

原子 激 射 器

何向阳 刘

(天水师范学院物理系 甘肃 741001)

20 世纪 60 年代诞生了近代光学与电子学的结合之子——激光器,它的出现使科学技术研究的手段,内容更加丰富多彩。激光器也称为激射器,它是在光波段利用光的干涉、衍射、偏振等光学特性实现同一相干态光的放大而制成的,由德布罗意对称假设知道,任何实物粒子都具有波动性,那么就完全可利用实物粒子的波动性,在粒子处于高度简并、相干的同一量子态下制成物质波激射器。原子激射器正是这一思想的产物,1997 年诺贝尔物理学奖获得者菲立普领导的小组,成功地研制了世界上第一台物质波激射器——原子激射器。

一、什么是原子激射器

原子激射器也叫原子激光器,实际上是“相干原子束发生器”[类比于激光中是“相干光波发生器”],即它发射的原子束具有高度相干的特性,束中所有原子处于同一量子态[指每个原子质心运动的量子态],同时束中原子处于单模,从能量分布的角度讲具有极好的“单色性”。另外,由于发射的原子均处于同一量子态上,因此,可以准直行进相当长的距离而无明显的发散,即“指向性”好。从这几点看,与激光器很相似,因此称为原子激射器,它是现代原子分子物理和光与物质粒子相互作用领域内科学与技术结合的新产物。

二、原子激射器的工作原理与工作过程

自然界中的单质在温度很低时能够遵从玻色-爱因斯坦统计和费米-狄拉克统计规律。服从玻色-爱因斯坦统计的物质状态为玻色-爱因斯坦凝聚状态(缩写为 BEC),它是一种由微观粒子的量子性质而产生的宏观现象。当原子冷却到足够低温时,原子的德布罗意波长大于它的平均距离,原子群将进入 BEC 状态,这时所有原子都处于能量最低的量子态(基态),原子间相互相干,形成高度简并的玻色子[自旋量子数为整数的粒子]系统。原子激射器的工作物质正是处于 BEC 下的超冷原子团。要使原子团实现 BEC 态,要求物体温度低到 10^{-6}K 以下并保持在气体状态下冷却。据目前最新报道,所用冷却技术分级进行,第一级利用激光冷却和囚禁获得大数目、高密度的初始冷却玻色子气体;第二级利

用射频蒸发冷却方法进一步降低温度,使超冷原子团温度达到几个 μK 。这些冷却技术在相关文献中都有详细的报道。

原子激射器在工作过程中首先把存放在室温下高真空室中的工作物质[铷 Rb, 锂 Li, 钠 Na 等碱金属原子气]经过强磁场的捕获和初步冷却后,再运输到激光冷却器进一步冷却。这时在激光器冷却器中被初步冷却的原子能量参差不齐,有高,有低,通过切断激光器电源的方法,把较高能量的原子筛选令其逃逸,剩下低能量的原子经过碰撞重新建立温度更低的热平衡。如此反复多次就能使原子都聚于同一个最低能级量子态上,即实现了 BEC 状态。实现了 BEC 的原子虽然处于同一量子态,但由于其运动方向是杂乱无章的,故还需要进一步降温筛选使它们的运动状态趋于一致,然后让 BEC 状态的相干原子在其重力作用下注入射频输出耦合器,利用射频蒸发冷却等方法再次冷却,从而得到相对速度趋于零的相干原子束。最后令其一批一批不可逆地输出耦合器,这就完成了原子激射器的工作过程。

三、原子激射器与光激射器的类比诠释区别

一个原子激射器一般由三部分构成:原子阱、BEC 状态下的预冷原子云团、将原子云团装入原子阱以及不可逆输出装置。现以激光器作为类比分别是:谐振腔、增益介质、泵浦。激光器工作时主要环节是通过泵浦手段实现粒子数的反转,依靠受激辐射在谐振腔中建立光的增益;而原子激射器工作时主要环节是通过特殊的装入和输运手段把处于中等能量级的 BEC 原子搬到较高能量级上,由于高能级不稳定而向低能级跃迁,使原子在确定较低能级的量子态上产生原子数的增益。

由此可见,原子激射器和激光器都是波的激射器,而前者发射的是相干物质波,后者发射的是相干光波;激光器中的光子可以产生,且其数目能够增多,而原子激射器中的原子不能生成,原子总数不会增大,增大的只是处于基态的原子数目,同时其他量子态上的原子数目相应减少。

原子间有相互作用——这使原子激射器输出的

相干原子束会产生额外发散,与激光器相比会聚性较差,这种物质波不能在空气中远距离传播。

原子具有质量,由于地球对它的引力作用,原子激光器耦合输出的相干原子束会受到重力的加速,其速度与方向不可完全控制,相干原子束会像普通原子束一样任其下落,其方向性受到很大的限制。

原子激光器中的玻色-爱因斯坦凝聚系统处于热平衡态,具有极低的温度;与此相反,光激光器是工作处于负温度的非平衡态。另外,在玻色-爱因斯坦凝聚和蒸发制冷中绝不会出现粒子数的反转。

四、原子激光器的应用前景

原子激光器的问世对物理学和其他高新技术领域的影响十分巨大,研究与应用价值值得一提,应用前景特别喜人。

1. 线性原子光学

60年代,随着光激光器的问世,诞生了一门崭新的学科非线性光学。目前非线性光学已被广泛地应用于物理、化学、生物、医学、工程通信及其他研究与先进技术发展领域。而随着原子激光器的出现,将建立现代非线性原子光学,它使现代原子物理学和现代光学的发展达到一个新的阶段。要准确预测非线性原子光学对未来科学技术与社会发展的影响当然有一定的难度。

2. 原子干涉仪

物质粒子在 uk 的低温下,平均动能极小,粒子会显现波动性,这时可使原子束呈现普通光束所具有的干涉现象。利用低速原子构建的原子干涉仪,使人们更方便去观察实物粒子所具有的德布罗意波,它将大大改进原子物理学的实验方法,还能提供某些物理常数的精确测量。1999年朱棣文小组运用原子干涉仪成功地测量了重力加速度,该小组利用自由下落原子能以与光子干涉相同的精度测出重力加速度 g ,精度达 3×10^{-6} ,证实了自由落体定律在量子尺度上成立。原子干涉仪的出现为基础物理和高量子物理的研究与应用提供了更有力的帮助。

3. 原子钟

原子钟是目前最精确的计时工具,它是利用原

子内电子振动为计时标准,但是由于原子间杂乱无章的运动及其相互作用,致使原子钟精度难以提高,最好的铯原子钟精度可达 10^{-13} 。然而用原子激光器输出的粒子源,将大大改善原子钟的精度,现已使铯原子钟精度可达 10^{-15} ,将来可望达到 10^{-16} 。另外可利用原子钟测量地心引力,并以此进行探矿,同时原子钟还可以用来检验自然界基本力的相互关系和基本对称性等一系列课题。

4. 纳米技术

纳米技术是利用扫描隧道显微镜和原子力显微镜来搬移原子或光刻蚀的方法来产生微小位移的尖端技术。原子激光器可以聚焦、准直,因此可利用原子激光器通过适当变换实现纳米级的微细加工,制作纳米材料,制造纳米机械、电机或系统等,开发原子印刷制版技术和刻蚀新工艺。通过对原子的操纵,利用原子[或分子]操纵技术,制备具有整流、开关、存贮、振荡等功能的纳米电子器件及原子器件,生产具有量子特性的量子计算机等等,对未来微电子学的发展将带来深远的影响。

5. 在生物技术、医药医学方面的应用

在生物技术上,解开DNA的密码一直是人类的重大科学目标之一,解码需要分段,利用激光致冷捕捉技术可以测量其物理特性;由于对原子的操纵与控制,将能制作出可控原子或分子的医疗药剂;基于原子激光器制造的医疗仪器,可迅速提高对病情诊断的准确性,它的发展前景将是无法估量的。

6. 用于其他工程技术方面

在21世纪,随着原子激光器技术的不断完善和发展,必将大力推动精密测量技术、控制技术、空间技术、航天技术、化工技术、纳米生物技术、能源环保工程技术以及高速信息技术等的飞速发展。

据最新报道,物理学家在实验中已制备出了双原子[Rb]分子的BEC态,分子玻色-爱因斯坦凝聚体已初露曙光;另外,科学界也实现了两个囚禁离子的激光致冷。可以大胆预言,在不久的将来,将会实现分子激光器及离子激光器。到那时,人类认识世界和探测自然的手段将更进一步增强,物质波激光器的应用将给人类的生活带来丰富多彩的广阔前景。