

文章编号: 2095-4980(2014)01-0032-05

## 基于光导开关和平板线的固态脉冲功率技术

谌 怡, 夏连胜, 王 卫, 刘 毅, 张 篁, 石金水, 章林文

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 紧凑型固态化是脉冲功率技术发展的趋势, 研究了基于 GaAs 光导开关和陶瓷平板传输线的固态脉冲功率技术。紧凑型固态脉冲功率系统的关键部件主要包括固态陶瓷平板传输线, 高功率 GaAs 光导开关以及激光二极管触发系统。研究了单路 Blumlein 脉冲形成线输出特性, 分析了 GaAs 光导开关非线性导通带来的损伤, 并开展了单路 Blumlein 脉冲形成线实验。结果表明: 研制基于固态平板传输线、光导开关以及激光二极管触发系统的紧凑型脉冲功率具有可行性, 负载上获得了超过 20 kV 的高压脉冲输出。

**关键词:** 脉冲功率技术; 陶瓷平板传输线; GaAs 光导开关; 激光二极管; Blumlein 线

**中图分类号:** TN78

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201401.0032

## Solid-state pulsed power technology based on PCSS and planar lines

SHEN Yi, XIA Lian-sheng, WANG Wei, LIU Yi, ZHANG Huang, SHI Jin-shui, ZHANG Lin-wen  
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** For the developmental tendency of pulsed power technology is compact and solid-state, a solid-state pulsed power technology based on GaAs Photoconductive Semiconductor Switches(PCSS) and ceramic planar transmission lines is proposed. The critical components and technologies included are solid-state ceramic planar transmission lines, high-power GaAs PCSS and triggering system of laser diode. An experiment of single Blumlein pulse forming line is conducted, of which the output characteristics is studied, and filament current damage of GaAs PCSS working at the lock-on mode is analyzed. Experimental results show that the proposed compact pulsed power system which obtained a high voltage pulse output above 20 kV on the load is feasible.

**Key words:** pulsed power technology; ceramic planar transmission line; GaAs Photoconductive Semiconductor Switches; laser diode; Blumlein line

脉冲功率技术是将脉冲能量进行压缩, 获得高功率、短脉冲的技术, 是应军事和民用需求发展起来的新兴技术。脉冲功率技术不但在高功率微波、加速器、强激光以及材料改性等军事领域具有重要作用, 而且在生物医疗、食品灭菌、污水处理等民用技术领域也具有优势。目前大多数实用脉冲功率系统装置都存在体积庞大、笨重的缺点, 研制轻便、紧凑、高重复频率脉冲功率装置是该领域技术必然趋势<sup>[1]</sup>。国外开展了较多的基于堆叠式 Blumlein 脉冲形成线的紧凑型固态脉冲功率研究。F Davanloo 等研制了功率为 50 MW~70 MW, 重复频率为 1 Hz~300 Hz 的堆叠式 Blumlein 脉冲发生器, 在匹配负载上获得了超过 80 kV 的高压脉冲<sup>[2]</sup>。M Joler 开展了基于平板 Blumlein 脉冲形成线的紧凑型脉冲功率系统的优化设计与分析<sup>[3]</sup>。G J Caporaso 等开展了介质壁加速器中堆叠式 Blumlein 紧凑型脉冲功率的研究<sup>[4-5]</sup>。近年来, 国内也开展了基于铁电陶瓷、高介电常数复合材料的固态传输线的初步研究<sup>[6-9]</sup>。这些研究都表明, 基于固态 Blumlein 脉冲形成线是研制紧凑型脉冲功率源的主要方法。由于固态传输线具有高介电常数和击穿场强(即具有高储能密度), 同时兼具低介电损耗和高电阻率等优点, 因此基于固态平板传输线的脉冲功率源装置本身具有轻便、紧凑等优点。本文开展了基于 GaAs 光导开关和陶瓷平板传输线的固态脉冲功率技术研究, 单路固态 Blumlein 线在失配设计时可输出超过 20 kV 脉冲电压, GaAs 光导开关的非线性导通容易导致光导开关热击穿损坏。

收稿日期: 2013-05-05; 修回日期: 2013-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11035004); 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2013A0402018); 核能开发项目

## 1 关键部件及主要技术

### 1.1 固态陶瓷平板传输线

传输线是高功率脉冲技术的主要部件。采用陶瓷或复合陶瓷等材料制成的固态平板传输线,其介电常数相对较大且较易实现可调,具有体积较小、轻便的优点<sup>[10]</sup>。对于  $1 < w/d < 10$  的平板传输线结构,其结构阻抗  $Z$  为:

$$Z = 377 \frac{d}{d+w} \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (1)$$

平板传输线的电长度  $\tau_0$  为:

$$\tau_0 = \frac{l \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{c} \quad (2)$$

平板传输线的储能密度  $w$  为:

$$w = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2} E^2 \quad (3)$$

式中:  $d$  为平板传输线间距;  $\mu_r$  为介质磁导率;  $\epsilon_r$  为相对介电常数;  $l$  为平板传输线几何长度;  $c$  为光速;  $E$  为平板传输线场强。  $\epsilon_r$  越大,

平板传输线储能密度越高,传输线结构阻抗越低,更易获得短脉冲。陶瓷材料具有从数十至数千的相对介电常数,因此采用陶瓷类介质材料作为储能介质具有很大优势,也使研制紧凑型固态脉冲功率实用系统成为可能。实验用平板传输线选择  $\text{CaO-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  为原料,通过固相烧结法制得,其相对介电常数约 23,陶瓷介质几何尺寸为  $170 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,电极尺寸  $150 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。图 1 是实验中采用的陶瓷平板传输线的照片。



Fig.1 Solid-state ceramic planar transmission lines  
图 1 固态陶瓷平板传输线

### 1.2 高功率 GaAs 光导开关

在脉冲功率系统中,开关起着重要的作用,不仅决定了脉冲功率装置的输出特性,而且是研制脉冲功率系统成败的关键。相对于传统开关,光导半导体开关(PCSS)具有响应速度快(ps 量级)、极低触发抖动(ps 量级)、低开关电感(亚 nH 量级)、高重复频率、光电隔离、结构简单紧凑等优点<sup>[11]</sup>。GaAs 光导开关一般工作在线性模式,因此所需触发激光光能低( $10^{-6} \text{ J} \sim 10^{-5} \text{ J}$ )。在光通信、冲击雷达、超宽带技术、THz 技术、紧凑型脉冲功率系统、超高速电子学和瞬态电磁波技术有着广阔的应用前景。由于光导开关结构简单紧凑,因此在研制紧凑型脉冲功率系统时,光导开关扮演着十分关键的角色。

实验用 GaAs 材料电阻率大于  $2 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ ,载流子迁移率大于  $5000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,位错密度小于  $1000 \text{ EPD}/\text{cm}^2$ 。光导开关电极结构为异面结构,电极是采用磁控溅射的方法在 GaAs 表面沉积  $\text{Ge}300 \text{ nm}/\text{Ni}100 \text{ nm}/\text{Au}2500 \text{ nm}$  的复合金属层。实验用光导开关有 2 种尺寸,分别是体积为  $9 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ ,开关电极间隙为  $3 \text{ mm}$  和体积为  $12 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ ,开关电极间隙为  $6 \text{ mm}$ 。当红外激光照射到 GaAs 光导开关表面时,GaAs 材料中产生大量的电子-空穴对,在偏置电压的作用下,载流子定向移动,引起开关非线性导通,图 2 是光导开关的结构示意图和实验用 GaAs 光导开关。

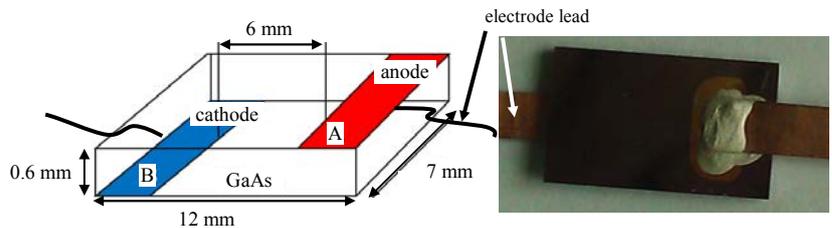
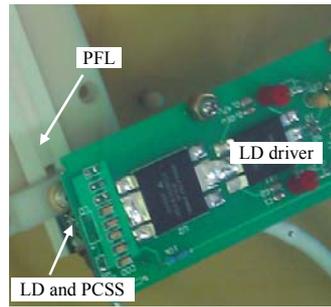


Fig.2 GaAs photoconductive semiconductor switches  
图 2 GaAs 光导开关

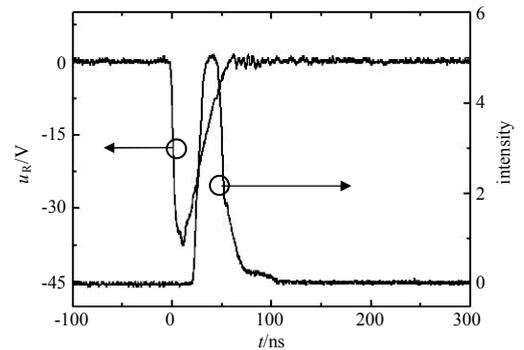
### 1.3 激光二极管触发系统

GaAs 光导开关导通需要必不可少的 2 个条件: a) 偏置电压; b) 触发激光。当偏置电压与触发激光能量均超过其阈值时, GaAs 光导开关才能出现非线性导通。目前大多数研究中<sup>[12-14]</sup>,多采用红外激光器产生的高能激光(mJ 量级)触发 GaAs 光导开关。随着半导体技术的发展,基于半导体技术的激光二极管产生的红外激光(激光能量约为数  $\mu\text{J}$  至数十  $\mu\text{J}$  量级)也能够触发 GaAs 光导开关。采用激光二极管来触发光导开关其优点在于:首先,激光二极管触发系统结构简单紧凑,更符合紧凑型脉冲功率系统研制的需求;其次,激光二极管触发系统成本低。实验中,利用高功率脉冲激光二极管产生波长为  $905 \text{ nm}$ ,能量为数  $\mu\text{J}$  至数十  $\mu\text{J}$  的红外激光,触发 GaAs 光导开关,使光导开关工作在线性模式下。当开关两端偏置电压为数十 kV 的脉冲高压时,开关导通电流可达数百 A 至 kA 量级,输出脉冲的峰值功率可达数十 MW 量级。

由于光导开关电极间隙大,采用单个激光二极管触发光导开关出现开关不导通的情况。将 2 个激光二极管串联,这样就使组合激光二极管发射出来的激光能够照射到光导开关整个间隙区域,这种方式下,光导开关能够稳定导通。图 3 是激光二极管触发系统和激光二极管的输出波形,其中  $u_R$  是测量激光二极管电流的  $1.5 \Omega$  取样电阻上的电压。



(a) triggering system of laser diode



(b) waveform of laser pulse

Fig.3 Triggering system of laser diode and waveform of laser pulse

图 3 激光二极管触发系统及激光脉冲波形

## 1.4 总体结构

利用光导开关和固态平板传输线,连接成高电压转换效率的 Blumlein 脉冲形成线结构,采用脉冲激光二极管触发光导开关,其总体结构示意图如图 4。直流或脉冲高压电源对 Blumlein 脉冲形成线充电,连接在其中一根固态平板传输线的 GaAs 光导开关获得偏置电压,当激光二极管触发系统输出的红外激光照射到光导开关后,Blumlein 脉冲形成线对负载放电,负载  $R$  上的电压经衰减器进入示波器测量。

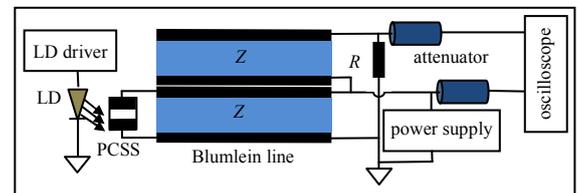


Fig.4 Schematic diagram of overall configuration

图 4 总体结构示意图

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 单路 Blumlein 线输出特性

在前期实验中,开展的是直流偏置电压下 Blumlein 脉冲形成线输出特性研究,图 5 是 3 mm GaAs 光导开关在直流偏置高压下放电时 Blumlein 脉冲形成线获得的脉冲输出波形。直流高压电源对传输线充电至约 10 kV, GaAs 光导开关在红外激光的照射下非线性导通,Blumlein 脉冲形成线输出半高宽约为 11 ns, 前沿约为 4 ns, 幅度约 6.5 kV 的高压脉冲。从示波器采集到的波形来看,高压脉冲没有平顶。导致“三角波”波形的可能原因有 2 个或其中之一: a) 来自于 Blumlein 脉冲形成线本身。GaAs 光导开关的电感,回路的连线电感都将影响波形输出的前沿,同时由于平板传输线电长度较短,当输出前沿过慢时,输出波形就可能没有平顶; b) 来自于高压脉冲的测量回路。当 Blumlein 脉冲形成线输出快前沿具有平顶的高压脉冲时,由于高压测量设备的回路电感太大(测量设备的带宽太低),同样会影响输出脉冲的前沿,甚至影响输出脉冲的幅值。实验中,通过将高压探头接地端的普通连线改成铜丝编制的带状线来减小测量回路的连线电感,增加高压探头的带宽,能够使输出波形前沿加快,幅值变高。因此在本文的紧凑型脉冲功率技术研究中,两者的电感均带来一定的影响。值得一提的是,在高压短脉冲技术研究中,不但要注意高压短脉冲发生器自身各参数对输出的影响,而且需要注意测量设备带来的误差。

在提高直流偏置电压时,回路中各部分均可能出现打火,导致直流高压最高能够加载到 13 kV(直流电压过高对光导开关的绝缘性能要求也较高,且容易造成开关自击穿破坏)。因此,将直流高压电源更换成脉冲高压电源。为

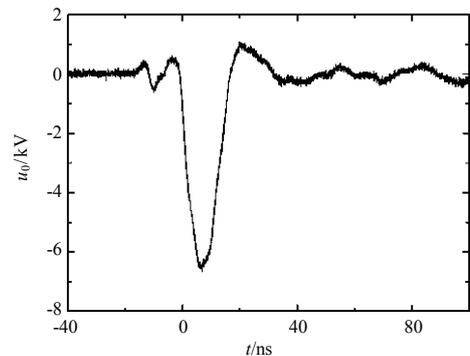


Fig.5 Waveforms of output pulse voltage at DC bias voltage

图 5 直流偏置高压下 Blumlein 脉冲形成线输出波形

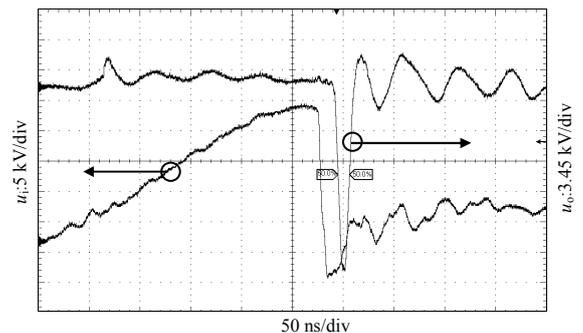


Fig.6 Waveforms of pulsed bias voltage and output pulse voltage

图 6 脉冲偏置电压及输出脉冲电压波形

了提高放电效率( $\eta=u_o/u_i$ ),使负载上获得的输出电压尽量高,满足输出电压设计需求,采用正失配的方式提高输出电压。这样设计可以尽量减小被开关导通电阻“吃”掉的电压,从而提高输出电压。当脉冲电源充电为 21.7 kV 时,输出脉冲高压宽度为 11.3 ns,幅值达到了 21.2 kV,输入输出波形见图 6。这里的波形前沿较直流情况有所改善,是因为实验中采用了更为紧凑的 Blumlein 脉冲形成线。

实验中,直流充电和脉冲充电 2 种方式均能够实现单路 Blumlein 脉冲形成线充电,采用激光二极管触发 GaAs 光导开关,Blumlein 脉冲形成线输出高压脉冲。在直流高压下,GaAs 光导开关和陶瓷固态平板传输线容易出现沿面闪络,对开关和传输线要求较高。在脉冲高压下,充电幅值高于直流充电幅值,GaAs 光导开关可以在相对较高的电压下导通,其导通电阻相对较小。因此,在后续实验中,将主要采用脉冲充电的方式实现 Blumlein 脉冲形成线输出。

## 2.2 GaAs 光导开关热击穿

实验中,无论是直流偏置电压还是脉冲偏置电压,当加载电压过高时,都会出现光导开关爆裂的现象,分析认为:在本文的实验条件下,GaAs 光导开关主要以非线性模式导通,在光导开关非线性导通的过程中产生丝电流,丝电流引起光导开关焦耳加热,导致开关热击穿或破坏。一般来说,GaAs 光导开关非线性导通时会形成直径为数十  $\mu\text{m}$  的电流丝,丝内存在严重的电流加热。丝内温度可能迅速超过材料最高允许使用温度和熔点,致使开关失效或损伤破坏<sup>[15-16]</sup>。实验条件下,光导开关导通约数十 ns,因此忽略光导开关的热功率耗散,视为绝热过程,则丝内材料温度变化:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{m\chi} \frac{dQ}{dt} \quad (4)$$

式中: $\chi$  是 GaAs 材料的比热; $m$  为有温升的 GaAs 材料的质量; $dQ/dt$  是焦耳热功率。

同样由于光导开关导通时间很短,忽略丝内 GaAs 材料和邻近 GaAs 材料之间的热量交换,考虑成绝热过程,因此光导开关在非线形导通过程中,只有丝内材料才能获得焦耳加热,则丝内 GaAs 材料的温度升高可表示为:

$$\Delta T = \left[ \left( \frac{u_i}{Z_0 + R_{on}} \right)^2 R_{on} \Delta t \right] / (\pi r^2 L \rho \chi) \quad (5)$$

式中: $u_i$  是偏置电压; $R_{on}$  是开关导通电阻; $\Delta t$  是脉冲宽度; $r$  是电流丝半径; $L$  是开关间隙; $\rho$  是 GaAs 材料的密度。一般来说,GaAs 光导开关的导通电阻从开关的线性导通跨度到非线性导通时,电阻变化较大,但在非线性导通持续过程中,开关的导通电阻变化不明显。因此根据回路各参数(阻抗  $Z$  和负载  $R$ )和电压测量幅值(偏置电压  $u_i$  和输出电压  $u_o$ )即可计算光导开关的导通电阻值。大多数情况下,GaAs 光导开关导通时仅出现单根丝电流导通。取电流丝半径  $r=40 \mu\text{m}$ ,当偏置电压为 20 kV 时,光导开关具有约  $10 \Omega$  的导通电阻。当  $\Delta t=5 \text{ ns}$ , $L=6 \text{ mm}$ , $\rho=5.316 \text{ g/cm}^3$ ,比热  $c=0.36 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$  时,开关导通过程中,丝内 GaAs 材料的温升高达 2 220 K(约 1 947  $^\circ\text{C}$ ),而 GaAs 材料的熔点仅为 1 238  $^\circ\text{C}$ ,因此开关出现热击穿破坏是必然趋势。在这里,仅讨论了 GaAs 光导开关导通丝电流带来的损坏。实际上表面闪络、高场畴击穿以及电极的欧姆接触退化也是 GaAs 光导开关的损坏的原因。由于整个系统位于变压器油中,因此表面闪络带来的损坏较小,但欧姆接触退化带来的损坏不可避免。

## 3 结论

本文开展了基于固态陶瓷平板传输线,高功率 GaAs 光导开关和激光二极管触发系统的紧凑型固态脉冲功率技术研究实验,介绍了紧凑型固态脉冲功率系统的关键部件及技术。实验结果表明:固态平板传输线耐压超过 21.7 kV/mm,GaAs 光导开关能够在此偏压下工作,但使用寿命有限;激光二极管产生的数十  $\mu\text{J}$  量级的红外激光能够触发光导开关。研究了单路 Blumlein 脉冲形成线输出特性,分析了高压短脉冲产生技术中回路电感和测量设备电感(带宽)带来的影响。研究了 GaAs 光导开关非线性导通过程中丝电流造成的开关损坏。通过以上研究,明确了紧凑型固态脉冲功率系统研制的关键部件和主要技术。GaAs 光导开关若在紧凑型固态脉冲功率系统中大规模应用时,将存在较大问题,因此还需开展光导开关的导通特性研究,解决光导开关的导通问题及寿命问题。

### 参考文献:

- [1] Nunnally W C. Critical component requirements for compact pulse power system architectures[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2005,33(4):1262-1267.

- [ 2 ] Davanloo F,Collins C B,Agee F J. High-power,repitive-stacked Blumlein pulsers commutated by a single switching element[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1998,26(5):1463–1475.
- [ 3 ] Joler M. Analysis and optimization of parallel-plate blumlein line for compact pulsed-power systems[D]. New Mexico:The University of New Mexico, 2006.
- [ 4 ] Caporaso G J,Chen Y J,Sampayan S,et al. Status of the dielectric wall accelerator[C]// Particle Accelerator Conference 2009. Vancouver,Canada:[s.n.], 2009:3085–3089.
- [ 5 ] Chen Y J,Guethlein G,Caporaso G J,et al. Compact proto injector and first accelerator system test for compact proton dielectric wall cancer therapy accelerator[C]// Particle Accelerator Conference 2009. Vancouver,Canada:[s.n.], 2009:1516–1518.
- [ 6 ] XIA Liansheng,ZHANG Huang,SHI Jinshui,et al. A compact,portable pulse forming line[J]. Review of Scientific Instruments, 2008,79(8):0861131.
- [ 7 ] 夏连胜,陈德彪,张篁,等. 固态高压脉冲形成线研究[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(7):1111–1114. (XIA Liansheng,CHEN Debiao,ZHANG Huang,et al. Research on compact solid-state high voltage pulse forming line[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009,21(7):1111–1114.)
- [ 8 ] 陈德彪,刘承俊,夏连胜,等. 高介电常数复合介质固态 Blumlein 线[J]. 强激光与粒子束, 2007,19(1):174–176. (CHEN Debiao,LIU Chengjun,XIA Liansheng,et al. Solid state Blumlein line with high dielectric constant polymer-composite[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007,19(1):174–176.)
- [ 9 ] 李洪涛,刘金峰,袁建强,等. 大功率固态脉冲形成线研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(11):2906–2910. (LI Hongtao,LIU Jinfeng,YUAN Jianqiang,et al. Development progress of high-power solid-state pulse forming lines[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(11):2906–2910.)
- [10] 夏连胜,梁川,石金水,等. 固态 Blumlein 线的初步研究[J]. 高电压技术, 2003,29(2):44–45. (XIA Liansheng,LIANG Chuan,SHI Jinshui,et al. Primary research on solid Blumlein line[J]. High Voltage Engineering, 2003,29(2):44–45)
- [11] Zutavern F J,Loubriei G M,O'Malley M W,et al. Photoconductive semiconductor switch experiments for pulsed power applications[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1990,37(12):2472–2477.
- [12] Bertolucci E,Conti M,Mettivier G,et al. GaAs devices with vertical and planar structures for optically activated high-voltage switching[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1998,417(1):124–130.
- [13] SUN Yanliang,SHI Shunxiang,ZHU Yanwu,et al. A new phenomenon in GaAs photoconductive semiconductor triggered by laser diode[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007,49(9):2232–2234.
- [14] 吴朝阳,陈志刚,薛长江,等. 激光二极管触发光导开关实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(3):635–638. (WU Zhaoyang,CHEN Zhigang,XUE Changjiang,et al. Experimental research on GaAs photoconductive semiconductor switched triggered by laser diode[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(3):635–638.)
- [15] 施卫,田立强. 半绝缘 GaAs 光电导开关的击穿特性[J]. 半导体学报, 2004,25(6):691–696. (SHI Wei,TIAN Liqiang. Breakdown characteristics of semi-insulating GaAs photoconductive switch[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(6):691–696.)
- [16] 赵越,谢卫平,李洪涛,等. 影响高功率光导开关临界频率热因素的数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2010,21(11):2278–2282. (ZHAO Yue,XIE Weiping,LI Hongtao,et al. Numerical simulation on factors affecting critical frequency of high-power photoconductive semiconductor switch[J]. High power laser and particle beams, 2010,21(11):2278–2282.)

#### 作者简介:



谌 怡(1984–),男,四川省广安市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为脉冲功率技术及电子束源研究,email:ifpshen@caep.cn.

夏连胜(1970–),男,江苏省扬州市人,研究员,主要从事脉冲功率技术及电子束源研究.

王 卫(1985–),男,重庆市人,助理研究员,主要从事脉冲功率技术研究.

刘 毅(1987–),男,成都市人,研究实习员,主要从事脉冲功率技术研究.

张 篁(1981–),男,江苏省丹阳市人,助理研究员,主要从事脉冲功率技术及电子束源研究.

石金水(1964–),男,安徽省安庆市人,研究员,主要从事直线感应加速器研究.

章林文(1962–),男,福建省宁德市人,研究员,主要从事直线感应加速器、脉冲功率技术研究.