

DEVELOPMENT OF HIGH SPEED AVALANCHE PULSER

K. Takami

Research Reactor Institute, Kyoto University
Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka 590-04, Japan

ABSTRACT

In the present study to develop the fast risetime pulser, following characteristics of the risetime and the amplitude were achieved as a step pulse by using the transistor 2SC3736(NEC) at 16 stages and MMBT5551L at 6 stages : 120 pS and 1,000 V.

超高速アバランシェ・パルサの開発

1. はじめに

アバランシェ・パルサは、トランジスタを多段化(直列接続)することで、大振幅化と高速化を行っているが、その限界速度は明確でない。

3年程前、英国Kentech社が立上り時間100pSの超高速パルサを商品化した時、その手法を予測できなかった。昨年の本研究会で、内藤氏によって超高速パルス発生回路の紹介や製作等が報告された。⁽¹⁾

京大炉においても近年、アバランシェ・パルサの高速化に取り組み、昨年は、トランジスタ2SC3736(NEC)の6段構成で、振幅~250Vで立上り時間~200pS弱のステップ応答パルサを報告した。⁽²⁾

しかし、同様の回路パターンで段数を増やすと、振動が大きくなり、回路パターンで振動を減らすと立上りが遅くなった。

この原因を明らかにし、立上り時間100pSパルスの発生を目標に、次のような作業を行った。

- ① TDR(Time Domain Reflectometer)測定による回路パターンの考察。
- ② 多段アバランシェ・パルサを多段接続した伝送線式パルサとして考察。
- ③ 多段伝送線式パルサによる2SC3736のアバランシェ・パルス特性の検証。
- ④ トランジスタMMBT5551(MOT)を使ったパルサの検討。

これらの作業によって、振幅~1,000V、立上がり時間~120pSのステップ応答パルサを実現した。これらについて報告する。

2. サンプリング・オシロスコープのTDR測定による回路パターンの考察

通常のTDR測定による伝送線等の評価は、入力パルスに対する反射波形を観測して行われるが、伝送線

を通過した波形も観測した。通過波形は、伝送線(回路パターン)の通過帯域を評価出来るとの考えである。これまで試みた種々の回路パターンをテストした結果、立上り時間100pSを目指す上で、パターンに余計なものを付加すると、立上りを鈍らせ(低速化)、波形を歪ませると云う結論を得た。

パターンの考察は、先に報告したので省略する。⁽³⁾

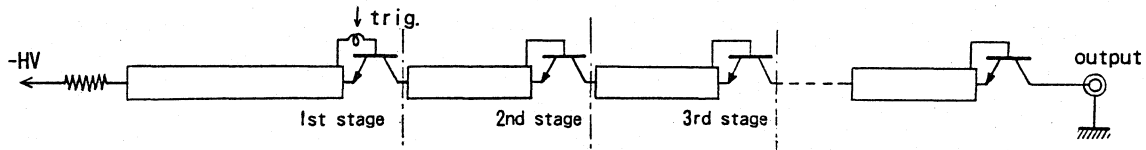
3. 多段伝送線式パルサ

高速化した多段アバランシェ・パルサの動作を理解する方法として、トランジスタとトランジスタの間を立上り時間よりも長い伝送線で接続した図1のような立体回路を考える。

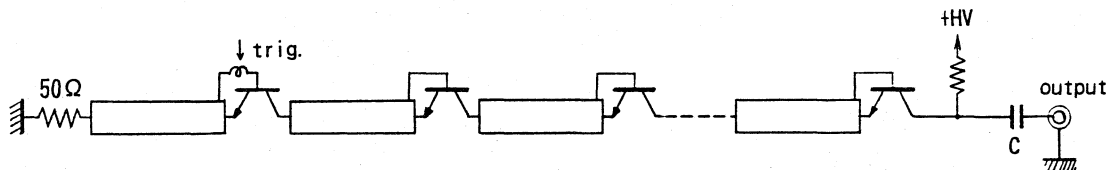
図1(a)の回路は、トランジスタ全てを一つのスイッチと見ると一つの伝送線式(line type)パルサであるが、各段が伝送線とトランジスタで構成する伝送線式パルサの多段接続とも理解できる。初段パルサは、ベースにトリガを加えてスイッチ(トランジスタ)をONに(2次降伏)し、2段目以降は、伝送線の電圧を上げてスイッチをONに(2次降伏)している。

伝送線式パルサのスイッチがONすると負荷側に向かうパルスと伝送線側(反射波)に向かうパルス(逆極性)が発生する。両者のパルス電圧は、伝送線に蓄えられていた電圧が負荷と伝送線のインピーダンス比で配分される。

アバランシェ・トランジスタの2次降伏は、完全なショート(電圧零)状態ではなく、1次降伏電圧の約1/3が残る。この電圧は定電圧特性を持ち、ダイナミック・インピーダンスが低い。この電圧のために、伝送線と負荷側のインピーダンスが等しい場合、スイッチON時に、負荷と伝送線に生じるパルス電圧は、降伏電圧の約1/3になる。



(a)伝送線型多段伝送線式パルサ



(b)CR放電型多段伝送線式パルサ

図1. 多段伝送線式パルサの立体回路

多段に接続した伝送線パルサで、初段のスイッチがONして発生した負荷側に向かうパルスは、次のスイッチをONし、電圧が加算され、その次のスイッチに向かう。このように初段で負荷に向かったパルスがアバランシェ・トランジスタを順次ONしながら電圧が加算されていく。出力は、約 $1/3$ 降伏電圧×段数のステップ電圧となる。一方、初段のスイッチで伝送線側に発生したパルス（逆極性で $1/3$ 降伏電圧）は、伝送線の開放端まで行って同極性で反射されて負荷に向う。ステップ・パルスからの遅れ時間は、初段伝送線の往復時間になる。これで1段分パルスが立下がる。2段目のパルスの反射波は、初段の反射波よりも段間伝送線の伝搬時間($=t$)遅れて発生して、段間伝送線から初段のスイッチを通り、初段の伝送線の開放端で反射されて負荷に向う。初段の反射波よりも $2t$ 遅れる。同様に3段目は2段目よりも $2t$ 遅れて負荷に向う。このように、段毎に $2t$ づつ遅れて負荷に加えられる。これが多段パルサの立下がり時間が、遅くなる理由である。これを、仮に、伝送線型多段伝送線式パルサと名付けた。昨年報告したパルサは、基本的にこの方式である。但し、パルスのフラット性改善のために段間をテーパ・ラインにしたり、初段の伝送線インピーダンスを調整している。

パルサの出力を同軸ケーブルを使って、クリッピングして矩形波を得る時には、立下がりよりもっとゆっくりしたステップ応答パルスが望ましい。このような場合は、図1(b)に示す回路が有効である。これは、全てのトランジスタを一つのスイッチと見るとCR (Capacitor, Resistor) 放電型パルサであり、個々のトランジスタは伝送線式パルサである。図1(a)の初段伝送線を特性インピーダンスで終端している。こうすると、各トランジスタから伝送線路側に反射されたパ

ルスを終端抵抗で吸収し、負荷側に戻らないので、ステップ応答パルスになる。これを、仮にCR放電型多段伝送線式パルサと名付けた。今回は、この回路方式を採用してテストした。

3. 多段伝送線式パルサによる2SC3736の検証

プリント板上に長さ約30cmの50Ω伝送線路を引き、片端を50Ωで接地し、もう一方を出力コネクタに接続した。そして、終端抵抗から、約4cm毎に伝送線をカットし、そこにアバランシェ・トランジスタを追加していった。(図1(b)の回路)

こうするとトランジスタを追加しても、初段トランジスタからオシロスコープまでの伝送線の長さは変わらない。即ち、アバランシェ・トランジスタ追加によるパルスの遅れが判る。トランジスタ2SC3736を1段から8段まで追加して、得られた波形を図2に示す。

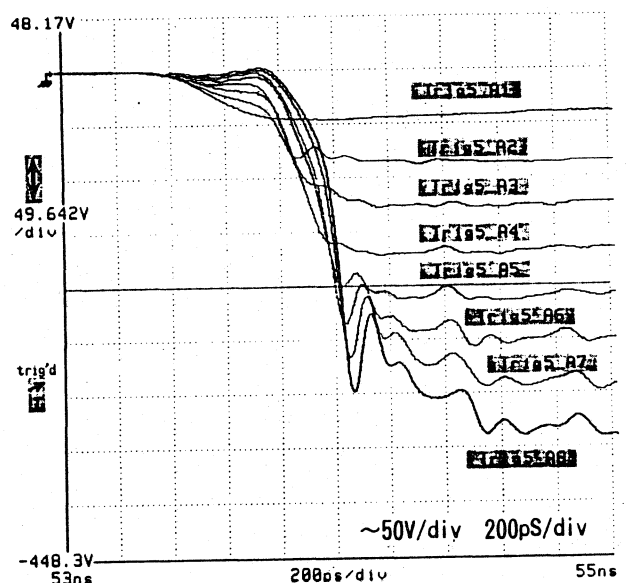


図2. 2SC3736を1段づつ追加した時の波形

図2から、次のような結論を得た。

(1) 立上り時間について

トランジスタを追加すると振幅が大きくなるだけでなく、パルスの立上りも速くなる。

(2) 遅れ時間について

トランジスタが5段位になると、1段当たりの遅れは、 $\sim 20\text{pS}$ になる。

(3) 振動について

高速化するほど、立上り後の振動が大きくなる。

これは、2SC3736の結果であるが、この傾向は、他のアバランシェ・トランジスタにもあると予測している。

アバランシェ・パルスのスイッチング速度は、NECデータ・ブックによれば、スイッチ時にトランジスタに加わるエネルギー（電圧、電流、時間）の関数としている。(4)

多段伝送線式パルサは、全てのトランジスタが同時にスイッチするのではなく、トリガを加えたトランジスタから1本ずつ順次スイッチしていく。この結果、段数の増加で、スイッチ時にトランジスタに加わるエネルギーが段々大きくなり、高速化する。

しかし、2SC3736は立上り時間が $\sim 150\text{pS}$ になると振動が大きくなり、高速化するほど、振動も大きくなる。別のテストで、段数を8段から16段に増やしたが、振幅は増加しても、立上り時間 $\sim 110\text{pS}$ が限界であった。以上の結果から、2SC3736の高速化を制限している原因は、トランジスタの内部インピーダンスと判断した。

図2から、4段では立上り後に振動が発生していないので、4段の多段伝送線式パルサを作り、これをドライブ段として、別に段間の伝送線の長さを変えたり、テーパ・ラインにしたり、数種類のパルサを試みた。しかし、立上りを高速化しながら、立上り直後の凹みを小さく出来なかった。この結果、2SC3736を使った立上り時間100ピコ秒パルサの製作を断念した。

12段伝送線式パルサを先の4段パルサでドライブして得られた波形の例を図3に示すが、パルサとして使える波形ではない。

アバランシェ・パルスの20pSという遅れは、予想以上に小さく、二次降伏現象への認識を新たにする。

4. MMBT5551Lによる多段伝送線式パルサの試作

MMBT5551Lは、2N5551の表面実装型である。MMBT5551L(Lot No. N374J58071)の特性を詳しく調べていないが、 $\sim 10\text{M}\Omega$ の並列抵抗では不安定で自走した。

並列抵抗を $1\text{M}\Omega$ 位まで下げると自走はなくなったが、タイム・ジッタが、 $\sim 300\text{pS}$ と大きく、2SC3736のタイ

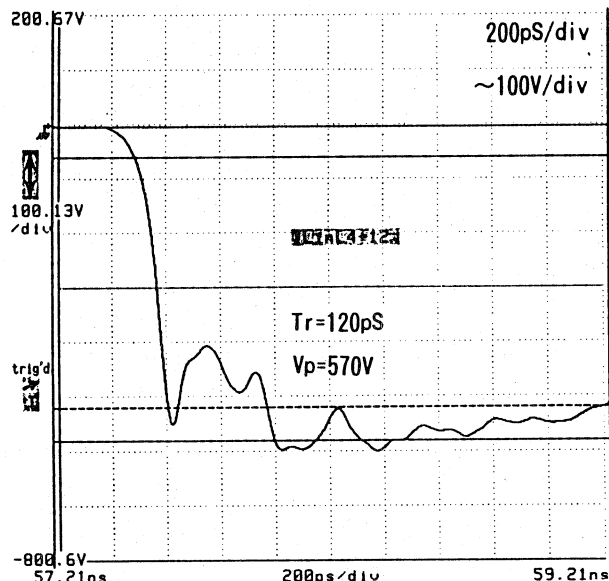


図3. 2SC3736 4+12段で得られた波形例

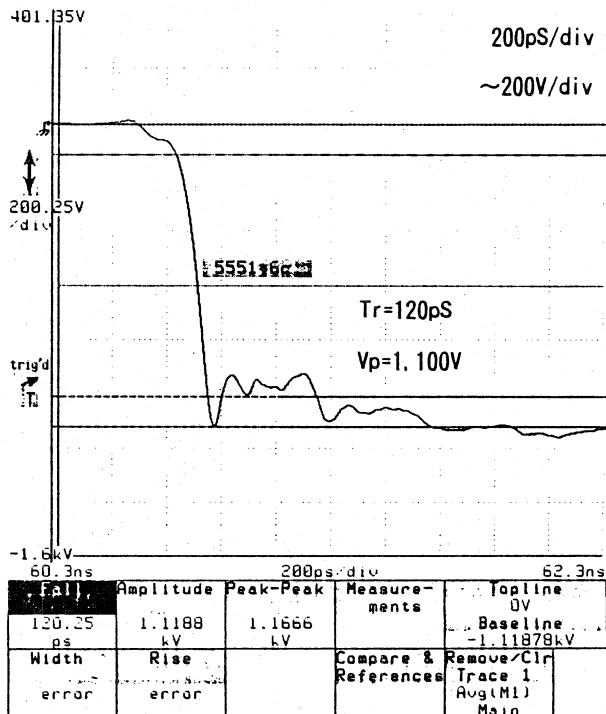


図4. 2SC3736 4+12段+MMBT5551L 6段で得られた波形ム・ジッタが $\sim 5\text{pS}$ であることから、当初、高速化に不適切なトランジスタと判断していた。しかし、2SC3736高速化の限界が明確になり、他のトランジスタを再テストすることにした。

そこで、MMBT5551Lを試みた。タイム・ジッタを減らすために、先の2SC3736 4+12段でドライブした。3.5cm伝送線+MMBT5551L 6段の多段伝送線式パルサ構成である。得られた波形を図4に示す。

振幅 $\sim 1,000\text{V}$ 、立上り時間 $\sim 120\text{pS}$ のステップ応答

パルスを得た。2SC3736と比べて、立上りの高速化はない(限界に近付いたとも考える。)が、立上り直後の凹みはかなり小さくなり、約30分間測定のタイム・ジッタが6pSp-pになった。

同軸ケーブルでクリップすれば、矩形波を得られる(振幅は半減)が、現状の波形ではリップルが大きく、実用にならない。高速化だけでなく、波形の改善が重要である。

4. まとめと今後の課題

今回の作業で、これまで検討してきたトランジスタ2SC3736の限界が明確になった。

2SC3736を使った段数を変えた伝送線式パルサのテストで、多段化で高速化すること、アバランシェ・パルスの遅れが $\sim 20\text{pS}$ と小さいこと等を明らかにした。

2SC3736 4+12段プラスMMBT5551L 6段で、振幅1,000V、立上り時間120pSのステップ応答パルスを得た。

残念ながら、立上り時間100pSは達成できなかったが、実現するための基本的技術は、得られたと考えている。

今後の課題は、実用的な波形で、立上り時間100pSを実現し、実際に使うことである。

本技術開発の一部は、京大原子炉実験所の研究助成費(平成3・4年度)等の援助を受けて行ったものです。ここに感謝いたします。

参考文献

- (1)内藤 孝他 : Proc. of the 17th Linear Accelerator meeting in Japan 1992, P43
- (2)高見 清 : Proc. of the 17th Linear Accelerator meeting in Japan 1992, P41
- (3)高見 清 : 分子科学研究所技術研究会, 1993. 3. 11
(報文集印刷中)
- (4)NEC : 表面実装ディスクリート・デバイス 1991
P880