

用于铯原子磁光阱的超高真空系统*

王军民 张天才 杨炜东 刘海峰 王克廷 韩如春
(山西大学光电研究所) (中科院陕西天文台) (电子部第十二所)

Ultra-High Vacuum System for Magneto-Optical Trap of Cesium Atoms

Wang Junmin, Zhang Tiancai, Yang Weidong
(*Institute of Opto-Electronics, Shanxi University*)
Liu Haifeng

(*Shanxi Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science*)

Wang Keting, Han Ruchun
(*12th Institute of Electronic Industry Ministry*)

Abstract

Basing on homemade vacuum equipment, materials and technology a set of vacuum system with ultra-high vacuum degree has been designed and constructed for magneto-optical trap of Cesium atoms. Vacuum degree of 1.2×10^{-7} Pa (about 9.0×10^{-10} Torr) can be kept. It can meet the requirements, of magneto-optical trap operating in a vapor cell of Cesium atoms.

摘要 立足于国产材料、真空设备和技术,设计、建立了一套用于铯原子磁光阱的超高真空系统。整个系统结构紧凑、性能稳定、操作方便,其真空度可保持在 1.2×10^{-7} Pa (约 9.0×10^{-10} Torr)左右,可满足直接工作在铯原子汽室中的磁光阱的要求。

关键词:超高真空系统 磁光阱 原子冷却与俘获

一、引言

1987年美国Bell实验室与麻省理工学院、斯坦福大学合作,利用激光与磁场相结合的方法首次实现了中性原子的磁光阱(Magneto-Optical Trap, MOT)^[1],这是一种较为稳定且阱深较大的原子阱;磁光阱的实现一定程度上促进了中性原子冷却与俘获技术的发展。特别是1990年美国JILA实现了直接工作在原子汽室中的磁光阱^[2],甩掉了笨重的原子束设备,大大简化了磁光阱装置,中性原子冷却与俘获技术得以广泛应用,使人们能够方便地操控中性原子的运动,从而在更深层次上认识微观世界;也大大加速了 Bose-Einstein 凝聚(BEC)^[3]和“原子激光”(Atom Laser)^[4]的实验研究进程。

近年来,国外已有多个实验室实现了中性原子磁光阱,被俘获的原子有钠、铷、铯、锂等等,采用的真空系统有不锈钢金属系统也有石英玻璃系统,在设计及实验研究工作上也均各有特

* 本工作得到国家自然科学基金(编号:19974039)、山西省青年科学基金(编号:971012)及山西省回国留学人员科研经费的资助。

收稿日期 1999-03-15

邮编 030006

色和侧重。国内,北京大学^[5]和中科院上海光机所^[6]在1996年分别报道了铯原子和钠原子磁光阱的初步实验结果,其研究工作分别侧重于铯原子喷泉频标及原子光学方向。山西大学光电研究所也开展了铯原子磁光阱方面的工作^[7,8],实验工作侧重于探索冷原子样品与相干光场及非经典光场的相互作用方面。

对于直接工作在原子汽室中的磁光阱,阱中被俘获的原子可能被背景气体中的大速度原子碰撞而逃出阱外。为了有效地提高阱中所俘获原子的数量及密度,必须降低原子汽室中背景气体密度,以减小上述碰撞的几率,即需要提高汽室真空度。对于铯原子磁光阱, $10^{-6}\sim 10^{-7}$ Pa量级的真空度较为适宜。

基于上述认识,我们选用国产真空泵、真空计等设备以及无磁不锈钢、优质石英光学玻璃等材料,立足于国内的加工、封接技术,设计、建立了一套用于铯原子磁光阱的超高真空系统。系统真空度约 1.2×10^{-7} Pa(约 9.0×10^{-10} Torr),可以满足磁光阱从铯原子汽室中直接冷却与俘获铯原子对于系统真空度的要求。目前,应用该系统我们在实验中已成功地获得了超冷铯原子团^[7,8]。

二、系统设计及工作原理

1. 系统设计的出发点

铯原子具有相对较为简单的能级结构,可以采用特定频率的激光,利用自发辐射力产生对铯原子运动的阻尼作用,同时利用空间梯度磁场与激光束特定的偏振态组合产生回复作用,从而直接从热平衡的铯原子汽室中冷却与俘获铯原子。铯原子的 D_2 线($6^2S_{1/2}\sim 6^2P_{3/2}$ 跃迁)的波长值为852.1nm,波长范围可覆盖此值的单频连续钛宝石激光器及单频连续GaAlAs半导体激光器都可以用作铯原子磁光阱的冷却与俘获光源及再泵浦(repumping)光源。

铯的饱和蒸汽压与温度有一定的依赖关系,其经验公式为:

$$\log(P/133)=11.38-4075/T-1.45\times\log(T)$$

式中P为饱和蒸汽压,单位取Pa;T为温度,单位取K。在室温下(298K),由上式可求得铯的饱和蒸汽压约为 1.7×10^{-4} Pa。

对于直接工作在铯原子汽室中的磁光阱,阱中被俘获的铯原子可能被汽室内背景气体中较大速度的原子碰撞而被碰出阱外,这种碰撞对冷却与俘获铯原子是极为不利的。 1.7×10^{-4} Pa的压强,对于从铯原子汽室中有效地冷却与俘获铯原子而言则太高了,在此压强下汽室内还有较高密度的铯原子(每立方厘米 4.25×10^{10} 个)及其他原子,碰撞因素的影响还很明显,使得被俘获的铯原子在阱中只能停留极短的时间;同时,汽室内较高密度的铯原子和冷却与俘获激光束作用,会产生较强的背景荧光,对冷原子样品的实验观测也会造成较大的影响。

实际中是采用一定真空度的铯原子汽室来适当降低背景气体密度,增大原子的平均自由程,以减小上述碰撞的几率,从而有效地提高阱中可能俘获铯原子的数量及密度,同时便于实验观测。对于直接工作在铯原子汽室中的磁光阱,汽室内的压强应比室温下铯的饱和蒸汽压(1.7×10^{-4} Pa)低两至三个数量级,即较适宜的真空度应为 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ Pa量级,此时汽室内的铯原子远未达到饱和。

系统设计的总体原则,首先是系统真空度可以达到铯原子磁光阱对于真空度的要求,即要求 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ Pa量级或略高一些;其次是系统要留有一定数量的用于实验观测和用于送入冷却与俘获激光束及再泵浦激光束的光学窗,并且要便于操作和维护;还要考虑到真空室的可扩充性,以适应后续实验研究的要求。

2. 真空室

基于以上总体设计原则,真空室(即铯原子汽室)主体选用了国产无磁不锈钢材料设计制作。真空室的示意图参见图1。

真空室主体是一个外径120mm、壁厚约5mm、高度约250mm的无磁不锈钢圆桶,上下方各有一个光学窗,用于送入Z轴方向的冷却与俘获激光束。与下方不同的是,上方的光学窗下面还设计有一个大法兰,主要是考虑到真空室的可扩充性(如需在真空室内装入光学谐振腔或其他元器件时,可从这一法兰处拆开真空室;或者是需要增加用于观测或用于送入探针光束的光学窗时,可在这一法兰中间接入一段带有倾斜光学窗的无磁不锈钢管)。

上层水平面内在圆桶外部沿径向对称分布着8个带光学窗的臂,互相垂直的4个用于送入X轴和Y轴方向的冷却与俘获激光束,另外4个可用于实验观测以及送入再泵浦激光束(再泵浦激光束可以单独从一个光学窗送入,也可以和冷却与俘获激光束同光路送入)。竖直方向两个光学窗的轴线与上层水平面内8个光学窗的轴线相交于真空室内的同一点,这一点即为磁光阱的中心(圆桶外侧在上层水平面的上下方还对称地固定有一对反向亥姆霍兹磁场线圈,加恒定电流以产生合适的空间梯度磁场,其中心零磁场点应与磁光阱中心重合;磁场线圈是在系统真空度达到预定水平后绕上的)。下层水平面内,在圆桶的外部沿径向对称分布着互相垂直的4个带光学窗的臂(用于磁光阱参数的测量),还有一个排气管(用于连接真空泵组)和一个陶瓷芯座(有若干对穿心电极,主要是考虑后续实验中若需在汽室内部安装电子元器件,可通过陶瓷芯座上的穿心电极将导线引出真空室外)。

主体圆桶的底盖、由主体伸出的各过渡管及排气管与主体之间经氩弧焊工艺焊接;排气口处焊有一个CF-64型法兰;各过渡管外侧焊有CF-35型法兰。全部14个光学窗均采用优质石英光学玻璃经光学精加工后,与CF-35型的法兰经特殊工艺封接而成。相对应的所有法兰之间均垫有经高温处理过的超高真空无氧铜密封垫圈,并通过不锈钢螺钉连接。

约五克高纯度的铯被预封装在一个小石英玻璃泡内,此玻璃泡放置在一个特殊设计的无磁不锈钢铯泡打碎机构中。该机构通过CF-16型法兰与一个超高真空金属阀门连接,阀门则通过一段细过渡管与真空室相连,即构成了真空室的铯原子源。

3. 真空泵组及真空计

在真空泵组的设计中,选用了分子泵和离子泵,其高真空端分别通过超高真空金属阀和过渡管开口向真空室。真空泵组及真空计连接示意图参见图2。

分子泵选用的是FB-110型风冷式涡轮分子泵(中科院北京科学仪器研制中心),其抽速为110L/s,标称极限压强为 2.7×10^{-7} Pa,是通过高速旋转的多级转子涡轮叶片和定子涡轮叶片的组合进行抽气的^[9]。其主要特点是抽速较大、清洁度高、性能稳定、操作维护方便等,对被抽气体无选择、无记忆效应。而对于传统的扩散泵,极限压强低于分子泵,且向高真空端返油较大,一般需要液氮冷阱,否则会严重污染真空室,其使用维护也不太方便,因此未选用。

涡轮分子泵不能直接工作在大气环境下,工作时其低真空端须维持一定的前级真空,我们采用抽速为2L/s的直连旋片式机械泵作为其前级泵(机械泵的低真空端通大气),并在机械泵和分子泵之间增加了一个手动真空阀,还在机械泵进气口处增加了一个磁动挡板式真空阀,以防止机械泵向系统返油。

离子泵选用的是JBY-100型三极式溅射离子泵(中科院北京科学仪器研制中心),其抽速为100L/s,标称极限压强为 2×10^{-8} Pa^[10]。其基本原理是,在由永磁铁提供的0.10~0.15特斯拉的强磁场中,在阴极与阳极之间5~6kV高压电场的作用下,阴极钛板发射出的电子在高速

飞向阳极钛板过程中同时作高速螺旋运动,途中与残余的气体分子/原子激烈碰撞使之发生雪崩式电离,所产生的正负离子在阴、阳极钛板上强烈溅射,被不断溅射出新鲜钛膜所吸附、埋葬,由此达到抽气的目的^[10]。其主要特点是:超高真空、超清洁、无振动、无噪音、长寿命等,特别是三极式溅射离子泵对于惰性气体的抽速要比二极式泵大得多。溅射离子泵启动时需要 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{Pa}$ 或更高的预真空(预真空越高离子泵的工作寿命越长),正常工作时可关断真空室与分子泵之间的阀门(之后可关掉分子泵和机械泵),而形成一个全封闭系统,汽室真空度则由离子泵来长期维持。

设计在离子泵上方的超高真空金属阀,是为了保护离子泵以进一步沿长其寿命。关掉此阀,即使真空室再次暴露大气,离子泵还被封闭在一定真空度的环境中。

图2中,在泵组与真空室之间设计了一段金属波纹管通过CF-64型法兰连接,目的是使系统安装更方便,并可隔离泵组工作时的残余振动,以减低其对真空室以及隔振光学平台的影响。

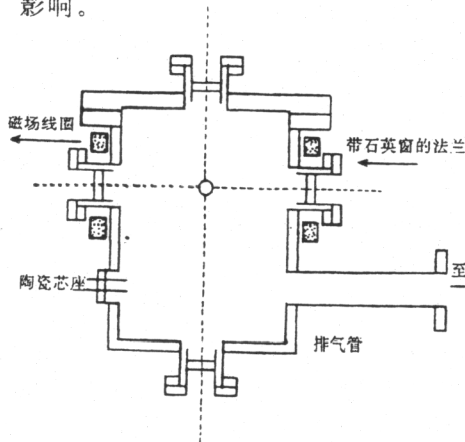


图1 用于铯原子磁光阱的真空室设计示意图(竖直轴向剖面)

Fig. 1. Sketch of the vacuum chamber for cesium magneto-optical trap.

在涡轮分子泵与机械泵之间,通过三通及KF-25型卡箍封有一个金属热偶真空管,连接低真空计用以测量分子泵的前级真空度。低真空计选用ZDO-1001S型数字显示热偶真空计(冶金部真空计量站),其测量范围为 $300 \sim 0.1 \text{Pa}$ 。

在真空室和泵组之间的过渡管上通过法兰封有一个金属裸规,连接电离真空计用以测量真空室的真空度。电离真空计选用DL-7型程控电离真空计(北京大学电子学系)^[11],其测量范围为 $1 \times 10^{-1} \sim 6 \times 10^{-8} \text{Pa}$ 。

三、系统的实验运转及测试结果

加工好的各部件,经仔细清洗、分别上氦质谱仪检漏合格后,在铯原子汽室端和真空泵组端分别组装。两端分别进行再检漏,需要特别注意的是各对应法兰之间的连接部。之后在实验室进行最后的总装、调试。要达到所设计的真空度指标,最后的调试过程中,在系统排气的适当时段对真空室、过渡管道、真空泵等各部分进行烘烤除气是非常必要的,这样才能使无磁不锈钢充分放出内壁表层所吸附的气体,利于提高系统的真空度。

经过反复多次的实验,总结出的真空泵组及真空计开机/关机以及系统烘烤除气的操作规程参见表1。

由于预封装铯的石英玻璃泡内真空度较低,泡内还残留着一部分气体,在打开铯泡以后,

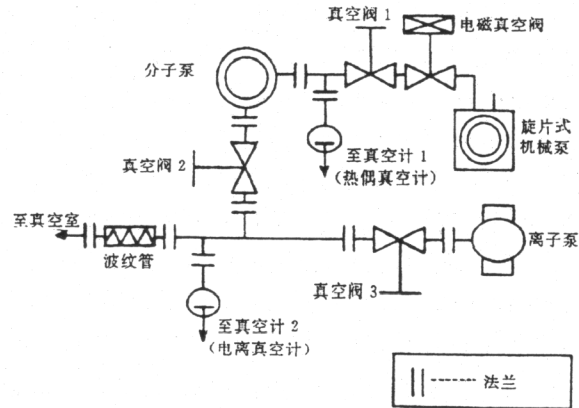


图2 真空泵组及真空计连接示意图

Fig. 2. Illustration of connection of the vacuum pumps and the vacuum gauges.

真空室内铯原子会逐渐增多(铯原子汽室),真空度会有一些反复,但很快即基本恢复到原来的水平,略有所降低。

由 DL-7 型电离真空计测得系统的真空度为 1.2×10^{-7} Pa (约 9.0×10^{-10} Torr), 并可以保持, 可满足磁光阱直接从铯原子汽室中冷却与俘获铯原子对于系统真空度的要求。

表 1 真空泵组及真空计开机/关机以及系统烘烤除气的操作规程

Table 1 Operation rule

1	系统由大气状态开始排气:在系统各部位均匀缠绕加热带、安装温度计或温度传感器后,打开全部手动真空阀,启动机械泵,打开机械泵上方的磁动挡板阀,启动热偶真空计(此时整个系统依靠机械泵由大气状态开始排气;由热偶真空计监测系统真空度的变化情况)。
2	当系统真空度达到 1Pa 或更高时,可启动涡轮分子泵;分子泵运转平稳数分钟后,启动电离真空计。(此时由机械泵维持分子泵的前级真空,系统靠分子泵继续排气;由电离真空计监测系统真空度的变化情况,由热偶真空计监测分子泵的前级真空度)
3	给加热带通电,开始对系统烘烤除气。特别要注意系统各部分要求不同的烘烤温度(温度过低,除气不充分;温度过高,则会影响真空泵正常工作,甚至造成损坏。特别是各石英光学窗附近,过高的温度会造成光学表面畸变、光学质量变坏);真空室及各过渡管道, $T \leq 250^\circ\text{C}$; 溅射离子泵泵体及各真空阀, $T \leq 200^\circ\text{C}$; 涡轮分子泵泵体, $T \leq 90^\circ\text{C}$ 。加热、降温要平缓,可使用几个调压器分别控制各部分温度;烘烤保温时间要求 48h 左右(加热阶段以及保温初期,系统真空度下降得较快;保温中期,真空度基本上维持不变;保温后期,真空度缓慢上升;降温过程中,真空度升得较快)。
4	当系统真空达到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa 时,可启动溅射离子泵(此时系统靠分子泵和离子泵共同排气)。
5	当系统真空达到 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ Pa, 试关分子泵高真空端金属阀,若真空度基本保持不变,则可完全关闭此阀门,随后可关掉分子泵,关断分子泵与机械泵之间的手动真空阀,关掉机械泵,关掉热偶真空计。
6	之后,真空室即靠离子泵来进一步提高、维持其真空度。

四、结束语

基于国产真空泵、真空计等设备以及无磁不锈钢、优质石英光学玻璃等材料,立足于国内的加工、封接技术,设计、建立了一套用于铯原子磁光阱的超高真空系统。系统真空度约为 1.2×10^{-7} Pa (约 9.0×10^{-10} Torr), 可以满足磁光阱从铯原子汽室中直接冷却与俘获铯原子对于系统真空度的要求。目前该系统运转状况良好,我们已采用原子汽室磁光阱技术在该系统中成功地实现了铯原子的激光冷却与俘获^[7,8], 获得了超冷铯原子团, 目前正在进行相干光场及非经典光场与超冷铯原子相互作用探索等方面的工作。

本文可为国内准备开展铯原子或者其他中性原子磁光阱方面的实验工作的同行提供一些参考。

参 考 文 献

- 1 E. L. Raab, et al. Phys. Rev. Lett., 1987, 59(23):2631
- 2 C. Monroe, et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 65(13):1571
- 3 M. H. Anderson, et al. Science, 1995, 269(5221):198; K. B. Davis, et al, Phys. Rev. Lett., 1995, 75(22):3969; C. C. Bradley, et al, Phys. Rev. Lett., 1997, 78(6):985
- 4 M. O. Mewes, et al. Phys. Rev. Lett., 1997, 78(4):637
- 5 Gan Jianhua, et al. Chinese Phys. Lett., 1996, 13(11):821
- 6 Liu Xunming, et al. Chinese Journal of Lasers, 1996, B5(6):511
- 7 王军民等.“采用原子汽室磁光阱俘获铯原子”, 第八届全国量子光学学术报告会(西安, 1998年10月8~10日)大会报告.
- 8 王军民等.“采用原子汽室磁光阱实现铯原子的激光冷却与俘获”, 光学学报, 1998, 18(12):1770; Wang Junmin, et al. Acta Sinica Quantum Optica, 1998, 4(4):229
- 9 中科院北京科学仪器研制中心, FB-110型涡轮分子泵使用说明书
- 10 中科院北京科学仪器研制中心, JBY-100型溅射离子泵使用说明书
- 11 北京大学电子学系, DL-7型程控真空计使用说明书