

微波腔镀银实现漫反射冷却的实验研究

孟艳玲¹ 郑本昌¹ 刘鹏¹ 万金银¹ 肖玲¹ 王秀梅¹ 高源慈² 成华东¹ 刘亮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 电子科技大学电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘要 观测到了使用镀银微波腔产生漫反射光场冷却原子的信号, 完成了微波腔与积分球一体化的最后一步。这种冷却方式结构更加简单, 且没有涂料, 不会对微波场场型造成影响, 有利于钟信号的信噪比及对对比度提高。同时测试了微波腔冷却在不同冷却光注入方案、漫反射系数及腔表面开孔尺寸下的冷却性能。结果表明端面注入冷却光是目前获得更多冷原子数目的方法, 提高腔表面的漫反射系数, 可以显著提高冷原子数目。为了充分利用积分球内的冷原子, 采用了10 mm的通光孔径, 测试了不同通光孔径对冷原子信号的影响, 证实了目前较大的通光孔径不会影响到冷原子数。

关键词 原子与分子物理学; 激光冷却; 一体化; 积分球; 微波腔

中图分类号 O431.2; TN629.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0902001

Experiment Studies on the Diffuse Light Cooling by Using Silver Plated Microwave Cavity

Meng Yanling¹ Zheng Benchang¹ Liu Peng¹ Wan Jinyin¹ Xiao Ling¹ Wang Xiumei¹
Gao Yuanci² Cheng Huadong¹ Liu Liang¹

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

² School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu, Sichuan 611731, China

Abstract The cold atom absorption signal produced by the silver plated microwave cavity is observed, which finishes the last step of the integration of the microwave cavity and the integrating sphere. This setup which doesn't use reflective material and won't influence the magnetic field distribution is not only simpler, but also benefit for the signal to noise ratio of the clock signal. Meanwhile, the cooling performances of the cooling microwave cavity are studied with different cooling light injection schemes, diffuse reflective coefficients and apertures. The results show that the scheme of injecting the cooling light from the end surface can get more cold atoms, and the improvement of the reflective coefficient increases the cold atom numbers. Two 10 mm apertures are used in order to take full advantage of cold atoms in the integrating sphere, and the absorption signals for different apertures show that the 10 mm apertures used here won't affect the cold atom number.

Key words atomic and molecular physics; laser cooling; integration; integrating sphere, microwave cavity

OCIS codes 020.3320; 350.4010; 020.1335

收稿日期: 2014-04-23; 收到修改稿日期: 2014-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(11034008)、国家 863 计划(2012AA120702)

作者简介: 孟艳玲(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事激光冷却与小型化冷原子钟等方面的研究。

E-mail: yanling_meng@siom.ac.cn

导师简介: 刘亮(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事冷原子物理、原子钟和原子干涉仪等方面的研究。

E-mail: liang.liu@siom.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

积分球冷却具有体积小、光束无需精确准直、装置简单、不需要使用磁场等优点。其基本原理为,入射激光在密闭空间内多次漫反射,形成各向同性光场,一定速度的原子会与特定的负失谐激光相互作用以补偿原子的多普勒频移,而这个角度是自动匹配的,因此这种冷却方法可以在很大速度范围内捕获原子。

积分球冷却最初是由 Ketterle 等^[1]在 1992 年使用 Spectralon 材料形成的漫反射光场实现的,他们实现了对 Na 原子束的减速;法国的 Esnault 等^[2]使用的是表面进行抛光的无氧铜球腔形成的漫反射光场对 Cs 原子进行冷却。本实验室的 Cheng 等^[3]在 2009 年使用陶瓷材料制成的积分球实现了 Rb 原子的冷却,由于陶瓷材料不易固定,较难与系统集成,后来 Wang 等^[4]采用在玻璃球表面涂覆漫反射涂料 Avian-B 的方法形成漫反射光场,实现原子的冷却。涂覆漫反射涂料制成的积分球结构紧凑,容易实现。

漫反射光冷却原子的一个主要应用领域是原子频标,但上述漫反射涂料对微波有吸收作用,会影响到微波场的场型,因此涂覆漫反射涂料的积分球不适合应用于冷原子钟系统。为了提高积分球冷原子钟的性能,本课题组研制了积分球与微波腔一体化的装置^[5]。通过对微波腔表面处理后镀银,提高微波腔表面的漫反射系数,使其兼具积分球的功能,进而实现积分球与微波腔的一体化。

本文在一体化研制的基础上加工了冷却实验用的微波腔,实现了使用镀银微波腔产生的漫反射光场冷却铷原子,并测试了不同漫反射系数,冷却光注

入方式以及通光孔径大小对冷却效果的影响。结果表明目前的镀银工艺能使微波腔实现积分球的冷却功能,且冷却效果与涂覆漫反射涂料的积分球相同;微波腔表面的较大的通光孔径不会影响冷原子数,且能充分利用腔内的冷原子。

2 微波腔漫反射冷却原子的实验装置

为了测试微波腔的冷却效果,制作了一个冷却实验所用的微波腔,在这里称之为冷却腔,这个腔的尺寸以及表面处理工艺均与文献^[5]所设计的微波腔完全相同。微波腔的作用是贮存微波辐射能量,提供辐射场与原子相互作用的条件,即沿轴向的磁场,激发原子基态能级的磁偶极跃迁,一般选用 TE₀₁₁ 圆柱腔。文献^[5]选用直径与高度比为 1:1 的圆柱腔,经过求解 TE₀₁₁ 模的场方程,理论计算及模拟仿真后得到微波腔的直径和高度为 57.6 mm,并根据计算结果加工微波腔进行实测,结果表明共振频率及场型满足微波腔的要求。

按照上述尺寸加工好的冷却腔如图 1 所示。图 2 为实验原理图,玻璃球内充满铷原子,通过直径为 10 mm 的玻璃管道与真空相连,球内真空维持在 10^{-7} Pa。冷却腔套在玻璃球的外面,其直径和高均为 57.6 mm,在上下端面中心分别开一个直径为 10 mm 的通光孔,用于探测冷原子吸收信号。冷却腔与所设计微波腔的唯一区别在于其侧面开了一个直径为 11 mm 的孔以使玻璃泡与真空的连接管道通过,这个孔会对光场造成一定的泄漏,孔的面积占冷却腔总表面积的 0.6%,不会影响对腔冷却性能的测试^[6]。

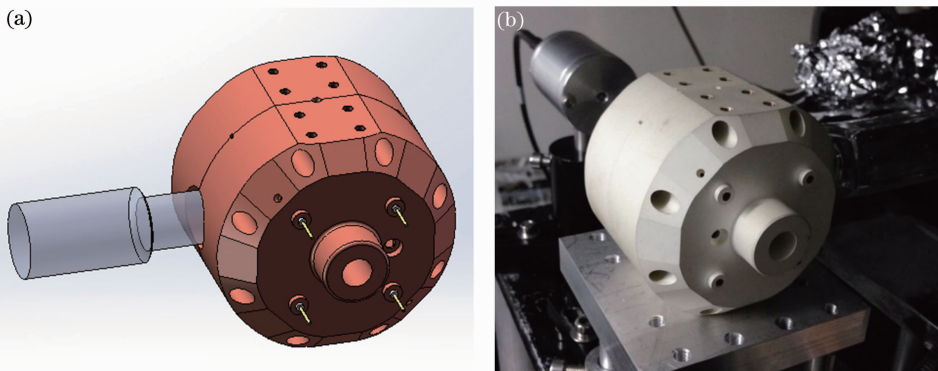


图 1 (a)冷却腔 SolidWorks 模装图; (b)冷却腔实物图

Fig. 1 (a) SolidWorks model of the cooling cavity; (b) photograph of the cooling cavity

实验中采用 Toptica TA100 激光器作为冷却光源,锁定在 ^{87}Rb D2 线的 $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F'=2\rangle$ 与 $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F'=3\rangle$ 的交叉

峰上面,激光器输出的激光经过偏振分光棱镜分成两束,一束经过声光移频产生 $|5^2S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F'=3\rangle$ 红失谐的冷却光,另外一束产生近

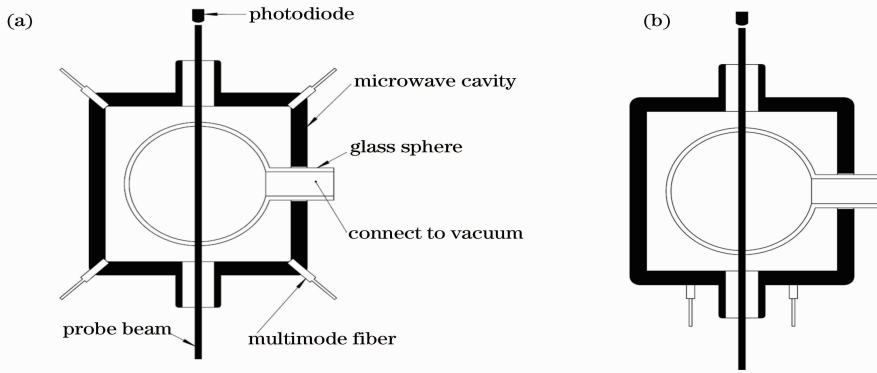


图2 冷却腔注入方案。(a)十字入射；(b)端面入射

Fig. 2 Injection schemes for cooling cavity. (a) Cross injection; (b) end surface injection

共振的探测光。冷却光总光强为 200 mW。再抽运光源为 DL100 激光器锁定在 $|5^2S_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |5^2P_{3/2}, F'=2\rangle$ 跃迁峰上产生, 总光强为 13 mW, 再抽运光与冷却光合束后一起耦合入多模光纤, 同冷却光一起注入到微波腔内。探测光强约为 $1 \mu\text{W}$, 直径为 2 mm。冷却时间为 1 s, 冷却光关闭后打开探测光进行探测, 具体时序可参见文献[3]。

3 冷却光注入方式对冷却效果的影响

微波腔采用的是真空镀银的方式, 经测试其漫反射率为 74.4%。为了测试在这个漫反射系数下的冷却效果, 采用了两种冷却光注入方案。第一种方案, 冷却光从主截面的 4 个角入射至腔内, 4 根光纤呈十字状, 两两相互垂直, 称这种冷却光注入方式为十字入射, 如图 2(a) 所示。第二种方案, 冷却光通过下端面的 4 个预留孔注入冷却腔内, 这 4 个孔均匀分布在端面上直径为 44 mm 的圆上, 探测冷却腔轴向的冷原子吸收情况, 如图 2(b) 所示。

图 3 为探测到的冷原子吸收信号。从实验结果可以看出, 端面入射时的冷原子数目明显多于十字入射, 这与使用漫反射涂料方式获得冷原子^[7-8]的情况一致。这是由于直接入射到积分球内的光在未被反射前光强较其他位置更强^[9], 会对冷原子有一定的加热作用, 起冷却作用的主要是经过腔壁漫反射后的冷却光, 因此沿着入射光束方向的冷原子数目较少。端面入射的 4 束光分布在以轴线为圆心的圆上, 不经过轴线, 因此轴线上的原子不会被加热, 获得的冷原子数比入射光经过轴线的十字入射方式更多。

本文使用金属腔表面镀银工艺获得的冷原子吸收信号, 证实了使用微波腔冷却原子的可行性。但在目前 74.4% 的漫反射系数下, 即使是端面注入冷

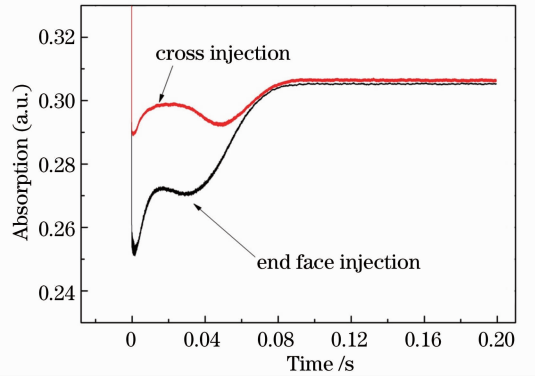


图3 冷却光注入方式对冷原子吸收信号的影响

Fig. 3 Influences of the injection scheme to the cold atom absorption signal

却光, 冷原子吸收信号仍然较弱, 从图 3 中可以看出冷原子吸收信号的幅度占总信号幅度的比例小于 20%, 冷原子吸收信号正比于冷原子数, 这表明腔内的冷原子数很少, 不利于最终钟信号的信噪比的提高, 因此还需要增加冷原子数。

4 漫反射系数对冷原子数的影响

第 3 节的实验结果采用的是漫反射率为 74.4% 的真空镀银工艺冷却腔, 可以实现冷却, 但冷却效率低, 冷原子数少。为了增加冷原子数, 采用电镀工艺, 测得的漫反射率为 96.6%, 实验冷却光采用端面注入方式, 测得的冷原子吸收信号如图 4 所示。

可以看出漫反射率从 74.4% 增到 96.6%, 会使冷原子吸收信号大幅提高, 所占总信号幅度的比例从小于 20% 增到大于 50%。原子吸收光子遵循指数吸收定律, 吸收后的光强可表示为

$$I = I_0 \exp(-\sigma n z_d) = I_0 \exp(-D), \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光强, σ 为原子的光吸收截面, 具体计算方法可参考文献[10], 在探测光失谐、光强、偏振态确定的情况下为一定值, n 为原子密度, z_d 为探测

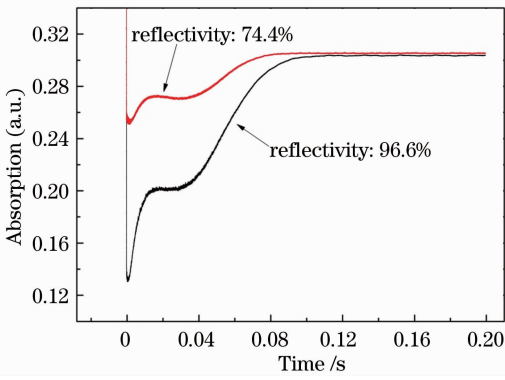


图 4 漫反射系数对冷原子吸收信号的影响

Fig. 4 Influences of the reflective coefficient to the cold atom absorption signal

光传播方向原子的尺寸, D 为光学厚度(OD), 通常使用公式 $D = \ln(I_0/I)$ 计算得到。(1)式唯一未知数为 n , 因此可以从冷原子吸收信号计算得到冷原子密度。通过计算可得冷原子密度从 $2.1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $8.9 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$, 冷原子数目增加了 3 倍, 满足实验所需。可以看出漫反射系数是影响冷原子数的关键因素。

5 通光孔径

为了充分利用腔内的冷原子, 在微波腔的两个端面分别开了 10 mm 的通光孔, 相对于以往 2~3 mm 的积分球开孔, 这次的通光孔径较大。较大的开孔会引起冷却光的泄漏, 可能会影响冷原子数, 为此专门测试了不同通光孔径下的冷却效果。将通光孔径从上述实验中的 10 mm 分别缩小至 6 mm 及 3 mm, 测试冷原子吸收信号, 实验结果如图 5 所示。

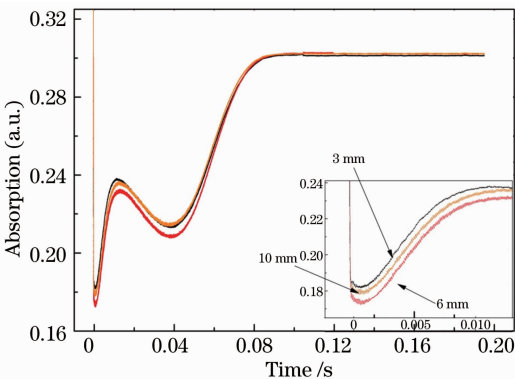


图 5 通光孔径的尺寸对冷原子吸收信号的影响

Fig. 5 Influences of the aperture size to the cold atom absorption signal

实验结果表明, 三种不同大小的通光孔径产生的冷原子数是一样的。实验环境的温度变化、光强抖动等因素会使冷原子吸收信号在一定范围内浮

动, 图 5 中三种情况吸收信号的细微差别在实验误差范围内。因此, 对于目前的微波腔冷却方案, 10 mm 的开孔大小并不会影响冷原子数目。这是因为虽然 10 mm 的通光孔径较大, 但相对于微波腔的表面积, 两个开孔所占的比例为 1%, 仍然是比较小的。较大的通光孔径在做积分球冷原子钟时可以增加钟信号探测光的光斑直径, 利用更多的冷原子。

6 结 论

观测到了使用镀银微波腔产生漫反射光场冷却原子的信号, 完成了微波腔与积分球的一体化的最后一步。这种冷却方式结构更加简单, 且没有涂料, 不会对微波场场型造成影响。测试了不同冷却光注入方案对冷原子数目的影响, 结果同采用涂料的积分球一样, 端面注入冷却光是目前获得更多冷原子数目的方法。通过改变镀银工艺, 提高腔表面的漫反射系数, 提高了冷原子数目。为了充分利用积分球内的冷原子, 采用了 10 mm 的通光孔径, 测试了不同通光孔径大小对冷原子信号的影响, 证实了目前的通光孔径并不会影响到冷原子数。

参 考 文 献

- 1 W Ketterle, A Martin, M A Joffe, *et al.*. Slowing and cooling atoms in isotropic laser light [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, 69(17): 2483–2486.
- 2 F X Esnault, N Rossetto, D Holleville, *et al.*. HORACE: a compact cold atom clock for Galileo [J]. *Adv Space Res*, 2011, 47: 854–858.
- 3 H Cheng, W Zhang, H Ma, *et al.*. Laser cooling of rubidium atoms from background vapor in diffuse light [J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(2): 023407.
- 4 X Wang, H Cheng, B Zheng, *et al.*. Integrating sphere cold atom clock with cylindrical microwave cavity [C]. *Frequency Control and the European Frequency and Time Forum (FCS)*, 2011 Joint Conference of the IEEE International, 2011. 1–3.
- 5 Meng Yanling, Gao Yuanci, Zheng Benchang, *et al.*. Design for the integration of integrating sphere and microwave cavity [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0918001.
- 6 Ma Hongyu, Cheng Huadong, Zhang Wenzhuo, *et al.*. Laser cooling of rubidium atoms in an integrating sphere [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3): 1569–1573.
- 7 Wang Xucheng, Cheng Huadong, Xiao Ling, *et al.*. Measurement of spatial distribution of cold atoms in an integrating sphere [J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(2): 023701.
- 8 Meng Yanling, Cheng Huadong, Zheng Benchang, *et al.*. Controlling the shape of a cold atom cloud in a cylindrical cavity [J]. *Chin Phys Lett*, 2013, 30(6): 063701.
- 9 E Guillot, P E Pottie, C Valentin, *et al.*. HORACE: atomic clock with cooled atoms in a cell [C]. *Frequency and Time Forum*, 1999 and the IEEE International Frequency Control Symposium, 1999. , Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European, 1999, 1: 81–84.
- 10 A M Steane, M Chowdhury, C J Foot. Radiation force in the magneto-optical trap [J]. *J Opt Soc Am B*, 1992, 9(12): 2142–2158.