

文章编号: 1002-2082(2004)06-0005-04

细菌视紫红质近场光存储特性的研究

冯晓强^{1,2,3}, 杨文正^{1,2}, 白永林^{1,2}, 侯洵¹, 杨青¹, 陈烽¹

(1. 中科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. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 西北大学 光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710069)

摘要: 结合近场光学显微镜, 利用菌紫质 M 态和基态之间的跃迁, 对 BR-D⁹⁶N 样品作了静态近场光存储特性的研究。结果表明, 近场区域内细菌视紫外质在光激发前后对红光的吸收有较大差别, 而且激发后无光照时会缓慢弛豫到激发前的状态, 具有光致变色特性和热弛豫特性, 可望作为近场光存储材料和微光学信息处理器件材料。

关键词: 细菌视紫红质; 近场光学显微镜; 光致变色

中图分类号: O434.19-34

文献标识码: A

Study on the Near-Field Optical Storage Property of Bacteriorhodopsin

FENG Xiao-qiang^{1,2,3}, YANG Wen-zheng^{1,2}, BAI Yong-lin^{1,2}, HOU Xun¹, YANG Qing¹, CHEN Feng¹

(1. State Key Lab of Transient Optics and Technology, Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics,

CAS, Xi'an 710068, China; 2. Graduate School, CAS, Beijing 100039, China; 3. Institute of Photonics and

Photon-technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: With near-field optical microscope, the static photochromic property of BR-D⁹⁶N film is investigated based on its transition between B state and M state. The results show that in the near-field area of BR film, it has strong absorbance to red light before excited by green light, but not after excited to M state, and BR can relax to B state when there is no exciting light. This near-field property of BR is similar to that of far-field, having special character of photochromism and relaxation, and BR is expected to be used as high-density optical storage media and micro-devices of optical information processing.

Keywords: bacteriorhodopsin; near-field optical microscope; photochromism

引言

迄今为止, 人类发现的生物光合系统只有 2 类: 一类是存在于绿色植物中的叶绿素分子内的光合作用系统; 另一类是在 20 世纪 80 年代发现的存在于嗜盐菌细胞膜中的唯一的一种蛋白质, 称为细菌视紫红质或菌紫质(BR)。菌紫质分子由 248 个氨基酸和 1 个生色团——视黄醛组成。当受光照时, BR 分子中生色团迅速发生从全反到 13 顺的光异构化, 先后形成一系列中间产物, 这些中间产物都具有不同的吸收光谱性能、寿命及热稳定性, 部分中间态能在其对应的吸收峰波长的光激励下

可逆地通过光化学反应直接返回到 BR 基态。在此过程中, 菌紫质将光能转化为电化学梯度, 供其细胞合成 ATP 及其它生理活动所需的能量。由于菌紫质可以脱离生物体稳定存在, 并且某些中间态表现出较好的稳定性及独特的光学特性, 因此自从菌紫质被发现以来, 一直备受科学家的重视, 而且大量的研究工作(对菌紫质光致变色特性、非线性以及基于这些特性的光学原型器件的研究)也随之展开, 并获得了许多新的理论和成果^[1]。

1 细菌视紫红质的光致变色

收稿日期: 2003-07-14; 修回日期: 2004-04-15

作者简介: 冯晓强(1974—), 男, 陕西宝鸡人, 中国科学院西安光学精密机械研究所在读博士研究生, 主要从事近场光学显微和近场高密度光存储研究工作。
<https://www.cnki.net>

在光照条件下,菌紫质会发生光化学反应,形成一系列中间产物后又返回到初始态——基态。在此过程中,菌紫质吸收光能,并将其转化为跨膜的电能。在这些中间态中,有些中间态在室温下寿命非常短,而且很不稳定,持续很短的时间之后会跃迁到其它中间态中去;而有些中间态则具有较好的稳定性,在室温下寿命较长,所以受光照之后的菌紫质,其大部分分子都处于一个比较稳定的中间态上,从而也表现出此中间态的性质。如果此中间态的吸收光谱与基态吸收光谱差别较大,那么就有可能作为光存储介质。在细菌视紫红质的中间态中,M态是室温下比较稳定的中间态。经过基因修饰过的菌紫质,其M态寿命可以达到数分钟,较野生菌紫质(毫秒量级)的寿命增长了许多。而且,如图1所示,M态的吸收光谱峰值在412 nm处,与570 nm处的基态吸收光谱峰值相距较大,通过光谱可以很容易地区别基态和M态,从而满足光致变色光存储材料的光谱要求。基因修饰型细菌视紫

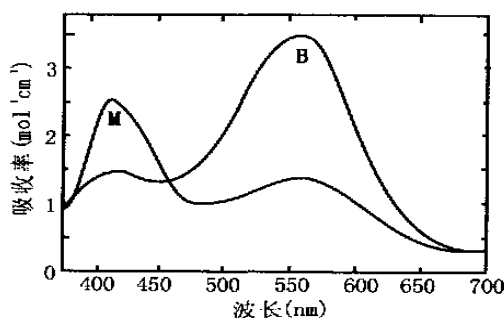


图1 BR膜B态和M态吸收曲线

Fig. 1 Absorbance of B and M state of BR

红质光循环中的部分其它中间态在室温下也具有较好的稳定性,可以用来做光存储介质光学信息处理材料^[2,3]。如果不考虑其它短寿命中间态,只考虑室温下稳定的中间态,细菌视紫红质基态与激发态两个能级之间的跃迁可以表示为:

基态 $\rightleftharpoons$ 激发态

经基因修饰过的细菌视紫红质变种材料D^{96N}的M中间态在室温下具有很好的稳定性。虽然光通过普通光学显微镜无法聚焦为波长量级大小的光点,但可设法利用一小孔来获得这样的点,只要这一小孔的孔径足够小。20世纪80年代发展起来的扫描近场光学显微镜(NSOM)技术给超高密度光存储带来了全新的概念和实现的可能。

扫描近场光学显微技术克服了光学衍射的物理极限,横向光学分辨率可达数十纳米量级。它取消了物镜,而直接将激光用锥尖形光纤或光导管引向存储介质,在波长量级距离以内形成几十纳米的光点,用扫描方式得到显微图像。当入射光通过小孔后,虽然光通过小孔会迅速衍射到各个方向,但初始的束径由该小孔的尺寸决定,在非常靠近小孔的近场区域,光束的束径与小孔的孔径相等。如果样品表面被置于这一近场区域,并利用该近场光点对样品进行二维扫描,则通过对表面各点信息的采集处理,就可以建立样品表面的三维图像。如果小孔具有亚波长量级孔径,则表面图像将具有亚波长的横向分辨率。近场小孔可用光纤探针的针尖来实现。NSOM的分辨率取决于光纤探针针尖孔径的大小。探针技术以及探针与表面倏逝波的耦合是NSOM的核心问题。优化光纤探针的设计和制作,可以使NSOM达到高分辨率和高探测灵敏度。

NSOM进行超高密度存储的关键技术主要是探针针尖的制作和针尖与记录介质的间隔控制,后者对NSOM的正常运行至关重要。小孔出射的光能量密度对间距非常敏感,按能量密度大小可分为3个区域:瞬衰场区、近场区和远场区。在与小孔尺寸相当的区域内,近场区能量密度基本保持不变,而后按3.7的指数因子急剧下降。信息记录和读出时,记录介质必须位于近场区,因此必须严格控制二者的间隔。

结合近场扫描探测技术和菌紫质分子水平所发生的光致变色特性进行超高密度信息的记录、再现、擦除,无疑是一个极有前途的提高信息存储密度的新方法。本文以样品上一个 $\Phi=100$ nm左右的小点作为研究对象,用532 nm绿光作为激发光、633 nm红光作为探测光来研究样品激发前后对光的吸收变化。

结合近场光学显微镜,我们对由德国提供的D^{96N}样品做了静态近场光致变色的研究。此样品M态寿命较短,作为存储器在用600 nm光读出信息时,图像会在写入后1秒钟之内翻转,但会获得较好的对比度。这里,我们只是将样品上一个 $\Phi=100$ nm左右的小点作为研究对象,用532 nm绿光作为激发光、633 nm红光作为探测光来研究样品激发前后对光的吸收变化,而不是对一个面上很

多点同时进行研究,而且 NSOM 的探测针尖除过 Z 方向向样品逼近和微小振动之外,不在 X-Y 平面上扫动,所以这里研究的是静态特征。

2 NSOM 的系统控制

NSOM 针尖向样品逼近过程和针尖在样品表面近场区域内的移动都是在亚微米量级尺度内进行的,因此如何控制针尖的准确定位就显得至关重要。NSOM 控制流程如图 2 所示,具体实现起来要

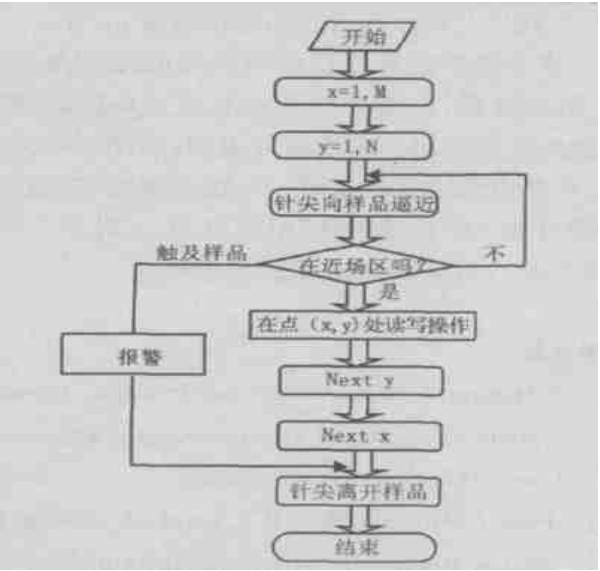


图 2 NSOM 针尖控制流程图

Fig. 2 Flowchart of fiber tip control of NSOM 涉及到微弱信号检测、红绿光同时向光纤耦合、数模之间转换以及相应的控制软件等工作。几个主要环节的实现过程如下。

2.1 针尖是否位于近场区域的检测

这是利用压电效应来实现的。将针尖固定于左右靠得很近的两片相同的压电陶瓷片(4×3 mm²)上,其中一个压电片电极接振荡器产生的低频信号,作为激励电极,另一个压电片电极接锁相放大器的输入,作为检测电极。调整振荡器频率,使输出信号的频率与压电片固有频率 f_0 相同,于是压电片将带动针尖做谐振。由于针尖的振动,检测电极也跟着做受迫振动,并在其电极上产生相应的电信号。检测放大的这个电信号就可知道针尖是否在近场区域内。针尖处于样品的远场时,振幅相对较大,一旦到达近场区域,样品与针尖之间由于原子力的影响将相互吸引,于是针尖振幅明显减小。此近场区域大约在样品表面上一个波长量级以内。

2.2 针尖的扫描控制

由于针尖一般在几个微米范围之内移动,扫描时不能采用电机拖动针尖的方法。这里仍采用压电陶瓷管来实现。在压电陶瓷管的电极上分别加 X、Y 方向扫描电压及 Z 方向控制针尖向样品表面逼近的信号电压,在直流电压的作用下,压电陶瓷管会在相应方向上做微小的“伸展”,带动针尖在样品表面扫描。

2.3 信号的“读”和“写”

针尖在近场区域内定位后打开 Nd : YAG 激光器,耦合进光纤的绿光经光纤以较高功率密度打在样品上,形成 $\Phi=100\text{ nm}$ 左右的光斑。样品下方装有光电倍增管,读出时将较弱的 He-Ne 激光耦合进光纤,用光电倍增管来检测透射的探测光强度。

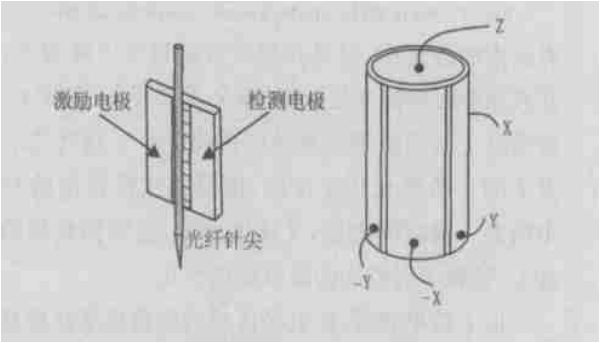


图 3 近场距离传感器和扫描管

Fig. 3 Near-field sensor and XYZ scanner

3 菌紫质的近场特性

为了研究一个点的静态光学特性,在实验过程中,断开了扫描电压控制器与近场显微镜之间 X、Y 方向扫描的连线。这样,系统工作时虽然产生了水平扫描信号,但是它并不控制针尖在 X、Y 平面上的运动。计算机控制扫描管确保探针位于 BR 膜的近场距离之内,同时采集绿光激发前后透过 BR 膜的红光光强信息,并显示出来。于是,样品上这个点在光激发后随时间透射的光强度被计算机记录(与水平方向的扫描电压相对应),并且把透射光随时间的变化转化为空间平面上的分布,这就是“扫描”得到的图片。试验中的探测光用 He-Ne 激光,激发光用倍频的 YAG 脉冲激光,脉宽为 10 ns。多次实验表明其结果重复性很好。其中最具有代表性的图片如图 4 所示,此图片的灰度值反映了透射 BR

的光强度。图片中,左→右→下→右→左→下……的“Z”形对应着时间的由前到后。图中灰度最小的区域是在激发样品的过程中采集的。为了防止高功率激发光源损坏光电倍增管,采集过程中关掉了光电倍增管的电源,所以此处不反映样品的任何性质。可以看到,在光激发前后,细菌视紫红质对红光的吸收有较大差别:在激发前,细菌视紫红质对红

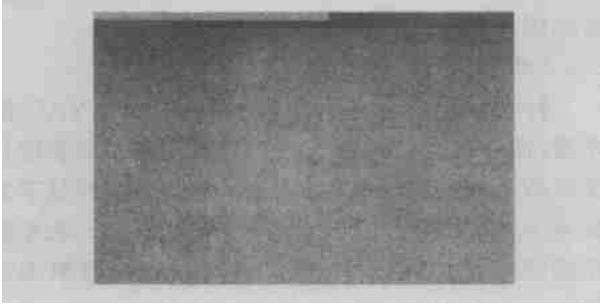


图 4 细菌视紫红质近场区的光致变色

Fig. 4 Near-field photochromic property of BR

光有较大的透过率,但是在激发后透过率下降很多,并且随着时间的变化,透过率又逐渐升高。实际上,这是处于基态的细菌视紫红质膜吸收了绿光之后发生的一系列光化学反应:停留在比较稳定的M 中间态一段时间之后,又缓慢弛豫,返回到初始的基态,导致了对红光的吸收率的变化。

以上结果表明,在近场区域内细菌视紫红质具有跟远场一样的光致变色特性和热弛豫特性,即受到光激发后会启动光化学循环,经历许多中间态之后又会在没有激发光时返回到初始的基态,许多中间态表现出不同的吸收光谱。根据此灰度图像还原的激发前后样品随时间对红光吸收的归一化相对值如图 5 所示。为了更好地对比激发前后红光透过率的变化,图中去掉了打开激发光时所得到的数据。由此图可以更直观地看到细菌视紫红质在绿光激发前后对红光吸收的变化过程。

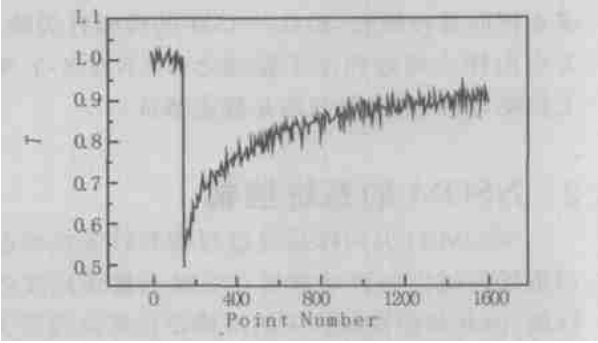


图 5 菌紫质膜近场透射率的变化

Fig. 5 Near-field transmission of BR film

基于细菌视紫红质近场区域的光学器件体积小、集成度高,作为存储介质有望实现超高密度和海量光信息存储。理论研究表明,采用近场光学技术,并利用光致变色材料——细菌视紫红质作为光存储介质(存储密度极限^[4]可以达到 $10^{12} \sim 10^{13}$ bits/cm²),可望实现超高密度光存储。

参考文献:

[1] N Hamp, A Silber. Functional dyes from nature: Potentials for technical applications [J]. Pure & Appl Chem, 1996, 68(7) : 1361—1366.

[2] Feng Chen, Xun Hou, B F Li, et al. Optical information storage of bacteriorhodopsin molecule film: Experimental study [J]. Material Science & Engineering(B) , 2000, 76(2) : 395—397.

[3] 杨文正, 杨青, 陈烽, 等. 基于细菌视紫红质薄膜的空间调制器试验研究[J]. 物理学报, 2003, 52(3) : 761—766.

[4] Tsuyoshi Tsujioka, Masahiro Irie. Theoretical study of the recording density limit of a near-field photochromic memory [J]. J Opt Soc Am B, 1998, 15(3) : 1140—1146.