

文章编号: 1000-7032(2019)06-0803-05

# 不同激光能量涨落对 GaAs 光电导开关时间抖动的影响

桂淮濛<sup>1,2</sup>, 施 卫<sup>2\*</sup>

(1. 陕西工业职业技术学院 信息工程学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 结合激光能量涨落对输出电脉冲涨落影响的实验,通过理论分析研究了激光能量涨落对 GaAs 光电导开关时间抖动特性的影响。实验中,当外加偏置电压为 2 kV 时,使用波长为 1 053 nm、脉宽为 500 ps 的激光触发 GaAs 光电导开关,在不同的激光能量下测试能量涨落对输出电脉冲涨落的影响,通过对比分析指出激光能量的涨落与输出电脉冲涨落成正比关系。结合对光生载流子输运过程的分析,结果表明随着激光能量涨落的增加, GaAs 光电导开关时间抖动也会随之增加,直到激光能量达到 GaAs 饱和吸收限时,能量的涨落不会再引起开关时间抖动的迅速变化。这一结论为 GaAs 光电导开关应用于条纹相机中提供了理论基础。

**关键词:** GaAs 光电导开关; 时间抖动; 能量涨落

中图分类号: O59

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20194006.0803

## Effects of Laser Energy Fluctuation on Jitter Time of GaAs Photoconductive Switch

GUI Huai-meng<sup>1,2</sup>, SHI Wei<sup>2\*</sup>

(1. College Information Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China;

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

\* Corresponding Author, E-mail: sush@ mail. xaut. edu. cn

**Abstract:** Based on the experiment of influence of laser energy fluctuation on output electric pulse fluctuation, the influence of laser energy fluctuation on the jitter time of GaAs photoconductive switch was investigated theoretically. In the experiment, GaAs photoconductive switch was triggered using the wavelength of 1 053 nm and the pulse width of 500 ps laser pulse under the condition of 2 kV bias voltage. The influence of laser energy fluctuation on the output electrical pulse fluctuation was investigated. It is shown that the fluctuation of the laser energy is proportional to the output electrical pulse fluctuation through the contrast analysis. At the same time, it is pointed out that the jitter time of GaAs photoconductive switch increases with the increase of laser energy fluctuation through the analysis of the carrier transport. The fluctuation of energy does not cause the rapid change of switching jitter time with the increase of laser power fluctuation. GaAs photoconductive switch will also increase the zone of timing jitter until the energy reaches GaAs saturated absorption limit.

**Key words:** GaAs photoconductive switch; jitter time; energy fluctuation

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-10-15

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2017YFA0701005); 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金(SKLIPR1812); 陕西省教育厅科学研究项目计划(17JK0056); 陕西工业职业技术学院专项科研计划(ZK16-13)资助项目  
Supported by National Key Research and Development Program of China(2017YFA0701005); State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect of China(SKLIPR1812); Special Scientific Research Plan of Shaanxi Provincial Education Department(17JK0056); Special Scientific Research Program of Shaanxi Polytechnic Institute(ZK16-13)

## 1 引 言

GaAs 光电导开关 (Photoconductive semiconductor switch, PCSS) 是超快激光器与光电半导体相结合形成的一类新型器件<sup>[1]</sup>。GaAs PCSS 具有快速的响应、光电隔离、高耐压、寄生电感电容小、抖动时间小、同步精度高等特性<sup>[2-3]</sup>, 因此在超高速电子学及高功率超宽带脉冲产生领域等具有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。特别是当需要兼顾输出电脉冲的超快上升沿、超短脉宽、高重复频率、高功率、抗电磁干扰等方面时, 光电导开关成为众多功率开关中的最优选择。相比于传统的高功率开关, GaAs PCSS 具有极小的抖动时间<sup>[5-6]</sup>, 因此已广泛地应用在条纹相机及精同步控制领域。条纹相机设计中, 用于产生快前沿的半导体开关输出脉冲的速度和触发抖动决定了条纹相机的最大时间分辨率<sup>[7]</sup>。Liu 等指出在使用 GaAs PCSS 为偏转板提供电压时, 可使条纹相机的时间抖动值减小到 30 fs, 积分模式下的时间分辨率优于 590 fs<sup>[8]</sup>。

国内外学者已开展了一系列针对 GaAs PCSS 时间抖动特性的研究<sup>[9-11]</sup>。Gaudet 等指出触发光的快速上升时间是获得低抖动的关键因素, 充足的光脉冲能量以及激光准直也是至关重要的<sup>[12]</sup>。Shi 等使用光纤分光的方法, 将一束波长为 1 053 nm、脉宽为 500 ps 的激光分成能量相等的两束, 同时触发两路并联的间隙为 3 mm 的 GaAs PCSS。在外加偏置电压为 1 kV 时, 得到 GaAs PCSS 的时间抖动为 14.41 ps<sup>[13]</sup>。激光使用过程中会带来输出能量的涨落, 而能量的涨落对 GaAs PCSS 时间抖动的影响尚未有报道。本文通过触发激光能量涨落的改变对输出电脉冲幅值涨落影响的实验, 及对开关导通过程中载流子输运过程的分析, 研究了触发激光能量涨落对开关时间抖动的影响。该结果为进一步提高条纹相机的时间分辨率提供了有利的理论依据。

## 2 实 验

实验中使用横向结构 GaAs PCSS, 如图 1 所示。光电导开关的芯片材料选用的是半绝缘 GaAs, 其暗态电阻大于  $5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ , 禁带宽度为 1.43 eV, 电子的迁移率大于  $5\,000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,

载流子浓度为  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ , 载流子寿命为几个纳秒, 芯片材料的相对介电常数为 12.9, 其本征击穿场强可达 250 kV/cm。半绝缘砷化镓芯片为 8.0 mm (宽)  $\times$  10.0 mm (长)  $\times$  0.6 mm (厚度), 开关芯片表面用多层透明有机硅凝胶做绝缘保护, 防止强场下沿面闪络的发生, 该透明硅胶对触发激光几乎不吸收。半绝缘 GaAs PCSS 电极采用刻蚀方法制作, 通过优化设计来使电场更均匀, 电极为 135° 圆角, 尺寸为 6.0 mm  $\times$  3.0 mm, 其圆角半径为 1.1 mm。电极采用 Au/Ge/Ni 合金制作, 与 GaAs PCSS 芯片材料形成欧姆接触。

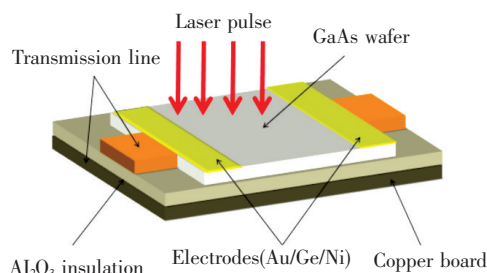


图 1 GaAs PCSS 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GaAs PCSS

触发光能量涨落对电脉冲幅值涨落影响的测试电路如图 2 所示。高压直流电源正极连接阻值为 15 M $\Omega$  的限流电阻对充电回路中的 0.1 nF 的电容器进行充电, 电容正极连接 GaAs PCSS 输入端, 开关的输出端通过 50  $\Omega$  特性阻抗匹配的传输线耦合入衰减器, 然后由 40 dB 衰减器衰减信号后经传输线耦合到示波器进行测试。在 GaAs PCSS 触发时, 用 DET210A 型 PIN 光电二极管实时监测触发光的时域波形。

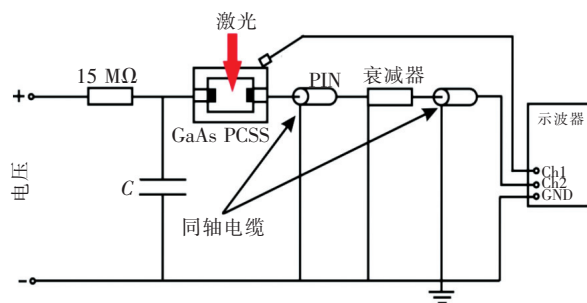


图 2 实验电路测试图

Fig. 2 Test circuit of GaAs PCSS

在外加偏置电压为 2 kV 时, 使用激光波长为 1 053 nm, 脉宽为 500 ps, 平均能量分别为

11.25, 44.9, 60.8  $\mu\text{J}$  触发 GaAs PCSS, 在每一个特定的触发光能量下连续触发 20 次, 记录每次触发光脉冲幅值和输出电脉冲的幅值。在不同的触发能量下, 分别计算出触发光脉冲幅值和输出电脉冲幅值的平均值。当外加偏置电压为 2 kV、激光能量为 60.8  $\mu\text{J}$  时, 输出电脉冲波形如图 3 所示(时间基点选为零, 触发电平为电压分度格的 50%)。

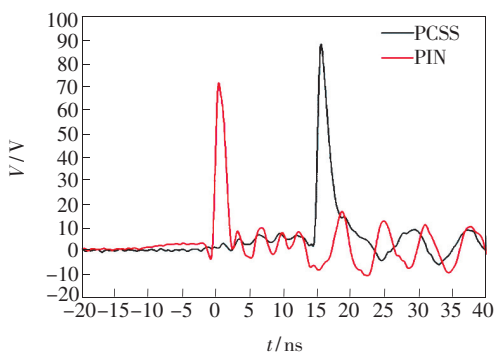


图 3 偏置电压 2.0 kV 时输出的波形图

Fig. 3 Output waveform when the 2.0 kV bias voltage

### 3 结果与讨论

从图 3 可以看出, 输出电脉冲波形与光脉冲波形形状相同, 脉宽一致。当外加偏置电压相同、触发光能量改变时, 光脉冲幅值涨落与输出电脉冲幅值涨落的关系, 如图 4、5 和 6 所示。当光脉冲幅值增加时, 输出电脉冲的幅值也会随之增加。反之, 亦然。将实验数据分别进行了线性拟合, 拟合度分别为 0.991, 0.977, 0.926。根据拟合曲线可以看出, 光脉冲幅值的涨落与

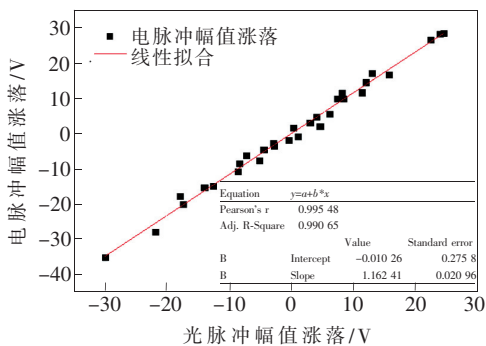


图 4 触发光能量为 11.25  $\mu\text{J}$ , 触发光脉冲幅值涨落与输出电脉冲幅值涨落关系示意图。

Fig. 4 Relationship between trigger energy fluctuation and electric pulse amplitude fluctuation when the 11.25  $\mu\text{J}$  trigger light energy

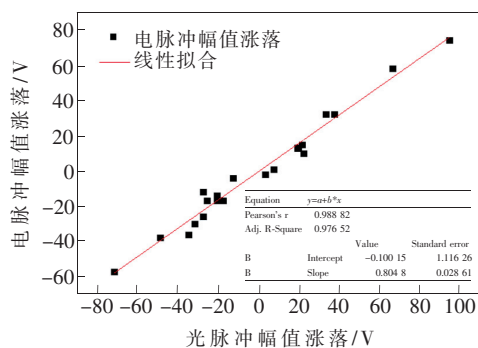


图 5 触发光能量为 44.9  $\mu\text{J}$ , 触发光脉冲幅值涨落与输出电脉冲幅值涨落关系示意图。

Fig. 5 Relationship between trigger energy fluctuation and electric pulse amplitude fluctuation when the 44.9  $\mu\text{J}$  trigger light energy

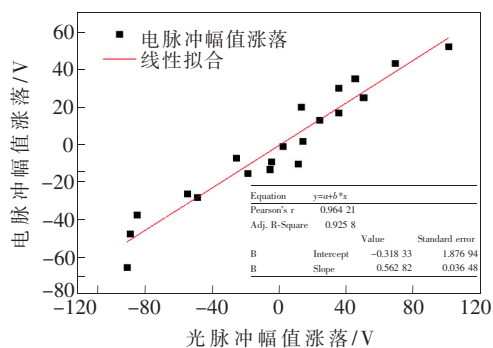


图 6 触发光能量为 60.8  $\mu\text{J}$ , 触发光脉冲幅值涨落与输出电脉冲幅值涨落关系示意图。

Fig. 6 Relationship between trigger energy fluctuation and electric pulse amplitude fluctuation when the 60.8  $\mu\text{J}$  trigger light energy

电脉冲幅值涨落成正比关系。根据 PIN 光电二极管的工作原理可知, 激光脉冲能量越大, 光脉冲幅值就越大。也就是说, 当开关工作在线性模式时, 触发光脉冲能量的涨落是引起输出电脉冲幅值涨落的主要原因。

GaAs PCSS 在不同的偏置电场及入射光能下存在两种工作模式。当偏置电场低于某一阈值时, 开关工作在线性模式下。当偏置电场超过 4~8 kV/cm, 开关将进入非线性模式(也称为 lock-on 模式)。上述实验中, GaAs PCSS 工作在线性模式下, 即每吸收一个光子最多只能产生一个电子-空穴对。载流子输运过程中由于散射过程和产生-复合过程, 使得载流子的速度和数目均存在涨落, 这就导致输出电流涨落的产生。而输出电流的表达式是关于时间的函数, 因此, 每一个确定时刻电流的大小都不是固定不变的。这使得

开关在多次导通过程中,存在时间的偏差,即为开关的时间抖动,其表达式为:

$$\Delta t_{\text{RMS}} = \frac{\Delta I_{\text{RMS}}}{\Delta I/\Delta t}, \quad (1)$$

其中,  $\Delta I_{\text{RMS}}$  为输出电脉冲涨落的标准偏差,  $\Delta I/\Delta t$  为电脉冲上升沿 50% 处的斜率。当触发激光脉冲宽度相同时,  $\Delta I/\Delta t$  为一确定的值。因此,由公式(1)可知在每一个固定时刻下,输出电脉冲的涨落越大,则经多次导通时,开关的时间抖动也就越大。在线性模式下,不存在载流子的倍增效应,则触发激光特性是决定载流子分布的关键。从实验结果中可以看出,当触发激光能量存在涨落时,输出电脉冲也随之涨落,且光脉冲幅值的涨落与电脉冲幅值涨落成正比关系。经上述分析可以看出,触发激光能量的涨落是引起 GaAs PCSS 时间抖动的关键因素,且激光能量涨落越大, GaAs PCSS 时间抖动也随之增加。

当触发激光能量足够强时, GaAs 材料会出现饱和吸收。 GaAs PCSS 输出电脉冲幅值并不会随着激光脉冲能量的增加而增加,此时载流子的数目不会再随着能量的增加而增多,载流子数目的偏差趋于稳定,因此当激光脉冲能量达到 GaAs

的饱和吸收光能时,开关的时间抖动不会随着触发光能的增大而迅速减小。

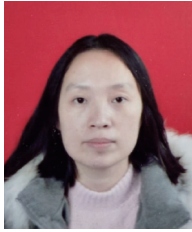
## 4 结 论

本文在外加偏置电压为 2 kV 下,使用波长为 1 053 nm 的激光触发 GaAs PCSS,在不同的激光能量下测试能量涨落对输出电脉冲能量涨落的影响。对实验数据进行线性拟合,拟合度分别为 0.991, 0.977, 0.926, 实验结果表明触发激光能量涨落与 GaAs PCSS 输出电脉冲能量涨落呈正比关系。开关工作在线性模式时,触发激光特性是决定载流子分布的关键。由实验结果可知载流子的涨落来自于触发激光能量的不稳定,同时结合开关导通过程中载流子的输运过程及时间抖动的定义,理论分析指出触发激光能量的涨落是引起 GaAs PCSS 时间抖动的关键因素,且激光能量涨落越大, GaAs PCSS 时间抖动也随之增加。当触发光能量增大到 GaAs 材料的饱和吸收限时,载流子数目不会随着能量的变化而变化。因此,能量的涨落不会引起时间抖动的迅速变化。该结论为进一步提高条纹相机的分辨率提供了理论依据。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] ZHANG T, LIU K F, GAO S J, *et al.*. Characteristics of GaAs PCSS triggered by 1  $\mu\text{J}$  laser diode [J]. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat.*, 2015, 22(4):1991-1996.
- [ 2 ] SHI W, JIANG H, LI M X, *et al.*. Investigation of electric field threshold of GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by 1.6  $\mu\text{J}$  laser diode [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104(4):042108-1-3.
- [ 3 ] CUI H J, YANG H C, XU J, *et al.*. Roles of voltage in semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch [J]. *Chin. Phys. B*, 2017, 26(1):017804-1-5.
- [ 4 ] VERGNE B, COUDERC V, LEVEQUE P. A 30-kHz monocyclus generator using linear photoconductive switches and a microchip laser [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2008, 24(20):2132-2134.
- [ 5 ] YALANDIN M I, SHARYPOV K A, SHPAK V G, *et al.*. A picosecond-jitter electron-beam-triggered high-voltage gas spark gap [J]. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat.*, 2010, 17(1):34-38.
- [ 6 ] CASTAGNO S, CURRY R D, LOREE E. Analysis and comparison of a fast turn-on series IGBT stack and high-voltage-rated commercial IGBTs [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2006, 34(5):1692-1696.
- [ 7 ] LARSSON J, CHANG Z, JUDD E, *et al.*. Ultrafast X-ray diffraction using a streak-camera detector in averaging mode [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(13):1012-1014.
- [ 8 ] LIU J Y, WANG J, SHAN B, *et al.*. X-ray streak camera with 30-fs timing jitter [C]. *Proceedings of SPIE 5194, Fourth-Generation X-Ray Sources and Ultrafast X-Ray Detectors, San Diego*, 2003:123-127.
- [ 9 ] SHI W, GUI H M, ZHANG L, *et al.*. Effects of trigger laser pulse width on the jitter time of GaAs photoconductive semiconductor switch [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(13):2330-2332.
- [ 10 ] SHI W, GUI H M, ZHANG L, *et al.*. Influence of the incident laser pulse energy on jitter time of GaAs photoconductive semiconductor switches [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(21):4339-4341.

- [11] GUI H M, SHI W, MA C, *et al.*. The jitter time of GaAs photoconductive switch triggered by 532- and 1 064-nm laser pulse [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2015, 27(19):2001-2003.
- [12] GAUDET J A, SKIPPER M C, ABDALLA M D, *et al.*. Temporal switching jitter in photoconductive switches [C]. *Proceedings of SPIE 4031, Intense Microwave Pulses VII, Orlando, FL*, 2000:121-124.
- [13] SHI W, ZHANG L, GUI H M, *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(15):154106-1-3.



桂淮濛(1985-),女,安徽蒙城县人,博士,讲师,2015年于西安理工大学获得博士学位,主要从事超快光电器件的研究。

E-mail: 304913013@qq.com



施卫(1957-),男,浙江金华人,博士,教授,1997年于西安交通大学获得博士学位,主要从事超快光电器件的研究。

E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn