

激光光抽运技术应用

杨 德 林

(中国科学院武汉物理研究所, 武汉 430071)

本文简要介绍光抽运方法, 评述激光光抽运技术在原子分子物理研究和激光光谱学上的应用。

40年代后期, 法国物理学家 A. 卡斯勒 (Aefred Kastler 1902—) 在研究原子与光的作用过程时注意到原子与光的作用同水泵抽水十分相像: 水被水泵抽到高处, 在高处的水可通过一定的渠道流向较低的需水的地方; 原子吸收光子从低能级跃迁到高能级, 在高能级的原子可通过自发发射和受激发射跃迁到各个较低的能态, 跃迁过程服从一定的规律。在原子与光的作用过程中光的作用就像抽水过程中水泵的作用一样。这样如果我们让很多原子吸收特殊的(特定频率, 特定偏振状态的)光子, 再经过服从跃迁定则的发射, 不就可以使这些原子聚集于某特殊状态吗? 经过这样的类比, A. 卡斯勒在 1950 年提出^[1]: 让大量在基态各子能级均匀分布的原子吸收特定偏振状态的共振光跃迁到激发态, 然后按照跃迁规律通过自发和受激辐射向基态各子能级跃迁, 从而使原来处于热平衡分布的原子体系达到非热平衡分布, 将光子的角动量传递给原子体系, 实现原子体系的宏观极化。这便是“光抽运”(optical pumping)的基本思想。

通过对原子吸收和辐射特征的观测, 可直接了解原子结构, 弛豫效应以及辐射场与原子体系作用过程的信息。利用光抽运技术人们对许多原子、分子进行的大量研究工作, 极大地丰富了我们对微观粒子的了解, 同时利用光抽运获得的极化原子和极化核也具有系列重大的实用价值。A. 卡斯勒由于在光抽运方法上的创造性贡献而获得了 1966 年度诺贝尔物理学奖。

激光作为新的抽运光源, 给光抽运技术注

入了新的活力。利用激光的单色性, 可以直接对复杂能级结构进行选择性的光抽运; 应用可调谐激光器, 可以激发几乎所有原子、分子能级, 尤其是分子的振动能级; 激光作为强相干辐射源, 使原子产生一系列非线性相干效应, 如共振抽运下的相干性粒子数俘获, 能级间的原子数相干振荡和相干致窄等。本文将简要介绍激光光抽运技术的一些应用。

一、直接抽运获得高度极化原子和极化核^[2,3]

极化原子和极化核具有一系列重要的实用价值: 极化原子束在原子物理中用来作碰撞实验, 在核物理中用作极化靶和粒子源, 在表面物理中作为探测手段, 极化原子束还用来检验原子中的宇称不守恒性。因此, 产生高度极化原子和极化核是近年来引起人们极大兴趣的一个课题。产生极化原子和极化核的传统方法是使之处在强磁场和低温下, 而激光抽运则是产生极化原子和极化核的更加有效的方法。它能以较高的速度使更多种类的原子和更多的态得到极化, 而且由于激光所具有的一系列特点导致了较高激态的极化原子、短寿命极化原子、强流和高密度极化原子的产生和应用。近年来, 人们发展了多种激励和探测方法, 如垂直激光照射后用磁铁对原子束选态, 通过放射性核的衰变或裂变产生场分布的各向异性探测核极化等。这里我们以锂-7 的原子极化为例来说明激光抽运产生极化的原理。锂-7 原子只有一个外层电子, 基态原子角动量量子数在强场下为

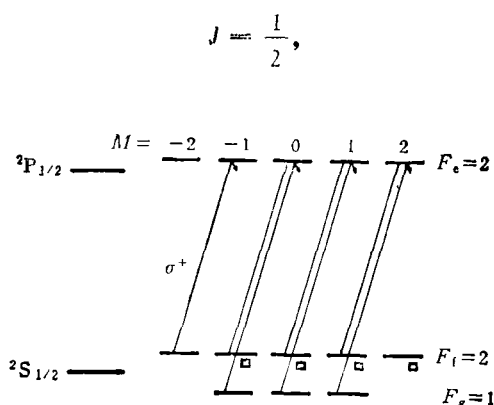


图1 锂-7的与D₁线有关的部分超精细结构塞曼能级和σ⁺偏振激光抽运示意图

图中基态塞曼子能级下方有小方框□的表示该态的

$$M_J = +\frac{1}{2}$$

M_J 只能取 $+\frac{1}{2}$ 或 $-\frac{1}{2}$ 。我们称 $M_J = +\frac{1}{2}$ 的态为原子正极化态， $M_J = -\frac{1}{2}$ 的态为原子负极化态。图1为锂-7的与D₁线有关的部分超精细结构塞曼能级和σ⁺偏振激光抽运示意图。正常情况下，原子在基态八个塞曼子能级上均匀分布，无宏观极化。当我们用σ⁺偏振激光作用于原子时，由电偶极跃迁总磁量子数选择定则(σ⁺: ΔM_F = +1)知道，这将引起原子向激发态 M_F 比基态 M_F 大1的跃迁，然后原子将通过自发发射(ΔM_F = 0, ±1)向基态塞曼子能态跃迁，或由受激发射回到原塞曼态。如果激光足够强，原子在回到基态后马上又被重新激发到激发态，这样的过程将重复进行。我们注意到，每一循环的趋势是把原子向基态 M_F 值增大的方向移动。如果这样的过程重复的次数足够多，所有的原子将聚集在 M_F 取最大的塞曼态，从图1知此态的 $M_J = +\frac{1}{2}$ ，我们获得了正极化原子。图2是一种典型的激光抽运产生极化原子束实验方案的示意图。从原子炉出射的原子经小孔后形成细束，在作用室被垂直入射的激光抽运而极化，同激光平行方向有一弱磁场以产生量子化轴，原子束的极化度测量由探测室的六极磁铁(六极磁

物理

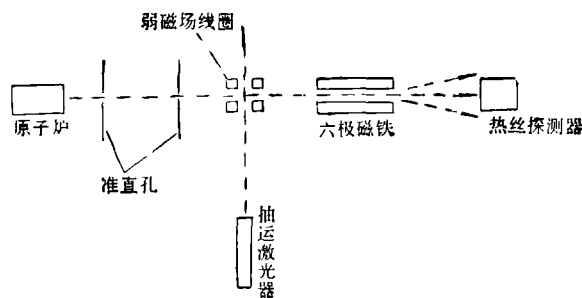


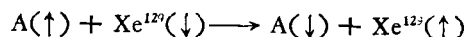
图2 原子束极化实验装置示意图

铁有使原子束中正极化原子聚焦，负极化原子发散的作用)和热线探测器(用来测量原子束相对强度)来完成。整个系统处在真空中。

二、间接抽运产生极化^{[4],1)}

有些原子如氢原子和惰性气体原子等，本身很难用激光抽运直接获得极化，因为它们共振吸收线落在真空紫外区域，没有很好的抽运光源及相应的光学元件。为扩大光抽运的研究对象，发展了间接抽运技术，其中主要的有自旋交换碰撞方法、彭宁碰撞方法、亚稳态交换方法和电荷交换方法等。下面仅对自旋交换方法作一简要介绍。

考虑碱原子与 Xe¹²⁹ 的自旋交换过程，它可以用下式表示：



碰撞前，碱原子被激光抽运至电子自旋向上态，Xe¹²⁹ 在核自旋向下态；碰撞后，Xe¹²⁹ 在核自旋向上态，碱原子在电子自旋向下态。开始存在于碱原子的取向现在被自旋交换转移给 Xe¹²⁹。

自旋交换方法是 H. Dehmelt 在 1957 年为精确测量电子磁矩而引入的。电子是不能直接进行光抽运的，而钠原子则可以。实验中把钠原子样品泡放在一对平板中(见图3)，用放电的方法使泡中产生自由电子，并用光抽运方法使钠原子极化，极化的钠原子与电子相互碰

1) 曾锡之等，第五届全国原子、分子物理学术会议文集，中国物理学会原子、分子专业委员会，(1990)，137。

撞,进行自旋交换从而使电子获得极化。如果所加射频场等于电子的自旋共振频率,则将使电子“去极化”,并影响钠原子极化程度,进而改变了透射光强。由此测得的电子磁矩精度高达 10^{-3} ,比以往方法精度提高100倍。H. Dehmelt是用光谱灯作抽运光源的,现在以激光器代替光谱灯利用此法可做更多的工作。目前,间接抽运获得极化的问题越来越受到重视。如用自旋交换方法产生极化惰性气体样品制成NMR陀螺作为高精度惯性导航系统的计划已获得重大进展;由自旋交换碰撞使稀薄气体Xe至高度核极化,大大增强了核磁共振谱仪的信号。

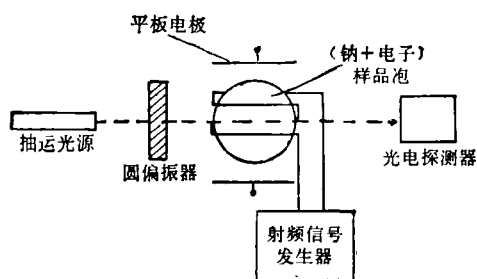


图3 自旋交换光抽运法测量电子磁矩实验装置示意图

三、获得受激辐射^[5,6]

激光抽运原子或分子是一种简单而有效地进行相干光频率转换的手段,它可以将单线抽运激光转换为在其它光谱区域的多线或连续可调的激光输出。这样的抽运和辐射对原子、分子光谱学及动力学的研究是很合适的。由于分子存在有效的激光循环,分子激光能在许多谱线上实现振荡并可在一定程度上调谐,因此激光抽运分子是一项非常有意义的工作。激光抽运技术已成功地用于实现多种分子的振动-转动或纯转动跃迁的激光输出。一般情况下是由CO和CO₂等激光器激发这些分子,形成某些能级间的粒子数反转,导致在红外和远红外光谱区的激光输出。后来,分子产生电子跃迁的抽运较快地发展起来,基于分子的电子跃迁,获得了可见和近红外的受激辐射。近年来,发展

了光离解激光和自电离抽运激光的机制。并抽运分子使之离解可导致激发原子的形成,从而产生光离解激光,紫外激光器的发展为产生原子光离解激光提供了有力的工具。一种简单的二聚体(同核双原子分子)激光器装置如图4所示。分子池由密封的石英管制成,布儒斯特棱镜可使激光在分子的个别谱线上振荡。

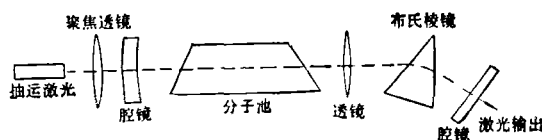


图4 二聚体激光器示意图

四、激光磁共振^[7]

我们知道,在无磁场时简并的原子(或分子)塞曼态在有磁场时能级将发生分裂。设有两能级 E_1 和 E_2 ,无磁场时两能级间隔为 ΔE_0 ,有磁场时上能级某塞曼态的能量变化为 ΔE_1 ,下能级某塞曼态的能量变化为 ΔE_2 ,用一频率为 ν_0 的光场作用于原子(或分子),调节磁场强弱使 ΔE_1 和 ΔE_2 变化,如果

$$h\nu_0 = \Delta E_0 + \Delta E_1 + \Delta E_2$$

满足时,将发生共振现象,这就是光抽运磁共振的原理。光抽运磁共振技术在激光发明以前就已存在,但那时所用的光源——光谱灯——的谱线强度和单色性及光谱范围都无法与激光器相比拟。1968年K. M. 埃文森等人首先用固定频率的远红外激光器代替固定频率的微波源来作激光顺磁共振实验获得成功,从此以后激光磁共振光谱方法不断发展,现已对许多瞬态自由基分子和原子作了测量。由于激光磁共振的灵敏度非常高,它对探测低浓度的分子基团和以高精度测量它们的光谱是一种非常好的方法。如果对一些激光线可以找到足够数目的共振跃迁,就能很准确地确定转动常数和精细结构参量等。激光磁共振在星际分子研究中也具有重要意义。激光磁共振在技术上的发展很快。例如,近年来出现了采用光旋转的激光磁共振:

采用速度调制,浓度调制和双调制的激光磁共振;采用双共振的激光磁共振和时间分辨的激光磁共振等。同时激光磁共振的研究对象也正在从基态自由基分子向离子分子和激发态分子发展。

五、能级交叉激光抽运^[8]

能级交叉技术是人们熟知的无多普勒方法。它实际上是一种干涉效应。原子激发态超精细结构的塞曼子能级在特定数值的磁场中相互交叉,在交叉点上能级发生简并,使原子辐射荧光发生特殊的变化,实验上用这种变化来研究原子的能级结构。长期以来,这种技术已用于原子光谱学,然而在激光器出现以前的年代里,大部分研究局限于强的原子共振灯可以激发的原子共振跃迁。用分子跃迁与一些原子共振线间的偶然巧合,也只研究过很少几种分子。用可调谐激光器或固定频率激光器进行光抽运,极大地扩大了能级交叉技术在原子、分子物理学中的研究范围。

六、量子拍效应^[9]

如果有两个或更多个靠得很近的原子或分子能级同时受到短脉冲激光激发,从这些能级发射出的时间分辨总荧光强度表现出调制的指数式衰减。这种调制图样称为量子拍,这种现象称为量子拍效应,它是由于从这些相干受激能级发射的荧光振幅间干涉的结果。因为拍频率正好等于激发态塞曼子能级间的共振频率,因此可以用量子拍效应来探测原子分子的磁共振。现在,量子拍效应已发展成为一种常用的高分辨激光光谱技术。

七、弛豫的研究^[10,11]及其它

由抽运所激发的原子取向是一种非热平衡

分布,因此它们会向平衡状态弛豫。弛豫时间与共振线宽成倒数关系,因此通过对共振线宽的测量可以确定弛豫时间。弛豫时间与原子间的相互作用,例如碰撞、自旋-自旋相互作用以及电子自旋-核自旋相互作用等有关,这样我们可以了解原子间相互作用的机制。在低压气态系统中弛豫主要发生在抽运池的壁处,因此通过光抽运对弛豫的研究也增进了对表面物理的了解。

激光光抽运技术的应用远不止这些,它还在其它重要领域中扮演重要角色,例如利用激光光抽运对高里德堡态的研究^[12]、激光分离或浓缩同位素^[13,14]以及激光抽运原子频标^[15,16]等近年来都取得重大进展。

- [1] A. Kastler, *J. Phys. Radium.*, **11** (1950), 255.
- [2] C. Cohen-Tannoudji and A. Kastler, *Progress in Optics*, **5**, North Holland, Amsterdam, (1966).
- [3] 陈小源、朱熙文, *物理学报*, **36**(1987), 436.
- [4] X. Zeng et al., *Phys. Rev. A*, **31** (1985), 260.
- [5] Q. H. F. Vrethen et al., *Opt. Commun.*, **18** (1976), 155.
- [6] J. C. White et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-18** (1981), 30.
- [7] G. W. Hills, *Magnetic Resonance Review*, **9** (1984), 15.
- [8] F. D. Colegrove et al., *Phys. Rev. Lett.*, **3** (1959) 420
- [9] J. N. Dodd et al., *Proc. Phys. Soc.*, **74**. (1959), 789.
- [10] B. Horn et al., *Z. Phys. B*, **48** (1982), 335.
- [11] H. Kleipopen, *Adv. At. Mol. Phys.*, **15** (1979), 423.
- [12] J. F. Gallagher et al., *Phys. Rev. A*, **30** (1977), 1937.
- [13] J. I. Davis, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-30** (1983), 24.
- [14] 朱熙文, *物理学报*, **33**(1984), 1605.
- [15] Dong-Hai Yang and Yi-Qiu Wang, *Opt. Commun.*, **73** (1989), 285.
- [16] P. Tremblag and C. Jacques, *Phys. Rev. A*, **41** (1989), 4989.

1) 朱熙文等,第五届全国原子、分子物理学学术会议文集,中国物理学会,原子、分子专业委员会,(1990), 280.