

积分球内的铷原子激光冷却*

马红玉^{1,2)} 成华东¹⁾ 张文卓¹⁾ 刘 亮^{1)†} 王育竹¹⁾

1) 中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800)

2) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2008 年 4 月 15 日收到, 2008 年 7 月 28 日收到修改稿)

研究了积分球内激光冷却原理, 设计积分球时对积分球的反射率、尺寸及球上开孔大小对于激光冷却的影响进行了讨论. 进行了积分球冷却⁸⁷Rb 实验, 实验结果表明积分球有效的冷却了球腔中的铷原子, 获得了积分球内冷原子的吸收信号以及冷原子随冷却光失谐的变化曲线.

关键词: 漫反射光场, 积分球, 全光冷却

PACC: 3280, 3280P, 4250, 4250V

1. 引 言

积分球为中空的内表面为漫反射率极高的球腔, 其内表面可认为是朗伯发射体, 它是一种光度学测量仪器, 常用于激光功率与能量、材料反射率测量等方面^[1,2]. 当一束激光射入积分球后, 会在积分球内形成一个均匀的各向同性的漫反射光场, 该漫反射光场能应用于激光冷却气体原子中. 早在 1979 年王育竹于成都的光频标会议上就提出了利用积分球冷却原子束的基本构想, 并对其基本物理机理进行了讨论^[3]. 1992 年 Ketterle 等人利用一个内表面为漫反射的空心管产生红移漫反射光来冷却原子束^[4], 对 Na 原子进行了有效的冷却. 之后 1994 年 Metcalf 等人采用一个圆柱腔产生漫反射光来冷却⁸⁵Rb 原子^[5], 原子速度被冷却至 150 m/s. 同年, 陈洪新等人利用积分球冷却装置对 Na 原子束进行减速^[6], 观察到了明显的冷却现象.

积分球冷却为全光模式, 不存在磁场, 避免了磁光阱冷却方法中磁场带来的功耗问题. 并且积分球冷却不受积分球几何形状的限制, 因此可以将积分球制作成微波谐振腔的形状, 将激光冷却区与微波腔合二为一, 这种方法能够减小目前所用原子钟的

尺寸, 并且能够提高频率的稳定性. 故利用积分球冷却制作的原子钟体积小, 重量轻、功耗低, 这正是空间原子钟的要求, 所以积分球在空间原子钟有重要的应用.

从 1997 年开始, Dimarcq 等人开始研制积分球冷却的小型原子钟^[7]. 在 2005 年, 此小组用积分球对铯原子进行冷却并将积分球用作微波腔, 研制成功了原子钟^[8], 它的体积很小, 高度仅为 250 mm, 宽度仅为 80 mm. 它将会用作星载钟, 预期在微重力环境下它的短稳可达到 10^{-13} s^{-1} .

本文研究了积分球冷却的原理, 讨论了积分球设计中积分球各参数的选取标准, 以及我们开展的积分球冷却⁸⁷Rb 的实验, 获得了积分球内冷原子的吸收信号以及冷原子随冷却光失谐的变化曲线.

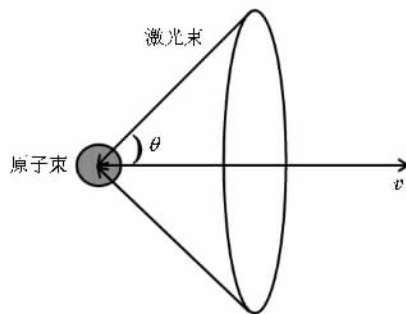


图 1 激光束与原子束夹角示意图

* 国家自然科学基金(批准号:10604057) 中国博士后基金(批准号:2005038453)和国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号:2006AA12Z311)资助的课题.

† E-mail: liang.liu@siom.ac.cn

2. 积分球冷却原理

一束激光射入积分球后会在积分球内形成一个均匀的各向同性的漫反射光场,当激光频率为负失谐,原子通过积分球时,特定速度的原子将与某一特定角度(与原子束的夹角)的光线相互作用以补偿原子的 Doppler 频移.光子与原子动量交换的结果使原子纵向速度降低,减速后的原子继而与角度更小的光线相互作用.通过这种 Doppler 频移的自动补偿,原子从进入球腔到离开球腔始终经受了减速和冷却的作用,大大加宽了原子与辐射的共振相互作用区.

当一频率为 ω_L 激光的运动方向与速度为 v 的原子束运动方向夹角为 θ 时,如图 1 所示,原子对顶角为 2θ 的锥面上所有光子的吸收概率都相同.由于 Doppler 效应原子感受到的激光频率为

$$\omega_a = \omega_L + kv \cos(\theta), \quad (1)$$

其中 k 为光场波矢,当 ω_a 为原子共振频率时,原子共振吸收光子减慢速度,则共振条件为

$$\cos(\theta) = (\omega_L - \omega_a) / kv. \quad (2)$$

当原子被减速后,因为是漫反射光场,所以总会存在比 θ 角度更小的光线满足共振条件,原子会与这个夹角更小的激光共振而被减速.这就是漫散射光的 Doppler 频移的自动补偿机理.且对于固定的激光频率 ω_L ,只要原子速度 v 满足 $v > v_f$, $v_f = \frac{\omega_L - \omega_a}{k}$,原子都可以被冷却.原子感受的辐射压力为^[9]

$$F = -\hbar k \Gamma \rho_{ee} \cos\theta \\ = -\hbar k \Gamma \frac{s/2}{1 + s + (\chi \delta + kv \cos\theta) \Gamma} \cos\theta, \quad (3)$$

\hbar 是普朗克常数, Γ 为原子的自然线宽, ρ_{ee} 为二能级原子处于上能级的概率, s 为饱和参数 ($s = I/I_s$, I 是激光光强, I_s 原子的饱和参数), δ 为光失谐 ($\delta = \omega_a - \omega_L$).原子在红失谐的漫反射光中会感受到与 $I \times \cos\theta$ 成正比的减速,它会使较大速度原子产生 $\Gamma \delta / (kv)$ 成比例的渐近式的速度累积,在大范围的速度分布情况下与六束光构成的 Molasses 相比它能更有效冷却原子^[4,10].

3. 实验装置

在积分球设计时要考虑到积分球大小、球上开

孔大小及反射率.如 A_s 为积分球内表面积, A_h 为积分球上总的开孔面积, ρ 为积分球内表面反射率,积分球直径为 D_s .开孔率为 $f = A_h / (A_s + A_h)$,如果入射积分球的光通量为 Φ_i ,则积分球的表面辐射率为

$$L_s = \frac{\Phi_i}{\pi A_s} \times \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)}. \quad (4)$$

由上式可见在积分球内的反射使得积分球内光通量总量高于入射光通量.冷却过程中为了获得较高的辐射率,在设计积分球时应该减小积分球表面积,即减小球半径,增高反射率,减小开孔面积.积分球的响应时间为

$$\gamma = -\frac{3}{2} \frac{D_s}{c} \frac{1}{\ln(\rho(1 - f))}, \quad (5)$$

它反映的是一个光子进入积分球后存在的时间,自然在设计积分球时应使这个时间参数尽量长,则积分球的损耗就会比较低.

一般制作积分球内壁材料通常采用喷涂聚四氟乙烯、氧化镁、硫酸钡涂层,这些涂层在 450—800 nm 波段的反射率一般为 96%.有一种国产的聚四氟乙烯悬浮树脂(F4)喷涂材料,它在 200—2500 nm 波长范围内反射率可达到 98%,也用来制作积分球.但是喷涂型积分球会存在涂层剥落问题.美国的 Labsphere 公司的 Spectralon 材料是一种热塑性反射材料,它能提供在光谱 UV-VIS-NIR 区域中,高于目前任何已知材料的漫反射率. Spectralon 可在 400 至 1500 nm 光谱范围内,漫反射率 > 99%.而且这种材料可以放置到超高真空中.但是这种材料表面会吸附铷原子,导致反射率下降.目前有一种高反射率陶瓷,可用来制作积分球,在 450—800 nm 波段反射率为 98%.这种高反射率陶瓷积分球用模具烧制而成,可以订制,而且价格便宜,所以我们积分球选用此种材料.

在设计积分球时,需要遵循一点,开孔率 f 不能大于 0.05,因为当 $f > 0.05$ 时,积分球便丧失高反射率带来的优势.表面辐射率与积分球直径的关系由(4)式可见,积分球越小球内辐射率越高,则在冷却中激光利用率就高,所需的冷却光功率就小.但是我们使用积分球进行激光冷却往往是为了利用积分球能将入射的光通量在空间均匀化,而大的积分球半径和小的开孔率会改善积分球内光场均匀性.因此,积分球半径选择时应该同时考虑到这两点.我们还要考虑到真空开口的问题,开口太小则抽速会很小,积分球内真空很难达到我们的要求.综合以

上几点考虑,我们设计的积分球直径为 48 mm,上下有两个直径 10 mm 的开孔,用来连接真空.积分球上还有三对相互垂直对称分布的 $\Phi 2$ mm 的开孔,用作激光通过光纤导入积分球开口,这样尺寸的积分球开孔率为 $f = 0.024$,它的响应时间为 2.4 ns.

积分球为两个可以合起来的半球,如图 2(a)所示,它套在一个正好可以放置在积分球内玻璃球上(图 2(b)所示),放置在真空系统外面.我们将此玻

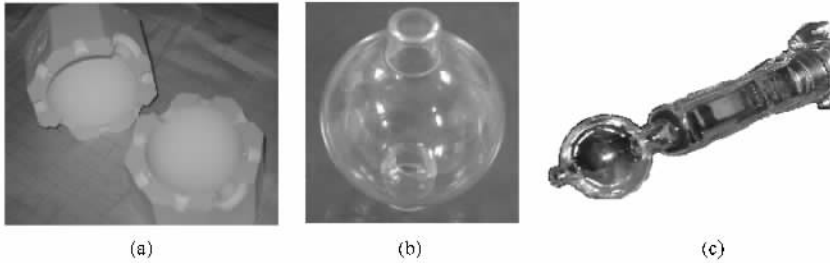


图 2 积分球实物图 (a)为积分球 (b)为玻璃球 (c)为吸收池

4. 实验过程与结果

实验中的冷却光为 Toptica 公司的光栅外腔反馈式激光器(型号为 TA100),波长为 780 nm,利用饱和和吸收法将激光器频率锁定在 ^{87}Rb 的 D_2 线上.然后用 A.A 公司的声光调制器(AA.MT.110)将冷却光频率移至铷原子 $5^2S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5^2P_{3/2} F = 3$ 负失谐 17 MHz 处.另一台 Toptica 的激光器(DL100)提供抽运光,它锁定在 ^{87}Rb 的 $5^2S_{1/2} F = 1 \rightarrow 5^2P_{3/2} F = 2$ 上,防止冷却过程中原子泄露到 $5^2S_{1/2} F = 1$ 态.探测光由另一台 DL100 激光器提供,它处于扫频状态,利用吸收法探测冷原子信号.吸收信号由 Hamamatsu 公司 S2386-18L 型光电管探测,然后经过放大电路后在 Tektronix 示波器(TDS1002)记录下来.

我们将冷却光与抽运光耦合进多模光纤,通过球上的开孔将激光引入积分球内,如图 3 所示,图上仅示意地画出一对对射激光束.多模光纤数值孔径为 $\text{NA} = 0.22$,所以光很容易耦合进光纤,一般耦合效率高于 80%.且多模光纤输出光的发散度大,由于积分球上的开孔都是两两对称的,这样发散角度大的光进入积分球后光功率损耗会小.光纤输出的冷却光功率为 40 mW,抽运光功率为 6 mW.由于使用的多模光纤,进入积分球的冷却光的偏振无法确定,但是这对冷却结果并无影响.由于积分球冷却是在封闭腔中进行,无法直接得到冷原子的图像信

息.我们将冷却光和抽运光同时打开,探测光处于扫频状态.如图 4(a)所示,探测光的吸收信号的超精细结构开始出现.此时激光器扫频范围为 500 MHz 左右.图 4(b)为探测光的饱和吸收谱线,可以利用饱和吸收谱线确定探测光吸收信号中超精细结构的位置.可见,图 4(a)中的三个峰分别为 ^{87}Rb 的 D_2 线的 $F = 2 \rightarrow F' = 1$, $F = 2 \rightarrow F' = 2$ 与 $F = 2 \rightarrow F' = 3$ 跃迁吸收峰.图 5 为对探测光吸收信号的 $F = 2 \rightarrow F' = 3$ 跃迁吸收峰的高斯拟合,得到拟合后的吸

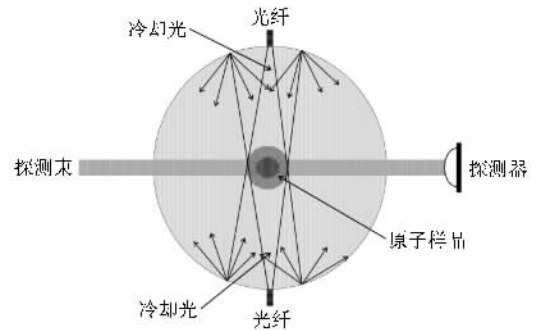


图 3 积分球内冷却与探测过程示意图

息.我们利用一束穿过积分球的探测光的吸收信号来对球内冷原子进行探测.探测光为线偏光,光斑为 2 mm,光功率约为 $10 \mu\text{W}$.它通过积分球水平方向中央的 2 mm 的孔进入积分球,然后通过积分球上对称的另一个孔射出,由光电管探测吸收信号,传输到示波器上进行记录.

我们将冷却光和抽运光同时打开,探测光处于扫频状态.如图 4(a)所示,探测光的吸收信号的超精细结构开始出现.此时激光器扫频范围为 500 MHz 左右.图 4(b)为探测光的饱和吸收谱线,可以利用饱和吸收谱线确定探测光吸收信号中超精细结构的位置.可见,图 4(a)中的三个峰分别为 ^{87}Rb 的 D_2 线的 $F = 2 \rightarrow F' = 1$, $F = 2 \rightarrow F' = 2$ 与 $F = 2 \rightarrow F' = 3$ 跃迁吸收峰.图 5 为对探测光吸收信号的 $F = 2 \rightarrow F' = 3$ 跃迁吸收峰的高斯拟合,得到拟合后的吸

收峰的峰值宽度约为 13 MHz,图中横坐标的频率为相对频率.如果是热原子,由于存在多普勒加宽效应,在室温情况下其吸收峰宽度大约为 510 MHz.所以可以确定探测到的是冷原子信号,积分球将腔中的⁸⁷Rb 原子速度降了下来.

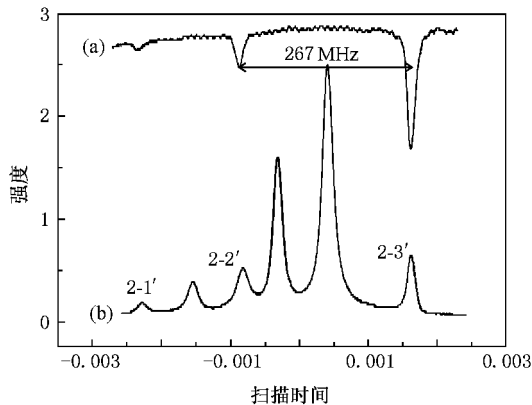


图 4 积分球冷原子吸收信号 (a)探测光通过冷原子后的吸收信号 (b)探测光激光器的饱和吸收信号

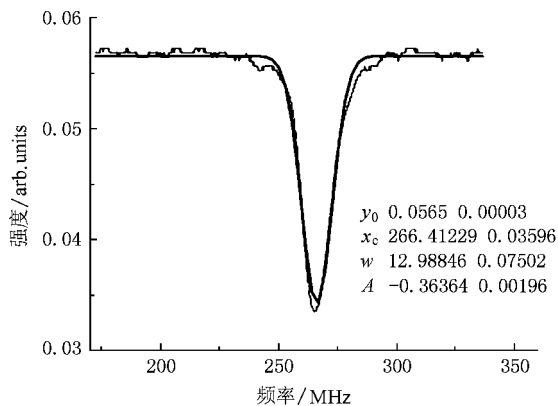


图 5 冷原子 $F=2 \rightarrow F'=3$ 吸收峰拟合图

改变冷却光的失谐,探测光的吸收信号峰值大小随之改变,图 6 为冷却光在不同失谐情况下吸收信号强度的变化.吸收信号的峰值大小对应了积分球内的冷原子数目,即冷原子多吸收信号就强.图中的点值为实验点,曲线是用 Lorentz 函数进行的拟合,吸收最强处失谐为 $\delta = -3.4\Gamma$,即这时俘获的冷原子最多.因为原子受力与失谐的关系为 Lorentz 线

型,因此冷原子信号与失谐的关系呈 Lorentz 型.积分球冷却中,由球内的原子受力(3)式可见,随着冷却光失谐的增大,原子的速度俘获范围随之增大,则可以得到更多的冷原子;与此同时,原子能够被冷却的最小速率也增大了,也就是说最终冷却下来的原子团的温度升高了.当原子俘获范围较小时,积分球最后得到的冷原子数目较少,相应的探测信号就弱;如果原子团温度比较高时,原子很快就从俘获区域逃逸,原子数也会较少,探测信号同样会比较弱.因此存在一个最佳的失谐,使得原子数与原子团温度都比较适合,此时就会得到较强的探测信号.可见对于本实验, $\delta = -3.4\Gamma$ 为比较合适的失谐量.

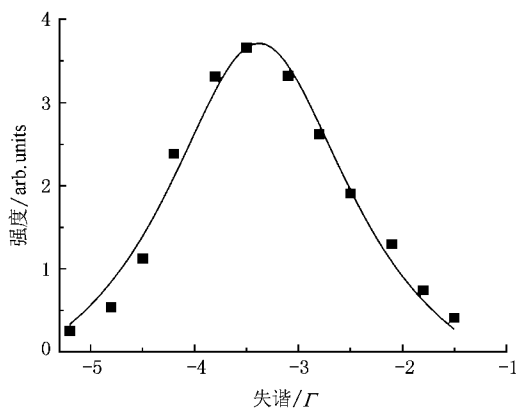


图 6 冷却光在不同失谐情况下的吸收信号强度

5. 结 论

我们加工设计了积分球,并将其用来冷却⁸⁷Rb 原子,探测光的吸收信号表明积分球对腔内热原子进行了有效冷却,这是我们目前取得的初步进展.实验结果显示了积分球中漫反射光能有效地冷却气体原子,这样的结果为进行下一步冷原子钟的研究奠定了基础.由于我们这套系统无法进行飞行时间法探测原子,腔内的原子数以及原子温度还没有确切测定,我们需要对这套系统进一步完善.下一步的实验将积分球设计成微波腔,进行原子与微波相互作用的研究.



- [1] Hu K S , Fu D H , Wang Y Z 1978 *Acta Phys. Sin.* **27** 303 (in Chinese) [胡恺生、付德惠、王永珍 1978 *物理学报* **27** 303]
- [2] Zheng J S 1980 *Acta Phys. Sin.* **29** 286 (in Chinese) [郑健生 1980 *物理学报* **29** 286]
- [3] Wang Y Z 1979 *Proceedings of Frequency and Time Forum Chengdu* (in Chinese) [王育竹 1979 *光频标研讨会 成都*]
- [4] Ketterle W , Martin A , Wolf M A , Pritchard D E 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 2483
- [5] Batelaan H , Padau S , Yang D H , Xie C , Gupta R , Metcalf H 1994 *Phys. Rev. A* **49** 2780
- [6] Chen H X , Cai W Q , Shu W , Li F S , Wang Y Z 1994 *Chin. J. of Laser* **21** 280 (in Chinese) [陈洪新、蔡惟泉、束伟、李佛生、王育竹 1994 *中国激光* **21** 280]
- [7] Guillemot C , Vareille G , Valentin C , Dimarcq N 1997 *Proceedings of the 11th European Frequency and Time Forum* , Neuchâtel Switzerland 156
- [8] Tremine S , Guerlandel S , Holleville D , Delpont J , Dimarcq N and Clairon A 2005 *IEEE International* 111
- [9] Metcalf H J , vander Straten P 1999 *Laser cooling and trapping* (New York : Springer-Verlag Press) 25
- [10] Zhang W Z , Cheng H D , Ma H Y , Liu L , Wang Y Z 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 1366 (in Chinese) [张文卓、成华东、马红玉、刘亮、王育竹 2007 *光学学报* **27** 1366]

Laser cooling of rubidium atoms in an integrating sphere^{*}

Ma Hong-Yu^{1,2)} Cheng Hua-Dong¹⁾ Zhang Wen-Zhuo¹⁾ Liu Liang^{1)†} Wang Yu-Zhu¹⁾

1) *Key Laboratory of Quantum Optics , Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China*)

2) *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China*)

(Received 15 April 2008 ; revised manuscript received 28 July 2008)

Abstract

In this paper , the theory of atomic cooling in an integrating sphere is studied. During designing an integrating sphere system , the effects of the parameters of the sphere on the cooling , including the reflectivity of the material , the shape of the sphere and holes in the sphere have been considered carefully. The experiment of ⁸⁷Rb atomic cooling in an integrating sphere was performed. The experimental results show that the atoms in the integrating sphere are cooled down evidently. And the relation between the detuning of the cooling laser and the absorption signal of cold atoms was measured.

Keywords : diffused optical field , integrating sphere , all-optical cooling

PACC : 3280 , 3280P , 4250 , 4250V

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10604057) and the Post Doctor Foundation of China (Grant No. 2005038453) and the National High Technology Research and Development Program (" 863 " Program) of China (Grant No. 2006AA12Z311).

[†] E-mail : liang.liu@siom.ac.cn