

GaAs 光导开关电极制备工艺及性能测试

党鑫, 杨向红, 孙岳, 刘康, 朱莉, 胡龙, 李昕, 刘卫华, 王小力
(西安交通大学电子与信息学部, 710049, 西安)

摘要: 为了解决目前 GaAs 光导开关成品率低、稳定性差和可靠性低等问题,提出了 GaAs 光导开关的关键电极制备工艺解决方案。该方案首先以半绝缘 GaAs 材料作为衬底,利用电子束蒸镀机在 GaAs 衬底上沉积 Ni/Ge/Au/Ni/Au 金属复合层作为光导开关电极,并对电极进行快速退火使其与 GaAs 衬底形成欧姆接触;然后,为了隔绝光导开关与外界环境,在 GaAs 衬底上沉积氮化硅作为钝化保护层;最后,通过在欧姆接触电极上外延场板的工艺,制备出电极间距为 4 mm 的异面 GaAs 光导开关。对所制备的 GaAs 光导开关的测试结果表明:在 400 ℃ 退火条件下,电极的接触电阻率最低可达到 $0.019\ 5\ \Omega\cdot\text{cm}^2$;采用 $50\ \Omega$ 单脉冲形成线,在工作频率为 1 kHz、偏置电压为 22 kV 时,光导开关的输出电压脉冲为 10 kV,脉冲上升时间为亚 ns 量级。采用该制备方法制备的 GaAs 光导开关的成品率高达约 98%,可稳定工作上万次。

关键词: GaAs 光导开关;电极制备;欧姆接触;性能测试;可靠性

中图分类号: TN305 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202202019 **文章编号:** 0253-987X(2022)02-0184-07



OSID 码

Preparation Technology and Performance Test of GaAs Photoconductive Semiconductor Switch Electrodes

DANG Xin, YANG Xianghong, SUN Yue, LIU Kang, ZHU Li, HU Long,
LI Xin, LIU Weihua, WANG Xiaoli
(Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A key electrode preparation process solution of GaAs photoconductive semiconductor switch is proposed to solve the current problems of low yield, poor stability and low reliability of GaAs photoconductive semiconductor switches. In this scheme, the semi-insulating GaAs material is firstly used as substrate, and the Ni/Ge/Au/Ni/Au metal composite layer is deposited on GaAs substrate by electron beam evaporation machine as electrode of GaAs photoconductive semiconductor switch, and then the electrode is annealed quickly to form ohmic contact with the GaAs substrate; then, in order to isolate the photoconductive semiconductor switch from the external environment, silicon nitride is deposited on the GaAs substrate as a passivation protective layer; finally, a GaAs photoconductive semiconductor switch with 4 mm gap between two bilateral electrodes is fabricated by epitaxial field plate on ohmic contact electrode. Test results of the GaAs photoconductive semiconductor switch show that the minimum specific contact resistivity of the electrode can reach $0.019\ 5\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ when annealed at 400 ℃; When the single pulse forming line of $50\ \Omega$ is adopted, the operating frequency is 1 kHz and the bias voltage

is 22 kV, the output voltage pulse of photoconductive semiconductor switch is 10 kV and the pulse rise time is sub ns. The yield of GaAs photoconductive semiconductor switch prepared by this preparation method is about 98%, and it can work stably for tens of thousands of times.

Keywords: GaAs photoconductive semiconductor switch; electrode preparation; ohmic contact; performance test; reliability

光导开关技术自 20 世纪 70 年代诞生以来,以其具有超快响应、高功率和低抖动等优势成为该技术领域研究热点^[1-3]。目前可用作制备光导开关的衬底材料有:第一代半导体 Si、第二代半导体 GaAs 和 InP、第三代半导体 SiC 和 GaN,其中应用最广泛的材料是 GaAs^[4-6]。

1987 年,研究者发现 GaAs 光导开关可工作于非线性模式下,在对 GaAs 光导开关施加更高偏置电场(4~10 kV/cm)时,即使撤去激光源,GaAs 光导开关仍可以保持导通状态,且其输出特性不强烈依赖于触发激光源。这是由于 GaAs 光导开关在非线性工作模式下,激光触发产生的光生载流子在电场作用下形成了强烈的雪崩电离现象^[7-8]。GaAs 光导开关在非线性工作模式下可降低 3~5 个量级的触发能量,显著降低了触发系统的复杂度,有利于光导开关阵列化技术的应用^[9-10]。同时,低能量触发 GaAs 光导开关在放电等离子体、高功率微波、气体开关触发等方面有重要的应用价值^[11-14]。

GaAs 光导开关因其具有众多的优点而在各领域得到越来越广泛的应用,但其寿命限制了它的实际应用^[15-17]。对光导开关寿命影响的重要因素之一为欧姆接触电极的制备技术,电极的欧姆接触质量将直接影响光导开关的电学响应特性,进而决定它的可靠性。半导体-金属接触理论研究表明:由于半导体和金属材料之间存在势垒差,一般的半导体-金属接触会形成电阻很大的肖特基接触,这会导致光导开关的接触电阻增大,从而降低光导开关的效率、性能和寿命^[18-21],因此,为提高光导开关的可靠性,就需要电极具有良好的欧姆接触。目前就国内外光导开关的研究现状对比而言^[22-25],国内制备的光导开关在性能方面较差,尤其是基于半绝缘衬底的相关工艺报导较少,因此,半绝缘 GaAs 光导开关的工艺探索就显得至关重要,这不仅对推动工艺研究有指导意义,同时也可提升 GaAs 光导开关的性能提供借鉴。

为了解决目前 GaAs 光导开关的成品率低和可靠性差、稳定性低等问题,本论文提出了 GaAs 光导开关的关键电极制备工艺解决方案。首先通过半导

体工艺制备技术在半绝缘 GaAs 衬底上制备欧姆接触电极,并对其采用快速热退火工艺得到较低的比接触电阻率,获得良好的光导开关欧姆接触特性,然后采用外延金属工艺得到场板电极结构的 GaAs 光导开关器件,提高了光导开关的可靠性。测试结果表明:在 1 kHz 的工作频率下,GaAs 光导开关可输出 10 kV 脉冲电压,可稳定工作上万次,从而验证了工艺的可靠性。

1 GaAs 光导开关电极工艺

GaAs 光导开关的常规结构有 3 种类型:体结构、同面结构和异面结构。本文将以异面、半绝缘衬底的 GaAs 光导开关作为研究对象,半绝缘衬底具有较高的电阻率(大于 $10^7 \Omega \cdot \text{m}$)和电子迁移率(大于 $6\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$),可用于制备性能良好的光导开关。

GaAs 光导开关的欧姆接触电极形状一般为矩形,其结构简单,但耐压能力差,在高功率工作条件下,电极边缘直角处容易击穿空气,降低光导开关的可靠性。矩形电极由于电极边缘处曲率半径过小会导致电场过于集中,光导开关承受电场能力变弱,而适当增大电极边缘处的曲率半径可以均匀电场,提高光导开关的耐压能力,因此本文设计的光导开关电极形状为圆弧形电极,GaAs 光导开关的基本结构示意图和剖面图如图 1 所示。异面结构 GaAs 光导开关的电极位于衬底两侧,电极之间有一定的距

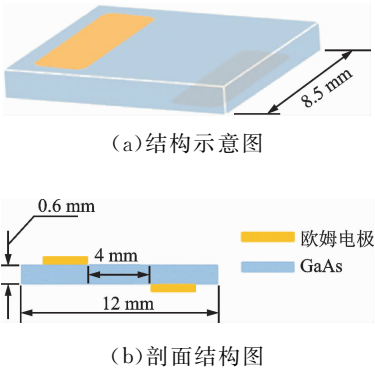


图 1 GaAs 光导开关基本结构示意图及其剖面图
Fig. 1 Schematic diagram and section of the basic structure of the GaAs photoconductive semiconductor switch

离,该设计是由于光导开关可通过控制电极的间距来调整其工作电压,因此,异面结构光导开关在性能提升方面更具优势,本文制备的 GaAs 光导开关电极间距为 4 mm。

图 2 为 GaAs 光导开关的主要制备流程图,其关键制备工艺为欧姆接触电极和场板。

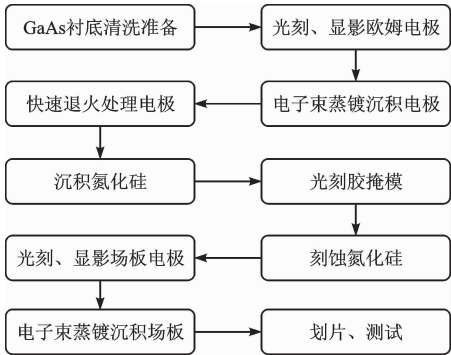


图 2 GaAs 光导开关的主要制备流程

Fig. 2 Flow chart of main preparation of GaAs photoconductive semiconductor switch

1.1 Ni/Ge/Au/Ni/Au 欧姆接触电极体系

欧姆接触技术是研制 GaAs 光导开关的关键之一,对光导开关性能影响较大。目前国内研制的光导开关普遍采用的是 Ge/Ni/Au 标准欧姆电极体系,该电极在高功率工作条件下,容易发生横向和纵向扩散形成尖峰,导致欧姆接触电极形貌平整度差、稳定性低,从而使电极退化,影响光导开关正常工作。通常情况下,光导开关的欧姆接触电极体系应包括欧姆接触金属层、掺杂金属层、黏附金属层、阻挡金属层和导电金属层这 5 个部分,每一金属层各自发挥作用又相辅相成。

Ni/Ge/Au/Ni/Au 为欧姆接触电极沉积金属体系,其各金属层的厚度依次为 1.5 nm、35 nm、104 nm、26 nm、130 nm, GaAs 光导开关欧姆接触体系示意图如图 3 所示。其中,最底层 Ni 作为黏合层金属,对改善合金的形貌和平坦接触起重要作用,同时对其他金属层具有催化和媒介的作用,黏附层厚度相对较薄,过厚会阻挡上层金属对 GaAs 的掺杂反应作用;Ni 的上层金属 Ge 和 Au 均作为掺杂层金属,Ge 进入 GaAs 中填补 Ga 空位并起施主作用,Au 作为反应活性金属,扩散进入 GaAs 中起着受主的作用,从而使光导开关具有良好的欧姆接触,这是由于金属层和半导体之间的电荷转移可以形成具有线性电流-电压关系的低接触电阻率的欧姆接触。Ge/Au 掺杂金属层的厚度要控制在合适的范围内,

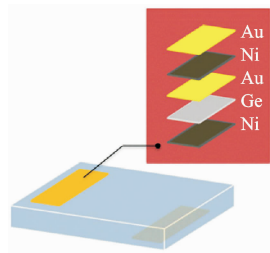


图 3 GaAs 光导开关欧姆接触体系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ohmic contact system of GaAs photoconductive semiconductor switch

以保证最低的接触电阻率;第 4 层 Ni 作为阻挡层金属,其熔点高、扩散能力较低,稳定性高,可以阻止上下接触金属层之间各元素原子之间的相互扩散,提高了欧姆接触电极体系的可靠性和稳定性。Ni 厚度相对较厚,既要阻挡下层金属向外扩散反应,同时也要隔绝上层金属向内扩散反应,该层对欧姆接触电极体系稳定工作至关重要;最外层 Au 作为导电层金属,厚度为欧姆接触体系中最厚的部分,可以使欧姆接触体系保持具有稳定低阻的外接触,防止下层金属氧化,同时作为导电层,与外电路连接。

1.2 场板体系

目前大多数光导开关的制备工艺是以欧姆接触电极作为光导开关与外电路连接的电极,这样的制备工艺有两个缺点:一是欧姆接触层厚度较薄,不易于焊接测试;二是光导开关的耐压能力差,致使光导开关工作的稳定性大大降低。对于欧姆接触电极而言,每部分承受的电场不同,尤其是当 GaAs 光导开关在非线性工作模式下时,产生电流丝一侧的电极会出现明显脱落、烧蚀现象,原因就在于该电极边缘区域承受过高电场,因此光导开关在电极边缘某些地方容易发生击穿,而为了提高击穿电压,可以通过改变光导开关电极边缘形貌或微调电极结构,从而调节和控制光导开关在表面或者界面的电场分布。

本文在制备工艺流程中新增加了一项工艺步骤——场板制备,即在欧姆接触电极上沉积金属外延层,其结构如图 4 所示。场板电极形状和欧姆接触电极形状一致,增加长宽尺寸,采用这种结构可以

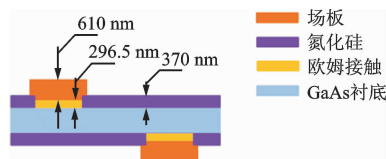


图 4 GaAs 光导开关场板结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of field plate of GaAs photoconductive semiconductor switch

通过增大电极的曲率半径来均匀电场,以此来达到增大光导开关耐压,同时,增加场板层也有利于光导开关焊接测试,可整体提高光导开关工作的可靠性和稳定性。

2 GaAs 光导开关工艺讨论

2.1 欧姆接触电极工艺

本文采用电子束蒸镀机制备欧姆接触电极,该方法制备出的接触电极形貌良好,接触质量高。蒸镀完成后,由于蒸发沉积的金属与半导体衬底之间的界面没有形成牢固的结合,且金属和半导体之间没有相互扩散形成欧姆接触,因此需要进行快速退火工艺,即对欧姆接触金属体系进行合金化,同时对各层金属元素进行激活并使其相互作用。快速退火工艺使得金属与半导体的界面结构更加稳定和牢固,同时可以降低接触电阻,形成良好的欧姆接触。

合金化后的欧姆接触电极质量可以通过电极的伏安特性或者接触电阻率加以评价,本文选择接触电阻率进行测量。快速退火是降低光导开关电极接触电阻率的重要工艺之一,其关键变量为退火温度。本文选择 5 组重复实验来探究电极的最佳退火温度,在采用相同电极制备工艺的条件下,制备 5 组试样,然后测量不同退火温度下样品电极的接触电阻率,退火温度选择为 380 °C、400 °C 以及 425 °C。同时为了表明退火工艺的必要性,增加未退火的样品进行对比。其测试结果如图 5 所示,由该图可以确定电极的最佳退火温度为 400 °C,其接触电阻率最小可达 $0.0195\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 。

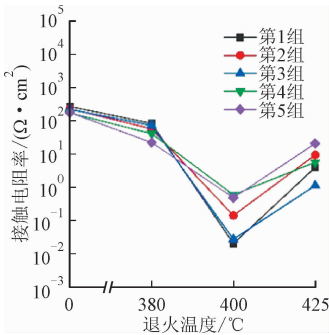


图 5 退火后 GaAs 光导开关的欧姆接触电阻率
Fig.5 Ohmic contact resistivity of GaAs photoconductive semiconductor switch after rapid thermal annealing

欧姆电极经退火合金化后,各层金属进行不同程度的反应,这会造成电极表面局部粗糙度(用符号 R_a 表示)增加。本文用 H 表示表面形貌的起伏粗糙高度,图 6 为欧姆接触电极退火后的原子力显微

镜(AFM)形貌表征图,其表面平均粗糙度 R_a 为 12.7 nm、均方根粗糙度 R_q 为 17.7nm,同时光镜下未发现电极表面损伤,由此认为退火后的电极表面形貌良好。

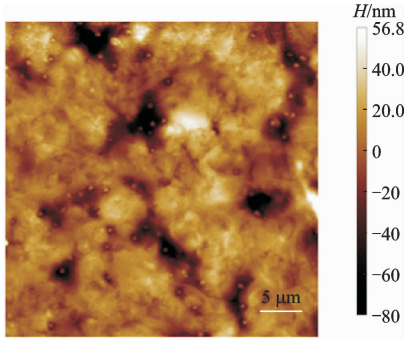


图 6 退火后 GaAs 光导开关的欧姆接触 AFM 形貌图
Fig.6 AFM morphology of ohmic contact of GaAs photoconductive semiconductor switch after rapid thermal annealing

2.2 场板工艺研究

Ti/Ag/Au 为场板层沉积金属,其各金属的厚度依次为 10 nm、500 nm、100 nm,其中 Ag/Au 为场板金属材料,Ti 为黏附层金属。由于欧姆接触和场板层连接的界面经刻蚀钝化层的工艺步骤后,残存的钝化材料会影响欧姆接触和场板的界面黏附特性,降低光导开关电极的可靠性,因此需要沉积黏附层来保证场板的附着力,提高光导开关的电极质量,确保其工作的可靠性和稳定性。

图 7 为局部场板的光镜图,由图 7 可明显看到场板与欧姆接触层的接触形貌。

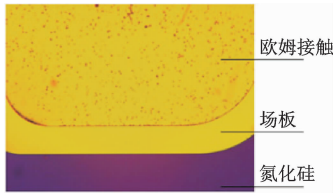


图 7 场板光镜图
Fig.7 Field plate in optical microscope

图 8 为制备完成的 10.16 cm(4 英寸)GaAs 光导开关阵列器件,划片后用于测试,其中红色圈内为具有完整结构的 GaAs 光导开关,成品率约为 98%。评价成品的标准为:在显微镜观察下,光导开关电极以及钝化层表面形貌良好,同时要确保划片后不会造成光导开关形状及大小损失。异面的结构光导开关金属电极位于衬底两侧,图 8 所示为单面 10.16 cm(4 英寸)GaAs 光导开关阵列器件,器件需

确保两面均达到成品要求。由 8 图可以看出:少部分电极表面存在轻微划痕,这是实验过程中难以避免的情况,但对电极性能并无过大影响,后续将通过改进工艺细节来避免出现可控的人为影响因素。

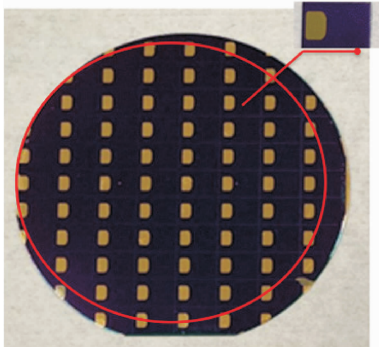


图 8 制备完成的 10.16 cm(4 英寸)光导开关阵列器件
Fig. 8 Array device of a prepared 10.16 cm (4-inch) photoconductive semiconductor switch

3 GaAs 光导开关性能测试

GaAs 光导开关的工艺水平可以通过光导开关在脉冲功率电路中的电学响应特性来表征,其基本参数为输出脉冲上升沿时间以及光导开关耐压值。

GaAs 光导开关测试电路如图 9 所示,高压直流电源通过充电电阻向电容 C 充电,待电容 C 充电完成后,开关 S_m 导通,电容 C 通过变压器 PT 向 50 Ω 脉冲形成线充电,同时为光导开关提供电压偏置。待形成线充电至光导开关的工作电压后,激光二极管模块输出光脉冲触发光导开关,在光导开关导通后,产生的脉冲通过同轴高压脉冲衰减器输入至示波器。

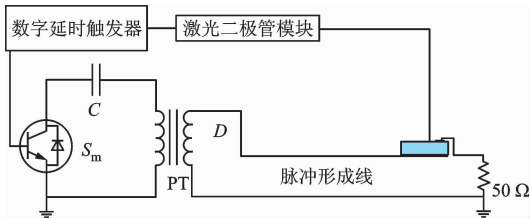


图 9 GaAs 光导开关测试电路
Fig. 9 Test circuit for GaAs photoconductive semiconductor switch

本文采用功率为 90 W 的激光二极管模块,输出为高斯光束,波长范围为 905~915 nm,激光脉冲能量约为 2 μ J,脉冲半高宽为 20 ns,如图 10 中红色脉冲输入曲线所示。

施加 22 kV 的偏置电压使得 GaAs 光导开关工作在非线性工作模式下,在 1 kHz 的工作频率下,

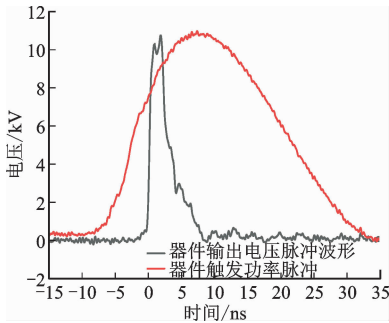
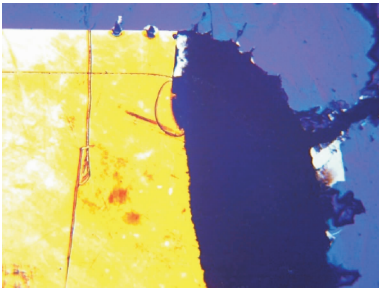


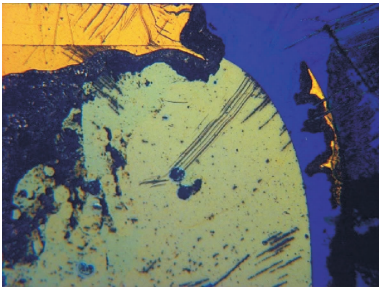
图 10 GaAs 光导开关的触发功率脉冲与输出电压脉冲曲线
Fig. 10 Curves of trigger power pulse and output voltage pulse of GaAs photoconductive semiconductor switch

光导开关的电压脉冲曲线如图 10 中黑色曲线所示。测试结果表明:GaAs 光导开关可持续、稳定工作 10 s 以上,同时可在负载端产生幅值约 10 kV 的电压脉冲,脉冲上升沿低于 1 ns,最高耐压可达 30 kV。

图 11 为 GaAs 光导开关电极局部损伤对比图,在光镜下观察,光导开关表面均有不同程度的损伤。图 11a 为光导开关工作上万次后仍可维持正常稳定工作的局部损伤图,损伤现象为电极边缘区域烧蚀,图 11b 为光导开关完全损伤图,损伤为电极大面积烧蚀脱落致使光导开关无法工作。



(a) 电极局部烧蚀



(b) 电极大面积脱落

图 11 GaAs 光导开关电极局部损伤对比图
Fig. 11 A comparison diagram of local damage of GaAs photoconductive semiconductor switch electrode

GaAs 光导开关非线性工作模式具有明显优于其他衬底材料光导开关的突出性能,但 GaAs 光导开关损伤也非常明显。GaAs 材料由于其热导率低,散热效果差,在高功率工作条件下,光导开关的电极区域会产生大量的热量,通常在电极的边缘会发生电极烧蚀、脱落等现象,这种情况会影响光导开关的可靠性和稳定性,而本文提出的场板电极结构能够有效地改善此类损伤,实验结果表明:电极处的损伤明显减少,光导开关具有更好的稳定性和可靠性。

实测结果表明,光导开关工作上万次后,仍有金属电极局部脱落、钝化层开裂等损伤现象。主要产生原因为 GaAs 光导开关在非线性工作模式下产生了电流丝,高电流密度导致大量热量聚集于光导开关电极边缘,致使光导开关损伤至失效,后续工作将针对光导开关的损伤进行分析,同时改进光导开关钝化层的设计,提高钝化层质量和散热效果,以改善光导开关的可靠性和稳定性。

4 结 论

本文结合理论分析和实验探究提出了 GaAs 光导开关的关键电极工艺解决方案,制备出电极间距为 4 mm 的 GaAs 光导开关,成品率约为 98%,其中重点在欧姆接触电极和外延场板两步关键工艺。首先,对欧姆接触电极进行不同温度的快速热退火处理,结果表明:400 °C 退火条件下,欧姆接触电阻率为 $0.019\ 5\ \Omega \cdot \text{cm}^2$,界面质量良好。其次,提出的场板电极结构明显提高了光导开关的可靠性和稳定性,降低了光导开关的损伤率。最后,进行光导开关性能测试,结果表明:采用单脉冲形成线,工作频率为 1 kHz 的条件下,光导开关在偏置电压为 22 kV 时可输出 10 kV 的电压脉冲,脉冲上升沿达亚 ns 量级,工作寿命数万次以上,表明光导开关可在一定工作条件范围内稳定有效地工作。该光导开关的成功制备不仅解决了制备光导开关的难点技术问题,也对光导开关投入实际应用提供了性能测试参数,为其应用奠定了基础。本文的工作也可为后续研究提供借鉴经验。

参考文献:

- [1] MAJDA-ZDANCEWICZ E, SUPRONIUK M, PAWLOWSKI M, et al. Current state of photoconductive semiconductor switch engineering [J]. Opto-Electronics Review, 2018, 26(2): 92-102.
- [2] 刘毅, 谌怡, 夏连胜, 等. GaAs-PCSS 多通道同步导

通条件实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(2): 025005.

- LIU Yi, SHEN Yi, XIA Liansheng, et al. Experimental study on multi-channel synchronous conduction conditions of GaAs-PCSS [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(2): 025005.
- [3] RAKHEJA S, HUANG L, HAU-RIEGE S, et al. Performance modeling of silicon carbide photoconductive switches for high-power and high-frequency applications [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2020, 8: 1118-1128.
- [4] WU Qilin, XUN Tao, ZHAO Yuxin, et al. The test of a high-power, semi-insulating, linear-mode, vertical 6H-SiC PCSS [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019, 66(4): 1837-1842.
- [5] XU Ming, DONG Hangtian, LIU Chun, et al. Investigation of an opposed-contact GaAs photoconductive semiconductor switch at 1-kHz excitation [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(5): 2355-2359.
- [6] GADDY M, KURYATKOV V, WILSON N, et al. GaN-based PCSS with high breakdown fields [J]. Electronics, 2021, 10(13): 1600.
- [7] HU Long, WANG Yaogong, XU Ming, et al. Experimental study of recovery time of a bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switch in low-energy-triggered mode [J]. Electronics Letters, 2019, 55(12): 711-712.
- [8] ZHANG Lin, SHI Wei, CAO Juncheng, et al. Research on time jitter of GaAs photoconductive semiconductor switches in the negative differential mobility region [J]. IEEE Electron Device Letters, 2019, 40(2): 291-294.
- [9] 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.
- [10] MA Cheng, XU Nuo, LIU Zenan, et al. 1.6-kV 1.5-kA GaAs avalanche semiconductor switch triggered by 4 μJ laser diode [J]. IEEE Journal of the Electron Devices Society, 2020, 8: 223-228.
- [11] 桂淮濛, 施卫. 储能电容对 GaAs 光电导开关快前沿正负对称脉冲输出特性的影响 [J]. 物理学报, 2019, 68(19): 194206.

GUI Huaimeng, SHI Wei. Effect of capacitance on positive and negative symmetric pulse with fast rising edge based on GaAs photoconductive semiconductor switch [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(19):

- 194206.
- [12] HU Long, SU Jiancang, QIU Ruicheng, et al. Ultra-wideband microwave generation using a low-energy-triggered bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switch with ultrafast switching [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(4): 1308-1313.
- [13] CULPEPPER J, MILLER A, NEUBER A, et al. Packaging and evaluation of 100 kV photoconductive switches [C]// *IEEE International Pulsed Power Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 9009753.
- [14] SUN Yue, HU Long, DANG Xin, et al. Investigation on the mechanism of triggering efficiency of high-power avalanche GaAs photoconductive semiconductor switch [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(11): 1646-1649.
- [15] MA Cheng, YANG Lei, WANG Shaoqiang, et al. Study of the lifetime of high-power GaAs PCSSs under different energy storage modes [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(6): 4644-4651.
- [16] LIU Ruijia, SHANG Annan, CHEN Changjiang, et al. Nanostructure enabled lower on-state resistance and longer lock-on time GaAs photoconductive semiconductor switches [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(4): 825-828.
- [17] CHOWDHURY A R, NESS R, JOSHI R P. Assessing lock-on physics in semi-insulating GaAs and InP photoconductive switches triggered by subbandgap excitation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(9): 3922-3929.
- [18] CHU Xu, XUN Tao, WANG Langning, et al. Break-down behavior of GaAs PCSS with a backside-light-triggered coplanar electrode structure [J]. *Electronics*, 2021, 10(3): 357.
- [19] 卫新发, 梁国松, 张育民, 等. 氧化镓锡与掺 Fe 半绝缘 GaN 的接触特性 [J]. *半导体技术*, 2021, 46(6): 474-478.
- WEI Xinfu, LIANG Guosong, ZHANG Yumin, et al. Contact characteristics of indium tin oxide with Fe doped semi-insulated GaN [J]. *Semiconductor Technology*, 2021, 46(6): 474-478.
- [20] LIU Kang, CUI Hongwang, ZHU Li, et al. Introduction of graphene to decrease barrier height and improve contact characteristics of metal/Si-GaAs interface [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, 67(10): 4105-4111.
- [21] XU Ming, LIU Xiaofei, LI Mengxia, et al. Transient characteristics of interdigitated GaAs photoconductive semiconductor switch at 1-kHz excitation [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(7): 1136-1138.
- [22] 湛怡, 刘毅, 王卫, 等. 激光二极管触发 GaAs 光导开关导通特性 [J]. *高电压技术*, 2019, 45(1): 310-315.
- SHEN Yi, LIU Yi, WANG Wei, et al. On-state properties of GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by laser diode [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(1): 310-315.
- [23] CHOWDHURY A R, NIKISHIN S, DICKENS J, et al. Numerical studies into the parameter space conducive to “lock-on” in a GaN photoconductive switch for high power applications [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(2): 469-475.
- [24] LUAN Chongbiao, LI Boting, ZHAO Juan, et al. A new phenomenon in semi-insulating 4H-SiC photoconductive semiconductor switches [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(1): 172-175.
- [25] PIWOWARSKI K, PERKA B. Possibilities of replacing selected switches with photoconductive semiconductor switches [J]. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2021, 97(4): 88-91.

(编辑 刘杨)