

用聚苯乙烯小球模拟生物组织中的光强分布*

郭红莲 程丙英 张道中

(中国科学院物理研究所凝聚态物理中心光物理实验室,北京 100080)

(2002 年 5 月 14 日收到 2002 年 7 月 4 日收到修改稿)

用水中周期排列的直径为 $3\mu\text{m}$ 的单层聚苯乙烯小球以及单个聚苯乙烯小球模拟对光敏感的生物组织,如绿色植物叶肉细胞、动物皮肤的表皮细胞、苍蝇蜜蜂等的复眼以及一种海蛇尾背部的光敏器官的光强分布.通过观测聚苯乙烯小球在不同深度的光强分布,发现随着深度的改变其光强分布是截然不同的.在小球的横截面上,光强分布不很均匀而且呈有规律的花纹图案.在小球的外面,光强分布表现为独立的透镜成像分布.周期排列的小球与单个小球在其横截面上的光强分布也完全不同,前者的光强分布表现出球与球之间很大的相关性.

关键词:生物组织,周期排列,光强分布

PACC:4230,8750E

1. 引言

生物学的世界是一个微妙而又高度复杂的世界,人们通过对生物学的研究得到许多很大的启示.在对植物的光合作用的研究中,人们发现只有绿色植物和一些有光合能力的细菌能将太阳能转换为化学能.而在这些有光合作用能力的生物体中,色素的存在对光合作用起着决定性的作用,它可以吸收、传递光能.由于色素有如此重要的作用,那么色素的合理分布对于提高光合作用的效率具有决定性意义^[1].另外,通过对苍蝇、蜜蜂、蜻蜓等能够快速而准确识别、捕获物体的研究中发现,这些昆虫都有一种特殊的器官,即由许许多多只小眼组成的复眼,每只小眼就如同一个光学微透镜,可以独立成像.科学家们基于此原理发明了应用于军事上的多元相控阵“蝇眼”雷达、高能宇宙射线空气簇射“蝇眼”探测器以及一次能拍摄到上千张清晰度很高的照片的“蝇眼”照相机.在 LCD 投影仪的技术革新中,科学家们应用了复眼透镜技术,使投影机光源发射出的光线以相同的角度投射到液晶板上,均匀度提高到 95% 以上.在对一种没有眼睛但对光非常敏感的海蛇尾的研究中发现它的背部布满了周期排列的球状结构的方解石晶体^[2],而这种结构的存在为其能够对光的刺激产生响应提供了合理的解释.为什么这些生物体能如此精确而又合理的感受并利用光能呢,其

必然原因就是这些生物体都具备能精确感光的物质并且能实时调整其分布以响应不同的光刺激.本文是基于上述生物体中具有对光敏感的组织观点,用水中的聚苯乙烯小球在不同深度的光强分布来模拟生物组织在不同深度的光强分布,这对进一步了解这些对光敏感的生物组织的结构和功能以及解释其感光机理具有重要的指导意义.

2. 实验方法

实验装置如图 1 所示.

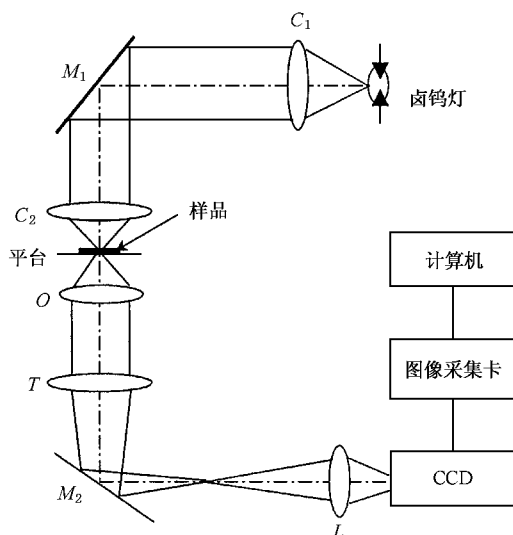


图 1 实验装置示意图

* 国家自然科学基金(批准号:1989380)资助的课题.

图中 C_1, C_2 为聚光镜组; M_1, M_2 为反射镜; O 为显微镜水浸物镜; T 为显微镜中的 Tube lens; L 为一成像透镜.

样品的制备:先将聚苯乙烯小球(Duck Scientific Corp. 的产品, 小球直径 $3.063\mu\text{m}$, 标准偏差 $\pm 0.027\mu\text{m}$, 浓度 1.0% 固体含量, 折射率 $n = 1.59$) 的悬浊液放入超声器中充分超声, 使小球尽量呈单分散状, 用注射器将混合均匀的浊液注入干净的样品

池. 样品池由两片盖玻片组成, 上面一盖玻片打有一直径为 8mm 的孔, 与下面的盖玻片用胶粘在一起. 将充满浊液的样品池放入一干净且较密闭的器皿中. 样品池中的水分自然蒸发的同时, 小球在重力、表面所带电荷的作用力以及与样品池表面之间的作用下自动排列, 待水分蒸发干后, 小球就排列成具有周期结构的晶体. 控制加入样品池的浊液的量, 使其在样品池中只排一层. 然后将二次蒸馏水慢慢注

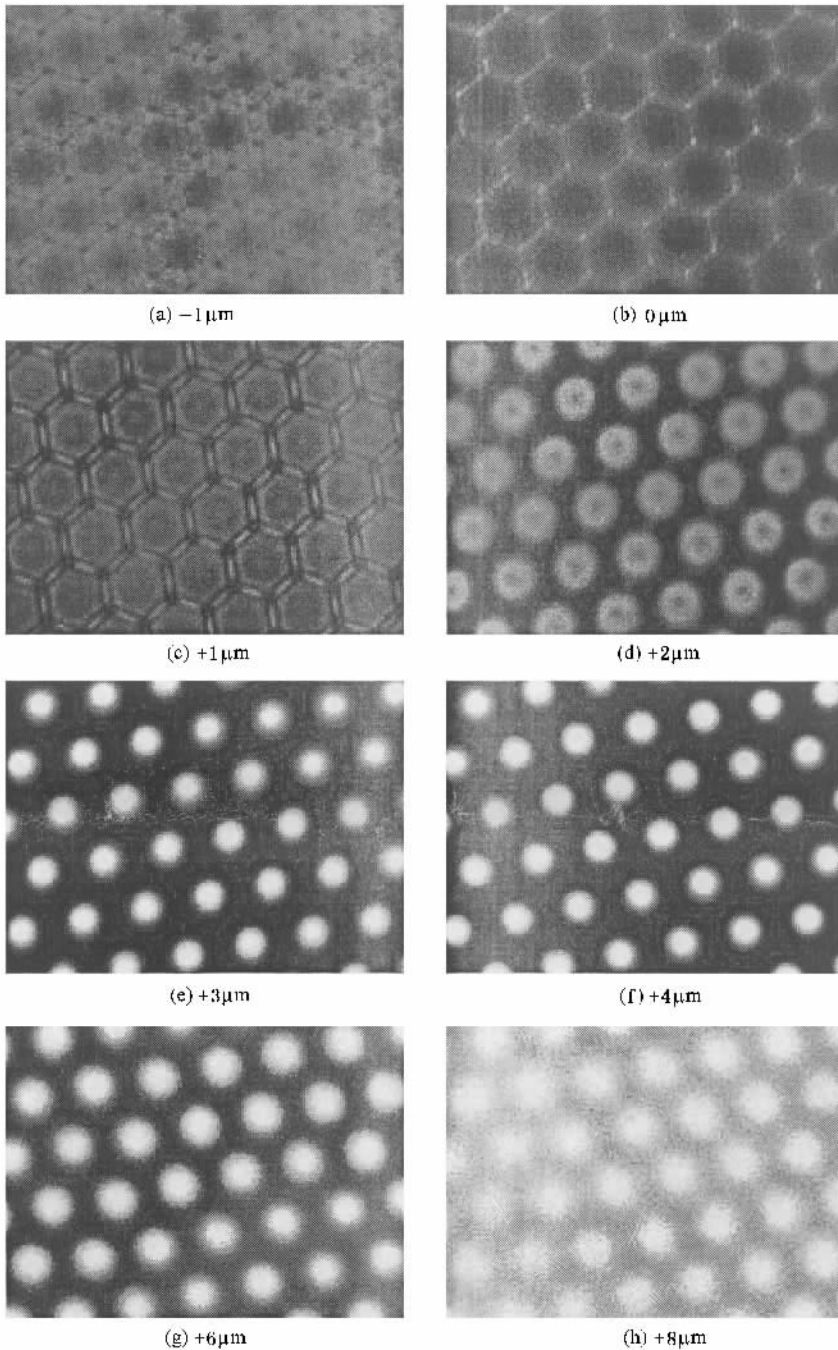


图 2 周期排列的小球在不同深度的光强分布

入载有晶体的样品池中.在注入水的过程中,一定要确保排好的小球不要被水冲起来.

测量:卤钨灯发出的光经 C_1, C_2 聚光镜组对光束会聚照在样品上,如图 1 所示.样品放置在倒置显微镜(Leica DMIRB)的平台上,经显微镜水浸物镜($100\times NA=1.2$)和 Tube lens 放大 100 倍,透镜 L 对其二次成像于 CCD(Charge Coupled Device)的光敏面上.8 位黑白视频图像采集卡(OK-M10M)采集图像送入计算机现实、观察并存储.通过调节物镜的像平面,使得对周期排列的聚苯乙烯小球样品的不同深度进行成像,这样像的亮暗就反映了光强的分布.物镜的焦深为 $0.3\mu\text{m}$.物镜的微调精度为 $0.3\mu\text{m}$,由其调节旋钮决定,其读数显示在显微镜的电子显示屏上.

3. 实验结果

结果如图 2、图 3 所示.图中照片有激光打印机输出.图 2 为水中周期排列的聚苯乙烯小球在不同横截面上的光强分布.其中图 $\chi(b)$ 为小球最大横截面的光强分布,其上下位置的误差不超过 $\pm 0.3\mu\text{m}$.我们定义其为零点,并规定向下为正.图 $\chi(a)$ 图 $\chi(c)$ 分别为在最大横截面上下 $1\mu\text{m}$ 处的光强分布,此时还处于小球的横截面上,其光强分布表现出小球与小球之间很大的相关性,且分布较为复杂.这种相关性主要源于相邻小球对入射光的反射与折射所导致

的在空间同一位置的干涉效应.以图 $\chi(c)$ 为例,改干涉面处于球心面附近.对于某一特定波长的光,单个小球在这一平面内的反射光与正入射光的干涉图案由于对称性的关系呈强弱间隔的球状分布.接近掠入射的反射光所形成的干涉环靠近小球表面,且光强最强.有相邻小球存在时,这种极大强度的环状反射光就会被再次反射和折射,形成新的干涉图案.图案的结构对称性完全由小球排列的对称性决定.在其他平面上的干涉图案由于位置的不同,其干涉的图案也会随之改变.当远离小球时,干涉效应不再明显,光线的传播行为由环状透镜对光的聚焦效应所决定,如图 $\chi(f)$ 所示.这一结果提示我们在高等植物细胞中对光合作用起着决定作用的色素分子以及动物皮肤的表皮细胞中的色素可能也呈与光强分布相关的有规律分布.在光合作用过程中,为了尽可能地利用光能,色素应大量分布在光强较强的位置.同样对于皮肤细胞当受到强光照射时,色素就会大量合成并分布到皮肤表面,以防止内部组织受强光的伤害.从优化色素分布使其达到最佳利用效果的角度看,色素分布应与光强分布有一定的联系.图 3 为水中单个小球在不同截面的光强分布.从中可以看出单个小球与周期排列的小球在其截面上的光强分布是不同的.那么对于单细胞生物体如蓝藻,其光合作用片层呈环状结构^[4]是否遵循类似单个小球的光强分布而进行分布呢?这就为我们研究色素的分布开辟了一条新途径.另外,对于小球外面的光强,

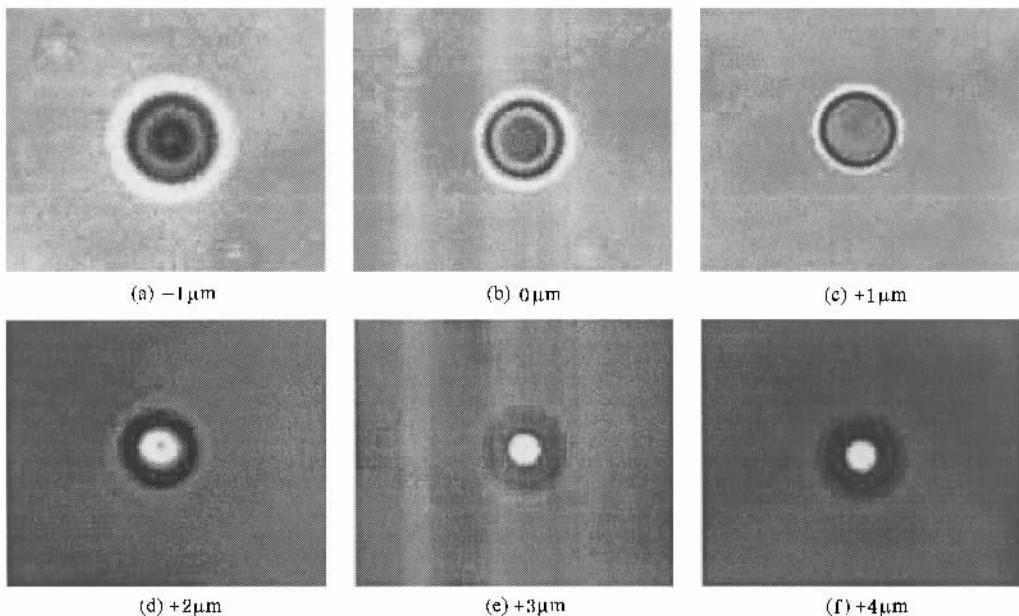


图 3 单个小球在不同深度的光强分布

如图 2(d)–(h) 以及图 3(d)–(f), 其分布表现为独立透镜成像的光分布. 聚苯乙烯小球可看作一球形透镜^[3], 其焦距 f 的公式为

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \frac{2}{r}, \quad (1)$$

其中 n_1, n_2 分别为聚苯乙烯小球及周围介质的折射率, r 为小球半径. 由此公式求得直径为 $3\mu\text{m}$ 的小球当其周围介质为水时, 其焦距为 $3.8\mu\text{m}$. 在图 2(f) 中光束经小球分别聚集, 焦斑的直径约为 $1.5\mu\text{m}$, 此时的光强达到最大值, 而且每个小球的亮度分布比较均匀, 而这一位置与理论计算的焦平面大体一致. 这种情况也许最能解释复眼优于单眼以及许多应用中利用多个微透镜来增加视角及亮度均匀性的原理. 而海蛇尾的神经束正好长在其背上的微透镜的焦点处也是同样的原理^[2].

4. 讨 论

由于生物组织组成及结构上的复杂性, 给研究

者带来了很大的困难与挑战. 通过直接研究生物组织而得出规律性的结论似乎很困难. 那么假设一种与生物组织近似的模型通过对模型的研究进而了解生物体的性质是当前生物学常用的手段之一. 本文用聚苯乙烯小球来模拟生物体中对光敏感的组织是基于几种考虑. 聚苯乙烯小球跟对光敏感的生物组织一样都是透光材料; 另外, 水溶液中周期排列的小球与某些生物组织具有类似的结构, 尽管生物组织非常复杂, 但用简化的模型从某一角度来了解生物组织对我们还是有启发性的意义的. 而通过模拟生物体合成、制作一些材料或器件的时候, 这一结果对怎样才能让光能利用达到最佳具有指导性意义. 比较图 2 和图 3 可以发现, 颗粒阵列及单个颗粒在光照下其光强在颗粒内部的分布是十分不同的. 对于单个粒子, 其内部的光强分布具有圆对称的特点, 而对阵列排列的小球, 其光强分布呈现出与阵列形状有关的分布. 联系到生物体, 细胞是以阵列的方式存在的, 因此在研究这类客体对光的影响时, 必须考虑阵列带来的效应, 与单体状态是有很大的差别的.

- [1] Zhai Z H 1996 *Cell Biology* (Higher Education Press) p157 (in Chinese) 翟中和 1996 细胞生物学 (高等教育出版社) 第 157 页]
 [2] Aizenberg J, Tkachenko A, Weiner S, Addadi L and Hendler G 2001 *Nature* **412** 819

- [3] Sasaki M, Kurosawa T and Hane K 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 785
 [4] Zhai Z H 1996 *Cell Biology* (Higher Education Press) p24 (in Chinese) 翟中和 1996 细胞生物学 (高等教育出版社) 第 24 页]

Photonic intensity distribution simulations of biological tissues with polystyrene spheres *

Guo Hong-Lian Cheng Bing-Ying Zhang Dao-Zhong

(*Optical Physics Laboratory, Institute of Physics and Centre for Condensed Matter Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

(Received 14 May 2002 ; revised manuscript received 4 July 2002)

Abstract

The photonic intensity distributions of biological tissues which are sensitive to light such as mesophyll cell of green plant, epidermal cell of animal, compound eye of insect are simulated with single and periodically arrayed $3\text{-}\mu\text{m}$ -diameter polystyrene spheres in water. The results show that the photonic intensity distributions are very different in different cross sections of spheres. Within the section of spheres, the photonic intensity distributions present well-regulated pattern, which out of the sphere the distributions are similar to that of lens imaging. In addition, the difference of the distributions between single and periodically arrayed spheres in cross section is obvious. The distribution of the latter presents the correlativity of spheres.

Keywords : biological tissues, periodic array, photonic intensity distributions

PACC : 4230, 8750E

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 1989380).