

文章编号: 0253-2239(2004)09-1199-4

衰减全反射型电压传感器的理论和实验研究*

袁文¹ 郭琴¹ 桑明煌¹ 聂义友¹ 肖平平¹ 曹庄琪² 沈启舜²

(¹ 江西师范大学物理系, 南昌 330027)
(² 上海交通大学物理系, 上海 200240)

摘要: 提出了一种新型反射型聚合物波导电压传感器理论, 并且进行了实验研究。这种电压传感器采用棱镜波导耦合结构, 在棱镜下底面依次镀有金属膜-聚合物-金属膜三层结构。通过两层金属膜对极化聚合物加电压, 利用聚合物材料电光效应和导模共振吸收峰对聚合物折射率的敏感特性, 通过反射光强的测量来确定作用电压的变化值。实验中的测试电压范围是从-140 V 至+140 V, 得到的线性度值为 0.991, 电压测量的分辨力为 0.1 V, 电压测量灵敏度系数为 0.0011 V⁻¹。实验表明这种电压传感器具有良好的线性和较高的灵敏度。

关键词: 导波光学; 衰减全反射; 极化聚合物; 电压传感器

中图分类号: TN761 文献标识码: A

Theoretical and Experimental Research on Voltage Sensing Based on Attenuated-Total-Reflection

Yuan Wen¹ Guo Qin¹ Sang Minghuang¹ Nie Yiyu¹ Xiao Pingping¹
Cao Zhuangqi² Shen Qishun²

(¹ Department of Physics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027)
(² Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

(Received 24 March 2003; revised 9 January 2004)

Abstract: A new type of voltage sensor which uses the prism and symmetrical metal-cladding polymer waveguide configuration has been proposed. The structure consists of a coupling prism and 3-layer film that prepared on the bottom of prism in proper order. The 3-layer films are metal layer, poled polymer, bottom electrode. Owing to the electrooptical effect of the poled polymer, and the sensitive feature of its refractive index to the resonance absorption peak of the guided mode, the voltage change can be determined through the measurement of the light intensity when applying voltage on the poled polymer. The measurement range of voltage is from -140 V to 140 V in the experiment. The linearity is 0.991. The resolution of voltage measurement is 0.1 V⁻¹. The sensitivity coefficients is about 0.0011 V⁻¹. The experimental results show the fine linearity and the high sensitivity of the proposed voltage sensor.

Key words: guided wave optics; attenuated total reflection; poled polymer; voltage sensor

1 引言

光学电压传感器由于采用非金属作为传感头、光纤作为传输介质, 使电网与测量电路能有效隔

离, 其测量安全得到了很大的提高, 而且具有精度高、抗电磁干扰、结构简单、体积小、重量轻、携带方便等特点, 使之具有更高的可靠性, 适合于远距离测量。近年来用于电力系统测量高电压的光纤电压互感器已趋于实用化^[1], 在传感领域中引起人们的广泛关注。光学电压传感器大多是利用电光效应、磁光效应来实现, 并且主要分为两类, 块状光学电压传感器和波导光学电压传感器。块状光学电压传感

* 国家自然科学基金(60237010)、江西省自然科学基金(0112009)、江西师范大学青年成长基金资助课题。

E-mail: ywuu@sina.com; guoqin91@163.com

收稿日期: 2003-03-24; 收到修改稿日期: 2004-01-09

器通常包括电光晶体、1/4 波片、自聚焦透镜等光学组件。光波导电压传感器主要是利用一些电光晶体^[2]或者聚合物^[3]的集成光学装置设计而成。随着光波导调制技术的发展,光学电压传感器将向集成化方向发展。本文提出了一种新型光学电压传感器的原理和制作方法,这种新型器件是基于导模共振原理的衰减全反射型电压传感器,实验结果表明它具有结构简单、灵敏度高、线性良好和易于集成的优点。

2 原 理

衰减全反射型电压传感器的结构如图 1 所示。器件结构从上至下由棱镜、上电极、电光介质和下电极四部分构成。棱镜一般采用高折射率材料,上下电极均为金属薄膜,通常是金或银。以工作于 780 nm 波长的电压传感器为例,棱镜由 ZF6 玻璃制成,折射率为 $n_1=1.75$ ($\epsilon_1=3.0625$);上银膜厚度 47 nm,上银膜厚度和折射率由双波长法测量^[4],折射率 $n_2=0.143+i5.149$ ($\epsilon_2=-26.5+i1.47$);电光介质采用经极化的侧链型 DR1/PMMA 有机聚合物,厚度约为 $4.2 \mu\text{m}$,其分子结构如图 2 所示,折射率为 $n_3=1.52$;下层金膜厚度要求大于 100 nm 以上即可,故一般不需要测量。

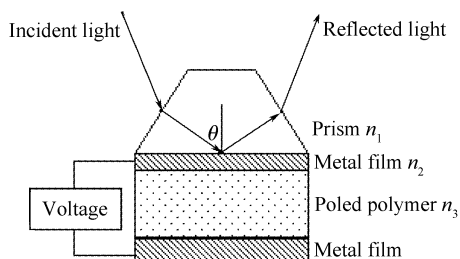


Fig. 1 Attenuated-total-reflection voltage sensor

该电压传感器是一个棱镜波导耦合结构器件^[5],也是一个双面金属包覆波导结构^[6,7],涂于棱镜底的银膜既是耦合介质也是聚合物波导的覆盖层。电压传感器工作时,经准直的 TM 线偏振光入射至棱镜底面上并反射,当棱镜中入射光的波矢沿棱镜底面方向的分量与波导导模的特征波矢(传播常量)相等时,就会激发导模共振,入射光的能量耦合到聚合物导波层中,这时会引起反射光能量的急剧下降,在反射率曲线中形成一个吸收峰^[5]。图 3 是反射光强随入射角的变化曲线,即衰减全反射谱。在图上有五个吸收峰,每一个吸收峰对应于一个共振模式。吸收峰的最低点对应的角度就是该模式的同步角。由图 3 可见,吸收峰的下沿和上升沿都具有较好的直线性。

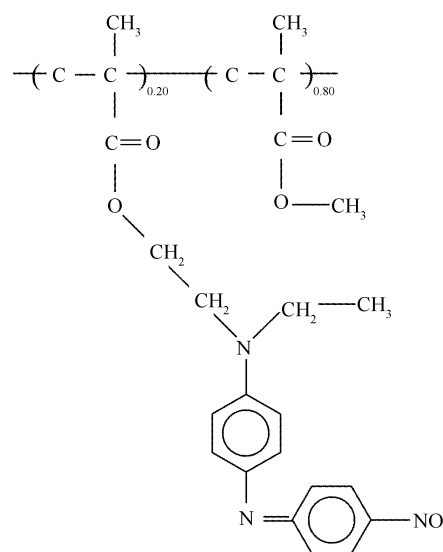


Fig. 2 Structural formula of DR1/PMMA side chain polymer

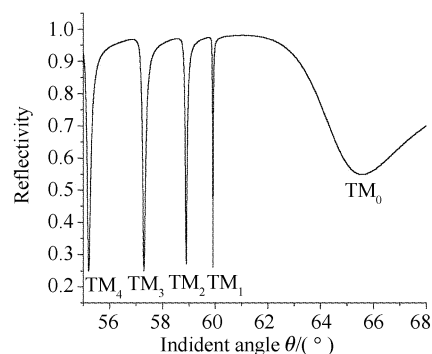


Fig. 3 Attenuated-total-reflection spectrum

导模的传播常量严格依赖于波导层的折射率。如果采用极化聚合物作为波导层,并通过上下金属电极对其施加电压,则波导层的折射率将由于极化聚合物的电光效应而发生改变,这样就会引起导模传播常量的变化,并进而引起模式同步角的改变,对应于整个吸收峰的平移。如图 4 所示即为电压作用下的衰减全反射谱线的移动情况。

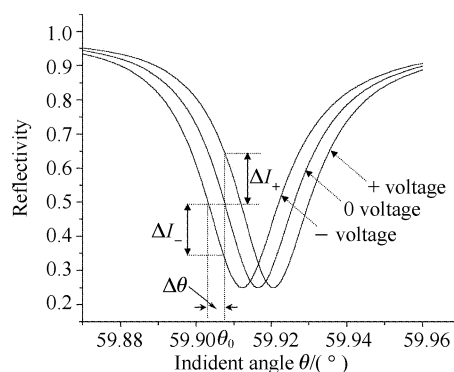


Fig. 4 The shift ATR spectrum when voltage is applied

电压传感器的工作过程如下: 设未加电压时, 传感器的工作角位于图 4 所示的 θ_0 处, 该处通常是曲线线性段的中点。当传感器的上下电极施加电压以后, 衰减全反射谱线会在角度方向上发生移动。对于负作用电压的情况, 衰减全反射谱线会向小角度方向移动, 而对于正作用电压, 衰减全反射谱线则向大角度方向移动。这样, 在原来的工作角 θ_0 处的反射光强将发生 ΔI 的变化, 因此, 可通过反射光强的测量而确定电压的变化。以下对电压传感器的工作原理进行理论分析。

设因作用电压 U 而引起同步角的变化 $\Delta\theta$, 则有

$$\Delta\theta = \frac{d\theta}{dn_3} \Delta n_3 = \frac{d\theta}{dn_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dn_3} \Delta n_3, \quad (1)$$

式中 n_3 为聚合物材料的折射率, 而 n_{eff} 为导模有效折射率。作用电压引起的工作物质折射率变化为^[8]

$$\Delta n_3 = -\frac{1}{2} n_3^3 \gamma_{i3} U, \quad (2)$$

式中 γ_{i3} 为聚合物的电光系数, $i=1$ 或 3 分别对应于 TE 和 TM 的偏振方向。根据金属波导的特性, 对低阶模有^[9,10]

$$dn_{\text{eff}}/(dn_3) \approx 1, \quad (3)$$

又由棱镜波导耦合条件 $n_{\text{eff}} = n_1 \sin \theta$, 可得:

$$\Delta\theta = -\frac{\gamma_{i3} n_3^3}{2n_1 \cos \theta} U, \quad (4)$$

式中 n_1 为棱镜材料折射率, θ 为入射光与棱镜底面的夹角, 设共振吸收峰下降沿的斜率为 k , 即 $\Delta I = k\Delta\theta$, 则有

$$\Delta I = -\frac{k\gamma_{i3} n_3^3}{2n_1 \cos \theta} U, \quad (5)$$

(5) 式表明了反射光强变化与所作用电压之间的依赖关系, 反射光经光电变换处理后可得到对应的被测电压, 这就是电压传感器的工作原理。由于传感器工作区仅是共振吸收峰的下沿或上升沿, 因而, 由 (5) 式可见, 衰减全反射型电压传感器的反射光强与所加电压有很好的线性关系。另外, 作为导波层的有机聚合物电光系数的大小与电压传感器的灵敏度成正比关系, 因此, 尽量提高有机聚合物的电光系数, 是提高电压传感器灵敏度的关键。

3 实 验

电压传感器的制备过程为先用溅射法在棱镜底面镀上银薄膜, 导波层采用侧链型结构的聚合物 DR1/PMMA, 用旋转涂膜法在银膜层上涂覆成薄膜, 聚合物薄膜的厚度约为 $4.2 \mu\text{m}$, 能承载五个导

波模式。然后对聚合物薄膜采用电晕极化, 极化的目的是使聚合物发色团的电偶极取向与外界电场方向一致, 形成非中心对称结构以使聚合物具有电光效应。整个极化过程在聚合物的玻璃态-橡胶态转化温度 140°C 以上进行, 极化前聚合物中非线性发色团的偶极矩取向是随机的, 当加上极化电压 3000 V 时, 聚合物的偶极矩取向便与所加电场方向一致, 极化时间约为 30 min , 然后在保持极化电压的作用下冷却到室温, 即得到了永久性极化的聚合物, 具有了电光效应。最后, 在聚合物导波层上采用溅射镀膜的方法镀上金膜作为下电极。制成的器件的结构如图 1 所示。

电压传感器实验装置如图 5 所示, 实验中采用波长为 780 nm 的半导体激光器。衰减全反射型电压传感器被置于 $\theta/2\theta$ 转台上, 以精确控制入射角的大小。反射光的强度用光电探测器进行测量。在本实验中, 先对制成的器件进行 m 线扫描, 得到的 m 线谱图如图 3 所示, 图中共有五个模式, TM_0 模是表面等离子波, $\text{TM}_1 \sim \text{TM}_4$ 属于导模。而 TM_1 模的吸收峰最为陡峭 (k 值最大), 所以选择 TM_1 模的衰减全反射谱作为电压传感器的工作曲线。选择 TM_1 模吸收峰下降沿的中点为工作点, 在电极上施加待测电压, 由于聚合物的电光效应, 波导层的折射率将发生微小改变, 从而使共振角位置发生变化, 于是反射光的强度也将发生变化, 根据反射光强的变化即可确定电压的变化。实验中用作光电变换的探测器为光电 S2387-1010R。

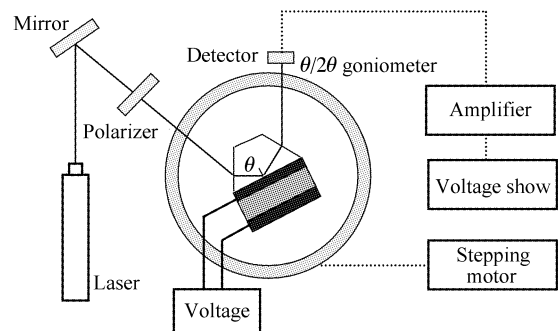


Fig. 5 Experimental configuration of voltage sensor

实验中选择 TM_1 模来调制光强, 所加电压为 $-140 \sim +140 \text{ V}$, 所测得的光强反射率和所加电压的关系曲线如图 6 所示, 黑点符号表示实验结果。从拟合的曲线上很容易看出, 电压与反射光强呈较好的线性关系, 光强反射率的变化范围是 $32.75\% \sim 64.11\%$, 电压测量灵敏度为 0.0011 V^{-1} 。根据图 5 的测量系统得到的电压测量的分辨力是 0.1 V , 电

压测量的线性拟合度为0.991,实验中如果继续增加电压(超过140 V)我们看到被测光强会超出线性范围,表现出非线性,因此被测电压的线性范围不大于-140~+140 V。对于电力系统的交流高电压可以采用电容式分压测量的方法^[11]来提高该电压传感器的测量范围。实验中我们采用了电阻分压的方法来测量-2000~+2000 V的直流电压,同样得到了线性度与图6相同的曲线。所以采用该方法可以提高其测量电压的范围。

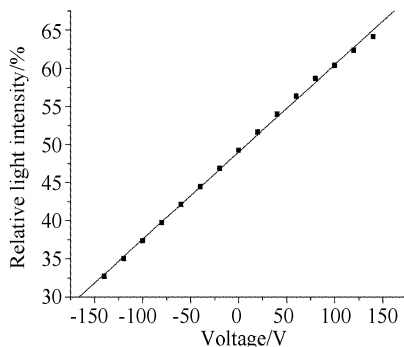


Fig. 6 The relationship between relative light intensity and applied voltage

结论 利用衰减全反射原理制作了一种新型的电压传感器,这种传感器即克服了块状光学电压传感器光学系统复杂,和集成光学电压传感器难于制作的弊端,而且还具有制作简单、电压测试灵敏度高、线性好的优点。在实际器件中对该电压传感器进行封装,避免环境杂散光的影响,从而避免入射光角度对导模吸收峰过于敏感的缺点,因此提高抗干扰能力;电压传感器中的温度的影响也可以采用温度跟踪补偿的方法加以补偿^[12];提高聚合物导波层的厚度或者采用电光晶体作为导波层来提高测量电压的范围;这几个问题都是我们进一步的研究要解决的。该电压传感器在电力工业测量中具有潜在的应用价值,可望在光电领域得到的应用。

参 考 文 献

- 1 Christensen L H. Design construction and test of a passive optical prototype high voltage instrument transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, **10** (7): 1332~1337
- 2 Kingsley S A, Sriram S. Parallel-plate integrated optic high-voltage sensors. *Electron. Lett.*, 1995, **31** (13): 1096~1097
- 3 Lee S S, Ahn S W, Oh M C *et al.*. Integrated optical high-voltage sensor based on a polymeric Y-brach digital optical switch. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8** (7): 921~923
- 4 Chen W P, Chen J M. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic films. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71** (2): 189~191
- 5 Cao Zhuangqi. *Transfer Matrix Technique in Guided Wave Optics* (导波光学中的转移矩阵方法). Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2001. 150~153, 202~208 (in Chinese)
- 6 Zhou Feng, Cao Zhuangqi, Jiang Yi *et al.*. Method to identify mode order in double metal-cladding waveguide. *Acta Optics Sinica* (光学学报), 2002, **22** (6): 665~669 (in Chinese)
- 7 Li Honggen, Shen Qishun, Cao Zhuangqi *et al.*. Direct coupling for double metal-cladding waveguide. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22** (8): 924~926 (in Chinese)
- 8 Yariv A. *Quantum Electronics*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. 339~347
- 9 Jiang Y, Cao Z, Shen Q S *et al.*. Improved attenuated-total-reflection technique for measuring the electro-optic coefficients of nonlinear optical polymers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17** (5): 805~808
- 10 Kaminow I P, Mamel W L, Weber H P. Metal-clad optical waveguides analytical and experimental study. *Appl. Opt.*, 1974, **13** (2): 208~307
- 11 Jaeger N A F, Young L. High-voltage sensor employing an integrated optics Mach-Zehnder interferometer in conjunction with a capacitive divider. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7** (2): 229~235
- 12 Wan Xiaodong, Ye Meiyang. Temperature tracking compensation of fiber optic voltage sensor. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29** (7): 600~604 (in Chinese)