

光压效应及其应用

王 瑞 敏

(西安交通大学理学院大学物理部 西安 710049)

一、光压效应

光的本质是电磁波,电磁波不仅具有能量,而且具有动量。设光子速度为 c ,频率为 ν ,波长为 λ ,则光子的能量和动量分别为:

$$E = h\nu, \quad (1)$$

$$P = h\nu/c \quad (2)$$

当光波与物质发生相互作用被物体吸收或反射时,光子把它的动量传给物体,因此它将对物体施加力的作用,这就表现为光压。1901年列别捷夫首先在实验上观察到这一现象。

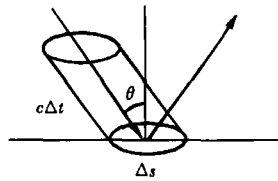


图1 光压的计算

如图1,设能量密度为 $\bar{\omega}$,频率为 ν 的单色光以入射角 θ 射到物体上,单位时间内落到物体单位面积上的光子数为 $N = \bar{\omega} c \cos\theta / h\nu$,总动量为 $N \cdot h\nu/c = \bar{\omega} \cos\theta$ 。设物体表面的反射系数为 R ,即有 RN 个光子被反射,这一部分光子被反射后动量改变量为:

$$\Delta P_1 = 2RN \cdot \bar{\omega} \cos^2\theta \quad (3)$$

余下 $(1-R)N$ 个光子被物体吸收,动量在法线方向的变化为:

$$\Delta P_2 = (1-R)\bar{\omega} \cos^2\theta \quad (4)$$

总动量改变为:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = (1+R)\bar{\omega} \cos^2\theta \quad (5)$$

这就是它们在单位时间内传递给物体单位面积上的动量,即光压。

光压一般非常小,距强度为100万烛光的光源1m处的镜面上,所受到的可见光的光压只有 10^{-5} N/m^2 ,所以开始人们以为光压不会有什么实际应用。激光问世后,激光的高亮度和能聚焦到很小光斑的特点使光束的辐射压力显著提高。当光束汇聚到微米量级时,在光束中心可产生约 10^6 达因/平方米的辐射压力,如此大的力使激光动力学的开发应用成为可能。70年代初,很多科学家就认识到激光束的辐射压力可以用来操纵原子和介电粒子。现在利用

激光光压效应进行原子冷却和捕陷,以及对介质微粒的操纵,已成为当今最热门的研究课题之一。

二、激光与原子的相互作用

仔细分析激光和原子的相互作用,主要存在两类力对原子的运动产生影响:一类称为散射力(耗散力)或自发辐射力;另一类称为偶极梯度力或感应辐射力。

当一束激光照射原子时,原子吸收一个光子跃迁到高能态,紧接着会按受激辐射或自发辐射衰变。如果是受激辐射,发出的光子与入射光束方向相同,将原子开始获得的动量带走,整个过程中光束无动量传给原子,所以不产生力。如果是自发辐射,辐射光子的方向是随机的和各向同性的,原子在多次吸收和发射光子的过程中反冲动量平均为零,而在光束方向上净得入射光子的动量,这个动量等效于光的辐射压力,称为散射力或自发辐射力。

激光光束的强度分布是不均匀的,呈高斯分布,原子在这种非均匀光场中由于感应会生成感应偶极矩,原子的偶极矩与非均匀光场相互作用就要受到力,该力的大小正比于光的强度梯度,称为偶极梯度力或感应辐射力。在一定条件下,偶极力可以使微小物体向光束焦点附近汇聚,形成激光陷阱。

三、光压效应的应用

1. 激光冷却原子

在原子物理的研究中,有时需要对单个孤立原子进行观察和测量,研究人员都渴望得到一种能使原子处于静止和无相互作用的理想状态。冷却可以使原子热运动速度降低,但低温时原子间有强烈的相互作用,不再是孤立的。激光技术发展后,从70年代初科学家开始尝试用激光光压控制原子的运动。到目前为止,激光冷却原子技术的研究已取得一些重大成果,并有越来越多的人参与这项工作。

激光冷却机理可以用下面的物理模型加以说明:

一个动量 $P = h\nu/c$ 的光子迎着—个速度为 v ,质量为 m 的原子发生对撞,光子被原子吸收,根据动量守恒定律,原子速度减慢 Δv

$$\Delta v = \frac{h\Delta\nu}{m c} \quad (6)$$

原子吸收光子后通过自发辐射衰变,衰变中对原子的反冲力为零,所以原子热运动速度就逐渐减慢,原子也迅速冷却下来。原子静止时,当激光频率 ν 和原子跃迁频率 ν_0 相同时达到共振吸收,散射力最大。当原子以速度 v 相对光波运动时,根据多普勒效应,被共振吸收的光波频率为:

$$v = v_0(1 - v/c) \quad (7)$$

以上方法称为多普勒冷却。

2. 光学镊

以光压为基础对生物粒子的捕陷、操纵技术及器件目前通称为光学镊(或光钳)。它在生物细胞检选、细胞的显微操作和加工、免疫学、遗传学和分子生物学研究方面有很高的应用价值。激光光镊术是利用透镜把激光束聚焦成极小的光斑,当微粒落入光束焦点附近时,受偶极梯度力的作用被束缚在焦点处。对大多数生物细胞,其直径 d 在微米量级($d \gg \lambda$),此时可用几何光学近似来分析微粒的受力情况。

如图 2,将折射率为 n 的微粒置于折射率为 n_0 的介质中($n > n_0$),用激光束照射微粒,当微粒处于偏离光轴的位置时,分析 a 、 b 两条光线可看出,光线 a 经微粒两次反射对微粒的作用力 F_{R1} 和 F_{R2} 的合力沿 z 轴,两次折射对微粒的作用力 F_{D1} 和 F_{D2} 在 y 轴方向的叠加沿 y 轴正向指向光轴。光线 b 反射光作用力沿 z 轴,折射光的作用力在 y 轴方向的叠加指向 y 轴负向。由于高斯光束光线 a 比光线 b 强, y 方向上总的的作用力沿 y 轴正向指向光轴。

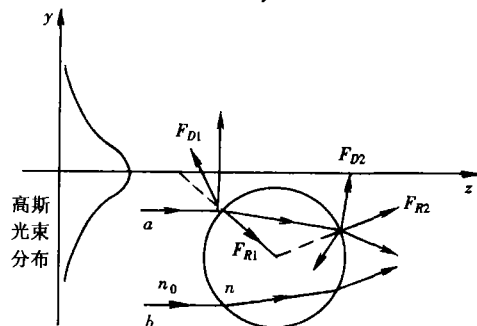


图 2 微粒在偏离光轴时的受力情况

如图 3,高斯光束经透镜汇聚后照射在微粒上,微粒位于光束焦点前方。此时折射光造成的作用力占主导地位,它有沿 z 轴负方向指向焦点的分量。通过分析可知,微粒只要进入光束焦点附近,就要受到指向焦点的力并被束缚于焦点处,通过移动光束

就可实现对微粒的移动、旋转等操纵。

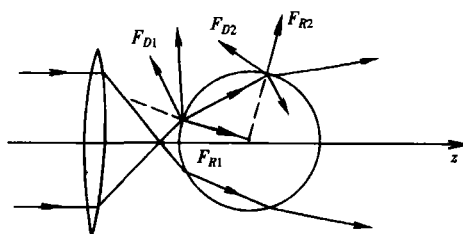


图 3 微粒偏离焦点时的受力情况

当 $d \ll \lambda$ 时,要用波动光学的方法,从粒子在不均匀场中的极化作用来分析其所受的梯度力。

3. 同位素分离

在分离同位素时也可借助光的辐射压力来实现。由于同种原子的不同同位素的电子激发能量稍有不同,这样我们可以将入射光频率调谐到刚好与其中一种同位素的跃迁频率发生共振。如图 4,光束垂直于原子运动的方向射入,同位素原子吸收光子后通过自发辐射衰变,就可以获得垂直于它原先路径的动量 $h\nu/c$,使其在横向产生一个小的位移,实现与其他原子的分离。增加入射光光强,可使每个原子吸收并发射光子的数目增多,有助于使同位素得到最大的空间分离。

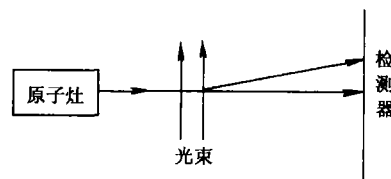


图 4 同位素分离

4. 激光清洗

在微电子加工过程中,沾污是个严重的问题,它常使 50% 的集成电路失效。因此,有效的清洗技术可以促进半导体技术、计算机磁盘技术、光盘技术的发展。传统的液相化学清洗法对 0.1 微米以下的粒子无效。现在各种激光清洗工艺被大力推广,其中利用激光光压进行清洗是一种简便而有效的方法。当激光照射到物体表面时,污物粒子吸收光子而获得动量,产生振动,使其克服基体的吸附力,脱离物体表面,达到清洗的目的。激光清洗在工业生产、艺术品保护以及牙齿疾病的治疗中也有着广泛应用。

利用激光光压效应进行激光冷却、光捕陷、光操纵等的研究,在物理学、生命科学、化学以及工艺技术领域有着广泛的应用前景,越来越受到人们的重视。