

聚合物自写入光波导的时域有限差分模拟

李 凤^{1,3} 陈四海^{2*} 罗 欢² 高益庆^{1,3}

¹南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016

²华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074

³南昌航空大学测试与光电工程学院, 江西 南昌 330063

摘要 利用时域有限差分方法,对非线性光学聚合物 SU-8 环氧树脂在激光作用下,其折射率会升高的过程进行了数值模拟与分析,得到 SU-8 薄膜与激光作用一定时间之后,其内部折射率的分布。分别对表面是平面及表面带有微透镜的 SU-8 薄膜进行了模拟。结果表明,利用折射率升高引起的自聚焦效应,可以在 SU-8 薄膜内自写入波导;写入的波导以自聚焦点为分界点,分为锥形波导和柱形波导。写入的波导长度随着与激光作用时间的增加而增长;在与激光相同的作用时间里,表面带有微透镜的 SU-8 薄膜,与表面是平面的 SU-8 薄膜相比,锥形波导的旁瓣更收敛,写入的波导长度更长;在微透镜底面半径保持不变以及曝光时间一定时,微透镜冠高与底面半径比例为 0.08 时比比例为 0.24 时写入的波导长度要长 12.2%,其中锥形波导部分要长 19.2%。

关键词 光学器件;自写入光波导;时域有限差分;自聚焦;SU-8 环氧树脂

中图分类号 O437.5;TN252

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201131.1023002

Finite-Difference Time-Domain Simulation of Polymer Self-Written Waveguide

Li Feng^{1,3} Chen Sihai² Luo Huan² Gao Yiqing^{1,3}

¹College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

²Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

³School of Measuring and Optoelectronic Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract SU-8 epoxy resin is a kind of polymer material of nonlinear optical properties. It is ultraviolet sensitive and its refractive index increases because of the photopolymerization. Finite-difference time-domain method is employed to simulate the process of photopolymerization, and the inner distribution of refractive index of SU-8 film is obtained. Both the process in the plane thin film and the thin film with a microlens are simulated. It is concluded that self-focusing effect which results from the refractive index change leads to the formation of self-written waveguide. The self-written waveguide consists of two continuous parts, one is cone and the other is cylinder. The length of the self-written waveguide increases with the time of exposure. Given the same exposure time, cone part in the SU-8 film with a microlens is more convergent than that without a microlens, and the length of the self-written waveguide in the SU-8 film with a microlens is longer than that without a microlens. The length of the self-written waveguide decreases with the increase of the ratio of the height to the basal diameter, given the same exposure time and a

收稿日期: 2011-05-06; 收到修改稿日期: 2011-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(61072131)、新世纪优秀人才计划(NCET-07-0319)和中央高校基本科研业务费资助(HUST:2010MS069)资助课题。

作者简介: 李 凤(1981—),女,博士研究生,讲师,主要从事微纳光电器件方面的研究。E-mail: lf_swnu@yahoo.com.cn

导师简介: 高益庆(1951—),男,教授,主要从事微纳光电器件、光电信息处理及二元光学等方面的研究。

E-mail: gyqniat3@msn.com

* 通信联系人。E-mail: cshai99@163.com

constant basal diameter of the microlens. The length of the self-written waveguide with the ratio 0.08 is 12.2% longer than that with the ratio 0.24, and the cone part with the ratio 0.08 is 19.2% longer than that with the ratio 0.24.

Key words optical devices; self-written waveguide; finite-difference time-domain; self-focusing; SU-8 epoxy resin
OCIS codes 230.7370; 190.4400; 130.5460

1 引 言

有机聚合物光波导因其加工工艺比硅基光波导相对简单,价格低廉,制作出来的器件质量轻、机械性能好,已经引起了广泛的关注^[1~4]。目前有离子束刻蚀、激光束直写、电子束直写等方法来制作有机聚合物波导^[2,5,6]。离子束刻蚀工艺复杂、工艺参数易受外界环境影响;电子束直写方法精度高,但所需的设备往往非常昂贵。以非线性光学聚合物为波导材料,基于自聚焦效应的自写入技术是一种新颖的三维微结构制作技术。通过紫外线与聚合物中的分子发生光化学反应,使聚合物分子发生重组,重新组合后的分子的折射率会升高,因此会在非线性光学聚合物中“写入”光波导的芯层结构。

已有文献对具有非线性光学特性的有机聚合物的自聚焦效应进行了理论分析,证实了这些聚合物能利用自聚焦效应“写入”波导的可能性^[7,8];也有文献报导了使用如 SU-8、ORMOCER、SCR-500 等非线性光学聚合物材料,利用自聚焦效应制作出了光波导阵列^[7,9,10]。本文在这些工作的基础上,考虑到光与 SU-8 环氧树脂发生光化学反应,导致其折射率增加的因素,分别对 SU-8 表面是平面、表面带有微透镜两种情况下的自聚焦效应用时域有限差分方法进行了数值模拟,分析了在这两种情况下,写入的波导长度和 SU-8 薄膜与紫外光相互作用时间的关系;对于表面带有微透镜的 SU-8 薄膜,在微透镜底面半径保持不变,不同冠高的情况下对写入波导的过程进行了模拟。通过模拟发现,在这两种情况下,由折射率升高引起的自聚焦效应可以用来在 SU-8 薄膜内写入波导结构;波导结构以自聚焦点为分界点,分为锥形波导和柱形波导。对于表面带有微透镜的自写入波导结构,因其微透镜、锥形波导和柱形波导等物理结构能分别与自然界中昆虫复眼的小眼的角膜镜、晶锥和感杆束等生理结构对应,所以可以用来对昆虫复眼进行仿生。

2 自聚焦效应的物理描述^[11,12]

自聚焦效应属于三阶非线性光学效应,引起自聚焦的原因是光致折射率变化^[12]。假设一束具有高斯

横向分布的激光在介质中传播,其折射率表示为

$$n = n_0 + \Delta n, \quad (1)$$

式中 n_0 是介质的初始折射率, Δn 是折射率的变化量,是与介质相互作用的光场强度的函数

$$\Delta n = n_2 |\mathbf{E}_0|^2, \quad (2)$$

式中 \mathbf{E}_0 为入射光矢量 \mathbf{E} 的振幅, n_2 是一个与非线性折射率系数有关的常数。因此描述自聚焦效应的是非线性波动方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} [(n_0 + \Delta n)^2 \mathbf{E}] = 0, \quad (3)$$

式中 c 为真空中的光速。对于这个方程,经过变量代换及分离,在一些特殊的情况下,可以求得解析解;在一般情况下,可以与经典力学中哈密顿-雅可比方程进行类比,得到其近似解^[11]。更严格精确的解,可以使用有限元、时域有限差分方法等数值方法,考虑光与介质相互作用导致折射率变化的因素,直接对麦克斯韦方程组求解得到^[7,11]。

3 聚合物自写入光波导的时域有限差分模拟

时域有限差分(FDTD)方法是一种有效的求解麦克斯韦方程组的数值方法。该方法由 K. S. Yee 于 1966 年首次提出,他对电磁场的 \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 的分量在空间和时间上进行交替采样,每一个电(磁)分量周围由 4 个磁(电)分量环绕,然后对麦克斯韦方程组使用中心差分近似得到一组差分方程,给定了初始值和边界条件后,各个场分量可以在时间上迭代求解^[13,14]。电磁场问题通常会涉及到各向异性介质^[15]、金属^[16]等,根据计算区域介质的不同,已经发展了多种有效的方法及吸收边界来进行计算,如辅助差分方程法、Z 变换法^[13,17];吸收边界有完美匹配层、各向异性完全匹配层等^[14]。

在用 FDTD 方法对自聚焦效应进行模拟时,要考虑到与光相互作用的介质的折射率会发生变化。在这里,聚合物选取 SU-8 环氧树脂。SU-8 环氧树脂聚合物对波长为 350~400 nm 之间的紫外光线敏感^[18],与其发生光化学反应并固化,且折射率有所增加,而且这种增加是不可逆的^[19]。折射率随着其吸收的光能量的增加而增加,但有一饱和阈值:当

增加到这一阈值之后,折射率将不会再改变。SU-8 环氧树脂薄膜初始折射率为 1.550,软烘后由于其一部分溶剂挥发,折射率增加至 $n_0 = 1.584$,经紫外线充分曝光,折射率继续增加 $\Delta n = 0.021$ 至 1.605 这一饱和阈值。若继续对其进行后烘或者热互联,充分曝光部分的折射率保持 1.605 不变,但未曝光部分的折射率会降至 1.576。这样,经过充分曝光部分作为自写入波导的芯层结构、未曝光部分作为自写入波导的包覆层结构,折射率差为 0.029^[19]。

就波导在自聚焦作用下的自写入过程而言,SU-8 因吸收光能量而引起的折射率改变的最大值是 $\Delta n = 0.021$,因为 Δn 远小于 SU-8 软烘后的折射率 $n_0 = 1.584$ 以及充分曝光后的折射率 1.605,所以在模拟时将折射率的增加按照线性变化处理:

$$n = \begin{cases} 1.584 + \frac{0.021 \times I}{I_{\max}}, & I \leq I_{\max} \\ 1.605 & I > I_{\max} \end{cases}, \quad (4)$$

式中 I 为曝光剂量, $I \propto |E|^2 t$, I_{\max} 为 SU-8 薄膜充分曝光时的曝光剂量。

3.1 入射光与 SU-8 平面薄膜的直接相互作用

如图 1(a)所示,假设有一波长 $\lambda = 365$ nm 的平面波沿 y 方向由空气垂直入射到 SU-8 平面薄膜上。进行模拟时,数值计算所用的空间离散间隔 $\Delta x = \Delta y = \lambda/12$,时间离散间隔 $\Delta t = \Delta x/2c$,均满足 FDTD 方法的数值稳定性条件,吸收边界采用完全匹配层^[17]。其中计算区域 x 轴方向有 94 个格子, y 轴方向有 300 个格子,其中完全匹配层为 20 层,整体模拟区域的大小约为 $2.86 \mu\text{m} \times 9.125 \mu\text{m}$ 。入射光源选择余弦时谐源,其位置与介质分界面的距离

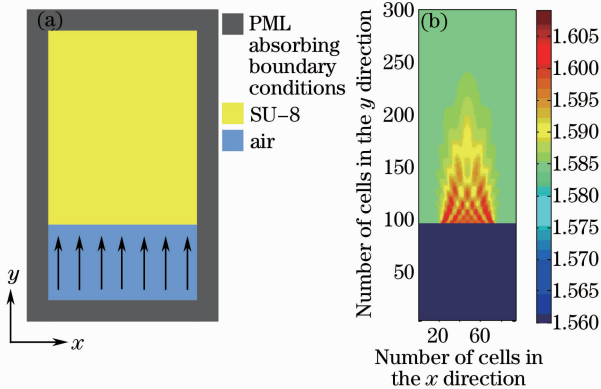


图 1 (a) 表面是平面时 SU-8 薄膜的 FDTD 模拟模型;
(b) 表面是平面的 SU-8 薄膜曝光 10 min 时,其折射率分布

Fig. 1 (a) Simulated FDTD model for SU-8 plane surface film; (b) refractive index distribution of SU-8 plane surface film after being exposed for 10 min

保持恒定,其电场矢量 E 沿 z 方向,因此可以表示为 $E_z = E \cos(2\pi\omega t)$,其中 E 为振幅, ω 为角频率, t 为时间。在模拟过程中, E 取单位振幅,SU-8 折射率未达到饱和之前因吸收光能量引起的损耗由 σ 表示,取 $\sigma = 1000$ s/m,折射率饱和之后其损耗设置为 0。程序时间步处理为:程序每循环一步,代表对 SU-8 薄膜曝光 1 s。SU-8 薄膜充分曝光时的曝光剂量 $I_{\max} = 300$ mW/cm²。在计算时,考虑到由于光化学作用引起的损耗,参考文献[17]中对有损耗介质的处理方式:即首先用前一时间步得到的磁场分量计算与 E_z 有关的电通量 D_z ,然后由 D_z 计算 E_z ,再由 E_z 计算当前循环中的磁场分量,用来计算下一时间步中的 D_z ,与文献[17]不同的是,当前循环结束之前,要根据(4)式更新计算区域中 SU-8 的折射率。

图 1(b)给出对 SU-8 平面薄膜曝光 10 min 的折射率分布图。从图 1(b)中可以看出,与光相互作用的 SU-8 的折射率发生了改变,空气的分界面处与入射光的作用时间最长,折射率已达到饱和。在 SU-8 薄膜中前进的波前会有会聚的趋势,但没有出现明显的自聚焦点。图 2(a)和(b)是在图 1(b)的基础上,分别继续曝光 5 和 10 min 的折射率分布图。可以看出,锥形波导和柱形波导的分界面可以分辨,曝光时间为 20 min 时的波导长度明显长于 15 min 的。

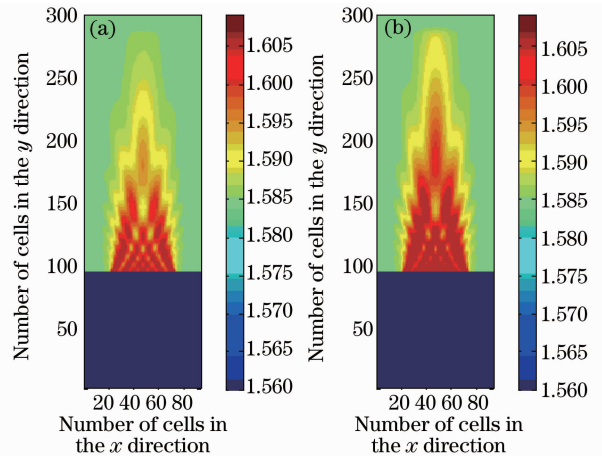


图 2 表面是平面的 SU-8 薄膜分别曝光(a) 15 min;
(b) 20 min 后的折射率分布

Fig. 2 Refractive index distribution of SU-8 plane surface film after being exposed for (a) 15 min; (b) 20 min

3.2 入射光与表面带有微透镜的 SU-8 薄膜相互作用

因为介质的初始相位面的发散度或者会聚度对自聚焦的焦点位置有影响,因此若使 SU-8 薄膜表面呈微透镜形状,在光与 SU-8 发生光化学作用使

其折射率发生改变的同时,微透镜对光产生会聚作用。图 3(a)和(b)分别给出表面带有微透镜的 SU-8 薄膜曝光 10 和 15 min 的折射率分布图,可以推断,曝光时间越长,写入的波导也越长,锥形波导和柱形波导的分界点也更容易分辨。图 3(a)与图 1(b)对比可以看出,相同的曝光时间,微透镜有助于自聚焦焦点的出现,并开始自写入波导,而且小的旁瓣也更加集中。图 3(b)与图 2(a)对比也可以得出类似结果。

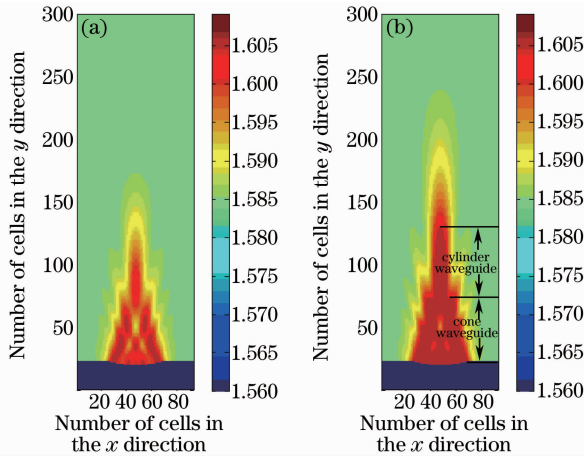


图 3 表面带有微透镜($h/D=0.08$)的 SU-8 薄膜分别曝光(a) 10 min;(b) 15 min 后的折射率分布

Fig. 3 Refractive index distribution of SU-8 film with microlens ($h/D=0.08$) after being exposed for (a)10 min; (b)15 min

图 3 中微透镜的冠高与其底面半径的比例为 $h/D=0.08$ 。为了进一步考察曝光时间对写入波导长度的影响,在 $h/D=0.12$ 时,将曝光时间依次为 10,11,⋯,20 min 时写入的锥形波导和柱形波导的长度进行了对比,结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,随着曝光时间的增加,锥形波导的长度和柱形波导长度的增加趋势是明显的,其中柱形波导部分

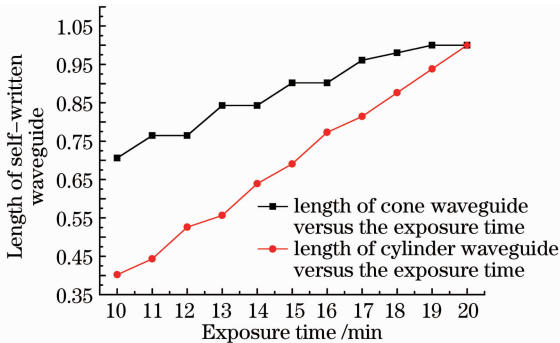


图 4 自写入波导长度与曝光时间关系($h/D=0.12$)

Fig. 4 Length of self-written waveguide with microlens ($h/D=0.12$) versus the exposure time

较锥形波导部分增加趋势相对较快,图中分别对曝光时间为 20 min 时的锥形波导长度和柱形波导长度作了归一化处理。

为考察不同光焦度的微透镜在光与 SU-8 作用过程中的影响,图 5(a)和(b)给出了微透镜底面半径保持恒定的情况下,在 h/D 分别为 0.14 和 0.2 时,曝光 15 min 后的折射率分布图。可见,不同的冠高与底面半径比例越大的微透镜,对光的折射作用越明显,锥体的长度有所减少。为了更明显的看到这种变化趋势,在底面半径 D 保持不变的情况下,依次增加冠高 h 的值,即在 h/D 分别为 0.08, 0.10, 0.12, ⋯, 0.22, 0.24 时,进行了数值模拟,模拟过程中的曝光时间均为 15 min。图 6 给出自写入锥形波导的长度以及整个自写入波导的长度随着

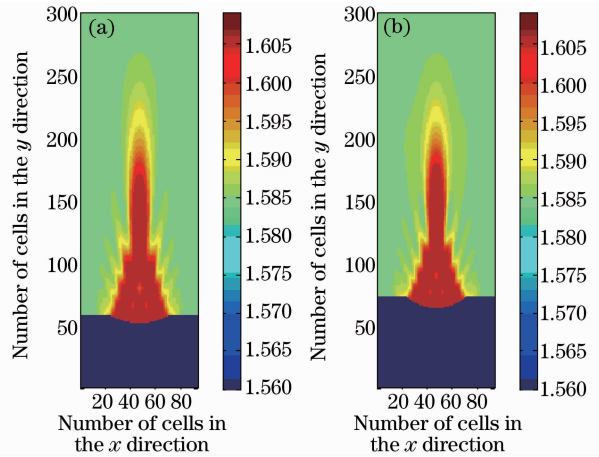


图 5 表面分别带有微透镜(a) $h/D=0.14$; (b) $h/D=0.2$ 时, SU-8 薄膜曝光 15 min 时折射率分布

Fig. 5 Refractive index distribution of SU-8 film with microlens of (a) $h/D=0.14$ and (b) $h/D=0.2$ after being exposed for 15 min

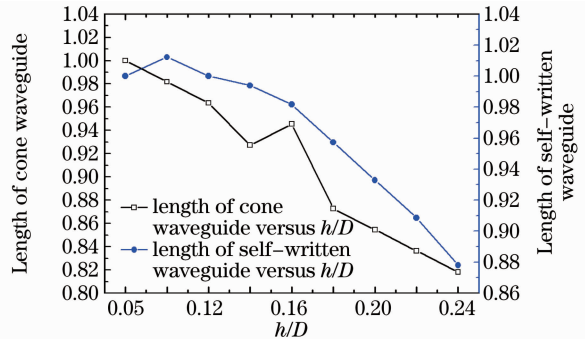


图 6 曝光时间为 15 min 时,写入锥形波导长度及整体波导长度随着不同 h/D 时的变化曲线

Fig. 6 Length of cone waveguide versus h/D and the length of self-written waveguide versus h/D after being exposed for 15 min

冠高 h/D 增加时的变化趋势,其中分别对 $h/D=0.08$ 时的锥形波导的长度和整个自写入波导长度做了归一化处理。从图 6 中可以看出,随着 h/D 从 0.08 增加至 0.24 时,在曝光时间一致的情况下,锥形波导的长度和整体自写入波导的长度的变化的整体趋势是降低的。

4 结果与讨论

从图 1(b)和图 2 可以看出,光与表面是平面的 SU-8 薄膜发生光化学反应,SU-8 薄膜的折射率发生了改变,吸收的曝光量大于折射率饱和剂量部分的折射率达到饱和,曝光时间如果不够,写入锥形波导,自聚焦焦点不会出现,或者不明显;当曝光时间足够时,自聚焦焦点出现,并开始前移写入柱形波导;从图 3(a)和图 1(b)以及图 3(b)和图 2(a)可以看出,光与表面带有微透镜的 SU-8 薄膜相互作用时,微透镜对光的会聚作用使得锥形波导的旁瓣有所收敛;在相同的曝光时间里,在带有微透镜的 SU-8 薄膜内写入的波导长度比平面 SU-8 薄膜里的长。两种情况下,写入的波导的长度均随着曝光时间的增加而增加。对于表面带有微透镜的 SU-8 薄膜,从图 4 可以看出,当 $h/D=0.12$ 时,曝光 20 min 时的锥形波导与柱形波导较曝光 10 min 分别增加了约 29.4%和 59.8%。

从图 5 和图 6 可以看出,对于表面带有微透镜的 SU-8 薄膜,当底面半径保持不变时,在相同的曝光时间里,不同的冠高即不同的光焦度会影响光与 SU-8 薄膜的相互作用,对自写入锥形波导的长度以及整体自写入波导的长度有一定影响。随着 h/D 从 0.08 增加至 0.24,在曝光时间一致的情况下,锥体波导的长度和整体自写入波导的长度的变化的整体趋势是降低的,其中锥体波导的长度下降了 19.2%,整体自写入波导的长度下降了 12.2%。波导长度的下降因素之一与微透镜的不同光焦度即折光能力有关。在底面半径保持不变的情况下,冠高增加,微透镜的曲率半径会降低,而光焦度与曲率半径成反比,因此光焦度会升高,因此锥形波导的长度会降低,从而使整体自写入波导的长度减少。

另外,在进行数值模拟时,用 σ 表示 SU-8 折射率未饱和之前由于吸收光能量引起的损耗,发现不同的 σ 取值对自写入波导的结构、长度有一定的影响。当 σ 为 1 S/m,10 S/m,100 S/m 时,其模拟结果给出的波导长度和横截面直径与 σ 为 0,即无损耗时的相差不大,但当 σ 为 1000 S/m 时,波导的长度和横截面直

径都明显减小,与 σ 为 0 时有了很大差异,这说明,损耗对波导的写入起了作用。因此,模拟时选择使损耗作用表现明显的 σ 值,即 $\sigma=1000$ S/m。

5 结 论

SU-8 属于交联型聚合物,它吸收波长为 350~420 nm 之间的紫外光能量,发生光化学反应,从而其折射率发生改变,并且这种改变是不可逆的。主要考虑了这种 SU-8 聚合物与波长为 365 nm 的紫外光发生光化学反应致其折射率发生变化的因素,模拟了折射率变化引起的自聚焦效应并写入波导的过程。结果表明:由折射率升高引起的自聚焦效应可以用来在 SU-8 薄膜内写入波导结构;波导结构以自聚焦焦点为分界点,分为锥形波导和柱形波导;写入的波导长度随着 SU-8 与紫外光相互作用时间的增加而增加;对于表面带有微透镜的 SU-8 薄膜,因为微透镜对光线有会聚作用,与表面是平面的 SU-8 薄膜相比,在相同的曝光时间里,锥形波导的旁瓣更收敛,写入的波导长度更长;在微透镜底面半径保持不变以及曝光时间一定时,冠高小的微透镜写入的波导长度更长。这对用 SU-8 环氧树脂聚合物制作自写入光波导提供有意义的理论指导。

参 考 文 献

- 1 Wen Changli, Ji Jiarong, Dou Wenhua *et al.*. Polymer material for optical waveguide used in integrated circuit [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 36~40
温昌礼, 季家镛, 窦文华等. 集成电路用聚合物光波导材料[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(7): 36~40
- 2 Lü Guangcai, Hu Guohua, Yun Bin Feng *et al.*. Fabrication of polymer optical waveguide using fluorinated polyimide [J]. *Chinese J. Electron Devices*, 2007, **30**(3): 752~754
吕广才, 胡国华, 恽斌峰等. 含氟聚酰亚胺有机聚合物波导的制备[J]. *电子器件*, 2007, **30**(3): 752~754
- 3 Gao Yuan, Zhang Xiaoxia, Liao Jinkun. Analysis and optimization of organic polymer asymmetric bent waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0213002
高原, 张晓霞, 廖进昆. 有机聚合物非对称弯波导分析与优化 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0213002
- 4 Hong Jianxun, Xu Kai, Zhou Limin *et al.*. Tapers in electro-optic polymer waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2686~2691
洪建勋, 徐 凯, 周立民等. 电光聚合物波导中的锥形结构 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2686~2691
- 5 Y. Hanada, K. Sugioka, K. Midorikawa. UV waveguides light fabricated in fluoropolymer CYTOP by femtosecond laser direct writing [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 446~450
- 6 W. H. Wong, E. Y. B. Pun. Polymeric waveguide wavelength filters using electron-beam direct writing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(22): 3576~3578
- 7 U. Streppel, P. Dannberg, C. W. Chter *et al.*. Formation of micro-optical structures by self-writing processes in photosensitive polymers [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(18):

3570~3579

- 8 Tetsuzo Yoshimura, Kazuyuki Wakabayashi. Self-organization of optical z-connections in three-dimensional optical circuits simulated by the finite difference time domain method[C]. *SPIE*, 2011, **7944**: 79440R
- 9 Li Feng, Chen Sihai, Lai Jianjun *et al.*. Design and fabrication of polymer microlens array with self-written waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0310003
李 凤, 陈四海, 赖建军 等. 自写入光波导聚合物微透镜阵列的设计与制作[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0310003
- 10 S. Shoji, S. Kawata, A. A. Sukhorukov *et al.*. Self-written waveguides in photopolymerizable resins[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(3): 185~187
- 11 Shen Yuanrang. The Principles of Nonlinear Optics[M]. Beijing: Science Press, 1987
沈元壤. 非线性光学原理(上)[M]. 北京: 科学出版社, 1987
- 12 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. Nonlinear Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003
石顺祥, 陈国夫, 赵 卫 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003
- 13 A. Taflove, S. C. Hagness. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method [M]. Boston MA: Artech House, 2005
- 14 Ge Debiao, Yan Yubo. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005
葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005
- 15 Fang Yun, Zhang Jian, Wu Liying. Optical property simulation of liquid crystal based on finite-difference time-domain method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 562~566
方 运, 张 健, 吴丽莹. 基于时域有限差分法的液晶光学特性模拟[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 562~566
- 16 Wang Hui, Zeng Wei, Song Guofeng. Simulation and development of subwavelength periodic hole array on Au film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1638~1643
王 卉, 曾 韡, 宋国峰. 金膜上亚波长周期性孔阵的模拟与研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1638~1643
- 17 D. M. Sulliva. Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method[M]. New York: IEEE press, 2000
- 18 Su-8 2000 permanent epoxy negative photoresist. [Http://www.microchem.com/products/pdf/su-82000datasheet2025thru2075ver4.pdf](http://www.microchem.com/products/pdf/su-82000datasheet2025thru2075ver4.pdf)
- 19 K. H. Jeong, J. Kim, L. P. Lee. Biologically inspired artificial compound eyes[J]. *Science*, 2006, **312**(5773): 557~561