

一、简介

继 Ashkin [1,2] 的开创性工作之后, 允许用光操纵小颗粒的光学捕获得到了快速发展。该技术已成为物理、化学、生物医学和材料科学的基础和应用研究独特且不可或缺的工具。光捕获可以通过近场光或远场光来实现。近场光允许在降低激光功率的情况下捕获超出衍射极限的光。然而, 在需要非侵入性操作的应用中, 优选使用远场光捕获。

典型的远场光学捕获系统用单束激光束捕获粒子——光镊或单光束陷阱[3-7]。激光束通过高数值孔径 (NA) 的物镜紧密聚焦在颗粒上, 从而在颗粒上产生强大的光学力。光学力包括吸引力梯度力和排斥散射力。尽管这个论点对于尺寸远小于光波长的瑞利散射是准确的, 但它可以用来定性地理理解捕获机制[8]。梯度力源自聚焦激光束的强度梯度, 并且倾向于将颗粒吸引到光束中心。相反, 来自激光束辐射压力的散射力往往会将粒子推向激光传播方向, 从而破坏陷阱的稳定性。梯度力必须足够大以克服有害的散射力, 从而可以形成稳定的陷阱, 这一条件可以通过使用高NA物镜聚焦激光束来实现。微米尺寸的介电粒子已被皮牛顿力成功捕获。构建单光束光捕获系统的分步指南可以在[9,10]中找到。还鼓励读者在[11-13]中了解更多有关该技术的信息。

尽管过去几十年来对微米尺寸介电颗粒的捕获进行了广泛的研究, 但人们越来越有兴趣将捕获范围扩展到其他材料[14], 例如高折射率颗粒[15]、抗反射涂层颗粒[16, 17], 或金属纳米颗粒[18-25]。与电介质颗粒上的力相比, 这些颗粒上的梯度力显着增强, 但散射力也显着增强。实际上, 在某些情况下散射力可以超过梯度力, 如下所述。这使得单束陷阱无法捕获这些粒子。这个问题可以通过应用反向传播光束来解决, 其中光束每一侧的散射力相互抵消[15,26–30]。然而, 大多数反向传播陷阱都采用两个低数值孔径的物镜。这种配置具有以下局限性: (1) 来自这些透镜的弱聚焦光束产生的光学力不足以捕获纳米级的粒子; (2) 低数值孔径物镜缺乏对纳米尺度粒子进行成像的分辨率, 而在这些实验中成像与捕获同样重要; (3) 缺乏单光束和反向传播陷阱之间切换的灵活性。

在本文中, 我们为实现可转换光捕获系统提供了实用指南, 该系统可以在两种模式下兼容工作: 单光束捕获器或反向传播捕获器。两种工作模式可以轻松切换, 从而可以捕获各种尺寸和材料的颗粒。本文的结构如下: 第2节比较了单光束和反向传播陷阱的性能; 第3节给出了可转换捕获系统的布局以及该系统的一些注意事项; 第4节详细介绍了可转换光捕获系统的实现; 最后, 部分

击可查看大图

5 展示了介电和高散射金纳米颗粒（GNP）在该系统上的捕获。

2. 单光束（SB）捕集器 vs 反向传播（CP）捕集器

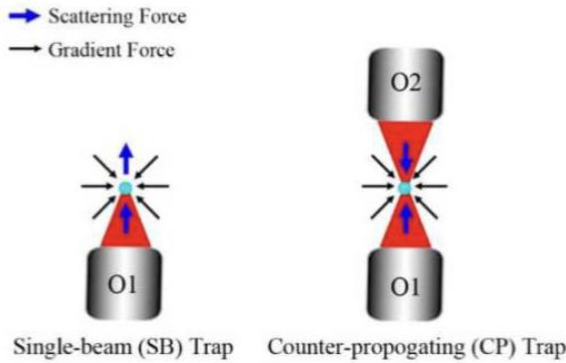


图 1. 比较单光束和反向传播捕集器。

图 1 示意图地显示了 SB 陷阱和 CP 陷阱的配置。在 SB 陷阱中，激光束由高 NA 物镜（O1）紧密聚焦。位于 O1 焦点的纳米粒子会受到梯度力和散射力，如图 1 中的黑色和蓝色箭头分别表示。应该注意的是，只有当纳米颗粒的尺寸远小于激光波长时，这种说法才是准确的 [8]。但我们仍然可以使用这张图片来定性地理解捕获机制 [19]。对于高散射纳米粒子，例如金属纳米粒子，散射力占主导地位，并将粒子从陷阱中推向激光传播方向。这使得很难用单束捕获这些纳米颗粒。为了克服这个问题，沿相反方向传播的第二束光束可以由第二个物镜（O2）聚焦，以抵消来自 O1 的散射力。CP 阱消除了沿激光传播方向的有害散射力，因此，它可以稳定地捕获各种尺寸和材料的高散射颗粒。

为了更深入地了解 SB 和 CP 陷阱之间的捕获差异，我们用 T 矩阵方法计算了金纳米颗粒（GNP）上的光力 [31,32]。选择 GNP 不仅因为它们高度散射，还因为它们具有有趣的特性 [33–35]。在 SB 陷阱的计算中，波长为 1064 nm 的激光器聚焦在等效 $NA = 1.2$ 的水中。在 CP 陷阱的计算中，两个相同的光束在相反的方向上聚焦到同一点。水的折射率取为 $n = 1.33$ ，金的折射率取自 [36]。

图 2（a）显示了沿 SB（黑色曲线）和 CP（红色曲线）陷阱的激光传播方向（z 方向）在 100 nm（直径）GNP 上计算的光力 F_z ，作为粒子位置的函数。由于散射力的作用，粒子主要沿 z 方向逃逸，因此仅计算该方向的光学力。陷阱强度由最大负恢复力 $F_{z, \text{最大}}$ 决定，如图 2（a）中用黑色箭头标记。原则上， $F_{z, \text{最大}}$ 应大于热波动力，以形成稳定的陷阱。为简单起见，我们根据 $F_{z, \text{最大}}$ 的符号来确定 GNP 是否被捕获，而不考虑热波动。

例如，如果 $F_{z, \text{最大}} < 0$ ，则始终存在恢复力将粒子拉回陷阱中心。如果 $F_{z, \text{最大}} = 0$ ，则 F_z 的方向始终朝向激光传播方向，并且没有恢复力将粒子拉回。因此，我们将 $F_{z, \text{最大}} > 0$ 作为无陷阱条件。根据这个标准，很明显 100 nm GNP 可以被捕获在 SB 和 CP 陷阱中。但是，SB 陷阱中的陷阱中心（其中 $F_z = 0$ ）为

由于散射力，位于光束中心上方 230 nm（其中 $z = 0$ ）。相反，由于散射力的抵消，CP 陷阱中的捕获中心与光束中心重叠。图 2(b) 分别显示了 SB（黑色曲线）和 CP（红色曲线）陷阱中 200 nm GNP 的光力 F_z 。200 nm GNP 不能被 SB 陷阱捕获。相比之下，它可以很好地被困在 CP 陷阱中。

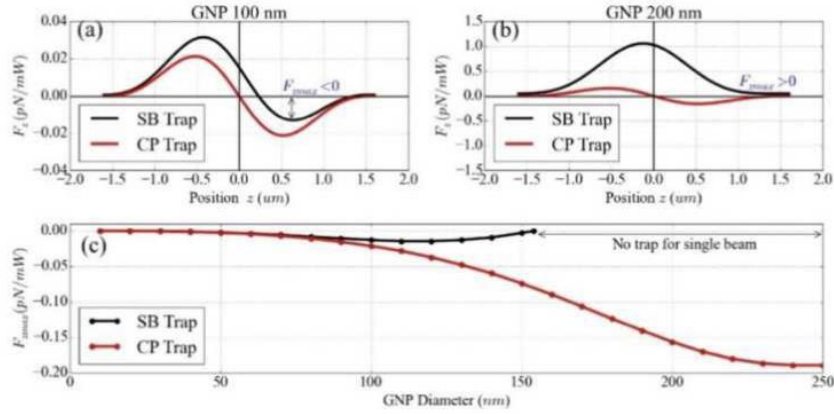


图 2. (a) 计算单光束（黑色实线）和反向传播陷阱（红色实线）中 100 nm GNP 沿激光传播方向（ z 方向）的光力。 F_{max} 是沿 z 方向的最大负恢复力，如黑色箭头所示。(b) 对于单光束和反向传播陷阱中的 200 nm GNP，计算出相同的光学力。(c) 直径范围为 10 至 250 nm 的 GNP 的捕获图。SB 和 CP 陷阱分别代表单束陷阱和反向传播陷阱。

图 2(c) 显示了光学力 F_{max} 与 10 nm 至 250 nm 范围内的颗粒尺寸的函数关系（尺寸在此范围内的颗粒可商购）。双面黑色箭头表示如果 GNP 的大小在此范围内，则不会被捕获。例如，直径大于 154 nm 的 GNP 不能被 SB trap 捕获。结果与 [37] 的计算一致。相比之下，各种规模的国民生产总值都可能陷入困境

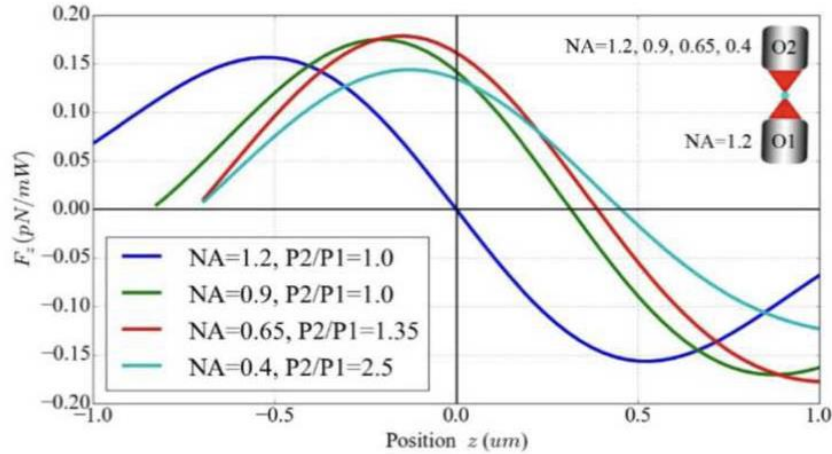


图 3. 计算 CP 陷阱中 200 nm GNP 沿激光传播方向（ z 方向）的光学力。下物镜 O1 的 NA 为 NA=1.2，上物镜 O2 的 NA 从 NA=1.2 变为 NA=0.4。P2/P1 是上光束和下光束之间的功率比。

CP陷阱。对于小于 80 nm 的 GNP，由于对较小颗粒的散射力显著降低，CP 陷阱相对于 SB 陷阱没有明显优势 [38]。

第二物镜(O2)的NA可以等于或小于第一物镜(O1)的NA。例如，SB 阱中 O1 的 NA 通常大于 1（油浸或水浸），这会导致样品和物镜之间的工作距离较短。因此，可以选择NA较小的O2，以在样品和透镜之间获得更大的工作空间。图 3 显示了 CP 陷阱中 200 nm GNP 上的光学力，其中两个物镜的配置不同。下物镜 O1 的 NA 固定为 1.2，上物镜 O2 的 NA 从 NA = 1.2 变为 NA = 0.4。200 nm GNP 可以很好地陷入这四种配置中。当具有相同激光功率的两束CP光束被两个相同的物镜聚焦时，捕获位置($F_z=0$)与光束中心($z=0$)重叠。当 O2 的 NA 更改为 NA = 0.9 时，由于 O2 的光学力减小，捕获位置在光束中心上方移动了 300 nm。NA 时，捕获位置为光束中心上方 370 nm 和 440 nm 分别 = 0.65 和 0.4。为了保持捕获位置的对称光学力，两束光束之间的功率比需要分别调整为 $P_2/P_1 = 1.35$ 和 2.5。CP 陷阱中的捕获位置可以通过调整相对激光功率或两束光束的焦点来改变。这提供了一种灵活的方式来调整被捕获粒子沿光轴的位置，这在 SB 陷阱中很难实现。

3. 可转换光捕获系统的布局

光学捕获系统可以直接在商用显微镜上构建，也可以从头开始构建。直接在显微镜上构建系统既省时又机械稳定，但代价是灵活性降低。相比之下，从头开始构建系统需要先进的光学知识和技能，但系统可以灵活地添加自定义功能。在本节中，给出了实现自制可转换光捕获系统的详细指南。

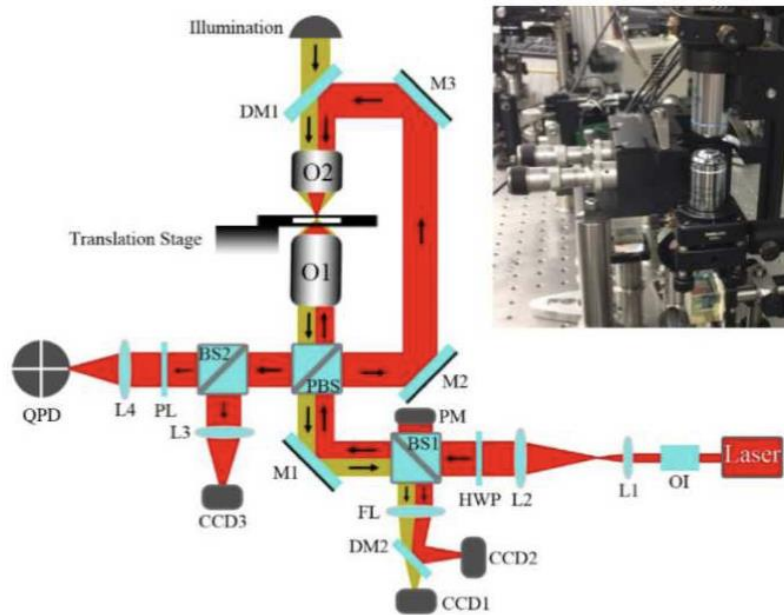


图 4. 光捕获系统的布局。OI: 光隔离器; L: 镜头; HWP: 半波片; M: 镜子; BS: 分束器; PBS: 偏振分束器; DM: 二向色镜; O: 物镜; FL: 场镜; PL: 偏光镜; QPD: 象限光电二极管; PM: 功率计; CCD: 电荷耦合器件。插图显示了系统的一部分。

图4显示了可转换光捕获系统的布局，包括以下四个模块：

- **捕获模块：**捕获激光器采用波长1064 nm的近红外激光器。激光穿过光隔离器 (OI) 以避免背反射。然后用望远镜形式的两个透镜 (L1 和 L2) 对其进行扩展和准直，以充满物镜 (O1 和 O2) 的后孔径。半波片 (HWP) 和偏振分束器 (PBS) 相结合，将光束分成两束交叉偏振光束。每个光束的相对功率可以通过旋转 HWP 来调整。反射镜M1、M2、M3和二向色镜DM1有助于将光束引导至两个物镜O1和O2。然后，两束具有交叉偏振的 CP 光束被聚焦到样品室中。O2 安装在压电平台上，用于精确对准两束光束。两个物镜垂直于光学平台配置，以实现机械稳定性。含有颗粒的样品室安装在 3D 平移台上。样品室准备的详细说明将在第 4.5 节中给出。两种捕获模式 - SB 或 CP 捕获 - 可以通过旋转 HWP 轻松切换，同时保持整个系统不变。例如，如果 HWP 旋转到所有光都透过 O1 的位置，则系统可以转换为 SB 陷阱。
- **成像模块：**该模块用于颗粒的实时成像。白光通过 DM1 耦合到捕获模块，然后通过 O1 聚焦在样品上进行照明。颗粒可以通过 O1 和场镜 (FL) 在 CCD1 上成像。
- **检测模块：**该模块用于基于前向散射方法跟踪粒子的实时位置[39-45]。穿过由 PBS、M2、M3 和 DM1 形成的矩形环的两束 CP 光束最终将从 PBS 的第四面射出。一束光束顺时针穿过环，另一束则逆时针穿过环。这与萨格纳克干涉仪中的光路类似，只是由于两束光束的交叉偏振而没有干涉。偏振器 (PL) 可以拾取任一光束以进行位置跟踪。
- **对准模块：**该模块对于成功实现可转换光捕获系统是必不可少的，因为对准至关重要。例如，两个 CP 光束的焦点必须在横向和纵向上良好重叠，以形成稳定的 CP 陷阱。简而言之，穿过 PBS 第四个面的两束 CP 光束被 BS2 反射并通过透镜 L3 聚焦在 CCD3 上。CCD3上显示的光点可用于检查两个焦点的实时对准情况。另外，实验中还需要找到样品表面，这可以通过O1和FL将样品表面的反射光成像到CCD2上来实现。最后，了解捕获位置的激光功率也很重要，可以通过了解 BS1 处的激光功率和 HWP 的旋转角度来校准。

以下是应考虑的其他一些注意事项：

- **激光：**激光波长的选择取决于应用。对于生物相关应用，通常使用近红外激光，因为生物材料在此光谱中的吸收率较低。另一个必须考虑的重要因素是激光器的振动隔离。这可以通过以下两种方式完成：

(1) 用光纤隔离激光振动，如图 5(a) 所示。单模保偏 (PM) 光纤通常用于

保持激光良好的高斯分布以及偏振。这种方法可以很好地将振动与激光系统隔离，但如果激光器本身不是光纤耦合，则需要繁琐的光纤耦合。此外，光纤的微小振动会导致激光功率的可检测波动，特别是当系统中使用偏振光学器件时。因此，由于使用了 PBS，因此不建议将这种配置用于可转换光捕获系统：

- (2) 选择不带风扇的激光头并将其放置在与捕获系统所在的同一光学平台上，如图 5(b)所示。这种配置不需要耗时的光纤耦合，但激光头应具有最小的振动。因此，建议使用带有水冷却选项的激光器。我们使用 Laser Quantum 的红外激光器（Ventus 1064, 5W）以及水冷却系统（Oasis 170）。激光头和捕获系统位于同一光学台上，但激光器的电源单元和冷却系统与光学台隔离。

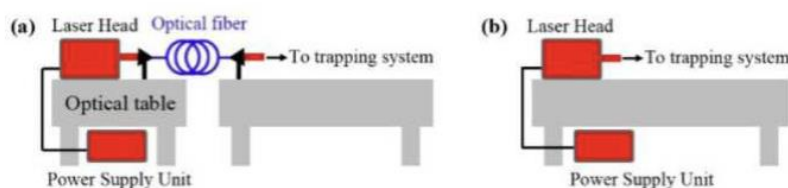


图5.(a). 用光纤隔离激光振动。(b) 选择激光头振动最小的激光器。

- **物镜：**在像差、透射率和数值孔径方面正确选择物镜是捕获和成像必须仔细考虑的另一个重要因素。
 - (1). **像差：**应该指出的是，大多数现成的光学显微镜商业物镜（尼康、奥林巴斯、徕卡、蔡司）都是在可见光谱中设计和优化的。因此，它们仍然受到捕获系统中常用的红外激光器的球面像差的影响。在 SB 陷阱中必须仔细考虑球面像差，这对盖玻片上方的捕获高度产生了重要的依赖性[18,46]。相比之下，CP 陷阱中球面像差的负面影响由于散射力的抵消而减轻。
 - (2). **透射率：**大多数物镜在红外光谱中的透射率较低。例如，我们测量了尼康物镜（CFI Plan Apochromat VC Series 100x/1.4NA油浸）的透射率，发现在1064 nm波长处透射率为30%。物镜的低透射率意味着物镜入口处的激光功率较高，这可能会升高系统的温度并导致系统漂移，这是敏感力测量必须避免的。尼康推出了采用纳米晶体涂层技术的高性能物镜（CFI60 Plan Apochromat Lambda系列），并声称在宽光谱范围内的传输率显着提高，这可能是提高捕获激光传输率的一个不错的选择。在我们的系统中，使用两个低成本物镜 O1（AmScope, NA = 1.25, 100x, 油）和 O2（AmScope, NA = 0.65, 40x, 空气），测得的透射率分别为 45% 和 68%。
 - (3). **数值孔径（NA）：**在SB陷阱中，物镜通常具有较大的NA，因此通常使用油浸或水浸物镜。水浸物镜可以最大限度地减少产生的球面像差

来自水和玻璃之间的折射率不匹配，这对于捕获远离表面的颗粒很重要。然而，水浸物镜比油浸物镜更昂贵。因此，对于预算紧张的情况，油浸物镜是不错的选择。应该注意的是，具有较大数值孔径的油浸物镜并不一定会产生更好的捕获效果。这主要是因为油浸物镜的有效NA受到水玻璃表面全内反射的限制，在水溶液中捕获不会超过1.3。基于这些事实，可转换光学捕获系统中使用了AmScope的低成本油浸物镜（NA = 1.25，100x，油）。

4. 可转换光捕获系统的实现细节

CP 光束两个焦点的良好对准对于成功实现可转换捕获系统至关重要。此外，O1 物镜平面与捕获平面的良好重叠对于成像也很重要。因此，本节给出了这两种情况的对齐细节。其他光学元件（例如透镜、反射镜、分束器和 QPD）与光轴的对准已在[10,47]中得到详细记录，因此，我们简单地假设这些光学元件已与光轴良好对准。光轴。

4.1 将物镜与光轴对齐

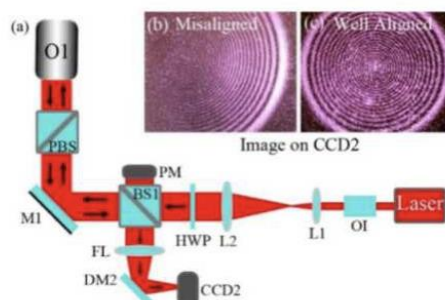


图 6. (a) 将物镜 O1 与来自 O1 后孔径的反射光的光轴对齐。(b) CCD2 上的图像显示物镜未对准。(c) CCD2 上的图像显示物镜与光轴良好对准。

为了构建可转换的光捕获系统，两个物镜 O1 和 O2 的中心必须与光轴良好对准。为此，物镜 O1 和 O2 安装在两个 5 轴锁定运动安装座（Thorlabs，K5X1）上，以进行五个自由度的调整。还需要具有 SM1 外螺纹和 RMS 内螺纹的适配器（Thorlabs，SM1A3）才能将物镜正确安装到安装座上。来自 O1 后孔的反射光在 CCD2 上成像以检查对准情况，如图 6 (a) 所示。图 6(b) 显示了当 O1 与光轴未对准 CCD2 上的反射光图案。图 6(c) 显示了通过调整 5 轴运动安装座使 O1 与光轴良好对准时的光图案。可以按照相同的步骤将第二物镜 O2 与光轴对准。

4.2 将目标平面与捕获平面重叠

大多数为光学显微镜设计的物镜都是无限远校正的，这意味着物镜的像平面（与物镜平面共轭）位于无穷远。因此，需要使用场镜 (FL) 将图像返回到 CCD 上。使用无限远校正物镜的优点在于可以自由添加其他光学元件

在光路扰动最小的系统中。由于物镜 O1 同时用于成像和捕获，因此确保物镜平面与捕获平面重叠非常重要。无限远校正物镜的物镜平面位于焦点附近，以获得最佳图像质量，如图 7 所示。可以通过放置标记来找到物镜平面，例如美国空军目标（Thorlabs, R3L3S1P），在可见光照明下的平移台上。将目标沿光轴移动到 O1 焦点附近，直至 CCD1 上形成清晰、质量最好的目标图像。由于捕获的粒子在该物镜平面上也将具有最佳图像质量，因此有必要将捕获平面与物镜平面重叠。然而，由于系统的球差和捕获激光的发散，这两个平面不会自动重叠。要使这两个平面重叠，可以按照以下步骤操作：

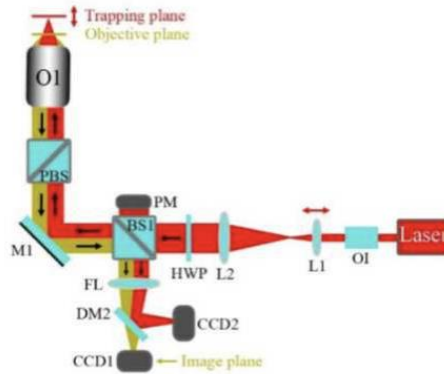


图 7. 将 O1 的目标平面与捕获平面重叠的程序。

- (1) 上一步找到 O1 的目标平面后，将目标保持在该位置；
- (2) 移动 CCD2，直到在捕获激光照射下在 CCD2 上形成清晰的目标图像。此时目标上的捕获激光光斑也应该出现在 CCD2 上；
- (3) 沿着光轴轻轻移动镜头 L1，同时保持眼睛注视 CCD2，直到目标上的激光光斑最小。现在捕获平面与目标平面重叠。

CCD2 上的图像还可用于确定样品表面，这对于获取表面上方颗粒的捕获高度等信息很有用。实验开始时，可以沿光轴移动含有颗粒的样品，直到在 CCD2 上形成样品表面反射光的最小光斑。在此步骤中，捕获激光精确聚焦在样品表面上。还可以仔细检查 CCD1 上的图像，如果有的话，应该可以清晰地看到表面的缺陷。

4.3 两束 CP 光束焦点重叠

如 4.1 节所述将两个物镜与光轴对齐并不能保证两个物镜的焦点重叠，但应该在 CCD3 上看到两个点，如图 8(a) 所示。这两个点来自穿过 PBS 第四面的两束 CP 光束。由于两个物镜的数值孔径不同，两个光斑的大小不同。如果系统中使用两个相同的物镜，则应该看到两个相同的点。如果 O1 和 O2 的两个焦点在 CCD3 上重叠，则这两个焦点将在捕获平面上横向重叠。这可以通过横向移动 O2 来实现

调整镜子DM1如图8(c)所示。在我们的系统中，O2 安装在压电物镜执行器（EO Edmund，库存号 85-008）上，用于垂直位移。然后将压电物镜执行器安装在 5 轴锁定运动支架（Thorlabs，K5X1）上进行横向位移。图 8(b) 显示两个焦点对齐良好。然而，两个焦点在横向上的重叠并不能保证它们在光轴上的重叠。沿光轴的重叠可以通过两个焦点扫描 GNP 来检查，如下所示：

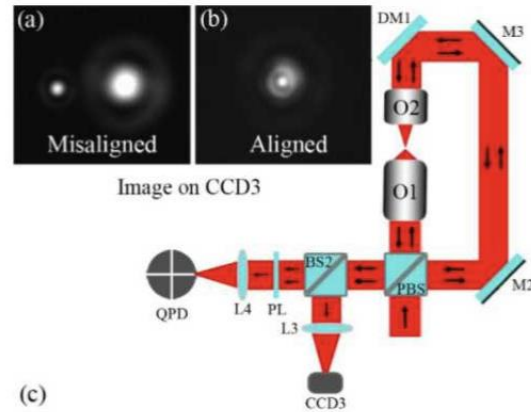


图 8. 重叠由 O1 和 O2 聚焦的两个 CP 光束焦点的程序。

- (1). 将一滴含有 200nm GNP 的溶液放在玻璃盖玻片上； (2)。让溶液蒸发，GNPs 就会粘附在玻璃表面；
- (3)。在 GNP 上滴一滴浸油，以匹配玻璃的反射率； (4)。用另一个玻璃盖玻片覆盖 GNP 和浸油；
- (5). 将此 GNP 样本插入压电平台上的 O1 和 O2 之间；
- (6). 阻挡来自 O2 的光束，并通过观察 CCD2 上 GNP 的背向散射光，将一个 GNP 定位在 O1 的焦点处（图 7）；
- (7). 阻挡来自 O1 的光束，我们应该看到来自 O2 的相同 GNP 的后向散射光也出现在 CCD2 上；如果 GNP 不在焦点处，调整 DM1 使其处于中心位置（此步不要移动 GNP）；
- (8). 横向扫描 O2 焦点上的 GNP，同时保持眼睛注视 CCD2 的图像。
- (9). 使用压电物镜执行器沿光轴移动 O2，并重复步骤 (8)，直到可以看出 GNP 通过 O2 聚焦的激光束腰。

完成所有这些步骤后，CP 光束的两个焦点在横向和纵向上都重叠。现在，可以将光点图像保存在 CCD3 上以供将来参考。例如，不需要在每次实验中重复这一对准过程，只需沿光轴移动 O2，直到 CCD3 上的光点与记录的光点相似即可。这个技巧在实验中效果非常好，并且节省了每次实验中重新调整系统的时间。

4.4 校准捕获功率

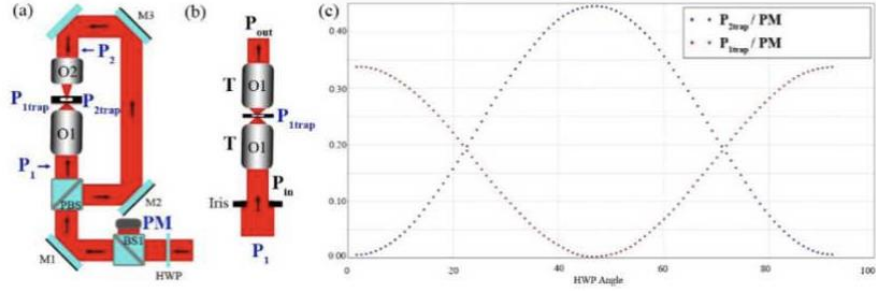


图 9. 捕获位置激光功率的校准程序。(a) 激光功率检查点。(b) 测量物镜的激光透射率。
(c) 捕获位置激光功率的校准曲线。

在可转换的光捕获系统中，必须仔细校准捕获位置处的两束CP光束的激光功率。这可以通过用功率计监测 BS1 处的激光功率并记录 HWP 的旋转角度来完成，如图 9(a) 所示。捕获位置的两束 CP 光束的激光功率可以校准如下：

- (1) 记录 PM、P1 和 P2 处的功率作为 HWP 角度的函数，如图 9(a) 所示；
- (2) 计算功率比 P_1/PM 和 P_2/PM 作为 HWP 角度的函数。
- (3) 功率传输 $P_{1\text{陷阱}}/P_1$ 和 $P_{2\text{陷阱}}/P_2$ 可以根据图 9(b) 测量 (如下所述)，其中 $P_{1\text{陷阱}}$ 和 $P_{2\text{陷阱}}$ 分别是捕获位置处两束 CP 光束的激光功率。
- (4) 根据以下公式计算最终功率比 $P_{1\text{陷阱}}/PM$ 和 $P_{2\text{陷阱}}/PM$ 作为 HWP 角的函数： $P_{1\text{陷阱}}/PM = (P_{1\text{陷阱}}/P_1) (P_1/PM)$ 和 $P_{2\text{陷阱}}/PM = (P_{2\text{陷阱}}/P_2) (P_2/PM)$ 。

图 8(c) 显示了两个 CP 光束的校准激光功率。实验中，如果已知 BS1 处的功率 (PM) 和 HWP 角，则可以从这两条曲线立即找到两束 CP 光束在捕获位置处的激光功率。

功率传输 $P_{1\text{陷阱}}/P_1$ 可以根据图 9(b) 测量如下： ($P_{2\text{陷阱}}/P_2$ 同样)

- (1) 将图 9(a) 中的 O2 替换为相同的物镜 O1，并在 O1 之前放置可变光圈，如图 9(b) 所示。
- (2) 根据第 4.3 节中描述的程序对齐两个 CP 光束。
- (3) 缓慢关闭光圈，同时监测输出功率 $P_{\text{出去}}$ ，直到 $P_{\text{出去}}$ 开始变化。
- (4) 记录 $P_{\text{出去}}$ 、 $P_{\text{在}}$ 和 P_1 ，如图 9(b) 所示。
- (5) 由 O1 后孔径截断光束产生的透射率为 $P_{\text{在}}/P_1$ ，由物镜 O1 和样品室产生的透射率为 $(P_{\text{出去}}/P_{\text{在}})$ 。

因此， $P_{1\text{陷阱}}/P_1 = (P_{\text{在}}/P_1) (P_{\text{出去}}/P_{\text{在}})$

4.5 准备一个密封良好的样品室

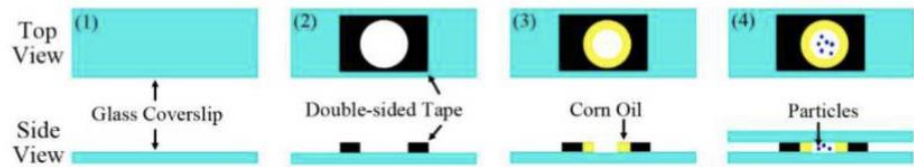


图 10. 准备密封良好的样品室的程序。

在本节中，描述了一种快速、简单的方法来准备密封良好的样品室。图10示意性地示出了以下过程：

- (1) 将干净的玻璃盖玻片 (0.16 – 0.19 mm) 放在平坦的表面（例如载玻片）上。
- (2) 用打孔器在双面胶带上打孔，然后将胶带粘在玻璃盖玻片上。双面胶带上的孔形成容纳颗粒溶液的腔室。
- (3) 使用移液器在孔的内周周围涂抹一些玉米油（或可以从杂货店买到的任何食用油）（参见图 10 中的步骤 3）。这种环形油将防止颗粒溶液蒸发。
- (4) 在环形油的中心添加一滴颗粒溶液，并将另一个玻璃盖玻片放在上面。
- (5) 推紧两个玻璃盖玻片。

如果遵循以下步骤，就可以形成密封良好的样品室。这样制备的室可在一周内用于捕获，且无明显的溶液泄漏和蒸发。

5 结果与讨论

在SB陷阱中，由于散射力的作用，捕获位置位于光束中心上方，如图2（a）所示，这导致横向捕获强度比光束中心捕获的捕获强度降低。在 SB 陷阱中，给定粒子的捕获位置无法轻易更改。相反，在 CP 陷阱中，可以通过改变两束光束的相对功率或移动物镜 O2 来调整捕获位置，如图 11(a) 所示。

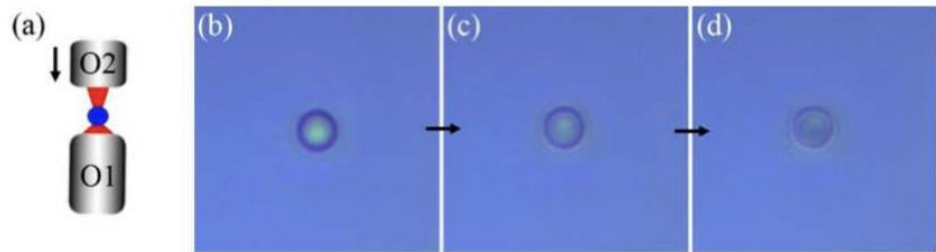


图 11. (a) 通过移动物镜 O2 改变聚合物珠沿光轴的捕获位置。(b) – (d) 向下移动 O2 时聚合物珠的连续图像（参见可视化1）。

图 11(b) 显示了可转换光学捕获系统捕获的直径为 2.1 μm 的聚合物珠的图像（在 CCD1 上）。聚合物珠被捕获在 O1 的物镜平面上，以便珠子在 CCD1 上清晰成像（捕获位置与物镜平面重叠，如第 4.2 节所述）。图11(c)和11(d)显示

移动 O2 时相同捕获的聚合物珠的图像向下。宝lymer 珠被推到物镜平面下方并离开 O1 的焦点（参见可视化1）。因此，CP陷阱中的捕获位置可以沿光轴灵活调整，这为优化粒子的捕获强度提供了另一个自由度。

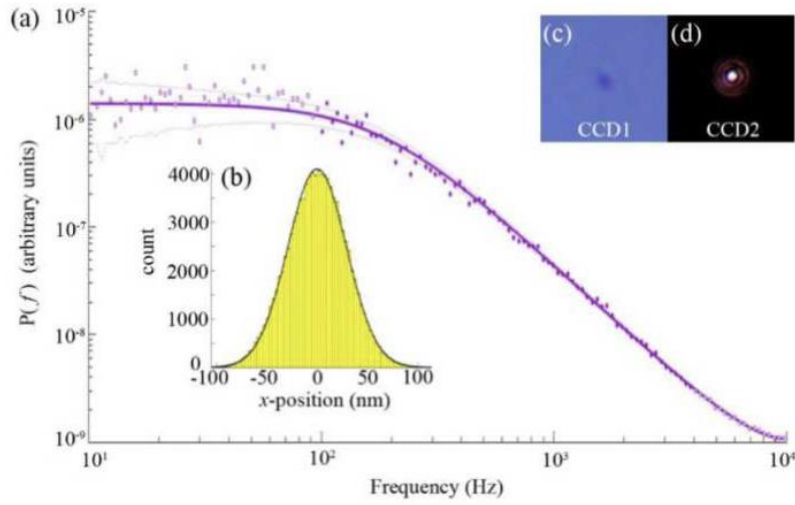


图 12. (a) CP 陷阱中 200 nm GNP 的功率谱（点）。实线显示使用[48]中描述的方法进行的拟合。虚线显示了被阻止数据点的标准差，根据该标准差，其围绕其期望值（实线）呈高斯分布。(b) 200 nm GNP 在 CP 陷阱中沿横向（x 方向）的位置分布。(c)和(d)显示的形象分别捕获在 CCD1 和 CCD2 上的 CP 陷阱中的 GNP（图 4）。（看可视化2和可视化3）。

为了进一步证明该可转换光捕获系统的优势和鲁棒性，直径为200 nm的GNP也被捕获在该系统上。图 12(a) 显示了 CP 陷阱中 200 nm GNP 横向（垂直于光轴）的功率谱。数据分析是使用[48]中描述的Matlab包进行的，该包已广泛用于光学捕获领域的数据分析[19-21]。实线显示使用[48]中描述的方法进行的拟合。虚线显示了被阻止数据点的标准差，根据该标准差，其围绕其期望值（实线）呈高斯分布。对于两个 CP 光束，捕获位置处的捕获功率分别为 $P_{1\text{陷阱}} = 3.3 \text{ mW}$ 和 $P_{2\text{陷阱}} = 9.3 \text{ mW}$ ，如图 9(a) 所示。光捕获强度可以通过捕获刚度 κ_x 来确定，测量结果为 $\kappa_x = (0.15 \pm 0.01) \text{ pN}/(\text{nm} \cdot \text{W})$ ，标准化为激光功率。GNP 被捕获在样品表面上方 $5 \mu\text{m}$ 处，以避免邻近效应。图12(b)显示了CP陷阱中GNP的位置分布，其遵循高斯分布，假设位置与QPD信号之间存在线性关系。

值得注意的是，该系统上的 SB 陷阱无法捕获 200nm GNP，这验证了 CP 陷阱捕获高散射粒子的好处。这也与我们图2（b）所示的理论计算一致。图 12(c) 和 12(d) 显示了 CCD1 和 CCD2 上 CP 陷阱中 200nm GNP 的图像（参见可视化2和可视化3）分别。显示了来自透射光的捕获 GNP 的图像在 CCD1 上，而来自背向散射光的捕获的 GNP 图像显示在 CCD2 上。据报道，这种规模的 GNP 已成功陷入 SB 陷阱 [19]。造成这种差异的原因如下：（1）理论计算中假设的是球形国民生产总值。然而，实验中使用的 GNPs 的形状和大小各不相同，这对捕获能力产生了显著影响。Oto 等人也观察到了这一点。[49,50]；（2）计算中没有考虑物镜对光束的截断，这也会改变

诱捕能力[51,52]；(3)[19]中物镜的球差被小心地最小化，而在我们的系统中没有考虑到。此外，同一小组后来表明，200 nm GNP 实际上没有被捕获在光轴上 [18]，这意味着捕获强烈依赖于实验条件。因此，在相同实验条件下比较捕获能力非常重要。本文介绍的可转换光捕获系统为此目的提供了一个理想的平台。

我们希望具有光学基础知识的读者能够为自己的研究复制或重新建模该系统。如果两个 CP 光束的焦点偏移而不是重叠，该系统还可以轻松转换为双光束捕获系统。因此，这种可转换的光捕获系统不仅保持了最先进的光镊的捕获能力，而且还可以捕获传统光镊无法处理的各种颗粒。

致谢

作者感谢代顿大学汉利可持续发展研究所 (HSI) 的财政支持。