のエネルギーとの中間値、および劣化した場合のエネルギーを臨界破壊エネルギーと称することにして、パルス巾を変えて、この臨界破壊エネルギーを求めた。その結果、破壊は、ターンオーバーが起こつたのちに起こることがわかり、第 6.1 図は、その結果の 1 例である。なお、図中の実線は、前章で求めた接合温度上昇曲線より、破壊が、接合温度が一定 (175°C) になると起こるとした場合のエネルギーを示すものであり、時間が長い部分で、実験結果によく一致している。また、5μS のパルスに対しては、400V で 10A 程度の電流が流れたが、破壊しないことがわかり、この電圧、電流範囲内での電圧、電流、電力などによる破壊

このように、著者の提案による温度上昇の測定法により、実験し、また検討した結果、この方法は比較的測定が容易で、その測定誤差も小で、十分満足な結果を得て、特に Si 素子にはすすめてよい方法と考えられる。

第 6 章 逆方向破壊

接合の破壊の基礎的考察のため、前章で温度上昇を求めたトランジスタのエミッタあるいはコレクタ接合を用いて、これに単一矩形波電力を

印加し、破壊とそのエネルギーの関係を求めた。実験は、パルス印加毎にトランジスタの電流増巾率 h_{fe} および接合の逆方向特性を測定し、前者の急減あるいは後者の変化があつた場合を破壊と称することにした。また、 h_{fe} が

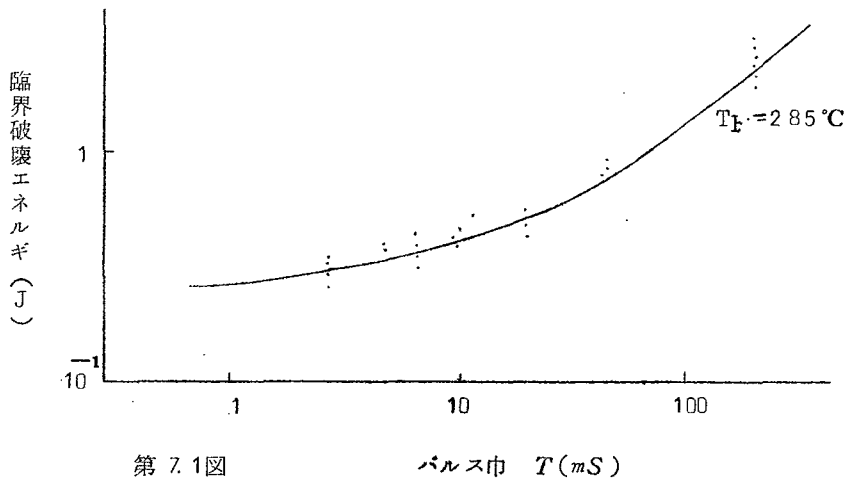


はないことになり、エネルギー破壊が考えられる。また、第 6.1 図の実線の関係より、破壊は、接合の温度上昇が一定となると起こるとする仮定がよくあてはまっています、実用にあたって、接合温度上昇を求めることにより、接合の耐量を十分推定できることがわかった。

なお、このような方法で推定される破壊温度は、Ge で 175°C 、Si で 250°C 程度と、比較的低いことがわかり、このことは、破壊したものをエッチングすると特性の回復するものが多いことなどから、破壊は、接合の周辺で、その部分がさらに高温となつて、起こつていていると考えることができるが、この点に関しては、さらに今後詳細に究明されなくてはならない問題である。

第 7 章 順方向破壊

前章と同様の実験を、順方向について行なつて第 7.1 図の結果を得た。これは、この場合も破壊の耐量は、

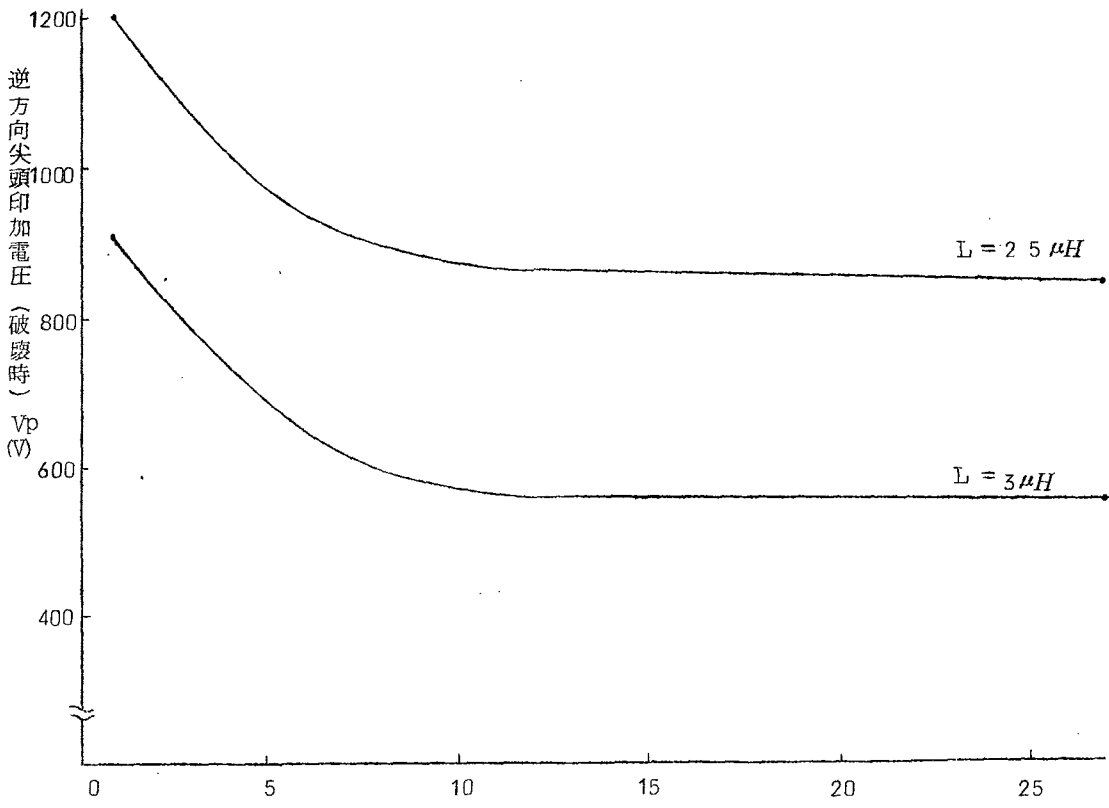


接合の温度上昇で推定することができることを示している。なお、この場合、推定される破壊温度は、逆方向における値よりも大きいですが、これは、順方向では、破壊する場合

の電流が大であるので、リード線など各部の抵抗による損失が大となるためと考えられる。

第8章 小数キャリア回復によるダイオードの破壊

ダイオードの破壊としては、以上の順方向および逆方向破壊のほか、小数キャリアの回復の影響による破壊が、動作中に生ずるのではないかという問題がある。そこで、実験として、順方向電流を流しておき、急に逆方向電圧を印加し、その破壊に与える影響を、電圧、電流波形を観測しながら行なつた。その結果、破壊には、高周波の振動がともない、破壊を起こす場合の順方向電流と、逆方向印加尖頭電圧の関係は、第8.1図のごとくなる。なお、 L は回路に直列のイン



順方向電流 (破壊時) I_f (A) 第8.1図

ダクタンスの値であり、 L が小となると、小数キャリア回復時の尖頭電流は大となり、結局、この図より、蓄積キャリア回復時の電流が大きくなると、破壊電圧が低下することがわかる。このことは、蓄積キャリアにより空乏層中の電界がみだされ、なだれを生じやすくなるためと考えられる。また、耐圧の低い素子においては、破壊が起こり難いことが、実験的にわかつたが、これは、耐圧の高いものに比して、欠陥などによる局部破壊が起こり難いことも考えられるが、その他に、不純物密度が大であるので、蓄積キャリアの影響を受け難いためと考えられる。そこで、このような破壊を防ぐには、コンデンサをダイオードに並列に挿入して発生電圧を防ぐのが有効な

一方法であり、また必要以上に高い耐圧の素子を使用するとかえつて、破壊をまねきやすくなるとも考えられる。

第9章 結 論

本編においては、接合の温度上昇測定法の新しい提案と、その結果を用いて、ダイオードの順および逆方向破壊につき検討の結果、破壊は、熱による効果が主であることがわかり、実用にあつて破壊耐量を逆に推定できる。なお、破壊は局部において起こっていることは十分推定され、この点はさらに今後究明されなくてはならない問題である。

また、ダイオードが、実際に動作している場合の破壊について、少数キャリア回復時の破壊が実際に容易に起こりうるということがわかり、これは、少数キャリアによりなだれが発生し易くなるためと考えられ、これを防ぐ方法も判明した。

第3編 トランジスタの破壊

第10章 緒 論

次に、前編でのダイオードの破壊をもとにして、トランジスタの破壊について研究し、まず、抵抗負荷の場合の電流密度の解析をもとにして、破壊機構を検討した。ついで、誘導性負荷の場合は、コレクタの出力特性がターンオーバを起こすということが重大であり、この点を少数キャリア蓄積効果をも考慮して十分検討し、またその後起こる二次降伏特性についても検討した。最後に、回路上の問題についても考究した。以下、これらについて記述することとする。

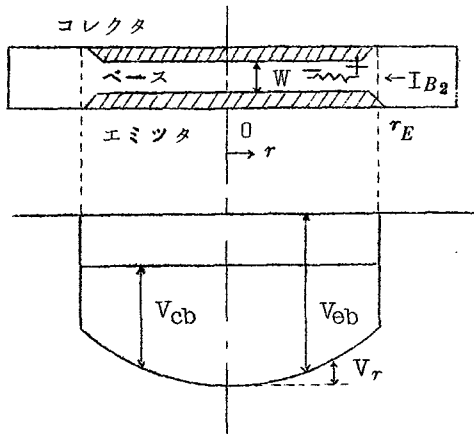
第11章 従来の研究

従来は、Kidd氏ら¹²⁾によるコレクタ出力特性に負性抵抗の生じることの解析、さらに接合への印加エネルギーの計算とそれによる接合温度上昇より破壊の可能性を論じたもの¹³⁾などがあるが、破壊に対する定説はない現状である。さらに、二次降伏についても、最近1.2の発表もあるが、¹⁴⁾¹⁵⁾まだ定説のない状態である。

第12章 抵抗負荷スイッチ回路における破壊

まず、小電力トランジスタで、コレクタに抵抗負荷を有するスイッチ回路での実験の結果、このような状態では、トランジスタの消費電力は大とならず、破壊し難いことがわかつた。そこで、その極限として、コレクタ抵抗を零とした場合の単一矩形波電力印加に対する破壊エネルギーを求めると、第6章、第7章でのべたごとく、破壊は、接合の温度が一定となると起こるといふ仮定がほぼ満足されていることがわかり、このことより、トランジスタにおいても破壊の究極は、熱であることがわかつた。しかし、電力用トランジスタのごとく、接合面積が大となると、スイッチオフ時にベースの逆電流 I_{B2} により、蓄積されたキャリアがトランジスタの中心に集中することが考えられる。そこで、まずその場合の電流密度を計算した。

すなわち、円盤形トランジスタにおいて、第1.2.1図中のように、コレクタ・ベース間電圧、エミッタ・ベース間電圧をそれぞれ $V_{cb}(r)$ 、 $V_{eb}(r)$ とし、 V_r をトランジスタの中心との



第12.1図

電位差とし、キャリア蓄積時間中、コレクタ電流を一定(= I_{CS})とすると、その電流密度 $j_{CS}(r)$ は

$$j_{CS}(r) = \frac{I_{CS}}{2\pi} \frac{\exp\left(\frac{-q}{kT} V_r\right)}{\int_0^{r_E} \exp\left(\frac{-q}{kT} V_r\right) r \cdot dr} \quad (1.2.1)$$

そこで、 V_r を、この期間中の I_{B2} が分布して流れることによる電位で考え、¹⁶⁾ 零次のベッセル関数を2次の項までで近似し、 ψ を(1.2.3)式のごとく定義す

ると(1.2.2)式のごとくなる。

$$V_r = \frac{kT}{q} \psi \left(\frac{r}{r_E}\right)^2 \quad (1.2.2)$$

$$\psi = \frac{q}{kT} \cdot \frac{\rho}{4W} \frac{I_{B2}}{2\pi \frac{1}{j\sqrt{\frac{\rho y}{W}} r_E J_1(j\sqrt{\frac{\rho y}{W}} r_E)}} r^2 E \quad (1.2.3)$$

ここに、 ρ はベースの比抵抗、 W はベース巾、 y は入力アドミタンスである。そこで、(1.2.2)式を(1.2.1)式に代入して $j_{CS}(r)$ を求め、比電流密度 X として、(1.2.4)式を定義すると、その結果は、第1.2.2図のごとくなる。

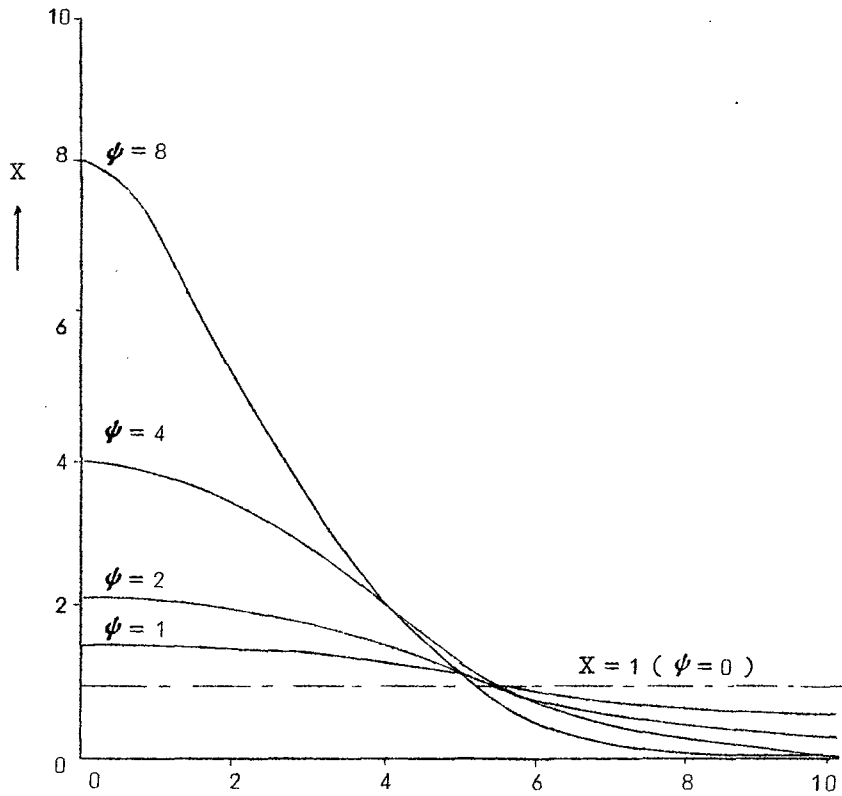
$$X = \frac{j_{CS}(r)}{I_{CS} / \pi r_E^2} \quad (1.2.4)$$

この結果は、キャリア蓄積時間中のものであるが、電流下降時間中にもトランジスタの中心に電流が集中し、この部分において、トランジスタが破壊する可能性があることが理論的に推定される。

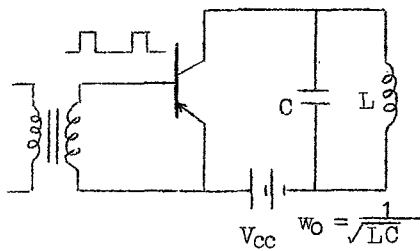
そこで、この点を実験的に検討するため、 I_{B2} が大の場合と、零の場合について実験を行なうと、 I_{B2} があると破壊を起こしやすく、破壊位置も中心が多いことより、このような破壊機構が実際に存在し、抵抗負荷スイッチ回路での最大定格となると考えられる。また、このような破壊を防ぐには、 I_{B2} を流さないこと、およびリングエミッタなどベース抵抗の小さいトランジスタがよいことになることがわかった。

第13章 誘導性負荷スイッチ回路における破壊の基礎実験

誘導性負荷スイッチ回路における破壊に関しては、種々の条件が考えられるが、例として、第1.3.1図のような主として最も問題の多いテレビの水平偏向回路を研究することにした。この結

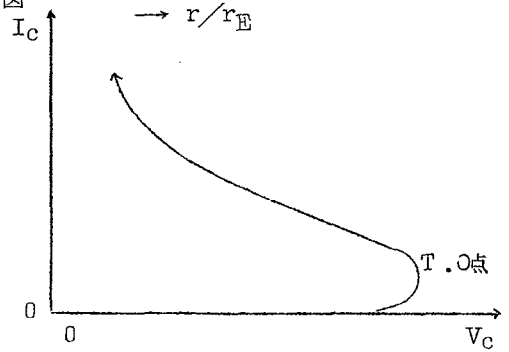


第 1 2.2 図



第 1 3.1 図

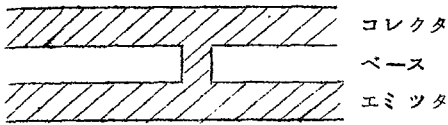
インジューム



第 1 3.2 図

果より、一般的考察をすることができるのは勿論である。まず、基礎的にどのような状態で実際に破壊が起こるかを検討するため、種々の回路状態で電源電圧を上昇して破壊を起こさせると、その場合のコレクタの出力特性は、第 1 3.2 図のごとくターンオーバを起し、低電圧領域で破壊が起こることがわかった。破壊を起こしたものは、これをラツプしてたねんに破壊位置を調べたが、破壊位置は中央が多く、中央でコレクタおよびエミッタの再結晶層が第 1 3.3 図のごと

インジューム



インジューム
第 1 3.3 図

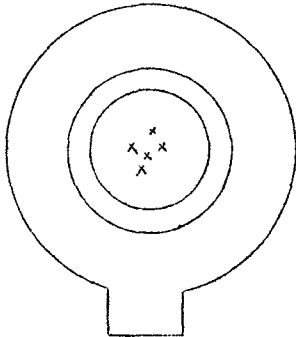
く1ヶ所で短絡していることがわかり、これは、この部分での発熱による溶融を意味すると考えられる。また、破壊後、過大電流をさらに流すと、この破壊位置に I_n が流れ込み、これを HCl で溶解すると、コレクタ・エミッタを貫通している穴が見出され、破壊位置を容易に見出しうること

がわかつたので、以後、このような方法で破壊位置を調べた。

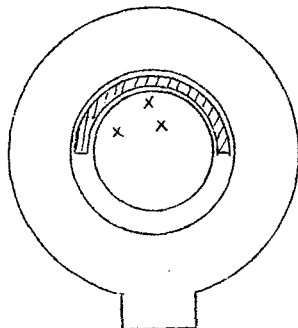
第 1 4 章 単一パルス動作における誘導性負荷回路における破壊

前章の結果は、くり返し動作で行なつたため、発熱の影響により、破壊機構の詳細が不明であつたので、次に単一動作で実験を行なつた。実験回路は、前章の水平偏向回路を単一動作させたもの、あるいはそのスイッチオフ時に等価な回路である。そこで、実験の結果、この場合も、コレクタ出力特性がターンオーバを起こしたのち破壊は起こり、その過程としては、次第に、コレクタの再結晶層が局部的にベース中へ突出してくることが推定された。破壊箇所は、いずれも1ヶ所であり、その分布については、例として示すと、第 1 4.1 図のごとく中

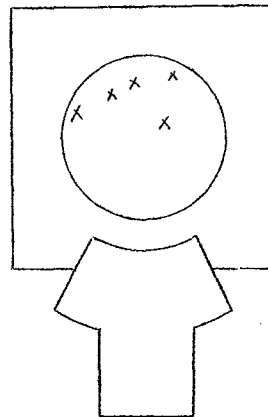
央附近が多く、また、トランジスタのベース抵抗をベースリードと反対側で最大となるような非対称のものを製作して、同様の実験を行なうと、たとえば、第 1 4.2 図、第 1 4.3 図のごとく、破壊位置は、ベース抵抗の高い部分に分布した。なお、第 1 4.2 図の構造は、斜線の部分が強



第 1 4.1 図



第 1 4.2 図

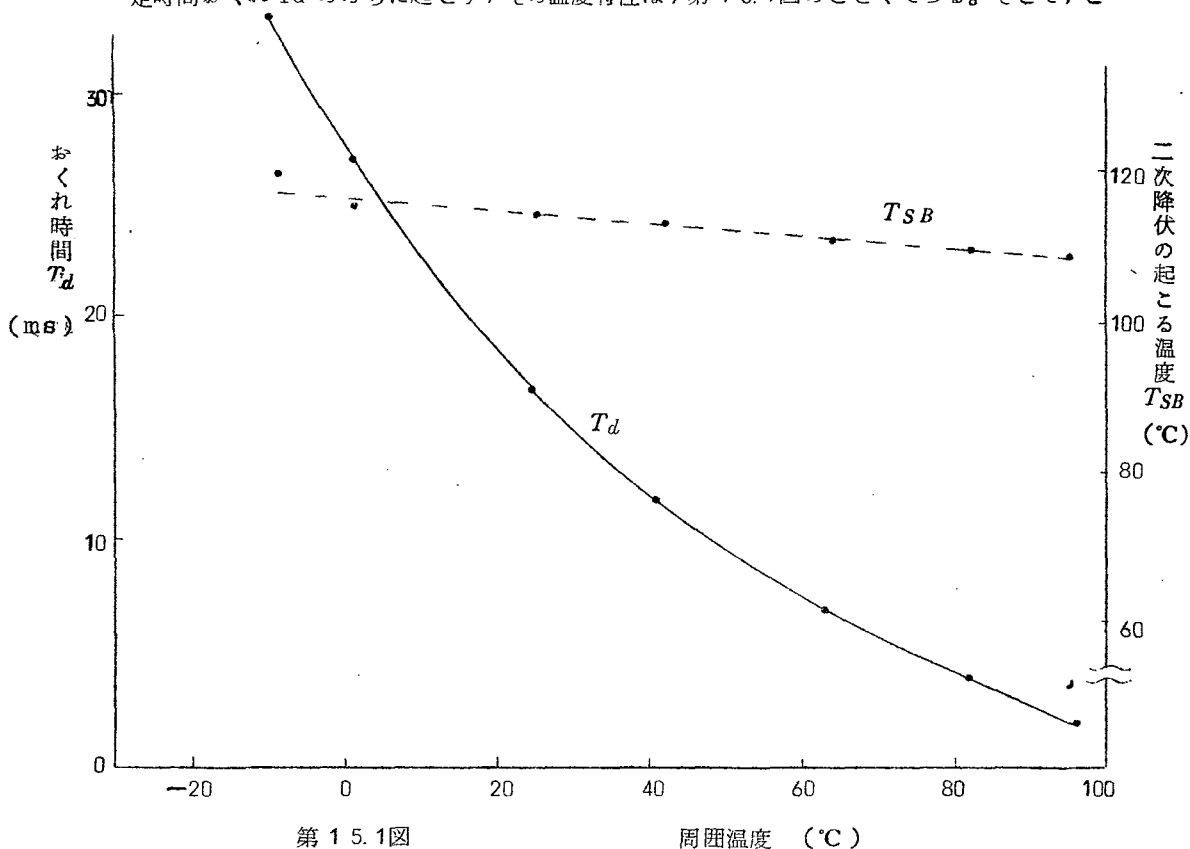


第 1 4.3 図

くエッチングされ、ウエファの厚さがうすくなっている。したがって、このような破壊機構としては、スイッチオフ時に、コレクタに過大電圧が印加され、それによるなだれ電流と、ベース抵抗のため、ベース内に横方向の電位が生じ、普通のトランジスタでは、中心でエミッタからの注入が起こりやすくなり、この部分が過大電流により破壊するものと考えられる。したがって、また、非対称トランジスタでは、ベース抵抗の最高点附近で破壊が起こることになる。

第15章 二次降伏特性

以上のごとく、誘導性負荷スイッチ回路での破壊は、ターンオーバー特性が重要であり、その後は、さらに低電圧領域で破壊が起こる。この領域の観測は、従来、ベースが逆バイアスで行なわれているが、これは、ベース開放にも起こり、ベース開放条件では、電流密度が一定と考えられるので、その解明に有効と考え、ベース開放で実験を行なつた。その結果、このような領域は一定時間おくれ T_d ののちに起こり、その温度特性は、第15.1図のごとくである。そこで、こ



第15.1図

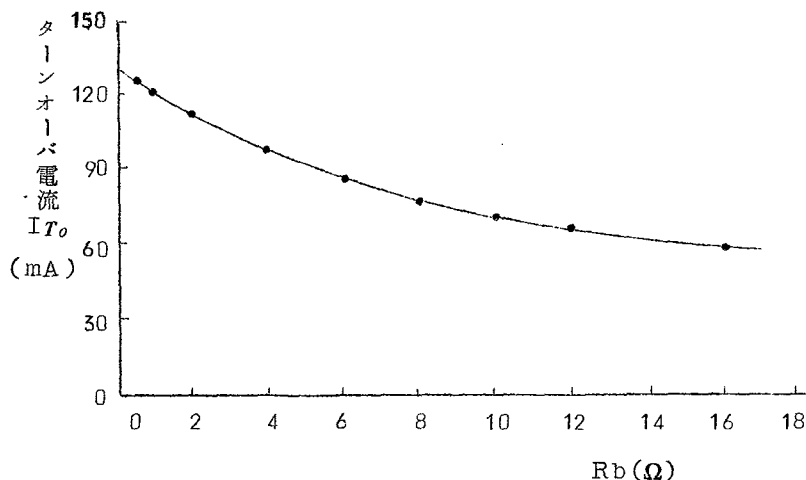
周囲温度 (°C)

の機構として、温度効果を考え、この T_d の間の温度上昇を第5章で求めた熱抵抗より求めて、この領域の起こる温度を計算すると、第15.1図の破線のごとく周囲温度に無関係に一定となり、したがって、この領域は温度によることがわかつた。なお、著者の発表と同時期に、Lin 氏ら⁴⁾

は、この領域を二次降伏領域と呼んでいるが、このように二次降伏が温度によることがわかると、Lin 氏らの示した破壊機構は、まちがっていることになり、また、二次降伏は、回路条件にもよることになるので、この点特に注意する必要がある。そうして、著者は、二次降伏よりもそのきつかけとなるターンオーバー特性の方が重要と考える。そこで、この点をさらに検討した。

第16章 ターンオーバー特性

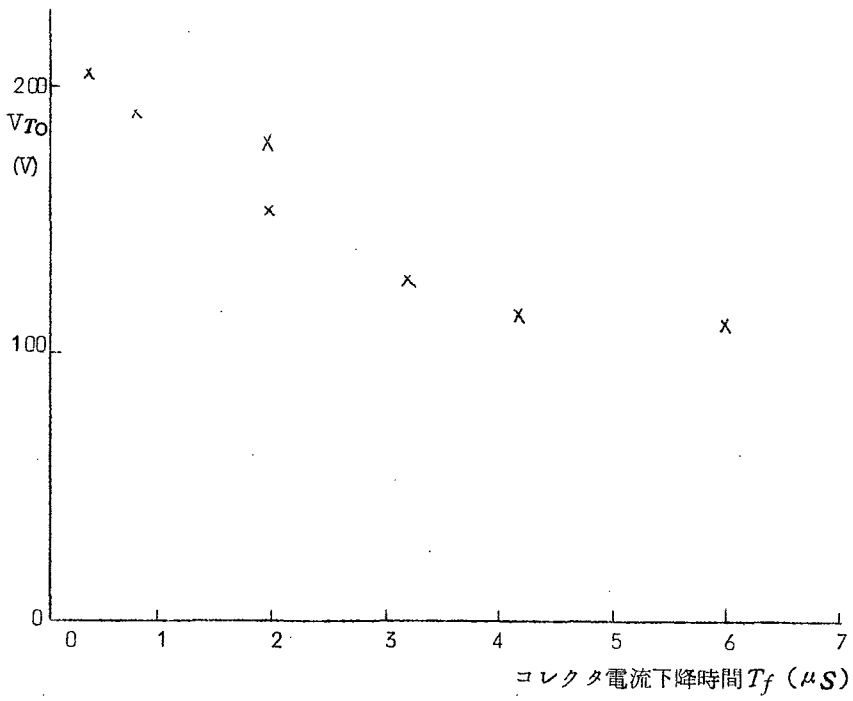
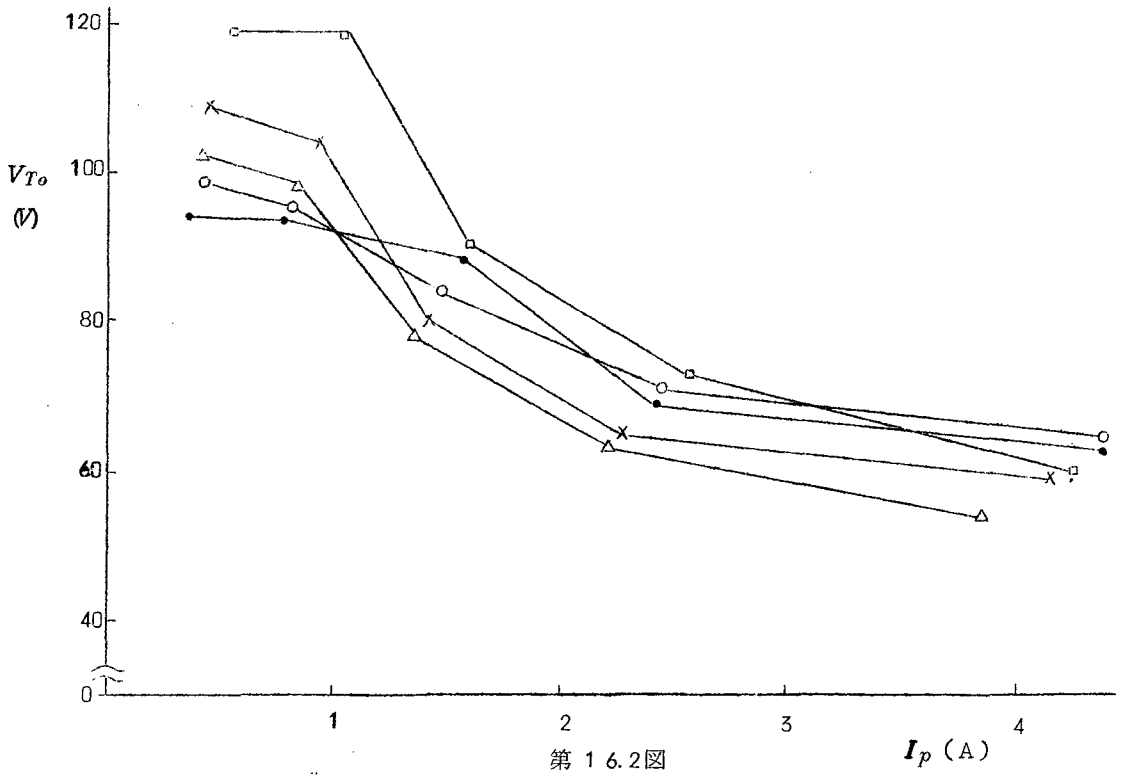
まず、静的特性の一例として、ターンオーバー電流 I_{TO} と、ベース回路の外部抵抗 R_b との関係を一 50 c/s 半波整流波で測定して、第 16.1 図の関係を得た。これは、ターンオーバー機



第16.1図

構が、なだれ電流と、ベース抵抗により定まるとした第 14 章の結論と一致した。次に、動的特性につき、第 13 章でとりあつかった回路を単一動作させて求めると、その傾向は、静的特性と一致し、また、コレクタ耐圧と、ターンオーバー電圧 V_{TO} の関係も、スイッチする電流が小の場合は、一応直線の関係が存在して、コレクタ耐圧が高いほど V_{TO} も高くなるが、スイッチする尖頭電流 I_p が大となると、 V_{TO} は第 16.2 図のごとく低下し、また、コレクタ電流下降時間 T_f との関係は、第 16.3 図のごとく、 T_f の増大により、 V_{TO} は低下することがわかった。そこで、この原因として、蓄積キャリア効果を考え、その際の V_{TO} の低下を近似的に求めた。

そこで、電流下降時間中のコレクタの一次電流を I_{f1} 、二次電流を I_{f2} 、またベース電流を I_b とすると、(16.1)、(16.2)式が成立し、また、 I_b によるエミッタ電位の変化が、エミッタからの注入電流を増加し、下降電流 I_f に重畳して I_{f1} が流れるとすると、(16.3)式が成立する。



$$I_{f2} = M I_{f1} \quad (16.1)$$

$$I_b = (M-1) I_{f1} \quad (16.2)$$

$$I_{f2} = M I_f \frac{\alpha}{(M-1) I_{f2} / M} \left[\exp\left\{ \frac{(M-1) I_{f2} / M}{\alpha} \right\} - 1 \right] \quad (16.3)$$

$$\text{ここに, } \alpha = \frac{4\pi W}{\rho} \cdot \frac{k T}{q} \quad (16.4)$$

$$M = \frac{1}{1 - (V_c / V_B)^3} \quad (16.5)$$

V_B : 降伏電圧 ($V_B = \omega_0 L I_p$ とおく)

また

$$I_f = \frac{1}{e} I_p e^{-t/t_0} \quad (16.6)$$

$$V_c = \frac{\omega_0 L I_p}{\sqrt{1 + (\omega_0 t_0)^2}} \sin \omega_0 t \quad (16.7)$$

として¹⁷⁾; ターンオーバー条件として, $\partial I_{f2} / \partial t > 0$ をとり, その時の電圧をターンオーバー電圧 V_{To} として求めると, t_0 と T_f の対応などに問題はあるが, 一応, 第16.2図, 第16.3図と同様の傾向を示し, したがって, このようなターンオーバー特性は蓄積キャリアにも左右されることがわかった。したがって, このような回路でのトランジスタとしては, 耐圧の高いのはもちろんであるが, その他に, スイッチ特性として, 電流下降時間の小のものが良いことがわかり, また, ベース抵抗の小さいリングエミッタなどの構造が良いことになる。

第17章 水平偏向回路に使用されるトランジスタの破壊に影響を与える2.3の因子および改良案

以上により得られた誘導性負荷スイッチ回路での破壊機構をもとに, 現在トランジスタの破壊で最も問題の多い水平偏向回路での破壊について考察すると, その最も注意すべき点は, 位相のずれと, 電源スイッチ閉時の問題であることがわかった。

位相のずれは, ホール蓄積時間などによつて, スイッチオフのパルスの位相がおくれて, 次の周期に影響を与える場合を意味し, その際, 過大の損失が生じる。これを防ぐには, あらかじめ, スイッチオフのパルス巾をせまくする必要がある。次に, 電源スイッチ閉時には, 位相関係によつては, 過大電圧力が発生し, ターンオーバーが起こりやすくなる。これを

防ぐには、ベースの駆動をあまり大きくしない方が良く、これは、同期のはずれにも有効な防止方法である。

第18章 結 論

以上、本編では、トランジスタの破壊につき、抵抗負荷と誘導性負荷の場合について論じた。その結果、抵抗負荷の場合は、スイッチオフ時の電流集中が問題であり、誘導性負荷の場合は、ターンオーバー電圧が重要で、これは、このような回路条件での最大許容電圧と考えることができる。また、この電圧については、解析の結果、蓄積キャリアにも影響されることがわかり、種々トランジスタへの要求事項も見出すことができ、また、所謂二次降伏は、熱によることを示し、従来不明確な点を明瞭にすることができた。そうして、回路的な問題にも言及し、その改良方法に関しても具体的方法を示した。

第4編 パルス動作におけるトランジスタの劣化

第19章 緒 論

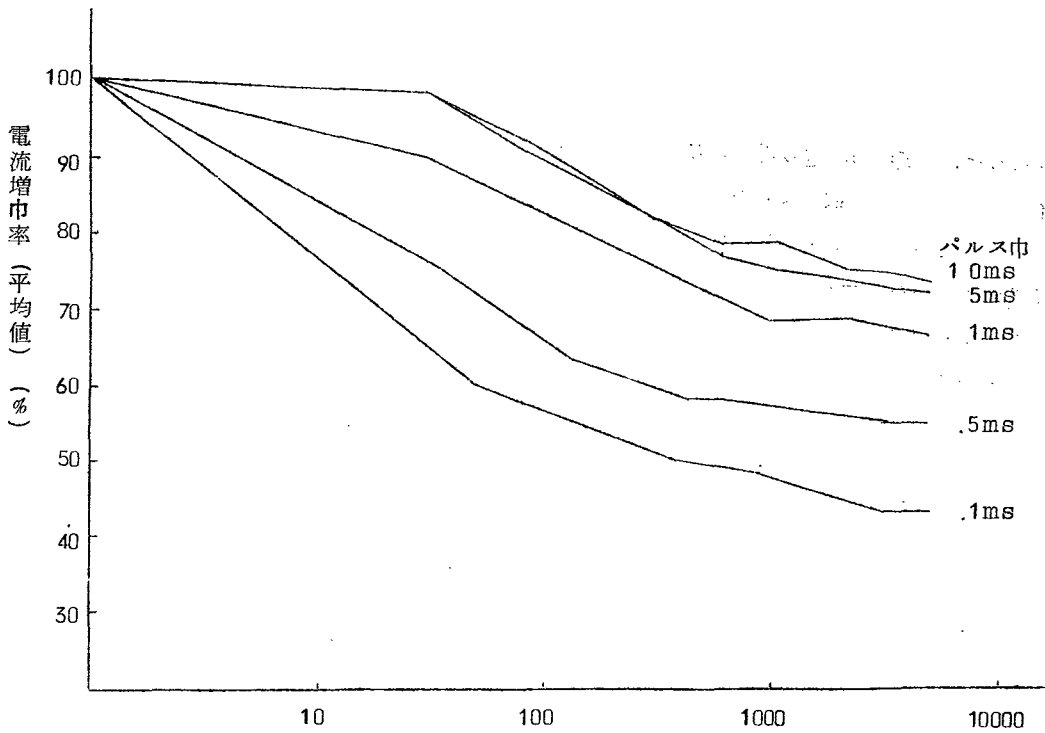
トランジスタをパルス動作で使用する際、非常に重要なことは、トランジスタの劣化特性であり、これも、破壊の一種と考えて究明した。しかし、その結果より、さらに寿命の推定などについては、多くの試料について、実験を行なわなくてはならず、その一般化は、将来問題であり、ここでは、基本的な点について研究を行なった結果について述べる。

第20章 従来の研究

従来、トランジスタの劣化について、直流動作あるいは放置状態での劣化については種々の資料が発表されていて、接合温度により劣化が促進されるとされている¹⁸⁾。しかし、パルス動作での劣化に関しては、1.2の発表はあるが¹⁹⁾、その本質については、まだ究明されていない。

第21章 尖頭電力と劣化との関係

本章では、平均の消費電力を一定（定格の7割）として、パルス巾を変え、尖頭電力を変えて、劣化の比較を行なった。その結果、電力を断続すること自体は劣化を促進しないことがわかり、パルス巾が小となると、劣化は、第2.1.1図のごとく促進されることがわかった。しかし、この実験では、コレクタ電圧が一定であるので、この劣化が、尖頭電力によるか、あるいは電流によるかが不明であるので、次にコレクタ電圧を12Vと4Vの2種類用いて実験すると、4Vの方が劣化がはげしいことがわかった。これより、尖頭電流による劣化がありうるとも考えられるが、電流のみの劣化は、次章の結果より起こらないので、この劣化は、電流が大となつたため、エミッタ有効面積が低下し²⁰⁾、局部加熱によつてると考



時間 (hours) 第 2.1.1 図

えられ、第 5 章で求めた熱抵抗により温度上昇を推定すると、一応数値的にも、この考が妥当であることがわかった。

第 2.2 章 スイッチング動作における劣化

動作条件としては、前章のコレクタ電圧 4V の場合の尖頭電流と等しくして、スイッチング動作させ、各種パルス巾において実験の結果、劣化は、非常に少ないことがわかった。また、フリック フロップなど実動の回路でも劣化を調べたが、この場合も劣化は少なく、結局、スイッチング動作特有の劣化もないと考えてよいことがわかった。

第 2.3 章 結 論

以上の結果より、パルス動作でのトランジスタの劣化は、尖頭電力による過渡的溫度上昇によっても一応実験結果を説明できることがわかった。また、このような関係より、パルス動作での寿命の推定法を提案した。

第 5 編 総合的結論

第 2.4 章 総合的結論

以上のごとく、本論文では、今まで全く究明されていなかったダイオードおよびトランジスタの破壊に多くの解明を与えることができた。すなわち、半導体素子の破壊の究極は熱と考えられ、

したがつて、熱抵抗の測定の新しい方法を提案し、素子の耐量は推定できることを示した。また、ダイオードの動作中の破壊に、小教キャリアの効果が十分考えられ、その防止法も示した。トランジスタの破壊としては、抵抗負荷では、スイッチオフ時が問題であり、誘導性負荷の場合は、スイッチオフ時のターンオーバー電圧が問題であり、また、その後起こる二次降伏は熱によることがわかり、種々トランジスタへの要求、改良点も判明した。最後に、トランジスタの劣化に関しては、接合の過渡温度上昇によつても一応説明できることがわかつた。

第25章 今後の問題

以上のごとき結論より、今後さらに究明されるべき問題は、破壊の物理学的、金属学的機構の究明と、本研究の結果をもとにして、パルス動作での半導体素子の最大定格の設立、寿命の問題の一般化などであり、なお将来多くの努力を必要とする。

謝 辞

終りに、本研究にあたり、終始御指導を賜つた真野教授に対し、深謝するとともに、種々御指導、御援助を賜つた和田教授、喜安教授、高橋教授および西沢教授に深く感謝の意を表する次第である。また、種々御援助を賜つた松本助教、高木助教をはじめ真野研究室の諸氏に感謝するとともに、試料などの御提供を賜つた関係会社の各位に対し深謝する次第である。

文 献

- 1) A.W.Matz:P.I.E.E.104B,P.555(1957)
- 2) 岡久雄,大島征一:昭37電四学連大455
- 3) C.G.Thornton,C.D.Simmons:IRE Trans ED-5,1,P.6(1958)
- 4) H.C.Lin et al:IRE Trans ED-7,3,P.174(1960)
- 5) 山口次郎,浜川圭弘:昭33電四学連大969
- 6) F.E.Gentry:Comm.and El. P.746(1958)
- 7) I.Somos:Comm.and El. 80,54,P.162(1961)
- 8) E.J.Diebold:Comm.and El. 76,P.593(1957)
- 9) P.R.Strickland:IBMJ.3,1,P.35,(1959)
- 10) K.H.Mortenson:Proc,IRE,45.P.504(1957)
- 11) H.S.Carslaw,J.C.Jaeger:"Conduction of Heat in Solids"P.112,
Oxford at the Clarendon press 1960
- 12) M.C.Kidd et al:RCARev.16,1,P.16(1955)
- 13) H.C.Lin,W.F.Jordan:IRE Trans ED-6,1,P.79(1959)
- 14) H.A.Schafft,J.C.French:IRE Trans ED-9,2,P.129(1962)

- 15) 鳴神長昭, 垂井康夫: 昭38電四学連大 1476
- 16) 西沢潤一, 渡辺寧: トランジスタ研究専委資料(昭36-6)
- 17) 藤村安志, 三井信雄: NHK技術研究 12.1, P. 33 (昭35)
- 18) 色摩亮次郎, 青木達雄: 昭35電気通信学会全大 282
- 19) たとえば, 垂井康夫, 鳴神長昭: 昭34電四学連大 960
- 20) N. H. Fletcher: Proc. IRE, 43, P. 551, (1955)

審 査 結 果 要 旨

一般に、ダイオードおよびトランジスタなどを使用する際、破壊は最も注意しなければならないことであるにもかかわらず、従来これに関係ある若干の解析などのほか、直接考察された研究はなく、特に、パルス動作では、破壊が突然起こり、神秘的な不可解な現象(Thorntonらの表現による)といわれ、破壊機構や、その過程など、全く判明されていないといつても過言ではない。

本論文は、ダイオード、およびトランジスタなどを使用する立場から、パルス動作での破壊機構を究明し、それらの改良、使用上の諸条件などについて述べたもので、5編、25章よりなる。

第1編では関係ある従来の研究の概要と本研究の意義について述べている。

第2編では、まずダイオードの破壊について、接合の温度上昇を、著者の提案する新しい測定方法で測定し、ついで逆方向、順方向破壊を観察して検討を加え、また小数キャリア回復によるダイオードの破壊を考究し、破壊に関する機構について解明した結果を述べ、さらに、大電流ダイオードの使用法について新しい提案をしている。

第3編では、トランジスタの破壊について、抵抗性、誘導性負荷の場合の現象、機構を解明し、いわゆる、二次降伏特性については、著者によりLinらの発表と同時期に、より詳細に全く独自に発表されている。それとともに、著者は、二次降伏特性により、ターンオーバー電圧条件こそ、より重要であることを多くの考察結果より提案している。これは著者の新知見である。

なお、これらの結果の利用の一例として、トランジスタテレビ受像機の水平偏向回路に使用されるトランジスタの破壊に影響を与える因子の検討、改良案について述べている。

第4編では、パルス動作における劣化に関する数多くの考察を行ない、その結果、スイッチング動作だけでは特に劣化は促進されないが、一定平均電力動作でも、パルス巾が小となると劣化は促進され、それは、接合温度の過渡上昇のためであると考えても、実験結果をよく説明できると述べている。これは著者の新提案で、今後大いに利用価値があると考えられる。

第5編は総合的結論である。

これを要するに、本論文は、種々理論的、実験的研究を行ない、単に、ダイオードおよびトランジスタの破壊機構を解明したのみならず、ダイオードあるいはトランジスタ以外のものについても、その破壊機構の推定を可能とし、パルス動作での最大定格を決定すべき基礎資料を得るなど、この方面の工学と技術に貢献するところが多い。

よつて、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。