

用不对称法布里-珀罗薄膜测量 极化聚合物的电光效应*

张大明 衣茂斌 田小建 孙 伟 侯阿临

(集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130023)

摘 要 报道用不对称的法布里-珀罗(AFP)多光束干涉膜测量极化聚合物的线性电光效应。将聚合物在有高反射膜的载体上旋涂成膜后进行电晕极化,利用聚合物自身的反射率和高反射膜构成不对称的法布里-珀罗膜,用这种聚合物电光薄膜的自由放置方法和反射式光路构造电光检测系统,测量了铟锡氧化物共面波导上的电信号,并对系统的工作原理进行了理论分析。结果表明,不对称的法布里-珀罗薄膜具有线性电光效应,在 1 kHz 正弦波时系统得到了 $5 \text{ mV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的电压灵敏度。

关键词 不对称法布里-珀罗薄膜, 极化聚合物, 电光测量。

1 引 言

由于外部电光测量^[1]克服了内电光测量^[2]对衬底的依赖性,并在调整集成电路的时域无侵扰检测中具有十分重要的应用价值,因而近年来受到高度重视。迄今为止,可实际用于电光测量的材料都是以无机的铁电体和半导体材料为主体的。这些材料一般具有介电常数大或透光波长在红外区等弱点,使系统的空间分辨率很难达到亚微米。最近几年来,有机聚合物电光材料因其具有低散射和快速的电响应以及介电常数小和透明波长在可见区等理想的特性引起人们的极大兴趣^[3],其电光性质的测试也就变得重要起来。目前对聚合物电光性质测试的方法基本是用 Teng 和 Man 的结构^[4]。我们采用的是将极化聚合物在有高反射膜的载体上旋涂成膜,再利用聚合物自身的反射率构成不对称法布里-珀罗薄膜,用反射式电光检测系统测量了极化聚合物的电光效应,并对其原理进行了理论分析。

2 理论分析

取少量合成的侧链聚合物(EPNAC)^[5]溶解后在镀有反射率为 85% 的 SiO_2 膜的玻璃载体上旋转涂膜,然后将其真空加热干燥去除残留溶剂。将薄膜加温电晕极化并用紫外光照射,使其中生色团取向和光交联基团交联成网络结构。然后在电场存在的情况下降至室温。随着温度的降低,链运动受到阻碍,取向了的生色团因此也被“冻结”,得到性质稳定的电光薄膜。

极化聚合物法布里-珀罗薄膜结构如图 1 所示,图中 r_1 为其自然反射率, r_2 为高反射膜的

* 国家自然科学基金资助项目(No. 69876014)。

收稿日期: 1999-03-15; 收到修改稿日期: 1999-08-16

反射率。设入射光的振幅为 A , 取入射位置的初始相位为零, 则入射光的电场表达式可写为 $E_0 = A \exp(i\omega t)$, 式中 ω 为入射光的角频率。当光正入射时, 第一个界面的振幅反射率为:

$$r_1 = (n_0 - n_A)/(n_0 + n_A) \quad (1)$$

这里 n_0, n_A 分别为聚合物和空气的折射率。对极化聚合物 (EPNAC) 薄膜, $n_0 = 1.63, n_A = 1.00$, 得到 $r_1 = 0.23$ 。若反射镜成为全反射面 ($r_2 = 1$) 时, 则其振幅反射率为 100%, 此时形成多光束干涉。根据反射光的复振幅叠加原理, 可得到反射光是相位受调制的光, 而相位调制的光并不改变其强度 (即光强反射率为 100%), 因此, 若要将相位调制的光转变为光探测器可检测的强度受调制的光, 需要引入参考光束^[6], 将其变换为强度受调制的光束。由于将极化聚合物薄膜旋涂于有高反射膜的载体上进行纵向 (垂直于极化膜) 的电晕极化, 利用极化膜自身的反射率 r_1 和高反射膜的反射率 r_2 ($r_2 < 1$) 构成不对称的法布里-珀罗多光束干涉膜, 因此在不需参考光束的情况下, 可将输出光束变换为强度受调制的光。将法布里-珀罗薄膜自由放置在钢锡氧化物 (ITO) 共面电极 (CPS) 上, 利用极化膜的电光效应, 对氧化物共面电极上的电信号进行测量 (见第 3 部分)。分别写出两个面多次反射的反射光束复振幅并依次叠加, 得到不对称法布里-珀罗多光束干涉膜的反射光复振幅 E_R 为:

$$E_R = A[r_1 - r_2 \exp(-i2\phi)]/[1 - r_1 r_2 \exp(-i2\phi)], \quad (2)$$

ϕ 为正入射时光线在膜内单程的相位差, $\phi = (2\pi/\lambda) n_0 d$, d 为聚合物薄膜的厚度。由 (2) 式可知, 当 $r_2 = 1$, 可得全反射时的振幅公式。根据 (2) 式, 可得到法布里-珀罗腔的反射光强 I_R 为

$$I_R = E_R \cdot E_R^* = I_0[(r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos 2\phi)/(1 + r_1^2 r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos 2\phi)], \quad (3)$$

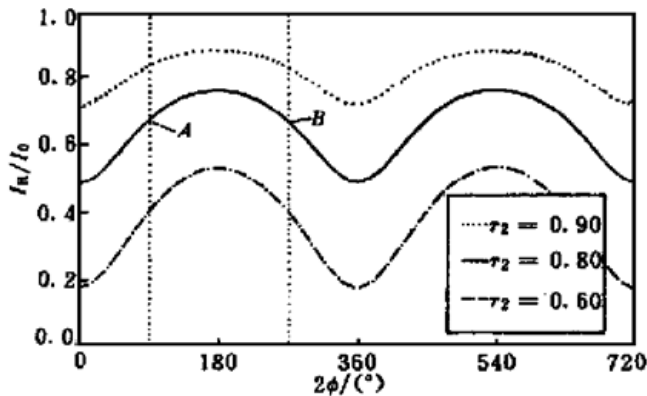


Fig. 2 Reflective light intensity I_R as a function of phase retardation 2ϕ ($r_1 = 0.23$)

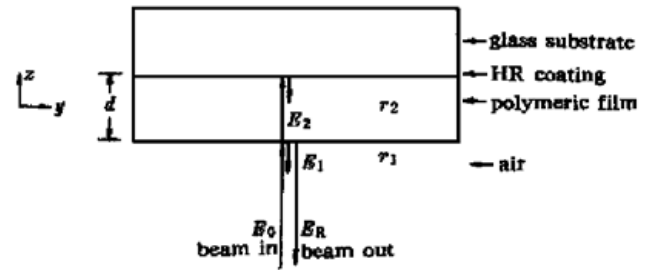


Fig. 1 The configuration of the reflection measurement technique based on an asymmetric Fabry-Perot (AFP) film

式中 E_R^* 为 E_R 的共轭复数, $I_0 = E E^* = A^2$ 为入射光强。可见当 r_1, r_2 为确定值时, 归一化反射光强 (I_R/I_0) 是相位因子 ϕ 的函数。分别画出 $r_1 = 0.23$ 及 $r_2 = 0.60, 0.80, 0.90$ 时的 I_R/I_0 和 2ϕ 关系, 示于图 2。从图 2 可看出, 反射光强随 r_2 的增加而增加, 变化的幅度随 r_2 的增加而减小, 当 r_2 趋近 1 时, I_R/I_0 趋近于 1; 当 $r_2 = 1$ 时, $I_R/I_0 = 1$, 即全反射。

由 (3) 式可知, 当 $2\phi = 90^\circ$ 时, 即图 2 中的 A、B 两点时, I_R/I_0 和 2ϕ 有最好的线性关系, 此时将 (3) 式进一步改写为:

$$I_R = I_0 \left\{ 1 - \frac{1 + r_1^2 r_2^2 - r_1^2 - r_2^2}{1 + r_1^2 r_2^2} \cdot \frac{1}{1 - [2r_1 r_2 / (1 + r_1^2 r_2^2)] \cos 2\phi} \right\}. \quad (4)$$

当 2ϕ 在 A 或 B 作微小的变化, 即 (4) 式中的 $\cos 2\phi \ll 1$ 时, 可将其改写为:

$$I_R = I_0 \left[1 - \frac{1 + r_1^2 r_2^2 - r_1^2 - r_2^2}{1 + r_1^2 r_2^2} \left(1 + \frac{2r_1 r_2}{1 + r_1^2 r_2^2} \cos 2\phi \right) \right]. \quad (5)$$

将(5)式展开整理,有:

$$I_R = I_0 \left[\frac{r_1^2 + r_2^2}{1 + r_1^2 r_2^2} - \frac{2r_1 r_2 + 2r_1^3 r_2^3 - 2r_1^3 r_2 - 2r_1 r_2^3}{1 + 2r_1^2 r_2^2 + r_1^4 r_2^4} \cos 2\phi \right] = I_0 [r_A - r_B \cos 2\phi], \quad (6)$$

式中 $r_A = \frac{r_1^2 + r_2^2}{1 + r_1^2 r_2^2}$, $r_B = \frac{2r_1 r_2 + 2r_1^3 r_2^3 - 2r_1^3 r_2 - 2r_1 r_2^3}{1 + 2r_1^2 r_2^2 + r_1^4 r_2^4}$ 。为更直接表达 I_R 和 ϕ 的关系,需给出折射率的变化。

对于如图 1 所示的不对称法布里-珀罗腔,由于共面电极宽度远大于光的波长,当光对共面电极的中间部分进行测量时,近似认为电场仅沿 z 方向。根据外加电场下折射率椭球的普遍表达式和极化聚合物的电光系数矩阵^[7] 可得对纵向电光调制的折射率椭球方程为:

$$(1/n_o^2 + \gamma_{13} E_z) x^2 + (1/n_o^2 + \gamma_{13} E_z) y^2 + (1/n_e^2 + \gamma_{33} E_z) z^2 = 1, \quad (7)$$

由(7)式可以得到新折射率椭球的主轴长度为:

$$n_x = n_o - n_o^3 \gamma_{13} E_z / 2, \quad n_y = n_o - n_o^3 \gamma_{13} E_z / 2, \quad n_z = n_e - n_e^3 \gamma_{33} E_z / 2. \quad (8)$$

由于 $n_x = n_y$, 因此不存在双折射效应,故光线沿 z 轴传播时, o 光和 e 光之间没有相位延迟。纵向相位表达式为:

$$2\phi = 2(2\pi/\lambda) n_z d = (4\pi/\lambda) n_e d - (2\pi/\lambda) n_e^3 \gamma_{33} E_z d, \quad (9)$$

对厚度不同的位置,若 d 满足:

$$(4\pi/\lambda) n_e d = k\pi + \pi/2 \quad (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (10)$$

即 2ϕ 在图 2 中的 A 或 B 点时,有:

$$\cos 2\phi = \cos [k\pi + \pi/2 - (2\pi/\lambda) n_e^3 \gamma_{33} E_z d] = \sin [(2\pi/\lambda) n_e^3 \gamma_{33} E_z d] \approx (2\pi/\lambda) n_e^3 \gamma_{33} E_z d, \quad (11)$$

可见 2ϕ 是外加调制电压的函数,故反射光强成为外加电压的函数。将(11)式代入(6)式,有:

$$I_R = I_0 [r_A - r_B (2\pi/\lambda) n_e^3 \gamma_{33} E_z d] \quad (12)$$

在建立的电光检测系统中(见图 4),入射光经过起偏器、 $\lambda/2$ 和 $\lambda/4$ 波片后入射到聚合物,经反射膜反射后用垂直于起偏器的检偏器检测,输出光强为入射到法布里-珀罗薄膜光强的一半,所以总的出射光强(I_{OL}) 为:

$$I_{OL} = I_R / 2 = (I_0 / 2) (r_A - r_B \cos 2\phi) \approx (1/2) I_0 r_A - (\pi/\lambda) r_B n_e^3 \gamma_{33} E_z d \quad (13)$$

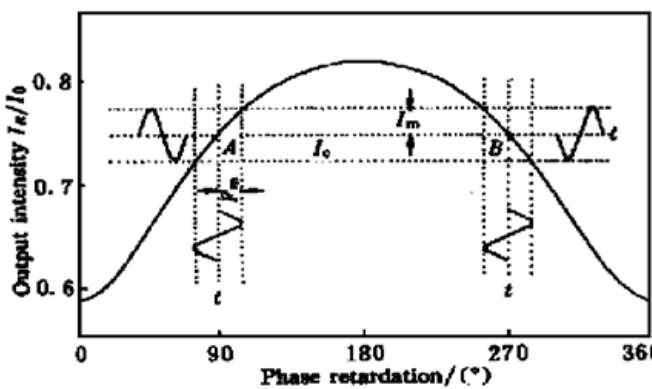


Fig. 3 Output intensity as a function of phase retardation induced by the EO effect

在(13)式中,第一项为恒定值,不受外加电压影响,起到了给输出光设置一个工作点的作用;第二项为电压控制项,可以用探测器检测出来。在特定的厚度 d , 即 d 满足(10)式,使输出光强工作在线性区 A 点或 B 点时,输出光强度与相位延迟的关系如图 3 所示。图中 I_m 表示输出信号的幅度, I_0 表示无调制时的工作点, F_m 表示输入信号的幅度。图中反射率的取值为 $r_1 = 0.23$, $r_2 = 0.85$ 。从图 3 中可以看出,当输出光强工作在 A 点时,输入电压与输出光强的波形成同相关系;当输出光强工作在 B 点

时,输入电压与输出光强成反相关系。根据(13)式可知, $E_z d \approx V_m \cos \omega_m t$ 可近似为调制信号 (V_m 为调制信号幅度, ω_m 为调制信号角频率), 由此可得不对称法布里-珀罗薄膜的光强调制度 m 为:

$$m \approx (2\pi/\lambda)(r_B/r_A)n_e^3\gamma_{33}V_m. \tag{14}$$

由(14)式, 当 $r_1 = 0.23, r_2 = 0.85$, 由实验数据 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}, n_e \approx n_o = 1.63, \gamma_{33} = 3.1 \text{ pm/V}, V_m = 5 \text{ V}$, 可得调制度 $m \approx 4 \times 10^{-5}$ 。

3 实验结果与讨论

3.1 不对称法布里-珀罗电光薄膜测量系统

在铟锡氧化物玻璃上采用光刻、腐蚀的方法制作共面电极, 用共面探针输入电信号进入铟锡氧化物共面电极作为测试信号。将不对称法布里-珀罗电光薄膜自由放置^[8]在铟锡氧化物共面电极上, 用非共轴反射式外部电光检测系统测量铟锡氧化物共面电极上的电信号, 其实验原理框图如图 4 所示。图中由信号源发出的交流信号通过共面探针加到铟锡氧化物共面电极上作为待测信号, 共面电极的输出接到 HP54503A 数字存储示波器上。激光器输出连续光, 通过棱镜起偏器和波片组, 将入射光变换为圆偏振光, 然后用聚焦透镜将光束透过玻璃、铟锡氧化物共面电极和电光薄膜聚焦到高反射镜面上。当铟锡氧化物共面电极上通过电信号时, 电场延伸进入电光薄膜内; 电光薄膜在电场作用下折射率发生变化; 经过多光束干涉, 使反射镜面反射回来的光束受到电场调制; 经过检偏器和探测器转换为电信号并由前置放大器接收放大; 用存储示波器对波形进行分析比较和存储。

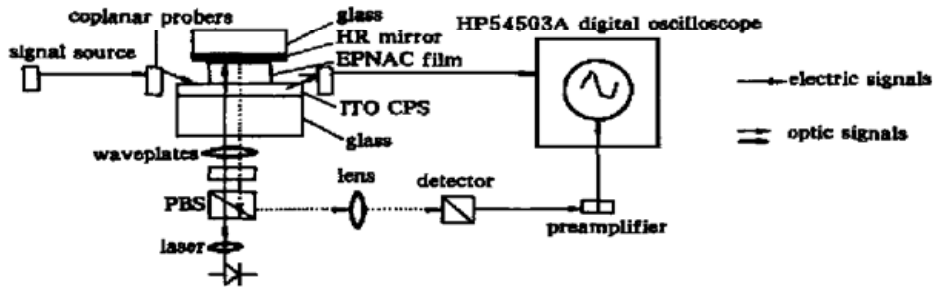


Fig. 4 Schematic diagram of the AFP EO measuring system

3.2 不对称法布里-珀罗薄膜测量方波信号

方波信号在数字集成电路中应用广泛, 而且在电光调制中方波信号的测量又最有代表性, 因此我们在铟锡氧化物共面电极上传输方波信号, 用不对称法布里-珀罗电光薄膜进行外部调制测试, 实测到的波形如图 5 所示。该波形是在高反射膜的反射率为 85%、输入方波频率为 1 kHz、电压峰-峰值为 5 V 时的电光输出曲线。从图 5 中可以看出, 用不对称法布里-珀罗电光薄膜测量到的波形基本是方波信号, 其上升、下降沿清楚, 可见 EPNAC 电光薄膜有较高的灵敏度。在方波的高(低)电平持续时间内输出信号的抖动是由于噪声引起的, 可用前置滤波器来减小。增大或减小输入信号的电压值, 输出信号也随之作线性变化, 表明不对称法布里-珀罗薄膜具有线性电光效应。对典型样品的电光系数的测量结果为 $\gamma_{33} = 3.1 \text{ pm/V}$, 而用压电补偿法测量的结果为 $\gamma_{33} = 2.8 \text{ pm/V}$ 。二者符合得较好。

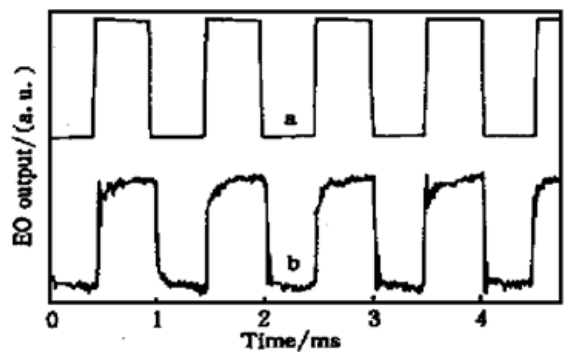


Fig. 5 Rectangle waveforms measured by the AFP EO film. (a) input and (b) EO output

3.3 电压灵敏度

在铟锡氧化物共面电极上传输 1 kHz 正弦波信号做为测试信号,用示波器监测其大小,当信号的峰-峰电压值为 100 mV 时,电光调制测量信号的信噪比约为 1。由于噪声电压与信号探测带宽的平方根成正比,测量时前置放大器信号接收单元的等效噪声带宽为 380 Hz,从而确定的电压灵敏度为 5 mV/Hz^{1/2}。

结 论 用不对称的法布里-珀罗多光束干涉膜测量了极化聚合物的线性电光效应并对其原理进行了分析。表明不对称法布里-珀罗电光薄膜具有线性电光效应和较高的电压灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Shinagawa M, Nagatsuma T. An automated electro-optic probing system for ultra-high-speed ICs. *IEEE Trans. Instrum. Measur.*, 1994, **43**(6): 843~ 847
- [2] Yi M B, Sun W, Tian X J. A practical electro-optic sampler for characterization internal to GaAs ICs. *International J. High Speed Electron. & Sys.*, 1996, **7**(3): 463~ 469
- [3] Burland D M, Miller R D, Walsh C A. Second-order nonlinearity in poled-polymer system. *Chem Rev.*, 1994, **94**(1): 31~ 75
- [4] Teng C C, Man H T. Simple reflection technique for measuring the electro-optic coefficient of poled polymers. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(18): 1734~ 1736
- [5] Zhang D M, Sun J Z, Hou A L. Synthesis and application of a stable nonlinear optical polymer. *Materials Lett.*, 2000, **45**: 149~ 153
- [6] Thackra J I, Bloom D M, Auld B A. Electro-optic sampling of poled organic media. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(10): 1159~ 1161
- [7] Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Crystals Propagation and Control of Laser radiation*, New York: John Wiley & Sons. Inc. 1984, 179~ 279
- [8] Dykaar D R, Kopf R R, Laskowski E J. Electro-optic sampling using a aluminum gallium arsenide probe. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(15): 1733~ 1735

Electro-Optic Measurement Utilizing Asymmetric Fabry-Perot Poled Polymer Film

Zhang Daming Yi Maobin Tian Xiaojian Sun Wei Hou Alin

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region, Changchun 130023)

(Received 15 March 1999; revised 1 August 1999)

Abstract The linear electro-optic measurement of poled polymer utilizing an asymmetric Fabry-Perot (AFP) multiple reflection film was reported. The polymer spin-coated on the high reflectivity (HR) glass was corona poled, and an asymmetric Fabry-Perot film was form based on its own reflectivity and HR glass. An electro-optic measuring system was established based on standing-free technique of this AFP film and reflective configuration. The principle of the system was analysed in detail, and the voltage sensitivity about 5 mV/Hz^{1/2} was obtained as 1 kHz sine input electric signals propagating on coplanar electrodes.

Key words Asymmetric Fabry-Perot film, poled polymer, electro-optic measurement.