

线性模式下 GaAs 光电导开关的时间抖动特性

桂淮濛 施卫

Time jitter characteristics of GaAs photoconductive semiconductor switch in linear mode

Gui Huai-Meng Shi Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 184207 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180548

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180548>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光在大气中驱动的强大太赫兹辐射的理论和实验研究

Theoretical and experimental studies on terahertz radiation from laser-driven air plasma

物理学报.2018, 67(12): 124202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180564>

液相硝基甲烷分子振动特性的相干反斯托克斯拉曼散射光谱

Coherent anti-Stokes Raman scattering spectrum of vibrational properties of liquid nitromethane molecules

物理学报.2018, 67(2): 024208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171828>

晶格振动的超快光谱调控

Manipulation of lattice vibration by ultrafast spectroscopy

物理学报.2017, 66(1): 014203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.014203>

双色圆偏振飞秒脉冲驱动 CO 分子不对称解离

Directional bond breaking of CO molecules by counter-rotating circularly polarized two-color laser fields

物理学报.2016, 65(22): 224209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224209>

全啁啾镜色散补偿的亚 8 fs 钛宝石激光器

All chirped mirrors long-term stable sub-8 fs Ti:sapphire oscillator

物理学报.2015, 64(14): 144204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144204>

线性模式下GaAs光电导开关的时间抖动特性*

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)

(2018年3月27日收到; 2018年5月20日收到修改稿)

针对线性模式下GaAs光电导开关时间抖动特性的研究, 对提高精密同步控制系统的输出性能具有重要意义. 根据电脉冲的概率分布和时间与电脉冲波形的对应关系, 结合载流子的输运过程, 对光电导开关时间抖动进行了定性的理论推导. 此外, 通过搭建实验平台, 利用正交光栅分光, 将一束激光同时触发两路并联的GaAs光电导开关, 改变触发激光脉冲宽度及外加偏置电压测试开关时间抖动, 根据实验值的对比分析, 得出在不同的外加偏置电压下, 随着触发激光脉冲宽度的减小, 开关时间抖动值随之减小. 验证了触发激光脉冲宽度对开关时间抖动的影响及理论分析的正确性. 研究结果对GaAs光电导开关时间抖动的进一步减小具有一定的指导意义.

关键词: GaAs 光电导开关, 时间抖动, 激光脉冲宽度, 输出电脉冲

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

DOI: 10.7498/aps.67.20180548

1 引言

GaAs 光电导开关(photoconductive semiconductor switch, PCSS)是超快脉冲激光器与半导体GaAs相结合的新型器件^[1-3]. 相比于传统的开关, 如绝缘栅型双极型晶体管^[4]、可控硅^[5]等, GaAs PCSS的时间抖动可以比传统器件少几个数量级以上^[6]. 此外, GaAs PCSS还具有响应速度快、重复频率高、触发抖动小和寄生电感电容小等特点^[7-10], 因此, GaAs PCSS已广泛地应用于脉冲功率技术、太赫兹技术、超高速电子学和宽带雷达等领域^[11-13]. 使用高功率的激光脉冲触发时, GaAs PCSS的闭合时间约为几十皮秒, 这就使相干合成多个源及转向波束成为可能. Eric和Chi^[14]通过三路并联激光触发天线阵列, 在辐射场中将功率结合起来, 电磁辐射波束转向控制, 以形成可变的辐射波束, 通过同时对所有阵列元件点火

或者相继把阵列元件弄成波状点火, 从而以极高的脉冲重复频率形成短脉冲串. 为了获得更高的性能, 每个PCSS需具有低抖动^[15]. 尤其在超快过程和超短脉冲已达到飞秒数量级, 对开关时间抖动特性的研究是必要的.

2000年, 美国圣地亚实验室Gaudet等^[16]研究指出, 使用上升时间快、能量高的激光触发GaAs PCSS时, 开关的时间抖动会减小, 但是并没有定量地指出激光上升时间及能量对GaAs PCSS时间抖动的影响. 在不同的外加偏置电压和触发光特性下, GaAs PCSS会工作在线性模式或非线性模式. 线性模式下开关每吸收一个光子最多只能产生一个电子-空穴对, 即不存在载流子的倍增效应^[17]. 当外加偏置电场与触发光能量都高于某一阈值时, GaAs PCSS将进入高倍增、持续导通状态的非线性模式(也称为高倍增模式或lock-on效应)^[18]. 这两种工作模式的导通机理不同. 相比于非线性工作模式而言, 当GaAs PCSS工作在线性模式时会获

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB339802)、国家自然科学基金(批准号: 61427814, 51377133)、强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室(批准号: SKLIPR1812)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

得更小的时间抖动,更适用于对开关时间抖动要求极高的领域.

因此,本文针对工作在线性模式下GaAs PCSS时间抖动特性展开研究.实验中,在激光能量相等的条件下,外加偏置电压从100 V增加到1000 V,步长为100 V时,使用不同脉冲宽度的激光触发GaAs PCSS.通过计算及理论分析得知,在不同的外加偏置电压下,随着触发激光脉冲宽度的减小,开关的时间抖动也随之减小.同时指出,触发激光脉冲宽度是决定开关时间抖动量级的关键因素.

2 实验

本实验用到的PCSS结构都是横向结构,如图1所示. PCSS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 $5000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,载流子浓度为 10^{14} cm^{-3} ,载流子寿命为几纳秒,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GaAs芯片为 8.0 mm (宽) $\times 10.0 \text{ mm}$ (长) $\times 0.6 \text{ mm}$ (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,此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° 直角,尺寸为 $6.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm}$,其圆角半径为1.1 mm,电极是用Au/Ge/Ni合金制作的,与GaAs PCSS芯片材料形成欧姆接触.

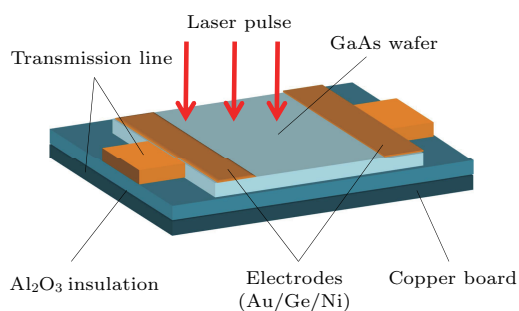


图1 GaAs PCSS结构

Fig. 1. Structure of GaAs PCSS.

本实验的测试电路如图2所示.激光器(型号为Dawa-350)脉宽可调,其输出波形为高斯分布.利用正交光栅将触发光脉冲分成完全相同的两束光,用于同时触发两路并联的GaAs PCSS.在每一

个支路中,直流高压电源正极连接阻值为 $10 \text{ M}\Omega$ 的限流电阻,为 0.53 nF 的电容器进行充电,电容器正极连接GaAs PCSS的一端,另一端通过特性阻抗为 50Ω 的高速传输线耦合接入衰减器,信号通过衰减器衰减后再经过传输线接入到示波器进行测量.示波器测量到PCSS导通瞬间的脉冲信号,通过计算并乘以衰减器的衰减倍数,就可以得到开关输出电流的时域波形.

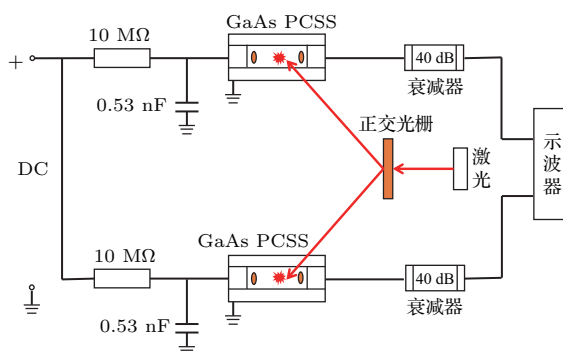


图2 GaAs PCSS时间抖动测试图

Fig. 2. Test circuit of time jitter of GaAs PCSS.

3 测量结果

当波长为 1064 nm 、脉宽为 13.8 ns 、能量为 0.35 mJ 的激光同时触发两路并联的间隙为 3 mm GaAs PCSS.当外加偏置电压为 600 V 时,输出的电脉冲(时间基点选为零,触发电平为电压分度格的50%)如图3所示.从图3内插图可以看出,输出波形重叠性好.将两路波形的上升沿放大后,可以看出输出波形在其上升沿50%处是存在时间差的.

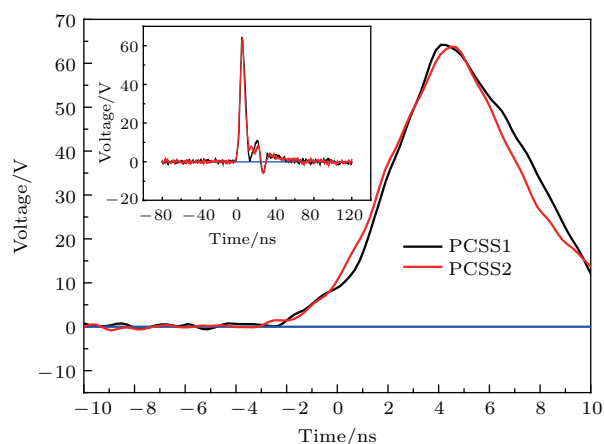


图3 偏置电压为 0.6 kV 下PCSSs输出的波形(插图为完整波形图)

Fig. 3. Output waveforms of PCSSs when bias voltage is 0.6 kV (Insert is whole output waveform).

在触发激光脉冲波长为1064 nm, 能量为0.35 mJ, 脉冲宽度分别为30, 22, 16和11 ns条件下, 外加偏置电压从100 V增加到1000 V, 步长为100 V时测量开关的时间抖动, 计算结果如图4所示^[19]. 从图4可以看出, 在每一个确定的外加偏置电压条件下, 随着触发激光脉冲宽度的减小, GaAs PCSS的时间抖动会随之减小.

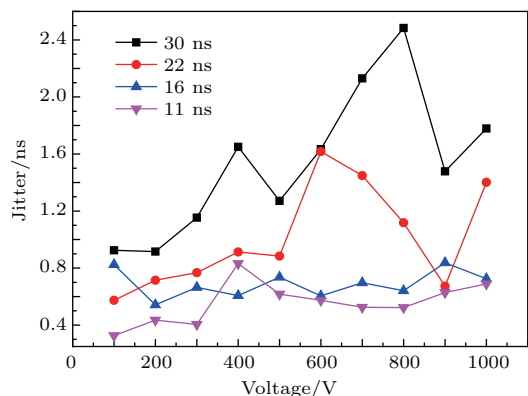


图4 不同偏置电压下, 激光脉冲宽度与 GaAs PCSS 时间抖动示意图^[19]

Fig. 4. Relationship between the laser pulse width and the time jitter of GaAs PCSS under different bias voltage^[19].

4 讨 论

在载流子输运过程中, 由于热运动的无规则性, 载流子的速度及其分布将会出现起伏, 从而产生电流的涨落. 根据统计学理论, 当PCSS多次导通时, 其输出电流的涨落值服从高斯正态分布, 其表达式为^[20-22]

$$f(\Delta I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta I_{\text{RMS}}^2}} \exp\left(-\frac{\Delta I^2}{2\Delta I_{\text{RMS}}^2}\right), \quad (1)$$

式中 ΔI 为输出电流的涨落, ΔI_{RMS} 为电流涨落的标准偏差.

假设

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (2)$$

式中 S 为输出电流在其上升沿 50% 处的斜率, Δt 为 ΔI 所对应的时间差值.

根据 (1) 和 (2) 式可以得出 Δt 的概率分布函数, 其表达式为

$$f(\Delta t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\frac{(\Delta I_{\text{RMS}})^2}{S^2}}} \exp\left(-\frac{\Delta t^2}{2\frac{\Delta I_{\text{RMS}}^2}{S^2}}\right). \quad (3)$$

开关的时间抖动是指开关多次导通时间的标准偏差, 其表达式为

$$\Delta t_{\text{RMS}} = \frac{\Delta I_{\text{RMS}}}{S} = \frac{\Delta I_{\text{RMS}}}{(\Delta I/\Delta t)}, \quad (4)$$

式中 Δt_{RMS} 为开关时间抖动. 当开关工作在线性模式时, 开关每吸收一个光子最多产生一个电子空穴对, 则电流的表达式为

$$I = e \sum_{i=1}^N v_i, \quad (5)$$

其中 I 为输出电流, e 为电子电量, N 为载流子数目, v_i 为载流子速度.

由于载流子在运动过程中存在散射和复合过程, 导致其速度和数目均不是固定不变, 而是存在涨落. 因此, (5) 式可改写成如下形式:

$$I = e \sum_{i=1}^N v_i \approx \bar{N}e\bar{v} + e \sum_{i=1}^{\bar{N}} (v_i - \bar{v}) + e\bar{v}(N - \bar{N}), \quad (6)$$

式中 $\bar{v}$ 为载流子的平均速度, $\bar{N}$ 为载流子的平均数目.

输出电流涨落的表达式为

$$\Delta I = I - \bar{I} = e \sum_{i=1}^{\bar{N}} (v_i - \bar{v}) + e\bar{v}(N - \bar{N}), \quad (7)$$

式中 $\bar{I}$ 为电流平均值.

由于只分析激光脉冲宽度对 GaAs PCSS 时间抖动的影响, 而激光脉冲宽度的改变不会影响载流子速度的涨落. 此处将忽略载流子速度涨落对 GaAs PCSS 时间抖动的影响. 根据 (7) 式可知, 电流涨落正比于载流子数目的涨落值. 当激光脉冲宽度减小时, 其上升时间也会减小, 则在单位时间内产生的载流子数目会增加. 当 GaAs PCSS 工作在线性模式时, 载流子不存在倍增过程, 全部来自于光生载流子. 因此载流子数目的涨落正比于触发光能量的涨落. 实验中, 记录了每次触发光能量的大小, 经计算得到能量的偏差约为 8%. 即输出电流涨落的大小是基本一致的. 当激光脉冲宽度减小时, 输出电脉冲在其上升沿 50% 处的斜率会增加. 根据 (4) 式可知, 当激光脉冲宽度减小时, 开关的时间抖动也会相应减小.

从 (4) 式可以看出, 输出电脉冲上升沿的斜率是影响开关时间抖动的重要因素. 当开关工作在线性模式时, 触发光特性是影响开关输出电脉冲上升

时间的关键因素. 从之前的实验结果(图4)可知, 当使用脉宽为纳秒量级的激光器触发 GaAs PCSS 时, 得到开关时间抖动在纳秒或亚纳秒量级. 当使用脉宽为 500 ps 的激光器时, 得到开关时间抖动为 14.41 ps^[19]. 当使用脉宽为 25 fs 的激光器时, 得到开关时间抖动为 30 fs^[23]. 若光脉冲的宽度减小一个数量级, 则其上升沿也会减小一个数量级. 由于光脉冲和输出电脉冲的波形相似, 这就使得在电脉冲上升沿 50% 处的斜率减小一个数量级, 因此开关的时间抖动也会相应减小. 从以上分析可以看出, 激光脉冲宽度是影响开关时间抖动的主要因素, 甚至决定了时间抖动的量级.

5 结 论

本文根据 GaAs PCSS 应用在精密同步控制系统中要求实现低抖动的应用需求, 研究了在不同的外加偏置电压下, 改变触发激光脉冲宽度对线性模式下 GaAs PCSS 时间抖动的影响. 通过建立电脉冲的概率分布和时间与电脉冲波形的对应关系, 结合载流子的输运过程, 对 GaAs PCSS 时间抖动进行了定性的理论推导. 改变外加偏置电压及触发激光脉冲宽度, 获得开关抖动测量值, 并根据实验值的对比分析, 得出随着触发激光脉冲宽度的减小, 开关时间抖动也随之减小, 这与理论分析结构一致. 该研究对进一步提高 GaAs PCSS 性能具有一定的指导意义, 同时对 GaAs PCSS 更好地应用在精密同步控制系统具有一定的推进作用.

参考文献

- [1] Zutavern F J, Armijo J C, Cameron S M, Denison G J, Lehr J M, Luk T S, Mar A, O'Malley M W, Roose L D, Rudd J V 2003 *14th IEEE International Pulsed Power Conference Texas, USA, June 15–18, 2003* p591
- [2] Zutavern F J, Reed K W, Glover S F, Mar A, Ruebush M H, Horry M L, Swalby M E, Alexander J A, Smith T L 2005 *2005 IEEE Pulsed Power Conference Washington, USA, May 14–18, 2005* p81
- [3] Hu L, Su J C, Ding Z J, Hao Q S 2015 *IEEE Electr. Device Lett.* **36** 1176
- [4] Appiah G N, Jang S R, Bae J S, Cho C G, Song S H, Ryoo H J 2017 *IEEE Trans. Dielect. Elect. In.* **24** 2006
- [5] Song B B, Do K I, Koo Y S 2018 *IEEE J. Electron Dev.* **6** 691
- [6] Zutavern F J, Glover S F, Swalby M E, Cich M J, Mar A, Loubriel G M, Roose L D, White F E 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 2708
- [7] Schoenberg J S H, Burger J W, Tyo J S, Abdalla M D, Skipper M C, Buchwald W R 1997 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25** 327
- [8] Xu M, Li R B, Ma C, Shi W 2016 *IEEE Electr. Device Lett.* **37** 1147
- [9] Zhang T, Liu K F, Gao S J, Shi Y W 2015 *IEEE Trans. Dielect. Elect. In.* **22** 1991
- [10] Vergne B, Couderc V, Leveque P 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 2132
- [11] Shi W, Wang X M, Hou L 2013 *IEEE Trans. Electron Dev.* **60** 1361
- [12] Ruan C, Zhao W, Chen G F, Zhu S L 2007 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **49** 1118
- [13] 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]
- [14] Eric E F, Chi H L 1996 *IEEE Trans. Microw. Theory* **44** 2039
- [15] Xu M, Bian K K, Ma C, Jia H J, An X, Shi W 2016 *Opt. Lett.* **41** 4387
- [16] Gaudet J A, Skipper M C, Abdalla M D, Ahem S M, Romero S P, Mar A, Zutavern F J, Loubriel G M, O'Malley M W, Helgeson W D 2000 *Intense Microwave Pulses VII Orlando, USA, April 24–28, 2000* p121
- [17] Saad E A, Annalisa D A, Delia A C, Vincent C, Philippe L 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 673
- [18] Shi W, Fu Z L 2013 *IEEE Electr. Dev. Lett.* **34** 93
- [19] Shi W, Zhang L, Gui H M, Hou L, Xu M, Qu G H 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 154106
- [20] Shi W, Gui H M, Zhang L, Ma C, Li M X, Xu M, Wang L Y 2013 *Opt. Lett.* **38** 2330
- [21] Shi W, Gui H M, Zhang L, Li M C, Ma C, Wang L Y, Jiang H 2013 *Opt. Lett.* **38** 4339
- [22] Gui H M, Shi W, Ma C, Fan L L, Zhang L, Zhang S, Xu Y J 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 2001
- [23] 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

Time jitter characteristics of GaAs photoconductive semiconductor switch in linear mode*

Gui Huai-Meng¹⁾²⁾ Shi Wei^{2)†}

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

2) (School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 27 March 2018; revised manuscript received 20 May 2018)

Abstract

Time precision switching is crucial to a high-precision synchronization control system with several synchronized sources. Compared with the other high-power switches, a GaAs photoconductive semiconductor switch (PCSS) with a litter time jitter has been widely used in a precision synchronization control system. There is little work on the time jitter of a GaAs PCSS. In this paper, a formula of GaAs PCSS time jitter is derived by the qualitative theoretical derivation through using the probability distribution of the output electrical pulse and the corresponding relation between the time and electrical waveform of GaAs PCSS, and combining the carrier transport process. In experiment, a neodymium-doped yttrium aluminum garnet nanosecond laser beam is split by a semipermeable half mirror into two optical beams, and then these two beams simultaneously trigger two identical GaAs PCSSs in two parallel circuits. As the energy of a triggering laser pulse is fixed at 0.35 mJ, four different laser pulse widths, namely 30 ns, 22 ns, 16 ns and 11 ns, respectively, are used to trigger the GaAs PCSSs. The bias voltage changes from 0.1 kV to 1 kV in steps of 0.1 kV, and it is used in the above-mentioned experiment. The PCSSs are triggered 20 times at each of the bias voltage values. The time jitter of the GaAs PCSS with a 3-mm gap can be measured. By analyzing the experimental data, we conclude that the time jitter of the GaAs PCSS decreases with the triggering laser pulse width decreasing under the condition of different bias voltage. In the linear mode, the GaAs PCSS illuminated by a photon with a proper wavelength creates an electron-hole pair. The characteristic of the triggering laser pulse determines that of the output electrical pulse. With the energy of triggering laser pulse fixed, the fluctuation of electrical pulse increases fast with its pulse width decreasing. Moreover, according to the derived formula for a time jitter, the GaAs PCSS time jitter decreases with triggering laser pulse width narrowing, under the different externally applied bias voltages. It is demonstrated that the theoretical and experimental results of the relationship between the triggering laser pulse width and the GaAs PCSS time jitter are consistent. The obtained results provide a basis for further reducing the GaAs PCSS time jitter, which is important for a next-generation fusion research facility and laser trigger antenna array of generating short pulse sequence.

Keywords: GaAs photoconductive semiconductor switch, time jitter, laser pulse width, output electrical pulse

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

DOI: 10.7498/aps.67.20180548

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB339802), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61427814, 51377133), the State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, China (Grant No. SKLIPR1812), and the Special Scientific Research Plan of Shaanxi Provincial Education Department, China (Grant No. 17JK0056).

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