

基于 FR4 的多自由度电磁式扫描光栅微镜结构设计

周原媛^{1,2,3}, 袁幸权^{1,2,3}, 温 泉^{1,2,3}, 卢国凤^{1,2,3}, 李东玲^{1,2,3}

(1 重庆大学光电工程学院 重庆 400030;

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 400030;

3 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400030)

摘要: 本文面向低成本、高可靠、便携式光谱分析检测设备的需要, 提出了一种基于 FR4(Flame Retardant, 阻燃等级为 UL94V-O 的板材, 4 表示树脂为环氧树脂、增强材料为玻璃纤维布) 复合材料的多自由度电磁驱动微型集成扫描光栅微镜新结构。通过多自由度结构设计, 有效提升了微镜转动角度。建立了器件有限元仿真模型, 开展了静力学、模态及谐响应分析。有限元分析结果表明: 微镜能够在设定谐振模式下工作, 其微镜与驱动线圈的位移比值为 1.795, 为大转角电磁式微型集成扫描光栅微镜设计提供了一种新方法。

关键词: 扫描光栅微镜; MEMS; 电磁驱动

中图分类号: TH74; O342 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)04-0109-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230304001

引用格式: 周原媛, 袁幸权, 温泉, 等. 基于 FR4 的多自由度电磁式扫描光栅微镜结构设计[J]. 遥测遥控, 2023, 44(4): 109-116.

Structural design of electromagnetic scanning micromirror based on FR4

ZHOU Yuanyuan^{1,2,3}, YUAN Xingquan^{1,2,3}, WEN Quan^{1,2,3}, LU Guofeng^{1,2,3}, LI Dongling^{1,2,3}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. National Key Laboratory of Fundamental Science of Novel Micro/Nano Device and System Technology,
Chongqing University, Chongqing 400030, China;

3. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Education Ministry of China, Chongqing University,
Chongqing 400030, China)

Abstract: Aimed at the request of low-cost, high-reliability portable spectral analysis and detection equipment, this paper proposes a new structure of electromagnetic micro-integrated scanning grating micromirror based on composite material FR4. Through designing the multi-degree-of-freedom drive structure, which improves the rotation angle of the micromirror effectively. A finite element simulation model of the device is established. A series of simulation have been carried out in order to optimize the performance. The simulation results show that structure can work in the set resonance mode, and the displacement ratio of the micromirror to the driving coil is 1.795, which provides a new method for the design of large-angle electromagnetic micro-integrated scanning grating micromirrors.

Keywords: Scanning mirror; MEMS; Electromagnetic actuation

Citation: ZHOU Yuanyuan, YUAN Xingquan, WEN Quan, et al. Structural design of electromagnetic scanning micromirror based on FR4[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(4): 109-116.

引 言

光谱仪是一种对物质的组分和含量进行快速定性无损伤检测的分析仪器^[1]。在科学实验^[2]、工

农业生产^[3]、环境监测^[4]、石油化工^[5]、生物医药^[6]、食品安全^[7]、航空航天^[8]以及矿物勘探^[9]等众多领域有着广泛的需求与应用。近红外阵列式探测器高昂的成本, 限制了微型近红外光谱仪在各

领域的应用。基于微型扫描光栅的微型光谱仪, 通过采用扫描光栅与单点探测器替代近红外阵列式探测器, 实现了光谱数据的采集与重构, 体积小、精度高、价格低, 对近红外光谱检测技术的广泛应用具有重要价值, 需求十分迫切。

目前, 大多数的扫描光栅微镜是使用MEMS (Micro-Electro-Mechanical System, 机电系统) 技术开发制造的, 由不同的驱动机制进行驱动, 如静电^[10-12]、电热^[13-15]、电磁^[16-18]以及压电^[19-22]驱动。静电式驱动器驱动电压高, 且由于驱动力与驱动电压存在非线性关系, 导致微镜的控制较为复杂; 电热驱动器主要是利用不同材料的热膨胀系数不同, 致使驱动器产生形变, 从而驱动器件工作, 但是存在响应速度慢以及对工作环境要求较高的缺点; 压电驱动器主要是利用压电材料的逆压电效应来产生驱动力, 压电驱动器具有驱动力大、功耗低以及体积小的优点, 但是目前压电驱动器主要以薄膜为主, 存在制备工艺兼容性、驱动位移小等问题。电磁驱动器主要是利用驱动电流在磁场中受安培力来产生驱动力, 驱动电压低、驱动位移大且响应速度快。但是随着转动角度增加, 磁场强度会逐渐减小导致微镜运动的非线性增加。在电磁式扫描光栅微镜中使用多自由度受迫振动系统, 是减小非线性运动的方法之一。利用多自由度谐振系统特性, 实现对扫描光栅微镜转动角与驱动线圈转动角解耦并实现放大, 在有效提升器件扫描角的同时, 优化微镜扫描线性特性。

为验证所提出的基于多自由度系统的扫描微镜, 本文设计了基于FR4的电磁式扫描光栅微镜结构, 因其材料优势, 该微镜具有优异的抗冲击和抗振动性能, 并可以将器件驱动与传感信号的前端电路, 与器件结构集成于同一PCB(Printed Circuit Board, 印刷电路板)上, 集成度高, 装配简单。

1 扫描光栅微镜理论模型

1.1 理论模型

本文提出的电磁式扫描光栅微镜可以等效为一个多自由度受迫振动系统, 如图1所示。 J_Q 和 J_{Mirror} 分别是驱动器和镜面的转动惯量, k_1 和 k_2 为两对悬臂梁的刚度, c_1 和 c_2 为阻尼, T_Q 为驱动力矩, 该系统动力学方程式为:

$$\mathbf{J}_m \ddot{\theta} + \mathbf{C}_m \dot{\theta} + \mathbf{K}_m \theta = \mathbf{T} \quad (1)$$

式中, \mathbf{J}_m 为系统的转动惯量矩阵:

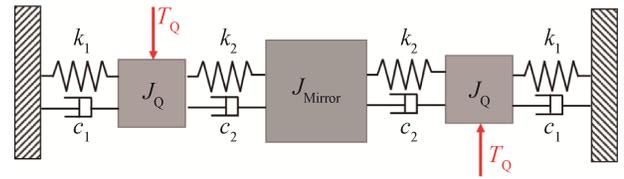


图1 具有阻尼的多自由度受迫振动系统

Fig. 1 Multi-degree-of-freedom forced vibration system with damping

$$\mathbf{J}_m = \begin{pmatrix} J_Q & 0 & 0 \\ 0 & J_{Mirror} & 0 \\ 0 & 0 & J_Q \end{pmatrix} \quad (2)$$

\mathbf{C}_m 为系统的阻尼系数矩阵:

$$\mathbf{C}_m = \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & 2c_2 & -c_2 \\ 0 & -c_2 & c_1 + c_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

\mathbf{K}_m 为系统的扭转刚度矩阵:

$$\mathbf{K}_m = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & 2k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_1 + k_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

\mathbf{T} 为总的驱动力矩矩阵:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_Q \\ 0 \\ -T_Q \end{pmatrix} \quad (5)$$

假设驱动器与微镜转动惯量的比值为 $a(0 < a < 1)$, 悬臂梁刚度的比值(k_2/k_1)为 b , 驱动力矩仅仅施加在驱动器上。通过多自由度振动系统的理论计算, 三自由度的振动系统存在三个固有频率, 分别为 W_1 、 W_2 以及 W_3 :

$$W_1^2 = \frac{k_1 F}{2aJ_{FR4}} \quad (6)$$

$$W_2^2 = \frac{k_1(b+1)}{aJ_{FR4}} \quad (7)$$

$$W_3^2 = \frac{k_1 D}{2aJ_{FR4}} \quad (8)$$

二阶振动系统阻尼主要由锚定阻尼、气动阻尼及热弹性阻尼等构成, 其受器件材料、加工、封装等多种复杂因素的影响, 难以给出基于解析表达式的准确值。故本文根据已报道的尺寸相近、并同样由FR4材料制备的电磁式扫描光栅微镜的实测品质因数(100~200), 计得其等效阻尼约为 $2.5E-3 \sim 5E-3$ 。因此, 在本文后续理论计算与有限元仿真中, 系统的阻尼均取 $2.5E-3$, 并假设其不随器件频率变化。即在当驱动信号的频率为 W_1 时, 系统阻尼取定值时, 镜面与驱动器的位移比值

Y为:

$$Y = \frac{DW_1^2 - DW_3^2 + FW_1^2 - FW_2^2}{-2W_1^2 + W_2^2 - W_3^2} \quad (9)$$

其中, D 、 F 、 W_1 、 W_2 、 W_3 皆是有关 a 、 b 的表达式:

$$D = \frac{b - \sqrt{4a^2b^2 + 4ab^2 - 4ab + b^2 + 2b + 1} - 2ab + 1}{2b} \quad (10)$$

$$F = \frac{b + \sqrt{4a^2b^2 + 4ab^2 - 4ab + b^2 + 2b + 1} - 2ab + 1}{2b} \quad (11)$$

1.2 扭转刚度

结合式(9)、式(10)以及式(11)可知:调整两对悬臂梁的扭转刚度比值,以及镜面和驱动器转动惯量的比值,可以达到调节微镜和驱动器位移比值的目。由于FR4中心镜板和硅光栅可近似看成刚体,所以系统的扭转刚度仅仅考虑两对悬臂梁的扭转刚度。结合动力学方程可知,微镜在线性区工作时系统扭转刚度越低,微镜的扫描角度越大;结合微型近红外光谱分析设备的应用需求,扫描光栅微镜的体积越小越好,故选择了两支不同的悬臂梁结构如图2所示,满足小体积的需求。假设远离镜面的梁为悬臂梁A,扭转刚度为 k_1 ;靠近镜面的梁为悬臂梁B,扭转刚度为 k_2 。

其中,

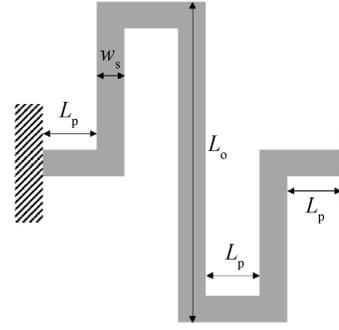
$$k_1 = \left(\frac{2}{EI_{y1}}(L_o - w_s) + \frac{1}{GJ_{p1}}(4L_p + 2w_s) \right)^{-1} \quad (12)$$

$$k_2 = \left(\frac{4(l_o + w_t)}{EI_{y2}} + \frac{3l_p + (d_{ini} + w_t) + (d_{fin} + w_t) + \left(l_{ini} + \frac{w_t}{2}\right) + \left(l_{fin} + \frac{w_t}{2}\right)}{GJ_{p2}} \right)^{-1} \quad (13)$$

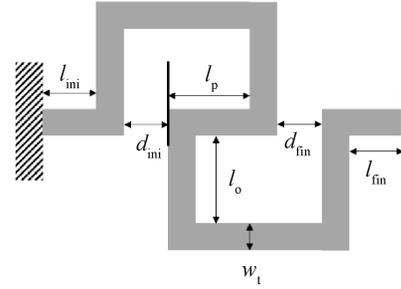
式中, E 、 G 分别表示复合材料FR4的杨氏模量和剪切模量, L_p 、 L_o 、 w_s 等为悬臂梁A的结构参数, d_{ini} 、 d_{fin} 、 l_p 、 l_o 、 w_t 、 l_{ini} 、 l_{fin} 等为悬臂梁B的结构参数,对于矩形截面梁,惯性矩 I_y 和扭转因子 J_p 分别为:

$$I_y = \frac{wt^3}{12} \quad (14)$$

$$J_p = \frac{w}{2} \left(\frac{t}{2} \right)^3 \left(\frac{16}{3} - 3.36 \frac{t}{w} \left(1 - \frac{t^4}{12w^4} \right) \right) \quad (15)$$



(a) 悬臂梁 A
(a) Cantilever beam A



(b) 悬臂梁 B
(b) Cantilever beam B

图2 悬臂梁结构

Fig. 2 Cantilever beam structure

1.3 转动惯量

忽略悬臂梁和线圈的转动惯量,转动惯量 J_{Mirror} 主要由FR4中心镜面的转动惯量 J_{FR4} 、硅光栅的转动惯量 J_{Si} 组成(将硅光栅等效为一个实心长方体),由下式进行计算:

$$J_{FR4} = \frac{1}{12} \rho_{FR4} l w t (w^2 + t^2) \quad (16)$$

$$J_{Si} = \frac{1}{12} \rho_{Si} l_{Si} w_{Si} t_{Si} (w_{Si}^2 + t_{Si}^2) \quad (17)$$

$$J_{Mirror} = J_{FR4} + J_{Si} \quad (18)$$

考虑到驱动线圈布线,故将两个驱动质量块连接形成驱动外框如图3所示,方便驱动线圈形成回路。

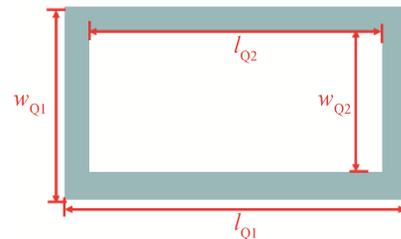


图3 驱动器结构示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the actuator structure

故驱动器的转动惯量 J_Q 由下式进行计算:

$$J_Q = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{12} \rho_{FR4} l_{Q1} w_{Q1} t_Q (w_{Q1}^2 + t_Q^2) - \frac{1}{12} \rho_{FR4} l_{Q2} w_{Q2} t_Q (w_{Q2}^2 + t_Q^2) \right) \quad (19)$$

式中, ρ_{Si} 、 ρ_{FR4} 分别表示硅材料的密度和FR4材料的密度, l 、 w 、 t 分别为镜面的长、宽、高, l_{Si} 、 w_{Si} 、 t_{Si} 分别为硅光栅的长、宽、高, l_{Q1} 、 w_{Q1} 、 t_{Q1} 分别为驱动外框的内外长宽高。

1.4 扫描光栅微镜结构设计

根据上述理论模型构建了如图4所示的电磁式扫描光栅微镜结构, 硅光栅贴在中心镜面上, 扫描微镜和驱动器分别独立, 为了方便驱动线圈布线, 将两个驱动器相连形成了驱动器外框, 一对磁铁放置在驱动器旁。当驱动线圈中通入电流时, 驱动线圈因在磁场中受到安培力带动驱动器转动, 通过悬臂梁带动镜面绕轴转动。

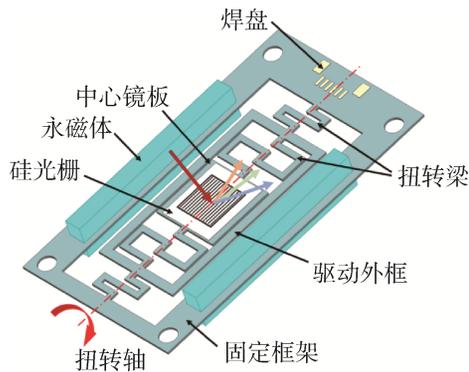


图4 多自由度系统的扫描光栅微镜

Fig. 4 Scanning grating micromirror with multi-degree-of-freedom system

1.5 结构参数优化设计

由式(9)可知, 微镜与驱动线圈位移比值主要与两对悬臂梁扭转刚度的比值 b , 以及驱动器与微镜和硅光栅的转动惯量的比值 a 相关。本文采用重庆大学微系统中心现有的标准光栅掩模板, 制备的硅光栅单元厚度为 0.5 mm, 面积为 10.0 mm×11.5 mm, 由此确定 FR4 中心镜面的大小为 12.0 mm×12.0 mm, 结合现有 PCB 加工条件, 确定采用 FR4 基板厚度为 0.4 mm, 即镜面和悬臂梁的厚度均为 0.4 mm, 由此确定了硅光栅与 FR4 微镜的转动惯量。硅光栅的面积和 FR4 的面积相近, 硅光栅厚度大于 FR4 微镜, 且硅材料的密度大于 FR4 材料的密度, 考虑到器件应用于微型分析设备

故器件体积不宜过大, 因此在器件厚度固定的情况下, 要限制驱动外框的面积, 故初步确定 a 的取值小于 1, 具体参数如表 1 所示。

表 1 扫描光栅微镜主要结构参数

Table 1 The major structure parameters of the scanning grating micromirror

单位: mm

微镜参数	t	l	w		
数值	0.4	12.0	12.0		
硅光栅参数	t_{Si}	l_{Si}	w_{Si}		
数值	0.5	11.5	10		
驱动器参数	t_Q	l_{Q1}	w_{Q1}	l_{Q2}	w_{Q2}
数值	0.4	33.0	13.6	30.0	16.6

计算使用的材料参数如表 2 所示, 结合悬臂梁 A 扭转刚度的计算公式确定 k_1 值。通过理论计算得出悬臂梁结构参数 w_s 、 L_p , 以及 L_o 对扭转刚度 k_1 的影响如图 5 所示。随着 w_s 的增大, 扭转刚度逐渐变大; 随着 L_p 、 L_o 的逐渐增大, 扭转刚度逐渐减小。

表 2 理论计算采用的材料性能参数

Table 2 Materials parameters used in the theoretical calculation

参数	硅杨氏模量/GPa	硅密度/(kg/m ³)	硅剪切模量/GPa	FR4 密度/(kg/m ³)	FR4 杨氏模量/GPa	FR4 剪切模量/GPa
数值	169	2 330	66	1 850	20	7.8

同理, 通过式(13)可以确定悬臂梁 B 结构参数 l_p 、 l_o 对扭转刚度 k_2 的影响。如图 6 所示, 扭转刚度随着 l_p 的增加而减小, 随着 w_s 的增大而增大。结合现有 PCB 加工工艺, 选取的悬臂梁结构如表 3 所示。最终整个微镜结构呈长方形, 厚度为 0.4 mm, 器件面积为 31.4 mm×57.5 mm, 理论计算谐振频率为 179.3 Hz, 位移放大倍数为 1.93。

2 有限元建模与仿真

2.1 器件模型静力学分析

为了避免器件在工作时因应力过大而发生结构断裂失效, 考虑到实际工程应用, 器件上产生的最大应力应小于 FR4 材料断裂应力的三分之一 (133.33 MPa)。图 7(a)为直接给微镜边缘施加位移载荷使其产生 ±10° 的偏转角度时, 等效应力结果显示应力最大值出现在悬臂梁内角处, 为 31.011 MPa;

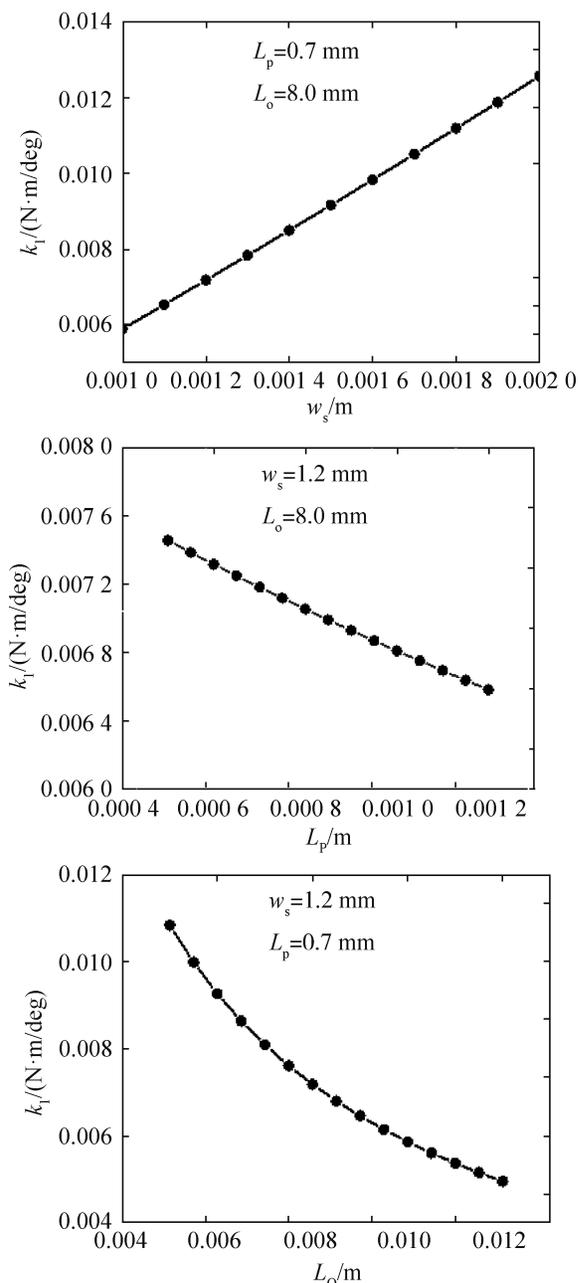


图5 悬臂梁A结构参数对扭转刚度 k_1 的影响
Fig. 5 Influence of structural parameters of cantilever beam A on torsional stiffness k_1

图7(b)显示最大剪切应力同样也出现在悬臂梁内角处,为17.066 MPa,远小于133.33 MPa。

针对抗冲击以及抗振动的需求,参考 IEC 60068-2-27(2008)环境测试标准,在Z轴方向上对器件整体施加500 G的加速度模拟冲击负载,图8(a)结果显示最大等效应力为37.779 MPa,图8(b)显示最大剪切应力为20.985 MPa,均出现在悬臂梁内直角处,远小于133.33 MPa。从仿真分析的角

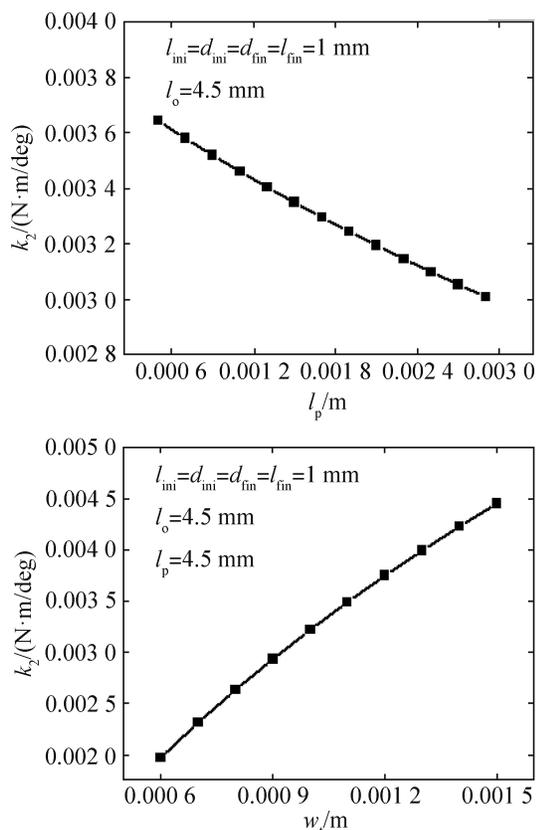


图6 悬臂梁B结构参数对扭转刚度 k_2 的影响
Fig. 6 Influence of structural parameters of cantilever beam B on torsional stiffness k_2

度说明:该器件实现大偏转角度和承载冲击负载时无断裂失效的风险,满足设计要求。

2.2 器件模型模态分析

根据如图9所示仿真结果可知:器件的一阶模态即为微镜的竖直方向上下振动,谐振频率为145.71 Hz;二阶模态即为理想运动模态,微镜绕扭转梁所在轴线进行扭转运动,谐振频率为172.15 Hz,且从分析结果上可以看出微镜的位移大于驱动器位移,从理论上可实现位移放大;三阶模态振型为微镜绕一三象限对角线进行扭转运动,最大位移出现在驱动器,谐振频率为342.42 Hz;四阶模态为微镜绕二四象限对角线进行扭转运动,谐振频率为465.03 Hz。

2.3 器件模型谐响应分析

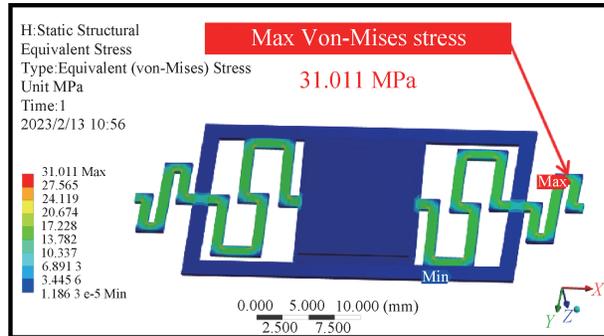
在驱动器上加大小相同、方向相反的0.000 1 N模拟扫描光栅微镜正常工作时的受力状况,利用模态叠加的方法进行谐响应分析。通过该分析得到微镜和驱动线圈的面外位移,利用三角函数计算得到微镜和驱动线圈的转角,得到器件频率响应

表 3 扫描光栅微镜悬臂梁主要结构参数

Table 3 The major structure parameters of cantilever beam of the scanning grating micromirror

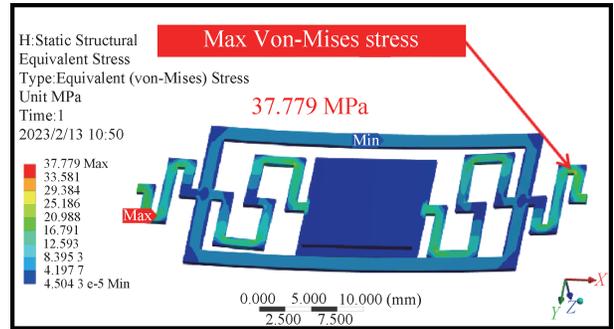
单位: mm

悬臂梁 A 参数	L_p	w_s	L_o				
数值	0.7	1.0	8.0				
悬臂梁 B 参数	l_{ini}	d_{ini}	l_p	l_o	d_{fin}	w_t	l_{fin}
数值	1.0	1.0	2.0	4.5	1.0	1.0	1.0



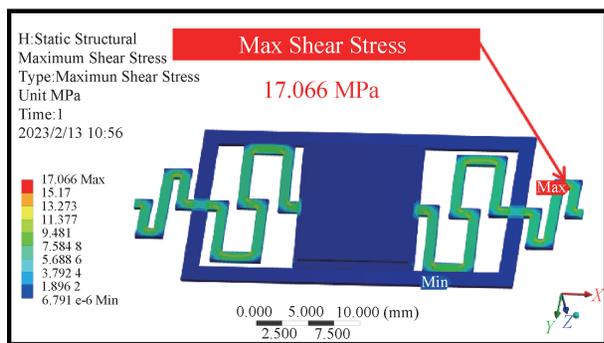
(a) 最大冯米斯应力

(a) Maximum Von-Mises stress



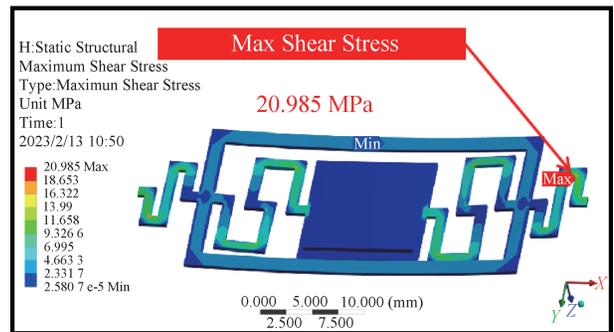
(a) 最大冯米斯应力

(a) Maximum Von-Mises stress



(b) 最大剪切应力

(b) Maximum shear stress



(b) 最大剪切应力

(b) Maximum shear stress

图 7 微镜产生 10° 偏转

Fig. 7 Micromirror produces 10° deflection angle

曲线如图 10 所示, 随着驱动信号频率的增加, 微镜转角和驱动器的位移都逐渐增加, 可清晰地看见在二阶模态即驱动频率为 172.25 Hz 时, 转角达到最大值 2.106°, 驱动线圈转角为 1.173°, 放大倍数约为 1.795。微镜在三阶模态工作时, 转角为 0.517°, 小于驱动线圈的转角 0.528°。由此可见, 该结构工作在二阶模态时可以有效地放大微镜转角。

通过静力学分析、模态分析以及谐响应分析说明: 扫描光栅微镜可在设定谐振模态下(二阶模态、172.25 Hz)实现分光的功能, 且无断裂失效的风险, 镜面与驱动线圈的位移比值(转动角度)为

图 8 给微镜施加 500 G 加速度

Fig. 8 Apply 500 G acceleration to the micromirror

1.795。仿真结果(172.25 Hz)与理论值(179.3 Hz)存在差异, 主要从两个方面考虑: 一为降低模型复杂程度, 建立理论分析模型与有限元仿真模型中, 未考虑线圈的布置及其对扭转梁刚度的影响; 二是硅光栅贴附中心点未与设计镜面中心严格对齐, 导致其转动质心与设计准则存在一定差异。

3 结束语

本文提出了一种基于复合材料 FR4 的多自由度电磁式扫描光栅微镜新结构, 建立了多自由度电磁式扫描光栅微镜的解析模型与有限元仿真模型, 提出了基于扭转刚度与转动惯量调控镜面转动位移的提升方法, 并针对微型红外光谱仪对扫描

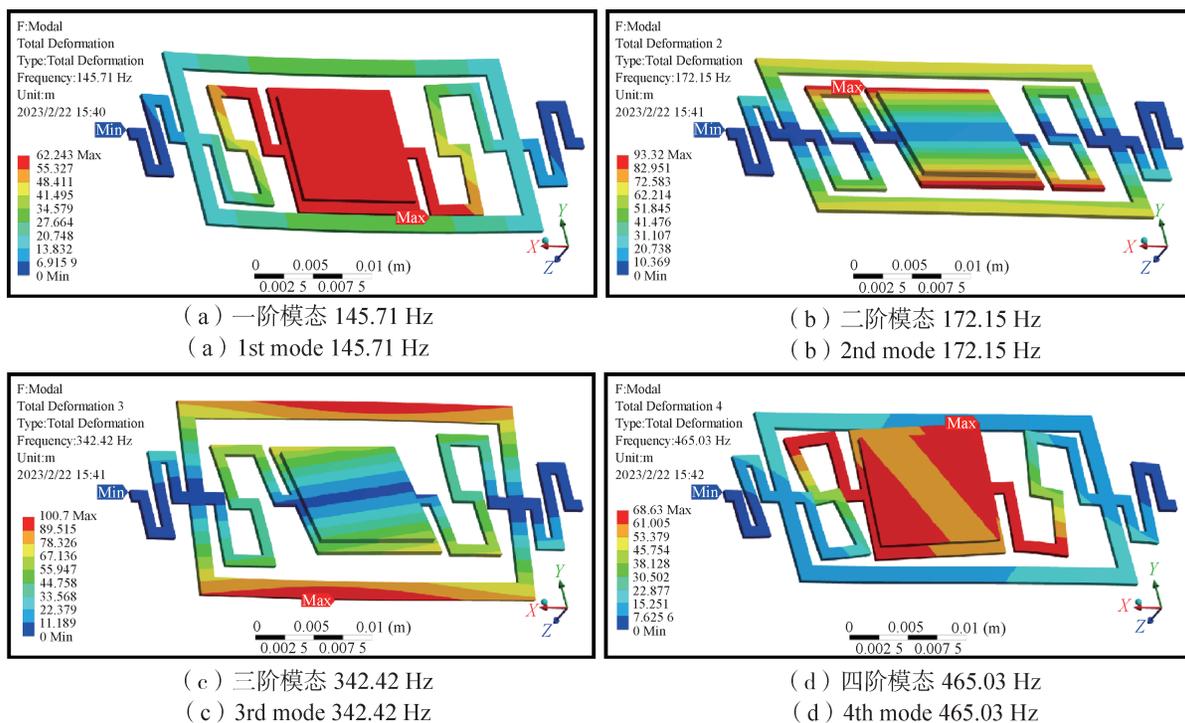


图 9 模态分析仿真

Fig. 9 Simulation results of modal analysis:

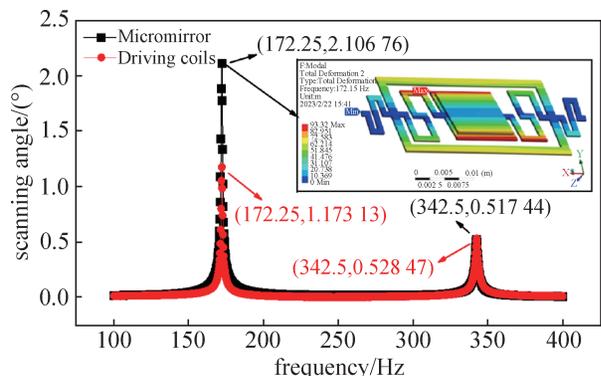


图 10 器件频率响应曲线

Fig. 10 Frequency response curve of the device:

光栅高转角、低驱动电压的技术需求,开展了器件优化与仿真。仿真结果显示:优化设计后的器件工作在设定谐振模式下时(二阶谐振、172.25 Hz), 微镜与驱动器的转角比值为 1.795 倍。

参考文献

[1] SCHULER L P, MILNE J S, DELL J M, et al. MEMS-based microspectrometer technologies for NIR and MIR wavelengths[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2009, 42(13): 133001.

[2] QIN L, GU W, WEI J, et al. Piecewise phototuning of

self-organized helical superstructures[J]. Advanced Materials, 2017: 1704941.

[3] WEDDING B B, WRIGHT C, GRAUF S, et al. Near infrared spectroscopy as a rapid non-invasive tool for agricultural and industrial process management with special reference to avocado and sandalwood industries[J]. Desalination & Water Treatment, 2011, 32(1-3): 365-372.

[4] CHAKRABORTY S, WEINDORF D C, ZHU Y, et al. Assessing spatial variability of soil petroleum contamination using visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(11): 2886-2892.

[5] In-line monitoring of the transesterification reactions for biodiesel production using NIR spectroscopy[J]. Fuel, 2014, 115(1): 46-53.

[6] 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 & Microengineering, 2013, 24(1): 5010.

[7] POREP J U, KAMMERER D R, CARLE R. On-line application of near infrared(NIR) spectroscopy in food production-ScienceDirect[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(2): 211-230.

[8] HE Z, SHU R, WANG J Y. Imaging spectrometer based on AOTF and its prospects in deep-space exploration ap-

- plication[C]// Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, SPIE, 2011.
- [9] 刘水. DMD编码成像光谱仪算法的研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [10] HUANG J M, LIU A Q, DENG Z L, et al. A modeling and analysis of spring-shaped torsion micromirrors for low-voltage applications[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, 48(6): 650-661.
- [11] WANG Z F, NOELL W, ZICKAR M, et al. A new scanning mems mirror[J]. *Microsystem Technologies*, 2007, 13(11-12): 1595-1599.
- [12] JOUDREY K, ADAMS G G, MCGRUER N E. Design, modeling, fabrication and testing of a high aspect ratio electrostatic torsional MEMS micromirror[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2006, 16(10): 2147.
- [13] KIM D H, PARK Y C, PARK S. Design and fabrication of twisting-type thermal actuation mechanism for micromirrors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 159(1): 79-87.
- [14] PAL S, XIE H. Fabrication of robust electrothermal mems devices using aluminum-tungsten bimorphs and polyimide thermal isolation[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(11): 115014-115036.
- [15] LARA-CASTRO M, HERRERA-AMAYA A, ESCAROLA-ROSAS M, et al. Design and modeling of polysilicon electrothermal actuators for a mems mirror with low power consumption[J]. *Micromachines*, 2017, 8(7): 203.
- [16] MIYAJIMA H, ASAOKA N, ISOKAWA T, et al. A mems electromagnetic optical scanner for a commercial confocal laser scanning microscope[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(3): 243-251.
- [17] OLIVEIRA L C M, BARBAROTO P R, FERREIRA L O S, et al. A novel Si micromachined moving-coil induction actuated mm-sized resonant scanner[J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2005, 16(1): 165-172.
- [18] HAN A, CHO A R, JU S, et al. Electromagnetic biaxial vector scanner using radial magnetic field[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15813.
- [19] KOH K H, KOBAYASHI T, LEE C. Investigation of piezoelectric driven mems mirrors based on single and double s-shaped PZT actuator for 2-D scanning applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 184: 149-159.
- [20] BARAN U, BROWN D, HOLMSTROM S, et al. Resonant PZT mems scanner for high-resolution displays[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(6): 1303-1310.
- [21] STOECKEL C, MEINEL K, MELZER M, et al. Static high voltage actuation of piezoelectric ALN and ALScN based scanning micromirrors[J]. *Micromachines*, 2022, 13(4): 625.
- [22] 雷宏杰. 高性能低成本微型集成扫描光栅微镜关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.

[作者简介]

周原媛 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为微型扫描光栅微镜结构设计。

袁幸权 1999年生, 硕士研究生, 主要研究方向为微型扫描光栅微镜控制系统设计。

温泉 1983年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为基于谐振机理的微纳器件与微系统(微型环境能量收集器, 微型压电传感器与执行器和微型扫描光栅微镜)等基础理论与关键技术研究。

卢国风 1999年生, 硕士研究生, 主要研究方向为表面等离子激元耦合器设计。

李东玲 1982年生, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向是先进微纳加工技术、新型智能传感器、光电功能薄膜及器件。

(本文编辑: 傅杰)