

细菌视紫红质用于光子逻辑门的研究*

冯晓强^{1,2} 陈烽¹ 田燕宁² 侯洵^{1,2} 李宝芳³ 江龙³

(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 西北大学光子学与光子技术研究所, 西安 710069)

(³ 中国科学院化学研究所分子科学中心, 北京 100101)

摘要 本文对基于细菌视紫红质变种材料 D^{96N} 的三种基本光逻辑操作进行了研究。随着入射黄光强度的增加, 菌紫质对黄光的吸收呈饱和吸收特性, 此时紫光的照射将会使此饱和吸收阈值增加。在黄光和紫光对样品的共同作用下, 透射光强度会被调制, 调制的程度取决于这两束光的相对强度以及被调制光波长。通过观测被调制的 525 nm 检测光强度, 我们模拟了几种基本的光子逻辑运算: “非”、“或”和“与”运算。

关键词 细菌视紫红质; 光子逻辑门; 饱和吸收; 互补抑制

0 引言

细菌视紫红质(bacteriorhodopsin, 简称 BR 或菌紫质)是嗜盐菌的紫膜中的唯一的蛋白质, 每个野生型 BR 分子由 248 个氨基酸和 1 个通过希夫基连接在第 216 个氨基酸上的生色团—视黄醛组成。当 BR 受黄光照射时, 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、寿命及热稳定性, 并且部分中间态在其对应的吸收带内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, 与基态形成光致变色双稳态。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, 很有利于做菌紫质光存储器及其他光学元件。随着计算机技术的不断发展, 人们迫切要求容量更大的存储介质和处理速度更快的芯片。目前, 美国、日本、德国对于菌紫质在光电探测、神经网络、仿视觉系统、非线性光学、光生物分子器件、光学信息存储与处理等领域已做了深入的研究, 促进了 BR 作为新型光电功能材料走向应用。在信息存储与处理方面, Chen Feng 等人利用他们建立的光写、读、擦除系统, 研究了菌紫质变种材料 M^{1B} 的长时间信息存储, 并取得了很大的进展, 存储在样品

里的图象 42 天后仍保持着较高的衬比(度)¹。D·V·G·L·N·Rao 等利用 BR 的非线性光学特性和简并四波混频系统, 成功地实现了几种光子逻辑门²。科学家已预言了光子计算机的雏形, 而光子逻辑门将是这种光子计算机最基本的组成部分。

1 菌紫质光子逻辑门原理

细菌视紫红质基态(B 态)和激发态(M 态)的吸收光谱如图 1 所示³, 其吸收峰分别对应黄光

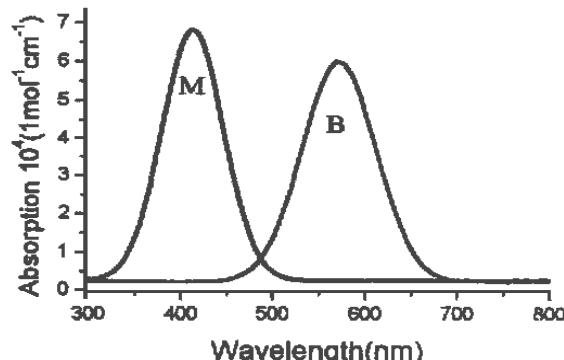


图 1 菌紫质基态和 M 态吸收谱

Fig. 1 Absorption of ground state and M state

和紫光。忽略短寿命的其它中间态，虚拟两能级 E_1 和 E_2 可以将光循环简化为一个关于 B 态和 M 态的双稳系统如图 2。

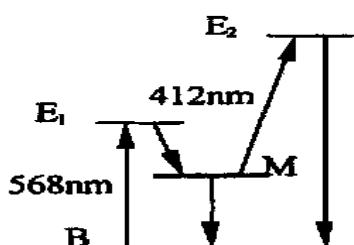


图 2 简化的菌紫质光循环图

Fig. 2 Simplified energy level diagram of BR photocycle

当细菌视红质膜受到波长和强度分别为 λ 和 I_i 的多束光同时照射时, 其分子即有正向反应, 又有逆向反应, 最后到达动态平衡, 此时基态分子数可表示为⁴

$$N_B = N \left[\frac{1}{\tau} + \sum_{i=1}^n K_{M \rightarrow B}(\lambda) \right] / \left\{ \frac{1}{\tau} + \sum_{i=1}^n [K_{B \rightarrow M}(\lambda) + K_{M \rightarrow B}(\lambda)] \right\}$$

式中

$$K_{B \rightarrow M}(\lambda) = 2.3026 \frac{\Phi_{B \rightarrow M} \epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda) N_A \lambda}{N_A h c}$$

$$K_{M \rightarrow B}(\lambda) = 2.3026 \frac{\Phi_{M \rightarrow B} \epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda) N_A \lambda}{N_A h c}$$

称为正向和逆向光反应常量, 式中 $\Phi_{B \rightarrow M}$ 和 $\Phi_{M \rightarrow B}$ 是正向和逆向反应量子效率, $\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda)$ 和 $\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda)$ 是波长为 λ 的光引起的正向和逆向反应的摩尔消光系数, N 是分子总数, N_A 为阿伏加德罗常量, h 为普朗克常量, c 为光速, τ 为 M 态寿命。

当只有两束波长分别为 570nm 和 410nm 的单色光照射细菌视紫红质膜时, 上式可简化为

$$N_B = N \left[\frac{1}{\tau} + K_{M \rightarrow B}(570) + K_{M \rightarrow B}(410) / \tau^1 + K_{M \rightarrow B}(570) + K_{M \rightarrow B}(410) + K_{B \rightarrow M}(570) + K_{B \rightarrow M}(410) \right]$$

即 $\frac{1}{N_B} =$

$$\frac{1}{N} \left[1 + \frac{K_{B \rightarrow M}(570) + K_{B \rightarrow M}(410)}{\tau^1 + K_{M \rightarrow B}(570) + K_{M \rightarrow B}(410)} \right]$$

由于 $\epsilon_{B \rightarrow M}(570) \gg \epsilon_{B \rightarrow M}(410)$, $\epsilon_{B \rightarrow M}(410) \ll \epsilon_{M \rightarrow B}(410)$, 我们从上式可以看出:

1) 当只有黄光时, 细菌视紫红质分子会被激发到 M 态, 随光强增大, 被激发到 M 态的分子越多, 光强增大到一定程度, M 态分子数将不再大幅度增加。此时如果利用弱探测光测量 BR 的吸收特性, 将会发现随入射黄光的增大, 细菌视紫红

质呈现饱和吸收特性。

2) 黄、紫光共同作用时, 黄光将细菌视紫红质分子激发到 M 态, 但紫光会促使细菌视紫红质分子从 M 态返回到基态。此时上式右边分数项的分子和分母都分别随黄光和紫光的增强而增大, 分子在基态和激发态上的分布将不仅仅取决于黄光的强度, 而也依赖于紫光的强度。这样, 透射的紫光和黄光将会互相抑制。

这里我们利用 M 态对黄光的透过及基态对黄光的吸收特性实现非门运算, 而利用其饱和吸收特性及互补抑制效应实现“与”和“或”运算。

我们用 He-Ne 激光器输出的 633nm 红光作为激发源, 卤钨灯光经 525nm 干涉滤光片的绿光作为探测光, 改变 He-Ne 光功率照射细菌视紫红质膜并测透射样品的探测光功率, 得到了图 3 所

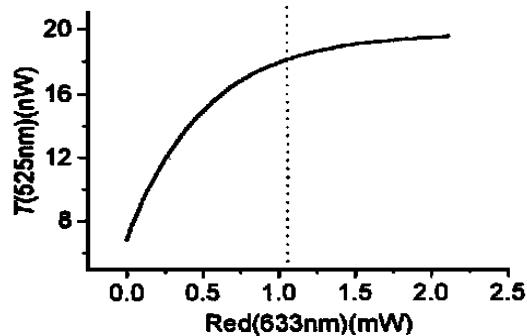


图 3 菌紫质的饱和吸收

Fig. 3 Saturated absorption of BR

示 525nm 光透射曲线, 可以看出, 在 1.0mW 红光照射下, 膜片对 525nm 光的吸收趋于饱和。如果有两束强度相同的红光照射样品并视其为光子逻辑门的输入, 打开光和关闭光分别对应逻辑值“1”和“0”, 视功率计的示数为输出, 红光总强度大于饱和吸收阈值, 菌紫质处于饱和吸收状态时得到的较大读数为逻辑值“1”, 而红光总强度小于饱和吸收阈值时测得的较小读数为逻辑值“0”, 那么适当控制红光强度, 若使得投射到样品的红光总功率大于此饱和吸收阈值而每一束红光强度小于或远小于引阈值, 则可以实现“与”运算, 若每一束红光功率都大于饱和吸收阈值, 则可实现“或”运算。这里的饱和吸收阈值不仅仅取决于样品的浓度、厚度、 M 态寿命, 而且还与照射条件有关: 同时入射的紫光越强, 此阈值越大。我们可以通过控制紫光强度来调节其阈值大小。两束光的共同作用结果如图 4 所示, He-Ne 光入射功率保持为 1.9mw, 而仅仅改变紫光强度。可以看到, 随着紫光强度的增加, 透射的探测光迅速减小, 减小到一

定值后基本保持不变。如果将紫光看作输入, 功率计读数为输出, 那么, 输入和输出之间有逻辑“非”的关系。

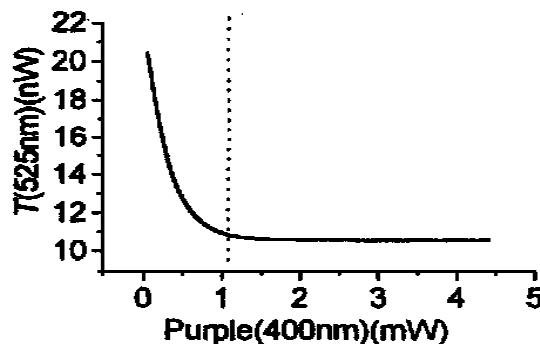


图 4 菌紫质的互补抑制

Fig. 4 Mutual suppression of BR

2 实验装置

基于细菌视紫红质对黄光和紫光的饱和吸收及互补抑制特性, 我们设计了如图 5 所示的实验

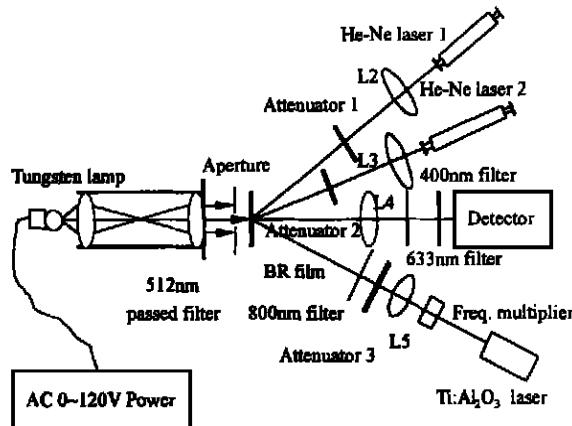


图 5 光子逻辑门实验装置

Fig. 5 Experimental setup for photonic logic gates

装置。虽然此装置的原理和光路都比较简单, 但是透射光强度直观地反映了逻辑值的“高”和“低”, 而且能很好地实现几种逻辑运算。细菌视紫红质样品为经过基因修饰过的 D96N 变种材料, 由中科院北京化学所提供, 膜厚 60 μm, 涂在 (4×4) cm² 的玻璃基片上。此样品较野生型菌紫质样品有很长的 M 态寿命(可达 3min 左右), 激发光源还是 He-Ne 激光器, 虽然细菌视紫红质基态吸收峰是 570nm, 但是其吸收带较宽, 在 633nm 处也有较大吸收。紫光来自 Ti:Al₂O₃ 激光照射的倍频仪, 中心波长 400nm 处, 考虑到卤

钨灯光富含红光成分以及弱光功率计前的滤除 He-Ne 光和紫光的 633nm 全反滤光片及 400nm 全反滤光片, 我们选择了 525nm 的光作为探测光, 探测光波长对探测结果的衬比(度)的影响如图 6 所示。这里的衬比(度)指的是保持激发光功率不变, 激发后与激发前透射细菌视紫红质膜的探测光功率之差与激发前透射 BR 膜的探测光功率之比值, 即

$$CR = (I_{\text{激发后}} - I_{\text{激发前}}) / I_{\text{激发前}}$$

显然, 负衬比(度)说明激发后 BR 对该探测光有较大的吸收。

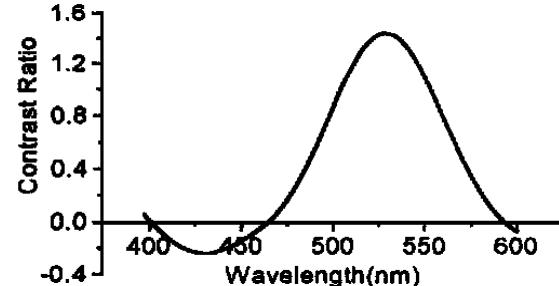


图 6 探测光波长对衬比(度)的影响

Fig. 6 Wavelength of probe light effects the contrast ratio

图中, Aperture 为一个紧贴样品的 0.5mm 的圆孔, 透过圆孔与样品的探测光经 L₄ 汇聚到弱光功率计的探头上。红光和紫光经扩束照射到样品的另一面, 各形成直径约为 3mm 的光斑, 以覆盖样品经光阑透光部分, 实现对经光阑的探测光的调制。对于非门试验, 只用一束 He-Ne 光作为偏置光。对于或门试验, 我们采用较弱的紫光作为偏置光, 与门和或门试验装置相同, 只是 400nm 偏置光要强得多, 使得样品对红光的饱和吸收阈值大于单束 He-Ne 光强, 功率的调节是通过增减衰减片来实现的。

3 实验结果

利用上述装置, 我们以低光强作为逻辑意义上的“0”, 以高光强作为逻辑意义上的“1”对“非”、“与”、“或”三种逻辑运算进行了模拟, 结果如表 1 所示。结果表明“0”、“1”可明显区别, 运算效果较好。

表 1 实验结果

逻辑功能	偏置光 (mW)	光输入(mW) 作为逻辑值“1”		逻辑输入 输入1 输入2	光输出 (nW)	逻辑输出
		输入1	输入2			
非	1.9 (633nm)	1.9 (400nm)		1	9.5	0
				0	21.4	1
与	4.2 (400nm)	2.1 (633nm)	2.1 (633nm)	0	7.4	0
				0	8.5	0
				1	8.5	0
				1	12.8	1
或	0.68 (400nm)	2.1 (633nm)	2.1 (633nm)	0	7.5	0
				0	12.6	1
				1	12.6	1
				1	13.9	1

4 总结

细菌视紫红质基态和 M 态有较大的差异吸

收,在较强的黄光照射下,大部分菌紫质分子被激发到 M 态,随光强继续增大,分子在基态和 M 态之间的分布不再有太大的变化,于是对黄光的吸收呈饱和吸收;此时紫光的照射将使得菌紫质分子又返回到基态,从而菌紫质对黄光吸收又增加,透射的黄光减小。黄光与紫光表现出明显的相互抑制特性。我们利用不同强度的红光和紫光照射菌紫质膜,控制其分子在基态和 M 态分布,改变了样品对探测光的吸收,调制了透过样品的很弱的探测光强度,模拟出了三种基本逻辑运算。细菌视紫红质的光敏特性和光循环特性使得它在光学信息存储及处理领域有很大的潜力⁵,研究和开发基于细菌视紫红质的光学器件有广泛的应用前景。

参考文献

- Chen Feng, Hou Xun, Li B·F, et al. Optical information storage of bacteriorhodopsin molecule film : Experimental study · Material Science & Engineering(B), 2000, 76(1) : 76~78
- Rao D V G L N, Aranda F J, Rao D N, et al. All - optical logic gates with bacteriorhodopsin films · Optics Communications, 1996, 127(1) : 193~199
- Hampp N, Silber A. Functional dyes from nature : Potentials for technical applications · Pure & Appl Chem, 1996, 68(7) : 1361~1366
- Song Q W, Zhang Chungping, Blumer R, et al. Chemically enhanced bacteriorhodopsin thin - film spacial light modulator · Optics Letters, 1993, 18(16) : 1373~1375
- Oesterhelt D, Brauchle C, Hampp N. Bacteriorhodopsin : a Biological material for information processing · Quarterly Reviews of Biophysics, 1991, 24(4) : 425~478

PHOTONIC LOGIC GATES BASED ON BACTERIORHODOPSIN

Feng Xiaoqiang^{1,2}, Chen Feng¹, Tian Yanning², Hou Xun^{1,2},
Li Baofang³, Jiang Long³

¹ State Key Lab of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Academic Sinica, Xi'an 710068

² Institute of Photonics & Photon Technology, Northwest University, Xi'an 710069

³ Molecular Science Center, Institute of Chemistry, Academic Sinica, Beijing, 100101

Received date: 2000-04-29

Abstract In this paper it is presented 3 photonic logic gate models based on bacteriorhodopsin polymer made from variant D⁹⁶N. With the increasing intensity of yellow illumination, BR shows saturated absorption property. The illumination of purple light will make the threshold of the saturated absorption higher and change the absorption spectrum. NOT, AND and OR gate are implemented by detecting the intensity of probe light which can be modulated lower or higher by illumination of violet and yellow light on BR film, determined by their relative intensity of the two wavelength and wavelength of probe light.

Keywords Bacteriorhodopsin(BR); Photonic logic gates; Saturated adsorption; Mutual suppression



Feng Xiaoqiang was born in August, 1974. He studied in Department of Physics, Northwest University since Sept, 1994 and began his graduated study at Institute of Photonics & Photon Technology, Northwest University in Feb, 1998. Under the guide of Professor Hou Xun, Academician of CAS, he had been participating in the research of Optical Information Storage in Bacteriorhodopsin Films in State Key Laboratory of Transient Optics, Xi'an Institute of Optical & Precision Mechanics, CAS. He will obtain his M.S. degree in the July, 2000.