

用光电导开关产生稳幅 ps 量级时间晃动 超快电脉冲的研究^{*}

施 卫¹⁾ 马德明¹⁾ 赵 卫²⁾

¹⁾ (西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

²⁾ (中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068)

(2003 年 7 月 28 日收到, 2003 年 8 月 22 日收到修改稿)

报道了用半绝缘 GaAs 光电导开关产生电压幅值稳定、ps 量级时间晃动超快电脉冲的实验结果. 分别用 ns、ps 和 fs 激光脉冲触发 GaAs 光电导开关的结果表明, 在低电场偏置下, 电极间隙为 1 mm 的 GaAs 光电导开关可以产生触发时间晃动小于 10 ps、电压幅值变化小于 1.2%、亚 ns 量级脉冲宽度的稳定超短电脉冲. 分析了触发光脉冲能量起伏对光电导开关产生超快电脉冲电压幅值的影响, 指出通过控制光电导开关的触发条件和对开关的优化设计, 就可以获得电压幅值稳定、时间晃动在 ps 量级的超快电脉冲.

关键词: 光电导开关, 超快电脉冲, 电压幅值稳定性, 时间晃动

PACC: 0660J, 7240

1. 引 言

随着雷达、通信、激光核聚变等技术领域的迅速发展, 对超快电脉冲发生系统及其开关技术提出了更高的要求. 半导体光电导开关(photoconductive semiconductor switches, PCSS's)是利用超快脉冲激光器与光电导体(如 Si, GaAs, InP 等)相结合而发展起来的一种新型光电器件, 该器件具有响应速度快、无时间晃动、高重复频率、体积小、重量轻、结构简单、易组成阵列工作等优点, 使其在超高速电子学、超快大功率电脉冲的产生、检测和整形等领域有着广泛的应用前景. 近年来 PCSS's 的研究进展十分迅速, 光电导开关的芯片材料已由 Si 改为 GaAs 或 InP 等^[1-3]. 我们用半绝缘 GaAs 材料经过后处理等工艺研制了横向型 GaAs 超快光电导开关, 对开关的线性和非线性工作模式以及工作机理作了细致研究, 并进一步分析了开关的瞬态性能和输出超短电脉冲的功率容量与开关有关参数之间的关系^[4-11]. 在高功率激光快速点火等精同步控制技术应用中, 需要用开关输出电压 6V 且幅值变化小于 2%、触发时间晃动小于 10 ps 的超快电脉冲, 由于脉冲激光器、特别是 Nd:YAG 激光器本身存在能量涨落, 输出光脉冲

的能量有 8%—15% 的变化, 这将导致光电导开关输出电压幅值的变化, 对精同步控制技术应用带来不利影响. 光电导开关芯片材料对触发光的响应速度决定开关的触发时间晃动, 触发光脉冲的能量起伏影响着光电导开关输出电脉冲电压幅值的变化幅度, 而同时兼顾无时间晃动和电压幅值稳定的超快电脉冲源尚未见到报道.

本文研制了具有全固态绝缘结构、开关电极材料采用一定比例的 Au/Ge/Ni 合金化工工艺形成欧姆接触的横向型半绝缘 GaAs 光电导开关, 用微带同轴联结方式对开关分别在 ns、ps 和 fs 超快激光脉冲触发下的瞬态特性、特别是开关输出电压幅值的稳定性和时间晃动性进行了实验测试和分析, 得到了触发时间晃动小于 10 ps、幅值变化小于 1.2% 的稳定超短电脉冲, 为光电导开关在超快精同步控制技术中的实用化提供了可靠的根据.

2. 开关结构和基本原理

PCSS's 分横向和纵向两种基本类型^[12]. 横向开关易于制作, 有较大的光照面积和电导通道. 半绝缘 GaAs 材料(其电阻率可达 10^7 — $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 击穿场强 250kV/cm)具有优良的电、光性能, 是制作光电导

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-804-2002AA842211)和国家自然科学基金(批准号: 50077017, 10376025)资助的课题.

[†] E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

开关的理想材料.本文选用的半绝缘 GaAs 作为光电导开关芯片材料制作横向 PCSS's,其暗态电阻率 $\rho > 5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$,载流子浓度为 $n \approx 10^{14} \text{cm}^{-3}$,电子迁移率 $\mu > 5500 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,芯片的厚度为 0.6 mm,外形尺寸为 9.0 mm \times 6.0 mm;用电子束蒸发工艺淀积厚度为 900 nm 的 Au/Ge/Ni 合金电极,经退火处理与 GaAs 晶片形成欧姆接触,电极尺寸为 6 mm \times 4 mm,圆角半径为 1.1 mm,两电极间隙为 1.0 mm;将这种 GaAs 芯片安装于与之匹配的平面微带传输线上,形成具有最低电感的输出方式,整个开关经微带同轴过渡与同轴电缆相接,微带传输线用高导热性能的 Al_2O_3 复铜板制作,使开关具有良好的散热性能;开关的绝缘保护采用多层固态透明介质,如图 1 所示,第一层介质为 Si_3N_4 绝缘薄膜,与通常的钝化保护层相同,第二层介质为新型有机硅凝胶,它的绝缘强度大于 280 kV/cm,在 360 nm—1200 nm 波长范围内的平均透过率约 95%,对触发光的吸收几乎可以忽略.整个开关由同轴电缆接头作为输入输出端,用超短激光脉冲照射开关芯片以触发开关导通,其结构如图 2 所示.

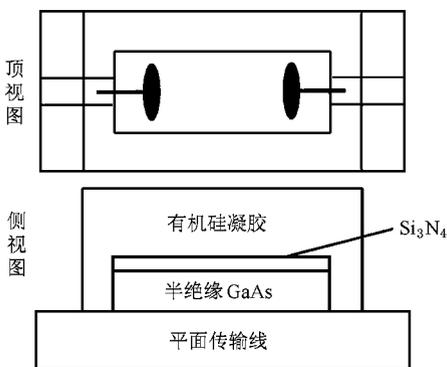


图 1 开关的绝缘结构

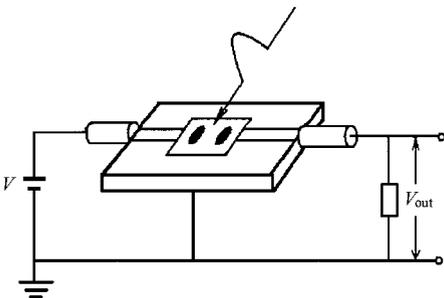


图 2 横向 GaAs PCSS 结构示意图

材料中产生电子-空穴来实现对材料电导率的调制,在直流偏置条件下,无光照时开关因高阻而呈现关断状态,若触发开关的激光脉冲能量适当,则开关受到光脉冲作用时其导通阻抗远小于传输线的特征阻抗,GaAs 开关处于导通状态.光脉冲每次照射处于直流偏置的 GaAs 开关,开关便输出一个电脉冲.在低电场下 ($< 3.5 \text{kV/cm}$),PCSS's 工作在线性模式,即半导体材料每吸收一个光子产生一对电子-空穴对,电脉冲的宽度主要取决于触发光脉冲的宽度和 GaAs 芯片材料载流子的寿命,对于 GaAs 开关,输出电脉冲的形状与触发光脉冲波形基本相同.触发光脉冲过后,开关恢复高电阻状态.工作在线性模式的 PCSS's 用于脉冲功率系统的优点是响应速度快和无触发晃动、工作电压范围宽、低电感/低电容、动态范围大等特点^[6].在强电场下,GaAs PCSS's 工作在线性模式,又称为高倍增模式或 Lock-on 效应,其优点是大功率 PCSS's 所需触发光能量与线性工作模式相比较可以降低 3—5 个数量级,从而使得超快大功率 PCSS's 可由激光二极管阵列(LDA)替代庞大的 YAG 激光器触发,但强电场下开关易因丝状电流导致击穿或表面闪络等,影响了开关的使用寿命,此外,非线性光电导开关输出电脉冲的稳定性还有待于提高^[5,7,10].

3. 实 验

电极间隙为 1 mm 的 GaAs PCSS's 分别在 ns、ps 和 fs 超快激光脉冲触发下实验测试电路如图 3 所示.根据超快精确同步控制技术的实际需要,偏置电压采用 0—30V 可调节直流电源,在光路中放置一个半反镜以检测激光脉冲能量,光能量计为 KSDP2210-CAS-1,激光器输出激光脉冲光斑位于电极中间,调节光斑直径覆盖 PCSS's 电极间隙.PCSS's 输出的电脉冲通过 50 Ω 微带线和同轴电缆连接到示波器.

用 ns 激光脉冲触发 GaAs PCSS's:纳秒 YAG 激光器波长 1064 nm,脉冲宽度为 20 ns,光脉冲能量在 50 μJ —2 mJ 范围可以调节.当光脉冲的能量低于 0.5 mJ 时,电极间隙为 1 mm 的 GaAs 开关无论其偏置电压多大,所输出电脉冲的电压幅值都受到触发光脉冲能量起伏的影响而变化,在开关偏置电压恒定的条件下,随着触发光脉冲能量的增加,开关输出电脉冲电压幅值逐渐趋于稳定.当触发光脉冲能量为 0.74 mJ 时,开关输出电压幅值几乎不变.图 4 是电

极间隙为 1 mm 的开关在 7V 的偏置电压下,用 0.74 mJ 左右的光脉冲(能量起伏约 10%)连续触发 301 次所记录输出电脉冲的重叠波形.由图 4 结果,开关输出电脉冲的触发时间晃动在 ns 量级无法分辨,脉冲宽度最大值为 23.348 ns,最小值为 20.543 ns,平均值为 22.53516 ns,输出电压幅值最大值为 6.45 V,最小值为 6.29 V,平均值为 6.3688 V,在 301 次的触发实验测试中,开关输出电压幅值变化小于 1.2%,电压传输效率达 90% 以上.

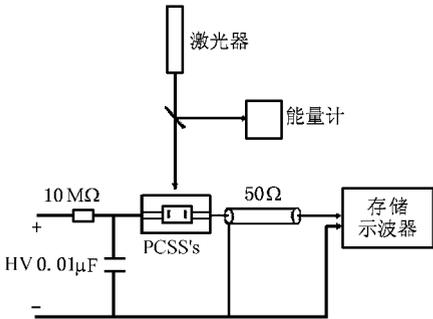


图 3 激光脉冲触发开关测试电路

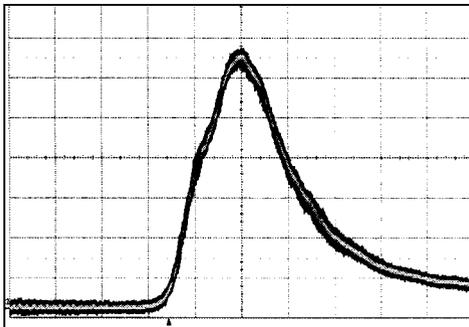


图 4 ns 激光脉冲多次触发时的电压波形(横轴为时间 10ns/div,纵轴为电压 1V/div)

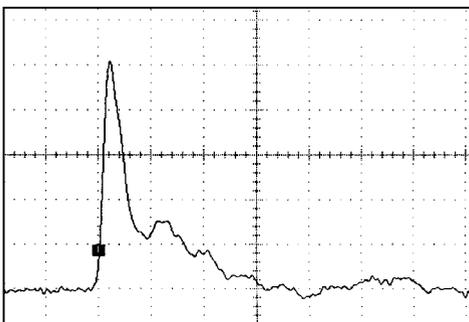


图 5 ps 激光脉冲触发时的电压波形(横轴为时间 1ns/div,纵轴为电压 1V/div)

用 ps 激光脉冲触发 GaAs PCSS's 皮秒 Nd:YAG 激光器波长 1064 nm,脉宽 100 ps,光能量在 50 μJ—3 mJ 范围可以调节,触发电极间隙为 1 mm 的 GaAs 开关,用带宽 5 GHz 的 Lecory-8500A 示波器记录输出电脉冲波形,开关偏置电压在 5V—25V 之间进行实验测试,观察输出电脉冲的稳定性.在触发光能大于 0.5 mJ 的情况下,开关输出电脉冲电压幅值相对稳定,而电脉冲电压幅值随入射光脉冲能量的变化情况与用 ns 激光脉冲触发时的情况相同.由于测试电路所使用同轴线带宽的限制,开关在不同偏置电压下所输出电脉冲的上升时间在亚 ns 量级,图 5 是开关偏置电压为 10V 时所输出电脉冲的波形.

用 fs 激光脉冲触发 GaAs PCSS's Ti:sapphire 飞秒激光器脉冲宽度小于 100fs,波长 800nm,重复频率 82MHz,单脉冲能量 10nJ,触发电极间隙为 1mm 的开关,用带宽 5GHz 的 Lecory-8500A 示波器记录输出电脉冲波形,测试开关输出脉冲的稳定性.当偏置电压为 100V 时,输出的电脉冲序列经 40dB 衰减后的波形如图 6 所示.根据输出电脉冲序列实测数据计算可得输出电压幅值变化小于 1.2%.由于触发光脉冲能量较小,开关在触发光脉冲照射期间的通态电阻较大,电压传输效率较低.由图 6 可见,因 Ti:sapphire 飞秒激光器所产生每个单脉冲的能量相对稳定,即使在触发光脉冲能量较小的情况下,只要光脉冲能量的起伏小,光电导开关同样可以输出电压幅值稳定的电脉冲.所以,当偏置电压和触发光脉冲一定时,开关输出电脉冲的电压幅值仅取决于 GaAs PCSS's 的特性.

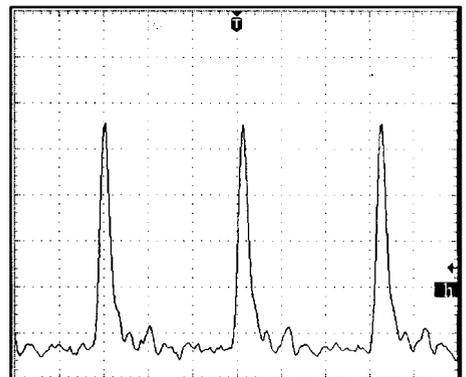


图 6 用 fs 激光脉冲触发时输出的电压波形(横轴为时间 4ns/div,纵轴为电压 10mV/div)

4. 结果和讨论

由于 GaAs 材料对入射光的响应速度小于 0.6 ps^[13],在触发光斑覆盖开关电极间隙照射的实验条件下,从入射光在 GaAs 中产生电子-空穴对(时间小于 0.6 ps)到这些电子-空穴对在偏置电场作用下形成电流的时间仅在 ps 量级(小于 10 ps),因而 GaAs 光电导开关无论在 ns、ps 还是 fs 触发导通时,均表现为 ps 量级的时间晃动,这是由 GaAs 芯片材料所决定的特性。

YAG 激光器输出光脉冲的能量起伏一般在 8%—15% 范围,由于光电导开关在触发光照射期间的通态电阻随触发光脉冲的能量而变化,这个因素将导致开关输出电脉冲电压幅值的变化。在线性工作模式下,光电导开关的平均通态电阻可以估算为^[13]

$$R = \frac{L^2 h\nu}{E_a q\mu}, \quad (1)$$

其中 L 为电极间隙, E_a 为 GaAs 吸收的光脉冲能量, μ 是电子迁移率, h 为普朗克常数, ν 为触发光频率, q 为电子电量。若 U 表示开关的偏置电压,则开关的输出电压 U_f 为

$$U_f = \frac{R_f}{R + R_f} U = \frac{R_f}{\frac{L^2 h\nu}{E_a q\mu} + R_f} U, \quad (2)$$

其中, R_f 为负载电阻。由(2)式可知,开关输出电压与开关芯片材料、电极间隙、触发光参量以及偏置电压有关。当开关芯片材料、电极间隙、偏置电压和触发光波长一定时,输出电压仅取决于触发光脉冲能量。按照(2)式,用计算机模拟了电极间隙为 1 mm 的半绝缘 GaAs PCSS's 的输出电压随 GaAs 开关芯片材料所吸收的光脉冲能量的变化曲线,见图 7;其中开关偏置电压为 15V,光脉冲波长为 1064 nm,负载电阻为 50 Ω 。从图 7 中可以看出,随着触发光单脉冲能量的增加,GaAs 开关芯片吸收光脉冲的能量也随之增加,开关输出电脉冲电压幅值逐渐增大,当开关吸收的光脉冲能量增加到一定程度时,输出电脉冲电压幅值趋于稳定。这一结果与前述实验结果的趋势是一致的,在定量上存在差异的原因主要是触发光在光路上的损失,特别是 GaAs 晶片表面的镜面抛光处理引起的反射及多层绝缘介质的每一层界面引起的反射,使得 GaAs 实际吸收的光能远小于入射光能。在实际应用中,尽管触发光脉冲的能量存在

8%—15% 的起伏,但只要满足 $R \ll R_f$ 条件,光电导开关在线性工作模式下就能够产生电压幅值稳定的电脉冲。如果触发光源能够提供较大的光脉冲能量,则可以通过提高 GaAs 吸收的光脉冲能量的方法实现 $R \ll R_f$ 条件;如果触发光源不能提供较大的光脉冲能量,如 ICF 方案精确同步控制中,要求光电导开关提供 6V 电压、幅值变化小于 2%、时间晃动小于 10 ps 的线性电脉冲,但触发光脉冲能量仅在 μJ 量级,这种情况下,可以通过减小开关的电极间隙至 μm 量级,达到满足 $R \ll R_f$ 的条件。总之,通过控制光电导开关的触发条件和对开关的优化设计,就可以用光电导开关产生电压幅值稳定、时间晃动在 ps 量级的超快电脉冲。

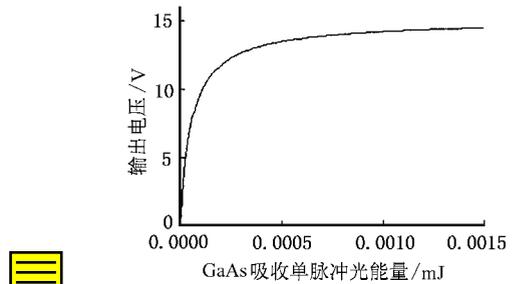


图 7 开关输出电压随 GaAs 吸收光脉冲能量的变化曲线

5. 结 论

本文研制了具有全固态绝缘结构、开关电极材料采用一定比例的 Au/Ge/Ni 合金化工艺形成欧姆接触的横向型半绝缘 GaAs 光电导开关,开关电极间隙 1 mm。用微带同轴联结方式对开关分别在 ns、ps 和 fs 超快激光脉冲触发下的瞬态特性、特别是开关输出电压幅值的稳定性和时间晃动性进行了实验测试和分析,得到了触发时间晃动小于 10 ps、电压幅值变化小于 1.2% 的稳定超短电脉冲。实验表明,开关输出电压与开关芯片材料、电极间隙、触发光参量以及偏置电压有关。当开关芯片材料、电极间隙、偏置电压和触发光波长一定时,输出电压幅值仅取决于触发光脉冲能量。随着触发光脉冲能量的增加,开关输出电脉冲电压幅值趋于稳定,不再受触发光脉冲能量起伏的影响。为获得幅值稳定的超快电脉冲,可以通过增大触发光脉冲能量的方法实现,对电极间隙为 1 mm 的 GaAs 光电导开关,所需触发光脉冲能量大于 0.5mJ;当触发光源不能提供较大的光脉冲能量时,也可以用减小开关的电极间隙的方法,获

得电压幅值稳定的超快电脉冲. 总之, 通过控制光电导开关的触发条件和对开关的优化设计, 可以用半绝缘 GaAs PCSS's 产生电压幅值稳定、时间晃动在

ps 量级的超快电脉冲, 为光电导开关在超快精密同步控制技术中的实用化提供了可靠的根据.

- [1] Lee C H *et al* 1977 *Appl. Phys. Lett.* **30** 84
- [2] Nunnally W C *et al* 1984 *Appl. Phys. Lett.* **44** 980
- [3] Loubriel G M *et al* 1987 *Proc 6th IEEE Pulsed Power Conf. Arlington*. 149
- [4] Shi W *et al* 1998 *Chin. J. Semiconductors* **19** 437 (in Chinese) [施卫等 1998 半导体学报 **19** 437]
- [5] Shi W *et al* 1999 *China. J. Semiconductors* **20** 53 (in Chinese) [施卫等 1999 半导体学报 **20** 53]
- [6] Shi W *et al* 2000 *Chin. J. Semiconductors* **21** 421 (in Chinese) [施卫等 2000 半导体学报 **21** 421]
- [7] Shi W *et al* 2000 *Acta Electronica Sinica* **28**(2) 21 (in Chinese) [施卫等 2000 电子学报 **28**(2) 21]
- [8] Shi W *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 11
- [9] Shi W *et al* 2001 *High Power Laser And Particle Beams* **13** 734 (in Chinese) [施卫等 2001 强激光与粒子束 **13** 734]
- [10] Shi W *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 867 (in Chinese) [施卫等 2002 物理学报 **51** 867]
- [11] Shi W *et al* 2003 *High Voltage Engineering* **29**(5) 1 (in Chinese) [施卫等 2003 高电压技术 **29**(5) 1]
- [12] Zutavem F J and Loubriel G M. 1992 *SPIE Proc* [C] **1632** 152
- [13] Grischkowsky D *et al* 1987 *Picosecond Electrics And Optoelectronics* II 11

Generation of steady and jitter-free ultra-fast electrical pulses with GaAs photoconductive switches *

Shi Wei¹⁾ Ma De-Ming¹⁾ Zhao Wei²⁾

¹⁾ Department of Applied Physics, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

²⁾ State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

(Received 28 July 2003 ; revised manuscript received 22 August 2003)

Abstract

In this paper, experiments of a lateral semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch triggered by nanosecond, pico-second and femto-second laser pulses were reported. The switches was insulated by solid multi-layer transparent dielectrics. Jitter-free electrical pulse with steady voltage amplitude from the 1mm-gap GaAs switches was observed when biased with a low voltage and triggered by the serial laser pulses. Its change of amplitude was less than 1.2%, the triggered jitter-time was less than 10ps, and pulse width was up to sub-nanosecond. The effect of pulse energy change on the amplitude generated photoconductive semiconductor switch was analyzed. It was indicated that ultra-fast electrical pulse with steady voltage amplitude and pico-second triggered jitter-time can be obtained by controlling switch trigger condition and optimizing the switch design.

Keywords: photoconductive switches, ultra-fast electrical pulse, stability of pulse voltage amplitude, jitter-time

PACC: 0660J, 7240

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 863-804-2002AA842211), and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 50077017, 10376025).