

# 细菌视紫红质的自衍射效率与最佳入射角研究\*

王刚志<sup>1,2</sup> 陈桂英<sup>5</sup> 袁义哲<sup>2</sup> 张春平<sup>3</sup> 许 棠<sup>3,4</sup> 宋奇望<sup>3</sup>

(1 天津大学, 天津 300072)

(2 天津科技大学理学院物理部, 天津 300222)

(3 南开大学光子学中心, 天津 300074)

(4 湛江师范学院测量中心, 广东湛江 524048)

(5 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境动力学重点实验室, 广州 510301)

**摘 要** 研究了弱光强下细菌视紫红质膜(bR 膜)的自衍射特性. 给出了弱光强下相干光在 bR 膜中产生的振幅光栅光强分布模型, 并用  $y \sin^{\alpha} x$  近似表示透射光强分布, 结果与实验吻合. 给出了不同透射光强  $y$  与指数  $\alpha$  的对应关系. 结果表明, 在 bR 膜及入射光波波长给定的情况下, 入射光强越小, 对应的  $\alpha$  值越大, 当入射光强为  $0.072/T(\text{mW}/\text{cm}^2)$  时,  $\alpha$  等于 1. 计算出不同入射光强和入射角下的自衍射效率. 结果发现, 对应于最大衍射效率的最佳入射角为  $2^{\circ}$ .

**关键词** 自衍射; 细菌视紫红质(bR); 衍射效率; 最佳入射角

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

## 0 引言

在非线性材料中两波混合的研究和应用已经非常广泛, 例如在信息处理领域, 光逻辑和光计算领域的应用<sup>[1]</sup>. 当两束相干光在非线性材料中以小角度耦合时, 由于这两束光形成的光栅对它们本身产生衍射, 称为自衍射. 自衍射和光的非线性特性密切相关, 非常具有研究价值<sup>[2]</sup>. 对饱和状态下衍射的研究, 主要用正弦光栅理论进行理论研究. 对于弱光下的自衍射, 由于 bR 膜具有明显的饱和吸收特性, 由 bR 膜透射率与光强的关系(入射光波长为 632.8 nm), 可知当入射光强较小时, bR 膜的吸收系数变化与入射光强呈非线性关系. 本文给出了振幅光栅光强分布模型, 用非正弦型光栅理论描写 bR 膜中的位相光栅, 理论模拟了一阶衍射效率随入射角度的变化规律, 从而选出最佳入射角.

## 1 bR 膜的吸收特性及不同光强下的光强分布

细菌视紫红质(bacteriorhodopsin, bR)是一种生物光色材料<sup>[3]</sup>, 光照时, 处于基态的 bR 分子吸收光子后发生异构化, 经过一系列中间态, 完成一次光循环<sup>[4]</sup>. 在光的激励下, 中间态上总保留着一定数目的分子, 而这些中间态的吸收系数及折射率与基态是不同的. 因此, 在光照下, bR 膜的吸收系数和折射率均发生改变. 光致吸收系数变化和光致折射率变化与入射光的波长<sup>[5]</sup>及入射光强都有关. 在单

频光照射下, bR 膜表现出较强的非线性饱和吸收特性<sup>[6~8]</sup>, 在两束相干光照射下, bR 膜会形成吸收光栅<sup>[9]</sup>. 实验测量出 bR 膜的透射特性如图 1.

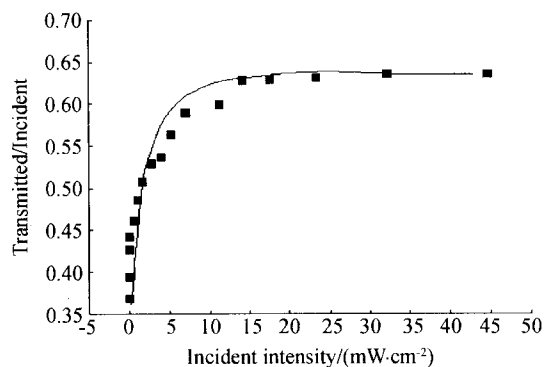


图 1 bR 膜的透射特性随入射光强的变化  
Fig. 1 The transmittance of bR film as a function of incident intensity

实验在室温下进行, 所用 bR 膜的光密度(570 nm)为 0.64, 激发态 M 的寿命为 5 s, bR 膜的厚度约为  $200 \mu\text{m}$ , 膜的浓度为  $0.003 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 以 He-Ne 激光器为光源. 当光强较小时(入射光强小于  $0.7 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ), 其透射率与光强近似于线性, 但通过对小光强的透射特性曲线进行分析, 无论光强多小, 其透射率与光强都不为线性关系. 如果将两束具有相同偏振方向的偏振光同时入射到 bR 膜上, 两束光在 bR 膜中相干并形成干涉条纹, 条纹的光强分布是正弦调制的, 在这一干涉条纹光强的照射下, 其透过 bR 膜的光强按照透射率的关系去调制. 调制后的干涉条纹的光强不再是正弦分布. 因为对小光强其透射率小, 对大光强其透射率大. 饱和时透射率基本不变. 图 2 为不同光强下实验数据和模拟光强的分布图. 图中“o”为实验数据, 实线为模拟数据, 虚线为对应光强的正弦分布. 图 2 中的(a)~(d)分别对应于呈正

\*国家自然科学基金(60578020)及广东省自然科学基金资助(04011427)

Tel: 022-60601210 Email: wj\_yan@tust.edu.cn

收稿日期: 2005-11-01

弦分布的入射光(虚线)透射过 bR 膜后最大透射光强为  $0.01 \text{ mW/cm}^2, 0.0107 \text{ mW/cm}^2, 0.028 \text{ mW/cm}^2, 0.059 \text{ mW/cm}^2$  正弦分布的改变(曲线 o). 用  $y\sin^\alpha x$  进行拟合实验数据,  $y$  不同, 对应的  $\alpha$  值也不同, (a)~(d) 各图中实线为模拟数据. 从图中可知, 拟合数据与实验数据很接近, 因此, 正弦分布的入射光经过 bR 膜后的透射光强分布可用  $y\sin^\alpha x$  近似表示. 从图(a)可知, 当正弦分布的入射

光强为  $0.01/T(\text{mW/cm}^2)$  时( $T$  为透射率), 其正弦调制的光强分布经过 bR 膜后不再是正弦结构, 而是用  $0.01\sin^2 x$ (实线)代替正弦(虚线), 更接近实验值. 在图(b)~(d)中, 对应的入射光强分别为  $0.0107/T(\text{mW/cm}^2), 0.028/T(\text{mW/cm}^2)$  和  $0.059/T(\text{mW/cm}^2)$  经 bR 膜透射后, 分布分别用  $0.0107\sin^{1.95}(x), 0.028\sin^{1.8}(x)$  和  $0.059\sin^{1.65}(x)$  公式拟合. 由图可见, 拟合结果与实验值非常接近.

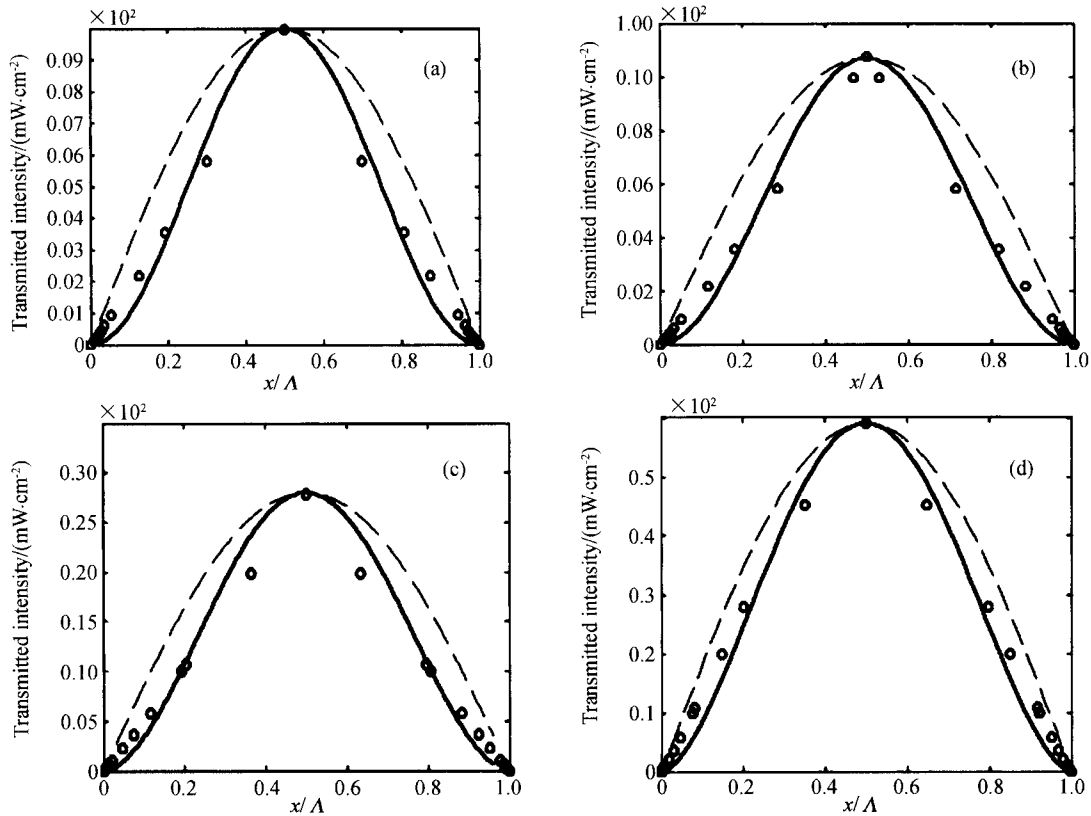


图 2 不同照射光强下的 bR 膜透射光强按光栅间隔的分布

Fig. 2 Distribution of transmitted intensity of bR film on grating space in different incident intensities

图 3 为不同透射光强  $y$  与指数  $\alpha$  的对应关系. 从图中可知, 光强越小, 对应的  $\alpha$  值越大, 随着入射光强的增加,  $\alpha$  值减小. 当入射光强为  $0.072/T(\text{mW/cm}^2)$  时,  $\alpha=1$ , 即当正弦分布的入射光强为  $0.072/T(\text{mW/cm}^2)$  时, 透射光强的分布也为正弦分布, 正

弦调制的光强分布透射后仍为正弦结构. 当入射光强进一步增大时, 由于透射率增长缓慢, 所以透射光强分布由接近正弦慢慢变为平坦, 出现饱和, 到逐渐加深饱和程度, 直到深度饱和. 能否出现完全饱和, 则取决于入射光光强及入射光的波长<sup>[10,11]</sup>.

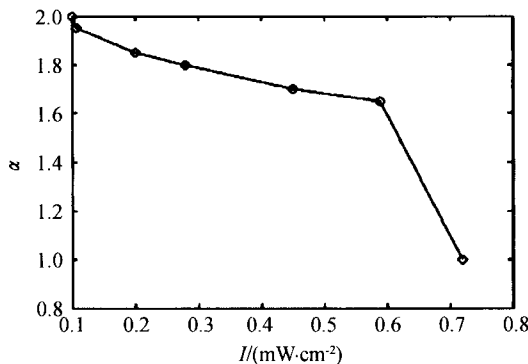


图 3 透射光强与指数  $\alpha$  的对应关系

Fig. 3 The factor of  $\alpha$  as a function of transmitted intensity

## 2 衍射效率与光强分布的关系

衍射效率可由公式<sup>[12]</sup>

$$I_m = I_{in} T \{ J_m^2[\phi] + J_{m+1}^2[\phi] \} \quad (1)$$

求出, 这里  $J_m$  和  $J_{m+1}$  是贝塞尔函数,  $I_{in}$  是入射光强,  $T$  是样品的透射率, 及

$$\phi = \frac{2n_1 k_0 L \sin(2^{-1} KL \tan \theta_0)}{\cos \theta_0} \quad (2)$$

式中  $\theta_0$  是在样品内的入射角,  $k_0 = 2\pi n_0 / \lambda_0$ ,  $\lambda_0$  是在真空中的波长,  $L$  是样品的厚度.  $K = \frac{2\pi}{\Lambda}$ ,  $\Lambda$  是光栅

间隔

$$n_1 = \frac{(n^2 + 2)^2}{6000n} \frac{k_1}{k_1 + k_t} \frac{iOD(570)}{\epsilon_1(570)L} \Delta R \quad (3)$$

$n$  是 bR 膜的线性折射率,  $iOD$  是 bR 膜在波长 570 nm 的光密度, 这里  $\Delta R = R_1 - R_2$  可以从测量的折射率变化及吸收变化得出, 或用 Kramer-Kronig 变换得出折射率的变化, 以及从 bR 膜吸收谱<sup>[13]</sup> 得出. 若  $\tau$  是 bR 分子在  $M$  态的寿命, 则  $k_t = k_3 = \frac{1}{\tau}$ ,  $k_1 (B \rightarrow M)$  和  $k_2 (M \rightarrow B)$  分别是光化学速率常量, 计算时所用消光系数为  $\epsilon_1(632.8 \text{ nm}) = 15000$ ,  $\phi_1 = 0.64$ ,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ,  $m$  阶的衍射效率为

$$\eta_m = I_m / I_{in} \quad (4)$$

计算和测量的 bR 膜的透射率<sup>[14~16]</sup>  $T(I)$  随着入射光强的增加而增加. 入射光强  $I_{in}$  透过 bR 膜的光强变为  $I = T(I) I_{in} = I_{in} \sin^2 x$ . 因此, 在干涉场中的光强分布为

$$I = I_{in} \sin^2(-Ky - KL \tan \theta_0) \quad (5)$$

所以折射率可以表示为

$$n(y, z) = n_0 + n'_1 [\sin^2(-Ky - KL \tan \theta_0)] \quad (6)$$

$n'_1$  是折射率系数. 从图 2 可知光栅的形状不是纯正弦而是非正弦的, 从而导致折射率的变化也是非正弦分布. 这可以看成是多个不同周期 ( $\Delta, \Delta/2, \Delta/3 \dots$ ) 的纯正弦的迭加. 由于不同周期的正弦光栅对自衍射都有贡献, 因此, 折射率的各阶谐波对自衍射光强的影响不可以忽略. 式(6)可以用 Fourier 级数表示为

$$n(y, z) = n_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \exp[-iKhy - iKhL \tan \theta_0] \quad (7)$$

这里  $a_h$  是 Fourier 系数, 可由下式求出

$$a_h = \frac{2}{L} \sum_{h=1}^{\infty} n(y, z) \exp[-iKhy - iKhL \tan \theta_0] \quad (8)$$

由式(7)和式(8)得到 Fourier 系数, 然后把它们代入到式(1)和(2)中.

### 3 实验与结果

图 4 为实验示意图, 入射角  $\theta_0 = 3^\circ$ , bR 膜的厚度

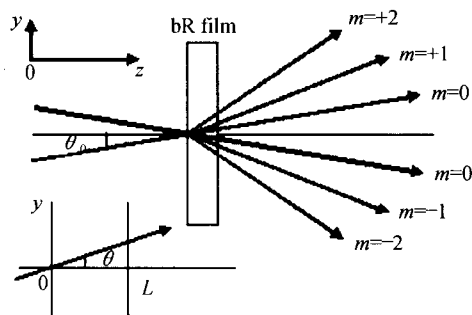


图 4 实验示意  
Fig. 4 Experimental scheme

约为  $200 \mu\text{m}$ ,  $M$  态寿命为 5s, 膜的浓度为  $0.003 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 膜是由美国 Syracuse 大学提供的.

图 5(a) 为测量的一阶衍射效率与入射光强的关系, 曲线  $a$  为  $\eta'_1 = \frac{I_1}{I_0}$ ,  $I_0 = I_{in} T$ ,  $T$  为透射率, 曲线  $b$  为  $\eta = I_1 / I_{in}$ . 图 5(b) 是计算的一阶衍射效率与入射光强的关系. 由于建模时充分考虑了透射率对光栅分布的改变, 因此, 用  $y \sin^2 x$  近似表示小光强 (小于  $0.7 \text{ mW/cm}^2$ ) 透过 bR 膜后干射光强的分布是接近实际的, 是合理的. 对于入射光强大于等于  $0.7 \text{ mW/cm}^2$ , 干射光强的分布用正弦分布近似.

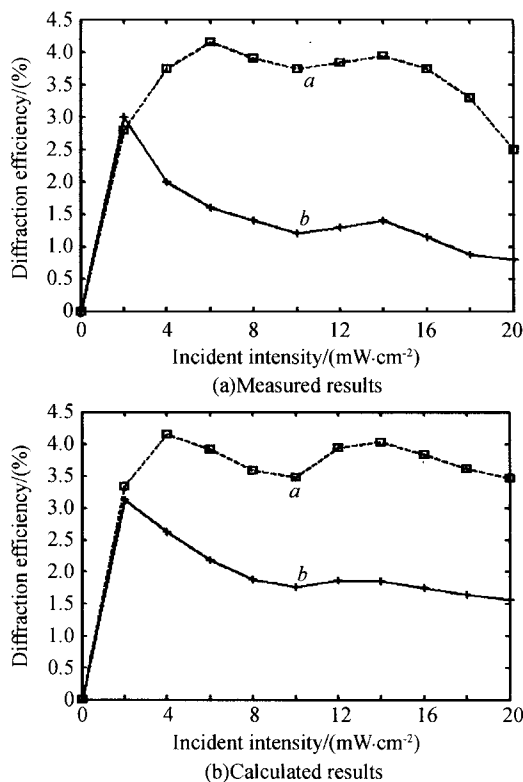


图 5 衍射效率与入射光强的关系  
Fig. 5 Relationship of diffraction efficiency and incident intensity

图 5 可见, 计算结果与实验结果很接近. 尤其是小光强, 计算结果更准确. 图 6 是在不同入射角

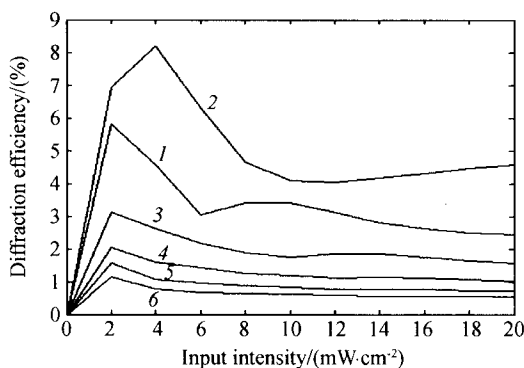


图 6 衍射效率随入射光强及入射光夹角的变化  
Fig. 6 Diffraction efficiencies as a function of incident intensities for different incident angles

下,一阶衍射效率随入射光强变化的模拟图. 图中曲线 1,2,3,4,5 和 6 分别对应于入射角为  $1^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$  和  $6^\circ$ .

#### 4 结论

研究了在弱光强下(小于  $0.7 \text{ mW/cm}^2$ ),相干光在 bR 膜中产生的振幅光栅光强分布模型. 用  $y \sin^2 x$  近似表示透射光强分布,并给出了不同透射光强  $y$  与指数  $\alpha$  的对应关系. 由于透射光强与 bR 膜的参量(消光系数,光密度,分子浓度, M 态寿命等)、入射光强及波长有关,所以,  $y$  与指数  $\alpha$  的对应关系也依赖于 bR 膜的参量,入射光强及波长. 基于振幅光栅光强分布模型还计算出了在不同入射角下的自衍射效率. 计算结果与实验结果符合较好. 计算发现对应于最大衍射效率的最佳入射角为  $2^\circ$ . 当  $\theta_0 < 2^\circ$  时,衍射效率随着入射角增大而增大,当  $\theta_0 = 2^\circ$  时,自衍射效率最大,当  $\theta_0 > 2^\circ$  时,衍射效率开始减小.

#### 参考文献

- 1 刘伟民,陈烽,杨青,等. 细菌视紫红质高分辨图象存储中吸收和散射现象的实验研究. *光子学报*,2002,**31**(1): 1~5  
Liu W M, Chen F, Yang Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002,**31**(1):1~5
- 2 李霞,侯洵,姚保利,等. 聚对苯撑乙烯衍生物/氯仿溶液的自衍射及光限幅特性的研究. *光子学报*,2004,**33**(5): 549~552  
Li X, Hou X, Yao B L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004,**33**(5):549~552
- 3 郑媛,姚保利,王英利,等. 光致变色菌紫质薄膜的动态光学响应特性. *光子学报*,2002,**31**(1):10~14  
Zheng Y, Yao B L, Wang Y L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002,**31**(1):10~14
- 4 Oesterhelt D, Stoerkenius W. Rhodopsin-like protein from the purple membrane of *Halobacterium halobium*. *Nature*,1971,**233**(39):149~152
- 5 Birge R R. Photophysics and molecular electronics applications of the rhodopsin. *Annual Review of Physical Chemistry*,1990,**41**:683~733
- 6 Oesterhelt D, Brauchle C, Hampp N. Bacteriorhodopsin: abiological material for information processing. *Quart Rev Biophys*,1991,**24**(4):425~478
- 7 Werner O, Fisher B, Lewis A, *et al.* Saturable absorption wave mixing and phase conjugation with bacteriorhodopsin. *Optics Letters*, 1990, **15**(20):1117~1119
- 8 Thoma R, Hampp N, Brauchle C. Bacteriorhodopsin film as spatial light modulators for nonlinear-optical filtering. *Optics Letters*, 1991,**16**(9):651~653
- 9 Okamoto T, Yamaguchi I, Boothroyd S A, *et al.* Novelty filter that use as bacteriorhodopsin film. *Applied Physics Letters*, 1997,**36**(2):508~511
- 10 Chen Guiying, Zhang Chunping, Shang Xiaodong, *et al.* Real-time intensity dependent all-optical switch of reverse image converter from wavelength to wavelength based on bacteriorhodopsin film. *Optics Communications*, 2005,**249**(4-6):563~568
- 11 Guo Zongxia, Chen Guiying, Zhang Chunping, *et al.* The dynamic characters of self-diffraction in bacteriorhodopsin film. *Chinese Physics Letters*, 2004, **21**(12):2418~2421
- 12 Ghatak A, Thyagarajan K. *Optical Electronics*. Cambridge: Cambridge University press, 1989. 640
- 13 Gross R B, Izgi K C, Birge R R. The potential application of optical phased arrays in two-photon three-dimensional optical memories. *Proc of SPIE*, 1992, **1662**:186~196
- 14 董卫斌,姚保利,门克内木乐,等. 菌紫质薄膜光致折射率变化的理论计算和实验测量. *光子学报*,2005,**34**(4):598~600  
Dong W B, Yao B L, Men KNML, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005,**34**(4):598~600
- 15 Zhang Chunping, Chen Guiying, Song Qiwang, *et al.* Analysis of higher-order self-diffraction of low-power continuous wave based on nonlinear transmission of bR film. *Journal of Modern Optics*, 2004, **51**(2):285~296
- 16 王洪波,陈烽,王伟,等. 细菌视紫红质激发态动力学过程实验与数值分析. *光子学报*,2005,**34**(7):1005~1009  
Wang H B, Chen F, Wang W, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005,**34**(7):1005~1009

## Research on Self-Diffraction Efficiency and the Optimal Incident Angle Based on Bacteriorhodopsin Film

Wang Gangzhi<sup>1,2</sup>, Chen Guiying<sup>5</sup>, Yuan Yizhe<sup>2</sup>, Zhang Chunping<sup>3</sup>, Xu Tang<sup>3,4</sup>, Song Qiwan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Tianjin University, Tianjin 300072

<sup>2</sup> Physics Department in College of Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222

<sup>3</sup> Photonics Research Center, Nankai University, Tianjin 300074

<sup>4</sup> Survey Center, Zhanjiang Normal College, Zhanjiang, Guangdong 524048

<sup>5</sup> Key Laboratory of Tropical Ocean Environmental Dynamics, Institute of Marine of the South China Sea of CAS, Guangzhou 510301

Received date: 2005-11-01

**Abstract** The self-diffraction characteristics of bacteriorhodopsin (bR) film illuminated by weak light were studied. The model describing the distribution of the light intensity of the amplitude grating induced by interference light in bR film under weak light was given, and the distribution of the transmitted light intensity  $y$  from the amplitude grating was described approximately as  $y \sin^{\alpha} x$ , which was in agreement with the experiment. The relationship between  $y$  and  $\alpha$  was obtained, which indicated that giving the wavelength of incident light, the weaker the incident light intensity would become, the bigger  $\alpha$  would get. When the incident light intensity was  $0.072/T$  ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ),  $\alpha$  equaled to 1. From different incident intensities and incident angles, the self-diffraction efficiencies were calculated, from which it could be found that the optimal incident angle was  $2^{\circ}$  corresponding to the maximum diffraction efficiency.

**Keywords** Self-diffraction; Bacteriorhodopsin; Diffraction efficiency; The optimal incident angle



**Wang Gangzhi** was born on November 5, 1965, in Shanxi Province. He received his Master's Degree from Hefei University of Technology. Now he is working in Tianjin University of Science and Technology, and he will receive his Doctor's Degree soon from Tianjin University. He is working in the field of laser and its application.