

可移动型铯原子光钟的系统研制与钟跃迁谱线探测

郭峰^{1,2}, 孔德欢^{1,2}, 张强^{1,2}, 王叶兵^{1**}, 常宏^{1,2*}

¹中国科学院时间频率基准重点实验室, 陕西 西安 710600;

²中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

摘要 主要介绍了可移动铯原子光晶格钟的系统研制和钟跃迁谱线探测。光钟系统采用尺寸为120 cm×50 cm×60 cm的小型化物理系统,通过光纤将模块化的子光路系统与物理系统连接。经过一级461 nm激光和二级689 nm激光冷却后,得到原子数目为 1.02×10^6 、原子温度为5.45 μ K的冷原子团。利用具有“魔术波长”的晶格光实现⁸⁷Sr的一维光晶格装载,晶格寿命为434 ms,晶格中原子温度为4.63 μ K。在具有超窄线宽的698 nm钟激光探测下,得到边带可分辨的钟跃迁谱、窄线宽简并谱、自旋极化谱及拉比振荡曲线。经钟激光探测后,得到的自旋极化谱的谱线线宽为11.79 Hz,接近傅里叶探测极限的理论值,为可移动光钟的闭环工作提供了频率参考。

关键词 原子与分子物理学;可移动⁸⁷Sr光钟;小型化光钟;一维光晶格;钟跃迁谱线探测

中图分类号 O562.3+2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0902001

System Development and Clock Transition Spectroscopy Detection of Transportable ⁸⁷Sr Optical Clock

Guo Feng^{1,2}, Kong Dehuan^{1,2}, Zhang Qiang^{1,2}, Wang Yebing^{1**}, Chang Hong^{1,2*}

¹Key Laboratory of Time & Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences,
Xi'an, Shaanxi 710600, China;

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

Abstract This work mainly presents the system development and clock transition spectroscopy detection of a transportable ⁸⁷Sr optical lattice clock. The optical clock system uses a miniaturized physical system with a size of 120 cm×50 cm×60 cm, which connects the modularized sub-optical system through fibers. After subsequent to cooling with a first stage 461 nm laser and a second stage 689 nm laser, a cold atomic cloud with an atomic number of 1.02×10^6 and an atomic temperature of 5.45 μ K is obtained. The lattice light with a magic-wavelength is used to load ⁸⁷Sr in one-dimensional optical lattice with a lifetime of 434 ms, and an atomic temperature in lattice of 4.63 μ K. The atoms are detected using an ultra-narrow linewidth 698 nm clock laser to obtain the clock transition spectrum with distinguishable sidebands, the degenerate spectrum with narrow linewidth, the spin-polarized spectrum, and the Rabi-flopping curve. The spin-polarized spectrum with linewidth of 11.79 Hz is obtained under the condition of clock laser interrogating, which is fairly close to the theoretical value of Fourier limit linewidth and can be as the frequency reference for the future optical clock closed-loop.

Key words atom and molecular physics; transportable ⁸⁷Sr optical clock; miniaturized optical clock; one-dimensional optical lattice; spectroscopy detection of clock transition

OCIS codes 020.3320; 020.7010; 300.6210

1 引 言

目前,中性原子光钟系统的稳定度已达到 10^{-19} 量级,比现有的复现秒定义的铯原子喷泉钟高出近

3个量级^[1-3]。作为下一代时频基准的有力候选对象之一^[4],铯原子光晶格钟一直是国际上多个实验室研究的热点^[5-7]。近年来,国际上多个研究组对光钟的研制取得重大进展,但大多数光钟系统复杂、体

收稿日期: 2019-12-09; 修回日期: 2020-01-15; 录用日期: 2020-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(11803042, 11474282, 61775220)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZBD-SSW-JSC004)、中国科学院青年创新促进会资助课题(2019400)

* E-mail: changhong@ntsc.ac.cn; ** E-mail: wangyebing@ntsc.ac.cn

积巨大,对工作环境要求极其苛刻,只能在实验室中使用,这限制了光钟在科研和工程上的广泛应用。目前欧盟和美国都开展了空间光钟项目,这对基本物理量测量^[8]和重要仪器的精度提高起到关键作用,可移动光钟的研制与精度的提高对空间光钟的发展至关重要。可移动光钟的钟跃迁谱线具有对外界电场、磁场、热力场及重力场变化高度敏感的特点,通过研究外场对谱线造成的影响,可以将光钟作为测量这些势场的探测器。地面光钟每 10 cm 的高度变化会带来 10^{-17} 量级的频率变化,利用一台系统不确定度优于 10^{-17} 量级的可移动光钟就可以精确测量地表的重力势分布^[9]。可移动光钟在测量引力波方面也有着广泛的应用前景^[10]。目前,异地的光钟比对主要依赖全球导航卫星系统(GNSS)和远距离光纤进行^[11-12],利用可移动光钟就可以方便快捷地进行两地的钟信号比对,极大地节省了成本,提高了精度。

国际上多个研究组已开展了可移动光钟的研制。2014年,意大利 LENS 小组研制的可移动玻色子⁸⁸Sr 光晶格钟^[6]的物理系统体积小于 2 m^3 ,系统不确定度达 7.0×10^{-15} 。2017年,德国 PTB 小组实现了车载⁸⁷Sr 光钟,整个实验系统的尺寸缩小为 $2.2\text{ m} \times 3\text{ m} \times 2.2\text{ m}$,实现了 7.4×10^{-17} 系统不确定度,这是目前报道的可移动光钟的最高精度^[13]。在国内,北京大学研制的热原子光钟,包括 2017 年完成的小型化铷光频标^[14-15],在 80 s 时间内稳定度达 2.1×10^{-15} ;2019 年利用全密封真空管技术实现的体积约为 0.3 m^3 的钙光频标^[16],在 1600 s 时间内稳定度达 1.8×10^{-15} 。2016 年,中国科学院武汉物理与数学研究所完成了可搬运钙离子光钟,体积小于 0.54 m^3 ,实现了 7.8×10^{-17} 系统不确定度^[17-18]。

本文主要介绍基于费米子⁸⁷Sr 的可移动光钟的系统研制和钟跃迁谱线探测。光钟物理系统固定在一个双层光学面板上,尺寸缩小为 $120\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 60\text{ cm}$,同时将各个子光路系统进行小型化和模块化处理,激光通过光纤输入到物理系统中与铷原子相互作用。各个子光路系统相互独立,有利于搬运过程中光钟的维修与替换。通过两级激光冷却和一维光晶格装载,晶格中原子数目约为 10^4 。利用钟激光对原子进行探测,得到边带可分辨的钟跃迁谱线。根据红蓝边带推算出晶格中原子轴向温度为 $4.63\text{ }\mu\text{K}$;之后通过减小钟激光功率和进行剩磁场补偿,在钟激光探测下得到线宽为 14.50 Hz 的简并谱;在系统量子化轴方向上添加偏置磁场,使原子能级分

裂,之后导入极化光得到自旋极化谱,谱线线宽被压窄到 11.79 Hz ;在改变钟激光探测时间后进行测量,得到磁量子数 $m_F = -9/2$ 的自旋极化谱的拉比振荡曲线。

2 实验系统

2.1 铷原子能级结构

图 1 是可移动⁸⁷Sr 光钟涉及的能级结构图。其中 461 nm 一级冷却激光对应 $(5s^2)^1S_0$ 到 $(5s5p)^1P_1$ 的偶极跃迁,自然线宽为 32 MHz ,多普勒冷却极限为 $770\text{ }\mu\text{K}$ 。 679 nm 和 707 nm 的重泵浦激光分别对应 $(5s5p)^3P_0$ 到 $(5s6s)^3S_1$ 的跃迁和 $(5s5p)^3P_2$ 到 $(5s6s)^3S_1$ 的跃迁,将处于能级寿命较长的 3P_0 和 3P_2 的原子泵浦回基态 $(5s^2)^1S_0$,形成一级冷却准封闭循环。二级冷却 689 nm 激光对应单态 $(5s^2)^1S_0$ ($F=9/2$) 到三重态 $(5s5p)^3P_1$ ($F=11/2$) 的跃迁,自然线宽仅为 7.6 kHz ,其冷却极限可以达到 180 nK 。除此之外,加入一束相对于二级冷却俘获光失谐 1.46 GHz 的 689 nm 激光作为匀化光,对应 $(5s^2)^1S_0$ ($F=9/2$) 到 $(5s5p)^3P_1$ ($F=9/2$) 的跃迁,通过改变原子基态各磁子能级分布来提高二级冷却的效率,并且在之后的自旋极化谱探测中将匀化光作为极化光使用。在两个阶段冷却后,原子被装载在由“魔术波长”为 813 nm 的激光(图中未作出)形成的光晶格势阱中。之后利用 698 nm 钟激光对原子进行探测,对应 $(5s^2)^1S_0$ ($F=9/2$) 到 $(5s5p)^3P_0$ ($F=9/2$) 的跃迁,自然线宽仅为 1 mHz 。通过钟激光跃迁谱线将 698 nm 激光器锁在原子跃迁频率上,锁定后的钟激光频率即为光钟输出的频率信号。

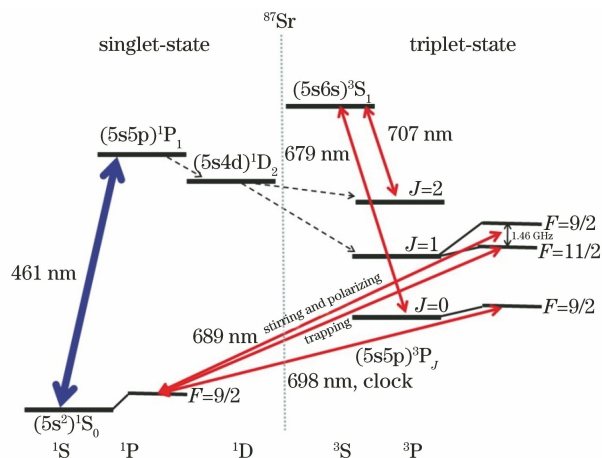


图 1 ⁸⁷Sr 光钟涉及的能级结构

Fig. 1 Energy level structure involved in ⁸⁷Sr optical clock

2.2 物理系统

可移动光钟主要包括 3 个部分:物理系统(用于原子的制备和原子与光场、磁场的相互作用)、光路系统(用于原子的冷却光与其他激光的制备)、控制系统(主要利用 Labview 软件和 NI 硬件系统实现时序控制,本文不作详述)。

图 2(a)为可移动光钟的物理系统装置图。整个物理系统固定在不锈钢双层面包板上,为了减弱杂散磁场对钟激光探测的影响,物理系统采用无磁不锈钢材料。物理系统包括原子制备部分(用于原子加热和准直)、Zeeman 减速器和磁光阱(MOT)腔部分(用于原子束减速、俘获、晶格装载和钟激光探测)。这两部分分别由抽气速率为 25 L/s 和 40 L/s 的离子泵维持真空,工作时真空度分别为 1.0×10^{-6} Pa 和 7.1×10^{-8} Pa。实验中还使用了独立于主物理系统的铯原子锁频系统(未在图 2 显示),通过观测铯原子的荧光光谱对 461 nm 激光器进行锁频。

实验中将铯炉加热到 460 °C 后,铯原子通过孔径为 0.2 mm 的毛细管形成热原子束,原子束先经过准直光窗口,利用水平、竖直两个方向对射的准直光对原子束进行二维准直;然后打开插板阀,通过 Zeeman 减速器的原子和减速光作用后速度减小,其中 Zeeman 减速器的作用是补偿原子减速过程中的多普勒频移,使具有固定失谐的减速光对原子束持续减速^[19]。实验中设计了有效长度为 18 cm 的 Zeeman 减速器,采用 8 个独立供电的线圈。如图 2(b)所示,MOT 腔由反亥姆霍兹线圈和 13 个 CF16 特制窗口片组成。其中反亥姆霍兹线圈由一对电流大小相同、方向相反的线圈组成,线圈半径为 64 mm,当实验中导入 12 A 的电流时会产生 46 Gauss/cm 的轴向梯度磁场。黑体辐射频移是影响光钟不确定度的重要因素之一,为了减小黑体辐射频移,防止线圈过热,反亥姆霍兹线圈采用沉浸式水冷控温手段。为了减小环境杂散磁场对 MOT 腔中心处原子的干扰,实验中采用骨架大小为 14 cm × 19 cm × 21.4 cm 的 3 组亥姆霍兹线圈对 MOT 区杂散磁场进行补偿,利用压控恒流源对三组线圈分别供电,形成三维剩磁补偿磁场。

2.3 光学系统

光学系统分为 4 个子光路:一级冷却光路,二级冷却光路,晶格光光路及钟激光光路。各个子光路系统输出的激光通过光纤被导入到物理系统中,在下层面板上经过光束处理后通过笼式结构被导入射到 MOT 腔窗口。实验所用的激光器全部采用

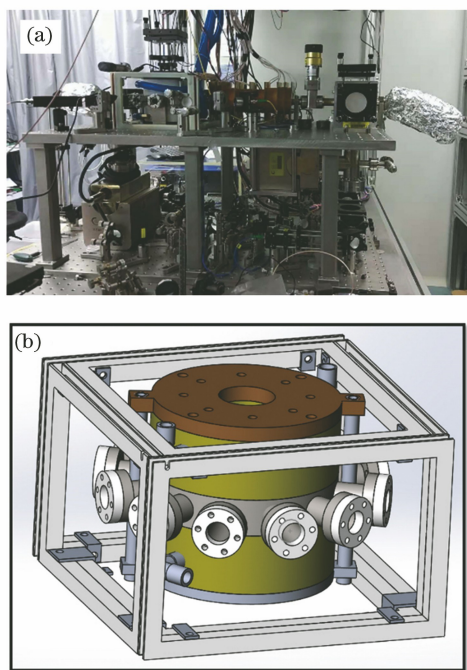


图 2 可移动光钟物理系统。(a)实物图;
(b) MOT 腔和剩磁补偿线圈三维图

Fig. 2 Physical system of transportable optical clock. (a) Physical drawing; (b) three-dimensional drawing of MOT cavity and residual magnetic compensation coils

Toptica 公司生产的半导体激光器。在一级冷却实验中,热原子束先通过两组对射的 461 nm 二维准直光来减小径向发散角,在 Zeeman 减速器中与减速光作用,最概然速率由 362 m/s 减到 57 m/s 左右。铯原子在反亥姆霍兹线圈(磁场梯度为 46 Gauss/cm)和由三组对射的俘获光形成的 MOT 中被俘获。导入重泵浦光以提高原子俘获效率,并得到一级冷却原子团,如图 3(a)所示,原子数目为 1.7×10^7 ,利用飞行时间法^[20]测得原子团温度为 5.1 mK。

二级冷却红 MOT 需要借助时序控制实现。被 1000 ms 的蓝 MOT 俘获后,关断 461 nm 激光和重泵浦光,反亥姆霍兹线圈中的磁场梯度由 46 Gauss/cm 降为 3 Gauss/cm;之后导入 689 nm 的俘获光和匀化光,为提高俘获效率,对俘获光和匀化光增加频率调制,10 ms 后磁场梯度由 3 Gauss/cm 逐渐提高到 10 Gauss/cm;压缩原子团体积,然后关掉 689 nm 激光频率调制,将俘获光和匀化光功率降到原来的 2%,磁场梯度维持在 10 Gauss/cm,持续 30 ms 后通过电子倍增式电荷耦合器件(EMCCD)观测到红 MOT 原子团,如图 3(b)所示。

其高斯半径为 0.34 mm,光电倍增管(PMT)测得一级冷却到二级冷却的原子转换效率为 6%,由此推

算出红 MOT 原子数目为 1.02×10^6 ,利用飞行时间法测得原子温度为 5.45 μ K。

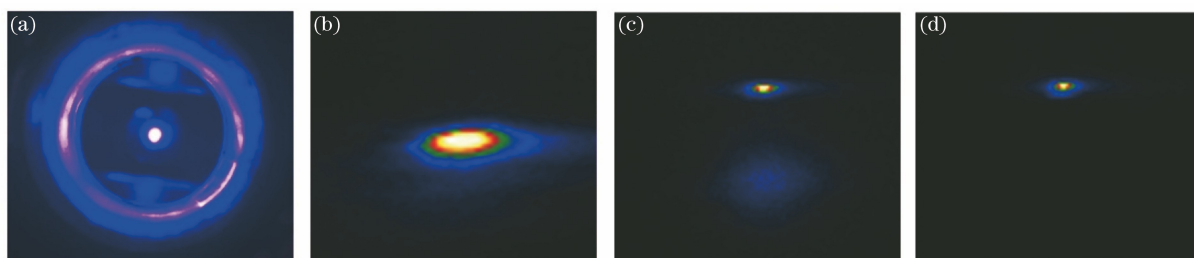


图 3 不同实验阶段的原子团。(a)一级冷却蓝 MOT 原子团;(b)二级冷却红 MOT 原子团;
(c)未载入晶格的原子与晶格原子团分离;(d)晶格原子团

Fig. 3 Atomic clouds at different experimental stages. (a) Blue MOT atomic cloud after first stage of cooling; (b) red MOT atomic cloud after second stage of cooling; (c) separation between atoms not loaded into lattice and atomic cloud in lattice; (d) atomic cloud in lattice

经过两级冷却后,导入晶格光对原子进行一维光晶格装载,将原子限制在 Lamb-Dick 区域,进一步减小原子碰撞频移^[21]。将晶格光波长调至“魔术波长”813.43 nm^[22],以减小钟跃迁谱线的 AC Stack 效应展宽。经格兰棱镜转为竖直偏振的晶格光,经过凹反镜的反射后,入射光和反射光在原子团处腰斑重合,形成驻波场。如图 3(c)所示,在晶格光功率为 440 mW 时,二级冷却关闭 20 ms 后未载入晶格的原子在重力作用下与晶格中的原子发生分离,晶格原子团如图 3(d)所示,囚禁原子数约为 10^4 。晶格中的原子数呈 $e^{-t/\tau}$ 的指数衰减,其中 τ 为晶格寿命,461 nm 探测光在不同时间点与晶格中的原子发生作用,荧光信号衰减曲线如图 4 所示,利用衰减函数拟合得到晶格寿命为 434 ms,满足钟探测的需要。

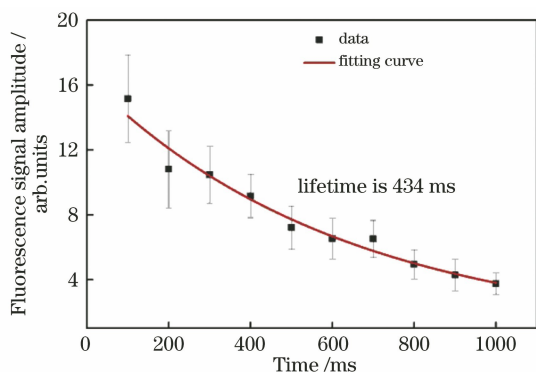


图 4 一维光晶格原子寿命

Fig. 4 Atomic lifetime in one-dimensional optical lattice

凹反镜对 698 nm 钟激光具有高透射率,通过 PDH(Pound-Drever-Hall)技术被锁定到超稳腔的钟激光在噪声抑制后线宽约为 1 Hz,经过扫描声光调制器(AOM)和格兰棱镜后,竖直偏振方向的钟激

光在 MOT 腔中与晶格光重合。在 MOT 腔处各光束的作用方向如图 5 所示。461 nm 俘获光与 689 nm 俘获光、匀化光合束后两次通过 MOT,在 MOT 上方反射镜前加入一个机械开关以控制 689 nm 极化光单次通过 MOT。813 nm 晶格光经凹反镜反射后与入射光在原子团处束腰重合,获得了一维光晶格势阱装载原子,该原子被单次通过的 698 nm 钟激光作用。重泵浦光与 461 nm 探测光合束后两次通过 MOT 腔,探测原子的荧光信号被垂直方向的 PMT 采集,同时利用电子倍增电荷耦合器件(EMCCD)对原子团进行观测。

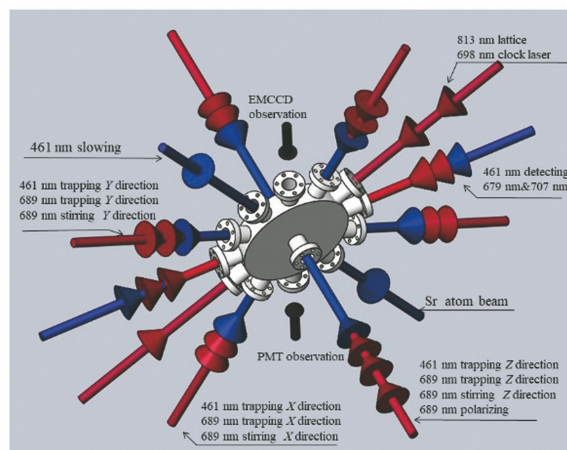


图 5 MOT 腔各光束的作用方向

Fig. 5 Direction of each beam in MOT cavity

3 实验结果

3.1 边带可分辨谱和窄线宽简并谱

实验中采用归一化探测方法^[23]对钟跃迁谱线进行探测,在晶格装载完 70 ms 后,加入光功率为 500 μ W 的 698 nm 钟激光以探测原子,以 100 Hz

步长扫描 698 nm 钟激光频率,得到包括红蓝边带在内的钟跃迁谱线,如图 6(a)所示,其中 FWHM 为半峰全宽。通过谱线得到光晶格轴向囚禁频率 ν_Z 为 75 kHz,晶格中原子轴向温度^[24]表示为

$$T_Z \approx \frac{h\nu_Z}{k_B} \left(\ln \frac{A_{\text{red, sb}}}{A_{\text{blue, sb}}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

式中: k_B 为玻尔兹曼常数; $A_{\text{red, sb}}$ 、 $A_{\text{blue, sb}}$ 分别为红蓝边带的面积,由图 6(a)得 $A_{\text{red, sb}}/A_{\text{blue, sb}} = 2.18$ 。计算得晶格内原子轴向温度 T_Z 为 4.63 μK 。利用轴向囚禁频率可以得到晶格势阱深度 $U_0 = m\nu_Z^2\lambda^2/2$ ^[25],其中 m 为铯原子的质量, λ 为晶格光波长,则晶格势阱深度 U_0 为 19.59 μK 。利用 Lorentz 线型

拟合得到载波线宽为 703.1 Hz,引起谱线展宽的主要原因是 698 nm 钟激光的功率展宽。将钟激光功率减小到 200 nW,在钟激光探测时加入剩磁补偿,以减小杂散磁场对钟跃迁谱线的磁场展宽,三个方向剩磁补偿的大小分别为竖直方向 19.89 μT ,东西方向 0.84 μT ,南北方向 47.64 μT ,接近地磁场强度 46 μT 。钟跃迁谱线线宽受限于傅里叶极限^[26],傅里叶极限表达式为 $\Delta\nu_{\text{Fourier}} = 0.89/t_R$,在钟激光探测时间 t_R 为 80 ms 时,计算得到傅里叶探测极限为 11.13 Hz,测量得到图 6(b)中简并谱的谱线线宽为 14.50 Hz,接近傅里叶极限理论值。

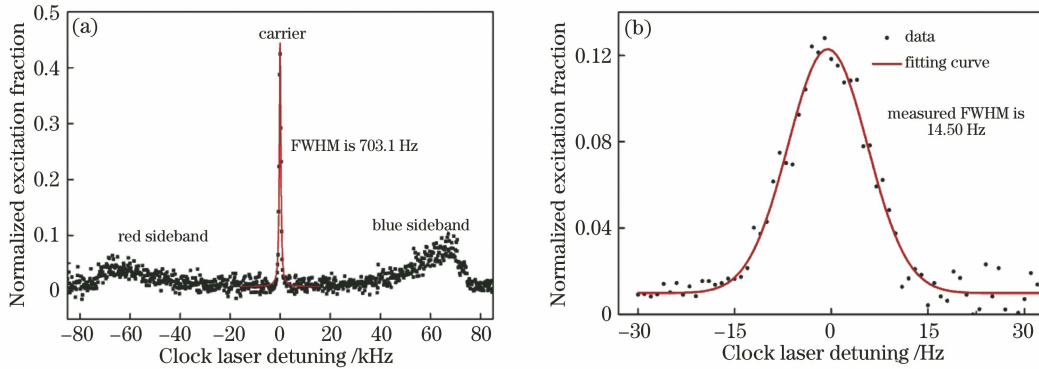


图 6 钟跃迁谱线。(a)边带可分辨谱;(b)窄线宽简并谱
Fig. 6 Clock transition spectra. (a) Spectrum with distinguishable sidebands;
(b) degenerate spectrum with narrow linewidth

3.2 自旋极化谱

⁸⁷Sr 存在核自旋 $I=9/2$,对应 $(5s^2)^1S_0 (F=9/2)$ 到 $(5s5p)^3P_0 (F=9/2)$ 的钟跃迁,偏置磁场会使原子自旋能级发生塞曼分裂。光钟闭环锁定最终采用的频率参考为磁量子数 $m_F = \pm 9/2$ 对应的 π 跃迁谱线,为提高原子利用率和信噪比,同时避免牵引效应带来的频移,钟激光探测前在 MOT 腔竖直方向上导入一束单次通过的 689 nm 极化光,频率对应 $(5s^2)^1S_0 (F=9/2)$ 到 $(5s5p)^3P_1 (F=9/2)$ 的跃迁。调节波片使极化光偏振为右旋圆偏振 σ^+ 或左旋圆偏振 σ^- ,将原子布局到基态 $m_F = +9/2$ 或 $m_F = -9/2$ 上,最终得到的跃迁谱线对应 $(m_F = +9/2) - (m_F = +9/2)$ 和 $(m_F = -9/2) - (m_F = -9/2)$ 。实验中在二级冷却作用结束 55 ms 后,在竖直方向(系统量子化轴方向)上加入 27.3 μT 的偏置磁场,导入功率为 0.27 mW 的极化光作用 15 ms,极化过程完毕后关掉极化光。将偏置磁场增加到 70 μT ,在钟激光功率为 200 nW,探测时间为 80 ms 的条件下,极化光为 σ^+ 时得到图 7 左边 $m_F = +9/2$ 的跃迁

峰,极化光为 σ^- 时得到图 7 右边 $m_F = -9/2$ 的跃迁峰,利用 Lorentz 线型拟合得到谱线线宽为 11.79 Hz,接近傅里叶极限的理论值,激发率相比简并谱提高约 5 倍。自旋极化谱作为可移动光钟下一步闭环锁定^[27]的直接频率参考,是光钟系统的重要一环。

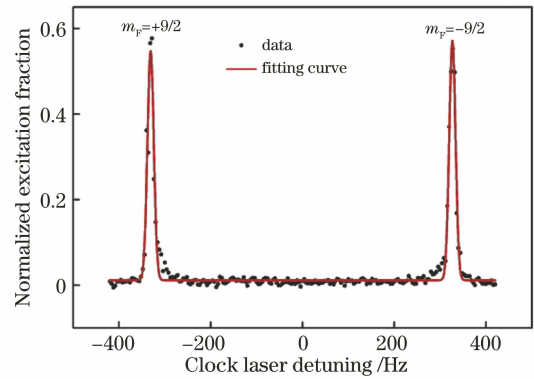


图 7 自旋极化谱
Fig. 7 Spin-polarized spectrum

3.3 拉比振荡

得到自旋极化谱后,将钟激光频率锁定在 $m_F =$

-9/2 对应的跃迁频率上,改变钟激光探测时间,得到对应的原子激发率,如图 8 所示。利用公式 $p_{ex} = a[1 - \cos(2\pi\Omega\Delta t)\exp(-\Delta t/\tau')]$,拟合得到的拉比振荡曲线如图 8 实线所示,其中 a 为退相干后的原子激发率, Ω 为拉比频率, Δt 为钟激光探测时间, τ' 为退相干时间。拟合后得到拉比频率 Ω 为 4.8 Hz,退相干时间 τ' 为 210 ms。在钟激光探测时间为 100 ms 时原子激发率达到最大。

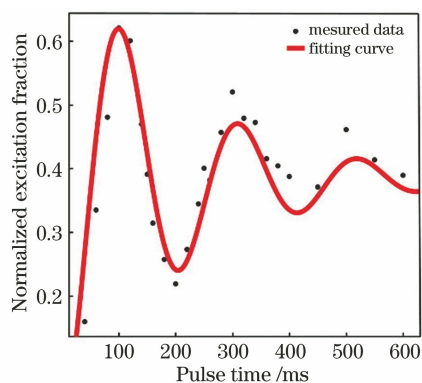


图 8 拉比振荡曲线

Fig. 8 Rabi-flopping curve

4 结 论

主要介绍了可移动铯原子光钟的系统研制和钟跃迁谱线探测。相比传统的光钟系统,可移动光钟在搭建物理系统时采用了更紧凑的设计,光路系统兼顾小型化和稳定性,最终通过光纤将激光导入到物理系统中。完成⁸⁷Sr 的两级冷却和一维光晶格装载,晶格中原子温度为 4.63 μ K,晶格寿命为 434 ms。具有超窄线宽的 698 nm 钟激光在不同条件下探测,得到边带可分辨谱、窄线宽简并谱、自旋极化谱及拉比振荡曲线。在钟激光探测时间为 80 ms 时得到谱线线宽为 11.79 Hz 的自旋极化谱,该谱线线宽接近傅里叶探测极限的理论值 11.13 Hz,为光钟下一步闭环工作提供了频率参考。在完成光钟闭环和评估工作后,可移动铯原子光晶格钟可用于重力常数分布的精密测量,同时为空间光钟的研制提供了技术参考。

参 考 文 献

- [1] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [2] Nicholson T L, Campbell S L, Hutson R B, et al. Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6896.
- [3] Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, et al. A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock[J]. *Science*, 2017, 358(6359): 90-94.
- [4] Grebing C, Al-Masoudi A, Dörscher S, et al. Realization of a timescale with an accurate optical lattice clock[J]. *Optica*, 2016, 3(6): 563-569.
- [5] Ludlow A D, Ye J. Progress on the optical lattice clock[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 499-505.
- [6] Poli N, Schioppo M, Vogt S, et al. A transportable strontium optical lattice clock[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(4): 1107-1116.
- [7] Ohmae N, Sakama S, Katori H. High-stability optical frequency transfer with all-fiber architecture for optical lattice clocks [J]. *Electronics and Communications in Japan*, 2019, 102(5): 43-48.
- [8] Altschul B, Bailey Q G, Blanchet L, et al. Quantum tests of the Einstein equivalence principle with the STE-QUEST space mission[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1): 501-524.
- [9] Grotti J, Koller S, Vogt S, et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock [J]. *Nature Physics*, 2018, 14(5): 437-441.
- [10] Kolkowitz S, Pikovski I, Langellier N, et al. Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks[J]. *Physical Review D*, 2016, 94(12): 124043.
- [11] Lopez O, Haboucha A, Chanteau B, et al. Ultra-stable long distance optical frequency distribution using the internet fiber network[J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23518-23526.
- [12] Bercy A, Lopez O, Pottie P E, et al. Ultrastable optical frequency dissemination on a multi-access fibre network[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(7): 189.
- [13] Koller S B, Grotti J, Vogt S, et al. Transportable optical lattice clock with 7×10^{-17} uncertainty [J]. *Physical Review Letter*, 2017, 118(7): 073601.
- [14] Zhang S N, Zhang X G, Cui J Z, et al. Compact Rb optical frequency standard with 10^{-15} stability [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(10): 103106.
- [15] Chang P Y, Zhang S N, Shang H S, et al. Stabilizing diode laser to 1 Hz-level Allan deviation with atomic spectroscopy for Rb four-level active optical frequency standard [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(11): 196.
- [16] Shang H S, Zhang X G, Zhang S N, et al. Miniaturized calcium beam optical frequency standard using fully-sealed vacuum tube with 10^{-15} instability [J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30459-30467.

- [17] Shang J J, Cao J, Cui K F, et al. A compact, sub-Hertz linewidth 729 nm laser for a miniaturized $^{40}\text{Ca}^+$ optical clock [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 410-414.
- [18] Cao J, Zhang P, Shang J, et al. A compact, transportable single-ion optical clock with 7.8×10^{-17} systematic uncertainty[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(4): 112.
- [19] Han J X, Lu X T, Lu B Q, et al. Influence of cut-off speed on atomic number of blue magneto-optical trap in Zeeman slower of strontium optical clock[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0702001.
韩建新, 卢晓同, 卢本全, 等. 铯光钟 Zeeman 减速器中截止速度对蓝磁光阱原子数的影响[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0702001.
- [20] Xie Y L, Lu B Q, Liu H, et al. Achieving the second Doppler cooling and measuring the temperature of strontium atoms [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2015, 21(2): 136-142.
谢玉林, 卢本全, 刘辉, 等. 铯原子二级 Doppler 冷却及温度的测量[J]. *量子光学学报*, 2015, 21(2): 136-142.
- [21] Ido T, Katori H. Recoil-free spectroscopy of neutral Sr atoms in the lamb-dicke regime [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(5): 053001.
- [22] Brown R, Phillips N, Beloy K, et al. Hyperpolarizability and operational magic wavelength in an optical lattice clock [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(25): 253001.
- [23] Guo Y, Yin M J, Xu Q F, et al. Interrogation of spin polarized clock transition in strontium optical lattice clock[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(7): 070601.
郭阳, 尹默娟, 徐琴芳, 等. 铯原子光晶格钟自旋极化谱线的探测[J]. *物理学报*, 2018, 67(7): 070601.
- [24] McDonald M, McGuyer B, Iwata G, et al. Thermometry via light shifts in optical lattices [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(2): 023001.
- [25] Blatt S, Thomsen J W, Campbell G K, et al. Rabi spectroscopy and excitation inhomogeneity in a one-dimensional optical lattice clock [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(5): 052703.
- [26] Boyd M M. High precision spectroscopy of strontium in an optical lattice: towards a new standard for frequency and time [D]. Colorado: University of Colorado, 2007: 99.
- [27] Wang Y B, Yin M J, Ren J, et al. Strontium optical lattice clock at the national time service center [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(2): 023701.