

用光电导开关产生超宽带电磁辐射的研究

施 卫¹, 纪卫莉¹, 赵 卫²

(1. 西安理工大学应用物理系, 陕西西安 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, 陕西西安 710068)

摘 要: 用全固态绝缘结构的横向型半绝缘 GaAs 光电导开关, 在高重复频率飞秒激光脉冲触发下产生超快电脉冲串, 经过微带同轴过渡连接至宽带微波天线进行了超宽带电磁辐射和接收的实验, 测试了辐射波形及频谱分布, 得到了上升时间为 200ps、脉宽 500ps、重复频率 82MHz、辐射频带宽度达 6.0GHz 以上的电磁波, 分析了用光电导开关进行宽带辐射的机理和特性。

关键词: 光电导开关; 超宽带辐射; 微波源

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 11-1891-03

Investigation of Ultra-Wideband Microwave Generation Based on Photoconductive Semiconductor Switches

SHI Wei¹, JI Wei-li¹, ZHAO Wei²

(1. Applied Physics Department, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

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

Abstract: The experimental results of wideband antenna radiating and receiving ultra fast electrical pulse that was generated by GaAs photoconductive switch triggered by femo-second laser pulse is reported. From receiving antenna, ultra fast electrical pulse of 200 ps rise time and 500 ps pulse width was obtained, the repetition rate of the pulse was about 82 MHz and frequency bandwidth was more than 6.0 GHz.

Key words: photoconductive switch; ultra-wideband radiation; microwave source

1 引言

随着雷达、通信、激光核聚变等技术领域的迅速发展, 利用超短激光脉冲与光电导体相结合形成的半导体光电导开关 (简称 PCSS's) 作为一种新型的超快电磁脉冲源越来越受到人们的关注。光电导开关具有快速响应 (皮秒级上升/下降时间)、GHz 的重复频率、无触发晃动、寄生电感电容小、触发隔离、动态范围大和结构灵活, 加上其耐高压和极大的电流承载能力, 使之在高功率超短电磁脉冲微波源、超宽带脉冲发生器、电磁武器等领域中具有广泛的应用前景。用光电导开关组成的微波源是一种宽带源, 电磁脉冲上升前沿为亚纳秒或皮秒量级、相对带宽超过 25%。用宽带天线发射时, 其频谱可以从几十 MHz 伸展到几 GHz 乃至几十 GHz。用光电导开关实现超宽带电磁辐射, 在电子干扰及对抗、窄脉冲雷达、通信和地下传感等领域有广泛的用途。此外, 光电导开关微波源可以直接把直流电源储存的能量转换成射频电能输出, 不需要用电子束做媒质, 也不需高能强流电子束源和产生微波的一套真

空电子设备, 具有体积小、重量轻、造价相对低廉的特点。用光电导开关产生超快电磁脉冲技术近年来发展很快, 美国桑地亚实验室、空军实验室及俄罗斯科学院等研究机构近年来一直致力于这方面的工作, 已经分别实现了用单个光电导开关和光电导开关阵列组成的超宽带微波辐射源, 其输出功率、频率响应和重复运行能力均有很大提高^[1]。

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的研究, 并进一步分析了开关的触发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^[2-4]。本文用具有全固态绝缘结构、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, 在高重复频率 fs 激光脉冲触发下所产生的超快电脉冲串, 经过微带同轴过渡连接至宽带微波天线, 进行了超宽带电磁辐射和接收的实验, 测试了辐射波形及频谱分布, 得到了上升时间为 200ps、脉宽 500ps、重复频率 82MHz、脉冲频带宽度达到 6.0GHz 以上的电磁辐射, 并分析了用光电导

收稿日期: 2003-08-07; 修回日期: 2004-07-05

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 10390160, No. 50077017); 陕西省教育厅基金 (No. 01J K25)

开关进行宽带辐射的机理和特性.

2 实验原理

2.1 GaAs 光电导开关辐射机理及电脉冲特性分析

典型的横向 GaAs 光电导开关是在半绝缘 GaAs 芯片两端制作欧姆接触电极,将其安放在与之匹配的平面传输线上,其结构满足具有最小的电感.通过微带传输线过渡到与之相匹配的同轴接头,形成开关的输入、输出端.同轴传输线的特性阻抗为 50Ω ,其带宽为 100ps.开关一般处于直流高压偏置状态,当用一束超短激光脉冲照射到光电导开关的电极间隙时,如果光子能量大与光电导材料的禁带宽度,则光电导材料吸收入射光子,其价带或深能级中的电子被激发到导带,产生电子-空穴对,形成光生自由载流子,使得光照区域材料的电导 $G(t)$ 发生变化,产生瞬态光电流沿着传输线输出,此时开关处于导通状态.当停止光照射后,由于光电导体内自由载流子的复合,载流子数目很快减少,开关的电阻率又恢复到原来的高阻状态,开关呈现关断状态.开关在导通的瞬间,输出电脉冲的参数主要受下列几个因素影响.(1)电脉冲的上升时间和脉冲宽度主要决定于触发光脉冲的上升时间及脉冲宽度;(2)电脉冲的下降沿主要决定于光电导材料载流子的寿命.所以,光电导开关输出电脉冲的波形由触发光脉冲的波形、光电导体载流子的寿命以及传输线中的电荷损耗三个因素决定.

电脉冲的上升时间和下降时间对电脉冲的频谱分布具有重要的影响.假设激励光为 δ 脉冲,且不计开关芯片暗电导的影响,则考虑了载流子的复合效应以后,电导 $G(t)$ 可表示为

$$G(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ g_0 \exp(-t/\tau), & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

g_0 为 $G(t)$ 峰值电导.开关间隙电容为 C_g ,而光电导开关的输出电压可由下式决定^[5]:

$$V_{out} = \frac{V_{in} Z_0 G_0}{1 + Z_0 G_0} \left\{ 1 + \frac{1}{Z_0 g_0 C_g} \int_0^t dt g(t) \exp[-(t-t')] \right\} \quad (2)$$

式中 V_{in} 为电源偏置电压, $\tau = (1 + Z_0 G_0) / Z_0 G_0$,其中 Z_0 为负载, G_0 为开关芯片的暗态电导.将式(1)代入式(2),可得输出电压的表达式:

$$V_{out} = \frac{V_{in} g_0}{C_g} \left| \frac{\exp(-t/\tau) - \exp(-t/\tau_c)}{1/\tau_c - 1/\tau} \right| \quad (3)$$

其中,载流子的复合寿命为 τ , τ_c 是电脉冲上升时间.对式(3)进行傅立叶变换后得到电脉冲频谱分布函数如下

$$|V(\omega)| = \frac{V_{in} g_0 Z_0}{\sqrt{2}} \frac{\tau}{\tau^2 (1 - \tau_c^2 \omega^2)^2 + \tau^2 (\tau + \tau_c)^2 \omega^2} \quad (4)$$

由式(4)可见,在 Z_0 和 g_0 不变的条件下,频谱分布函数仅受电脉冲上升时间 τ_c 及载流子复合寿命 τ 的影响.通过数值计算,可以得到:载流子复合寿命 τ 一定时, τ_c 越小(电脉冲上升时间越短),电脉冲将包含更高的频率成份,也就是说,电脉冲的频带更宽.

2.2 宽带天线

用光电导开关产生的超快电脉冲通过辐射天线转换为超

快电磁波脉冲,经自由空间传播,到达接收天线,接收天线将接收到的微波脉冲又转换为高频电流,经同轴线传送到检测系统(示波器或频谱仪).本文采用 TEM 喇叭天线作为发射天线,螺旋天线作为接收天线,传输线选用可以传输超宽带电磁信号(带宽 100ps)的同轴传输线. TEM 喇叭天线由于具有很好的方向性和辐射效果,常常用作超宽带电磁波的发射天线.螺旋天线选用轴向模螺旋天线,最大辐射方向沿轴线方向,且沿螺旋天线传播的是行波,很适合作脉冲天线.这两种天线均有很宽的工作频率范围,且天线的电特性如阻抗、方向图等在几倍频程范围内无明显变化.实验过程中,接收天线与辐射天线的距离在实验室范围内可以调节,并尽量减少外部噪声的干扰.

3 实验结果与讨论

实验测试原理示意图如图 1,触发光源是钛宝石飞秒激光器,其输出光脉冲的波长为 800nm,脉冲宽度 75fs,重复频率 82MHz,平均功率在 800mW~900mW 之间,单脉冲能量约 10nJ.

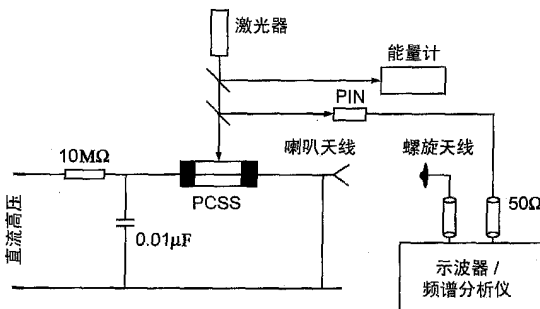


图 1 实验测试原理示意图

开关芯片材料是半绝缘 GaAs,其载流子迁移率 $\mu > 5500 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$,暗态电阻率 $> 5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$,载流子复合寿命 $< 1 \text{ns}$,开关两电极间隙 $L = 3 \text{mm}$.将 GaAs 开关与喇叭天线集成在一起,接收天线经同轴传输线分别接入示波器和频谱分析仪.同轴传输线的特性阻抗为 50Ω ,其带宽为 100ps.测试用示波器为 Lecory-8500A wave master 系列,带宽为 5GHz.实验用频谱仪是 Hp 85292L,扫描频率为 9kHz,带宽 9kHz~22GHz.

当 GaAs 开关处于 800V 直流偏置电压下被飞秒激光脉冲串触发时,由示波器直接记录开关输出的电脉冲波形如图 2 所示.因受同轴传输线带宽限制,电脉冲宽度为亚纳秒量级,电脉冲波形与触发光脉冲波形没有明显差别.

在不同直流偏置电压下用飞秒激光脉冲串触发开关,将开关输出的电脉冲连接到宽带喇叭天线进行辐射,在实验室范围内用螺旋天线接收,分别用示波器和频谱仪进行记录和测量辐射电磁波的波形和频谱分布.

图 3 是光电导开关在 1000V 直流偏置下,用喇叭天线发射,螺旋天线接收,示波器记录的电磁波脉冲序列波形.可见,用重复频率为 82MHz 的飞秒激光脉冲串触发与喇叭天线相连接的光电导开关,所辐射的电磁波脉冲具有稳定的输出.从图 2 可以观察到电磁波脉冲串的宽度为 500ps,上升时间约为 200ps.

对开关在 5000V 的直流偏压下被飞秒激光脉冲串触发时进行采样测试分析,用频谱仪测试.

图 4 是用接收天线连接至频谱仪所测量超宽带电磁辐射的频谱分布,测试结果表明,所辐射电磁波的频带宽度达 6.0GHz 以上.用实验测试的采样数据进行傅立叶变,得到的频谱分布如图 5 所示,与用频谱仪的测试结果基本吻合.

4 结论

用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,在高重复频率飞秒激光脉冲触发下产生超快电脉冲串,并经过微带同轴过渡连接至宽带微波天线进行超宽带电磁辐射和接收的实验.结果表明,用飞秒激光脉冲触发光电导开关,可以获得亚纳秒量级脉宽的电脉冲.用微带同轴过渡连接方式将光电导开关集成于 TEM 喇叭天线,在高重复频率飞秒激光脉冲触发下可以辐射超宽带电磁波,用螺旋天线接收并测试辐射波形及频谱分布,得到了上升时间为 200ps、脉宽 500ps、重复频率 82MHz、脉冲频带宽度达到 6.0GHz 以上的超宽带电磁辐射.

参考文献:

- [1] Islan N E, Schamiloglu E, Hedderman C B. Characterization of a semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch for ultrawide band high power microwave application [J]. Applied physics letters, 1998, 73, (4): 1988 - 1990.
- [2] 施卫,等.高倍增超快高压 GaAs 光电导开关触发瞬态特性分析 [J]. 电子学报, 2000, 28(2): 20 - 23.
- [3] 施卫,等.高功率亚纳秒 GaAs 光电导开关的研究 [J]. 物理学报, 2002, 51(4): 867 - 871.
- [4] Shi Wei, et al. Time-dependent analysis of high gain triggering in semi

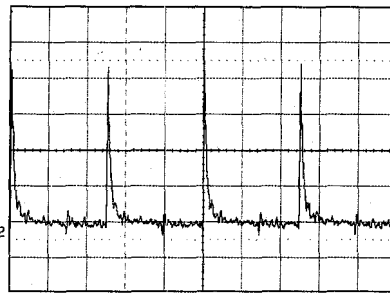


图 2 开关输出电脉冲波形

(x:5ns/div, y:500mV/div)

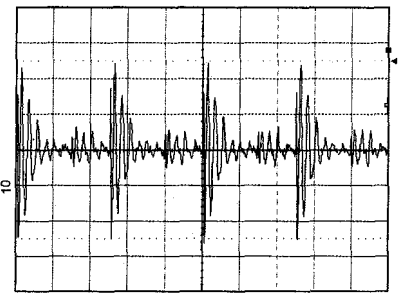


图 3 1000V 电压下,采样波形

(x:5ns/div, y:50mV/div)

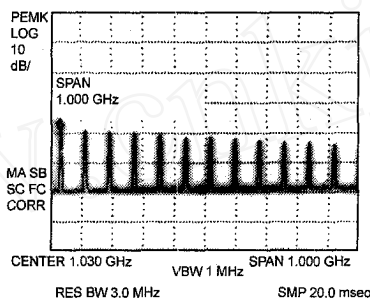


图 4 输出电脉冲频谱示意图

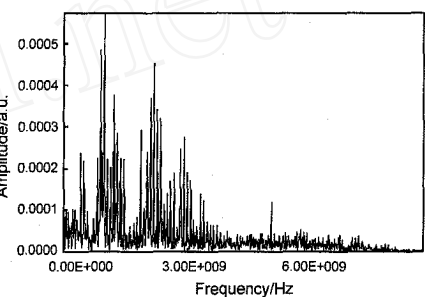


图 5 输出电脉冲频谱分布

-insulating GaAs photoconductive switches [J]. Chin Phys Lett, 2001, 18(11): 1479 - 1480.

- [5] H A Sayadian, M GLi, C H Lee. Generation of high-power broad-band microwave pulse by picosecond optoelectronic technique [J]. IEEE Tran MTT, 1989, 37(1): 43 - 50.

作者简介:

施 卫 男,1957 年出生于太原市,1997 年获西安交通大学博士学位,现为西安理工大学教授,博士生导师,研究领域为超快光电技术及其应用.

纪卫莉 女,1974 年出生于陕西富平,1998 年获西北大学物理系学士学位,现为西安理工大学讲师,在读硕士研究生,研究方向为超快光电技术及器件.