

文章编号: 0253-2239(2006)06-0822-5

利用菌紫质薄膜进行角度复用和偏振复用 全息存储实验研究*

任志伟 姚保利** 门克内木乐 王英利 雷 铭 任立勇 陈国夫

(中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710068)

摘要: 全息光存储以其高密度、大容量、高速并行数据存取而成为光存储领域的一个重要研究方向。生物光致变色材料——菌紫质是一种新型可擦重写全息记录介质。实验证明了使用菌紫质薄膜进行角度复用和偏振复用全息存储的可行性。利用菌紫质的光致变色特性,采用 90°角度复用全息存储光路,在 BR-D96N 薄膜样品同一位置上实现了 6 幅全息图存储,并分别读出了无串扰的再现像。利用菌紫质薄膜的光致各向异性进行了偏振复用全息存储,在 BR-D96N 薄膜样品的同一位置上存储了两幅正交偏振光记录的图像,用原参考光再现和偏振片选择,可分别读出这两幅图像。

关键词: 薄膜光学; 全息存储; 角度复用; 偏振复用; 菌紫质; 光致变色; 光致各向异性

中图分类号: O484.4⁺1 文献标识码: A

Experimental Study on Angle Multiplexing and Polarization Multiplexing Holographic Recording with Bacteriorhodopsin Film

Ren Zhiwei Yao Baoli Menke Neimule Wang Yingli Lei Ming Ren Liyong Chen Guofu

(State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

Abstract: Holographic data storage is a key research direction in the optical data storage field due to its high storage density, high capacity and high speed of parallel data accessing. Bacteriorhodopsin (BR), a biologically photochromic material, is a new kind of re-writable holographic recording media. The feasibility of angle multiplexing and polarization multiplexing holographic recording with BR film is proved experimentally. Based on the photochromic property of BR, using 90° angle multiplexing scheme, six holograms are recorded in the BR-D96N film and the reconstructed images are respectively read out clearly without crosstalk. Based on the photoanisotropic property of BR, polarization multiplexing holographic recording in the BR-D96N film is presented. Two images with orthogonal polarizations are recorded as two different holograms at the same position, respectively, which can be selectively retrieved with the original reference beam as readout beam and the appropriate polarizer.

Key words: thin film optics; holographic storage; angle multiplexing; polarization multiplexing; bacteriorhodopsin; photochromism; photoanisotropy

1 引 言

全息光存储具有高密度大容量的存储能力,其关键在于使用了复用技术。常见的复用技术有空间复用^[1]、角度复用^[2]、旋转复用^[3]、位相编码复用^[4]等单一复用技术,以及稀疏波长-角度复用^[5]等混合复用技术。角度复用是使用最多的一种复用技术,它是在材料的同一空间区域上叠加记录多幅全息

图,每幅全息图用各自不同入射角的参考光记录和再现,不同全息图之间靠布拉格选择定理进行鉴别。目前用于角度复用全息存储的材料研究最多的是光折变晶体^[6~8]。缺点是响应速度慢,灵敏度低,做一次实验要花费的时间较多,全息图擦除要使晶体加热,不能进行原位擦除。而光致聚合物是一次性使用材料,不能反复擦写。

* 国家自然科学基金(60337020, 60278026)和中国科学院创新方向性研究项目(40001043)资助课题。

作者简介: 任志伟(1980~),男,中国科学院西安光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事光功能材料特性及应用研究。

** 通信联系人。E-mail: yaobl@opt.ac.cn

收稿日期: 2005-06-27; 收到修改稿日期: 2005-08-24

细菌视紫红质(Bacteriorhodopsin,简称菌紫质或BR)是一种具有光致变色效应的光敏蛋白质,在可见光激发下,发生从基态 B 到中间态 J 、 K 、 L 、 M 、 N 、 O ,再回到基态的一个光循环过程,其中 M 态是寿命最长的亚稳中间态。BR-D96N 是一种具有长寿命 M 态的新型基因改性材料,相对于野生型 BR (M 态寿命在毫秒量级),其 M 态寿命延长到了数分钟^[9],其显著优点是光致变色效应明显,感光灵敏度高。而且 BR 对光的偏振态也有响应,会产生光诱导的各向异性,该特性使其不仅能记录强度调制光栅,而且还可记录偏振调制光栅,偏振复用即利用这种特性实现的。Todorov 等^[10]首先发现了选用两组不同偏振态的记录光记录全息图时,在同一样品上可得到相互没有影响的两幅全息记录图。Su 等^[11]说明在 LiNbO_3 晶体中也可以使用偏振复用技术。Koek^[12]利用 BR 的偏振全息记录特性,演示了一种在 BR 薄膜同一位置记录两幅偏振态正交的图像并用一束参考光同时读出这两幅图像的技术。菌紫质的光致变色特性和光致各向异性在全息干涉计量^[13],模式识别^[14],偏振全息记录^[15],空间光调制器^[16]等技术领域得到了应用。

本文从实验证明了使用菌紫质薄膜进行角度复用和偏振复用全息存储的可行性。在 BR-D96N 薄膜上利用 90° 角度复用全息装置存储 6 幅全息图,并分别读出了无串扰的再现像。对 BR-D96N 薄膜在不同偏振光记录下的偏振复用全息存储进行了实验研究,分别得到了线偏振复用和圆偏振复用的衍射像。与 Todorov^[10]的方法相比,我们的读出衍射效率更高;与 Koek^[12]的实验相比,我们不仅进行了圆偏振复用实验,还进行了线偏振复用实验,而且记录和读出过程都采用同一光路,简化了实验过程。

2 材料与方法

所用 BR-D96N 薄膜样品由德国 Marburg 大学 Hamppe 教授提供,薄膜密封于两片平行的光学玻璃中间,膜厚约 $80 \mu\text{m}$,有效直径为 19 mm 。样品 B 态吸收峰在 568 nm ,光密度为 1.2 ,在 633 nm 的光密度为 0.4 。 M 态吸收峰在 407 nm ,在室温下寿命 $(1/e)$ 约为 5 min ^[12]。

全息存储实验光路如图 1 所示。记录和读出光源为 633 nm 、 3 mW 的 He-Ne 激光器;擦除光源为 405 nm 、 10 mW 的半导体激光器。快门 S_1 控制记录曝光时间,快门 S_2 控制擦除时间。连续可调衰减片 A_1 和 A_2 配合用来调节物光、参考光和读出的光强。偏振分光棱镜 PBS 将非偏振的 He-Ne 激光分成水平偏振的物光和竖直偏振的参考光。物光路中透镜 L_1 、 L_2 组成扩束准直器照明位于透镜 L_3 前焦面的目标(Object)。光阑 D_1 位于 L_3 的后焦平面上,用来滤掉高阶衍射光。 L_3 的后焦面与 L_4 的前焦面重合, L_4 的后焦面与 L_5 的 2 倍前焦面重合。样品放置在 L_5 的后焦面附近,CCD 光敏面位于 L_5 后的两倍焦平面处,CCD 前的偏振片 P 用来选择欲读出衍射像的偏振态。各透镜的焦距为: $f_1=6 \text{ mm}$, $f_2=80 \text{ mm}$, $f_3=50 \text{ mm}$, $f_4=38 \text{ mm}$, $f_5=80 \text{ mm}$,CCD 上得到的是正立缩小的目标像。参考光路中透镜 L_6 、 L_7 构成一个 $4f$ 系统, $f_6=f_7=50 \text{ mm}$ 。旋转反射镜 M_2 和样品分别位于 L_6 、 L_7 的焦平面处,当反射镜 M_2 沿其转轴在一定范围内转动时,照射到样品上的参考光斑位置不随 M_2 的转动而移动,而只是改变入射方向,达到角度复用的目的。样品薄膜法线与物光和参考光光轴的夹角都为 45° 。在角度复用全息存储实验中,目标为透射式鉴别率板,调节四分之一波片 Q_1 和 Q_2 ,使物光和参考光为同圆偏振,以

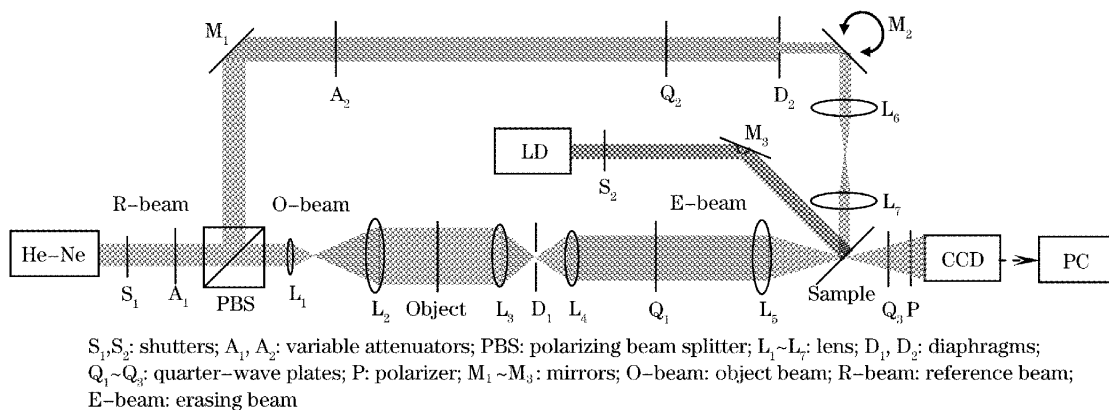


图 1 角度复用和偏振复用全息存储实验光路图

Fig. 1 Experimental setup for angle multiplexing and polarization multiplexing holographic recording

记录光强调制光栅, Q_3 和偏振片 P 不用。

偏振复用时, 以空间光调制器 (SLM) 作为目标, 通过计算机来加载图像。调节 Q_1, Q_2, Q_3 可以改变物光、参考光和衍射光的偏振状态。我们分别研究了线偏振光复用和圆偏振光复用两种情况, 实验条件如表 1 所示。在线偏振光复用实验中, 由于衍射光都是线偏振的, 光路中的 Q_3 不用。当偏振

片 P 的偏振方向与水平方向成 $90^\circ, 0^\circ$ 和 45° 时, 可分别读出同线偏振光记录的图像、正交线偏振光记录的图像和两幅图像的同时再现像。在圆偏振光复用实验中, 偏振片 P 的偏振方向与水平方向成 $0^\circ, 90^\circ$ 和 45° 时, 可分别读出同圆偏振光记录的图像、正交圆偏振光记录的图像和两幅图像的同时再现像。

表 1 两种不同偏振复用方式记录下的实验条件

Table 1 Experimental conditions for two types of polarization multiplexing recording

Types of polarization multiplexing	Types of recording	Polarization of object	Polarization of reference	Polarization of reading light	Polarization of diffractive light	Polarization of diffractive light after Q_3
Linear polarization multiplexing	Parallel linear	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	
	Orthogonal linear	←→			←→	
Circular polarization multiplexing	Parallel circular	⊙	⊙	⊙	⊙	←→
	Orthogonal circular	⊙			⊙	⊙

3 结果与讨论

3.1 角度复用全息存储

为了获得高质量的再现像, 物光和参考光的强度比和曝光时间控制是关键。实验中调节物光和参考光的强度之比尽量接近 1。单幅全息图的最佳曝光时间有一个范围, 经多次比较实验, 曝光时间在 3~5 s 都可以获得理想的再现像, 曝光时间过短或过长都会使再现像质下降。图 2 是曝光时间为 3 s 时获得的单幅再现像。

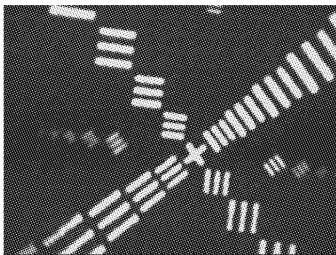


图 2 在 BR-D96N 薄膜上记录的单幅全息图再现像 (曝光时间 3 s)

Fig. 2 Single retrieved hologram recorded in the BR-D96N film (exposure time 3 s)

角度复用时, 相邻两幅全息图对应参考光之间的夹角应小于最小水平选择角 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \frac{2\sqrt{\pi^2 - \nu^2}\lambda}{\pi nd} \frac{\cos\theta_s}{|\sin(\theta_r - \theta_s)|}, \quad (1)$$

其中 $\nu = \pi\Delta nd / (\lambda \sqrt{\cos\theta_r \cos\theta_s})$ 。已知记录光波长

$\lambda = 633 \text{ nm}$, 薄膜厚度 $d = 80 \mu\text{m}$, 样品折射率 $n \approx 1.5$, M 态与 B 态的折射率差 $\Delta n \approx 1.5 \times 10^{-3}$, 物光与参考光对称入射: $\theta_r = 45^\circ, \theta_s = -45^\circ$ 。将这些参量代入(1)式可计算出 $\Delta\theta \approx 0.42^\circ$ 。由(1)式可以看出, 要减小最小水平选择角提高角度复用数, 对于样品的要求是增大 Δn 和 d 。在图 1 实验光路中, 由几何光学可知, 当旋转反射镜 M_2 改变角度 $\Delta\alpha$ 时, 引起参考光角度变化 $\Delta\theta = 2\Delta\alpha$ 。本实验系统中 M_2 的最小转动角 $\Delta\alpha_{\min} = 0.25^\circ$, 对应参考光最小变化角度 $\Delta\theta_{\min} = 0.5^\circ > \Delta\theta$ 。由于透镜 L_6, L_7 的口径有限, M_2 的旋转范围受到限制, 这里 M_2 的旋转范围 $\Delta\alpha_{\max} = 8^\circ$, 对应参考光最大复用角度范围 $\Delta\theta_{\max} = 16^\circ$ 。因此, 在样品上的最大复用图像数目为 32 幅。当复用图像数多时, 每幅图像的平均衍射效率就会降低, 影响再现像的亮度和信噪比, 同时对 CCD 的性能要求更高。为了获得较好的再现像, 实验中我们选取相邻两幅全息图参考光的水平间隔角 $\Delta\theta = 2^\circ$, 复用 6 幅图像。

在 BR-D96N 薄膜样品进行角度复用全息存储的实验结果如图 3 所示。每记录一幅全息图, 鉴别率板旋转一个角度, 以便区分不同。由于每次记录新全息图时都对前面记录的全息图有一定的擦除作用, 对于记录多幅全息图, 第一幅图像经历的擦除作用最大, 而最后一幅图像不受影响。如果每幅全息图以相同的时间曝光, 则第一幅图像衍射效率最低, 最后一幅图像衍射效率最高。因此, 为了使各幅全

息图获得较一致的衍射效率,曝光时间应随记录图像个数增加而减少。图 3 所示的 6 幅图像的曝光时间依次为:6 s,6 s,5 s,5 s,3 s,2 s。可以看到,6 幅图像的像质(亮度和信噪比)较单幅再现像下降不

少,但仍然清楚可辨,无串扰现象。复用度的进一步提高主要受限于 M 态与 B 态的折射率差不够大, M 态的寿命在室温下较短(5 min),以及读出过程对全息图的擦除效应。

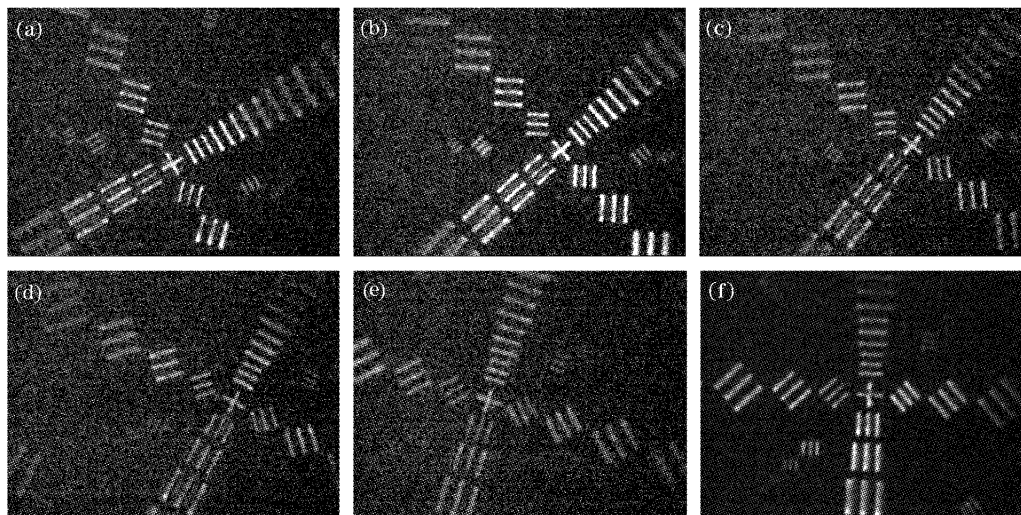


图 3 在 BR-D96N 薄膜上角度复用 6 幅全息图的再现像结果。(a) 6 s, (b) 6 s, (c) 5 s, (d) 5 s, (e) 3 s, (f) 2 s
Fig. 3 Six retrieved holograms recorded in the BR-D96N film by angle multiplexing scheme. (a) 6 s, (b) 6 s, (c) 5 s, (d) 5 s, (e) 3 s, (f) 2 s

由于读出再现过程也是一个全息图破坏过程,当一幅图像被读出时,均匀的读出光将与所有全息图作用,降低了所有全息图的衍射效率,因此要读出较高衍射效率的再现像需要缩短读出时间。抓取图像的最短时间决定了我们的读出时间为 0.2 s。由于后记录的全息图时间较短,应先进行读取,这样有利于各幅全息图的再现像衍射效率都较高。使用 405 nm, 10 mW 的半导体激光器,全息图可在 0.1 s 内全部擦除。

3.2 偏振复用全息存储

图 4 是 BR-D96N 薄膜在线偏振光复用下记录的全息图再现像。在记录光和读出光光强不变的情况下,当偏振片 P 的偏振方向与水平方向成 90° 时,如图 4(a),读出的是同线偏振光记录的图像,衍射效率高,但噪声也大。当偏振片 P 的偏振方向与水

平方向成 0° 时,如图 4(b),读出的是正交线偏振光记录的图像,衍射效率比较低。当偏振片 P 的偏振方向与水平方向成 45° 时,如图 4(c),同时读出两种线偏振光记录的图像。

图 5 是 BR-D96N 薄膜在圆偏振光复用下记录的全息图再现像。当偏振片 P 的偏振方向与水平方向成 0° 时,读出同圆偏振光记录的图像,如图 5(a)。当偏振片 P 的偏振方向与水平方向成 90° 时,读出正交圆偏振光记录的图像,如图 5(b)。当偏振片 P 的偏振方向与水平方向成 45° 时,同时读出两种圆偏振光记录的图像,如图 5(c)。可以看出,使用圆偏振光复用记录的方法,两个全息图都有较高的衍射效率,比线偏振光复用记录方法更好,更适合于偏振复用全息存储。

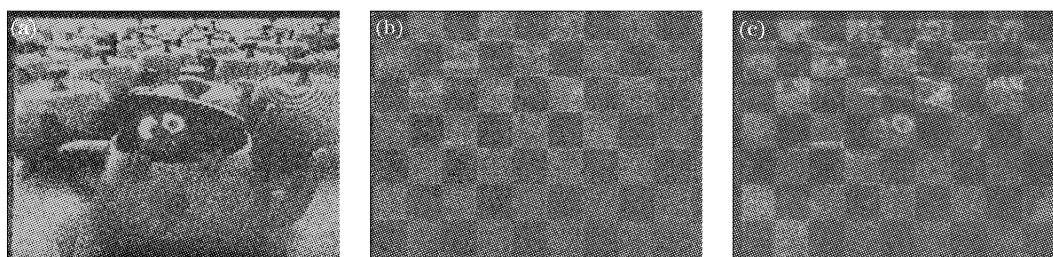


图 4 线偏振光复用全息存储实验结果

Fig. 4 Experimental results of linear polarization multiplexing holographic recording

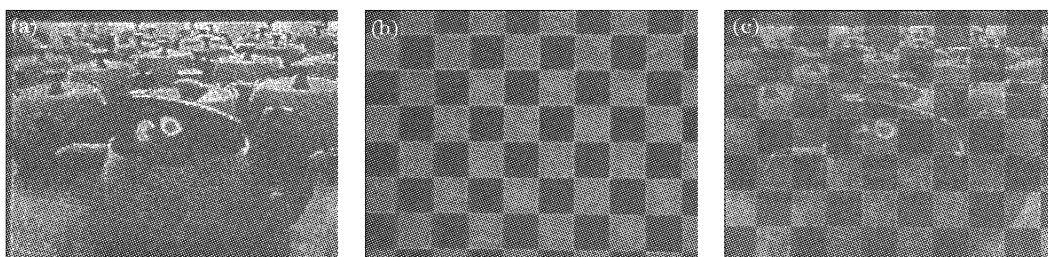


图 5 圆偏振光复用全息存储实验结果

Fig. 5 Experimental results of circular polarization multiplexing holographic recording

4 结 论

利用基因改性细菌视紫红质 BR-D96N 薄膜的光致变色特性和光致各向异性, 可将其用作可擦写的全息记录介质。本文采用 90° 角度复用全息存储实验光路, 在 BR-D96N 薄膜样品上实现了 6 幅全息图存储, 并读出了无串扰的再现像。分别采用线偏振光复用和圆偏振光复用方法, 实现了两幅偏振态正交图像的全息记录和选择性再现。实验证明, 圆偏振光复用得到的两幅全息图的衍射效率都较高, 更适合于偏振复用存储。BR-D96N 薄膜具有响应速度快, 感光灵敏度高, 擦写次数高(一百万次以上), 稳定耐用, 使用方便等优点, 非常适合作为一种动态全息或全息缓存记录介质。

致谢 感谢德国 Marburg 大学 Norbert Hampp 教授提供 BR-D96N 薄膜样品。

参 考 文 献

- 1 Yonghong Kang, Kihyun Kim, Byoungbo Lee. Volume hologram scheme using optical fiber for spatial multiplexing[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 739~741
- 2 Fai H. Mok. Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(11): 915~917
- 3 Kevin Curtis, Allen Pu, Demetri Psaltis. Method for holographic storage using peristrophic multiplexing[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(13): 993~994
- 4 Yeon H. Lee, Seung-Dae Sohn. Optical implementation of orthogonal phase-code multiplexing[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(24): 1990~1992
- 5 Scott Campbell, Xianmin Yi, Pochi Yeh. Hybrid sparse-wavelength angle-multiplexed optical data storage system[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(24): 2161~2163
- 6 D. L. Staebler, W. J. Burke, W. Phillips *et al.*. Multiple storage and erasure of fixed holograms in Fe-doped LiNbO₃[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**(4): 182~184
- 7 Meng Qingxin, Gong Dewei, Zhang Jianlong *et al.*. Study of self-erasing of recording process in Zn:Fe:LiNbO₃ with the double-carrier four-trap model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1788~1792 (in Chinese)
- 孟庆鑫, 宫德维, 张建隆等. 利用双载流子四陷阱模型解释 Zn:Fe:LiNbO₃ 晶体记录过程中的自擦除现象[J]. *物理学报*, 2004, **53**(6): 1788~1792
- 8 Huang Mingju, Yao Huawen, Chen Zhongyu *et al.*. Study on the character of novel green light sensitive high-density digital holographic photopolymer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(11): 2536~2541 (in Chinese)
- 黄明举, 姚华文, 陈仲裕等. 新型绿光敏感光致聚合物高密度全息存储特性[J]. *物理学报*, 2002, **51**(11): 2536~2541
- 9 Baoli Yao, Yuan Zheng, Yingli Wang *et al.*. Kinetic spectra of light-adaption dark-adaption and M-intermediate of BR-D96N[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **218**(1~3): 125~130
- 10 T. Todorov, L. Nikolova, K. Stoyanova *et al.*. Polarization holography. 3: Some applications of polarization holographic recording[J]. *App. Opt.*, 1985, **24**(6): 785~788
- 11 Wei-chia Su, Ching-cherng Sun, Nicholai Kukhtarev *et al.*. Polarization-multiplexed volume hologram in LiNbO₃ with 90-deg geometry[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(1): 9~10
- 12 W. D. Koek, N. Bhattacharya, J. J. M. Braat. Holographic simultaneous readout polarization multiplexing based on photoinduced anisotropy in bacteriorhodopsin[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 101~103
- 13 Norbert Hampp, Thorsten Juchem, Klaus Anderle *et al.*. Holographic system for non-destructive testing, vibration analysis and size measurement using bacteriorhodopsin films as optical memory media[J]. *Proc. SPIE*, 2000, **3939**: 86~93
- 14 Norbert Hampp, Ralph Thoma, Dieter Oesterheld *et al.*. Biological photochrome bacteriorhodopsin and its genetic variant Asp96→Asn as media for optical pattern recognition[J]. *Appl. Opt. Lett.*, 1992, **31**(11): 1834~1841
- 15 Yoshiko Okada-Shudo. Polarization holography with bacteriorhodopsin[J]. *Proc. SPIE*, 2001, **4461**: 138~145
- 16 Q Wang Song, Chungping Zhang, Robert Blumer *et al.*. Chemical enhanced bacteriorhodopsin thin film spatial modulator[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1373~1375