

空间超冷原子实验二维磁光阱系统的集成设计与实现

李文文^{1,3}, 刘乾^{1,3}, 梁昂昂^{1,3}, 谢昱^{1,3}, 李琳^{1,3}, 李蕊², 孟洁², 潘大军², 汪斌²,
许忻平^{2**}, 王文丽^{2*}

¹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;

²中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800;

³中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 101408

摘要 介绍了一种应用于空间超冷原子物理实验平台的二维磁光阱光机系统的集成优化设计方法, 可获得高通量冷原子束流以满足后续三维磁光阱中冷原子的高装载率。二维磁光阱激光系统的主要光路包括冷却光、重泵光、推送光和缓冲光。首先, 利用 Zemax 软件对光学系统进行设计和优化, 使得成像系统的点列图均方根(RMS)半径均小于艾里斑, 而且光学系统的调制传递函数(MTF)与衍射极限传递函数非常接近, 系统具备优良的光学性能。在此基础上, 利用 Solidworks 软件仿真完成了高稳定性、简单化、小型化光机结构的设计。针对 4 路光同时输入一个光机口的难题, 提出了 V-GROOVE 光纤设计方案, 进一步提高了所有光机组件的集成度。该系统在工程化的基础上实现了装载率约为 $1.89 \times 10^8/s$ 的连续冷原子束流。

关键词 量子光学; 二维磁光阱; 激光冷却; 原子装载; Zemax 软件; Solidworks 软件

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1112001

1 引言

自 20 世纪 80 年代以来, 人们陆续通过激光冷却以及蒸发冷却等手段制备超冷原子气体。基于超冷原子科学家们开展的一系列探索工作, 目前超冷原子已被广泛应用于非线性动力学、凝聚态物理、宇宙学、原子和分子物理、粒子物理及量子光学等领域^[1-3]。由于具有高纯度和高操作度, 超冷原子在强相互作用超流^[4]、量子模拟^[5]、原子干涉仪^[6]、冷碰撞^[7]、量子计算^[8]、量子信息^[9]等方面也扮演着越来越重要的角色。

利用原子冷却与陷俘技术可以获得温度低至 nK 的超冷原子气体, 结合直接模拟蒙特卡罗(Direct Simulation Monte Carlo, 简称 DSMC)方法, 可模拟磁光阱中的原子冷却与囚禁^[10]。在超冷原子地面实验室中, Leanhardt 等^[11]已实现了 450 pK 的超低温记录。对于极低温度的原子气体, 在考虑单个原

子时, 忽略不计的重力已经成为一个实质性的障碍, 对于囚禁在极弱势阱中的超冷原子, 重力会导致大量原子丢失。近地轨道上的微重力条件可以突破地面上的限制, 故微重力环境下的超冷原子实验应运而生。目前, 国际上开展的微重力冷原子实验有德国微重力环境超冷原子项目 QUANTUS (Quanten Gase Unter Schwerelosigkeit), 该项目基于脉冲冲击冷却(DKC)方法, 实现了 1 nK 的铷玻色-爱因斯坦凝聚体^[12]; 美国国家宇航局(NASA)在 2016 年将空间冷原子实验室(CAL)成功发射至空间站, 目标是制备 100 pK 的超冷原子气体样品^[13]。国内上海光学精密机械研究所研制的空间冷原子钟(CACES)于 2016 年成功发射并在轨稳定运行超过 30 个月^[14], 基于中国空间站的空间超冷原子物理实验平台也计划于 2022 年发射。空间超冷原子物理实验平台中原子的激光冷却、态制备、探测、基于光阱的蒸发冷却和深度冷却实验所需的光源均由光学

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-11; 录用日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1730126)、中国科学院青年创新促进会

通信作者: *wangwenli@siom.ac.cn; **irenexu@siom.ac.cn

系统提供,因此光学系统是空间超冷原子物理实验平台的关键系统之一。光学系统主要由激光器、光学平台、光机系统三部分构成。其中,光机系统安装在物理子系统上,对馈入的激光进行整形、准直、成像以及偏振控制等操作。本文基于 Rb-87 调制转移光谱稳频技术^[15],详细介绍了空间超冷原子物理光机系统的设计,并通过三维磁光阱中原子装载率和原子数目的实验,验证了其可行性。

获得超冷原子的前提是真空腔中的背景气体浓度足够低,从而尽量减小冷原子与背景气体原子之间的碰撞造成的损失。但是,背景气体浓度的降低意味着目标原子的浓度也会降低,最终能获得的冷原子数目达不到要求。为了克服这一矛盾,冷原子束源应运而生^[16]。传统冷原子束源主要分为两大类。一类是利用基于塞曼频移补偿多普勒效应的塞曼减速器来实现原子的冷却和减速^[17]。另一类则基于激光冷却的二维磁光阱(2D-MOT)。二维磁光阱根据构型可分为以下几类:低速原子强束流源(LVIS)^[18]、移动光学黏团(Moving Molasses)^[19]、轴向二维磁光阱(2D⁺-MOT)^[20-21]。

本文提出了空间超冷原子物理实验平台的二维磁光阱的光机系统,用于超冷原子的制备和预冷却,主要目的是通过 2D-MOT 横向预冷却产生高通量冷原子束流,从而提高 3D-MOT 的原子装载率。在简述系统设计原理的基础上,重点介绍了光学系统、核心器件以及光机结构系统的设计。相较于传统物理光机的设计,本方案更侧重于光路的简洁性和结构的集成稳定性,更易于实现工程化。另外,提出了 V-GROOVE 光纤设计方案,解决了 4 路光同时输入一个光机口的难题,提高了所有光机组件的集成度。最后,利用三维磁光阱中的冷原子装载实验对本方案进行了验证。实验结果表明,2D 推送光可以有效提升装载的原子数及装载率,与传统实验系统相比,该系统在工程化的基础上实现了 Rb-87 三维磁光阱中装载率约为 $1.89 \times 10^8/\text{s}$ 的高强度连续原子束流。

2 光学系统设计

2.1 总光路设计

在冷却光与重泵光的作用下,Rb-87 原子在 2D-MOT 中被冷却,最终预冷却的原子主要分布在超精细能级基态 $F=2$ 的各个磁子能级上。2D-MOT 中的原子束在红失谐推送光的作用下,形成一个流速相对稳定的冷原子束流,束流经过差分管

指向 3D-MOT 中心。本实验使用的 2D-MOT 光机系统装置如图 1(a)所示,二维腔为长方体结构,腔体内壁尺寸约为 $58 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。腔体侧面留有四个光学窗口,其中三个窗口尺寸为 $58 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$,长窗冷却重泵光沿 x 轴方向传播,短窗冷却重泵光沿 $-z$ 轴传播, 0° 反射镜和四分之一波片组合安装在冷却重泵光机对面的窗口上,从而构成 2D-MOT 所需的光场结构。一个较长的窗口尺寸为 $73 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$,沿 $-x$ 轴方向,用来通过缓冲光和长窗冷却重泵光对应的 0° 反射光。再加上 y 轴方向的推送光窗,总共 5 个光学窗口,每个窗口镀增透膜(透射率 $> 99.8\% @ 765 \sim 781 \text{ nm}$)。2D-MOT 的右端经转接腔与原子源相连,左端则通过差分管与 3D-MOT 相连。最后再将两对四极线圈套在腔外围,构成横向的两对反亥姆霍兹线圈,用于提供 2D-MOT 所需的梯度磁场^[16]。系统的真空环境依靠两个离子泵和两个吸气剂,2D 腔的真空气压为 10^{-7} Pa ,3D 腔的真空气压为 10^{-9} Pa 。2D 腔和 3D 腔使用喇叭形的差分管连接起来,该差分管用以维持 2D 腔和 3D 腔之间两个数量级的压强差^[22]。

2D-MOT 中的冷却光频率与 3D-MOT 中的冷却光频率相同,如图 1(b)所示,在铷原子 D_2 线的 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 红失谐处,失谐量 Δ_1 为 -12 MHz 。重泵光频率与 D_2 线的 $|F=1\rangle \rightarrow |F'=2\rangle$ 跃迁频率共振,冷却光和重泵光从光纤输出并合束后,经两个焦距分别为 -442.53 mm 和 53.57 mm 的透镜进行扩束准直,形成直径为 13 mm 的准直光。2D-MOT 可以在 x 方向和 z 方向冷却原子,轴线 y 方向是原子束的流动方向,为了扩大 2D-MOT 的体积并提高束流质量,冷却光和重泵光被三个分束器(BS)分为三束光,分束比分别为 $1/3$ 、 $1/2$ 和全反。在穿过真空腔后,依次经过四分之一波片和 0° 反射镜后再次返回真空腔,形成对射。使用 BS 的方案具有更好的激光功率平衡性以及更多的调节维度。

推送光频率在 D_2 线的 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 红失谐处,失谐量 Δ_2 为 -25 MHz 。推送光是一束由焦距为 25.85 mm 的聚焦透镜产生的会聚光,其焦斑位于 2D-MOT 腔长轴右侧 $1/4$ 位置处,差分管小孔位置处的光斑直径为 2.02 mm ,能全覆盖小孔(小孔直径为 1.96 mm),推送光的作用是将 2D-MOT 中冷却后的原子通过真空差分管推送到 3D-MOT 腔。

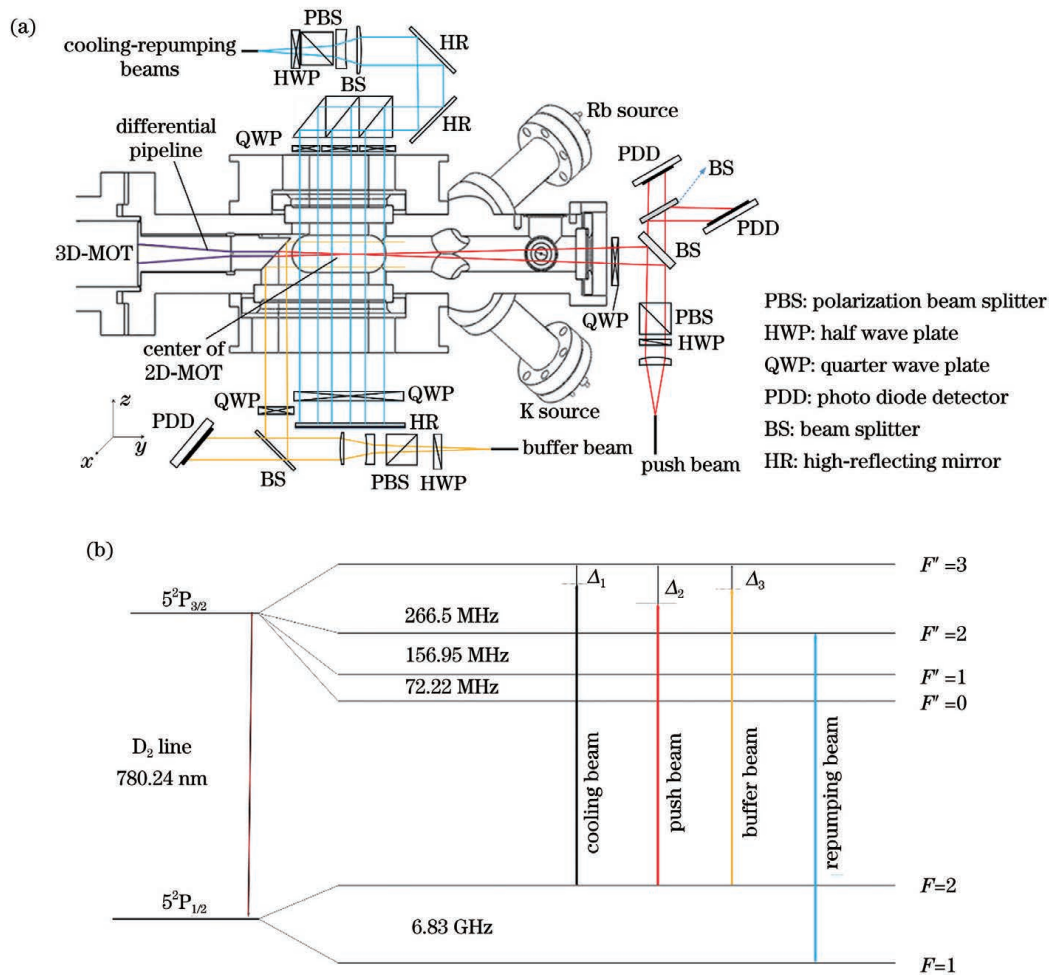


图 1 2D-MOT 总光路图及能级图。(a) 2D-MOT 总光路模型图;(b) Rb-87 原子的 D₂ 线能级图

Fig. 1 2D-MOT total optical path diagram and energy diagram. (a) Diagram of total optical path model for 2D-MOT; (b) D₂ line energy diagram of Rb-87 atom

缓冲光频率在 D₂ 线的 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 红失谐处,失谐量 Δ_3 为 $-10 \sim -20$ MHz。光纤输出的光束经两个焦距分别为 -165.11 mm 和 37.57 mm 的透镜准直后即为缓冲光,光斑尺寸为 10 mm,从较长窗口的一端入射,与推送光在腔内重合,形成对射。在差分管的 2D-MOT 端镀了一个 45° 的反射面,缓冲光从侧面入射,经差分管端面反射后,传播方向与推送光相反,形成对射,同时由于差分管端面的中心孔洞,反射后缓冲光的轴向光强分布为环形分布,即中心光强为零,因此缓冲光对束流中心的原子没有影响,但对束流边缘的原子有减速作用,减慢其脱离束流的速度,提高束流强度。

2.2 Zemax 仿真模拟

采用光学设计软件 Zemax 对 2D-MOT 的光路进行光学设计模拟。图 2 所示为 2D-MOT 光学设计结果的 Footprint 图,其中图 2(a)、(b) 分别为冷却重泵光和缓冲光在 2D 腔中心的光斑大小,直径

分别为 13.20 mm 和 10.00 mm,图 2(c) 为推送光在差分管位置处的光斑大小,直径为 2.20 mm。由于冷却重泵光和缓冲光是近平行光束,故还需考虑发散角的大小。为了方便,在设计时将一个面焦距为 1 m 的理想透镜放在成像面前用于显示发散角大小,由图 2(d)、(e) 可以看出,冷却重泵光和缓冲光的发散角分别为 0.20 mrad 和 0.18 mrad。由于推送光为会聚光,故不考虑其光束发散角。

对于每路准直光,在其光斑大小和发散角满足实验要求的条件下,评价其成像质量。经过反复校正与平衡像差后,利用调制传递函数 (MTF) 图和点列图对各路光的成像质量进行评价,结果如图 3 所示。图 3(a)、(b) 分别为冷却重泵光和缓冲光的 MTF 图,可见系统调制传递函数几乎与系统衍射极限传递函数重合。

冷却重泵光和缓冲光的点列图分别如图 4(a)、

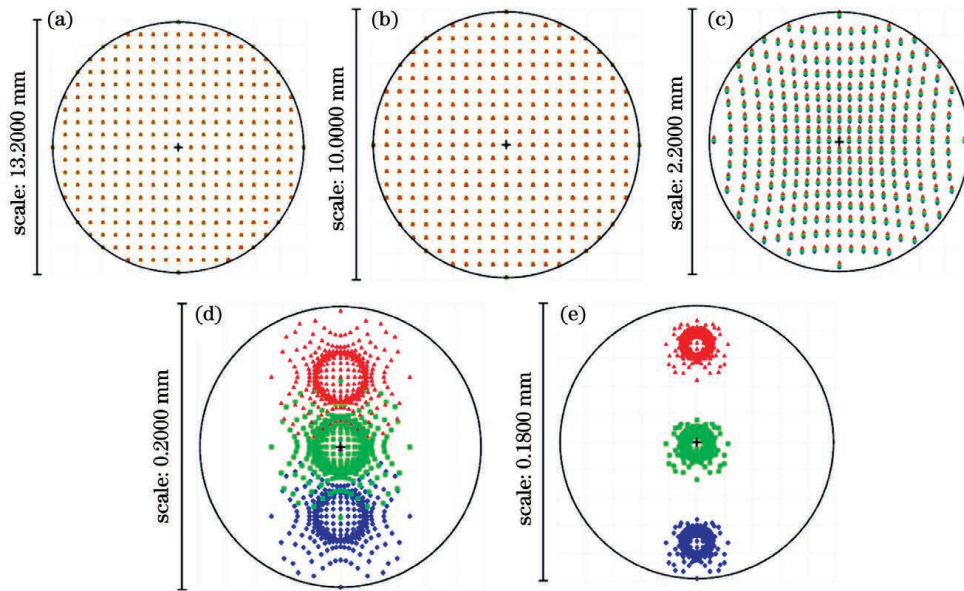


图 2 2D-MOT 光路的 Footprint 图。(a) 冷却重泵光在 2D 腔中心的光斑大小;(b)缓冲光在 2D 腔中心的光斑大小;
(c) 推送光在差分分管位置处的光斑大小;(d) 冷却重泵光的发散角分布;(e) 缓冲光的发散角分布

Fig. 2 Footprint diagrams of 2D-MOT light path. (a) Light spot size of cooling repumping beam in center of 2D-MOT;
(b) light spot size of buffer beam in center of 2D-MOT; (c) light spot size of push beam at differential pipeline;
(d) divergence angle distribution of cooling repumping beam; (e) divergence angle distribution of buffer beam

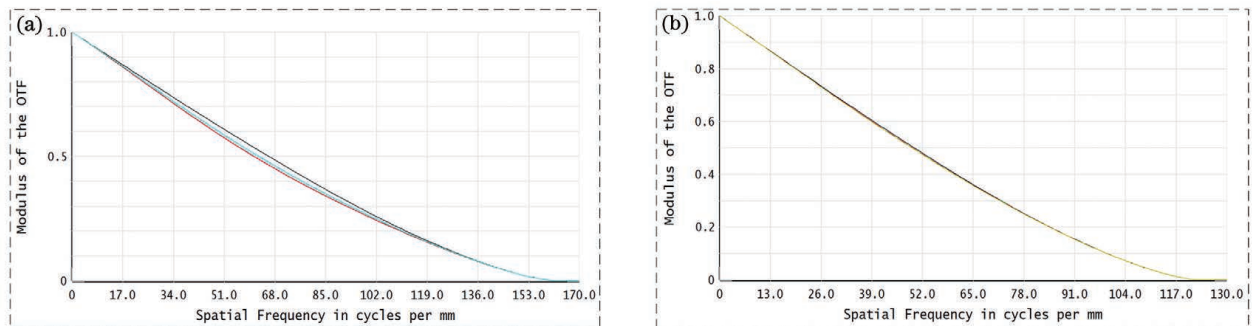


图 3 MTF 图。(a) 冷却重泵光;(b) 缓冲光

Fig. 3 MTF diagrams. (a) Cooling repumping beam; (b) buffer beam

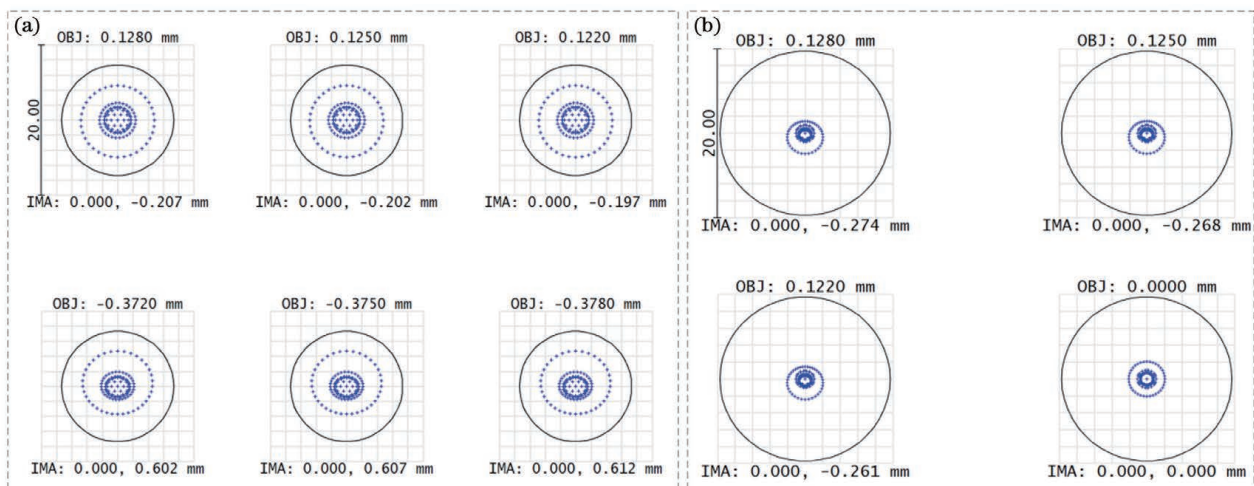


图 4 点列图。(a) 冷却重泵光;(b) 缓冲光

Fig. 4 Spot diagrams. (a) Cooling repumping beam; (b) buffer beam

(b)所示,其中外围的实线圈代表艾里斑,里边的虚线圈代表光束弥散斑,OBJ 表示物体所在面,IMA 表示像所在面。图 4(a)所示为 6 个不同视场的冷却重泵光的点列图,其艾里斑半径为 $7.35 \mu\text{m}$,6 个视场的均方根(RMS)半径约为 $3.00 \mu\text{m}$ 。图 4(b)所示为 4 个不同视场的缓冲光的点列图,其艾里斑半径为 $9.72 \mu\text{m}$,4 个视场的均方根半径约为 $1.30 \mu\text{m}$ 。可以看出,两路准直光在不同视场下的弥散斑尺寸均远远小于对应的艾里斑尺寸,系统的光学性能良好。推送光通过单透镜实现会聚光束,所以不考虑 MTF 图和点列图。

3 物理光机设计

3.1 光机总结构

超冷原子物理实验系统的整体质量不能大于 305 kg。在真空腔体外壁安装单个物理光机。系统的二维激光冷却对光束的质量和功率稳定度都有非

常严格的要求。在有限的质量和空间限制下,考虑光学组部件、光路调整工艺和结构所用材料等要求,利用机械结构设计软件 Solidworks 进行结构建模。

光机结构主要基于图 1(a)所示的光路进行设计,如图 5 所示。其中,图 5(a)为整体的 2D 光机结构,由 4 个小系统组成,分别为短窗冷却重泵光机、长窗冷却重泵光机、缓冲光机和推送光机。图 5(b)~(d)分别为长/短窗冷却重泵光机、推送光机和缓冲光机的结构剖图。在每个小系统的设计中,采用固定长度的隔圈来保证准直透镜组之间的固定距离。每个小系统中均添加了 45° 反射镜,使光路产生转折,这样不但可以节约空间,还可以对微透射的光束采用光电二极管探测器进行监测,用于后期分析。为了满足实验中光强以及偏振的可调性, $1/4$ 波片结构和 $1/2$ 波片结构都留有可旋转小孔。在每个光机结构上,所有孔位公差均保证为 ± 0.1 ,以满足实验高精度的要求。

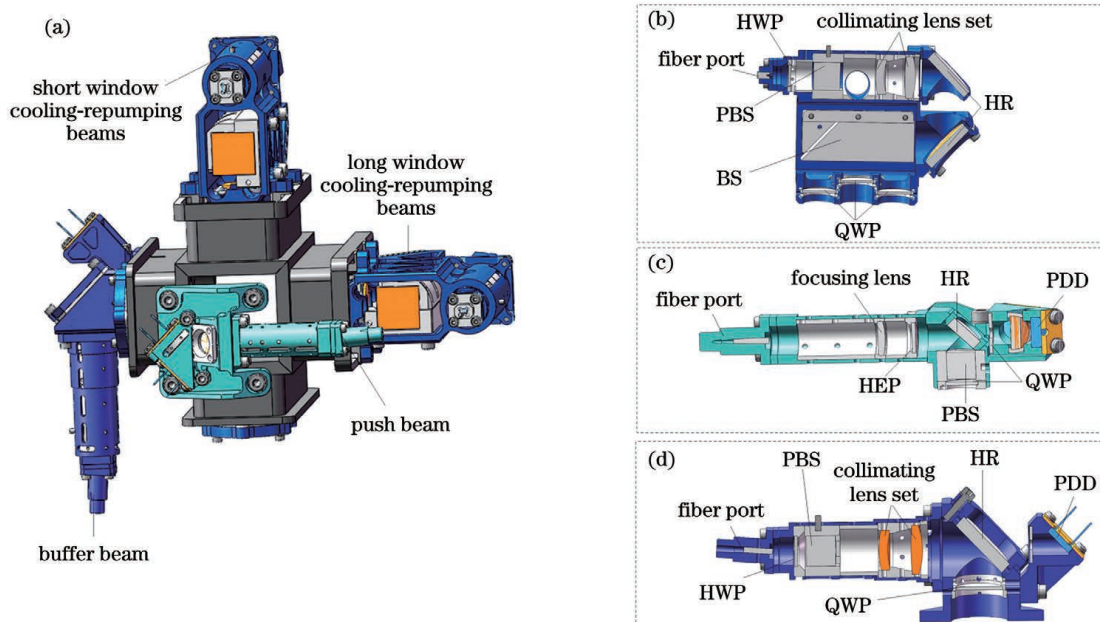


图 5 2D-MOT 光机的结构总图及剖图。(a)2D-MOT 光机的结构图;(b)冷却重泵光光机结构剖图;(c)推送光光机结构剖图;(d)缓冲光光机结构剖图

Fig. 5 General structure drawing and profiles of 2D-MOT optical machine. (a) Structural diagram of 2D-MOT optical machine; (b) optical-mechanical profile for cooling repumping beam; (c) optical-mechanical profile for push beam; (d) optical-mechanical profile for buffer beam

各个部件的结构设计特点是外形尺寸尽可能小,不采用任何可调节的弹性机械结构,所有光学元件间距的精密调节均采用旋转元件加锁紧的装调方式,光束指向的精密调节则采用研磨垫片和微调反射镜来实现,利用隔圈控制镜片与镜片之间的距离,利用螺纹压圈固定镜筒中的各结构件。实验证明,

这种设计有助于提高光路稳定性及使用持久性。所有光机结构均采用铝合金,光机安装螺丝和部分光纤转接件为钛合金。物理光学使用的非金属材料有石英玻璃窗口、耐辐射玻璃透镜、BK7 光学玻璃、AB 双组分环氧结构胶和 GD414 硅橡胶等。优质的质量为物理光机结构实现其功能提供了保证。

3.2 V-GROOVE 光纤设计

针对 Rb-87 和 K-40 两种原子,需要用不同波长的光进行激光冷却,两种原子的 D_2 线分别在 780 nm 和 767 nm 波长处,由两台光纤激光器分别提供。两种波长的光在单根单模保偏光纤中合束困难较大,针对这个问题,我们设计了 V-GROOVE 光纤,结构如图 6(a)所示。

冷却重泵光输入光纤的型号为康宁 PM850/(5/125),光纤数值孔径为 $0.1052@767\text{ nm}$ 和 $0.1043@780\text{ nm}$,模场直径为 $(5.5 \pm 1)\text{ mm}@850\text{ nm}$,单模保偏,端面从下至上斜 8° 切割,OZ 公司的 V-GROOVE 接头,总共有 4 根光纤带,4 根光

纤平行排列,V 型槽内 4 根光纤垂直排列,其保偏(PM)短轴沿垂直方向,通过同一个光机系统。不同波长光束与光纤的对应关系及光纤排列的结构参数如图 6(b)所示,其中①、②、③、④用来标注光纤的位置。780 nm 重泵光的纤芯排列位置需在 2D 真空腔光学窗口入射端,由于慢轴与 V 型槽底座垂直,故将 780 nm 重泵光的纤芯放在④号位置处;重泵光与冷却光偏离 0.5 mm 左右,故将 780 nm 冷却光的纤芯放在②号光纤位置处,767 nm 重泵光和冷却光同理可得。这种设计解决了四路光从一个光机输入端输入的难题。从图 6(c)也可以看出,四路光同时通过三个 BS 分光后也能全部覆盖 2D-MOT 中的原子团。

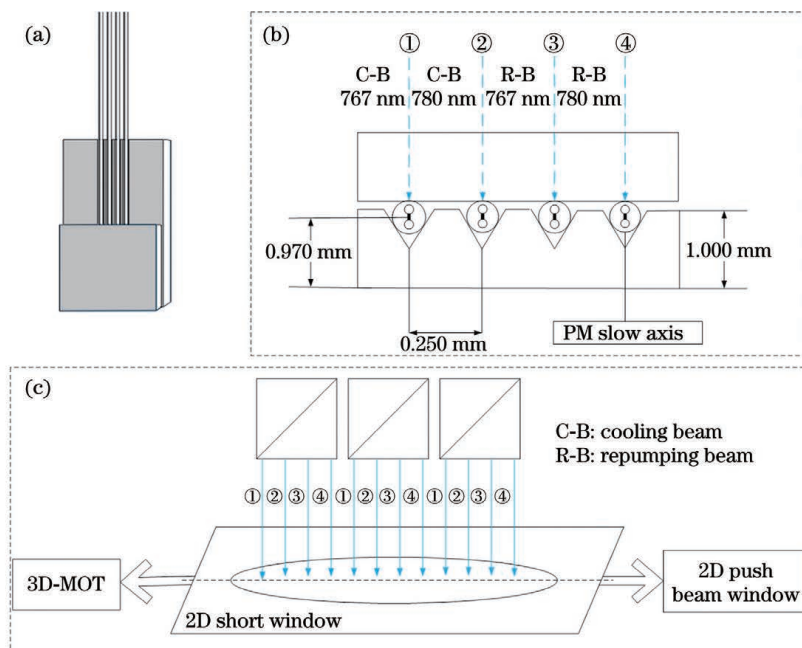


图 6 V-GROOVE 光纤设计。(a)结构图;(b)冷却重泵光光纤排列图;(c)冷却重泵光光束排列顺序图

Fig. 6 Design of V-GROOVE fiber. (a) Structural diagram; (b) arrangement diagram of cooling repumping optical fibers; (c) sequence diagram of cooling repumping beams

4 实验研究与分析

4.1 光路测试结果

在整体的物理光机安装调试过程中,探测器均采用 OPHIR 公司型号为 BGP-USB-L11059 的光斑质量分析仪,用来分析光斑大小及偏心率。采用内调焦望远镜分析入射光束与安装面的垂直度。采用长度为 10 m 的反射式平行光管测量光束发散角。采用 THORLABS 公司型号为 M0054651 的偏振分析仪分析光斑的偏振情况。使用 THORLABS 公司型号为 P0030229 的功率计测量光束功率大小。铷原子 2D-MOT 光机的测试结果如表 1 所示,其中 σ^+ 代表左旋圆偏振, σ^- 代表右旋圆偏振(面对光束传播方向)。

表 1 中第二列代表每路光对应的光斑大小,可以看到,缓冲光在二维磁光阱腔中心处的光斑直径为 10.06 mm,推送光在差分管小孔位置处的光斑直径为 2.02 mm,长/短窗冷却重泵光被分光棱镜(BS)分为相同尺寸的三束光,在二维磁光阱腔中,长窗冷却重泵光对应的三束光的光斑直径均为 13.10 mm,短窗冷却重泵光对应的三束光的光斑直径均为 13.27 mm。第三列为每路平行光束对应的发散角,可以看到,长/短窗冷却重泵光对应的发散角分别为 0.39 mrad 和 0.41 mrad,缓冲光对应的发散角为 0.13 mrad,基本满足近平行光束的条件。第四列和第五列分别为各路光的偏振情况和输入光功率大小。综上可知,四路光基本满足实验需求。

表 1 光路测试结果
Table 1 Optical path test results

Beam	Spot size /mm	Divergence angle /mrad	Polarization state	Input power /mW
Long window cooling & repumping beams	13.10	0.39	σ^-	60 (cooling beam 1) and 20 (repumping beam 1)
Short window cooling & repumping beams	13.27	0.41	σ^+	60 (cooling beam 2) and 20 (repumping beam 2)
Buffer beam	10.06	0.13	σ^-	10
Push beam	2.02		$-\sigma^+$	15

4.2 实验结果分析

磁光阱中的原子数目由荧光检测法^[23]得到,通过分析收集到的原子发出的共振荧光光子数来推算原子数目。荧光光子数直接表征了磁光阱中处于激发态的原子数目(N_e)^[24]:

$$N_e = \frac{N}{2} \cdot \frac{c_1^2 \Omega / 2}{\Delta^2 + \Gamma^2 / 4 + c_2^2 \Omega^2 / 2}, \quad (1)$$

式中: c_1, c_2 是与原子在磁子能级上的粒子数分布有关的参量,在弱光近似下,各磁子能级上的粒子数近似呈平均分布, $c_1 = c_2$; N 为阱中的原子总数; Ω 为冷却光的拉比频率; Δ 为失谐量; Γ 为激发态能级到基态能级的自发发射速率。用大面积的光电探测器收集 3D 磁光阱中 Rb-87 原子发出的荧光,荧光光电流的大小与磁光阱中的原子数目成正比。考虑到荧光收集角、原子的发光效率和接收效率等因素,原子数为

$$N = \frac{4\pi I}{\eta \Omega_c \hbar \omega \Gamma} \frac{1}{2} \frac{c_1^2 \Omega / 2}{\Delta^2 + \Gamma^2 / 4 + c_2^2 \Omega^2 / 2}, \quad (2)$$

式中: I 为接收到的光电流; η 为光电探测器的量子效率; Ω_c 为荧光收集立体角; \hbar 为普朗克常数; ω 为角频率。

基于上述实验条件,通过光电管收集冷原子的荧光信号,并实时标定对应的原子数。考虑实验设备,本次实验未输入缓冲光,实验中分有推送光和无推送光两种情况进行测试。

3D-MOT 中的原子装载曲线图如图 7 所示,可以看出,有推送光条件下的 MOT 装载曲线初始斜率较大,装载效率和最终装载原子数也相对较多,当装载时间达到 20 s 时,装载原子数约为 9×10^8 ; 没有推送光条件下,相较于有推送光条件,其装载效率有很大下降,最终装载原子数仅有约 2×10^8 。

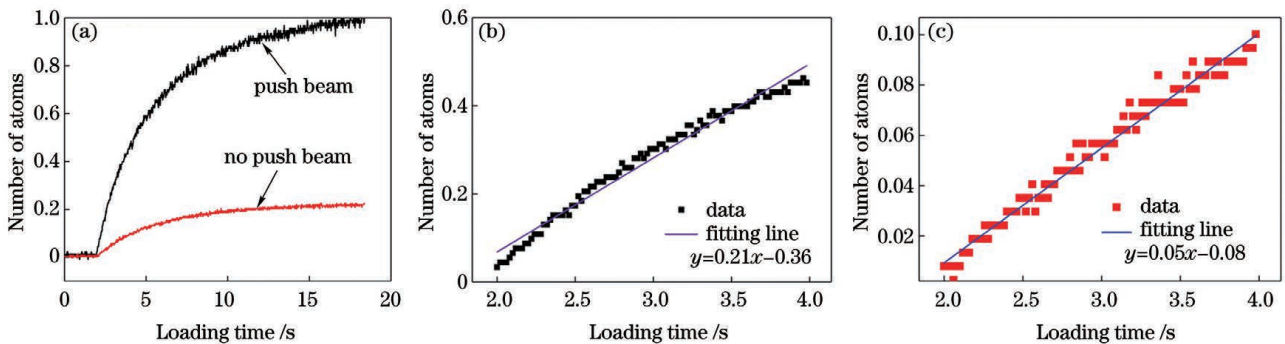


图 7 归一化系数为 9×10^8 时 3D-MOT 归一化后的装载原子数。(a) 3D-MOT 中原子的装载曲线图;(b) 有推送光时的装载率拟合曲线;(c) 无推送光时的装载率拟合曲线

Fig. 7 Normalized loading atom number in 3D-MOT with normalization factor of 9×10^8 . (a) Atomic loading curves in 3D-MOT; (b) fitting line of loading rate with push beam; (c) fitting line of loading rate without push beam

由于磁光阱最初装载的速率正比于束流强度,因此对图 7(a) 所示 2~4 s 装载过程中的原子数的变化进行线性拟合,得到对应实验条件下的初始装载率,最终结果如图 7(b)、(c) 所示,其中拟合曲线的斜率表示原子束流强度。从图 7(b) 可以看到,有

推送光条件下的装载率约为 $1.89 \times 10^8/s$ 。从图 7(c) 得到,没有推送光条件下的原子装载率约为 $4.51 \times 10^7/s$ 。对比两种情况,证明推送光可以显著提高 3D-MOT 的装载速率以及最终的原子数。

综上,基于简洁的光路设计、集成化的结构设计

以及精细的装调,2D-MOT 所得到的冷原子束流完全满足后续的 3D-MOT 装载需求。

5 结 论

为了适应工程化的物理光机应用需求,针对传统实验中光机体积重量大、光学部件多、光学系统复杂等问题,设计了高稳定度的小型化光机系统,对系统的光学组部件、光路调整工艺以及结构材料等进行高质量的筛选和高精度的装调,论述了系统设计和核心器件选型的方法,研制了应用于铷钾原子混合二维磁光阱的物理光机系统,并进行了系统分析以及实验验证。结果表明:长窗冷却重泵光的光斑直径为 13.10 mm,发散角为 0.39 mrad,短窗冷却重泵光的光斑直径为 13.27 mm,发散角为 0.41 mrad,缓冲光的光斑直径为 10.00 mm,发散角为 0.13 mrad,推送光在差分管位置处的光斑直径为 2.02 mm。成像系统点列图中的均方根半径和几何半径都小于艾里斑,而且光学系统的调制传递函数与衍射极限传递函数非常接近,说明系统具备优良的光学性能。提出的 V-GROOVE 光纤设计方案实现了 4 路光同时输入一个光机口,整体物理光机设计满足所用光学组部件少、总光程短、体积和功耗小、总重量轻的要求,大大提高了所有光机组件的集成度,同时也提升了原子捕获效率和原子团的质量,实现了 3D-MOT 中 $1.89 \times 10^8/s$ 的原子装载率。激光冷却与囚禁技术的工程化为超冷原子物理从科学实验研究转向工程应用及空间超冷原子物理的发展打下了扎实的基础。

参 考 文 献

- [1] Bloch I, Dalibard J, Zwerger W. Many-body physics with ultracold gases[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2008, 80(3): 885-964.
- [2] Lewenstein M, Sanpera A, Ahufinger V, et al. Ultracold atomic gases in optical lattices: mimicking condensed matter physics and beyond[J]. *Advances in Physics*, 2007, 56(2): 243-379.
- [3] Adams C S, Sigel M, Mlynek J. Atom optics[J]. *Physics Reports*, 1994, 240(3): 143-210.
- [4] Hudson J J, Kara D M, Smallman I J, et al. Improved measurement of the shape of the electron[J]. *Nature*, 2011, 473(7348): 493-496.
- [5] 刘伍明, 周小计, 江开军, 等. 基于人造规范势与光晶格中超冷原子气体的量子模拟[J]. *中国基础科学*, 2019, 21(5): 41-57.
Liu W M, Zhou X J, Jiang K J, et al. Quantum simulation of ultra-cold atom gases in artificial gauge field and optical lattices[J]. *China Basic Science*, 2019, 21(5): 41-57.
- [6] Müller H, Chiow S W, Long Q, et al. Atom interferometry with up to 24-photon-momentum-transfer beam splitters[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(18): 180405.
- [7] Zhao B S, Schewe H C, Meijer G, et al. Coherent reflection of He atom beams from rough surfaces at grazing incidence[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 133203.
- [8] Wu Z, Zhang L, Sun W, et al. Realization of two-dimensional spin-orbit coupling for Bose-Einstein condensates[J]. *Science*, 2016, 354(6308): 83-88.
- [9] Mancini M, Pagano G, Cappellini G, et al. Observation of chiral edge states with neutral fermions in synthetic Hall ribbons[J]. *Science*, 2015, 349(6255): 1510-1513.
- [10] 刘乾, 谢昱, 李琳, 等. 基于人工神经网络的超冷原子实验多参数自主优化系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(24): 2412001.
Liu Q, Xie Y, Li L, et al. Multiparameter autonomous optimization system for ultracold atomic experiments based on artificial neural network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(24): 2412001.
- [11] Leanhardt A E, Pasquini T A, Saba M, et al. Cooling Bose-Einstein condensates below 500 picokelvin[J]. *Science*, 2003, 301(5639): 1513-1515.
- [12] Müntinga H, Ahlers H, Krutzik M, et al. Interferometry with Bose-Einstein condensates in microgravity[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(9): 093602.
- [13] Elliott E R, Krutzik M C, Williams J R, et al. NASA's Cold Atom Lab (CAL): system development and ground test status[J]. *Npj Microgravity*, 2018, 4: 16.
- [14] Liu L, Lü D S, Chen W B, et al. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ^{87}Rb atoms[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2760.
- [15] 洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb^{87} 调制转移光谱稳频技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2101003.
Hong Y, Hou X, Chen D J, et al. Research on frequency stabilization technology of modulation transfer spectroscopy based on Rb^{87} [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2101003.
- [16] 刘乾, 谢昱, 李琳, 等. 基于红失谐高斯光束的冷原子束流长距离传输[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2102001.
Liu Q, Xie Y, Li L, et al. Long-distance transmission of cold atomic beams based on red-detuned Gaussian beams [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2102001.

- [17] Lison F, Schuh P, Haubrich D, et al. High-brilliance Zeeman-slowed cesium atomic beam [J]. *Physical Review A*, 1999, 61: 013405.
- [18] Feng Y Y, Zhu C X, Wang X J, et al. Characterization of a velocity-tunable ^{87}Rb cold atomic source with a high-speed imaging technology [J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(8): 3373-3378.
- [19] Wang X J, Feng Y Y, Xue H B, et al. A cold ^{87}Rb atomic beam [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(12): 126701.
- [20] Dieckmann K, Spreeuw R J C, Weidemüller M, et al. Two-dimensional magneto-optical trap as a source of slow atoms [J]. *Physical Review A*, 1998, 58(5): 3891-3895.
- [21] Catani J, Maioli P, de Sarlo L, et al. Intense slow beams of bosonic potassium isotopes [J]. *Physical Review A*, 2006, 73(3): 033415.
- [22] Liu Q, Xie Y, Li L, et al. Development of an ultra-high vacuum system for a cold atom physics rack in space [J]. *Vacuum*, 2021, 190: 110192.
- [23] Monroe C, Swann W, Robinson H, et al. Very cold trapped atoms in a vapor cell [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 65(13): 1571-1574.
- [24] Gabbanini C, Evangelista A, Gozzini S, et al. Scaling laws in magneto-optical traps [J]. *Europhysics Letters (EPL)*, 1997, 37(4): 251-256.

Integrated Design and Realization of Two-Dimensional Magneto-Optical Trap for Ultra-Cold Atomic Physics Rack in Space

Li Wenwen^{1,3}, Liu Qian^{1,3}, Liang Ang'ang^{1,3}, Xie Yu^{1,3}, Li Lin^{1,3}, Li Rui², Meng Jie², Pan Taijun², Wang Bin², Xu Xinping^{2*}, Wang Wenli²

¹Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Spaceborne Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

Abstract

Objective An optical system is one of the key systems of the space ultra-cold atomic physics experimental platform for laser cooling, state preparation and detection of atoms, as well as evaporative cooling and deep cooling experiments based on optical traps. The optical system is mainly composed of laser, optical platform and optical-mechanical system. The optical-mechanical system is a key component installed in the physical subsystem for shaping, alignment, imaging, and polarization control of the incident laser. In this paper, a two-dimensional (2D) magneto-optical trap (MOT) optical-mechanical system of the space ultra-cold atomic physics experimental platform is proposed for the preparation and pre-cooling of ultra-cold atoms. The main purpose is to generate a high-flux cold atomic beam through two-dimensional magneto-optical trap (2D-MOT) lateral pre-cooling and thus to improve the atomic loading rate of a three-dimensional magneto-optical trap (3D-MOT).

Methods The laser system of our quasi-2D MOT includes cooling beams, repumping beams, push beam, and buffer beam. To ensure an excellent optical performance, the Zemax software is applied to design and optimize this optical system with the root mean square (RMS) radius of the point diagram of the imaging system less than that of Airy spot and the modulation transfer function (MTF) of the optical system very close to the diffraction limit transfer function. Further, the Solidworks software is used to complete the simulation design of the miniaturized optical-mechanical structure with a high stability performance. We also propose a V-GROOVE optical fiber design scheme to let four-way beams input into one optical port at the same time, which further improves the integration of all optical components.

Results and Discussions In this paper, the optical design software Zemax is used to simulate the optical path required by a 2D-MOT for the optical-mechanical system of the space ultra-cold atomic physics experimental platform. From the footprint diagram, it can be seen that the light spot size of a long window cooling repumping beam is 13.10 mm, and the divergence angle is 0.39 mrad. The light spot size of a short window cooling repumping

beam is 13.27 mm, and the divergence angle is 0.41 mrad. The light spot size of a buffer beam is 10.00 mm, the divergence angle is 0.13 mrad, and the focal spot size of a push beam at the differential pipeline is 2.02 mm (Fig. 2). The imaging quality of all channels of light is evaluated by the modulation transfer function and the point sequence diagram. The root mean square radius and the geometric radius of the point sequence diagram of the imaging system are both smaller than those of the Airy spot, and the modulation transfer function of the optical system is very close to the diffraction limit transfer function, indicating that the system had an excellent optical performance (Figs. 3 and 4). The V-GROOVE fiber scheme and other optical-mechanical structures simulated by the Solidworks software also meet the requirements of few optical components, short total optical path, small volume, low power consumption and light total weight, greatly improving the integration of all optical components (Figs. 5 and 6). Finally, the atomic loading rate of 1.89×10^8 /s in the 3D-MOT is achieved.

Conclusions This paper presents a method for system design and core device selection, a physical optical-mechanical system is developed for the realization of a rubidium potassium hybrid two-dimensional magneto-optical trap, and the system analysis and experimental verification are carried out. The results show that the light spot size of a long window cooling repumping beam is 13.10 mm, and the divergence angle is 0.39 mrad. The light spot size of a short window cooling repumping beam is 13.27 mm, and the divergence angle is 0.41 mrad. The light spot size of a buffer beam is 10.00 mm, and the divergence angle is 0.13 mrad. The focal spot size of a push beam at the differential pipeline is 2.02 mm. The root mean square radius and the geometric radius of the imaging system are both smaller than those of the Airy spot, and the modulation transfer function of the optical system is very close to the diffraction limit transfer function, indicating that the system has an excellent optical performance. The V-GROOVE design scheme of an optical fiber is proposed to let the four-way beams input optical port at the same time, and the overall physical optical-mechanical structure design also meets less parts used in an optical group, short total optical path, small volume, low power consumption, and light total weight, greatly improving the integration of all optical components and at the same time promoting atomic capture efficiency and the quality of the groups. The atomic loading rate of 1.89×10^8 /s in the 3D-MOT is achieved.

Key words quantum optics; two-dimensional magneto-optical trap; laser cooling; atomic loading; Zemax software; Solidworks software