

基于细菌视紫红质光子逻辑门的实验研究^{*}

冯晓强^{1,2)} 侯 洵^{1,3)} 杨文正¹⁾ 杨 青¹⁾ 陈 烽¹⁾

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⁾ 中国科学院研究生院, 北京 100039)

³⁾ 西安交通大学电子科学与技术系, 西安 710049)

(2003 年 1 月 21 日收到, 2003 年 2 月 25 日收到修改稿)

研究了基于细菌视紫红质(简称 BR 或菌紫质)变种材料 D96N 的 3 种光逻辑操作. 在 633nm 激发光照射下, 菌紫质分子会被激发到 M 态, 处于 M 态的菌紫质对 412nm 的紫光呈较大吸收, 会抑制同时入射的紫光. 选择合适的紫光强度, 通过 CCD 观测被抑制的 412nm 检测光透射强度分布, 模拟了“非”、“或非”、“与非”几种基本的光子逻辑操作.

关键词: 细菌视紫红质, 光子逻辑门, 互补抑制

PACC: 4280V, 4270G

1. 引 言

细菌视紫红质(bacteriorhodopsin, 简称 BR 或菌紫质)是一种与动物眼睛中视紫红质相类似的蛋白质, 是嗜盐菌的紫膜中唯一的蛋白质. 菌紫质由于其优良的光学非线性和光致变色特性, 得到了生物学家、化学家和物理学家的广泛关注和研究兴趣, 他们对菌紫质的组成、结构、光化学与光物理性质进行了深入的研究, 促进了其作为新型光致变色材料的应用, 使得它在光存储、光学信息处理领域以及作为光学器件研究领域有很大潜力^[1-3], 尤其是其 5000 线/毫米的高分辨率很有利于高密度信息存储以及光学器件的微型化. 德国和美国的研究小组已将菌紫质膜用于可擦写全息记录介质、三维光存储介质等应用研究领域.

2. 菌紫质光子逻辑门原理

研究表明, 菌紫质在光照时产生一快速光异构化过程——分子中生色团从全反到 13 顺的光异构化, 先后形成一系列表现出不同吸收光谱的中间态, 最后返回到基态 B. 菌紫质的光循环如图 1 所示^[4], 这些中间态中, M 态化学物理性质稳定, 吸收峰与 B 态吸收峰差值大, 寿命相对较长, 并且在其吸收带内

波长的光激励下能可逆地通过光化学反应直接返回到菌紫质 B 态, 很有利于做菌紫质光存储器及其他光学元件. 光子逻辑门将是高速光子计算机的基本运算单元, 研究和开发快速光子逻辑运算器件是研制光子计算机所要解决的基本课题之一. 图 2 为实际测到的菌紫质膜在 670nm 光激发前后的吸收, 激发前后分子分别主要处于 B 态和 M 态.

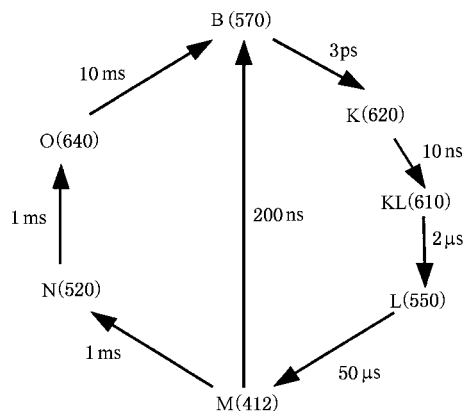


图 1 菌紫质的光循环

菌紫质光循环的中间态中, 除了 M 态之外, 其他中间态在室温下很不稳定, 寿命很短, 所以可以忽略掉这些短寿命的中间态, 认为在光的作用下分子只在 B 态和 M 态之间跃迁, 这样就得到了简化的光

^{*} 国家“九五”攀登计划(批准号 95-预-20)及中国科学院知识创新方向性项目(批准号 KGCX2-401)资助的课题.

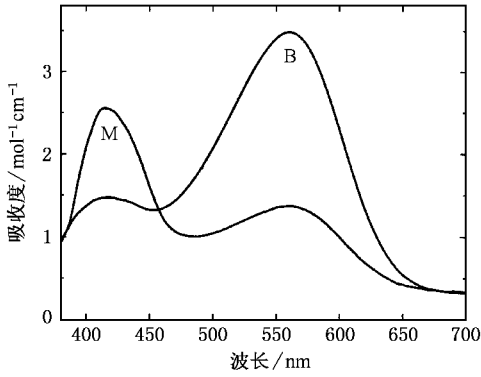


图 2 菌紫质膜 B 态和 M 态吸收曲线

循环模型.在某波长的光激发下,分子既有正向光反应,又有逆向光反应,但是正向和逆向光反应常数不相同,就导致了菌紫质分子在 B 态和 M 态上的重新分布.如果有波长和强度分别为 λ_i 和 I_{λ_i} 的多束光同时照射时,菌紫质分子在 B 态和 M 态上的分布达到动态平衡,可以用下式描述 B 态分子数^[5]:

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

式中

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

为正向和逆向光反应常数, $\Phi_{B \rightarrow M}$ 和 $\Phi_{M \rightarrow B}$ 为正向光和逆向光反应量子效率,对于菌紫质, $\Phi_{B \rightarrow M} = \Phi_{M \rightarrow B} = \Phi$, $\epsilon_{B \rightarrow M}(\lambda_i)$ 和 $\epsilon_{M \rightarrow B}(\lambda_i)$ 为波长为 λ_i 的光引起的正向光和逆向光反应的摩尔消光系数, N 为分子总数, N_A 为阿伏伽德罗常数, h 为普朗克常数, c 为光速, τ 为 M 态寿命.

菌紫质 B 态和 M 态的吸收峰分别对应黄光和紫光.当只有两束波长分别为 570 和 412nm 的单色光照射菌紫质膜时,考虑到 $\epsilon_{B \rightarrow M}(570) \gg \epsilon_{M \rightarrow B}(570)$, $\epsilon_{B \rightarrow M}(412) \ll \epsilon_{M \rightarrow B}(412)$,即黄光主要引起菌紫质分子由 B 态到 M 态的跃迁,紫光主要引起菌紫质分子由 M 态到 B 态的跃迁,上式可简化为

$$N_B = N \frac{\frac{C}{\tau} + \epsilon_{M \rightarrow B}(412) I_{412} \lambda_{412}}{\frac{C}{\tau} + \epsilon_{B \rightarrow M}(570) I_{570} \lambda_{570} + \epsilon_{M \rightarrow B}(412) I_{412} \lambda_{412}},$$

式中

$$C = N_A h c (2.3026 \Phi).$$

如果用 z 表示菌紫质膜内光传播的方向,再根据比尔-朗伯定律:

$$\frac{dI_{570}}{dz} = -2.3026 \epsilon_{B \rightarrow M}(570) N_B I_{570},$$
$$\frac{dI_{412}}{dz} = -2.3026 \epsilon_{M \rightarrow B}(412) N_M I_{412},$$

式中 $N = N_B + N_M$,可得

$$\frac{dI_{570}}{dI_{412}} = \frac{C}{\tau \epsilon_{M \rightarrow B}(412) \lambda_{570} I_{412}} + \frac{\lambda_{412}}{\lambda_{570}}.$$

同时代入边界条件

$$I_{570}|_{z=0} = I_{570,i}$$

和

$$I_{412}|_{z=0} = I_{412,i}$$

以及关系式,可得

$$I_{570,t} - I_{570,i} = (C/\tau) [\epsilon_{M \rightarrow B}(412) \lambda_{570}] \times \ln(I_{412,i}/I_{412,t}) + (\lambda_{412}/\lambda_{570}) (I_{412,t} - I_{412,i}),$$

式中下标 i 和 t 分别为入射光和透射光,可以看出,当 M 态寿命很长即 τ 充分大时,上式可简化为

$$I_{570,t} - I_{570,i} = (\lambda_{412}/\lambda_{570}) (I_{412,t} - I_{412,i}).$$

由上式可以看出,菌紫质在两束光的共同作用下对这两束光的吸收以一定的比例增减,对其中一束光吸收的增加会同时引起对另一束光吸收的增大.如果采用一束较强的黄光和一束较弱的紫光照射菌紫质,那么,菌紫质会对紫光和黄光呈较大吸收,但是透射的紫光很微弱,好像被黄光抑制一样.同理,如果黄光较弱而紫光较强,那么黄光将被紫光抑制,黄光和紫光呈相对互补抑制特性.

菌紫质 B 态吸收峰为 570nm,但是它的吸收带较宽,在 633nm 处也有较大吸收,所以可以用 He-Ne 激光器输出的红光作为激发源,卤钨灯光经 412nm 干涉滤光片的紫光作为偏置光,观察菌紫质对这两束光的互补抑制现象及这两束光之间所表现出来的逻辑关系:随激发光功率的增加,偏置光会被抑制掉,此时激发光和透射的偏置光之间有逻辑“非”的关系.如果有多束强度相同的红光照射样品并且每一束光的强度都能抑制掉紫光,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输入值“1”和“0”,视透射的紫光为输出,有透射光和无透射光对应逻辑值“1”和“0”,那么,输入和输出之间有逻辑“或非”关系.如果这几束红光总强度刚好能抑制掉紫光,那么,输入和输出之间有逻辑“与非”关系.

3. 实验与结果

实验装置如图 3 所示. 菌紫质样品为经过基因修饰过的 D96N 变种材料, 较野生型有很长的 M 态寿命(可达 3min 左右). 激发光源是 He-Ne 激光器, 紫光来自经平行光管和 412nm 透过的干涉滤光片的卤钨灯光. 图 3 中光阑为一个紧贴样品的直径为 3mm 的圆孔, 透过圆孔与样品的偏置光强分布经透镜成像到 CCD 光敏面上. 目标 1 和目标 2 为在黑纸上剪成的两个矩形条状孔, 一个水平放置, 另一个竖直放置. 两束红光经扩束镜和目标照射到样品的表面, 各形成长 5mm、宽 2mm 的水平和竖直矩形光斑, 交叉成十字打在样品经光阑透光部分, 用以对经光阑的偏置光的调制. 对于非门实验, 只用一束 He-Ne 光作为激发光(输入), 而且也不用目标, 直接用扩束

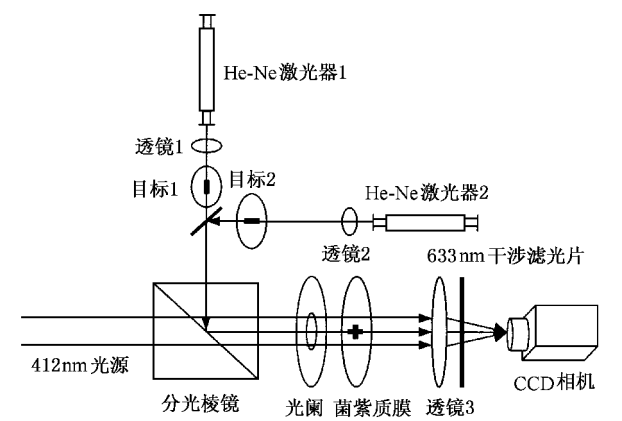


图 3 光子逻辑门实验装置

和衰减后的光照射样品. 对于“或非”门实验, 则采用较弱的紫光作为偏置光. “与非”门和“或非”门实验装置相同, 只是 412nm 偏置光较强, 使得单束红光不能抑制掉紫光而两束红光可抑制掉紫光. 偏置光功率的调节是通过增减衰减片和调节卤钨灯电压来实现的.

利用上述装置对几种基本光子逻辑门进行模拟, 实验结果如图 4 所示. 其中图 4(a)和(b)分别为非门实验中未打开红光和打开红光时所采集. 由图 4 可以看出, 菌紫质在红光照射的区域几乎吸收了所有的偏置光, 而红光未照射的区域还有较强偏置光透过. 如果把红光看作输入, 紫光看作输出, 那么, 输入和输出有很好的“非”关系. 由图 4(c)可以看出, 在有红光照射的区域都没有紫光透过, 输入和输出之间有较好的“或非”关系. 再适当增加紫光强度, 输入与“或非”门的输入一样, 输出则变成图 4(d), 不难看出, 此时只有在两束红光共同照射的区域紫光才被抑制, 输入与输出有“与非”关系. 每个实验过程中都要认真调节偏置光的强度.

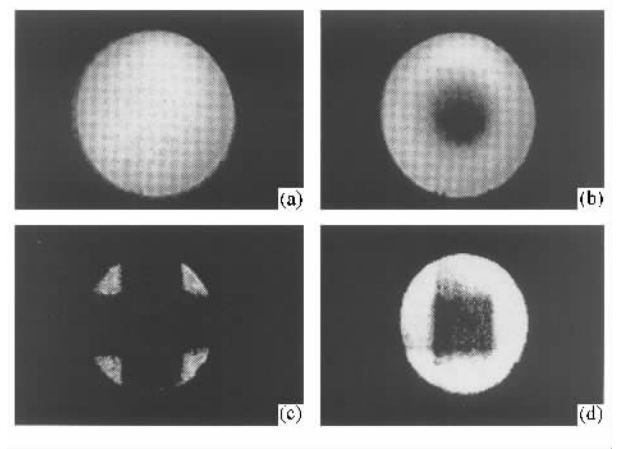


图 4 光子逻辑门实验结果

4. 小结

菌紫质对同时入射的黄光和紫光有互补抑制特性, 任何一束光的加强都会使得另一束光的透过减小. 选择较强的红光和较弱的紫光, 适当调整紫光强度, 在只用一束红光就可抑制掉紫光时, 实现了“非”和“或非”运算. 再增加紫光强度, 当两束红光共同作用才能抑制掉紫光时, 实现了“与非”运算.

[1] Chen F *et al* 2000 *Mater. Sci. Eng.* B **76** 395

[2] Hamp N 2000 *Chem. Rev.* **100** 1755

[3] Yang W Z *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 761 [in Chinese] 杨文正等 2003 物理学报 **52** 761]

[4] Hamp N and Silber A 1996 *Pure Appl. Chem.* **68** 1361

[5] Li Y D *et al* 1999 *Acta Opt. Sin.* **19** 677 [in Chinese] 李玉栋等 1999 光学学报 **19** 677]

Photonic logic gates based on bacteriorhodopsin^{*}

Feng Xiao-Qiang^{1,2)} Hou Xun^{1,3)} Yang Wen-Zheng¹⁾ Yang Qing¹⁾ Chen Feng¹⁾

¹⁾ *State Key Laboratory of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy Sciences, Xi'an 710068, China*

²⁾ *Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

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

(Received 21 January 2003 ; revised manuscript received 25 February 2003)

Abstract

In this letter three photonic logic gate models are presented based on the bacteriorhodopsin(BR) polymer made from variant D96N. With the illumination of 633nm laser the BR molecules can be excited to the M state and show a strong absorption at 412nm, so the intensity of transmitted purple light will decrease until zero when the exciting light is strong enough. A CCD camera is used to detect the distribution of transmitted purple light intensity that can be modulated by illumination of 633nm laser on BR film and NOT, ORNOT, ANDNOT gates are simulated under the special intensity of purple light.

Keywords : bacteriorhodopsin(BR), photonic logic gates, mutual suppression

PACC : 4280V 4270G

^{*} Project supported by the National " Climbing " Program in the " 9th 5-Year Plan " of China(Grant No.95-Yu-20) and the Major Project of Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences(Grant No.KGCX2-401).