

文章编号: 0253-2239(2010)03-0898-05

利用塞曼减速法实现锶同位素的磁光阱俘获

田 晓^{1,2} 常 宏¹ 王心亮¹ 张首刚¹

(¹ 中国科学院国家授时中心, 陕西 西安 710600; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 利用塞曼减速法在磁光阱(MOT)中实现锶原子一级冷却,使用塞曼减速器对进入阱区前的热原子束进行减速,实验时该减速器线圈通入 10.2 A 电流,阱区反亥姆霍兹线圈通入 10 A 电流时,中心区域线性磁场梯度为 4 mT/cm,用于冷却和俘获的激光波长为 461 nm,其对应于锶原子($5s^2$)¹S₀→($5s5p$)¹P₁ 的能级跃迁。通过实验获得了锶 4 种同位素的冷原子团,探测到相应的冷原子荧光光谱,并且测定其中⁸⁸Sr,⁸⁷Sr 和⁸⁶Sr 的冷原子数目分别为 1.759×10^6 , 1.759×10^5 和 2.638×10^5 。

关键词 量子光学;冷原子;塞曼减速;锶原子

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103003.0898

Trapping Four Isotopes of Strontium in a MOT by Using Zeeman Slowing

Tian Xiao^{1,2} Chang Hong¹ Wang Xinliang¹ Zhang Shougang¹

(¹ National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710600, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Optical clock is reported that the capture of cold strontium (Sr) atoms in a magneto-optical trap (MOT) by using Zeeman slowing. The MOT is loaded from a thermal atomic beam which is decelerated by a Zeeman slower having 10.2 A electric current. The anti-Helmholtz coils of MOT have 10 A current and then can induce a linear magnetic field. Its gradient is 4 mT/cm in the central zone. The 461 nm laser is used for Zeeman slowing and trapping which corresponds to the transition of Sr atomic level ($5s^2$)¹S₀→($5s5p$)¹P₁. According to the experiment, four isotopes of Sr in MOT are obtained and the fluorescent spectrums of the atoms are detected. Using the fluorescence, the number of three isotopes ⁸⁸Sr, ⁸⁷Sr, ⁸⁶Sr is measured, which is 1.759×10^6 , 1.759×10^5 and 2.638×10^5 separately.

Key words quantum optics; cold atoms; Zeeman slowing; Sr atoms

1 引 言

光钟是建立在原子光学波段跃迁的时间/频率基准,它是一种基于激光冷却技术和飞秒光梳技术的新型原子钟。采用光频标,频率将从 10 GHz 增加到 100 THz,能够极大提高原子谐振系统的品质因数 Q,同时光子能量远大于微波量子能量,探测灵敏度可被有效提高,从而提高信噪比,提高系统的稳定度。目前光频标基于探测样品的不同一般分为离子光频标(如:Hg⁺, Yb⁺等)和原子光频标(多以碱土金属、类碱土金属为主,如 Sr, Ca, Yb 等)。理论

上预期光钟频率不确定度可达 $10^{-17} \sim 10^{-18}$,由于其潜在的性能优势,光钟有望成为国际新一代时间频率的基准^[1~8]。光晶格钟最早由日本东京大学的 Katori 小组提出^[9]。目前为止,美国实验天体物理学联合学院的⁸⁷Sr 光晶格钟已完成与美国国家标准与技术研究所 NIST 的 Ca 冷原子光钟比对,并得到⁸⁷Sr 光晶格钟的频率不确定度为 1×10^{-16} ^[10],优于现今最好的频率标准——Cs 喷泉钟。与囚禁离子的光钟相比,基于囚禁中性原子的光晶格钟具有更多的原子数目,有利于提高原子谱线的信噪比。

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-05-19

基金项目: 国家 973 计划(2005CB72440)和中国科学院重要方向项目(KJCX2-YW-T12)资助课题。

作者简介: 田 晓(1984—),女,硕士研究生,主要从事光频标方面的研究。E-mail: tianxiao_1005@sina.com.cn

导师简介: 常 宏(1977—),男,博士,研究员,主要从事量子光学及光频标等方面的研究。

E-mail: changhong@ntsc.ac.cn(通信联系人)

由于使用“魔术”波长来构成光晶格,能使得原子钟跃迁的基态和激发态的 Stark 频移相同,最终使原子钟跃迁频率保持精确不变。光晶格钟由稳频激光器、光学频率标准和频率分配器三部分组成,其中光学频率标准由囚禁的中性原子产生,冷原子被光晶格囚禁,不受原子间相互碰撞和外界环境干扰且其移动范围小于光波长^[1,3]。光晶格钟的冷原子样品由于多普勒效应以及原子能级跃迁谱线的自身特点(如散射率低)等因素限制,需要经过多级冷却并使温度足够低后才能被装载进光晶格,从而进行钟跃迁探测并获得光频信号^[11,12]。对于以中性锶原子为研究对象的光晶格钟,一级冷却利用偶极跃迁 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$ (对应波长 461 nm),可以获得温度为 mK 量级的原子,二级冷却用 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^3P_1$ 能级跃迁(对应波长 689 nm),可获得 μ K 量级的冷原子。

本文介绍了利用 Zeeman 减速器和磁光阱(MOT)装置,实现了锶原子四种同位素的一级冷却原子团,并且观测到相应的冷原子荧光光谱,利用荧光收集法在实验上测定了⁸⁸Sr,⁸⁷Sr 和⁸⁶Sr 的原子数目。

2 实验装置

2.1 锶热原子束产生装置

锶是第5周期IIA族的碱土金属元素,熔点是

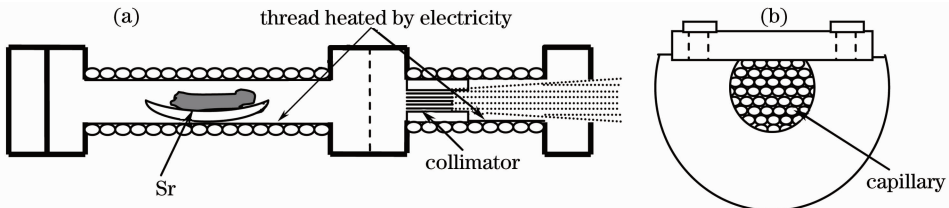


图 2 (a)热原子束产生装置示意图;(b)实验用准直器横截面图

Fig. 2 (a) Equipment of generation of a thermal atomic beam; (b) cross section of collimator tube

2.2 真空系统

实验中真空装置分为两部分,一部分用于激光器的稳频,另一部分用于锶的一级冷却。用于稳频的真空系统结构如图 3(a)所示,其主体为一段长 80 cm 的无磁不锈钢圆柱形的真空腔,腔体尾部为加热炉,腔体上有三组结构相同且直径均为 34.5 mm 的石英玻璃窗口,每组有两个平行窗口(用以通光)和一个垂直窗口(用以探测荧光信号),腔体前端用直径为 70 mm 的盲法兰密封。另外一套用于冷却的真空系统装置如图 3(b)所示,装置后端为加热炉,中部是

769 °C,沸点是 1384 °C。锶最外层有 2 个电子,由此导致原子产生单重态和三重态的能级结构,如图 1 所示。锶有⁸⁸Sr,⁸⁷Sr(费米子),⁸⁶Sr 和⁸⁴Sr 4 种同位素,其自然界丰度分别为 82.58%,7.0%,9.86%和 0.56%^[13]。

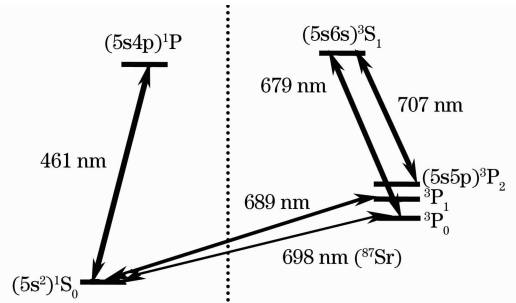


图 1 与锶原子冷却有关的能级结构图

Fig. 1 Energy-level structure of strontium for laser cooling

常温下锶为固态,根据实验需要将其放置于由加热丝加热的圆柱形无磁不锈钢腔中,结构如图 2(a)所示,当炉内的固体锶被加热至一定温度后锶原子由准直器准直后喷出,在腔内形成热原子束。该准直器的横截面直径约 6 mm,由长 8.08 mm、直径 0.2 mm 的 1000 多根毛细管堆积而成,剖面示意图如图 2(b)所示,热原子经过准直器后形成的原子束发散角小于 40 mrad。为防止加热后的锶原子附着于准直器壁,堵塞毛细管,在实际的实验操作中准直器的温度高于炉温 60 °C。

有效长度为 27 cm 的 Zeeman 减速器,前端为一个八边形的不锈钢真空腔,共有 10 个窗口,除与离子泵连接的和与 Zeeman 减速器连接的 2 个窗口外,其它 8 个均为镀膜的石英玻璃窗口,用作通光或探测通道,其中两个窗口直径为 100 mm(平行于纸面),另外 6 个窗口直径均为 35 mm。为了避免原子黏附在通 Zeeman 减速光的玻璃窗面上,影响减速光的透射率,此窗面周围一直被加热,温度为 200 °C。

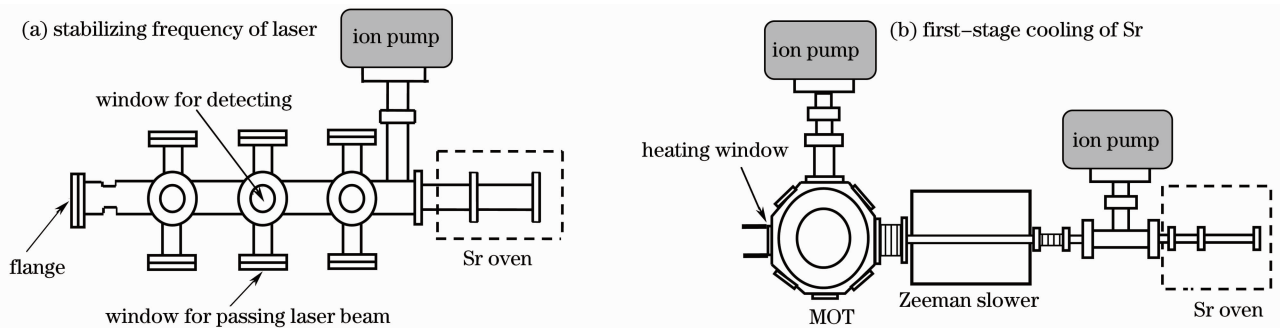


图 3 装置示意图

Fig. 3 Experimental setup

2.3 实验装置

整体实验装置如下图 4 所示,其中 $\lambda/2$ 是半波片, $\lambda/4$ 是四分之一波片, PBS 是偏振分束棱镜, AOM 是声光调制器, 单次通过一级衍射效率为 80%, 双次为 58%, PD 是光电探测器, 铯原子由 500 °C 的炉子喷出后最可几速率是 470 m/s, 经过有效距离为 27 cm 的 Zeeman 线圈, 同时与相对原子共振频率失谐为 -500 MHz 的左旋圆偏振 (σ^-) 激光相互作用后, 速度被减至每秒几十米^[14]。该减速线圈两端各呈塔状, 工作时通以 10.2 A 的电流, 产生不均匀的磁场, 线圈

末端磁场梯度为 -9.3 mT/cm。应用空间变化的磁场, 使磁场中原子能级的 Zeeman 频移补偿 Doppler 频移, 实现在原子的减速过程中激光与原子保持共振, 从而达到最大的减速效果。

经减速后的原子在阱区继续进行冷却和俘获, 磁光阱区的三个坐标方向分别由六束激光两两对射且偏振分别为 σ^+ 和 σ^- , 其中在阱区直径为 100 mm 的玻璃窗口外加一对间距 $L = 152$ mm, 半径 $R = 117$ mm 的 Anti-Helmholtz 线圈, 实验中线圈通以 10 A 电流, 中心区域磁场梯度为 4 mT/cm。

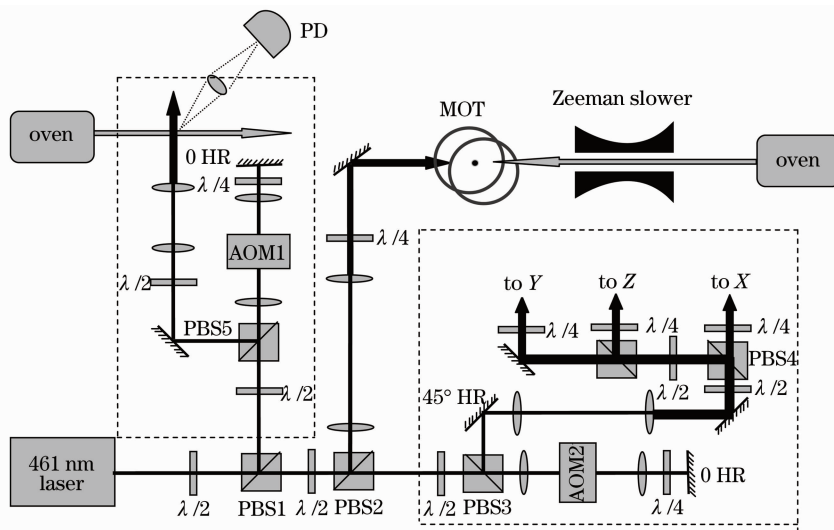


图 4 磁光阱实验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the MOT experimental setup

实验所用光源为德国 Toptica 公司生产的 TA/DL-SHG 110 型倍频半导体激光器, 其标准输出为波长 461 nm 的线偏振光, 激光线宽小于 2 MHz, 扫频范围约 20 GHz, 标准输出功率为 220 mW。如图 4 所示, 461 nm 激光器输出的光经半波片和 PBS1 后被分为两束, 一束功率为 20 mW, 双次通过中心频率为 250 MHz 的声光调制器 AOM1 且均取正一级光, 经扩束(光斑直径约为 20 mm)后垂直打入由

630 °C 铯炉喷出的热原子束中, 用光电探测器 PD 探测其荧光谱进行激光稳频, 热原子荧光信号如图 5 曲线 a 所示; 较高峰值所对应的是 ^{88}Sr 的跃迁谱线, 较低峰值所对应的是 ^{86}Sr 的跃迁谱线。曲线 b 为自制 F-P 腔激光透射峰, F-P 腔纵模间隔为 750 MHz。因为横向 Doppler 效应导致谱线加宽, 直接测量铯原子 ($5s^2$) $^1S_0 \rightarrow (5s5p)$ 1P_1 能级跃迁的荧光光谱线宽为 110 MHz (自然线宽为 32 MHz)^[15], ^{88}Sr 和 ^{86}Sr 跃迁

谱线间同位素位移为 124.8 MHz, 所以热原子束荧光谱中 ^{87}Sr 的跃迁谱线被 ^{88}Sr 和 ^{86}Sr 跃迁谱线所湮没。

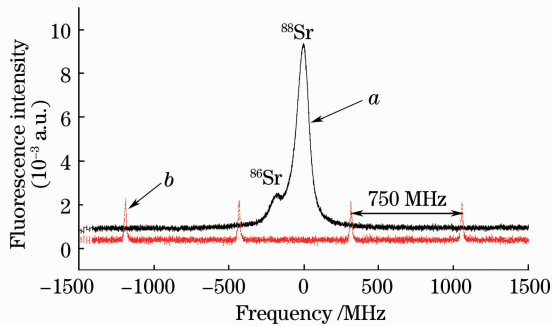


图 5 实验上利用 F-P 腔进行 Sr 热原子的荧光谱分析

Fig. 5 Analysis about the fluorescence spectrums of thermal Sr atoms with F-P cavity experimentally

另外一束再经过半波片和 PBS2 后被分成两部分, 分别用于 Zeeman 减速 (60 mW) 和 MOT 俘获 (120 mW)。由于激光是经过 AOM1 (+500 MHz 频偏) 锁定于原子跃迁线上, 即激光相对于原子共振跃迁线有 -500 MHz 的失谐, 所以此时直接用于减速的激光也具有同样的失谐量。令此减速光通过 $\lambda/4$ (变为 σ^- 光) 与经过 Zeeman 减速器的原子束作用, 使原子束被减速。而另外一束功率为 120 mW 的激光在双次穿过中心频率为 230 MHz 的 AOM2 且均取正一级光后, 其相对于原子共振跃迁有 -40 MHz 的失谐, 令其扩束 (光斑直径约为 15 mm) 后分成光功率均为 11 mW 且两两互成直角的三束光作为 MOT 区的俘获光, 这三束光在经过腔体后再各由零度高反镜原路反射。此三束光在经过腔体前后均先要经过两个 $\lambda/4$, 前一个 $\lambda/4$ 用来调整俘获光的偏振态以获得右 (左) 旋圆偏振光。原子俘获时典型背景真空度约为 4×10^{-6} Pa。

3 实验结果及分析

实验用高分辨率 CCD 数字摄像机对磁光阱中俘获的冷原子荧光图像进行观测, 同时利用探测器对冷原子荧光光谱进行探测。图 6 为实验得到的锶 4 种同位素冷原子团的荧光图像, 因为丰度不同所以 4 种同位素冷原子团亮度不同, 其中 ^{88}Sr 在同位素中丰度最大因此也是最亮的。在本实验中由于利用热原子束对激光器进行频率锁定, 所以可以直接将激光锁定在 ^{88}Sr , ^{86}Sr 的跃迁线上得到相应的冷原子团, 而 ^{87}Sr , ^{84}Sr 的热原子荧光信号探测不到所以无法对其进行锁定, 但是根据同位素位移^[16], 可以先将激光锁定于 ^{88}Sr 或 ^{86}Sr 跃迁线上, 调节 AOM1

使激光频率移至 ^{87}Sr , ^{84}Sr 对应的跃迁线上, 同时调节 AOM2 使俘获光失谐量保持 -40 MHz 不变, 这种情况下可以获得 ^{87}Sr , ^{84}Sr 的冷原子团。

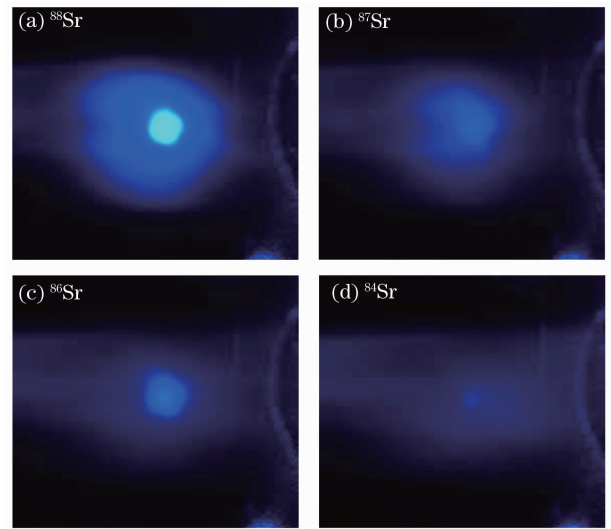


图 6 中心呈明亮的区域为锶各同位素冷原子荧光

Fig. 6 Fluorescence of cold atoms of strontium isotopes in the central area

图 7 为激光器在慢速扫描 (扫描频率 1 Hz) 时用自制的光电探测器探测到的冷原子荧光谱, 由于激光器既作为减速光又作为俘获光, 所以在扫描状态下会使俘获到的锶冷原子团总是处于俘获、释放、俘获、释放这样反复的过程中, 因而探测到的冷原子荧光谱线具有较大的不对称度。另外对比图 5 中热原子束荧光光谱, 因为冷原子中原子温度降低, 多普勒效应导致的谱线加宽减小, 所以这时可明显地看到 ^{87}Sr 的荧光谱线, 而对于 ^{84}Sr 因为同位素丰度很低 (0.56%), 所以荧光谱线不是很明显。

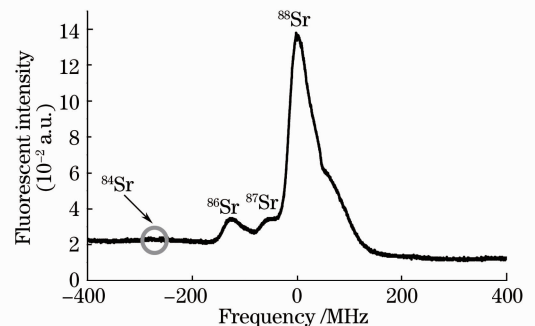


图 7 测得冷原子荧光谱线

Fig. 7 fluorescent spectrum of cold atoms

采用荧光收集法来测量阱中俘获到的锶同位素冷原子数目^[17,18]。利用自制的光电探测器探测 ^{88}Sr , ^{87}Sr 和 ^{86}Sr 的冷原子荧光强度, 计算出的冷原子数目依次为 1.759×10^6 , 1.759×10^5 和 $2.638 \times$

10^5 , 由于 ^{84}Sr 自然丰度非常小, 实验上难以收集足够的荧光来计算原子数目。

4 结 论

通过利用 Zeeman 减速器和磁光阱装置, 在实验上获得了铯 4 种同位素的一级冷却原子团, 并探测了其冷原子荧光光谱, 利用荧光收集法测定 ^{88}Sr , ^{87}Sr 和 ^{86}Sr 的原子数目。为了得到更多的原子数目, 尽可能满足光晶格装载冷原子数目的要求, 在今后的实验中进一步优化实验条件(如炉温、光强、磁场等), 另外通过加入再抽运光源 707 nm 和 679 nm 激光亦可有效地增加俘获的冷原子数目^[19], 最终在一级冷却效果良好的基础上进行二级冷却(窄线宽冷却), 获得数目更多且温度更低的铯冷原子。

参 考 文 献

- Ma Longsheng. Optical clock [J]. *Physics*, 2008, **37**(10): 716~719
马龙生. 光钟[J]. 物理, 2008, **37**(10): 716~719
- Xavier Baillard, Mathilde Fouch'e, Rodolphe Le Targat *et al.*. Accuracy evaluation of an optical lattice clock with bosonic atoms [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1812~1817
- Fei Ligang, Zhu Jun, Zhang Shulian. Optical frequency standard and realization of optical clock [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, **4**(6): 55~59
费立刚, 朱 均, 张书练. 光学频率标准与光钟的实现[J]. 光学与光电技术, 2006, **4**(6): 55~59
- Wang Yuzhu. Laser cooling and its applications in science and technology [J]. *Progress in Physics*, 2005, **25**(4): 347~355
王育竹. 激光冷却以及在科学技术中的应用[J]. 物理学进展, 2005, **25**(4): 347~355
- Huang kaikai, Zhang Jianwei, Chen Jingbiao *et al.*. Preliminary work on calcium beam optical ramsey experiment [J]. *J. Time and Frequency*, 2006, **29**(1): 58~64
黄凯凯, 张建伟, 陈景标 等. 钙原子束光学 Ramsey 实验的初步工作[J]. 时间频率学报, 2006, **29**(1): 58~64
- Gao Kelin. The progress and space applications prospects of ion frequency standards [J]. *Physics*, 2008, **37**(10): 720~728
高克林. 离子光频标的研究进展和空间应用展望[J]. 物理, 2008, **37**(10): 720~728
- Pengfei Zhang, Haichao Zhang, Xinping Xu *et al.*. Cooling induced by parametric resonance in a magnetic quadrupole trap [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 87~89
- Pengbin He, Qing Sun, Peng Li *et al.*. Magnetic quantum phase transition of cold atoms in an optical lattice [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **76**(4): 043618-1
- Wang Yiqiu. Laser Cooling and Trapping of Atoms [M]. Beijing: Peking University Press, 2007. 374~383
王义道. 原子的激光冷却与陷俘[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007. 374~383
- A. D. Ludlow, T. Zelevinsky, G. K. Campbell *et al.*. Sr lattice clock at 1×10^{-16} fractional uncertainty by remote optical evaluation with a Ca clock [J]. *Science*, 2008, **319**(5871): 1805~1808
- Martin M. Boyd. High Precision Spectroscopy of Strontium in an Optical Lattice: Toward a New Standard for Frequency and Time [D]. B. S., University of Washington, 2002. 23~35
- Xinye Xu, Thomas H. Loftus, Josh W. Dunn *et al.*. Single-stage sub-doppler cooling of alkaline earth atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(19): 193002-1~193002-4
- F. Sorrentino, G. Ferrari, N. Poli *et al.*. Laser cooling and trapping of atomic strontium for ultra-cold atoms physics, high-precision spectroscopy and quantum sensors [J]. *Mod. Phys. Lett. B*, 2006, **20**(21): 1287~1320
- Wang Xinliang. The Zeeman slower used for ^{87}Sr optical lattice clock [D]. Xi'an: Northeast University, 2008. 23~32
王心亮. 用于 ^{87}Sr 冷原子光晶格钟原子冷却装置的塞曼减速器研究[D]. 西安: 西北大学, 2008. 23~32
- Wu Hui, Zhao Yanan, Chang Hong *et al.*. Electronic dipole radiation of Sr atoms induced by polarized light field [J]. *Acta Quantum Optica Sinica*, 2009, **15**(3): 248~252
吴 慧, 赵亚楠, 常 宏 等. 偏振光激发的 Sr 原子电偶极辐射 [J]. 量子光学学报, 2009, **15**(3): 248~252
- Yang Fu Jia. Atomic Physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999. 390~395
杨福家. 原子物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999. 390~395
- Fu Junxian, Li Yimin, Chen Xuzong *et al.*. A new method for measuring density and temperature of cold atoms in magneto-optical trap [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 414~416
付军贤, 李义民, 陈徐宗 等. 一种测量磁光阱中冷原子密度和温度的新方法[J]. 光学学报, 2001, **21**(4): 414~416
- Wang Junmin. Setting up the device of cesium vapor-cell magnetic-optical trap and experimental research on laser cooling and trapping of cesium atoms. [D]. Taiyuan: Institute of Opto-Electronics of Shanxi University, 1999. 95~98
王军民. 铯原子汽室磁光阱装置的建立及激光冷却与俘获铯原子的实验研究[D]. 太原: 山西大学光电研究所, 1999. 95~98
- He Lingxiang, Wang Yuzhu. A simple demonstration of optical pumping effect[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 25~28
贺凌翔, 王育竹. 光抽运效应的实验演示[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 25~28