

## BASIC CHARACTERISTICS OF THE AVALANCHE TRANSISTOR

Kiyoshi Takami

Research Reactor Institute, Kyoto University  
Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-0494

### Abstract

The avalanche transistor is a useful device for a short-pulse generator of the thermionic electron-gun. However, some properties of the transistor have not been clear experimentally until now. In this report the following properties are presented: the thermal characteristics of the primary breakdown voltage, variations of the output pulse waveform according to the power supply voltage, and the estimated V-I curve of the secondary breakdown voltage.

## アバランシェ・トランジスタの基本的な特性

### 1. はじめに

熱陰極型電子銃駆動用パルス発生器に使われる素子として最小パルス巾が $\sim 30$ nsec以上であれば、POWER MOS FETは有用であるが、より短いパルス巾が必要な場合、現在でもアバランシェ・トランジスタを使ったパルス発生器が期待される。今回、アバランシェ・トランジスタの1次降伏電圧の温度特性や2次降伏電圧などを測定したので報告する。

### 2. アバランシェ・トランジスタ

トランジスタのベース・エミッタ間をショートしてコレクタ・エミッタ間に電圧を加えていくと電流の急激な増加が起こる。これがなだれ(1次)降伏現象で、どのトランジスタにも存在し、トランジスタの破壊につながる領域として通常は避ける。しかし、もっと電流を流すと低インピーダンス領域に入り、電圧が下がる。この領域を2次降伏現象と呼ぶ。長く大電流を流しているとトランジスタの永久的な破壊に至るが、供給電流を短時間で止めると破壊されない。30年以上前、高速、大電流を発生できる方式として米国の数社から専用トランジスタが売り出されていた。しかし、現在、アバランシェ・トランジスタを売出しているのは英国ZETEX 1社である。1段ではT092パッケージと表面実装型(STO-23)の差はないが、多段化して超高速パルスを発生するには表面実装型が必要である。1次降伏電圧を調べる必要は在るが、安価な汎用トランジスタでアバランシェ・トランジスタとして使えるものがある。ZETEX社のFFMT493、FFMT494は、昔、紹介されていた2N5551よりも高速でFFMT415やFFMT417と大差がない。専用トランジスタ100本とほぼ同額で3,000個購入できる。NEC社の2SC3733や2SC3736も振幅は半減するが高速パルスを発生できる。今回、多段化して大振幅を目指す関係でZETEX社のFFMT415、FFMT417、FFMT493、FFMT494の特性を測定した。

### 3. 1次降伏電圧の温度特性の測定

アバランシェ・トランジスタはできるだけ高い電

圧を加えた方が立ち上がり早く大きいパルスを得られる。しかし、降伏電圧の温度特性が明確でないと動作温度範囲を保証できない。この降伏電圧の測定は以下の理由で難しい。降伏電圧に近づくと当初、数 $\mu$ Aの電流が流れてから数秒後に電流が減る現象がある。少し電流が増えても段々電流が減り、電圧をあげることができる。この効果が持続するのであれば、クリーニング効果として意味はあるが、電圧をかけずに放置するとまた、始めから電圧を上げる必要がある。数秒の電流減少効果は、降伏電圧の測定中に過ぎてしまうし、多段化する場合も高压電源を少しゆっくり上げるようにすれば、逃げられる現象なので、今回、降伏電圧の測定からこの現象は無視した。電圧を加えている時間を減らす目的で設定温度になるまで電圧を加えず、1ボルト単位で電圧を上げ、電流値が $0.1 \mu$ Aを超えた電圧を降伏電圧とした。(0.1Vステップでは測定に時間を要する)

直線でフィットして温度係数を求めた。電圧が高いほど温度係数が大きい。他のトランジスタも含めて、電圧が高いほど温度係数は高くなる。各トランジスタの線形近似したフィッティングの結果を表1に示す。温度を下げていくと結露現象による電流増加があったり、長年室内に放置していたトランジスタ

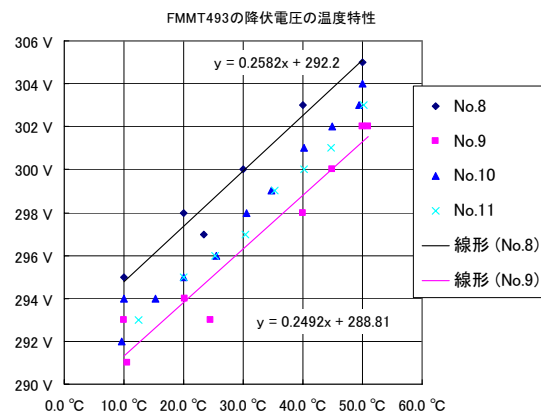


図1. FFMT493の1次降伏電圧の温度特性

表 1. 各トランジスタの1次降伏電圧の温度特性

トランジスタ	30°Cの降伏電圧	線形フィットした結果
FMMT493_No9	296 V	$y = 0.2492x + 288.81$
FMMT493_No8	300 V	$y = 0.2582x + 292.2$
FMMT415_No3	298 V	$y = 0.240x + 290.600$
FMMT415_No4	300 V	$y = 0.241x + 292.783$
FMMT417_No2	327 V	$y = 0.2495x + 319.11$
FMMT417_No1	332 V	$y = 0.2519x + 324.87$
FMMT494_No1	339 V	$y = 0.2824x + 329.98$
FMMT494_No2	341 V	$y = 0.299x + 331.64$

は、パッケージ表面の漏れ電流も大きくnAクラスでの電流測定はいろいろな課題がある。

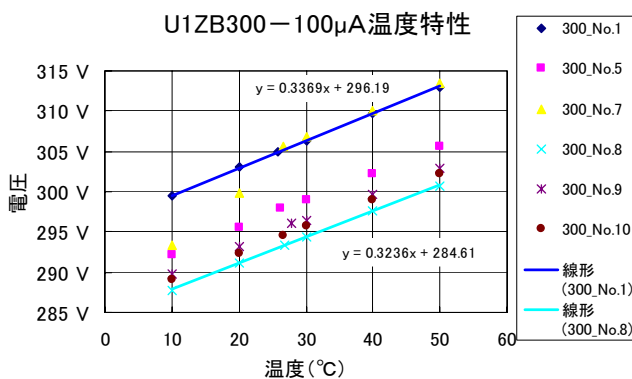


図 2. 300Vツェナーの温度特性

限界に近い電圧で多段接続する場合、並列にツェナーダイオードでバイアスするとトランジスタを壊しにくい、この温度特性も問題になり、測定した。同じ電圧ではツェナーの方が大きい温度係数である。固定電圧では低温側で降伏電圧を超えないか、ツェナーダイオードでのバイアスでは高温で超えないように注意が必要になる。

#### 4. 供給電圧による波形の変化

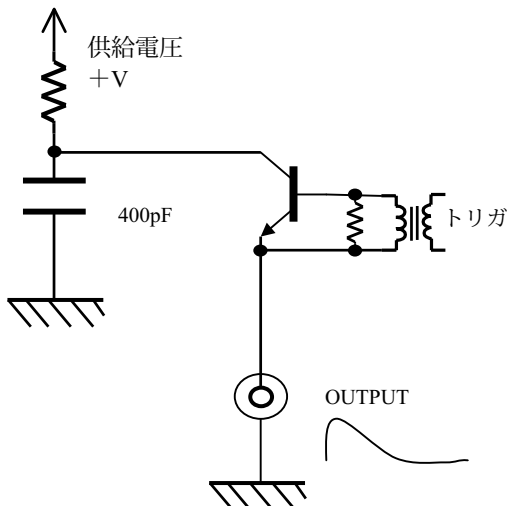


図 3. 基本アバランシェ・パルサ回路

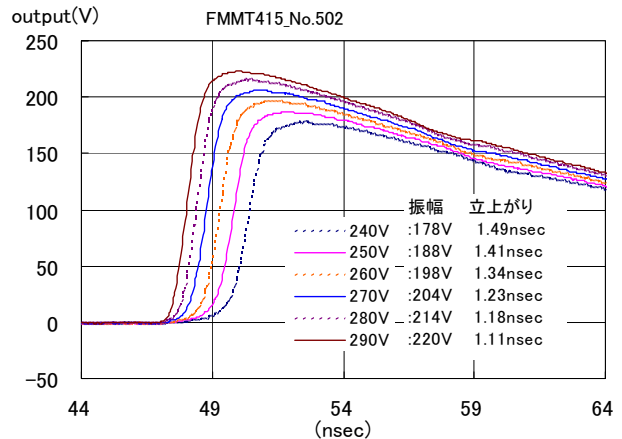


図 4. FMMT415の供給電圧による波形の変化

図 3 に示す回路で供給電圧を変えて得た出力波形を図 4 (FMMT415) に示す。FMMT415の絶対最大定格  $V_{CBO}$  は 260V であるがこれを守ると得られる振幅は小さく立ち上がり時間も遅い。降伏電圧を測定すれば、図のような立ち上がり時間を実現することが可能である。このトランジスタの1次降伏電圧は  $\sim 28^\circ\text{C}$  で 296V である。

逆に絶対最大定格 320V である FMMT417 は測定すると 320V 以下のものがあり、両者の規格の決め方は異なっているので注意が必要である。

同じトランジスタで耐圧も同じでも早い遅いのばらつきは存在するが、一般に降伏電圧の小さいトランジスタほど立ち上がり時間は小さい傾向がある。と同時に電圧変化、電流変化という意味からは耐圧の高いトランジスタの方が大きい傾向がある。

#### 5. 2次降伏電圧－電流特性の予測

長年、アバランシェ・トランジスタに取組んできて2次降伏電圧は1次降伏電圧の  $\sim 1/3$  と予測してきたが、今回、新しい方法で2次降伏の電圧－電流特性の測定を試みた。

図 3 の回路でトランジスタ FMMT493 を使い、供給電圧 335V 一定で、出力のみと並列に  $50\Omega$  ( $100\Omega$  2P) を 1 組から 4 組追加した時の波形の変化を図 5 に示し、その時の電圧や電流値などを表 2 に示す。(後述)

充電用コンデンサも負荷抵抗器も表面実装型を使っている。

アバランシェ・トランジスタの両端の電圧が測定できれば、その差から降伏時の電圧が分かる。エミッタ側の電圧は出力電圧で分かる。この出力電圧が最高になった時が2次降伏した時である。コンデンサ側の電圧測定は難しい。しかし、コンデンサの電圧低下は、出力が最高になるまで流れた電流の積分で電圧低下が計算できる。サンプリング・オシロスコープの結果を使い、エクセルに読んでコンデンサの電圧を計算して2次降伏電圧を求めた。表 3 にこの結果も示す。電荷量とは、最高出力電圧になるまでに流れた電流を積分した電荷量である。コンデ

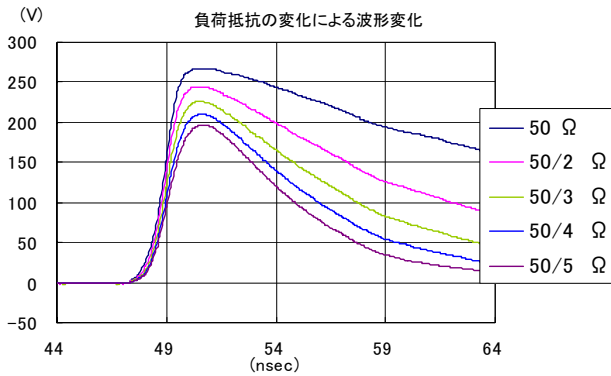


図5. 負荷抵抗の変化による波形変化

ンサの電圧とは、最高出力電圧になった時のコンデンサの電圧である。2次降伏電圧は先のコンデンサの電圧から出力電圧を引いた値である。立上がり時間は10%~90%の時間でレイトは、10%~90%の変化割合である。

この放電ループにインダクタンス成分が存在するとの計算は成り立たないが、出力波形から無視できると考えた。

各抵抗値での2次降伏電圧-電流特性をプロットしたものを図6に示す。直線的なのでフィッティングすると同図で示した直線になった。

これは、電流ゼロ(実際にそのような2次降伏は存在しない)での~46Vの一定電圧と~1.4Ωの直列抵抗の存在を示している。

充電用コンデンサにプリント板の静電容量32pFも追加して計算したが、パルス出力に平坦部があり、432pFが正しいか不明である。測定後に考えた計算方法で他にも誤差を含む要因もある。

この結果は、予測と異なり、一定電圧は低い上に抵抗値も大きい(1次降伏電圧:343V)。現段階では2次降伏への移行時間の遅さがこのような結果を示しているのではないかと予想している。

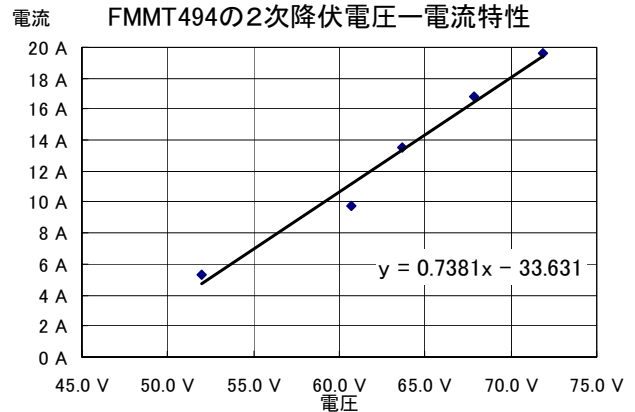


図6. FMMT494の2次降伏の電圧-電流特性

もっと考察や検討が必要と考えている。この測定は、アバランシェ・トランジスタとしての一つの評価としても使えそうである。

## 6. おわりに

5章の10Ω負荷時の特性を見てほしい。大きさ1.5×3mm□で1個5円の汎用トランジスタFMMT494(3000個購入時の価格)が立上がり時間~1.6nsecで、200V、20A近い振幅のパルスが発生している。これがアバランシェ・トランジスタの魅力である。

今回、これまであまり報告されることがなかった特性を紹介した。アバランシェ・トランジスタの用途は限られている。興味を示される方も少なくなった。しかし、現在でも電子ライナックのショート・パルス発生のような用途には出番があると考えている。アバランシェ・パルス発生器を考える方に今回示した基本的な情報がいくらかでもお役立てれば、幸いである。

表2. FMMT493で負荷抵抗を変えた時の変化

供給電圧	電荷量(C)	コンデンサの電圧	出力電圧	出力電流	2次降伏電圧	負荷抵抗	立上がり時間	電圧スルーレイト	電流スルーレイト
335 V	7.37E-09	317.9 V	266 V	5.3 A	51.9 V	50 Ω	1.47 ns	144.76 V/ns	2.90 A/ns
335 V	1.31E-08	304.7 V	244 V	9.8 A	60.7 V	25.00 Ω	1.46 ns	133.70 V/ns	5.35 A/ns
335 V	1.96E-08	289.6 V	226 V	13.6 A	63.6 V	16.67 Ω	1.50 ns	120.53 V/ns	7.23 A/ns
335 V	2.47E-08	277.8 V	210 V	16.8 A	67.8 V	12.50 Ω	1.55 ns	108.39 V/ns	8.67 A/ns
335 V	2.90E-08	267.9 V	196 V	19.6 A	71.9 V	10.00 Ω	1.61 ns	97.39 V/ns	9.74 A/ns