

实验四 光力学效应与光镊实验

一、实验原理

1. 光镊原理

光作为电磁波，不但具有能量，而且具有动量。光与物质间可以交换动量，使受光照射的物体受到一个力或力矩，也即产生光的力学效应。光的力学效应是光与物质相互作用的重要内容，基于这一原理的光镊技术在物理、生物、化学等科学前沿都有广泛应用。

光镊是利用激光微束的动力学效应实现的。即把具有一定强度和模式的激光束会聚到微米量级，则在光束焦点附近不仅具有沿光束传播方向上的散射力存在，而且在垂直光轴传播方向上还产生一指向光束焦点的力，该力的大小正比于光的强度梯度，因而又称之为梯度力。应用该力，在一定条件下，可以使微小物体稳定在光束焦点附近，随光束焦点的移动而移动，这犹如一把无形的镊子，把物体镊住了，故称为光镊。

光镊又称单光束梯度力光阱（single-beam optical gradient force trap），简单的说，就是用一束高汇聚的激光形成的三维势阱来俘获，操纵控制微小的粒子。此概念在 1970 年由 Ashkin 等首先提出。他通过理论计算认为聚焦的激光能推动尺寸为几个微米的粒子，并实现了用聚焦的氩离子激光使悬浮在水中的透明胶粒（直径为 0.6~2.5 微米）沿着光轴方向加速推离。他发现接近光束的微粒也出乎意料地被吸入光束中推离。再通过用气泡与液滴反复试验后，Ashkin 认为光束对折射率比周围介质高的微粒具有横向吸力，但对折射率比周围介质低的微粒具有横向推力。1986 年 Ashkin 发现只需要一束高度聚焦的激光，就可以形成稳定的能量阱将微粒稳定俘获。这标志着光镊的诞生并正式命名为单光束梯度力阱。

我们以一个透明介质球为模型，用几何光学近似方法，通过考察光穿过介质的行为来分析光对物体的作用力。对于几微米的微粒，该近似方法是合理的。设考虑的介质球折射率大于周围媒介的折射率。

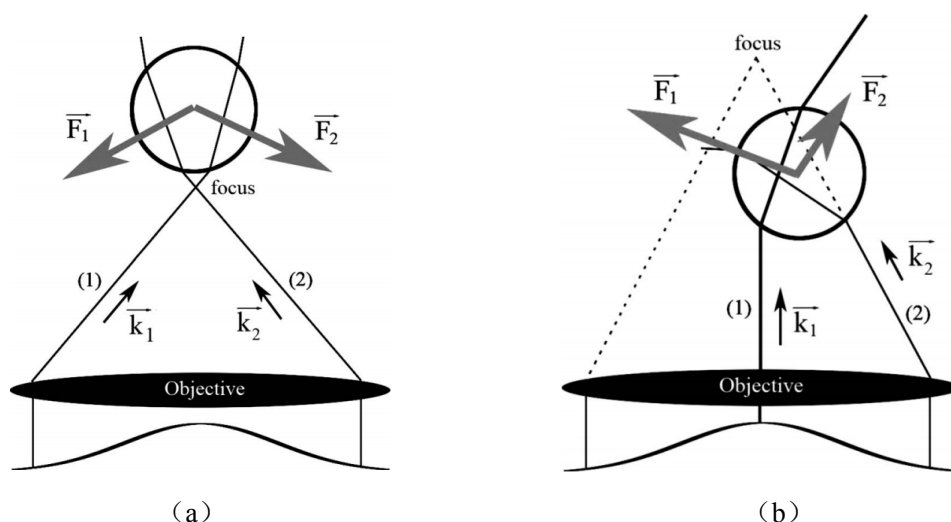


图 1 光镊原理示意图 (a) 小球在光轴上; (b) 小球偏离光轴

当一束光穿过这个小球，以 1, 2 两条光线为代表，光线在进入和离开球表面时产生折射，从而光线离开球时，方向发生了改变，也即光的动量有了改变。取入射光沿 Z 方向传播，在 X-Y 方向上动量守恒，而因为光在 X-Y 方向上通过

折射后动量有了变化，那么光对球施加一个与它动量改变方向相反的作用力。相应的将有 F_1 和 F_2 施加在小球上。如果小球位于入射光轴上，如图 1a 所示，各个方向的力的水平分量将会完全抵消。如果小球偏离光轴，如图 1b 所示，左边光线 1 比右边光线 2 强度强，那么左边光线 1 改变的动量大，也就是说左边光线作用于小球的力 F_1 将大于右边光线作用于小球的力 F_2 ，总的效果就是，合力将有向左方向的分量。所以结果就是在非均匀光场中，小球将被推向光强大的地方，这种由于光场分布不均匀而产生的横向的力称为梯度力。

那么用这一结论，对于激光的汇聚光束焦点附近。其光场分布为高斯分布，中间光场强，外围光强弱，那么粒子就可以被约束在最亮点附近。这种在 X-Y 平面内得到的横向的力，使得在 X-Y 平面内粒子被束缚在光强极强处的情形我们亦称之为二维光学势阱。

光与粒子的作用除了折射之外，还有在粒子表面的反射。由于反射，入射光动量改变，因此反过来粒子还受到一个沿光束传播方向(Z 轴方向)的辐射压力。如果要光阱在 Z 轴方向也能对粒子进行束缚，就必须有逆向光压用以抵消粒子受到的沿光传播方向的辐射压力，形成三维光阱。事实上，1986 年 Ashkin 用一束强聚焦激光实现了 X-Y 面和 Z 方向同时形成了梯度力势阱，从而稳定地俘获了生物粒子。

三维光阱与二维光阱的区别在于，入射到粒子上的光是强汇聚的。对于焦点低于球心的情形(图 1a)，其光在通过小球折射后更趋向于平行，也即增大了 Z 轴方向的动量，那么，粒子将获得与此方向相反的力，里就是说粒子收到了向下的作用力。同样，对于焦点在球心下方的情况，入射光通过小球折射，出射光张角加大，其 Z 轴动量减小，相应的小球收到一个向上的作用力。那么总得效果就是，小球在 Z 轴方向被束缚在焦点附近。结合 X-Y 方向的束缚，最终小球在空间上将被束缚在光的焦点上(如果考虑小球重力应该为之会稍有偏下)。这就是三维光阱对小球的束缚。

2. 光阱刚度的测量

粒子在势阱中相当于简谐振子。在光镊中心附近，粒子受到的光阱力是一个回复力 F ，它与粒子偏离光镊中心的位移 x 成正比，即 $F = -k_x \cdot x$ 。其中， k_x 是回复力常数，又称之为光阱刚度(trap stiffness)。光阱刚度是表征光阱性能的一个重要参量，需要对其进行标定。常用的测量光阱刚度的方法有流体力学法、热运动分析法、外加周期驱动力法、功率谱法等。这些方法测量精度和适用范围各不相同，各有优缺点。这里重点介绍流体力学法。

光镊对微粒的操控通常都是在类水溶液中进行的。当处于液体介质中的小球在光阱力的捕获下相对液体作水平方向运动时，近似地认为小球在水平方向只受到光阱力与液体粘滞阻力。当小球匀速运动时，液体阻力与光阱力平衡(大小相等，方向相反)，小球在偏离光阱中心处有一新的平衡位置。其偏离光阱中心的位移 x 可以直接测量得到。液体的粘滞阻力大小可以由斯托克斯公式给出，即 $F = 6\pi\eta r v$ ， r 为粒子半径， η 为液体粘滞系数， v 为相对运动速度。因此，光阱刚度可以由下式给出：

$$k_x = 6\pi\eta r \frac{v}{x} \quad (1)$$

3. 光致旋转

光镊是利用了光的线性动量。光在一定条件下还带有角动量。角动量包括轨道角动量和自旋角动量。光的轨道角动量与光场的特定空间分布相联系。自旋角动量是光子本身的属性，其方向取决于光束的偏振状态。光与物质相互作用过程中，比如光被吸收或光通过双折射粒子后光束偏振态变化，就有相应的角动量的交换，从而使物体发生转动，这是光的另一种力学效应，称之为光致旋转。光镊与光致旋转相结合，利用光镊的捕获和操控作用使微粒悬浮，不再受其它机械的摩擦力，因而更容易实现光致旋转。

光束通过双折射物体时，光束的 o 光和 e 光分量具有不同的相位变化，因而透过双折射粒子后的合成光束的偏振态发生了改变，光束的自旋角动量也随之发生变化。与此同时，双折射物体的角动量也有大小相等方向相反的改变，即光施加扭转力矩作用在物体上。如该力矩能克服阻力矩，就能使物体产生旋转运动。例如，对于 CaCO_3 晶体，在偏振光场中受到的力矩大小为

$$\tau = \frac{\varepsilon}{2\omega} E_0^2 [(1 - \cos(n_o - n_e)kd) \sin 2\varphi - \sin(n_o - n_e)kd \cos 2\varphi \sin 2\theta] \quad (2)$$

其中 θ 是晶体光轴与光束之间的夹角， φ 为描述入射椭圆偏振光的椭圆度 ($\tan\varphi$ 为入射椭圆长轴和短轴的比值)。

当 φ 为 0 或 $\pi/2$ 时，即入射光为线偏振光，力矩 τ 使粒子转动直至 $\theta=0$ 或 $\pi/2$ ，所以线偏振光对双折射粒子有定向的作用。当 φ 为 $\pi/4$ 时，入射光为圆偏振光，力矩 τ 的大小与 θ 无关。这个力矩将使粒子产生连续恒定的转动。

二、实验仪器

倒置显微镜，半导体激光器 (532nm) 及电源，偏振片，1/4 波片，半波片，透镜 2 个 ($f_1=40\text{mm}$; $f_2=180\text{mm}$)，银反射镜，光束提升器，光阑，白屏，样品池，酵母菌细胞，碳酸钙颗粒

三、实验内容

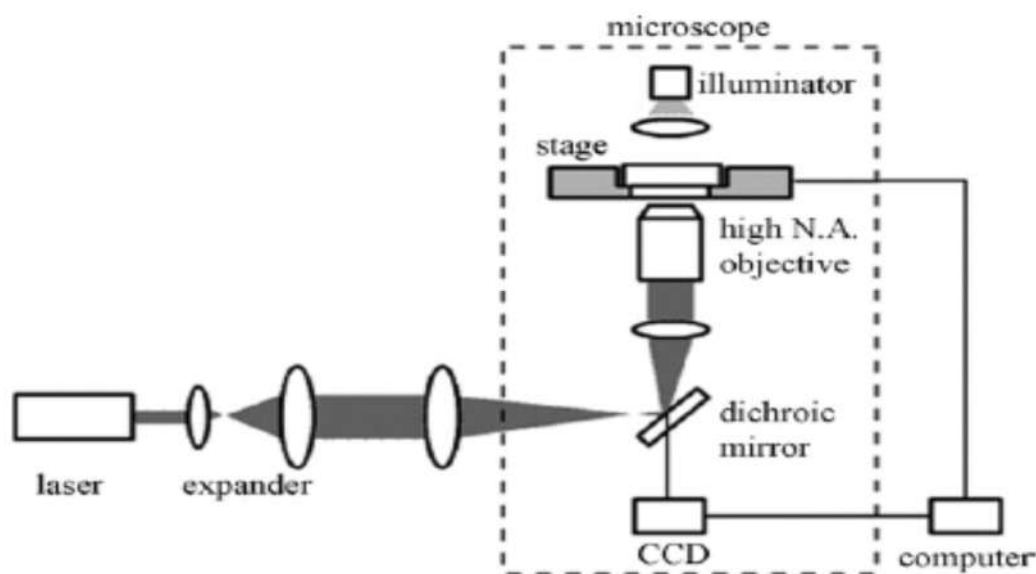


图 2 光路示意图

1. 酵母菌细胞的捕获

利用倒置显微镜将激光通过反射镜导入显微镜物镜从而在其焦面上得到一个高汇聚光束。光路如图 2 所示。激光通过扩束可使经过显微镜物镜后的光束张角更大从而提高汇聚程度。

要求：

- (1) 光路共轴调节；
- (2) 利用 CCD 相机拍摄一段光阱捕获酵母菌细胞视频（时长控制在 1 分钟以内）。

2. 流体力学法测定光阱刚度 (*)

流体力学法采用 CCD 图像分析法进行数据处理。利用压电扫描平台控制样品作匀速往复运动，运动周期和幅度由计算机控制。此时光镊中的小球将在偏离光阱中心的两侧各有一个稳定平衡位置。利用 CCD 相机记录小球做 10 个运动周期的图像，通过图像分析法计算出小球的两个平衡位置，从而得到偏离光阱中心的位移 x ，根据公式 (1) 求出光阱刚度 k_x 。

要求：

- (1) 给出具体实验方案和步骤；
- (2) 给出实验数据处理过程。

3. 碳酸钙颗粒的旋转

实验用的样品是具有双折射特性的碳酸钙晶体粒子，大小为微米量级。碳酸钙晶体被激光俘获，悬浮在溶液中。由于碳酸钙晶体的双折射特性，通过碳酸钙晶体的光的自选角动量发生了改变，根据角动量守恒定律，粒子将获得这个该变量从而产生旋转。实验装置与光镊的基本相同，只是加了一个 1/4 玻片将线偏振光变成圆偏振光，如果想要改变圆偏光的旋转方向，可以多加一个 1/2 玻片。

- (1) 线偏振光对双折射粒子的定向作用

在光镊光路中插入半波片，旋转半波片改变入射偏振方向，观察线偏振光对光阱中捕获的双折射粒子的作用。

- (2) 圆偏振光引起双折射粒子的连续转动

要求：利用 CCD 相机拍摄一段光致旋转视频（时间控制在 1 分钟以内）