



·特种电源技术·

砷化镓光导开关的损伤形貌研究*

沙慧茹^{1,2}, 肖龙飞^{1,2}, 栾崇彪³, 冯琢云^{1,2,3}, 李阳凡^{1,2}, 孙 逊^{1,2}, 胡小波^{1,2}, 徐现刚^{1,2}

(1. 山东大学 新一代半导体材料研究院, 济南 250100; 2. 山东大学 晶体材料国家重点实验室, 济南 250100;
3. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 制作了同面型砷化镓光导开关, 并测试了其导通性能。在偏置电压 8 kV、激光能量 10 mJ、重复频率 10 Hz 的条件下, 研究了光导开关触发 10^4 次后器件表面的损伤形貌。利用激光扫描共聚焦显微镜, 对电极边缘及电极间的损伤形貌进行分析, 研究发现阳极边缘由于热积累形成热损伤, 而阴极边缘的热损伤来源于热应力, 并对电极间损伤形貌进行细致表征及分类。

关键词: 光导开关; 砷化镓; 损伤; 形貌; 热效应

中图分类号: TN36 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210579

Damage morphology of GaAs photoconductive switch

Sha Huiru^{1,2}, Xiao Longfei^{1,2}, Luan Chongbiao³, Feng Zhuoyun^{1,2,3},
Li Yangfan^{1,2}, Sun Xun^{1,2}, Hu Xiaobo^{1,2}, Xu Xiangan^{1,2}

(1. Institute of Noval Semiconduction, Shandong University, Jinan 250100, China;
2. State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China;
3. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: A lateral GaAs photoconductive switch was fabricated and its conduction performance was tested. To study device damage in long-term working environment, the switch is studied operating at 8 kV, 10 Hz triggering frequency and 10 mJ triggering energy for 10^4 times. By means of confocal laser scanning microscopy, the damage morphology of the electrode edge and between the electrodes are analyzed. It is found that the thermal damage of the anode edge was caused by thermal accumulation, and the damage of the cathode edge was caused by thermal stress. The damage morphology between electrodes is characterized and classified in detail.

Key words: photoconductive semiconductor switch, gallium arsenide, damage, morphology, heat effect

光导开关是一种新型的超快半导体开关器件, 相对于传统的高压开关器件来说, 其具有更快的响应速度、更高的重复频率、更小的触发抖动等优点^[1]。基于以上优点, 光导开关被广泛地应用到超快电子、高功率脉冲发生源、太赫兹技术、超短超快电脉冲等领域^[2-8]。在超宽高分辨率冲击雷达、高精度卫星定位和跟踪系统、导弹拦截系统、激光核聚变系统、电子对抗及电子战系统和反隐形技术等应用领域也表现出诱人的应用前景^[9]。GaAs 光导开关具有线性和非线性两种工作模式。对于线性模式来说, 材料吸收一个光子产生一对电子空穴对, 光生载流子的数量取决于光子的能量。对于非线性模式来说载流子的产生不仅依赖于触发光源, 而且还依赖于雪崩碰撞电离, 该模式所需要的触发光能量相对较小^[10-11]。随着光导开关的快速发展, 其材料从原来的第一代半导体材料硅, 逐步扩展到第二代半导体材料砷化镓、磷化铟以及第三代半导体材料碳化硅、氮化镓等。不同的材料性质决定光导开关的适用范围有所不同。砷化镓光导开关得益于高增益模式以及较快的载流子迁移率, 被广泛地应用到高频领域。目前砷化镓光导开关的可靠性成为制约其发展的重要因素。

本文通过对长时间工作条件下的砷化镓光导开关表面形貌进行分析, 研究了热效应对砷化镓光导开关失效的影响, 并通过激光扫描共聚焦显微镜分析开关电极表面的损伤形貌。通过开展上述研究工作, 可为制备高可靠性的砷化镓光导开关奠定基础。

* 收稿日期: 2021-12-30; 修订日期: 2022-04-12

基金项目: 山东省重点研发计划项目 (2019JMRH0901); 山东省重点研发计划项目 (2019JMRH0201)

联系方式: 沙慧茹, 202034074@mail.sdu.edu.cn。

通信作者: 肖龙飞, xiaolongfei@sdu.edu.cn。

1 基本原理

1.1 砷化镓光导开关制备

本实验利用电阻率为 $1 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ 的砷化镓材料制备了电极间隙 10 mm、开关厚度 1 mm 的同面型光导开关, 该结构的光导开关制作工艺相对简单, 电极距离容易测算调整, 并且传导电流更快, 使得响应速度更快, 抖动更小, 但大电流产生的热量难以分散, 丝状电流更容易对材料造成破坏。器件制备时, 通过热扩散原理在电极区域形成高掺杂层, 掺杂浓度大于 10^{20} cm^{-3} , 掺杂层能够在一定程度上抑制电流丝, 提高光导开关的寿命^[12]。电极 Ti/Pt/Au, 通过快速退火工艺形成欧姆接触。将铜箔焊接到电极位置, 并利用环氧树脂将其粘接在氮化铝陶瓷片上。具体的开关结构示意图如图 1 所示。

1.2 砷化镓光导开关测试电路图和光路图

砷化镓光导开关测试电路图和光路图如图 2 所示。我们利用可变光阑和扩束镜对激光光斑进行整形, 并通过分束镜和能量计对激光能量进行实时测量。直流电压源通过 $5 \text{ M}\Omega$ 的限流电阻给 4 nF 的电容充电。为防止电流对开关的损伤, 回路中将光导开关与 20Ω 的限流电阻串联。回路中的电流以及光导开关两端电压值分别通过内阻为 $50 \text{ m}\Omega$ 的电流采样电阻 (CVR) 和高压探头 (High-voltage Probe) 进行采集, 并通过 1 GHz 示波器对电流采样电阻 (CVR) 和高压探头 (High-voltage Probe) 采集的信号进行显示和存储。

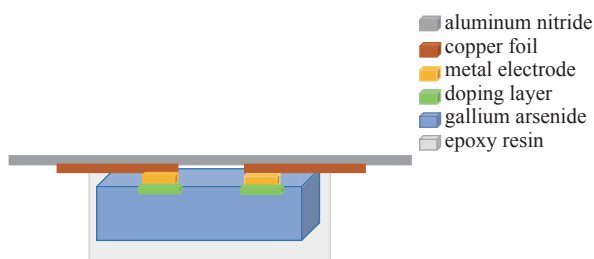


Fig. 1 Structural schematic diagram of GaAs photoconductive switch
图 1 砷化镓光导开关结构示意图

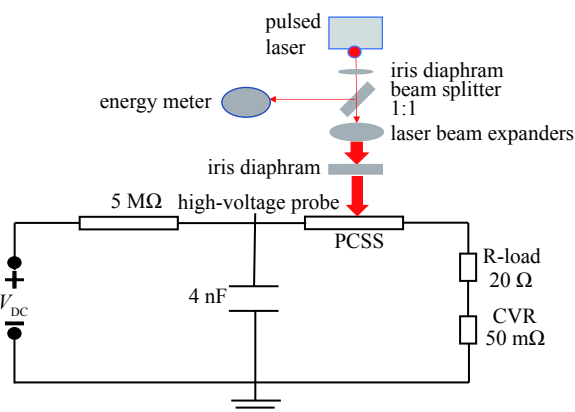


Fig. 2 Confocal response curves with different annular pupils
图 2 砷化镓光导开关测试电路图和光路图

2 实验结果与分析讨论

利用上述测试电路和光路, 对砷化镓光导开关导通情况下的电压电流信号进行采集。光导开关在触发的激光能量为 3.5 mJ 下不同偏置电压下的电流值以及光导开关的最小导通电阻值如图 3 所示, 随着开关所加偏置电压的增加, 光导开关的导通电流值逐渐增大。但是当光导开关的偏置电压加到一定阈值时, 其最小导通电阻的变化越来越小, 当偏置电压小于 4 kV/cm 时, 砷化镓开关没有出现高增益效应, 光生载流子的数目由激光能量所决定, 当偏置电压大于 4 kV/cm 时, 由于开关工作非线性模式, 材料中载流子的产生不仅依赖于激光的能量, 而且还依赖于雪崩碰撞电离产生的载流子。随着偏置电压的增加, 电子的漂移速度逐渐增大, 当电压值增大到一定程度时, 载流子的移动速度达到饱和电子漂移速度, 此时, 偏置电压变化对开关导通电阻的影响不大。通态电流和导通电阻值影响光导开关的能量转换。光导开关在偏置电压为 8 kV 时不同触发能量下的电流值以及光导开关的最小导通电阻值如图 4 所示, 随着激光能量的增加, 光生载流子的数目大大提高, 因此激光产生的光生载流子对于导通电阻的贡献起到重要作用, 随着激光能量的继续增加, 材料中产生的载流子数目将不再发生变化, 因此导通电阻的数值将趋于稳定状态。

图 5 为光导开关在偏置电压为 8 kV , 触发频率 10 Hz , 触发能量为 10 mJ 下的电流值与触发次数的关系图, 由于主要是观察光导开关在长时间过程中的电流变化情况, 因此我们将开关测试次数设定为 10^4 次, 在前 5000 次, 每 10 次触发取一个电流值, 当开关超过 5000 次轰击时, 每 50 次触发取一个电流值, 具体结果如图 5 所示。当开关经过 10^4 次触发后, 利用共聚焦激光显微镜对开关损伤表面进行形貌分析, 具体结果如图 6 所示。图 6 中的 3 个小图代表了开关电极间不同的三种损伤效果形貌图。如图 5 所示, 随着触发次数的增加, 光导开关的导通电流值逐渐下降, 结合图 6 开关表面损伤形貌图, 表明材料表面产生的损伤, 影响了光导开关的稳定性。阳极边缘的损伤程

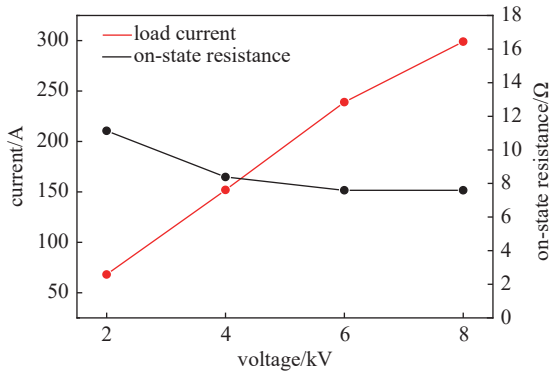


Fig. 3 Current value of photoconductive switch under different bias voltage and minimum on-resistance value of photoconductive switch

图3 光导开关在不同偏置电压下的电流值及光导开关的最小导通电阻值

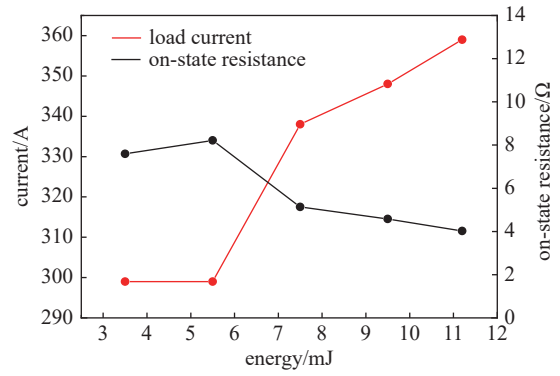


Fig. 4 Current value of photoconductive switch at different triggering energies and minimum on-resistance value of photoconductive switch

图4 光导开关在不同触发能量下的电流值及光导开关的最小导通电阻值

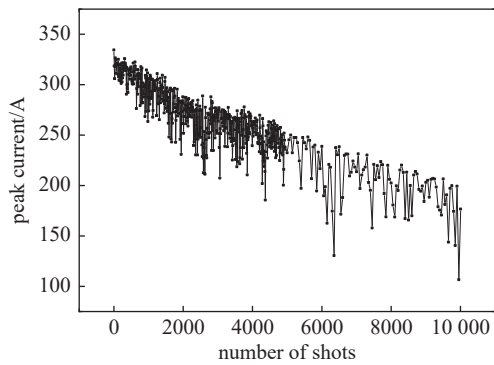


Fig. 5 Current value of photoconductive at different triggering number

图5 光导开关电流值与触发次数的关系图

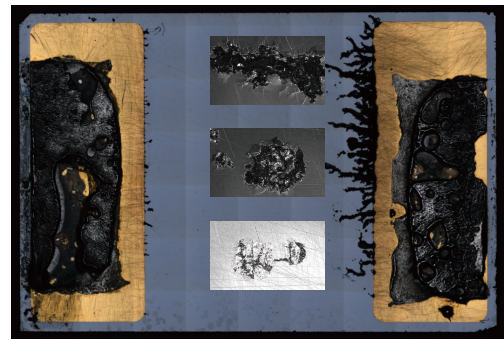


Fig. 6 Analysis of damaged surface morphology of switches

图6 开关损伤表面形貌图

度大于阴极边缘,这主要是由于热损伤产生的。光生载流子在强电场的作用下变为热载流子,电子迁移率高,使得阳极附近的电子与电子以及电子与晶格之间的碰撞加剧,导致阳极区域附近温度大幅度提高,因此在阳极区域附近的热损伤是影响高压高频下器件性能的重要因素。光导开关在导通状态下的热量变化为^[13-14]

$$\Delta T = \frac{nqv_d E}{\rho V c_v} \Delta t \quad (1)$$

式中: Δt 代表开态时间; ρ 代表砷化镓密度; V 代表光导开关体积; c_v 为 GaAs 材料比热容; n 为电子浓度; q 为电子电荷; v_d 为电子漂移速度; E 为偏置电场。

通过式(1)可以看出,开关导通状态时温度变化正比于载流子浓度、漂移速度以及电场强度。当开关所加偏置电压不变的情况下,载流子漂移速度不发生变化,因此开关温度变化依赖于载流子浓度。根据流柱模型^[13],初级流柱的产生是在阴极附近,因此在阴极边缘处也会由于高电荷密度产生损坏,并且该损伤区域向阳极发展,流柱前端形成大量的热电子,并且场强相对较高,因此相对流注中段其前端产生的热量变化更大,从而引起砷化镓材料的损伤,具体如图7所示。根据先前的研究报道,电极接触区域的局部高场强造成的热积累导致开关长时间连续工作后出现局部区域的损伤^[14];开关损伤分为电极损伤和电极间损伤,电极间损伤可以分为介质的热击穿和电击穿,开关表面出现贯穿介质的丝状痕迹^[15],但并未对电极间损伤形貌进行细致表征及分类。

此外两电极之间的电流丝通道,以及光损伤问题,使得砷化镓光导开关的损伤有不同的表现形式,损伤形貌如图8所示。在电极之间会存在不同形式的损伤方式,大体可以分

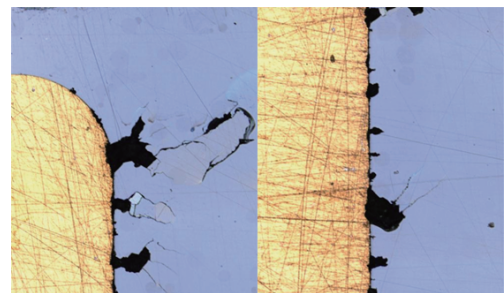
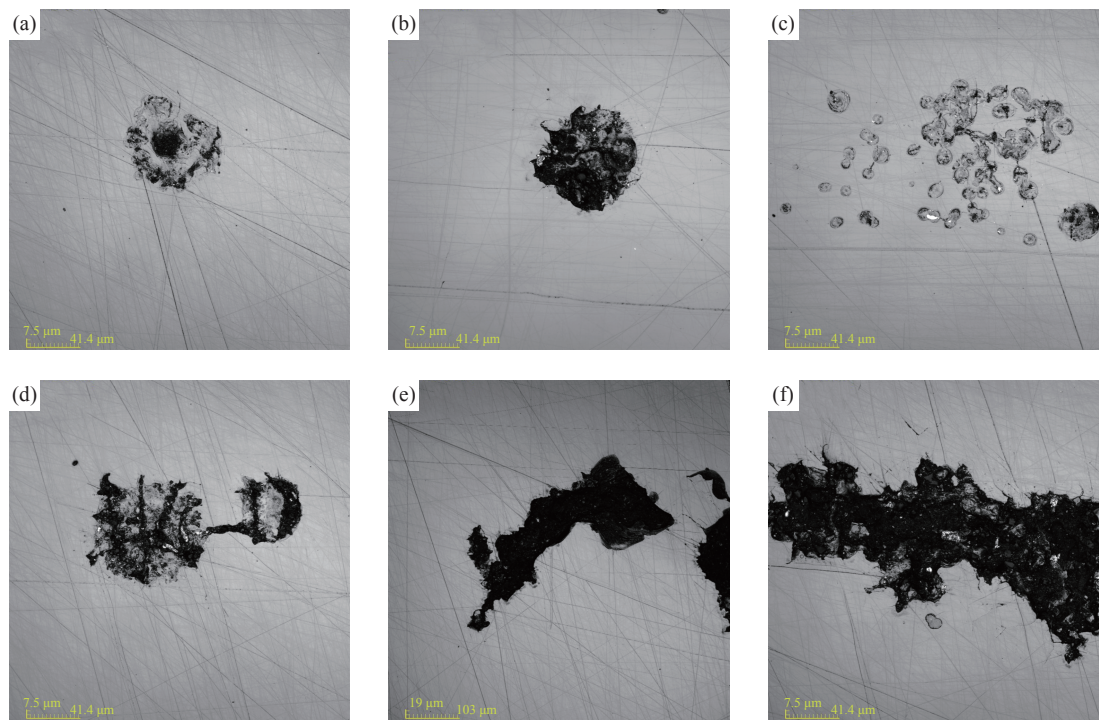


Fig. 7 Diagram of damage between two electrodes of switch

图7 热应力所引起的破坏

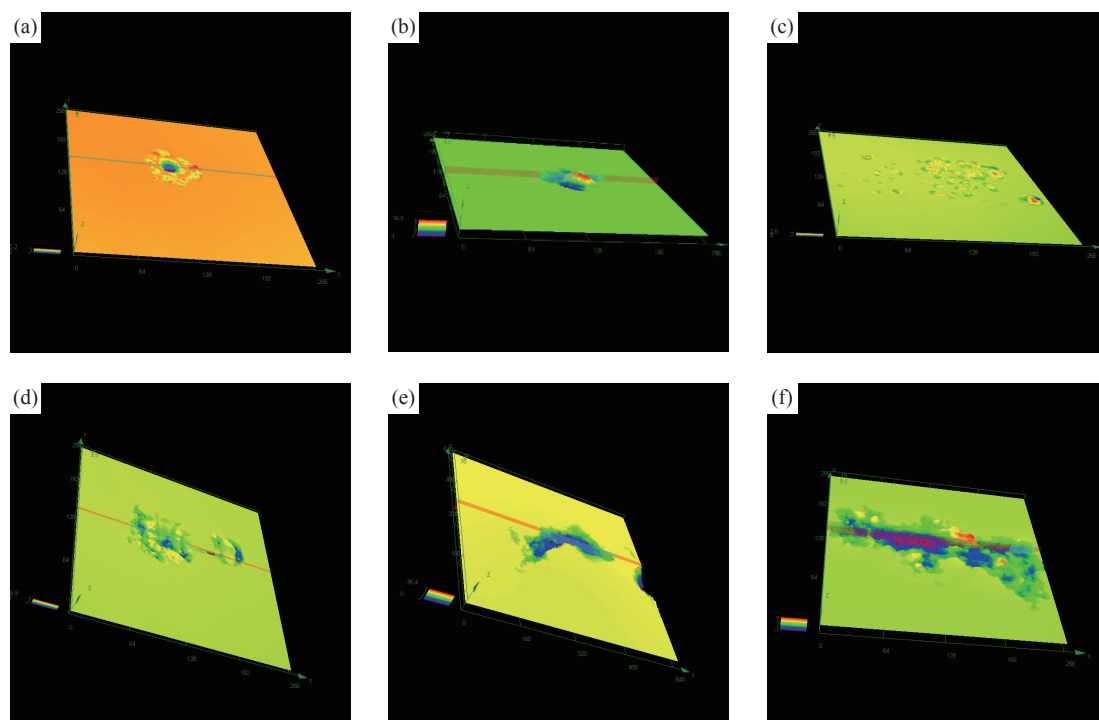
为以下4类:单一点损伤,如图8(a)、图8(b)所示;弥散型点损伤,如图8(c)所示;孪生点损伤,如图8(d)所示;条形损伤,如图8(e)、图8(f)所示。利用激光扫描共聚焦显微镜的断层扫描模式对不同图形的损伤进行三维分析,如图9所示。通过三维形貌图形所示,在电极之间存在多种形式的损伤形貌,可以将其化分为以下两类:光斑引起的以及电流丝引起的损伤结构。



(a), (b) single point injury; (c) diffuse point injury; (d) twin point injury; (e), (f) strip damage

Fig. 8 Damage caused by thermal stress

图 8 两个电极之间不同形式的损伤



(a), (b) single point injury; (c) flake point injury; (d) twin point injury; (e), (f) strip damage

Fig. 9 3-D effect map of damage layer

图 9 损伤层面三维效果图

对于点损伤结构(图9(a)~图9(c)),可以分为三种类型,分别为凹坑型、凸起型和弥散型。在强电场作用下,半绝缘砷化镓深能级中心 EL_2 存在电子俘获和辐射两种作用,当开关工作在非线性区域时,砷化镓材料产生大量的光生载流子,导致陷阱向导带发射的电子数目小于陷阱所俘获的电子数目。由于陷阱对于载流子的复合作用,使得局部区域产生大量的空间电荷,随着空间电荷的积累,电子的热运动加剧,进而形成大量的热电子。在热电子的作用下,打破了Ga-As键,As的挥发使得在该区域产生一种向下烧蚀的凹坑状缺陷,但是对于某些点损伤区域,遇冷后有又重新凝聚到中心位置,导致中心位置相对于材料表面有一定的凸起,因此认为该烧蚀损伤结构是由于电损伤和光损伤共同决定的。对于条形损伤结构及孪生点损伤结构,可归结为电流丝效应引起的损伤结构。当砷化镓光导开关工作在非线性工作模式下时,电流丝的理论模型有很多种^[16-21],其中光生电荷畴理论认为畴的前端电子积累^[22-23],并且该区域的电场更容易达到雪崩电离阈值,并形成类似球状的高浓度电子区域,根据式(1)可知载流子的浓度影响开关的温度变化,当温度达到一定值时,同样打破了Ga-As键,As的挥发形成烧蚀区域,在某些位置形成点损伤,当开关持续工作时,损伤会在沿着电流通道继续形成点损伤,得到如孪生点损伤结构(图8(d))。条形烧蚀形貌是由于导电通道的局部载流子密度过高,温度升高破坏Ga-As键,形成烧蚀坑。因此高电荷密度影响器件的可靠性。

3 结 论

制作了同面型砷化镓光导开关,并通过热扩散技术在电极区域形成良好的欧姆接触。开关工作状态为偏压8 kV,激光重复频率10 Hz,激光能量10 mJ,研究触发 10^4 次后开关表面形貌的损伤机制。利用激光扫描共聚焦显微镜,对电极边缘及电极间的损伤形貌进行分析,发现阳极边缘由于热积累形成热损伤,阴极边缘由于热应力产生损伤,以及在电极之间产生的点状及条状的烧蚀损伤。发现电损伤和光损伤导致三种不同的点损伤形貌及电流丝引起的热烧蚀导致的孪生点状和条状的损伤结构。因此增加器件散热装置,降低电流通道中的电荷密度,可以增加砷化镓光导开关的可靠性。

参考文献:

- [1] Shi Wei, Jiang Huan, Li Mengxia, et al. Investigation of electric field threshold of GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by 1.6 μ J laser diode[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 042108.
- [2] Loubriel G M, Zutavern F J, Baca A G, et al. Photoconductive semiconductor switches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, 25(2): 124-130.
- [3] 施卫, 闫志巾. 雪崩倍增GaAs光电导太赫兹辐射源研究进展[J]. *物理学报*, 2015, 64: 228702. (Shi Wei, Yan Zhijin. Research progress on avalanche multiplication GaAs photoconductive terahertz emitter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64: 228702)
- [4] Liu Xiaorong, Li Song. The effect of photoconductive semiconductor materials in improving the resolution of femtosecond streak camera[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 772: 012060.
- [5] Islam N E, Schamiloglu E, Fleddermann C B. Characterization of a semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch for ultrawide band high power microwave applications[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(14): 1988-1990.
- [6] Mar A, Bacon L D, Loubriel G M. Device technology investigation: subsystems packaging study: feasibility of PCSS-based pulser for highly portable platforms[R]. SAND2002-2059, 2002: 2002-2059.
- [7] Glover S F, Zutavern F J, Swalby M E, et al. Pulsed- and DC-charged PCSS-based trigger generators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2701-2707.
- [8] Nunnally W C. Critical component requirements for compact pulse power system architectures[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(4): 1262-1267.
- [9] 严成锋, 施尔畏, 陈之战, 等. 超快大功率SiC光导开关的研究[J]. *无机材料学报*, 2008, 23(3): 425-428. (Yan Chengfeng, Shi Erwei, Chen Zhizhan, et al. Super fast and high power SiC photoconductive semiconductor switches[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2008, 23(3): 425-428)
- [10] Tian Liqiang, Shi Wei, Feng Qingqing. Breakover mechanism of GaAs photoconductive switch triggering spark gap for high power applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110: 094507.
- [11] Wang Langning, Jia Yongsheng, Liu Jinliang. Photoconductive semiconductor switch-based triggering with 1 ns jitter for trigatron[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2018, 3(5): 256-260.
- [12] Mar A, Loubriel G M, Zutavern F J, et al. Doped contacts for high-longevity optically activated, high-gain GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(5): 1507-1511.
- [13] Shi Wei, Ma Cheng, Li Mengxia. Research on the failure mechanism of high-power GaAs PCSS[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(5): 2427-2434.
- [14] 刘宏伟, 袁建强, 刘金锋, 等. 大功率GaAs光导开关寿命实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(4): 795-798. (Liu Hongwei, Yuan Jianqiang, Liu Jinfeng, et al. Experimental investigation on lifetime of high power GaAs photoconductive semiconductor switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010,

22(4): 795-798)

- [15] 孙飞翔, 何晓雄, 常润发, 等. GaAs光导开关损伤机理研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 497-501. (Sun Feixiang, He Xiaoxiong, Chang Runfa, et al. GaAs PCS's injuring mechanism[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40(4): 497-501)
- [16] Hjalmarson H P, Kambour K, Myles C W, et al. Continuum models for electrical breakdown in photoconductive semiconductor switches[C]//16th IEEE International Pulsed Power Conference. 2007: 446-450.
- [17] Kambour K, Hjalmarson H P, Zutavern F J, et al. Simulation of current filaments in photoconductive semiconductor switches[C]//15th IEEE International Pulsed Power Conference. 2005: 814-817.
- [18] 张同意, 石顺祥, 赵卫, 等. 深能级杂质对光导半导体开关非线性特性的影响[J]. 光子学报, 2003, 31(1): 121-123. (Zhang Tongyi, Shi Shunxiang, Zhao Wei, et al. The effect of deep level impurity on the nonlinear performances of photoconductive semiconductor switches[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 31(1): 121-123)
- [19] Brinkmann R P, Schoenbach K H, Mazzola M S, et al. Analysis of time-dependent current transport in an optically controlled Cu-compensated GaAs switch[C]//Proceedings of SPIE 1632, Optically Activated Switching II. 1992: 262-273.
- [20] 刘鸿, 阮成礼. 本征砷化镓光导开关中的流注模型[J]. 科学通报, 2008, 53(18): 2181-2185. ((Liu Hong, Ruan Chengli. Flow model in intrinsic gallium arsenide photoconductive switch[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(18): 2181-2185)
- [21] Ma Cheng, Shi Wei, Li Mengxia, et al. Impact of current filaments on the material and output characteristics of GaAs Photoconductive Switches[J]. IEEE Transactions on Electron Device, 2014, 61(7): 2432-2436.
- [22] Hu Long, Xu Ming, Li Xin, et al. Performance investigation of bulk photoconductive semiconductor switch based on reversely biased p⁺-i-n⁺ structure[J]. Transactions on Electron Devices, 2020, 67(11): 4963-4969.
- [23] Ma Cheng, Shi Wei, Dong Chengang, et al. 998 multiplication rate of GaAs avalanche semiconductor switch triggered by 0.567 nJ[J]. IEEE Access, 2020, 8: 116515-116519.