

# 皮秒电脉冲的产生、测量及在微带中的传输色散\*

肖纲要 刘玉璞 张影华 何慧娟 赵永华 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

## 提 要

本文描述了 Cr:GaAs-LiTaO<sub>3</sub> 开关——行波普克尔盒的设计结构. 用飞秒激光脉冲作激发、探针脉冲, 采用电光采样技术, 产生并测量到了上升沿约为 5ps 的超快电脉冲, 并从 Yamashita 的微带设计方程出发, 运用准 TEM 波近似, 分析了微带线的色散特性及 ps 电脉冲在微带中传播时的波形畸变, 电脉冲较陡的上升沿在传播过程中被展宽而下降沿变陡.

**关键词** 光开关, 微带, 色散, 电光采样 准 TEM 波近似

## 1 引 言

采用碰撞锁模技术<sup>[1]</sup>, 获得了几十甚至 6fs<sup>[2]</sup> 的超短光脉冲, 这本身不仅为 ps-sps 超快光电子器件提供了激发源, 而且还可以通过光学手段来测量这些器件的超快响应. 一类最常用的测量方法就是电光采样技术<sup>[3]</sup>. 超快电脉冲产生后通过微带传输线加在行波普克尔(Pockels)盒上, 由于晶体电光效应而引起探针光偏振态发生微弱变化, 就可以记录超快电脉冲的时间特性.

但是, 上述超快器件产生的 ps-sps 电脉冲频谱范围达到几百 GHz, 它们在微带传输过程中, 微带的色散和损耗会造成电波形的畸变. Denlinger<sup>[4]</sup> 和 Getsinger<sup>[5]</sup> 早年分析过微带传输线的色散特性, 但他们的结果复杂而且简单地把微带传输的电磁波考虑成纯 TEM 波, 这在几百 GHz 频域范围就不再合适. Yamashita<sup>[6]</sup> 用准 TEM 模近似, 忽略微带传输线中的高阶 TE 模和 TM 模, 建立了微带传输计算机辅助设计近似方程.

本文设计了能产生皮秒电脉冲的开关——行波普克尔盒的一体化器件, 用 80 fs、80 MHz 的飞秒光脉冲作为激发、探针脉冲, 采用电光采样方法产生并测到了最短约 5 ps 的超快电脉冲. 同时, 文中将从 Yamashita 方程出发, 分析 ps 电脉冲在微带线中传输的色散特性.

## 2 皮秒电脉冲的产生和电光采样测量

在高阻的 Cr:GaAs 材料上光刻微带隙, 就构成一个光开关. 激发光脉冲照到已偏压的开关隙上时, 在 Cr:GaAs 体内激发出电子-空穴对等离子体, 使开关隙瞬时导通, 形成一个开关

收稿日期: 1992年11月24日

\* 本课题为国家自然科学基金项目

脉冲. 把光开关与行波普克尔盒做成一体化器件, 如图 1 所示, 电脉冲沿微带传输到普克尔盒上,  $\text{LiTaO}_3$  晶体光轴与微带表面及探针光方向垂直, 开关脉冲加到  $\text{LiTaO}_3$  晶体上引起探针光偏振态变化, 由此可以测出该电脉冲. 器件的主要设计和物理参数如表 1.

Table 1. Parameters of microstrip line and switch gap

W (mm)	H (mm)	t ( $\mu\text{m}$ )	$\epsilon_r$	$\rho(\Omega \cdot \text{cm})$	gap( $\mu\text{m}$ )
0.3	0.3	0.5	47	$2.6 \times 10^{-6}$	50

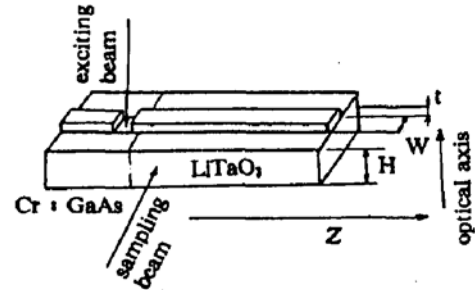


Fig. 1 Geometry of Cr : GaAs-LiTaO<sub>3</sub> device with parameters shown in table 1

图 2 为超快电光采样的装置图. 碰撞锁模染料激光器产生的 80 fs、80 MHz 飞秒光脉冲分成两束, 激发光 ( $\sim 70\%$ ) 照射 Cr : GaAs 光开关, 探针光 ( $\sim 30\%$ ) 同步通过  $\text{LiTaO}_3$  普克尔盒.  $\lambda/4$  片和起偏器  $P_1$  保证了探针光偏振态与晶体光轴  $45^\circ$  夹角, 对  $D_1$ 、 $D_2$  接收的信号差分、锁相放大, 就可以从噪声中提取信号. Valdmanis<sup>[7]</sup> 等人的光开关采用直流偏压, 这样就必须插入斩波器以作为锁相放大器的参考输入. 用 SBM-14 型示波器的 50 V、10 kHz 方波输出作为光开关的偏压, 并将该方波衰减成 1/20 作为锁相放大器的参考输入, 克服了斩波器斩波频率较低 ( $\sim 1$  kHz) 频率稳定性较差的缺点. 补偿器的作用是为了消除  $\text{LiTaO}_3$  晶体的静态双折射. 用微机控制的步进马达驱动可变延迟线, 改变探针光脉冲与电脉冲之间的相对延时, 这样, 电脉冲不同位置通过电光效应而引起的探针光偏振方向的变化也就不同. 用差分放大法测出该偏振方向的变化就可知道该电脉冲的波形. 图 3 是用电光采样方法测得的电脉冲上升沿即开关“开”时的时间响应, 它反映了 Cr : GaAs 器件的开关速度, 主要由激发光脉冲、开关隙几何结构及衬底材料等因素决定.

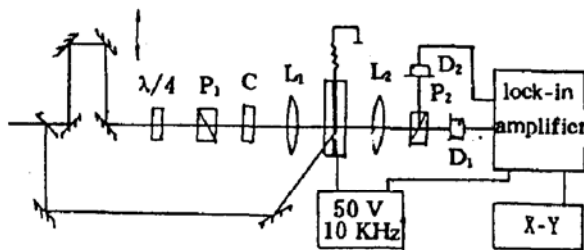


Fig. 2 Diagram of electro-optic sampling system  $P_1, P_2$  : polarizers,  $L_1, L_2$  :  $10\times$  objective lens,  $D_1, D_2$  : slow response detectors,  $C$  : compensator



Fig. 3 E-O sampling when distance between exciting and sampling beam is 1.0 mm, the 10~90% risetime is about 5 ps

由于测量系统的噪声影响, 图 3 曲线不光滑, 用曲线拟合, 并定义上升沿 10~90% 时间为开关时间, 可以确定该开关响应为 5 ps. 实验发现, 测量噪声主要来源于 fs 激光脉冲、光开关及光接收元件 ( $D_1, D_2$ ) 的热噪声和暗电流噪声. 改变探针光与开关隙的距离, 实验还测量了开关脉冲在微带中传输时的上升沿变化, 如图 4 所示. 从图 4 看出, 随着传播距离的增加, 电脉冲的上升时间增加, 即开关脉冲的上升沿在传播过程被展宽, 后面的分析发现, 这主要由于微带传

输线的色散而引起的.

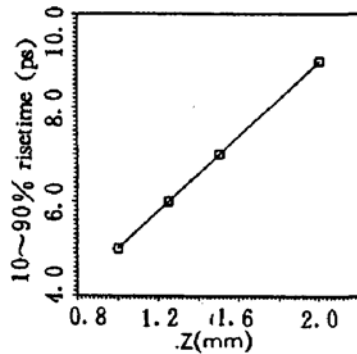


Fig. 4 Measured 10~90% risetime of electrical pulse at different sampling points

### 3 传输线色散和皮秒电脉冲的畸变

ps 电脉冲频宽达几百 GHz, 它们在微带线上传播时, 由于微带衬底材料介电常数 ( $\epsilon_r$ ) 与覆盖层(空气)在界面处的突变, 不能传播纯 TEM 波, 高阶 TE、TM 模甚至不在介质表面传播而渗透到体面, 这就使问题变得复杂. 但是, 由于传输波长远大于微带横向尺寸 ( $\lambda_d \gg W, H, t$ ), 且高阶 TE、TM 模由于渗透到体内而迅速衰减, 所以仍可以假设微带中传输的是低阶 TEM 模, 这就是准 TEM 模近似.

电磁波在介质中的传播常数:

$$\beta(f) = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon_e(f)} \quad (1)$$

式中  $\epsilon_e(f)$  为介质有效介电常数. 对 Yamashita 方程<sup>[6]</sup>稍作约化, 就得到:

$$\sqrt{\epsilon_e(f)} = \sqrt{\epsilon_{TEM}} + (\sqrt{\epsilon_r} - \sqrt{\epsilon_{TEM}}) / (1 + 4F^{-1.5}) \quad (2)$$

$$F = \frac{4fH}{c} \sqrt{\epsilon_{TEM} - 1} \cdot \{0.5 + [1 + 2\log(1 + \frac{W_e}{H})]^2\} \quad (3)$$

(3)式中, 由于考虑到电场并不局限于微带线几何宽度内, 有效宽度  $W_e = W + \Delta W$ , 根据 Bahl 结果<sup>[8]</sup>

$$\Delta W = \begin{cases} \frac{1.25}{\pi} \cdot \frac{t}{H} (1 + \ln \frac{4\pi W}{t}) & \frac{W}{H} \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{1.25}{\pi} \cdot \frac{t}{H} (1 + \ln \frac{2H}{t}) & \frac{W}{H} > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

根据准 TEM 模近似<sup>[9]</sup>:

$$\epsilon_{TEM} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 10 \frac{H}{W_e})^{-1/2} \quad (5)$$

由上述方程求得介电常数的频率分布  $\epsilon_e(f)$ , 图 5 所示. 电脉冲在介质界面的传播速度  $V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e(f)}}$ , 从图 5 看出, 低频部分有较大的传播速度而高频传播较慢, 这样就造成了电脉冲在传播过程中的畸变.

假设光开关产生的电脉冲复包络为  $A(o, t)$ , 考虑频域函数:

$$\tilde{A}(o, f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} A(o, t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (6)$$

在  $z = L$  处:

$$\tilde{A}(L, f) = e^{-[a + i\beta(f)]L} \cdot \tilde{A}(o, f) \quad (7)$$

$$\therefore A(L, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{A}(L, f) \cdot e^{+i2\pi ft} df \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为微带传输线损耗. 尽管传播频率高达几百 GHz, 但由于微带传输线厚度  $t \sim 0.5 \mu\text{m}$ , 它小于趋肤深度  $\Delta \sqrt{\rho/\mu_0 f \pi}$  ( $\rho$  为微带线电阻率), 所以由于导体趋肤效应引起的介质损耗可以忽略. 这样只考虑导体损耗  $\alpha(f)$ , 据文献<sup>[10]</sup>:

$$\alpha_c = \begin{cases} 1.38 P \frac{R}{HZ_0} \cdot \frac{32 - (W_c/H)}{32 + (W_c/H)} & (W/H \leq 1) \\ 6.1 \times 10^{-5} P \frac{R z_0 \epsilon_c(f)}{H} \left\{ W_c/H + \frac{0.667 W_c/H}{W_c/H + 1.444} \right\} & (W/H > 1) \end{cases} \quad (9)$$

$$P = 1 + \frac{H}{W_c} \left( 1 + \frac{1}{\pi} \ln \frac{28}{t} \right) \quad R = \sqrt{\pi f \mu_0 \rho}$$

图 6 中曲线(a)是用一非对称高斯函数模拟的开关电脉冲波形  $A(o, t)$ , 其上升沿为代替开关响应而下降沿代表载流子的复合过程. 用离散傅里叶级数求和代表傅里叶积分, 计算了电脉冲传播到  $Z = 2 \text{ mm}$ 、 $Z = 5 \text{ mm}$  时的波形变化(图 6 中曲线(b), 和(c)). 根据图 6 中曲线(a),  $Z = 0 \text{ mm}$  处电脉冲较陡的上升沿对应高频部分, 缓慢的下降对应于低频部分, 在微带中传播时, 微带色散使脉冲前沿展宽, 这与实验结论(图 4)是比较一致的. 而电脉冲的下降沿由于速度较快而逐渐变陡, 造成电脉冲在传播过程中的波形畸变.

由于超高频电脉冲在微带传输时, 许多物理因素都可能导致波形畸变, 本文的分析只考虑了色散和损耗, 但是定性解释本文的实验结果, 仍是很好的近似.

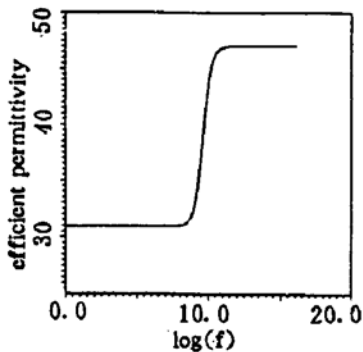


Fig. 5 Efficient dielectric constant as a function of frequency in logarithm

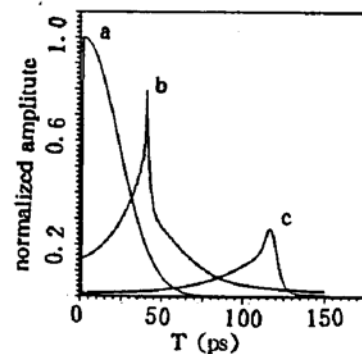


Fig. 6 Pulse wavefronts at different distances. a;  $Z = 0 \text{ mm}$ , b;  $Z = 2 \text{ mm}$ , c;  $Z = 5 \text{ mm}$ . Line a is an asymmetric Gaussian pulse with FWHM = 5 ps for leading edge and FWHM = 50 ps for trailing edge

### 参 考 文 献

- [1] R. L. Fork *et al.*, Generation of optical pulses shorter than 0.1 ps by colliding pulse mode locking, *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**(9): 671~672
- [2] R. L. Fork *et al.*, Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation, *Opt. Lett.*, 1987, **12**(7): 483~485
- [3] R. C. Alferness *et al.*, Picosecond optical sampling technique for measuring the second of fast electro-optic

- switch-modulators, *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**(7) : 597~599
- [4] E. J. Delinger, A frequency dependent solution for microstrip transmission lines. *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1971, **MTT-19**(1) : 30~39
- [5] W. J. Getsinger *et al.*, Microstrip dispersion model, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1973, **MTT-21**(1) : 34~39
- [6] E. Yamashita *et al.*, An approximate dispersion formula of microstrip lines for computer-aided design of microwave integrated circuits, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1979, **MTT-27**(12) : 1036~1038
- [7] J. A. Valdmanis *et al.*, Picosecond electro-optic sampling system, *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**(3) : 211~212
- [8] I. J. Bahl *et al.*, Simple and accurate formulas for a microstrip with finite strip thickness, *Proc. IEEE*, 1977, **65**(11) : 1611~1612
- [9] Wheeler, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1965, **MIT-13**(2) : 172
- [10] R. A. Pucel *et al.*, Losses in microstrip, *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, 1968, **MTT-16**(6) : 342~350

## Generation and measurement of picosecond electrical pulse and the dispersion on stripline

XIAO Gangyao    LIU Yupu    ZHANG Yinghua    HE Huijuan  
ZHAO Yonghua    WANG Zhijiang

*(Laboratory of Laser Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics  
Academia Sinica, Shanghai 201800)*

*(Received 24 November 1992)*

### Abstract

The configuration of optical switch and traveling-wave pockels cell (Cr : GaAs-LiTaO<sub>3</sub>) is described in this paper. Using Electro-Optic Sampling measurement with fs laser pulse as exciting and sampling beam, we have succeeded in generating and measuring ps ultrashort electrical pulse with a rise-time of 5 ps. Using Yamashita's stripline design formula and under quasi-TEM mode approximation, we have analyzed the stripline dispersion and the wavefront distortion as the ps electrical pulse travels along the stripline. It is concluded that the short leading edge of ps electrical pulse was broadened and the slow decaying trailing edge was shortened because of the stripline dispersion.

**Key words** optical switch, stripline dispersion, electro-optic sampling, quasi-TEM mode approximation.