

## GaAs-PCSS 多通道同步导通条件实验研究\*

刘 毅, 谌 怡, 夏连胜, 王 卫, 叶 茂, 张 肇

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 砷化镓光导开关(GaAs-PCSS)是具有快响应、高重复、低抖动、高功率容量的半导体光电导开关,多通道设计能够有效降低 GaAs-PCSS 非线性大电流导通时的损伤,提高开关寿命。为探究 GaAs-PCSS 多通道同步导通的必要条件,在基于固态脉冲形成线的实验平台上,通过特殊设计的夹具,将多枚 GaAs-PCSS 并联连接以作为脉冲形成电路的开关,以对各 GaAs-PCSS 施以不同的触发信号进行测试。实验结果证明:相同触发信号下,开关导通电流被成功地均分到 4 个 GaAs-PCSS 通道中;不同触发信号下,为获得较好的电流均分效果,各通道触发延迟时差须小于 1 ns,触发能量差须小于 20  $\mu\text{J}$ 。设计了分体式、单体式两种结构的多通道 GaAs-PCSS,其中基于刻蚀工艺的单体式 20 通道 GaAs-PCSS 在 7 000 余次大电流工作后仅发生轻微损伤。

**关键词:** 砷化镓光导开关; 多通道; 同步; 触发延迟时差; 触发能量

中图分类号: TM834

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190328

## Experimental study on multi-channel synchronous conduction conditions of GaAs-PCSS

Liu Yi, Shen Yi, Xia Liansheng, Wang Wei, Ye Mao, Zhang Huang

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Gallium Arsenide Photoconductive Semiconductor Switch (GaAs-PCSS) has outstanding features, such as, fast response, high repetition, low jitter and high-power capacity. Multi-channel design can effectively reduce the damage from high current in nonlinear mode and improve switch's lifetime. In this paper, on the solid-state pulse forming line experimental platform, multiple GaAs-PCSSs are connected in parallel as one switch through a special fixture, and different trigger signals are applied to each of them, in order to study the necessary conditions for GaAs-PCSS multi-channel synchronous conduction. The results show that, firstly, by the same trigger signals, the on-current is successfully divided into 4 GaAs-PCSS channels; secondly, by different trigger signals, the delay time difference and trigger energy difference must be lower than 1 ns and 20  $\mu\text{J}$  respectively, if an effective current diversion is expected; thirdly, split and integrated multi-channel GaAs-PCSS structures are designed, and the integrated 20-channel GaAs-PCSS was slightly damaged after 7 000 shots.

**Key words:** GaAs-PCSS; multi-channel; synchronous; trigger delay; trigger energy

砷化镓光导开关(GaAs-PCSS)是一种可以通过脉冲红外激光触发使 GaAs 半导体从高电阻率迅速变为高电导率的新型高功率半导体器件<sup>[1]</sup>。由于 GaAs-PCSS 具有响应快、抖动小<sup>[2]</sup>、重复频率高、功率容量大、耐压高、体积小、抗电磁干扰、光电分离等优点,随着高功率脉冲应用的发展,PCSS 日益收到重视<sup>[3]</sup>,在紧凑型脉冲功率源<sup>[4]</sup>、高功率超宽带脉冲源<sup>[5]</sup>、超快电子学、THz 产生与探测<sup>[6]</sup>等领域有着极其广阔的前景。由于 GaAs-PCSS 的非线性导通特性,小功率的激光发生器即可触发其高功率工作,非常适用于紧凑型高功率脉冲系统,因而 GaAs-PCSS 的非线性导通是其研究热点。

GaAs-PCSS 目前在应用中的主要问题是高功率工作下的寿命问题,特别是在须由激光二极管触发的大规模集成应用中,寿命及稳定性问题尤为突出<sup>[7]</sup>。研究者普遍观察到 GaAs-PCSS 非线性导通时的电流丝现象,是制约 GaAs-PCSS 工作寿命的根本因素<sup>[8-10]</sup>。为应对这一问题,使 GaAs-PCSS 既能在非线性模式导通大电流,又能保持一

\* 收稿日期:2019-09-02; 修订日期:2019-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51507162, 51407169, 51607166);国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目(U1530156)

作者简介:刘毅(1987—),男,硕士,助理研究员,从事脉冲功率技术及加速器技术研究;109854434@163.com。

定的工作寿命,比较现实的方法是使其发生稳定的多通道导通以降低各个通道中导通电流,以减小开关损伤,提升工作稳定性和工作寿命<sup>[11-12]</sup>。

本文重点研究了 GaAs-PCSS 多通道同步导通条件。首先通过巧妙的实验设计,验证了 GaAs-PCSS 发生多通道导通的可行性,并直接测量了 4 路同步导通时各通道中的导通电流;然后对各通道的触发条件进行独立控制,研究了各通道触发能量和触发延迟时差对导通同步性的影响;最后,设计了具有多通道结构的 GaAs-PCSS,并开展了初步的多通道 GaAs-PCSS 导通实验。

## 1 实验设置

本研究中,实验平台是由固态平板脉冲形成线构建的 Blumlein 线脉冲形成电路,出于探索同步导通触发条件的研究目的,该脉冲形成电路的开关是由 2~4 个 GaAs-PCSS 并联构成,其中每个 GaAs-PCSS 分别由各自的激光二极管触发器独立触发。本实验中主要观测的实验参数为各 GaAs-PCSS 的导通电流大小和时间,因而设计了特殊的夹具,可以同时测量通过各 GaAs-PCSS 电流信号。

如图 1 所示,固态脉冲形成线是平行板结构,介质为铌酸盐体系玻璃陶瓷,介电常数约为 17,尺寸为 300 mm×30 mm×6 mm,两面银电极尺寸为 280 mm×4 mm,该脉冲形成线特征阻抗为 59.3 Ω。GaAs-PCSS 为本征砷化镓,暗态电阻率为大于 10<sup>8</sup> Ω·m,尺寸为 12 mm×2 mm×0.8 mm,异面电极结构,电极间隙为 5 mm。每个 GaAs-PCSS 焊接在 PCB 框架上并与引线连接,整个开关由聚四氟乙烯封装。上述两种器件以及 100 Ω 电阻负载,构成了基本的 Blumlein 线脉冲形成电路。

为同时测量各 GaAs-PCSS 中的导通电流,特殊设计的夹具具备以下功能:固定电流互感器,固定各 GaAs-PCSS,设置并调整激光二极管驱动器,连接引线,尽可能保持较短的引线避免回路电感过大。该夹具设计及安装如图 2 所示,最多可同时设置 4 个 GaAs-PCSS。

每个 GaAs-PCSS 对应 1 个电流互感器和 1 个独立的激光二极管驱动器,电流互感器可测量该 GaAs-PCSS 的导通电流和导通时间,各激光二极管驱动器的触发时间和触发能量均可独立调节,用以探索并联 GaAs-PCSS 同步导通条件。另外,两个高压探头分别测量偏置电压与负载上输出电压,据此可估算整套并联开关的导通内阻。

## 2 四 GaAs-PCSS 并联同步导通

在此实验平台上,我们首先开展了 4 GaAs-PCSS 并联同步导通实验,以验证多个 GaAs-PCSS 同步导通的可行性。虽然 4 个 GaAs-PCSS 已并联安装在电路中,但首先,我们分别令各开关单独导通,以测量单个开关导通时的导通电流,一方面确保每个 GaAs-PCSS 状态基本一致,另一方面该电流也等于电路总电流。随后,我们从 2 至 4 逐渐增加受触发 GaAs-PCSS 的数量,同时测量了各开关中的导通电流。

实验结果如图 3 所示,①为对照组,图中 4 条曲线分别对应了仅一个 GaAs-PCSS 受触发时的导通电流,显然,各个 GaAs-PCSS 的导通电流和导通前沿基本一致,说明这 4 个被测开关初始状态基本相同,均可受控触发,触发后导通性能基本相同;电路总电流约 220 A。②为其中 2 个开关同时受触发,导通时间基本一致,导通电流幅值分别为 104 A 和 112 A,两个开关的导通电流基本一致,且电流之和与①中电路总电流基本相同,说明电路总电流被有效地均分到了两个并联的 PCSS 中。③同②,当 3 个开关同时受触发时,导通时间基本一致,各开关导通电流略有不同,导通电流幅值分别为 54 A, 79 A 和 92 A,电流之和与①中电路总电流基本相同,说明电路总电流被有效地分摊到了 3 个并联的 PCSS 中。④亦然,当 4 个开关同时受触发时,导通时间基本一致,各开关导通电流略有不同,导通电流幅值分别为 42 A, 58 A, 61 A 和 61 A,电流之和与①中电路总电流基本相同,说明电路总电流被有效地分摊到了 4 个并联的 PCSS 中。该实验结果明确证明了 GaAs-PCSS 的多通道导通的可行性。

## 3 GaAs-PCSS 同步导通触发能量条件和触发延迟时差条件

为研究 GaAs-PCSS 并联同步导通的触发能量条件,我们利用相同的实验平台,对 2 个并联的 GaAs-PCSS 进行了测试实验:保持其 2 个激光二极管驱动器触发时间一致,并分别控制激光二极管驱动器的激光能量,测量各

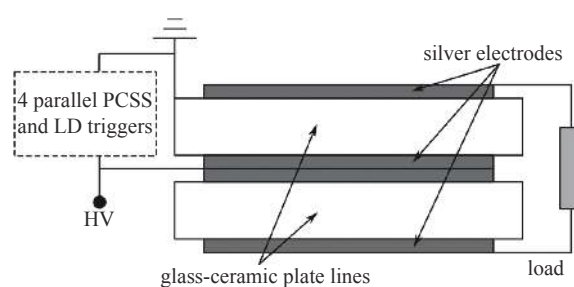


Fig. 1 Schematic of experimental circuit

图 1 实验平台电路示意图

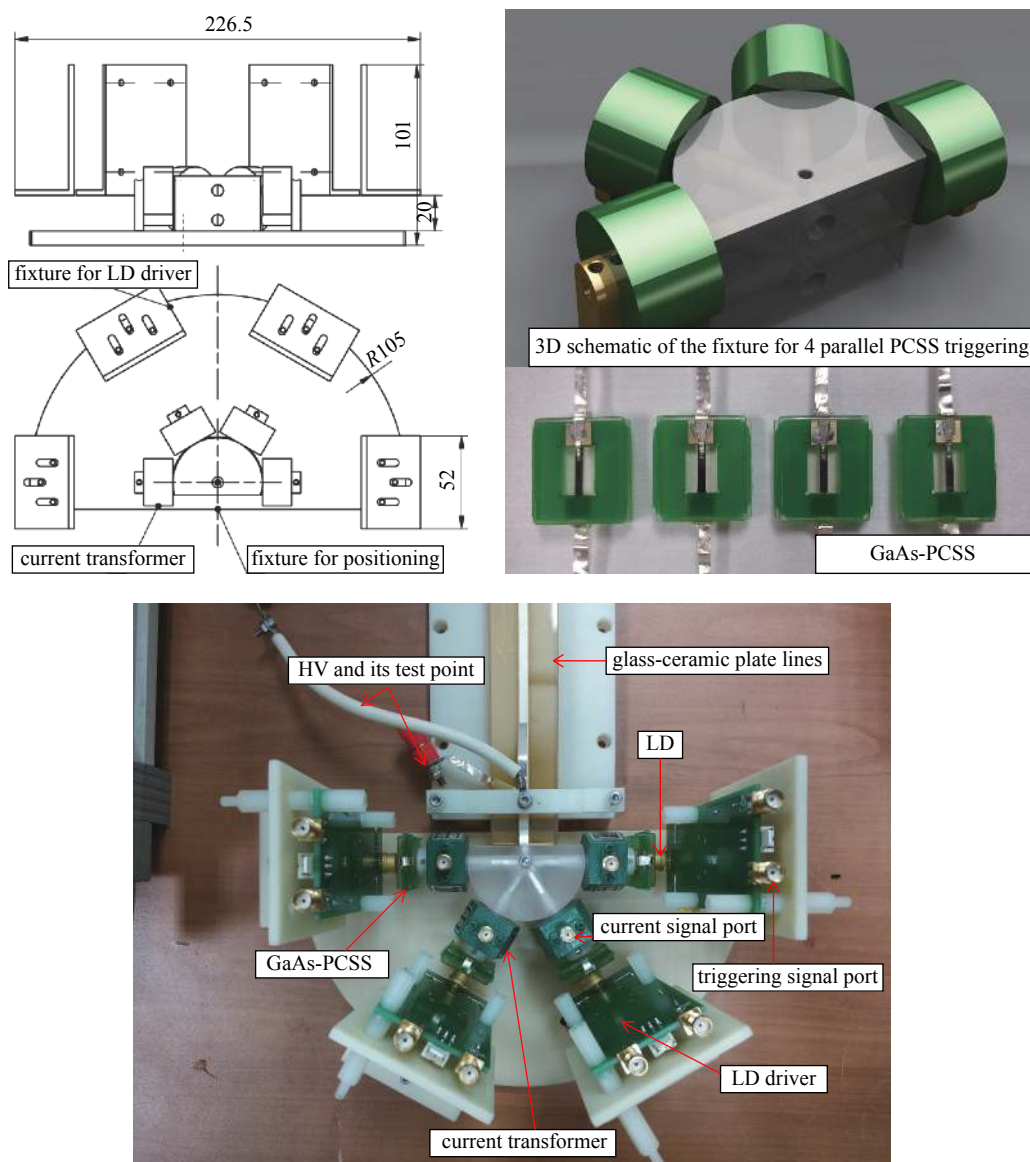


Fig. 2 Experimental platform for 4 parallel GaAs-PCSS triggering test

图 2 四 GaAs-PCSS 并联同步导通触发与测试平台

GaAs-PCSS 的导通电流。

实验结果如图 4(a) 所示, 横轴为触发开关 B 的激光相对于触发开关 A 的激光能量之差, 纵轴为开关中导通电流占总电流的百分比。我们可以看到, 两个开关所分摊电流的百分比基本与触发能量差呈线性关系, 受触发激光能量较高的开关所分摊的导通电流更多, 当两个开关触发激光能量差小于  $20 \mu\text{J}$  时, 两个开关均可导通, 分摊导通电流约为总电流 20% 或 80%, 在触发激光能量差小于  $10 \mu\text{J}$  时, 分摊电流的效果才足够好, 各自能分摊导通电流约为总电流 40%~60%。另, 图中所显示的对称性表明被测开关状态基本一致, 实验结果具有重复性。

为研究 GaAs-PCSS 并联同步导通的触发延迟时差条件, 我们利用相同的实验平台, 对 2 个并联的 GaAs-PCSS 进行了测试实验: 保持其 2 个激光二极管驱动器触发能量一致, 并分别控制激光二极管驱动器的激光时刻, 测量各 GaAs-PCSS 的导通电流。

实验结果如图 4(b) 所示, 横轴为开关 B 相对于开关 A 的触发时间延迟, 纵轴为开关中导通电流占总电流的百分比。我们可以看到, 当 2 个开关触发时间差大于 2 ns 时, 仅先受触发的开关导通, 另一个开关无法有效导通电流; 当两个开关触发时间差小于 2 ns 时, 两个开关均可导通, 且各自分摊的电流百分比基本与触发延迟时差呈线性关系, 先受触发的开关所分摊的导通电流更多; 但须在时间差小于 1 ns 时, 分摊电流的效果才足够好, 各自能分摊导通电流约为总电流 40%~60%。另, 图中所显示的对称性表明被测开关状态基本一致, 实验结果具有重复性。

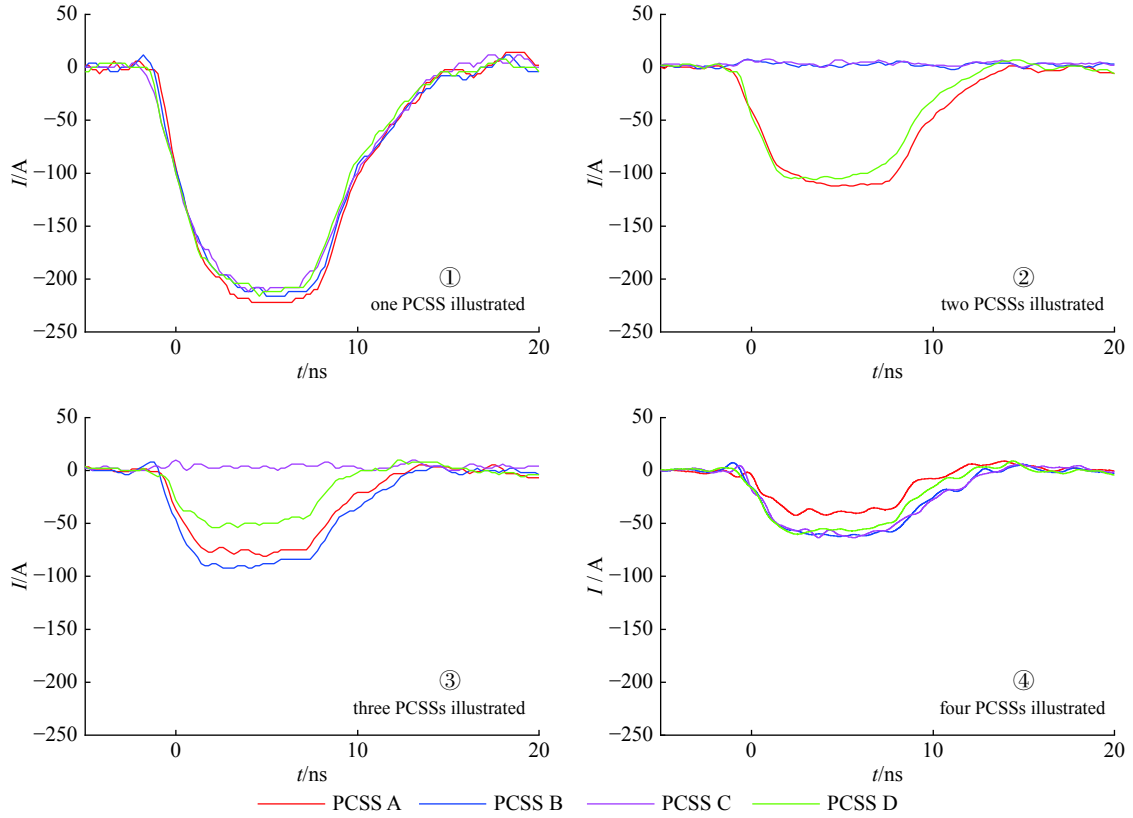


Fig. 3 Conducting current of each PCSS when 1, 2, 3 or 4 PCSSs are triggered

图 3 各开关中导通电流测试结果

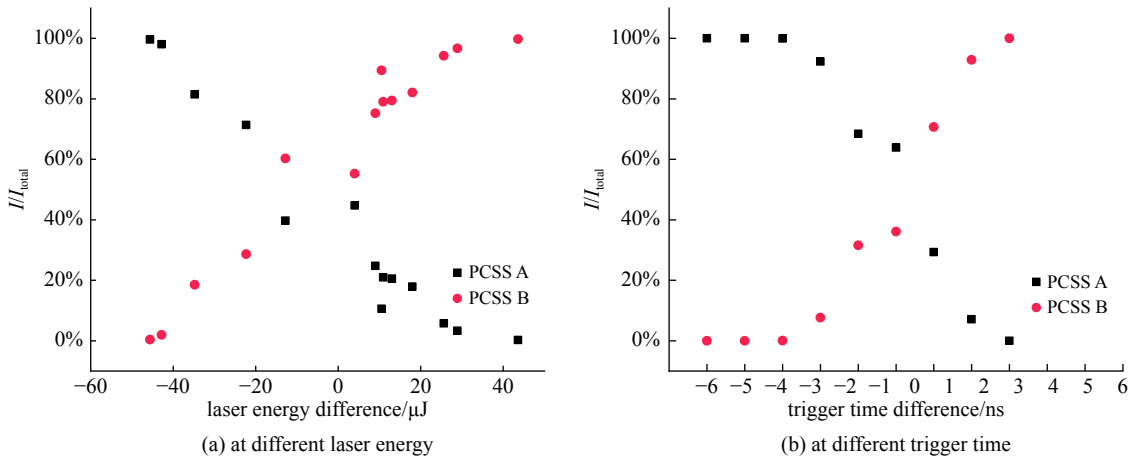


Fig. 4 Percentage of conducting current of each PCSS when triggered at different laser energy or trigger time

图 4 各开关中导通电流百分比与触发能量或触发延迟时间差之间的关系

#### 4 多通道 GaAs-PCSS 结构设计与初步实验结果

基于上述实验结果,我们认为具有多通道结构的 GaAs-PCSS 可以实现将导通电流分摊到各个导通通道中,降低导通通道中实际导通电流,以期获得更好的工作寿命。据此,我们设计了分体式、单体式两种具有多通道结构的 GaAs-PCSS。

分体式多通道 GaAs-PCSS 结构较为简单,且便于制备:利用多个上述实验中宽度仅为 2 mm 的 GaAs-PCSS,在特别设计的 PCB 框架上将其组合、并联焊接、外接引线,从而构成多通道 GaAs-PCSS,如图 5(a) 所示。该方法因为使用了成熟的工艺,且每个分体开关的面积小,相比于普通 GaAs-PCSS,制备成本并未增加,并且根据 PCB 框架的不同,可以构成不同通道数的分体式多通道 GaAs-PCSS。

单体式多通道 GaAs-PCSS 结构和制备较为复杂,我们设计了如图 5(b) 所示的单体式多通道 GaAs-PCSS 结构,

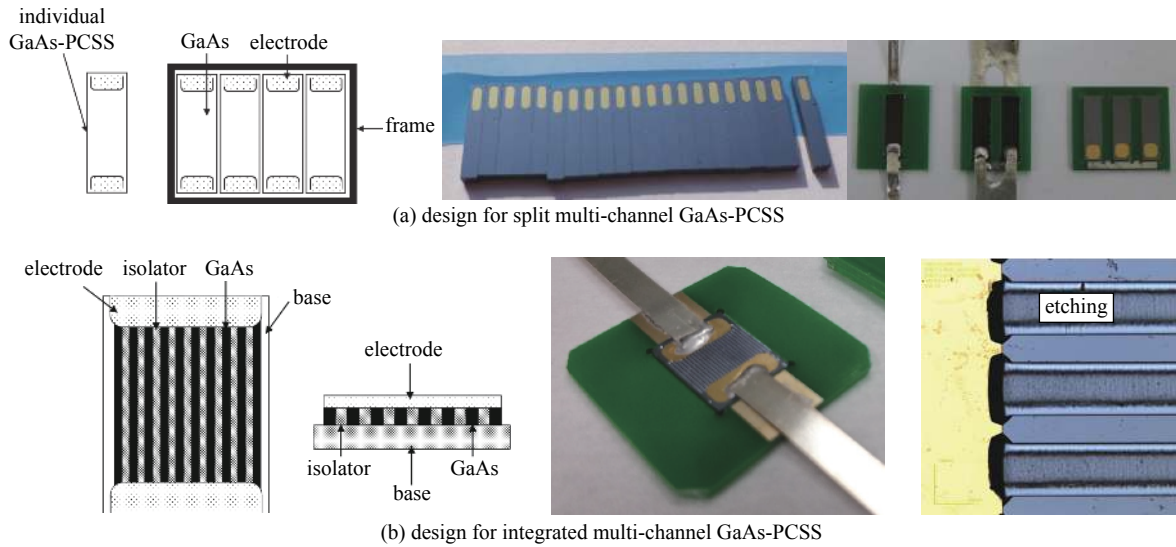


Fig. 5 Designs and pictures of split and integrated multi-channel GaAs-PCSS

图5 分体式 and 单体式多通道 GaAs-PCSS 设计与照片

采用湿法刻蚀工艺,图中“绝缘介质”为在刻蚀沟槽中所填充的聚四氟乙烯。其中,沟槽宽度和间距均为  $200\ \mu\text{m}$ ,沟槽深度为  $45\sim 50\ \mu\text{m}$ 。

目前,我们对单体式 GaAs-PCSS 开展了初步的导通实验。实验平台与图 1 中基本相同,不同点是将被测开关从多开关并联夹具换成了 1 个单体式 20 通道 GaAs-PCSS,该开关采用了聚四氟乙烯封装。

实验结果如图 6 所示,位于上方的波形为负载输出波形累积图,下方的波形为偏置电压波形累积图,每幅波形图下方数字表示图中对应的开关工作次数。光导开关测试平台使用的平板脉冲形成线特征阻抗  $Z_0=59.3\ \Omega$ ,负载阻抗  $R=100\ \Omega$ ,实验初期,负载上输出电压为  $13.4\ \text{kV}$ ,工作了 7 000 余次后负载上输出电压为  $12\ \text{kV}$ 。经计算,工作初期,单体式多通道 GaAs-PCSS 的导通内阻约  $1.4\ \Omega$ ,7 000 余次后导通内阻约  $8.5\ \Omega$ 。通过波形累积图可以看出,开关偏置电压波形和输出波形均保持良好,未出现导通失败或开关打火等情况。

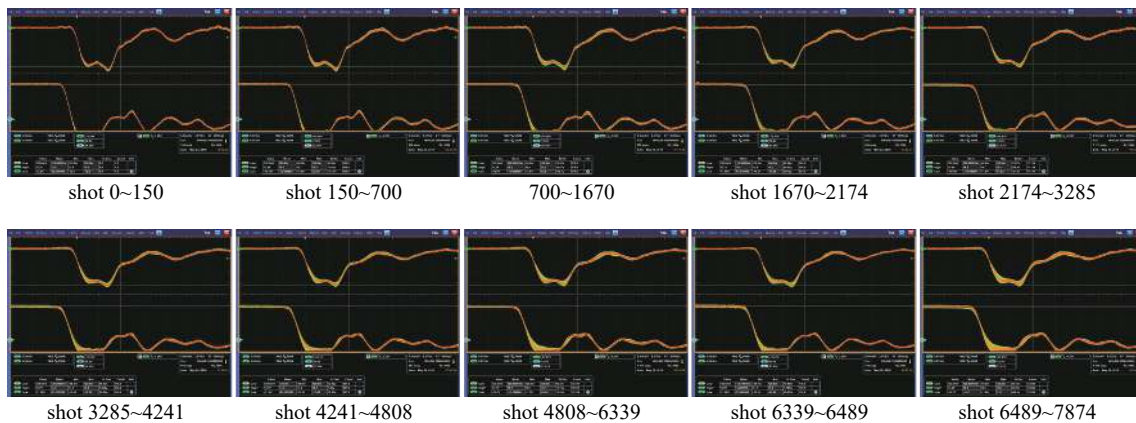


Fig. 6 Cumulative graph of load output waveforms (up) and bias voltage (down) of the integrated multi-channel GaAs-PCSS during 7 000 shots

图6 单体式 20 通道 GaAs-PCSS 的 7 000 余次导通波形累积图

图 7 是该单体式 20 通道 GaAs-PCSS 实验开始前 (a) 和 7 000 余次导通后 (b) 的照片比较, (c) 为普通 GaAs-PCSS 的电流丝损伤照片。(b) 中红圈所示为开关电极烧蚀,较 (c) 中普通 GaAs-PCSS 有非常明显的改善,且该单体式 20 通道 GaAs-PCSS 尚未损坏,能够继续有效工作。由此,该实验研究证明基于刻蚀工艺的单体式多通道 GaAs-PCSS 因对导通电流的分摊作用,可以有效保持低较低导通内阻,且具有更长的导通寿命。

## 5 结论

本文在基于固态脉冲形成线的实验平台上,通过特殊设计的夹具,将多枚 GaAs-PCSS 并联连接以作为脉冲形成电路的开关,并可以对各 GaAs-PCSS 施以不同的触发信号,验证了 GaAs-PCSS 可以发生非线性模式下的多通道

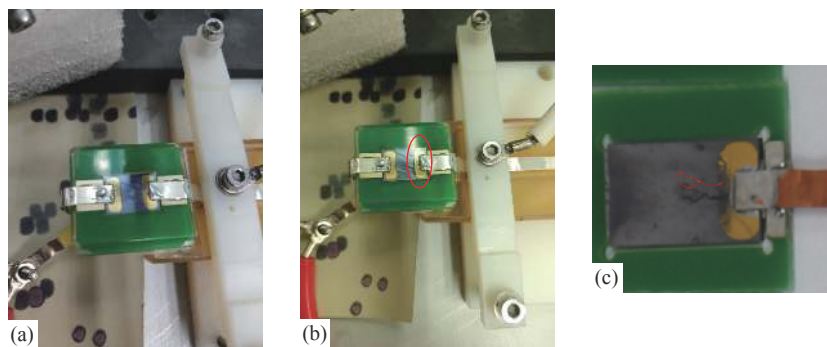


Fig. 7 Photos of the integrated 20-channel GaAs-PCSS before (a) and after (b) 7 000 shots, and a photo of a damaged normal GaAs-PCSS (c)  
图 7 单体式 20 通道 GaAs-PCSS 的 7 000 余次导通前 (a)、后 (b) 对比照, 及普通 GaAs-PCSS 损伤照片 (c)

同步导通, 并且通过对触发信号的独立控制, 探究了 GaAs-PCSS 发生多通道同步导通的必要条件。实验结果证明: 相同触发信号下, 开关导通电流被成功地将均分到 4 个 GaAs-PCSS 通道中; 不同触发信号下, 为获得较好的电流均分效果, 各通道触发延迟时差须  $< 1 \text{ ns}$ , 触发能量差须  $< 20 \mu\text{J}$ 。本文设计了分体式、单体式两种结构的多通道 GaAs-PCSS, 初步实验证明, 基于刻蚀工艺的单体式 20 通道 GaAs-PCSS 在 7 000 余次大电流工作后仅发生轻微损伤, 可以有效保持较低导通内阻, 具有更长的导通寿命。

#### 参考文献:

- [1] Loubriel G M, Zutavern F J, Baca A G, et al. Photoconductive semiconductor switches[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1997, 25(2): 124-130.
- [2] Shi W, Tian L, Liu Z, et al. Accurate measurement of the jitter time of GaAs photoconductive semiconductor switches triggered by a one-to-two optical fiber[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 154106.
- [3] Yuan Jianqiang, Xie Weiping, Zhou Liangji, et al. Developments and applications of photoconductive semiconductor switches in pulsed power technology[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 171-176.
- [4] Nunally W C. Critical component requirements for compact pulse power system architectures[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2005, 33(4): 1262-1267.
- [5] Schoenberg J S H, Burger J W, Tyo J S, et al. Ultra-wideband source using gallium arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1997, 25(2): 327-334.
- [6] Nunally W C. High-power microwave generation using optically activated semiconductor switches[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1990, 37(12): 2439-2448.
- [7] Liu Yi, Wang Wei, Shen Yi, et al. Lifetime of high-power GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by laser of different power density[C]// Proc of SPIE. 2014: 92554G.
- [8] 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]. *Journal of Semiconductors*, 2004, 25(6): 691-696)
- [9] Loubriel G M, Zutavern F J, Mar A, et al. Longevity of optically activated, high gain GaAs photoconductive semiconductor switches[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1998, 26(5): 1393-1402.
- [10] 杨宏春, 崔海娟, 孙云卿, 等. 高功率、长寿命GaAs光电导开关[J]. *科学通报*, 2010, 55(13): 1331-1337. (Yang Hongchun, Cui Haijuan, Sun Yunqin, et al. High power, longevity gallium arsenide photoconductive semiconductor switches[J]. *Chinese Sci Bull*, 2010, 55(13): 1331-1337)
- [11] Saiz T A, Zutavern F J, Glover S F, et al. PCSS lifetime testing for pulsed power applications[C]//Proc of 16th IEEE International Conference on Pulsed Power. 2007: 106-109.
- [12] Zutavern F J, Mar A, Vawter G A, et al. Multi-filament PCSS modules to replace high current pulsed power switches[C]//Proc of 19th IEEE International Conference on Pulsed Power. 2013: 1-6.