

# 一种用于电光开关的高速、高压电脉冲的产生\*

时利勇 刘百玉 欧阳娴 白永林 行海 王琛

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710068)

**摘 要** 介绍了一种用于电光开关驱动源的高压超快电脉冲产生技术; 电路采用级联的雪崩晶体管串和微波传输线结构, 输出阻抗  $50\Omega$ ; 在  $50\Omega$  负载情况下, 获得脉冲下降时间为  $1\text{ ns}$ 、幅度达到  $5\text{ kV}$ 、峰值电压为  $6.4\text{ kV}$ 、幅度和半宽度稳定性优于  $2\%$ 、触发晃动为  $\pm 15\text{ ps}$ 、触发延时为  $30\text{ ns}$ 、脉冲峰值电流为  $128\text{ A}$  的高压高速大电流脉冲。

**关键词** 雪崩晶体管; 微波传输线; 高压脉冲

**中图分类号** TN209 **文献标识码** A

## 0 引言

高速、高压电脉冲产生技术在激光技术、核物理、高速摄影、测试技术和超宽带雷达等领域具有广泛的用途。激光核聚变即惯性约束核聚变(ICF)驱动器所需的关键技术之一就是电光开关<sup>[1,2]</sup>。高速、高压电脉冲是电光开关的驱动脉冲源, 驱动电脉冲的形状和稳定性决定了电光开关输出的形状和稳定性<sup>[1,2]</sup>。因此, 研究高速、高压电脉冲对惯性约束核聚变(ICF)具有十分重要的意义; 高速摄影技术中, 为了提高扫描相机和分幅相机等的时间分辨率, 需要高稳定性且具有快速前沿的高速、高压电脉冲<sup>[3,4]</sup>; 测试技术中, 高速、高压电脉冲作为许多仪器设备的取样脉冲或门控脉冲, 是提高仪器性能的主要参量指标<sup>[2]</sup>; 在超宽带雷达中, 欲获得宽带发射输出, 就必须首先获得具有快速上升沿的宽带脉冲<sup>[6,7]</sup>。总之一一个可靠、稳定、高性能的高压高速脉冲源具有广阔的应用前景。本文介绍了一种基于雪崩三极管的高速、高压电脉冲产生技术。

## 1 基础理论

当 NPN 型晶体管的集电极电压很高时, 收集结空间电荷区内的电场强度比放大低压运用时大得多。进入收集结的载流子被强电场加速, 从而获得很大的能量, 它们与晶格碰撞时便产生了新的电子-空穴对, 新产生的电子、空穴又分别被强电场加速而重复上述过程。于是流过收集结的电流便“雪崩”式迅速增长, 这就是晶体管的雪崩倍增效应<sup>[8~10]</sup>。

图 1 为雪崩晶体管共发射极二次击穿测试曲线。

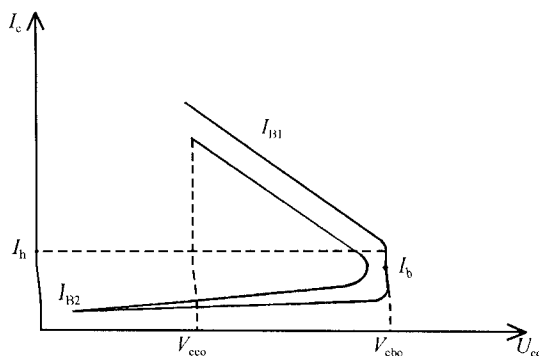


图 1 雪崩管工作特性曲线

Fig. 1 The operating characteristic of avalanche transistor

图中  $V_{cbo}$  为雪崩管基极和射极短路时的击穿电压,  $V_{cvo}$  为基极和射极开路时的雪崩击穿电压,  $I_h$  为雪崩管的最大保持电流,  $I_b$  为电路的静态工作点电流。当管子被触发导通时, 由于基极电流从  $I_{B1}$  变化到  $I_{B2}$ , 从而使雪崩管过压导通。

### 1.1 电触发导通

雪崩晶体管基极触发导通应用电路如图 2。外加电源电压加到使雪崩晶体管 C-E 极间电压满足  $V_{ce} > V_{cvo}$ , 此时雪崩晶体管的静态工作点处于雪崩区。当基极未加触发脉冲时雪崩晶体管处于截止状态, 而雪崩晶体管加有触发信号时, 雪崩晶体管发生雪崩导通。

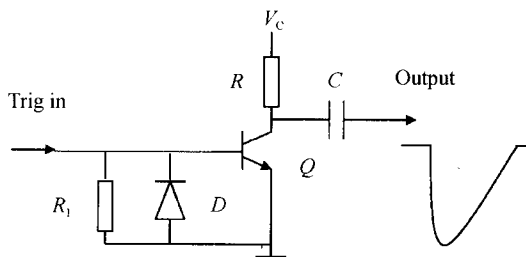


图 2 单雪崩管脉冲电路

Fig. 2 Pulse generator with one avalanche transistor

雪崩晶体管工作在这种状态下从形式上看与开关晶体管工作状态类似, 实际上雪崩晶体管和普通

\* 国家 863 高功率激光项目资助

Tel: 029-88472107-8601 Email: picosecond@126.com

收稿日期: 2004-06-22

晶体管在器件内部结构上是有区别的;图 2 雪崩管脉冲电路中,由于雪崩晶体管在静态时集电极与发射极之间的电压  $V_{ce}$  大于  $V_{ceo}$ ,它的静态工作点处于雪崩区,因此当基极有触发信号输入时雪崩晶体管内部产生雪崩倍增,使得导通速度加快;当雪崩过程结束,即使触发信号不再继续存在,雪崩晶体管还继续导通直至内部 P-N 结存储电荷全部消耗时,  $I_c \approx 0$ ,雪崩晶体管恢复截止状态.

单一雪崩管工作时的输出电流可表示为

$$I_L = (V_{cbo} - V_{ceo}) / R_L \tag{1}$$

式中  $R_L$  为负载电阻. 输出脉冲前沿时间可表示为

$$\tau = R_T C_1 \tag{2}$$

式中  $R_T$  为雪崩管导通内阻,  $C_1$  是电路分布电容.

### 1.2 过压击穿导通

雪崩管过压击穿导通测试电路如图 3.

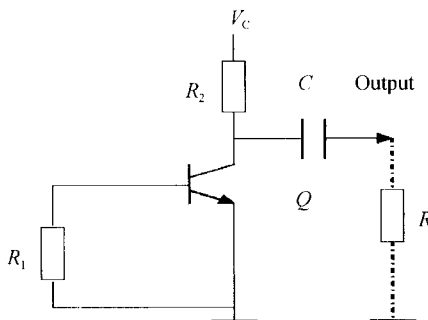


图 3 雪崩晶体管过压击穿导通测试电路  
Fig. 3 Breakdown operating circuit with overload voltage

逐步加大电源电压  $V_c$  值,当  $V_c$  大到使雪崩晶体管 C-E 极间电压  $V_{ce}$  大于雪崩晶体管击穿电压时,雪崩管将发生过压击穿导通. 发生过压击穿导通时雪崩晶体管输出  $I-V$  特性曲线如图 4.

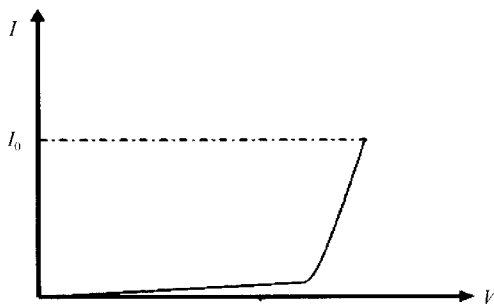


图 4 雪崩晶体管雪崩输出特性曲线  
Fig. 4 The output characteristic of avalanche transistor

当改变基极电阻  $R_1$  时,会影响雪崩晶体管管导通瞬间的电流  $I_0$  大小,即特性曲线图中  $I_0$  的大小,一般随着  $R_1$  的增加,  $I_0$  逐渐减小;另外由于集电极电阻  $R_2$  的限流作用,不能提供一大的瞬态电流,也就不能满足雪崩的电流条件,因此雪崩管不能在瞬间完全导通,所以过压击穿时,输出电压波形前沿的线性不好;如果继续提高电源电压,雪崩晶体管发生过压击穿导通的频率还会提高.

### 1.3 雪崩晶体管 C-E 极间电压上升率引起导通

在雪崩晶体管集电极和发射极间加一变化电压,当电压随时间变化率较高时,即使电压值不很高也能雪崩管导通.

### 1.4 光触发导通

将雪崩晶体管芯片裸露出来,在 C-E 极间加一电压,当光脉冲照射雪崩晶体管芯片时,由于光生载流子作用,会引起雪崩晶体管导通.

## 2 超快高压脉冲的产生

为了得到一定幅值的输出脉冲,通常的方法是将多只雪崩管结成雪崩管串或连接成 Marx 脉冲发生器形式<sup>[9,11]</sup>. Marx 脉冲发生器形式具有供电电压比较低的优点,但是这种形式的分布电容比较大,影响了输出脉冲的上升时间,比较大的分布电容对电路稳定工作也有很大影响,尤其在高电压输出情况下,它将造成雪崩管的击穿损坏;雪崩管串连接形式具有比较小的分布电容,有助于缩短脉冲的前沿时间,但是在使用雪崩管数目较多的情况下,它需要比较高的直流高压供电,这样电路中容易产生高压放电打火. 考虑这两种方法的优缺点, Marx 电路和雪崩管串的适当结合,是一种比较理想的高压脉冲电路设计方案.

图 5 是方案的电路原理示意图;本电路包括安装在  $50\Omega$  传输线结构<sup>[12]</sup>上的多串雪崩晶体管串,每个晶体管串由多个雪崩晶体管串连而成,为了降低电路的杂散电感和分布电容到最小,设计电路板使得晶体管的寄生电感和印刷电路板的寄生电容形成了一个  $50\Omega$  的共面波导传输线结构<sup>[11~13]</sup>. 第一串的第一个晶体管( $Q_1$ )通过一个小的铁氧化磁环

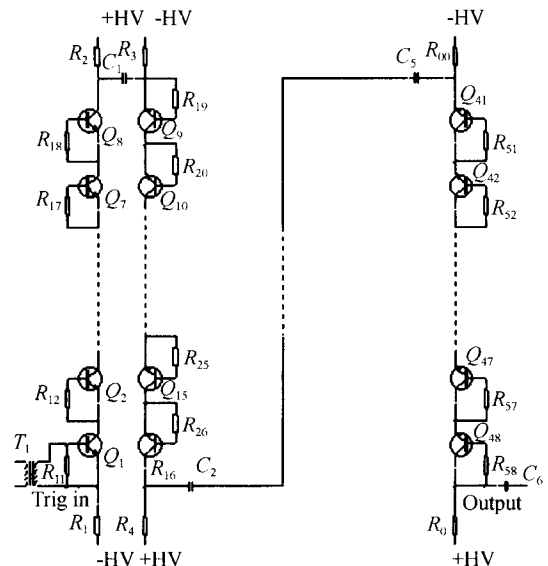


图 5 高压脉冲产生电路  
Fig. 5 High voltage pulse generator circuit

冲变压器( $T_1$ )被触发,当 $Q_1$ 被触发导通时, $Q_1$ 的收集结电位接近 $-HV$ ,使得第二个晶体管( $Q_2$ )集电极和发射极之间的电压大于晶体管击穿电压,第二个雪崩晶体管( $Q_2$ )发生过压导通;后面的管子依次过压导通,同时后面管子集电极和发射极之间依次承受越来越高的电压,将得到越来越快的上升时间和越来越短的触发延时,直至最后一个晶体管( $Q_{48}$ )过压导通,一个高压、具有快速下降沿的脉冲产生了。

雪崩管采用 2N5551,这种雪崩管的 $V_{cbo}$ 大约 500 V, $V_{ceo}$ 大约 200 V,注意到这种管子的击穿电压比较大,同时测试时击穿电压有漂移,这些都导致触发延时和输出开关电压的变化;为了解决这个问题,对这些管子进行为期几个月的老化试验,选取具有相同击穿电压、触发延时和上升时间,同时具有比较小触发晃动的管子。

本电路采用正负直流电源供电,电源通过限流电阻和雪崩晶体管串相连,电阻除了起到保护电源的作用外,更重要的作用在于提供一较小的偏置电流,有效地改善了电路的稳定性。该电路结构有两大优点:1)比较低的电源电压,降低了高压放电打火的可能性;2)采用 Marx 电路和雪崩管串电路相结合的方法以及采用 50 $\Omega$ 传输线结构,提高了整个电路输出脉冲的上升时间。

### 3 电路测量结果

输出脉冲的下降时间主要由最后一串晶体管的分布电容和最后一串晶体管的开关时间决定的。

假设每个晶体管的寄生电感为 6nH,则一个晶体管串(8个雪崩晶体管)的总电感是 48nH,其杂散电容为

$$Z = (L/C)^{1/2} = \sqrt{C} = L/Z^2 = \sqrt{C} = 48\text{nH}/50^2 = 19.2 \text{ pf} \quad (3)$$

根据假设结果,可以推算出输出脉冲的下降时间

$$RC = 50 \Omega \times 19.2 \text{ pf} = 960 \text{ ps} \quad (4)$$

杂散电容是由双层印刷电路板上的铜箔形成的。

输出脉冲的幅度主要是由雪崩晶体管串的数目和雪崩晶体管的开关转换时间决定的,与电源电压也有一定的非线性关系,此外还受电路结构参量等因素的影响

本电路实际输出为幅度 5 kV、峰值电压 6.4 kV、下降沿 1 ns、脉冲宽度为 9.5 ns 的高压、大电流超快电脉冲,如图 6 是用示波器 TEK TDS 680B 测出的输出斜坡脉冲波形(信号衰减了 1000 倍)。

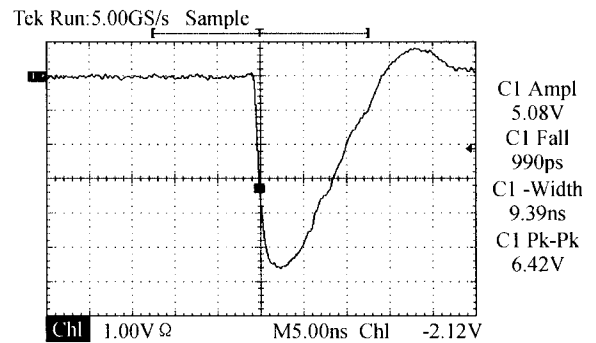


图 6 测试结果  
Fig. 6 Test result

### 4 结论

本电路产生的高压、高速电脉冲,用于驱动雪崩二极管脉冲成型电路可以得到皮秒高压窄脉冲,皮秒高压窄脉冲作为 Pockel 盒和其他一些电光器件的脉冲驱动源已经获得了成功的运用;提高脉冲的幅度、加快脉冲的上升和下降沿以及实现脉冲波形形状和幅度的任意可调是今后努力的目标。

#### 参考文献

- 1 曾文章,张生佳,韦辉,等.利用雪崩晶体管驱动电光偏转器实现稳定纳秒激光脉冲输出.激光与光电子学进展,2003,40(6):13~15  
Zeng W Z, Zhang S J, Wei H, et al. Laser And Optoelectronics Progress, 2003, 40(6): 13~15
- 2 王春晖,成向阳,田兆硕,等.窄脉冲外差体制 CO<sub>2</sub> 激光主动成像研究.光子学报,2003,32(2):155~158  
Wang C H, Cheng X Y, Tian Z S, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(2): 155~158
- 3 桂建保,赵宝升,张小秋,等.用于软 X 射线光谱探测的双 MCP 近贴单幅相机.光子学报,2004, 33(10): 1261~1264  
Gui J B, Zhao B Sh, Zhang X Q, et al. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(10): 1261~1264
- 4 邱孟通,张美,罗建辉,等.微带像增强器的选通特性研究.光子学报,2003,32(4):505~508  
Qiu M T, Zhang M, Luo J H, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 505~508
- 5 王硕勤,朱祖华.电光取样技术在 ps 级超短电脉冲测量和 GHz 高频电信号测量中的应用.半导体光电, 1991, 12(2): 181~188  
Wang S Q, Zhu Z H, et al. Semiconductor Optoelectronics, 1991, 12(2): 181~188
- 6 梁步阁,陈小娟,朱畅,等.超宽带雷达实验系统中大功率纳秒级脉冲的研制.微波学报,2005,21(1):26~34  
Liang B G, Chen X J, Zhu C, et al. Journal Of Microwaves, 2005, 21(1): 26~34

- 7 胡伟东,吕昕,高本庆.超宽带雷达技术的新进展.无线电工程,2005,**35**(1):35~64  
Hu W D, Lv X, Gao B Q. *Radio Engineering*, 2005, **35**(1):35~64
- 8 杨萌彪.特种半导体器件及其应用.北京:电子工业出版社,1991.53~60  
Yang M B. *Special Semiconductor Devices And Their Application*. Beijing: Electronic Industrial Press, 1991. 53~60
- 9 刘进元,欧阳炯,刘百玉,等.一种用于激光削波的超快高压方波电脉冲的产生与研究.光子学报,1999,**28**(Z2):190~193  
Liu J Y, Ou Y X, Liu B Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(Z2):190~193
- 10 郭宝平,牛憨笨.雪崩晶体管的导通方式讨论.高速摄影与光子学,1990,**19**(4):386~390  
Guo B P, Niu H B. *High Speed Photography And Photonics*, 1990, **19**(4):386~390
- 11 刘百玉,刘进元,欧阳炯,等.高压台阶脉冲的研制.2000年青年光学学术讨论会暨院士报告会  
Liu B Y, Liu J Y, Ou Y X, *et al.* The 2000 Youth Symposium On Optics And Academicians' Seminar
- 12 顾继慧.微波技术.北京:科学出版社,2004.25~170  
Gu J H. *Microwave Technology*. Beijing: Science Press, 2004. 25~170
- 13 欧阳炯,刘百玉,刘进元,等.激光打靶同步系统电磁兼容性能的研究.光子学报,2003,**32**(12):1521~1523  
Ou Y X, Liu B Y, Liu J Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12):1521~1523

## High-Speed and High-Voltage Electrical Pulse Generation for Electro-Optical Switch

Shi Liyong, Liu Baiyu, Ouyang Xian, Bai Yonglin, Hang Hai, Wang Chen

State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2005-06-22

**Abstract** The authors have developed avalanche transistors based pulser for use as a electro-optical switch driver. These transistors are mounted on microwave structure board. The circuit can generate a electrical pulse with peak voltage of 6.4 kV, peak current of 128A, voltage amplitude of 5 kV, fall time of 990 ps, in 50Ω load. The trig jitter is less than ±15 ps; trig delay is about 30 ns.

**Keywords** Avlanche transistor; Microwave transmission line; High voltage pulse



**Wang Yishan** was born in Henan Province in 1978. He received his bachelor degree in precision instrument from china institute of metrology in 2000, then threw himself into work. Three years later, he continued his education towards Master degree at the State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences.