

# 菌紫质高密度偏振全息光数据存储实验研究<sup>\*</sup>

任志伟<sup>1,2)</sup> 姚保利<sup>1)</sup>† 门克内木乐<sup>1)</sup> 王英利<sup>1)</sup> 郑媛<sup>1)</sup> 雷铭<sup>1)</sup> 陈国夫<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室,西安 710068)

<sup>2)</sup>中国科学院研究生院,北京 100039)

(2004 年 10 月 13 日收到,2004 年 11 月 29 日收到修改稿)

实验研究了基因改性菌紫质 BR-D96N 薄膜在不同偏振光记录下的全息存储特性,比较了不同偏振态记录光和读出光对衍射像光强及信噪比的影响.实验结果表明,与其他偏振全息记录相比,正交圆偏振光记录可实现衍射光偏振状态与散射噪声偏振状态的分离,得到高信噪比的衍射像,同时还具有高的衍射效率.以 He-Ne 激光器(633nm,3mW)为记录和读出光源,用空间光调制器作为数据输入元件,CCD 作为数据读出器件,采用傅里叶变换全息记录的方法,在 BR-D96N 薄膜样品  $60\mu\text{m} \times 42\mu\text{m}$  的面积上进行了正交圆偏振全息数据存储,达到了  $2 \times 10^8 \text{ bit/cm}^2$  的存储面密度,并实现了编码数据的无误读出与还原.

关键词:菌紫质,偏振全息,光致变色,光致各向异性,高密度光存储

PACC:4225J,4230N,4240E,4240K

## 1. 引言

全息光存储以其高数据存储容量和高数据传输速率成为光存储领域的一个重要发展方向.偏振全息作为全息技术中的一种逐渐受到人们重视,已先后对几种光致各向异性材料,如色心晶体<sup>[1]</sup>、银和氯化银明胶<sup>[2]</sup>、染料-聚合物体系<sup>[3,4]</sup>等进行过偏振全息方面的研究.但各种材料各有优缺点,目前还没有找到一种理想的偏振全息记录材料.

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 态是寿命较长的亚稳中间态.菌紫质的这种光致变色特性已在光信息处理及光存储领域中得到了广泛的应用. 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<sup>[5]</sup>,其显著优点是光致变色效应明显,感光灵敏度高.同时 BR 对光的偏振态也有响应,在其光致变色过程中也会产生光致各向异性,因此 BR 适合作为偏振全息记录材料.目前只有德国的 Hampp,日本的 Okada-Shudo 和荷兰的 Koek

等少数研究组进行过 BR 偏振全息方面的研究. Hampp<sup>[6]</sup>第一次从实验上证实了在 BR 样品上进行全息记录时不同偏振态的记录光和读出光对于衍射光偏振态及相对衍射效率的影响,并将其应用于光学模式识别. Okada-Shudo<sup>[7]</sup>进行了与 Hampp 相近的实验,并从理论和实验上对衍射光偏振态和衍射效率与记录光偏振态及读出光偏振态之间的关系进行了详细的研究. Koek<sup>[8]</sup>利用 BR 的这种偏振全息记录特性,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再现出这两幅图像的技术.有关 BR 在全息光数据存储方面的研究还未见报道.目前用于全息光数据存储的材料研究最多的是光折变晶体和光致聚合物,但二者都有各自的缺点.光折变晶体响应速度慢,灵敏度低,固定困难;光致聚合物是一次性使用材料,不能反复擦写.本文开展了 BR-D96N 薄膜在不同偏振光记录下的全息存储实验研究,比较了不同偏振态的记录光和读出光对衍射像光强及信噪比的影响,最终选用正交圆偏振光记录的方法在 BR-D96N 薄膜上获得了  $2 \times 10^8 \text{ bit/cm}^2$  的存储面密度,并实现了对数据编码、存储、再现、解码的全过程演示.与光折变晶体和光致聚合物相比, BR-D96N 薄膜具有响应速度快,灵敏度高,可反复擦写(100 万次以上),可进行

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:60337020,60278026)和中国科学院创新方向性研究项目(批准号:40001043)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: yaobl@opt.ac.cn

偏振全息记录的优点.

## 2. 材料与方 法

实验中所用样品是由德国 Marburg 大学 Hamppe

教授提供的基因改性菌紫质 BR-D96N 薄膜,有效直径为 19mm,膜厚  $80\mu\text{m}$ . 样品 B 态吸收峰在 568nm,光密度为 1.2,在 633nm 的光密度为 0.4. M 态吸收峰在 407nm,寿命在室温下约为  $5\text{min}$ <sup>[5]</sup>.

偏振全息存储实验光路如图 1 所示. 633nm,

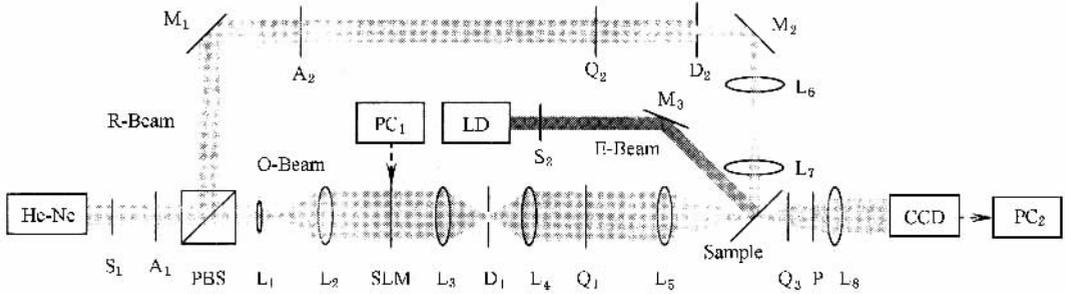


图 1 偏振全息存储实验光路图  $S_1, S_2$  快门;  $A_1, A_2$  连续可调衰减片; PBS: 偏振分光棱镜;  $L_1-L_8$  透镜; P: 偏振片;  $D_1, D_2$ : 光阑;  $Q_1-Q_3$ : 四分之一波片;  $M_1-M_3$ : 反射镜; O-Beam: 物光; R-Beam: 参考光; E-Beam: 擦除光

3mW 的 He-Ne 激光器为记录和读出光源; 405nm, 10mW 的半导体激光器为擦除光源. 快门  $S_1$  控制记录曝光时间,  $S_2$  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、参考光和读出光的光强. 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垂直偏振的参考光. 物光路中透镜  $L_1, L_2$  组成扩束准直器. 空间光调制器 SLM 位于傅里叶变换透镜  $L_3$  的前焦面, 通过计算机  $PC_1$  来加载编码数据图像, 物光经过 SLM 后变为垂直偏振光. 光阑  $D_1$  位于  $L_3, L_4$  组成的  $4f$  系统频谱面上, 用来滤掉高阶衍射光. 透镜  $L_5, L_6$  构成另一个  $4f$  系统, 样品

放置在其共焦面上, 用来存储傅里叶变换全息图. CCD 的光敏面位于  $L_8$  的后焦面上,  $L_8$  前的偏振片 P 用来在正交偏振存储中滤除散射噪声. 参考光路中透镜  $L_6, L_7$  构成一个  $4f$  系统, 旋转反射镜  $M_2$  和样品分别位于  $L_6, L_7$  的焦平面处, 可用来进行角度复用实验. 物光、参考光与样品法线的夹角均为  $45^\circ$ .  $Q_1, Q_2, Q_3$  为四分之一波片, 用来改变物光、参考光和衍射光的偏振状态. 我们共研究了以下四种不同偏振光的记录方式: 同线偏振光记录、同圆偏振光记录、正交线偏振光记录和正交圆偏振光记录, 实验条件如表 1 所示.

表 1 四种不同偏振光记录下的实验条件

记录光的偏振方式	$Q_1$ 位置及其光轴与水平方向夹角	物光的偏振态	$Q_2$ 光轴与水平方向夹角	参考光/读出光的偏振态	$Q_3$ 光轴与水平方向夹角	通过 $Q_3$ 的衍射光偏振态	P 的偏振方向
同线偏振光记录	不用	竖直线偏振光	不用	竖直线偏振光	不用	竖直线偏振光	竖直
同圆偏振光记录	$L_4$ 与 $L_5$ 之间, $-45^\circ$	左旋圆偏振光	$45^\circ$	左旋圆偏振光	$-45^\circ$	水平线偏振光	水平
正交线偏振光记录	$Q_2$ 与 $D_2$ 之间, $-45^\circ$	竖直线偏振光	$-45^\circ$	水平线偏振光	不用	竖直线偏振光	竖直
正交圆偏振光记录	$L_4$ 与 $L_5$ 之间, $-45^\circ$	左旋圆偏振光	$-45^\circ$	右旋圆偏振光	$-45^\circ$	水平线偏振光	水平

需要说明的是, 由于反射镜对入射偏振光有相

位延迟作用, 当光在空气和玻璃界面上入射, 即外反

射且入射角小于布儒斯特角时(如  $n_1 = 1.0$ ,  $n_2 = 1.5$ , 则  $i_B \approx 56^\circ$ ), 反射光与入射光相比, 有  $\pi$  相位的变化. 在本实验中, 光在参考光路中的反射镜  $M_2$  发生外反射, 因此, 在圆偏振光记录中, 入射的左旋圆偏振光经过  $M_2$  变为右旋圆偏振光, 右旋圆偏振光则变为左旋圆偏振光, 但在线偏振光记录中, 入射光为竖直或水平的线偏振光, 反射光偏振状态不变.

图 1 也是采用傅里叶变换全息记录方法进行高密度数据存储的实验装置. 由于样品放置在傅里叶变换透镜  $L_5$  的频谱面上, 记录的全息图面积很小, 可实现高密度存储. 经对比实验, 正交圆偏振光记录不仅具有高信噪比的再现衍射像, 而且衍射效率也高, 二者对全息数据存储都是必不可少的, 因此最终采用了正交圆偏振光记录的方式. 物光和参考光的光强均约为  $14\text{mW}/\text{cm}^2$ , 最佳记录时间  $0.3\text{s}$ , 擦除时间小于  $0.1\text{s}$ .  $PC_1$  上编码软件将待存储文件转换成二进制黑白图像加载到 SLM 上, 经曝光存储到 BR-D96N 薄膜样品上. 再现后的衍射像由 CCD 拍摄输出到  $PC_2$  上, 经过解码软件解码后还原原始文件. 记录的全息图经紫光擦除后可重复多次使用.

### 3. 结果与讨论

图 2 是 BR-D96N 薄膜在不同偏振光记录下的全息图再现像对比. 在记录光和读出光光强不变的情况下, 以上四种偏振记录中, 同线偏振光记录的衍射效率最高, 但散射噪声也大; 同圆偏振光记录的衍射效率也高, 散射噪声也大; 正交线偏振光记录的衍射像信噪比高, 但衍射效率最低; 正交圆偏振光记录的衍射效率与同圆偏振光记录的基本相同, 而且信噪比也很高, 全息数据存储效果最好.

由上述结果可以看到, 正交偏振光(正交线偏振或正交圆偏振)记录可以获得高信噪比的衍射像, 这是因为它记录的是偏振调制光栅而非强度调制光栅(相对于同偏振光记录情况). 在全息图再现的过程中, 散射噪声的偏振方向与再现光是相同的, 在同偏振光记录的情况下, 衍射光的偏振方向与散射噪声的偏振方向相同, 无法通过波片  $Q_3$  和偏振片  $P$  滤掉散射光, 衍射像的噪声较大. 但在正交偏振光记录的情况下, 衍射光的偏振方向与散射噪声的偏振方向正交, 因此可以通过波片  $Q_3$  和偏振片  $P$  将二者分开, 滤掉散射光, 获得高信噪比的衍射像. 由琼斯矩阵方法和耦合波理论可推出正交线偏振光记录的衍

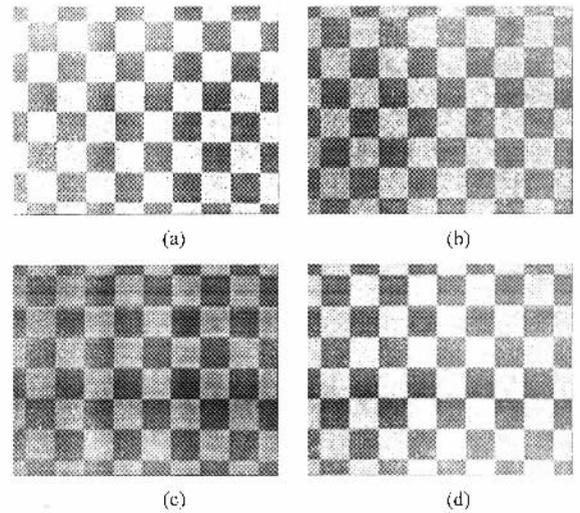


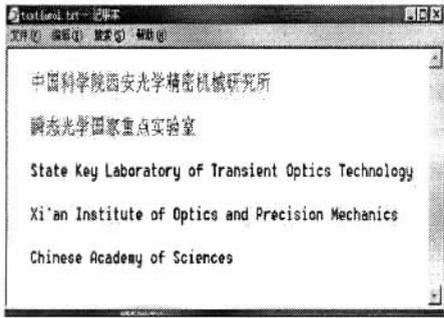
图 2 BR-D96N 在不同偏振光记录下的全息光存储实验结果 (a)同线偏振光记录 (b)同圆偏振光记录 (c)正交线偏振光记录 (d)正交圆偏振光记录

射效率远小于正交圆偏振光记录的衍射效率<sup>[9]</sup>. 对全息数据存储来说, 不仅要求衍射像信噪比高, 还要求有高的衍射效率, 因此正交圆偏振光记录是最佳的偏振全息存储方法.

图 3 给出的是在 BR-D96N 薄膜样品上进行傅里叶变换正交圆偏振光全息数据存储的实验演示结果, 分别列出了待存储文件内容、编码图像、再现衍射像、解码结果图、还原文件内容和记录全息图大小的测量结果. 可以看到再现衍射像清晰, 经解码软件处理后, 得到的还原文件内容与原始文件完全相同. 实验中每幅全息图存储的数据量为  $81 \times 61\text{bit}$ , 全息图大小经测量约为  $60\mu\text{m} \times 42\mu\text{m}$ , 因此可计算出存储面密度为  $2 \times 10^8 \text{bit}/\text{cm}^2$ . 由于样品表面的不均匀、缺陷和光学元件的非共轴及调节失协, 会使衍射像产生一定的畸变而带来误码, 通过设计合理的编码和解码软件可以将误码率减少到最小.

### 4. 结 论

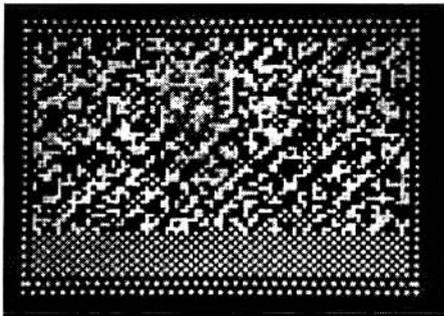
基因改性菌紫质 BR-D96N 薄膜在不同偏振光记录下的全息存储实验表明, 利用正交圆偏振光记录可实现衍射光偏振状态与噪声偏振状态的分离, 易于滤除噪声, 得到高信噪比和高衍射效率的衍射像. 采用正交圆偏振光进行傅里叶变换全息数据存储, 实现了高信噪比、高密度的数据存储和读出. 在 BR-D96N 薄膜上进行的偏振全息数据存储实验



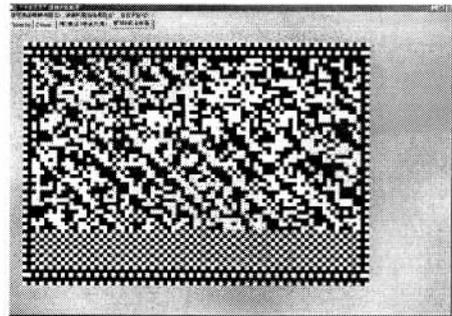
(a)



(b)



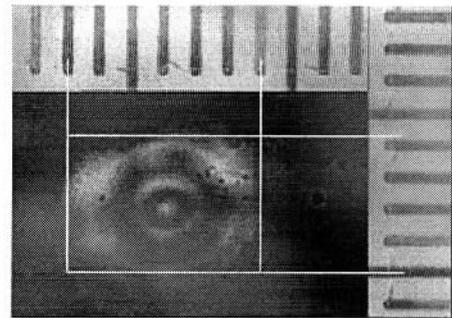
(c)



(d)



(e)



(f)

图3 傅里叶变换正交圆偏振光全息数据存储实验结果 (a)待存储文件 (b)编码后的二进制黑白图像 (c)再现衍射像 (d)解码处理结果 (e)还原文件 (f)全息图大小的测量(刻度尺每小格对应 10 $\mu$ m)

证明 ,BR-D96N 薄膜具有感光灵敏度高 ,空间分辨率高 ,擦写循环次数高 ,偏振敏感的显著优点 ,唯一的缺点是 M 态的寿命在室温下较短 ,因此适合作为一

种动态全息或全息缓存记录介质 .

感谢德国 Marburg 大学 Norbert Hampf 教授提供 BR-D96N 薄膜样品 .



- [ 1 ] Nikolova L *et al* 1978 *Opt. Commu.* **24** 44
- [ 2 ] Jonathan J M C *et al* 1979 *Opt. Commu.* **29** 7
- [ 3 ] Zhang Q *et al* 1990 *Acta Opt. Sin.* **10** 42 ( in Chinese ) [ 张 齐等 1990 光学学报 **10** 42 ]
- [ 4 ] Wang Y L *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 66 ( in Chinese ) [ 王英利等 2004 物理学报 **53** 66 ]
- [ 5 ] Yao B *et al* 2003 *Opt. Commu.* **218** 125
- [ 6 ] Hampp N *et al* 1992 *Appl. Opt.* **31** 1834
- [ 7 ] Okada-Shudo Y 2001 *SPIE Proc.* **4461** 138
- [ 8 ] Koek W D *et al* 2004 *Opt. Lett.* **29** 101
- [ 9 ] Yu M W 1996 *Optical Holography and its Applications* ( Beijing : Beijing Institute of Technology Press ) p200 ( in Chinese ) [ 于美文 1996 光全息学及其应用 ( 北京 北京理工大学出版社 ) p200 ]

## Experimental study on polarization holographic high density optical data storage with bacteriorhodopsin film<sup>\*</sup>

Ren Zhi-Wei<sup>1,2)</sup> Yao Bao-Li<sup>1)†</sup> Menke Neimule<sup>1)</sup> Wang Ying-Li<sup>1)</sup> Zheng Yuan<sup>1)</sup> Lei Ming<sup>1)</sup> Chen Guo-Fu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China

<sup>2)</sup> Graduate College, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

( Received 13 October 2004 ; revised manuscript received 29 November 2004 )

### Abstract

Genetic mutant bacteriorhodopsin BR-D96N film was experimentally studied on its holographic storage properties with different polarization recording waves. The influences of the different polarization states of the recording and readout waves on the retrieval diffractive image's intensity and signal-to-noise-ratio were compared with each other. The experimental results showed that compared with other polarization holographic recording, orthogonal circular polarization recording can realize the separation of the polarization state of the diffractive wave from the scattering noise, and thus has high signal-to-noise-ratio as well as high diffraction efficiency. Using He-Ne laser (633nm, 3mW) as recording and readout beam, spatial light modulator as data input element and CCD as data capture element, orthogonal circular polarization holographic optical data storage was made on  $60\mu\text{m} \times 42\mu\text{m}$  area of the BR-D96N film by Fourier transform holographic method. The area density of  $2 \times 10^8 \text{ bit/cm}^2$  was obtained, and the encoded data was retrieved without errors.

**Keywords :** bacteriorhodopsin, polarization holography, photochromism, photoinduced anisotropy, high density optical data storage

**PACC :** 4225J, 4230N, 4240E, 4240K

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60278026 and 60337020 ) and the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences ( Grant No. 40001043 ).

<sup>†</sup> E-mail : yaobl@opt.ac.cn