

基于型材网格平台的紧凑⁸⁵Rb 喷泉钟光路设计

姬清晨^{1,2}, 董日昌³, 王倩², 张宁², 赵伟靖², 王燕^{1*}, 魏荣^{2**}

¹上海大学理学院, 上海 200444;

²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;

³中国科学院微小卫星创新研究院导航卫星研究所, 上海 201203

摘要 原子喷泉钟是具有重要应用价值的冷原子装置, 紧凑型光学系统设计是研制可搬运冷原子喷泉钟的关键技术之一。介绍了一种以通用铝型材搭建的网格化光学平台, 并基于此平台实现了⁸⁵Rb 喷泉钟紧凑型光路。通过仿真, 证明了该型材网格平台在二维方向均具有较好的力学性能。在该平台上, 设计并搭建了四倍频移、注入锁定放大、冷却光路、再泵浦光路和探测光路等单元模块, 满足了喷泉钟的所有要求。该网格平台面积为 50 cm×50 cm, 高度为 2.5~3 cm。该光路实现了 8 个月以上的持续运行, 功率的起伏小于 5%。基于该紧凑型光学系统, 完成了后续的⁸⁵Rb 喷泉钟的物理实验和微波实验。

关键词 原子与分子物理学; 原子喷泉钟; ⁸⁵Rb; 型材网格; 光学平台

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1802001

Design of Compact ⁸⁵Rb Fountain Optical Path Based on Profile Gridded Platform

Ji Qingchen^{1,2}, Dong Richang³, Wang Qian², Zhang Ning²,
Zhao Weijing², Wang Yan^{1*}, Wei Rong^{2**}

¹Department of Physics, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³Institution of Navigation Satellite, Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 201203, China

Abstract The atomic fountain clock is one cold atom applied apparatus possessing important applications. Compact laser system design is one of the key techniques for a portable cold atomic fountain clock. This paper introduces a gridded optical platform built with the general aluminum profiles, and based on it, we construct a compact optical path for the ⁸⁵Rb fountain clock. Through simulation, it is proved that the profile gridded platform has better mechanical properties in two-dimensional direction. On this platform, we design and build the modules of such as four-pass frequency shift, injection locked amplifier, cooling optical path, repumping and probing paths to satisfy all requirements of an atomic fountain clock. The platform covers an area of 50 cm×50 cm and has a height of 2.5-3 cm. The optical path has been running continuously for more than 8 months with a power fluctuation less than 5%. Based on the compact optical system, we have completed the subsequent physical and microwave experiments of ⁸⁵Rb fountain clocks.

Key words atomic and molecular physics; atomic fountain clock; ⁸⁵Rb; profile grid; optical platform

OCIS codes 020.2930; 300.6210

1 引 言

自激光冷却技术发展以来, 基于冷原子的装置

包括原子喷泉钟^[1]、原子磁强计^[2]、原子重力仪^[3-4]、原子干涉仪^[5]等在计量学、导航定位、资源勘探等诸多领域发挥着重要作用, 以冷原子作为工作介质的

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-05-31; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB21030200)

* E-mail: yanwang@staff.shu.edu.cn; ** E-mail: weirong@siom.ac.cn

实验平台被放置在落塔^[6]、探空火箭^[7-8]、卫星及空间站^[9-10]上,用于检验各种物理效应。其中,冷原子喷泉钟的不确定度已达到 10^{-16} 量级,并参与国际原子时的维持^[11]。目前,喷泉钟的工作介质主要是 ^{133}Cs 和 ^{87}Rb 。本文研究的是国际上首台 ^{85}Rb 原子喷泉钟。 ^{85}Rb 是精密测量领域非常重要的工作介质,具有很高的研究价值^[12],已应用于 Bose-Einstein 凝聚物^[13]、原子干涉仪^[14]、原子钟^[15]等研究中。喷泉钟是研究 ^{85}Rb 的重要工具。 ^{85}Rb 具有基态超精细跃迁频率(3.0 GHz),这意味着在相同条件下 ^{85}Rb 钟的短期稳定度比 ^{133}Cs (9.2 GHz)和 ^{87}Rb (6.8 GHz)差,但其优点也很明显^[12,16-17],例如,与1977年发布的 ^{85}Rb 钟频的不确定度 2×10^{-9} ^[18]相比, ^{85}Rb 钟频的测量精度提高了6~7个数量级,可以通过比较 ^{87}Rb 和 ^{85}Rb 的钟频来测量精细结构常数的含时变化等^[19]。

制备冷原子需进行复杂的光路设计,对其工作平台也要充分考虑,以满足系统的性能要求。例如,对于欧洲航天局(European Space Agency, ESA) PHARAO 计划的空间冷原子钟^[20]、我国第一台空间冷原子钟^[21]而言,光学系统设计是重要的研究内容。前者的平台设置了电子学系统,温控和集成化水平很高;后者将平台外形尺寸控制在10 cm量级,光学器件分布于正反两面,依靠加强筋增强平台的力学性能。在可搬运冷原子干涉仪、原子重力仪的研究中,广泛采用的是复杂的笼式结构或螺纹孔实验平台^[3]。

除螺纹孔平台外,很多实验需要为光学系统设计特定的光学平台,为了满足特定的实验要求,常采用非标准化的定制底板、特制的光学支架及光学元器件^[20-21]。但非标准化的光学面板及光学元器件均需专门的设计与加工,不具备通用性,且加工周期长、费用高。而螺纹孔平台虽然具有通用性,但结构笨重,空间利用率低。光学系统是研制可搬运冷原子喷泉钟的关键技术之一。本文介绍了一种为 ^{85}Rb 喷泉钟设计的基于型材网格平台的光路设计方案。该光学平台采用含有T型凹槽的面板结构,该面板比螺纹阵列面板多了一个自由度,光学器件的装配更加简洁和灵活。在不影响光路性能的前提下, ^{85}Rb 喷泉钟光学系统搭建在50 cm×50 cm的网格平台上。 ^{85}Rb 喷泉钟与实验室已有的 ^{87}Rb 喷泉钟共用一套激光源,采用声光调制器(Acousto optic modulator, AOM),设计并搭建了四倍频移、激光注入锁定、再泵浦光路等单元模块,制备了系统所需的

冷却光、探测光和再泵浦光,实现了原子俘获、冷却、上抛、选态、探测等所有功能。该设计具有体积小、重量轻的特点,满足搬运喷泉钟对光学平台紧凑性、可靠性的需求。基于该系统,完成了世界上首台 ^{85}Rb 喷泉钟的实验并实现了钟跃迁频率的评估。8个月以上的长期运行结果表明,基于标准型材网格光学平台的光学系统性能稳定,满足喷泉钟长期运行的要求。

2 ^{85}Rb 喷泉钟及其光路设计

2.1 ^{85}Rb 喷泉钟原理

喷泉钟涉及的原子冷却和囚禁技术包括磁光阱、光学黏胶、绝热冷却^[22]等。原子在冷却区被磁场和光场俘获并被冷却至 μK 量级后,在光场辐射压力作用下作竖直上抛运动。原子经过选态腔时,开启微波 π 脉冲,使原子发生 $|F=3, m_F=0\rangle$ 到 $|F=2, m_F=0\rangle$ 的跃迁(F 为总量子数, m_F 为 F 能级的磁子能级),处于 $|F=3, m_F\neq 0\rangle$ 态的原子在探测区行波光场作用下获得沿行波场传播方向的速度,从而离开原子团,剩余原子处于单一的 $|F=2, m_F=0\rangle$ 态。经微波选态后,原子在 Ramsey 腔中继续作上抛运动,并在上抛和下落过程中与 $\pi/2$ 微波脉冲发生了两次相互作用(Ramsey 作用)。原子经过探测区时,分别探测处于 $|F=2, m_F=0\rangle$ 态和 $|F=3, m_F=0\rangle$ 态的原子布居数,通过计算得到原子跃迁几率。最后,根据输入微波频率与原子跃迁几率的关系得到误差电压信号,锁定参考晶振,输出 ^{85}Rb 喷泉锁定后的频率信号。图1(a)为 ^{85}Rb 喷泉钟的物理系统结构图,图1(b)为相应的实物图。其中, MOT 为磁光阱; C-field 为 C 场,用于产生 Ramsey 作用区所需磁场条件; H_{AFC} 为原子上抛高度。

图2(a)为 ^{85}Rb 原子的 D2 线(基态能级 $5^2\text{S}_{1/2}$ 到第一激发态能级 $5^2\text{P}_{3/2}$ 的跃迁谱线)超精细结构及冷却、再泵浦、探测等过程中的相关跃迁示意图。利用基态 $|F=3\rangle$ 与激发态 $|F'=4\rangle$ 间的循环跃迁实现 ^{85}Rb 原子的冷却,冷却光为负失谐,失谐量为 $2\Gamma\sim 3\Gamma$ (Γ 为激发态的自然线宽),探测光的正失谐量为 $\Gamma/2$ 。为了保证冷却过程的持续进行,以基态 $|F=2\rangle$ 跃迁到激发态 $|F'=3\rangle$ 的共振光作为再泵浦光,并将其用于双能级探测过程。图2(b)为喷泉钟运行的时序图,其中 B_{gradient} 为磁场梯度大小, f 为基态 $|F=3\rangle$ 到激发态 $|F'=4\rangle$ 的跃迁频率, $\Delta\nu$ 为失谐量, I_{repump} 为冷却过程中再泵浦光的光强,

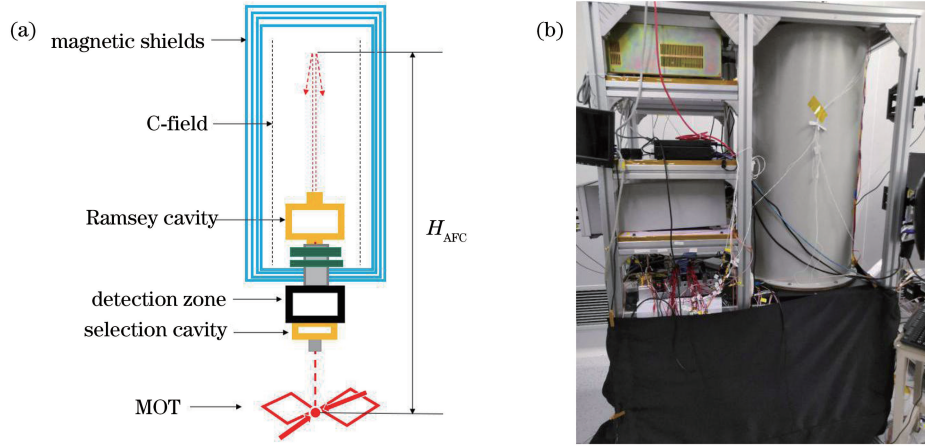


图 1 ^{85}Rb 喷泉钟的物理系统。(a) 结构图; (b) 实物图
Fig. 1 Physical system of ^{85}Rb fountain clock. (a) Structural diagram; (b) photo

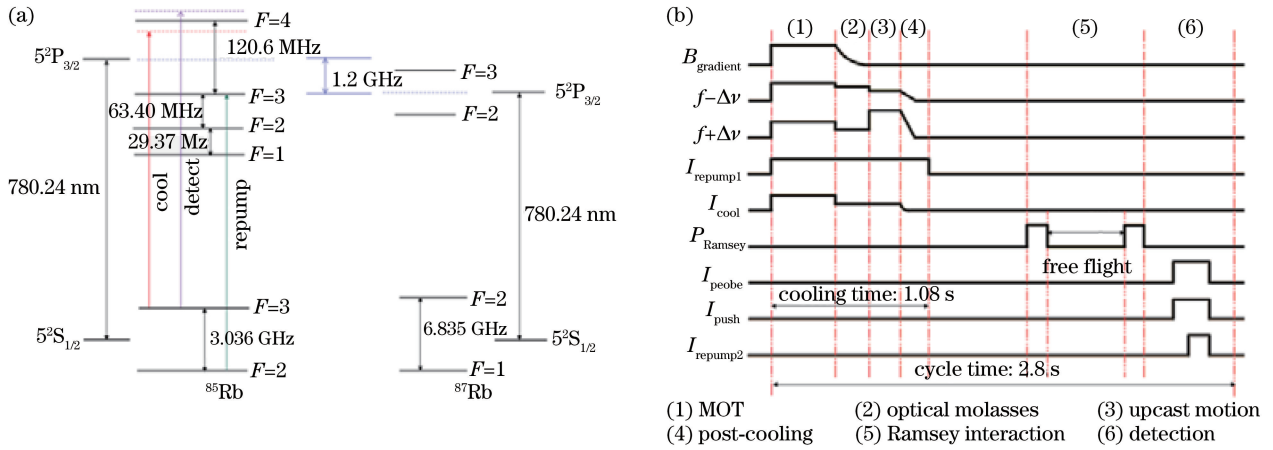


图 2 ^{85}Rb 喷泉钟的工作能级与时序。(a) D2 线超精细能级结构与相关跃迁; (b) 喷泉钟运行时序
Fig. 2 Working levels and timing sequence of ^{85}Rb fountain clock. (a) Ultra-fine level structure and related transition of ^{85}Rb D2 line; (b) operation timing sequence of fountain clock

I_{cool} 为冷却光的光强, P_{Ramsey} 为 Ramsey 腔的微波功率, I_{probe} 为探测光的光强, I_{push} 为探测区的行波光强, I_{repump2} 为双能级探测中再泵浦光的光强。采用折叠光路方案^[23], 将两束入射光变换为三对传播方向和偏振方向均相反的激光; 冷却并俘获背景热原子后, 通过调节两束入射光, 产生频率失谐且竖直向上的光场辐射压力, 在该辐射压力作用下冷原子作上抛运动, 之后自由下落到探测区, 依次通过上探测区驻波场[此时探测上能级原子的飞行时间(Time of flight, TOF)信号]、行波场(赶走上能级原子)、再泵浦光驻波场(将下能级原子抽运到上能级)、下探测区驻波场(探测原下能级原子的 TOF 信号), 实现了双能级探测, 其中行波场与上探测区的驻波场来自同一束光。

2.2 ^{85}Rb 光路设计

已有的 ^{87}Rb 喷泉钟激光器具有优越的性能, 例

如线宽很窄、可以数月连续运行、锁定以后几乎不失锁等, 因此希望 ^{85}Rb 喷泉钟能采用该激光源, 但受当前实验条件限制, 无法再添加一台。设 ^{87}Rb 的 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=2\rangle$ 跃迁对应的跃迁谱线为 L_1 , ^{87}Rb 的 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 跃迁对应的跃迁谱线为 L_2 , ^{85}Rb 的 $|F=3\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 跃迁对应的跃迁谱线为 L_3 , ^{85}Rb 的 $|F=3\rangle \rightarrow |F'=4\rangle$ 跃迁对应的跃迁谱线为 L_4 , L_3 与 L_4 的交叉峰比 L_1 与 L_2 的交叉峰高约 1.2 GHz[图 2(a)], 两者的基态超精细跃迁频率很接近, 从光路上讲, 增加一个 210 MHz 的四次频移系统即可实现 ^{85}Rb 喷泉钟与 ^{87}Rb 喷泉钟共用激光源, 且难度不大, 所以本文采用大范围频移方案, 如图 3 所示, 其中 $2-3 \otimes 2-2$ 表示 L_1 与 L_2 的交叉峰频率, FEOM 为光纤光电调制器。

由光纤引入 ^{87}Rb 喷泉钟的主激光并将其作为 ^{85}Rb 光路的种子光, 种子光通过声光调制器

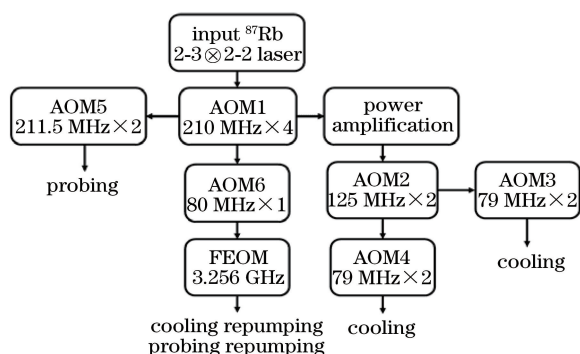
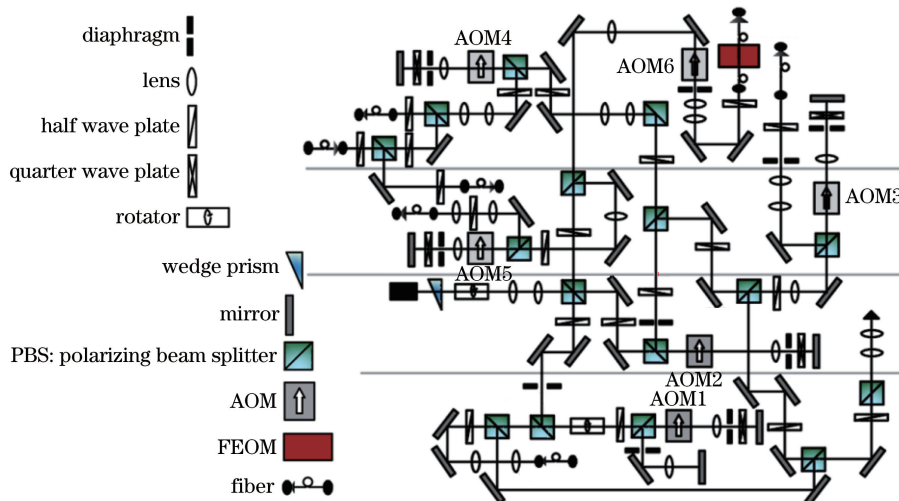


图 3 大范围频移方案

Fig. 3 Scheme for large-range frequency shift

AOM1(210 MHz)后,发生了 0.84 GHz 的四倍正频移(four pass);一部分光(1~2 mW)被分出,其功率被注入锁定放大模块放大(大于 80 mW);放大后的光再通过 AOM2(125 MHz),发生了 0.25 GHz 的双倍正频移(doublepass);对应输出光被等分为

两路并分别通过 AOM3、AOM4(79 MHz),发生了 0.158 GHz 的双倍正频移,此时共计频移 1.248 GHz。AOM3、AOM4 输出光是负失谐,失谐频率为 12 MHz(对应跃迁 $|F=3\rangle \rightarrow |F'=4\rangle$),将其作为两路冷却光。经四倍正频移的大部分光(约 20 mW)被分为两路,一路经 AOM5(211.5 MHz)以实现 0.423 GHz 的双倍正频移,共计频移 1.263 GHz,对应的输出光是正失谐,失谐频率为 3 MHz(对应跃迁 $|F=3\rangle \rightarrow |F'=4\rangle$),将其作为探测光;由于再泵浦光与跃迁 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 共振耦合,故另一路经 AOM6 实现 0.08 GHz 的单倍正频移(single pass)后,再通过光纤电光调制器实现 3.256 GHz 的频移,对应输出光作为再泵浦光。再泵浦光被分为两路,一路用于双能级探测,另一路被耦合到冷却光中。整体光路设计如图 4 所示。

图 4 ^{85}Rb 喷泉钟的光学系统Fig. 4 Optical system of ^{85}Rb fountain clock

3 基于型材网格的光路实现

根据 ^{85}Rb 冷原子系统在不同时序阶段对激光功率和频率有不同的复杂需求,我们设计了功能区块化、结构紧凑化且性能可靠的 ^{85}Rb 喷泉钟光学系统。

3.1 型材网格

型材网格是指以标准化铝板材、铝杆材为主体构建的通用型光学平台^[24]。铝板材为上下两面均含有两条以上 T 型凹槽的长条形中空结构,铝杆材为四面均含有 T 型凹槽的长条中空结构。利用铝板材、铝杆材和相应配件可实现单层或多层光学平台的搭建。

将多个板材分为两层,每层平行共面排列,两层板材互相垂直,呈网格状结构,用两直角面有通孔的角件固定板材相交处,如图 5(a)所示,可实现单层网格面板的搭建。利用穿过角件通孔的螺钉与拧在板材凹槽内的 T 型螺母固定角件,如图 5(b)所示。搭建支架时,将杆材穿过光学面板四个角落的空隙,使其紧贴面板板材,相交处被角件固定以保持杆材垂直于地面并保持面板水平。将器件固定于底座上,螺钉穿过底座槽被拧在 T 型螺母上,螺母被置入板材凹槽内,拧紧螺钉即可将光学器件固定在面板上。

因为该系统主要在实验室环境下工作,基本也只在实验室内或实验室之间进行小范围搬运,且平

台和光学调整架都采用铝,热膨胀系数基本相同,同时光路非常紧凑,仿真后发现该结构满足要求,可以进行光路搭建。图 5(c)为⁸⁵Rb 光学系统 50 cm×50 cm 型材网格光学面板的仿真,面板质量为 6.29 kg。对其进行力学仿真分析,结果如图 5(d)、(e)所示。实验中面板表面的光学器件所受总重力约为 60 N。在重力作用下,面板的每个板材表面受

到 15 N 竖直向下的压力,非网格面板的最大形变量约为 7 μm,如图 5(d)所示。添加板材以形成网格面板,最大形变量约为 3 μm,如图 5(e)所示。该光学系统已经进行了一年以上的持续运行,从已有实验结果^[16-17]来看,其具有较高的可靠性,这也在实验层面证明了基于该平台的光学系统可满足现阶段的研究需求。

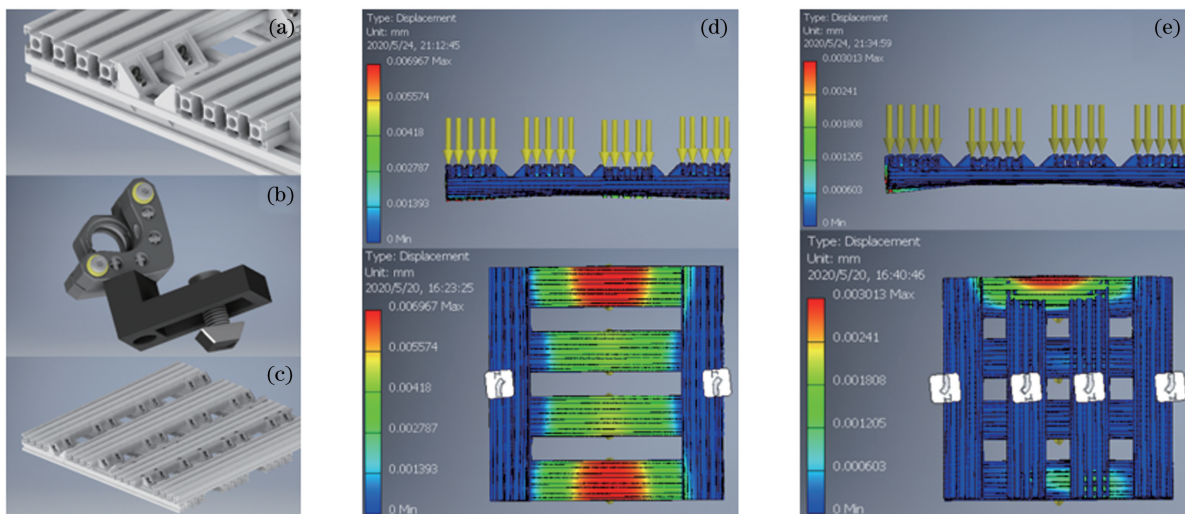


图 5 铝型材网格光学平台。(a)平台的搭建;(b)光学器件的固定;(c) 50 cm×50 cm 单层光学面板;
(d)非网格平台的力学仿真(上:侧面;下:底面);(e)网格平台的力学仿真(上:侧面;下:底面)

Fig. 5 Aluminum profile gridded platform. (a) Building of platform; (b) fixing of optical devices; (c) 50 cm×50 cm single layer optical panel; (d) mechanical simulation of non-gridded platform (top: side view; bottom: bottom view); (e) mechanical simulation of gridded platform (top: side view; bottom: bottom view)

3.2 Four pass 方案

基于 AOM(210 MHz)的 four pass 方案可实现 0.8 GHz 左右的大范围频移。激光由光纤引入,利用透镜组对其进行光斑整形;利用 1/2 波片和偏振分光棱镜(Polarizing beam splitter,PBS)组合来调整种子光偏振面和法拉第旋光器,偏振面偏转 45°后,利用 AOM1 进行 double pass 操作;在 1/4 波片

作用下,出射光经 0° 反射镜反射后再次通过 AOM1,实现 four pass。出射光再次经过旋光器并最终输出。图 6(a)为使用 inventor 软件模拟的 four pass 模块光路,图 6(b)为在铝板材上搭建的一个 four pass 模块。

在偏振分析仪辅助下,⁸⁵Rb 光学系统中的 four pass 模块的输入种子光的线偏振度 > 30 dB,光功

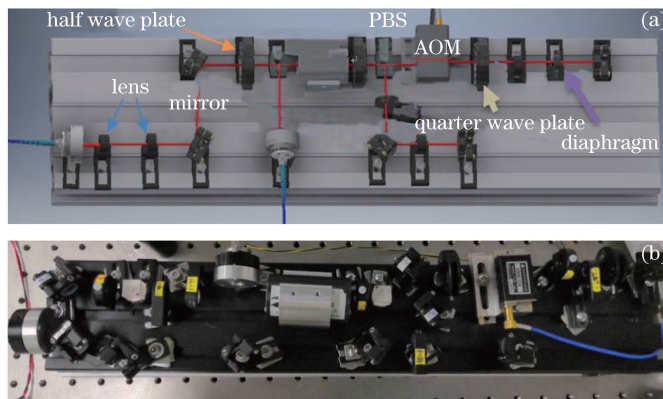


图 6 在铝型材上搭建的 four pass 模块的光路。(a)仿真;(b)实物图

Fig. 6 Optical path in four pass module built on aluminum profile. (a) Simulation; (b) photo

率 >40 mW,且该种子光由 7 m 长保偏光纤引入,衍射效率可达 55%。利用法布里-珀罗标准具测试了其输出频谱,通过示波器观察谱线。图 7 所示为主光阑打开情况下一个周期内的谱线。峰 2、峰 5 是载波峰,正一级衍射光 1 和 4 来自同一纵模,间隔 7.5 GHz。峰 1 与峰 2、峰 4 与峰 5 的频率间隔为 0.84 GHz,是 four pass 操作的结果。峰 3 与峰 2、峰 6 与峰 5 的频率间隔为 0.42 GHz,是 double pass 操作的结果。由于第一次 double pass 偏振光不纯, four pass 操作中未经第二次 double pass 操作而直接透射的光也影响了峰 3、峰 6 的形成^[12]。

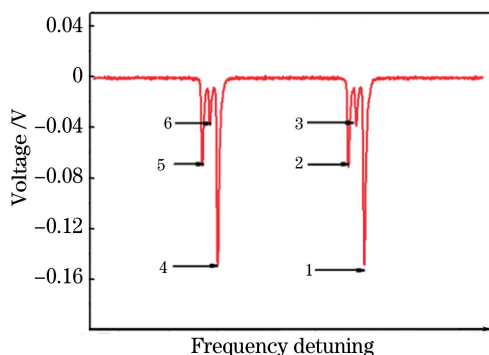


图 7 ⁸⁵Rb 喷泉钟光学系统中的 four pass 模块谱线^[12]

Fig. 7 Spectrum of four pass module in optical system of ⁸⁵Rb fountain clock^[12]

3.3 注入锁定放大模块

在⁸⁵Rb 光学系统中,需对光纤引入的种子光进行功率放大。注入锁定放大模块将种子光入射到自由运转的激光器中,并通过模式竞争将激光器频率

锁定在种子光频率上,从而实现功率放大。利用楔形棱镜调整激光器出射光的光斑,以实现其与种子光光斑的横模匹配;利用旋光器使入射光和出射光的偏振方向相互垂直,以便于后续利用 PBS 和 1/2 波片分离输入光和放大输出光。利用注入锁定放大模块,使种子光与放大光重合,并通过调节 1/2 波片实现种子光偏振模式与放大器本征偏振模式的匹配。这种方案可使用性能较低的激光器,并实现高倍数功率放大。在⁸⁵Rb 光学系统中,注入种子光功率保持为 1.5 mW,此时激光器可在约 200 mA 的大电流模式下工作。将激光管电流值设定在 150 mA 左右时,输出功率可达 100 mW 以上。

3.4 AOM 及 FEOM 频移

在⁸⁵Rb 系统所需的三种光中,冷却光和探测光与种子光的频率差较小,约为 100 MHz 量级,可通过 AOM 频移获得;再泵浦光与种子光的频率差在 GHz 量级,可通过 FEOM 频移获得^[25]。在本文光学系统中,采用自制的压控振荡器电路实现 AOM1、AOM2、AOM5 和 FEOM 的微波驱动,可实现 100 ns 量级的调节。采用购买的直接数字频率合成器 (DDS) 电路板实现 AOM3、AOM4 和 AOM6 的微波驱动。表 1 为各 AOM 和 FEOM 的实验参数。各 AOM 工作模式为:AOM1 为 four pass, AOM2、AOM3、AOM4、AOM5 为 double pass, AOM6 为 single pass。通过调节,各 AOM 与 FEOM 都达到了预期指标,光纤耦合效率均在 70% 左右,保偏性能在 25 dB 左右,满足实验需求。

表 1 AOM 与 FEOM 的参数^[12]

Table 1 Parameters of AOM and FEOM^[12]

Device	Modulation frequency /MHz	Frequency shift /MHz	Efficiency /%
AOM1	210	840	55
AOM2	125	250	74
AOM3	79	158	71
AOM4	79	158	69
AOM5	211.5	423	63
AOM6	80	80	71
FEOM	3256	3256	30

在设计和搭建光学系统时,还需注意光路高度、光学器件规格等对光路的影响。为了满足系统要求,各模块的光路设计需整体契合。此外,光学器件之间应留有适当空间,以便进行检测和调节。在螺纹孔光学平台上,受螺纹阵列结构和器件固定方式的限制,器件的间距不够灵活,光路一般较高,难以设计紧凑的光路。而构成型材网格光学面板的铝板材间距可调,面板结构可变,因此实验平台能更好地

满足实验需求。另外,T 型凹槽作为固定元件的结构,允许元件沿其方向自由移动,这比螺纹孔平台多了一个自由度,因此光学器件排布更灵活,通过选用小型光学器件可实现更紧凑的光路。采用铝型材底座固定元件,可使光路的高度降至 20~30 mm,因此光路有较好的稳定性。通过盒子封装系统以消除环境温度和气流的影响。在合适位置打孔即可用螺丝刀直接进行光路调节,最终实现了图 8 所示

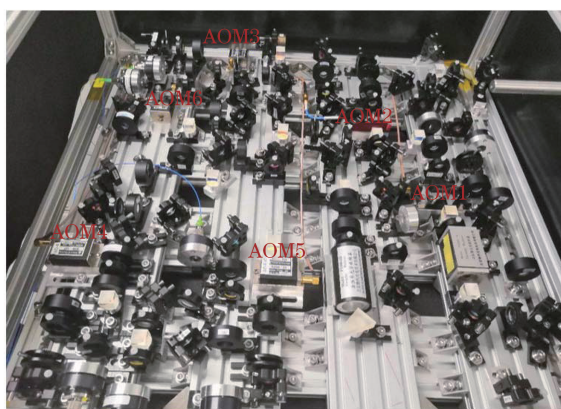


图 8 ⁸⁵Rb 光学系统实物图

Fig. 8 Photo of ⁸⁵Rb optical system

的⁸⁵Rb 喷泉钟的光学系统。考虑隔振的需求,该系统被放置在隔振海绵上。

4 ⁸⁵Rb 喷泉钟的物理实验

在无功率控制的情况下,对⁸⁵Rb 光学系统中某路激光的输出功率进行了 5 天的监测:利用光纤从该路激光(12 mW)中分出部分光(能量占比 1%)作为光信号,使用光电管对其进行实时监测。图 9 为得到的相对功率起伏曲线。可以看出,激光功率起伏的峰峰值在 5%左右,均方根(RMS)值为 1%。

利用上述光路,完成了⁸⁵Rb 喷泉钟的物理实验。TOF信号探测是通过用光电管、弱电流放大器

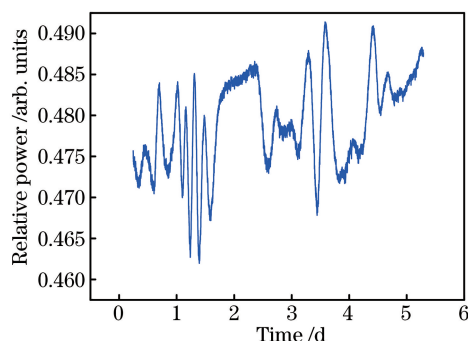


图 9 ⁸⁵Rb 光学系统中某路激光的功率起伏

Fig. 9 Power fluctuation of one laser in

⁸⁵Rb optical system

将荧光信号转化为电压信号实现的。图 10(a)为下落过程中探测到的 TOF 信号,其中原子上抛初速度为 2.43 m/s,两束冷却光的频率失谐量为 1.8 MHz,探测区中心与 MOT 区中心的高度差为 0.3 m。由 TOF 信号可知,探测得到的冷原子数目在 10⁵ 量级。原子温度为 4 μK。当原子团上抛高度为 580 mm 时,中心谱线的半峰全宽为 1.6 Hz 的 Ramsey 跃迁谱线如图 10(b)所示。通过开展钟跃迁频率测量实验,测量了喷泉钟的稳定度。在实验中,Ramsey 条纹的中心谱线的半峰全宽可以达到 1 Hz 以下,测得的钟频率比文献[18]中提高了 4 个数量级以上。文献[17]中的实验验证了该光学系统的可行性。

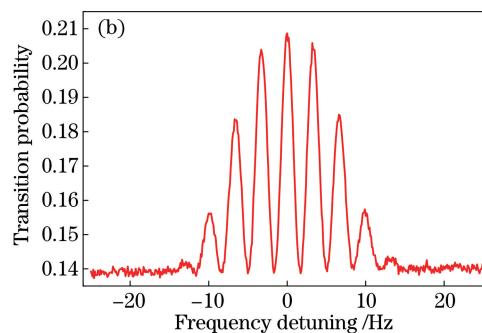
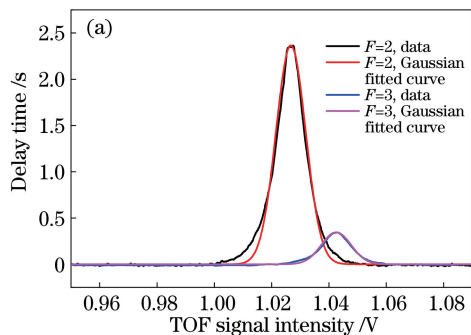


图 10 ⁸⁵Rb 喷泉钟的物理实验结果。(a)下落过程中的 TOF 信号;(b) Ramsey 跃迁谱线

Fig. 10 Physical experimental results of ⁸⁵Rb fountain clock. (a) Falling TOF signal; (b) Ramsey transition line

5 结 论

基于通用型材,采用网格化设计,实现了紧凑可靠的⁸⁵Rb 光学系统。该设计以倍频激光系统作为激光源,采用大范围频移方案,实现了⁸⁵Rb 喷泉钟的两路冷却光、两路重泵浦光及一路探测光的制备,光功率的起伏小于 5%;通过 four pass 方案,实现了基于 AOM (210 MHz) 正一级衍射光的 0.84 GHz 的大范围频移,衍射效率可达 50%以上;

采用注入锁定放大模块,在注入 1 mW 种子光的条件下实现了 100 mW 锁模激光的放大输出。基于该系统,完成了⁸⁵Rb 喷泉钟的相关物理实验和微波实验,验证了该光学系统的有效性。

参 考 文 献

[1] Wang Q, Wei R, Wang Y Z. Atomic fountain frequency standard: principle and development [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 163202.

- 王倩, 魏荣, 王育竹. 原子喷泉频标: 原理与发展[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 163202.
- [2] Cohen Y, Jadeja K, Sula S, et al. A cold atom radio-frequency magnetometer [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(7): 073505.
- [3] Wu B, Wang X L, Wang H L, et al. The current situation and trend of the gravimeter based on cold atom interferometer [J]. Navigation and Control, 2015, 14(2): 1-9.
吴彬, 王肖隆, 王河林, 等. 冷原子干涉型重力仪的发展现状与趋势[J]. 导航与控制, 2015, 14(2): 1-9.
- [4] Huang P W, Tang B, Chen X, et al. Accuracy and stability evaluation of the ^{85}Rb atom gravimeter WAG-H5-1 at the 2017 International Comparison of Absolute Gravimeters[J]. Metrologia, 2019, 56(4): 045012.
- [5] Becker D, Lachmann M D, Seidel S, et al. Spaceborne Bose-Einstein condensation for precision interferometry[J]. Nature, 2018, 562(7727): 391-395.
- [6] Lewoczko-Adamczyk W, Schiemangk M, Peters A, et al. QUANTUS—degenerate quantum gases in microgravity [C] // 2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, June 17-22, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE, 2007: 1.
- [7] Schkolnik V, Hellmig O, Wenzlawski A, et al. A compact and robust diode laser system for atom interferometry on a sounding rocket [J]. Applied Physics B, 2016, 122(8): 217.
- [8] Grosse J, Seidel S T, Becker D, et al. Design and qualification of an UHV system for operation on sounding rockets[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2016, 34(3): 031606.
- [9] Wang X W, Gao Y C, Zhao J B, et al. Design of microwave cavity for *in situ* atom detection used in space cold atom clock[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0901006.
王新文, 高源慈, 赵剑波, 等. 空间冷原子钟原位探测微波腔设计[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0901006.
- [10] Baxter C L. Environmental testing of lasers for JPL's cold atom laboratory[EB/OL]. (2014-08-01) [2020-03-21]. <https://digitalcommons.calpoly.edu/star/248>.
- [11] Bize S. The unit of time: present and future directions[J]. Comptes Rendus Physique, 2019, 20(1/2): 153-168.
- [12] Dong R C. Construction and performance evaluation of the rubidium atomic fountain clock group[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2017: 25-47.
董日昌. 铷喷泉钟组的系统搭建与性能评估[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2017: 25-47.
- [13] Cornish S L, Claussen N R, Roberts J L, et al. Stable ^{85}Rb Bose-Einstein condensates with widely tunable interactions [J]. Physical Review Letters, 2000, 85(9): 1795.
- [14] Wang J, Zhou L, Li R B, et al. Cold atom interferometers and their applications in precision measurements [J]. Frontiers of Physics in China, 2009, 4(2): 179-189.
- [15] Ovchinnikov Y B, Marra G. Accurate rubidium atomic fountain frequency standard [J]. Metrologia, 2011, 48(3): 87-100.
- [16] Zhang N, Wang Q, Zhao W J, et al. Design of low phase noise microwave frequency synthesizer for ^{85}Rb fountain clock [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1002001.
张宁, 王倩, 赵伟靖, 等. ^{85}Rb 喷泉钟的低相噪微波频率综合器设计 [J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1002001.
- [17] Wang Q, Zhang N, Guang W, et al. Precision measurements of the ground-state hyperfine splitting of ^{85}Rb using an atomic fountain clock [J]. Physical Review A, 2019, 100(2): 022510.
- [18] Arimondo E, Inguscio M, Violino P. Experimental determinations of the hyperfine structure in the alkali atoms [J]. Reviews of Modern Physics, 1977, 49(1): 31-75.
- [19] Berengut J C, Flambaum V V, Kava E M. Search for variation of fundamental constants and violations of fundamental symmetries using isotope comparisons [J]. Physical Review A, 2011, 84(4): 042510.
- [20] Laurent P, Massonnet D, Cacciapuoti L, et al. The ACES/PHARAO space mission [J]. Comptes Rendus Physique, 2015, 16(5): 540-552.
- [21] Qu Q Z, Xia W B, Wang B, et al. Integrating design of a compact optical system for space laser cooling application [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0602003.
屈求智, 夏文兵, 汪斌, 等. 空间激光冷却原子集成光学平台设计 [J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0602003.
- [22] Wang Y Q. Laser cooling and trapping of atoms [M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 171-364.
王义遒. 原子的激光冷却与陷阱 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 171-364.
- [23] Zhou Z C, Wei R, Shi C Y, et al. Foldable dual-

- beam magneto-optical trap system: CN101657062A [P]. 2010-02-24.
- 周子超, 魏荣, 史春艳, 等. 折叠式双光束磁光阱系统: CN101657062A[P]. 2010-02-24.
- [24] Zou F, Wei R, Du Y B, et al. Lightweight and expandable aluminum profile optical platform: CN104570258A[P]. 2015-04-29.
- 邹凡, 魏荣, 杜远博, 等. 轻便型可扩展铝型材光学平台: CN104570258A[P]. 2015-04-29.
- [25] Shi C Y. Operation and performance evaluation of rubidium 87 atomic fountain clock [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 64.
- 史春艳. 铷 87 原子喷泉钟的运行与性能评估 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2012: 64.