

单、双光束光镊转换系统的原理介绍与其中单光束光镊部分的光路调节方法

魏佳亮^{1*}

1 北京大学物理学院 北京 100871

摘要

本实验为物理学院研究型实验课程的课题之一，我们搭建的光镊系统将用于后续的综合性实验的教学中。我们试图通过上下两个显微镜物镜搭建一个由双光束反向传播形成的光镊（Counter-propagating trap）来实现对酵母菌、二氧化硅微球等微粒的无接触式操纵。目前已基本完美实现了单光束光镊的功能，预计将在下个学期实现对微粒的定量操纵与第二个光镊部分光路的搭建，实现优于单光束光镊的功能。

1 简介

1969年，物理学家阿瑟·阿什金首次提出了光对微粒的辐射压力可以用于操控粒子的概念。1986年，阿什金实现了第一个完整的光镊系统，正式提出了“光学捕获”（Optical Trapping）的概念，并展示了如何用光镊捕获微小粒子。随着技术的成熟，光镊被广泛应用于生物物理学、纳米技术、胶体科学等领域。随后全息光镊和多光束光镊的出现，使得研究人员可以同时操控多个粒子，并在三维空间中进行复杂操作。北大物院的实验室里开始时有两套由生物显微镜改装而成，由学生搭建的单光束光镊系统。今年为实现光路的进一步可视化和可调节化，并受到2017年Optics Express一篇文章^[1]的启发，我们尝试搭建所有元件均可调节的双光束光镊，希望能得到比之前的单光束光镊更好的对粒子的操纵效果，并应用于后续教学。

2 单光束光镊与双光束光镊

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进行超出光的衍射极限的捕获。然而，在需要非侵入性操作的应用中，使用远场光才是首选。

典型的远场光捕获系统用单束激光捕获粒子（Single-beam trap）。激光束通过具有高数值孔径（NA）的物镜紧密地聚焦在微粒上，从而在微粒上产生强大的光学力。根据电介质微粒（通常需捕获的颗粒为电介质颗粒）的不同尺寸，光镊作用在微粒上的光阱力的理论模型可以分为三种^[2]：第一种是几何光学模型，这种模型适合计算半径 a 远大于捕获激光波长 λ 的微粒（ $a \geq 5\lambda$ ）受到的光阱力，此时光束被看作是由若干根带有特定动量的光线的集合，因此属于几何光学研究范畴。第二种是瑞利散射模型，这种模型适合计算半径 a 远小于捕获激光波长 λ 的微粒（ $a < \lambda/20$ ）受到的光阱力，由于这种粒子相比于几何光学模型中的微粒要小的多，为了简单起见，假设微粒占据的空间内电场近似是一个常量，这样就可以将粒子看作是被电场极化的电偶极子来处理。第三种是电磁散射模型，这种模型不受微粒尺寸限制，可以计算任意尺寸的微粒所受的光阱力。利用电磁散射原理解释光与粒子的相互作用过程，然后对麦克斯韦方程进行数值求解，获得激光通过粒子散射后的光场分布，最后根据动量守恒得出光场施加给微粒的作用力（T矩阵法）。我们实验中采用的微粒（如酵母菌）均为微米量级，属于几何光学研究范畴，它所受的光学力包括梯度吸引力和散射斥力。在几何光学模型中，认为光线对微粒施加的作用力是由于光线在微粒表面反射、折射后动量的改变和转移引起的（如图 1所示）。尽管这个模型对尺寸远比光的波长小的瑞利颗粒是不准确的，但它可以用来定性地了解光镊的捕获机制。

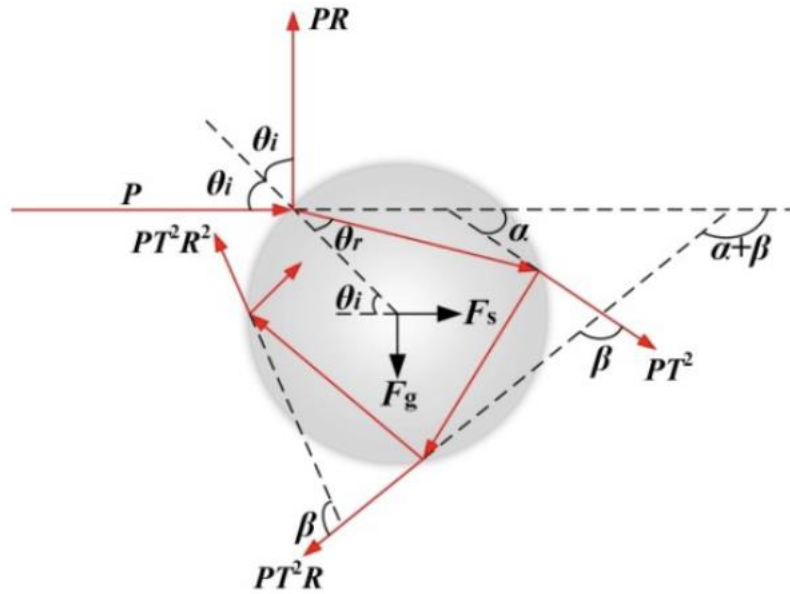


图 1 单根光线入射到粒子上的反射、折射过程示意图^[2]

梯度吸引力来源于高度汇聚的高斯光束的强度梯度，大小与强度梯度成正比。

聚焦的激光束会把粒子吸引到光束的中心。若微粒的折射率比环境高，则会折射入射的光，而光的动量改变将提供一个反作用力（暂不考虑光线在微粒内部的多次反射）^[3]。当微粒平衡于光束颈部略微靠上位置（大约百纳米量级的距离）时（如图 2.a 所示）光场提供的力仅有水平方向分量且互相抵消，故微粒不运动，此即光镊不考虑散射力时的平衡位置（即物镜焦点）。若微粒在水平方向上略微偏移平衡位置（如图 2.b 所示），则由于光场靠近中心处光强较强，而外部光强较弱，其光强梯度造成两侧折射光产生的反作用力并不相同，形成指向焦点的回复力。若微粒在竖直方向略微偏移焦点（如图 2.c 所示），则为汇聚光入射到微粒之内，可知光对微粒的反作用力仍为一回复力。

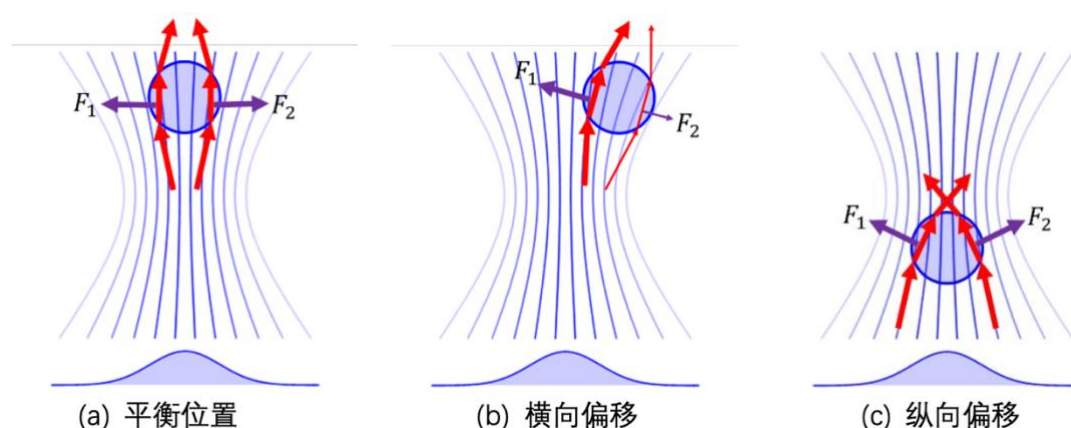


图 2 光镊原理示意图^[3]

散射斥力来源于光线在微粒表面的反射产生的反作用力（即辐射压力），大小与入射光束能流大小成正比，倾向于把微粒推向入射光束的能流方向，破坏势阱的稳定性。

在单光束光镊中，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势阱，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量级的力成功捕获。

尽管在过去的几十年里人们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尺寸与材料的颗粒上，如高折射率颗粒、抗反射涂层颗粒、金属纳米颗粒等。与介电颗粒相比，作用在这些颗粒上的梯度力明显增强，但散射力也显著增强。实际上，在某些情况下，散射力可以超过梯度力使光阱失效，无法捕获这些颗粒。这个问题可以通过在高散射颗粒处施加反向传播的光束来解决，它可以使两侧的散射力相互抵消（如图 3所示）。

→ Scattering Force
→ Gradient Force

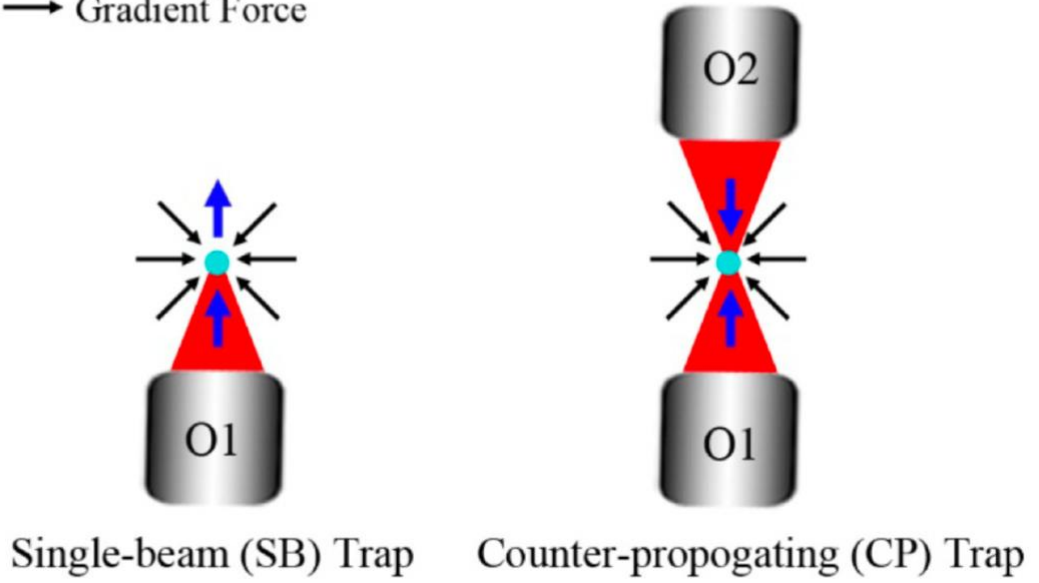


图 3 比较单光束光镊与双光束光镊^[1]

通过对高散射的金纳米颗粒（GNP）在两种光镊中的沿光轴方向的受力（颗粒一般也通过这个方向逃逸）通过T矩阵法进行数值模拟^[1]，我们也可以看出双光束光镊的特点与优势。在SB光阱的计算中，采用波长为1064nm的激光在等效物镜NA为1.2的水中聚焦。在计算CP光阱时，两束相同的光束从相反方向聚焦到同一点上。模拟结果如图 4所示。

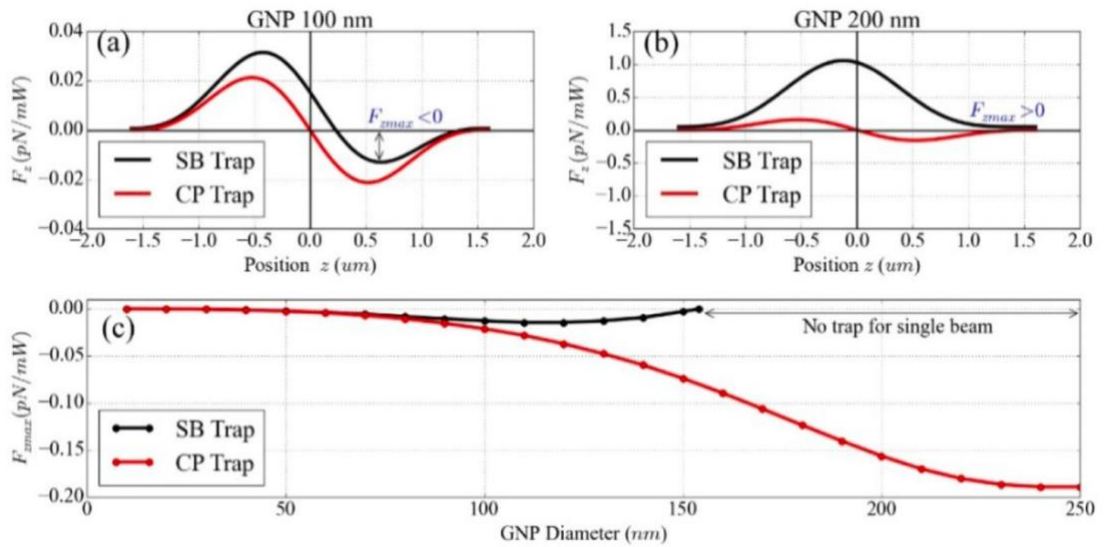


图 4 (a) (b) 不同直径的金纳米颗粒在两种光镊中沿光轴方向的受力沿光轴方向的分布，其中 F_{zmax} 为与激光能流方向相反的最大的回复力（最大负回复力） (c) 不同直径的金纳米颗粒在两种光镊中的 F_{zmax} ^[1]

原则上, F_{zmax} 应大于热随机力才能形成稳定的光阱, 故光阱深度由 F_{zmax} 决定。为简单描述起见, 我们这里忽略热随机力, 直接根据 F_{zmax} 的符号确定 GNP 能否被捕获 (负的就是可以)。可以发现, 当 GNP 直径为 100nm 时, SB 和 CP 光镊均可捕获, 只是 SB 光镊由于散射力的作用导致捕获位置相对物镜焦点靠后了 230nm。而当 GNP 直径为 200nm 时, SB 光镊无法捕获, 但 CP 光镊依然能很好地发挥作用。从图 4 (c) 中可以看出, 对于 SB 光镊来说, 直径大于 154nm 的 GNP 无法被捕获, 而 CP 光镊对所有尺寸的 GNP 都有很好的捕获效果。对直径小于 80nm 的 GNP 来说, 由于散射力对较小尺寸的颗粒有显著的降低, CP 光镊相比于 SB 光镊并没有显著的优势。

大多数反传播陷阱使用两个低 NA 物镜来减少非线性效应, 并提高系统的稳定性和灵活性。然而这种配置多数情况下具有以下限制: (1) 从这些物镜发出的弱聚焦光束产生的光学力不足以在百纳米尺度上捕获颗粒; (2) 低 NA 的物镜缺乏在百纳米尺度上成像粒子的分辨率, 而成像该实验中与捕获同样重要; (3) 缺乏单光束光镊和双光束光镊之间切换的灵活性。

在 SB 光镊中, 物镜通常要具有较大的 NA (>1), 因此采用油浸物镜。而这会导致样品和物镜之间的工作距离较短, 于是我们将第二个物镜选为 NA 较小的干物镜以在样品和物镜之间获得更大的工作空间。我们使用的两个物镜分别为 NA = 1.25, 100x 的油镜和 NA = 0.65, 40x 的干物镜。为保证捕获位置的光学力对称, 我们需要使进入第二个物镜的激光光束的功率大于进入第一个物镜的激光光束的功率 (几倍即可)。CP 光镊中颗粒的捕获位置, 势阱深度等可以通过调整两光束的强度, 焦点位置, 甚至第二个物镜的数值孔径等参数来改变, 焦点有相对偏移时理论上甚至可以实现对颗粒的三维转动, 这提供了一种灵活的方式来调整被捕获颗粒沿光轴方向的位置, 然而在 SB 光镊中这很难实现。

3 单、双光束光镊转换系统的具体实现

我们参考了参考文献 1 中给出的光路^[1], 如图 5 所示。

在后续实验中，我们将利用3个CCD和一个四象限探测器（QPD）来对光镊的捕获情况进行监测、观测及测量（由QPD记录数据），保证O1，O2的焦平面位置和样品良好重合，O1，O2的光轴良好重合（主要由通过调节五轴调节架的各维度使各CCD上能观察到形状、强度均中心对称的圆环衍射条纹和找到最小的重合光斑等过程实现）。

当然物镜本身会减弱部分光强，其孔径也会截断部分光束，而功率计PM只能记录一个相对的总功率，所以我们可以通过一些方法^[1]测得HWP在不同角度下两个物镜的绝对的在捕获处的光功率，这里不具体展开了。

目前的搭建部分大致如图 7。观察到了图 8中的捕获现象。



图 6 两束光打在墙上的光斑（此时基本为单光束光镊）

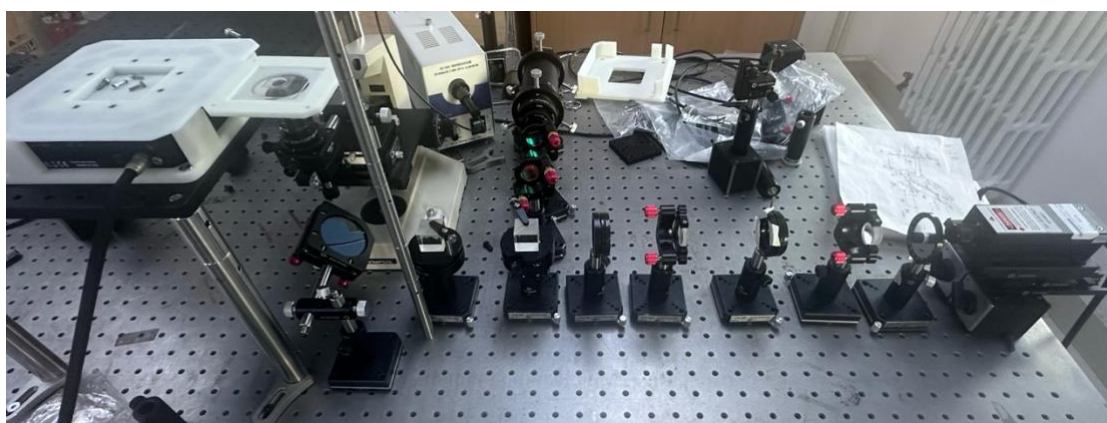


图 7 目前已搭建的单光束光镊部分



图 8 捕获时CCD1显示的图像（图中的中间的圆环衍射条纹代表已捕获）

4 单光束光镊部分光路的调节细节

参考文献中并未说明除物镜外其他元件的调节细节，这里我们给出单光束光镊部分光路的调节方法。我们在前部的光路处主要使用光阑，从前往后调节。

- (1) 激光器：激光器不是很需要水平或竖直方向的调节，只需要调节俯仰水平即可。先把光阑缩到最小的孔径，在激光器出射孔附近调节光阑高度使激光通过光阑。然后把光阑放在较远的地方，调节激光器俯仰螺钉使激光通过光阑。反复调节多次，使远近两处激光均可通过光阑，此时激光器出射激光水平。此时可以在墙上做一个标记点。
- (2) L1：L1与后面的L2构成了一个扩束器，其焦距分别为5cm和15cm。先在激光的光路上放两个光阑，然后把L1放上去，调节L1的高度，位置和倾角，使其透射光点通过后方光阑，同时反射光斑通过前方光阑即可（或者关于光阑中心对称也行）。
- (3) L2：调节L1的高度，位置和倾角，使反射光斑通过后方光阑，透射光斑以墙上的标记点为中心，同时用另一个光阑检查出射光斑是否会随距离变大或变小。变大时，将L2向后移；变小时，将L2向前移。反复调节至L2出射平行光，此时扩束器光轴与激光光轴重合。
- (4) HWP：先留出位置，最后直接放进光路中即可。
- (5) BS1：该分光镜前后表面稍有不平行，但不是大问题。将BS1装在三旋转自由度工作台上，调节三个转动旋钮使通过BS1表面的反射光也通过后方光阑，从侧面反射出的也是沿水平方向的平行光即可（类似激光器一样用另

一个光阑反复校准)。

(6) **PBS**: 调节过程类似**BS1**。后续细调可以利用**CCD1**监测或者看**BS1**在墙面上的反射光点，如图 9和图 10所示。



图 9 **CCD1**上观测到的由**PBS**、**BS1**分别的前、后表面共四个表面反射的反射斑

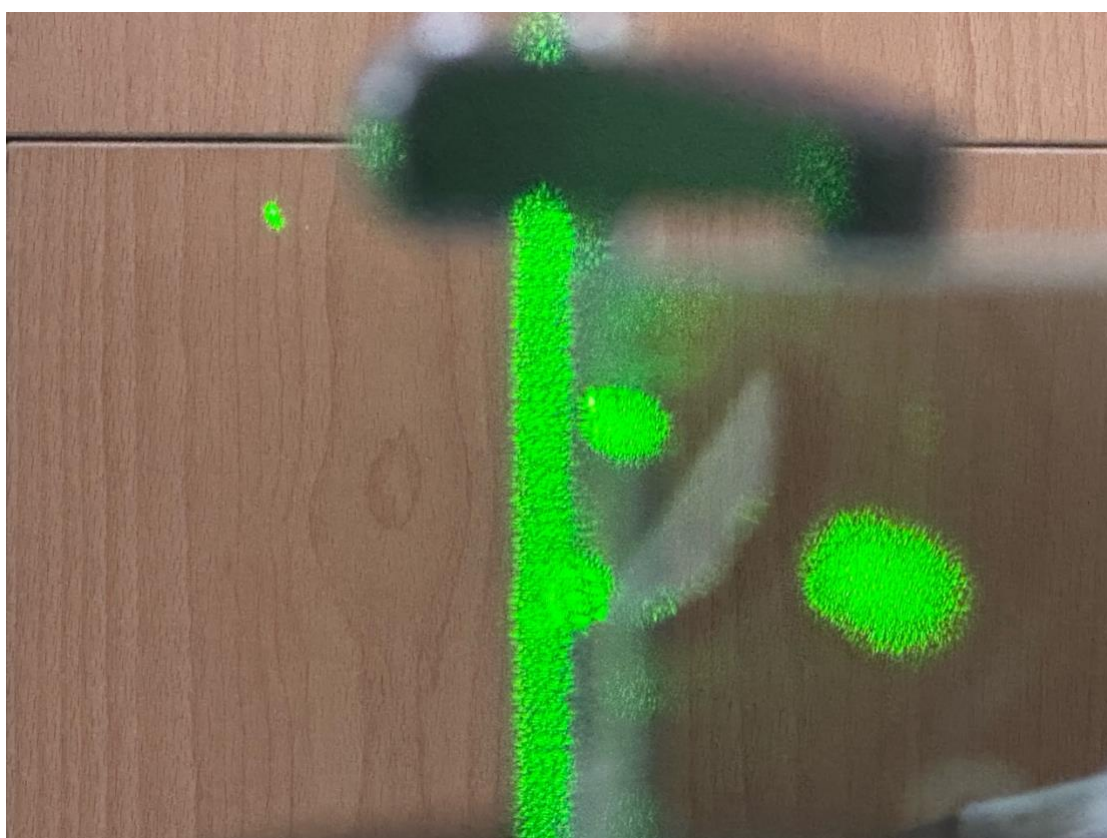


图 10 反射到墙上的光点（只能看见两个（因为斑有点宽加上有干涉））

实际上如果**PBS**和**BS1**的前后表面严格平行的话，四个点会严格重合，但实验中做不到。

(7) **M1**: 我们由于场地和器件的限制，交换了**M1**和**PBS**的位置。我们在样品台

上先放上一个平面镜，通过调节M1的位置和倾角，使出射光和反射光重合（也可以用光阑监测，让反射光也通过光阑）。同时，出射光应基本通过样品台中心，以方便后续调节。

- (8) O1: 将O1固定在一三维调节平台上（要求很稳，我们使用了一个由显微镜拆卸出来的三维平移台）。先粗调，使其目测光轴竖直。然后将其放到样品台下面（注意不要碰到M1），再调整其左右位置和光轴角度使O1的出射光强度最大且关于镜头大致中心对称。然后在O1镜头上滴上显微镜用油，在样品台上放上反射镜。缓慢升高O1，同时观察着CCD1的图像，出现较好的圆环衍射条纹时停下来（如果看不到圆形或椭圆的条纹说明粗调不太好，需重新调节）。细调O1的左右位置和光轴角度，使CCD1上出现形状和强度中心对称的圆形衍射条纹，如图 11所示。

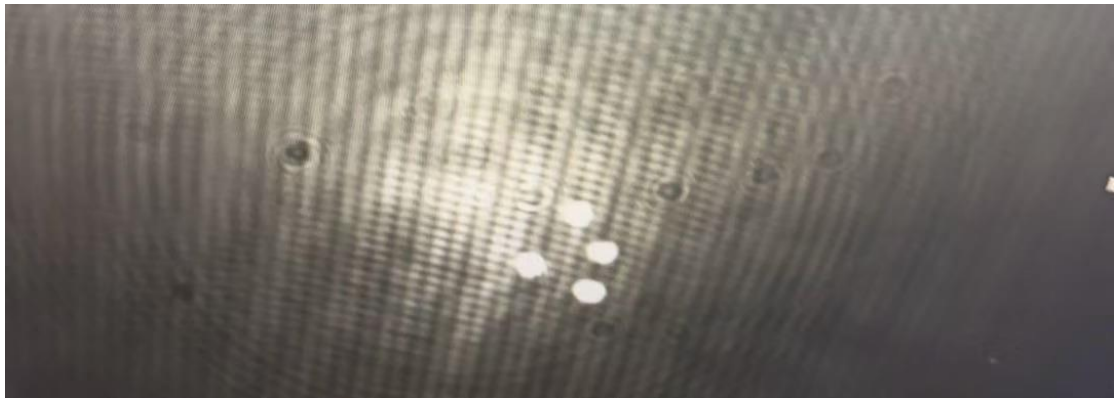


图 11 形状、强度均较为均匀的圆形衍射圆环

此时O1光轴竖直且与激光光轴重合

- (9) 样品: 将反射镜撤下，再在O1镜头上滴一滴油，将样品放上去（样品片的制备方法也在参考文献1中有写，这里不展开写了）。稍微升高O1，应该能看到清晰的酵母菌（先用酵母菌做，因为捕获相对简单）。理论上在清晰看到酵母菌时，若酵母菌处于之前的衍射条纹的中心处，也基本上能被捕获（因为捕获中心离O1焦点并不会太远），捕获时图像如图 8所示。

5 结论和展望

目前已基本实现了单光束光镊的相关功能。在搭建第二条光路之前，有以下几个问题有待解决：

- (1) 样品台为3D打印件，不够硬，导致重力作用下会下垂，不严格水平。

且由于它太软了导致在纳米平移台运动时，其运动和平移台并不完全同步，会有竖直方向的小振动，影响实验精度。后续可能需要更换样品的放置方式（如换成金属夹具等）。

（2）样品的成像质量有待改进，需要找到有污渍的光学表面，擦干净或换掉（如二向色镜DM2等）。

（3）视场范围还需扩大（更换过一次元件，但可能还要再大），可能需要换个更大的反射镜或者缩短整体光路来实现。

（4）成像不够稳定，画面一直在以微米量级晃动，需要找到晃动来源并稳定。

总的来说，目前实验仍处于初步阶段，还有很多的事情要干。不过我们相信最终它能发挥我们想要的作用。

6 致谢

首先，感谢实验过程中杨景老师的指导，教会了我们很多调光路的技巧，并对光路的整体设计和布局提供了很多有价值的建议。

其次，感谢我的同学张鑫睿，跟我一起完成了上述的实验，提供了许多有创意的想法和理论指导。

还要感谢我们的学长王竞先，在3D打印上帮助我改图并教会了我许多改图的方法，并告诉了我联系哪家公司打印。

最后感谢我的家人和朋友们，在实验进展不顺利时，他们的鼓励和关心给予了我坚持不懈的动力。

参考文献

- 1 CHENGLONG ZHAO, "Practical guide to the realization of a convertible optical trapping system," Opt. Express **25**(3), 2496-2510 (2017).
- 2 曹志良, "光镊光阱刚度影响因素的理论与实验研究" 光学 硕士 2019
- 3 王竞先, 王秋原, "光镊实验操作手册" 2019. 1.