

文章编号:1001-9014(2006)03-0203-04

亚皮秒电脉冲的产生及其在槽线上的传输特性

吴添洪, 陈晓文, 刘叶新, 焦中兴, 赖天树, 林位株

(中山大学光电材料与技术国家重点实验室/物理系, 广东 广州 510275)

摘要:采用了飞秒光电导相关技术首次在以低温生长砷化镓(LT-GaAs)为衬底材料的槽线电极结构上产生亚皮秒电脉冲,并对其脉宽与传输特性进行了测量研究,得到电脉冲初始的半高全宽(FWHM)约为0.7ps,传输速度约为真空中光速的1/2.3倍;观察到电脉冲在传输过程中的强度衰减和脉冲的增宽,其衰减系数为20dB/mm,并测得脉冲传输至420后展宽至2.86ps.实验测量值与理论预期值相符.

关键词:飞秒光电导相关技术;亚皮秒电脉冲;槽线电极

中图分类号:O472+.8, TN811+.7 **文献标识码:**A

GENERATION AND PROPAGATION OF SUBPICOSECOND ELECTRICAL PULSES IN SLOTLINES

WU Tian-Hong, CHEN Xiao-Wen, LIU Ye-Xin, JIAO Zhong-Xing,
LAI Tian-Shu, LIN Wei-Zhu

(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Department of Physics
Zhongshan(Sun-Yet Sen) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Subpicosecond electrical pulses were generated and characterized in slotlines fabricated on LT-GaAs substrate for the first time, in our knowledge, by using femtosecond photoconductive correlation techniques. The measured pulse width is 0.7ps at the generation site. The velocity of the pulses propagating in the slotlines is 1/2.3 of the light velocity in vacuum and the estimated attenuation coefficient of the electrical pulses is 20dB/mm. The pulse is broadened to 2.86ps after propagating distance of 420 along the slotlines. The measured parameters are consistent with the predicted values.

Key words: femtosecond photoconductive autocorrelation technique; subpicosecond electrical pulses; slotlines

引言

随着高速电路的发展,对皮秒乃至亚皮秒电信号的产生及在各种无源电路上的传输特性的研究显得尤为重要.其中对各种传输线结构尤其是共面波导、共面带状线和微带线上传输特性的研究已经相当深入^[1~4].从低损耗、大带宽的单传输线到不同传输线间的高效耦合,以及不同衬底不同结构参数作用等研究都是人们感兴趣的课题.在测量方法上采用超短激光脉冲的光电导测量技术可以提供比传统电子学方法高得多的测量带宽,被认为是超高速光电子器件测量的有效手段之一^[6].在这些研究中对微带线和共面波导的传输特性研究较多,对槽线的传输特性的研究,尤其在THz波段的传播特性的研究则比较缺乏.槽线由于容易安装有源器件和并联

元件,容易获得较高阻抗等特点,在毫米波段已经与共面波导、微带线共同被用作最常用的传输线.为探讨槽线高频下的工作特性,本文利用飞秒光电导相关技术首次对亚皮秒电脉冲在槽线结构上的产生和传输特性进行了实验研究,测量了其传播速度,并观测到该脉冲在槽线上的传输存在较大的衰减和展宽,为这一课题的研究提供了新的资料.

1 实验及结果

所谓槽线电极是指在绝缘体或半导体衬底上的金属导电层上的小槽结构,或看作两个在同一衬底上一定距离的较宽共面导体构成的微结构元件^[5].本实验之LT-GaAs衬底槽线电极结构如图1所示:在厚度为1 μ m的LT-GaAs薄层表面真空蒸镀金属层后,再经光刻形成所需的传输线结构,得到LT-

收稿日期:2005-10-05,修回日期:2006-02-24

Received date: 2005-10-05, revised date: 2006-02-24

基金项目:国家自然科学基金(批准号:60178020,10274107,60378006)及广东省重大科技基金(批准号:2002B11601)资助的课题

作者简介:吴添洪(1979-),男,广东顺德人,中山大学硕士,主要研究飞秒激光与超快光电子学.

GaAs 超快光电导开关器件. LT-GaAs 层下面 SI: GaAs 衬底厚度 $h = 500\mu\text{m}$, 金属电极层材料为 Cr/Au, 厚度 $t = 0.1/0.2\mu\text{m}$, Cr 充当粘附层, 槽线电极缝隙宽 $W = 10\mu\text{m}$, 总宽度 $a = 600\mu\text{m}$, 取样电阻 $R_H = 10\text{K}\Omega$, 外偏压 $V_c = 20\text{V}$. 本处的槽线电极结构属于一种可滑动开关, 可以在槽的沿线任何地方进行激发和探测.

在飞秒光电导技术相关测量中的激发和探测脉冲是由同一飞秒激光器产生并由一类迈克尔逊干涉仪的光学分光延迟器分裂而成^[6], 一个用作激发产生 THz 电脉冲, 另一个用作采样探测脉冲, 它们之间有时间延迟 τ 并分别用频率为 $f_1 = 1292\text{Hz}$ 和 $f_2 = 1077\text{Hz}$ 的斩波器对两束光进行斩波调制. 当激发脉冲与探测脉冲都聚焦于槽线电极同一点时, 称同位探测; 若这两个脉冲聚集于不同点时, 则称为异位探测.

同位探测主要用于测量光脉冲的宽度和光电导产生之电脉冲的宽度. 图 2(a) 为同位探测时的飞秒光电导相关曲线, 该曲线处于延迟零点处的尖峰来源于激发光脉冲与探测光脉冲在样品中重合时产生的相干光栅, 尖峰的宽度相当于飞秒光脉冲的宽度. 实验曲线的较宽的底座则反映了电脉冲的宽度, 在亚皮秒量级^[7,8].

异位探测可以对在传输线上形成并沿槽线电极方向传输的电脉冲作采样测量. 由激发光产生的沿传输线两端传输的电脉冲可由经适当延迟的探测光脉冲触发光电导开关取样.

本实验利用自行研制的 KLM 钛宝石激光器产生的中心波长为 780nm , 脉宽约为 20fs , 重复率为 100MHz 的飞秒激光脉冲经光学延迟线分成激发和探测光脉冲, 强度均为 8mw , 其偏振方向互相平行, 且平行于槽线方向. 激发和探测光脉冲经焦距为 50mm 的透镜聚焦于样品表面, 所得差频信号经锁

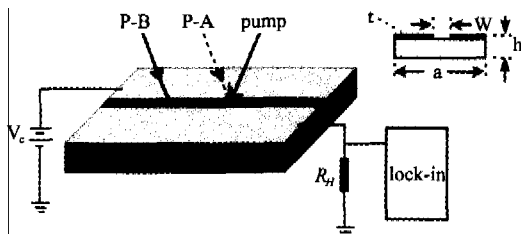


图 1 槽线样品及其连接电路, 同位探测(P-A)、异位探测(P-B)示意图, 右上插图槽线横截面
Fig. 1 Schematic of the photoconductive correlation experiment on LT-GaAs substrate. Inset: cross section of a slotline

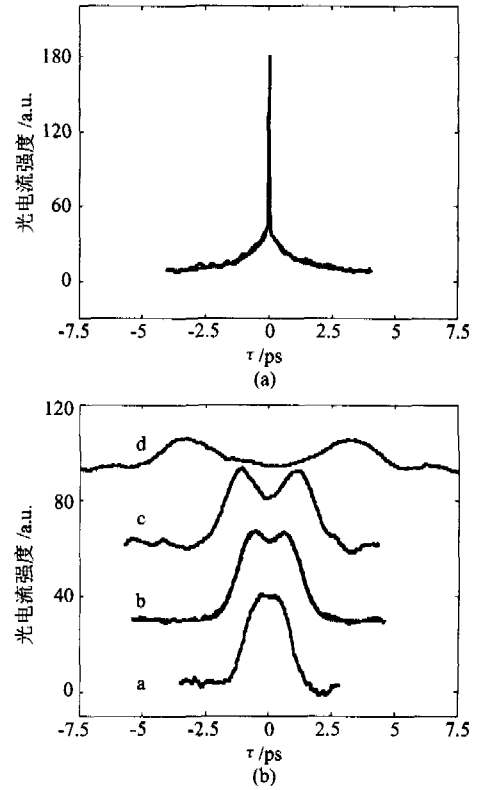


图 2 (a) 同位探测光电导相关实验曲线, 虚线为拟合曲线, 电脉冲宽度为 700fs (b) 不同传输距离下的光电流信号, 由 a 至 d 传输距离为 $60, 90, 140, 420$ 微米, 随传播距离增加脉冲展宽, 强度衰减. 图中 b, c, d 各曲线之零点已作了移动以利观察, 曲线 b 中虚线部分是双高斯拟合曲线

Fig. 2 (a) Photoconductive correlation signals of co-spot pump-probe measurement (b) photoconductive correlation traces a, b, c and d for different propagation distances of $60, 90, 140$ and $420\mu\text{m}$, respectively. The background of the traces of b, c, d is shifted for convenient observation; the dashed curve in trace b is the Gaussian fitting

相放大后, 由计算机采集. 实验中测得的相关光电流曲线如图 2 所示.

图 2(a) 为同位探测相关光电流信号. 在延迟零点之尖峰是前面所述的光脉冲相干峰, 在飞秒量级; 底座则反映槽线电极的开关特性. 通过高斯拟合, 得到电脉冲半高全宽为 700fs , 它对应于槽线电极响应时间. 图中的虚线为理论拟合曲线. 图 2(b) 为异位探测情况, 曲线 a, b, c, d 分别是激发点和探测点距离为 $60\mu\text{m}, 90\mu\text{m}, 140\mu\text{m}, 420\mu\text{m}$ 情况下测得的光电流随时间延迟变化信号. 因色散展宽, 电脉冲的宽度会随传播距离而增宽, 在 ps 量级, 具体情况将在下面的讨论中介绍. 信号曲线峰值间的延迟时间亦随传播距离而增加, 分别为 $1.02, 1.40, 2.14,$

6. 24ps.

2 数据分析

实验中测量的光电流信号曲线与实际电脉冲包络有一定差别. 文献[9]讨论了光电流信号宽度与实际电脉冲宽度之间的数量关系, 光电流信号是电脉冲与载流子密度函数的卷积. 对于本实验, 电脉冲近似为高斯型, 载流子浓度函数为指数衰减函数, LT-GaAs 中载流子寿命为 300fs. 作为卷积值的光电流信号峰半高全宽比电脉冲半高全宽略大. 电脉冲为 1~3ps 的情况下, 光电流信号半高全宽比电脉冲半高全宽值宽约 5%.

由图 2(b) 可以看到随激发-探测点距离的增大, 两电脉冲宽度增宽, 其峰值位置在延迟时间轴上的距离也随之增大, 且峰值也随之较快地衰减. 通过激发点的空间距离和延迟时间轴上两峰值点的时间差, 可以求得电脉冲产生后沿槽线电极传输的速度. 值得注意的是, 激发和探测光在延迟时间 t 和 $-t$ 时刻产生的相关信号对应于光电信号的两个峰. 因此光电流信号曲线两峰之间的延迟时间 $\tau = 2t$. 由图 2(b) 实验曲线可得到电脉冲在 LT-GaAs 衬底槽线电极结构上的传输速度 $v \approx 1.28 \times 10^8$ m/s, 约为光速的 1/2.3. 电脉冲在空气与衬底介质的界面中传播, 其速度介于空气和介质中光速之间, 由零阶无色散近似公式^[9,10]

$$v = C \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (1)$$

其中 C 为光速, ϵ_r 为衬底材料介电常数取值 13.18, 求得 $v = 1.13 \times 10^8$ m/s. 毫米波段下考虑电极结构参数的更精确更复杂的二阶解法的值较该值大 10% 左右[5], 即 $v \approx 1.24 \times 10^8$ m/s, 在误差范围内与实验值相符. Ketchen 在 SOS 衬底材料共面波导上得到的初始宽度为 0.6ps 电脉冲的速度为 1.22×10^8 m/s^[9]. Jacobsen 在 SOS 材料衬底共面带状线上得到的电脉冲速度 $\approx 1.3 \times 10^8$ m/s, 其传输线电极间距为 $30 \mu\text{m}$ ^[6]. 从衬底材料的角度考虑, SOS 中介电常数 ($\epsilon_{\text{si}} = 11.9$, $\epsilon_{\text{sapphire}} = 10$) 与 GaAs ($\epsilon_{\text{GaAs}} = 13.18$) 比较接近, 3 者较为接近的速度值是合理的. 当然除了介电常数还要考虑结构参数的影响.

在传输线的应用中, 其色散特性对高性能传输的影响尤为重要. 通过对图 2(b) 的信号分析, 可以知道不同传输距离后电脉冲的演化, 包括其色散展宽及其峰值强度变化.

初始脉宽为 0.7ps 的电脉冲, 传输 $60 \mu\text{m}$ 后电

脉冲的半高全宽增宽为 1.12ps, 结果已考虑了光电流与电脉冲宽度差. 同样在传输 $90 \mu\text{m}$, $140 \mu\text{m}$, $420 \mu\text{m}$ 后的电脉冲增宽至 1.36ps, 1.66ps, 2.86ps, 同时伴有一定程度的畸变. 由图 2(b) 可知这里的电脉冲没有拖尾现象, 主要得益于 LT-GaAs 短至亚皮秒量级的载流子寿命和较大的迁移率 ($\approx 2500 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$).

图 3 表示不同传输距离后的脉冲展宽的情况. 由图可见电脉冲脉宽的展宽程度随传播距离进一步增加而渐弱, 这与槽线电极在毫米波段的较高的辐射衰减和高色散性质有关. 和其它传输线一样, 脉冲展宽由强渐弱是由于 THz 高频成分的辐射衰减较严重所致. 在脉冲产生的初始阶段频谱较宽, 色散也严重, 随着 THz 成分的较快速衰减, 色散减弱, 增宽减缓. 电脉冲峰值强度的衰减与电磁场的有效介电损耗有关. 文献[11]对槽线电极有效介电常数进行了理论计算, 但范围局限在 300G 以内.

由图 2(B), 该电脉冲传输到 $420 \mu\text{m}$ 时会衰减到约为原来的 $1/e$, 即传输损耗系数约为 20dB/mm, 较报道的共面波导 SOS 衬底^[9]的衰减严重. 一般槽线电极都设计得较宽, 这必然导致色散和损耗较大, 传输带宽下降. 其实 LT-GaAs 的介电常数大, 介电损耗并不大. 要使 LT-GaAs 衬底槽线电极在更高频段达到实用还必须对之作进一步改良, 通过结构参数的优化或结合屏蔽部件设计等以降低损耗和色散.

3 结论

本文从实验上实现了槽线电极上 THz 电脉冲的产生和测量, 得到初始宽度约为 0.7ps 的电脉冲信号, 脉冲形状大致呈高斯型, 沿槽线电极传输速度

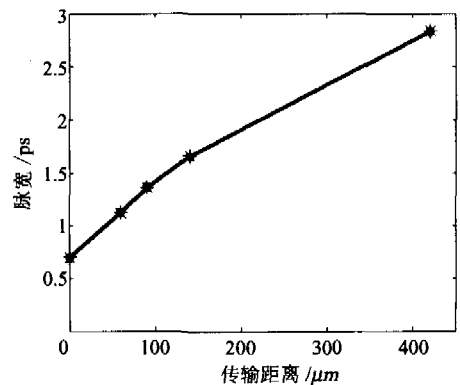


图 3 电脉冲宽度随槽线上传输距离增加而变化的情况
Fig. 3 Pulse width broadening with propagation distances along the slotline

约为 1.28×10^9 m/s, 传输 $420 \mu\text{m}$ 后展宽至 2.86ps , 传输损耗系数约为 20dB/mm . 色散展宽和辐射衰减都比同类衬底材料的共面波导等传输线严重, 性能有待提高. 据我们所知, 在实验上对短至 0.7ps 的电脉冲 THz 波在槽线电极上的传输特性的研究尚属首次. 本文的研究结果为超快光电子器件研制中电极设计提供了有益的参考.

REFERENCES

- [1] XUE Ting, HUA Yong, YANG De-Wei, *et al.* Theoretical analysis of terahertz radiation generated in periodically poled lithium niobate [J]. *Acta Photonica Sinica*, (薛挺, 华勇, 杨德伟, 等. 周期极化铌酸锂 THz 波产生理论分析, *光子学报*), 2004, **33**(10): 1180—1186.
- [2] Yang Kun, Fang Yu-De, Zhang Li-Xia, *et al.* Design of the transmission line for ECRH system in HT7 TOKAMAK [J]. *J. Infrared Millim Wave*, (杨坤, 方瑜德, 张丽霞, 等. HT7 托卡马克 ECRH 系统传输线设计, *红外与毫米波学报*), 2002, **21**(2): 129—132.
- [3] LIU Hai-Wen, LI Zheng-Fan, SUN Xiao-Wei, *et al.* Novel butterfly shape defected ground structure for microstripine [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘海文, 李征凡, 孙晓玮, 等. 一种新颖的蝴蝶结形缺陷接地结构微带线, *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(6): 431—435.
- [4] Hu B B, Weling A S, Auston D H, *et al.* Dc-electric-field dependence of THz radiation induced by femtosecond optical excitation of bulk GaAs [J]. *Phys. Rev.* 1994, **B49**: 2234.
- [5] Cohn S B. Slot line - an alternative transmission medium for integrated circuits [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1968, **17**(10): 768—778.
- [6] Jacobsen R H, Birkelund K, Holst T, *et al.* Interpretation of photocurrent correlation measurements used for ultrafast photoconductive switch characterization [J]. *J. Appl. Phys.* 1996, **79**(5): 2649—2657.
- [7] Deng Li, Liu Ye-Xin, Shou Qian, *et al.* Response characteristic of femtosecond LT-GaAs photoconductive switches at different voltage bias [J]. *Acta Physica Sinica*, (邓莉, 刘叶新, 寿倩等. LT-GaAs 飞秒光电导之电场响应特性, *物理学报*), 2004, **53**(9): 3010—3013.
- [8] Zamdmer Z, Hu Q. Increase in response time of low-temperature-grown GaAs photoconductive switches at high voltage bias [J]. *Appl. Phys. Lett.* 1999, **75**(15): 2313—2315.
- [9] Ketchen M B, Grischkowsky D, Chen T C, *et al.* Generation of subpicosecond electrical pulses on coplanar transmission lines [J]. *Appl. Phys. Lett.* 1986, **48**(12): 751—753.
- [10] Galejs J. Excitation of slots in a conducting screen above a lossy dielectric half space [J]. *IRE Trans. Antennas and Propagation*, 1962, (10): 436—443.
- [11] Wolfgang Heinrich. The slot line in uniplanar MMIC's: propagation characteristics and loss analysis [J]. *IEEE MTT-S Digest*, 1990, **2**: 167—170.