

辅助紫光提高菌紫质全息衍射效率的 实验和理论研究^{*}

王英利 姚保利[†] 门克内木乐 任志伟 雷 铭 任立勇

(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)

(2005 年 11 月 30 日收到 2006 年 1 月 16 日收到修改稿)

由于菌紫质样品的饱和吸收特性,在全息记录中,当记录光强大于样品的饱和光强时,全息光栅透过率随记录光相位差的分布远离余弦型,因此衍射效率的稳定值很低.菌紫质样品在红光和紫光共同作用下存在着双光束互补抑制效应,紫光可以抑制红光的透过率,提高红光的饱和光强,使记录区域由非线性区移至线性区,从而使全息光栅透过率随记录光相位差的分布变为余弦型,可以有效地提高全息衍射效率.实验证明,辅助紫光大大提高了菌紫质样品全息衍射效率的稳定值.根据此原理,建立了三光束全息光存储系统,在红光记录全息图的同时加入辅助紫光,可以使全息图衍射效率及衍射像的像质得到提高.

关键词:菌紫质,全息存储,衍射效率,饱和吸收

PACC:4225J,4240,4240F,4230N

1. 引言

全息光存储以其存储容量大、数据传输速率高等优点成为未来光存储发展的一个重要方向.全息记录材料主要有银盐、重铬酸盐明胶、光致聚合物、光折变晶体、光致变色材料等^[1].银盐、重铬酸盐明胶和光致聚合物属于一次性使用材料.光折变晶体是可擦写使用材料,其折射率相位光栅衍射效率高,是大容量体全息存储的候选材料.但它也存在一些缺点,如信息固定比较困难(需要电固定、热固定等)材料空间分辨率受晶体缺陷限制,响应速度比较慢等^[2-4].光致变色材料也属于可擦写记录材料,其特点是只需光照就可在原位记录或擦除全息图,不需要特殊固定过程.它还具有无颗粒性、空间分辨率高、响应速度快等特性.但缺点是衍射效率不高,多次读出后信噪比下降^[5].菌紫质(bacteriorhodopsin, BR)作为一种全息记录介质,具有灵敏度高、抗疲劳性好、空间分辨率高等优点^[6].我们已经研究过菌紫质样品的全息存储特性和偏振全息^[7-10].菌紫质样品具有饱和吸收特性^[11],当记录光强大于饱和光强时,记录介质工作在非线性区域工作,记录的全息光

栅衍射效率很小.已有研究表明,紫光或另一种适当波长光辅助照射下会提高光致变色样品如菌紫质^[12]、螺藻^[13]、偶氮^[14]的全息衍射效率,刘立人等也证明了紫光可以提高铈酸锂晶体的全息衍射效率^[15].我们利用菌紫质样品红光和紫光的双光束互补抑制效应,使用辅助紫光可以提高红光的饱和光强,从而使全息记录区域从非线性区移至线性区,达到提高衍射效率的目的.本文从理论上计算了菌紫质样品在红光和紫光作用下的光强透过率曲线及不同记录条件下全息光栅透过率随记录光相位差的分布情况,说明了辅助紫光提高红光全息衍射效率的机理,并从实验上证明了辅助紫光可以提高红光衍射效率.根据理论和实验结果,建立了衍射效率高、记录时间不敏感的二光束全息记录系统,得到了衍射效率高、像质好的全息衍射像.该系统同样也适用于其它光致变色材料的全息记录.

2. 材料与方法

菌紫质样品为 BR-D96N,由德国 Marburg 大学制备.从基因定点突变的嗜盐菌(*Halobacterium salinarum*)中提取紫膜,经蔗糖梯度法纯化和超声破

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60337020,60278026,30370269)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: yaobl@opt.ac.cn

碎,以一定的浓度掺杂到高分子聚合物中(如聚乙二炔、聚乙烯醇等),然后将该聚合物密封到两片平行的光学玻璃中间,形成均匀透明的聚合物薄膜。薄膜的厚度约 $80\mu\text{m}$,直径 19mm ,BR-D96N 样品基态的吸收峰在 570nm 处,光密度为 1.9 。M 态为其长寿命亚稳中间态,吸收峰在 407nm ,在室温下寿命约为 $5\text{min}^{[16]}$ 。

采用四波耦合系统实时测量菌紫质薄膜样品的一级衍射效率,光路如图 1 所示。记录和读出光源为 633nm 氦氖激光器,擦除和辅助光源 I_e 为 405nm 半导体激光器。氦氖激光经分光棱镜 BS_1 和 BS_2 分光,分别形成物光 I_o 、参考光 I_r 和再现光 I_c ,其中再现光与参考光共轭,衍射光 I_d 与物光共轭,经分束镜 BS_3 反射,由数字功率计 D(美国 United Detector Technology 公司生产)实时测量衍射光功率,输出到数字示波器 O。物参光的夹角 $\theta = 16.5^\circ$,样品表面垂直于物参两光束的角平分线。快门 S_1 和 S_2 用来控制记录和擦除时间。衰减片 A_1 、 A_2 和 A_3 用来调节物光、参考光和读出光的光强。实验中物光、参考光的光强均为 $141.1\text{mW}/\text{cm}^2$,读出光光强为 $1.41\text{mW}/\text{cm}^2$,远远小于物光和参考光的光强。

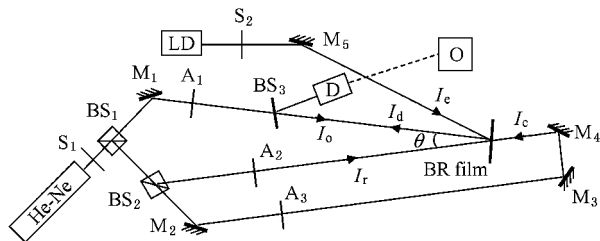


图 1 实时全息衍射效率测量光路

3. 结果与讨论

3.1. 菌紫质样品饱和吸收特性与双光束互补抑制效应

采用文献 [17] 中数值计算的方法,对菌紫质样品红光单光束以及紫光和红光双光束作用下红光的光强透过率曲线进行了计算,结果如图 2 所示。

从图中可以看出,菌紫质样品具有饱和吸收特性。按照激发光强与透过率的关系可将曲线分为两部分:线性区域($I < I_s$):透过率随激发光强增大基本呈线性变化,饱和区域:当激发光强大于饱和光强

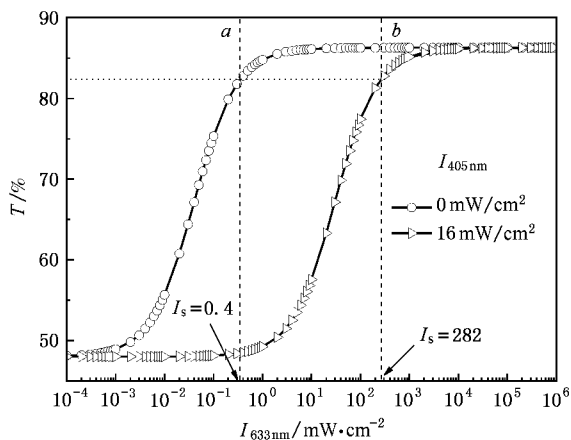


图 2 紫光对菌紫质样品红光光强透过率曲线的影响

(I_s) 时,透过率逐渐达到饱和值,不再随激发光强增大而增大。在双光束作用下,菌紫质样品具有互补抑制特性^[18],紫光对红光透过率有抑制效应。如图 2 中 ab 段,当红光单独作用样品时,透过率达到饱和,为非线性区域。当紫光和红光同时作用时,紫光抑制红光透过率,使 ab 段从非线性区域移至线性区域。紫光通过抑制红光的透过率而提高红光的饱和光强,在紫光照射下样品在红光处的饱和光强变大,加入 $16\text{mW}/\text{cm}^2$ 紫光后使样品的饱和光强从原来的 $0.4\text{mW}/\text{cm}^2$ 变为 $282\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

3.2. 菌紫质样品衍射效率的光强依赖特性

在全息记录中,记录光产生的干涉场的光强分布为: $I = I_0(1 + \cos\phi)$,其中 ϕ 表示物参光的相位差。根据光强透过率关系可以计算出菌紫质样品在不同记录光强下全息光栅透过率分布与记录光相位差的关系如图 3 所示。由于样品透过率具有饱和特性,当记录光强小于饱和光强 $0.4\text{mW}/\text{cm}^2$ 时,全息光栅透过率分布基本为余弦型(曲线 1);当记录光趋于饱和光强时,全息光栅透过率调制度最大且近似为余弦型(曲线 2),此时全息图衍射效率最大;当记录光强不断增大时,全息光栅透过率分布逐渐由余弦型变为尖峰脉冲形状(曲线 3 和 4),此时衍射效率下降。

由以上理论计算可知,菌紫质样品的衍射效率依赖于记录光强,衍射效率最大值出现在饱和光强附近。用图 1 的光路测量了衍射效率随记录光强的变化曲线如图 4 所示,得到的规律与上面分析相同。当记录光强小于饱和光强时,衍射效率随记录光强的增大而增大,记录光强接近饱和光强 $0.4\text{mW}/\text{cm}^2$

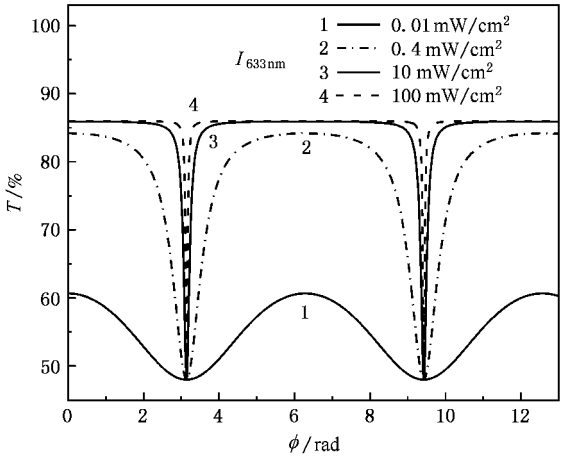


图 3 不同记录光强下全息光栅透过率分布随记录光相位差的关系曲线

时,衍射效率达到最大值,然后随着记录光强的增大而减小.

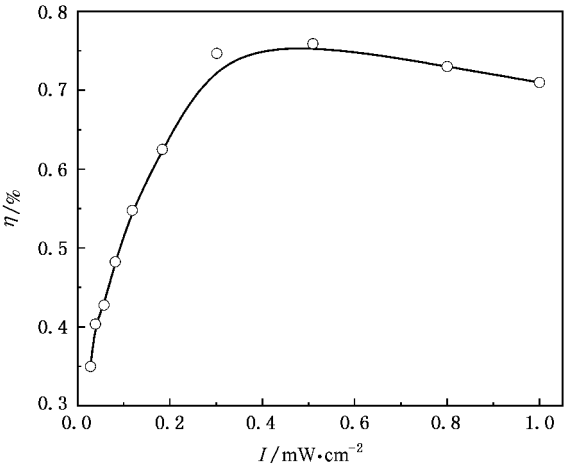


图 4 菌紫质样品衍射效率随记录光强的变化

3.3. 紫光作为辅助光提高菌紫质样品的衍射效率

菌紫质薄膜作为全息记录介质,要想获得较大的衍射效率必须使记录光强在饱和光强附近.但由于菌紫质样品饱和光强很小,考虑到读出光对全息光栅的擦除作用,读出光强应至少比记录光强小十倍以上,在这种情况下,即使衍射效率较大,衍射光强却很小,不利于探测.在实际应用中,需要同时考虑衍射效率和读出光强两方面的因素,要求记录光强应该较大,远远大于饱和光强.但是根据记录光强与衍射效率关系可知,当记录光强远大于饱和光强时,衍射效率的稳定值会下降得很小.而从 3.1. 中可知,紫光可以提高样品红光的饱和光强,使记录光强从透过率的非线性区域移至线性区域,从而提高衍射效率.因此,用较强的红光记录,在记录同时加入适量的辅助紫光可以提高衍射效率的稳定值.

衍射效率测量实验表明,在红光记录的同时加入适当强度辅助紫光,可使衍射效率随时间的动力学曲线在达到最大值后不下降或者下降很小就稳定下来.图 5 (a)是当记录光强为 $282\text{mW}/\text{cm}^2$ 时,菌紫质样品全息衍射效率随时间变化曲线.曲线 1 无辅助紫光,当记录时间大于 0.3s 时,衍射效率开始下降, 7s 以后衍射效率达到较小的稳定值.曲线 2、3 和 4 加入不同强度的紫光,可以看到,衍射效率动力学曲线下降很小,衍射效率稳定值提高.从图 5 (b)可以看出,当记录光强一定时,随着紫光光强增加,衍射效率稳定值先上升后下降,存在一个最佳辅助紫光光强,使衍射效率稳定值达到最大.

从图 5 的实验结果可知,当记录光强为 $282\text{mW}/\text{cm}^2$ 时,记录 7s 时衍射效率达到稳定.采用与 3.1 中同样的数值计算方法,根据红光和紫光双光束作用

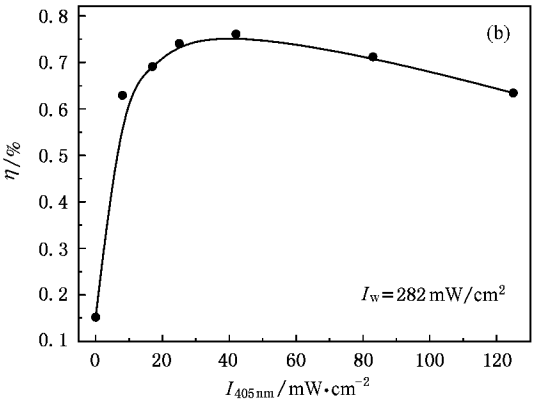
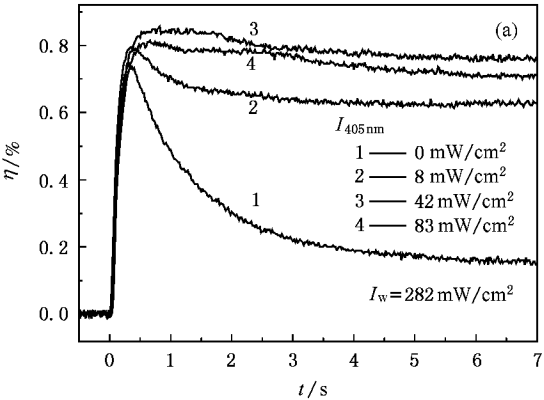


图 5 辅助紫光对菌紫质全息衍射效率的影响 (a)动力学曲线 (b)衍射效率稳定值随紫光光强变化曲线

下光强透过率曲线,可以得到菌紫质样品在不同记录条件下全息光栅透过率分布与记录光相位差的关系,如图 6 所示.当记录光强为 $282\text{mW}/\text{cm}^2$,加入 $16\text{mW}/\text{cm}^2$ 紫光时,全息光栅透过率分布随记录光相位差的关系曲线与记录光强为饱和光强 $0.4\text{mW}/\text{cm}^2$ 曲线重合(图 6 中曲线 3 和 5),此时衍射效率最大.这说明加入 $16\text{mW}/\text{cm}^2$ 的辅助紫光后,样品的饱和光强从 $0.4\text{mW}/\text{cm}^2$ 提高到 $282\text{mW}/\text{cm}^2$.当紫光光强小于 $16\text{mW}/\text{cm}^2$ 时,全息光栅透过率分布仍为非余弦型(图 6 中曲线 2),衍射效率低.当紫光光强大于 $16\text{mW}/\text{cm}^2$ 时,全息光栅透过率分布为余弦型,但调制度小(图 6 中曲线 4),衍射效率也低.

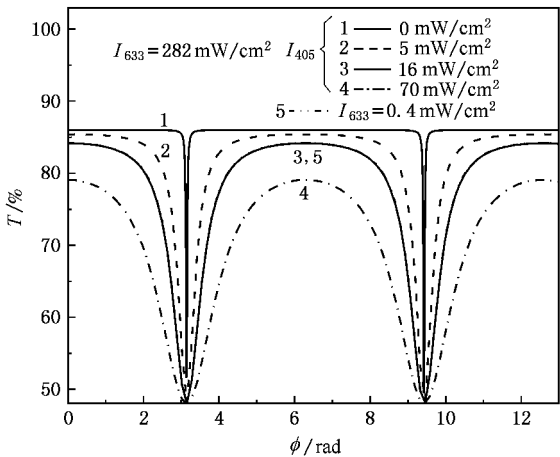


图 6 紫光光强对全息光栅透过率分布的影响

3.4. 三光束全息光存储系统

根据以上理论和实验结果,我们提出了三光束

全息光存储系统,即在两束红光进行全息记录的同时加入第三束辅助紫光提高样品的饱和光强,从而提高全息衍射效率稳定值.实验光路如图 7 所示, 633nm 35mW 的氦氖激光器为记录和读出光源; 405nm 18mW 的半导体激光器为辅助光源.分光棱镜 BS 将氦氖激光分成物光和参考光.物光路中透镜 L_1 L_2 组成扩束准直器.空间光调制器 SLM 位于透镜 L_3 的前焦面,通过计算机来加载数据图像.光阑 D 位于 L_3 L_4 组成的 $4f$ 系统频谱面上,用来滤掉 SLM 的高阶衍射光.成像系统为 L_5 L_6 组成的另一个 $4f$ 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_6 的后焦面上.物光参考光在样品处重合,物像的频谱信息被记录在菌紫质样品上.经过参考光再现后,物像的频谱信息经 L_6 反傅里叶变换得到原始物象,由 CCD 捕获采集输入到计算机中.

当记录光强为 $282\text{mW}/\text{cm}^2$ 、记录时间为 0.3s 时,得到了衍射效率高、像质好的衍射像,如图 8(a) 所示,这与衍射效率随时间变化曲线的测量结果(图 5(a) 中的曲线 1)相符合.当记录时间大于 0.3s 时,衍射效率会随着记录时间的增大而减小,例如记录时间为 10s 时,衍射效率下降到一个较小的稳定值,此时得到的衍射像如图 8(b)所示,像质差,衍射效率也低.如果在记录时加入 $30\text{mW}/\text{cm}^2$ 辅助紫光,即使记录时为 10s 全息衍射效率也会保持较大值.衍射像的像质可以得到恢复,衍射效率也得到提高,如图 8(c)所示,这与辅助紫光对全息衍射效率影响得到的结果一致(如图 5(a) 中的曲线 3).

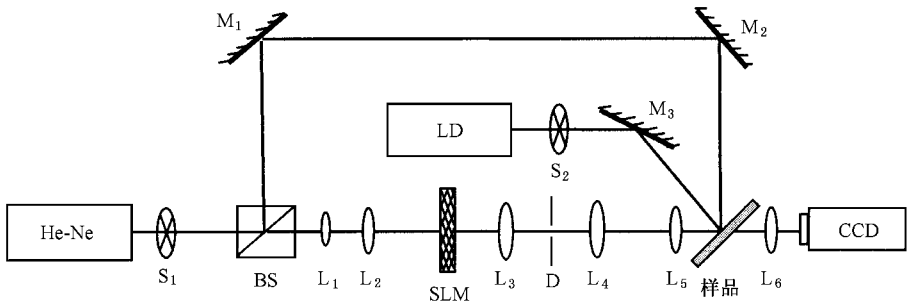


图 7 三光束全息存储实验光路 S_1 S_2 快门;BS 分光棱镜 L_1 — L_6 透镜;D 光阑 M_1 — M_3 反射镜;SLM 空间光调制器



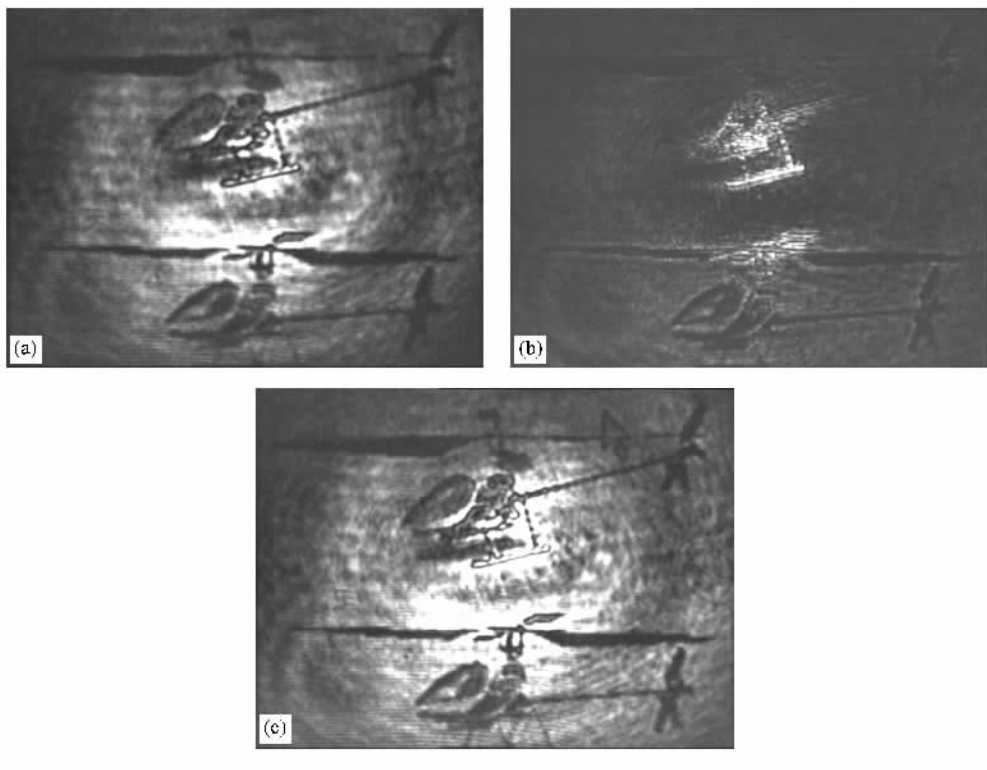


图 8 辅助紫光对记录光强为 $282\text{mW}/\text{cm}^2$ 全息衍射像的影响 (a)无辅助紫光,记录时间 0.3s ,曝光量合适,衍射效率高 (b)无辅助紫光,记录时间 10s ,曝光量过度,衍射效率低 (c)加入 $30\text{mW}/\text{cm}^2$ 辅助紫光,记录时间 10s 时,衍射效率提高

4. 结 论

根据上述理论分析和实验结果,可以得出以下结论:

1) 菌紫质样品的全息衍射效率具有光强依赖特性.由于菌紫质样品的饱和吸收特性,当记录光强大于样品的饱和光强时,全息光栅随相位差分布不再为余弦型,引起样品衍射效率变小,记录光强在饱和光强处具有最大衍射效率.

2) 根据紫光和红光的双光束互补抑制作用,紫光可以提高样品在红光处的饱和光强,用光强较大的红光进行全息记录时加入适当辅助紫光可以提高全息衍射效率.

3) 采用三光束全息记录系统,即使用较大的记录光强、长时间地记录也可以得到衍射效率高、像质好的全息衍射像.

感谢德国 Marburg 大学 Norbert Hampp 教授提供 BR-D96N 菌紫质薄膜样品.

[1] Tao S Q , Wang D Y , Jiang Z Q <i>et al</i> 1998 <i>Holography Storage</i> (Beijing : Beijing University of Technology Press) p85 (in Chinese) [陶世荃、王大勇、江竹青等 1998 光全息存储 (北京 : 北京工业大学出版社) 第 85 页] [2] Chao T , Zhou H , George R <i>et al</i> 1999 <i>SPIE Proc.</i> 3864 181 [3] Mogilny V V , Gritsai Y V 1998 <i>SPIE Proc.</i> 3402 100 [4] Gu A , Ansari Z , Dunsby C <i>et al</i> 2002 <i>J. Mod. Opt.</i> 49 877 [5] Heller H G 1978 <i>Chem. Ind.</i> 18 193 [6] Hampp N , Brauchle C , Oesterhelt D 1990 <i>Biophys. J.</i> 58 83	[7] Zheng Y , Yao B L , Wang Y L <i>et al</i> 2004 <i>Sci. Chin. (Ser. G)</i> 47 284 [8] Zheng Y , Yao B , Wang Y <i>et al</i> 2003 <i>Chin. Phys. Lett.</i> 20 671 [9] Zheng Y , Yao B L , Wang Y <i>et al</i> 2003 <i>Acta Biochem. Biophys. Sin.</i> 35 592 (in Chinese) [郑 媛、姚保利、王英利等 2003 生物化学与生物物理学报 35 592] [10] Ren Z W , Yao B L , Menke N <i>et al</i> 2005 <i>Acta Phys. Sin.</i> 54 2699 (in Chinese) [任志伟、姚保利、门克内木乐等 2005 物理学报 54 2699]
---	--

- [11] Thoma R , Hampp N , Branchle C *et al* 1991 *Opt. Lett.* **16** 651
- [12] Hampp N , Juchem T 2004 *Opt. Lett.* **29** 2911
- [13] Fu S , Liu Y , Lu Z *et al* 2005 *Opt. Mat.* **27** 1567
- [14] Yavrian A , Astryan K , Galstian T *et al* 2005 *Opt. Comm.* **251** 286
- [15] Dai C , Liu Y , Liu D *et al* 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1127
- [16] Yao B L , Wang Y L , Zheng Y *et al* 2003 *Opt. Commu.* **218** 125
- [17] Zheng Y , Yao B L , Wang Y L *et al* 2002 *Acta Photonica Sinica* **31** 10 (in Chinese) 郑 媛、姚保利、王英利等 2003 光子学报 **31** 10]
- [18] Li Y , Sun Q , Zhang C *et al* 1998 *Chin. Phys. Lett.* **15** 799

Experimental and theoretical studies on auxiliary violet light increasing the diffraction efficiency of holographic gratings in bacteriorhodopsin film *

Wang Ying-Li¹⁾ Yao Bao-Li[†] Menke Neimule Ren Zhi-Wei Lei Ming Ren Li-Yong

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

(Received 30 November 2005 ; revised manuscript received 16 January 2006)

Abstract

Due to the saturation absorption characteristic of bacteriorhodopsin film , in holography , when the intensity of the recording light is higher than the saturation intensity , the distribution of the transmission of the holographic gratings deviates from the cosine shape. As a result , the steady level of diffraction efficiency is very low. Using the mutual suppression property of bacteriorhodopsin films between the violet light and the red light , the saturation intensity of the film at 633nm can be increased by adding an auxiliary irradiation of 405nm violet light , which results in the holographic recording being changed from the nonlinear region to linear region. Consequently the distribution of the transmission of the holographic gratings retrieves to the cosine shape , and the diffraction efficiency is improved to a high value. Base on this principle , a three-beam holography system is set up. The diffraction efficiency and the quality of the diffraction image are shown to be greatly improved by the auxiliary violet light.

Keywords : bacteriorhodopsin , holography , diffraction efficiency , saturation absorption

PACC : 4225J , 4240 , 4240F , 4230N

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60278026 , 60337020 , 30370269).

[†] Corresponding author. E-mail : yaobl@opt.ac.cn