

共面插指电极结构电光聚合物薄膜器件的电光系数测量

蒋 强^{1,2} 王 暄^{1,2} 李志远^{1,2}

(¹ 哈尔滨理工大学电介质工程国家重点实验室培育基地, 黑龙江 哈尔滨 150080)
(² 哈尔滨理工大学工程电介质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 分析了改进后的共面插指电极在高场强下的电场分布,验证了插指电极结构用于制作电光聚合物薄膜器件的可行性。基于插指电极薄膜器件在极化过程中电场分布的不均匀性,建立了关于电极间距、聚合物厚度、电场分布的三维模型,得到了不同极化电压下的平均场强。为了测试插指电极薄膜器件的电光系数,对三明治结构器件的椭偏透射测量电光系数方法做了改进。在相同电场下,对比了共面插指电极薄膜器件与三明治结构薄膜器件的电光系数,结果表明薄膜器件结构的变化不会引起薄膜本身电光系数的改变。

关键词 薄膜;光学器件;电光聚合物;插指电极;电光系数;椭偏透射

中图分类号 O484.4⁺1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0931001

Measurement of the Electro-Optic Coefficients in Electro-Optic Polymer Thin Film Devices with Interdigitated Coplanar Electrodes

Jiang Qiang^{1,2} Wang Xuan^{1,2} Li Zhiyuan^{1,2}

¹ State Key Laboratory Breeding Base of Dielectrics Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

² Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract The electric field distribution of modified interdigitated electrodes structure at high fields is analyzed through simulation, and the feasibility that the structure can be used in electro-optic polymer thin film devices is verified. Due to the non-uniform electric field during poling in the thin film devices with interdigitated electrodes, the three-dimensional electric field distribution model related with the electrode gap and the polymer thickness is established, and the average electric field is obtained at different poling voltages. For the changes in the structure of the thin film device with the interdigitated electrodes, the transmission-geometry ellipsometric technique based on device with sandwich structure is modified. In addition, the experimental results of electro-optic coefficients of the devices of the interdigitated coplanar electrodes and the sandwich structure are compared under the same electric field. Experimental results show that changes in the structure of thin film device will not cause the resulting electro-optic coefficients changed.

Key words thin films; optical devices; electro-optic polymer; interdigitated electrode; electro-optic coefficient; transmission-geometry ellipsometry

OCIS codes 130.3120; 230.3390; 310.6860

收稿日期: 2013-03-15; **收到修改稿日期**: 2013-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(60871073)

作者简介: 蒋 强(1985—),男,博士研究生,主要从事基于电光聚合物发生和检测太赫兹波等方面的研究。

E-mail: jiangqiang888@sina.com

导师简介: 王 暄(1968—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事纳米电介质、电光聚合物材料和太赫兹波与物质相互作用等方面的研究。E-mail: topix@sina.com(通信联系人)

1 引言

极化电光聚合物材料本身具有电光系数大、响应速度快、介电常数小和易于加工集成等特点,使其成为制备光电器件和光电探测器件的关键材料^[1-4]。在实际研究和应用中,如何将电光聚合物薄膜器件化一直是人们关注的一个焦点。目前,常用的薄膜器件结构有波导结构^[5]、三明治结构、共面结构^[6]等。利用波导结构实现的电光聚合物器件已经广泛应用,如可调耦合器^[7],但这种结构的器件制作工艺复杂。三明治结构薄膜器件,即透明导电层[如氧化铟锡(ITO)玻璃]-样品层-透明导电层或者透明导电层-样品层-金属导电层结构。这种三明治结构薄膜器件制备简单,但作为光电探测器件时,却存在透明导电层的吸收性引起入射光透射率减弱、金属导电层的高反射性引起器件灵敏度降低等缺点。共面电极结构的薄膜器件与三明治结构相比,最大的不同就在于电极共面,消除了导电层对聚合物薄膜的不利影响。但实际运用中的共面结构只有一个电极通道,能有效利用的电光聚合物薄膜仅存在于电极之间很狭窄的电极间隙里,成膜面积小,薄膜的利用率低。

本文提出将具有共面结构的插指电极运用于电光聚合物薄膜器件化中,该结构既避免了导电层对薄膜本身性能的影响,又由于电极通道多,使得薄膜的有效利用面积增大。考虑到共面插指电极结构常

用于电导率的测量^[8]、材料的可控生长及其性能利用^[9]、电化学测量^[10]、光折变聚合物薄膜传感器^[11]等低电场领域,因此对共面结构电极的厚度以及电极形状做了优化,使其能够适用于高电场下。通过仿真模拟分析了极化过程中插指电极结构薄膜器件的电场分布。为了测试电光聚合物的电光系数,对基于三明治结构器件的椭圆透射测量电光系数方法做了改进,使其适合于插指结构型薄膜器件。在相同电场强下,对比了共面插指电极薄膜器件与三明治结构薄膜器件的电光系数测量结果。

2 薄膜器件的制作及其电场分布仿真模型的建立

实验中所用的电光聚合物薄膜器件如图 1(a)所示。整个器件分两大块,一个是芯片外部的铝基覆铜板及芯片外接引线,另一个就是插指电极芯片,它是整个器件制作的核心部分,是通过激光微细加工技术在 K9 玻璃衬底上镀有厚度约 $30\ \mu\text{m}$ 的铝膜进行微刻加工,刻出电极长度 $7\ \text{mm}$ 、电极宽度 $450\ \mu\text{m}$ 、电极间距 $100\ \mu\text{m}$ 的插指结构,玻璃衬底尺寸 $14\ \text{mm}\times 14\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ 。电光聚合物材料选用的是聚分散红 1 丙烯酸酯(PMMA-DR1),采用旋涂工艺成膜。图 1(b)是制备完成后电光聚合物薄膜器件的截面图。

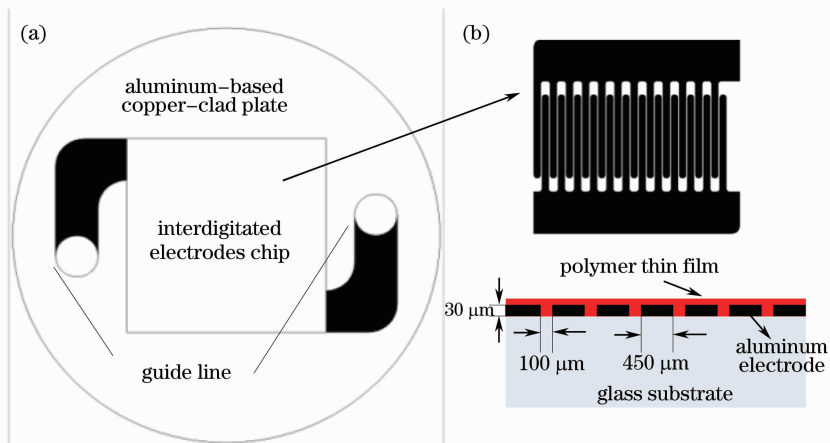


图 1 (a) 插指电极结构薄膜器件原理图; (b) 电光聚合物薄膜器件截面图

Fig. 1 (a) Schematic of the thin film device with interdigitated electrodes; (b) cross section of electro-optic polymer thin film device

考虑到样品极化时所施加的高电场,必须避免方形电极端部边缘所产生的高场强。为此,将电极端部设计成具有一定弧度的圆角,避免电极端部边缘高场强的出现,保证样品所受电场的均匀性,防止

局部击穿。图 2(a)是本实验中所设计的插指电极端部放大图,图 2(b)是在施加电压 $10\ \text{kV}$,电极间距 $100\ \mu\text{m}$ 下,相应的 ANSYS 软件得到的仿真效果图。从图 2(c)中看出电极间中心场强最大约

110 V/ μm , 电极端部并无高场强出现, 这说明具有弧度的圆角电极能够有效改善电极间电场分布, 尽

可能地保证样品极化时所受电场的均匀性, 为后续计算样品所受有效电场提高了准确度。

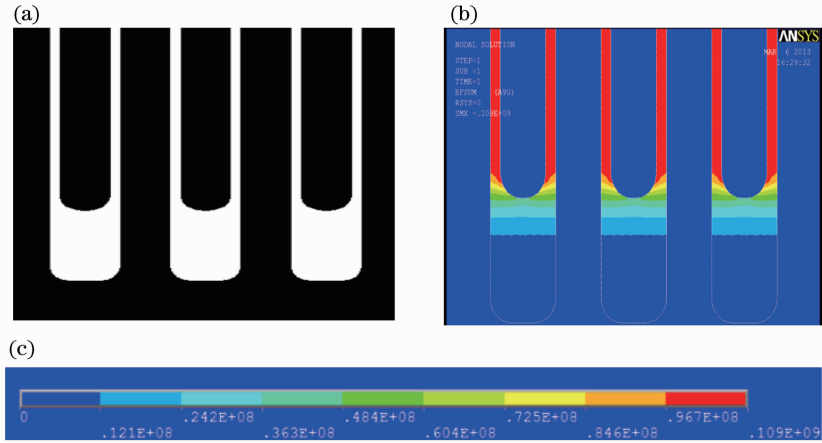


图 2 (a) 插指电极局部放大图; (b) ANSYS 软件仿真电场分布图; (c), (b) 中不同颜色所对应的具体电场分布值

Fig. 2 (a) Partial enlargement drawing of the interdigitated electrodes; (b) electric field distribution by ANSYS simulation; (c) different colors represent specific values of electric field distribution in (b)

在三明治结构薄膜器件中, 夹在两导电层之间的聚合物薄膜面积在平方厘米量级。因此在测量聚合物薄膜的电光系数时, 一般假设样品所受场强是均匀分布的, 即电场强度 $E = V_{\text{app}}/d$, V_{app} 为电极两端所加电压, d 为薄膜样品厚度。而在插指电极结构中, 受电极间距(典型间距一般在 $1 \sim 100 \mu\text{m}$)、电极高度以及聚合物薄膜厚度的影响, 电极间的聚合物薄膜所受电场强度是极不均匀的。在利用插指电极结构型薄膜器件测试和计算聚合物薄膜的电光系数 γ_{33} 时, 不能简单地利用三明治结构时的场强计算方法。本实验中, 在电极间距 $100 \mu\text{m}$ 、聚合物厚度 $40 \mu\text{m}$ 和电极厚度 $30 \mu\text{m}$ 条件下, 通过 ANSYS 软件建立了不同极化电压时的三维仿真模型, 在建立模型时也考虑了玻璃衬底和聚合物薄膜本身的介质

性能。图 3(a) 为极化电压 10 kV 时, 插指电极薄膜器件在极化过程中的具体电场分布模型。从图中可以看出, 插指电极间的薄膜所受场强是极不均匀的, 在靠近两电极边缘场强大, 电极间距中部最小, 其余位置电场分布较为均匀。因此, 在计算插指电极薄膜器件的平均电场时, 可通过选取除电极边缘位置的其他任意位置所对应的电场值取平均, 就得到了聚合物薄膜在极化过程中的平均电场值 E_{eff} 。图 3(b) 为聚合物薄膜厚度、电极间距及电极厚度相同的条件下, 改变薄膜器件极化电压后, 通过电场分布三维模型选取 4 个不同电极间距位置得到的平均电场。通过建立此种结构的薄膜器件极化过程中电场分布的三维仿真模型, 能够很方便地得出薄膜器件的平均电场 E_{eff} , 这为表征插指电极结构型薄膜

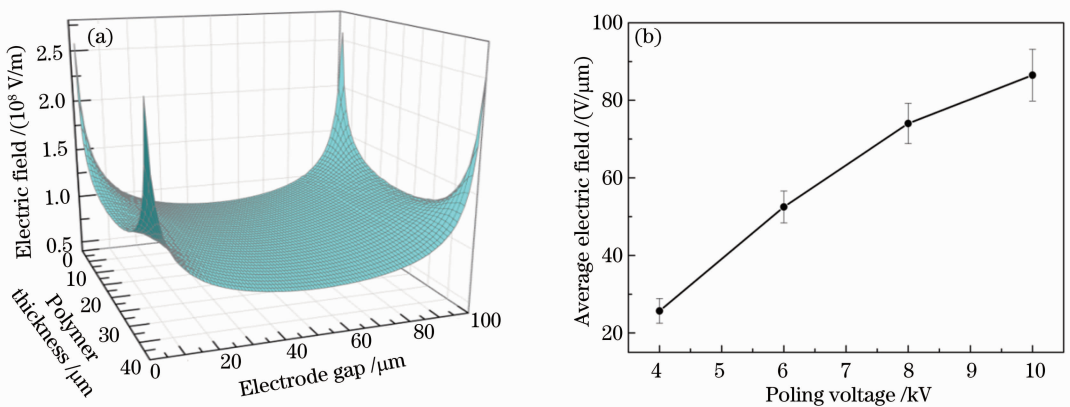


图 3 (a) 10 kV 下, 插指电极薄膜器件的电场分布仿真模型; (b) 不同极化电压下, 插指电极结构型薄膜器件的平均电场

Fig. 3 (a) Simulation of the electric field distribution of the thin film devices with interdigitated electrodes at 10 kV ;

(b) average electric field of the thin film devices with interdigitated electrodes with different poling voltages

器件在极化过程中的电光系数提高了准确度。

3 电光系数的测量及分析

3.1 椭圆透射法的改进

利用椭圆透射技术^[12]测量聚合物薄膜的电光系数,其简单原理是在外加电场下,测量电光聚合物的电光效应引起的 p 光和 s 光的干涉情况,来测量聚合物的线性电光系数。传统的椭圆透射原理测试的是三明治结构薄膜器件,需要考虑入射光与薄膜样品入射夹角 θ 变化引起的 s 偏振和 p 偏振在薄膜中的光程变化,两偏振光程差可表示为

$$l_p - l_s = d(n_p \cos \psi_p - n_s \cos \psi_s), \quad (1)$$

式中 d 为聚合物薄膜的厚度, λ 为入射光波长, ψ_p 和 ψ_s 分别表示 p 光和 s 光在聚合物中的折射角。在测试共面插指电极薄膜器件的系统中,由于器件结构改变,电场方向发生变化,激光可垂直透射进入样品即 $\theta = 0^\circ$,具体测试原理如图 4 所示。此时,(1)式可表示为

$$l_p - l_s = d(n_p - n_s), \quad (2)$$

假设 $n_p = n_e, n_s = n_o$, 则相位差为

$$\Delta\Gamma = \frac{2\pi d}{\lambda}(\delta n_e - \delta n_o). \quad (3)$$

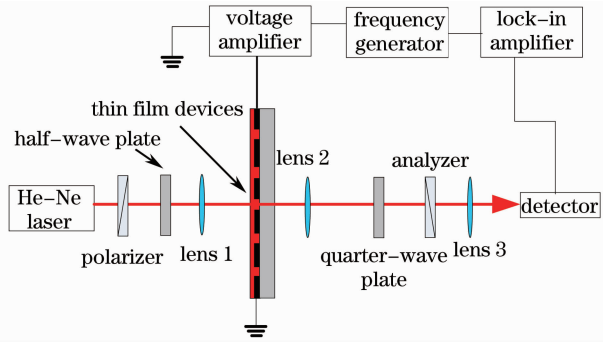


图 4 改进后的椭圆透射法测量插指电极结构型薄膜器件的电光系数原理图

Fig. 4 Schematic of electro-optic coefficient measurement of thin film devices with interdigitated electrodes from modified transmission-geometry ellipsometric technique

在三明治薄膜器件中,样品接触电极面积尺寸大,薄膜所受电场可看作是一均匀电场。而在共面插指电极结构型薄膜器件中,由前文分析可知,极化电场分布不均匀,在计算电光系数薄膜的电光系数时,电场值应该为薄膜器件所受的平均电场 E_{eff} 。

若 $\gamma_{13} \approx \frac{1}{3}\gamma_{33}$, $n \approx n_o \approx n_e$, o 光和 e 光的折射率改变分别表示为

$$\begin{cases} \delta n_e = \frac{1}{2}n^3\gamma_{33}E_{eff} \\ \delta n_o = \frac{1}{6}n^3\gamma_{33}E_{eff} \end{cases}. \quad (4)$$

椭圆透射原理一般表达式为

$$\frac{I_m}{(I_{max} - I_{min})/2} \approx \Delta\Gamma, \quad (5)$$

式中 I_{max} 和 I_{min} 分别为调整 $\lambda/4$ 波片角度得到的最大和最小光强, I_m 为调制光强幅值。结合(3)~(5)式,共面插指结构型薄膜器件的电光系数测量公式可表示为

$$\gamma_{33} = \frac{3\lambda}{\pi dn^3} \frac{1}{(I_{max} - I_{min})} \left(\frac{I_m}{E_{eff}} \right). \quad (6)$$

3.2 实验结果

极化过程中,共面插指电极薄膜器件由于电极在一个平面内,因而极化电场方向与三明治结构器件相比发生了改变。为了验证器件结构引起薄膜电场方向改变能否引起薄膜的电光系数的变化对比了两种结构的薄膜器件在相同极化场强下的电光系数测试结果。两种结构器件样品均为电光聚合物 PMMA-DR1,厚度约 $40 \mu\text{m}$ 。首先利用改进后的椭圆透射方法测量了图 3(b)所示的 4 种不同平均场强 E_{eff} 下,插指电极薄膜器件的电光系数 γ_{33} 。随后,根据三明治结构薄膜器件所受场强与极化电压成正比关系($E_z = \frac{V_{app}}{d}$),在膜厚不变的情况下,改变极化电压 V_{app} ,使三明治结构薄膜器件所受电场与插指电极薄膜器件所受电场相同。利用传统椭圆透射技术测试了在入射光与样品夹角 $\theta = 45^\circ$ 下的电光系数。两种结构的薄膜器件电光系数测量结果如图 5 所示。从图中看出,在相同场强下,插指结构薄膜器

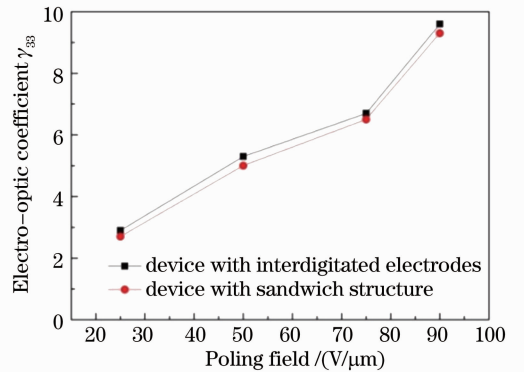


图 5 相同极化场强下,三明治结构薄膜和插指电极薄膜器件的电光系数

Fig. 5 Electro-optic coefficients of the sandwich structure thin film and the thin film with interdigitated electrodes at the same poling field

件的电光系数要略大于三明治结构薄膜器件的电光系数。这主要是由测试插指电极结构薄膜器件电光系数的方法改变引起的,薄膜本身电光系数不会发生改变。

4 结 论

1) 通过对共面插指电极结构的改进以及仿真模拟分析的验证,常用于低场强下的插指电极能够用于高场强下电光聚合物薄膜器件的极化和电光系数的测量,为电光聚合物薄膜的器件化提供了一种新方法。

2) 考虑到共面插指电极薄膜器件在极化过程中电场分布的不均匀性,建立了关于电极间距、聚合物厚度、电场分布的三维模型,得到了不同极化电压下的平均场强。针对插指电极结构薄膜器件结构引起的入射光光程差的变化,对基于三明治结构薄膜器件的椭偏透射原理的电光系数测量方法做了改进。对两种结构薄膜器件在相同极化场强下的电光系数测量结果对比表明:器件结构改变导致的极化电场方向的改变,并不能引起薄膜本身电光系数的变化。

3) 所研究的具有共面插指电极结构的薄膜器件不仅能够测试薄膜的电光系数,而且从器件化的角度来说,为电光聚合物器件化的后续利用提供了直接、可靠的器件性能参数。

参 考 文 献

- 1 Dinu R, Jin D, Yu G, *et al.*. Environmental stress testing of electro-optic polymer modulators [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(11): 1527–1532.
- 2 Lin C Y, Wang X, Chakravarty S, *et al.*. Electro-optic polymer

- infiltrated silicon photonic crystal slot waveguide modulator with 23 dB slow light enhancement [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(9): 093304.
- 3 Yue Yuanbin, Wang Xibin, Sun Jian, *et al.*. Application of ultraviolet photo-resist in polymeric quasi-rectangle electro-optical waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1225001.
岳远斌, 王希斌, 孙 健, 等. 紫外胶在聚合物准矩形电光波导中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1225001.
- 4 Gardiner D J, Morris S M, Castles F, *et al.*. Polymer stabilized chiral nematic liquid crystals for fast switching and high contrast electro-optic devices [J]. *Appl Phys Lett*, 2011, 98(26): 263508.
- 5 Zhou Jinzhao, Huang Zuohua, Zeng Xianyou, *et al.*. Simultaneous measurement of prism and waveguide film parameters by waveguide technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1212001.
周进朝, 黄佐华, 曾宪佑, 等. 光波导技术同步测量棱镜及波导薄膜参数[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1212001.
- 6 McLaughlin C V, Zheng X, Hayden L M. Comparison of parallel-plate and in-plane poled polymer films for terahertz sensing [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(25): 6283–6290.
- 7 Song Hongyan, Han Xiyou, Zou Pin, *et al.*. Optimal design of low power tunable coupler based on polymer waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0723003.
宋红妍, 韩秀友, 邹 品, 等. 低功耗聚合物波导可调耦合器的优化设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0723003.
- 8 Venet C, Pearson C, Jombert A S, *et al.*. The morphology and electrical conductivity of single-wall carbon nanotube thin films prepared by the Langmuir-Blodgett technique [J]. *Colloids and Surfaces*, 2010, 354(1): 113–117.
- 9 Zhou X Z, Boey F, Zhang H. Controlled growth of single-walled carbon nanotubes on patterned substrates [J]. *Chem Soc Rev*, 2011, 40(11): 5221–5231.
- 10 Fang Xinxin, Zhang Huanqian, Zhang Feng, *et al.*. Real-time monitoring of strand-displacement DNA amplification by a contactless electrochemical microsystem using interdigitated electrodes [J]. *Lab Chip*, 2012, 12(17): 3190–3196.
- 11 Christenson C W, Greenlee C, Lynn B, *et al.*. Interdigitated coplanar electrodes for enhanced sensitivity in a photorefractive polymer [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(17): 3377–3379.
- 12 Sandalphon A, Kippelen B, Meerholz K, *et al.*. Ellipsometric measurements of poling birefringence, the Pockels effect, and the Kerr effect in high-performance photorefractive polymer composites [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(14): 2346–2354.

栏目编辑: 韩 峰