

引用格式:HAO An-qing, JIA Sen, XIE Lai-yun, *et al.* Development of Laser Beam Expanding Collimator for Cold Atom Preparation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3): 0314002

郝安庆, 贾森, 解来运, 等. 用于冷原子制备的激光扩束准直器研制[J]. 光子学报, 2020, **49**(3):0314002.

# 用于冷原子制备的激光扩束准直器的研制

郝安庆<sup>1,2</sup>, 贾森<sup>1</sup>, 解来运<sup>1</sup>, 蔡勇<sup>1</sup>, 王先华<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**针对现有的冷原子实验用的多数保偏光纤输入型扩束准直器不能对输入激光束的偏振进行精确调节的缺陷,提出了一种全长度为 135 mm,输出圆形光斑有效直径为 20 mm 的紧凑型偏振可调激光扩束准直器.该扩束准直器中的偏振棱镜和波片偏振轴均可独立调节,能对单模保偏光纤输入光束的偏振态进行精确调节和保持.所研制的激光扩束准直器在三维磁光阱冷原子实验中制备出了满足冷原子干涉实验要求的冷原子团,冷原子团原子数为  $5 \times 10^8$ ,温度约为 10  $\mu$ K,并获得了最大上抛高度为 1.156 m 的原子喷泉飞行时间信号.

**关键词:**冷原子;原子喷泉;偏振光;激光扩束准直;磁光阱

中图分类号:O431.2; TN202

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0314002

## Development of Laser Beam Expanding Collimator for Cold Atom Preparation

HAO An-qing<sup>1,2</sup>, JIA Sen<sup>1</sup>, XIE Lai-yun<sup>1</sup>, CAI Yong<sup>1</sup>, WANG Xian-hua<sup>1</sup>

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Aiming at the defect that most polarization-maintaining fiber input beam expander collimators used in cold atom experiments can not accurately adjust the polarization of the input laser beam, a compact polarization-adjustable laser beam expanding collimator with a full length of 135 mm and an effective diameter of 20 mm for the output circular spot is proposed. The polarization axes of the polarization prism and the wave plate in the beam expander collimator can be independently adjusted, and the polarization state of the input beam of the single-mode polarization maintaining fiber can be accurately adjusted and maintained. The developed laser beam expanding collimator has prepared cold atomic groups that meet the requirements of cold atom interference experiment in the cold atom experiment of three-dimensional magneto-optical trap. The atomic number of cold atomic groups was  $5 \times 10^8$ , the temperature was about 10  $\mu$ K, and the flight time signal of atomic fountain with the maximum throw-up height of 1.156 m was obtained.

**Key words:** Cold atom; Atomic fountain; Polarized light; Laser beam expanding collimation; Magnetic optical trap

**OCIS Codes:** 140.3320; 020.3320; 220.3620; 020.7010

## 0 引言

在冷原子物理实验及以冷原子作为工作介质的仪器设备中,获得原子数量稳定的超低温原子团是需要解

基金项目:国家自然科学基金青年基金(No. 11404387),西部之光项目(No. Y429681213),陕西省自然科学基金(No.2016JM1022)

第一作者:郝安庆(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为激光光学.Email:anqing361@163.com

导师(通讯作者):贾森(1980—),男,副研究员,博士,主要研究方向为冷原子干涉仪.Email:jiasen@opt.ac.cn

收稿日期:2019-11-05;录用日期:2020-01-03

<http://www.photon.ac.cn>

决的首要技术问题<sup>[1,2]</sup>.目前获得超冷原子最常用的方法是“光学黏团”和“磁光阱”法<sup>[3,4]</sup>,两种方法都通过激光与原子的相互作用产生超冷原子<sup>[1-6]</sup>，“光学黏团”法只需要将三对准直射且偏振相互正交的(线⊥线偏振光)线偏振激光束汇聚于充满热原子蒸汽的真空仓中即可在光束汇聚处获得冷原子黏团；“磁光阱”法所使用的三对准直射的激光束的偏振态为圆偏振正交( $+\sigma \perp -\sigma$ )<sup>[5]</sup>,该方法还需要外加一个梯度磁场(采用一对反亥姆霍兹线圈产生)来俘获冷原子团<sup>[6-9]</sup>.然而两种方法的一个重要的前提是装置系统中的激光束的横截面上的偏振态应尽可能一致,同时光束直径应足够大,且是严格的平行光束<sup>[10-12]</sup>,这时才能获得原子数量多且温度低的满足冷原子干涉实验要求的超冷原子云.通常情况下,用于冷原子制备的激光系统产生的激光首先经过分束器分为六束,然后由六根单模保偏光纤分别输入六个扩束准直器形成平行光束后再对原子进行冷却,因此激光扩束准直器的性能与所制备的冷原子团的质量直接相关<sup>[12-20]</sup>.然而,现有的商用保偏光纤输入型激光扩束准直器(如国内广泛使用的德国的 Schafter+Kirchhoff 相关型号)存在以下不足:1)光路中未安装起偏器用于对输入激光束的偏振态进行优化,只能通过玻片调节输出光束的偏振态,因此输入激光束的偏振不能被精确调节和保持,从而使得输出激光束的偏振态会随环境变化而显著改变,难以产生原子数稳定的超低温冷原子团.2)为实现扩束准直器对激光束的最佳扩束效果,单模保偏光纤导入扩束准直器中的激光指向应与扩束准直光路系统的光轴重合,现有光纤输入型扩束准直器一般采用多维调整架调节导入激光束的位置和指向,以获得最佳准直扩束效果,这种方式易受到外界环境振动的影响,使激光束的输入位置参数改变,从而影响了制备冷原子团的光束质量.

为了克服现有扩束准直器不足,本文设计研制一种可用于“磁光阱”法、“光学黏团”法获得冷原子及其它结构冷原子物理实验系统的偏振可调的激光扩束准直器.该扩束准直器主要由镜筒以及沿激光传输方向依次设置的激光输入与方向调节模块、偏振调节模块和扩束准直模块组成,可以对激光束的准直特性和偏振特性进行精确调节,满足冷原子团的制备需要,且具有体积小,可靠性高的特点.

## 1 激光扩束准直器设计

### 1.1 光学系统设计

单模保偏光纤输入型激光扩束准直器的光学系统包括扩束准直镜组和偏振调节镜组.根据实现<sup>87</sup>Rb 原子冷却对激光束的要求,光学系统设计参数指标如下:

- 1)激光波长:780 nm,入射激光束直径:5  $\mu\text{m}$ ,入射激光束发散角:6.32°(单模保偏光纤数值孔径  $\text{NA} = 0.11$ );
- 2)扩束准直器将单模保偏光纤导入激光扩束准直后出射的激光光斑直径:28 mm,作用于三维磁光阱中的有效光斑直径(近场中  $1/e^2$  功率水平处的直径):20 mm;
- 3)镜头只需校正轴上点球差;
- 4)光学系统的镜头结构尽量简单,设计用两片镜片达到扩束准直要求.

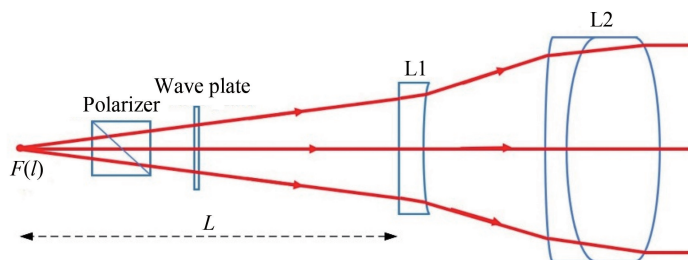


图1 扩束准直光路系统  
Fig.1 Optical path system of beam expanding collimating

采用凹透镜和凸透镜组合实现激光束扩束准直,扩束准直光路系统如图1.其中输入镜 L1 采用平凹透镜,输出镜 L2 采用双胶合消像差凸透镜,焦距为 100 mm.单模保偏光纤的激光入射点与凹透镜与凸透镜组成的光学系统的焦点重合.

单模保偏光纤在  $F$  点将激光导入扩束准直光路,凹透镜将输入激光束聚焦在焦平面上,新的束腰  $\omega_0'$  和发散角  $\theta'$  为

$$\begin{cases} \omega'_0 = \frac{f_1 \lambda}{\pi \omega_L} \\ \theta' = \frac{2\lambda}{\pi \omega'_0} \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_L = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi \omega_0^2}\right)^2} \quad (2)$$

式中,  $\omega_L$  为入射激光束在凹透镜上的束腰半径,  $L$  为激光入射点与凹透镜的距离,  $f_1$  为凹透镜焦距,  $\omega'_0$  落在输出凸透镜的焦平面上, 激光束经过凸透镜  $L_2$  后将被扩束准直, 准直倍率为

$$T = \frac{\theta}{\theta''} = \frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda L}{\pi \omega_0^2}\right)^2} \quad (3)$$

式中,  $\theta$  和  $\omega_0$  分别为入射光束的发散角和束腰,  $\theta''$  为扩束准直后出射光束的发散角,  $f_2/f_1$  为凸透镜与凹透镜的焦距比. 经系统扩束后出射准直光束直径约 28 mm, 根据高斯光束光强分布特征, 近场中  $1/e^2$  功率水平处为作用于冷原子的激光束直径, 经光阑剪切获得出射准直激光束直径为 20 mm. 光路系统中由偏振棱镜和波片(光学黏团中波片为  $\lambda/2$  波片, 磁光阱中波片为  $\lambda/4$  波片)对激光束的偏振态进行精确调节. 通过调节偏振棱镜的透射方向与保偏光纤的出射端偏振轴方向一致, 可获得最大的透射光束能量.

采用 CodeV 和 Zemax 软件对光学系统进行设计和优化, 得到的最终结果数据如表 1. 由于激光扩束准直系统属于小像差系统, 用波像差和点扩散函数对系统进行像质评价, 图 2(a) 是系统波像差图, 系统的波像差设计值小于  $\lambda/4$ , 图 2(b) 点扩散函数图显示能量集中成像质量好, 设计系统满足像质评价要求. 冷原子囚禁实验要求激光扩束准直后光斑横截面上偏振态分布尽可能一致, 图 2(c) 和 (d) 分别为线偏振和圆偏振光扩束准直后的激光偏振态的分布图, 由图可知, 扩束准直器扩束后的激光截面上偏振态与入射光束保持一致, 没有退偏, 满足设计要求.

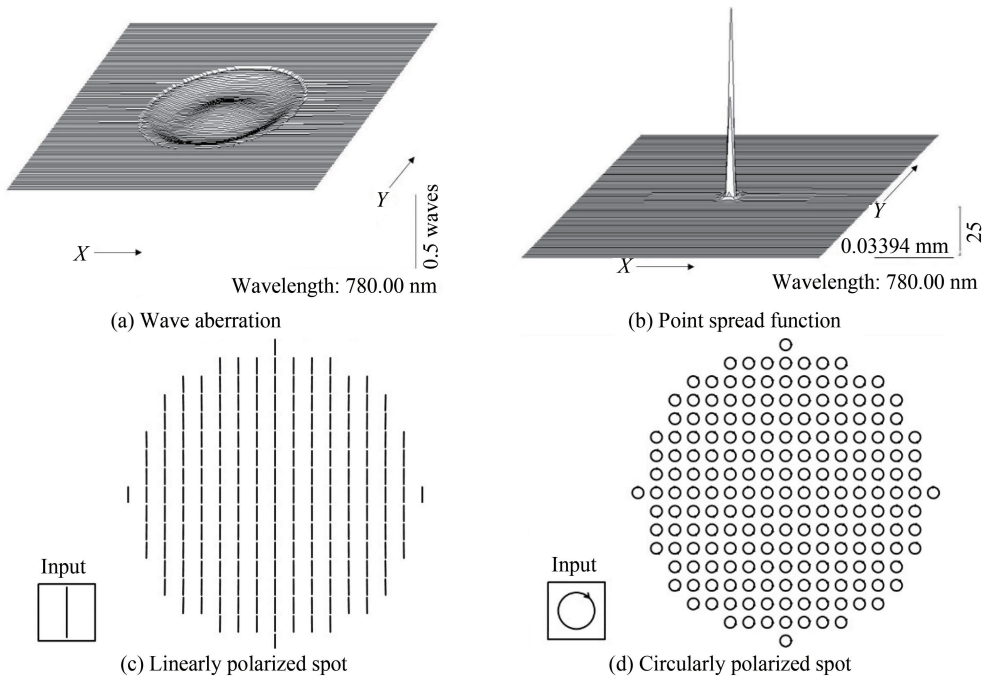


图 2 像质评价和接收面光斑图

Fig.2 Image quality evaluation and light spot map of receiving surface

## 1.2 机械结构设计

单模保偏光纤输入扩束准直器整体结构包括: 激光输入与方向调节模块, 偏振调节模块, 扩束准直模块, 所有模块均安装在一个镜筒上, 镜筒用材为航空铝材(7075)和铜(H62), 防止变形, 图 3(a) 是其对称轴剖面图. 激光输入与方向调节模块用于将保偏光纤导入扩束准直器, 并调节光束的指向. 图 3(b) 是其结构, 该模块由方向调整板与方向调整基座组成, 两者为球面连接. 出光端设计为半球型转动头负责对保偏光纤的输入激

表 1 扩束准直系统数据

Table 1 Beam expansion collimation system data

Radius	Thickness	Glass	Semi-diameter
Infinity	Infinity		
70.778 0	14.000 0	HZBAF52_C	15.000 0
-45.180 0	4.000 0	HZF4_CDGM	14.199 3
-381.770	33.300 0		13.789 3
-185.350	4.000 0	HZF6_CDGM	9.010 4
Infinity	64.415 9(v)		8.753 5
Infinity	5.000 0	HK9L_CDGM	1.908 4
Infinity	4.071 1(s)		1.557 9
Infinity	-0.059 3(v)		1.133 6

光进行方向调节,半球型转动头的球心与保偏光纤出光端面的中心位置重合,转动方向调整板时激光束的入射点位置始终不变,只是光束指向变化,该结构大幅度减小了方向调整板在对输入激光进行调节时可能产生的横向偏移.考虑到所使用的单模保偏光纤端面为角度物理接触(Angled Physical Contact, APC)接头,具有 $8^\circ$ 角端面陶瓷插芯,设计安装光纤耦合头的安装面与方向调整板的端面夹角为 $8^\circ$ ,保证单模保偏光纤导入到扩束准直器的激光出射方向水平.方向调整基座与镜筒采用柱面连接,可使激光输入与方向调节模块沿光轴调节,并可由基座上设计的挠性锁紧结构进行锁定,该挠性锁紧结构是在方向调整基座的侧壁上开设一弧形狭缝,弧形狭缝中部沿轴向切开形成纵向狭缝,在纵向狭缝的两端设置两个凸起的带有螺钉孔的耳座,用锁紧螺钉将方向调整基座与镜筒锁紧.现有多数准直扩束器结构一般在镜筒圆周设置三组顶丝(呈平面内 $120^\circ$ 分布)进行锁紧,三组顶丝锁紧装置调节不均可能导致横截面上的偏差,两种结构相比,该设计减小了输入进的激光在垂直于光轴的横截面上的横向偏移,同时调节更加方便,使整个激光输入与方向调整模块的调节维度减少为 4 维,稳定性更好.

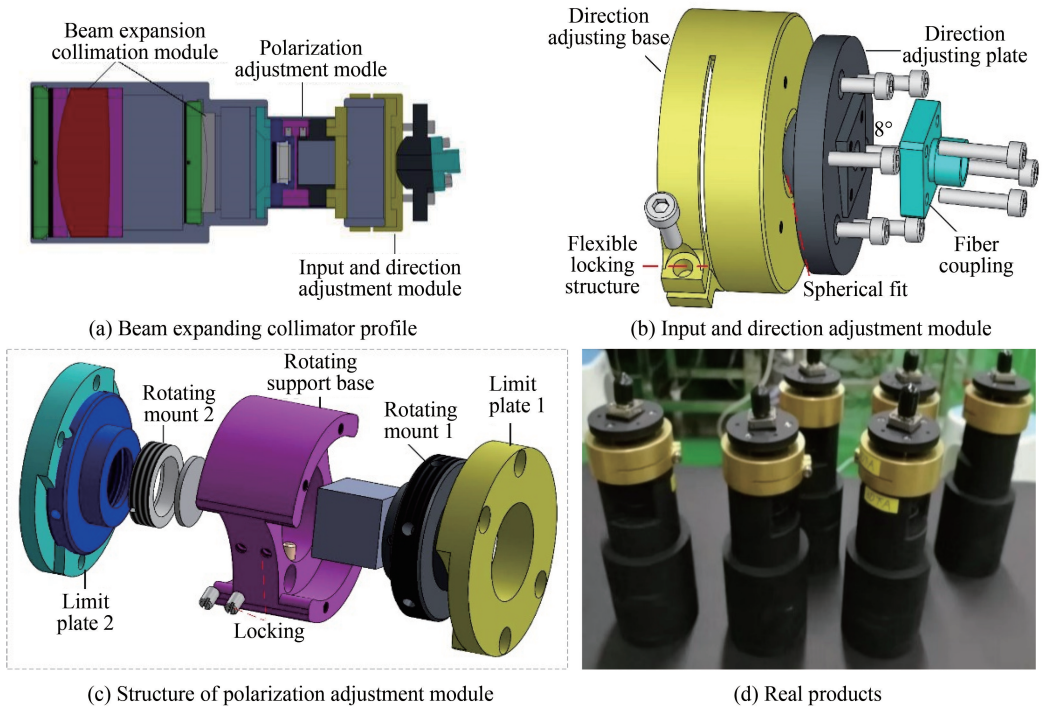


图 3 扩束准直器机械结构

Fig.3 Mechanical structure of beam expanding collimator

图 3(c)为偏振调节模块结构图.该模块用于对激光偏振态进行精确调节,包括用于安装偏振棱镜和波片的独立的旋转安装座,两安装座同轴装配到旋转支持基座中;并通过与旋转支持基座固定连接的、中心开有圆孔的限位板对棱镜和波片的旋转安装座进行轴向限位,使它们只能绕各自的中心轴转动.两个旋转安装座均设有 $360^\circ$ 滚花转盘,可对偏振棱镜和波片的偏振轴进行最小为 $2^\circ$ 的独立精密调节,旋转支持基座与旋转安装座间设有锁紧螺孔,配合锁紧螺钉对旋转安装座进行锁定,确保将激光调整到最佳偏振态时能够长久保持.对比现有的多数保偏光纤输入型扩束准直系统中只有波片可以转动来改变输入激光的偏振角度,该偏振调节光路具有对

保偏光纤输入的光束的偏振态进行精确调节和保持的优点,消除了保偏光纤引起的出射光束的偏振态变化,有利于高质量超冷原子的制备.装配好扩束准直器实物如图 4(d),实测整体长度为135 mm,相比实验室之前使用的扩束性能相当的进口扩束准直器(Schafter+Kirchhoff,60FC-H780-4-M150 系列),长度减小了 50 mm.

## 2 扩束准直器调节与测试

扩束准直器光机装配过程中,透镜的定心装调是最关键步骤,首先用反射式定心仪调节镜筒中心轴与定心仪回转基准轴重合,然后依次装调透镜使透镜光轴与定心仪回转基准轴重合,这样保证光学系统的光轴和镜筒的机械中心轴重合,完成组件的光机装配.接着将扩束准直器安装在自制工装上用激光自准直仪(穆勒 ELCOMAT3000)对出射高斯光与镜筒中心轴进行同轴度测试与调节,测量结果显示出射高斯光和镜筒中心轴偏差小于  $6'$ ,符合冷原子试验要求.

装配好的扩束准直器在用于冷原子试验前,必须对其进行参数调节,包括准直平行调节、偏振调节.准直平行调节是将 780 nm 激光经过单模保偏光纤导入扩束准直器,调节输入与方向调节模块的方向调整板使高斯光斑中心与镜筒中心轴重合,使用剪切干涉仪(THORLABS)对研制的扩束准直器的出射光束进行了准直平行测试,得到调节后光束的干涉条纹如图 4a 所示,可以看到干涉条纹方向与刻度参考线平行,说明出射光束已被调节为平行光束.同时对进口扩束准直器(型号:60FC-H780-4-M150-37,Schafter+Kirchhoff 公司)进行干涉条纹检测,检测结果如图 4(b),比较图 4(a)和(b)可以看出自制扩束准直器的剪切干涉条纹的平行度要好于进口型号.其次是偏振调节,转动偏振调节模块的棱镜旋转安装座使得棱镜与保偏光纤的偏振轴一致,此时用功率计检测得透射光功率最大,然后锁紧旋转安装座,即完成扩束准直器调节.

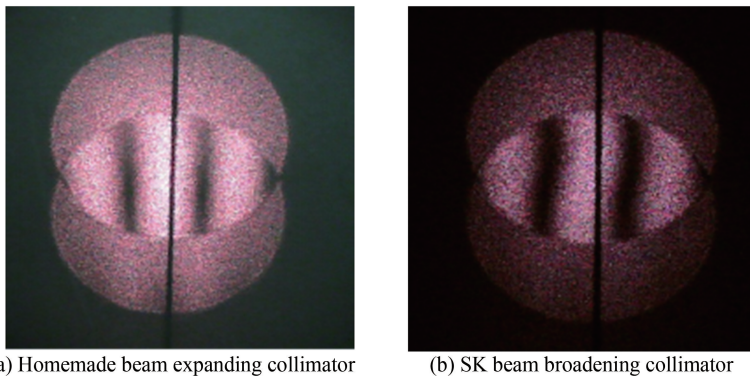


图 4 准直光束剪切干涉图  
Fig.4 Collimating beam shear interferogram

进一步对装调好的扩束准直器使用 zygo 干涉仪测量其波前像差,结果如图 5,经过测量,扩束准直光学系统的干涉条纹比较齐整,系统波前 RMS 为  $0.017\lambda$  (设计值为  $0.015\lambda$ ),斯特列尔比为 0.988,光能量分布较好,系统的非对称像差较小,像散为  $0.057\lambda$ ,慧差为  $0.027\lambda$ ,整个系统的 PV 值为 0.28,接近完善成像条件,因此扩束准直器的成像质量与理论设计符合,且成像质量较好,能够满足冷原子制备的使用条件.

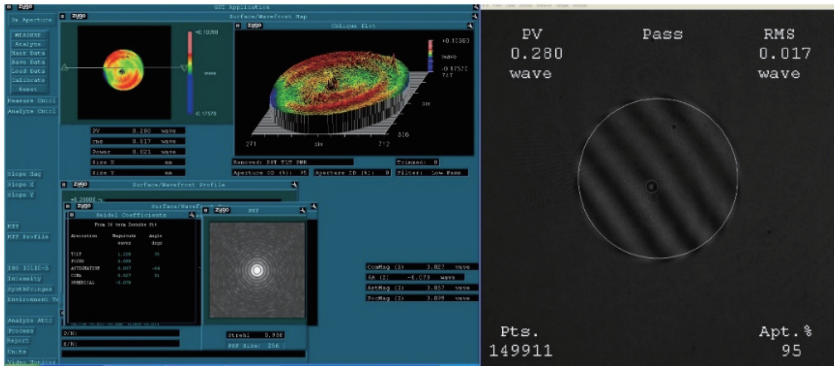
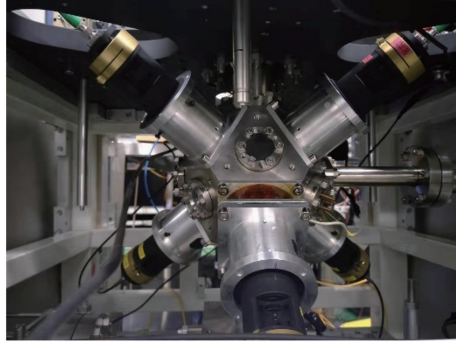


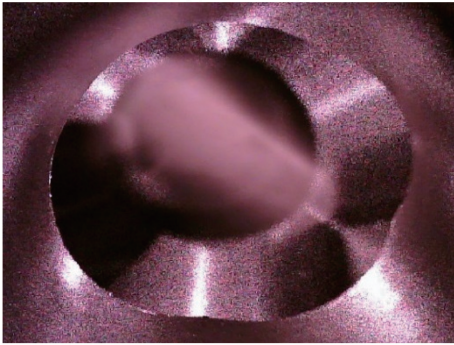
图 5 波前像差测试结果  
Fig.5 Result of wavefront aberration test

### 3 冷原子实验

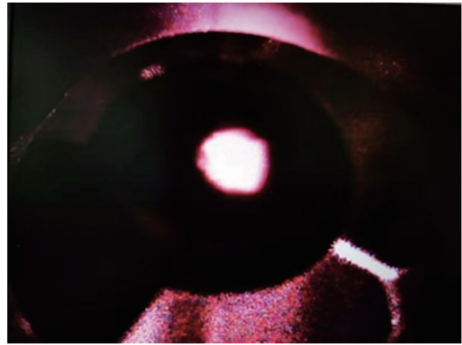
将调节好的 6 个扩束准直器依次安装在三维磁光阱中,如图 6(a),通过单模保偏光纤将频率锁定在 $^{87}\text{Rb}$ 原子  $5^2\text{S}_{1/2}, F=2-5^2\text{P}_{3/2}, F=3$  跃迁线上的 780 nm 激光导入扩束准直器,精确调节扩束准直器并保持冷却激光束的偏振态,得到三对两两对射的圆(线)偏振光,对原子进行冷却.实验中分别用“光学黏团”和“磁光阱”法对原子进行冷却.当制备光学黏团时,扩束准直器中装入  $\lambda/2$  波片,调节镜筒使激光保持为线偏振光,关闭外加的梯度磁场,此时利用线偏振激光获得了铷( $^{87}\text{Rb}$ )原子的光学黏团,如图 6(b).将扩束准直器中的



(a) Beam expander collimator for three-dimensional magneto-optical trap



(b) Optical adhesion of rubidium atom



(c) The cold atoms of rubidium

图 6 三维磁光阱中冷原子制备

Fig.6 Preparation of cold atoms in three-dimensional magneto-optical trap

波片更换为  $\lambda/4$  波片,同样调节镜筒得到偏振态良好的圆偏振光,打开阱中的梯度磁场,构成三维磁光阱(Three-dimensional Magneto-optical Trap, 3D-MOT)对铷( $^{87}\text{Rb}$ )原子进行了冷却,得到如图 6(c)所示的数量稳定的超冷铷( $^{87}\text{Rb}$ )原子团,冷原子团原子数为  $5 \times 10^8$ ,温度约为  $10 \mu\text{K}$ .利用获得的超冷原子团进行上抛实验,得到了图 7 所示的不同上抛高度下的冷原子喷泉飞行时间信号,最大上抛高度为 1.156 m.实验结果证明研制的激光扩束准直器可对激光进行良好的扩束准直,满足冷原子干涉实验的冷原子团制备的要求,可以用于冷原子干涉重力仪、陀螺仪等装置.

### 4 结论

研制了一种用于冷原子制备保偏光纤输入型激光扩束准直器,分析了其光学系统,以及为实现激光偏振精确调节和提高系统稳定性采用的机械结构设计.该扩束准直器可以将单模保偏光纤导入激光束进行有效扩束,同时对激光束的指向和偏振态进行精密调节,并能在调节完成后能对调节元件进行锁定.冷原子实

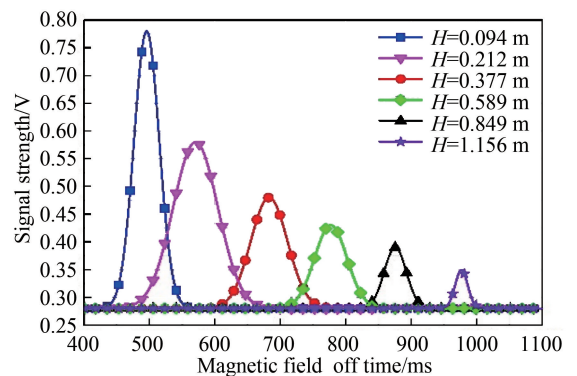


图 7 不同上抛高度下的冷原子团飞行时间信号  
Fig.7 Time-of-flight signals of cold atom groups at different throwing height

验结果表明,研制的扩束准直器能够得到满足冷原子干涉实验要求的<sup>87</sup>Rb冷原子团,可用于紧凑型冷原子传感器.该型扩束准直器可在长度方面进一步优化缩短.

## 参考文献

- [1] PRODAN J, MIGDALL A, PHILLIPS W D, *et al.* Stopping atoms with laser light[J]. *Physical Review Letters*, 1985, **54**(10): 992-995.
- [2] CHU S, BJORKHOLM J E, ASHKIN A, *et al.* Experimental observation of optically trapped atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1986, **57**(3): 314-317.
- [3] CHU S, HOLLBERG L W, BJORKHOLM J E, *et al.* Three-dimensional viscous confinement and cooling of atoms by resonance radiation pressure[J]. *Physical Review Letters*, 1985, **55**(1): 48-51.
- [4] YAN Wen, YAO Yuan, SUN Yu-xin, *et al.* Zeeman slowing atoms using the magnetic field from a magneto-optical trap [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, **17**(4): 040201.
- [5] RAAB E L, PRENTISS M, CABLE A, *et al.* Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **59**(23): 2631-2634.
- [6] COHEN-TANNOUDJI C. Manipulating atoms with photons[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1998, **70**(3): 707-719.
- [7] MA Jun. Cold atoms preparation in compact setup of atom interferometry[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014  
马骏. 小型化干涉仪系统中冷原子的制备[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [8] HU Jia-zhong, URVOY A J, VENDEIRO Z M, *et al.* Creation of a Bose-condensed gas of 87 Rb by laser cooling[J]. *Science*, 2017, **358**(6366): 1078-1080.
- [9] WANG Pei-fang, XIANG Yang, GAO Jian, *et al.* Design of collimating and beam expanding laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(9): 0922007.  
王培芳,向阳,高健,等. 激光变倍准直扩束系统设计[J]. 光学学报,2015,**36**(9):09222007.
- [10] DALIBARD J, COHEN-TANNOUDJI C. Laser cooling below the Doppler limit by polarization gradients: simple theoretical models[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1989, **6**(11): 2023-2045.
- [11] LI Chun-yan, LU Wei-guo, QIAO Lin. Analysis and research of polarization aberration in rapid space angle measuring system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, **67**(3): 030703.  
李春艳,陆卫国,乔琳. 快速空间测角系统中偏振像差的分析与研究[J]. 物理学报,2018,**67**(3):030703.
- [12] GIBBLE K E, KASAPI S, CHU S. Improved magneto-optic trapping in a vapor cell[J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(7): 526-528.
- [13] JARVIS K, DEVLIN J, WALL T, *et al.* Blue-detuned magneto-optical trap[J]. *Physical Review Letters*, 2018, **120**(8): 083201.
- [14] LI Shang-yan, ZHOU Min, XU Xin-ye. Analysis of atomic beam collimation by laser cooling[J]. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 9971.
- [15] HUBER M, FORRER H, WUEST P, *et al.* Collimation optics for high power blue laser diodes[C]. SPIE, 2017, **2**(22): 100850B.
- [16] WANG Hai-lin, ZHANG Deng-yin. Design of coupling system between fibers and laser diodes based on zemax[J]. *Acta Photonica sinica*, 2011, **40**(s1): 81-84.  
王海林,张登印. 基于 Zemax 半导体激光器与单模光纤耦合系统设计[J]. 光子学报,2011,**40**(s1):81-84.
- [17] YAN Shi-sen, LIU Dai-zhong, OU-YANG Xiao-ping, *et al.* Spatial filter pinhole alignment on high power laser facility [J]. *Acta Photonica sinica*, 2018, **47**(11): 1114002.  
闫世森,刘代中,欧阳小平,等. 高功率激光装置空间滤波器小孔准直[J]. 光子学报,2018,**47**(11):1114002.
- [18] DU Bin-bin, GAO Wen-hong, LI Jiang-lan, *et al.* Design of aspherical lens for laser diode collimation based on ZEMAX [J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(12): 1384-1388.  
杜彬彬,高文宏,李江澜,等. 基于 ZEMAX 的半导体激光器非球面准直透镜设计[J]. 激光与红外,2013,**43**(12):1384-1388.
- [19] GONG Hai-long, LIU Zhi-hui, LI Guo-jun, *et al.* Fidelity study of diffractive laser beam expander[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(9): 0902006.  
龚海龙,刘志辉,李国俊,等. 衍射型激光扩束器的保真度研究[J]. 中国激光,2014,**41**(9):0902006.
- [20] HUANG Yao-lin, WANG Min, KOU Yuan-feng. Design of continuously variable collimating and beam expanding system for lasing[J]. *Optical Instruments*, 2018, **40**(2): 38-43.  
黄耀林,王敏,寇远凤. 一种激光连续变倍准直扩束系统的设计[J]. 光学仪器,2018,**40**(2):38-43.