

文章编号 1004-924X(2016)01-0050-09

锶原子光钟钟跃迁谱线探测中的程序控制

任 洁¹, 刘 辉^{1,2}, 卢本全^{1,2}, 常 宏^{1*}, 张首刚¹

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

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了实现中国科学院国家授时中心研制的锶原子光晶格钟钟跃迁的自动化探测, 设计了完整的自动控制系统。该系统主要由延迟精度与同步精度在 μs 量级的时序控制系统和满足要求的激光频率扫描系统组成。两个控制系统均通过 LabVIEW 软件编程及虚拟仪器控制光场和磁场。完成了锶原子的两级冷却和光晶格囚禁, 最终得到了高信噪比载波线宽为 180 Hz 的锶原子 $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$ 钟跃迁谱线。谱线展现了高信噪比和窄线宽的特点, 表明整个锶原子光钟系统的运行较为稳健, 整个控制系统满足实验对于控制精度的需求, 实现了锶原子光钟系统的自动化操作与控制。该控制系统具有一定普适性, 也可拓展至需要对光场及磁场进行控制的其他系统中。

关键词: 锶原子光晶格钟; 时序控制; 谱线扫描控制; 虚拟仪器

中图分类号: O433.1; TH714.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162401.0050

Program control in transition observation of strontium optical lattice clock

REN Jie¹, LIU Hui^{1,2}, LU Ben-quan^{1,2}, CHANG Hong^{1*}, ZHANG Shou-gang¹

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: changhong@ntsc.ac.cn

Abstract: To achieve the auto control of transition observation of the Optical Lattice Clock transition developed by the National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, a complete control system is designed. The control system consists of a timing sequence control unit with delay accuracy and synchronizing precision in μs level and a laser spectral scanning control unit. The two units were both realized through the virtual instrument exploited by LabVIEW software programming to control the optical field and magnetic field precisely. The two-level cooling and optical lattice trapping of strontium atoms are implemented and the high signal-to-noise ratio (SNR) clock transition $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$ spectral line of strontium atom with a line-width of 180 Hz is obtained. The spectral line with higher SNR and narrower line width indicate that the optical lattice clock can operate in higher stability and whole control system meets the precision requirement of the running of strontium optical clock system. Moreover, the experiment demonstrates that the control system has universality, and can be extended to other systems to control the optical fields and magnetic fields.

收稿日期: 2015-09-17; 修订日期: 2015-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61127901, No. 11074252)

Key words: strontium optical lattice clock; sequence control; spectral scanning control; virtual instrument

1 引 言

时间(频率)是目前测量精度最高的物理量^[1]。现行的时间国际制单位“秒”由铯原子喷泉钟定义^[2]。近年来,有着更高稳定度的光学原子钟取得了快速发展^[3-7],特别是铯原子光晶格钟^[8-10],已经成为了目前世界上稳定性和准确度最高的光学原子钟,未来秒很有可能由光学原子钟来定义^[11-12]。

铯原子光晶格钟的实现原理是将铯原子通过激光冷却至 μK 量级的温度并囚禁在光晶格中^[8],然后用超窄线宽的钟激光探测铯原子的钟跃迁,并将钟激光的频率锁定在钟跃迁线的共振频率上。铯原子光晶格钟的运行是周期性的,每个周期的运行中通过对多个设备或部件的开关来控制光场和磁场。此外,在运行周期中,还需要扫描钟激光的频率并采集相应的钟跃迁信号,得到钟跃迁谱线。因此铯原子光钟系统要具备一个自动化控制系统,以实现系统的运转。

铯原子光钟的控制系统主要分为两个部分:一是控制光场和磁场用于冷原子制备的时序控制系统;二是用于钟跃迁复合测量的谱线扫描系统。时序控制系统的实现难度在于需要做到多路晶体管-晶体管逻辑电平(Transistor Transistor Logic, TTL)时序信号一定精度的同步输出,且包括控制磁场的线性变化的模拟时序控制信号;谱线扫描系统的难点在于如何通过复合测量技术得到精准的高信噪比谱线。

近年来,虚拟仪器技术在光学领域得到广泛应用^[13-15]。本课题组采用基于 LabVIEW 的虚拟仪器方法^[16],设计并实现了延迟精度与同步精度在 μs 量级的时序控制系统和满足要求的钟激光频率扫描与钟跃迁信号采集处理系统。本文利用该系统成功地进行了铯原子的两级冷却和光晶格囚禁实验,并得到了高信噪比的钟跃迁谱线。

2 实验装置及程控需求

图 1 为铯原子光钟整体实验装置及光路示意图。光与原子发生相互作用的场所为磁光阱(Magnetic Optical Trap, MOT),经加热铯原子由铯炉喷出,再经过二维准直到达塞曼减速器,再经过塞曼减速器和 461 nm 减速激光的共同作用,原子达到磁光阱中心区域时原子的最可几速率由 500 m/s 减为 50 m/s 左右。减速后的原子进一步被转入到以 461 nm 为俘获光的蓝磁光阱,完成原子的第一级冷却,此时原子温度为 mK 量级^[17]。为了使蓝磁光阱原子冷却中能级封闭,再加入 679 nm、707 nm 重泵浦光,从而提高俘获效率。整个一级冷却过程中,激光处于打开状态,当进行到二级冷却阶段则需要利用时序信号将一级冷却光和重泵浦光关闭。

二级冷却分为宽带冷却和窄带冷却两个步骤。经过一级冷却的原子速度分布较大,需要先进行宽带冷却,利用声光调制器(Acoustic Optical Modulator, AOM)将 689 nm 激光频带展宽,并使频带负失谐于原子共振频率;再改变 AOM 的调制频率,用单频光进行窄带冷却,将原子冷却到 μK 量级^[18]。从一级冷却到二级冷却的过程中,磁光阱上下两个窗口的反赫姆霍兹线圈产生梯度变化的磁场,通过线性变化的时序信号控制线圈电流得以实现。

813 nm 激光输出后经过一组透镜和 0° 全反射镜往返对射形成光晶格,移动透镜位置将光晶格束腰放在磁光阱中心,通过单模保偏光纤实现对激光模式的空间滤波及偏振控制。实验中二级冷却激光关断后,打开 813 nm 激光,将原子囚禁在光晶格中,即将原子限制在 Lamb-Dicke 区^[19],消除一阶多普勒效应、反冲效应和碰撞效应,利用重力场消除相邻晶格间的原子隧穿效应,提高铯光钟信号的精确度。

钟跃迁谱线扫描前需要将 698 nm 钟激光锁定在高稳腔上从而使其线宽达到赫兹量级,按铯光钟的运行周期同步扫描钟激光的频率,实现钟跃迁谱线的探测。

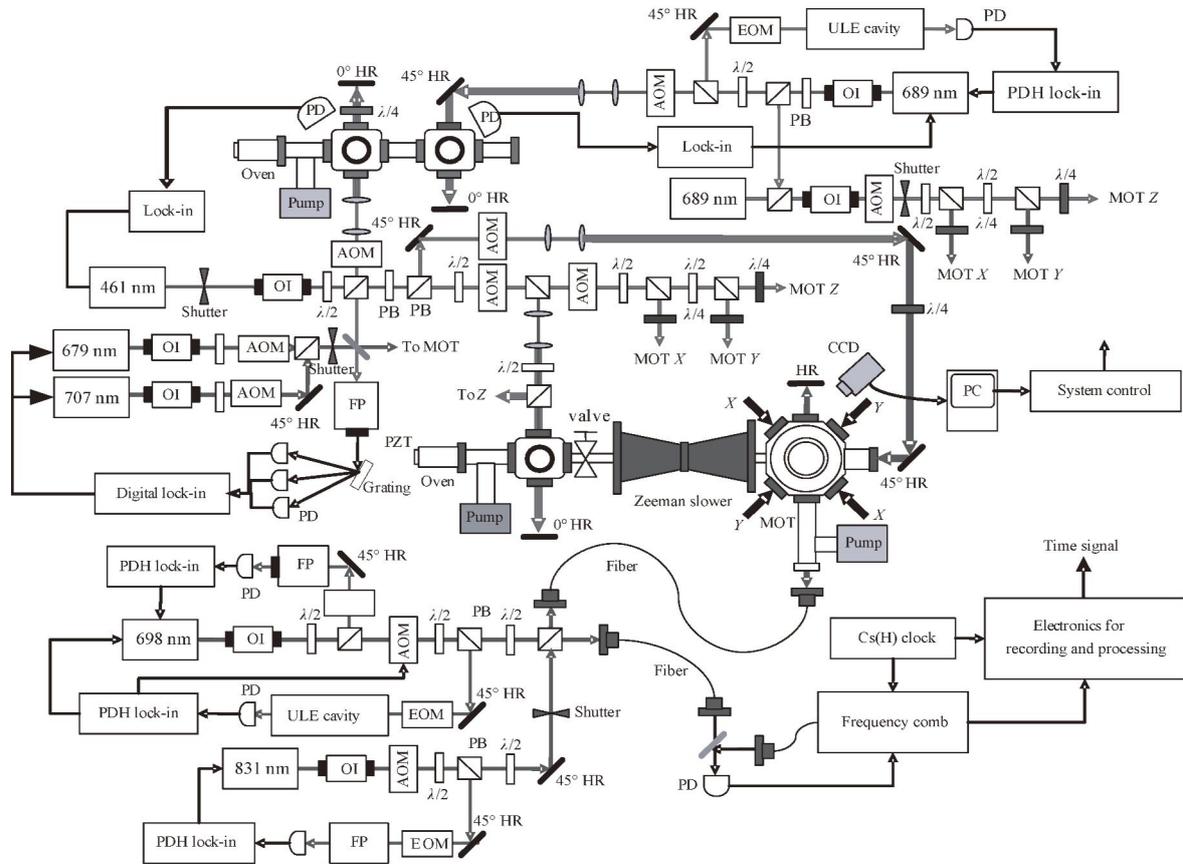


图 1 锶原子光钟实验装置示意图(图中 MOT 为磁光阱, Zeeman Slower 为塞曼减速器, $\lambda/2$ 为二分之一波片, $\lambda/4$ 为四分之一波片, Fiber 为光纤, HR 为平面反射镜, valve 为角阀, PD 为光电探测器, Shutter 为机械开关, Pump 为离子泵, Grating 为光栅)

Fig. 1 Experimental setup of strontium optical lattice clock, where MOT means Magnetic Optical Trap, $\lambda/2$ means half-wave plate, $\lambda/4$ means quarter-wave plate, HR means high reflectivity mirror, PD means photoelectric detector, shutter means mechanical shutter, pump means ionic pump.

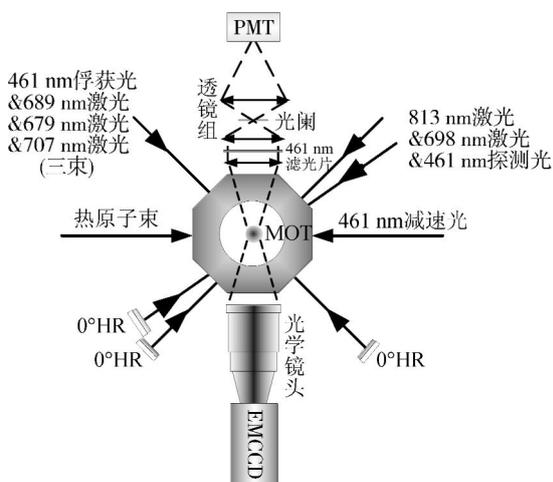


图 2 ^{88}Sr 原子光晶格及探测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of MOT

图 2 为锶原子光晶格及探测系统示意图。其中一级与二级冷却激光合光后分三束从空间 3 个垂直方向注入 MOT 并原路返回; 813, 698, 461 nm 探测光合束后与一束冷却光共用一个窗口注入 MOT。在垂直于原子束的水平方向上放置光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)(滨松 H11526-20-NF)和电子倍增电荷耦合器(Electron Multiplying Charge Coupled Device, EMCCD)(Andor iXon Ultra 897)进行荧光探测和冷原子团的图像监测。其中, 通过商用光学镜头(Nikon ED AF MICRO NIKKOR 200 mm 1:4D)将 MOT 在 EMCCD 上成像; 通过滤光片、光阑和透镜组将冷原子团成像在 PMT 上。

图 3 是锶光钟实验中各个单元运行的时序

图。其中,461 nm 探测光(第四部分有详细叙述)和 PMT 的探测时间都是几十 μs ,故这里要求时序控制系统的延迟精度至少应达到 μs 量级。

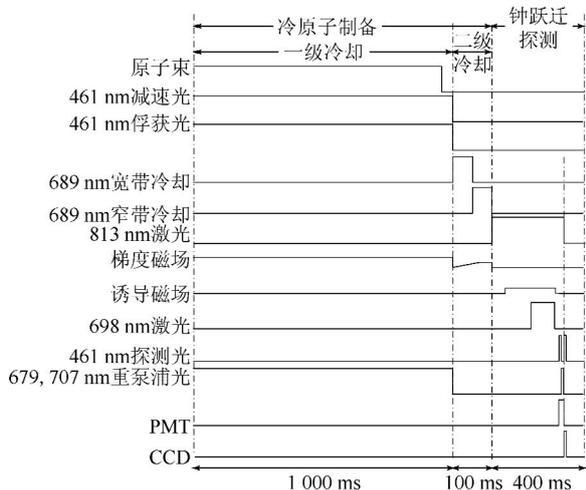


图 3 铯光钟系统时序图

Fig. 3 Diagram of system sequence of Sr optical lattice clock

场、磁场的具体受控单元为:461 nm 激光(五束激光:一束减速光、三束俘获光和一束探测光)、689 nm 激光(一束激光两路控制:宽带和窄带冷却光)、679 nm和 707 nm 重泵浦激光、813 nm 激光和 698 nm 钟激光,通过 AOM (MT250-B100A0.5-VIS)和机械开关(SRS470)控制;磁场线圈(通过磁光阱控制电路和继电器控制)和原子束(通过机械开关控制)。复合测量的具体受控单元为 PMT、EMCCD 以及信号发生器。其中 PMT 和 EMCCD 自带有触发接口,可直接接收时序触发信号,信号发生器通过 GPIB 控制器与工控机(研华 IPC-610)通信。

3 时序控制系统

时序控制系统为整个光钟控制系统的核心,它主要由时序控制软件和虚拟仪器硬件构成,主要包括 NI PCI6713 八通道模拟输出卡(含两路计数器通道)、NI PCI6723 三十二通道模拟输出卡(含两路计数器通道)和 RTSI 总线一根(用于 PCI6713 和 PCI6723 的联接,进行时间同步)。

3.1 原子束与激光的时序控制

通过机械开关对原子束进行关断,在真空系统内部放入专门的机械开关(美国 Vincent 公司的 NS15B1T0L),通过外部电极连接时序信号进行控制。

在光路中加入 AOM 可以同时实现对激光的关断、移频和调制。但 AOM 无法彻底地关断操作激光,这里所用 AOM 的关断延迟为 160 ns,衰减为 33 dB,剩余的射频会引起少量的衍射光进入 MOT 区,导致光晶格寿命的减短。需要在光路中加入可以彻底关断激光的机械开关来配合操作。图 5 为 AOM 和机械开关联合控制光开关的示意图。

首先在信号源和功放之间加一个高度隔离开关(图 5 中的开关,Mini Circuits 公司 ZSWA-4-30DR),给开关输入相应的时序信号以进行 AOM 的关断控制。再在衍射光路径上安装一个机械开关(关断延迟 500 μs),以保证激光的彻底关断。在关闭光源时,先关 AOM,再关机械开关;在打开光源时,先打开机械开关,再打开 AOM。

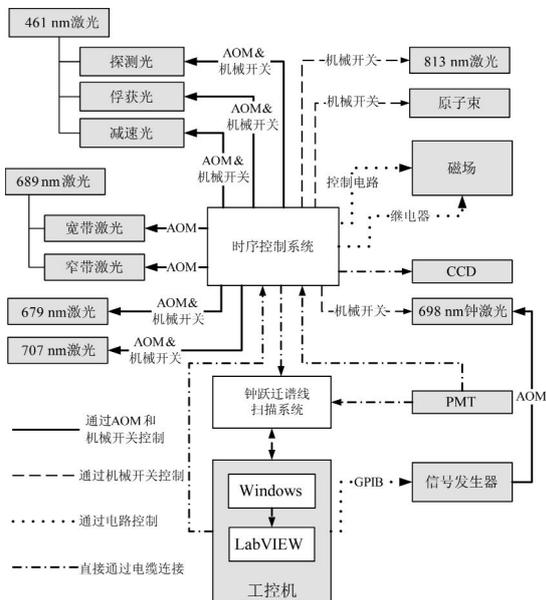


图 4 程控系统原理示意图(图中 IPC 为工控机)

Fig. 4 Schematic diagram of program control (IPC means Industrial Personal Computer)

整个实验过程中,控制系统包括时序控制系统和钟跃迁谱线扫描系统,如图 4 所示,它们都由软件和相应的数据采集硬件装置组成。控制对象主要包括光场、磁场以及复合测量系统。其中,光

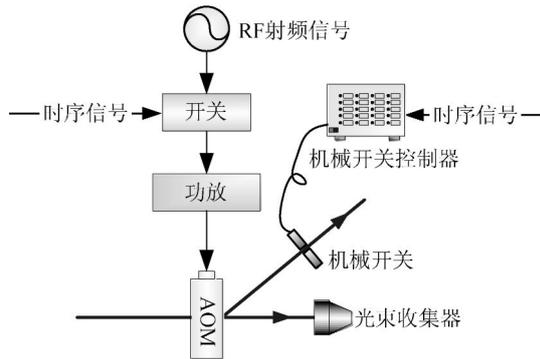


图 5 激光开关控制连接示意图

Fig. 5 Schematic diagram of laser switch

另外,二级冷却光源 689 nm 激光宽带到窄带冷却的转换实现原理如图 6 所示。

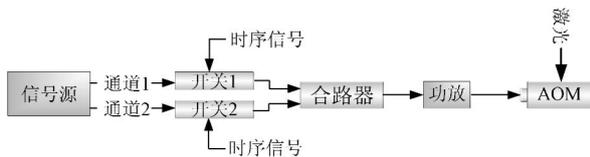


图 6 二级冷却宽带与窄带激光控制转换连接图

Fig. 6 Switching of broad band laser and narrowline width laser in second stage cooling

利用两组不同的射频信号作为 689 nm 宽带与窄带激光的调制信号,分别输入两个开关(如图 6 中的开关 1 和开关 2),再使用信号合路器(Mini Circuits 公司 ZSC-2-1+),将两组信号合并,再经功放将信号连接到 AOM。这样,在 689 nm 激光通过 AOM 时,由两组时序信号控制两个开关,即可自由控制宽带激光与窄带激光的切换与开关。

3.2 磁场的时序控制

磁场的控制涉及梯度磁场与诱导磁场的产生与控制两个方面。

磁场与光场的时序控制有所区别,主要体现在磁场梯度的控制。在二级宽带冷却中,为了压缩冷原子团的大小,要将磁场梯度线性增大,需用相同形状的时序信号来进行触发和控制;但磁场在关断时会产生一个较大的自感电流,为了消耗该电流以保护磁场线圈,需要在很短的时间内将磁场进行完全关断,故磁场控制信号的延迟精度应更高。将 MOT 亥姆赫兹线圈驱动电源连接到专门设计的磁光阱控制电路,该电路主要是将恒定的电源电压转化成为可以随任意波形时序信号

改变的电流信号,变化的电流输入到磁场线圈从而产生变化的梯度磁场。将电源连接到控制电路的两个输入端口,线圈接到控制电路的两个输出端口。电路的设计原理如图 7 所示。在迅速关断电流时,反接的两个二极管用以保护线圈,并保证线圈电流的迅速关断。通过改变时序信号,由 OP27 驱动 IGBT(1MBI400N-120)将输出的电流进行变换。

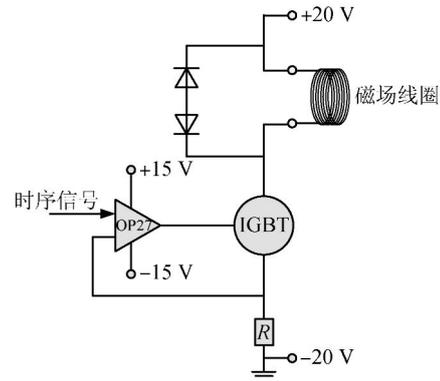


图 7 磁光阱控制电路

Fig. 7 Control circuit of MOT

这里的时序信号不同于常规的 TTL 电平信号,它是梯度变换的,时序信号如图 8 所示。其中 U 表示实际的输出电压值, t 表示这一电压值的输出时间。

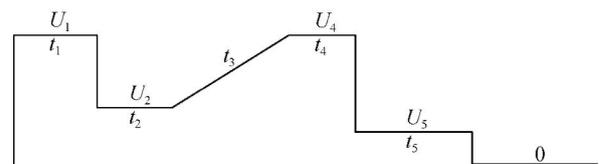


图 8 磁场时序控制信号

Fig. 8 Sequence control signals of magnetic field

模拟输出卡可以实现这样的时序信号。程序将完整的信号队列分为几个部分,并根据前面板输入的电压值、电压持续时间可连续输出这个时间段内的电压。

诱导磁场的产生是将 MOT 线圈中的一路电流反转的过程。在磁光阱控制电路和 MOT 下方磁场线圈之间串联一个继电器,通过时序信号的高低电平改变继电器开关的方向,从而达到电流的反转。将线圈的接线端正接到继电器则产生与

上线圈方向相反的电流,从而产生梯度磁场,用以进行冷原子的俘获;反接则产生相同方向的电流,产生诱导磁场,使得 3P_1 与 3P_0 态有一定程度的混合^[20],从而有一定的跃迁几率,用以探测钟跃迁。

3.3 时序控制系统的软件设计

该时序控制程序设计的关键在于任意波形的产生以及每个通道输出信号的同步。重点在于模拟通道时序信号的输出。这里将 LabVIEW 程序面板测量 I/O 中数据采集定时 VI (DAQmx timing) 设置为“使用波形 (Use Waveform)”格式,需要将输出的信号设计成为可以触发主函数中采样时钟的波形格式,再通过计数器产生的内部触发来触发信号的循环输出。具体可参见 LabVIEW 函数库中基本函数发生器 (Basic Function Generator. VI) 的编程方法,这里其实就是通过编程设置自己所需要的函数产生 VI。在主函数中调用数据采集任务属性节点 (Task Node) 中“通道数 (NumChans)”作为 For 循环的循环次数。对于 PCI6713, For 循环次数为 8 (PCI6723 则为 32),从 0~7 每一个循环中调用一种需要的子函数,这也对应着实际信号输出所对应的物理通道序号,将产生的总波形用作时钟的参考并输出。

图 9 为整个程序的设计流程图。计数器通道的信号精度要高于模拟通道,利用 PCI6713 的一条计数器通道 Ctr0 作为整个时序的内部触发源,来触发其它所有通道的信号输出。Ctr0 的输出任务也作为程序的主控任务,其它所有通道均为被控输出任务。需要在任务的循环输出之前设置任务输出的先后顺序,将所有的被控任务都同时并提前于主控任务开始,这是为了让受控端口事先进行等待,这样主控设备启动的同时,所有受控端口都将同步进行输出。

在使用软件时,对于计数器通道,输入高低电平以及初始延迟时间即可;对于模拟通道,则需输入电平大小(5 为高电平,0 为低电平)以及持续时间。软件前界面还显示了模拟通道输出信号的波形图,以便观测与记录实验结果。每个通道输出信号的时间长度必须一致,这是由于信号的输出是由设置好的波形触发的,每个数组的长度需一致。

4 钟跃迁谱线扫描系统

原子在经过一级冷却、二级冷却、光晶格装载的过程后,得到了适用于钟跃迁探测的冷原子样品。

在进行钟跃迁谱线复合测量^[21]时,首先利用 698 nm 激光脉冲将基态原子泵浦到 3P_0 态,此时有部分原子发生了跃迁。用一束 461 nm 激光进行探测,由于 $^1S_0 \sim ^1P_1$ 跃迁的自发辐射速率很强($2 \times 10^8/s$),可激发较强的荧光信号,同时产生较大的辐射压力,将基态原子推出光晶格,用 PMT 可观测到一个荧光信号 A;再用重泵浦激光将之前 3P_0 态上的原子泵浦回 1S_0 基态,用 461 nm 探测光再次探测,可观测到另一个荧光信号 B,这一过程的时序可参见图 3。在每一个周期内,改变一次 698 nm 激光的频率,系统在信号源所设置的正确扫描频率范围运行之后,可以得到完整的钟跃迁谱线信号。数据采集卡连续采集此过程,利用每一个周期内两个荧光信号的峰值进行归一化的跃迁几率 $B/(A+B)$ 计算,并给出相应的数据和波形图。通过软件同步实现对信号源的远程频率控制,实验中可随时更改信号扫描的相关参数,并在扫描结束时自动停止荧光信号的采集。

钟跃迁谱线扫描需要的核心硬件包括数据采

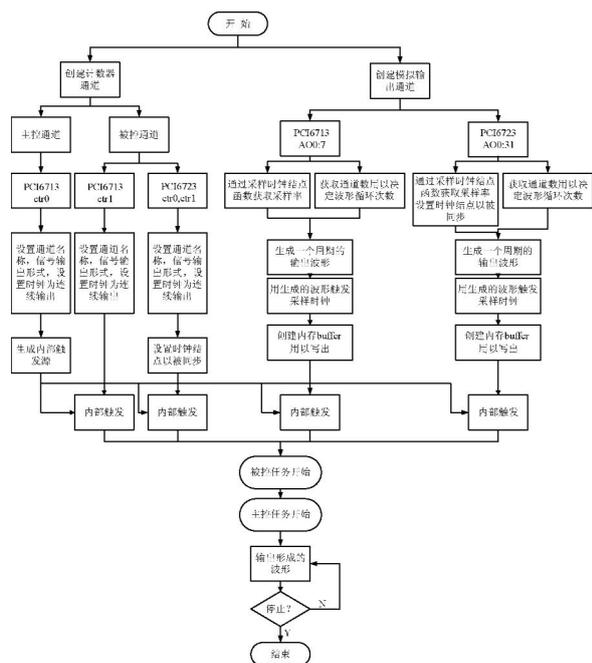


图 9 时序控制软件整体流程图

Fig. 9 Flow chart of sequence control software

集卡 NI USB6341、GPIB 控制器、PMT、电流前置放大器(Newport 公司的 70710QE,将 PMT 采集到的电流信号转换为电压信号并加以放大输入到数据采集卡),以及安捷伦 E8663D 型信号发生器,通过 AOM 对 698 nm 激光器进行步进扫描。

图 10 为谱线扫描软件的流程图。该软件还可以直接采集荧光信号,这里使用归一化采集模式。数据采集与仪器的远程控制程序得到触发信号后同时开始。

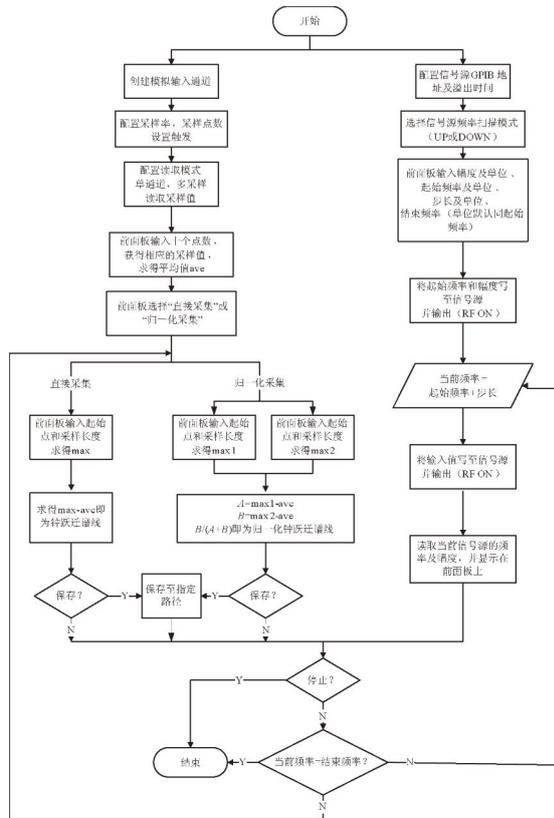


图 10 谱线扫描软件的流程图

Fig. 10 Flow chart of spectral scanning software

4.1 数据采集

数据采集前要配置采样参数,整个铯光钟的运行周期为 1.5 s,461 nm 激光两次探测的时间间隔为 11 ms,两次探测时间均为 4 ms;需要在同一周期内采集到两个荧光信号 A, B,故将 PMT 的探测时间设为 20 ms;这里将数据采集卡每周期的采集时间设置为 30 ms,对信号进行完整的采集,保证了采集信号的分辨率和信号的完整性,程序运行需要时序信号进行触发。这些参数都可以在前面板进行设置,并根据实际情况进行相应的更改。

软件搜索采集荧光信号的最大值,该最大值正比于跃迁的原子数目。在每个采集周期中会搜索两个最大值,即上文提到的 A 和 B,采集到完成后即进行相应的归一化计算。

由于铯光钟整个系统较为庞大,所以噪声来自诸多方面,采集结果自然也存在误差。这里影响较大的是晶格光 813 nm 激光杂散光带来的信号本底波动,主要表现在采集到的信号上下浮动较大,而钟跃迁信号本身又较为微弱,如果使用直接采集到的信号则无法观测到理想信号,所以需要利用程序消除采集到的波动。这里将采集信号中的 10 个点进行平均,用直接采集到的信号将该平均值减去,观测原子的跃迁几率。前面板显示的采样信号图形的横坐标即为点数,输入 10 个波动值所对应的点数即可,程序将自动算出平均值并进行相减。

运行程序后可以在前面板观察直接采集的信号、处理后的峰值信号(即钟跃迁信号)以及处理前的峰值信号,然后根据处理前后峰值的对比观察系统的波动状态。

4.2 仪器远程控制

在钟跃迁谱线扫描的过程中,需要利用信号源对 698 nm 激光器进行频率扫描。软件对信号源进行了远程操控,可以直接在电脑上对其进行操作,并实时显示当前的频率与幅度值。在前面板输入起始频率、结束频率、扫描步长和信号幅度,点击运行即可。程序运行过程中前面板显示当前信号源频率与幅度值,并在信号源扫描结束后直接停止整个程序。

对仪器的控制要参照仪器本身的编程手册^[22-23],并需要在软件编程中设置仪器的 GPIB 地址、超时和相应的指令语句。

4.3 实验结果

图 11 为采集到的完整的归一化跃迁几率图。698 nm 激光的扫描频率为 239.53~239.21 MHz,扫描步长为 1 kHz,激光功率为 6 mW,光斑直径为 0.2 mm,得到的钟跃迁谱线中心载波的半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)约为 2.7 kHz。如果将激光功率降低至 1 mW,磁场强度降至 0.05 mT,可以得到载波线宽为 180 Hz 的

铯原子钟跃迁谱线(如图 11 中插图所示)。

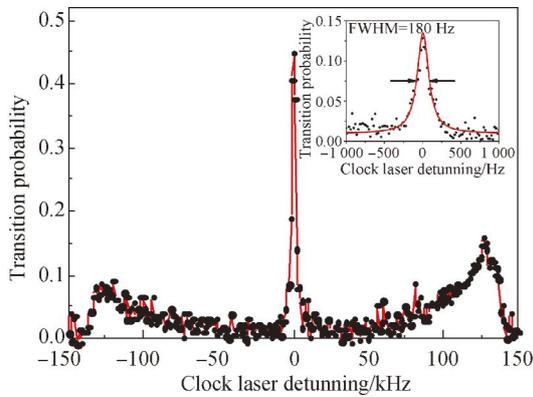


图 11 铯原子钟跃迁谱线

Fig. 11 Clock transition spectral line of strontium

参考文献:

- [1] DIDDAMS S A, BERGQUIST J C, JEFFERTS S R, *et al.*. Standards of time and frequency at the outset of the 21st century [J]. *Science*, 2004, 306: 1318-1324.
- [2] MAJOR F G. *The Quantum Beat Principles and Applications of Atomic Clocks* [M]. USA: Springer Science + Business Media, LLC Press, 2007:167
- [3] HALL J L. Defining and measuring optical frequencies [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2006, 78: 1279-1295.
- [4] MA L S. Optical clock [J]. *Physics*, 2008, 37: 716-719.
- [5] BLOOM B J, NICHOLSON T L, WILLIAMS J R, *et al.*. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level [J]. *Nature*, 2014, 506, 71-75.
- [6] HINKLEY N, SHERMAN J A, PHILLIPS N B, *et al.*. An atomic clock with 10^{-18} instability [J]. *Nature*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [7] DAS M, OHKUBO T, TAKAMOTO M, *et al.*. Cryogenic optical lattice clocks [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3):185-189.
- [8] TAKAMOTO M, HONG F L, HIGASHI R, *et al.*. An optical lattice clock [J]. *Nature*, 2005, 435:321-324.
- [9] KATORI H. Optical lattice clocks and quantum metrology [J]. *Nat. Photonics*, 2011, 5:203.
- [10] 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*

5 结 论

本文设计了铯原子光钟的自动控制系统,包括时序控制系统和信号采集处理系统。完成了铯原子的两级冷却和光晶格囚禁,并成功获得了铯原子光钟的钟跃迁谱线。谱线所展现的高信噪比和窄线宽特点表明,整个铯光钟系统的运行较为稳健,也说明本文所设计的自动控制系统符合铯原子光钟的要求。数据采集卡模拟输出通道输出的时序信号, TTL 上升沿时间为 $1 \mu\text{s}$, 计数器通道输出的 TTL 上升沿时间在百 ns 级别, 每路信号之间的延迟小于 $5 \mu\text{s}$, 满足铯原子光钟实验的控制精度要求。

Communications, 2015, 7896: 1-8.

- [11] GUROV M, MCFERRAN J J, NAGÓRNY B, *et al.*. Optical lattice clocks as candidates for a possible redefinition of the SI second [J]. *IEEE Trans. Instrum. and Measure*, 2013, 62(6):1568-1573.
- [12] FALKE S, LEMKE N, GREBING C, *et al.*. A strontium lattice clock with 3×10^{-17} inaccuracy and its frequency [J]. *New J. Physics*, 2014, 16: 073023.
- [13] 曲兴华, 职广涛, 张福民, 等. 利用信号拼接提高调频连续波激光测距系统的分辨力 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1):40-47.
QU X H, ZHI G T, ZHANG F M, *et al.*. Improvement of resolution of frequency modulated continuous wave laser ranging system by signal splicing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 40-47. (in Chinese)
- [14] 何玲平, 陈波, 杨林, 等. 基于虚拟锁相的原位光学测量技术 [J]. *光学精密工程*, 2015, 16(9): 1677-1681.
HE L P, CHEN B, YANG L, *et al.*. In situ optic measuring technique based on virtual lock-in [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 16(9):1677-1681. (in Chinese)
- [15] 王奎龙, 陆璇辉, 陈和. 虚拟仪器在激光冷却原子实验中的应用 [J]. *光电子激光*, 2010, 21(2): 183-186.
WANG K L, LU X H, CHEN H. Application of virtual instrument in the experiments of laser cooling atoms [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, 21(2):183-186. (in Chinese)

- [16] 杰弗里特拉维斯, 吉姆克林. LabVIEW 大学实用教程[M]. 第三版. 乔瑞萍, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011:111-310.
TRAVIS J, KRINF J. *LabVIEW for Everyone* [M]. 3rd edition, QIAO R P, Transl., Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2011: 111-310. (in Chinese)
- [17] 田晓, 常宏, 王心亮, 等. 利用塞曼减速法实现锶同位素的磁光阱俘获[J]. 光学学报, 2012, 30(3): 898-902.
TIAN X, CHANG H, WANG X L, *et al.*. Trapping four isotopes of strontium in a MOT by using zeeman slowing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 30(3): 898-902. (in Chinese)
- [18] 谢玉林, 卢本全, 刘辉, 等. 锶原子二级 Doppler 冷却及温度的测量[J]. 量子光学学报, 2015, 21(2): 136-142.
XIE Y L, LU B Q, LIU H, *et al.*. Achieving the second doppler cooling and measuring the temperature of strontium atoms[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2015, 21(2):136-142. (in Chinese)
- [19] DICKE R H. The effect of collisions upon the doppler width of spectral lines [J]. *Phys. Rev. A*, 1953, 89: 472.
- [20] TAICHENACHEV A V, YUDIN V I, OATES C W, *et al.*. Magnetic field-induced spectroscopy of forbidden optical transitions with application to lattice-based optical atomic clocks[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, 96: 083001.
- [21] 田晓. ⁸⁸Sr 光晶格装载及钟跃迁探测的实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015:79-90.
TIAN X. *Experimental Study on Loading ⁸⁸Sr Into Anoptical Lattice and Probing its Clock Transition* [D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 79-90. (in Chinese)
- [22] *Agilent Technologies Signal Generators E8663D PSG Programming Guide* [M]. USA: Agilent Technologies, Inc, 2012: 1-74.
- [23] *Agilent Technologies E8257D/ 67D, & E8663D PSG Signal Generators SCPI Command Reference* [M]. USA: Agilent Technologies, Inc, 2011: 1-156.

作者简介:



任 洁(1986—),女,陕西西安人,硕士,研究实习员,2013年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事锶原子光频标方面的研究。E-mail: raphael_pp@126.com



常 宏(1977—),男,山西太原人,研究员,博士生导师,2005年于山西大学获得博士学位,2005年至2007年在法国国家科研中心做博士后、助理研究员,主要从事锶原子光频标方面的研究。E-mail: changhong@ntsc.ac.cn