

文章编号: 0258-7025(2010)08-2045-06

# 菌紫质的 B 型和 M 型光致双折射特性研究

韩俊鹤<sup>1</sup> 姚保利<sup>2</sup> 郜鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 河南大学物理与电子学院, 河南 开封 475004

<sup>2</sup> 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, 陕西 西安 710119

**摘要** 各向异性吸收的菌紫质(BR)分子可以看作一个电偶极子。由大量随机取向的 BR 分子构成的聚合物薄膜在宏观上呈现光学各向同性。在线偏振光照射下,电偶极矩取向与激发光的偏振方向一致或接近的 BR 分子被激发到中间态,产生光致异构,而电偶极矩与激发光偏振方向垂直的 BR 分子大部分仍处于基态。分子结构的改变导致其折射率和吸收系数发生变化,从而使 BR 薄膜呈现出宏观的光学各向异性。利用抽运-探测法测量了 BR 薄膜的光致双折射特性,并通过 BR 分子光循环的二态模型对实验结果进行了理论模拟。实验与理论计算结果符合较好。

**关键词** 信息光学;光致各向异性;光致双折射;菌紫质

**中图分类号** O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.2045

## Study of Photoinduced Birefringence Characteristics of B-Type and M-Type in Bacteriorhodopsin Film

Han Junhe<sup>1</sup> Yao Baoli<sup>2</sup> Gao Peng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract** The anisotropically absorbing bacteriorhodopsin (BR) molecules can be approximated by linear oscillators. BR film is isotropic in its initial state because of the random distribution of the BR molecules. Upon excitation by a linearly polarized light, those molecules with the dipole moment aligned closed to the polarization direction of the excitation light are dominantly pumped to the intermediate state and produce photoisomerization. However, those with the dipole vector in the perpendicular direction of the pumping beam have a little probability occurring the above change. Due to the change of molecular structure, the refractive index and absorption coefficient of the BR molecules change, then the macroscopic anisotropy was induced as a result. The photoinduced birefringence of the BR film is measured by the orthogonal polarization detection, the experimental results are basically consistent with the simulated results, which are obtained by utilizing the two-state model of BR molecule photocycle.

**Key words** information optics; photoinduced anisotropy; photoinduced birefringence; bacteriorhodopsin

## 1 引 言

由于镶嵌光功能分子的聚合物薄膜具有大的光学非线性、易于优化与设计 and 低的制作成本等特性<sup>[1~3]</sup>,近年来受到人们的广泛关注。光控光功能分子及由此产生的光致各向异性效应在很多光学领域,如光波导<sup>[3]</sup>、模式识别<sup>[4]</sup>、光存储<sup>[5]</sup>、光开关<sup>[6]</sup>、

光学滤波器<sup>[7]</sup>、光功率限制器<sup>[8]</sup>和新事物滤波器<sup>[9]</sup>等有着重要应用。菌紫质(BR)由于具有稳定性好、灵敏度高、响应速度快、空间分辨率高、抗疲劳性好和可擦重写等优点<sup>[1,4,6]</sup>,已成为光子学领域最有应用前景的生物分子材料之一。由于 BR 薄膜的大多数应用都是基于其光致各向异性<sup>[6~8]</sup>,故对其进行

收稿日期: 2009-12-07; 收到修改稿日期: 2010-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(60678023)资助课题。

作者简介: 韩俊鹤(1974—),男,讲师,主要从事光功能材料的特性及应用等方面的研究。E-mail: junhh@henu.edu.cn

深入的理论和实验研究就显得尤为重要。光致各向异性是指某些各向同性的感光介质在线偏振光的诱导下产生二向色性 (Dichroism) 或双折射 (Birefringence) 的现象。光致二向色性和光致双折射分别是指各向同性的感光介质经偏振光诱导而产生的对不同振动方向的线偏振光具有不同的吸收系数和折射率的现象。大多数光致各向异性材料同时具有光致二向色性和光致双折射,只是在一定波长范围内其中一种占主导地位。对 BR 薄膜来说,在其 B 态吸收峰处,光致二向色性占主导地位;在远离吸收峰处,光致双折射占主导地位<sup>[10,11]</sup>。对 BR 薄膜光致各向异性的研究已有很多<sup>[6,10~13]</sup>,但以前的研究主要集中在 BR 薄膜的 B 型光致各向异性,对 BR 薄膜的 M 型光致各向异性的研究很少。Wu 等<sup>[6]</sup>和 Korchemskaya 等<sup>[12]</sup>对 BR 薄膜的 M 型光致各向异性进行了研究,但 Wu 等只对实验结果进行了定性说明,Korchemskaya 等仅研究了 BR 薄膜的光致二向色性。本文从引起 BR 薄膜光致各向异性的物理机制出发,给出了 BR 薄膜光致双折射的理论计算公式,并利用抽运-探测法研究了 BR 薄膜在 632.8 nm 处的光致双折射特性。

## 2 实验装置

实验所用的 BR 薄膜由德国马尔堡 (Marburg) 大学提供,其具体制备过程和吸收特性见文献[14]。

测量光致各向异性的实验装置如图 1 所示。用波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为探测光光源,其光斑直径为 1.8 mm。用波长为 650 nm 和 405 nm 的两个半导体激光器作为激发光光源,其光斑直径分别为 4 mm 和 2 mm。氦氖激光器和两个半导体激光器输出的都是线偏振光。NF1, NF2 和 NF3 为连续可调光衰减器,用来调节探测光和激发光的光强。W 为半波片,用来调节 405 nm 激发光的偏振方向。BR 薄膜置于两个正交的偏振片 P (起偏器) 与 A (检偏器) 之间,P 的透振方向与  $x$  轴平行。功率计用来测量透过两个正交偏振片的探测光。无激发光时, BR 薄膜是各向同性的,探测光不能通过检偏器 A。在线偏振激发光作用下, BR 薄膜呈现出宏观的各向异性,且其光轴方向和激发光的偏振方向相同<sup>[11,12]</sup>。线偏振的探测光经过各向异性的 BR 薄膜后变为椭圆偏振光,因此会有一部分探测光通过检偏器 A 到达功率计,且探测光的透射率与 BR 薄膜的各向异性有关。

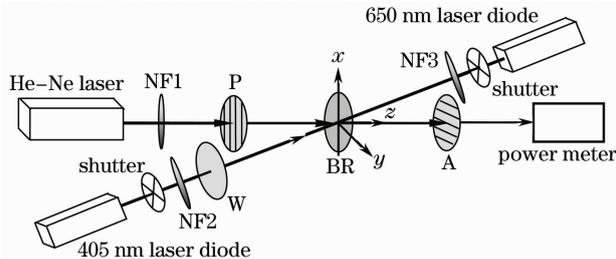


图 1 测量光致双折射的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for measurement of photoinduced birefringence

偏器) 之间,P 的透振方向与  $x$  轴平行。功率计用来测量透过两个正交偏振片的探测光。无激发光时, BR 薄膜是各向同性的,探测光不能通过检偏器 A。在线偏振激发光作用下, BR 薄膜呈现出宏观的各向异性,且其光轴方向和激发光的偏振方向相同<sup>[11,12]</sup>。线偏振的探测光经过各向异性的 BR 薄膜后变为椭圆偏振光,因此会有一部分探测光通过检偏器 A 到达功率计,且探测光的透射率与 BR 薄膜的各向异性有关。

## 3 理论模型

### 3.1 BR 分子光循环的二态模型

BR 分子的光循环是一个十分复杂的生物过程。但在整个光循环中仅有 M 态的寿命较长,故可以忽略其他中间态,把 BR 分子的光循环简化为一个简单的二态模型。二态模型的基态为 B 态,中间态为 M 态。在线偏振光作用下, BR 分子光循环的速率方程<sup>[11]</sup>可以写为

$$\frac{dN_B(\theta)}{dt} = -k_B N_B(\theta) + (k_M + k_r) N_M(\theta), \quad (1)$$

且有

$$N_B(\theta) + N_M(\theta) = \frac{N_0}{2\pi}, \quad (2)$$

式中  $k_B$  和  $k_M$  分别为 B 态和 M 态的光反应速率,  $k_r$  为 M 态的热弛豫速率,  $\theta$  为分子偶极矩方向与  $x$  轴之间的夹角,  $N_B(\theta)$  和  $N_M(\theta)$  分别为分子偶极矩沿  $\theta$  方向取向的 B 态和 M 态分子数密度,  $N_0$  为 BR 薄膜中光活性 BR 分子数密度。由于实验时探测光强  $I_d$  远小于激发光强  $I_e$ , 故可以忽略探测光对分子数密度分布的影响。此时, B 态和 M 态分子的光反应速率为

$$\begin{cases} k_B(\theta) = \frac{\lambda_e I_e \sigma_e^B(\theta) \phi_B}{hc}, \\ k_M(\theta) = \frac{\lambda_e I_e \sigma_e^M(\theta) \phi_M}{hc}, \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\lambda_e$  为激发光波长,  $\sigma_e^B$  和  $\sigma_e^M$  分别为 B 态和 M 态分子对线偏振激发光的吸收截面,  $\phi_B$  和  $\phi_M$  分别为 B 态和 M 态的量子效率,  $c$  为真空中的光速,  $h$  为普朗克常数。BR 分子对线偏振光的吸收截面<sup>[12]</sup>可以表示为

$$\sigma^i(\theta) = \sigma_{\parallel}^i \cos^2 \theta + \sigma_{\perp}^i \sin^2 \theta = \sigma_{\parallel}^i (\cos^2 \theta + \beta_i \sin^2 \theta), \quad (4)$$

式中  $i$  表示 B 态或 M 态,  $\sigma_{\parallel}$  和  $\sigma_{\perp}$  分别为分子偶极矩方向平行和垂直于激发光偏振方向的 BR 分子对

激发光的吸收截面,  $\beta = \sigma_{\perp} / \sigma_{\parallel}$  为分子偶极矩方向垂直与平行于激发光偏振方向的吸收截面之比。

假设光照前所有 BR 分子都处于 B 态, 即  $N_B(\theta)|_{t=0} = N_0 / (2\pi)$ ,  $N_M(\theta)|_{t=0} = 0$ 。则在一定的激发光强下, BR 分子在 B 态和 M 态之间达到动态平衡, 即稳定状态时, (1) 式的解为

$$N_B(\theta) = \frac{N_0}{2\pi} \left( \frac{k_M + k_r}{k} \right), \quad (5)$$

式中  $k = k_B + k_M + k_r$ 。把(3)和(4)式代入(5)式, 整理可得

$$N_B(\theta) = \frac{N_0}{2\pi} \frac{F \cos 2\theta + E}{H \cos 2\theta + G}, \quad (6)$$

式中  $F = al(1 - \beta_M)$ ,  $E = al + al\beta_M + 2$ ,  $H = a(1 + l - \beta_B - \beta_M) + 2$ ,  $G = a(1 + l + \beta_B + \beta_M) + 2$ ,  $a = \sigma_{\parallel}^B \phi_B \lambda_c I_c / (hck_r)$ ,  $l = \sigma_{\parallel}^M \phi_M / (\sigma_{\parallel}^B \phi_B)$ 。

### 3.2 BR 薄膜光致各向异性的物理机制

为了阐明 BR 薄膜产生光致各向异性的物理机制, 需要考虑 BR 分子在线偏振光作用下的光物理过程。BR 分子是各向异性分子, 它对线偏振光的吸收具有选择性。BR 薄膜是由大量随机取向的 BR 分子镶嵌在聚乙烯醇(PVA)薄膜中构成的。无偏振光照射时, BR 薄膜呈现出宏观的光学各向同性。但在位于 BR 分子 B 态吸收带的线偏振光作用下, 分子偶极矩取向与光场方向一致或接近的分子吸收光, 被激发到 M 态并不断积累; 而偶极矩取向与激发光的偏振方向垂直的 B 态分子大部分仍处于 B 态。这导致不同取向的 BR 分子在 B 态和 M 态的不均匀分布, 从而使 BR 薄膜呈现出宏观的各向异性, 这称为 BR 的 B 型光致各向异性。反之, M 态分子被激发至 B 态, 产生的各向异性, 称之为 BR 的 M 型光致各向异性。若同时使用两束可以分别引起 B 态到 M 态和 M 态到 B 态转换的线偏振光激

发, 则产生 B 型和 M 型的混合型光致各向异性, 即 B-M 型光致各向异性。

实验所用的 BR 薄膜在探测光波长(632.8 nm)处光致双折射占主导地位, 光致二向色性可以忽略<sup>[10,11]</sup>。根据文献[10], BR 薄膜的光致双折射与分子数密度分布之间满足

$$\Delta n = C_0 \int_0^{2\pi} N_B(\theta) (|\cos \theta| - |\sin \theta|) / N_0 d\theta, \quad (7)$$

式中  $C_0$  为分子数密度分布与光致双折射之间的比例因子。把(6)式代入(7)式并进行整理, 可以得到 BR 薄膜光致双折射的解析表达式为

$$\Delta n = \frac{2\sqrt{2}C_0(HE - FG)}{H\sqrt{(G^2 - H^2)H}} \times \left[ \sqrt{G - H} \operatorname{artanh} \frac{\sqrt{2H}}{\sqrt{G + H}} - \sqrt{G + H} \operatorname{arctan} \frac{\sqrt{2H}}{\sqrt{G - H}} \right], \quad (8)$$

利用(8)式可以从理论上计算激发光强对 BR 薄膜光致双折射的影响, 这对深入了解 BR 薄膜的光致双折射特性有很大帮助, 也对光致双折射的各种应用中选取合适的激发光强具有很好的指导作用。

### 3.3 光致双折射的测量

测量 BR 薄膜光致双折射的实验装置如图 1 所示。将 BR 薄膜置于正交的偏振片 P 和 A 之间, 并使起偏器 P 的透振方向与  $x$  轴平行。650 nm 的线偏振激发光的偏振方向与  $x$  轴之间的夹角  $\varphi = 45^\circ$ 。在 650 nm 的线偏振光作用下, BR 薄膜呈现出宏观的光学各向异性。由于探测光(632.8 nm)远离 B 态吸收峰, 光致双折射占主导地位, 光致二向色性对光致各向异性的贡献可以忽略。此时, 各向异性 BR 薄膜的 Jones 矩阵<sup>[15]</sup>(在  $xoy$  坐标系中)可以表示为

$$\mathbf{M} = \frac{t_{BR}}{2} \begin{bmatrix} \exp(ikn_{\parallel} d) + \exp(ikn_{\perp} d) & \exp(ikn_{\parallel} d) - \exp(ikn_{\perp} d) \\ \exp(ikn_{\parallel} d) - \exp(ikn_{\perp} d) & \exp(ikn_{\parallel} d) + \exp(ikn_{\perp} d) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中  $k = 2\pi / \lambda_D$ ,  $\lambda_D$  为探测光波长;  $t_{BR}$  为 BR 薄膜在探测光波长处的振幅透射率。探测光经过 P-BR-A 系统后, 其光场  $\mathbf{E}_{P-BR-A}$  为

$$\mathbf{E}_{P-BR-A} = \frac{t_{BR} t_P t_A E_0}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ \exp(ikn_{\parallel} d) - \exp(ikn_{\perp} d) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中  $t_P$  和  $t_A$  分别为起偏器 P 和检偏器 A 的振幅透射率,  $E_0$  为探测光在 P-BR-A 系统入射面处的振

幅。由(10)式可得 P-BR-A 系统的透射率  $T_{P-BR-A}$  为

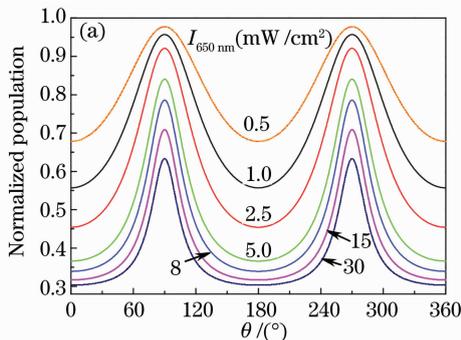
$$T_{P-BR-A} = (t_{BR} t_P t_A)^2 \sin^2 \left( \frac{\pi d}{\lambda} \Delta n \right), \quad (11)$$

式中  $\Delta n = n_{\perp} - n_{\parallel}$ 。利用(8)式和(11)式, 可以从理论上计算线偏振光作用下 P-BR-A 系统的透射率。当然, 也可以利用实验测得的透射率计算光致双折射的大小。

## 4 结果与分析

### 4.1 B型光致双折射

测量 BR 薄膜的 B 型光致双折射时,关闭 405 nm 的激发光。在不同激发光强(650 nm)下,测量了 BR 薄膜在 632.8 nm 处的稳态光致双折射,实验结果如图 2(圆点)所示。从图 2 可以看出,无激发光时,光致双折射为零,即 BR 薄膜是各向同性的。在 650 nm 的线偏振激发光作用下,BR 薄膜呈现出光致各向异性。激发光强较小时,BR 薄膜的光致双折射随激发光强的增大而增大;当激发光强达到  $5 \text{ mW/cm}^2$  时,光致双折射达到最大值;继续增大激发光强时,光致双折射随激发光强的增大反而逐渐减小。上述实验现象可以这样解释:由于 BR 薄膜的光致双折射是由不同取向的 BR 分子在 B 态和 M 态的不均匀分布引起的,而这种不均匀分布源自 BR 分子对线偏振激发光的选择性吸收。当激发光强较弱时,不同取向的 BR 分子在 B 态和 M 态的不均匀分布随激发光强的增大而增大(如图 3 所示),故光致双折射也随激发光强的增大而增大;当激发光强达到  $5 \text{ mW/cm}^2$  时,偶极矩取向与光场方向一致或接近的 B 态分子的吸收先达到饱和,此时 BR 分子在 B 态和 M 态的不均匀分



布达到最大,光致双折射也达到最大值;继续增大激发光强时,沿其他方向取向的 B 态分子的吸收也趋于饱和,此时分子在 B 态和 M 态的不均匀分布随光强的增大反而减小(如图 3 所示),光致双折射也随激发光强的增大逐渐减小。图 3 是利用(6)式计算得到沿不同方向取向的 B 态分子数随激发光强的变化曲线。理论计算时,各个参数的取值为  $\sigma_{\parallel}^{\text{B}}(650 \text{ nm}) = 2.48 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ ,  $\sigma_{\parallel}^{\text{M}}(405 \text{ nm}) = 1.75 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ ,  $\beta_{\text{B}} = 0.04$ ,  $\beta_{\text{M}} = 0.11$ ,  $C_0 = -3.40 \times 10^{-4}$ ,  $\phi_{\text{B}} = 0.64$ ,  $\phi_{\text{M}} = 0.64$ ,  $k_{\text{r}} = 0.029 \text{ s}^{-1}$ 。

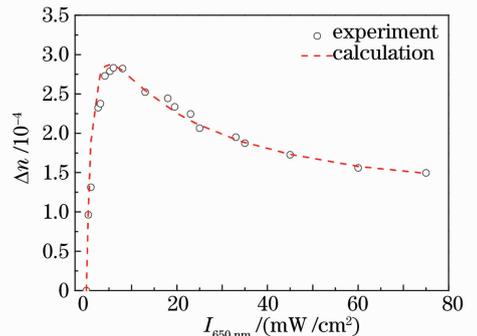


图 2 B 型光致双折射随 650 nm 激发光强的变化  
Fig. 2 Change of photoinduced birefringence of B type with intensity of 650 nm pumping beam

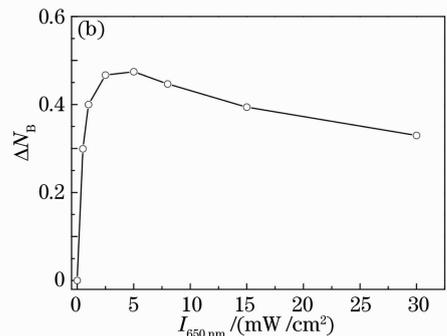


图 3 计算得到沿不同方向取向的 B 态分子数随激发光强的变化曲线。(a)归一化 B 态分子数分布;  
(b)  $N_{\text{B}}(\theta)$  的最大值与最小值之差

Fig. 3 Calculated population orientation distributions along any direction with the intensity of 650 nm pumping beam.

(a) normalized population distributions of molecules in B-state; (b) difference between the maximum and minimum of  $N_{\text{B}}(\theta)$

利用(8)式和(11)式模拟了 BR 薄膜的 B 型光致双折射随 650 nm 激发光光强变化规律,模拟结果如图 2(虚线)所示。从图 2 可以看出,理论模拟结果和实验结果是一致的。这表明从 BR 分子对线偏振光的选择性吸收特性出发,结合其光循环的二态简化模型可以很好地解释 BR 薄膜的光致双折射现象。

### 4.2 M型光致双折射

测量 BR 薄膜的 M 型光致双折射时,在 650 nm 激发光的光路上加入一个  $\lambda/4$  波片(650 nm),把 650 nm 的线偏振光变为圆偏振光。在 650 nm 的圆

偏振激发光的作用下,处于 B 态的 BR 分子被激发到 M 态,且沿不同方向取向的 B 态分子被激发到 M 态的几率相同,所以 B 态和 M 态分子沿各个方向的取向是均匀的,因此不产生光致各向异性。若在 650 nm 圆偏振激发光作用的同时,引入 405 nm 的线偏振激发光(偏振方向与  $x$  轴的夹角为  $45^\circ$ ),405 nm 的线偏振光引起 M 态分子向 B 态跃迁,且沿不同方向取向的 M 态分子的跃迁几率不同,这导致 B 态和 M 态分子数密度的不均匀分布,产生 M 型光致各向异性。在  $25 \text{ mW/cm}^2$  的 650 nm 圆偏振激

发光作用下,测量了 BR 薄膜的 M 型光致双折射随 405 nm 的激发光光强的变化,实验结果如图 4 所示(圆点)。对应的理论计算结果在图 4 中以实线给出。从图 4 可以看出:1)理论计算结果和实验是一致的;2)BR 薄膜的 M 型光致双折射和 B 型光致双折射具有相似的变化规律,但 M 型光致双折射的最大值比 B 型的小。

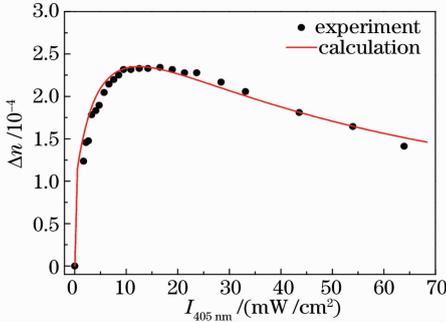


图 4 M 型光致双折射随 405 nm 激发光光强的变化  
Fig. 4 Change of photoinduced birefringence of M type with intensity of 405 nm pumping beam

### 4.3 B-M 型光致双折射

650 nm 的线偏振激发光可以引起 B 态 BR 分子向 M 态跃迁,产生 B 型光致双折射;405 nm 的线偏振激发光则可以引起 M 态分子向 B 态跃迁,产生 M 型光致双折射;若同时使用 650 nm 和 405 nm 的线偏振激发光,则产生 B-M 型光致各向异性。为了深入了解 BR 薄膜的 B-M 型光致双折射,分别测量了紫光(405 nm)光强和偏振取向对 BR 薄膜光致双折射的影响。测量时 650 nm 线偏振激发光的光强为 25 mW/cm<sup>2</sup>,实验结果如图 5 所示。图 5 中,实心圆点表示 405 nm 和 650 nm 的激发光的偏振方向相

互垂直,空心圆点表示 405 nm 和 650 nm 的激发光的偏振方向相互平行,对应的曲线是理论计算的结果。从图 5 可以看出,当 405 nm 和 650 nm 激发光的偏振方向相互垂直时,BR 薄膜的光致双折射显著增强,且存在一个最佳的 405 nm 激发光光强,使 BR 膜的光致双折射达到最大值;而二者的偏振方向相互平行时,BR 薄膜的光致双折射被明显抑制,且紫光光强越大抑制越显著。上述实验现象可以这样解释:当 405 nm 和 650 nm 激发光的偏振方向相互平行时,405 nm 激发光引起分子偶极矩取向与其偏振方向平行的 M 态分子快速地返回 B 态,而对偶极矩的取向与其偏振方向垂直的 M 态分子的影响却很小。这削弱了 B 态和 M 态分子取向分布的不均匀性[6(b)],因此抑制了 BR 薄膜的光致各向异性。当 405 nm 和 650 nm 激发光的偏振方向相互垂直时,405 nm 激发光引起偶极矩的取向平行于其偏振方向的 M 态分子快速地返回 B 态,而对偶极矩的取向垂直于其偏振方向的 M 态分子的影响却很小。

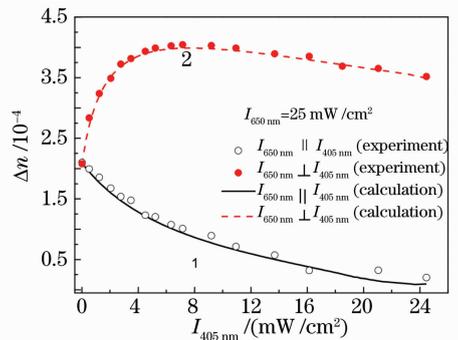


图 5 405 nm 激发光对光致双折射的影响  
Fig. 5 Influence of 405 nm pumping beam on photoinduced birefringence

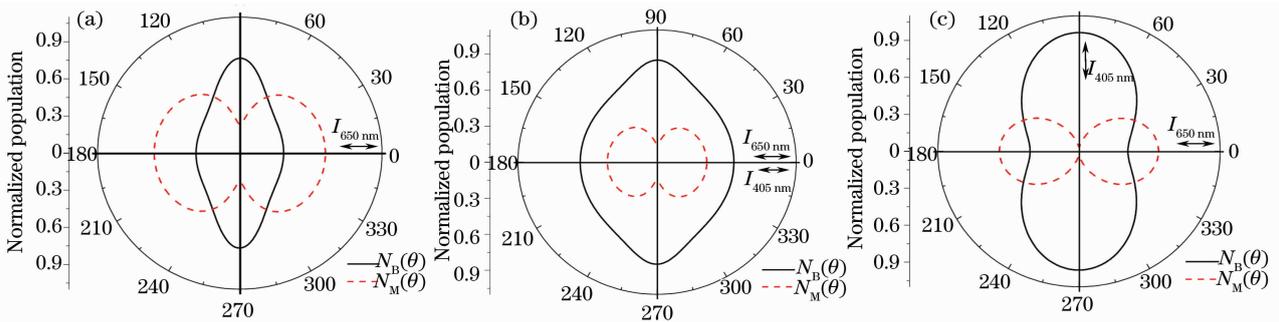


图 6 405 nm 激发光对不同取向 BR 分子数密度的影响( $I_{650\text{ nm}}=25\text{ mW/cm}^2$ ,  $I_{405\text{ nm}}=5.1\text{ mW/cm}^2$ ). (a)  $I_{650\text{ nm}}$ ; (b)  $I_{650\text{ nm}} \parallel I_{405\text{ nm}}$ ; (c)  $I_{650\text{ nm}} \perp I_{405\text{ nm}}$

Fig. 6 Influence of the 405 nm pumping beam on the population density distribution of BR molecules.  $I_{650\text{ nm}}=25\text{ mW/cm}^2$ ,  $I_{405\text{ nm}}=5.1\text{ mW/cm}^2$ . excited (a) by 650 nm pumping beam, (b) by 650 nm and 405 nm pumping beams with mutually parallel polarizations and (c) by 650 nm and 405 nm pumping beams with mutually perpendicular polarizations

这加剧了 B 态和 M 态分子取向分布的不均匀性[图 6(c)],因此增强了 BR 薄膜的光致各向异性。图 6 是利用(2)式和(6)式计算得到 B 态和 M 态分子的数密度分布曲线。

## 5 结 论

BR 分子对线偏振光的吸收具有选择性,在线偏振光的照射下,偶极矩沿不同方向取向的 BR 分子对线偏振光的吸收截面不同。这导致 B 态和 M 态 BR 分子的取向分布由均匀变为非均匀,使 BR 薄膜呈现出宏观的各向异性。根据 BR 分子的特性,利用 BR 分子光循环的二态简化模型可以得到分子的取向分布。根据 B 态分子的取向分布可以从理论上计算 BR 薄膜的 B 型, M 型及 B-M 型光致双折射。理论计算结果和利用抽运-探测方法测得 BR 薄膜的 B 型, M 型及 B-M 型光致双折射是一致的。

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

## 参 考 文 献

- 1 N. Hampp. Bacteriorhodopsin as a photochromic retinal protein for optical memories [J]. *Chem. Rev.*, 2000, **100**(5): 1755~1776
- 2 Xiao Yong, Wang Sulian, Tang Daoguang *et al.*. Holographic characteristics of the photopolymer sensitized by four photosensitizers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 928~933  
肖 勇, 王素莲, 唐道广等. 四种光敏剂共敏化光致聚合物的全息性能研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 928~933
- 3 S. A. Jewell, J. R. Sambles, J. W. Goodby *et al.*. Optical waveguide characterization of a tristable antiferroelectric liquid crystal cell [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(5): 2246~2249
- 4 N. Hampp, R. Thoma, D. Oesterhelt *et al.*. Biological photochrome bacteriorhodopsin and its genetic variant Asp96 to Asn as media for optical pattern recognition[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(11): 1834~1841
- 5 Duan Xiaoya, Zhu Jianhua, Wei Tao *et al.*. Recipe optimization and holographic storage characteristics of green sensitive polyvinyl alcohol/acrylamide-based photopolymer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 983~988  
段晓亚, 朱建华, 魏 涛等. 绿敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物的配方优化及全息存储特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 983~988
- 6 P. Wu, D. V. Rao, B. R. Kimball *et al.*. Enhancement of photoinduced anisotropy and all-optical switching in bacteriorhodopsin films[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(20): 3888~3890
- 7 J. Khoury, C. L. Woods, G. Cronin. Photorefractive holographic interference novelty filter [J]. *Opt. Commun.*, 1991, **82**: 533~538
- 8 G. E. Dovgalenko, M. Klotz, G. J. Salamo. Optically induced birefringence in bacteriorhodopsin as an optical limiter [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(3): 287~289
- 9 Yang Guang, Chen Guiying, Qi Shengwen *et al.*. Simulation of effect of non-uniform input image on characteristics of output image of optical novelty filter based bacteriorhodopsin film [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(12): 6954~6960  
杨 光, 陈桂英, 祁胜文等. 非均匀输入图像对基于细菌视紫红质膜的新事物滤波器输出特性的数值模拟[J]. *物理学报*, 2007, **56**(12): 6954~6960
- 10 T. Juchem, M. Sanio, N. Hampp. Bacteriorhodopsin modules for data processing with incoherent light [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(18): 1607~1609
- 11 Y. Huang, G. Siganakis, M. G. Moharam *et al.*. Broadband optical limiter based on nonlinear photoinduced anisotropy in bacteriorhodopsin film[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(22): 5445~5447
- 12 E. Korchemskaya, D. Stepanchikov, A. Druzhenko *et al.*. Mechanism of nonlinear photoinduced anisotropy in bacteriorhodopsin and its derivatives [J]. *J. Biol. Phys.*, 1999, **24**(2-4): 201~215
- 13 Han Junhe, Yao Baoli, Gao Peng *et al.*. Theoretical and experimental studies on kinetics of photoinduced anisotropy of bacteriorhodopsin[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 2010~2014  
韩俊鹤, 姚保利, 郜 鹏等. 菌紫质光致各向异性动力学的理论和实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 2010~2014
- 14 Han Junhe, Yao Baoli, 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**(4): 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**(4): 2199~2204
- 15 I. Scierski, F. Ratajczyk. The Jones matrix of the real dichroic elliptic object [J]. *Optik (Stuttgart)*, 1984, **68**(2): 121~125