

# 用雪崩三极管电路生成高压负脉冲技术研究

吴侃 邵冲 李新碗

(上海交通大学“区域光纤通信网与新型光通信系统”国家重点实验室)

**摘要:** 雪崩效应因为能在极短时间内输出极大电流, 常被用来设计高压脉冲电路。分析了利用雪崩三极管电路生成高压正脉冲的实现方案, 并提出了改进的设计, 接着分析了脉冲输出过程中负载回路的电流流向, 通过改变信号输出点, 设计了输出高压负脉冲的电路。电路输出的脉冲幅度达到了-200V, 前沿约3.2ns。与相似结构的正脉冲电路相比, 性能略有降低。同时对性能下降的原因进行了分析。

**关键字:** 雪崩效应; 脉冲形成; 负脉冲; 高压; 高速

## Research on the Generation of Negative High-voltage Pulse Using Avalanche Transistor

Wu Kan Shao Chong Li Xinwan

(State key laboratory on advanced optical communication systems &amp; networks, Shanghai Jiao Tong University)

**Abstract:** Avalanche effect is usually used to design the circuit to generate high-voltage pulse due to its ability to output very large current within very short period. We analyzed the realization by using avalanche transistor to generate positive high-voltage pulse and improved it. Then by modifying the output port of load we designed a structure to output negative pulse with same amplitude. The amplitude of negative high-voltage pulse is 200V and edge is 3.2ns. Compared with the performance of the circuit which has similar structure but outputs positive pulse, the performance of negative-pulse-generation circuit was deteriorated and we also analyzed the possible reasons of the deterioration.

**Key words:** avalanche effect; pulse forming; negative pulse; high voltage; high speed

### 0 引言

晶体管的雪崩效应使其能够在极短的时间内输出极大的电流, 因此常被用作高速开关[1, 2]。同时脉冲形成技术通过研究电磁波在无源网络中的传播特性, 能够产生特定波形的电脉冲[3]。结合这两种技术, 已经提出了一些利用晶体管的雪崩效应加上脉冲形成线输出具有快速边沿的高压脉冲。目前已有的方案主要集中在如何输出正高压脉冲[4], 而负脉冲的实现方案大多比较复杂[1]。另一方面, 高压负脉冲在众多领域都有应用, 例如选通型像增强器中, 控制光阴极的电信号即为高压负脉冲[5]。本文将提出利用晶体管的雪崩效应结合脉冲形成技术产生负高压脉冲的一种简单实现方法, 并比较其与相似结构的正高压脉冲电路的异同。理论上, 任何正高压脉冲输出电路结构, 都可以通过本文中的方法经过适当修改后输出同样幅度的负脉冲。

### 1 电路实现

图1(a)给出了一个普通的输出正高压脉冲的雪崩电路结构[6], 电路中传输线用作脉冲形成线。电路的工作原理为: 当雪崩三极管关闭时, 脉冲形成线被高压电源充电, 直到脉冲形成线上各点电压都等于高压电源供电电压HV。当雪崩管基极输入触发脉冲后, 雪崩管相当于高速开关瞬间导通, 此时脉冲形成线等价于瞬时电压源, 因为雪崩管负载端的阻抗为50欧姆, 脉冲形成线特

征阻抗也为50欧姆, 所以脉冲形成线上A端的电压降为原来的一半即 $1/2HV$ 。另一方面, 脉冲形成线等价于在A端输入了一个负脉冲, 脉冲幅度为 $-1/2HV$ , 这个脉冲沿传输线从A端传播到B端, B端开路, 因此脉冲又被反射回A端, A端输出电压降为0V。脉冲传播时间 $2L/v$ , 其中L是脉冲传输线的长度, v是电脉冲在传输线中的传播速度。因此A端对应的正脉冲宽度即为 $2L/v$ 。对于50欧姆同轴线,  $v=2 \times 10^8 m/s$ , 因此每10cm长度的同轴线对应于1ns的脉宽。

需要说明的是, 图1(a)中, 当晶体管截止时, Q1射极(同时也是Q2集电极)处的电压是通过晶体管中的漏电流产生的压降决定的。实测发现, 高压HV=500V时, 漏电流的大小在0.08mA左右, 则等效的单个晶体管内阻约为3M欧姆。但Q1射极处的电压不稳定, 这说明漏电流的大小在不断变化, 若晶体管长时间处于这种状态, 会加速老化, 影响电路长期工作稳定性。如果加入分压电阻R1和R2, 且使R1和R2阻值小于等效的晶体管内阻, 使电流主要从分压电阻流过。同时Q1射极处的电压确定, 相当于为Q1和Q2设置了一个稳定可控的工作点, 对电路调试带来方便。我们尝试了2种取值, R1取500K欧姆, R2取1M欧姆和R1、R2均取1M欧姆。0中给出了加入R1和R2后, 晶体管Q1和Q2的电压电流以及等效电阻值。可以看出, 当Q1射极处的偏置电压设在中点时, 晶体管中的漏电流明显降低, 且两者漏电流比较平衡, 有利于保护晶

晶体管。改进后的电路如图1 (b) 所示。

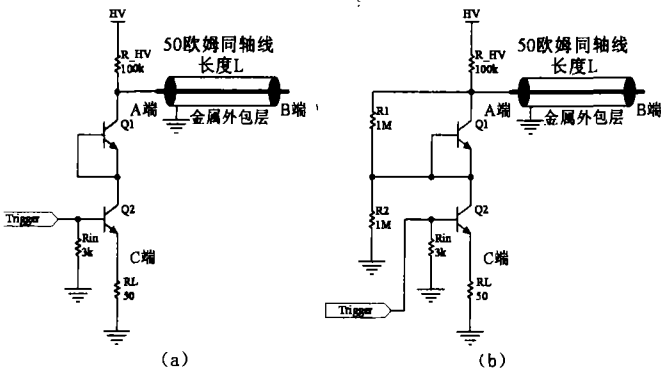


图1. 两个雪崩管级联构成的高压正脉冲输出电路  
(a) 无分压偏置电阻 (b) 有分压偏置电阻

表1. R1、R2取不同阻值时，晶体管Q1、Q2的漏电流、电压和等效电阻值

高压 HV 输入 530V	电压 (V)	电流 (mA)	等效电阻 (MΩ)	
Q1	184	0.036	5.3	R1=500KΩ R2=1MΩ
Q2	296	0.124	2.4	
Q1	258	0.042	6.1	R1=1MΩ R2=1MΩ
Q2	242	0.058	4.2	

以上电路实现输出正高压脉冲，如果要输出负高压脉冲，则需要仔细分析整个脉冲输出过程中电流的流向，在此基础上，再对电路结构做出修改。以图1 (b) 为图例分析：当晶体管发生雪崩效应时，脉冲形成线等效为一个分布式的电容，而电容对负载以恒定的电流供电，电流从负载C端流入，从另一端流出到地 (GND)。那么如果要使负载上输出负脉冲，则要求负载上的电流反向流动。为了便于分析将传输线等效为一个分立的电容元件 (此时A端与B端重合)，则电路等效为图2 (a) 中的结构。可以看出，如果负载电压输出点选为C端，参考地选为D端，则输出正脉冲，那么如果将C端选为参考地，D端选为输出点，即可输出负脉冲，等效电路图如图2 (b) 所示。将这种分析映射到传输线的结构上，就得到了如图3的电路。当雪崩晶体管导通时，因为传输线的金属芯被接到了地，那么相对的，传输线的金属外包层电压下降到-1/2HV，其他分析过程与正脉冲形成的分析相同。

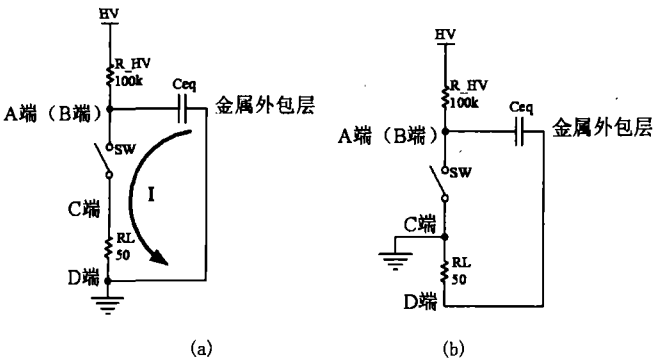


图2. 传输线脉冲形成电路的等效电路图  
(a) 正脉冲形成电路 (b) 负脉冲形成电路

根据图1和图3分别制作电路，并比较两者的输出脉冲波形，如图4所示。脉冲的相关技术参数在0中列出。

雪崩晶体管选用ZTX417，分析0中的数据，可以得到

以下几个结论：

(1) 相比正脉冲波形的前后沿，负脉冲的前后沿指标略差，这是由于对于同轴线，按照标准接法，即外侧金属包层接地，内部金属芯传输信号，此时可以保证其特征阻抗为50欧姆，但如果反过来，内部金属芯接地，外侧金属包层传输信号，则在同轴线和电路接口处会发生阻抗不匹配或者分布参数过大，从而使信号恶化。除了边沿变差外，还可以从图中看出负脉冲的波形相比正脉冲出现了一些震荡，这同样是阻抗不匹配造成的；

(2) 正脉冲的上升沿约为2.6ns，这与文献[7]中给出的使用芯片ZTX417的测量结果一致，可以认为正脉冲形成电路的设计实现了比较好的阻抗匹配；

(3) 高压供电530V时，所获得的脉冲幅度均为200V，输出脉冲幅度小于1/2HV=265V，这是因为雪崩晶体管导通时有一定压降造成的，且随着串联级数越多，压降增加得会越快[4]。

表2. 正、负脉冲的边沿与幅度指标

500V 高压供电	前沿 (ns)	后沿 (ns)	幅度 (V)
正脉冲	2.6	4	200
负脉冲	3.2	4.1	-200

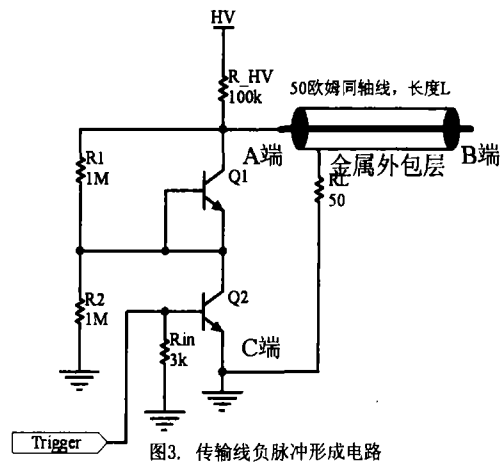
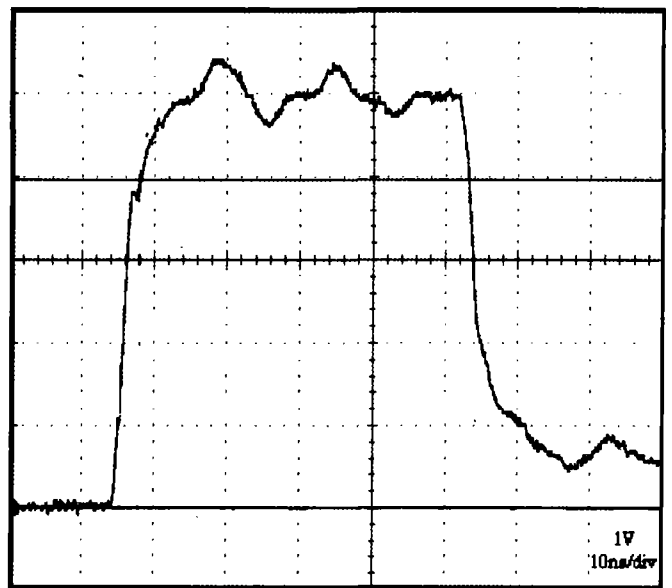
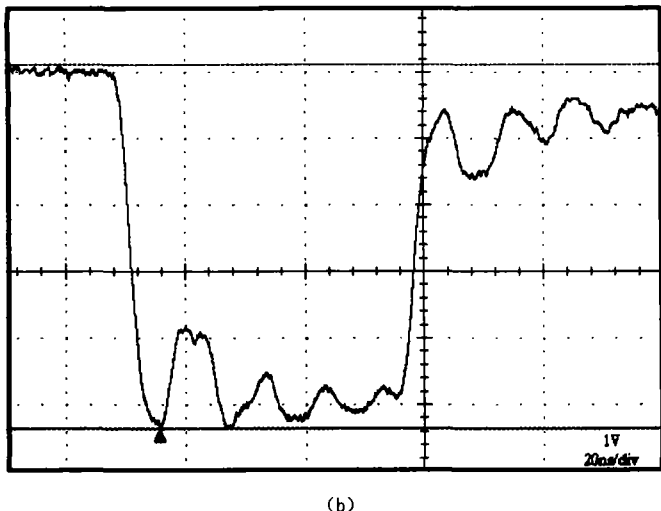


图3. 传输线负脉冲形成电路



(a)



(b)

图4. 高压脉冲输出波形 (a) 正脉冲 (b) 负脉冲

为了研究多级雪崩晶体管级联对输出负高压脉冲边沿和幅度的影响, 我们分别制作了一级、二级和三级级联电路, 图5给出了随着级数增加, 脉冲边沿和幅度的变化。从图中可以看出, 随着级联的级数增加, 脉冲边沿的时间以越来越快的速度增加, 而脉冲的幅度则因为雪崩晶体管本身的分压作用而增加的越来越慢。

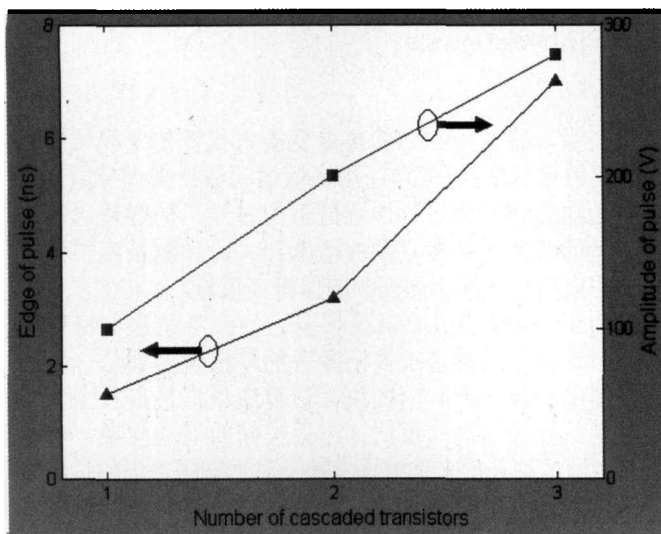


图5. 脉冲边沿、幅度与级数的关系

此外, 实验中还发现, 对于固定级数的级联电路(如二级级联或三级级联), 当高压供电持续增高时, 脉冲幅度会有一个饱和值。低于饱和值时, 幅度会随着高压供电的增高而增高。一旦脉冲幅度达到饱和值, 高压供电继续增高时, 雪崩晶体管的管压降将急剧增大, 导致输出脉冲的幅度几乎不变。这是因为脉冲输出幅度主要与晶体管雪崩导通时的雪崩电流相关, 而雪崩电流存在上限, 因此一旦晶体管上施加的电压使晶体管的雪崩电流达到上限, 则意味着脉冲输出已经达到最大值, 继续增加高压供电, 只能使晶体管上的功耗继续增加, 继而缩短晶体管寿命。

## 2 结论

我们首先分析了利用晶体管雪崩效应输出正电脉冲

的原理, 并针对级联的结构提出了改进的设计。接着通过改动正脉冲形成电路的信号输出点, 我们成功的使电路能够输出负脉冲。脉冲幅度与正脉冲相同, 但边沿稍差。这是由于传输线在以内部金属芯作为接地端, 外侧金属包层作为信号输出端时, 与电路的接口处发生阻抗不匹配, 导致信号边沿略有变差, 并产生了一定抖动。

利用我们给出的负脉冲形成电路, 电路结构简单, 可以在正高压供电的情况下, 输出幅度约为高压一半的负脉冲, 具有一定的应用价值。

## 参考文献:

- [1] Lundy, A., J.S. Lunsford, and A.D. Martin., Avalanche Transistor Pulser For Fast-Gated Operation of Microchannel Plate Image-Intensifiers. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978. 25(1): (591-597)
- [2] Mizushima, Y. and Y. Okamoto, Properties of Avalanche Injection and its Application to Fast Pulse Generation and Switching. IEEE Transactions on Electron Devices, 1967. 14(3): (146-157)
- [3] Fireman, J., Computer simulation of a pulse-forming network. Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE, 2001. 4(4): (20-22)
- [4] 梁步阁. et al. 超宽带雷达实验系统中大功率纳秒级脉冲源的研制. 微波学报, 2005. 21(1): (26-34)
- [5] 韩振兴. 高速选通型微光像增强器驱动技术的研究. 2008. 上海交通大学
- [6] 刘进元, 山冰. 半宽度为300ps 超快高压电脉冲的产生与研究. 电子学报. 1999. 27(8): (133-134)
- [7] Heeren, T., T. Ueno, and H. Akiyama, Miniature, Solid-State, Kilovolt, Nanosecond Pulse Generator with Variable Pulse-Width, Pulse-Polarity, and Pulse Frequency, in Pulsed Power Conference, 2005 IEEE. 2005(1360-1363)

## 作者简介:

吴侃, 上海交通大学, 硕士研究生。

## 基金项目:

国家863项目(ID: 2006AA01Z242, 2007AA01Z275; 国家自然科学基金(ID90704002); 以及教育部新世纪人才计划, 上海市曙光人才计划项目资助。