

# 在研究生光学实验课程中开展光镊技术实验的探索

陈鑫麟, 韩翔, 熊威

国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙  
Email: xlchencs@163.com

收稿日期: 2021年4月21日; 录用日期: 2021年6月4日; 发布日期: 2021年6月11日

---

## 摘要

光镊技术是指利用光的力学效应捕获和操控微粒的技术, 具有非机械接触、无损伤的优点, 是一种新兴的光学操控手段。本文提出在研究生光学实验课程中引入光镊技术实验, 设计了具体的实验方案和实验步骤。本实验的展开有助于学生更深入地理解光的本质, 同时为他们后续的科研工作提供了一种可行的操作工具。

## 关键词

光镊技术, 光的力学效应, 微球

---

# Exploring the Optical Tweezers Experiment in the Postgraduate Optical Experiment Course

Xinlin Chen, Xiang Han, Wei Xiong

College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha Hunan  
Email: xlchencs@163.com

Received: Apr. 21<sup>st</sup>, 2021; accepted: Jun. 4<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 11<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

Optical tweezers realize the capturing and manipulating of microparticles based on the mechanical effect of light. It has the advantages of non-mechanical contact and no damage, and is an

**emerging optical manipulation method. This paper proposes to introduce the optical tweezers experiment into the graduate optical experiment course. The experimental schemes and procedures are designed. This experiment can help students for better understanding the essence of light, and provides a feasible operating tool for their follow-up scientific research work.**

## Keywords

**Optical Tweezers, Mechanical Effect of Light, Microspheres**

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

光镊技术是指利用光的力学效应捕获、操控纳米至微米量级微粒的一种技术[1]。1970年,美国贝尔实验室的 Arthur Ashkin 首次利用两束相向传输的光束成功在液体溶液中捕获了二氧化硅微球[2]。1986年,他在此基础上,利用透镜对激光极限聚焦,成功利用单光束实现了微粒的捕获,这种技术就像是一个无形中的镊子将微粒夹住,因而又被称为“光镊”[3]。由于光镊技术具有非接触、无损伤操控的优点,因而被广泛应用于对微纳米颗粒、单细胞、大生物分子的操控和研究。2018年 Arthur Ashkin 被授予诺贝尔物理学奖,以表彰其在“光学镊子的发明及其在生物领域的应用”中的突破性贡献。

在学科之间日益交叉融合的当今时代,光镊技术作为一种微粒操控的工具,在生物、物理、化学、纳米技术等多个领域应用越来越广泛[4] [5] [6]。学习光镊技术的相关理论知识及实验操作技巧,有利于学生拓展思维,为科学研究提供新的思路。因此,针对光学工程专业的研究生开展光镊技术实验课程,越来越迫在眉睫。

本文从光镊技术的基本原理出发,提出了在研究生光学实验课程中开展光镊技术实验的思路,从实验目的、实验原理、实验内容和步骤几个方面,对光镊技术实验课程的展开进行探讨,并利用光镊技术捕获、操控二氧化硅微球和酵母菌细胞。本文对于高等院校开展相关实验课程具有一定的参考价值。

## 2. 实验目的

针对光学方向研究生开展光镊技术实验课题,主要目的是使学生对光镊技术有一定的了解,为开展相关研究提供一种可行的实验工具,主要包括以下几个方面:

- 1) 了解光的力学效应的基本原理,从而对光的性质有更全面的认识。
- 2) 进一步提高学生光路系统搭建及调试的能力。
- 3) 掌握光镊技术作为操控微粒的一种先进工具的可能应用场景,从而为研究生课题展开提供新的思路。

## 3. 实验原理

1905年,爱因斯坦首次利用光量子理论成功地解释了光电效应,该理论指出,光和原子、电子等物质一样,也具有粒子性,在该理论中,每一束光都可以看作是以光速  $c$  高速运动的粒子流,这种粒子称为光子。光子同时具有能量和动量,其能量可以表示为  $E = h\nu$ , 动量为  $p = E/c = h/\lambda$ , 因此,作为光子的集合体,光也具有能量和动量的特性。自古以来,人们就认识到了光的能量特性并将它应用到了日常生

活中，然而关于光的动量特性却一直未能得以应用。

当一束光入射到物体表面时，将会在物体表面发生发射、折射等现象，它所包含的光子的运动方向将会发生变化，其动量也随之改变，根据牛顿定律，物体的动量也会发生相应变化，此时物体受到了光施加的一个力的作用，这个力叫做光辐射压力，简称光力，这种现象被称为光的力学效应。对于自然界存在的光场，光的动量传递所导致的力学效应很微弱，难以在实验中得到观察和利用。直至 19 世纪 60 年代激光的出现，为光的力学效应提供了现实手段。激光具有方向性好、相干性好、亮度高的优点，当一束激光作用在物体表面时，其动量将会传递到物体上，使物体的动量发生变化，从而对物体产生明显的力学效应，该力学效应可以通过实验进行观察和测量。

光的力学效应的基本原理如图 1 所示，一束光从水中入射到均匀介质表面并发生折射，水和介质的折射率分别为  $n_1$  和  $n_2$ ，入射角、反射角和折射角分别为  $\theta_i$ 、 $\theta_r$  和  $\theta_t$ ，反射率和折射率分别  $R$  和  $T$ 。

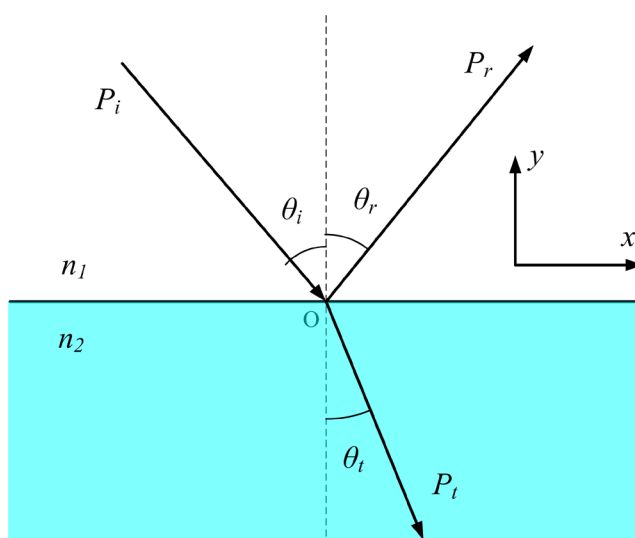


Figure 1. Reflection and refraction of light incident on the surface of the medium

图 1. 光入射到介质表面的反射与折射

令入射光功率为  $P_0$ ，则单位时间内入射光、反射光和折射光的光动量分别为

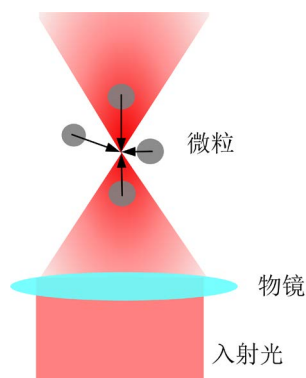
$$P_i = \frac{n_1 P_0}{c}, P_r = \frac{n_1 R P_0}{c}, P_t = \frac{n_2 T P_0}{c}, \quad (1)$$

反射和折射前后光的动量发生变化，介质受到力的作用，即为光的力学效应，介质受力等于单位时间内入射光的动量变化：

$$F_x = \frac{P_0}{c} (n_1 \sin \theta_i - n_1 R \sin \theta_i - n_2 T \sin \theta_t), \quad (2)$$

$$F_y = \frac{P_0}{c} (-n_1 \cos \theta_i - n_1 R \cos \theta_i + n_2 T \cos \theta_t).$$

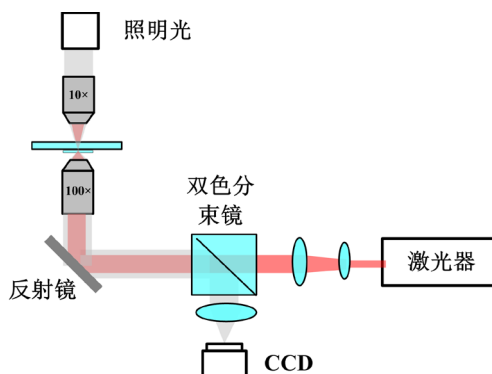
光的力学效应主要包括散射力和梯度力两种，散射力是由于光的反射所产生的力，其方向沿光束传播方向；梯度力指由于光的折射所产生的光阱力，其方向指向光强最大位置，如图 2 所示。在本实验中，我们利用高倍物镜对入射的平行光进行聚焦，产生强的光强梯度，当微粒移动到光束焦点位置附近时，会受到梯度力的作用，从而被捕获。



**Figure 2.** Schematic diagram of capturing microspheres by optical tweezers  
**图 2.** 光镊捕获微球的原理示意图

#### 4. 实验内容和步骤

光镊技术实验光路如图 3 所示，激光器出射的连续激光，经过扩束后，利用 100 倍油浸物镜进行聚焦，用于捕获微粒。同时，利用 LED 光源作为照明光，利用 CCD 对微粒的捕获情况进行观察。具体实验步骤如下：



**Figure 3.** Optical path of optical tweezers technology experiment  
**图 3.** 光镊技术实验光路

- 1) 在实验开始前首先将少量酵母放入水中，等待发酵形成酵母菌溶液。
- 2) 打开激光器，利用不同焦距的透镜对激光进行扩束，调节透镜之间的间距，使出射光束为平行光。
- 3) 平行光经过双色分束镜和反射镜后，垂直向上传输，使其穿过 100 倍油浸物镜，形成聚焦光束。
- 4) 在 100 倍油浸物镜上放置 10 倍物镜和照明光，双色分束镜另一端利用透镜对照明光束进行焦距后输入到 CCD 中，初步调节 10 倍物镜和 100 油浸倍物镜共焦。
- 5) 在 100 倍油浸物镜上滴入香柏油，并放置样片，通过位移台将样片移动到 100 倍油浸物镜焦平面位置，调节 10 倍物镜和 CCD 位置，使 CCD 能观察到清晰的成像。
- 6) 配置微球溶液，选择直径为 2 微米的二氧化硅微球原液，以 1:50 的比例与水进行混合，利用超声清洗机超声 2 分钟。在载玻片上滴取少量混合溶液，并盖上盖玻片。将盖玻片朝下放置于位移台，上下移动位移台使微球成像清晰，左右移动位移台使二氧化硅微球移动到光阱中心，微球被光阱捕获，移动位移台，未捕获微球随位移台一起移动，但被捕获的微球位置不会发生变化。

7) 取出提前发酵的酵母菌溶液, 将 100 倍油浸物镜改为 10 倍物镜(酵母菌细胞直径在 5 微米到 10 微米之间, 无法使用 100 倍物镜进行捕获), 重复步骤 6, 实现酵母菌细胞的捕获和移动。

## 5. 进一步实验及思考

除了上述实验外, 还可以通过该实验装置进行更深层次的光镊实验, 如:

1) 利用光镊移动微粒, 并对微粒进行排列组合, 从而组成特定的文字。

2) 利用圆偏振光捕获碳酸钙微粒, 圆偏振光所携带的自旋角动量会传递到碳酸钙微粒中, 导致微粒的旋转。

3) 观察微粒的布朗运动, 利用光镊捕获该微粒, 对比捕获前后微粒的布朗运动, 并进一步根据微粒的布朗运动测量光阱刚度。

在光镊技术实验课程中, 学生不仅能通过提高光路搭建与调试的能力, 而且能亲身体会利用光束捕获和操控微粒, 通过接触光学前沿方向, 拓展学生的思维。在实验过程中, 学生不仅要掌握光镊技术捕获和操控微粒的技巧, 更重要的是, 要理解激光捕获和操控微粒的原理, 从而对光的特性有进一步的认识。

## 6. 总结

本文提出在研究生光学实验课程中引入光镊技术实验, 并设计了具体的实验方案和实验步骤, 实现了二氧化硅微球和酵母菌细胞的捕获和操控。学生通过本实验对光镊技术和光的力学效应有了较深入的了解, 这有利于他们在以后的科学研究过程中, 能更好地利用光镊这一新兴的科研工具。本文提出的实验方案, 对于其它高等院校开展光镊技术实验课程, 也具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 李银妹, 姚焜. 光镊技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] Ashkin, A. (1970) Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Physical Review Letters*, **24**, 156. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156>
- [3] Ashkin, A., Dziedzic, J.M., Bjorkholm, J.E., *et al.* (1986) Observation of a Single-Beam Gradient Force Optical Trap for Dielectric Particles. *Optics Letters*, **11**, 288. <https://doi.org/10.1364/OL.11.000288>
- [4] Neuman, K.C. and Block, S.M. (2004) Optical Trapping. *Review of Scientific Instruments*, **75**, 2787-2809. <https://doi.org/10.1063/1.1785844>
- [5] Montange, R.K., Bull, M.S., Shanblatt, E.R., *et al.* (2013) Optimizing Bead Size Reduces Errors in Force Measurements in Optical Traps. *Optics Express*, **21**, 39-48. <https://doi.org/10.1364/OE.21.000039>
- [6] Zhong, M.C., Wei, X.B., Zhou, J.H., *et al.* (2013) Trapping Red Blood Cells in Living Animals Using Optical Tweezers. *Nature Communications*, **4**, 1768. <https://doi.org/10.1038/ncomms2786>