

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*

桂淮濛¹⁾²⁾ 施卫^{2)†}

1) (陕西工业职业技术学院信息工程学院, 咸阳 712000)

2) (西安理工大学理学院, 西安 710048)

(2019年3月7日收到; 2019年6月18日收到修改稿)

针对 GaAs 光电导开关快前沿正负对称脉冲输出特性的研究, 对提高飞秒条纹相机的时间分辨率具有重要意义. 本文使用脉宽为 60 fs 的激光器触发电极间隙为 3.5 mm 的 GaAs 光电导开关, 在不同的储能电容及外加偏置电压条件下, 获得具有上升时间最快为 149 ps, 电压传输效率最高为 92.9% 的快前沿正负对称输出, 测试结果满足条纹相机实现飞秒时间分辨率的设计需求. 实验结果的对比分析表明, 储能电容是影响电压传输效率及上升时间的重要因素之一. 同时, 结合 GaAs 光电导开关线性工作模式特点及电容储能特性分析表明, 当触发激光特性相同时, 随着储能电容的增大, 输出电脉冲传输效率及上升时间均会增加. 研究结果将有助于 GaAs 光电导开关更好地应用于飞秒条纹相机中.

关键词: GaAs 光电导开关, 正负对称脉冲, 快速上升时间, 储能电容

PACS: 42.65.Re, 42.79.-e, 72.40.+w

DOI: 10.7498/aps.68.20190321

1 引言

GaAs 光电导开关 (photoconductive semiconductor switch, PCSS) 是利用光电半导体材料 GaAs 与超快脉冲激光器结合形成的一种超快光电子器件^[1,2]. 相较于传统的半导体开关, GaAs PCSS 器件具有响应速度快、耐压高以及光电隔离等特点^[3-5]. 当前 GaAs PCSS 器件的应用研究迅速发展, 在脉冲功率系统、精密同步控制系统、THz 产生装置等方面都取得了实质性的进展^[6-9]. 在飞秒条纹相机的应用中, 由于 GaAs PCSS 具有极小的时间抖动及超快的时间响应, 已作为条纹相机中扫描电路的核心器件. 因此, 以基于 GaAs PCSS 的扫描电路为研究对象, 探究提高条纹相机

的时间分辨率成为当前备受关注的研究内容^[10-12].

由于时间分辨率是条纹相机性能的重要指标, 学者对提高时间分辨率的研究引起了广泛关注. Liu 等^[13]利用 GaAs PCSS 为条纹相机提供正负对称电脉冲时, 可使条纹相机的时间抖动值减小到 50 fs, 时间分辨率优于 600 fs. 扫描电路作为条纹相机的重要组成部分, 决定了相机系统的时间分辨率及扫描速度. 为了改善条纹相机的性能, 这就要求扫描电路输出具有电压传输效率高 (> 70%)、上升时间快 (< 200 ps) 的正负对称脉冲^[14]. 因此, 研究影响快前沿正负对称脉冲输出特性的因素, 具有重要的科学和应用价值.

本文基于 GaAs PCSS 设计了快前沿正负对称输出的扫描电路. 当使用不同储能电容时, 在不同的外加偏置电压下测试了快前沿正负对称脉冲

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0701005)、强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金 (批准号: SKLIPR1812)、陕西省科技计划项目 (批准号: 2019NY-174) 和陕西省教育厅科学研究项目计划 (批准号: 17JK0056) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

输出特性. 通过计算载流子的倍增率, 指出 GaAs PCSS 工作在线性模式下. 同时, 实验结果表明在线性模式下, 当触发激光脉冲特性一定时, 储能电容也会对输出电脉冲的上升时间及传输效率产生影响, 此结论可为提高条纹相机的时间分辨率提供理论指导.

2 实验

实验中使用横向结构的 GaAs PCSS, 如图 1 所示. 半绝缘 GaAs 材料的暗态电阻大于 $5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, 禁带宽度为 1.43 eV, 电子的迁移率大于 $5000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 载流子浓度为 10^{14} cm^{-3} , 其本征击穿场强可达 250 kV/cm . GaAs 芯片的尺寸为宽 8.0 mm, 长 10.0 mm, 厚度 0.6 mm. GaAs PCSS 的电极采用刻蚀方法制作, 通过优化设计使得电场分别更均匀, 电极为 135° 圆角, 尺寸为 $6.0 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$, 圆角半径为 1.1 mm, 电极采用 Au/Ge/Ni 合金制作而成, 与 GaAs PCSS 芯片材料形成了良好的欧姆接触.

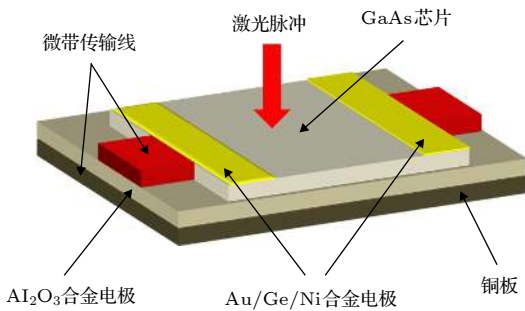


图 1 GaAs PCSS 结构图

Fig. 1. Schematic diagram of GaAs PCSS.

扫描电路的结构示意如图 2. 电路中的元器件取值为: 限流电阻 R_1, R_2, R_3 和 R_4 的阻值为 $470 \text{ k}\Omega$,

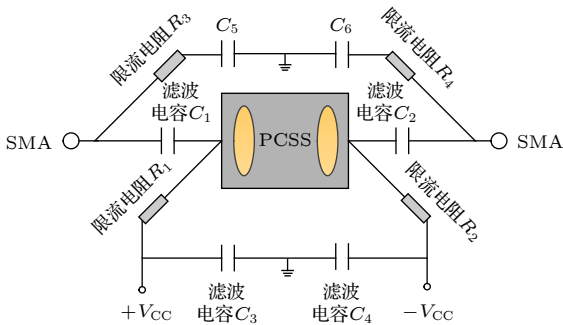


图 2 扫描电路结构图

Fig. 2. Schematic diagram of scanning circuit.

滤波电容 C_1, C_2, C_3 和 C_4 的容值为 10 nf , 储能电容 C_5 和 C_6 的耐压为 3 kV .

测试电路如图 3 所示. 使用波长为 800 nm , 脉宽为 60 fs 的飞秒激光器 (型号为 MaiTaiTisapphire) 触发电极间隙为 3.5 mm 的 GaAs PCSS, 其中激光脉冲波形为高斯分布. 扫描电路经 SMA (subminiature version A) 接头进入 50Ω 的同轴线中, 继而通过 60 dB 同轴衰减器 (带宽 $0\text{--}40 \text{ GHz}$) 与带宽为 6 GHz 的示波器 (型号为 LecroyWaveMaster 806Zi-A) 相连. 使用型号为 KSDP2210-CAS-1 激光能量计对激光脉冲能量进行测量.

3 测量结果

当触发激光能量为 $97.5 \mu\text{J}$, 外加偏置电压为 $\pm 1.9 \text{ kV}$ 时, 测试了在储能电容容值为 33 pF 时输出波形, 如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 正负输出电脉冲的对称性好. 经示波器测量可得正向脉冲的输出电压为 1.270 kV , 上升时间为 164 ps . 负向脉冲的输出电压为 1.302 kV , 上升时间为 175 ps .

为了使扫描电路获得更高的电压传输效率以及更快的上升时间, 当触发光能为 $97.5 \mu\text{J}$ 时, 分别在电容容值为 $10, 33, 82,$ 和 100 pF 时进行测试. 当外加偏置电压为 $\pm 2.0 \text{ kV}$, 单边电脉冲的输出结果如图 5 所示. 从图中可以看出, 随着储能电容的增大, 输出电脉冲的幅值及上升时间均增加.

此外, 对每一个特定电容, 在外加偏置电压分别为 $\pm 1.5, \pm 1.7, \pm 1.9$ 和 $\pm 2.0 \text{ kV}$ 条件下测试了扫描电路的输出波形, 测试结果如表 1 和表 2 所列. 经对比分析表明, 随着储能电容的增大, 输出电脉冲的传输效率及上升时间均增加.

4 讨论

根据导通机理的不同, GaAs PCSS 分为线性工作模式和非线性工作模式. 在线性工作模式下, GaAs 材料吸收一个光子最多产生一个电子空穴对. 当偏置电场超过 $4\text{--}8 \text{ kV/cm}$ 时, 开关进入到非线性模式, 载流子出现倍增现象, 即 GaAs 材料吸收一个光子产生多个电子空穴对. 当 GaAs PCSS 工作在线性模式时, 其时间抖动主要受触发激光脉冲能量、波长以及脉宽的影响 [15–17]. 相比于非线性工作模式, 线性工作模式下 GaAs PCSS 的

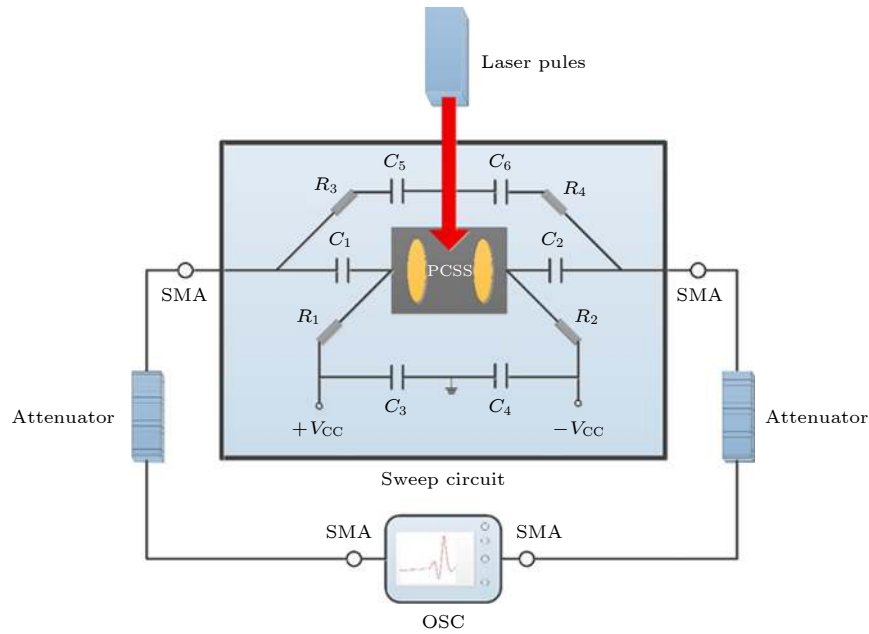


图 3 扫描电路测试电路图

Fig. 3. Testing test circuit of scanning circuit.

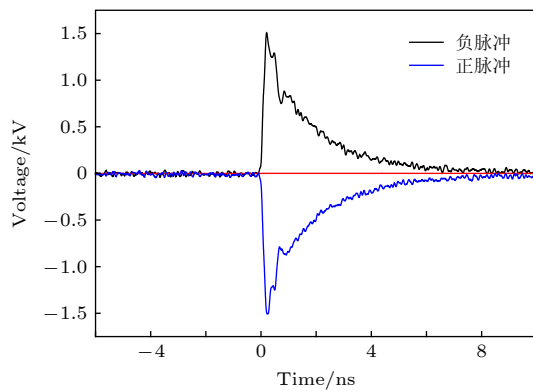


图 4 储能电容为 33 pF, 偏置电压为 ± 1.9 kV 时的输出波形图

Fig. 4. The output waveforms of 33 pF capacitor at the bias voltage is ± 1.9 kV.

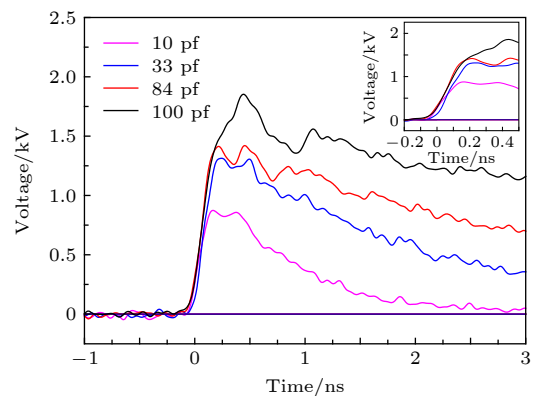


图 5 外加偏置电压为 ± 2.0 kV 时的输出波形图 (插图为上升沿波形图)

Fig. 5. The output waveforms at the bias voltage is ± 2.0 kV (insert is rising edge output waveform).

时间抖动更小 [18,19]. 因此, 为了更好地满足条纹相机的设计需求, GaAs PCSS 需工作在线性模式下.

实验中, 飞秒激光的波长为 800 nm, GaAs 材料对 800 nm 波长的吸收深度为微米量级. 实验中所使用的 GaAs 材料厚度为 0.6 mm, 因此 GaAs 材料对光是完全吸收. GaAs 材料的本征吸收限为 867 nm, 当用 800 nm 波长的激光触发 GaAs PCSS 时, 光生载流子为本征吸收所产生的. 对于光能量为 E , 波长为 λ 的入射光, 其所对应的载流子数为

$$N_L = \frac{E \cdot \lambda}{h \cdot c}, \quad (1)$$

其中 N_L 为 GaAs 材料吸收的光子数目, E 为触发

表 1 不同储能电容时输出电脉冲电压传输效率
Table 1. The voltage transmission efficiency of output waveform with different energy storage capacitor.

电容容值/pF	传输效率/%			
	± 1.5 kV	± 1.7 kV	± 1.9 kV	± 2.0 kV
10	50.4	47.2	46.9	44.3
33	72.4	71.1	68.5	66.2
82	78.6	76.2	73.9	72.1
100	89.3	92.2	92.9	92.6

光能量, λ 为波长 800 nm, h 为普朗克常数, c 为光速. 当触发光能量为 97.5 μ J 时, 根据 (1) 式计算得

表 2 不同储能电容时输出电脉冲上升时间
Table 2. The rise time of output waveform with different energy storage capacitor.

电容容值/pF	上升时间/ps			
	± 1.5 kV	± 1.7 kV	± 1.9 kV	± 2.0 kV
10	158	159	163	149
33	174	169	175	174
82	189	198	180	190
100	380	385	352	377

出此时载流子数目为 4.1×10^{14} 个.

当外加偏置电压为 ± 2.0 kV 时, 对于电极间隙为 3.5 mm 的 GaAs PCSS, 此时电场强度为 11.43 kV/cm. 根据输出电脉冲波形, 可以计算出载流子的倍增率^[20],

$$G = \frac{N_G}{N_L}, \quad (2)$$

其中 G 为载流子倍增率, N_G 为光生载流子数. 通过 (2) 式计算可得出, 载流子的倍增率约为 1×10^{-3} , 也就是说载流子未出现倍增, 即开关工作在线性模式下. 当 GaAs PCSS 工作在线性模式时, 输出电脉冲的上升时间和传输效率除了受触发激光特性和偏置电场的影响外, 储能电容也会对其产生影响. 在相同的外加偏置电压时, 由于使用的 GaAs PCSS 的间隙均为 3.5 mm, 因此, 开关上的外加偏置场强是相同的. 此外, 由于触发激光脉冲特性相同, 即单位时间内光生载流子的产生数量及速度相同. 作为能量的储存或输出装置, 当电容增大时, 电容储存的电量也会增加. 因此提供给开关的电能也就相应增加, 使得输出电脉冲的传输效率增大. 同时, 储能电容的增大导致了电路充放电时间常数的增大, 对光脉冲响应的灵敏度降低, 则输出电脉冲上升时间增大.

5 结 论

本文根据飞秒条纹相机中对扫描电路的需求, 设计了基于 GaAs PCSS 的具有快前沿正负对称输出的扫描电路. 利用飞秒激光脉冲触发 GaAs PCSS, 在不同的储能电容及外加偏置电压下, 获得了单边输出电脉冲的上升时间最快为 149 ps, 电压传输效率最高为 92.9%, 测试结果满足条纹相机的设计需求. 通过对实验值的对比分析, 得出在相同的触发激光脉冲, 储能电容会影响输出电脉冲的

效率及上升时间. 结合输出电脉冲波形计算载流子的倍增率, 得出 GaAs PCSS 工作在线性模式下. 根据线性模式的工作特点及电容的储能特性, 分析指出在触发激光脉冲特性相同时, 随着储能电容增大, 输出电脉冲电压传输效率及上升时间均增加, 这与实验结果一致. 该研究对 GaAs PCSS 更好地应用在飞秒条纹相机中具有一定的指导意义, 同时对提高飞秒条纹相机的时间分辨率具有一定的推进作用.

参考文献

- [1] Wang L N, Liu J L 2017 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **45** 3240
- [2] Ma C, Yang L, Wang S Q, Ji Y, Zhang L, Shi W 2017 *IEEE Trans. Power Electr.* **32** 4644
- [3] Zhang T, Liu K F, Gao S J, Shi Y W 2015 *IEEE Trans. Dielect. El. In.* **22** 1991
- [4] Zhang L, Shi W, Cao J C, Wang S Q, Dong C G, Yang L 2019 *IEEE Electr. Device Lett.* **40** 291
- [5] Shi W, Fu Z L 2013 *IEEE Electr. Device Lett.* **34** 93
- [6] Gaudet J A, Skipper M C, Abdalla M D, Ahem S M, Romero S P, Mar A, Zutavem F J, Loubriel G M, O'Malley M W, Helgeson W D 2000 *Intense Microwave Pulses VII* Orlando, USA, April 24–28, 2000 p121
- [7] Hu L, Su J C, Qiu R C, Fang X 2018 *IEEE Trans. Electron Dev.* **65** 1308
- [8] EI A S, De A A, Arnaud-Cormos D, Couderc V, Leveque P 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 673
- [9] Shi W, Yan Z J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 228702 (in Chinese) [施卫, 闫志巾 2015 物理学报 **64** 228702]
- [10] Liu J Y, Wang J, Shan B, Wang C, Chang Z H 2004 *Fourth-Generation X-Ray Sources and Ultrafast X-Ray Detectors* California, USA, August 4–6, 2004 p123
- [11] Larsson J, Chang Z, Judd E, Schuck P J, Falcone R W, Heimann P A, Padmore H A, Kapteyn H C, Bucksbaum P H, Murnane M M, Lee R W, Machacek A, Wark J S, Liu X, Shan B 1997 *Opt. Lett.* **22** 1012
- [12] Maksimchuk A, Kim M, Workman J, Korn G, Squier J, Du D, Umstadter D, Mourou G, Bouvier M 1996 *Rev. Sci. Instrum.* **67** 697
- [13] Liu J Y, Wang J, Shan B, Wang C, Chang Z H 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3553
- [14] Shi W, Yang L, Hou L, Liu Z N, Xing Z Y 2019 *Appl. Sci.* **9** 328
- [15] Shi W, Gui H M, Zhang L, Li M C, Ma C, Wang L Y, Jiang H 2013 *Opt. Lett.* **38** 4339
- [16] Shi W, Gui H M, Zhang L, Ma C, Li M X, Xu M, Wang L Y 2013 *Opt. Lett.* **38** 2330
- [17] Gui H M, Shi W, Ma C, Fan L L, Zhang L, Zhang S, Xu Y J 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 2015
- [18] Shi W, Zhang L, Gui H M, Hou L, Xu M, Qu G H 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 154106
- [19] Gui H M, Shi W 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 184207 (in Chinese) [桂淮濛, 施卫 2018 物理学报 **67** 184207]
- [20] Xu M, Li R B, Ma C, Shi W 2016 *IEEE Electr. Device Lett.* **37** 1147

Effect of capacitance on positive and negative symmetric pulse with fast rising edge based on GaAs photoconductive semiconductor switch^{*}

Gui Huai-Meng¹⁾²⁾ Shi Wei^{2)†}

1) (*College Information Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China*)

2) (*Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

(Received 7 March 2019; revised manuscript received 18 June 2019)

Abstract

Femtosecond streak camera is currently the only diagnostic device with a femtosecond time resolution. Scanning circuit with bilateral symmetrical output is an important part of femtosecond streak camera. To achieve better performance of the streak camera, high requirements are placed on the output of scanning circuit. Owing to the excellent feature of litter time jitter and fast response speed, a GaAs photoconductive semiconductor switch (PCSS) has become a core device in the scanning circuit. Investigating the positive and negative symmetric pulses with fast rising edge of GaAs PCSS is of great significance to improving the time resolution of femtosecond streak camera. In this paper, a laser with a pulse width of 60 fs was used to trigger a GaAs PCSS with an electrode gap of 3.5 mm. Under different storage capacitors and bias voltages, the positive and negative symmetric pulses with the fastest rise time of 149 ps and the highest voltage transmission efficiency of 92.9% were obtained. The test results meet the design requirements of streak camera to realize femtosecond time resolution. Through the comparative analysis of the experimental values, it is concluded that the storage capacitor can affect the efficiency and rise time of the output electrical pulse in the same trigger laser pulse. By calculating the multiplication rate of carriers in combination with the output electrical pulse waveform, it is concluded that the GaAs PCSS operates in linear mode. According to the working characteristics of the linear mode and the energy storage characteristics of the capacitor, the analysis indicates that, when the characteristics of the trigger laser pulse are the same, the transmission efficiency and rise time of the output electric pulse voltage increase with the increase in storage capacitor, which is consistent with the experimental results. This study has a certain guiding significance for the better application of GaAs PCSS in femtosecond streak camera, which also has a certain propelling effect on improving the time resolution of femtosecond streak camera.

Keywords: GaAs photoconductive semiconductor switch, positive and negative symmetric pulse, fast rising edge, energy storage capacitance

PACS: 42.65.Re, 42.79.-e, 72.40.+w

DOI: [10.7498/aps.68.20190321](https://doi.org/10.7498/aps.68.20190321)

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0701005), the State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect of China (Grant No. SKLIPR1812), Shaanxi Science and Technology Project, China (Grant No. 2019NY-174), and the Special Scientific Research Plan of Shaanxi Provincial Education Department, China (Grant No. 17JK0056).

[†] Corresponding author. E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn