

doi: 10.3788/gzxb20154408.0805002

紫光诱导菌紫质中同圆偏振光栅的衍射调制特性

黄海昆¹, 杨晨晓¹, 李若平¹, 黄明举¹, 姚保利², 韩俊鹤¹

(1 河南大学 物理与电子学院 河南省光电信息材料与器件重点学科开放实验室, 河南 开封 475004)

(2 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 710119)

摘 要: 基于琼斯矩阵和菌紫质分子光循环的简化光循环模型, 建立了紫光诱导同圆偏振记录光栅的理论模型, 采用四波耦合光路测量菌紫质光栅的衍射效率. 理论模拟和实验结果表明: 加入线偏振的辅助紫光, 线偏振再现光与线偏振辅助紫光相互平行时, 菌紫质光栅的衍射效率最大; 线偏振再现光与线偏振辅助紫光相互垂直时, 菌紫质光栅的衍射效率最小; 菌紫质薄膜中同圆偏振记录光栅的稳态衍射效率随线偏振再现光偏振方向和线偏振辅助紫光偏振方向之间的夹角按余弦规律变化. 线偏振紫光能诱导同圆偏振记录光栅由非偏振光栅转化为偏振光栅.

关键词: 偏振调制; 衍射效率; 光致各向异性; 菌紫质; 光栅

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)08-0805002-6

Polarization Modulation of Parallel Circular Polarization Recorded Grating in Bacteriorhodopsin Induced by Polarized Violet Light

HUANG Hai-kun¹, YANG Chen-xiao¹, LI Ruo-ping¹, HUANG Ming-ju¹,
YAO Bao-li², HAN Jun-he¹

(1 *Lab of Optoelectronic Information Materials and devices in Henan Province, College of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China*)

(2 *State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

Abstract: A theoretical model for calculating the diffraction efficiency kinetics of the grating recorded by two parallel circular polarized recording beams was proposed, based on Jones-matrix and photochromic two-state theory. The diffraction efficiency of bacteriorhodopsin grating was measured by system of four-wave coupled light path. The theoretical analysis and the experimental results show that, in the condition of adding linearly polarized auxiliary violet light, when linearly polarized reconstruction light parallel with linearly polarized auxiliary violet light, the diffraction efficiency of bacteriorhodopsin grating is maximum; when linearly polarized reconstruction light perpendicular to linearly polarized auxiliary violet light, the diffraction efficiency of bacteriorhodopsin grating is minimum. The angle between linearly polarized reconstruction light and linearly polarized auxiliary violet light produces a cosine modulation on the kinetics of the diffraction efficiency. It indicates that parallel circular polarization recorded grating in bacteriorhodopsin induced by polarized violet light became polarizing grating.

Key words: Polarization modulation; Diffraction efficiency; Photoinduced anisotropy; Bacteriorhodopsin; Grating

OCIS Codes: 050.1940; 050.7330; 160.1190; 090.2900

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61177004, U1304617)资助

第一作者: 黄海昆(1988.09-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全息存储材料及应用. Email: huanghaikun0@126.com

导师(通讯作者): 韩俊鹤(1974-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光功能材料的特性及应用. Email: junhh@henu.edu.cn

收稿日期: 2014-12-12; 录用日期: 2015-06-05

0 引言

全息光存储因具有高存储容量、高存储密度、高信息存储冗余度和超快的存取速度等优点一直受到重视,成为未来存储技术发展的一个重要方向.细菌视紫红质(Bacteriorhodopsin,简称菌紫质)是嗜盐菌紫膜中一种具有光致变色性质的蛋白质,是一种新型的生物分子材料.菌紫质具有响应速度快、空间分辨率高、稳定性和抗疲劳性好等优点^[1-4],这些优点使菌紫质在光开关、图像和数据处理、光电探测器、全光显示、全息存储、光计算等方面有潜在应用^[5-11].由于菌紫质分子对偏振光的吸收具有选择性^[12],这使菌紫质薄膜具有光致各向异性.菌紫质薄膜的光致各向异性可以用于偏振复用全息存储、永久光存储和光学加密等^[13-15].菌紫质分子在可见光激发下经过一系列具有不同吸收光谱和折射率的中间态(K, L, M, N, O),返回基态B,完成一次光循环过程.在这些中间态中,M态的寿命最长,对于基因改良型菌紫质分子(BR-D96N),其M态寿命可长达300s^[3].因此,可以忽略其它中间态,把菌紫质分子的光循环过程简化为一个简单的二态光循环系统,二态光循环系统模型可以很好地解释菌紫质的大部分光学性质^[16-17].

基于二态光循环模型,可以解释辅助紫光对菌紫质薄膜的光致各向异性并记录光强对全息光栅衍射效率动力学过程的影响^[18-20].本文用同圆偏振记录光在菌紫质中记录光栅,加入线偏振辅助紫光,使衍射效率表现出对线偏振再现光偏振方向的依赖.利用琼斯矩阵和菌紫质的二态光循环模型建立了菌紫质光致各向异性光栅的衍射效率动力学模型,并模拟了同圆偏振记录中加入线偏振辅助紫光时,再现光偏振方向对光栅衍射效率的影响.

1 材料与方法

实验所用的菌紫质薄膜(BR-D96N)由德国Marburg大学制备.菌紫质薄膜是把紫膜以一定的浓度掺杂到聚乙烯醇中,再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.菌紫质薄膜的厚度 d 约为80 μm ,光密度1.32;B态的吸收峰在568 nm处,M态的吸收峰在407 nm处;室温下M态寿命 $\tau_M = 300 \text{ s}$ ^[3].

实验采用如图1所示的四波耦合光路,光源为632.8 nm(红光)的氦氖激光器(He-Ne).氦氖激光器发出的竖直线偏振光经消偏振分光棱镜BS₁和BS₂分光,分别形成物光o、参考光r和再现光c.四分之一波片Q₁和Q₂调节物光o、参考光r为偏振状态相同的圆偏振光,再现线偏振光c的偏振方向通过半波片Q₃调节.再现光与参考光共轭,衍射光s与物光共轭.衍射

光经分束镜BS₃(反射率为47%)分束后,其反射光功率由数字功率计D测量,数字功率计的模拟输出电信号送到数字示波器O,用来记录整个衍射动力学曲线.紫光e由波长为405 nm(紫光)的线偏振半导体激光器LD产生,实验过程中其偏振方向通过半波片Q₄调节.S₁和S₂为快门;NF₁、NF₂、NF₃和NF₄为中性连续衰减片.实验中物光和参考光之间的夹角 $2\alpha = 14.6^\circ$,样品BR表面垂直于物光和参考光的夹角平分线.记录光强 I_w 定义为物光和参考光的光强之和,即 $I_w = I_o + I_r$.实验中所用光强为 $I_o = I_r = 15 \text{ mW/cm}^2$, $I_c = 0.3 \text{ mW/cm}^2$, $I_e = 3.5 \text{ mW/cm}^2$.

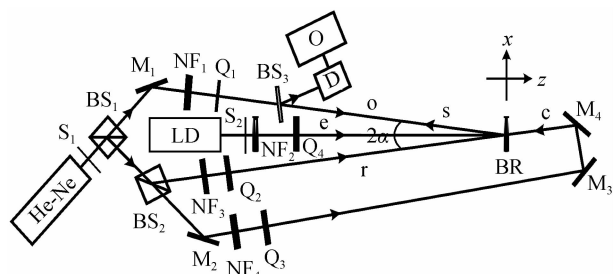


图1 实时全息衍射效率测量光路

Fig. 1 Schematic of the experimental setup for measuring real-time hologram diffraction kinetics

2 理论分析

2.1 菌紫质分子的粒子数分布

在二态光循环模型近似下,菌紫质分子吸收光子在基态B和长寿命的中间态M之间循环^[17].若光活性菌紫质分子的总分子数密度为 N_0 ,则沿 θ 方向取向的B态和M态分子数密度满足关系: $N_B(\theta) + N_M(\theta) = N_0/2\pi$.假定初始时刻($t=0$)光活性菌紫质分子全部处于B态,则有 $N_B(\theta, t=0) = N_0/2\pi$ 和 $N_M(\theta, t=0) = 0$.在上述条件下,B态的分子数密度 $N_B(\theta)$ 可写为^[11]

$$N_B(\theta) = \frac{N_0}{2\pi} \frac{k_c + k_r}{k_1} [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (1)$$

式中, $k_1 = k_w + k_c + k_e + k_r$; k_r 为室温下M态的热弛豫速率; $k_w = \sigma_B(\theta, \lambda) \phi_B(\lambda) \lambda I_w / (hc)$ 为记录光的光反应速率; $k_c = \sigma_B(\theta, \lambda) \phi_B(\lambda) \lambda I_c / (hc)$ 为再现光的光反应速率; $k_e = \sigma_M(\theta, \lambda_e) \phi_M(\lambda_e) \lambda_e I_e / (hc)$ 为辅助紫光的光反应速率; λ 和 λ_e 分别为红光和紫光的波长; I_w 、 I_c 和 I_e 分别为记录光、再现光和紫光的光强; σ_B 和 σ_M 分别为B态和M态分子的分子吸收截面; ϕ_B 和 ϕ_M 分别为B态到M态和M态到B态的量子转换效率; c 为光速, h 为普朗克常量.

2.2 菌紫质分子对偏振光的选择性吸收

菌紫质薄膜是由大量随机取向的各向异性菌紫质分子镶嵌在聚乙烯醇(PVA)中构成的.无光照时菌紫质薄膜呈现宏观的光学各向同性.菌紫质薄膜的光致各向异性来源于菌紫质分子对偏振光的选择性吸

收^[12]. 菌紫质分子对偏振光的选择性吸收可用分子吸收截面 σ 表示^[21],即

$$\sigma(\theta) = \sigma_{\parallel} \left(\frac{a^2}{I_0} \cos^2 \theta + \frac{b^2}{I_0} \sin^2 \theta \right) + \sigma_{\perp} \left(\frac{a^2}{I_0} \sin^2 \theta + \frac{b^2}{I_0} \cos^2 \theta \right) \quad (2)$$

式中, σ_{\parallel} 和 σ_{\perp} 分别表示菌紫质分子对偏振方向平行和垂直于分子长吸收轴的线偏振光的吸收截面, a 和 b 分别表示椭圆偏振光的长半轴和短半轴, $I_0 = a^2 + b^2$ 为椭圆偏振光的光强, θ 为分子的长吸收轴和椭圆偏振光的长半轴之间夹角. 对于圆偏振光 ($a=b$), 由式(2)可知 $\sigma(\theta) = (\sigma_{\parallel} + \sigma_{\perp})/2$ 是一个常量. 这表明沿不同方向取向的菌紫质分子对圆偏振光的吸收截面完全相同. 因此, 圆偏振光无法诱导菌紫质薄膜产生光致各向异性. 用同圆偏振光作为记录光时, 只能在菌紫质薄膜内记录普通的强度调制光栅. 对于线偏振光 ($b=0$), $\sigma(\theta) = \sigma_{\parallel} \cos^2 \theta + \sigma_{\perp} \sin^2 \theta$. 可以看出, 取向方向平行和垂直于线偏振光偏振方向的菌紫质分子吸收光子从 B 态到 M 态的几率是不一样的. 这导致不同取向的菌紫质分子由均匀分布转变为非均匀分布, 从而使菌紫质薄膜呈现出宏观的各向异性. 如果在同圆偏振光记录的同时加入线偏振的紫光, 紫光会改变沿不同方向取向的 M 态和 B 态菌紫质分子的分布, 进而诱导产生宏观的光致各向异性. 这时菌紫质薄膜内记录的光栅是强度调制光栅和偏振调制光栅的混合光栅.

2.3 全息光栅的衍射效率

菌紫质薄膜的光致各向异性包括光致双折射和光致二向色性. 在 632.8 nm 波长处, 菌紫质薄膜的光致各向异性占主导地位, 光致二向色性可以忽略^[22]. 在同圆偏振记录光(红光)和线偏振紫光的共同作用下, 菌紫质薄膜的光致双折射与分子数密度分布之间的关系可以表示为^[23]

$$\Delta n(t, x, \varphi) = C_n \int_0^{2\pi} N_B(t, x, \theta) [|\cos(\theta - \varphi)| - |\sin(\theta - \varphi)|] / N_0 d\theta \quad (3)$$

式中, t 表示时间, C_n 代表 B 态分子数和光致双折射之间的比例系数, φ 是再现光的偏振方向与紫光的偏振方向之间的夹角, 若无辅助紫光则 $\varphi=0$. 菌紫质薄膜对线偏振再现光的吸收系数可写为

$$\alpha(t, x) = - \int_0^{2\pi} \sigma_{\varphi}^B N_B(t, x, \theta) d\theta \quad (4)$$

由式(4)可得再现光的振幅透射比为

$$\ln t(t, x) = - \frac{d}{2} \int_0^{2\pi} \sigma_{\varphi}^B N_B(t, x, \theta) d\theta \quad (5)$$

菌紫质薄膜的透射矩阵可表示为^[19]

$$\hat{T}(t, x) = \begin{bmatrix} t_o e^{ik_o \Delta n, d} & 0 \\ 0 & t_e e^{ik_e \Delta n, d} \end{bmatrix} e^{ik_o n, d} \quad (6)$$

式中, 下标 o 和 e 分别表示再现线偏振光的偏振方向

平行和垂直于紫光的偏振方向, n_0 是菌紫质薄膜的初始折射率, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 表示再现光在真空中波矢的大小. 应特别注意, 同圆偏振记录时, 若无辅助紫光, 则 $\Delta n=0$. 此时, 对不同偏振方向的再现光, 衍射效率无各向异性.

若线偏振再现光的偏振方向与辅助紫光偏振方向之间的夹角为 φ , 则其琼斯矢量可以表示为

$$\mathbf{C} = C \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix} e^{-iKx/2} \quad (7)$$

衍射光场 \mathbf{D} 可表示为

$$\mathbf{D} = \hat{T}(t, x) \cdot \mathbf{C} = C e^{ik_o n, d} \begin{bmatrix} t_o e^{ik_e \Delta n, d} \sin \varphi \\ t_e e^{ik_e \Delta n, d} \cos \varphi \end{bmatrix} e^{-iKx/2} \quad (8)$$

在光栅记录过程中, Δn 随记录时间变化. 当曝光时间小于最佳记录时间时, Δn 的分布近似正弦调制光栅, 光栅的调制振幅和衍射效率都随时间增加而增加. 随着记录时间的增加, 亮区菌紫质分子的吸收逐渐趋于饱和, Δn 的分布偏离正弦光栅分布. 超过最佳记录时间后, 光栅的调制振幅和衍射效率下降^[20]. 考虑到其饱和效应, 建立衍射效率动力学模型时, 把 $t_j \exp(ik_0 \Delta n d)$ 项展开为傅里叶级数形式, 即

$$t_j \exp(ik_0 \Delta n, d) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} a_j \exp(ilKx) \quad (9)$$

式中, $j=0, e$, 分别表示再现线偏振光的偏振方向平行和垂直于紫光的偏振方向. 其傅里叶系数 a_j 为

$$a_j(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} t_j \exp(ik_0 \Delta n, d) \exp(-ilKx) \cdot d(Kx) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 衍射场可以写作

$$\mathbf{D} = C e^{ik_o n, d} \left\{ \begin{bmatrix} a_{0o} \sin \varphi \\ a_{0e} \cos \varphi \end{bmatrix} e^{-iKx/2} + \begin{bmatrix} a_{1o} \sin \varphi \\ a_{1e} \cos \varphi \end{bmatrix} e^{iKx/2} + \dots \right\} \quad (11)$$

式(11)中等式右边第一项再现光的透射光, 即 0 级衍射光; 第二项则为 1 级衍射光, 其它项表示高级衍射光. 实际上, 因高级衍射光不满足 Bragg 条件, 其在厚介质中被抑制. 由式(11), +1 级衍射波的衍射效率可写为

$$\eta_{+1} = \frac{\mathbf{D}_{+1} \cdot \mathbf{D}_{+1}^*}{\mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^*} = \frac{\eta_e + \eta_o}{2} + \frac{\eta_e - \eta_o}{2} \cos(2\varphi) \quad (12)$$

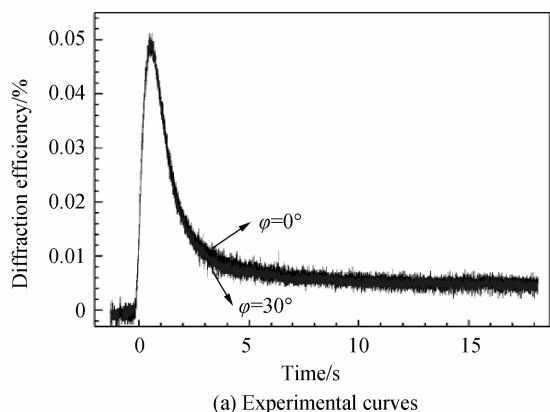
式中, $\eta_e = a_{1e} \cdot a_{1e}^*$, $\eta_o = a_{1o} \cdot a_{1o}^*$ 分别表示沿 e 和 o 方向偏振的再现光的衍射效率. 由式(12), 可以从理论上计算不同偏振方向再现光的衍射效率动力学曲线.

3 实验结果及其理论计算

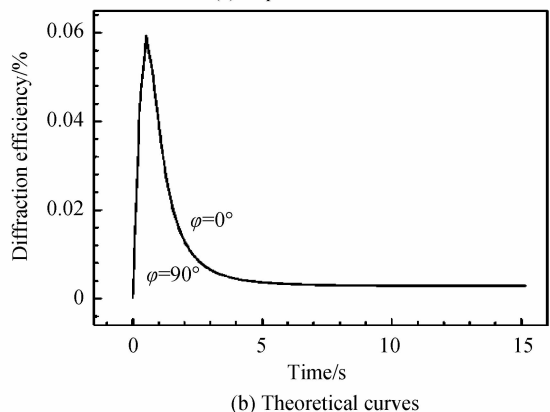
3.1 衍射效率动力学及其模拟计算

实验中首先测量了记录光为同圆偏振红光, 不同偏振方向的线偏振再现光的衍射效率, 其结果如图 2(a) 和 3(a) 所示. 图 2(a) 为无辅助紫光诱导同圆偏振

记录光栅时,两个偏振方向垂直的线偏振再现光的衍射效率动力学曲线;图 3(a)为线偏振紫光诱导同圆偏振记录条件下,沿不同方向偏振的线偏振再现光的衍射效率动力学曲线.从图 2(a)可以看出:当记录光为同圆偏振光,且无辅助紫光时,菌紫质薄膜的衍射效率先增大,达到最大值后再下降到一个较低的稳定值,且两条衍射效率曲线几乎完全重合.这表明无紫光诱导时菌紫质中的同圆偏振记录光栅对不同偏振方向的线偏振再现光具有完全相同的衍射效率,即,光栅的衍射效率与线偏振再现光的偏振方向无关,这与前面的分析完全一致.



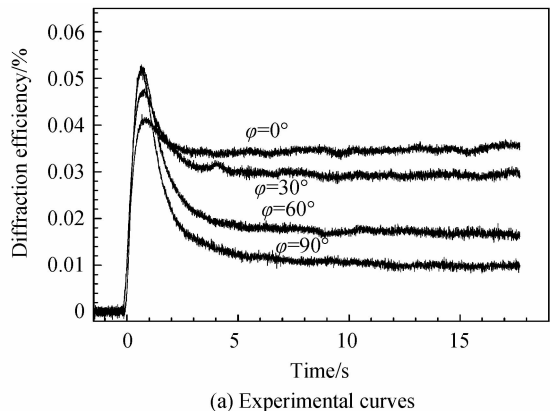
(a) Experimental curves



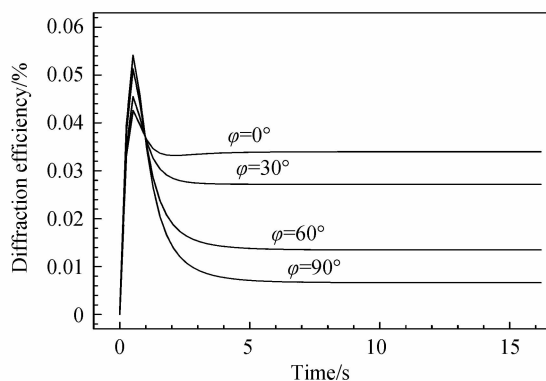
(b) Theoretical curves

图 2 无紫光诱导不同偏振取向再现光的衍射效率动力学曲线

Fig. 2 Diffraction efficiency kinetic curves of two linearly polarized reconstruction lights without auxiliary linearly polarized violet light



(a) Experimental curves



(b) Theoretical curves

图 3 紫光诱导不同偏振取向再现光的衍射效率动力学曲线
Fig. 3 Diffraction efficiency kinetic curves of reconstruction lights with different polarization orientation under auxiliary linearly polarized violet light

用式(12)从理论上计算了不同偏振方向再现光的衍射效率动力学曲线,计算结果如图 2(b)和图 3(b)所示.理论计算时各参量的取值为: $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $\lambda_c = 405 \text{ nm}$, $\phi_B = \phi_M = 0.64$, $K_r = 0.1 \text{ s}^{-1}$, $\chi = 0.2 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$, $\epsilon_{\parallel}^B(632.8 \text{ nm}) = 21\,040 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\epsilon_{\perp}^B(633 \text{ nm}) = 15\,020 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\epsilon_{\parallel}^M(405 \text{ nm}) = 75\,000 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\epsilon_{\perp}^M(405 \text{ nm}) = 7\,500 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

对比图 2(a)与 2(b)、图 3(a)与 3(b)可以看出,实验结果与理论计算结果是一致的.这说明利用琼斯矩阵和二态光循环模型可以从理论上模拟菌紫质薄膜的衍射效率动力学过程.

3.2 衍射效率对紫光偏振方向的依赖

对比图 2(a),由图 3(a)可以看出,加入线偏振辅助紫光后,全息记录光栅的衍射效率随着线偏振再现光偏振方向的变化而变化.这说明,加入线偏振紫光后,不同方向偏振的线偏振再现光的衍射效率和紫光的偏振方向密切相关.它们之间的这种关系称之为衍射效率对紫光偏振方向的依赖性.

用同圆偏振光在菌紫质薄膜中记录全息光栅时,沿不同方向取向的线偏振再现光的稳态衍射效率如图 4 所示.由图 4 可以看出,记录光为同圆偏振光时,若无辅助紫光,不同偏振方向的再现光有相同的稳态衍射效率,这说明此时全息光栅的衍射效率和再现光的偏振方向无关.此外,由于饱和吸收效应,光栅的稳态衍射效率很低,只有 0.0065%.加入线偏振紫光后,除稳态衍射效率因紫光对饱和效应的抑制有明显提高外^[18],沿不同方向偏振的再现光的稳态衍射效率还存在明显的差别,即再现光的偏振方向与紫光平行时衍射效率最大,垂直时衍射效率最小.总的来说,加入线偏振的辅助紫光后,同圆偏振记录光栅的稳态衍射效率随线偏振再现光偏振方向与辅助紫光偏振方向之间

的夹角 φ 按余弦规律变化,即产生余弦调制.另外,由图 4 还可以看出,理论计算结果和实验结果是一致的,这说明利用二态光循环建立的模型可以很好地模拟加入和不加入偏振紫光时同圆偏振记录光栅衍射效率动力学过程.

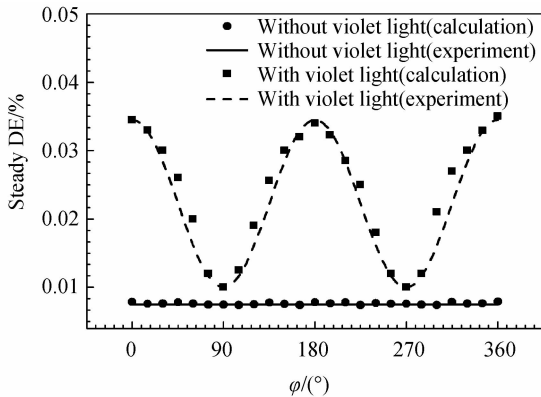


图 4 不同偏振取向再现光的稳态衍射效率
Fig. 4 Steady diffraction efficiency of reconstruction lights with different polarization orientation

4 结论

两束偏振态相同的圆偏振光在菌紫质薄膜中记录全息光栅时,辅助紫光的加入会使沿不同方向取向的线偏振再现光的衍射效率出现明显变化,既提高光栅稳态衍射效率,同时使不同取向的线偏振再现光的稳态衍射效率产生余弦调制.并用基于琼斯矩阵和菌紫质分子二态光循环模型建立的同圆偏振光记录光栅衍射效率的计算模型,计算了不同取向的线偏振再现光的稳态衍射效率,得到的理论计算结果与实验结果一致.

参考文献

[1] HAMPP N. Bacteriorhodopsin as a photochromic retinal protein for optical memories[J]. *Chemical Reviews*, 2000, **100**: 1755-1776.
 [2] CLAYS K, ELSHOCHT S V, PERSOONS A. Bacteriorhodopsin: a natural (nonlinear) photonic bandgap material[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**: 1391-1393.
 [3] YAO Bao-li, ZHENG Yuan, WANG Ying-li, et al. Kinetic spectra of light-adaptation dark-adaptation and M-intermediate of BR-D96N[J]. *Optics Communications*, 2003, **218**: 125-130.
 [4] ZHAO Ying-chun, MING Ming, HONG Jie, et al. Preparation of a gene-engineering mutant of bacteriorhodopsin BR-D96V and corresponding poly(vinyl alcohol)-based functional composite films[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(17): 1670-1675.
 赵迎春, 明明, 洪洁, 等. 细菌视紫红质基因工程点突变体 BR-D96V 的获取及其与合成高分子聚乙烯醇的功能性复合材料的制备[J]. *科学通报*, 2010, **55**(17): 1670-1675.
 [5] CHEN Gui-ying, ZHANG Chun-ping, GUO Zong-xia, et al. VResearch and application of all-optical logic gates by bacteriorhodopsin[J]. *Physics Experimentation*, 2005, **25**: 13-17.
 陈桂英, 张春平, 郭宗霞, 等. 细菌视紫红质在全光逻辑器件

中的研究与应用[J]. *物理实验*, 2005, **25**: 13-17.
 [6] QI Chun-yuan, LIU Kang-jun, HUANG Yan-ping, et al. Third order nonlinear optical properties of bacteriorhodopsin langmuir-blodgett multilayer film[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**: 178-180.
 祁春媛, 刘康俊, 黄燕萍, 等. 菌紫质 LB 膜的三阶非线性光学性能的研究[J]. *应用激光*, 2006, **26**: 178-180.
 [7] HAN Jun-he, YAO Bao-li, Gao Peng, et al. All-optical logic gates based on photoinduced anisotropy of bacteriorhodopsin film[J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, **59**(7): 636-642.
 [8] GUO Zong-xia, CHEN Gui-ying, ZHANG Chun-ping, et al. Characters for optical filter of removing bright-background based on bacteriorhodopsin film[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2005, **24**: 56-60.
 郭宗霞, 陈桂英, 张春平, 等. 基于细菌视紫红质膜的用于滤除亮背景光学滤波器的特性分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**: 56-60.
 [9] WANG Gang-zhi, CHEN Gui-ying, YUAN Yi-zhe, et al. Research on self-diffraction efficiency and the optimal incident angle based on bacteriorhodopsin film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**: 1211-1215.
 王刚志, 陈桂英, 袁义哲, 等. 细菌视紫红质的自衍射效率与最佳入射角研究[J]. *光子学报*, 2006, **35**: 1211-1215.
 [10] HUO Jin-chuan, LEI Yong-lin, WANG Hai-bin, et al. Progress of study on the properties and applications of the bio-optical function material based on bacteriorhodopsin[J]. *Materials Review*, 2005, **19**: 36-39.
 霍冀川, 雷永林, 王海滨, 等. 基于细菌视紫红质生物光学功能材料的特性及应用研究进展[J]. *材料导报*, 2005, **19**: 36-39.
 [11] YAN Su, MENKE Neimule, NING An-qi, et al. Collinear holographic image storage with BR-D96N film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1816-1819.
 阎肃, 门克内木乐, 宁安琪, 等. BR-D96N 薄膜共线全息图像存储实验研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1816-1819.
 [12] BURYKIN N M, KORCHEMSKAYA E Y, SOSKIN M S, et al. Photoinduced anisotropy in bio-chromic films[J]. *Optics Communications*, 1985, **54**: 68-70.
 [13] REN Zhi-wei, YAO Bao-li, MENKE Neimule, et al. Experimental study on angle multiplexing and polarization multiplexing holographic recording with bacteriorhodopsin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(6): 822-826.
 任志伟, 姚保利, 门克内木乐, 等. 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[J]. *光学学报*, 2006, **26**(6): 822-826.
 [14] YU Xiang-hua, YAO Bao-li, LI Xin-yu, et al. F-state based permanent optical data storage in bacteriorhodopsin film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(2): 024218.
 于湘华, 姚保利, 李新宇, 等. 基于菌紫质 F 态的永久光存储研究[J]. *物理学报*, 2015, **64**(2): 024218.
 [15] FISCHER T, NEEBE M, JUCHEM T, et al. Biomolecular optical data storage and data encryption [J]. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 2003, **2**(1): 1-5.
 [16] KOGELINK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *The Bell System Technical Journal*. 1969, **48**: 2909-2946.
 [17] DOWNIE J D, TIMUCIN D A. Modeling the grating-formation process in thick bacteriorhodopsin films [J]. *Applied Optics*, 1998, **37**: 2102-2111.
 [18] HAN Jun-he, YAO Bao-li, GAO Peng, et al. Influence of auxiliary violet light on holographic diffraction efficiency under different recording intensities in bacteriorhodopsin film

- [J], *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**: 2199-2204.
- 韩俊鹤,姚保利,郜鹏,等. 不同记录光强下辅助紫光对菌紫质薄膜全息衍射效率的影响[J]. 物理学报,2008, **57**: 2199-2204.
- [19] HAN Jun-he, YAO Bao-li, GAO Peng, *et al.* Kinetics of photoinduced anisotropy in bacteriorhodopsin film under two pumping beams[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(21): 3760-3766.
- [20] WANG Ying-li, YAO Bao-li, MENKE Neimule, *et al.* Experimental and theoretical studies on auxiliary violet light increasing the diffraction efficiency of holographic gratings in bacteriorhodopsin film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**: 5200-5205.
- 王英利,姚保利,内克内木乐,等. 辅助紫光提高菌紫质全息衍射效率的实验和理论研究[J]. 物理学报,2006, **55**: 5200-5205.
- [21] NIKOLOVA L, MARKOVSKY P, TOMOVA N, *et al.* Optically controlled photo-induced birefringence in photo-anisotropic materials[J]. *Journal of Modern Optics*, 1988, **35**(11): 1789-1799.
- [22] JUCHEM T, SANIO M, HAMPP N. Bacteriorhodopsin modules for data processing with incoherent light[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(18): 1607-1609.
- [23] HUANG Y, SIGANAKIS G, MOHARAM M G, *et al.* Broadband optical limiter based on nonlinear photoinduced anisotropy in bacteriorhodopsin film[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(22): 5445-5447.