

基于细菌视紫红质薄膜的空间光调制器实验研究*

杨文正¹⁾ 杨青¹⁾ 陈烽¹⁾²⁾ 冯晓强¹⁾ 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,西安 710068)

²⁾西安交通大学电子科学与技术系,西安 710049)

(2002 年 4 月 6 日收到,2002 年 5 月 23 日收到修改稿)

阐述了利用细菌视紫红质薄膜(BR 薄膜)优良的非线性光学特性作为光寻址的空间光调制器的实验研究. BR 有两个重要的光敏中间态(B 态和 M 态),其吸收带(B 态吸收峰为 570nm, M 态吸收峰为 412nm)重叠区域较少,利用其正向(B→M)和逆向(M→B)光反应之间转化关系和 B 态与 M 态的差异吸收实现了相干光学图像到非相干光学图像的转换实验. 采用经基因改性的细菌视紫红质薄膜(BR_{D96N})材料,使用 670nm 相干光作为写入光,530nm 非相干光作为读出光,得到了分辨率约为 200 lines/mm,对比度约为 2.1:1 的实验结果.

关键词:光寻址空间光调制器,细菌视紫红质薄膜(BR 薄膜),非线性光学特性,相干光与非相干光图像相互转换

PACC:8000,8170G

1. 引言

在目前多媒体信息化的社会里,信息量正在与日剧增,如何有效而快速的处理和存储庞大的信息量,解决日益拥挤的存储空间,已成为当前紧迫的问题. 光学信息处理具有大容量、高速度、信息带宽,可多通道并行或交叉传播等特点. 对光子所携带的相关信息进行处理离不开数据控制,其有效的数据控制一般可通过空间光调制器(spatial light modulator, 简称 SLM)实现.

SLM 可以实现多种不同的功能,如变换器功能、放大功能、算术运算功能、记忆功能、线性和非线性变换特性、阈值操作功能、光学限幅功能等. 因此可用作调制器、开关、放大器、相干光与非相干光转换

器、存储器或运算器等方面,所以 SLM 是光信息处理和光计算系统的基本功能器件之一. SLM 最为突出的是其并行处理能力,作为并行的光学处理器,可以完成数字光学处理和图像处理的许多任务,在实时的图形识别,白光和彩色图像处理中起关键作用.

按照 SLM 携带的信息信号是电的或光的区别,可将 SLM 分成两种主要类型:电寻址的 SLM(EA-SLM)和光寻址的 SLM(OA-SLM). EA-SLM 的优势在于电子系统与光学系统间的接口能力,但其分辨率一般不高,信息量也不够大,响应速度慢,光能利用率不高. OA-SLM 的最大优点在于并行寻址方式,把写入图像成像或投影到 OA-SLM 上瞬间完成,具有高度并行的特点^[1]. 表 1 列出几种典型 SLM 的性能^[1,2].

表 1 SLM 的性能

EA-SLM 器件名称	像素数	像素尺寸/ μm^2	帧频/Hz	对比度
薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)	1280 × 1024	40 × 40	60	400:1
磁光调制器(MOSLM)	256 × 256	60 × 60	100	200:1
数字微反射镜器件(DMD)	128 × 128	25 × 25	180	2:1
OA-SLM 器件名称	感光灵敏度($\mu\text{J}/\text{cm}^2$)	分辨率(lines/mm)	响应时间/ms	对比度
普克尔读出光调制器(PROM)	5—600	100	0.1	10000:1
微通道板调制器(MSLM)	30×10^{-3}	20	10	1000:1
液晶光阀(LCLV)	6	60	10	100:1
光塑器件	60	2000	—	—
感光胶片	0.4	2500	—	—
电子俘获材料(ET)	1	80	5×10^{-2}	—

*国家“九五”攀登计划预选项目(批准号:95-预-20)、国家自然科学基金(批准号:69907006)及中国科学院知识创新方向性项目资助的课题.

表 1 对比可看出目前常用的几种 SLM 在分辨率、响应时间、对比度、感光灵敏度,以及可循环使用次数等方面的优势和不足之处,其原因主要是受到材料特性的限制.由于光探测效应的响应速度往往不快,因此研制高响应速度、高空间分辨率、大容量、低成本的 OA-SLM 具有重要现实意义.

2. 细菌视紫红质材料特性

目前人们发现嗜盐菌的细胞膜上有一种光敏蛋白质分子——细菌视紫红质(bacteriorhodopsin, 简称 BR),它由 248 个氨基酸和一个生色团——视黄醛组成. BR 分子结构存在两种形式,二者之间可以互换.一种形式是含全反(all-trans)视黄醛的异构体(BR^{trans});另一种则是含 13-顺(13-cis)视黄醛的异构体(BR^{cis}). BR^{trans} 与 BR^{cis} 二者都具有光活性,当光照时, BR^{cis} 顺异构体经过一定的光反应,可以有效地全部转换为 BR^{trans} 异构体,形成只含 BR^{trans} 的光适应型 BR, 吸收峰为 570nm. BR 分子吸收光子后,伴随 BR 分子构型的迅速变化和质子转移过程,会经历一系列中间态 K, L, M, N, O 等,并且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 BR 基态,形成一个光循环过程,其光循环过程如图 1 所示.生物分子通常被认为是非常脆弱且化学不稳定,然而 BR 分子却是一个例外,即使在 140℃ 高温失水状态,以及 pH 值很低的环境下仍具有光活性和生物活性,而且它的使用光谱范围宽(400—700nm),具有高的空间分辨率($\sim 5000\text{lines/mm}$),高感光灵敏度($30\text{—}80\text{mJ/cm}^2$),快的反应速度($\sim 50\mu\text{s}$)^[3]、高量子转化效率($\sim 65\%$),热和化学稳定性好、使用寿命长等特点,一般有机光致变色分子可反复开关 1000 次,而 BR 分子可反复开关 $10^6\text{—}10^7$ 次^[4].基于以上优点,能够充分利用 BR 分子膜开展超高分辨的分子图像信息处理的研究工作.

在 BR 分子光循环过程中,其中间态 M 态化学、物理性质非常稳定,吸收峰与基态吸收峰差值大($\sim 160\text{nm}$),寿命相对较长(大于 10ms),易于操作,很适合做光存储器及其他光学元件^[5,6].因此我们对高分辨的 SLM 的研究主要利用基态 B 态($\lambda_{\text{max}} = 570\text{nm}$)和较稳中间态 M 态($\lambda_{\text{max}} = 412\text{nm}$)之间的转换来实时进行非线性光学信息的记录和读取,因此 BR 薄

膜可以作为一种 OA-SLM.

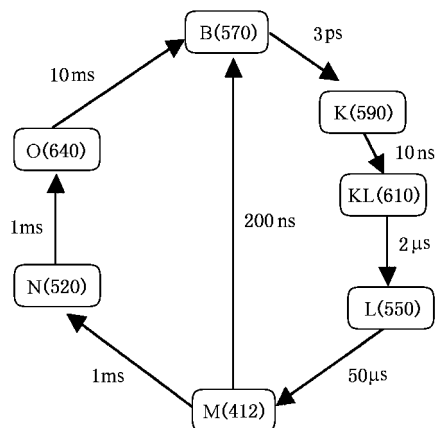


图 1 BR 分子光循环示意图

3. 理论分析

为了方便描述 BR 薄膜受光激励的情况,我们将其光循环简化为一个 B 态和 M 态的两态光循环系统,如图 2.当 BR 薄膜受到 570 nm 附近或长于 570nm 波长的黄光或红光的激发, B 态分子吸收光子跃迁到 E_1 , 然后弛豫到 M 态,而 M 态分子吸收 412nm 附近的蓝紫光可跃迁到更高的激发态 E_2 , 并很快返回到 B 态,同时一部分 M 态分子通过热弛豫回到 B 态.通过 B 态和 M 态分子在不同波长不同强度光照下的分布不同,从而对写入光携带的图像信息进行调制.

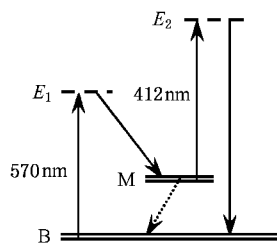


图 2 BR 分子简化能级图

当波长和光强分别为 λ_i 和 $I(\lambda_i)$ ($i = 1, \dots, n$) 的光照射在 BR 薄膜上,每束光均可导致 BR 分子正向($B \rightarrow M$)和逆向($M \rightarrow B$)光反应,此时描写 B 态分子浓度随时间变化的微分方程为

$$\frac{dB}{dt} = \sum_{i=1}^n (-K_i^{B \rightarrow M} B + K_i^{M \rightarrow B} M) + K_M M, \quad (1)$$

其中 B 和 M 分别为 B 态和 M 态的摩尔浓度, $K_M =$

τ_M^{-1} 为 M 态的热弛豫速率常数, τ_M 为 M 态的寿命, $K_i^{B \rightarrow M}$ 和 $K_i^{M \rightarrow B}$ 分别为 BR 分子正向($B \rightarrow M$)和逆向($M \rightarrow B$)光反应的反应速率常数, 可由下式给出:

$$K_i = \frac{2.3026 \epsilon(\lambda_i) \Phi \lambda_i I(\lambda_i)}{N_A c h}, \quad (2)$$

$\epsilon(\lambda_i)$ 为照射光波长 λ_i 处的摩尔消光系数, $\Phi^{B \rightarrow M} = \Phi^{M \rightarrow B} = 0.65$ 为正向和逆向光反应的量子产额(如图 3), $I(\lambda_i)$ 为照射光强度, N_A 为阿伏伽德罗常数, c 为光速, h 为普朗克常数.

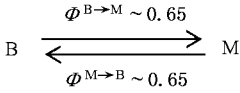


图 3 BR 分子 B 态和 M 态的转换

设 B_0 为总的 BR 分子摩尔浓度,

$$B_0 = B + M. \quad (3)$$

当 BR 分子达到稳定状态时, 正向($B \rightarrow M$)光反应的分子数和逆向($M \rightarrow B$)光反应的分子数相等,

$\frac{dB}{dt} = 0$, 有稳态解

$$B = \frac{K_i^{M \rightarrow B} + K_M}{K_i^{B \rightarrow M} + K_i^{M \rightarrow B} + K_M} B_0. \quad (4)$$

将厚度为 d 的 BR 薄膜分为 n 层讨论, 在厚度为 $\Delta z = d/n$ 的薄层中, 满足比尔-朗伯定律. 当一束单色光照射在薄层上时, 吸收系数为^[7]

$$\alpha(\lambda, I) = \sigma_B B + \sigma_M M \\ = 2.3026 [\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda) B + \epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda) M] \quad (5)$$

σ_B 和 σ_M 分别对应某一波长处, $B \rightarrow M$ 反应和 $M \rightarrow B$ 反应过程的吸收截面. 透射光强可表示为

$$\frac{dI}{dz} = -\alpha(\lambda, I) I = -2.3026 [\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda) B \\ + \epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda) M] I. \quad (6)$$

将第一层的出射光强作为第二层的入射光强, 依次递推可得透过第 n 层的光强为

$$I_n = I_{n-1} \exp[-\alpha(\lambda, I) \Delta z] \\ = I_{n-1} \exp\{-2.3026 [\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda) B + \epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda) M] \Delta z\}. \quad (7)$$

由于 $\epsilon_{B \rightarrow M}(570) \gg \epsilon_{M \rightarrow B}(570)$, 有

$I_n(570) = I_{n-1}(570) \exp\{-2.3026 \epsilon_{B \rightarrow M}(570) B \Delta z\}$, 故 570nm 波长附近, 在 B 态吸收带内的光主要引起细菌视紫红质分子由 B 态向 M 态跃迁. 随着激发态 M 态分子的增加, BR 薄膜将逐渐表现 M 态的光学特性, 而 $\epsilon_{M \rightarrow B}(412) \gg \epsilon_{B \rightarrow M}(412)$, 有

$I_n(412) = I_{n-1}(412) \exp\{-2.3026 \epsilon_{M \rightarrow B}(412) M \Delta z\}$, 因此 412nm 波长附近, M 态吸收带内的光主要引起细菌视紫红质分子由 M 态向 B 态跃迁. 随着基态 B 态分子的增加, BR 薄膜将逐渐表现 B 态的光学特性. 也就是当输入光进入 BR 调制元件时, 由于输入光频率、强度、振幅等自身的因素而改变了 BR 调制元件的特性(BR 分子分布的改变使 BR 薄膜呈现不同的光学特性), 从而实现自调制形成输出光束, 其输入光强和输出光强之间呈现非线性关系. 利用这种非线性关系, BR 薄膜可以进行相干光和非相干光之间的相互转换. 基于这种良好的非线性光学特性, BR 膜薄可以用作一种自调制 OA-SLM(本文简称 BR-OA-SLM).

以下针对本实验样品可获得的图像对比度进行理论分析.

测得 B 态和 M 态吸收曲线如图 4 所示, BR 薄膜的透射度值可由吸收曲线估计得到. I_0 为写入信号光强度, I 为读出信号光强度. 由吸收定律知: 薄膜吸收度定义为

$$A_\lambda = -\log_{10}(I/I_0), \quad (8)$$

薄膜透射度定义为

$$T = I/I_0, \quad (9)$$

即

$$T = 10^{-A_\lambda}. \quad (10)$$

由(9)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 $T \propto I$. 当写入光均匀照射 BR 薄膜, 在其非线性吸收区内, 由于写入光强度不同, 使 BR 分子完成 B 态到 M 态转化时, B 态和 M 态上的分子数分布不同, 从而使得 B 态和 M 态对读出光的吸收度不同, 则相应读出光的透射度就不同, 此时读出光强度就受到了写入光强度的控制.

对于振幅或强度调制器, 其对比度可定义为

$$R(\lambda) = \langle I_{\max} \rangle / \langle I_{\min} \rangle, \quad (11)$$

I_{\max} 和 I_{\min} 分别为 OA-SLM 在空间均匀的写入信号条件下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起偏器和检偏器的质量所限制.

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

$$R(\lambda) = \langle I_{\max} \rangle / \langle I_{\min} \rangle = T_{\max} / T_{\min}. \quad (12)$$

在大多数情况下, SLM 希望用最小的读出光功率来保持一个足够高信噪比.

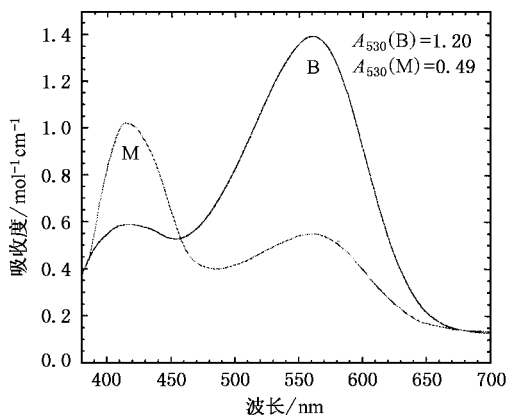


图 4 BR 薄膜 B 态和 M 态吸收曲线

经上述分析,综合考虑读出图像信息的对比度、信噪比、读出破坏性等因素,实验中结合卤钨灯光谱分布及照度分布,我们选用卤钨灯经单色仪出射的 530nm、弱强度低损伤的单色光作为非相干(读出)光.为避免检偏器不能完全滤掉写入光而在读出光中混有写入光,从而影响读出图像质量,我们选择远离 BR 分子 B 态主吸收带内波长的光作为写入光,因此相干(写入)光源采用 LD 激光器,输出光的中心波长为 670nm.由于 LD 激光器输出光能量足够使受光照的 BR 分子从 B 态跃迁到 M 态,故并不影响图像的写入质量.

如图 4 所示,读出光 $\lambda = 530\text{nm}$ 时, $A_{530}(\text{B}) = 1.20\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$, $A_{530}(\text{M}) = 0.49\text{mol}^{-1}\text{cm}^{-1}$, 此时 BR 薄膜的最小读出光透射度约为 $T_{\min} = 10^{-1.20}$, 最大读出光透射度约为 $T_{\max} = 10^{-0.49}$, 可估测其图像对比度为

$$R(530) = 10^{-0.49} / 10^{-1.20} = 10^{0.71} \approx 5 : 1. \quad (13)$$

4. 实验方法与结果

本实验中利用 BR 薄膜主要实现相干光图像信

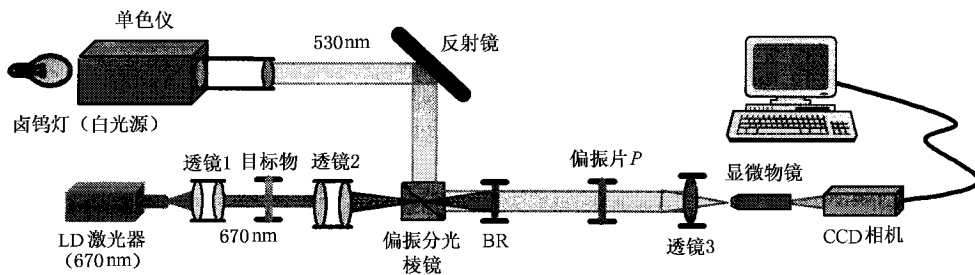


图 5 相干光图像转换非相干光图像实验装置

息到非相干光图像信息的转换.用相干光均匀照射目标图像,经透镜成像后照射在 BR 薄膜上,这样其携带的相干光图像信息就记录在 BR 薄膜上,同时用非相干光照射 BR 薄膜读出图像信息,经 CCD 采集进入计算机进行处理.这样利用 BR 分子光致变色特性和不同中间态对不同波长光吸收不同的特性,将相干光携带的图像信息记录在薄膜上,并在非相干光的作用下实时读取,从而将相干光图像信息自调制为非相干光图像信息.同理也可以将非相干光图像信息调制成相干光图像信息.

实验采用的样品为经基因修饰的高分子聚合的细菌视紫红质薄膜 BR_{D96N} , 薄膜厚度 $d = 30\mu\text{m}$, 夹在两层石英玻璃中间.相干光图像转换非相干光图像实验装置如图 5.目标图像采用上海光学仪器厂制造的 2 号鉴别率板(图 6), 其第 1 组条纹对应分辨率为 50 lines/mm, 第 25 组条纹对应分辨率为 200 lines/mm.

相干光光源经扩束准直后均匀照射在目标图像上,载有图像信息的相干光再经过数值孔径为 0.2 的成像透镜 2 把目标图像 1:1 成像在 BR 薄膜上.卤钨灯光源出射的白光经单色仪选出 530nm 的单色光作为非相干光,经偏振分光棱镜起偏后均匀照射在 BR 薄膜上.偏振片 P 起检偏器作用,旋转检偏器 P, 让 CCD 接收到的只是经 P 选出的 530nm 光,而滤除了 670nm 光.这样在计算机上采集到的图像只是由 530nm 光携带的非相干光图像信息,没有 670nm 光携带的相干光图像信息,则此装置便将相干光图像信息实时转换为非相干光图像信息读出.显微物镜的目的是将 BR 薄膜上得到的非相干光图像放大后供 CCD 观察和采集.相干光写入光强为 $350\text{mW}/\text{cm}^2$, 非相干光读出光强为 $300\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 信息的读出为低损伤的读出模式.

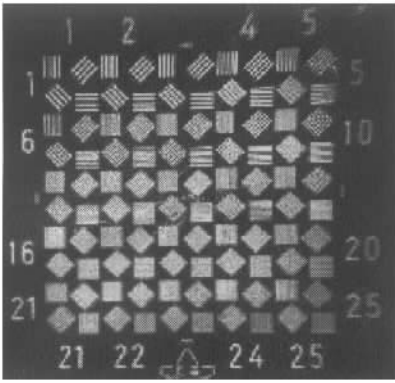


图6 目标图像的原像

图7为采集到的经BR薄膜调制的分辨率为200lines/mm,对比度约为2.1:1的非相干光图像。可以看出,鉴别率板第25组图像上边方块区域的横纹线条能够分辨,下边方块区域斜纹线条却呈现交叉,这主要是由于散射光和光照不均匀的影响。样品BR薄膜夹在两片玻璃中间,当写入光通过前层玻璃照射在BR薄膜上并在后层玻璃上被散射后,再次将携带有图像信息的散射光照射在BR薄膜上,因此在该区域就形成了二次图像写入。因此选取合适的写入光强度,尽可能保证信息光垂直入射样品面,减少散射光对调制图像的影响,可以提高调制图像的质量。

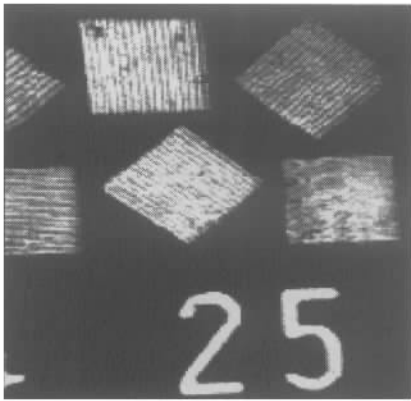


图7 读取的200lines/mm的相干光图像

5. 总 结

本文阐述了利用BR薄膜作为一种BR-OA-SLM进行了相干光图像信息到非相干光图像信息的转换,实现了空间两束光的相互调制。通过成像透镜3和显微物镜将BR-OA-SLM上记录图像经放大后成像在CCD光敏面上探测,得到了分辨率为200lines/mm、对比度约为2.1:1的非相干光图像。

经上述分析,由于BR薄膜本身的分辨率至少大于3000lines/mm,因此图像的分辨率除受材料本身的限制外,还要受实验装置中成像系统分辨率的影响。例如实验中采用了数值孔径为0.2的成像透镜2,这也限制了最终调制图像的分辨率。实验测得调制图像的对比度与理论分析值有误差,除了受到散射光的影响外,还与所用材料的光密度、读出光波长以及实验中所使用的偏振器质量有关。因此要提高调制图像质量除尽量消除散射光的影响外,还可以采用更高数值孔径的成像透镜以提高图像分辨率。采用光密度值(OD=0.1—5)较大的BR材料或基态吸收峰附近波长的非相干光读出调制图像,以及高质量低损耗的起偏器与检偏器,以期获得较好的图像对比度。此外,若能通过基因工程的DNA修饰和材料的生物、化学改性技术将BR实验材料进行有目的的改性,得到更佳的材料特性如更大光密度、更高量子转化效率和感光灵敏度等,以使BR-OA-SLM能够充分发挥其优势,从而满足目前日益膨胀的大容量信息处理的需要。

- [1] Song F J and Jutamulia S 1998 *Advanced Optical Information Processing* (Beijing :Peking University Press)pp175—215 (in Chinese)
[宋非君、Jutamulia S 1998 近代光学处理(北京:北京大学出版社)第 175—215 页]
- [2] Yang Z H and Chen S Y 1997 *Optical Signal Processing ,Computing and Neural Networks* (Beijing :New Times Press)pp167—201 (in Chinese) [杨振寰、陈树源 1997 光学信号处理、计算和神经网络(北京:新时代出版社)第 167—201 页]
- [3] Birge R 1992 *Computer* **25** (11) 56
- [4] Downie J 1994 *Appl. Opt.* **33** 4353
- [5] Chen F *et al* 2001 *Chin. J. Lasers A* **28** 176 (in Chinese) [陈 烽等 2001 中国激光 **28** 176]
- [6] Hampp N and Silber A 1996 *Pure Appl. Chem.* **68** 1361
- [7] Werner O *et al* 1990 *Opt. Lett.* **15** 1118

A study on spatial light modulator of bacteriorhodopsin film ^{*}

Yang Wen-Zheng¹⁾ Yang Qing¹⁾ Chen Feng^{1,2)} Feng Xiao-Qiang¹⁾ Hou Xun^{1,2)}

¹⁾ *State Key Laboratory of Transient Optics and Technology ,*

Xi 'an Institute of Optics and Fine Mechanics ,Chinese Academy of Sciences , Xi 'an 710068 ,China)

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

(Received 6 April 2002 ; revised manuscript received 23 May 2002)

Abstract

An optically addressed spatial light modulator (OA-SLM) is presented by using the excellent nonlinear-optical characteristics of bacteriorhodopsin films (BR films). The BR films have two dominant photoactive states (B state and M state) which have well-separated absorption bands with maxima of B state at 570nm and M state at 412nm. Using the ratio of the shift between the forward (B→M) and backward (M→B) photoreactions , the experimental study on the conversion of coherent-to-incoherent image is realized on BR films . Using the genetic manipulation of the BR_{D96N} film as a sample , the 670nm coherent light as a writing light and the 530nm incoherent light as a readout light , the experimental results for the resolution of ~ 200 lines/mm and the contrast of about 2.1:1 are achieved.

Keywords : optically addressed spatial light modulator , bacteriorhodopsin film (BR film) , nonlinear-optical characteristics , conversion between coherent and incoherent images

PACC : 8000 , 8170G

^{*} Project supported by the National " Climbing " Program in the " 9th 5-Year Plan " of China (Grant No.95-Yu-20) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No.69907006) and the Major Project of Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences .