

电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜驱动系统结构优化

陈亮¹ 顾雯雯¹ 温泉² 李东玲²

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 重庆大学新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室, 重庆 400044)

摘要: 基于现代农业发展对微型近红外光谱仪的迫切需求,对微型近红外光谱仪的电磁式 MOEMS (Micro optical electronic mechanical system) 扫描光栅微镜驱动系统进行结构优化改进,旨在解决 MOEMS 扫描光栅微镜驱动电压高、扫描角度小等问题。通过利用专业磁场仿真软件 Maxwell 16.0 对不同尺寸和材料属性永磁铁进行优化仿真,得到牌号分别为 N38 和 N52 的钕铁硼 (NdFeB) 作为电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜的工作磁铁。在此基础上,设计制造 2 个相同尺寸的电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜芯片 A1 和 A2,并分别结合永磁铁 N38 和 N52 开展性能测试。测试结果表明:相比磁性较弱的 N38,当电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜芯片 A1 和 A2 在永磁铁 N52 的作用下达到最大机械扫描半角时,驱动电压分别降低 6.6% 和 8.6%,最大机械扫描半角分别增大 20.2% 和 17.4%;此外,通过对比分析机电性能测试结果可知,通过结合永磁铁 N52,电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜能够获得更优异的机械扫描性能。研究结果对于提升光谱仪的光谱检测范围以及检测精度具有实际应用价值。

关键词: 光谱仪; MOEMS 扫描光栅微镜; 磁场强度; 驱动电压; 机械扫描半角

中图分类号: S237; TH744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2020) S2-0579-07

Structural Optimization and Design of Driving System for Electromagnetic MOEMS Scanning Grating Mirror

CHEN Liang¹ GU Wenwen¹ WEN Quan² LI Dongling²

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

2. Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the urgent demand of modern agricultural development for micro near infrared (NIR) spectrometer, the experimental research on the core component of the NIR spectrometer was carried out. To overcome the problems of high driving voltage, small scanning angle, etc., the structural optimization and improvement of driving system for the electromagnetic MOEMS scanning grating mirror was proposed. By using the professional simulation software Maxwell 16.0 to optimize the magnetic field of the permanent magnets with different sizes and material properties, the NdFeB with different grades of N38 and N52 was obtained as the working permanent magnets. On this basis, two electromagnetic MOEMS scanning grating mirrors marked A1 and A2 with the same size were designed and fabricated, which were used to combine with the two permanent magnets respectively for performance test. The test results showed that compared with the permanent magnet N38 with weak magnetism, when the two electromagnetic MOEMS scanning grating mirrors combined with N52 reached the maximum mechanical scanning half angle, the driving voltage was decreased by 6.6% and 8.6%, and the maximum mechanical scanning half angle was increased by 20.2% and 17.4%, respectively. Through the comparison and analysis of the mechanical and electrical performance test results, it can be concluded that the structural improvement of the driving system can effectively improve the performance of the MOEMS scanning grating mirror, and it had important practical application value for improving the spectral detection range and accuracy of the NIR spectrometer.

Key words: spectrometer; MOEMS scanning grating mirror; magnetic field strength; driving voltage; mechanical scanning half angle

收稿日期: 2020-08-03 修回日期: 2020-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF01011200)和中央高校基本科研业务费项目(XDJK2018C037)

作者简介: 陈亮(1992—),男,硕士生,主要从事微机电系统研究,E-mail: cl_top@163.com

通信作者: 顾雯雯(1983—),女,副教授,主要从事微机电系统研究,E-mail: guww1983@163.com

0 引言

微型近红外光谱仪通过利用近红外光谱技术对不同光谱进行吸收,能够实现对物质组成成分与含量的定性和定量检测。相比传统化学与物理分析检测方法^[1-4],近红外光谱技术以无损、无需前处理、检测速度快、成本低、能够实现多个分析对象同时检测等特点^[5-6],受到了国内外高校和研究机构的普遍关注。

作为微型近红外光谱仪的核心工作元件,电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜是采用体硅加工技术研制的光学单芯片。具有体积小、成本低、能以外置单管探测器替代昂贵的阵列探测器^[7]等特点,是替代传统近红外和中红外光谱分析检测装备的新一代核心分光元件。在 MEMS 技术的飞速发展带动下,利用微制造技术研发的电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜集驱动、传感、扫描和分光于一体,在农产品品质分析^[8-11]、作物病虫害监测^[12-14]、产品鉴别^[15-18]等农业生产领域有着广泛的应用需求。

电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜受工艺条件以及结构设计限制,存在驱动电压高、扫描角度小等问题。基于此,本文对电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜的驱动系统进行改进优化,并设计一款结构简单具有较优工艺性能的电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜。

1 结构与原理

MOEMS 扫描光栅微镜主要由可动微镜板、固定边框、闪耀光栅、驱动线圈、角度传感线圈、一对扭转梁等构成。如图 1 所示,可动微镜板通过一对扭转梁与固定框架相连,采用体硅加工技术一体化加工而成;可动微镜板的正面集成的是具有高衍射效率的闪耀光栅,背面集成的是驱动线圈和角度传感线圈,两种线圈分别通过集成在两个扭转梁上的引线连接到固定边框上的电极。为了消除环境因素的干扰,角度传感线圈采用差分形式对称排列^[19]。此外,一对永磁体平行地放置于 MOEMS 扫描光栅微镜的两侧,为电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜提供恒定的工作磁场。

当向驱动线圈中通入交变电流时,在磁场作用下,与 Y 轴方向平行的驱动线圈将在可动微镜板的两侧产生大小相等、方向相反的洛伦兹力,进而驱动可动微镜板沿着扭转梁中心轴线往复转动;当施加的驱动频率与 MOEMS 扫描光栅微镜的固有频率相同时,器件将发生谐振,此时其机械扫描角将达到最大^[20]。与此同时,传感线圈在磁场中作切割磁感应线运动,产生动生电动势,该动生电动势与机械扫描

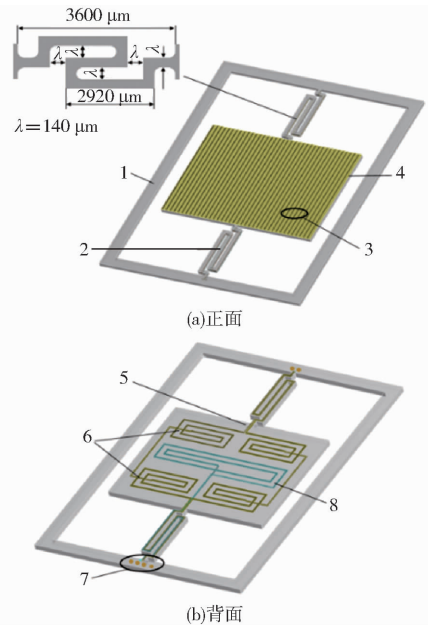


图 1 MOEMS 扫描光栅微镜结构示意图

Fig. 1 Schematics of MOEMS scanning grating mirror

1. 固定边框 2. 扭转梁 3. 闪耀光栅 4. 可动微镜板 5. 引线
6. 角度传感线圈 7. 电极 8. 驱动线圈

角成正比,通过外围控制电路采集该动生电动势信号,最终将该电动势信号转换成角度信号输出,从而实现对可动微镜板偏转状态的实时动态监测。

另一方面,MOEMS 扫描光栅微镜正面的闪耀光栅对入射的复合光进行衍射分光,使复合光分解成由单色光组成的光谱,该光谱在可动微镜板的带动下被依次投射到外置单管探测器上,通过探测器对光谱信号进行采集处理,即可完成对待测样品的检测分析。

由于可动微镜板受洛伦兹力驱动而绕扭转梁中心轴线发生往复偏转,所以其运动模型可以近似看作是质量-弹簧-阻尼的二阶振动系统。因此,MOEMS 扫描光栅微镜的运动方程可以表示为

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} + K\theta \quad (1)$$

式中 J ——转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

θ ——机械扫描半角, ($^\circ$)

t ——时间, s

C ——系统阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$

K ——扭转刚度, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$

T ——驱动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$

求解方程(1)得到其机械扫描半角和产生的驱动力矩为

$$\theta = \frac{T}{K} Q \quad (2)$$

$$T = BILR_d \quad (3)$$

式中 Q ——品质因数

B ——磁场强度, T

I ——驱动电流, A

L ——受磁场作用的驱动线圈长度, m

R_d ——受力线圈到扭转中心的距离, m

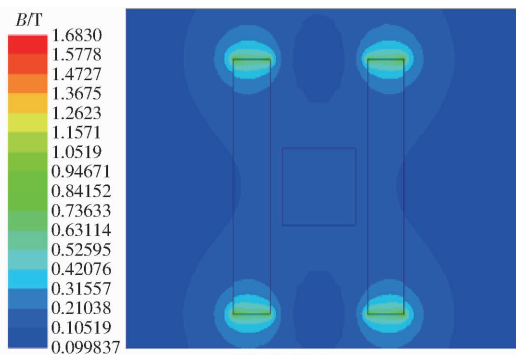
由于扭转刚度只与器件的自身结构有关,而品质因数受集成电路影响,因此,如果驱动电流发生变化,磁场的优化改进能否有效提升 MOEMS 扫描光栅微镜的机械扫描性能成为本文的研究重点。用于实验研究的 MOEMS 扫描光栅微镜的有效镜面面积设为 $6\text{ mm} \times 7\text{ mm}$,为了保证器件各部分具有较高的连接一致性,可动微镜板、扭转梁以及固定边框同厚度一体化制造,厚度设为 0.3 mm 。

2 仿真分析

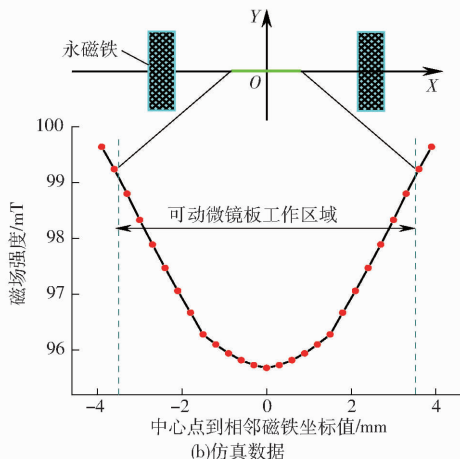
磁铁是电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜结构系统的一个重要组成部分,为 MOEMS 扫描光栅微镜的工作提供恒定磁场。当磁场发生了改变,磁场对载流线圈的作用也会相应发生改变,进而影响 MOEMS 扫描光栅微镜的工作性能。磁铁种类繁多,常见的有钕铁硼磁铁、钐钴磁体、铝镍钴磁铁和铁铬钴磁铁等。相比而言,钕铁硼作为一种稀土永磁材料,具有极高的磁能积和矫顽力,而且其高能量密度的优点使该永磁材料在现代电子和电子技术中获得了广泛应用,使仪器、仪表等小型化设备的微型化以及轻量化成为可能。因此,本文选用强力磁铁钕铁硼作为电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜的磁铁材料。

驱动线圈采用渐开线方式集成在 MOEMS 扫描光栅微镜芯片上,在可动微镜板的转动过程中,如果磁场中可动微镜板区域的磁场强度分布不均匀,即平均磁场强度差(如图 2a,沿 X 轴水平方向上可动微镜板区域磁场强度的最值差与间距的比值)较大,将不利于 MOEMS 扫描光栅微镜的正常扫描工作。因此,为了研究不同磁场对 MOEMS 扫描光栅微镜工作性能的影响,利用磁场仿真软件 Maxwell 16.0 对永磁体的磁场强度分布进行仿真,如图 2 所示。设定永磁体采用二维平面仿真,材料属性为:剩磁 B_r 取值为 1.4 T ,矫顽力 H_c 为 890 kA/m ;磁铁尺寸为 $20\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,两个磁铁的间距为 12 mm 。仿真结果如图 2a 所示,中间矩形区域为可动微镜板,得到可动微镜板区域的平均磁场强度(如图 2a,沿 X 轴方向上可动微镜板区域磁场强度的平均值)为 97 mT ,平均磁场强度差为 0.9 mT/mm 。图 2b 为可动微镜板区域仿真结果在 X 轴的磁场强度分布,结果表明:对称放置的永磁体其磁场强度由中心位置向磁铁方向逐渐增大,且两边磁场强度关于 Y 轴对

称分布,说明中间区域的磁场对驱动线圈的作用较弱。



(a) 磁场仿真图



(b) 仿真数据

图 2 永磁体的磁场仿真

Fig. 2 Magnetic field simulation of permanent magnets

为了进一步探究两个永磁体之间的磁场强度分布,表 1 分别对不同材料属性和间距的永磁体做磁场仿真,并限定永磁体的长度和宽度分别为 10 mm 和 3 mm 。仿真结果表明,相比改变磁铁的材料属性(剩磁和矫顽力),磁铁间距的改变对磁场分布的影响更为显著。磁铁间距的缩小不仅能有效增大可动微镜板区域的平均磁场强度,也能够使可动微镜板区域的平均场强差更小,使 MOEMS 扫描光栅微镜工作区域的磁场分布更加均匀。

表 1 不同材料属性和间距的永磁体磁场仿真结果

Tab. 1 Simulation results of permanent magnet with different material properties and spatial distribution

剩磁/ T	矫顽力/ ($\text{kA} \cdot \text{m}^{-1}$)	磁铁间距/ mm	平均磁场强度差/ ($\text{mT} \cdot \text{mm}^{-1}$)	平均磁场 强度/ mT
1.20	840	10.0	7.5	103.4
1.30	840	10.0	7.4	104.5
1.40	840	10.0	7.5	104.4
1.26	800	10.0	7.0	99.4
1.26	820	10.0	7.4	101.1
1.26	840	10.0	7.5	103.9
1.20	840	10.0	7.5	103.4
1.20	840	14.0	3.8	59.4
1.20	840	18.0	1.8	32.2

为了探究磁场分布对 MOEMS 扫描光栅微镜工作性能的影响,本文结合 MOEMS 扫描光栅微镜封装体的设计尺寸对永磁铁进行仿真优化,从而得到两种平均磁场强度和平均磁场强度差相差较明显的永磁铁用于实验测试分析。通过对永磁铁做不同尺寸和间距的优化仿真,确定两种永磁铁的材料属性和尺寸参数如表 2 所示。此外,为了便于实验标注,经查阅钕铁硼性能牌号表,确定得到两种永磁铁对应的牌号分别为 N38 和 N52。

表 2 永磁铁 N38 和 N52 的材料属性以及仿真优化结果

牌号	剩磁 /T	矫顽力 / (kA·m ⁻¹)	尺寸 / (mm × mm × mm)	间距 / mm	平均磁场强度差 / (mT·mm ⁻¹)	平均磁场强度 / mT
N38	1.23	901	15 × 6 × 3	16.0	1.5	68.8
N52	1.46	903	20 × 10 × 3	10.6	0.2	100.1

3 实验与分析

3.1 封装与测试原理

电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜的封装体主要由 MOEMS 扫描光栅微镜、一对永磁铁、PCB (Printed circuit board) 板和用于固定的两块有机玻璃板组成。如图 3a 所示,MOEMS 扫描光栅微镜固定在 PCB 板的中间,并用金线实现 MOEMS 扫描光栅微

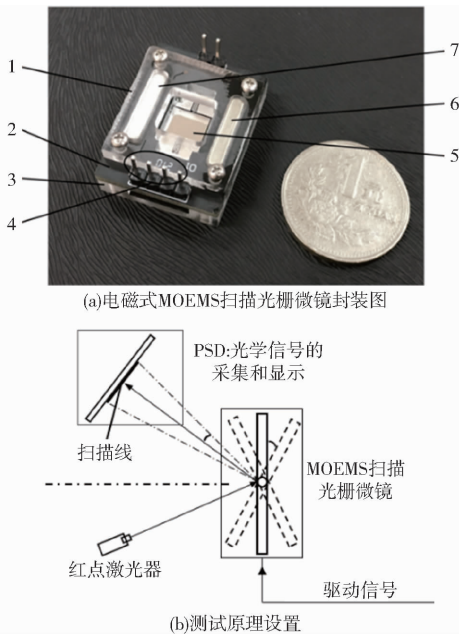


图 3 电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜封装图和测试装置原理图

Fig. 3 Package diagram and test setup of electromagnetic MOEMS scanning grating mirror

1. 封盖 2. PCB 板 3. 基板 4. 接口 5. MOEMS 扫描光栅微镜 6、7. 永磁铁

镜芯片和 PCB 板的电气连接;两个永磁铁水平对称地放置在 PCB 板两侧的凹槽中,最后一起被上下两层有机玻璃板固定在中间层。在装配体的 PCB 板上设置有集成电路的专用接口,该接口分别由集成在 MOEMS 扫描光栅微镜上的驱动线圈和角度传感线圈的开线引出,用于连接外围控制电路。由于本文主要针对器件的机电性能和机械性能进行研究,因此在微镜板的正面暂未集成闪耀光栅。

图 3b 是实验测试原理图。实验时将封装体竖直固定在支架上,然后再分别外设一个固定光源 (650 nm 红光激光器) 和一个位置灵敏探测器 (DRX-1 DPSD-OA03-X, PSD)。未工作状态,由固定光源发出的光点投射到可动微镜板的正面,经过反射后该光点能够投射在 PSD 的中心位置,即完成实验的光路设备位置校准;工作状态,向 PCB 板的驱动线圈接口通入交变电流,在磁场的作用下,载流线圈会产生洛伦兹力,进而驱动可动微镜板沿着扭转梁中心轴往复转动;在 MOEMS 扫描光栅微镜的转动下,角度传感线圈在磁场中做切割磁感线运动产生感应电动势,经外围控制电路处理最终由示波器 (Keysight, DSOX2014A) 显示。

3.2 MOEMS 扫描光栅微镜的机械扫描角测试

为了研究磁场分布对电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜机械扫描角度的影响,设计制造 2 个尺寸相同但谐振频率和驱动线圈电阻不同的 MOEMS 扫描光栅微镜芯片 A1 和 A2,并分别结合不同永磁铁做性能测试。首先,将两个芯片分别安装到固定有永磁铁 N38 的封装体中,然后不断改变驱动信号的幅值和频率,当投射到 PSD 的光线长度达到最大时,记录由 PSD 输出的角度信号值,通过计算即可得出对应的机械扫描角度,该角度即为 MOEMS 扫描光栅微镜的最大机械扫描半角。再分别将上述两个芯片 A1 和 A2 安装到固定有永磁铁 N52 的封装体中,进行同样的测试并计算对应的最大机械扫描半角。测试数据如表 3 所示,相比磁性较弱的永磁铁 N38,芯片 A1 在永磁铁 N52 的作用下驱动电压降低了 6.6%,最

表 3 MOEMS 扫描光栅微镜机械扫描角测试结果

Tab. 3 Mechanical scanning angle test results of MOEMS scanning grating mirror

牌号	芯片编号	驱动线圈电阻 / Ω	驱动电压 / V	最大机械扫描半角 / (°)
N38	A1	90.13	1.51	5.85
	A2	113.13	2.57	6.03
N52	A1	90.13	1.41	7.03
	A2	113.13	2.35	7.08

大机械扫描半角增大了 20.2%; 同样, 芯片 A2 的驱动电压相对应地降低了 8.6%, 最大机械扫描半角增大了 17.4%。

由于工艺加工误差, MOEMS 扫描光栅微镜芯片 A1 和 A2 的驱动线圈电阻和扭转梁尺寸存在差异, 使得两个芯片需要通入不同的驱动信号, 才能获得各自最大机械扫描半角(式 2)。由表 3 可以看出, 通过优化改进 MOEMS 扫描光栅微镜的工作磁场分布, 不仅有效地降低驱动电压, 同时也使 MOEMS 扫描光栅微镜的机械扫描性能得到显著提升, 这对增大光谱仪光谱检测范围以及拓展光谱仪的应用领域具有重要意义。

3.3 机电性能测试

电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜的驱动模块由外置在 MOEMS 扫描光栅微镜两侧的永磁铁和集成在 MOEMS 扫描光栅微镜上的驱动线圈组成。在外置永磁铁的磁场作用下, 向驱动线圈中通入交变电流会产生洛伦兹力, 进而驱动 MOEMS 扫描光栅微镜产生机械偏转。因此, 改变工作磁场会直接影响驱动系统对电磁式 MOEMS 扫描光栅微镜机械偏转性能的作用。为了研究磁场对 MOEMS 扫描光栅微镜机电性能的影响, 对 MOEMS 扫描光栅微镜芯片 A1 和 A2 分别在永磁铁 N38 和 N52 两种磁场作用下做机电性能测试。

首先测得 MOEMS 扫描光栅微镜的固有频率分别为 520.0、604.1 Hz, 然后对固有频率在 ± 20 Hz 的频率区间做 MOEMS 扫描光栅微镜的频率响应测

试。将 MOEMS 扫描光栅微镜 A1 先后结合磁铁 N38 和 N52, 固定驱动电流有效值 $I_{\text{rms}} = 5$ mA, 测试在频率 500 ~ 540 Hz 驱动下对应的机械扫描半角如图 4a 所示, 在永磁铁 N38 和 N52 的作用下, MOEMS 扫描光栅微镜分别在频率 520.0 Hz 和 523.9 Hz 处达到最大机械扫描半角 5.11° 和 6.43° 。对 MOEMS 扫描光栅微镜 A2 做同样的实验设计, 由于电阻不同, 设定固定驱动电流有效值 $I_{\text{rms}} = 8$ mA, 测试的驱动频率范围是 584 ~ 624 Hz。如图 4b 所示, 当驱动频率分别为 604.1 Hz 和 604.4 Hz 时, 器件达到最大机械扫描半角 5.82° 和 6.14° 。测试结果表明, 磁场的优化改进使 MOEMS 扫描光栅微镜的机械扫描角得到了显著提升; 由于更换了磁性强度不同的永磁铁, 使得施加的交变信号发生变化, 两个 MOEMS 扫描光栅微镜测试结果的峰值频率发生了轻微偏移^[21-22]。

本文还对 MOEMS 扫描光栅微镜芯片 A1 和 A2 在 N38 和 N52 两种永磁铁的作用下驱动电压与机械扫描半角的关系进行了测试。如图 4c、4d 所示, 谐振状态下, 对 MOEMS 扫描光栅微镜施加不同的驱动电压, 随着电压的逐渐增大, MOEMS 扫描光栅微镜的机械扫描半角逐渐增大。由于施加不同的驱动电压会影响器件的谐振偏转, 进而影响 MOEMS 扫描光栅微镜的机械扫描性能, 因此图 4c、4d 中 MOEMS 扫描光栅微镜芯片 A1 和 A2 测试数据的线性相关系数发生了轻微波动。但在磁性更强的永磁铁 N52 作用下, MOEMS 扫描光栅微镜 A1 和 A2 的机械扫描灵敏度从 0.00422 、 0.00261 ($^\circ$)/mV_{pp} 提

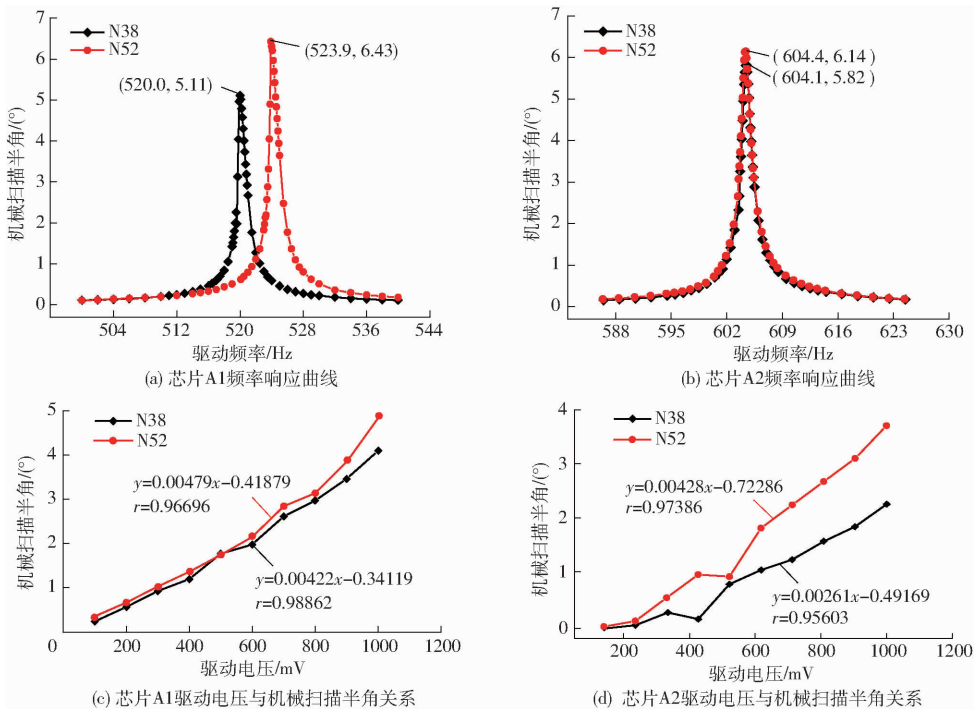


图 4 机电性能测试结果

Fig. 4 Electromechanical performance test results

升至0.00479、0.00428(°)/mV_{pp},表明磁场的优化改进有效提升了驱动系统对MOEMS扫描光栅显微镜机械扫描特性的影响,使MOEMS扫描光栅显微镜获得更优异的机械扫描性能。

4 结束语

针对微型近红外光谱仪的电磁式MOEMS扫描光栅显微镜驱动系统结构进行了优化改进。通过利用磁场仿真软件Maxwell 16.0对不同牌号和尺寸的永磁铁进行磁场仿真,探究了对称分布永磁铁的磁场分布特征,并根据需要的平均磁场强度和平均磁场

强度差,经仿真得到用于MOEMS扫描光栅显微镜实验测试的工作磁铁N38和N52。本文设计了MOEMS扫描光栅显微镜芯片A1和A2,并分别结合永磁铁N38和N52开展实验测试。测试结果表明:相比磁性较弱的永磁铁N38,MOEMS扫描光栅显微镜A1和A2在永磁铁N52的作用下达最大机械扫描半角时,驱动电压分别降低6.6%、8.6%,最大机械扫描半角分别增大20.2%、17.4%。此外,通过对芯片机电性能测试结果的对比分析,在磁性更强的N52作用下,MOEMS扫描光栅显微镜驱动系统对机械扫描特性的影响得到了显著提升。

参 考 文 献

- [1] 王荣. 玉米机械化生产条件下田间土壤持水与养分监测分析[J]. 农业技术与装备, 2017(6): 21-23, 25.
WANG Rong. Monitoring and analysis of soil water holding capacity and nutrients in maize mechanized production[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2017(6): 21-23, 25. (in Chinese)
- [2] 徐贵钰. 青海6种主要农产品中微量元素的特征分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(6): 77-80.
XU Guiyu. Characteristics analysis of trace elements in six kinds of main agricultural products in Qinghai[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2016, 34(6): 77-80. (in Chinese)
- [3] 周聪, 李建国, 陈忠, 等. 海南岛18种野生蔬菜的成分测定及质量安全和价值分析[J]. 热带作物学报, 2010, 31(10): 1853-1860.
ZHOU Cong, LI Jianguo, CHEN Zhong, et al. Composition assay and analysis of quality safety and value of 18 wild vegetables in Hainan island [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(10): 1853-1860. (in Chinese)
- [4] 陶永胜, 刘吉彬, 兰圆圆, 等. 人工贵腐葡萄酒香气的仪器分析与感官评价[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 270-279, 315.
TAO Yongsheng, LIU Jibin, LAN Yuanyuan, et al. Instrumental and sensory aroma analysis of noble-rot wine from artificial botrytized grapes [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 270-279, 315. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160236&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.036. (in Chinese)
- [5] 黄亚伟, 李换, 王若兰. 微型近红外光谱仪在农产品检测中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(7): 1-3.
HUANG Yawei, LI Huan, WANG Ruolan. Progress on the application of miniature near infrared spectroscopy in the detection of agricultural products[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(7): 1-3. (in Chinese)
- [6] 金长江, 郑先哲. 应用近红外光谱技术快速检测黑加仑浆果的主要营养成分[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(5): 41-47, 147.
JIN Changjiang, ZHENG Xianzhe. Rapid detection for main nutrient components of black currant berry using near infrared technology [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(5): 41-47, 147. (in Chinese)
- [7] NIE Q Y, WEN Z Y, HUANG J. A high-performance scanning grating based on tilted (111) silicon wafer for near infrared micro spectrometer application[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21: 1749-1755.
- [8] 张湘东, 马晋芳, 罗娟敏, 等. 微型近红外光谱仪快速测定桔梗有效成分研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2018, 20(5): 637-643.
ZHANG Xiangdong, MA Jinfang, LUO Juanmin, et al. Rapid determination of effective components of platycodon grandiflorum by micro near-infrared spectrometer[J]. World Science and Technology/Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica, 2018, 20(5): 637-643. (in Chinese)
- [9] 杨彪, 杜荣宇, 杨玉, 等. 便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 180-186.
YANG Biao, DU Rongyu, YANG Yu, et al. Design of portable nondestructive detector for chlorophyll content of plant leaves[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 180-186. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191220&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.020. (in Chinese)
- [10] BA T L. Application of deep learning and near infrared spectroscopy in cereal analysis[J]. Vibrational Spectroscopy, 2019, 106: 103009.
- [11] 王允虎, 孙蕾, 王成忠, 等. 便携式近红外光谱仪在鉴定无花果品质中建模效果研究[J]. 齐鲁工业大学学报, 2019, 33(4): 20-25.

- WANG Yunhu, SUN Lei, WANG Chengzhong, et al. Modeling effect of portable near-infrared spectrometer in identification of fig quality[J]. *Journal of Qilu University of Technology*, 2019, 33(4): 20 – 25. (in Chinese)
- [12] 张逸. 基于高分辨率光谱图像采集及混合模型的植物病害检测方法[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016.
ZHANG Yi. Plant disease detection high-resolution image acquisition and spectral mixture model-based approach [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2016. (in Chinese)
- [13] 张德荣, 方慧, 何勇. 可见/近红外光谱图像在作物病害检测中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(6): 1748 – 1756.
ZHANG Derong, FANG Hui, HE Yong. Research of crop disease based on visible/near infrared spectral image technology: a review[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(6): 1748 – 1756. (in Chinese)
- [14] 乔世成, 田有文, 何宽, 等. 水果病虫害无损检测技术研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 227 – 234.
QIAO Shicheng, TIAN Youwen, HE Kuan, et al. Recent progress in technologies for non-destructive detection of fruit diseases and pests[J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 227 – 234. (in Chinese)
- [15] 吴江, 刘明地. 基于红外光谱系统聚类分析的斑花黄堇产地鉴别[J]. *沈阳药科大学学报*, 2020, 37(5): 433 – 437.
WU Jiang, LIU Mingdi. The identification of the origin of *corydalis conspersa maxim* based on infrared spectral and cluster analysis[J]. *Journal of Shenyang Pharmaceutical University*, 2020, 37(5): 433 – 437. (in Chinese)
- [16] RAHI S, MOBLI H, JAMSHIDI B, et al. Different supervised and unsupervised classification approaches based on visible/near infrared spectral analysis for discrimination of microbial contaminated lettuce samples: case study on *E. coli* ATCC[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2020, 108: 10335.
- [17] 耿志旺, 乐健, 杨永健. 便携式 X 射线荧光光谱仪快速鉴别硫熏八角[J]. *食品安全质量检测学报*, 2017, 8(6): 2277 – 2281.
GENG Zhiwang, LE Jian, YANG Yongjian. Rapid screening of sulfur fumigated star anises by field-portable X-ray fluorescence [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2017, 8(6): 2277 – 2281. (in Chinese)
- [18] 夏立娅, 申世刚, 刘峥颢, 等. 基于近红外光谱和模式识别技术鉴别大米产地的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(1): 102 – 105.
XIA Liya, SHEN Shigang, LIU Zhenghao, et al. Identification of geographical origins of rice with pattern recognition technique by near infrared spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(1): 102 – 105. (in Chinese)
- [19] YU F, WEN Q, LEI H J, et al. A compound control system for FR4-based electromagnetic scanning micrograting [J]. *Electronics*, 2019, 8(7): 770.
- [20] 聂秋玉. 基于偏晶向(111)硅基的 MOEMS 扫描光栅微镜关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
NIE Qiuyu. Research on key technologies of MOEMS scanning grating mirror based on tilted (111) silicon wafer [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [21] BARAN U, BROWN D, HOLMSTROM S, et al. Resonant PZT MEMS scanner for high-resolution displays[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21: 1303 – 1310.
- [22] NAONO T, FUJII T, ESASHI M, et al. A large-scan angle piezoelectric MEMS optical scanner actuated by a Nb-doped PZT thin film[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24: 5010.