

实验,迅速取得成果,最大限度地发挥机器的效益,给予了高度的评价。闪光二号加速器已成为我国一台重要的核辐射效应模拟设备,必将在我国国防科研和高新技术研究中发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- [1] J. J. Ramirez, K. R. Rrestwich, D. L. Johnson et al., 7th IEEE Pulse Power Conf., (1989), 26.
- [2] B. M. Kovalchud and G. A. Mesyats, Proceedings of the Eight International Conference on High-Power Particle Beams, Novosibirsk, USSR, July2-5, (1990), 92.
- [3] 王淦昌,强激光与粒子束,11(1989),1.
- [4] R. B. 米勒著,刘锡三等译,强流带电粒子束物理导论,原子能出版社,(1990),22-77.
- [5] 彭常贤、程桂淦、徐建波等,高压物理学报,74(1993),286.
- [6] 彭常贤、胥永亮、徐建波等,高压物理学报,81(1994),23.
- [7] 刘晶儒、孙瑞蕃、邱爱慈等,强激光与粒子束,51(1993),23.

光学悬浮及其应用¹⁾

赵理曾 秦 勇 聂玉昕

(中国科学院物理研究所,北京 100080)

摘要 光学悬浮是利用光的辐射压力捕获粒子,并稳定地操纵它们定位的一种技术。文章简述了光学悬浮的基本原理,实验进展及其在空间材料制备、光子晶体构成和生物科学技术中的应用

关键词 光学悬浮,辐射压力,光陷阱

Abstract Optical levitation involves the use of radiation pressure for the stable trapping and manipulation of particles. The basic principle of optical levitation, experimental progress and applications in space material processing, photonic crystals research, the biological sciences and technology are reported.

Key words Optical levitation, Radiation pressure, Optical trap

光学悬浮是利用光的辐射压力捕获粒子,并稳定地操纵它们定位的一种技术^[1,2]。1909年,德拜在他的关于辐射压力的博士论文中,首先建议用辐射压力来抵消重力。但由于普通光源所产生的辐射压力是极微弱的,无法实现这项建议。激光的发明,为光悬浮奠定了基础。70年代初期,美国贝尔实验室的 A. Ashkin 首次从实验上观察到激光的辐射压力^[3],并用其成功地悬浮起一个直径为 20 μm 的透明玻璃小球^[4]。由于激光悬浮技术在很多方面的应用,如微小粒子光散射的研究、激光聚变中靶的支撑和定位、空间无容器加工材料、光子晶体的构成,特别是近年来在研究生物活细胞中的重要

应用,使得这项技术在理论和实验上,都得到广泛和深入的研究。

1 光悬浮的基本原理

光不仅携带能量,而且还带有动量。当光照射物体时,将与物体发生动量交换,从而对物体施加力,即辐射压力。辐射压力可分解为散射力和梯度力。散射力沿光传播的方向,其大小与光强成正比。梯度力指向光强梯度的方

1) 国家“八六三”高技术支持项目。
1994年10月17日收到初稿,1995年11月10日收到修改稿。

向,大小与光强梯度成正比。当物体的尺寸比光的波长大得多时,可以用几何光学的图象来描绘辐射压力的产生。设有一个透明均匀的介质球,其折射率 n_2 大于周围介质的折射率 n_1 (即相对折射率 $n = n_2/n_1 > 1$)。当一束 TEM_{00} 高斯光水平偏轴照射此球时,光在球表面上发生反射和折射,假设球的反射较小,光对小球的作用力主要来自光的折射。如图 1 所示,一对光线 a 和 b 通过小球后,由于光的折射,它们的传播方向发生变化,引起动量的变化,所产生

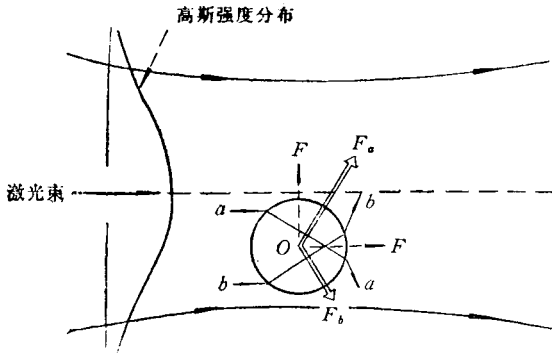


图 1 作用在透明介质小球上的辐射力

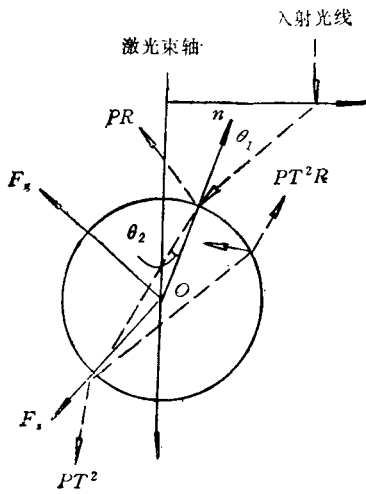


图 2 辐射压力的几何光学模型

的力 F_a 与 F_b 平行于动量变化的方向。由于光线 a 比光线 b 强,因此 F_a 大于 F_b ,使作用在球上的净力有一个指向光轴的横向分量,即光的梯度力 F_g ,和沿光传播方向的分量,即光散射力 F_s 。即使在平面波的情况下, F_s 也存在,

但 F_g 只有当光的强度有梯度时才存在。 F_g 还取决球的性质,如球是实心的还是空心的,相对折射率 n 大于 1 还是小于 1, F_g 或指向光强增大的方向或减小的方向。

A. Ashkin 采用严格的几何光学的模型,处理了具有任意强度分布的、高度会聚的激光束聚焦到透明小球上一点时,球所受到的梯度力和散射力^[5]。图 2 为这个模型的几何示意图。一束功率为 P 的光线通过透镜以 θ_1 角入射到球上,每秒入射的动量为 $n_1 P/c$,这里 n_1 是周围介质的折射率, c 是光速。作用在球上的力为反射光 PR 及无数次出射的折射光: PT^2 , $PT^2R, \dots, PT^2R^n, \dots$ 的贡献的和。 R 和 T 是球表面上反射和透射的费涅尔系数。力通过球心 O ,可分解为沿入射光方向的散射力 F_s 和与它垂直的梯度力 F_g 。可以证明:

$$F_s = n_1 P/c \left\{ 1 + R \cos 2\theta_1 - \frac{T^2 [\cos(2\theta_1 - 2\theta_2) + R \cos 2\theta_1]}{1 + R^2 + 2R \cos 2\theta_2} \right\}, \quad (1)$$

$$F_g = n_1 P/c \left\{ R \sin 2\theta_1 - \frac{T^2 [\sin(2\theta_1 - 2\theta_2) + R \sin 2\theta_1]}{1 + R^2 + 2R \cos 2\theta_2} \right\}, \quad (2)$$

这里 θ_2 为光线的折射角。整个光束对球的散射力和梯度力是个别光线的散射力和梯度力的矢量和。

Ashkin 的模型对于球直径 $d \gg \lambda$ 时,具有很高的精度,理论与实验符合得很好^[6]。但对 $d \ll \lambda$ 时,需用电磁模型计算辐射压力。经典的电磁学原理可以给出散射力和梯度力的完整形式。非均匀电磁场与介质小球的相互作用,可以归结为构成介质小球的原子与分子被外场极化后对外场的散射,散射光相对入射光动量的改变给出散射力,极化原子和分子对非均匀场时间平均的洛伦兹力的响应给出梯度力。根据电动力学的原理,求得光散射力和梯度力分别为:

$$F_s = \frac{2qP}{c}, \quad (3)$$

这里 P 为入射光的功率, c 为光速, q 为有效反

物理

射系数。

$$F_g = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1/\epsilon_2 + 2} r^3 \nabla E^2, \quad (4)$$

这里 ϵ_1 和 ϵ_2 分别为介质与球的介电常数, r 是球的半径, E 为电场强度。由(4)式可见, 对于尺寸远小于光波长的球, 梯度力与球的半径 r 的三次方成正比。还可见到, 当介质小球的介电常数大于周围介质的介电常数时, 小球受到的梯度力指向光强增强的方向, 反之, 小球受力向着光强减弱的方向。对 $r \gg \lambda$ 的球, Ashkin 的模型指出梯度力不随球大小而变, 但光束的会聚程度及球的相对折射率将对辐射压力有很大的影响。

为了对辐射压力有个定量的概念, 这里做一个粗略的估算。用一束功率为 1W 的波长为 514.5nm、模式为 TEM_{00} 的连续氩离子激光, 聚焦照射直径 $1\mu\text{m}$ 的透明介质小球, 设小球的有效反射率为 0.1, 则小球受到的散射力 $F_s = 6.6 \times 10^{-10}\text{N}$, 将使它得到近 10^6g 的加速度, 这里 g 为重力加速度。增大激光功率将进一步增大散射力。另一方面, 由于激光有很好的方向性、空间相干性和光谱纯度, 使激光能高度会聚到很小的光斑上, 产生极大的光强梯度, 因此导致极强的梯度力。Ashkin 计算了高度会聚的激光所产生的梯度力。当激光功率 P 为 10mW, 小球的相对折射率 $n = 1.2$ 时, 在梯度力最弱的方向上, $F_g = -1.2 \times 10^{-11}\text{N}$ 。由此可见, 对于典型的光束直径, F_g 的大小可与 F_s 相比, 两者均可达到粒子重量的上千倍。

横向梯度力的存在, 意味着能通过一定形状的光束设计, 形成所谓的光学陷阱, 捕获粒子并控制它的定位。一个具有高折射率的粒子, 如果被捕捉到这个陷阱中, 则是很稳定的。因为它的任何位移, 都会引起光恢复力。

2 实现光学悬浮的方法

实验上实现光悬浮的方法可以归纳为以下四种:

(1) 单束垂直向上的聚焦激光悬浮粒

子^[4,7-9]。一个均匀的介质小球定位于一 TEM_{00} 模高斯束的焦点上方, 重力和向上的轴向力平衡。平衡是稳定的, 因为任何垂直方向的位移都会因光强的改变而产生垂直恢复力, 任何横向位移都将因横向梯度力引起恢复力。Ashkin 首次用这种方法将直径为 15—25 μm 的玻璃小球浮起来。所用激光为氩离子激光, 其波长为 514.5nm, 模式为 TEM_{00} , 功率为 100—500 mW。用这种方法, Ashkin 进行了真空中的光悬浮实验, 在 $1.33 \times 10^{-4}\text{Pa}$ 柱高的真空中, 实现了对高度透明的熔融石英球的悬浮。另外, Ashkin 还研究了各种非球形粒子的悬浮, 它们由球形粒子组成, 如: 双球、三球、四球、椭球、泪滴等等。所能悬浮起的球的多少取决激光功率的大小。对于空心球或金属球或相对折射率小于 1 的粒子, 需要用 TEM_{01} 模式的激光去悬浮粒子, 因为在这种情况下, TEM_{00} 激光的横向梯度力是指向光强减弱的方向。这种悬浮的优点是装置简单, 工作距离长。但实验表明这种光陷阱的水平稳定性比垂直稳定性好得多。垂直方向上的位置对于激光功率的起伏非常敏感。为了增加垂直稳定性, 可在此基础上, 增加两束方向相反、功率大小相等的水平激光束, 使平衡点保持在垂直轴上并增加垂直稳定性。

(2) 用两束功率相等、方向相反的水平激光悬浮粒子^[4,10]。两束光的梯度力之和与粒子的重量平衡。这种方法有好的垂直和水平稳定性, 但需要先用垂直激光束将粒子悬浮起来, 放入水平光陷阱中, 然后撤去垂直光束。

(3) 单束梯度力陷阱^[5,6,11-13]。一般采用大数值孔径的显微镜物镜将一束垂直向下的高度会聚的激光聚焦到粒子上, 捕获粒子并稳定地操纵它。这种光悬浮具有很高的稳定性, 并可与显微镜结合在一起, 用以观察捕获各种生物活细胞, 进行生物学的研究。

(4) 利用多束相干光聚焦, 产生干涉图案, 用光梯度力使微粒陷在光强极大处, 并按相干图案在空间排列起来^[4]。通过调节束的数目和束之间的夹角, 将产生各种不同的微粒空间结构。可用于构成光子晶体。

实验证实,利用辐射压力可将介质的或金属的实心球或空心球,单个的或多个球的组合体以及液滴托起,被悬浮的物体的大小从亚微米到上百微米。其周围介质可以是空气、真空(直至 $1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$),也可以是液体。激光捕获力的大小与激光功率成正比,并与光斑尺寸,会聚角的大小,光偏振的状态、模式,被浮粒子的尺寸以及相对折射率有关。

3 光学悬浮的应用和前景

光悬浮的一个可能的应用是进行空间无容器材料加工。无容器技术提供了极难得的材料加工的机会。无容器加工材料将消除容器所导致的污染,避免熔体非均匀成核,并提供高温下精确控制材料化学组成的方法。悬浮技术是在空间微重力条件下,进行无容器制备和处理空间新材料的关键技术,因此受到了极大的重视。现有的几种悬浮技术,如电磁悬浮、声悬浮、光悬浮等,它们都各有所长,都有潜力用于无容器空间材料的制备。但基于电磁力的悬浮,都将涉及被悬浮物体的某些运动。在这些悬浮中,要么平衡是动态的,要么需要某种类型的负反馈,以便当物体运动时,不断修正它的位置。光所悬浮的物体的重量虽较小,但是它产生的悬浮是真正稳定的。粒子基本静止地处于平衡位置上。由于在空间微重力环境下,重力大为减小(一般为地面上的 $10^{-3} \sim 10^{-6}$),因此在相同的激光功率下,利用光的辐射压力可悬浮比地面上重得多的物体。另一方面,在空间,重力的变化却相对增大,且这是三维空间中的随机过程。因此稳定控制被悬浮物体的定位变得更为重要。综上所述,可以看出,激光悬浮能提供高稳定度的悬浮,因此在空间微重力条件下,它是一种可供选择的悬浮技术,可用于无容器材料的加工和处理。

光悬浮的另一个应用是构成光子晶体^[11]。光子晶体是指具有光子能带及能隙的一类新材料。其典型结构为一个折射率周期性变化的三维物体,其周期是光波长的量级。它的应用前

景极为广泛。微波区域的光子晶体可用精密机械加工构成,而光波长区域的光子晶体的构成不能靠机械加工。利用光的辐射压力是产生光子晶体的一种方法。如上所述第四种方法,利用多束相干光聚焦,产生周期为微米的结构,在干涉图形的强度极大处,光梯度力将捕获具有高介电常数的粒子,被捕获的粒子将按相干图形的空间形状排列起来,形成微粒的空间分布,其周期就是光波长量级。一般认为这种方法是实现在可见光和红外波段光子晶体的最有前景的方法之一。实验上已用波长为 514.5nm、模式为 TEM_{00} 、功率为 1W 的氩离子激光排列出直径分别为 $1.07 \mu\text{m}$ 和 $0.5 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯小球及 $8 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 小球的二维晶化结构^[14]。

近年来,光悬浮的一个最重要的应用是在生物技术和生物科学领域。1986年,Ashkin首先演示了单束梯度力光陷阱实验^[15],翻开了光悬浮应用的新的一页。这个被称作“光镊子”的单束梯度力陷阱的最通常的形式,是将一束激光引入显微镜,该光束通过显微镜的物镜高度聚焦在其物平面上,光斑尺寸为波长量级。由于激光高度会聚,在焦点附近产生很大的轴向梯度和横向梯度,成为光陷阱。陷阱的作用力足以使被捕获的细胞和细胞内的物体在非物理接触的条件下运动,因此在进行光操作时不会损伤生物样品。同时由于它和标准的显微镜相结合,使进行其他的生物诊断实验也很方便。由于这些特点,预计此项技术将在实验细胞生物学和免疫学以及其他的生物技术和生物科学中起重要作用。最近已有不少有关“光镊子”在生物物理和生物化学领域中的应用的报道^[16-20]。除了简单地俘获一个生物细胞、细菌、病毒,并使它相对其他细胞运动外,“光镊子”还可用于进行细胞分类、细胞融合和细胞操作。“光镊子”还可和其他的激光工具相结合,捕获样品,如染色体,并在此样品上进行激光显微操作。另外它还可用作精确的微力传感器,测量细胞内各种分子马达产生的力。

除了以上应用外,光学悬浮还可用来进行小粒子光散射、大气物理和激光聚变等方面的

研究。可以预料今后几年中,光悬浮将会得到更多的应用。

参 考 文 献

- [1] A. Ashkin, *Science*, **210** (1980), 1081.
[2] A. Ashkin, *Sci. Am.*, **226** (1972), 63.
[3] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, **24** (1970), 156.
[4] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.*, **19** (1971), 283.
[5] A. Ashkin, *Biophys. J.*, **61** (1992), 569.
[6] W. H. Wright, G. J. Sonek, and M. W. Berns, *Appl. Opt.*, **33** (1994), 1735.
[7] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.*, **26** (1976), 333.
[8] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, *Appl. Phys. Lett.*, **24** (1974), 586.
[9] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, *Appl. Opt.*, **19**(1980), 660.
[10] G. Roosen, *Can. J. Phys.*, **57** (1979), 1260.
[11] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm et al., *Opt. Lett.*, **11** (1986), 288.
[12] C. D'heon, E. W. Dearden, H. Rubinsztein-dunlop et al., *J. Modern Optics*, **41**(1994), 595.
[13] S. Sato, M. Ohyumi, H. Shibata et al., *Opt. Lett.*, **16** (1991), 282
[14] Cheng Bingying, Hu Wei, Yang Junhui et al., *Acta Physica Sinica*, **3** (1994), 861.
[15] 张道中, *物理*, **23-3**(1994), 141.
[16] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, *Science*, **235** (1987), 1517. A. Ashkin, J. M. Dziedzic, and T. M. Yamane, *Nature*, **330** (1987), 769.
[17] T. N. Buican, M. J. Smith, H. A. Crissman et al., *Appl. Opt.*, **26** (1987), 5311.
[18] R. Steubing, S. Cheng, W. H. Wright et al., *Cytometry*, **12** (1991), 505.
[19] H. Liang, W. H. Wright, S. Cheng et al., *Exp. Cell Res.*, **204** (1993), 110.
[20] M. Block, L. S. B. Goldstein, and B. J. Schanapp, *Nature*, **348** (1990), 348; A. Ashkin, K. Schultze, J.M. Dziedzic et al., *Nature*, **348**(1990), 346.

新型原子滤光器¹⁾

孙献平 汪盛烈 曾锡之

(中国科学院武汉物理研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要 原子滤光器是基于原子的吸收、发射和内部能量转换的物理过程的一种量子滤光器件。与干涉滤光片(包括薄膜的、偏振的等)和双折射滤光片相比,原子滤光器具有大的接收角、更窄的带宽和更高的滤光效率等特点。文章简要介绍了近年来新型原子滤光器研究的新进展和它们的应用,以及一些原子滤光方案和物理特性的研究。

关键词 原子共振滤光器, 电离检测器, 法拉第反常色散

新型原子滤光器是一种理想的用于强的、连续本底光中探测微弱激光或者荧光信号的量子滤光器件。它可在紫外、可见和近红外光谱范围的许多分立的波长下工作。改变电场、磁场,或者使用一些特殊技术后,工作波长可调。它的优点来自于原子跃迁的窄线宽。在高光谱分辨激光雷达系统中,使用钡原子滤光器,利用原子蒸汽吸收系数、谱线线宽与温度的关系,能够远距离、高灵敏度地测量大气温度等多种大气参数,其高空气温测量的精度为 1K^[1];在激光对潜通信的演示中,已经成功地实现了机载氯化氙准分子激光器 308nm 波长激光经铅蒸

汽拉曼散射频移与 459nm 铯原子共振滤光器匹配,潜艇载倍频紫翠宝石激光器输出激光经氢池拉曼频移得到 455nm 波长激光,也实现了与飞机上铯原子共振滤光器(6S_{1/2} → 7P_{3/2})的匹配。原子滤光器的应用,改善了信噪比,大大地加深了对潜通信的深度,使得卫星激光对潜通信方案成为可能^[2]。由于原子滤光器在红外探测、遥感、激光雷达和空间激光通信等方面具有重要的和广泛的应用前景,因此,它的研究和发 展一直受到人们重视。

1) 1994年6月3日收到初稿,1995年3月22日收到修改稿。