

文章编号: 1001-3806(2006)04-0445-04

## 纳秒脉冲半导体激光驱动器的研究

刘旭升<sup>1</sup>, 林久令<sup>1</sup>, 张海明<sup>1\*</sup>, 王晋疆<sup>2</sup>

(1. 天津工业大学 理学院, 天津 300160; 2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了获得高功率、高重复频率的纳秒级光脉冲, 介绍了一种基于 Marx bank 脉冲发生原理的纳秒脉冲激光驱动器的设计, 以及设计过程中雪崩晶体管的选取。该驱动器采用一级小雪崩管对触发脉冲进行陡化, 由小雪崩管产生的脉冲对 Marx bank 电路进行触发, 以获得大电流窄脉冲, 用于驱动半导体激光器。设计所得驱动器的峰值电流为 12.5A, 半峰全宽为 1.51ns, 重复频率为 100kHz, 实现了大幅度纳秒脉冲半导体激光驱动器的设计要求。结果表明, 对触发脉冲的陡化, 可以降低后一级 Marx bank 电路的雪崩电压, 同时使得脉宽更窄, 这将更加有利于驱动半导体激光器。

**关键词:** 激光器; 纳秒; 雪崩晶体管; 雪崩电压

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

### The study of nanosecond pulsed diode laser driver

LIU Xu-sheng<sup>1</sup>, LIN Jiu-ling<sup>1</sup>, ZHANG Hai-ming<sup>1</sup>, WANG Jin-jiang<sup>2</sup>

(1. Science Institute, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China; 2. Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science of Ministry of Education, College of Precise Instrument and Optical Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to obtain the nanosecond optical pulse with high power and high repetition frequency, a LD's driver which can produce pulse with nanosecond rise time is designed. The generator is based on the avalanche transistors in a Marx bank circuit. The selection of the avalanche transistors is also described in detail. This driver uses a transistor which has a low avalanche voltage to shape the trigger pulse, and then use the pulse which is obtained from this transistor to trigger the Marx bank circuit. A large current narrow pulse for driving the LD can be obtained. This driver can produce a large-amplitude nanosecond pulse and its peak current is up to 12.5A with pulse width of 1.51ns, pulse repetition frequency of 100kHz. It is consequent that shaping the trigger pulse can reduce the avalanche voltage of the Marx bank circuit and narrow the width of the output pulse. It is more suitable for driving the LD.

**Key words:** lasers; nanosecond; avalanche transistor; avalanche voltage

## 引 言

由于脉冲式半导体激光器具有体积小、效率高、寿命长、价格低廉等优点, 因此, 得到了越来越广泛的应用。在激光通信、激光雷达、高速摄影、抽运固体激光器、激光测距等诸多领域倍受青睐<sup>[1,2]</sup>, 尤其在测量领域, 对高频大幅度、纳秒脉冲源的要求越来越迫切。在脉冲式半导体激光测距机中, 脉冲激光光源的上升时间和测量精度密切相关, 上升时间越短, 越有利于提高测量精度; 脉冲激光的峰值功率和测量距离密切相关, 峰值功率越大, 越有利于增加测量距离<sup>[3]</sup>。为了得到快上升沿时间的光脉冲, 需用纳秒级甚至亚纳秒级的电脉冲驱动半导体激光器。采用雪崩晶体管、大功率

场效应管、氢气闸流管、绝缘栅双极晶体管和阶跃恢复二极管等均可获得低抖动、快上升沿时间的纳秒级大电流窄脉冲<sup>[4]</sup>。其中, 采用雪崩晶体管获得纳秒级大电流窄脉冲技术是最普遍的方法。采用雪崩晶体管可以很方便地获得具有毫微秒级上升时间的大峰值功率的脉冲<sup>[5,6]</sup>。

## 1 雪崩晶体管的工作原理及选取

### 1.1 雪崩晶体管的工作原理

当 NPN 型晶体管的集电极电压很高时, 集电极空间电荷区内的电场强度比放大低压运用时大得多。进入集电极的载流子被强电场加速, 从而获得很大能量, 它们与晶格碰撞时产生了新的电子-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。于是流过集电极的电流便“雪崩”式迅速增长, 这就是晶体管的雪崩倍增效应。

晶体管的临界雪崩击穿电压不仅与管子本身的特

作者简介: 刘旭升 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光驱动系统的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhm@tjpu.edu.cn

收稿日期: 2005-04-29; 收到修改稿日期: 2005-12-06

性有关,还取决于外部电路的接法,NPN型雪崩晶体管共射极输出特性如图 1所示。

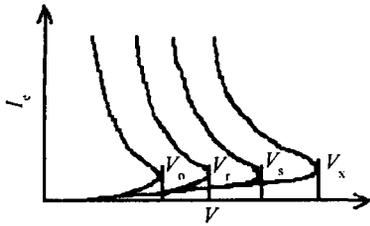


Fig 1 Common-emitter output characteristics of NPN avalanche transistor  
由图中可知,各击穿电压之间的关系是:

$$V_0 < V_r < V_s < V_x \quad (1)$$

其中,  $I_c$  为晶体管的发射极电流,  $V$  为晶体管集电极和发射极间的电压,  $V_0$  为晶体管基极开路时,集电极和发射极间的击穿电压,  $V_r$  为晶体管基极和发射极间接一电阻时,集电极和发射极间的击穿电压,  $V_s$  为晶体管基极和发射极间短路时,集电极和发射极间的击穿电压,  $V_x$  为晶体管基极和发射极间加反向偏压时,集电极和发射极间的击穿电压。

虽然  $V_x$  在这几个击穿电压中最高,但它要求对每只管子都有一个基射间的反向偏压,这在实验中不易满足。因此一般采用  $V_r$  或  $V_s$  的情况。当  $V < V_0$  时,雪崩晶体管处于放大状态,不论基极注入多大的电流,晶体管都不会发生雪崩。因此,要使晶体管雪崩必须使  $V > V_0$ 。但是,当  $V > V_r$  时,属于过压击穿,也是一种雪崩击穿,但它的频率不受基极脉冲的控制,这时,只有降低  $V$ ,雪崩才能停止。这种状态对晶体管有很大的损坏,因此在工作时要严格禁止出现这种情况。在实际应用中,需要由控制晶体管的雪崩击穿,工作点必须设计在:

$$V_0 < V < V_r \quad (2)$$

只有满足 (2) 式,才能使得雪崩晶体管电路在基极没有输入信号时,雪崩晶体管处于截止,当基极注入一个正脉冲信号时,晶体管发生雪崩,在这种工作点的设置下,晶体管的雪崩状态就可由输入信号来控制。

晶体管发生雪崩时,管中的电流以极快的速度增加,而集射间电压则以极快的速度下降,其速度之快可达几个纳秒,为此就可得到一个前沿为几纳秒的电压跳变。

### 1.2 雪崩晶体管的选取

雪崩晶体管的主要应用参数是雪崩上升时间与雪崩脉冲幅度,这两个参数都与雪崩晶体管的反向击穿电压有着密切的关系。通常,击穿电压较低的雪崩管具有更快的雪崩上升时间和较高的脉冲重复周期,但所获取的脉冲幅度较低;击穿电压较高的雪崩管截止频率较低,雪崩跳变沿较差。因此,需选取合适的雪崩晶体管。

当已经选定某种雪崩晶体管后,则该管的击穿电

压  $V_0$  与  $V_r$  就成为表征雪崩管脉冲性能的主要参数。

雪崩晶体管的主要选取原则如下:(1)若所需脉冲幅度较高,脉冲重复频率较低,应尽可能选用击穿电压  $V_0$  高的管子;(2)选取  $V_r - V_0$  值较大的雪崩晶体管。

## 2 驱动器的电路设计

### 2.1 触发脉冲产生电路

触发脉冲由多谐振荡电路和脉冲整形电路两部分组成。由晶振构成的多谐振荡器产生频率为 1MHz 的方波,经 CD4017BCN 脉冲分频器对前一级脉冲进行 10 分频,得到频率为 100kHz 的方波,再由 74LS123 对分频器出来的脉冲进行整形。最后,在由 74LS123 构成的单稳电路输出端得到半峰全宽为 35ns,幅度为 3.5V 的触发脉冲。

由于触发脉冲的上升时间直接影响了后面一级雪崩晶体管的波形,触发脉冲的上升时间越短,越有利于后面一级脉冲的形成。为了进一步提高触发脉冲的幅度、带负载能力和缩短上升时间,在 74LS123 的后面又加了一级击穿电压较低的晶体管,利用这一级晶体管雪崩时产生的脉冲来触发下一级晶体管发生雪崩。

### 2.2 主脉冲形成电路

主脉冲形成电路主要由两级电路组成,电路原理图如图 2 所示。前一级主要由 1 个 2N5179 晶体管组

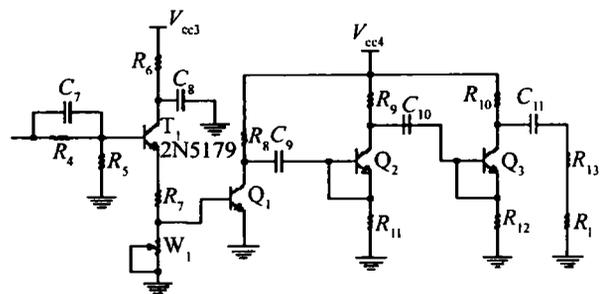


Fig 2 Principle diagram of the main pulse generation circuit

成,后一级主要由 3 个 ZTX415 晶体管组成 Marx bank 电路。为了提高工作速度,改善输出波形,在电路设计时就需要加大  $T_1$  管的正向基极电流  $I_b$  以缩短  $T_1$  管的开通时间  $t_{on}$ ,在 74LS123 的输出端和 2N5179 的输入端之间接入一个加速电容  $C_7$ ,  $C_7$  可以使得加到 2N5179 基极上的触发脉冲上升沿进一步陡化。

第 1 级电路是利用 2N5179 晶体管雪崩时的开关特性来对前面触发脉冲进一步陡化。这一级采用的电路是最基本的雪崩管脉冲产生电路,要使电路正常工作,必须满足:

$$\begin{cases} V_{cc3} < V_x \\ R_6 < V_{cc3} / I_b \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $I_b$  为初始雪崩电流。

这两个条件保证电源  $V_{cc3}$  接通时,经电阻  $R_6$  给  $C_8$  充电,最终充到  $V_{cc3}$ ,并且在触发信号到来之前,晶体

管  $T_1$  不会进入雪崩区。当一正触发信号加到  $T_1$  基极时,  $T_1$  雪崩导通, 于是  $C_8$  经  $T_1$  和  $R_7$  迅速放电, 从而产生窄脉冲电流。脉冲前沿由晶体管从低电流进入雪崩区的速度来决定, 重复频率取决于充电回路时间常数  $R_6 \times C_8$  的大小。

理论上, 由放电回路可得回路的放电电流最大值为:

$$I_{\max} = V_{cc3} \sqrt{\frac{C_8}{NL}} \exp\left[-\frac{\pi R}{4} \sqrt{\frac{C_8}{NL}}\right] \quad (4)$$

式中,  $L$  为放电回路的寄生电感,  $R$  为放电回路的总电阻。

由 2N5179 晶体管构成的第 1 级脉冲产生电路可以在发射极获得一个脉宽为 3.6ns 幅度为 9.54V 的正脉冲, 如图 3 所示。脉宽的变窄将有利于后面一级

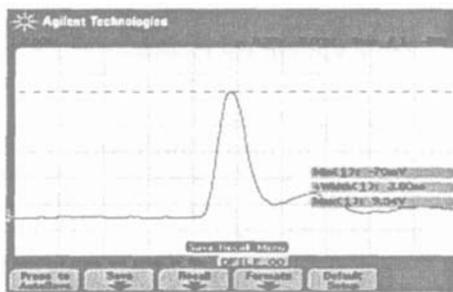


Fig 3 2N5179 output voltage

脉冲的形成, 由实验结果可知, 加入小雪崩管 2N5179 可使后面一级的脉宽变窄, 同时雪崩电压也下降了十几伏。

第 2 级电路主要是由 3 级 ZTX415 组成的 Marx bank 电路。大部分晶体管都不适合于工作在雪崩模式下, 不同晶体管的雪崩电压和电流都不一样, 目前用得较多的为 2N5551, 通过在实际电路中对 2N5551 和 ZTX415 进行了实验对比, 发现 ZTX415 这种晶体管更加适合于工作在雪崩模式下。这种晶体管的雪崩电压为 150V ~ 270V, 雪崩电流可以大到 60A<sup>[7]</sup>。

当 2N5179 发射极上的电压为 0 时,  $Q_1, Q_2, Q_3$  都处于截止状态, 高压直流电源对电容  $C_9, C_{10}, C_{11}$  进行充电, 使电容  $C_9, C_{10}, C_{11}$  上的电压达到高压直流电源的输出电压; 当 2N5179 晶体管发生雪崩, 发射极上得到一个窄脉冲时,  $Q_1$  发生雪崩。这时晶体管  $Q_1$  的集电极瞬时由高压  $U_0$  ( $U_0$  约为  $V_{cc4}$ ) 变为低电压  $U_1$ , 由于电容  $C_9$  两端电压的不可阶跃性,  $Q_2$  发射极的电压由零电位变为负的 ( $U_0 - U_1$ ), 这时在  $Q_2$  的集电极和发射极两端有较大的电位差,  $Q_2$  发生雪崩。同理,  $Q_3$  也在瞬时发生雪崩。就这样一个雪崩晶体管的雪崩耦合到下一个雪崩晶体管, 导致下一个晶体管的雪崩, 从而使脉冲得到叠加。这样的 Marx 电路可以得到幅度更大、脉宽更窄的负脉冲<sup>[8]</sup>。

理论上, 在末级负载  $R_1$  上得到的最大电流为:

$$I_{\max} \approx (U_0 - U_1) / [(R_j + Z_s) + (Z_1 + R_1) / N] \quad (5)$$

式中,  $Z_1 \approx \omega L_1, Z_s \approx \omega L_s, \omega \approx 2\pi / (4H_{FWHM}), R_j$  是雪崩晶体管导通时的电阻,  $R_1$  是负载的阻值,  $L_1$  是负载的寄生电感,  $L_s$  是雪崩晶体管和电容的寄生电感,  $H_{FWHM}$  是电流脉冲的半峰全宽,  $N$  是串联的级数。

实际上, 为了减少寄生电感, 作者在  $Q_3$  集电极上用 5 个 5Ω 的碳合成电阻并联成为 1Ω 电阻作为探测电阻。在 1Ω 电阻上用型号为 54642D (安捷伦) 的 500M 的示波器获得了峰值电压为 12.5V、上升时间为 1.2ns、半峰全宽为 1.51ns 的负脉冲, 如图 4 所示。

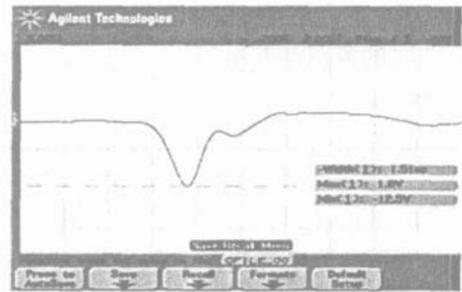


Fig 4 Marx bank circuit output voltage

采用雪崩晶体管设计 Marx bank 脉冲产生电路时需注意以下问题<sup>[9,10]</sup>: (1) 不同晶体管的雪崩特性有所不同, 最好是选自同一批生产的管子; (2) 随着级数的增加, 电路的输出阻抗也增加, 如果负载是一个低阻抗, 当达到一定级数后, 随着级数的增加输出电压反而变小<sup>[11]</sup>。为了获得更大的负载电流, 也可以在 Marx bank 电路的每一级上并联几个晶体管, 但是, 这需要对管子的导通电阻、延迟时间等各方面的参数进行更加严格的筛选。否则, 不但不能增大脉冲幅度, 反而会使脉冲宽度加大。目前, 通过 Marx bank 电路已经能够实现产生峰值为 4kV、上升时间小于 1ns 的大幅度脉冲<sup>[11,12]</sup>。

基于电容放电原理, 形成的脉冲为尖脉冲, 前沿不陡, 如果用传输线 (如同轴电缆) 代替电容器, 就能形成比较好的矩形脉冲。

### 2.3 电容和电阻的选择

选择雪崩电容  $C$  时, 需要兼顾电流幅度和宽度这两个因素, 选择合适的电容值。  $C$  值选择太大, 输出脉冲宽度加宽, 电路恢复期太长; 在一定范围内, 电容  $C$  值越小, 脉宽越窄, 但幅度也会变得越小。一般选取  $C \geq 2C_0, C_0 = (C_{01} + C_{02}) / 2$ , 由于  $C_0$  一般为 5pF 左右, 所以通常选取的  $C$  值在十几皮法到几百皮法之间, 一般应选用瓷片电容或云母电容。其中,  $C_{01}$  为晶体管集电极到地的分布电容,  $C_{02}$  为负载到地的分布电容。

选取集电极电阻  $R_c$  时应保证雪崩电路能够在截止期内恢复完毕, 即满足  $(3 \sim 5) (R_c + R_1) C \leq T_s$ , 式中,  $T_s$  为触发脉冲重复周期, 通常  $R_c$  选为几千欧姆到几十千欧姆。

在高速脉冲电路中,寄生电感愈小,放电电流随时间的衰减愈快,脉宽愈窄,所以一般都采用碳合成电阻作为探测电阻。此外,为了减少和其它元件的耦合和感应,在功耗允许条件下应选用体积最小的电阻。除去电流较大的退耦电阻外,一般采用 1/8W 就足够了。

## 参 考 文 献

### 3 注意事项

#### 3.1 高压直流电源的抗干扰方法

该电路的电源采用的是 400V 高压直流电源,为了减少电源对电路的影响,应当在供电回路接入 10 $\mu$ F 和 0.1 $\mu$ F 并联的旁路滤波电容。

#### 3.2 电路板的设计

纳秒脉冲的高频特性要求元件的引线短、电路板布线紧凑,一块印刷板上的地线线条应该尽量宽以减少地线线条的阻抗,同时注意利用地线线条进行隔离,直角转弯时应沿 45° 切角切去多余金属部分,斜边长度为 1.6w (w 为线条的宽度),以尽量减少分布参数。

应把模拟电路集中于一块印刷板上或印刷板的某一个区域,模拟信号的输入、输出电缆转接头直接安装在这块板上。所有模拟电路的接地点自己连在一起,只在一点与数字电路地相连。这种方法可以大大减少其它电路对模拟电路的影响;必须采用单点接地,避免高频信号经地线传输或反射,影响电路的正常工作。

### 4 结 论

该电路设计原理简单,主要工作在于电路的调试和器件参数的选择上,其指标已经达到了预期的效果,为下一步工作的开展奠定了基础。接下来,作者将用阶跃恢复二极管对脉冲进行整形,使脉宽进一步地变窄。

- [1] RAIV N, SHUKLA M, PANT H C *et al* Development of picosecond time resolution optical and X-ray streak cameras [J]. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 1995, 20 (6): 937~954.
- [2] VANSHTEEN S, KOSTAMOVARA J, KLPPELA A *et al* A novel compact 35A/150ps current pulse generator for a new generation of the laser radars [A]. *Proceedings of the 40th Midwest Symposium on Circuits and Systems* [C]. New York: IEEE, 1997. 148~151.
- [3] ZHANG L, QIN Sh Q, WANG Sh Sh *et al* Mini LD laser rangefinder used in intelligent vehicles [J]. *Laser Technology*, 2005, 29 (2): 130~131 (in Chinese).
- [4] MEIXLER L. Fast pulse techniques related to the x-ray laser project at PPPL [A]. *Proceedings of IEEE* [C]. New York: IEEE, 1992. 1188~1191.
- [5] KLPPELA A, KOSTAMOVARA J. Laser pulser for a time-of-flight laser radar [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68 (6): 2253~2258.
- [6] BEI GH, QIU W F, WANG X B. Experimental study of electron-optical Q-switch circuits used in Nd:YAG laser [J]. *Laser Technology*, 1994, 18 (6): 379~381 (in Chinese).
- [7] RAMANA K S, RASTKO R S, DONALD T H *et al* Solid-state nanosecond pulse generator. Application in ultra-wideband bioeffects research [A]. *Conference Proceedings - IEEE Southeast Conference* [C]. Piscataway: IEEE, 2004. 281~284.
- [8] LUIS L M, ALAN M, FRED J Z *et al* Sub-nanosecond avalanche transistor drivers for low impedance pulsed power applications [A]. *13th IEEE International Pulsed Power Conference* [C]. Las Vegas: IEEE, 2001. 178~181.
- [9] KANAD M. The theory of operation of transistorized Marx bank circuits [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70 (4): 2155~2160.
- [10] AMITABH C, KANAD M, OAK S M. The principle of operation of the avalanche transistor-based Marx bank circuit: a new perspective [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69 (5): 2166~2170.
- [11] RAIV N, SHUKLA M, KHARDEKAR R K A transistorized Marx bank circuit providing sub-nanosecond high-voltage pulses [J]. *Measurement Science & Technology*, 1994, 5 (4): 447~449.
- [12] LIU J Y, SHAN B, CHANG Z H. High voltage fast ramp pulse generation using avalanche transistor [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 69 (8): 3066~3067.

(上接第 437页)

## 参 考 文 献

- [1] DING Y Ch, ZHANG Sh L, LI Y *et al* Experiment study on the self-mixture interferential with orthogonal polarized He-Ne light [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (1): 33~35 (in Chinese).
- [2] ZHOU H, LIS, SHI Y *et al* Effect of polarization on the far-field diffraction of ideal cube corner retroreflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33 (4): 418~431 (in Chinese).
- [3] ZHANG J, CHEN L M, LI Y G *et al* The study on ejecting orientation of exceed strong electron that produced in laser plasma due to laser polarization [J]. *Nature Science Evolve*, 2003, 13 (5): 533~536 (in Chinese).
- [4] WANG J M, LI GH, WANG W *et al* Research of polarization state transferring in complex plane [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (1): 76~78 (in Chinese).
- [5] WANG W, LI GH, WANG J M *et al* Using polarizer and wave plate transform polarization state in Stokes space [J]. *Journal of Qufu Normal University*, 2002, 28 (7): 64~66 (in Chinese).
- [6] MA L L, LI GH. Polarized light expressed by Poincare sphere [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (4): 302~303 (in Chinese).
- [7] ZHAO P T, LI GH. Shown by using Stokes son space the state of polarization [J]. *Journal of Qufu Normal University*, 2004, 30 (1): 50~52 (in Chinese).
- [8] LI GH. Optics [M]. Ji'nan: Shandong Education Press, 1990. 417~418 (in Chinese).
- [9] XUE D, LI GH, HAO D Zh *et al* Achromatic analysis of the two-in-one composite 1/4 wave-plate [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (2): 184~185 (in Chinese).
- [10] BORN M WOLF E. Optics principle [M]. Beijing: Science Press, 1978. 44~45 (in Chinese).
- [11] LIAO Y B. Polarizing optics [M]. Beijing: Science Press, 2003. 215 (in Chinese).