

文章编号: 0253-2239(2010)04-0935-05

铯原子光晶格钟塞曼减速器的设计与实现

张远洋¹ 方占军² 张志刚¹

(¹ 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871
² 中国计量科学研究院电学与量子科学研究所, 北京 100013)

摘要 介绍了一种以电脑程序模拟计算线圈分布的方法,以精确匹配作为铯原子光晶格钟中作为冷却装置的塞曼减速器的理论塞曼磁场。说明了优化设计程序的算法结构及基本流程,并对实验中的实际塞曼磁场和铯原子光晶格钟磁光阱信号进行测量。这种设计方法完全基于电脑程序的模拟运算,可以根据实际情况改变物理参数和磁场模型,并迅速有效地计算出与之匹配的线圈分布。计算磁场相对于理论磁场的均方根(RMS)达到 2.17×10^{-4} T,实现了较高的磁场匹配度。

关键词 原子与分子物理;原子冷却;塞曼减速器;铯原子光晶格钟

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.0935

Design and Construction of a Zeeman Slower for Sr Optical Clock

Zhang Yuanyang¹ Fang Zhanjun² Zhang Zhigang¹

(¹ School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China
² Division of Electricity and Quantum Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract A Zeeman slower is taken as the cooling device for Sr atomic beam injected into the magneto-optical trap (MOT). An efficient method for design and construction of the Zeeman slower, which calculated the coil distribution exactly matching the analytical magnetic field by computer program, is proposed. The flow chart and the algorithm structure of the optimization design program are illustrated in detail. The experimental magnetic field produced by Zeeman slower coils and the signal from magneto-optical trap (MOT) are measured. Based on the computer program simulation, the model can be flexibly adjusted according to the experiment. The coil distribution can be calculated by matching the change of parameters and analytical magnetic field. The RMS value between calculated field and analytical field is 2.17×10^{-4} T.

Key words atomic and molecular physics; atom cooling; Zeeman slower; Sr atom optical lattice clock

1 引言

基于碱土金属的光钟是现今世界精确度最高的时间频率标准^[1,2],需要用光晶格囚禁超低温原子并把稳频激光锁定在目标钟频率上^[3~6]。而实现这种光钟的前提是在实验中要产生大量的超低温原子。通常由几个阶段的激光冷却过程来达到降低原子温度的目的,第一个阶段就是要把原子囚禁在磁光阱中(MOT)。衡量 MOT 的工作效率,即原子最

高载入率,取决于进入 MOT 前原子束是否被有效地冷却^[7~9]。

仅仅依靠冷却激光自然力对原子减速是不可行的:随着原子速度的减小,多普勒效应产生的频率漂移会使冷却激光相对于原子跃迁的频率失谐量不断增大,冷却效率随着自然力的减小而降低^[10]。国际上通常采用塞曼减速器作为使原子束减速的有效方法^[11]。

收稿日期: 2009-04-13; 收到修改稿日期: 2009-06-01

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAK03A20)资助课题。

作者简介: 张远洋(1983—),男,硕士研究生,主要从事冷原子及飞秒激光等方面的研究。

E-mail: yuanyang.zh@gmail.com

导师简介: 张志刚(1955—),男,博士,教授,主要从事超快光学方面的研究。E-mail: zhgzhang@pku.edu.cn

塞曼减速器的磁场随空间的分布应准确地与原子速度相匹配,使冷却激光相对于原子跃迁频率的失谐量始终为零,以维持较高的冷却效率。在设计塞曼线圈分布时,国际上其他科研小组更多的是以简单的物理计算和人工设计经验为基础,这样的设计结果很难使线圈产生的实际磁场与目标塞曼磁场准确匹配,且灵活性很差,当实验条件或物理参数改变时,很难快速调整线圈分布,不能很好地以理论计算为基础确定物理参数的最优值^[12~15]。本文提出的以优化设计程序为基础的塞曼线圈设计方法,能够在给定的物理参数和目标磁场的前提下,迅速地优化计算出能够准确匹配目标磁场的线圈分布,具有很强的灵活性和可操作性,能够较为全面地模拟塞曼线圈的物理参数与线圈分布之间的关系。

2 实际磁场与理想磁场的匹配

对于⁸⁸Sr原子的¹S₀ - ¹P₁跃迁,本实验中采用σ⁻激光。令激光频率失谐量δ=0,用塞曼减速器轴向(z轴)坐标表示原子束的平均速率v,可得理想塞曼磁场B的表达式:

$$B = - \left(\frac{h}{\mu_B} \Delta\nu + \frac{h}{\mu_B} \frac{v_0}{\lambda} \sqrt{1 - \frac{2az}{v_0^2}} \right), \quad (1)$$

式中 $\Delta\nu = \frac{\delta_0}{2\pi}$,实验中为-440 MHz; $\lambda = 461$ nm为冷却激光波长; v_0 是原子束射入塞曼减速器的初始速率,在铯炉温度为850 K时, $v_0 = 532.3$ m/s。 a 是冷却过程中的瞬时加速度,由作用在原子上的自然力 F 决定:

$$a = \frac{F}{M} = \hbar k \frac{\Gamma}{2} \frac{s}{s+1} \frac{1}{M}, \quad (2)$$

式中 $s = \frac{I/I_0}{\Gamma^2 + \delta^2/4}$ 是激光的饱和系数, Γ 是原子跃迁的自发辐射率, I/I_0 是激光光强与饱和光强之比, M 是⁸⁸Sr原子质量。当 $s \rightarrow \infty$ 时,可以得到加速度的最大值 $a_{\max} = \frac{\hbar k}{M} \frac{\Gamma}{2}$ 。通常令饱和参数 $\eta = \frac{s}{s+1}$,取 $\eta = 0.6$, $a = 5.90 \times 10^5$ m/s²。距塞曼减速器40 mm处为减速有效区,实验中希望得到的铯原子末速度为30 m/s,则塞曼磁场B的理想模型如图1所示。

在实际的塞曼减速器中,无论采用永磁体模块还是通电线圈产生的磁场,总会和理想塞曼磁场模型之间存在偏差,图2给出了实际磁场与理想磁场的匹配偏差。

在实际的塞曼减速器中,无论采用永磁体模块还是通电线圈产生的磁场,总会和理想塞曼磁场模型之间存在偏差,图2给出了实际磁场与理想磁场的匹配偏差。

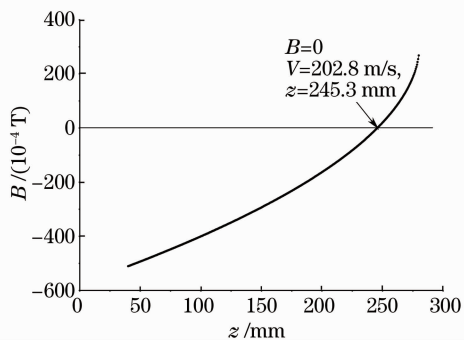


图1 塞曼减速器中的理论磁场

Fig. 1 Analytical magnetic field in the Zeeman slower

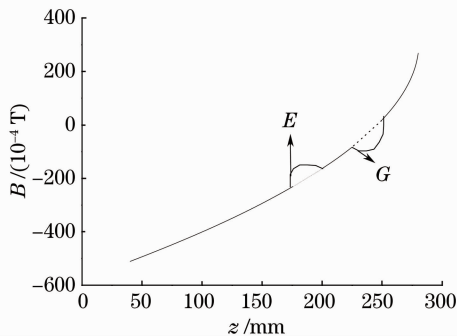


图2 计算磁场与理想磁场的匹配偏差

Fig. 2 Deviation between calculated and analytical magnetic field

如图2所示,虚线部分为理想磁场模型,实线部分为实际磁场相对于理论磁场的偏差。在E点处,设理想磁场为 B_E ,对应原子速度 v_E ;实际磁场为 B'_E ,对应原子速度 v'_E 。由(1)式可知,因为 $B'_E > B_E$,所以 $v'_E < v_E$ 。若实际磁场在E点之前与理论磁场严格匹配,那么在E点时原子束的平均速率 $\bar{v} = v_E$,因此得到 $v'_E < \bar{v}$,所有速度为 \bar{v} 的原子将不能在E点被有效减速。在E点之后的磁场区域中,由于每一个磁场值对应的原子速度均小于 \bar{v} ,在塞曼减速器末端这部分原子将不会被减速到目标值。可知射出铯炉的原子束的平均速率由热平衡状态的最可几速率求得,在原子束中,速度与平均速率 \bar{v} 相同的原子所占比例最大。因此,E点的磁场不匹配将会带来相当数量的原子缺失。

在G点处,理想磁场 B_G 对应的原子速度为 v_G ,实际磁场 B'_G 对应的原子速度为 v'_G ,与E点同理可得 $v'_G > v_G$ 。若此时原子束的平均速率 $\bar{v} = v_G$,可以得到 $v'_G > \bar{v}$ 。在G点,速度小于 v'_G 的原子将不能被有效减速,包括原子束的平均速率 \bar{v} 。另一方面,由(1)式可以得到加速度与磁场梯度之间的关系:

$$a = \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dz} = - \frac{\mu_B v}{\hbar k} \frac{dB}{dz}. \quad (3)$$

在 G 点之后的磁场区域,能够找到一点 X,使得该点实际磁场 B'_x 对应的原子速度为 \bar{v} ,但此时实际磁场梯度 $\frac{dB'_x}{dz}$ 一定大于 F 点处的理想磁场梯度 $\frac{dB_G}{dz}$,由上式可知在 X 点需要的加速度 a_x 超出了实验中的加速度 a ,原子仍然不能被有效减速。

因此实际磁场和理论磁场的匹配偏差将会降低塞曼减速的效率,导致后续磁光阱实验中的原子缺失。为了克服这种冷却失效问题,可以提高激光功率 I ,一方面在原子跃迁与激光频率失谐的磁场点补偿减小的自然力,另一方面在磁场梯度大于理想情况时提供更大的加速度。但是在铯原子光钟实验系统中,461 nm 激光功率是比较紧张的,不可能分给塞曼减速器太多的功率,而且增大加速度会使得实际磁场与理想磁场模型的匹配度进一步变差,原子的有效减速区域不连续地分布在塞曼减速器的轴向长度上。为了解决这个矛盾,只能在整个区域内降低实际磁场与理想磁场的匹配误差,从而减小实验中所需的461 nm 激光功率和塞曼减速器的长度。

3 计算塞曼线圈分布

以 C++ 作为编程语言。分别将线圈、线圈分布和磁场抽象化为 3 基本类 $coil, dis, field$ 。把塞曼减速器的物理参数要求如螺线管的长度、外径、导线直径及电流抽象化为基本类的属性,而对塞曼减速器的操作如添加、删除线圈,对磁场的计算抽象化为基本类的成员函数。除此之外还应该根据实际情况限定若干线圈排布时遵循的规则。由图 2 可知,理想塞曼磁场分为两段,方向相反,因此塞曼线圈应该分为绕向相反的两部分。如图 3 所示,如果令左端

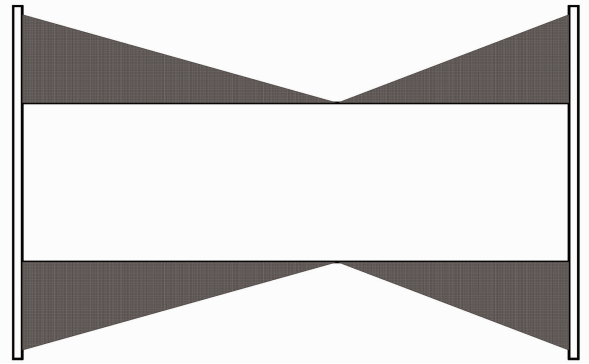


图 3 塞曼减速器线圈的剖面示意图

Fig. 3 Profile diagram of Zeeman slower coil

为铯原子束入射端,那么左端线圈产生的磁场方向应为“ $-$ ”,相对地,右端线圈产生的磁场方向为“ $+$ ”。出于加工方式的考虑,左右两端的线圈紧靠螺线管两端,紧密排布;下层线圈数应大于或等于上层线圈数。

程序初始化完成后,调用类 $coil$ 的内部成员函数 $coilevo()$ 进行循环优化。以单个线圈为优化步长,每改变一次线圈分布,计算当前线圈分布的叠加磁场相对于理论塞曼磁场的均方根(RMS)。有增加线圈 $add_coil()$ 和删除线圈 $remove_coil()$ 两个优化方向: $add_coil()$ 模块由螺线管底层开始,逐层增加线圈; $remove_coil()$ 模块由螺线管顶层开始,逐层删除线圈。程序从 $add_coil()$ 模块进入,当左右两端都不能再增加线圈,即 RMS 已经达到最小时,跳转到 $remove_coil()$ 模块。当 RMS 再次达到最小而无法删除线圈时,跳转回 $add_coil()$ 模块。如此循环往复,直到两个模块都不能通过改变线圈分布来减小 RMS,优化过程结束,此时的线圈分布产生的磁场与理想磁场达到最优匹配。循环优化过程如图 4 所示。

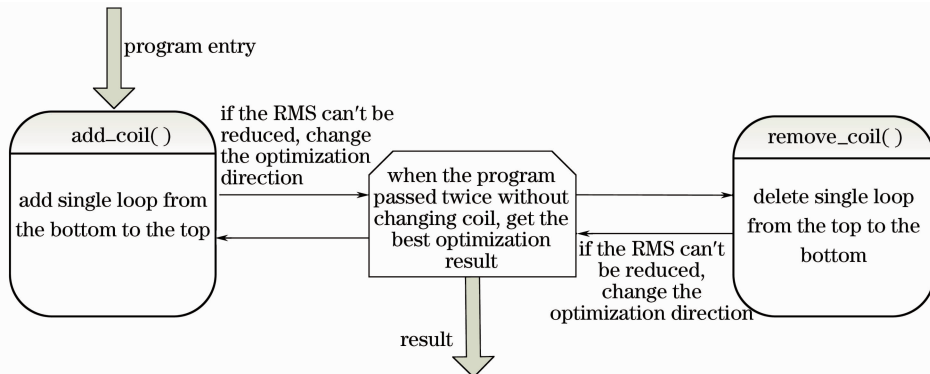


图 4 循环优化过程示意图

Fig. 4 Flow chart of loop optimization

其中 add_coil()和 remove_coil()两个程序模块流程基本相同。以 add_coil()函数为例:先判断是否能在当前位置添加线圈,如本层是否已经添满,下层线圈数是否比本层至少多 1;然后按照从底至顶的顺序找到可以放置线圈的位置;判断如果在当前位置添加 1 个线圈,是否会减小 RMS;如果 RMS 减小,则令此次添加线圈有效并更新当前线圈分布产生

的叠加磁场,反之则令此次添加线圈无效并寻找下一个可以放置线圈的位置。当无法找到可以令 RMS 减小的线圈位置时,程序跳出 add_coil()函数,转到另一优化方向。add_coil()函数流程图如图 5 所示。运行可执行文件 zeeman_coil.exe,持续时间小于 3 s。优化结果如表 1 所示。

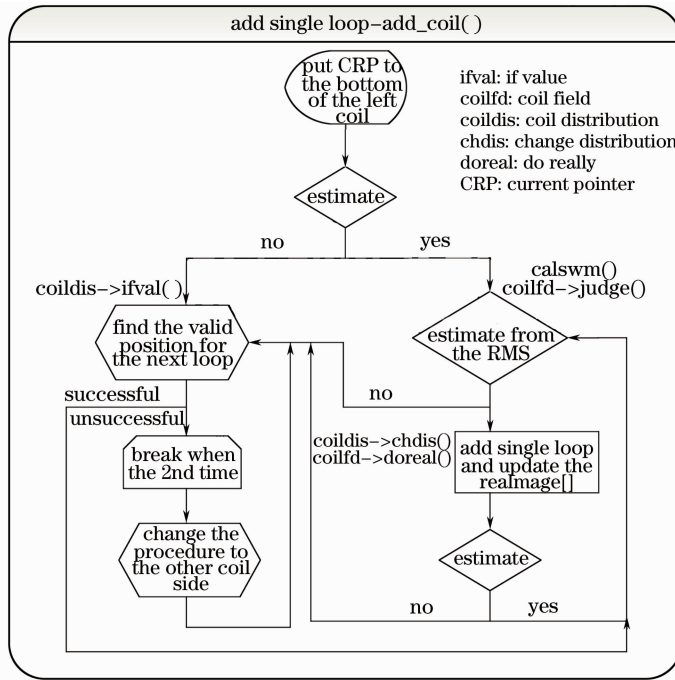


图 5 优化方向 add_coil() 的流程图

Fig. 5 Flow chart in the optimization direction of add_coil()

表 1 塞曼减速线圈分布

Table 1 Distribution of Zeeman slower coils

Layer number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Amount of loops in the left	216	203	188	168	152	130	107	82	55	45	24	2
Amount of loops in the right	55	45	44	43	45	44	43	39	34			

把上面的线圈分布产生的叠加磁场与理想磁场对照,结果如图 6 所示,计算可得 RMS 值为 $2.17 \times$

10^{-4} T。如果经验性地只选择 add_coil()一个优化方向,将不能修正每一次优化循环带来的偏差。从实验数据中可知,当第一次 add_coil()优化结束后,RMS 值为 18.729×10^{-4} T,与最终的优化结果相去甚远。

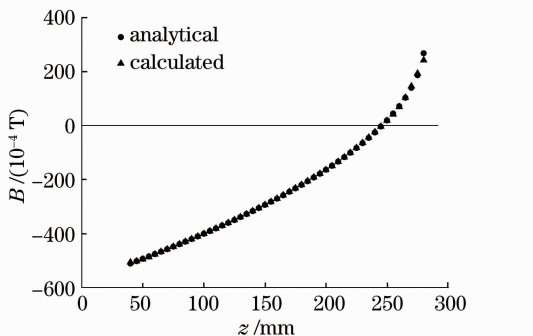


图 6 计算磁场与理论塞曼磁场对照

Fig. 6 Comparison of calculated magnetic field with analytical Zeeman magnetic field

4 塞曼减速器的实现及测量

实验中塞曼螺线管长 328 mm,半径 18 mm(外径),漆包线直径 1.1 mm,电流 5 A,有效磁场从 z 轴坐标 40 mm 处到 280 mm 处(以原子束入射端为 z 轴 0 点),共 240 mm。左端用线长度约为 190 m,电阻值为 4.5 Ω ,右端用线长度约为 55 m,电阻值为 1.22 Ω 。通电测量时功率为 1150 W。测

量结果如图 7 所示。

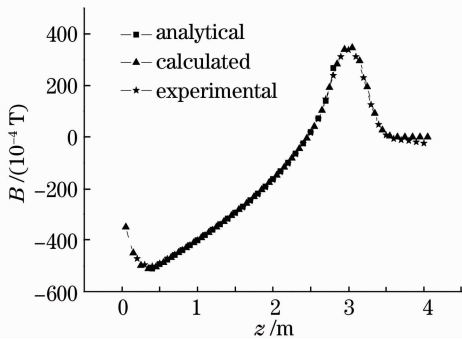


图 7 实际测量磁场与理论塞曼磁场和计算磁场的对照
Fig. 7 Comparison of experimentally measured magnetic field with calculated and analytical magnetic field

在 40~280 mm 的有效磁场段, 实测磁场与计算磁场的 RMS 值为 1.3×10^{-4} T, 实测磁场与理论塞曼磁场的 RMS 值为 5.2×10^{-4} T。为了考察塞曼减速器在铯光钟中的实际效果, 实验中分别测量了塞曼减速器开启和关断情况下 461 nm 蓝光 MOT 囚禁的 ^{88}Sr 原子数。从实验结果可以看到, 塞曼减速器开启后 MOT 信号明显增强, 峰值大概为原来的 2.5 倍。

5 讨 论

由于有效地控制了塞曼减速器的匹配精度, 从而可以采用较大的原子加速度 $a = 5.898 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ 。 η 为 0.6, 461 nm 激光功率为饱和激光功率的 1.6 倍, 而理论上的激光功率应为饱和激光功率的 1.5 倍。实际的磁场匹配度还与实验中的限制条件有关, 例如线径、电流和绕线方式等。如果把截面为圆的漆包线改为方线, 使单个线圈之间紧密配合, 或者减小电流而增大总的线圈数, 依然可用本文中的程序得到该实验条件下的最优线圈分布模型, 并进一步地提高磁场匹配度, 使实际的激光功率逼近饱和功率的 1.5 倍。程序的优化算法保证了在给定的物理参数要求和近似简化的前提下, 由程序计算出的线圈分布为现有初始状态的最优解。这种方法不仅适用于塞曼减速器的设计, 而且可用于模拟计算与其它特定磁场相匹配的线圈分布。

6 结 论

介绍了一种基于电脑程序的塞曼减速器设计方法。由理论磁场模型倒推塞曼线圈分布, 比起简单

的物理运算和人工经验, 设计结果更加准确, 运算过程非常迅速。实验证明, 设计的塞曼减速器减速效果良好, 显著提高了 MOT 信号, 为塞曼减速器关断情况下的 250%。

参 考 文 献

- 1 R. L. Targat, X. Baillard, M. Fouché *et al.*. Accurate optical lattice clock with ^{87}Sr atoms [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(13): 130801
- 2 H. Katori, M. Takamoto. Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(17): 173005
- 3 X. H. Hu, X. F. Zhang, D. Zhao *et al.*. Dynamics and modulation of ring dark solitons in two-dimensional Bose-Einstein condensates with tunable interaction [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(2): 023619
- 4 X. X. Liu, H. Pu, B. Xiong *et al.*. Formation and transformation of vector solitons in two-species Bose-Einstein condensates with a tunable interaction [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(1): 013423
- 5 X. F. Zhang, Q. Yang, J. F. Zhang *et al.*. Controlling soliton interactions in Bose-Einstein condensates by synchronizing the feshbach resonance and harmonic trap [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(2): 023613
- 6 B. He, Q. Sun, P. Li *et al.*. Magnetic quantum phase transition of cold atoms in an optical lattice [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **76**(4): 043618
- 7 Wang Guiping, Ji Weibang, Ma Jie *et al.*. Measurement on collisional loss rate coefficient of cesium cold atoms in a magneto-optical trap [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 221~224
王贵平, 冀炜邦, 马杰等. 磁光阱中铯冷原子碰撞损失率系数的测量 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 221~224
- 8 Lu Junfa, Ji Xianming, Yin Jianping. Controllable eight-well optical trap and the two-dimensional optical lattices for cold atoms or molecules [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1017~1019
陆俊发, 纪宪明, 印建平. 囚禁冷原子或冷分子的可控制光学八阱及其光学晶格 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1017~1019
- 9 Mu Renwang, Ji Xianming, Yin Jianping. Double-layer optical-trap arrays for trapping cold atoms or molecules [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 822~826
沐仁旺, 纪宪明, 印建平. 实现冷原子或冷分子囚禁的双层光阱阵列 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 822~826
- 10 W. D. Phillips, H. Metcalf. Laser deceleration of an atomic beam [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **48**(9): 596~599
- 11 F. Lison, P. Schuh, D. Haubrich *et al.*. High-brilliance Zeeman-slowed cesium atomic beam [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **61**(1): 013405
- 12 Wang Xinliang, Ruan Jun, Ma Jie *et al.*. The Zeeman slower magnetic field for ^{87}Sr Atom [J]. *J. Time and Frequency*, 2008, **31**(2): 92~96
王心亮, 阮军, 马杰等. ^{87}Sr 原子束的塞曼减速器磁场的研究 [J]. *时间频率学报*, 2008, **31**(2): 92~96
- 13 Y. B. Ovchinnikov. A permanent Zeeman slower for Sr atomic clock [J]. *The European Physical Journal-Special Topics*, 2008, **163**(1): 95~100
- 14 K. J. Günter. Design and implementation of a Zeeman slower for ^{87}Rb [R]. Ecole Normale Supérieure, Paris, 2004. 17~20
- 15 M. L. Harris. Design and Construction of Improved Zeeman Slower [D]. Durham: Duke University, 2003. 19~26