

一套实用的铯原子喷泉光学系统 的设计及建立

王晓辉 侯继东 陈徐宗 杨东海 王义遒
(北京大学电子学系, 北京 100871)

摘 要 介绍了实现铯原子喷泉的过程及条件, 并详细讨论了光路中各种光学元件对铯原子喷泉光学系统性能的影响。在对各种光学元件性能综合考虑的基础上, 设计并建立了一套用于进行激光冷却和上抛的铯原子喷泉的光学系统, 使光强控制、失谐调整、光束开关、光束质量等多种参数的控制达到了技术要求。在此基础上, 实现了铯原子磁光阱, 为实现铯原子喷泉奠定了基础。

关键词 原子喷泉, 光学系统, 冷原子。

1 引 言

原子喷泉型频标以其优异的准确度(2×10^{-15})和稳定度(短期稳定度 $4 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$)成为目前世界上最准确的频率基准^[1], 在频率计量标准和精密测量领域占据越来越重要的地位。

历史上原子喷泉思想是 Zacharias^[2]在 50 年代提出来的。早期的实验是利用垂直原子束中的原子上抛, 但由于原子束中慢速原子太少实验未能成功。原子激光冷却与囚禁技术的出现与发展, 使原子喷泉型频标得以长足的发展。1989 年美国斯坦福大学的 Chu 小组^[3]首先实现了激光冷却的钠原子喷泉, 获得线宽为 2 Hz 的冉赛(Ramsey)跃迁信号。后来 Clairon^[1, 4]等人采用一维运动光学粘团上抛原子团方法实现了铯原子喷泉, 得到线宽为 0.7 Hz 的冉赛信号, 并在 1995 年制成喷泉频标系统。这种移动光学粘团的方法, 使原子团在上抛过程中保持原有温度不变, 从而克服了上抛过程中引入的加热效应。后来他们又根据铷原子在相同密度下的碰撞频移小于铯原子的特点, 实现了铷原子喷泉, 实验上得到了线宽为 1 Hz 的冉赛信号^[5]。这种铷原子喷泉频标可以使系统的稳定度和准确度分别达到 $1 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 和 10^{-17} , 提高了喷泉频标的性能。此外, 日本的计量研究所采用两维移动光学粘团的方法实现铯原子喷泉频标的多脉冲运行, 在 1.7 s 时间间隔内实现了 17 个喷泉脉冲, 得到了线宽为 1 Hz 的冉赛信号^[6]。这种多脉冲连续运行工作方式, 缩短了喷泉频标中脉冲间隔时间, 减少了每次脉冲内的原子数目, 并保持单位时间内的原子数目不变, 从而减小了慢速原子间碰撞引起的频移, 提高了整个频标系统的准确度和稳定度。此外, 美国的 NIST 小组^[7]、加拿大^[8]、英国^[9]、德国^[10]、瑞士^[11]等许多国家都在致力于喷泉频标的研究。国内北京大学在 1993 年便开始了激光冷却和囚禁原子的实验研究^[12, 13], 现在已经建成了一套铯原子喷泉系统实验装置^[14]。利用磁光阱技术对喷泉光学系统进行初步测试的结果表明, 该系统的设计是切实可行的, 达到了原子喷泉实验所要求的技术指标。本文针对原子喷泉的设计要求, 介绍了光学系统的设计

方案, 并给出一些实验结果。

2 原子喷泉光学系统的设计要求

为了说明实现原子喷泉对光学系统的要求, 首先描述一下原子喷泉的实现过程。图 1 是原子喷泉的示意图。

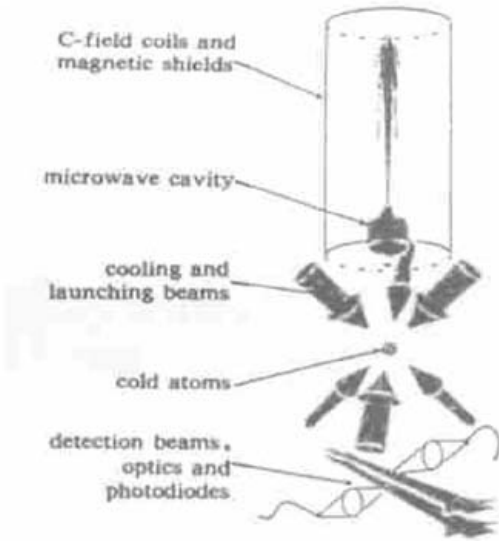


Fig. 1 The diagram of atomic fountain

在原子喷泉实验中, 为了获得好的信噪比, 需要冷原子的数目足够多。磁光阱可以在气体中直接捕获低速原子, 并使之进一步冷却, 具有囚禁势阱深、囚禁时间长特点, 所以成为获得冷原子的标准技术。磁光阱中囚禁冷原子的数目与冷却光的失谐、光强、光束直径等参量有关^[15]。冷却光的失谐量小, 光与原子作用强但速度捕获范围小; 失谐量大, 光与原子作用弱但捕获范围大。因此冷却光存在最佳失谐量。另外势阱中囚禁的原子数目随囚禁光光强增加而增多, 当光强 $I > I_0 \delta^2 \Gamma^{-2}$ (I_0 为饱和光强, $I_0 = 1.1 \text{ mW/cm}^2$, δ 为失谐量, Γ 为自然线宽) 时, 囚禁的原子数目不随光强变化, 而呈饱和趋势; 另外囚禁光束直径越大, 与原子作用的

范围也越大, 囚禁的原子数目也越多。从以上分析可以看出, 若想得到囚禁数目足够多的冷原子, 必须对磁光阱中冷却光参量进行仔细考虑, 寻找最佳参量。

要获得尽可能多的冷原子, 需要磁光阱中囚禁光较强, 失谐量较小。由于有磁场梯度的存在, 在磁光阱中原子的最低冷却温度约几十 μK 至几百 μK ^[16]。而为了使冷原子上抛, 实现原子喷泉, 原子在上抛路径上不致因为温度过高而扩散开, 则要求上抛原子的温度在几 μK 的量级, 所以在得到磁光阱中的冷原子后, 还需要利用光学粘团方法, 进一步降低原子的温度。另外在进一步冷却原子温度前, 还需要先利用移动光学粘团的方法实现冷原子上抛。这是因为在刚刚关闭梯度磁场时, 光学粘团的温度较高, 可以允许的加速度 dv_z/dt 较大, 可在短时间内 (1 ms) 通过改变上下冷却光的频率而使较高温度的光学粘团获得所需的上抛速度。

$\sigma^+ - \sigma^-$ 组态的三维光学粘团中, 在偏振梯度冷却机制作用下, 原子的最终冷却温度 T_{lim} 与基态光频移 ΔE_g 有关^[16], 满足

$$K_B T_{\text{lim}} = 0.097 \times |\Delta E_g| = 0.097 \frac{2h \delta s C_{ge}^2}{1 + 4\delta^2/\Gamma^2},$$

δ 为冷却光的失谐量, C_{ge} 为基态和激发态之间的克莱布斯-戈登 (Clebsch-Gordan) 系数, s 为饱和参量, Γ 为跃迁谱线的自然线宽。从上式可以看出, 要得到更低的温度应通过加大冷却光的失谐和降低光强以减小光频移来实现。因此进一步降低原子温度的步骤一般是在对冷原子实施上抛操作后, 减小冷却光的光强, 加大冷却光的失谐量, 使冷原子的温度进一步降低。这一过程称为后冷却过程。

该原子喷泉系统采用了两个微波腔, 上面的微波腔使原子和微波场相互作用以产生再赛跃迁信号, 下面的微波腔用来选态和消除喷泉束中与跃迁无关的原子以减小碰撞频移。其工作原理如下: 上抛的冷原子初始位于超精细子能级 $6S_{1/2}, F = 4$, 在经过第一个微波腔时, 位

于 $6S_{1/2}, F = 4, m_F = 0$ 磁子能级上的原子受到一 π 微波脉冲作用, 跃迁到磁子能级 $6S_{1/2}, F = 3, m_F = 0$ 上, 这时对原子施加一调谐于 $6S_{1/2}, F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}, F' = 5$ 行波光脉冲, 处于 $6S_{1/2}, F = 4, m_F \neq 0$ 子能级上的原子就会在此光脉冲的作用下被打出喷泉束, 只剩下处于 $F = 3, m_F = 0$ 的原子参与微波跃迁。这样那些对跃迁无贡献的原子就会大大减少, 从而减小了碰撞频移对喷泉频标性能的影响。

原子在上抛和下落过程中, 经历两次与微波作用, 产生再赛跃迁。探测区位于囚禁区下方 10 cm 处, 改变激励微波的频率进行喷泉实验, 便可以得到铯原子钟跃迁的再赛信号。

实现原子喷泉频标, 除了要求冷原子的数目足够多, 以获得好的信噪比和短期稳定度外, 为了增加信噪比和减小微波场分布相移对频率准确度的影响, 还需要原子的温度尽可能低。这是因为原子的横向运动会减少探测到的原子数目(原子数目正比 n/T_{\perp} , T_{\perp} 是横向温度^[17])并引起分布相移。但是这并不意味着原子温度越低越好, 因为在低温只有几 μK 时, 原子的德布罗意波长 λ_{dB} 很大, 这样自旋碰撞截面 $\sigma \approx \lambda_{\text{dB}}^2/\pi$ 非常大, 引起的碰撞频移就很大, 因此原子温度太低又会引起新的问题。所以在选择冷却参量时, 要对各种参量综合考虑, 以获得最佳冷却条件。

从以上对原子喷泉实现过程的分析和讨论可以看出, 为了获得高稳定和高密度囚禁的冷原子, 需要对喷泉光学系统的一些冷却参量比如冷却光频率的稳定、光束强度、光束质量、光斑大小等参量进行仔细考虑。原子喷泉实现过程中还需要对冷却光的失谐、光强大小等参量进行控制。相对于单纯的磁光阱系统而言, 在原子喷泉频标中, 对光学系统的设计提出了更加严格的要求。

1) 冷却光频率的稳定, 可保证冷却光较稳定地和原子作用。冷却光的中心频率稳定在 1 MHz 以内。

2) 为实现对原子进一步冷却, 需增大冷却光的失谐量, 要求其变化量一般在 $-5 \text{ MHz} < \delta < -70 \text{ MHz}$ 范围内变化。

3) 在磁光阱阶段, 为得到尽可能多的原子数目和提高捕获速率, 冷却光强一般很大, 最大值一般在 10 mW/cm^2 ; 在对冷原子降温的光学粘团阶段, 要降低冷却光光强, 一般最小值为 0.2 mW/cm^2 。所以要求冷却光强的变化范围一般为 $10 \sim 0.2 \text{ mW/cm}^2$ 。

4) 原子受两束对射冷却光的作用而被囚禁于阱中心, 若两束对射光的光强不平衡, 则会导致原子两边受力不均匀而被打散。一般要求对射光强的不一致性低于 5%。

5) 若对射方向的光束准直不好, 在磁光阱中冷原子团则会受到力矩的作用而发生旋转; 而在光学粘团阶段, 由于原子受力方向的不一致, 导致冷原子团被打散。所以在喷泉频标中, 对光束的准直度要求很严格, 一般要求对射光束的不准直度低于 1 mrad。

6) 冷却光的空间模式要好, 才能保证较高的囚禁和冷却效率。要求单模高斯光束基模截面中部光强均匀, 边缘呈高斯分布衰减。

3 喷泉光学系统设计的总体框架

光学元件的性能是原子喷泉光学系统设计的前提和根据。在实验中对光学元件的性能作了测试和分析, 在对各光学元件性能综合考虑的基础上, 提出了喷泉光学系统设计方案。

3.1 大范围移频的实现——正负两次移频方案

冷却光失谐量的控制是通过利用声光调制器(AOM)双通过装置来实现。其实验装置如图

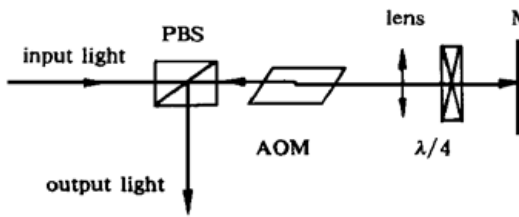


Fig.2 The apparatus of AOM double pass system

2所示。声光晶体AOM和反射镜M分别放置于透镜的前后两个焦点处,入射光通过声光晶体出现0级和+1级(或0级与-1级)衍射,在反射镜处通过一光阑取其+1(或-1)级衍射光作为反射光。一级衍射光沿原光路返回时,再次经过声光晶体产生二次衍射,二次衍射光的方向与入射光轴线重合,调节 $\lambda/4$ 波片方向,使出射光的偏振方向与入射光垂直,经过偏振分束镜(PBS)后便与入射光分开。这种双通过装置保证了声光调制器驱动频率变化时,输出光的方向不变。

由于来回两次通过声光晶体移频,得到了二倍移频量。

作者利用正负两次移频方案来实现对冷却光大失谐的控制。其设计思想为:锁定于某一跃迁频率处的光通过1[#]声光晶体组成双通过装置进行一次正移频,得到一正失谐频率的光,再使其通过2[#]声光晶体双通过装置进行一次负移频,移频后光的失谐量为两次正负移频之和。固定2[#]声光晶体驱动频率在其衍射中心处(100 MHz),由于1[#]声光晶体可以在较大频率范围内(65~97 MHz)变化,这样通过正负两次移频方案,就可以实现冷却光失谐量在-6~70 MHz范围内变化,从而满足了对冷却光大失谐控制的要求。

3.2 冷却光功率放大——两级注入锁定技术

在原子喷泉实验中,除了对冷却光的频率严格控制外,还要求激光器有较高的输出功率。由于所采用的外腔激光器的输出功率很小(10 mW左右),远不能满足冷却和囚禁的需要。采用注入锁定技术可以解决这一问题^[18, 19],从而实现功率放大。作者采用了两级注入锁定技术,用稳频窄线宽的主激光器输出光注入锁定一个150 mW从激光器进行功率一级放大,然后再通过正负两次移频装置进行移频,两次移频后的光再注入锁定另外三个150 mW从激光器进行二级功率放大,从而就可以得到大功率的冷却光输出。

3.3 光斑质量的改善——单模保偏光纤的使用

光束的光斑质量对激光冷却所能达到的最低温度有重要影响。由于半导体激光器的输出光为椭圆光斑,并且光学元件的质量不太高,导致激光系统输出光束的质量很不理想。为改善光斑质量,作者采用光纤做为空间滤波器件,并用此来连接光学平台与喷泉装置之间的光路,这样就使光束质量得到大幅度改善,获得了很好的强度为高斯分布光束,并克服了两部分装置之间机械震动对光束稳定性的影响。

在上述设计框架下,建立了一套铯原子喷泉光学系统,实现了对喷泉各种参量的自动控制,达到了技术指标的要求。在此基础上,得到了铯原子的磁光阱信号,为下一步观测喷泉再赛信号奠定了基础。

4 实验系统的建立

4.1 激光系统

激光系统由6个半导体激光器组成。其中一个作为光学系统注入锁定的主激光器,其频率锁定于 $6S_{1/2}$, $F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}$, $F' = 5$ 循环跃迁。4个150 mW、波长为850 nm的激光器(SDL-5422-H1)SL1、SL2-1、SL2-2、SL2-3作为一级和二级注入锁定放大的从激光器,另外

一个功率为 10 mW 的分布布拉格反射 (DBR) 激光器频率锁定于 $6S_{1/2}$, $F = 3 \rightarrow 6P_{3/2}$, $F' = 4$ 循环跃迁线, 作为抽运光激光器。图 3 是原子喷泉光学系统光路图。

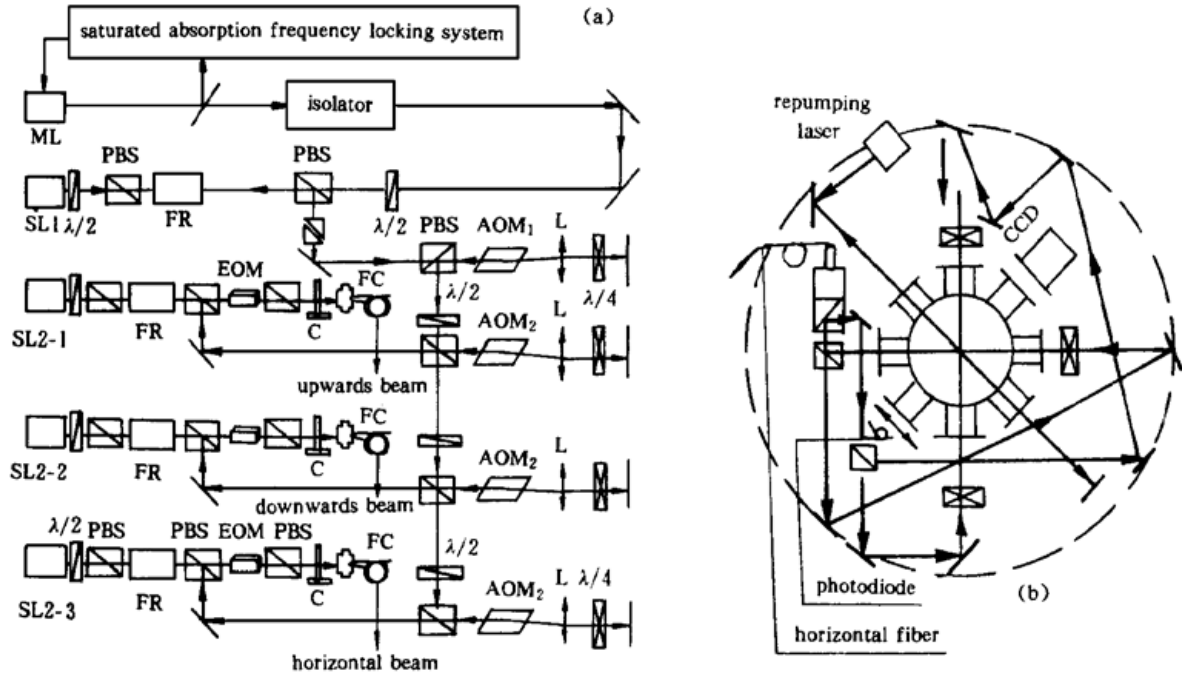


Fig. 3 (a) The main system optical set-up for the Cs fountain, (b) The optical system of horizontal beam

4. 1. 1 窄线宽主激光器的选用及其频率锁定

一般半导体激光器的激光腔长很短, 其输出激光线宽在 10~ 500 MHz。激光线宽对原子在多普勒冷却机制下冷却温度影响较大^[20], 为提高囚禁和冷却光的效率, 需要使用窄线宽的激光作为冷却光。选用窄线宽的激光器是设计光学系统首先考虑的问题。作者选用的主激光器是 New Focus 公司的波长在 850 nm 附近、内部结构为衍射光栅反馈型半导体激光器 (Vortex 6000), 其线宽在 200 kHz 以下, 实际输出功率 25 mW。

利用偏置饱和吸收锁定系统和数字辅助锁定环路 (DALL) 的方法对主激光器进行稳频^[21, 22], 将其频率锁定于铯原子 D_2 线的 $6S_{1/2}$, $F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}$, $F' = 5$ 循环跃迁谱线。使用数字辅助锁定环路增加了频率锁定的动态范围和主锁定环路的增益, 提高了频率控制系统的精确度和长期稳定性, 锁定后中心频率漂移小于 100 kHz。这套伺服环路锁定技术可以稳定锁定主激光器的频率几十小时。

4. 1. 2 激光级联系统——冷却光功率放大及大失谐变化的实现

1) 主激光器功率放大 主激光器 (ML) 功率放大光路如图 3(a) 所示: 主激光器输出光经一反射率为 4% 的玻璃片反射一小部分用于饱和吸收稳频; 大部分透射光经两级光隔离装置, 再经过一 70% 反射镜反射; 透射光作为探测光 ($F = 4 \rightarrow F' = 5$ 循环跃迁); 反射光通过一 $\lambda/2$ 波片和由两个偏振分束镜 PBS、一个法拉第旋转器 FR 组成的光隔离器注入到一级 150 mW 从激光器 SL1 中; 调整一级从激光器前的 $\lambda/2$ 波片角度使输出光竖直偏振分量最大, 这样就实现了对激光功率的一级放大。获得的一级光的功率为 90 mW, 频率锁定于铯原子的 $F = 4 \rightarrow F' = 5$ 循环跃迁线。

2) 正负两次移频方案的实现 移频光路如图 3 所示。具体实现过程为: 由于一级声光移频的声光晶体 AOM_1 孔径很小 (3 mm), 一级输出光斑有 5 mm, 移频前先利用一对角劈窄光束。由角劈出来的光经过由 AOM_1 组成的双通过移频装置进行正移频, 其频率正失谐移到

$F = 4 \rightarrow F' = 5$ 跃迁线以上 $90 \text{ MHz} \times 2$ 处; 正移频出来的光利用 $\lambda/2$ 波片和偏振分束镜把它依次均匀分为三束, 这三束光分别再通过由 AOM_2 组成的双通过移频装置进行负移频至 $-100 \text{ MHz} \times 2$; 经过两次移频后, 获得的冷却光总的失谐量为 -20 MHz 。将 AOM_2 的驱动频率固定在其中中心频率处不变 (100 MHz), 改变 AOM_1 的驱动频率, 使正失谐量在 $+65 \sim +97 \text{ MHz}$ 范围内变化, 这样就可获得在 $-6 \sim -70 \text{ MHz}$ 范围内变化的失谐量。

把光学粘团上抛时, 需改变上下两束光的频率, 失谐量 $\Delta\nu$ 最大为 5 MHz , AOM_2 可实现此小范围内的移频, 这种光路设计解决了声光晶体衍射带宽窄和衍射效率低所带来的困难。

3) 大功率冷却光的获得——二级从激光器注入锁定的实现 一级放大光经正负移频后, 出来 3 束负失谐频率的光, 每束光光强 2 mW , 这 3 束光分别注入锁定 3 个 150 mW 的半导体激光器 SL2-1、SL2-2、SL2-3, 从这 3 个激光器输出的光作为竖直向上、竖直向下和水平方向的冷却光, 输出光经光隔离装置和电光晶体后达 60 mW , 满足了冷却光需大光强的要求。

采用法布里-珀罗腔(其扫描带宽为 1.6 GHz) 监测其输出光模式作为锁定好坏的最后判据。这时若使主激光器处于自由扫频状态, 从示波器上可以看到锁定的模式在跟随主激光器扫频, 模式尖峰只随主激光器频率变化左右移动, 峰值高度不变。由此可以判定整个光学系统都已处于很好的锁定状态。这样通过二级注入锁定系统, 实现了对 3 对冷却光频率的控制, 获得了满足一定失谐量要求的大功率冷却光。

4.2 冷却光的控制——光强和光关断控制

4.2.1 光强的控制

在光学粘团阶段, 降低原子温度, 除了加大冷却光失谐, 还要减小冷却光的光强。采用电光晶体(EOM)和偏振分束镜相结合的方法控制冷却光光强。自制了电光晶体的驱动电路, 在外界可变信号($0 \sim 5 \text{ V}$)的控制下, 可以连续输出 $0 \sim 400 \text{ V}$ 的控制电压。当输出电压为电光晶体的半波电压(300 V)时, 冷却光经过电光晶体和偏振分束镜后输出光强最小, 为 2 mW 。

4.2.2 冷却光的关断

把光学粘团上抛后, 要立刻关断冷却光, 以避免有光继续作用在原子上引起跃迁原子数的变化和避免光进入到微波腔内引起光频移。关断冷却光时, 要求 3 束冷却光同时关断, 这样才能保证冷原子在冷却光关断时不会因为各路光的关断时间不一致, 被滞留的行波打散。采用继电器带动一个机械斩光臂, 经过认真仔细调节机械斩光臂的位置, 在外界脉冲电压控制下上下摆动, 实现了对三束冷却光的同步关断。在斩光器 C 后放置光电管来探测冷却光束是否同时关断。图 4 是对三束冷却光同时关断的信号图, 图中横坐标是关断时间, 纵坐标是

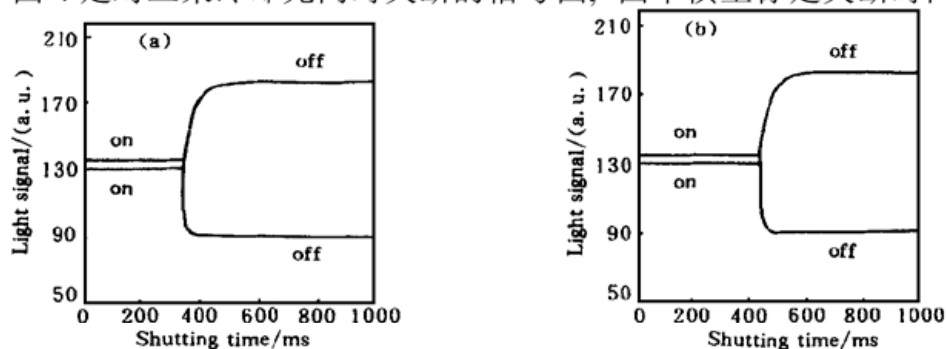


Fig. 4 The shutting single of laser beam. (a) Shutting the horizontal beam and one of the vertical beam synchronously; (b) Shutting the two vertical beams synchronously

光电管探测到的光电流信号。从图中可以看出,三路光基本上实现了同时关断,关断先后时间差不超过 0.1 ms,满足了喷泉实验中对冷却光关断的要求。

5 喷泉光学系统初步运行结果——磁光阱信号的观测

在上述光学系统基础上,利用时序控制系统,对冷却光的光强、失谐等冷却参量进行了自动控制,冷却光光强在 $0.2 \sim 10 \text{ mW/cm}^2$,失谐量在 $-6 \text{ MHz} \sim -70 \text{ MHz}$ 变化范围内,都观察到了磁光阱中冷原子信号。图 5 是在失谐量为 2Γ 、冷却光总光强为 6 mW/cm^2 、磁场梯度为 $13 \times 10^{-4} \text{ T}$ 的情况下,利用 CCD 装置得到的冷原子图像,原子云直径有 1.5 mm。原子数目为 4.2×10^7 个,密度为 $1.4 \times 10^{10} \text{ atom/cm}^3$,原子团的热力学温度为 $270 \mu\text{K}$ 。



Fig.5 Photograph of cold cesium atomic cloud in MOT taken by CCD

总 结 本文提出了一种实现原子喷泉的光学系统设计方案。采用这套光学系统,观测到了喷泉实验的初步结果——冷原子信号。由于此光学系统可以在外部时序信号的控制下,对冷却光的失谐、光强、光束关断等参量进行毫秒量级的控制,为以后进行原子的进一步冷却和上抛、喷泉再赛信号的观测奠定了坚实的基础。在此磁光阱的基础上,可通过时序信号控制系统产生一系列的脉冲信号来关断磁场,降低光强,加大失谐,降低原子团的温度,然后对冷原子上抛,观测再赛信号。下一步的工作正在进行中。

参 考 文 献

- [1] Clairon A, Laurent P, Santarelli G *et al.*. A cesium fountain frequency standard: Preliminary results. *IEEE Instrum. & Measur.*, 1995, **44**(2) : 128~ 131
- [2] Zacharias J R. X rays and spectra. *Phys. Rev.*, 1954, **94**(3) : 751~ 752
- [3] Kasevich M A, Riis E, Chu S. rf spectroscopy in an atomic fountain. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **63**(6) : 612~ 615
- [4] Clairon A, Salomon C, Guellati S *et al.*. Ramsey resonance in a Zacharias Fountain. *Europhys. Lett.*, 1991, **16**(2) : 165~ 170
- [5] Bize S, Sortais Y, Santos M S *et al.*. High accuracy measurement of the ^{87}Rb ground state hyperfine splitting in an atomic fountain. *Europhys. Lett.*, 1999, **45**(5) : 558~ 564
- [6] Ohshima S, Kurosu T, Ikegami T *et al.*. Multipulse operation of cesium atomic fountain. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(9A) : 1170~ 1173
- [7] Jeffers S R, Meekhof D M, Shirley J H *et al.*. Cesium fountain frequency standard: Preliminary results. *Proc. 1998 IEEE International Frequency Control Symposium.*, USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1998. 2~ 5
- [8] Boulanger J S, Gagne M C, Douglas R J. Cold atoms and cesium fountains at NRC. *Proc. 1996 IEEE International Frequency Control Symposium.*, USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1996. 1089~ 1096
- [9] Whibberley P, Henderson D, Lea S. Development of a cesium fountain: Primary frequency standard at the NPL. *Proc. 13th European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium.*, France, Société Française des microtechniques et de chronométrie, 1999. 70~ 73
- [10] Hubner U, Weyers S, Castellanos J *et al.*. Progress of the PTB caesium fountain frequency standard. *Proc. 12th European Symposium on Frequency Standard and Metrology*, Poland, Tele & Radio

- Research Institute, 1998. 544~ 547
- [11] Berthoud P, Joyet A, Thomann P. Frequency standard based on a continuous beam of laser cooled atoms. *Proc. 1994 IEEE International Frequency Control Symposium.*, USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1994. 128~ 129
- [12] Gan Jianhua, Li Yimin, Wang Yiqiu *et al.*. Magneto-optical trap for Cs atoms. *Chin. Phys. Lett.*, 1996, **13**(11) : 821~ 824
- [13] Hou Jidong, Li Yimin, Yang Donghai *et al.*. Preliminary results on the first optical molasses of Cs atoms in China. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(6) : 413~ 415
- [14] Wang Yiqiu, Hou Jidong, Yang Donghai *et al.*. Work towards a cesium fountain standard at Peking University. *Proc. 12th European Frequency and Time Forum.*, Poland, Tele & Radio Research Institute, 1998. 574~ 575
- [15] Li Yimin, Chen Xuzong, Wang Yiqiu. Motion of cesium atoms in the one dimensional magneto-optical trap. *Acta Physica Sinica.*, 1995, **4**(10) : 727~ 737
- [16] Metcalf H, Van der Straten P. Cooling and trapping of neutral atoms. *Phys. Rept.*, 1994, **244**(4, 5) : 203~ 286
- [17] Steane A M, Foot C J. Laser cooling below the Dopple limit in a magneto-optical trap. *Europhys. Lett.*, 1991, **14**(3) : 231~ 236
- [18] Kobayashi S, Kimura T. Injection locking in AlGaAs semiconductor laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(5) : 681~ 689
- [19] 陈徐宗, 甘建华. 大频差范围半导体激光注入锁定及相干特性转移. *量子光学学报*, 1996, **2**(3) : 183
- [20] Li Yimin, Yang Donghai, Wang Yiqiu. Laser cooling in phase fluctuating laser field. *Acta Physica Sinica. (Overseas Edition)*, 1998, **7**(6) : 414~ 421
- [21] Yang D H, Wang Y Q. A simple method to stably lock a diode laser frequency to an atomic transition line for a long period. *Opt. Commun.*, 1990, **80**(1) : 23~ 25
- [22] Yang D H, Wang Y Q. Preliminary results of an optically pumped cesium beam frequency standard at peking university. *IEEE Trans Instrum. & Measur.*, 1991, **40**(6) : 1000~ 1002

Design and Setting up of a Practical Optical System for Cesium Atomic Fountain

ang Xiaohui Hou Jidong Chen Xuzong Yang Donghai Wang Yiqiu
(*Department of Radio-Electronics, Peking University, Beijing 100871*)
(Received 16 April 1999; revised 27 July 1999)

Abstract The process and conditions of cesium atomic fountain were introduced with detailed discussion of the influence of the optical component on fountain optical system. An optical system for cesium fountain, used for cooling and launching atoms, was designed and set up. The parameters control such as intensity, detuning, light switch, beam quality meets to the demand of technology. The Cs magneto-optical trap for atomic fountain has been realized in this laser system. The work laid the groundwork for the realization of Cs atomic fountain.

Key words atomic fountain, optical system, cold atoms.