

# 冷原子高分辨率原位成像系统设计与测试

夏佳惠, 李芳, 邓书金\*, 武海斌

华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200241

**摘要** 基于长工作距离的显微物镜结构设计并加工一套高分辨率显微成像系统, 以应对冷原子高分辨成像的需求。仿真结果表明, 所设计的高分辨率显微成像光学系统在 671 nm 波长附近的数值孔径为 0.55、工作距离可达 14 mm, 并在  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  大小的视场范围内光学传递函数 (MTF) 曲线逼近理论衍射极限。实际点光源衍射实验结果表明, 将直径大小为  $(300 \pm 50)\text{nm}$  的针孔作为点光源, 实际测得该显微成像物镜系统的分辨率优于  $1\ \mu\text{m}$ , 可校正由厚度为 3.35 mm 真空视窗引入的像差, 改善超冷量子气体成像系统的分辨率。通过精确控制镜筒中透镜间距, 该高分辨率显微成像系统可应用于其他常用超冷原子, 如 Na、K 和 Rb 等, 为超冷量子气体实验提供更加直观便捷的成像探测工具。

**关键词** 光学设计; 高分辨率原位成像; 衍射极限;  $^6\text{Li}$  超冷费米原子气体; 像差

中图分类号 TN942.2; O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0222001

## Design and Test of High-Resolution Imaging System for Ultracold Atoms

Xia Jiahui, Li Fang, Deng ShuJin\*, Wu Haibin

State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China

**Abstract** A set of high resolution microscopic imaging system based on long-distance microscopic objective lens is designed and processed to meet the needs of high resolution imaging of ultracold atoms. The simulation results show that the numerical aperture of the designed high resolution microscopic imaging optical system is 0.55 near 671 nm wavelength, the working distance is up to 14 mm, and the optical transfer function (MTF) curve approaches the theoretical diffraction limit in the field of view of  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ . The experimental results of the actual point source diffraction show that the resolution of the microscopic imaging objective lens system is better than  $1\ \mu\text{m}$  when the pinhole with a diameter of  $(300 \pm 50)\text{nm}$  is used as the point light source, and the aberration introduced by the vacuum window with a thickness of 3.35 mm can be corrected and the resolution of the ultracold quantum gas imaging system can be improved. By precisely controlling the lens spacing in the tube, the high-resolution microscopic imaging system can be applied to other commonly used ultracold atoms, such as Na, K, and Rb, and provide a more intuitive and convenient imaging detection tool for ultracold quantum gas experiments.

**Key words** optical design; high-resolution *in situ* imaging; diffraction limit;  $^6\text{Li}$  ultracold Fermi gas; aberration

## 1 引言

强关联量子多体系统中存在着丰富而又复杂的物理特性, 如高温超导和巨磁电阻<sup>[1]</sup>等。量子多

体系统对未来科技发展的重要性引起了研究人员的广泛关注, 然而该系统的复杂性使得理论和实验研究都十分具有挑战性。超冷费米气体作为一种在实验室中制备的多体强关联体系, 其在量子多体

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-03-13; 录用日期: 2021-03-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11804095)、上海市自然科学基金(19ZR1473700)

通信作者: \*sjdeng@lps.ecnu.edu.cn

现象的研究中发挥着重要作用<sup>[2-3]</sup>。高分辨率的超冷原子气体原位成像技术为超冷量子气体的制备提供了精确且直观的调控手段,该技术可以对原子气体进行单格点的探测和操控,使得直接观测原子气体空间结构和磁性排序,以及探测原子关联和动力学过程成为可能,并且在高温超导和量子磁性等一系列强关联物理特性的研究中发挥着重要作用<sup>[4-6]</sup>。目前,冷原子实验由于受到成像系统(空间分辨率一般只能达到 5  $\mu\text{m}$  左右)的限制,难以获得原子光晶格的高分辨率原位成像,因此迫切需要搭建具有亚微米分辨率的显微成像系统。

冷原子高分辨率成像系统具有较高的空间分辨率和较大的数值孔径,其空间分辨率一般需要达到俘获激光波长的亚微米量级。然而,由于实验过程中冷原子气体被囚禁于真空系统,此时需通过真空腔的观察窗片(真空视窗)才能对其成像。真空视窗本质上是具有一定厚度的平行平板,光线倾斜透过真空视窗会带来大量的球差,这严重降低了冷原子成像系统的分辨率。目前,对于冷原子成像系统,设计一套可校正大球面像差且具有长工作距离的物镜仍然是一个挑战,通常国际上的主流解决方案是由国际顶尖的商业团队对实验系统进行专业定制,但这种定制方案一般成本较为昂贵且耗时非常长。

本文为冷原子强关联超冷费米气体实验研究针对性地设计一种放置在真空腔外的组合显微物镜成像系统,对光学系统进行整体优化设计可修正由真空视窗引入的像差,能够大幅度优化成像质量。该高分辨率成像系统全部采用易于购买的商用透镜,在使用过程中配合实验室真空系统可实现亚微米级的分辨率,而且能够极大地降低实验成本和设计周期,为超冷原子气体高分辨率原位成像系统的设计提供了新的研究思路。

## 2 高分辨率显微物镜的设计

### 2.1 设计指标参数的确定与显微物镜像差的优化

在  $^6\text{Li}$  冷原子气体实验中,成像目标是位于真空腔中心的  $^6\text{Li}$  冷原子团,其直径一般不超过 100  $\mu\text{m}$ 。设计过程中设置视场大小为 200  $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ ,物方线视场为 280  $\mu\text{m}$ 。原子团与 3.35 mm 厚的真空视窗之间的距离为 10 mm,这就要求显微物镜的工作距离(WD)需大于 13.35 mm。由锂原子能级决定的共振光波长为 670.979 nm,故选择设计波长  $\lambda = 671 \text{ nm}$ 。显微物镜的瑞利分辨率公式为

$$R = 0.61 \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

式中:NA 为数值孔径,  $NA = n \times \sin \theta$ , 其中  $n$  为透镜与被检物体之间介质的折射率,  $\theta$  为孔径角。由(1)式可知,分辨率与数值孔径相关,数值孔径越大,分辨率越高。为了实现亚微米级的分辨率,显微物镜的数值孔径大于 0.41。调制传递函数(MTF)曲线是测评光学系统性能的重要指标之一,为了获得高质量的成像,设定该显微物镜在奈奎斯特频率为 600 lp/mm 处的全视场 MTF 值大于 0.3。根据以上确定的显微物镜设计指标及光学参数,并参考国内外光学设计手册及专利<sup>[7-14]</sup>,初始结构选择四片式显微物镜结构<sup>[7]</sup>,所有透镜材料均选用 N-BK7。

冷原子原位成像系统是小视场成像系统,具有成像激光频率稳定以及对色差不敏感的优点,主要存在的像差有球差、彗差和像散等。在光学设计软件 ZEMAX 中将真空视窗与显微物镜看作一个光学整体反向光路设计优化系统,初始结构的数值孔径仅为 0.34。为了提高数值孔径以满足分辨率的要求,在初始结构的最前端添加一片正弯月透镜,透镜材料仍是选用 N-BK7,显微物镜由四片式结构改为五片式结构。正弯月透镜具有中心厚、边缘薄的特点,与其他透镜组合可增大数值孔径。使用 LONA(轴上像差)和 SPHA(球差)等操作数来编写优化函数以调整镜片曲率以及控制透镜间距等,从而进一步优化校正像差<sup>[15-18]</sup>,选取合适的商业透镜进行替换可以降低成本,最终获得一个足以满足设计要求且成本较低的高分辨显微物镜结构。

### 2.2 显微物镜的设计结果与像质评价

显微物镜的最终光路如图 1 所示。显微物镜由 5 片透镜组成,从左到右分别为 LC1315-B 型平凹透镜、KBX151AR 型双凸透镜、LE1418-B 型正弯月透镜和在福州逐日光电科技公司购买的两款定制正弯月透镜。物镜组的具体参数如表 1 所示,孔径光阑

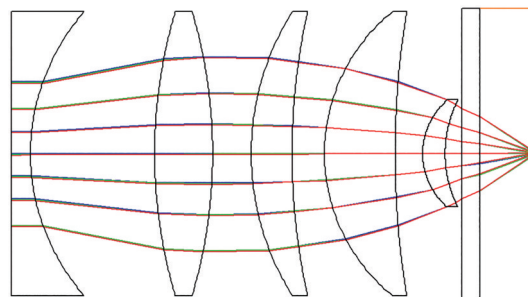


图 1 显微物镜系统的光路结构

Fig.1 Lightpath structure of microscopic objective system

表 1 显微物镜系统的具体参数

Table 1 Specific parameters of microscopic objective system

Lens	Surface No.	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Semi-diameter /mm
LC1315-B	1	Infinity	3.500	N-BK7	25.4
	2	38.590	22.170	Air	25.4
	3	89.470	10.362	N-BK7	25.4
KBX151AR	4	-89.470	6.890	Air	25.4
	5	47.870	7.290	N-BK7	25.4
LE1418-B	6	119.320	5.790	Air	25.4
	7	32.732	12.635	N-BK7	25.4
Custom lens 1	8	157.837	4.910	Air	25.4
	9	12.711	4.003	N-BK7	9.6
Custom lens 2	10	21.230	2.908	Air	9.6
	11	Infinity	3.350	Silica	25.0
Vacuum window	12	Infinity	10.000	Vacuum	25.0

为定制的正弯月透镜 2(表 1 中的镜面 9)。优化后,显微物镜的后工作距离为 14 mm,数值孔径为 0.55,显微物镜在 671 nm 的设计波长下,200  $\mu\text{m}$  全视场范围内的分辨率可达到 740 nm,Strehl 比率大于 0.8。

对显微物镜的成像性能进行评价,光学系统成

像面上的光线追迹点列图和光线像差如图 2(a)和图 2(b)所示。从图 2(a)和图 2(b)可以看到,各个视场中聚焦光斑的均方根半径均小于艾里斑(半径为 740 nm)且各种几何像差均达到平衡。图 2(c)为显微物镜在各视场下的传递函数曲线,其可以全面表

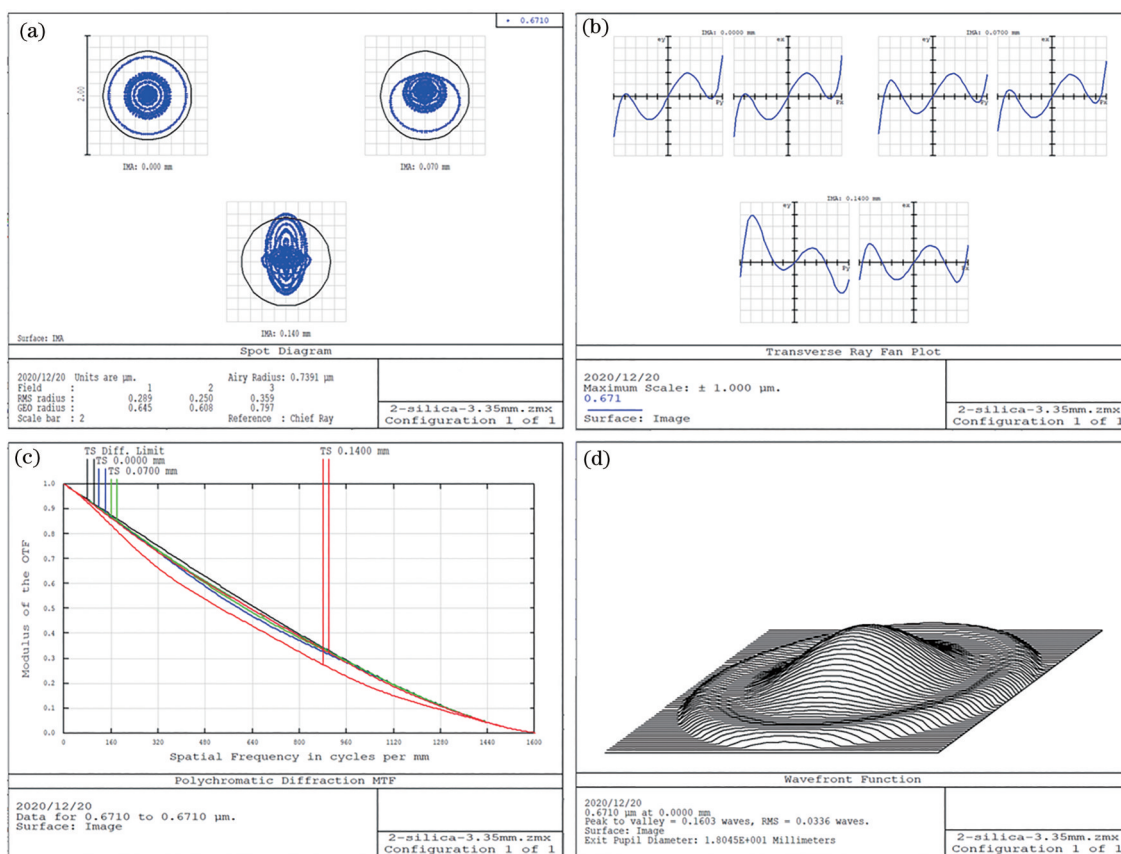


图 2 显微物镜系统的像质评价结果。(a)点列图;(b)光线像差;(c)MTF 曲线;(d)波像差

Fig. 2 Results of image quality evaluation of microscopic objective system. (a) Spot diagram; (b) ray aberration; (c) MTF curves; (d) wave aberration



征光学系统的分辨率性能。从图 2(c) 可以看到, 在设定的奈奎斯特频率为 600 lp/mm 处, 各视场的调制传递函数值均达到 0.4 以上; 系统的截止频率达到 1700 lp/mm 且各视场的 MTF 曲线均逼近衍射极限。实验结果表明, 全视场范围内显微物镜可以对待观察的冷原子实现高分辨率的成像和观测。

由于显微物镜是小像差成像系统, 为此需要满足瑞利判断来严格评价系统的成像质量, 系统的波像差如图 2(d) 所示。从图 2(d) 可以看到, 实际波面的最大波像差  $0.16\lambda$  小于理想波面的最大波像差  $0.25\lambda$ , 此时满足瑞利判断对成像系统波像差的要求。

为了测试显微物镜的普适性, 在不同真空视窗厚度和不同单色光成像的条件下分别对光学系统进行像质评价。在真空视窗(厚度为 3.35 mm) 中对冷原子常用元素的共振波长进行测试, 测试结果如表 2 所示, 其中 FOV 为视场。尽管之前在优化像差的过程中并未单独对色差进行优化, 但仅考虑色散偏移就可以逼近 200  $\mu\text{m}$  视场范围内数值孔径为 0.55 的衍射极限。671 nm 波长下, 不同真空视窗厚度下光学系统的 MTF 曲线如图 3 所示。从图 3 可以看到, 通过调节 5 片透镜间的距离可以修正厚度

表 2 冷原子常用元素的参数

Table 2 Parameters of common elements in ultracold atoms

Material	$\lambda$ /nm	Resolution / $\mu\text{m}$	NA	FOV / $\mu\text{m}$
Li	671	0.74	0.55	280
Na	589	0.64	0.56	280
K	767	0.85	0.55	280
Rb	780	0.87	0.55	280
Cs	852	0.95	0.55	280

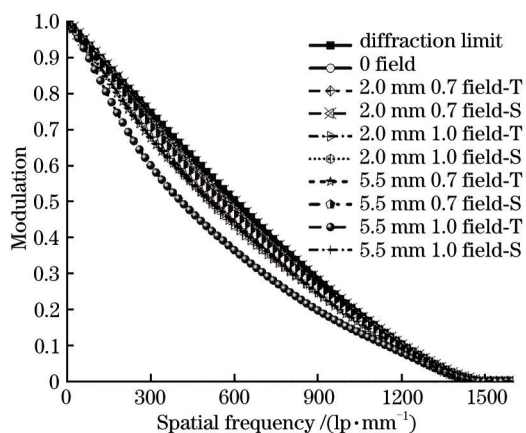


图 3 不同真空视窗厚度下光学系统的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves of optical system under different thickness of vacuum window

为 2.0 mm 和 5.5 mm 的真空视窗所引入的像差, 200  $\mu\text{m}$  视场范围内 MTF 曲线均趋近于衍射极限。这套显微物镜组的设计为不同厚度的碱金属真空腔搭建长工作距离的高分辨率成像系统提供了一种新思路。

### 2.3 显微物镜的公差分析

在实际加工生产前需先对系统进行公差分析, 显微物镜的公差设置如表 3 所示。以 600 lp/mm 处 MTF 的平均值作为公差分析的评价标准, 使用后焦距来补偿像差, 蒙特卡洛的分析结果如表 4 所示。从表 4 可以看到, 600 lp/mm 处的 MTF 值有 90% 大于 0.3, 这满足之前的设计指标要求, 为此可以实际加工使用。

表 3 显微物镜的公差设置

Table 3 Tolerance setting of microscopic objective lens

Parameter	Value
Radius / $\lambda$	3/2
Surface irregularity / $\lambda$	1/4
Thickness /mm	$\pm 0.1$
Air space /mm	$\pm 0.05$
Tilt /( $^\circ$ )	1
Decentration /mm	$\pm 0.02$
Refractive index	0.0005

表 4 蒙特卡洛的分析结果

Table 4 Analysis results of Monte Carlo

Probability /%	MTF threshold
90	$>0.30697373$
80	$>0.33699300$
50	$>0.41048692$
20	$>0.46395389$
10	$>0.48135166$

### 2.4 显微物镜光机结构的设计与材料的选择

对显微物镜进行设计, 目的是搭建一套具有高分辨率的超冷原子成像系统, 合理的光机结构设计可以确保光学设计结果能够满足加工和安装使用的要求<sup>[19]</sup>。显微物镜的总长为 108 mm, 内部结构如图 4(a) 所示, 最终的装配实物如图 4(b) 所示。在镜筒材料的选择方面, 由于冷原子实验需在强磁场的条件下进行, 而传统材料铝的硬度小, 易形变, 并且在强磁场的条件下会产生涡流效应, 不利于冷原子实验系统及镜筒的机械稳定。综合安装标准和强磁场实验条件的影响因素, 镜筒材料选择耐高温、不易形变、不会磁化且具有很好润

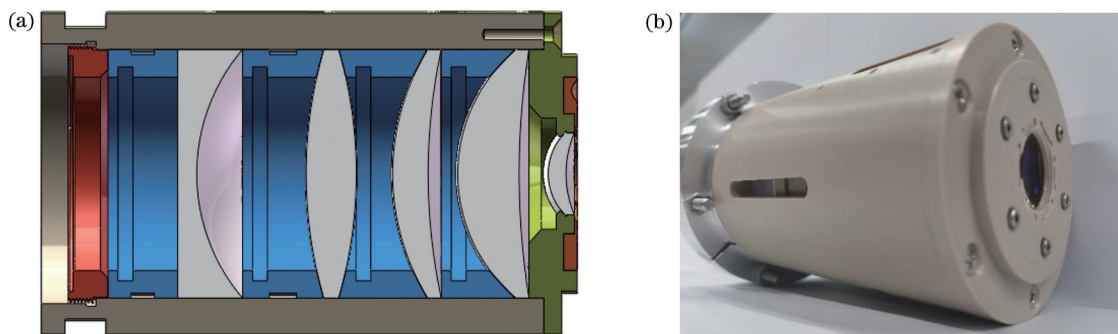


图 4 显微物镜的光机结构。(a)设计结果;(b)实物图

Fig. 4 Photomechanical structure of microscopic objective lens. (a) Design results; (b) physical drawing

滑性的聚醚醚酮(PEEK)材料。在透镜之间选取合适切角的 PEEK 圆环作为垫圈可以固定透镜,在保证通光直径为 40 mm 的前提下尽可能减小透镜的偏心和离轴等,在降低安装所带来的像差的同时能够有效避免冷原子实验过程中强磁场下涡流效应的产生。

### 3 $^6\text{Li}$ 高分辨显微物镜成像性能的研究

超冷原子高分辨原位成像系统可以将超冷量子气体空间探测和操控的精度提高至亚微米量级,为超冷原子实验的研究提供一种全新的研究手段<sup>[20-21]</sup>。该系统主要包括成像激光器、超冷原子俘获系统、高分辨显微物镜和探测设备(CCD 相机),其中高分辨率的显微物镜是实现超冷量子气体高分辨率成像的核心部件,其直接决定了整个成像系统的分辨率。为了检验本文设计的显微物镜是否满足超

冷量子气体高分辨率成像系统的需求,先后使用两种方案对该显微物镜的分辨率进行实际测试。

#### 3.1 分辨率板的测试

显微物镜加工组装后,模拟实际实验室中冷原子所处条件来测试显微物镜性能是否达到设计要求。首先对 Edmund-1951 USAF 型分辨率板进行初步测试,使用由厚度为  $(3.35 \pm 0.05)$  mm 的熔融石英材料构成的光学平板来模拟真空视窗,使用 671 nm 波长的激光光源进行照明。由于本文设计的显微物镜为无限共轭的物镜,故其需要配合场镜使用。因成像 CCD 的像元大小为  $16 \mu\text{m}$ ,为使测试结果更为清楚准确,在与显微物镜距离  $d_1 = 140$  mm 处放置焦距  $f_1 = 1000$  mm 的消色差双胶合透镜 L1 作为场镜,设计物镜的有效焦距为 23 mm,测试目标放大 44 倍后成像在 CCD 上。在 ZEMAX 软件中对整个成像系统的光路结构进行成像性能的评价,结果表明像平面的成像质量好。图 5 为分辨率板的实

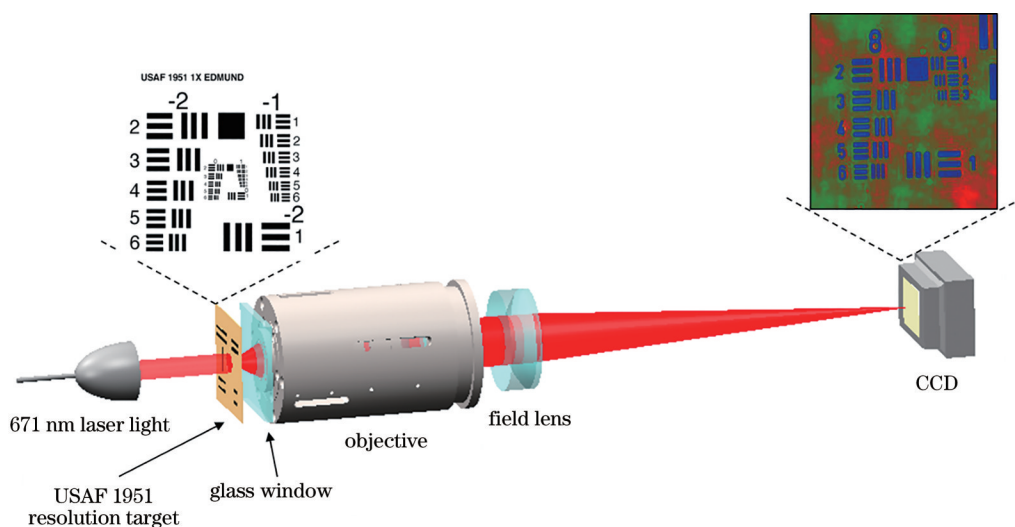


图 5 分辨率板的初步测试光路

Fig. 5 Preliminary test lightpath of resolution board

验测试光路,分辨率板上的信息通过视窗和显微物镜后最终由场镜会聚到 CCD 上,观测 CCD 上的分辨率板像即可获得分辨率的大小。从图 5 可以看到,第 9 组序列 3 的线对所对应的分辨率为  $1.55\ \mu\text{m}$ ,这说明该系统的成像分辨率优于  $1.55\ \mu\text{m}$ 。受到分辨率板中最大线对数的限制,该方案无法获得更准确的分辨率信息,具体的分辨率结果需采用点扩展函数 (PSF) 进行计算。

### 3.2 PSF 的测试

点扩展函数是衡量系统成像质量的一个重要指标,实验过程中利用有限大小(远小于分辨率)的针孔来形成点光源以得到物镜的点扩展函数。显微物镜的设计目标是其分辨率为亚微米量级,实验采用聚焦离子束来刻蚀直径为  $(300\pm 50)\ \text{nm}$  的针孔进行成像测试。为了避免 Talbot 效应(光的衍射自成像效应)<sup>[22]</sup>,在  $0.1\ \text{mm}\times 0.1\ \text{mm}$  大小的区域内随机刻蚀 6 个针孔,如图 7(a) 所示。为了在 CCD 上观测到更为清晰的针孔成像以及提高信噪比,在分辨率板测试光路的基础上添加了消色差透镜 L2(焦距  $f_2=30\ \text{mm}$ ) 和 L3(焦距  $f_3=100\ \text{mm}$ ),其中 L1 与 L2 之间的距离  $d_2=1024\ \text{mm}$ ,L2 与 L3 之间的距离  $d_3=130\ \text{mm}$ ,测试目标放大 144 倍后成像在 CCD 上。整个成像系统的光路结构如图 6(a) 所示,在 CCD 的像平面上对系统的成像性能进行评价。图 6(b) 和图 6(c) 分别为系统的光线追迹点列图和光线像差。

从图 6(b) 和图 6(c) 可以看到,各个视场中的聚焦光斑均落在艾里斑以内,且各种几何像差均得到平衡,达到全视场的衍射极限,满足显微物镜成像系统的设计要求。

实验使用波长为  $671\ \text{nm}$  的激光光源来照明针孔以进行点光源成像,记录 6 个点光源经过光学系统后聚焦在 CCD 上的衍射图,电镜下的针孔图像如图 7(a) 所示。在 Matlab 软件中采用拉普拉斯高斯图像滤波来获得 6 个衍射斑点的中心值,并利用 6 个衍射斑点之间的距离来修正系统的放大率。对光斑进行方位角平均处理以增加信噪比,利用高斯函数  $I=I_0\exp[-r^2/(2\sigma^2)]$  (其中  $I_0$  为振幅,通常取 1,以光斑中心为原点,  $I$  为离原点距离  $r$  处的光强,  $\sigma$  为标准差) 来拟合各针孔衍射图斑的径向曲线,根据分辨率  $r_0=2.9\sigma_{\text{fit}}$  (其中  $\sigma_{\text{fit}}$  为 6 个衍射光斑拟合  $\sigma$  的平均值)<sup>[23-25]</sup> 可以获得系统的分辨率大小。图 7(b) 为 6 个针孔在实际工作距离为  $(13.96\pm 0.01)\ \text{mm}$  处光学系统的最佳衍射图,该工作距离处光学系统的分辨率为  $(0.85\pm 0.09)\ \mu\text{m}$ 。图 7(c) 和图 7(d) 分别为最佳工作距离处某针孔的衍射斑及其光强平均后的高斯拟合结果,其中  $\sigma=0.293\ \mu\text{m}$ 。在该位置分别沿水平和竖直方向各移动  $100\ \mu\text{m}$ ,测试得到移动系统的分辨率均小于  $1\ \mu\text{m}$ ,满足  $200\ \mu\text{m}\times 200\ \mu\text{m}$  视场范围内亚微米分辨率的要求。

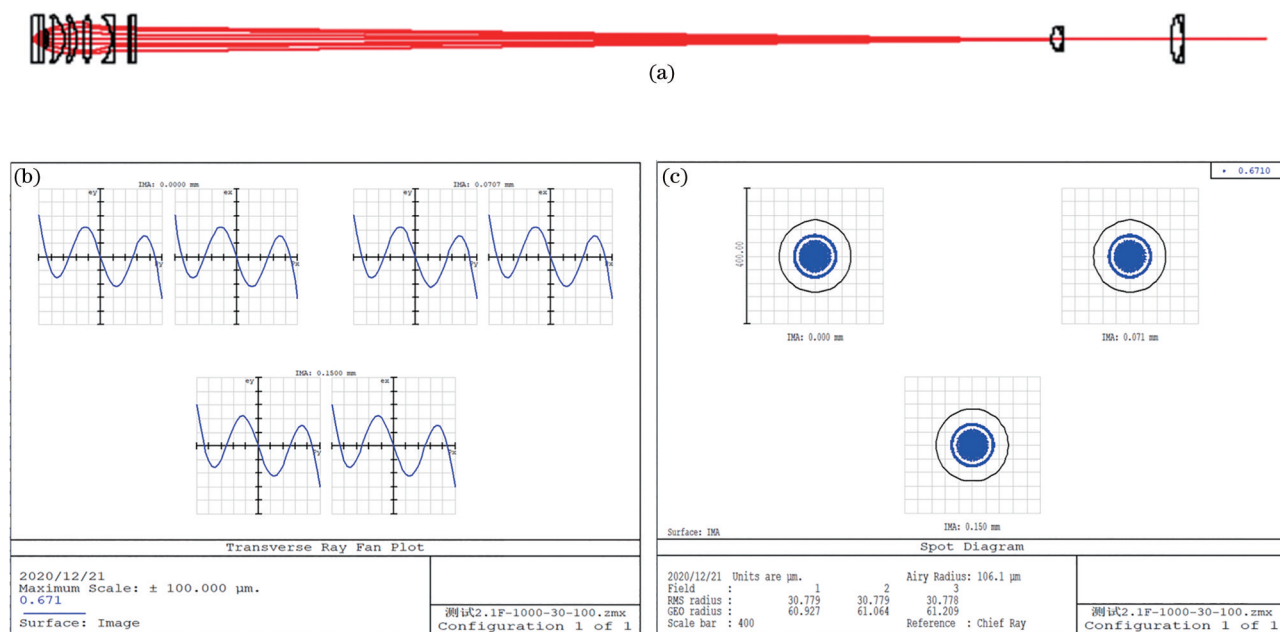


图 6 高分辨率的成像系统。(a) 光路; (b) 光线像差; (c) 点列图  
Fig. 6 High resolution imaging system. (a) Lightpath; (b) ray aberration; (c) spot diagram



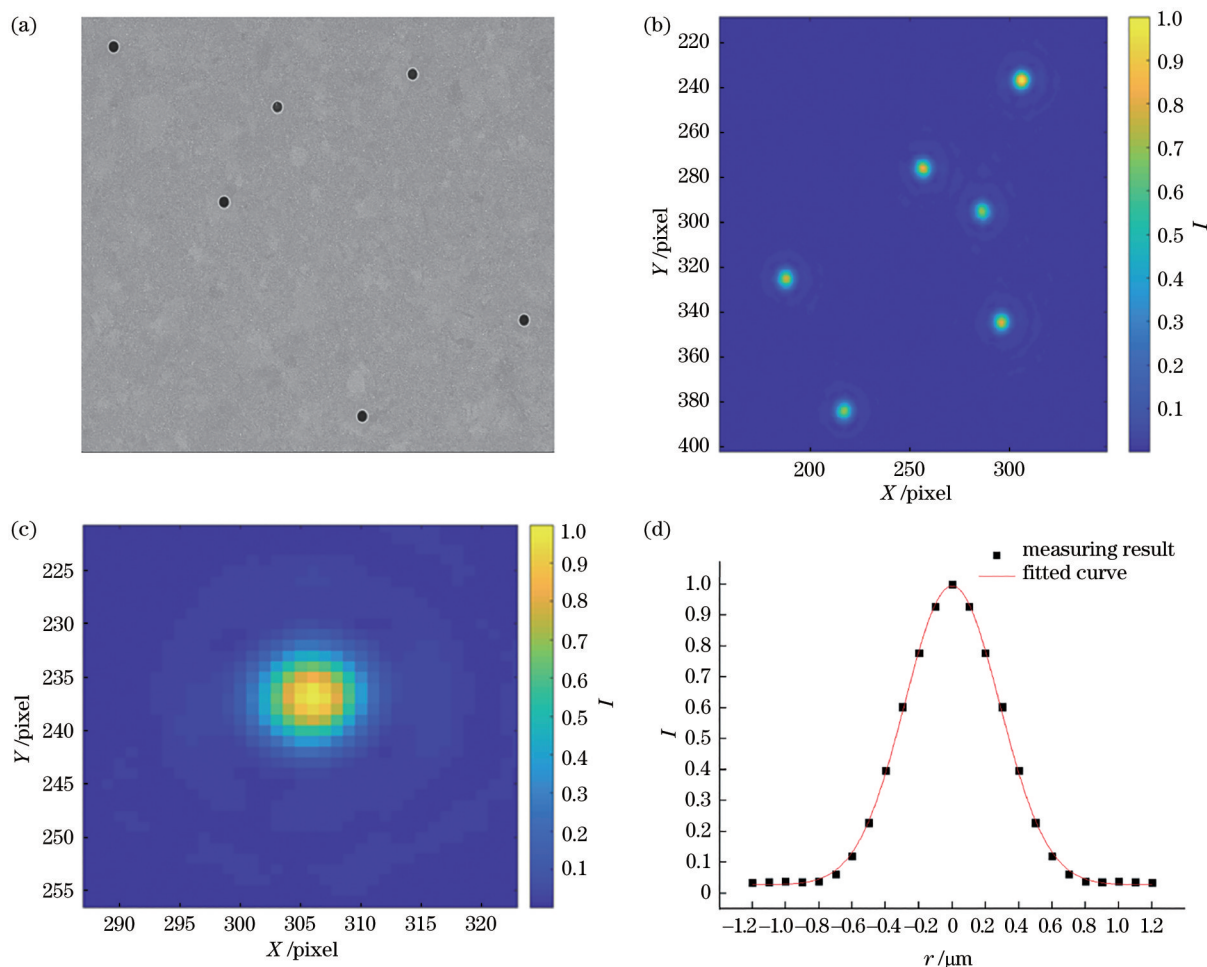


图 7 点扩展函数测试。(a)电镜下针孔图像;(b) CCD上针孔衍射图像;(c)某针孔的衍射图;(d)高斯拟合 PSF  
Fig. 7 Point spread function test. (a) Pinhole image under electron microscope; (b) pinhole diffraction image on CCD;  
(c) diffraction pattern of pinhole; (d) Gaussian fitting PSF

## 4 结 论

本文设计一种适用于超冷费米气体高分辨原位成像且具有长工作距离(14 mm)和大数值孔径(0.55)的高性价比显微物镜系统,在加工组装后测试验证系统的实际分辨率已经达到亚微米量级。该成像系统由5个透镜组合而成,可以补偿由真空腔视窗所引入的球差,能够提高成像质量。在波长为671 nm的激光照明下,在最佳的工作距离( $13.96 \pm 0.01$ ) mm处满足 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 视场范围内成像系统亚微米分辨率的需求。该系统为<sup>6</sup>Li冷原子气体实验提供了经济实惠的实验方案,有望直接应用于超冷费米气体多体量子态的直接观测。

## 参 考 文 献

- [1] Dagotto E. Complexity in strongly correlated electronic systems[J]. Science, 2005, 309(5732): 257-262.

- [2] Bloch I, Dalibard J, Zwerger W. Many-body physics with ultracold gases[J]. Reviews of Modern Physics, 2008, 80(3): 885-964.
- [3] Bloch I, Dalibard J, Nascimbène S. Quantum simulations with ultracold quantum gases[J]. Nature Physics, 2012, 8(4): 267-276.
- [4] Rispoli M, Lukin A, Schittko R, et al. Quantum critical behaviour at the many-body localization transition[J]. Nature, 2019, 573(7774): 385-389.
- [5] Endres M, Fukuhara T, Pekker D, et al. The ‘Higgs’ amplitude mode at the two-dimensional superfluid/Mott insulator transition[J]. Nature, 2012, 487(7408): 454-458.
- [6] Cheuk L W, Nichols M A, Okan M, et al. Quantum-gas microscope for fermionic atoms[J]. Physical Review Letters, 2015, 114(19): 193001.
- [7] Pritchard J D, Isaacs J A, Saffman M. Long working

- distance objective lenses for single atom trapping and imaging[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(7): 073107.
- [8] Douillet D, Rolley E, Guthmann C, et al. An easy-to-build long working distance microscope[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2000, 284/285/286/287/288: 2059-2060.
- [9] Zimmermann B, Müller T, Meineke J, et al. High-resolution imaging of ultracold fermions in microscopically tailored optical potentials[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(4): 043007.
- [10] Alt W. An objective lens for efficient fluorescence detection of single atoms[J]. *Optik*, 2002, 113(3): 142-144.
- [11] Sortais Y R P, Marion H, Tuchendler C, et al. Diffraction-limited optics for single-atom manipulation[J]. *Physical Review A*, 2007, 75(1): 013406.
- [12] Wong-Campos J D, Johnson K G, Neyenhuis B, et al. High-resolution adaptive imaging of a single atom[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(9): 606-610.
- [13] Liu Z Y, Zhang X T, Wu Q Q. High resolution ultraviolet/visible wide band microscope objective[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 575-578.  
刘仲禹, 张欣婷, 吴倩倩. 高分辨率紫外/可见宽波段显微镜设计[J]. *应用光学*, 2013, 34(4): 575-578.
- [14] Deng S H, Hu J, Xiao Y P, et al. Improvement of imaging resolution of fluorescence emission difference super-resolution microscopy with annular pupil[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0718001.  
邓素辉, 胡杰, 肖轶平, 等. 基于环形光瞳提高荧光辐射差分超分辨显微镜的成像分辨率[J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0718001.
- [15] Milton L. Lens design[M]. Zhou H X, Cheng Y F, Transl. Beijing: Machinery Industry Press, 2012.  
[美]Laikin Milton. 光学系统设计[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [16] Mei P J, Xu J. High resolution measurement lens design for microscope quality testing[J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(5): 64-69.  
梅培俊, 许键. 适用显微镜质量测试的高分辨率测量镜头设计[J]. *光学仪器*, 2017, 39(5): 64-69.
- [17] Wang C, Shi H D, Li Y C, et al. Design of super-resolution telescopic imaging optical system with relative large field-of-view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1322002.  
王超, 史浩东, 李英超, 等. 较大视场超分辨望远成像光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1322002.
- [18] Wang Y, Xu Y Y, Liu A Y, et al. Design and simulation of long-wavelength infrared microscopic imaging optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0622001.  
王宇, 许阳阳, 刘爱云, 等. 长波红外显微成像光学系统的设计与仿真[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0622001.
- [19] Xia C Q, Zhong X, Liu C Y, et al. Analysis of influence factors of resolution in high-resolution  $4f$  imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1573-1581.  
夏春秋, 钟兴, 刘春雨, 等. 高分辨率  $4f$  传像系统分辨率的影响因素分析[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1573-1581.
- [20] Tai M E, Lukin A, Rispoli M, et al. Microscopy of the interacting Harper-Hofstadter model in the two-body limit[J]. *Nature*, 2017, 546(7659): 519-523.
- [21] Preiss P M, Ma R C, Tai M E, et al. Quantum gas microscopy with spin, atom-number, and multilayer readout[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(4): 041602.
- [22] Chapman M S, Ekstrom C R, Hammond T D, et al. Near-field imaging of atom diffraction gratings: the atomic Talbot effect[J]. *Physical Review A*, 1995, 51(1): R14-R17.
- [23] Tang C, Hui H H. Gaussian curve fitting solution based on Matlab[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2013, 41(8): 1262-1263, 1297.  
唐冲, 惠辉辉. 基于 Matlab 的高斯曲线拟合求解[J]. *计算机与数字工程*, 2013, 41(8): 1262-1263, 1297.
- [24] McCally R L. Measurement of Gaussian beam parameters[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(14): 2227.
- [25] Zhang B, Zerubia J, Olivo-Marin J C. Gaussian approximations of fluorescence microscope point-spread function models[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(10): 1819-1829.