

光漂白聚合物波导折射率轮廓的确定*

刘向民 沈启舜 曹庄琪 陈英礼
(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

摘 要 通过实验发现了光漂白聚合物薄膜的厚度随光照时间按指数衰减的规律收缩, 在此基础上, 利用 m 线法和精确的转移矩阵理论, 由数值拟合得到的聚合物波导的折射率轮廓为费米函数。

关键词 光漂白, 聚合物光波导, 折射率轮廓, 精确的转移矩阵理论。

1 引 言

二阶非线性聚合物光波导是实现高效频率转换和高带宽电光调制器的重要光学元件之一。利用以各种方式(掺杂、侧链或主链)与聚合物母体结合的极性染料分子的光漂白效应^[1-4], 可制成各类功能器件要求的图形。而漂白后聚合物薄膜的折射率轮廓是图形设计的一个重要参数。确定薄膜折射率轮廓的传统过程是, 首先利用 m 线法测量波导导模的有效折射率, 然后由逆 WKB 近似法拟合给出折射率分布。这种传统方法对扩散型和离子交换型等多模波导比较合适, 但对漂白后的聚合物薄膜波导而言, 由于薄膜厚度有限, 导模数量不够多, 即使有多个导模, 但在折射率轮廓渐变部分有转折点的导模数量往往很少, 而 WKB 近似法对这种波导不能给出合理的精度。因此, 难以由逆 WKB 近似法算出合理的折射率分布曲线。另外, 本文作者在实验中发现, 聚合物薄膜中染料分子漂白的同时, 伴有厚度的收缩。有时, 这种收缩是十分严重的。

本文较为细致地研究了漂白过程引起的聚合物薄膜厚度的变化。在此基础上, 测量了导模的有效折射率, 并根据漂白的动力学过程^[5], 用精确的转移矩阵理论^[6,7]确定了光漂白聚合物波导的折射率分布函数。

2 染料分散红/聚甲基丙烯酸甲脂(DR1/PMMA)薄膜的收缩

本工作用掺杂型 DR1/PMMA 薄膜作为实验样品, 实验装置如图 1 所示。

实验发现, 聚合物薄膜收缩的快慢与染料分子的浓度直接有关。浓度高则收缩快, 浓度低则收缩慢。图 2 为 DR1/PMMA 薄膜厚度随光照时间的变化曲线, 图中折线为实验结果, 平滑曲线为数值拟合的结果。实验中, 所用的染料的质量分数为 0.10, 紫外灯的光强为

* 上海市教委重点科研项目。

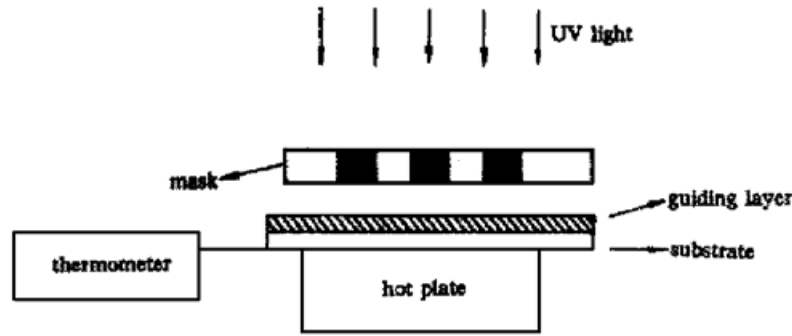


Fig. 1 Experimental setup for photobleaching

75 mW/cm^2 , 照射时样品保持温度为 80°C 。而薄膜的厚度由 DEKTEK 膜厚分析仪测量。由

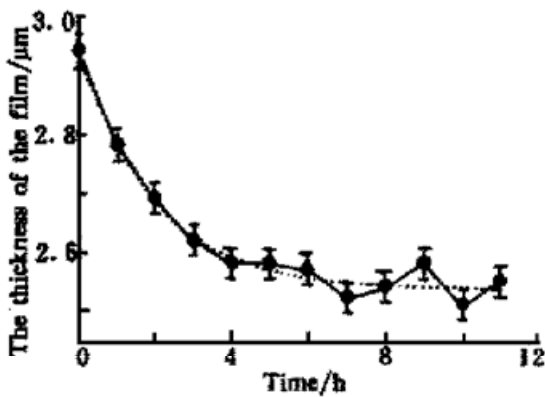


Fig. 2 Film thickness of DR1/PMMA vs. photobleaching time

图 2 可见, 实验结果可用一指数衰减函数拟合。显然, 薄膜的收缩与染料分子对紫外光的吸收直接有关。样品在漂白前, 染料分子最多, 因而, 薄膜具有最大的吸收系数, 其收缩的速度当然最快; 随着漂白白由样品表面向厚度方向的逐渐深入, 未漂白染料分子逐渐减少, 样品的吸收系数也随之减小, 薄膜收缩也趋缓; 当样品完全漂白时, 吸收系数减小到零, 到达饱和, 薄膜收缩停止。

用染料质量分数为 0.05 的 DR1/PMMA 薄膜作样品, 可得到类似的结果, 只不过表征收缩快慢的衰减系数比前者小。假设薄膜厚度 h 随漂白时间的

的变化是指数衰减函数, 即有

$$h = h_0 e^{-\alpha t}, \quad (t < t_{\text{over}}) \quad (1)$$

式中, h_0 为漂白前 ($t = 0$) 的薄膜厚度, 而 t_{over} 为完全漂白所需要的时间, 可通过观察薄膜的颜色确定。 α 是表征薄膜收缩快慢的衰减系数。

3 折射率轮廓的确定

掺杂型聚合物薄膜中染料分子的质量分数, 一般只能达到 0.10 左右, 限制了二阶非线性系数的提高。在确定折射率轮廓的实验中, 本工作使用质量分数为 0.35 的 4-二甲基胺-4-亚硝芪/聚甲基丙烯酸甲脂 (DANS/MMA) 侧链型薄膜为样品。由于用 DEKTEK 测量聚合物薄膜的厚度是破坏性的, 而制备高质量的聚合物薄膜却是一件费时费力的工作, 为节省人力和时间, 利用上节的结果。

容易知道, 漂白前, 薄膜的折射率是恒定的; 薄膜接收紫外光照射后, 染料分子因吸收光子而由表面逐渐向厚度方向漂白, 显然, 表面折射率低, 而沿厚度方向折射率逐渐升高; 样品完全漂白后, 折射率分布恢复到阶梯状, 但折射率的大小和薄膜的厚度与漂白前是不同的。

根据上述分析, 利用 m 线法测量了漂白前 ($t = 0$) 和完全漂白后 ($t = t_{\text{over}}$) 薄膜波导 (覆盖层为 $n_0 = 1.0$ 的空气, 衬底为 $n_s = 1.459$ 的石英片) 的有效折射率, 并利用模式本征方程求出了两种情况下的薄膜厚度 h 以及薄膜折射率 n 。于是由方程 (1) 可得到衰减系数

$$\alpha = -\frac{1}{t_{\text{over}}} \ln \frac{h_{\text{over}}}{h}, \quad (t < t_{\text{over}}) \quad (2)$$

由(1)、(2)两式,可确定经一定时间漂白后,聚合物薄膜的厚度 h 。

对上述 DANS/MMA 薄膜,在温度为 80°C 时,用强度为 $75\text{ mW}/\text{cm}^2$ 的紫外光照射,所得结果由表 1 列出。

Table 1 Parameters for two cases: (1) before bleaching, (2) overbleaching

time/h	n	$h/\mu\text{m}$	α/h^{-1}
$t = 0$	1.657	2.950	0.02372
$t_{\text{over}} = 24.00$	1.583	1.670	

当 $t = 8.000$ 小时,由方程(1)、(2),可得薄膜厚度 $h = 2.440\ \mu\text{m}$ 。再利用 m 线法测量,可得表 2 所列的四个 TE 模的有效折射率。

Table 2 Effective indices for TE_m modes of DANS/MMA waveguide

m	0	1	2	3
N	1.619	1.584	1.541	1.492

由表 2 可见,只有 TE_0 和 TE_1 两导模的有效折射率大于完全漂白时薄膜的折射率,这说明仅这两个导模的有效折射率处于折射率轮廓的渐变部分,其它导模的有效折射率均处于折射率轮廓的直线段。对光漂白聚合物光波导而言,这种现象是普遍的。如果仍采用逆 WKB 近似拟合,并且不考虑薄膜的收缩,则将得到薄膜厚度随光照时间增加的不合理结果^[3]。实际上,光漂白的动力学理论表明^[5],光漂白聚合物波导的折射率轮廓应是表面低,而沿厚度方向逐渐变高的费米函数分布。费米函数的平坦程度由光照时间决定,光照时间越长,则曲线越平坦。当完全漂白时,费米函数趋近于一水平直线,折射率轮廓变成阶跃形的分布。

根据上述分析,假定光漂白聚合物波导的折射率分布函数为

$$n(x) = n_s + (n_f - n_s) \frac{c_1}{e^{(h-x-c_2)c_3} + 1}, \quad (0 < x < h) \quad (3)$$

式中 n_f 和 n_s 分别为漂白前聚合物薄膜和衬底的折射率, c_1 、 c_2 和 c_3 是待定的参数。

利用表 1 和表 2 列出的数据,再用精确的转移矩阵方法^[6,7]进行数值拟合,拟合结果如图 3 所示。图中,实线为漂白 8 小时的薄膜折射率分布,线上点为测得的有效折射率,虚线 1 为未漂白时的折射率分布,虚线 2 为完全漂白的折射率分布。

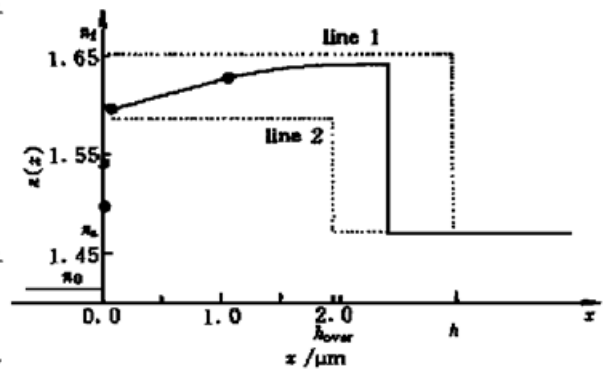


Fig. 3 Index profile of photobleaching waveguide

$$c_1 = 0.8, c_2 = 1.8\ \mu\text{m}, c_3 = 2.6 \times 10^6$$

结 论 掺有极性染料分子的聚合物波导紫外光照射后,除了染料分子的漂白效应外,还发现了聚合物薄膜厚度随光照时间按指数减小的规律。考虑了上述收缩效应后,由数值拟合得到的折射率轮廓为费米函数。

参 考 文 献

- [1] Moshrefzade R S, Misemer D K, Radcliffe M D. Nonuniform photobleaching of dyed polymers for optical waveguides. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(1) : 16~ 21
- [2] Diemeer M B J, Suyten F M M, Trommel E S. Photoinduced channel waveguide formation in nonlinear optical polymers. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(6) : 379~ 380
- [3] Zyung Teahyoung, Hwang Wol-Yon, Kim Jang-Joo. Accelerated photobleaching of nonlinear optical polymer for the formation of optical waveguide. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(26) : 3527~ 3529
- [4] Sarkisoy S, Teague Z, Venkateswarlu P. Formation of a graded-index waveguide in UV exposed polyimide. *J. Appl. Phys.*, 1997, **81**(6) : 2889~ 2890
- [5] Jiong Ma, Sihan Lin, Wei Feng *et al.*. Modeling photobleached optical polymer waveguides. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(24) : 5352~ 5360
- [6] Zhan Li, Cao Zhuangqi. Exact dispersion equation of graded refractive-index optical waveguide based on the equivalent attenuated vector. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1998, **15**(3) : 713~ 716
- [7] Cao Zhuangqi, Jiang Yi, Shen Qishun. Analytical investigations of planar optical waveguides with arbitrary index profile. *Opt. & Quant. Electron.*, 1999, **31**(6) : 637~ 644

Determination for Refractive-index Profile of Polymer Waveguide by Photobleaching

Liu Xiangmin Shen Qishun Cao Zhuangqi Chen Yingli

(Department of Applied Physics, Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 19 January 1999; revised 15 March 1999)

Abstract It was demonstrated in the photobleaching experiment that the shrinkage effect of polymer film, could be fitted approximately by an exponentially decaying function. After taking into account of the shrinkage effect, the index profile of the polymer waveguide determined by data simulation is a Fermi function with the help of m-lines method and the exact transfer matrix theory.

Key words photobleaching, polymer waveguide, index profile, exact matrix theory.