

# 光学学报

## 用于光学显微成像的无像差双二维微机电系统 振镜光束扫描方法

张国卓, 王旭, 王允, 赵维谦, 邱丽荣, 崔晗\*

北京理工大学光电学院复杂环境智能感测技术工信部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 光束扫描系统在光学显微成像中扮演着重要的角色, 针对现有光束扫描中继系统尺寸、像差较大以及装调精度要求高的问题, 提出一种双二维微机电系统(MEMS)振镜光束扫描方法。该方法采用两片二维 MEMS 振镜进行光束远心扫描, 其中, 一片 MEMS 振镜替代传统中继系统中的 scan lens 和 tube lens, 避免像差的引入, 缩减系统尺寸, 最终完成了小型化、结构简单和无像差的光束扫描系统设计。基于该方法构建了小型化共焦扫描显微镜, 并对台阶样品进行扫描成像, 验证了该方法的可行性。该方法为光学显微成像提供了一种新型的光束扫描手段, 可为光学显微成像技术在深空探测、现场检测和生物医学等领域的进一步应用提供一种新的技术途径。

**关键词** 双二维微机电系统振镜; 光束扫描; 无像差; 小型化; 扫描成像; 共焦

**中图分类号** O439 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230984

### 1 引言

光学扫描显微成像技术因其非侵入性、高分辨和实时成像能力被广泛应用于生物医学<sup>[1-6]</sup>、物理化学<sup>[7-9]</sup>和材料科学<sup>[10-13]</sup>等领域, 用于细胞、组织分析以及微结构样品的三维成像检测。光学扫描显微成像技术通常采用两种不同的方法实现快速成像: 第 1 种方法采用光束整形器件, 如 Nipkow 盘<sup>[14]</sup>、微透镜阵列<sup>[15]</sup>或数字微镜器件<sup>[16]</sup>等, 激光束通过整形器件后生成多束激光束, 多束激光同时照射样品形成多焦点探测, 从而实现快速扫描成像; 第 2 种方法采用扫描器件进行光束扫描, 如检流计振镜<sup>[17-19]</sup>、多边形扫描镜<sup>[20-21]</sup>和声光扫描器<sup>[22-23]</sup>等, 通过偏转扫描器控制激光束以不同角度到达物镜后瞳, 从而改变聚焦光斑在样品上的位置, 通过聚焦使光斑在样品表面快速运动实现快速扫描成像。前者虽然扫描速度更快, 但由于针孔和探测器阵列之间的串扰影响, 空间分辨力不高, 且结构设计复杂, 因此光束扫描型成像方式仍是当下主流方法。

微机电系统(MEMS)的发展为光束扫描提供了新型扫描器<sup>[24-26]</sup>, 并且因其尺寸小、功耗低、扫描速度快等优势被广泛应用于共焦<sup>[27-28]</sup>、光学相干<sup>[29-30]</sup>和双光子显微镜<sup>[31-32]</sup>等光学成像领域。Jeon 等<sup>[27]</sup>采用高帧率李萨如 MEMS 振镜研制了手持式共焦显微镜导管, 为实时、按需成像和体内光学活检提供了可用的显微结

构; Zong 等<sup>[32]</sup>利用 MEMS 振镜开发了一种微型双光子显微镜, 微型化的设计使其方便固定, 可以用于探测自由活动动物神经元的三维网络功能。MEMS 器件的发展和應用推动了光学显微镜的小型化发展, 使其适用于更多的应用场合。

然而在某些场合, 利用扫描器件进行扫描成像时, 需要在扫描器和物镜之间增加由 scan lens 和 tube lens 组成的中继光路, 以保障光束始终能够进入物镜后瞳, 进而保证成像质量<sup>[33]</sup>。但是传统中继系统采用透镜式设计, 其固有缺陷会导致光学像差<sup>[34]</sup>, 影响光学显微成像系统的分辨力。商业化的 scan lens 和 tube lens 经过优化设计后可以良好地抑制像差, 但其存在价格昂贵、体积大、焦距长的问题, 不适用于小型化设计的场合。采用双胶合透镜组成的中继系统可以根据需求进行小型化设计, 但是难以对像差进行有效的抑制<sup>[35]</sup>, 尤其是在光束扫描角度较大的情况下像差更为严重。采用抛物面反射镜组成中继系统可以有效消除色差<sup>[36-38]</sup>, 但是反射系统慧差难以完全消除, 并且其和透镜式中继系统一样, 要求焦点位置一一对应, 安装精度要求较高。因此, 如何实现无像差、小型化且结构简单的光束扫描系统设计仍是光学显微成像技术所面临的重要难题。

针对上述问题, 本文提出一种双二维 MEMS 振镜光束扫描方法。该方法采用二维 MEMS 振镜取代传统中继系统, 通过两片二维 MEMS 振镜进行光束远心扫

收稿日期: 2023-05-15; 修回日期: 2023-05-28; 录用日期: 2023-06-05; 网络首发日期: 2023-06-15

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51825501)、国家自然科学基金仪器基金(61827826)

通信作者: \*han.cui@bit.edu.cn

描,实现了一种无像差光束扫描系统设计。并且二维 MEMS 振镜结构对焦点位置无要求,便于小型化设计以及安装。首先论述该方法的工作原理,分析 MEMS 振镜偏摆角度和光束扫描角度的关系以及两片 MEMS 振镜之间的距离对光束扫描角度的影响。随后将传统中继系统和双二维 MEMS 振镜扫描系统进行比较,分析双二维 MEMS 振镜扫描方法的优势。最后基于双二维 MEMS 振镜扫描方法构建小型化共焦显微系统,对台阶样品进行成像实验,验证该方法的可行性。

## 2 基本原理

### 2.1 双二维 MEMS 振镜扫描理论分析

光学显微系统采用振镜进行光束扫描时,由于显

微物镜和振镜之间有一定的距离,使得扫描光束无法完全进入物镜,极大地降低了系统的扫描视场和成像质量。为了解决这一问题,传统方法是在振镜和物镜之间加入 scan lens 和 tube lens 组成的中继系统,以消除物镜后焦面(BFP)处的光束偏移,如图 1 所示。振镜放置于 scan lens 的焦平面处,扫描光束经过中继系统到达物镜后焦面时,光斑在物镜后焦面处的位置始终是固定不变的,不同角度的扫描光束能够全部进入物镜。

所提扫描方法用二维 MEMS 振镜取代上述中继光路,通过二维 MEMS 振镜调节使不同角度扫描光束可以全部进入物镜,实现光束远心扫描。双二维 MEMS 振镜扫描示意图如图 2 所示。

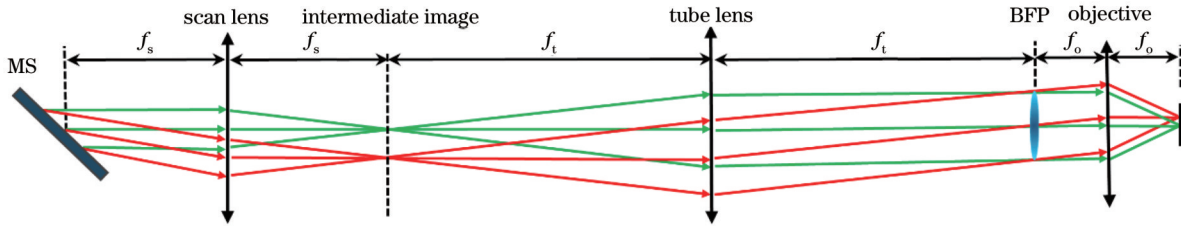


图 1 传统中继系统示意图

Fig. 1 Schematic of traditional relay system

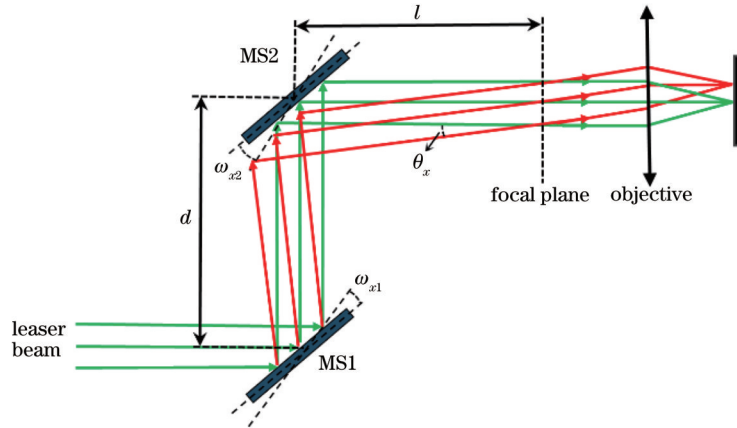


图 2 双二维 MEMS 振镜扫描方法示意图

Fig. 2 Schematic of dual 2D MEMS mirror scanning method

将 MEMS 振镜运动拆解为正交的两个方向,在 X 方向,即水平方向,当第 1 片 MEMS 振镜(MS1)偏转角度  $\omega_{x1}$  时,由几何光学原理可知,光线不再沿光轴传输,而是与光轴成  $2\omega_{x1}$  夹角反射到第 2 片 MEMS 振镜(MS2),给 MS2 施加特定控制电压使其偏转  $\omega_{x2}$ ,即可使激发光束以特定的扫描角度到达物镜后瞳。Y 方向同理,通过控制两片 MEMS 振镜以不同的偏摆角度配合,可以使激发光束以不同的角度到达物镜后瞳,从而完成二维横向扫描。出射光束扫描角度与 MEMS 振镜偏转角度之间的关系如下:

$$\begin{cases} \theta_x = \arcsin \left[ \frac{d \cdot \sin(2\omega_{x1})}{l} \right] \\ \theta_y = \arcsin \left[ \frac{d \cdot \sin(\sqrt{2}\omega_{y1})}{l} \right] \\ \omega_{x2} = \frac{\theta_x + 2\omega_{x1}}{2} \\ \omega_{y2} = \frac{\theta_y + \sqrt{2}\omega_{y1}}{\sqrt{2}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $d$ 是两片 MEMS 振镜中心点之间的距离; $l$ 是

MS2 镜面中心和物镜后瞳之间的距离;  $\theta_x$ 、 $\theta_y$  分别为最终出射光束在 X 方向和 Y 方向的偏转角度;  $\omega_{x1}$ 、 $\omega_{y1}$ 、 $\omega_{x2}$ 、 $\omega_{y2}$  分别为两片 MEMS 振镜在 X 方向和 Y 方向的偏转角度。

两片 MEMS 振镜之间的距离  $d$  与 MS2 镜面中心和物镜后瞳的距离  $l$  无特殊要求, 可以灵活设置, 便于系统小型化设计。当两片 MEMS 振镜之间的距离  $d$  等于 MS2 镜面中心和物镜后瞳的距离  $l$  时, 扫描光束角度和两片 MEMS 振镜偏转角度之间的关系如图 3 所示。其中: 图 3(a) 为 X 方向扫描光束角度与两片

MEMS 振镜偏转角度之间的关系, 图中实线代表 MEMS 振镜 1 在 X 方向的偏转角度, 虚线代表 MEMS 振镜 2 在 X 方向的偏转角度; 图 3(b) 为 Y 方向扫描光束角度与两片 MEMS 振镜偏转角度之间的关系。可以看出, 扫描光束角度与 MEMS 振镜偏转角度具有一一对应的关系。例如: X 方向 MS1 偏转角度  $0.5^\circ$ 、MS2 偏转角度  $1^\circ$  时, 光束在 X 方向扫描角度为  $1^\circ$ ; Y 方向 MS1 偏转角度  $0.5^\circ$ 、MS2 偏转角度  $1^\circ$  时, 光束在 Y 方向扫描角度为  $0.707^\circ$ 。因此, 为 MEMS 振镜施加特定驱动电压可以实现不同角度光束扫描。

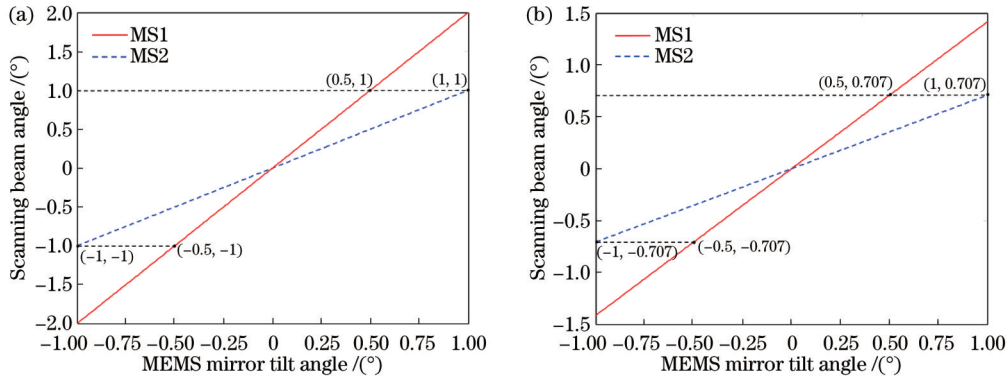


图 3 扫描光束角度与两片 MEMS 振镜偏转角度之间的关系。(a) X 方向; (b) Y 方向

Fig. 3 The response of beam scanning angle versus the tilt angle of two MEMS mirrors. (a) X-direction; (b) Y-direction

当两片 MEMS 振镜之间的距离  $d$  不等于 MS2 和物镜后瞳的距离  $l$  时, 光束扫描角度和 MEMS 振镜偏转角度之间的关系发生变化。当 MS1 偏转角度为  $1^\circ$  时, 不同  $d/l$  比值下光束扫描角度和 MS2 偏转角度如图 4 所示。可以看出, 随着  $d/l$  比值的增大, 光束扫描角度逐渐增大, 同样 MS2 所需偏转角度也逐渐增大。在实际应用中, 为了打开物镜与振镜之间的空间, 便于安装滤光片等器件, 一般设置  $l$  值相对较大, 并且 MEMS 振镜自身偏转角度一般较小,  $d/l$  值较大时, MEMS 振镜偏转角度无法满足需求, 所以一般在  $d/l \leq 1$  的情况下进行方案设计。当  $d/l \leq 1$  时, MS2 仅需偏转较小角度即可与 MS1 配合实现光束远心扫描。

### 2.2 传统中继系统与双二维 MEMS 振镜扫描系统对比

采用 Zemax 光学设计软件来比较传统中继系统和双二维 MEMS 振镜扫描系统的性能, 对其引入的像差进行详细分析。在小型化设计中, 一般选用双胶合透镜作为 scan lens 和 tube lens 组成中继系统, 为此选用 Thorlabs 公司焦距为 25 mm 的 AC127-025-A 双胶合透镜作为 scan lens 和 tube lens 进行仿真, 仿真图如图 5(a) 所示。双二维 MEMS 振镜扫描系统仿真图如图 5(b) 所示, 进行仿真时光束直径设置为 4 mm (考虑到物镜后瞳一般在 3~6 mm), 并在其后加入一个近轴物镜模型, 对平行光束经过系统后的光束质量进行评

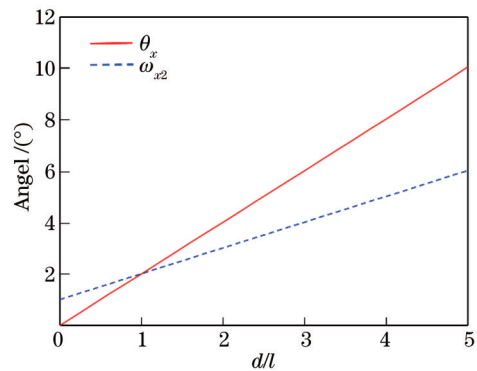


图 4 光束扫描角度和 MEMS 振镜 2 偏转角度与  $d/l$  比值的 关系

Fig. 4 The relationship between the beam scanning angle and the tilt angle of the MEMS-2 and the  $d/l$

价。可以看出, 采用双二维 MEMS 振镜扫描系统进行远心扫描时, 通过 MEMS 振镜作为中继系统调节可以很好地保证光斑处于物镜 BFP 处的不动点, 而传统中继系统由于透镜像差导致其在物镜 BFP 处存在偏移。

像差仿真结果如图 6 所示, 其中, 点划线为传统中继系统的像差, 由于像散和场曲的影响, 图像矢状分量弯曲  $32 \mu\text{m}$ , 切向分量弯曲  $70 \mu\text{m}$ , 如图 6(a) 所示, 矢状光线和切向光线的聚焦点存在明显偏差。可以通过波前误差的均方根 (RMS) 来证实上述偏差, 如图 6(c) 所示, 当光束偏转角度大于  $1.8^\circ$  时, 波前误差超过衍射极



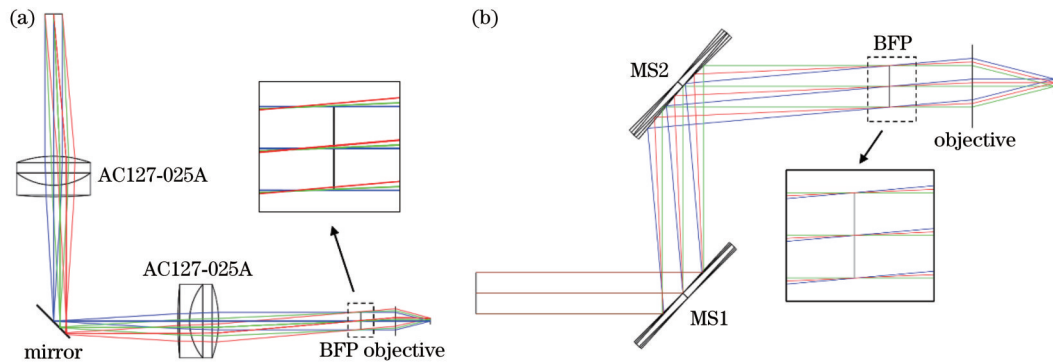


图 5 Zemax 仿真图。(a)两个 AC127-025-A 双胶合透镜组成的中继系统;(b)双二维 MEMS 振镜扫描系统

Fig. 5 Zemax simulation diagrams. (a) Relay system composed of two AC127-025-A doublet lenses; (b) dual 2D MEMS mirror scanning system

限(0.072波),光斑质量开始急剧下降。因此,采用这种透镜结构,衍射极限被限制在很小的扫描角度,并且该系统还会引入色差,不同波长的光束通过该系统后

存在明显的焦点偏移,如图 6(b)所示。图 6 实线为双二维 MEMS 振镜扫描系统的像差,可以看出,由于采用平面反射式结构,系统不存在像散、场曲以及色差。

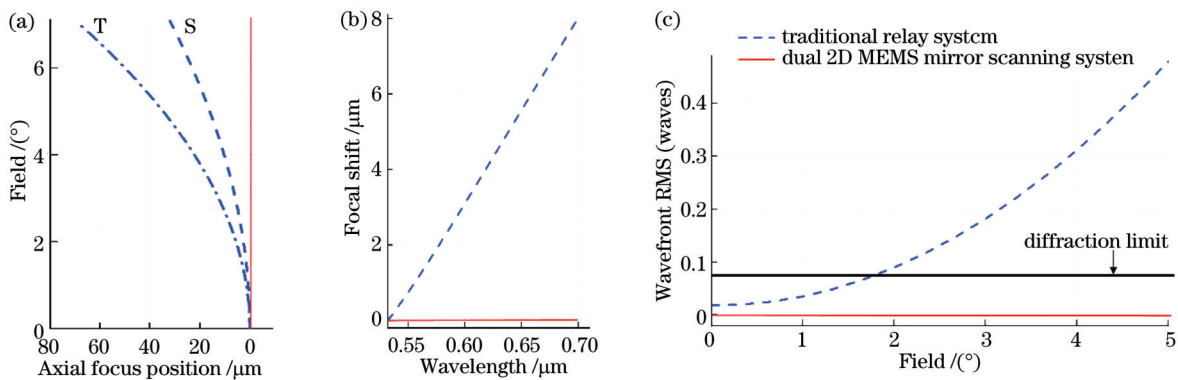


图 6 两种系统的光学像差。(a)场曲和像散;(b)焦点色位移;(c)波前误差

Fig. 6 Optical aberration of two systems. (a) Field curvature and astigmatic aberrations; (b) chromatic focal shift; (c) wavefront error

为了更直观地评价两种系统的像差,图 7(a)定义了 25 个扫描点,在正交方向最大扫描角度为  $\pm 5^\circ$ 。这 25 个点代表了两个轴的零偏转和最大偏转,不同角度扫描光束经过扫描系统被理想物镜聚焦后,聚焦点的光斑图像如图 7(b)、(c)所示。其中:图 7(b)为扫描光束经过双二维 MEMS 振镜扫描系统后聚焦光斑点列图,可以看出,因为没有像差的引入,不同角度光束经过物镜聚焦后仍为理想光斑;图 7(c)为扫描光束经过传统中继系统聚焦后的光斑点列图,可以看出,由于轴外像差的影响,光斑在较大扫描角度时存在严重失真。

综上所述,双二维 MEMS 振镜扫描系统相比于传统中继系统避免了像差的引入,具有更好的成像质量。因此,在实际应用中采用双二维 MEMS 振镜扫描系统搭配高质量测量物镜可以达到理想的成像效果。

对于传统中继系统,在实际安装过程中,不可避免存在安装误差,如图 8 所示,当振镜安装位置出现偏差,不再安装在 scan lens 的前焦点位置,而是沿光轴方向与 scan lens 的前焦平面存在  $\delta$  的偏差时,扫描光路

也会发生相应的变化。

从图 8 可以看出,存在安装误差时,部分入射光无法进入物镜后瞳,导致样品表面入射激光能量减少和收集光路偏差,最终影响到探测器的强度响应,使得系统产生渐晕,且渐晕的程度随振镜扫描角度的增大而增大。

而对于双二维 MEMS 振镜扫描光路,如图 9 所示,当 MEMS 振镜安装位置与预设位置产生  $\delta$  偏差时,可以重新获取两片 MEMS 振镜之间的距离:

$$d' = d + \delta. \quad (2)$$

将  $d'$  代入式(1)重新获取扫描角度与振镜偏转角度之间的关系,对其偏差进行校正,从而使光束可以完全进入物镜后瞳,消除位置安装误差带来的渐晕。

综上所述,双二维 MEMS 振镜扫描系统相比于传统中继系统,不会引入像差,并且结构简单,便于调节,可以避免安装误差对系统带来的影响。然而,受限于当前加工工艺,MEMS 振镜难以同时实现大镜面尺寸和大扫描角度设计,导致双二维 MEMS 振镜扫描方法不太适用于光束直径较大的大视场扫描场合。

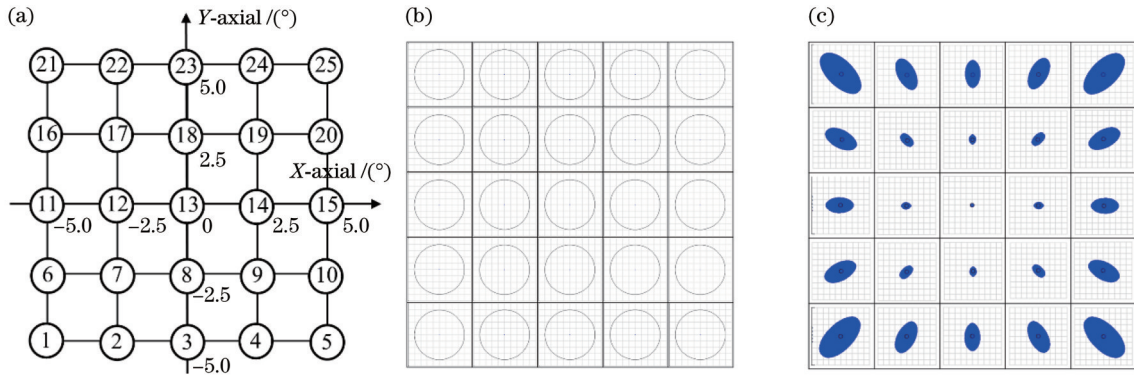


图 7 25 个不同扫描角度的扫描点配置及其仿真图像。(a)扫描点配置;(b)双二维 MEMS 振镜扫描系统点列图;(c)传统中继系统点列图

Fig. 7 Configuration and simulation results of 25 scanning points with different scanning angles. (a) Scan point configuration; (b) spot diagram of dual 2D MEMS mirror scanning system; (c) spot diagram of traditional relay system

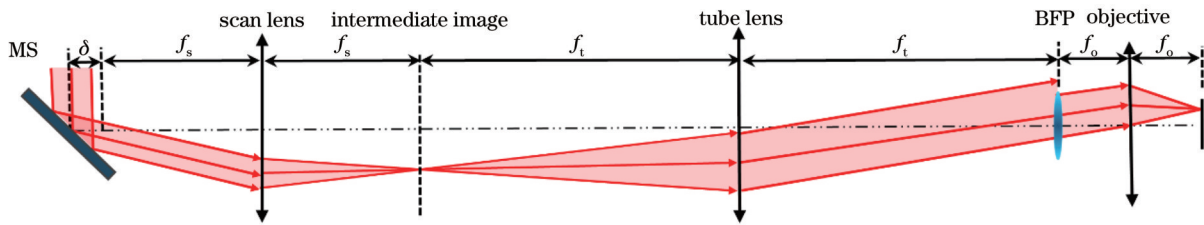


图 8 传统中继系统中振镜安装误差带来的影响

Fig. 8 The impact of MEMS mirror installation errors in traditional relay system

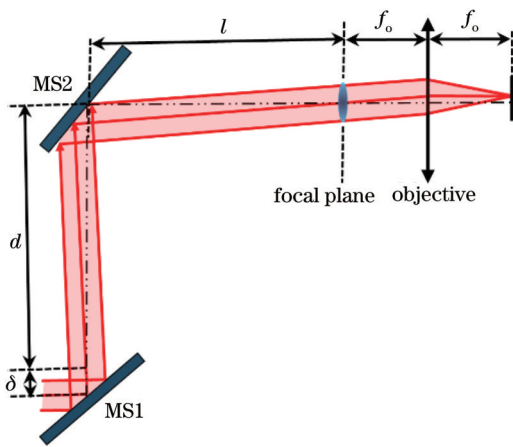


图 9 双二维 MEMS 振镜扫描系统中振镜安装误差带来的影响

Fig. 9 The impact of MEMS mirror installation errors in dual 2D MEMS mirror scanning system

### 3 系统构建与实验验证

#### 3.1 系统构建

为了验证双二维 MEMS 振镜扫描方法的可行性,构建了基于双二维 MEMS 振镜扫描方法的共焦显微系统,系统原理图如图 10 所示。激光器出射的激光经过扩束镜扩束生成测量光束,测量光束透过分光平片后到达双二维 MEMS 振镜扫描模块,经过两片二维 MEMS 振镜反射后被物镜聚焦于样品表面。样品表

面的反射光由物镜收集准直,原路返回经分光平片反射后被透镜会聚,最后被位于共焦针孔后的光电探测器收集,实现样品表面的位置探测。

通过控制二维 MEMS 振镜的偏摆角度可以实现样品表面的二维扫描,搭配轴向驱动器驱动物镜轴向扫描,即可实现样品表面的三维轮廓成像。系统光源选用瑞典 Cobolt 公司的 0801 型号连续激光器,激光波长为 532 nm,光束发散角小于 1.2 mrad,最大能量为 100 mW,能量稳定性小于 2% (8 h),通过数值孔径 (NA) 为 0.6 的物镜实现测量光束聚焦与收集。轴向驱动器选用德国 SmarAct 公司的 SLC-1720-S 型号压电导轨,其行程范围为 12 mm,运动分辨率为 1 nm,全量程重复定位精度可达 25 nm。光强信号通过自研制的基于滨松 S2386 型号光电二极管开发的光电探测器探测。

MEMS 振镜及其控制方式作为整个系统的核心,对系统的成像质量有重要的影响。本系统选用 Mirrorcle 公司的 A5L2.1 型号 MEMS 振镜,反射镜镜面尺寸为 7.5 mm,双轴谐振频率均为 532 Hz,机械扫描角度为  $\pm 1^\circ$ ,重复定位精度为  $0.001^\circ$  ( $17.5 \mu\text{rad}$ )。MEMS 振镜小信号频率响应如图 11(a) 所示,为了保证扫描精度,本系统快轴采用 240 Hz (6 阶贝塞尔截止频率) 的频率进行扫描。

MEMS 振镜可用于双轴准静态(点对点)光束控制,通过设置不同的两对电极的电压差可以控制二轴

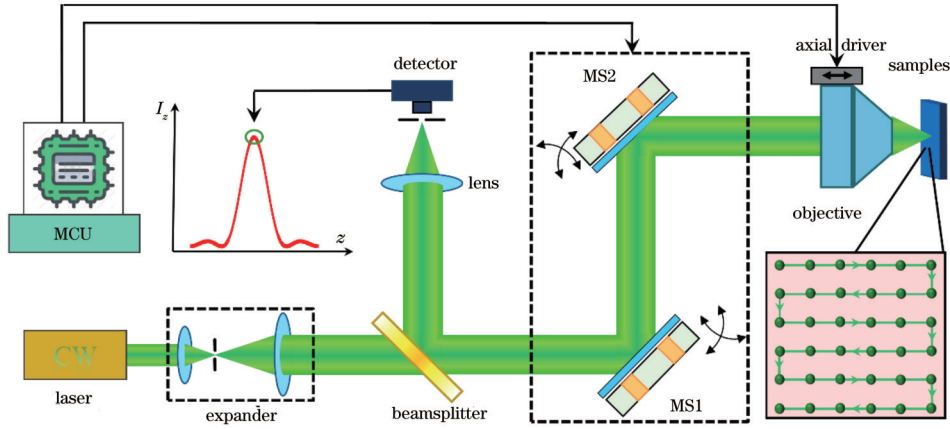


图 10 双二维 MEMS 振镜扫描共焦显微系统原理图

Fig. 10 Schematic of dual 2D MEMS mirror scanning confocal microscopy system

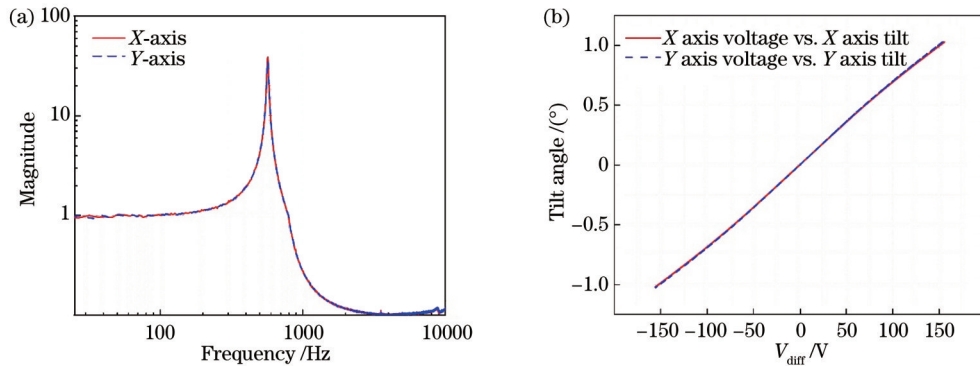


图 11 二维 MEMS 振镜特性。(a)小信号频率响应图;(b)振镜倾斜角度和驱动电压的关系

Fig. 11 2D MEMS mirror Characterization. (a) Small signal frequency response plots; (b) the response of mirror tilt angle versus applied voltages

倾斜。选用配套的 MEMS 驱动器提供控制电压，MEMS 振镜偏转角度与控制电压  $V_{diff}$  之间的对应关系如图 11(b) 所示，采用三次多项式对其进行拟合可获取其精确的对应关系：

$$\begin{cases} V_{x,diff} = 14.026\omega_x^3 - 0.1544\omega_x^2 + 114.19\omega_x + 0.0018 \\ V_{y,diff} = 13.668\omega_y^3 - 0.1218\omega_y^2 + 116.39\omega_y - 0.0995 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $V_{x,diff}$  和  $V_{y,diff}$  是 MEMS 振镜 X 方向和 Y 方向的控制电压； $\omega_x$  和  $\omega_y$  是 MEMS 振镜在 X 方向和 Y 方向的偏转角度。

### 3.2 共焦扫描成像实验

首先对系统的信噪比进行分析，共焦显微系统采用光电探测器来检测共焦针孔后的光强变化，从而获得样品的轴向位置信息。系统中杂散光、MEMS 振镜、轴向驱动器等机械抖动对系统成像带来的影响都由光电探测器的光强信号体现，因此，用光电探测器的响应来反映系统的信噪比。以平面反射镜作为样品，设置激光功率为 5 mW，控制轴向驱动器使反射镜位于物镜焦点位置，MEMS 振镜模块通电并使其保持于零点位置，通过光电探测器来测试共焦光强信号，持续采集 10 min，测试结果如图 12 所示。光电探测器测得

的电压有效值为 4.248 V，噪声峰峰值为 0.038 V，因此系统的信噪比为 41 dB。

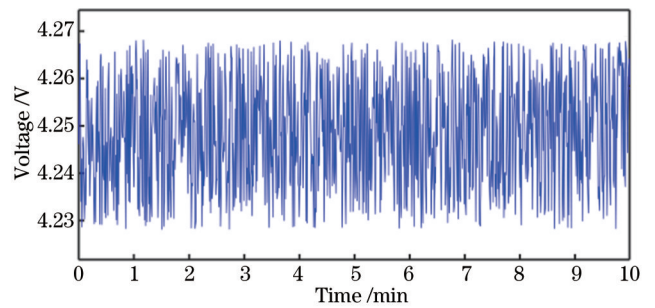


图 12 焦面附近系统探测器响应

Fig. 12 System detector response near focal plane

为了表征系统的成像能力，采用周期为 10  $\mu\text{m}$ 、高度为 500 nm 的台阶样品进行测试。共焦显微成像时，采用逐层扫描的方式对样品进行三维扫描，设置扫描像素为 128  $\times$  128，横向扫描步进为 300 nm，对应扫描范围为 38.4  $\mu\text{m}$   $\times$  38.4  $\mu\text{m}$ ，轴向扫描步进 80 nm，扫描层数为 50。MEMS 振镜驱动光束进行横向二维扫描，单帧图像扫描完成后，轴向驱动器驱动物镜移至下一扫描层，循环往复直至所有设定扫描层数扫描完成，对



不同位置获得的光强信息进行处理,即可得到样品的三维形貌信息,实验结果如图 13 所示。

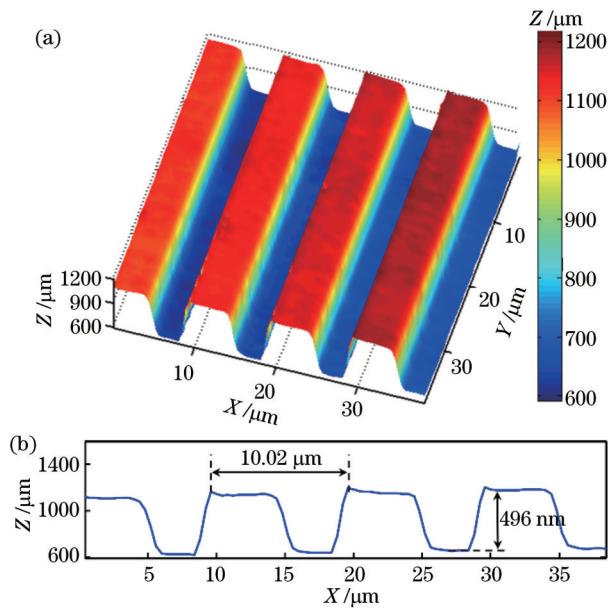


图 13 台阶样品成像图。(a)三维轮廓图;(b)横截面图

Fig. 13 Step sample imaging. (a) The rendered 3D surface profile; (b) the cross-sectional profile

由于设置 MEMS 振镜快轴扫描频率为 240 Hz,且采用“S”形扫描的方式,获得图 13 所示的三维形貌成像时长约为 15 s。其中,图 13(a)为系统实际测得台阶样品的三维表面轮廓,可以清晰地观察到台阶样品的三维形貌信息,其表面高度波动较小,具有清晰的台阶边缘,且图像边缘无畸变。图 13(b)为样品的横截面轮廓,根据轮廓曲线可以清楚得到样品的周期和高度信息。样品的轮廓周期为 10.02 μm,高度为 496 nm,考虑系统误差及测量结果边缘位置判定的主观性,可以认为该三维测量结果与台阶样品给定的 10 μm 周期、500 nm 高度是一致的。因此,将双二维 MEMS 振镜扫描方法用于共焦显微成像系统,一方面可以提高系统的成像速度,另一方面,不会给系统引入像差,扫图结果也无畸变,系统具有良好的三维成像能力。

## 4 结 论

提出一种双二维 MEMS 振镜光束扫描方法。该方法采用二维 MEMS 振镜取代传统中继系统,实现了一种无像差光束扫描系统设计,并且双二维 MEMS 振镜结构对焦点位置无要求,便于小型化设计以及安装。基于该方法构建了基于双二维 MEMS 振镜扫描的共焦显微成像系统,对标准台阶样品进行测试,验证了该方法的可行性。所提方法为光学显微成像提供了一种新型的光束扫描途径,对于共焦显微镜、双光子显微镜、光学相干扫描显微镜和彩色共焦显微镜等对像差要求比较严格的显微成像系统具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Wu Y C, Han X F, Su Y J, et al. Multiview confocal super-resolution microscopy[J]. Nature, 2021, 600(7888): 279-284.
- [2] 胡慕芸, 杨迪, 杨子哈, 等. 基于偏振敏感光学相干层析术的口腔鳞状细胞癌组织成像[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 1017002.
- [3] Hu M Y, Yang D, Yang Z H, et al. Polarization-sensitive optical coherence tomography for oral squamous cell carcinoma tissue imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1017002.
- [4] Atak M F, Farabi B, Navarrete-Dechent C, et al. Confocal microscopy for diagnosis and management of cutaneous malignancies: clinical impacts and innovation[J]. Diagnostics, 2023, 13(5): 854.
- [5] 黄剑, 周镇乔, 李敏, 等. 用于小鼠脑皮层双光子成像的大视场弯曲视野离轴三反系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(1): 0122001.
- [6] Huang J, Zhou Z Q, Li M, et al. Design of off-axis three-mirror system with large field of view bending for two-photon imaging of mouse cerebral cortex[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(1): 0122001.
- [7] 王志博, 刘开元, 蒋慎益, 等. 生物组织大深度定量光学成像[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 1717001.
- [8] Wen Z B, Liu K Y, Jiang S Y, et al. Large depth quantitative optical imaging of biological tissue[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 1717001.
- [9] 张子艺, 俞晨阳, 乔依琳, 等. 显微集成术中光学相干断层血流造影术[J]. 中国激光, 2022, 49(15): 1507301.
- [10] Zhang Z Y, Yu C Y, Qiao Y L, et al. Optical coherence tomography angiography in micro-integration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(15): 1507301.
- [11] Arthur J N, Pandey A K, Nunzi J M, et al. Insight into OTFT sensors using confocal fluorescence microscopy[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(4): 5709-5720.
- [12] Francis D, Ford H D, Tatam R P. Spectrometer-based refractive index and dispersion measurement using low-coherence interferometry with confocal scanning[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3604-3617.
- [13] Thaarup I C, Gummesson C, Bjarnsholt T. Measuring enzymatic degradation of degradable starch microspheres using confocal laser scanning microscopy[J]. Acta Biomaterialia, 2021, 131: 464-471.
- [14] 谢冠明, 王三宏, 张跃强, 等. 基于光学相干层析的激光焊接熔深监测方法[J]. 光学学报, 2023, 43(11): 1114002.
- [15] Xie G M, Wang S H, Zhang Y Q, et al. Laser welding depth monitoring method based on optical coherence tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(11): 1114002.
- [16] Ji X P, Chen Y, Hou Y Q, et al. Surface microscopic properties of various aggregates using laser scanning confocal microscope[J]. Construction and Building Materials, 2021, 290: 123222.
- [17] Alikin, Slautin, Abramov, et al. Correlative confocal Raman and scanning probe microscopy in the ionically active particles of LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> cathodes[J]. Materials, 2019, 12(9): 1416.
- [18] Choi Y M, Yoo H, Kang D. Large-area thickness measurement of transparent multi-layer films based on laser confocal reflection sensor[J]. Measurement, 2019, 153: 107390.
- [19] Adams M C, Salmon W C, Gupton S L, et al. A high-speed multispectral spinning-disk confocal microscope system for fluorescent speckle microscopy of living cells[J]. Methods, 2003, 29(1): 29-41.
- [20] 葛增辉, 黄蕴涵, 刘智颖. 基于填充因子的微透镜阵列扫描光学系统性能分析[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 0911004.
- [21] Ge Z H, Huang Y H, Liu Z Y. Performance analysis of scanning optical system with microlens array based on fill factor[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(9): 0911004.
- [22] Yoon T, Kim C S, Kim K, et al. Emerging applications of

- digital micromirror devices in biophotonic fields[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 104: 17-25.
- [17] 张健, 卓瑾, 金会良, 等. 基于扫描振镜的超短脉冲激光旋切制孔光学系统设计[J]. *光学学报*, 2023, 43(14): 1422003.  
Zhang J, Zhuo J, Jin H L, et al. Optical design of ultrashort pulse laser drilling system based on scanning galvanometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(14): 1422003.
- [18] Stirman J N, Smith I T, Kudenov M W, et al. Wide field-of-view, multi-region, two-photon imaging of neuronal activity in the mammalian brain[J]. *Nature Biotechnology*, 2016, 34(8): 857-862.
- [19] 杨雪芳, 刘哲晰, 王璞. 共聚焦内窥显微成像技术及其应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1907002.  
Yang X F, Liu Z X, Wang P. Confocal endoscopic microscopy and its applications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1907002.
- [20] Ji Y Y, So B H, Kim D Y. High-speed time-domain characterization method for polygon scanners[J]. *Measurement*, 2019, 135: 278-286.
- [21] Choi S, Kim P, Boutillier R, et al. Development of a high speed laser scanning confocal microscope with an acquisition rate up to 200 frames per second[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23611-23618.
- [22] Im K B, Han S M, Park H, et al. Simple high-speed confocal line-scanning microscope[J]. *Optics Express*, 2005, 13(13): 5151-5156.
- [23] Römer G R B E, Bechtold P. Electro-optic and acousto-optic laser beam scanners[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 29-39.
- [24] Hwang K, Seo Y H, Jeong K H. Microscanners for optical endomicroscopic applications[J]. *Micro and Nano Systems Letters*, 2017, 5: 1.
- [25] Yalcin C, Ersaro N T, Ghanbari M M, et al. A MEMS-based optical scanning system for precise, high-speed neural interfacing [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2022, 57(11): 3442-3452.
- [26] Kang S Y, Park J H, Ji C H. Design optimization of a 6.4 mm-diameter electromagnetic 2D scanning micromirror[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31272-31286.
- [27] Jeon J, Kim H, Jang H, et al. Handheld laser scanning microscope catheter for real-time and *in vivo* confocal microscopy using a high definition high frame rate Lissajous MEMS mirror[J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 13(3): 1497-1505.
- [28] Arrasmith C L, Dickensheets D L, Mahadevan-Jansen A. MEMS-based handheld confocal microscope for *in-vivo* skin imaging[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3805-3819.
- [29] Tanguy Q A A, Gaiffe O, Passilly N, et al. Real-time Lissajous imaging with a low-voltage 2-axis MEMS scanner based on electrothermal actuation[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8512-8527.
- [30] Sun J J, Guo S G, Wu L, et al. 3D *in vivo* optical coherence tomography based on a low-voltage, large-scan-range 2D MEMS mirror[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12065-12075.
- [31] Mehidine H, Li M, Lendresse J F, et al. A customized two photon fluorescence imaging probe based on 2D scanning MEMS mirror including electrothermal two-level-ladder dual S-shaped actuators[J]. *Micromachines*, 2020, 11(7): 704.
- [32] Zong W J, Wu R L, Chen S Y, et al. Miniature two-photon microscopy for enlarged field-of-view, multi-plane and long-term brain imaging[J]. *Nature Methods*, 2021, 18(1): 46-49.
- [33] Stelzer E H K. The intermediate optical system of laser-scanning confocal microscopes[M]//Pawley J B. *Handbook of biological confocal microscopy*. Boston: Springer, 2006: 207-220.
- [34] Atry F, Pashaie R. Analysis of intermediary scan-lens and tube-lens mechanisms for optical coherence tomography[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4): 646-653.
- [35] Negrean A, Mansvelder H D. Optimal lens design and use in laser-scanning microscopy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(5): 1588-1609.
- [36] Sharafutdinova G, Holdsworth J, van Helden D. Improved field scanner incorporating parabolic optics Part 1: simulation[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(22): 4389-4396.
- [37] Sharafutdinova G, Holdsworth J, van Helden D. Improved field scanner incorporating parabolic optics Part 2: experimental verification and potential for volume scanning[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(29): 5517-5527.
- [38] 姚靖, 吴婷, 叶世蔚, 等. 离轴抛物镜扫描中继系统提升双光子显微成像视场[J]. *激光生物学报*, 2020, 29(3): 217-224.  
Yao J, Wu T, Ye S W, et al. Scanning relay system of off-axis parabolic lens improves the field of view of two-photon microscopic imaging[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2020, 29(3): 217-224.

## Aberration-Free Dual 2D MEMS Mirror Scanning Method for Optical Microscopy

Zhang Guozhuo, Wang Xu, Wang Yun, Zhao Weiqian, Qiu Lirong, Cui Han\*

*MIIT Key Laboratory of Complex-Field Intelligent Exploration, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

### Abstract

**Objective** Due to its non-invasive, high-resolution, and real-time imaging capabilities, optical scanning microscopy has been widely applied in biomedicine, physical chemistry, and materials science to realize three-dimensional imaging detection of cells, tissue analysis, and microstructure samples. Beam scanning systems play an important role in optical microscopy. When scanners are leveraged for scanning and imaging, it is necessary to add a relay system composed of a scan lens and tube lens between the scanner and the objective lens. As a result, the beam does not deviate from the rear pupil of the objective lens to ensure the imaging quality. However, traditional relay systems adopt lenses design, and their inherent defects can cause optical aberration, which affects the resolution of optical microscopy imaging systems.



Commercial scan lens and tube lens are optimized to suppress aberrations, but they feature high price, large volume, and long focal length, making them unsuitable for miniaturized design occasions. The relay system composed of doublet lenses can be miniaturized according to requirements, but it is difficult to effectively suppress aberrations, especially under large beam scanning angles. The utilization of parabolic reflectors to form a relay system can effectively eliminate the chromatic aberration, but the coma aberration of the reflection system is difficult to eliminate. This is the same as the lens relay system, which requires a one-to-one correspondence of the focal position and high installation accuracy. Therefore, how to design aberration-free beam scanning systems with miniaturization and simple structures is still an important problem facing optical microscopy imaging technology.

**Methods** Aiming at the large size, large aberration, and high alignment accuracy of the relay systems in existing beam scanning systems, we propose a dual two-dimensional (2D) MEMS mirror beam scanning method. This method adopts two 2D MEMS mirrors to realize beam telecentric scanning. One mirror replaces the scan lens and tube lens in the traditional relay system to avoid the introduction of aberrations, reduce the system size, and finally design an aberration-free beam scanning system with miniaturization and simple structures. There is a one-to-one correspondence between the scanning angle of the scanning beam and the tilt angle of the MEMS mirrors. By controlling two MEMS mirrors to cooperate with different tilt angles, this method can make the excitation beam arrive the rear pupil of the objective lens at different angles to complete the 2D lateral scanning.

**Results and Discussions** To obtain the relationship between the angle of the scanning beam and the deflection angle of the two MEMS mirrors, we build a mathematical model of the dual 2D MEMS mirror scanning system, and analyze it in detail. First, the relationship between the tilt angle of the MEMS mirror and the beam scanning angle is analyzed. Under different  $d/l$  ratios (with  $d$  being the distance between two MEMS mirrors, and  $l$  being the distance between the second MEMS mirror and the rear pupil of the objective), the tilt angle of the MEMS mirror and the beam scanning angle have different relations. It is found that the dual 2D MEMS mirror scanning system can achieve a large angle beam scanning by adjusting the  $d/l$  value when the deflection angle of the first MEMS mirror is constant (Fig. 4). Additionally, the values of  $d$  and  $l$  can be selected arbitrarily, which is flexible in design and convenient for system miniaturization. Then, the aberrations of the traditional relay system and the dual 2D MEMS mirror scanning system are analyzed by Zemax optical design software, and their performances are compared. According to the simulation results, the dual 2D MEMS mirror scanning system avoids the introduction of aberrations and has better imaging quality than the traditional relay system (Figs. 6-7). Meanwhile, the system structure is simple, easier to adjust, and can avoid the influence of installation error on the system (Fig. 10). Finally, based on this method, a miniaturized confocal scanning microscope is constructed, and the step sample is utilized to obtain the height and period information of the sample (Fig. 13), which verifies the feasibility of the method.

**Conclusions** We propose a dual 2D MEMS mirror beam scanning method, which leverages a 2D MEMS mirror instead of the traditional relay system to design an aberration-free beam scanning system. In addition, the dual 2D MEMS mirror structure has no requirements for the focus position, making it convenient for miniaturization design and installation. A dual 2D MEMS mirror scanning confocal microscope is constructed based on this method, and the feasibility of this method is verified by testing standard step samples. This method provides a new beam scanning approach for optical microscopy, which is of great significance for optical microscopic systems with strict aberration requirements such as confocal microscopes, two-photon microscopes, optical coherence scanning microscopes, and chromatic confocal microscopes.

**Key words** dual 2D MEMS mirror; beam scanning; aberration-free; miniaturization; scanning imaging; confocal