

细菌视紫红质光学图像存储的灰阶特性研究

杨青^{1,2}, 陈烽³, 张金旺³, 陈涛³, 卿梅³, 侯洵^{2,3}

(1. 西安交通大学先进制造国家重点实验室, 西安 710049; 2. 中国科学院西安光机所瞬态光学技术国家重点实验室, 西安 710068; 3. 西安交通大学电子科学与技术系, 西安 710049)

摘要: 细菌视紫红质 (Bacteriorhodopsin, BR) 是一种具有优良光致变色特性的光敏蛋白分子, 具有极好的抗疲劳性和高的光转换量子效率, 可用于光学图像信息的获取和存储。文章讨论了 BR 分子膜在受到随空间位置变化的光强调制下, BR 分子膜光吸收变化量的空间分布及其与存储图像灰度分布之间的关系; 建立了 BR 灰度图像存储特性实验系统, 并对 BR-D96N 薄膜存储的光学图像灰阶特性进行了实验研究, 实验表明 BR 薄膜图像存储具有出色的灰度表现能力。

关键词: 细菌视紫红质; 图像存储; 灰阶特性

中图分类号: O438

1 引言

光致变色材料属于可擦重写的光学记录介质, 具有不需显影定影且成本低廉的优点, 是一种可用于实时信息获取的优良材料。细菌视紫红质 (Bacteriorhodopsin, BR) 是自然界中发现的具有优良光致变色特性的光敏蛋白分子, 具有极好的抗疲劳性 (循环使用次数大于 100 万次)、高的光转换量子效率 (64%)、宽光谱响应范围 (400~700 nm) 和高空间分辨能力 (~5 000 line/mm)。BR 的光致变色特性已在光信息处理领域中得到了广泛的应用, 如空间滤波^[1]、空间光调制^[2]、位相共轭^[3]以及全息图像存储^[4]等。通过基因工程, 将 BR 分子进行生物改性, 将使其在光信息处理领域中的应用发挥更大的潜力, 如利用定位基因突变法制备的 BR-D85N、BR-D96N 相对于野生材料 (BR-WT) 在信息记录方面具有更加优异的特性^[2,3]等。

BR 分子受到光照时, 分子中生色团迅速发生了从全反到 13 顺的光异构化, 先后形成一系列中间产物, 它们都有不同的吸收光谱、寿命及独特的热稳定性, 并且在其对应的吸收峰波长的光激励下能可逆地通过光化学反应直接返回到 BR 基态。所以可利用中间态和基态做光双稳开关和存储介质。其光循环过程如图 1 所示^[5]。其中, M 态化学、物理性质非常稳定, 吸收峰与基态吸收峰差值大, 寿命相对较长^[6], 很适合做光存储器及其他光学元件^[7,8]。作为图像获取的存储介质不仅需要高的空间分辨率, 有时也需要具备高的灰阶分辨能力。BR

分子膜不仅具有高的空间分辨率 (理论上可达 5 000 line/mm) 且具有较高的灰度分辨率。当采用单色光进行图像记录时, 分子膜的透射系数受到入射光强度的调制, 将可以记录下图像的灰度信息。

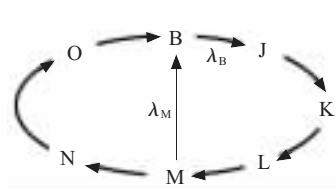


Fig.1 Schematic diagram of Photocycle of Bacteriorhodopsin

文章讨论了 BR 分子膜在受到随空间位置变化的光强调制下, BR 分子膜光吸收变化量的空间分布及其与存储图像灰度分布的关系; 建立了 BR 灰度图像存储特性实验系统, 并对 BR-D96N 薄膜的光学图像存储灰阶特性进行了实验研究, 实验表明 BR 薄膜图像存储具有出色的灰度表现能力。

2 理论分析

由于图像的灰度信息与图像对特定波长的反射系数和透射系数有特定的线性关系, 因此经过图像调制的光, 其光强的空间分布就带有图像的空间灰

收稿日期: 2004-12-27

通讯作者: 杨青, 电话: (029)82668984,

E-mail: yangqing@mail.xjtu.edu.cn

度信息。

假设经图像调制后的光的空间光强分布为 $I_{(x,y)}$ ，再将该光束作用于 BR 分子膜，从而使 BR 分子膜 B 态和 M 态上的分子数形成相应的空间分布，并对应于图像的空间灰度分布。

信息的记录过程：

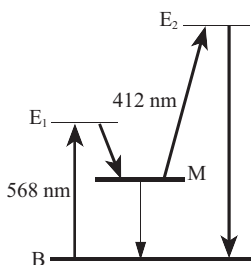


Fig.2 Simplified two energy levels of BR

由于 BR 光循环过程中 M 态是一个寿命较长的中间态，因此忽略其它短寿命的中间态将 BR 光循环模型简化为只包含 B 态和 M 态的如图 2 所示的二能级系统。当 BR 分子膜受到波长为 λ ，强度为 $I_{(x,y)}$ 的光束照射时，有

$$k_{(\lambda, J_{(x,y)})}^{\pm} = \ln 10 \frac{\lambda I_{(x,y)} \phi^{\pm} \epsilon^{\pm}(\lambda)}{N_A h c} \quad (1)$$

其中： $k_{(\lambda, J_{(x,y)})}^{\pm}$ 分别表示正向 ($B \xrightarrow{h\nu} M$ ，用“+”号表示) 和逆向 ($M \xrightarrow{h\nu} B$ ，用“-”号表示) 光化学反应速率常数。 ϵ^{\pm} 分别为样品在该波长作用下 B 态与 M 态的摩尔消光系数， ϕ^{\pm} 分别为正向和逆向光反应的量子效率， N_A 为阿伏加德罗常数， h 为普朗克常量， c 为真空中的光速。将(1)式变形为

$$k_{(\lambda, J_{(x,y)})}^{\pm} = \ln 10 \frac{\lambda \phi^{\pm} \epsilon^{\pm}(\lambda) + \ln I_{(x,y)}}{N_A h c} \quad (2)$$

由此可以看出，在特定光强 λ 的条件下， $k_{(\lambda, J_{(x,y)})}^{\pm}$ 与入射光强 $I_{(x,y)}$ 的对数成线型关系。又因为 B 态分子的摩尔浓度随时间变化的速率方程可表示为：

$$\frac{dN_{B(x,y)}}{dt} = k_{(\lambda, J_{(x,y)})}^{-} N_{M(x,y)} - k_{(\lambda, J_{(x,y)})}^{+} N_{B(x,y)} + k_M N_{M(x,y)} \quad (3)$$

其中 $N_{B(x,y)}$ 、 $N_{M(x,y)}$ 分别为空间位置 (x,y) 处 B 态和 M 态的分子摩尔浓度，且 $N_{B(x,y)} + N_{M(x,y)} = N$ ， N 为 BR 总分子数摩尔浓度。 k_M 为 M 态分子热弛豫速率。上式右端前两项分别表示吸收光时 M 态分子返回 B 态的速率和 B 态分子激发至 M 态的速率，而第三项则表示 M 态分子的热弛豫返回 B 态的速率，可

以看出 B 态分子摩尔浓度的变化会同时受到激发跃迁和热弛豫的影响。当这种变化达到动态平衡时：

$$\frac{dN_{B(x,y)}}{dt} = 0 \quad (4)$$

得到稳态解：

$$\frac{N_{B(x,y)}}{N_{M(x,y)}} = \frac{k_{M(x,y)} + k_{(\lambda, J_{(x,y)})}^{-}}{k_{(\lambda, J_{(x,y)})}^{+}} \quad (5)$$

由(2)式与(3)式可知： $N_{B(x,y)}$ 是 λ 、 $I_{(x,y)}$ 、 t 的函数，若选定激发光波长和激发时间使激发区域达到 B 态、M 态粒子数动态平衡，则 $N_{B(x,y)}$ 只是光强 $I_{(x,y)}$ 的函数，即一定的入射光强决定了一定的 B 态和 M 态的分子摩尔浓度。携带光信息的入射光强的空间分布决定了 B 态和 M 态的分子数的空间分布。这样光信息就被记录在紫膜上。

读出时，当选用波长为 λ' ，强度为 $I_{in(x,y)} = I_i$ 的均匀光照射记录有图像信息的 BR 膜时，透射光强为

$$I_{out(x,y)} = I_{in(x,y)} e^{-\alpha(\lambda, x, y) d(x, y)} \quad (6)$$

其中 $\alpha(x, y)$ 为吸收系数，又因为：

$$\alpha(\lambda, x, y) = \epsilon^{+} N_{B(x,y)} + \epsilon^{-} N_{M(x,y)} \quad (7)$$

因此，吸收系数是 λ 、 $N_{B(x,y)}$ 的函数，又从图 3 中 BR 分子膜基态 (B 态) 和激发态 (M 态) 的吸收光谱可知，B 态和 M 态分子存在较大的差异吸收。因此选择合适的光波长 λ' 使 B 态与 M 态存在大的吸收差异，即尽量使 $|\epsilon^{+} - \epsilon^{-}|$ 增大，则记录信息中 B 态分子数的分布在该波长下表现为较大的吸收系数分布，由此可读出记录于 BR 膜上的图像信息。

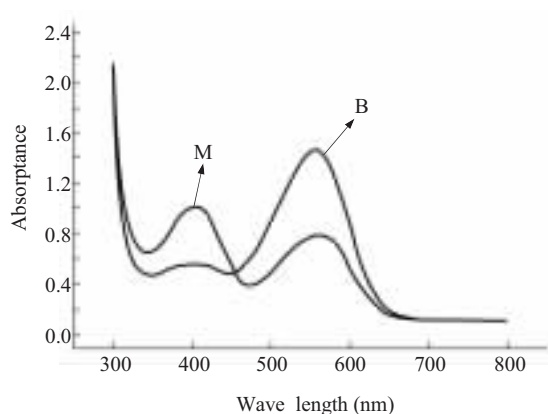


Fig.3 Absorbance spectrums characters of BR before and after exciting

3 实验与讨论

根据图 3 所示 BR 分子膜基态 (B 态) 和激发态 (M 态) 的吸收光谱可知, B 态和 M 态分子存在较大的差异吸收光谱, 实验中所选取的记录光为

半导体激光器产生的 532 nm 的光, 读出光波长为 575 nm, 实验样品为基因修饰的细菌视紫红质 BR-D96N 高分子聚合薄膜 (德国玛堡大学提供), 制备的薄膜尺寸为直径 25 mm, 分子膜厚 d 为 30 μm , 膜层基底为 2 mm 厚的光学玻璃。实验装置如图 4 所示。

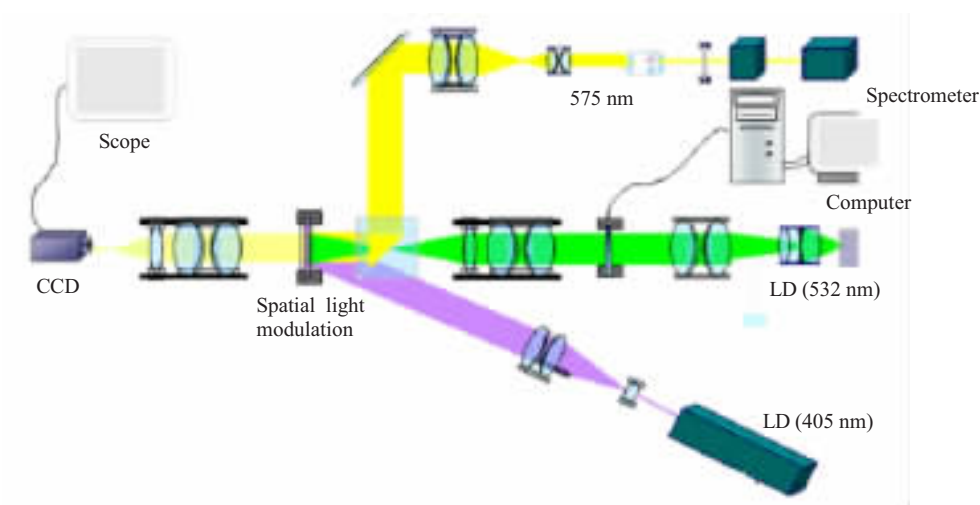


Fig.4 Schematic diagram of experimental system

该装置由写入、读出和擦除三部分组成:
1) 写入部分光源是采用相干公司的半导体激光器 compass-535, 经扩束与准直系统由空间光调制器调制后, 经成像系统直接成像到 BR 膜上, 写入光强为 2.4 mW/cm², 激发时间为 3 秒。
2) 读出光光强为 0.51 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 读出的图像由 CCD 系统采集。
3) 擦除光源为相干公司的 compass-405 型半导体激光器, 波长 405 nm, 激光经扩束准直后直接照射 BR 膜, 光强为 8 mW/cm², 可完全擦除所记录的图像。

丰富的灰阶信息。为了定量研究 BR 膜的灰度分辨能力, 我们将 8 阶和 14 阶灰度板 (每个灰度的空间间隔为 1 mm) 信息作为输入图像进行了实验, 并对实验结果进行了灰度分析。图 6、图 7 分别是我们利用上述系统所记录的 8 阶和 14 阶灰度分辨图及其灰度分析光谱。证实了 BR 膜图像存储的灰度分辨能力。从图 6 和 图 7 中还可以分析得出以下判断: 由于采用钨灯和单色仪作为可调谐读出光

图 5 是我们记录的在 BR 膜上的一幅风景照, 从结果上我们可以看到 BR 膜记录下了该图像上丰



Fig.5 Grey picture recorded in BR film

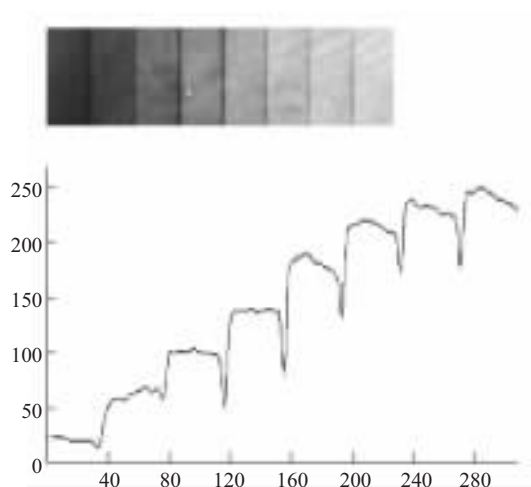


Fig.6 Experimental result and analysis of 8-grade level recording

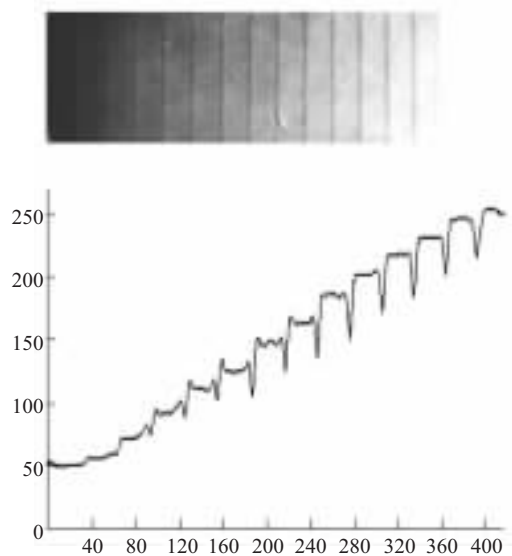


Fig.7 Experimental result and analysis of 14-grade level recording

源，因而在读出光均匀性方面带来不良影响，造成了每个灰度级中间的灰度有些不均匀性变化，对记录图形的灰度表现有不良影响，但也可推断出，在读出光均匀性提高的基础上将可进一步提升 BR 膜的灰度分辨特性。

参考文献:

- [1] Butt HJ. Quantum efficiency of native and mutant bacteriorhodopsin obtained from blue light induced relaxation experiments. *European Biophysics Journal*, 1990,19:31~394
- [2] Zeisel D, Hampp N. Spectral relationships of light-induced refractive index and absorption changes in bacteriorhodopsin films containing wild type BRWT and the variant BRD96N. *J Phys Chem*, 1992,96:7788~7792
- [3] Timucin DA, Dowine JD. Phenomenological characterization of bacteriorhodopsin-D85N photocycle. *J opt Soc Am B*, 2000,17(2):202~212
- [4] 郑媛, 姚保利, 王英利, 门克内木乐, 雷铭, 陈国夫. HAMPP Norbert. *生物化学与生物物理学报*, 2003,35(6):592~595
- [5] Hampp N, Silber A. Functional dyes from nature: Potentials for technical applications. *J Pure & Appl Chem*, 1996,68(7):1361~1366
- [6] Bacon M, Wang CH, Kar AK, Baxter RL, Wherrett BS. Nanosecond optical excitation dynamics of long M-state lifetime bacteriorhodopsin films. *Opt Commun*, 1996,124:175~183
- [7] Rao DV, Aranda FJ, Rao DN, Chen Z, Akkara JA, Kaplan DL, Nakashima M. All-optical logic gates with bacteriorhodopsin films. *Opt Commun*, 1996,127:193~199
- [8] Zhang CP, Gu LQ, Zhang GY, Birge RR. Bio-photochromic bacteriorhodopsin film-based novel photon device element: Photon Transistor-model establishment and application, *Opt Commun*, 1996,131:25~29

STUDY ON GRAY-LEVEL CHARACTERISTIC OF BACTERIORHODOPSIN FILM

YANG Qing^{1,2}, CHEN Feng³, ZHANG Jing-Wang³, CHEN Tao³, QING Mei³, HOU Xun^{2,3}

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710068, China;

3. Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Bacteriorhodopsin (BR) is a kind of light sensitive protein with excellent anti-fatigue property and high optical transition quantum efficiency, by which optical image information can be acquired and stored. The relationship between the space distribution of BR light absorption variation and the grey value distribution of the stored image has been discussed. The experimental study on gray-level characteristic of BR, using the genetic manipulation of the BRD96N film as a sample, has been done by the self-made system. Excellent grey value exhibition ability has been shown by this experiment.

Key Words: Bacteriorhodopsin film (BR film); Storage of image information; Gray-level characteristic