

小型化锶光钟物理系统的研制

赵芳婧 高峰 韩建新 周驰华 孟俊伟 王叶兵 郭阳 张首刚 常宏

Miniaturization of physics system in Sr optical clock

Zhao Fang-Jing Gao Feng Han Jian-Xin Zhou Chi-Hua Meng Jun-Wei Wang Ye-Bing Guo Yang  
Zhang Shou-Gang Chang Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 050601 (2018) DOI: 10.7498/aps.20172584

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20172584>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[<sup>87</sup>Rb 玻色-爱因斯坦凝聚体的快速实验制备](#)

Fast production of <sup>87</sup>Rb Bose-Einstein condensates

物理学报.2017, 66(8): 083701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.083701>

[用于光频传递的通信波段窄线宽激光器研制及应用](#)

Development and application of communication band narrow linewidth lasers

物理学报.2015, 64(19): 190601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.190601>

[锶玻色子的“魔术”波长光晶格装载实验研究](#)

Experimental research on loading strontium bosons into the optical lattice operating at the “magic” wavelength

物理学报.2015, 64(13): 130601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.130601>

[基于光纤的光学频率传递研究](#)

Study of optical frequency transfer via fiber

物理学报.2015, 64(12): 120602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120602>

[振动不敏感球形光学参考腔研究](#)

Study of a spherical vibration-insensitive optical reference cavity

物理学报.2014, 63(9): 090601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.090601>

## 小型化铯光钟物理系统的研制\*

赵芳婧<sup>1)2)</sup> 高峰<sup>1)†</sup> 韩建新<sup>1)2)</sup> 周驰华<sup>1)</sup> 孟俊伟<sup>1)</sup>  
王叶兵<sup>1)2)</sup> 郭阳<sup>1)2)</sup> 张首刚<sup>1)</sup> 常宏<sup>1)‡</sup>

1)(中国科学院国家授时中心, 时间频率基准重点实验室, 西安 710600)

2)(中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

(2017年12月4日收到; 2017年12月21日收到修改稿)

光钟物理系统的小型化是制约可搬运光钟及空间冷原子光钟发展的重要因素. 主要介绍了小型化铯原子光钟物理系统的研制实验. 采用真空腔内置反亥姆霍兹线圈, 构建一个小电流、低功耗及小体积的磁光阱. 实验中测得真空线圈通电电流仅为2 A时, 磁光阱中心区域轴向磁场梯度可达到43 Gs/cm, 完全满足铯原子多普勒冷却与俘获对磁场梯度的要求. 目前已经成功将铯原子光钟物理系统体积缩小至60 cm × 20 cm × 15 cm, 约为实验室原铯光钟物理系统体积的1/10, 并且实现了铯原子的一级冷却, 测得俘获区冷原子团的直径为1.5 mm, 温度约为10.6 mK. 铯同位素<sup>88</sup>Sr和<sup>87</sup>Sr的冷原子数目分别为 $1.6 \times 10^6$ 和 $1.5 \times 10^5$ . 重抽运激光707和679 nm的加入, 消除了冷原子在<sup>3</sup>P<sub>2</sub>和<sup>3</sup>P<sub>0</sub>两能态上的堆积, 最终可将冷原子数目提高5倍以上.

关键词: 小型化铯光钟, 内置磁场线圈, 空间冷原子光钟

PACS: 06.30.Ft, 37.10.De, 37.10.Gh, 37.10.Vz

DOI: 10.7498/aps.67.20172584

## 1 引言

冷原子铯光钟作为目前世界上性能指标最高的原子钟, 其测量精度已进入 $10^{-19}$ 量级<sup>[1]</sup>, 比目前基准钟铯微波喷泉钟高出三个量级, 是下一代时间频率标准“秒”定义的有力候选. 近十几年来, 国际上很多实验室都在积极开展铯光钟的研制<sup>[2-8]</sup>.

随着时间频率测量精度的不断提高, 高性能原子光钟的应用越来越广泛. 为了更好地开展基于光钟的高精密测量实验<sup>[9]</sup>, 比如里德堡常数 $R_H$ 测量、引力红移测量<sup>[10]</sup>、精细结构常数随时变化, 以及精密探测相对论和基础理论所预言的一些“微弱现象”, 并检验它们的正确性<sup>[11-13]</sup>, 科学家们一直在探索新的研究方向.

目前, 国际上多个研究组都竞相开展空间高精度原子钟的研制, 美国和欧洲均启动了利用国际空

间站环境开发空间冷原子钟的研究计划<sup>[14-16]</sup>. 国内, 中国科学院上海光学精密机械研究所从2000年开始小型化冷原子铯钟的研制, 并在2016年首次成功实现了空间冷原子铯钟, 地面测试中期千秒稳定度为 $1.5 \times 10^{-14}$ <sup>[17]</sup>, 已经成功搭载天宫二号进入太空, 并且正常运行. 最早研制空间冷原子钟的是欧洲空间局提出的空间原子钟组 (Atomic Clock Ensemble in Space, ACES) 计划, 该计划的目的是在空间站研制冷原子微波钟. 在2006年欧洲空间局开始空间光钟研制计划, 目标是在2023年左右实现频率不确定度优于 $1 \times 10^{-17}$ 、稳定度优于 $1 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ 的空间冷原子光钟, 该计划目前仍处在原理样机的地面测试阶段<sup>[18]</sup>. 受空间站特殊条件及光钟系统自身体积庞大和结构复杂等因素的限制, 在空间光钟研制过程中, 首要解决的问题就是实现光钟的小型化及低功耗设计.

\* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11603030)、国家自然科学基金(批准号: 11474282, 61775220)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(批准号: XDB21030700)和中国科学院前沿科学重点研究项目(批准号: QYZDB-SSW-JSC004)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: summit\_gao@ntsc.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: changhong@ntsc.ac.cn

近年来,关于光钟小型化的研究工作一直在进行中<sup>[19–22]</sup>.2014年,意大利Tino小组对整个光钟系统进行了优化,将物理真空系统的体积缩小至 $120\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 36\text{ cm}$ ,且系统总体积 $< 2\text{ m}^3$ ,最终实现了频率不确定度为 $7.0 \times 10^{-15}$ 的可搬运 $^{88}\text{Sr}$ 光钟<sup>[19]</sup>.2017年,德国联邦物理技术研究院成功实现了车载可移动锶光钟,光钟物理真空系统固定在 $120\text{ cm} \times 90\text{ cm}$ 的平板上,最终实现了 $^{87}\text{Sr}$ 光钟,频率不确定度为 $7.4 \times 10^{-17}$ ,稳定度优于 $1.3 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ ,是目前报道的不确定度和稳定度最高的可移动光钟<sup>[20]</sup>.此外,中国武汉物理与数学研究所黄学人小组研制的小型化钙离子光钟目前也实现了可搬运.他们研制的小型化原子钟系统总体积 $< 0.54\text{ m}^3$ ,初步评估得到光钟不确定度为 $7.8 \times 10^{-17}$ ,稳定度约为 $2.3 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$ <sup>[21]</sup>.

本文主要介绍小型化锶光钟物理系统的研制实验,将构建磁光阱(magneto-optical trap, MOT)的一对反亥姆霍兹线圈置于真空腔内.线圈采用Kapton材质的真空铜线绕制,实验中线圈通电电流为2 A,在MOT中心区域产生轴向磁场梯度为43 Gs/cm,发热功率小于1.0 W.整个线圈固定在一个易于导热的铝制支架上,支架和真空腔体的紧密贴合可实现很好的散热功效,无需增加循环水冷装置以实现散热和控温.目前,实验已经成功将物理真空系统体积缩小至 $60\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ ,约为实验室原锶光钟系统体积的 $1/10$ <sup>[23]</sup>,并且采用真空内置磁场线圈的技术,已经成功实现了锶原子的一级多普勒冷却.实验测得俘获区锶冷原子团的直径为1.5 mm,利用短程飞行时间法<sup>[24–26]</sup>测得冷原子温度约为10.6 mK.利用荧光收集法<sup>[27]</sup>测得锶同位素 $^{88}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}$ 的冷原子数目分别为 $1.6 \times 10^6$ 和 $1.5 \times 10^5$ .在一级多普勒冷却过程中,对应的原子跃迁能级结构的不封闭性造成了原子在 $^3\text{P}_2$ 和 $^3\text{P}_0$ 两能态上的堆积,从而影响了冷原子的俘获效率.加入707和679 nm重抽运激光,可极大地降低原子损失率,实验最终可将冷原子数目提高5倍以上.

## 2 实验系统设计

### 2.1 真空物理系统

锶光钟整个物理系统装置主要包括原子Dispenser源、毛细准直器、Zeeman减速器、磁光阱、

离子泵及真空组件等.如图1所示,装置最右端为锶原子Dispenser源,内装约5 g固态锶,在其前端放置长15 mm、直径0.8 mm的50根毛细管堆叠而成的毛细准直器.实验中,通电后的Dispenser源释放出锶原子蒸气,经由毛细准直器准直形成热原子束喷出.装置中间部分是长29.6 cm的Zeeman减速器,经过Zeeman减速器后热原子束被减速至100 m/s以下,减速后的原子被俘获到MOT中.在锶原子Dispenser源附近接有一个10 L的离子泵,实验中其真空度约为 $10^{-5}\text{ Pa}$ ,此外在MOT区还接有一个20 L的离子泵,实验中真空度约为 $10^{-6}\text{ Pa}$ .装置最前端的正八面体真空腔是最终俘获冷原子团的场所,俘获光、减速光及探测光分别从真空腔体不同的窗口导入腔中并与原子相互作用,实现一级多普勒冷却.真空腔体水平方向所有窗口尺寸均为CF16.

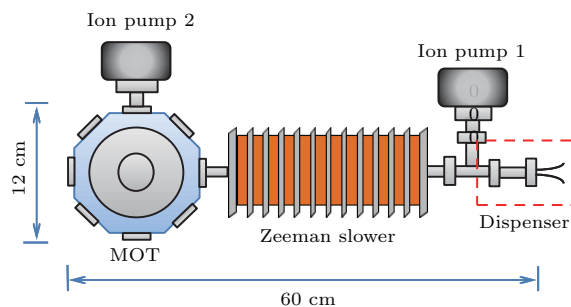


图1 物理系统装置示意图

Fig. 1. Sketch of the vacuum system for a low maintenance Sr optical lattice clock.

实验中Zeeman减速器是通过补偿原子多普勒频移来实现对原子束的持续减速,目前常用的减速器有通电线圈型和永磁体型两种.通电线圈型制作简单易调节,且产生的磁场曲线平滑,后期优化方便,缺点是需要电流源控制及循环水冷装置,系统结构复杂且体积较大.永磁体型优点是无需电流源控制及水冷装置,体积小,无功耗,但是对磁体材料及安装位置要求高,环形永磁体不易精密加工,且充磁后磁体的中心剩余磁场强度不能调节.基于对以上诸多因素及现有实验条件的综合考量,采用多匝线圈式Zeeman减速器模拟永磁体环型Zeeman减速器,通过分析实验结果选择合适的参数为下一步永磁体型Zeeman减速器的制作提供参考.减速器全长29.6 cm,共12个线圈.线圈间采用厚度为2 mm的无磁不锈钢板隔开,单个线圈均采用直径1.5 mm的铜丝绕制而成,共计15圈18层270匝.

12个线圈所加电流各不相同, 方便可调谐, 能实现最佳减速效果.

## 2.2 真空内置磁场线圈设计

与单一光学阱、磁阱相比, 磁光阱具有阱深较大, 阱中原子温度低、囚禁时间长, 冷却效果明显等特点. 为了实现三维俘获, 在磁光阱  $xyz$  三个方向上分别用三对光斑尺寸相同、光强相等的激光两两对射, 同时调节冷却激光的偏振, 使得激光偏振分别为  $\sigma^+$  和  $\sigma^-$  [28]. 此外, 还需要一对反向亥姆霍兹线圈即可构建磁光阱.

通常情况下构成磁光阱的反亥姆霍兹线圈被放在 MOT 区真空腔之外, 该结构虽然便于调节但热耗功率很大. 实验室原铯光钟系统中, 线圈采用 1.5 mm 的铜线绕 220 匝, 线圈内径约为 110 mm, 外径为 130 mm. 要达到实验所需磁场梯度 50 Gs/cm, 线圈所需电流约为 16.5 A, 发热功率为 150 W. 通

电一段时间后发热严重. 过高的温度不仅对线圈不利, 还会影响 MOT 区真空度以及实验系统的稳定性. 因此, 必须增加循环水冷装置实现散热和控温. 这使得整个物理系统体积非常庞大, 阻碍了物理系统向小型化方向发展, 不利于未来可搬运光钟及空间光钟的实现.

为实现物理系统的小型化目标, 实验将一对反亥姆霍兹线圈放置到真空腔内部, 使得整个系统体积大大缩小. 结合实验要求, 对两线圈的大小及线圈之间的距离进行精确的理论计算, 并模拟线圈产生的磁场. 根据真空腔的体积、窗口大小以及线圈尺寸, 设计加工了铝制线圈支架, 可将线圈直接绕制在支架上, 然后将其放入真空腔中. 内置线圈装置截面图如图 2(a) 所示, 整个真空腔长 120 mm, 高 69 mm. 线圈采用直径 1 mm 的铜线绕制而成, 共计 160 匝. 两线圈内径为 20 mm, 外径为 40 mm, 如图 2(b) 所示.

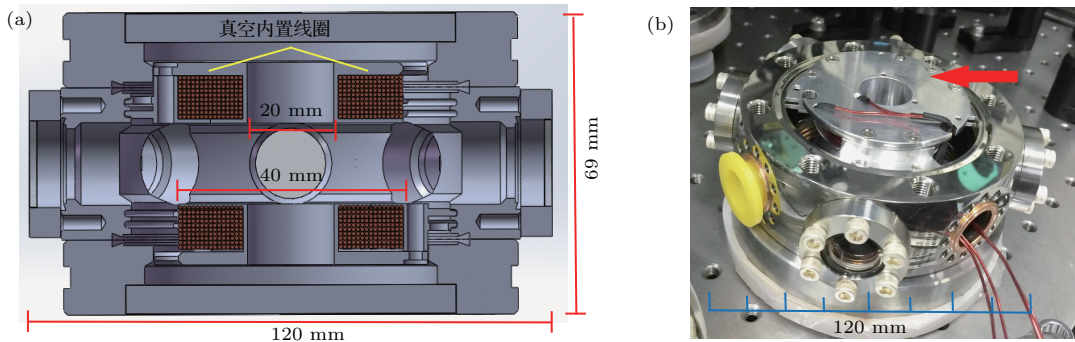


图 2 内置反亥姆霍兹线圈 (a) 装置截面图; (b) 装置实物图

Fig. 2. Schematic of the built-in anti-Helmholtz coil: (a) Sectional view; (b) set-up picture.

用磁强计对 MOT 中心区域的轴向和径向磁场进行精细测量. 数据拟合后得到轴向磁场梯度为 43 Gs/cm, 径向磁场梯度约为轴向的一半, 为 26 Gs/cm, 满足实验要求.

## 2.3 实验主光路

图 3 为铯光钟一级多普勒冷却光路. 实验所用激光光源型号为 TA-SHG 110 倍频半导体激光器 (Toptica), 输出为波长 461 nm 的线偏振光, 激光线宽小于 2 MHz, 扫频范围约为 20 GHz, 输出功率为 190 mW. 用于一级冷却的光路主要包括三个部分: 第一部分, 使激光器端口输出的 461 nm 激光双次通过声光调制器 (acoustic-optic-modulator, AOM)

1, 移频 +570 MHz 之后, 将激光频率锁定到铯原子  $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$  跃迁线上; 第二部分, 锁频后, 将 461 nm 激光分为两部分, 其中一束激光直接作为减速光, 与 Zeeman 减速器相结合, 共同与原子作用, 将原子从最可几速度 430 m/s 减速至 75 m/s; 第三部分, 在 MOT 区域, 冷却并俘获减速后的原子. 使锁频后的另一束 461 nm 激光双次通过 AOM2, 移频 +532 MHz 后, 分成三路. 在磁光阱的  $xyz$  方向, 三对偏振方向相反的圆偏振激光两两对射, 形成六束激光与冷原子相互作用. 同时, 在 MOT 区, 还有一对真空内置的反亥姆霍兹线圈, 在中心区域产生 43 Gs/cm 的轴向磁场梯度, 将原子俘获在 MOT 区中心.

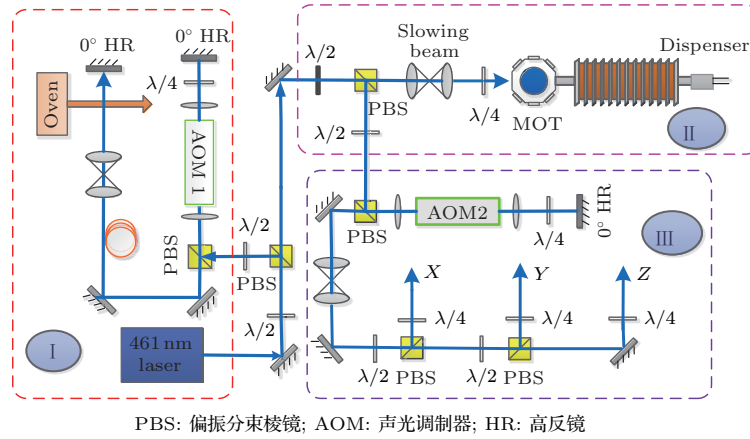


图3 一级多普勒冷却光路图

Fig. 3. First stage Doppler cooling laser system.

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 原子速度分布曲线

Zeeman 减速是冷原子制备过程中一个极其重要的技术环节. 实验中 Zeeman 减速光采用一束功率为 40 mW、失谐  $-570$  MHz、光斑为会聚型的圆偏振 461 nm 激光, 与相对应的 Zeeman 磁场共同作用使铯原子束持续减速. 由于受真空腔体窗口尺寸的限制, 实验采用的俘获光光斑尺寸约为 13 mm, 失谐  $-38$  MHz, 每束光功率均为 9 mW, 只有铯原子速度降至 100 m/s 以下时才能被 MOT 有效俘获. 因此, 先进行原子速度分布曲线探测, 获得 Zeeman 减速效率之后再进一步优化实验参数. 探测过程中, 需要两台 461 nm 激光器, 其中一台频率锁定后提供一束 Zeeman 减速光与原子相互作用. 同时, 将另一台 461 nm 激光器设置为扫描状态, 并将其输出激光分为两部分, 一束垂直原子束运动方向入射的激光作为零失谐标定; 另一束激光则与原子运动方向成  $45^\circ$  角入射作为探测光, 得到原子速度分布谱线. 独立调节 Zeeman 减速器各线圈的电流值, 使得 MOT 中心区域俘获原子数目达到最大.

图 4 所示为经 Zeeman 减速器减速前后的原子速度分布曲线. 黑色实线表示减速前, 红色虚线表示减速后. 从图中可以看出温度约为  $470^\circ\text{C}$  的 Dispenser 喷出的铯原子束最可几速率可达到 430 m/s. 通过原子速度分布曲线可以看出, 经过 Zeeman 减速后, 在原子速度为 220 和 75 m/s

两处, 原子数目有堆积存在, 经过理论拟合可以计算出减速后速度为 75 m/s 的原子占原子总数的 16.4%.

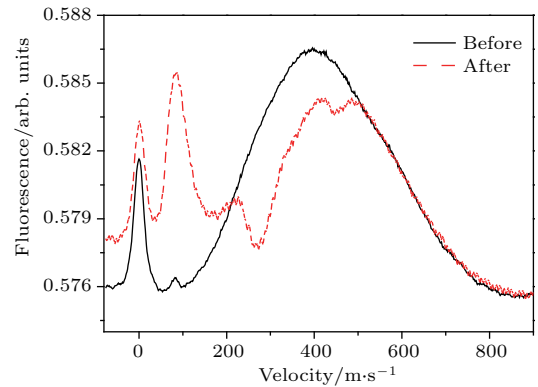


图4 原子的速度分布

Fig. 4. Atomic velocity distribution.

#### 3.2 铯原子同位素荧光图像

如图 5 所示, 实验中用型号为 CoolSNAP EZ 的高分辨率 CCD 观测磁光阱中俘获的冷原子团. 铯原子有四种同位素, 目前用于冷原子铯光钟研究的有玻色子  $^{88}\text{Sr}$  和费米子  $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Sr}$  在自然界中的丰度为 82.6%, 而  $^{87}\text{Sr}$  在自然界中的丰度仅为 7.0%, 因此实验中冷原子团荧光信号的强度相差较大. 利用 CCD 采集冷原子图像, 对其荧光亮度进行高斯拟合, 计算得到  $^{88}\text{Sr}$  冷原子团直径约为 1.5 mm.

实验利用自制的光电探测器加前置放大器对冷原子荧光强度进行探测. 通过光电探测器收集不同冷原子团的荧光功率, 可以推算出俘获冷原子的

数目,  $^{88}\text{Sr}$  和  $^{87}\text{Sr}$  的原子数目分别为  $1.6 \times 10^6$  和  $1.5 \times 10^5$ , 两者比值约为 10.7, 符合共同位素的自然丰度比例. 重抽运激光 707 和 679 nm 的加入, 最终可将冷原子数目提高 5 倍以上.

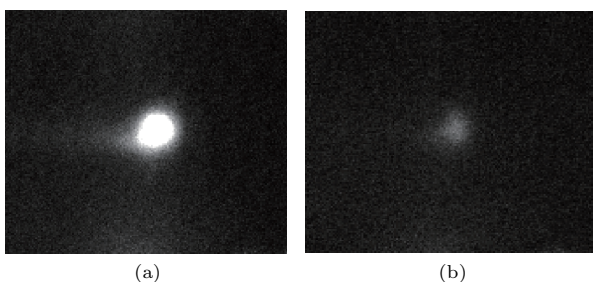


图 5 锶原子同位素的冷原子荧光图像 (a)  $^{88}\text{Sr}$ ; (b)  $^{87}\text{Sr}$   
Fig. 5. Fluorescence images of cold atoms of strontium isotopes: (a)  $^{88}\text{Sr}$ ; (b)  $^{87}\text{Sr}$ .

### 3.3 短程飞行时间法测量冷原子温度

温度是表征冷原子特征的基本物理量, 实验中常采用飞行时间法 (time of flight, TOF) [29] 测量温度. 这种测量方式下, 冷原子飞行距离一般较大, 无需考虑冷原子团初始位置的大小及探测光斑尺寸的影响, 只要探测光斑可覆盖下落的冷原子即可. 但实验中由于物理系统真空腔体光学探测窗口较小, 允许原子飞行的时间及路程较短, 冷原子团初始位置的大小及探测光斑尺寸不能被忽略, 传统的 TOF 法不再适用. 因此, 实验采用短程飞行时间法 (飞行距离  $< 10$  mm) 测量冷原子温度. 实验中, 冷原子团被囚禁在 MOT 中心, 半径约为 0.75 mm. 在距离冷原子团下方 3 mm 处, 打一束光斑半径为 0.5 mm 的细圆光束作为探测光. 通过时序精确控制 MOT 区磁场及实验中各光场的开关断, 使得冷原子团得到周期性的释放与俘获, 最终由探测器收集到的吸收信号推算出冷原子团温度为 10.6 mK, 如图 6 所示.

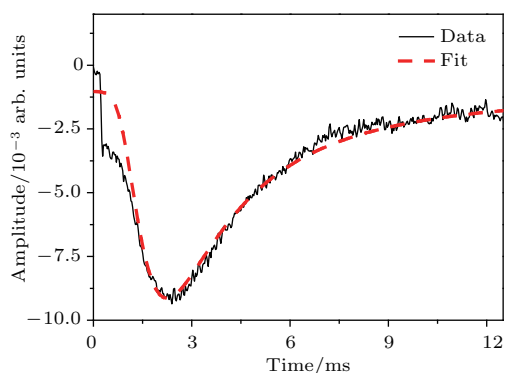


图 6 短程 TOF 法测量的冷原子吸收信号  
Fig. 6. Absorption curve of cold atoms by TOF.

### 3.4 利用 Zeeman 减速器研究最小减速器长度

实验中 Zeeman 减速器通过补偿由原子多普勒效应引起的频移来实现减速光与原子能级持续共振, 从而使原子束减速. 原子在减速器轴向上的运动可近似看作加速度为  $a$  的匀加速运动, 因此 Zeeman 减速器长度  $l$  可表示为

$$v_z^{\max} = \sqrt{v_f^2 + 2al}, \quad (1)$$

式中  $v_z^{\max}$  为实验希望能够减速的原子最大速度,  $v_f$  为最终到达 MOT 的原子速度. 实际上, 由于从原子炉喷出的原子束存在一定的发散角, 因此原子不仅具有轴向速度  $v_z$ , 还具有径向速度  $v_r$ . 由于径向速度  $v_r$  的存在, 如果减速器过长就会使大量的原子打在减速器管壁, 导致部分原子不能与激光光束相互作用, 减速效果变差, 最终无法进入磁光阱中, MOT 俘获原子数目减少. 最大径向速度  $v_r^{\max}$  可表示为 [30]

$$v_r^{\max} = \frac{r_0}{t_b + t_d + t_a}, \quad (2)$$

式中  $r_0$  为俘获的冷原子团半径,  $t_b$ ,  $t_d$ ,  $t_a$  分别为原子束离开准直器到达减速器的时间、在减速器中的时间和从减速器到达 MOT 的时间. 由此, 可由轴向最大速度  $v_z^{\max}$ 、径向最大速度  $v_r^{\max}$  求出长度为  $l$  的减速器作用下的俘获原子数. 对原子束运动速度分布 [31] 积分可得 [30]

$$R \propto \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{(v_z^{\max})^2}{v_{\text{mp}}^2} \right] \right\} \times \left\{ 1 - \exp \left[ -\frac{(v_r^{\max})^2}{v_{\text{mp}}^2} \right] \right\}, \quad (3)$$

式中  $R$  为任意长度的 Zeeman 减速器作用下俘获的原子数目,  $v_{\text{mp}} = \sqrt{3kT/m}$  为原子束最可几速度,  $m$  为锶原子质量,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为锶原子温度.

基于光钟物理系统小型化实验研制的考虑, 在保证获得较高减速效率的情况下, 应尽量缩短 Zeeman 减速器的尺寸. 实验通过逐渐减少 Zeeman 减速器的线圈数来模拟不同长度的减速器. 通过调节各个线圈电流值, 实现不同长度下的最优 MOT. 最终可得到不同长度的 Zeeman 减速器对应的线圈最优电流值. 将多螺线管 Zeeman 减速器的一个线圈模拟为永磁体 Zeeman 减速器的一对磁片, 利用这些电流值可以进行磁场拟合, 从中选择最优的磁场

拟合结果,为下一步设计永磁体 Zeeman 减速器的长度及磁片的选择提供参考.因为要实现光钟的可搬运,甚至未来的空间冷原子光钟,永磁体 Zeeman 减速器无疑是更好的选择.永磁体 Zeeman 减速器不仅拥有结构简单、体积小、质量轻、无需电源供电、无功耗等显著优点,其优良的抗震性及稳定性也是实现小型化以及未来可搬运光钟和空间光钟所必需的.

实验操作如下:保证其他实验条件保持不变,从靠近铯炉的一端开始,逐渐减少 Zeeman 减速器线圈数,重新调节各个线圈的电流值,同时观察不同状态下光电探测器探测到的冷原子团的荧光功率,使得俘获冷原子效果最优,并计算出相应原子数目.结果如图 7 所示.

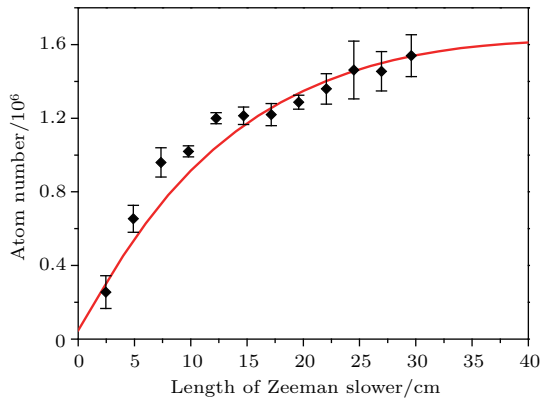


图 7 Zeeman 减速器长度与冷原子数目的关系

Fig. 7. Number of cold atoms under different lengths of Zeeman slower.

由图 7 可以看出,理论与实际拟合较好,当 Zeeman 减速器长度为 8—12 cm 时,通过调节 Zeeman 减速器线圈电流,仍然能俘获  $10^6$  数量级的冷原子,俘获效率约 11%.

## 4 结 论

采用真空内置反亥姆霍兹线圈构建磁光阱,实现了铯原子的一级多普勒冷却.实验中观测了不同的铯同位素的冷原子团,计算得到原子数目,并用短程飞行时间法测出冷原子团温度.实验验证了真空内置反亥姆霍兹线圈构成磁光阱这一关键技术,并成功实现了铯光钟物理系统的小型化.这对于未来可搬运光钟以及空间钟的实现都具有重要意义.在已有实验的基础上,我们可以设计永磁体 Zeeman 减速器.永磁体 Zeeman 减速器体积小、重量轻、无需电源供电且具有优良的防震性能及稳

定性,利用这些优点可以将 Zeeman 减速器的尺寸做到更小,更好地实现铯原子光钟物理系统的小型化,为可移动光钟及空间光钟的研制奠定基础.

## 参考文献

- [1] Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, Goban A, Darkwah Oppong N, McNally R L, Sonderhouse L, Robinson J M, Zhang W, Bloom B J, Ye J 2017 *Science* **358** 90
- [2] Le Targat R, Lorini L, Le Coq Y, Zawada M, Guéna J, Abgrall M, Gurov M, Rosenbusch P, Rovera D G, Nagórny B, Gartman R, Westergaard P G, Tobar M E, Lours M, Santarelli G, Clairon A, Bize S, Laurent P, Lemonde P, Lodewyck J 2013 *Nat. Commun.* **4** 2109
- [3] Takano T, Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, Akatsuka T, Yamaguchi A, Kuroishi Y, Munekane H, Miyahara B, Katori H 2016 *Nat. Photon.* **10** 662
- [4] Falke S, Lemke N, Grebing C, Lipphardt B, Weyers S, Gerginov V, Huntemann N, Hagemann C, Al-Masoudi A, Häfner S, Vogt S, Sterr U, Lisdat C 2014 *New J. Phys.* **16** 073023
- [5] Ushijima I, Takamoto M, Das M, Ohkubo T, Katori H 2015 *Nat. Photon.* **9** 185
- [6] Lin Y G, Wang Q, Li Y, Meng F, Lin B K, Zang E J, Sun Z, Fang F, Li T C, Fang Z J 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 090601
- [7] Hachisu H, Ido T 2015 *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** 112401
- [8] Akamatsu D, Inaba H, Hosaka K, Yasuda M, Onae A, Suzuyama T, Amemiya M, Hong F L 2014 *Appl. Phys. Express* **7** 012401
- [9] Schiller S, Görlitz A, Nevsky A, Koelemeij J C J, Wicht A, Gill P, Klein H A, Margolis H S, Mileti G, Sterr U, Riehle F, Peik E, Tamm C, Ertmer W, Rasel E, Klein V, Salomon C, Tino G M, Lemonde P, Holzwarth R, Hänsch T W 2007 *Nucl. Phys. B* **166** 300
- [10] Salomon Ch, Dimarcq N, Abgrall M, Clairon A, Laurent P, Lemonde P, Santarelli G, Uhrich P, Bernier L G, Busca G, Jornod A, Thomann P, Samain E, Wolf P, Gonzalez F, Guillemot Ph, Leon S, Nouel F, Sirmain Ch, Feltham S 2001 *C. R. Phys.* **2** 1313
- [11] Cacciapuoti L, Salomon C 2009 *Eur. Phys. J. Special Topics* **172** 57
- [12] Godun R M, Nisbet-Jones P B R, Jones J M, King S A, Johnson L A M, Margolis H S, Szymaniec K, Lea S N, Bongs K, Gill P 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 210801
- [13] Fortier T M, Ashby N, Bergquist J C, Delaney M J, Diddams S A, Heavner T P, Hollberg L, Itano W M, Jefferts S R, Kim K, Levi F, Lorini L, Oskay W H, Parker T E, Shirley J, Stalnaker J E 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 070801
- [14] Sullivan D B, Ashby N, Donley E A, Heavner T P, Hollberg L W, Jefferts S R, Klipstein W M, Phillips W D, Seidel D J 2005 *Adv. Space Res.* **36** 107
- [15] Schiller S, Görlitz A, Nevsky A, Alighanbari S, Vasilyev S, Abou-Jaoudeh C, Mura G, Franzen T, Sterr U, Falke S, Lisdat C, Rasel E, Kulosa A, Bize S, Lodewyck J, Tino G M, Poli N, Schioppo M, Bongs K, Singh Y,

- Gill P, Barwood G, Ovchinnikov Y, Stuhler J, Kaenders W, Braxmaier C, Holzwarth R, Donati A, Lecomte S, Calonico D, Levi F 2012 *Let's Embrace Space* (Vol. II) (Luxembourg: Publications Office of the European Union) p452
- [16] Świerad D, Häfner S, Vogt S, Venon B, Holleville D, Bize S, Kulosa A, Bode S, Singh Y, Bongs K, Rasel E M, Lodewyck J, Le Targat R, Lisdat C, Sterr U 2016 *Nat. Sci. Rep.* **6** 33973
- [17] Li L, Qu Q Z, Wang B, Li T, Zhao J B, Ji J W, Ren W, Zhao X, Ye M F, Yao Y Y, Lü D S, Liu L 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 063201
- [18] Origlia S, Schiller S, Pramod M S, Smith L, Singh Y, He W, Viswam S, Świerad D, Hughes J, Bongs K, Sterr U, Lisdat C, Vogt S, Bize S, Lodewyck J, Le Targa R, Holleville D, Venon B, Gill P, Barwood G, Hill I R, Ovchinnikov Y, Kulosa A, Ertmer W, Rasel E M, Stuhler J, Kaenders W, the SOC2 consortium contributors 2016 *Quantum Opt.* **9900** 990003
- [19] Poli N, Schioppo M, Vogt S, Falke St, Sterr U, Lisdat Ch, Tino G M 2014 *Appl. Phys. B* **117** 1107
- [20] Koller S B, Grotti J, Vogt S, Al-Masoudi A, Dörscher S, Häfner S, Sterr U, Lisdat C 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 073601
- [21] Cao J, Zhang P, Shang J J, Cui K F, Yuan J B, Chao S J, Wang S M, Shu H L, Huang X R 2017 *Appl. Phys. B* **123** 112
- [22] Vogt S, Lisdat C, Legero T, Sterr U, Ernsting I, Nevsky A, Schiller S 2011 *Appl. Phys. B* **104** 741
- [23] Xu Q F, Liu H, Lu B Q, Wang Y B, Yin M J, Kong D H, Ren J, Tian X, Chang H 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 100201
- [24] Geng T, Yan S B, Wang Y H, Yang H J, Zhang T C, Wang J M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5104 (in Chinese) [耿涛, 闫树斌, 王彦华, 杨海菁, 张天才, 王军民 2005 物理学报 **54** 5104]
- [25] Fu J X, Li Y M, Chen X Z, Yang D H, Wang Y Q 2001 *Acta Opt. Sin.* **21** 414 (in Chinese) [付军贤, 李义民, 陈徐宗, 杨东海, 王义道 2001 光学学报 **21** 414]
- [26] Brzozowski T M, Maczynska M, Zawada M, Zachorowski J, Gawlik W 2002 *J. Opt. B* **4** 62
- [27] Tian X 2010 *M.S. Thesis* (Xi'an: National Time Service Center, University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [田晓 2010 硕士学位论文 (西安: 中国科学院大学国家授时中心)]
- [28] Wang Y Q 2007 *Laser Cooling and Trapping of Atoms* (Beijing: Peking University Press) p294 (in Chinese) [王义道 2007 原子的激光冷却与陷阱 (北京: 北京大学出版社) 第 294 页]
- [29] Lett P D, Watts R N, Westbrook C I, Phillips W D 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 169
- [30] Savard T A 1998 *Ph.D. Dissertation* (Durham: Duke University)
- [31] Ovchinnikov Y B 2008 *Eur. Phys. J. Special Topics* **163** 95



# Miniaturization of physics system in Sr optical clock\*

Zhao Fang-Jing<sup>1)2)</sup> Gao Feng<sup>1)†</sup> Han Jian-Xin<sup>1)2)</sup> Zhou Chi-Hua<sup>1)</sup> Meng Jun-Wei<sup>1)</sup>  
Wang Ye-Bing<sup>1)2)</sup> Guo Yang<sup>1)2)</sup> Zhang Shou-Gang<sup>1)</sup> Chang Hong<sup>1)‡</sup>

1) (*Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)

2) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 4 December 2017; revised manuscript received 21 December 2017)

## Abstract

The compactness and robustness of the vacuum setup are the major limitations to develop transportable and space-borne optical clocks. The first step in the engineering challenge is to reduce volume and weight with respect to a stationary system. In this paper, we present the realization of a miniaturized vacuum system by building two anti-Helmholtz coils inside the vacuum magneto-optical-trap (MOT) chamber. The built-in coils are specially designed to minimize the distance between the coils, and in this way it is possible to reduce the current needed to realize a typical magnetic gradient of 40 Gs/cm required for blue MOT. When the MOT coil current is 2 A, an axial magnetic field gradient of 43 Gs/cm is obtained in the center of the MOT, which is enough for the first stage Doppler cooling. This novel design allows us to reduce size, weight and power consumption with respect to a traditional laser cooling apparatus, and simultaneously avoid complicating the water cooling equipment. Our vacuum system has a size of 60 cm × 20 cm × 15 cm, about 1/10 of the original system in the laboratory. In addition, the circularly polarized Zeeman slowing laser is sent to counter propagating atomic beam, and atoms at a few hundred meters per second are now routinely slowed down to velocities of tens of meters per second. As a result, about 16.4% of the atoms are actually trapped into the blue MOT. The final temperature of the blue MOT is approximately 10.6 mK, and the internal diameter is 1.5 mm by observing the expansion of the atoms from the MOT. The populations of cold atoms finally trapped in the MOT are  $1.6 \times 10^6$  of  $^{88}\text{Sr}$  and  $1.5 \times 10^5$  of  $^{87}\text{Sr}$ . The  $^1\text{S}_0 \rightarrow ^1\text{P}_1$  transition used for the blue MOT is not perfectly closed due to the decay channel of the  $5\text{p}^1\text{P}_1 \rightarrow 4\text{d}^1\text{D}_2$ , and a part of atoms are stored in the  $^3\text{P}_2$  and  $^3\text{P}_0$  states. To prevent the atoms from losing, 707 and 679 nm repumping lasers are employed to recycle these atoms in the  $^3\text{P}_1$  state, and then the atoms decay to the ground state  $^1\text{S}_0$ . Now the typical number of loaded atoms dramatically increases by 5 times compared with before. The slowing efficiency of Zeeman slower is also optimized for the operation with deceleration related to the parameter of magnet length, which uses more effectively available magnetic field distribution, in contrast to the usual constant deceleration mode. Our future work will focus on constructing a Zeeman slower combined with permanent magnets or an electric magnet for better tuning of the magnetic field.

**Keywords:** compact Sr optical clock, built-in anti-Helmholtz coil, space-borne cold atom optical clock

**PACS:** 06.30.Ft, 37.10.De, 37.10.Gh, 37.10.Vz

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172584

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11603030), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11474282, 61775220), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB21030700), and the Key Research Project of Frontier Science of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDB-SSW-JSC004).

† Corresponding author. E-mail: [summit\\_gao@ntsc.ac.cn](mailto:summit_gao@ntsc.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [changhong@ntsc.ac.cn](mailto:changhong@ntsc.ac.cn)