

# 在一种新的聚合物材料上刻写正弦相位波导 光栅及其特性研究

陈兆震<sup>‡</sup> 徐则达<sup>†</sup>

(北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

(2009 年 3 月 8 日收到; 2009 年 8 月 17 日收到修改稿)

用双光束干涉法在一种新的聚合物材料 IAC-4 上刻写正弦相位型光栅, 实现了光栅耦合光波导, 并研究了该光波导对不同偏振态的入射光的传播特性, 对光栅的形成进行了理论分析, 对光波导的传播常数进行了数值计算, 并对该波导光栅在导光的光强调制和方向控制及其在集成光学方面的应用进行了讨论, 最后对任意入射角的光栅方程进行了理论探讨.

**关键词:** 波导光栅, 有机聚合物, 平板光波导, 集成光学

**PACC:** 4280L, 4270J, 4225

## 1. 引 言

导波光学是集成光学的基础, 在光通信、数据传输、光信号处理、光计算机和自动控制等诸多方面有极为广泛的应用前景. 光波导是联接集成光路中各器件的基础元件, 近年来, 光波导理论和实验研究都取得了很多成果<sup>[1-5]</sup>. 在光通信和集成光学中, 光波耦合器是关键器件之一, 波导光栅作为光波耦合器, 与传统的光波耦合器相比, 具有表面平整、不受折射率限制、体积小、易于集成的优点. 有机聚合物是一类非常重要的非线性光学材料, 在光通信和高密度光存储等高技术领域中有良好的应用前景, 光致异构聚合物材料引起了越来越多地关注<sup>[6-8]</sup>, 聚合物波导<sup>[9-13]</sup>和波导光栅<sup>[14-19]</sup>也成为研究的热点. 利用聚合物材料制作光栅耦合器<sup>[14]</sup>、波导光栅光控开关<sup>[1, 18, 19]</sup>、激光调制器<sup>[12]</sup>、谐振光栅<sup>[17]</sup>、光分复用和解复用器等各种光学器件也有广泛的研究.

本实验采用双光束干涉法在 IAC-4 材料上制作正弦相位光栅. IAC-4 是一种新合成的聚合物材料<sup>[20-22]</sup>, 该材料光致各向异性大、光响应时间短、光栅衍射效率高且有很高的可逆性; 双光束干涉法相对其他制作光栅的方法具有一步成型、制作时间短、成本低等特点. 本文利用该光栅作为波导耦合

器, 探究了其在光集成方面的应用, 研究了导波对入射光的偏振态的响应特性, 并对任意角度入射时的光栅方程进行了理论探讨.

## 2. 实验部分

### 2.1. 材料介绍

IAC-4 材料是清华大学自主合成的, 其分子式如图 1 所示. 使用两束偏振光干涉照射样品, 即可写入光栅, 把样品加热到其玻璃化温度, 或用单束圆偏振光照射, 即可擦除光栅, 其光栅的写入与擦除是非常迅速和方便的<sup>[20]</sup>. 实验表明该材料相对于其他偶氮聚合物材料在形成光栅时更明显地依赖写入光的偏振态<sup>[21, 22]</sup>. 通过光谱分析, 该材料吸收峰在 360 nm 附近, 对可见光尤其红光吸收非常微弱, 这大大方便了实验的观察, 也降低了对观测设备的要求, 节约了实验成本.

将 IAC-4 材料制成质量分数为 25% 的 DMF 溶液, 旋涂于干净的玻璃片上. 旋涂条件为转速 800 r/min, 旋涂时间为 40 s, 涂好的膜在 70°C 下真空烘干备用, 膜厚约 5  $\mu\text{m}$ .

用 632.8 nm 的 He-Ne 激光(光强 2 mW)探测该材料的各向异性, 光路如图 2(a) 所示, 在样品前后分别放置一个格栅-泰勒棱镜(G-T), 前一个 G-T

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: xuzd@buaa.edu.cn

<sup>‡</sup> E-mail: chen Zhaozhen@ss.buaa.edu.cn

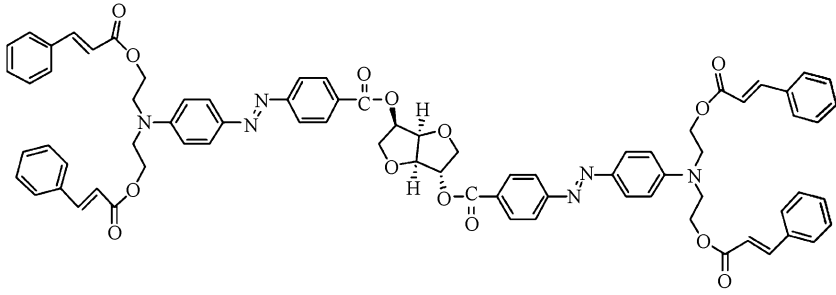


图1 IAC-4 的分子式

棱镜是水平起偏器,后一个 G-T 棱镜是竖直方向的检偏器,实验发现旋转样品时透过光的强度始终为零,这说明 IAC-4 材料光照之前是各向同性的. 然后用波长为 532 nm,光强为 28 mW 的单束水平偏振光照射样品 2 min,再进行上述实验,透过光的光强随样品的转动而改变,如图 2(b)所示,其规律为<sup>[23]</sup>

$$I = I_0 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}, \quad (1)$$

其中,  $I_0$  是入射的水平线偏振光的光强,  $\Delta\varphi =$

$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d$  是各向异性引入的相位差,  $\theta$  是样品光轴与水平方向的夹角,  $d$  是样品厚度,  $\lambda$  是入射光在自由空间的波长,  $\Delta n$  即为该材料的光致各向异性.

本实验对以前使用的侧链型偶氮苯材料进行完全相同的实验,发现 IAC-4 材料透过的最大光强约是侧链型偶氮苯材料的 2—3 倍(图 2(b)),由此可见,IAC-4 材料在光致各向异性方面具有明显的优势.

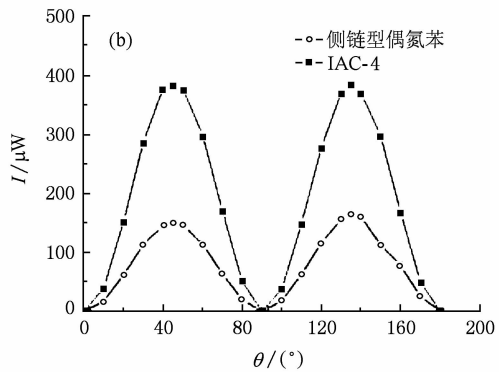
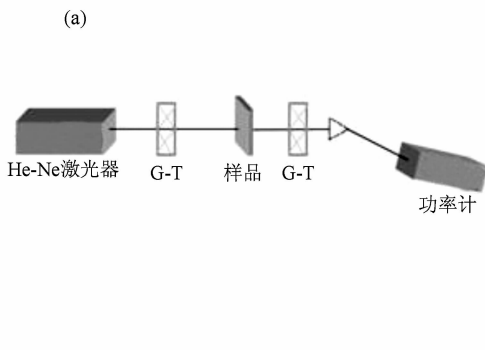


图2 光致各向异性 (a) 光路图;(b) 透射光强随角度的变化

以往的实验还表明:相对环氧基偶氮聚合物 BP-AZ-CA, IAC-4 材料在形成相位光栅方面,花费时间短且衍射效率高,双光束照射 5 min 后, IAC-4 材料形成的光栅的衍射效率达到 65%,而 BP-AZ-CA 材料的光栅衍射效率只有 5%<sup>[20]</sup>;该材料还具有优良的可逆性,反复写入擦除 50 次以上,所刻写光栅的质量和衍射效率几乎不变,便于重复利用和长期保存信息<sup>[17]</sup>.

综上所述,该材料与以前使用的偶氮苯材料相比,具有光响应时间短、光致各向异性大和可逆性好等优点,制作的光栅衍射效率高、光栅深度大、稳定性良好.

## 2.2. 正弦相位光栅的制作

实验光路图如图 3(a)所示,使用的是波长为 514.5 nm 的 Ar<sup>+</sup> 激光器, BS 是分束镜, M 是反射镜,样品前每条光路上分别依次放置半波片(HWP)、格兰-泰勒棱镜(G-T)、四分之一波片(QWP),旋转半波片可以调节透过起偏棱镜的偏振光的光强,旋转四分之一波片可产生不同偏振态的偏振光. 文献<sup>[22]</sup>表明,用两束左右旋圆偏振光照射样品 80—120 s,光栅稳定形成,衍射效率高达 62%,比用两束线偏振光照射制作的光栅具有更高的衍射效率和更大的光栅深度.

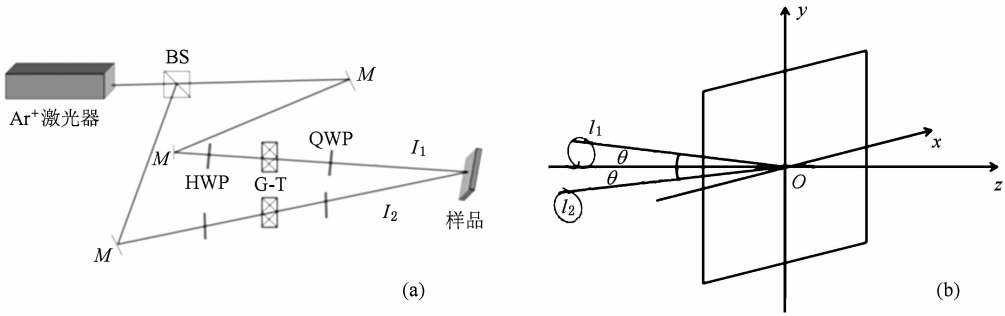


图3 光栅写入光路 (a)光路图;(b)坐标图

本实验采用左右旋正交圆偏振光双光束叠加在样品表面制作正弦相位光栅,每束光的光强 50 mW,两束光的夹角为 15°,曝光时间为 2 min.

建立如图 3 (b) 所示坐标系, XOY 面为记录平面, XOZ 为入射面, 两束入射光与 Z 轴的夹角都为  $\theta$ , 它们在 XOY 面上的相位分布为

$$\varphi_1 = -\varphi_2 = kx\sin\theta, \quad (2)$$

其中,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  为入射光波矢. 两束入射光可以写成琼斯矢量

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i\varphi_1} \\ e^{i(\varphi_1 + \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix}, \quad E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{i\varphi_2} \\ e^{i(\varphi_2 - \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix},$$

两束光叠加, 归一化后

$$E = E_1 + E_2 = \begin{bmatrix} \cos\delta \\ -\sin\delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,  $\delta = \frac{1}{2}(\varphi_1 - \varphi_2) = kx\sin\theta$ . 可以看出, 合成光  $E$  为线偏振光, 其振动方向随  $x$  成周期变化, 如图 4 所示. 其周期可由  $k\Lambda\sin\theta = \pi$  得

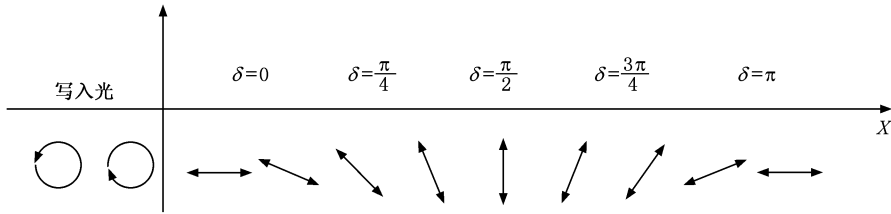


图4 左右圆偏振光合成光的偏振态

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin\theta}. \quad (4)$$

实验结果表明, 样品表面形成正弦型起伏光

栅, 起伏深度达 734 nm, 光栅常数为 2  $\mu\text{m}$ . 从其原子力显微镜照片 (图 5 (a)) 能够看出, 光栅结构均匀, 质量良好, 而其 He-Ne 光的衍射图 (图 5 (b)) 光

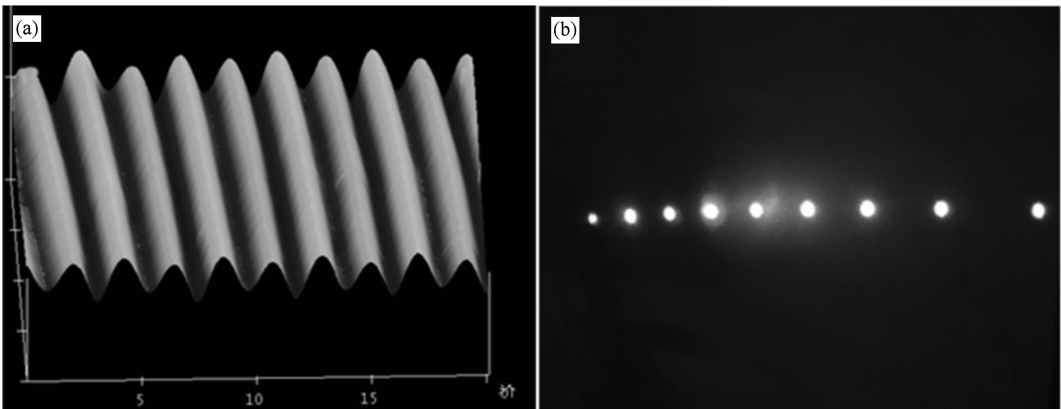


图5 质量良好的正弦光栅 (a)光栅的原子力显微镜照片;(b)光栅的 He-Ne 光衍射图

斑锐利,也反映出光栅质量良好. 对光栅的形成机理的研究已排除了热效应的影响,一般认为是由光场驱动的质量迁移造成的. Naydenova 等认为表面起伏光栅主要是由水平方向的线偏振光诱导质量迁移产生的<sup>[24]</sup>,较好地解释了光栅形成的原因.

### 3. 结果与讨论

实验中使用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光探测光栅的特性. 当激光照射到样品上时,在入射空间和透射空间都有均匀分布的衍射斑点,即该光栅既是透射光栅又是反射光栅. 为了同时观察两个空间的衍射现象,在样品前面放置一个带有小孔的屏,让入射光从小孔穿过,反射的衍射光斑就分布在该屏上,反射空间和透射空间的衍射斑点是分布的,而且衍射光强也基本是一样的. 3.4 节将讨论斜入射时光栅的衍射特性,用一个屏就可以看到两个空间的衍射斑点.

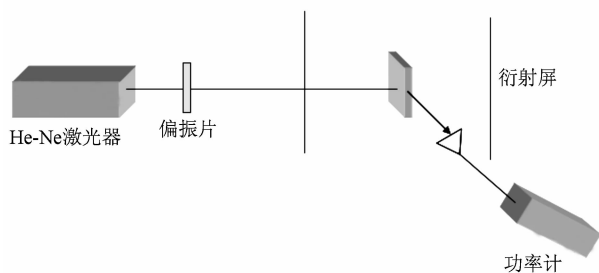


图6 用 He-Ne 激光器探测光栅特性的光路图

#### 3.1. 正弦相位光栅的理论分析

聚合物在光场的作用下形成表面凸起,其厚度成周期变化,同时材料的分子轴(光轴)也形成空间周期分布,其厚度的变化和分子轴排列都会对照射到上面的探测光的相位进行调制(由于材料对 632.8 nm 的光几乎没有吸收,在忽略材料吸收的情况下,对光的振幅没有调制作用). 正弦相位光栅的屏函数为<sup>[25]</sup>

$$t(x) = e^{i\frac{m}{2}\sin\langle k_A x \rangle} \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right), \quad (5)$$

其中,  $m$  为相位调制度,影响相位调制度主要因素是光栅深度和分子轴的空间分布.  $k_A$  是光栅矢量,  $L$  是光栅的长度,与写入光斑的大小有关,实验中约等于 3 mm. 利用数学上的一个恒等式

$$e^{i\frac{m}{2}\sin\langle k_A x \rangle} = \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_q\left(\frac{m}{2}\right) e^{ik_A q x},$$

式中  $J_q$  为第一类贝塞尔函数. 单位振幅平面波正入射时,其衍射强度分布为

$$I = \sum_{q=-\infty}^{\infty} L^2 J_q^2\left(\frac{m}{2}\right) \left[ \sin \frac{\pi}{\lambda} L \left( \sin\theta - q \frac{\lambda}{\Lambda} \right) \right]^2, \quad (6)$$

一般情况下,正弦相位光栅中所有的衍射级次都出现,其衍射主极大方向由  $\sin\theta - q \frac{\lambda}{\Lambda} = 0$ , 即  $\Lambda \sin\theta = q\lambda$  ( $q = \pm 1, \pm 2, \dots$ ) 决定. 正弦相位光栅可以使高阶衍射分量获得更多的能量. 一般的光栅衍射时,0 级衍射的光很强,浪费了大量的能量,正弦相位光栅可以克服这一难题. 当  $J_0\left(\frac{m}{2}\right) = 0$  时,0 级分量完全消失,正负一级衍射最强. 在工艺上只要控制透明材料表面的起伏量来确定相位调制度  $m$ , 就可以达到使 0 级完全消失的目的.

#### 3.2. 波导光栅耦合器

##### 3.2.1. 波导光栅的基本结构及原理

图 7(a) 为光栅耦合器的基本结构,  $n_0, n_1, n_2$  分别为覆盖层、波导、和衬底的折射率. 输入光经光栅作用产生衍射光,入射光矢量  $\mathbf{K}_i$ , 光栅矢量  $\mathbf{K}_A$ , 衍射光矢量  $\mathbf{K}_{out}$ , 三者之间满足 Bragg 条件<sup>[16]</sup>

$$\mathbf{K}_i + \mathbf{K}_A = \mathbf{K}_{out}, \quad (7)$$

但是要想使衍射光能在波导层内传播,还要使衍射光满足波导的导模条件,上式则变为<sup>[26]</sup>

$$\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) n_0 \sin\theta \pm \frac{2l\pi}{\Lambda} = \beta_n, \quad (8)$$

此式即为光栅耦合光波导的耦合条件,其中  $\theta$  是入射角,  $n_0$  是覆盖层的折射率,  $\beta_n = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 \sin\theta_n$ , 是波导  $n$  阶模的传播常数,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\lambda$  为入射光波长,  $l$  为衍射级次,  $l = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ . 波导传播常数  $\beta_n$  的计算将在下一小节阐述. 由以上结论可知,只需调节入射光的入射角,就可以实现光在波导里面的传播. 实验中用波长为 632.8 nm 的红光进行检测,转动样品以改变入射光的入射角,观察到明显的沿着玻璃导出的光如图 7(b). 由于聚合物薄膜的折射率和玻璃差值比较小,所以在某些角度入射时,会在薄膜一侧形成辐射模,导波光形成一些离散的点,如图 7(c) 所示. 实验中在导波光传播的路径上再刻写一个周期较小的光栅,发现光从波导层中耦合了出来(图 7(d)),从而实现控制

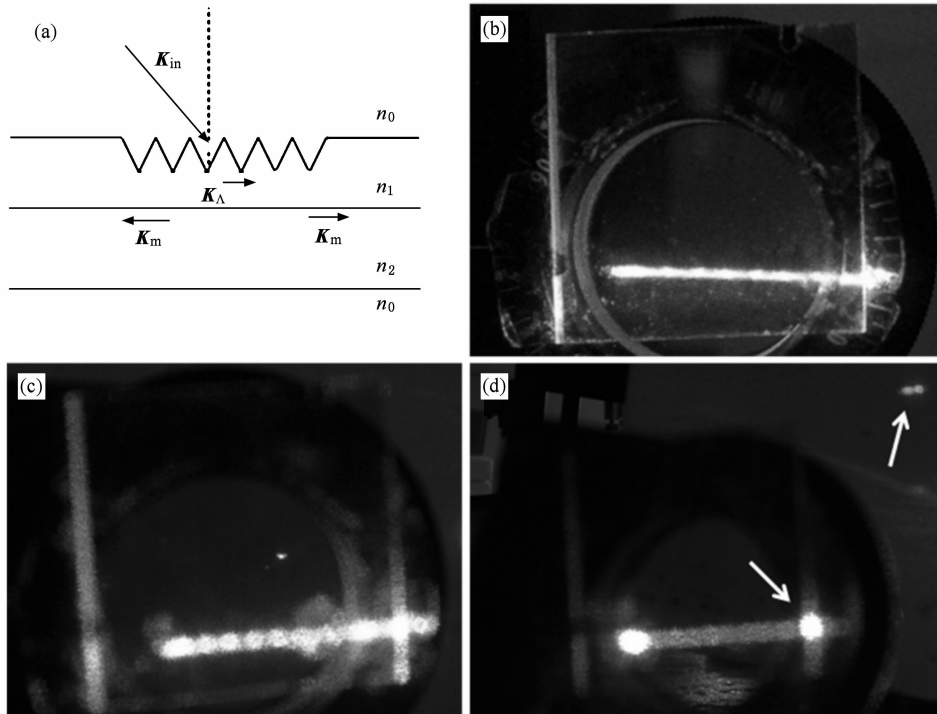


图7 光波导对光的传导 (a)原理图;(b)直线传播;(c)离散的斑点;(d)光栅耦合出

光的耦合进和耦合出,还可以控制光栅结构使光在波导层内改变传播的方向,这在光学集成方面将会有很好的应用前景。

光栅耦合器在导波光学和集成光学中是一个非常重要的器件,相对于其他的耦合方式具有成本低、制作简单快捷、体积小、便于集成、耦合效率高优点.理论上计算光栅的耦合效率可达88%<sup>[27]</sup>,实验上也达到了60%—70%<sup>[28,29]</sup>.文献[16,29,30]分别从理论、实验和数值计算等方面探究了影响光栅耦合效率的因素.光栅的光栅常数,光栅深度和光栅的占空比是影响光栅耦合效率的主要因素,随着光栅常数的增加光栅的耦合效率会随之下降;在光栅周期确定的情况下,最高的光栅耦合效率对应某一个光栅深度值,大于或小于该值耦合效率都会下降;光栅的占空比为0.5时,耦合效率最高.还有其他因素,比如入射光的波长以及入射光是高斯光还是平面光<sup>[31]</sup>,都会影响光栅的耦合效率。

经测量,本实验中所制作的光栅耦合效率为15.7%,耦合效率比较低,其主要原因在于所使用的光栅周期较大(2  $\mu\text{m}$ ),导致衍射级较多,在某一衍射级耦合进波导层的同时其他各级衍射因透射而浪费掉了;其次是零级衍射占有了较多的能量.要

提高耦合效率,主要是通过改善光栅的结构,如上文所述,正弦相位型光栅可以通过控制调制深度而实现零级衍射消光((6)式);由(4)式可知,控制制作光栅时双光束的夹角可控制光栅的周期,当光栅周期小于波长时,可形成超精细结构,从而使得衍射级成为倏逝波而能全部耦合进波导层内;另外,材料厚度的周期变化和分子轴的周期分布二者对光的相位调制未必同步,这种相移也会对耦合效率造成影响,这方面的实验正在进行当中。

### 3.2.2. 光波导传播常数的数值计算

数值计算是科学研究的一个重要环节,具有一定的预见性,可以为实验提供指导,减少盲目性,从而节省人力物力.任何一种波导都有其固定的传播常数,可以利用计算机,根据波导的参数计算出其传播常数.本文利用Matlab软件,采用图解法计算光波导各阶导模传播常数 $\beta_m$ .

要使光线在波导内传播,既要满足全内反射条件,还要满足相位加强(谐振)的条件,即光经过两次反射后,其相移的累加必须是 $2\pi$ 的整数倍.因此,光波能在薄膜中传播的条件,即薄膜波导的特征方程为<sup>[32]</sup>

$$2n_1 h K_0 \cos\theta_i + \delta_1 + \delta_2 = 2m\pi, \quad (9)$$

其中,  $h$  和  $n_1$  分别是光波导的厚度和折射率,  $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  是自由空间光的波矢,  $\delta_1, \delta_2$  分别是光在两个界面上反射时的相位差,  $m$  取整数. 以 TE 模为例, 上式改写为

$$kh - \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2}}{\cos \theta_i}$$

$$- \arctan \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_0}{n_2}\right)^2}}{\cos \theta_i} = m\pi, \quad (10)$$

其中  $k = n_2 K_0 \cos \theta_i$  是波矢垂直于波导层方向的分量, 利用三角公式

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{\tan \alpha + \tan \beta}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \beta}$$

可以把(10)式变形为

$$\tan(kh) = \frac{\sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} + \sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_0}{n_2}\right)^2}}{\cos \theta_i - \sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} \cdot \sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_0}{n_2}\right)^2} / \cos \theta_i}. \quad (11)$$

利用以下关系:

$$\cos \theta_i = \frac{k}{K_0 n_2}, \quad \sin^2 \theta_i = 1 - \left(\frac{k}{K_0 n_2}\right)^2$$

$$\sqrt{\sin^2 \theta_i - (n_1/n_2)^2} = \sqrt{(K_0^2 n_2^2 - k^2 - n_1^2 K_0^2) / K_0^2 n_2^2},$$

(11)式的右侧可以写成如下形式:

$$F(kh) = kh \frac{[(n_2^2 - n_0^2)(K_0 h)^2 - (kh)^2]^{1/2} + [(n_2^2 - n_1^2)(K_0 h)^2 - (kh)^2]^{1/2}}{(kh)^2 - [(n_2^2 - n_0^2)(K_0 h)^2 - (kh)^2]^{1/2} [(n_2^2 - n_1^2)(K_0 h)^2 - (kh)^2]^{1/2}}. \quad (12)$$

由此特征方程(9)的解即为  $\tan(kh)$  与  $F(kh)$  的交点, 由此用图解法求出这一超越方程的解.

+  $k_m^2 = K_0^2 n_1^2$  ( $k_m$  为图中每个交点的横坐标与  $h$  的比值), 可求得 TE<sub>*m*</sub> 模的传播常数  $\beta_m$ , 同时可以根据光波导耦合条件(8)式, 计算出每个导模相应的入射角. 可以看出, 随着波导厚度的增加, 其导模的数量也会增加. IAC-4 材料的折射率为 1.53, 厚度为 5  $\mu\text{m}$ , 衬底玻璃的折射率为 1.45, 通过计算得出该波导层可以存在八个 TE 模, 当入射角为 39.4° 时, 可以把一级衍射光以 TE<sub>0</sub> 模式耦合进波导层内.

### 3.3. 光强调制器

使用图 3(b)所示坐标系, 实验中发现改变入射光的偏振方向, 导出光的光强随之变化, 偏振方向沿  $Y$  方向时 (TE 模) 最强, 沿  $X$  (TM 模) 方向时最弱, 几乎减小到零. 实验中, 把偏振方向每改变 5° 测量一次导出光的光强, 然后对测得的数据用 Matlab 进行拟和,  $\theta$  是入射光的偏振方向与  $X$  轴的夹角, 光强随角度基本呈正弦规律变化 (如图 9 所示), 可见该光栅可以按照一定规律对导出光光强进行调制. 由此推断, IAC-4 材料经光诱导形成光栅以后对不同偏振态的光具有选择通过的效应. 在线偏振光作

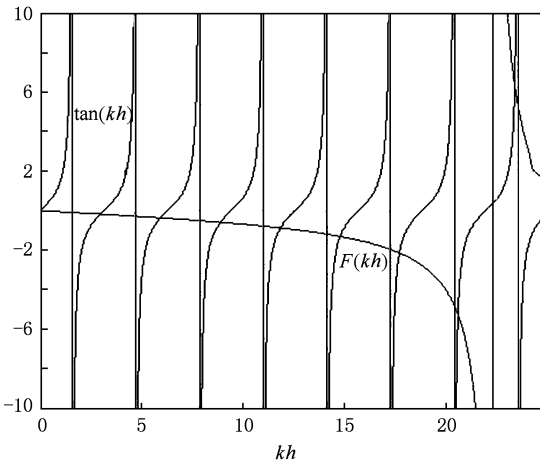


图 8 图解法求光波导的传播常数 (参数如下:  $n_1 = 1.53, n_2 = 1.45, n_3 = 1.0, \lambda = 632.8 \text{ nm}, h = 5 \mu\text{m}$ )

从左到右各交点相应于  $m = 0, 1, 2, \dots$  各阶模的解, 从这些交点的横坐标确定出  $kh$  的值, 再通过  $\beta_m^2$

用下偶氮本分子会沿垂直偏振方向形成取向分子轴取向,而光栅的栅槽平行于偏振光方向<sup>[21,33]</sup>. 根据文献[17],在左右圆偏振光作用下形成的光栅对平行于栅槽方向有最大的透射光,而与其垂直的方向透射率最小. 该器件实现了起偏棱镜和半波片二者的综合功能,而且体积小,制作简单,在光学集成可以得到有效的应用.

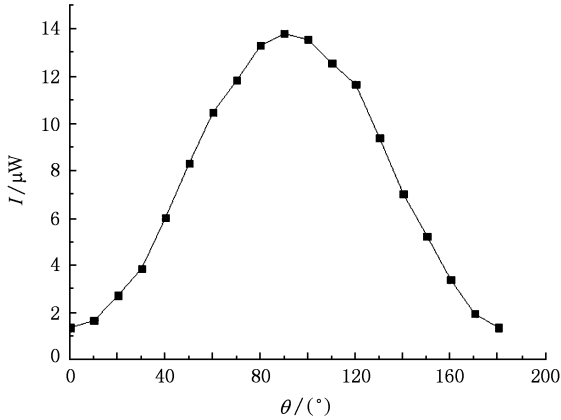


图9 导出光强随入射光的偏振态的变化

### 3.4. 任意角度入射时的光栅方程

沿用上面的坐标系,当入射光在  $YOZ$  面内与  $Y$  轴成某一角度入射时,在垂直  $Y$  轴的屏上观察到,所有的衍射斑点不再在一条直线上,而是成一个弧状,随着入射角度的改变,透射空间的衍射斑点和反射空间的衍射斑点的衍射弧对接在屏上形成一个圆形,如图 10(a)所示.

根据 Bragg 条件(7)式,而且  $|\mathbf{K}_i| = |\mathbf{K}_{out}|$ ,当入射光在  $YOZ$  面内倾斜入射时,要保证光矢的  $Y$  分量不变,即衍射光与  $Y$  轴的夹角  $\theta_0$  不变,则所有衍

射光的光矢形成一个以  $O$  点为顶点,以  $|\mathbf{K}_i|$  为母线,以  $Y$  轴为对称轴的部分圆锥面,在垂直于  $Y$  轴的屏上所有的衍射斑点便形成弧状,随着  $\theta_0$  变小,圆锥的顶角变小,衍射斑点形成的图案逐渐接近半圆. 这种情况下,衍射已不再是二维平面问题,而是一个立体的问题,设衍射光与  $X$  轴、 $Z$  轴的夹角分别是  $\alpha'$  和  $\beta'$ ,则光栅方程可以改写成如下形式:

$$\Lambda \cos \alpha = m \lambda, \cos^2 \theta_0 + \cos^2 \alpha' + \cos^2 \beta' = 1, \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (13)$$

由此作一个推广,光以任意角入射到光栅上,设入射光与  $X, Y, Z$  轴的夹角分别是  $\alpha, \theta_0, \beta$ ,衍射角分别是  $\alpha', \theta', \beta'$ ,考虑到  $\theta' = \theta_0$ , 得到

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{\lambda} \cos \alpha + m \frac{2\pi}{\Lambda} &= \frac{2\pi}{\lambda} \cos \alpha' \text{ 或} \\ \Lambda (\cos \alpha' - \cos \alpha) &= m \lambda, \\ \cos^2 \theta_0 + \cos^2 \alpha' + \cos^2 \beta' &= 1, \\ m &= \pm 1, \pm 2, \dots, \end{aligned} \quad (14)$$

由(14)式即可解决任意角度入射时光栅的衍射方向问题.

与正入射的情况不同,当入射角满足光栅耦合条件时,导光不再沿  $X$  方向传播,而是如图 10(b)所示,在  $XOY$  面内成某一角度传播,这是由于衍射光既有  $X$  分量,又有  $Y$  分量,所以其导光方向不再沿  $X$  方向,而是与  $X$  轴  $Y$  轴都有一定的夹角,当入射光在  $YOZ$  平面内时,两束导光是关于  $Y$  轴对称的. 任意角度入射时,波导耦合方程(8)式修正为

$$\mathbf{k}_y + \mathbf{k}_x + l \mathbf{k}_\Lambda = \boldsymbol{\beta}_n, \quad (15)$$

其中,  $k_y = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta_0, k_x = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \alpha, k_\Lambda = \frac{2\pi}{\Lambda}$  为光栅矢量,  $l$  是衍射级. 导波光的方向由入射光矢的  $X$  分量、 $Y$  分量以及光栅矢量合成而决定. 入射角度不同,两束导波光的方向也随之改变,这个现象可以

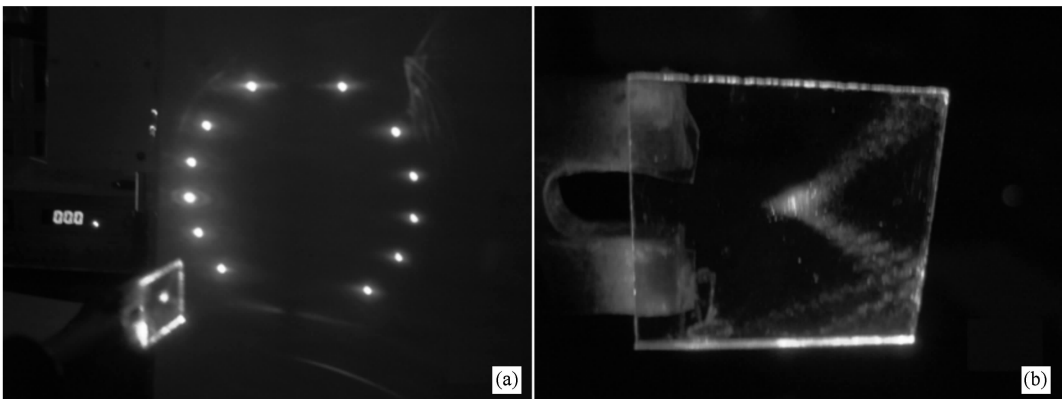


图10 任意角入射时光栅的特性 (a)衍射图;(b)导光图

在控制光在波导层内的传播方向等方面加以应用.

## 4. 结 论

介绍了用双光束干涉法在一种新的聚合物材料 IAC-4 上刻写正弦相位型光栅, 阐述了该材料相对其他偶氮苯聚合物在各向异性、形成光栅时间和

衍射效率方面的优势, 研究了使用该光栅作为波导耦合器及其在光强调制和导光方向控制等方面得到应用, 对波导层的传播常数进行了数值计算, 并探讨了对光栅方程的修正. 本实验制作的光栅成本低廉, 方法简单, 快速便捷且质量良好, 在导波光学和集成光学方面具有很好的应用前景. 在提高耦合效率, 改善光波导性能方面有待进一步的研究.

- [1] Li J, Zhao Y Z, Lin X B, Hu Q Y, Li Z J, Chen Z W 2004 *Semiconductor Optic Electronics* **25** 417 (in Chinese) [李 静、赵玉周、林旭彬、胡巧燕、李章健、陈志文 2004 半导体光电 **25** 417]
- [2] Liang H W, Shi S X, Li J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2293 (in Chinese) [梁华伟、石顺祥、李家立 2007 物理学报 **56** 2293]
- [3] Li Y M, Chen L X, She W L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5895 (in Chinese) [李燕明、陈理想、余卫龙 2007 物理学报 **56** 5895]
- [4] Yu T B, Wang M H, Jiang X Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1851 (in Chinese) [于天宝、王明华、江晓清、杨建义 2006 物理学报 **55** 1851]
- [5] Bai N F, Liu X, Xiao J B, Zhang M D, Sun X H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4933 (in Chinese) [柏宁丰、刘 旭、肖金标、张明德、孙小蕊 2005 物理学报 **54** 4933]
- [6] Xu Z D, Cai Z G, Zhang L Z, Liu Y F, Yang J, She W L, Zhou J Y 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1091 (in Chinese) [徐则达、蔡志岗、张灵芝、刘焰发、杨 杰、余卫龙、周建英 2000 物理学报 **49** 1091]
- [7] Liang J C, Wang X S, Luo D B, She W L, Wu S Z, Zeng F, Tang T, Yao S L 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3596 (in Chinese) [梁检初、王晓生、罗殿斌、余卫龙、吴水珠、曾 飏、唐天、姚胜兰 2004 物理学报 **53** 3596]
- [8] Li Y G, She W L, Wang H C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2229 (in Chinese) [黎扬钢、余卫龙、王红成 2007 物理学报 **56** 2229]
- [9] Zheng C T, Ma C S, Yan X, Wang X Y, Zhang D M 2008 *Opt. Commun.* **281** 5998
- [10] Chan W Y, Chen K X, Chan H P, Bishnu P Pal, Varshney R K 2009 *Opt. Commun.* **282** 883
- [11] Chow C K, Chiang K S, Liu Q, Lor K P, Chan H P 2009 *Opt. Commun.* **282** 378
- [12] Chen J J, Li Z, Zhang J S, Gong Q H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5893 (in Chinese) [陈建军、李 智、张家森、龚旗煌 2008 物理学报 **57** 5893]
- [13] Yang J Y, Zhou Q J, Jiang X Q, Wang M H, Chen R T 2003 *Chinese Journal of Semiconductors* **24** 1217 (in Chinese) [杨建义、Zhou Qingjun、江晓清、王明华、Ray T. Chen 半导体学报 **24** 1217]
- [14] Wang Y P, Chen J P, Li X W, Zhou J H, Shen H, Shi C H, Zhang X H, Hong J X, Ye A L 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4782 (in Chinese) [王义平、陈建平、李新碗、周俊鹤、沈 浩、施长海、张晓红、洪建勋、叶爱伦 2005 物理学报 **54** 4782]
- [15] Chen K, Cheng J Q, Xiao Y, Tang D G, Huang M J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1007 (in Chinese) [陈 珂、成建群、肖 勇、唐道广、黄明举 2009 物理学报 **58** 1007]
- [16] Yuan Z H, Liu Y Z, Pang T 1997 *Semiconductor Optic Electronics* **18** 92 (in Chinese) [袁纵横、刘永智、庞 涛 1997 半导体光电 **18** 92]
- [17] Donvala, Toussaere E, Zyss J 2001 *Synth. Met.* **124** 19
- [18] Bader M A, Keller H M, Marowsky G 1998 *Opt. Mater.* **9** 334
- [19] Barille R, Tajalli P, Zielinska S, Ortyl E, Kucharski S, Nunzi J M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 053102
- [20] Guo M C, Xu Z D, Wang X G 2008 *Langmuir* **24** 2740
- [21] Guo M C, Xu Z D, Wang X G 2008 *Opt. Mater.* **31** 412
- [22] Guo M C, Xu Z D, Wang X G 2009 *Acta Optica Sinica* **29** 767 (in Chinese) [郭妙才、徐则达、王晓工 2009 光学学报 **29** 767]
- [23] Yao Q J 2002 *Optics Course (the Third Edition)* (Beijing: Higher Education Press) p347 (in Chinese) [姚启钧 光学教程(第三版)2002 (北京:高等教育出版社)第 347 页]
- [24] Naydenova I, Nikolova L, Todorov T 1998 *Opt. Soc. Am.* **B 15** 1257
- [25] Yang G G, Song F J 1991 *Advance physical optics* (Hefei: University of Science and Technology of China Press) p106 (in Chinese) [羊国光、宋菲君 高等物理光学 1991 (合肥:中国科学技术大学出版社)第 106 页]
- [26] Taylor H F, Yariv A 1974 *Proc. IEEE* **62** 1044
- [27] Dalgoutte D G, Wilkinson C D W 1975 *Appl. Opt.* **14** 2983
- [28] Dalgoutte D G 1973 *Opt. Commun.* **8** 124
- [29] Yu D W 1980 *Acta Phys. Sin.* **29** 1135 (in Chinese) [余德维 1980 物理学报 **29** 1135]
- [30] Yu S X, Guo F M, Xiong D Y, Li N, Zeng Y, Xu J, Zhu Z Q 2006 *Chin. J. Quantum Electron.* **23** 428 (in Chinese) [于绍欣、郭方敏、熊大元、李 宁、曾 勇、徐 靖、朱自强 2006 量子电子学报 **23** 428]
- [31] Jin G L, Fang H T 1996 *J. Shanghai Jiaotong Univ.* **30** 135 (in Chinese) [金国良、方海涛 1996 上海交通大学学报 **30** 135]
- [32] Cao Z Q 2007 *Guided wave optics* (Beijing: Science Press) p14 (in Chinese) [曹庄琪 2007 导波光学 (北京:科学出版社)第 14 页]
- [33] Castagna R, Lucchetta D E, Vita F, Criante L, Simoni F 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 041115



# Investigation on characteristics of a new kind of polymer material with sine-phase waveguide grating

Chen Zhao-Zhen<sup>‡</sup> Xu Ze-Da<sup>†</sup>

(*School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*)

(Received 8 March 2009; revised manuscript received 17 August 2009)

## Abstract

Sine-phase waveguide grating is engraved on a new kind of polymer material through double-beams interference, which realizes grating coupled optical wave-guide. Conductive characteristic of optical wave-guide on different polarization incidence beam are investigated. Formation of grating is analyzed in theory as well, and propagation constant of optical wave-guide is calculated numerically in this article. The control of the wave-guide grating on guided-wave in modulation of light intensity and direction is discussed, the application of which in integrated optics is also noted. Finally, grating equation of arbitrary incident angle is analyzed.

**Keywords:** wave-guide grating, organic polymer, planar optical wave-guide, integrated optics

**PACC:** 4280L, 4270J, 4225

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: xuzd@buaa.edu.cn

<sup>‡</sup> E-mail: chenzhaozhen@ss.buaa.edu.cn