

文章编号: 0253-2239(2005)07-999-6

# 新型聚偶氮苯取向增强光折变效应及全息存储<sup>\*</sup>

谢茹胜<sup>1,2</sup> 赵有源<sup>1</sup> 李潞瑛<sup>1</sup> 郑元庆<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 复旦大学光科学与工程系 先进光子学材料与器件国家重点实验室, 上海 200433)  
(<sup>2</sup> 福建师范大学化学与材料科学学院, 福州 350007)

**摘要:** 合成了新型偶氮分子偶氮二苯胺 ADPA (Azo-diphenylamine), 将其掺入聚乙烯咔唑 Poly (N-Vinylcarbazole) (PVK) 和聚丙烯丁酯 (Poly-butylacrylate) (PBA) 的聚合物 (PVK-PBA) 以及三硝基芴酮 2, 4, 7-trinitro-9-fluorenone (TNF) 聚合制成薄膜器件。结果表明掺杂偶氮苯聚合物薄膜在非共振吸收下具有强的光致取向增强光折变效应。光致折射率变化值  $\Delta n$  达到  $1.3 \times 10^{-3}$  以上。样品在两相干光束作用下, 可建立光折射率光栅, 其衍射效率可超过 30%, 实现了光全息存储。讨论了影响折射率光栅的因素, 并对全息存储相关结果形成的机制进行了分析。

**关键词:** 薄膜光学; 非共振吸收; 取向增强光折变; 折射率光栅; 光全息存储

中图分类号: O439 文献标识码: A

## Orientation-Enhanced Photorefractive Effect and Holographic Storage in Novel Azobenzene Doped Polymer Films

Xie Rusheng<sup>1,2</sup> Zhao Youyuan<sup>1</sup> Li Luying<sup>1</sup> Zheng Yuanqing<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory For Advanced Photonic Materials and Devices, Department of Optics Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433)  
(<sup>2</sup> College of Chemistry and Materials Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

**Abstract:** A novel type of azobenzene molecule (Azo-diphenylamine) (ADPA) doped in poly (N-vinylcarbazole) (PVK), Poly-butylacrylate (PBA) and 2, 4, 7-trinitro-9-fluorenone (TNF) was synthesized and studied. The experimental results showed that the polymer film possesses strong photo-induced orientation-enhanced photorefractive effect. The change value of photo-induced refractive index  $\Delta n$  surpasses  $1.3 \times 10^{-3}$ . When irradiated by two-beams, the sample can set up refractive index grating with the diffraction efficiency over 30%. The optical holographic storage was achieved. The factors that influenced refractive index were discussed and the analysis to optical holographic storage was given.

**Key words:** films optics; nonresonant absorption; orientation-enhanced photorefractive; refractive index grating; optical holographic storage

## 1 引 言

为突破传统光学系统二维存储密度的局限, 发展一种三维的体全息存储技术是十分必要的。高冗度、高存储容量、并列式内容存储和寻址(大大快于串联式读写速率)是众多学者的研究热点。光子学材料研究中, 特别重视几种具有不同光电性质的有机物质的聚合物, 使之成为具有独特功能的新光电子器件, 甚至将生物活性蛋白质(如菌视紫红质-

BR)与聚合物一起制成光电薄膜器件。这些器件主要利用光活性分子的光致变色和光致双折射等重要性质。偶氮染料分子是在两个芳环之间以 N=N 双键连接为特征, 在光和热的作用下, 能产生顺式(cis)和反式(trans)之间的异构化反应, 且在偏振光激励下能发生光致分子取向重组, 因而具有光折变<sup>[1,2]</sup>、光致各向异性<sup>[3]</sup>和光致二向色性<sup>[4]</sup>等优良的非线性光学(NLO)特性, 在光子控制、光开关及光

\* 国家自然科学基金项目(30100034, 19834030)资助课题。

作者简介: 谢茹胜(1978~), 女, 福建师范大学研究生, 主要从事物理化学方面的研究。E-mail: yzhaoh@fudan.edu.cn

收稿日期: 2004-02-20; 收到修改稿日期: 2004-12-24

信息存储及转换等光电子技术领域倍受青睐<sup>[5]</sup>。

Todorov 等在 1983 年第一次提出了偶氮苯聚合物作为光信息存储介质的可能性<sup>[6]</sup>。偶氮苯材料掺杂在聚合物载体聚甲基丙烯酸甲酯(PVA)中,用线偏振光激励发现聚合物的透射率与偏振方向有关。探测光的偏振方向与抽运光偏振方向平行或垂直,透射率会相应地增加或减少。Eich 和 Wendorff<sup>[7]</sup>在偶氮苯液晶中实现了可擦除光学存储。Wendorff 用线偏振光激励薄膜,使其产生光学各向异性,并利用光谱方法证明了取向有序,确认起作用的是偶氮苯生色团分子。在通常报道中,光致双折射一般是在共振吸收区中用光激发或写入后所获得的。这实际上存在大的吸收、光漂白效应和热效应;用光致双折射效应所形成的光栅中不仅具有折射率光栅,还具有吸收光栅,即实际上是混合光栅。这样信息的存储,会使图像模糊、不稳定、分辨率低、景深小。而有机光折变材料一般是在光的非吸收区用光照射样品后,使含有电偶极距的分子重新有规则的定向排列产生折射率变化,因而形成的光栅仅仅是折射率光栅,没有吸收光栅,克服了以上缺陷。但是一般光折变材料要加较高的外电场<sup>[2]</sup>,在零或低的外加电场时,形成的光栅的衍射效率较低。

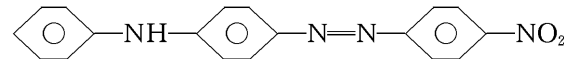
为了克服以上问题,研制了一种发色体有机聚合物,在非共振吸收区用较弱的光强就能获得双折射。在这种材料中又加入通常用于制备光折变器件的成分,如光敏剂、电荷输运剂及增塑剂等有机物质,使光致取向大大增强,仅在光场作用下就能产生较强的光折变效应,有利于形成效率高的衍射光栅,便于发展一种新型的并行式的高密度信息存储有机聚合物。本文介绍了化合物偶氮二苯胺的合成及新型取向增强光折变掺杂偶氮苯聚合物薄膜的制作;在非共振吸收条件下用偏振光测量了与光致分子取向相关的双折射及取向增强效应;分析讨论了取向增强效应及折射率光栅形成的机理;用两相干光束作为写入光和读出光初步实现了光全息存储。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 样品制作和吸收光谱

在 0~4 °C 温度下,把硝基苯胺、浓盐酸、亚硝酸钠的水溶液搅拌,待反应完成(用淀粉碘化钾试纸检验呈蓝色为止)后滴加二苯胺的丙酮溶液。产物经抽滤分离后,用丙酮重结晶,得蓝色固体沉淀。该分子的结构由 Thermo Nicolet Avatar 360 FT-IR 红外光谱仪和 Varian 的 Gary 50 紫外光谱仪测出光

谱,经分析,确定结构为



将偶氮二苯胺 Azo-diphenylamine (ADPA)、聚乙烯吡唑 Poly (N-Vinylcarbazole) (PVK) 和聚丙烯丁酯(Poly-butylacrylate) (PBA) 的聚合物(PVK-PBA)和三硝基芴酮 2,4,7-trinitro-9-fluorenone (TNF)以质量比为 50:49:1 溶解于氯仿中配成溶液,经搅拌、静置、过滤后,将溶液滴于清洁的玻璃上。滴的过程注意让氯仿充分挥发,直至玻璃上的残留物积累一定量为止。为了保证残留物中的氯仿充分挥发,将带有残留物的玻璃放进真空干燥箱加温至 60 °C 干燥 24 h。然后取出干燥过的材料在热台上加热,即将融化时用另一块玻璃覆盖其上,放置在真空热压系统内热压 20 h。热压环境的温度为 110 °C 左右。用热压法制成的薄膜样品为深红色,在一定波长范围内具有良好的透光性和均匀性。

图 1 为样品薄膜的吸收光谱。用波长为 632.8 nm He-Ne 激光照射并测其吸收光谱,发现吸收光谱并没有发生明显变化。光谱测试结果表明,该样品薄膜在 400~550 nm 波长范围内有较强的吸收,在 600 nm 以后更长的波长内吸收很小。

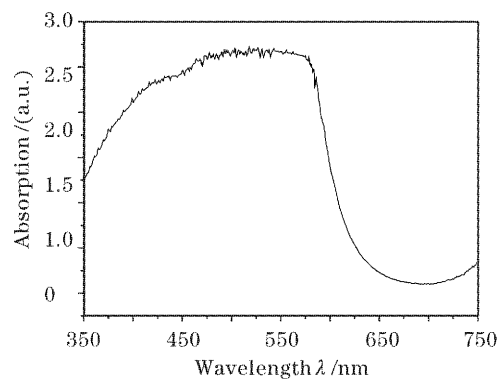


图 1 样品的吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectrum of the film

### 2.2 光致分子取向测试和分析

光折变聚合物产生光折变重要原因之一是:在光的作用下,分子的取向重新有规则地排列,或在光作用下产生的电荷在空间有规律地分布,形成空间电荷场。假设有一线偏振光在薄膜样品中传播,如果分子是各向异性的,通过光场与分子的感应极矩的相互作用,光场引起分子有规则排列。此外分子的感应矩之间存在相互作用,使分子在空间重新分布。因此首先采用类似测量光致双折射效应的方法来测量光致取向增强的程度。

实验装置如图 2 所示。He-Ne 激光器的线偏振

光经分束镜后分为  $I_1$  和  $I_2$  两束,束径为 3 mm,  $I_1$  为探测光,强度较弱;  $I_2$  为抽运光。经过调节  $\lambda/2$  波片与起偏器(P),使得  $I_1$  与  $I_2$  的偏振互相垂直。实验前先挡掉抽运光,让探测光偏振方向与检偏器(A)的偏振方向成  $90^\circ$ ,即通过检偏器后的探测光最弱。打开抽运光,则可以观察到所测得的探测光强度随抽运光的输入而发生很大的变化(如图 3 所示)。

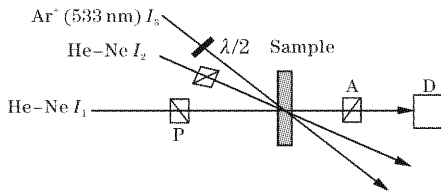


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

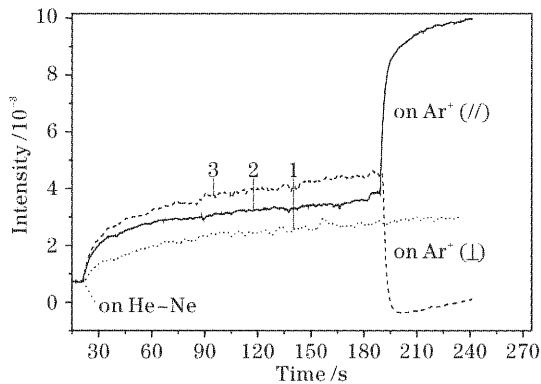


图 3 光致取向增强效应与照射时间

Fig. 3 The relationship of photo-induced orientation-enhanced effect and irradiation times

从图 1 的吸收光谱图看出,探测光在 632.8 nm 处的吸收很小,而且该样品薄膜经 632.8 nm He-Ne 激光照射后吸收并没有发生变化,透过的信号变化完全是由光致分子取向所致。根据下式<sup>[8]</sup>来确定光致取向引起的折射率变化程度:

$$I_{\perp} = I_0 \sin^2(\pi \Delta n d / \lambda), \quad (1)$$

其中  $I_0$  为探测光光强,样品未被照射时探测光偏振方向平行于检偏器光轴方向;  $I_{\perp}$  为样品被抽运光照射时透过检偏器的光强;  $d$  为样品厚度;  $\Delta n$  为平行于抽运光偏振方向的折射率与垂直于抽运光方向的折射率之差。当探测光为 0.17 mW,抽运光为 7.15 mW,样品厚度为 50  $\mu\text{m}$  时,测出的折射率变化值为  $1.3 \times 10^{-3}$ 。说明该材料有较好的三阶非线性光学性质。 $\Delta n$  的大小与抽运光强度、样品中染料组分的多少以及材料的特性有关。用不同强度的抽运光,观察另一束强度较弱的探测光的透射的改变。在图 3 中可以看到,刚打开抽运光时曲线上升

迅速,到达一定高度后上升变得很慢;随着抽运光的增加,信号幅度更大,且上升响应时间更快。另外,探测的信号强度随时间的延长而上升,即光折射强度与抽运光照射的积累过程相关,这种累积效应是光折变重要特征之一。为了进一步探明光响应时间与光强的关系,再加一束较强的  $\text{Ar}^+$  激光束参与抽运(图 2 中  $I_3$ )。若使的  $\text{Ar}^+$  激光的偏振方向与抽运的 He-Ne 激光的偏振方向相同,看到的结果如图 3 中曲线 2 所示;当只有单一的 He-Ne 激光照射(on)时,探测信号开始很快上升,接着慢慢地逐渐增强。此时将  $\text{Ar}^+$  激光( $I_3 = 25 \text{ mW}$ )加入(on)时,探测光强会迅速上升(在微秒到毫秒级范围内),并很快达到平稳态,而不是慢慢地到达饱和状态。(  $\text{Ar}^+$  激光的偏振方向与 He-Ne 激光的偏振方向垂直会使原来单一 He-Ne 激光引起的双折射迅速下降到零点,相当于对原信息的擦除效应,如图 3 中的曲线 3)。

样品的“双折射”有迅速产生和缓慢产生两个过程,这两个过程反映了样品薄膜产生分子取向重组过程产生的两种响应机制。快过程对应于偶氮苯生色团分子光致异构化所产生的取向重组,类似于通常的双折射现象;而慢过程对应于偶氮苯生色团分子取向而诱导的样品中(ADPA-PVK-PBA-TNF)大分子链段重取向,这种重取向主要导致光折变。如图 4 所示,ADPA 分子具有顺(cis)-反(trans)异构体。在光激励下会发生光致异构化过程。反式(trans)在热力学上相对比较稳定,在吸光条件下会变成具有光或热不稳定性的顺式分子(cis)。由于立体化学等因素,顺-反异构既可以进行光致异构化又可以进行热致异构化,而且热致异构在室温下就可以进行。这种可逆的顺-反异构化过程将导致在线偏振光抽运下,分子不断的改变取向状态,直至分子更趋向沿着垂直于抽运光偏振方向排列,而出现了各向异性现象,即产生了光致双折射。这个过程很快,一般是微秒级。

所制备的 ADPA 材料是具有“推-拉”型式的

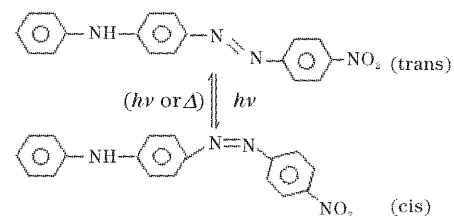


图 4 ADPA 的顺反异构

Fig. 4 The trans and cis isomers of ADPA

D-II-A结构的偶氮苯分子,在偶氮苯长轴方向的两端同时具有推电子取代基和拉电子取代基。长轴的一端是强的给电子基团二苯胺基,另一端是强的吸收电子基团硝基( $-\text{NO}_2$ ),使之具有大的偶极距。生色基推-拉型结构大的偶极距不仅可以提高对光的敏感度,还可以增强生色基分子之间及生色基与非生色基之间的偶极作用,使得分子极性增强。用光场或电场极化取向,可产生二阶或三阶非线性光学现象。在线性偏振光的诱导下,偶氮生色基易发生再取向。产生诱导效应和共轭效应,导致分子大 $\pi$ 键电子云流动性增大,使中间的偶氮基( $-\text{N}=\text{N}-$ )成为优异的电子通道。分子中 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁的能级差减小,电子易受光的激发,有利于聚合物实现光致顺-反(cis-trans)异构化过程。这与一般光致异构化化合物是不同的。

样品所采用的掺杂部分,在样品薄膜产生光致双折射中,对光照积累相关的慢上升过程起着不可缺少的作用。这些掺杂成分就是使通常用于制备光折变器件的TNF、PVK、PBA等<sup>[9]</sup>。PVK作为载流子输运剂是因为咪唑基具有良好的空穴导电能力和一定的电子导电能力。咪唑基与光敏剂TNF能产生电荷转移,形成电荷转移型络合物。PVK是电子给体,TNF是电子受体。在入射光照射该样品薄膜时,形成明暗相间的条纹的同时,会在材料内部产生光电压。在光照亮处产生的光生载流子在光电压的作用下漂移和扩散,被光照暗处的陷阱俘获。电荷的不断漂移和被俘获在材料内部产生了一个内电场。内电场的存在又进一步促进了载流子的漂移。样品中与PVK共聚的PBA不仅提供了大量的电荷陷阱,而且这些陷阱分布在电荷传输介质中。随着越来越多的光生载流子的产生、漂移和被俘获,内电场逐渐形成并且越来越强,直至饱和。正是内电场增大了ADPA分子的偶极距从而极化了该分子并改变了光折变材料的折射率。光折变的独特性质之一是它的积累效应,可使样品用弱光在较长时间照射下获得大的非线性效应。因而可看到随着时间的增长而增加的“双折射”慢过程现象。因积累效应与光通量有关。辐射光功率越强,则达到光折射强度饱和值的时间越短。所以实验中,强的 $\text{Ar}^+$ 激光照射下,探测信号会迅速达到饱和的平稳强度。光致折射率一旦形成,不会由于激发光的关闭而轻易消失,具有持久性。另外PBA的加入还能有效地降低材料的玻璃化转变温度 $T_g$ ( $T_g$ 略高于 $40^\circ\text{C}$ ),提高聚合物在室温条件下的柔性,在诱导光场的作

用下使得偶氮功能团很容易重新取向。这使样品具有不同于一般光致双折射样品功能的重要特征。

### 2.3 折射率光栅形成及图像存储

高密度可并行写读的光存储技术之一是光全息存储,需要两束相干光,在相干范围内同时照在介质上,感应出带有信息的折射率光栅。实验测定表明,此聚合物膜在非共振吸收区的光吸收下,具有强的光致取向增强效应,在不太强的光强下就能获得较大的非线性光折射率的变化值。这是由光致异构化和光致内电场两种效应结合引起的,可归属于含有双折射性能的一种新型取向增强的光折变效应<sup>[9]</sup>。可以想到:如果用两相干光束照射样品,在样品膜的内部可能产生体折射率光栅。因为具有光折变性质,这种光栅具有持久性。而样品在室温环境下光致取向大大增强,能克服一般的光折变材料在室温环境下折射率低的缺点,能在室温下不加外电场就产生折射率光栅。实验装置如图5。其中 $\lambda/2$ 波片用来改变激光的偏振方向,使原激光器的s偏振光变为p偏振光;Exp为扩束系统;Mark是图像模板;M为反射镜;图中标有虚线的元件为做存储图像实验时所使用;BS为分束器,把He-Ne激光分为两束相干光 $I_1$ 和 $I_2$ 。在两束相干光束照射样品后,用挡板挡住其中一束,发现被挡光束的对应的光路上产生了另一光束的衍射光。这表明由于两束光相干形成的正弦光强空间调制分布,造成了样品折射率的相应空间调制,而形成折射率光栅。由于折射率光栅的形成并稳定存在,两相干光束会产生自衍射效应分别被衍射到各自对方的方向上。

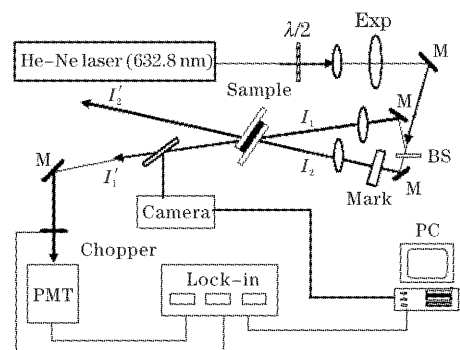


图5 折射率光栅形成及全息存储实验装置

Fig. 5 The experimental setup for refractive index grating form and holographic storage

测量了衍射效率与两束入射光功率密度的关系。固定样品倾斜度为 $20^\circ$ ,两束光夹角为 $15^\circ$ 。在 $I_2$ 光路中放置了可连续变化的衰减片调节光功率密度。在 $I_1$ 和 $I_2$ 同时照射样品后,挡掉 $I_1$ ,留 $I_2$

将折射率光栅再现,分别测出  $I_2$  和在  $I_1'$  光路中形成的衍射强度  $I_1''$ 。根据衍射效率  $\eta = I_1''/I_2$  得到一组随  $I_2$  变化的衍射效率曲线(见图 6)。从图中看到衍射效率随  $I_2$  光功率密度的增加而增大。现有激光器的功率所形成的光栅效率远未达到最大值。衍射效率与折射率变量之间有以下式:

$$\eta = \sin^2 \left[ \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_1 \cos \theta_2)^{1/2}} \right], \quad (2)$$

可知  $\eta$  随  $\Delta n$  的增大而增大,而在图 3 中也能看出  $\Delta n$  随着抽运光  $I$  的增强而增大。因此  $I_2$  的增大必然增大了衍射效率  $\eta$ 。但是在测衍射效率时也使用抽运光  $I_2$ ,并没有另外的弱探测光代替。从(2)式看出  $I_2$  的增大在某种程度上会抑制  $\eta$  的增大,而且  $I_2$  太大,势必引起对已形成的折射率光栅的擦除效应。因此要获得大的  $\eta$ ,最好用较大的入射光强  $I_2$  形成稳定光栅,再用较弱的  $I_2$  使之再现。

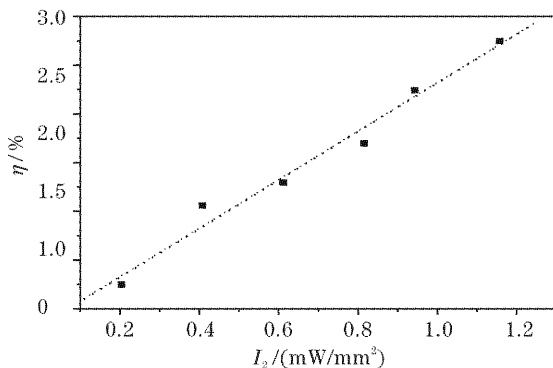


图 6 衍射效率随光功率密度的变化

Fig. 6 Diffraction efficiency versus beam intensity

为了考察样品多个全息图的叠置存贮能力,观察了样品倾斜度(入射光夹角的角平分线与样品法线的夹角)对衍射效率的影响。把两束均为 7.15 mW 的 He-Ne 激光(夹角为  $15^\circ$ ),分别照射到样品的同一个光点位置上。然后固定这光点位置,仅改变样品倾斜度( $0 \sim 25^\circ$ )发现衍射效率几乎不变。并且在单一光点位置上各个角度可同时记录所形成的衍射光栅,如果在一个角度建立了衍射光栅,则重现时的角度选择性约在  $\pm 0.1^\circ$  左右。表明该样品已初步具有较好的角度选择性,和多重存储复用功能。

He-Ne 激光经扩束系统扩束、准直后变为平行光束。把准直的两束连续相干光束通过透镜会聚到样品上,其中一束把 Mark 图像模板(带有漏空“FD”字的图像)写入到样品薄膜上。到达样品表面的图像光(即抽运光)强约为  $0.26 \text{ mW/mm}^2$ 。两光束照射样品,样品内建立起带有图像信息的体光栅。用探测光(即挡掉图像光)就可以读出如下图 7(a)

的所示情况,其中“FD”字是衍射图像,而(b)图像为透过样品的原始像,将光再关去一段时间,如 10 min 后还能较好地再现所存储的图像。前面光致双折射讨论中已分析光致折射率的持久性存储功能。由于实验中用两束相干光在样品中形成折射率光栅,而再现时,用其中一束光并没有减弱,即和写入时所用的光强相同,导致对已形成的光栅具有破坏作用,影响存储的持久性。这与前面提到要获得大的衍射效率  $\eta$ ,最好用较大的入射光强  $I_2$  形成稳定光栅,再用较弱的  $I_2$  使之再现的结论是一致的。而根据光折变原理知:一旦形成折射率光栅后,就具有持久性,除非再用一均匀强光再照射才能使之消除恢复原状。而且在第一天用两光束建立光栅后保持到第二天还能再现衍射光斑。

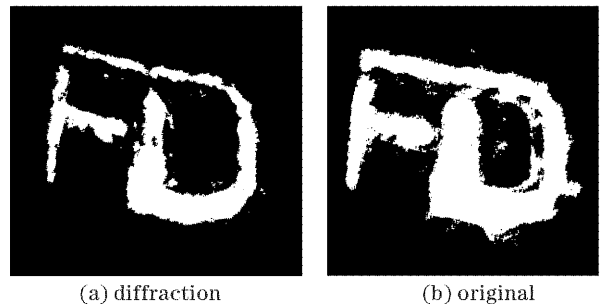


图 7 光信息存储图像

Fig. 7 Optical holographic storage image

对于存储图像的擦除,作了初步研究。发现用另一束偏振光(如  $\text{Ar}^+$  激光)就可实现。正如上节内容中所讨论的,再加一束与原抽运光偏振方向垂直的偏振擦除光就会将原来写入的信息擦除干净。

由于该样品可在远离共振吸收区下,用不太强的光作用就可获得较强的折射率变化值,在两相干光作用下即可建立起折射率光栅。该光栅是在非共振吸收下形成的,因此无吸收光栅产生,就不会存在吸收和折射率两种光栅的竞争和干扰,存储图像保持清晰和稳定。因为使用的光波长在非吸收区吸收很小,透射很高,在线偏振光作用下,还可获得很高的全息场调制度  $M$ :

$$M = (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} + T_{\min}). \quad (3)$$

当抽运光为  $0.33 \text{ mW/mm}^2$  时,调制度  $M$  可达 0.71,且  $M$  随着抽运光的增强而增强,调制度的加强使信息存储图像获得更大的景深度,可以获得比较清晰的图像。

样品虽然透射度很好,但也存在一定的散射。主要是因为样品内有微小气泡。另外,样品夹在两片玻片内,光束会在两玻片之间多次反射。这些都

对图像存储的清晰度有一定的影响,这将是以后工艺进一步研究解决的问题。

### 3 结 论

研制了一种新型掺杂偶氮苯聚合物 ADPA-PVK-PBA-TNF 薄膜器件,具有很高的光致取向增强的光折变效应。在非共振吸收光谱区中,不仅光的透射性能好,所建立的纯的折射率光栅的衍射效率高、全息场调制度大等特点,并获得了较为清晰的全息存储图像。这些特点是通常单纯的光致双折射有机材料或不加外电场情况下的单纯光折变聚合物所没有的。分析了取向增强效应及产生折射率光栅的机理。实验研究结果表明该薄膜器件是一种新的有开发潜力的光学记录材料,可望在光学信息处理和持久性信息存储方面有重要应用前景。

#### 参 考 文 献

- 1 Z. Sekkat, M. Dumont. Photoassisted poling of azo dye doped polymeric films at room temperature[J]. *Appl. Phys. B*, 1992, **54**(5): 486~489
- 2 L. Boris, Volodin, Sandalphon *et al.*. Highly efficient photorefractive polymers for dynamic holography [J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(8): 2213~2223
- 3 C. Wang, H. Fei, J. Xia *et al.*. OpticalLy controlled image storage in azobenzene liquid-crystalline polymer films[J]. *Appl. Phys. (B)*, 1999, **68**(6): 1117~1120
- 4 T. Todorov, L. Nikolova, N. Tomova. Polarization holography. 1: A new high-efficiency organic material with reversible photo-induced birefringence [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23** (23): 4309~4312
- 5 Lu Wei, She Weilong, Zhang Lingzhi. Characterization of photo-induced birefringence in the azobenzene doped polymer films[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(9): 845~849 (in Chinese)  
陆 伟,余卫龙,张灵芝. 掺杂偶氮苯聚合物薄膜光致双折射特性 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9): 845~849
- 6 T. Todorov, N. Tomova, L. Nikolova. High-sensitivity material with reversible photo-induced anisotropy [J]. *Opt. Commun.*, 1983, **47**(2): 123~126
- 7 Manfred Eich, Joachim Wendorff. Laser-induced gratings and spectroscopy in monodomains of liquid-crystalline polymers[J]. *Opt. Soc. Am. (B)*, 1990, **7**(8): 1428~1436
- 8 Huang Yaping, Wang Hui, Wen Jinhui *et al.*. The ultrafast photo-induced birefringence of a new kind azobenzene side-chain polymer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 501~504 (in Chinese)  
黄亚萍,王 惠,文锦辉 等. 新型偶氮苯侧链共聚合物的超快光致双折射特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 501~504
- 9 Li Luying, Zhao Youyuan, Li Fuming *et al.*. Orientation-enhanced photorefractive effect in PVK-PBA:DR1;TNF polymer[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(8): 1535~153