

文章编号: 0258-7025(2003)10-0904-05

BR_{D96N}膜记录图像对比度的实验研究

杨文正¹, 杨青¹, 陈烽^{1,2}, 侯洵^{1,2}

¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室, 陕西 西安 710068
² 西安交通大学电子科学与技术系, 陕西 西安 710049

摘要 利用 YAG 激光器二倍频 532 nm 连续激光作为记录光, 连续单色光作为读出光, 在细菌视紫红质(BR_{D96N})材料上进行了图像写/读实验。通过理论分析 BR_{D96N}膜所记录的图像对比度随读出光波长变化趋势, 得到图像对比度变化曲线, 并通过实验方法验证。实验结果表明, 在 BR_{D96N}膜基态峰(570 nm)附近 550 nm 波长处, 可获得最佳的图像对比度($\sim 1.63:1$); 在亚稳态(*M*态)吸收带内($390\sim 450$ nm), 图像出现反转现象。

关键词 图像处理; 图像对比度; 细菌视紫红质膜(BR 膜); 图像存储

中图分类号 O 438 文献标识码 A

Study on the Contrast of the Recorded Image Based on the BR_{D96N} Thin Film

YANG Wen-zheng¹, YANG Qing¹, CHEN Feng^{1,2}, HOU Xun^{1,2}

¹ State Key Lab of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710068, China

² Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract The 532 nm light of YAG laser is used as recording light and the monochromatic-light is used as the readout light. At the different wavelength, the changed tendency of the image contrast based on the BR_{D96N} thin film is observed. Using the method of the gray integration of the image, the contrast curve of the recorded image is achieved. All the results show that a maximum image contrast of $\sim 1.63:1$ is obtained in the peak absorption region of the *B*-state (~ 570 nm) and the reverse images are obtained in the absorption region of the *M*-state ($390\sim 450$ nm).

Key words image process; image contrast; bacteriorhodopsin film (BR film); image storage

1 引言

细菌视紫红质(bacteriorhodopsin, 简称 BR)是嗜盐菌细胞膜内的一种光敏蛋白质。它由 248 个氨基酸和 1 个生色团——视黄醛组成, 具有光驱动质子抽运功能^[1,2]。当受光照时, BR 分子中生色团会迅速发生从全反到 13 顺的光异构化, 并且形成一系列中间产物, 同时将光能转化为化学能^[1,2]。不同中间态具有不同的吸收光谱、寿命及热稳定性, 并且部分中间态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基态。BR 薄膜材料作为一种光生物材料具有极好的光致变色特性和

光循环特性, 而其宽的光谱响应范围($400\sim 700$ nm)、高的分辨率(~ 5000 lines/mm)、高感光灵敏度($\sim 10^{-3}$ J/cm²)、高循环次数(10^6 次)、高量子效率(64%)^[2,3]等独特性质使得它在光信息处理和光存储领域有很大的潜力和广泛的应用前景。BR 分子最主要的两个中间态为基态(*B*态, 峰值波长 570 nm)与亚稳中间态(*M*态, 峰值波长 412 nm)。由于处于 *B*态的 BR 分子在 570 nm 波长附近的光激励下, 可以跃迁到 *M*态, 而 *M*态的分子吸收 412 nm 波长附近的光, 又可以返回 *M*态, 且两态吸收带中心波长相差 ~ 160 nm^[4], 因此利用 *B*态与 *M*态

收稿日期: 2002-05-29; 收到修改稿日期: 2002-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(69907006)和中国科学院创新方向性项目(No. KGCX2-401)资助。

作者简介: 杨文正(1975—), 男, 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室硕士, 主要从事光信息存储及分子光子器件方面的研究。E-mail: yangwenzh@sina.com

之间的可逆循环特性,可以开展许多研究工作。而且 *M* 态相对于 BR 分子短寿命态 *K*, *L* (ps 量级) 等中间态有较长的寿命(ms 量级),并且通过基因改性和化学修饰(例如改变 pH 值)的方法,可以将 *M* 态延长到十几分钟^[5](例如 BR_{D96N})。目前利用 *B* 态与 *M* 态的光学特性已经开展了实时光学信息处理、光电转换、光学图像识别、图像边缘增强、空间光调制器以及分子电子器件^[4~8]等多方面的研究。在 BR 膜图像信息存储及处理方面的应用研究中,材料特性及写入/读出条件对存储图像质量(图像分辨率、图像对比度等)的影响尤为重要。本文着重研究 BR_{D96N}膜所记录图像的对比度与读出光波长变化之间的关系。

2 理论分析

图 1 为 BR 膜在不同能量记录光作用下的吸收曲线。随记录光能量的增大, BR 膜的 *B* 态分子吸收逐渐减少, *M* 态分子吸收逐渐增加, 直到达到平衡状态。BR 膜的透射度值可由吸收曲线估计得到。定义 I_0 为写入信号光强度, I 为读出信号光强度, 由比尔-朗伯吸收定律知

$$\text{薄膜吸收度定义为 } A_\lambda = -\lg(I/I_0) \quad (1)$$

$$\text{透射度定义为 } T = I/I_0 \quad (2)$$

$$\text{即 } T = 10^{-A_\lambda} \quad (3)$$

由(2)式知, 在空间均匀的写入信号光条件下, 透射度与读出信号光强度成正比, 即 $T \propto I$ 。因此当写入光均匀照射 BR 膜, 在其饱和吸收区内, 不同写入光强度使 BR 分子在完成 *B* 态到 *M* 态的转化时, *B* 态分子和 *M* 态分子具有不同的分布, 则该被激发区域内 BR 膜对不同波长读出光表现出不同的透射度值, 此时读出光强度就受到了写入光强度的调制。

对于振幅或强度调制器件, 其强度对比度可定义为

$$R(\lambda) = \langle I_{\max} \rangle / \langle I_{\min} \rangle \quad (4)$$

I_{\max} 和 I_{\min} 分别为在空间均匀的写入信号条件下, BR 膜可达到的最大和最小输出光强度。 $\langle \rangle$ 为对空间求平均。 R 值受调制材料的物理性质及实验中使用的光学器件的质量所限制。

对波长为 λ 的读出光而言, $T(\lambda) \propto I(\lambda)$, 记录在 BR 膜上图像信息的对比度可用透射度表示为

$$R(\lambda) = \frac{\langle I_{\max} \rangle}{\langle I_{\min} \rangle} = \frac{T_{\max}(\lambda)}{T_{\min}(\lambda)} \quad (5)$$

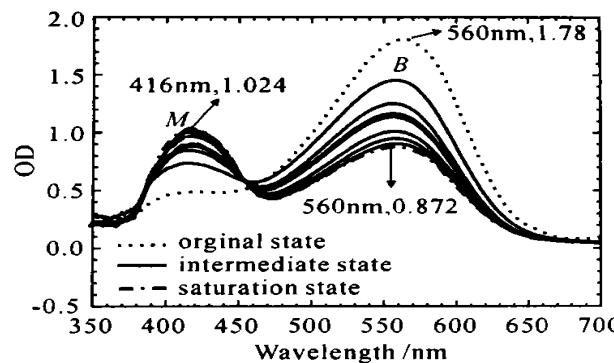


图 1 随记录光能量增大, BR 膜 *B* 态和 *M* 态吸收曲线

Fig. 1 With increasing of recording light energy, the absorption curves of *B*-state and *M*-state of the BR film

若用 *B* 态和 *M* 态的吸收度来表示, 则对同一读出光波长可表示为

$$R(\lambda) = \frac{10^{-A_\lambda^M}}{10^{-A_\lambda^B}} = 10^{-(A_\lambda^M - A_\lambda^B)} = 10^{-\Delta A_\lambda}$$

其中

$$\Delta A_\lambda = A_\lambda^M - A_\lambda^B \quad (6)$$

定义

$$R_T^\lambda = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{T_{\text{after excit.}}}{T_{\text{before excit.}}} \quad (7)$$

$$R_A^\lambda = 10^{-\Delta A_\lambda} \quad (8)$$

R_T^λ 与 R_A^λ 分别用来表示在不同波长处, 由透射变化量或吸收变化量计算所得到的记录在 BR 膜上图像信息的对比度。

3 实验内容

实验采用的样品为 BR_{D96N}, 薄膜厚度 $d = 30 \mu\text{m}$, 光密度 $OD_{560 \text{ nm}} = 1.78$ 。

实验 1: 静态光谱测试

选用的激发光为 YAG 激光器经二倍频、准直后出射的 532 nm 连续绿光, 功率密度为 205 mW/cm²; 白光光源光谱范围 370~700 nm; 显微物镜聚焦透过样品的白光进入光谱仪; 光谱仪波长范围为 190~950 nm, 可实时监测样品的吸收度和透射率的变化。实验装置如图 2, 首先用白光光源照射样品, 采集激光作用前的透射率曲线。再打开 532 nm 激光照射样品, 直到通过光谱仪监测透射率曲线幅值不再变化时采集达到饱和激发状态时的曲线。

实验 2: 记录图像

用一有图像的透明胶片作为目标图像, 仍选用同实验 1 的激发光作为写入光, 通过单色仪选用波长可变的单色光作为读出光。图像的写入/读出是

非实时性的,用挡板 B_1 与 B_2 分别控制写入光和读出光的“开”和“关”。首先用准直后的 532 nm 光照射样品写入一幅图像,再用挡板 B_1 关闭写入光而撤去 B_2 打开读出光,通过单色仪选取读出单色光波长,每隔 10 nm 读出图像并通过 CCD 采集。实验装置如图 3。

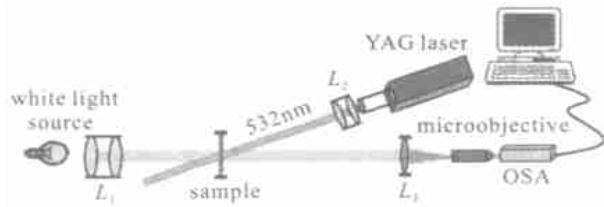


图 2 BR 膜静态光谱测试的实验装置图

Fig. 2 Experiment setup for the static spectra test of the BR film

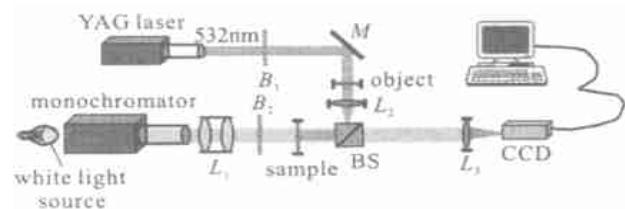


图 3 BR 膜记录图像的实验装置图

Fig. 3 Experiment setup for the image recording of the BR film

4 实验结果与讨论

图 4 为实验 1 中激发作用前(曲线 1)和后(曲线 2)的透过率变化曲线;图 5 为激发前后相对吸收量 ΔA 变化曲线;图 6 为实验 2 中通过 CCD 采集的

不同波长单色光读出的 BR 膜图像。

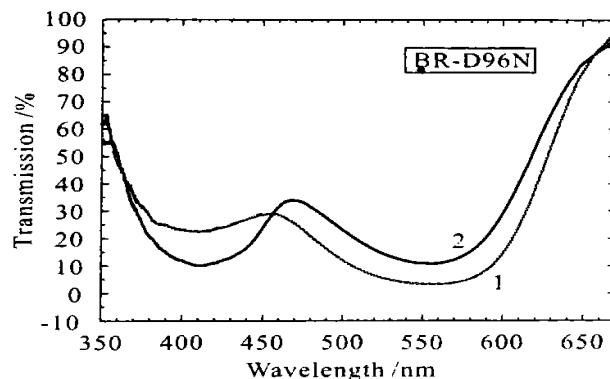


图 4 BR 薄膜经 532 nm 激发光作用前(曲线 1)和后(曲线 2)的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra of the BR thin film before (curve 1) and after (curve 2) excitation of 532 nm light

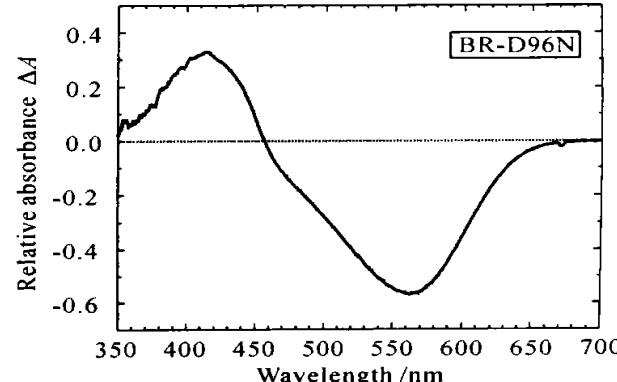


图 5 BR 薄膜经 532 nm 激发光作用前后的相对吸收量 (ΔA) 曲线

Fig. 5 Relative absorbance (ΔA) curve of the BR thin film before and after excitation of 532 nm light

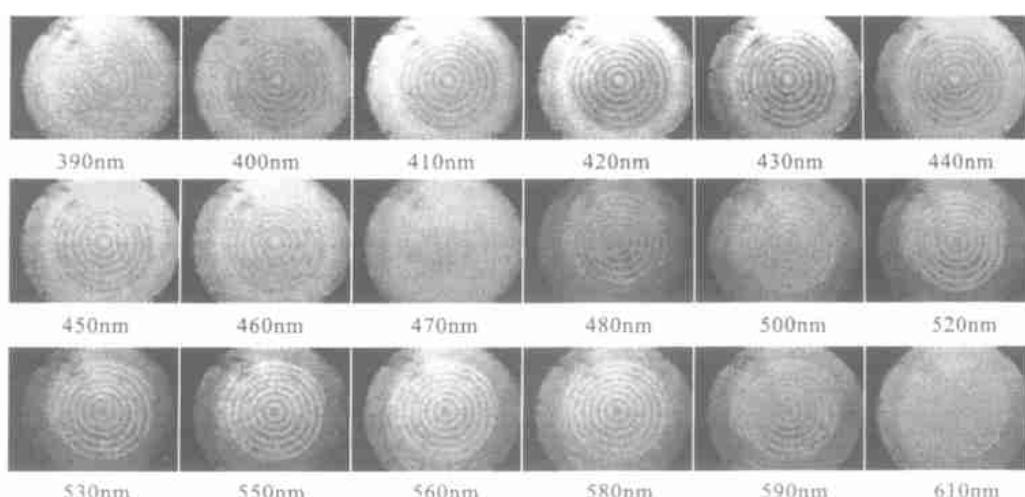


图 6 不同波长单色光读出的 BR 膜图像

图像对比度 R_C 值的测量是利用对图像均匀区域进行灰度积分(参考图 7),令 R_C 为灰度积分最大值与最小值的比值。参考图 8,用 R_T 与 R_A 分别表示本实验写入光作用下由(7),(8)式分别计算得到的对比度理论曲线,用 R_C 表示对比度实验曲线。

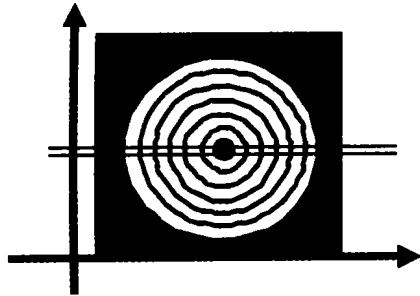


图 7 目标图像和灰度分析的图像模型

Fig. 7 Image model of the object and gray analysis

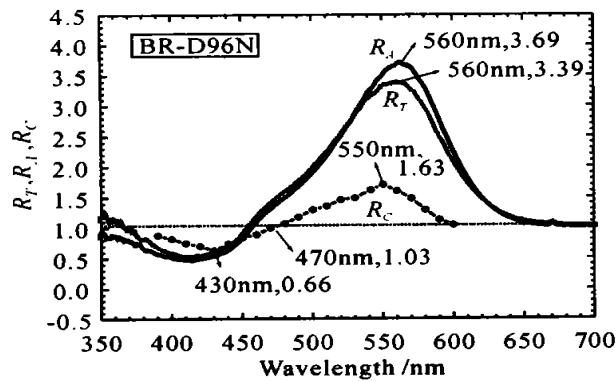


图 8 随读出光波长变化的 R_A 与 R_T 曲线和图像对比度 R_C 线

Fig. 8 R_A and R_T curves with the different wavelength of the readout light and the contrast R_C curve of the recorded image

若用 $R_i > 1$ (其中 $i = T, A, C$) 表示图像为“正像”(与目标图像灰度分布相同); $R_i = 1$ 表示图像“消失”(与目标图像灰度值相同); $R_i < 1$ 表示图像“反转”(与目标图像灰度分布相反)。参考图 8 中 R_T 与 R_A 曲线,当读出光在 470~620 nm 波长范围内,读出为“正像”;460 nm 波长附近,图像“消失”;380~450 nm 波长范围内,图像出现“反转”现象。其中在 560 nm 波长处正像获得最佳对比度,420 nm 波长处反转图像获得最佳对比度。从理论分析知 R_T 曲线与 R_A 曲线应该重合,由于样品存在有反射(反射率 $R\%$ (350~600 nm)=3.8%~4.3%)以及光谱测量中的误差, R_T 与 R_A 并未重合。

为了简化起见,在以下叙述中用“透过”表示作用光透过较强,表现为白色;用“吸收”表示作用光透

过相对较弱,表现为黑色。则图 7 中目标图像的白色区域是激发光透过强的“透过”区域;黑色区域是激发光透过相对弱的“吸收”区域。写入光通过带有目标图像的透明胶片作用在样品上,因此白色区中大部分 BR 分子在写入光作用下由 B 态跃迁到 M 态;黑色区内大部分 BR 分子仍处在 B 态。图 8 中, $R_i > 1$ 区域主要为 B 态分子的吸收带, B 态分子对读出光“吸收”而表现为黑色区域, M 态分子对读出光“透过”而表现为白色区域,因此读出与目标图像分布为一致的“正像”。反之 $R_i < 1$ 区域则主要为 M 态分子的吸收带, B 态分子对读出光“透过”而表现为白色区域, M 态分子对读出光“吸收”而表现为黑色区域,因此读出为“反转图像”。而 B 态分子与 M 态分子对 460 nm 波长单色光有相同的吸收度($\sim 0.5 \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)与透过率($\sim 30\%$)(参考图 1 和图 4),因此读出图像灰度值相同。

图 8 中 R_C 线为实际采集图像的对比度实验曲线,其变化趋势基本符合理论分析。其中在 550 nm 波长处正像对比度值为 1.63, 470 nm 波长处图像不可分辨,430 nm 波长附近图像出现反转。由于在室温下 BR 分子由 M 态向 B 态热弛豫的时间大于其自由衰减常数($T_{1/e} = 50 \text{ s}$),因而在撤去写入光后 90 s 内,伴随着 M 态分子弛豫到 B 态,图像对比度就会降为初始值的 50%^[9]。从理论对比度曲线知,在 560 nm 波长处 R_T 的初始值为 3.39,因此在实际采集图像中,560 nm 波长处图像对比度值将低于 1.7。因此在下一步研究工作中,可选取更合适的 BR 膜材料(如经基因改性或化学修饰方法而进一步延长 M 态寿命或减小 M 态分子热弛豫快过程的衰减常数等)作为实验材料。

通过上述分析可知,在 430 nm 与 550 nm 波长附近可获得最佳的图像对比度。适合图像存储器、空间光调制器、光开关或光子逻辑门^[6~8]等 BR 光子器件。并且在 430 nm 附近图像出现反转,说明可以通过改变波长来达到图像反像的作用,也可以用作图像反像器的研究等等。

参 考 文 献

- 1 C. H. Wang, M. Bacon, A. K. Kar *et al.*. Read times for bacteriorhodopsin-film optical cache memory [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(9): 2304~2306
- 2 N. Hampp, A. Silber. Functional dyes from nature: potentials for technical applications [J]. *Pure & Appl. Chem.*, 1996, **68**(7): 1361~1366
- 3 H.-J. Butt. Quantum efficiency of native and mutant

bacteriorhodopsin obtained from blue light induced relaxation experiments [J]. *European Biophysics Journal*, 1990, **19**: 31~39

4 J. D. Downie. Real-time holographic image correction using bacteriorhodopsin [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(20): 4353~4357

5 Changhai Wang, Mark Bacon, Ajoy. K. Kar *et al.*. Characterization of long *M*-state lifetime bacteriorhodopsin thin films for optical cache memory [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, **36**(Part 1, 1B): 439~443

6 Ofer Wernner, Baruch Fischer, Aaron Lewis *et al.*. Saturable absorption, wave mixing, and phase conjugation with bacteriorhodopsin [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(20): 1117~1119

7 Hiroyuki Tahei, Norio Shimizu. Spatial light modulation based on photoinduced change in the complex refractive index of bacteriorhodopsin [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(11): 1848~1854

8 D. V. G. L. N. Rao, F. J. Aranda, D. Narayana Rao *et al.*. All-optical logic gates with bacteriorhodopsin films [J]. *Opt. Comm.*, 1996, **127**: 193~199

9 M. Sanio, U. Settele, K. Anderle *et al.*. Optically addressed direct view display based on bacteriorhodopsin [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(6): 379~381

中国科学院力学研究所激光智能制造实验室

该研究室是国内最早从事激光智能制造工艺力学领域研究的机构。在该领域首席科学家虞钢研究员的带领下,以国家安全和高技术产业化的重大需求为导向,基于多学科交叉深入开展该领域的高科技创新和系统集成的研究工作,形成了一批具有自主知识产权的创新科技成果,并致力于推广应用。

主要的研究领域包括:

基于激光-材料相互作用原理的制造工艺力学研究:具有时间特性和空间分布激光作用下材料的非平衡演化过程和力学特性;相互作用过程演化的数学物理建模、量化数值模拟和微结构力学性能预测;建立完善的激光智能制造工艺力学的综合评价体系。

基于 CAx 离散-堆积原理的柔性制造和快速成形过程研究;具有智能测量、虚拟仿真、快速成型和制造、三维激光加工等关键技术的集成研究;基于衍射光学原理的高强激光束空间变换和柔性传输研究;基于自适应原理的快速定位测量;激光推进技术的基础研究与应用。

承担的重大科研项目有:

1996~1999 年,承担中国科学院重大仪器装备研制项目:模具表面强化技术装备系统(中国科学院计字[1997]第 167 号;1996~2000 年,承担国家自然科学基金项目和中国科学院院长基金项目:金属表面激光强化机理研究(69678007);1997~2000 年,承担中国科学院“九五”重大项目二级课题:模具

表面激光强化技术研究(二级子课题, KY951-A-602);2000~2003 年,承担中国科学院知识创新工程重大项目:集成化激光智能制造及柔性加工系统研究(KGCX1-11);2002~2010 年,承担材料工艺与力学课题(中国科学院力学所“十五”创新,在研);2000~2003 年,汽车冲压模具激光强化技术及装备系统(上海大众科技合作项目,在研);2003~2006 年,高密度激光制造/材料工艺机理研究(瑞中科技合作项目 DNR6907, 在研)。

实验室拥有多套百瓦至千瓦级连续和脉冲全数控激光系统,柔性光束传输及高强光束变换系统,大范围高精度 5 轴框架式机器人工作台,智能化测量系统,地面导向和电动双向运载系统,以及数据采集与转换、控制软件包和专家系统等及先进的力学、物理性能检测设备,高精度分析天平(0.01 mg)和配套的磨损试验机。

已出版专著:《集成化激光智能制造工程》(冶金工业出版社,2001);在国内外核心期刊发表文章 60 余篇;2002~2003 SCI&EI 收录 20 余篇;国家专利 10 余项;7 项发明(其中 2 项授权、3 项实用新型专利)。

目前研究人员的平均年龄不超过 30 岁,并常年招收一般力学与力学基础学科的研究生、博士后及客座人员。目前在站博士后 2 人,出站 2 人。培养博士 8 人,其中已获博士学位 2 人;培养硕士 6 人,其中已获硕士学位 2 人。