

冷原子束在线检测系统

王晓佳^{1,2} 冯焱颖^{2,3} 薛洪波²

¹中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051
²清华大学精密仪器与机械学系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084
³中国计量科学研究院-清华大学精密测量联合实验室, 北京 100084

摘要 应用荧光法和飞行时间(TOF)法实现了冷原子束纵向速度谱、通量及原子能态分布的在线检测。设计用于荧光收集的光学系统和机械结构, 实现了焦距可微调的即插即用式荧光检测装置, 实现了冷原子束检测系统的集成性和检测结果的高信噪比(SNR)。利用 LabView 软件实现对光电倍增管(PMT)、飞行时间法检测时序及检测激光的扫频范围等的控制, 可在线得到原子束性能参数, 并对数据进行平滑处理。检测结果表明, 检测系统检测信号的信噪比为 57:1(在 20 ms 内)。

关键词 原子与分子物理学; 冷原子束; 飞行时间法; 荧光法; 能态检测

中图分类号 O562.5; O431.2; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0508004

An Online Detection System for Atomic Beam

Wang Xiaojia^{1,2} Feng Yanying^{2,3} Xue Hongbo²

¹Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

²State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

³Joint Institute of Measurement Science, National Institute of Metrology-Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract An online detection system is developed for measuring the longitudinal velocity spectrum, flux and populations in specific states of an atomic beam, through the fluorescence and the time of flight (TOF) method. A fluorescence collection optical system with a plug and play and focal length adjustable mechanical structure is designed to improve the system integration and the signal to noise ratio (SNR). The system is used to measure and analyze on-line performance of an atomic beam, with a program based on LabView for the control of the photomultiplier tubes (PMT), the timing of TOF, the sweep range of the probe laser, and smoothing the results. The experimental results show that the SNR up to 57:1 (in 20 ms) can be obtained in this system.

Key words atomic and molecular physics; cold atomic beam; time of flight; fluorescence; state detection

OCIS codes 020.1335; 020.3320; 020.7010; 040.5250; 140.7010

1 引 言

冷原子束被广泛应用于基础物理研究以及各种超精密计量与测试技术领域, 如原子光刻、原子频

标、原子重力仪、原子陀螺和原子重力梯度仪等^[1~8]。其性能参数包括纵向速度及速度分布、通量和能态等, 对这些应用的测量精度有重要影

收稿日期: 2012-01-09; **收到修改稿日期**: 2012-03-15

基金项目: 国家 973 计划(2010CB922901)、国家自然科学基金(50775127)和清华大学校内自主科研计划(2009THZ06)资助课题。

作者简介: 王晓佳(1980—), 女, 博士研究生, 主要从事冷原子物理、冷原子束、原子光学等方面的研究。

E-mail: xiaojia_w@163.com

导师简介: 冯焱颖(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事原子光学技术及其在惯性和磁场传感领域的应用等方面的研究。E-mail: yyfeng@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

响^[9,10]。实现这些参数的在线实时监测有助于及时对束源进行调节以提高系统的性能和对实验结果进行分析评估。

冷原子束可通过塞曼减速器、原子漏斗和低速高通量源(LVIS)等方法实现,原子束纵向最可几速度范围一般为 5~50 m/s,通量一般为 $10^8 \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$ ^[11-13]。冷原子束重要的检测参量有原子束通量、原子纵向速度和纵向速度分布等。对原子束通量的测试方法主要有荧光法和吸收法。通过对检测激光的吸收功率测试得到原子束信号的方法称为吸收法^[14];利用收集到的原子在激光作用下自发辐射的荧光强度得到原子束信号的方法称为荧光法^[15-18]。吸收法的检测对象是直接和原子相互作用的检测激光,激光功率的稳定性会制约检测结果的信噪比(SNR)^[19]。荧光法的检测对象是原子在检测光作用下自发辐射后产生的各向同性的光子,可通过提高探测器对光子的收集立体角和降低检测系统中背景光的影响来提高检测结果的信噪比。对原子束的纵向速度测试方法主要有飞行时间(TOF)法^[19,20]和多普勒频移测量法^[10,21]。TOF法通过测量原子飞过一段固定距离的时间来确定原子的速度和速度分布等参量。多普勒频移测量法则通过使检测光与原子束成一定角度相交,测试原子束由于速度引起的频移,利用多普勒频移原理可计算出原子束速度信息。多普勒频移测量法需要在原子束的路径上作用一束与原子束有确定夹角的检测光,容易受到真空系统的制约,同时利用多普勒频移原理测试原子束纵向速度易受到原子束横向速度的影响,测试结果相比 TOF 法分辨率低。

本文设计并实现了针对⁸⁷Rb冷原子束性能参数测试的在线检测系统^[22]。通过设计导轨式的机械

结构实现高信噪比、焦距方便调节的即插即用式荧光收集系统;基于 LabView 平台实现对测试系统进行时序控制,并将数据拟合和分析过程嵌入程序中,实时对采集的数据进行计算和处理。该系统可实时在线对原子束的纵向速度谱及通量信息进行测试、分析和处理。

2 检测原理

荧光法通过基于透镜组的荧光收集系统收集原子束在检测激光作用下自发辐射的荧光,利用光电二极管(PD)或光电倍增管(PMT)探测荧光强度,根据得到的电压信号可推算原子束的通量^[21]为

$$F_{\text{atoms}} = \frac{U_{\text{PMT}}}{\eta} \frac{4\pi}{d\Omega} \frac{\langle v \rangle}{\Delta z} \left(\frac{\Gamma}{2} \frac{s}{1+s} \right)^{-1}, \quad (1)$$

式中 U_{PMT} 为通过 PMT 检测得到的电压信号,可通过 PMT 的荧光效应和量子转换效率计算得出, η 为透镜和窗口的透射率, $d\Omega$ 为 PMT 收集立体角, Γ 为原子跃迁的自然线宽, Δz 为探测光与原子束作用宽度, $s=I/I_{\text{sat}}$ 为检测激光功率的饱和系数。 $\langle v \rangle$ 为原子束的纵向最可几速度,可由 TOF 法得到。

利用 TOF 法对原子束进行测量的原理如图 1(a)所示,在原子束路径上设置一束与原子束垂直相交的检测激光。在 t_1 时刻前,检测系统可得到稳定的原子束信号, t_1 时在距检测光上行 L_1 处,垂直原子束方向作用一束阻断光,使得原子束在 t_1 时刻被“斩断”。由于原子束内原子的纵向速度不同,不同速度的原子到达检测区域 L_2 处的时间有先后,检测系统在不同时间接收到的原子数目不同,利用荧光法可得到随时间变化的荧光信号[见图 1(b)]。将图 1(b)中得到的荧光信号求导后,得到图 1(b)中右上角所示的 TOF 分布图。据此曲线的峰值可计

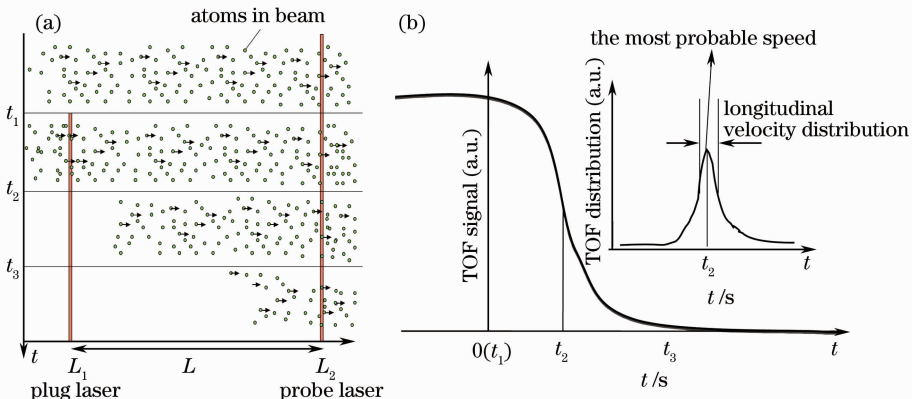


图 1 TOF 法测量原子束速度、速度分布原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TOF measure velocity and velocity distribution theory

算出原子束纵向最可几速度 $\langle v \rangle$ ，据其半峰全宽可计算出原子束纵向速度分布宽度。

利用荧光法，每个原子可被收集的光子数取决于原子束中原子通过检测光的时间和检测系统的收集光子立体角。对 ^{87}Rb 原子束，检测光频率选用 $^5\text{S}_{1/2}(F=2) \rightarrow ^5\text{P}_{3/2}(F'=3)$ 的循环跃迁频率。根据原子跃迁选择定则，循环跃迁可使原子在检测激光的作用下通过自发辐射得到更多的散射光子，增强原子束在检测光作用下的荧光信号。在1 cm宽的检测光作用下，原子平均 $\tau_{\text{scat}} = 2/\Gamma \approx 52$ ns 散射一个光子，速度为10 m/s的原子经过的检测区域通过循环跃迁可得到约 1.9×10^4 个光子。

3 实验系统

系统选用自主开发的 ^{87}Rb 冷原子束作为测试对象，其产生细节详见文献[22]，如图2所示。冷原子束利用在三维磁光阱(3D-MOT)中引入一个带小孔的波片和反射镜构成的不平衡磁光阱结构产生。结构中冷却与陷俘光由一台1 W 半导体激光器(德国Toptica DLX110)提供，利用饱和吸收稳频法和声光调制器(AOM)稳定在对 ^{87}Rb 原子 $^5\text{S}_{1/2}(F=2) \rightarrow ^5\text{P}_{3/2}(F'=3)$ 跃迁频率红失谐 (20 ± 10) MHz 状态上，光强在 $1 \sim 7$ mW/cm² 范围内可调。磁场由一对反亥姆霍兹线圈提供。基于这样的结构， ^{87}Rb 原子被陷俘并受到不平衡的辐射压力从而穿过小孔形成连续的冷原子束。

检测系统由光学部分、荧光收集部分和数据采集(DAQ)与控制部分组成。检测系统提供阻断光和检测光，分别由德国Toptica公司的DLX110和DLpro激光器提供，阻断光频率锁定在 ^{87}Rb 原子的 $^5\text{S}_{1/2}(F=2) \rightarrow ^5\text{P}_{3/2}(F'=3)$ 跃迁频率；当检测光锁定于 $^5\text{S}_{1/2}(F=2) \rightarrow ^5\text{P}_{3/2}(F'=3)$ 跃迁频率时，用于对原子束进行通量和TOF法测量；当检测光频率处于扫频状态时，用于对原子束进行能态检测。

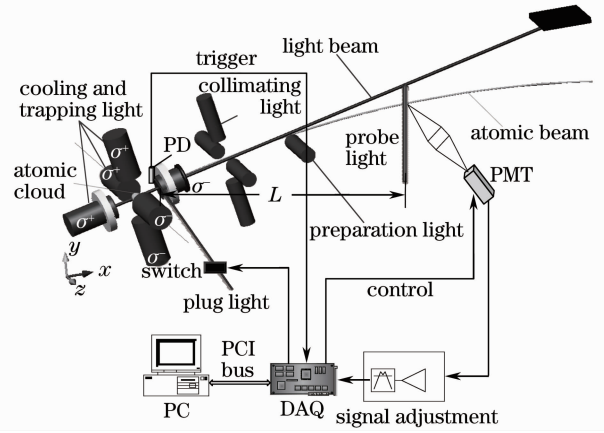


图2 原子束检测系统示意图

Fig. 2 Diagram of the detection apparatus

阻断光和检测光经光纤传输接入光纤准直仪，再经过一个狭缝变成与原子束垂直的片光，片光的宽度为1 mm。阻断光功率密度为 $1.7 \sim 3.4$ mW/cm²，检测光功率密度为 $0.1 \sim 0.2$ mW/cm²。阻断光在小孔前与原子束垂直相交，可通过光开关控制其开启与关闭；检测光在距阻断光L处与原子束垂直相交。当阻断光关闭，原子通过小孔形成原子束，检测光得到稳定的原子束信号；当阻断光开启，作用在原子束上时，原子在其散射力的作用下被推走，从而“切断”原子束。将阻断光置于在小孔前可使被其推走的原子回到3D MOT中重新被陷俘利用，并且可降低检测区域的背景噪声。

荧光收集部分的光学设计和机械机构如图3所示，由一个透镜组与安装套筒组成。透镜组由2个凸透镜组成，焦点分别置于原子束与检测光的交点处与PMT的接收端面上，通过计算装置选用一对焦距100 mm，半径50.8 mm的平凸透镜组。为了安置2个透镜并与PMT相接，设计了2个透镜的安装套筒。由透镜固定架、顶圈、连接套筒等部件组成。连接套筒与透镜固定架的连接部分利用长距离的滑配合连接。这种导轨式设计不但可以保证2个

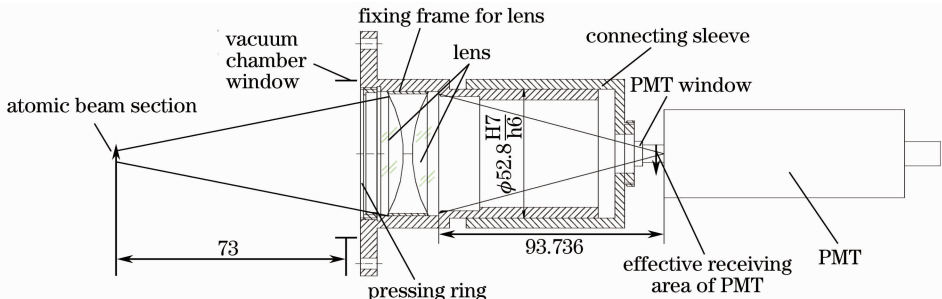


图3 荧光检测装置的机械设计装配图

Fig. 3 Mechanical design of fluorescence detection assembly drawings

零件同轴度而且起到了对光和空气的隔绝作用,降低 PMT 信号的背景光噪声,提高系统的稳定性和信噪比。通过调节连接套筒的固定位置还可以调节 PMT 的端面的接收位置与聚焦透镜焦点的配合,在真空腔内原子束位置发生变化时,可方便地改变 PMT 端面与像距匹配,优化检测系统。通过这种设计,荧光收集装置可以很方便地拔插,用于不同位置窗口的检测,实现即插即用。

数据采集与控制部分的时序如图 4 所示。利用计算机控制光开关,当光开关打开,阻断光作用在原子束上,使得原子束被切断,同时阻断光作用在 PD 上。PD 接收到阻断光信号,给计算机一个触发信号,数据采集卡开始采集 PMT 接收到的信号,并显示在计算机上的 LabView 程序界面上。这样实现了 TOF 法测量信号的同步触发,得到了 PMT 利用 TOF 法检测原子束性能的电学信号。图 4 中所示原子束信号指的是检测区内的原子束信号。

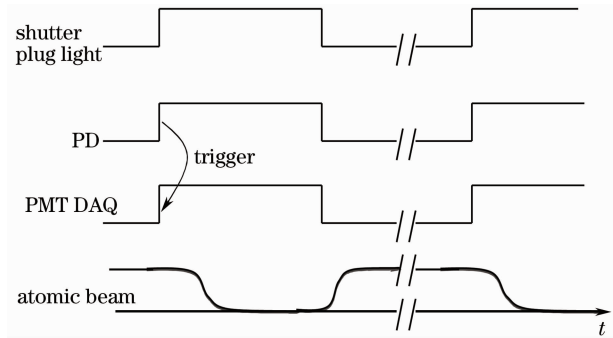


图 4 原子束检测系统时序控制图

Fig. 4 Timing control of the detection systems

系统选用了日本滨松公司生产的型号为 H7422-50 的 PMT 对原子束的荧光信号进行探测和放大,其光敏面直径 5 mm,在 780 nm 处阴极光电灵敏度为 90 mA/W。数据采集卡采用 NI 的 PCI-MIO-16E-1,模数(AD)采样分辨率 12 bit,最大采样率 1.25 MS/s。利用 LabView8.5 实现虚拟仪器控制,进行检测系统时序控制、部分仪器控制、信号采集、数据处理和存储,同时将信号调制和解调算法也内嵌于软件系统。通过原子束测试系统控制界面可实现 PMT 的操作及控制电压、光开关及数据采集卡等硬件设备的操作和控制。原子束测试系统控制界面如图 5 所示。

根据 PMT 的性能参数和系统装置可估计系统的检测能力。经测试,检测系统的背景噪声峰-峰值约为 0.5 V,假设经 PMT 检测到的原子束电压信号为 1 V 便可被识别,PMT 控制电压设为 0.6 V,利

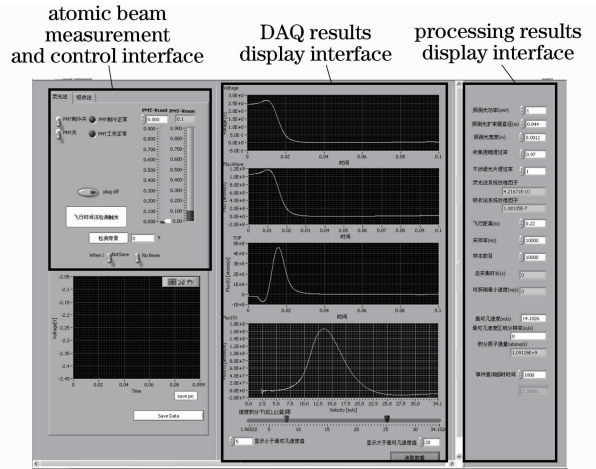


图 5 原子束测试系统控制界面

Fig. 5 Control interface of atomic beam detection system 用(1)式可反推检测系统可检测到的最小通量数量级为 10^5 s^{-1} 。

4 数据处理和检测结果

图 6 (a) 为在冷却和陷俘光功率密度为 4.5 mW/cm^2 ,失谐量为 21 MHz 条件下,当阻断光关断原子束时 PMT 获得的数据采集信号。利用 Lowess 函数局部加权散点图方法对数据进行平滑

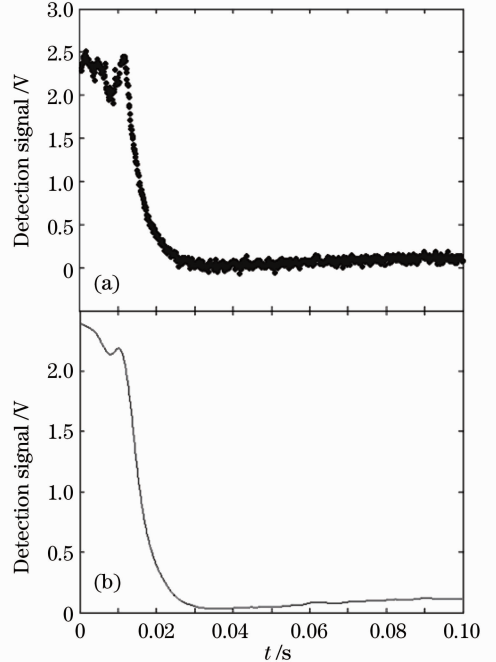


图 6 检测系统得到的 TOF 信号。(a) 系统直接采集到的离散数据点; (b) 利用 Lowess 函数对数据平滑处理后得到的数据

Fig. 6 TOF signal of detection system. (a) TOF signal observed from the PMT; (b) fitted curve using Lowess function

处理,所得曲线如图 6(b)所示。该数据处理算法也内嵌入 LabView 程序,因此可实时对测试数据进行处理。

根据 TOF 法的基本原理,对平滑后的检测电压信号[即图 6(b)信号]求导可得到原子束的纵向速度和速度分布结果,如图 7 所示。

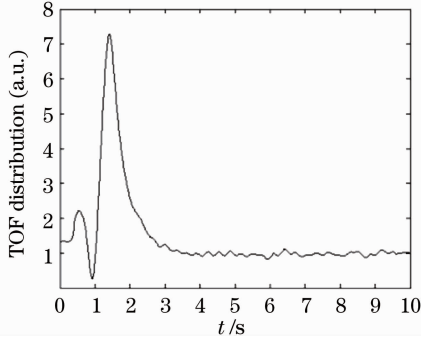


图 7 原子束的 TOF 分布结果

Fig. 7 TOF velocity distribution of the atomic beam

根据图 7 可得在冷却和陷俘光功率密度为 4.5 mW/cm^2 ,失谐量为 21 MHz 条件下,原子束的一次测量数据结果的最可几速度为 15.6 m/s ,速度分布宽度为 4.5 m/s ,通量为 $3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 。

原子的纵向最可几速度 $\langle v \rangle$ 为

$$\langle v \rangle = \frac{s_{\text{TOF}}}{t_{\text{TOF}}}, \quad (2)$$

式中 s_{TOF} 为阻断光和检测光之间的距离, t_{TOF} 为原子从阻断光位置到检测光位置的飞行时间。因飞行时间与距离不相干,所以系统测试误差为

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{s_{\text{TOF}}}}{t_{\text{TOF}}}\right)^2 + \left[\frac{s_{\text{TOF}}(\sigma_{t_{\text{TOF}}} + \sigma_{t_{\text{sh}}})}{t_{\text{TOF}}^2}\right]^2}, \quad (3)$$

式中 $\sigma_{t_{\text{TOF}}}$ 为对原子束做多次 TOF 法测量后对数据误差处理得到的标准差, $\sigma_{t_{\text{sh}}}$ 表示由于机械开关的控制阻断光的精度对实验产生的影响。根据机械开关的定时精度为 0.05 s ,直径为 5 mm ,阻断光直径小于 1 mm ,可得光打开/关断时间的标准差 $\sigma_{t_{\text{sh}}}$ 为 $1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。

在冷却和陷俘光功率密度为 6.7 mW/cm^2 ,失谐量为 30 MHz 条件下,对飞行时间多次(大于等于 5)取值,平均值为 0.019 s ,标准差为 0.001 s ,飞行距离测量期望值为 0.220 m ,误差为 0.003 m 。根据(2)式和(3)式可得原子束的纵向最可几速度的平均值为 14 m/s ,标准差为 1 m/s 。在同样条件下通量的误差可根据(1)式得出,原子束通量约为 $3.8 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$,标准差为 $2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。

为了得到原子束中原子的能态分布,实验系统

通过将检测光扫频频率增至 2 GHz 左右,实时测得了原子束中原子在基态能级上 $F=1$ 态和 $F=2$ 态的分布。实验采集得到的原子束能态分布数据与检测激光的铷原子吸收谱的对比如图 8 所示。

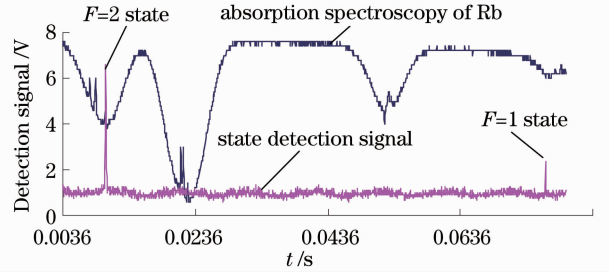


图 8 原子束能态检测结果

Fig. 8 Results of the state detection

利用图 8 的检测结果,对检测系统做 SNR 分析。将原子束信号的峰-峰值除以噪声的均方根(RMS)值计算检测系统的 SNR,根据检测结果可得到系统检测 SNR 的最大值为 $57:1$ (在 20 ms 内)。

5 结 论

利用荧光法和飞行时间法实现了对原子束性能的在线检测的实验系统。利用这个实验系统可集成、方便地实现对原子束速度、速度分布、通量及能态进行检测,并在线进行数据处理和平滑,经测试,检测系统 SNR 为 $57:1$ (在 20 ms 内)。

参 考 文 献

- G. Santarelli, P. Laurent, P. Lemonde *et al.*. Quantum projection noise in an atomic fountain; a high stability cesium frequency standard [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82** (23): 4619~4622
- A. Peters, K. Chung, S. Chu. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms [J]. *Nature*, 1999, **400** (26): 849~852
- T. Gustavson, P. Bouyer, A. Kasevich. Precision rotation measurements with an atom interferometer gyroscope [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(11): 2046~2049
- J. McGuirk, G. Foster, J. Fixler *et al.*. Sensitive absolute-gravity gradiometry using atom interferometry [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **65**(3): 033608
- J. Thywissen, K. Johnson, R. Younkin *et al.*. Nanofabrication using neutral atomic beams [J]. *Vac. Sci. Technol. B*, 1997, **15**(6): 2093~2100
- Deng Lianzhong, Yin Jianping. Generation of cold or ultracold atomic beams and their applications [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(1): 1~12
邓联忠, 印建平. 冷原子束或超冷原子束的产生及其应用 [J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(1): 1~12
- Tian Xiao, Chang Hong, Wang Xinliang *et al.*. Trapping four isotopes of strontium in a MOT by using Zeeman slowing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 898~902
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*, 2010, **30**(3): 898~902

- 8 Jiao Xiaoguang, Yin Cong, Shi Chunying *et al.*. Thermometry of Cr laser cooling via knife-edge[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0708004
焦晓光, 殷 聪, 石春英 等. 刀口法测量铬原子激光冷却温度[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0708004
- 9 X. Wu. Gravity Gradient Survey with a Mobile Atom Interferometer[D]. California: Stanford University, 2009
- 10 P. Striehl. A High-Flux Cold-Atom Source for Area-Enclosing Atom Interferometry[D]. Boston: Harvard University, 2007
- 11 S. C. Bell, M. Junker, M. Jasperse. *et al.*. A slow atom source using a collimated effusive oven and a single-layer variable pitch coil Zeeman slower[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(1): 013105
- 12 Z. T. Lu, K. L. Corwin, M. J. Renn *et al.*. Low-velocity intense source of atoms from a magneto-optical trap[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(16): 3331~3334
- 13 J. Schoser, A. Batär, R. Löw *et al.*. Intense source of cold Rb atoms from a pure two-dimensional magneto-optical trap[J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **66**(2): 023410
- 14 J. M. McGuirk, G. T. Foster, J. B. Fixler *et al.*. Low-noise detection of ultracold atoms[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6): 364~366
- 15 Wang Dewu, Kong Yufei, Yang Yi *et al.*. Measurement of velocity distribution of belted vapor by laser induced fluorescence[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 735~738
王德武, 孔羽飞, 扬 移 等. 激光诱导荧光法测量原子束速度分布[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 735~738
- 16 Xuzong Chen, Xiaojuan Wang, Li Zhong *et al.*. Measurement of velocity distribution in an atomic beam by means of Doppler resonance fluorescence[J]. *Chinese J. Lasers*, 1992, **B1**(6): 509~512
- 17 G. Biedermann, X. Wu, L. Deslauriers *et al.*. Low-noise simultaneous fluorescence detection of two atomic states[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(3): 347~349
- 18 S. Chaudhuri, S. Roy, C. Unnikrishnan. Realization of an intense cold Rb atomic beam based on a two-dimensional magneto-optical trap: experiments and comparison with simulations[J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **74**(2): 023406
- 19 A. Mohapatra, C. Unnikrishana. High sensitivity probe absorption technique for time-of-flight measurements on cold atoms[J]. *Indian Academy of Sciences*, 2006, **66**(6): 1027~1035
- 20 J. Swansson, R. Dall, A. Truscott. An intense cold beam of metastable helium[J]. *Appl. Phys. B*, 2007, **86**(3): 485~489
- 21 J. Kohel, J. Serrano, R. Thompson *et al.*. Generation of an intense cold-atom beam from a pyramidal magneto-optical trap: experiment and simulation[J]. *J. Opt. Soc. Am. J. B*, 2003, **20**(6): 1161~1168
- 22 Xiaojia Wang, Yanying Feng, Hongbo Xue *et al.*. A cold ^{87}Rb atomic beam[J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(12): 126701

栏目编辑:谢 婧