

文章编号 1004-924X(2007)05-0699-07

微机械光读出红外成像阵列器件 机械特性对其性能的影响

杨广立^{1,2}, 冯 飞², 熊 斌², 王跃林²

(1. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

摘要:研究了具有“双材料梁-微镜一体化”特征结构的光读出红外成像阵列器件的机械特性对其性能的影响。通过理论计算和 ANSYS 模拟,分析了器件的热-机械灵敏度,对器件的结构参数进行了优化,并得到其热-机械灵敏度为 2.14×10^{-3} rad/K;从器件的频率和阻尼特性出发,研究了器件的机械特性对热振动噪声和机械稳定性能的影响。研究结果表明:绝热梁断裂所需冲击载荷为 8 945 g;器件的工作气压确定在 50~200 Pa 时,其热机械噪声和外界机械振动引起的噪声对器件性能的影响可忽略。该器件基本满足红外成像阵列器件的高灵敏度、低噪声的要求。

关键词:红外成像器件;热-机械灵敏度;机械特性;热振动噪声;机械稳定性;微机械

中图分类号: TN214; TH703 **文献标识码:** A

Effect of mechanical characteristic of an micro-mechanical optically readable infrared imaging array device on its performance

YANG Guang-li^{1,2}, FENG Fei², XIONG Bin², WANG Yue-lin²

(1. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of

Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: For an optically readable infrared imaging array device with a bi-material beam micro-mirror integrated structure, the effect of mechanical characteristic of the pixel on its performance was studied. Thermal-mechanical sensitivity was analyzed by theoretic calculation and ANSYS simulation to optimize the geometric parameter and the thermal-mechanical sensitivity of 2.14×10^{-3} rad/K was obtained. Based on the study of frequency and damping, the effects of mechanical characteristic on thermal vibration noise and mechanical stability were analyzed. The results show that the mechanical impulse inducing fracture is 8 945 g, and when the working pressure is determined to be 50~200 Pa, the thermal vibration noise and noise induced by ambient mechanical vibration can be neglected. The results satisfy the requirement for infrared imaging device in high sensitivity and low noise.

Key words: infrared imaging device; thermal-mechanical sensitivity; mechanical characteristic; thermal vibration noise; mechanical stability; micro-mechanics

收稿日期:2006-11-22;修订日期:2007-02-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60407013);上海-应用材料研究与发展基金资助项目(No. 06SA04)

1 引言

红外成像技术广泛应用于生产、生活和军事等诸多领域^[1-3]。基于微机械技术发展起来的光读出红外成像阵列器件^[4-8]，由于其能在室温下工作、无需读出电路、重量小、能耗小和成本低等诸多优点越来越受到研究人员的关注。

光读出红外成像阵列器件工作原理是：当像素单元接收到红外辐射时，温度会上升，并且其本身含有的双材料梁由于双金属效应发生弯曲，带动与之连接的微镜发生位移或偏转。接收到的红外辐射的能量不同，会导致温升的差异，从而微镜发生位移和偏转的大小也不同。光学检测部分通过检测微镜输出光强的变化能够解读出微镜发生位移或偏转大小的变化和分布，最后得到以光强表征的被测物体的温度场。

双材料梁作为光读出红外成像阵列器件的敏感体，产生机械信号以实现红外辐射响应，是由热-机械灵敏度表征的，也是器件的关键性能指标之一，所以得到理想的热-机械灵敏度，是像素结构及参数设计的依据。对于既定结构的像素单元，作为一个机械结构，其自身的机械特性会影响到一些关键性能：首先由于自身产生热振动，会形成干扰敏感信号的振动噪声，是器件的等效噪声温差来源之一，等效噪声温差也是衡量器件性能优劣的主要指标之一；另外环境中的一些诸如机械振动和机械冲击等因素，会引起器件结构发生变形和振动，甚至会导致结构的损坏，这些都是对器件机械稳定性的考验。所以研究光读出红外成像阵列器件的相关机械特性是十分必要的。

“双材料梁-微镜一体化”（Bi-material Beam Micro-mirror Integrated Structure, BMB-MM）特征结构的光读出红外成像阵列器件，即将双材料梁和微镜结构集成为一个结构，通过这个结构既能实现红外敏感，又能调制和输出读出可见光信号。本文针对这种结构，利用相关理论计算结合 ANSYS 有限元模拟研究了其热-机械响应，进行了对结构参数的优化；然后以其频率特性和阻尼特性为基础，研究了器件的机械特性对热振动噪声、抗机械冲击和抗机械振动性能影响。

2 器件结构

BMB-MM 特征结构的光读出红外成像阵列器件是由一系列通过锚柱固定在 Si 衬底上的像素单元组成的。每一个像素单元结构包括 BMB-MM 结构和绝热梁（Thermal isolation beam）结构，如图 1 所示。BMB-MM 结构是由 Al 和 SiN_x 这两种热膨胀系数差异较大的材料组成的双层膜结构。其中 SiN_x 能够吸收 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 范围红外辐射使像素单元的温度升高，Al 能反射可见光。像素单元在吸收红外辐射后，双金属效应使 BMB-MM 结构发生弯曲，反射光的角度也随之发生变化，到达光学成像系统的检测部分的光强也随之变化，从而得到以可见光强表征的图像。绝热梁材料通常选择与 BMB-MM 结构中红外吸收层相同的材料，其作用是防止单元内热量过快的散失，减少单元间的串扰。

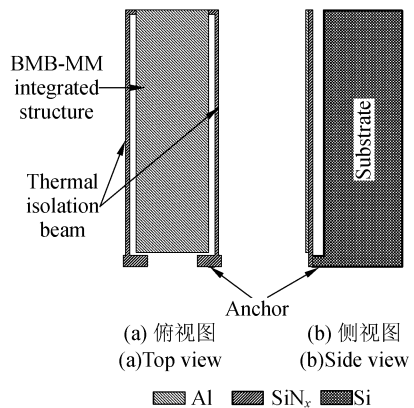


图 1 像素单元结构

Fig. 1 Pixel structure

3 热机械-灵敏度和 BMB-MM 结构参数的优化

具有 BMB-MM 结构的光读出红外成像阵列器件是将吸收红外辐射产生的热效应转换成 BMB-MM 结构的偏转，从而调制输出信号，所以热-机械响应是该器件的关键性能指标之一。在红外成像阵列器件工作时，像素单元吸收红外辐射后产生热能，BMB-MM 结构温度上升了 ΔT 。

由于材料间的热膨胀系数的差异,BMB-MM 会发生弯曲。如果沿梁长是 x 方向,求得上各处的偏移量为^[4]:

$$\delta = 3(\alpha_{Al} - \alpha_{SiN_x}) \left(\frac{n+1}{K} \right) \left(\frac{x^2}{t_{SiN_x}} \right) \Delta T, \quad (1)$$

其中 $K = 4 + 6n + 4n^2 + \phi n^3 + \frac{1}{\phi n}$, $n = \frac{t_{Al}}{t_{SiN_x}}$, $\phi = \frac{E_{Al}}{E_{SiN_x}}$, E 、 α 、 t 分别表示材料的杨氏模量、热膨胀系数和厚度。

定义升高单位温度时在整个 BMB-MM 结构上沿长度方向的平均偏转角为其热-机械灵敏度,偏转角通常很小,得到:

$$S_T = \frac{\bar{\theta}}{\Delta T} = \frac{\int_0^{L_B} \arctan\left(\frac{\partial \delta}{\partial x}\right) dx}{\int_0^{L_B} dx} \cdot \frac{1}{\Delta T} \approx 3(\alpha_{Al} - \alpha_{SiN_x}) \left(\frac{n+1}{K} \right) \left(\frac{L_B}{t_{SiN_x}} \right), \quad (2)$$

其中 L_B 表示 BMB-MM 的长度

由式(2)可知,当材料确定后,热-机械灵敏度由 BMB-MM 结构的材料厚度和长度决定:长度越长, SiN_x 材料的厚度越薄,热-机械灵敏度越高;当其它参数确定,两种材料的厚度比 $n=0.71$ 时,热-机械灵敏度达到最优,如图 2 所示;当 $L_B = 100 \mu m$, $t_{SiN_x} = 0.4 \mu m$ 时,热-机械灵敏度 $S_T = 2.14 \times 10^{-3} \text{ rad/K}$ 。

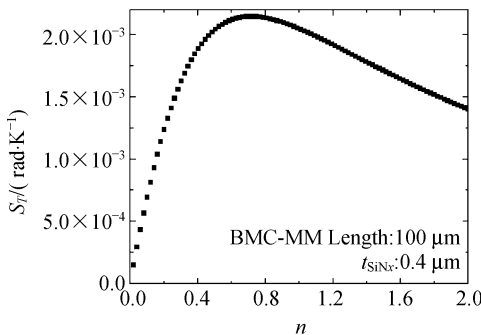


图 2 BMB-MM 材料厚度比与热-机械灵敏度的关系
Fig. 2 Effect of BMB-MM material thickness ratio on thermal-mechanical sensitivity

对像素单元进行了 ANSYS 的热应力耦合模拟。模拟中采用 solid92 单元划分网格,对锚点施加所有坐标自由度的约束,并在 BMB-MM 结构上施加 1 K 的温度载荷,得到了偏转位移场,网格划分和位移场如图 3,4 所示。

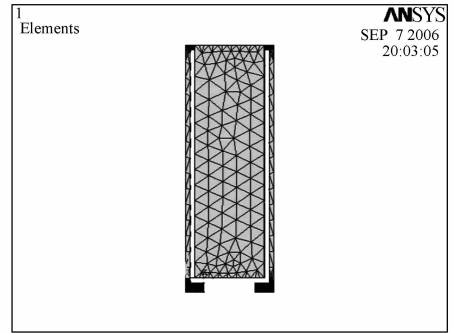


图 3 网格划分图
Fig. 3 Grid division

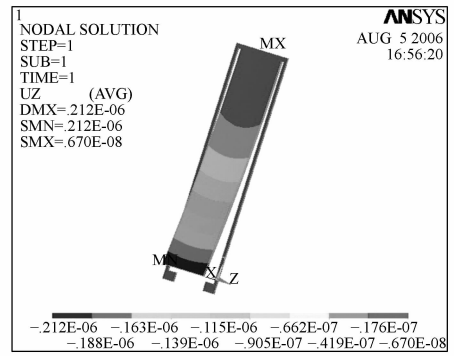


图 4 像素单元温度升高 1 K 时位移场
Fig. 4 Displacement field of pixel with temperature risen by 1 K

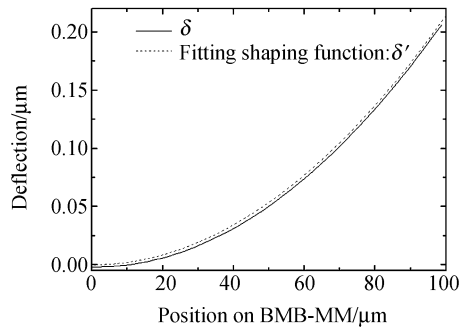


图 5 理论计算的 δ 和 ANSYS 模拟得到的 BMB-MM 在温度升高 1 K 时的形函数 δ
Fig. 5 Shaping functions get by theoretical calculation and ANSYS simulation

获得位移场中模型上适当点的坐标,拟合出双材料悬臂梁偏转后的形函数: $\delta' = -21.82x^2 + 0.44 \times 10^{-4}x + 0.18 \times 10^{-8}$,图 5 显示为拟合形函数 δ' 与通过式(1)得到的 δ 曲线的对比,可以看出两条曲线距离很近,而且基本平行。将 δ' 代入式

(2),求得 $S_T' = 2.14 \times 10^{-3}$ rad/K。ANSYS 的模拟与解析式计算的结果一致。

4 像素单元的机械特性

具有 BMB-MM 结构的像素单元作为一个机械结构^[9],并通过产生机械信号实现对红外目标的敏感,研究机械特性及其对器件性能的影响是必要的。像素单元的机械特性主要涉及频率特性和阻尼特性。

4.1 频率特性与模态分析

研究器件结构的频率特性是研究机械特性的基础和起点。

如果把 BMB-MM 结构看成一个质量块,则像素单元可以看成是两条固支的悬臂梁连接着一个质量块,近似一个弹簧-质量系统。其弹性系数为:

$$k = \frac{2E_{\sin_x} \omega_T t \sin_x}{L_T}, \quad (3)$$

$$\text{谐振频率为: } f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (4)$$

其中 $\omega_T = 2 \mu\text{m}$, $L_T = 104 \mu\text{m}$ 分别为绝热梁的宽度和长度, $m = 0.54 \times 10^{-11}$ kg 为 BMB-MM 结构的质量。理论计算得到的像素单元的谐振频率为 13 892 Hz。

利用 ANSYS 有限元模拟进行了像素单元的模态分析,得到了前五阶模态的谐振频率和振型,如表 1 和图 6 所示。可以看出,一阶模态和二阶模态都是以 BMB-MM 结构的某一端为轴,垂直

表 1 像素单元的前五阶模态的谐振频率

Tab.1 Resonant frequency of the first five models of pixel

| Modal | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| f/Hz | 13 998 | 14 802 | 63 490 | 70 065 | 357 279 |

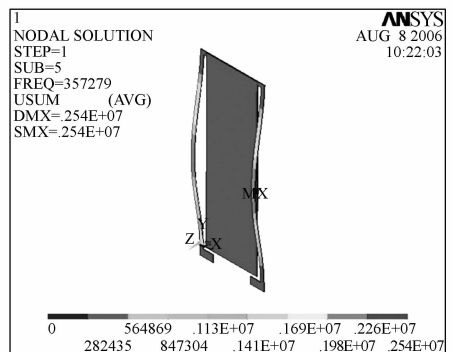
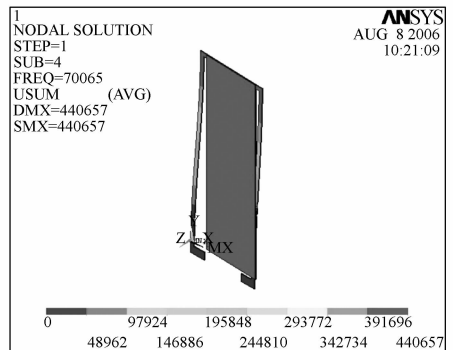
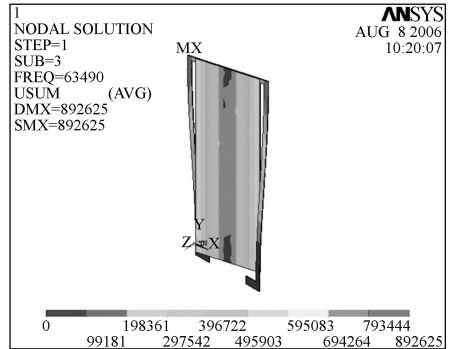
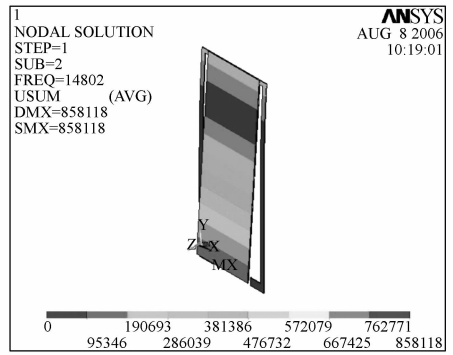
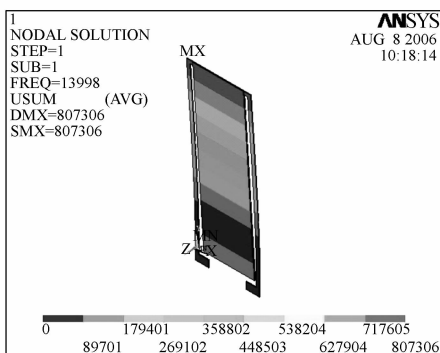


图 6 像素单元的前五阶振动模态

Fig.6 The first five modals of pixel

于其平面的转动;三阶模态是以 BMB-MM 结构平面纵向中心轴为轴心的转动;四阶模态是沿 BMB-MM 结构平面横向方向的摆动;五阶模态是绝热梁在垂直于自身平面内沿其梁长方向的波

动。其中一阶模态谐振频率的模拟结果与理论计算结果基本吻合。

4.2 阻尼特性、品质因子

任何振动系统都存在阻尼作用^[9]。光读出红外成像阵列器件需要在真空环境下工作,以减少空气对流引起的热导,在气压低于 1 000 Pa 时,阻尼主要的来源是分子阻尼。

由于器件封装在稀薄空气中(气压介于 1~1 000 Pa),根据 Christian 理论,由于空气分子的间距足够大,分子间的作用力以及摩擦可以忽略,并且气体分子的速度分布仍服从麦克斯韦分布。在 BMB-MM 结构沿法向方向运动时,阻尼力产生的原因在于:结构上下两面收到分子碰撞所引起的动量改变不同,阻尼力系数为:

$$c_r = 4\sqrt{\frac{\pi}{2V}} \frac{M_m}{RT} PA, \quad (5)$$

其中气体常数 $R=8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$, $T=300 \text{ K}$, 空气摩尔质量为 $M_m = 29 \times 10^{-3} \text{ kg}$, $A = 3 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 是 BMB-MM 的面积, P 是气体压强。

$$\text{系统的阻尼比为 } \zeta = \frac{c_r}{2\sqrt{mk}}, \quad (6)$$

$$\text{则品质因子为 } Q = \frac{2\pi fm}{c_r}, \quad (7)$$

由此可见,对于既定结构的像素单元结构,品质因子的大小需要根据气压的大小来确定。

5 机械特性对器件性能的影响

5.1 对热振动噪声的影响

热振动噪声是光读出红外成像阵列器件的主要噪声源之一,其大小直接影响等效噪声温差性能的优劣,热振动噪声是由于温度在绝对零度以上时,分子的振荡导致的结构微小的随机振动,振动的幅度为^[3]:

$$\delta_{\text{th,vib}} = \sqrt{(4K_B T \Delta f) / (2\pi f k Q)}, \quad (8)$$

其中 K_B 为波兹曼常数, $T=300 \text{ K}$ 为器件所处的环境温度, $\Delta f = 30 \text{ Hz}$ 为探测带宽。由上式可以看出,器件固有频率和品质因子都是影响热振动噪声的因素。在像素结构确定以后,固有频率也随之确定,则阻尼越大,品质因子越小,所引起的热振动幅度越大。以前的讨论表明,品质因子的大小由气压决定,研究了品质因子 Q 值和 $\delta_{\text{th,vib}}$ 与气压的关系,如图 7 所示。可以看出:在约 200 Pa

范围内,伴随着气压的升高, Q 值急速降低而 $\delta_{\text{th,vib}}$ 快速升高;气压高于这个范围时,二者随气压升高所变化的趋势趋于缓慢,并且变化的范围在同数量级内。由此可见,气压确定在 Q 值和 $\delta_{\text{th,vib}}$ 的快速变化的低压区,对减小热振动噪声更为有利。

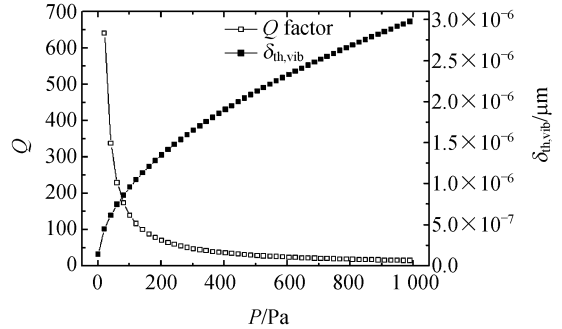


图 7 气压对 Q 值和 $\delta_{\text{th,vib}}$ 的影响

Fig. 7 Effect of pressure on Q factor and $\delta_{\text{th,vib}}$

5.2 对机械稳定性的影响

实际应用中,环境因素会使像素单元引起振动,甚至会导致结构的失效和断裂等。下面将从抗机械冲击和抗机械振动两方面入手,研究器件的机械稳定性^[9]。

5.2.1 抗机械冲击

当对器件施加一定的加速度 a 的机械冲击时,对于单条绝热梁,可以看作对绝热梁的末端施加了一个大小为 $ma/2$ 的力,根据力矩平衡原理,在固支端绝热梁的力矩为 $M=L_T ma/2$,则距离梁中性面距离为 z 的应力:

$$T = \frac{z M}{I}, \quad (9)$$

其中 I 为矩形截面的惯性力矩 $\omega_T t^3 \text{SiN}_x / 12$, 距绝热梁中性面 $z = t \text{SiN}_x / 2$, 即梁的表面产生最大应力。

在机械冲击过程中,只考虑绝热梁断裂的情况。如果产生的最大应力为 SiN_x 材料的断裂强度 460 MPa,可求得此时所施加的加速度为 8 945 g。

由于像素单元结构可以看成是一个弹簧-质量系统,在此加速度的作用下绝热梁末端发生的位移量为 $-ma/2k$,计算在 8 945 g 的加速度下绝热梁的末端位移为 $1.12 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

利用 ANSYS 模拟得到了像素单元结构的在

施加 8 945 g 的加速度体载荷时的 Von Mises 应力场,如图 8 所示。

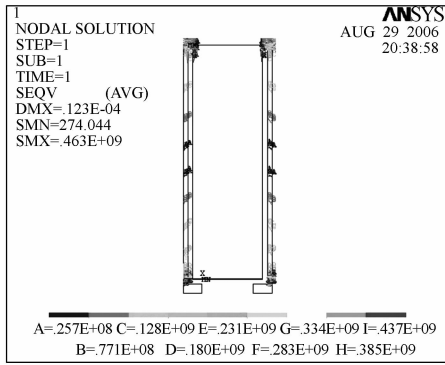


图 8 8 945 g 的冲击载荷下结构的应力分布

Fig. 8 Stress distribution in applied 8945g mechanical shocks

可看出,只有绝热梁上存在应力,最大应力出现在绝热梁与锚柱连接处和与 BMB-MM 结构连接处。最大 Von Mises 应力达到 463 MPa,此时绝热梁末端发生最大位移为 1.23×10^{-5} m,与用解析式计算的结果基本相符。

5.2.2 外力引起的机械振动

当环境中存在频率与器件固有频率大小近似的激励时,像素单元会发生共振,其振幅 A 与激励的振幅、器件固有频率和阻尼特性有关。假设激励是简谐振动的,对于弱阻尼的情况有:

$$A = \frac{F_0}{4\zeta k \sqrt{1-\zeta^2}}, \quad (10)$$

其中 F_0 为简谐激励的振幅,结构振动的平衡位置在 $-F_0/2k$ 处,则在振动中发生的最大位移为:

$$d_{\max} = A - \frac{F_0}{2k}, \quad (11)$$

由前面的抗冲击分析可知当达到 SiN_x 的断裂强度时,绝热梁末端位移为 1.12×10^{-5} m。由此得到在断裂发生时,频率为 13 892 Hz 的简谐激励的振幅 F_0 与气压的关系曲线,以及系统阻尼比与随气压变化的曲线,如图 9 所示。可以看出简谐激励振幅和阻尼比均与气压呈线性关系,并且器件的气压越大,系统阻尼比越小,能承受简谐激励的振幅越大。

研究了像素单元结构在不同气压下,施加不同脉冲外力的振动情况,如图 10 所示。可以发现,由于气压产生阻尼作用,任何脉冲外力所引起的振动的幅度会越来越小并最终稳定在平衡位

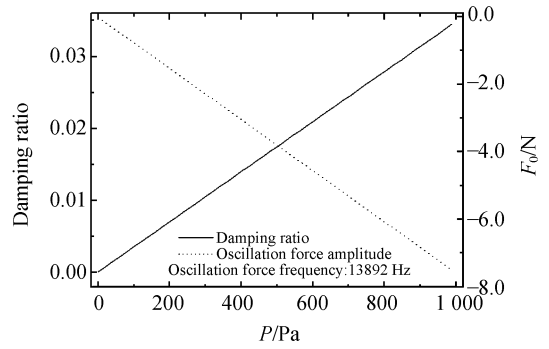


图 9 阻尼比和引起绝热梁发生断裂的简谐激励的振幅与器件气压的关系

Fig. 9 Effects of pressure on damping ratio and amplitude of harmonic motivations inducing fracture

置。振动的幅度与所施加的大小有关而与气压无关,力越大,振幅越大;振动结束的时间与气压大小有关而与所施加的力的大小无关,气压越大,振动结束的时间越短。图 11 为气压与振动结束时间的关系,可发现二者是互为倒数的关系。所以,气压适当增大有利于对脉冲外力引起的机械振动的抑制。如果红外成像系统的帧频确定为 30 Hz,应尽量使由脉冲外力引起的机械振动结束的时间小于这个范围,才不至于影响到成像。50 Pa 时对应的振动结束的时间为 32 ms。所以 50 Pa 以上的气压符合系统帧频的要求。

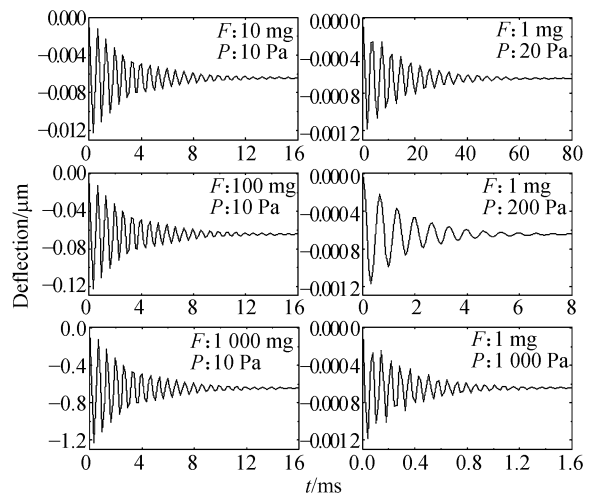


图 10 气压和脉冲力对像素单元振动的影响

Fig. 10 Effect of step force and pressure on pixel vibration

在前面的研究中,发现低气压更有利于降低热振动噪声,从而优化噪声等效温差性能。但由

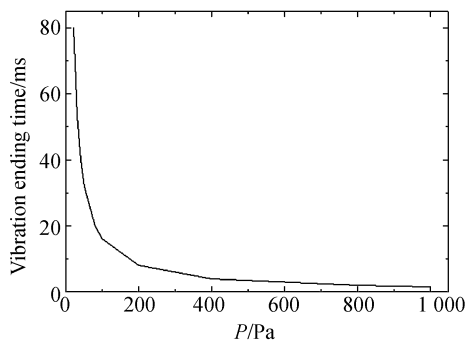


图 11 气压对脉冲力引起的振动结束时间的影响

Fig. 11 Effect of pressure on vibration ending time

于热振动噪声只是噪声等效温差的一部分来源,并且根据以往的研究发现它所占比例比较小,所以适当提高工作气压对噪声等效温差的整体影响不大。结合上文的分析考虑,50~200 Pa 是比较合适的工作气压。

6 结 论

本文研究了 BMB-MM 特征结构的红外成像

阵列器件像素单元的机械特性及其对器件性能的影响。首先通过理论计算和 ANSYS 模拟研究了其热-机械响应特性,对 BMB-MM 的结构参数进行了优化,得到像素单元的热-机械灵敏度为 2.14×10^{-3} rad/K。结合理论计算与 ANSYS 模拟,得到像素单元的五阶振动模态的频率和振型,并研究了频率特性和阻尼特性对热振动噪声和机械稳定性的影响。在抗机械冲击研究中得到绝热梁断裂所需施加的极限加速度冲击载荷为 8 945 g,此时绝热梁末端的位移为 1.12×10^{-5} m。在热振动噪声和抗外力机械振动的研究中,主要研究了气压对既定像素结构的品质因子、热振动噪声和抗外力振动与冲击能力的影响,发现封装气压较小,有利于提高品质因子和降低热振动噪声,但不利于抑制由外力振动和冲击引起的振动,基于对等效噪声温差影响的程度和成像系统的帧频考虑,50~200 Pa 是比较合适的工作气压。

参考文献:

- [1] 张云深,王义玉. 红外成像跟踪技术的现状和发展[J]. 光学精密工程,1994,2(3): 52-5.
ZHANG Y SH, WANG Y Y. Status and development of infrared image tracking technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1994, 2(3): 52-55. (in Chinese)
- [2] 纪新明,吴飞蝶,王建业,等. 一种可直接脉冲调制的 MEMS 红外激发源[J]. 光学精密工程,2005,13(2): 144-150.
JI X M, WU F D, WANG J Y, *et al.*. MEMS directly modulating wideband IR thermal source[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 144-150. (in Chinese)
- [3] 许中胜. 红外探测系统参数关系及实际应用[J]. 光学精密工程,1999,7(4): 81-85.
XU ZH SH. Infrared detection system parameter relation formula and practical application[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(4): 81-85. (in Chinese)
- [4] MAO M, PERAZZO T, KWON O, *et al.*. Direct view uncooled micro-optomechanical infrared camera[C]. *IEEE International MEMS'99 Conference, USA, Orlando*, 1999: 105-109.
- [5] SENESAC L R, CORBEIL J L, RAJIC S, *et al.*. IR imaging using uncooled microcantilever detectors[J]. *Ultra-microscopy*, 2003, 97: 451-458.
- [6] 冯飞,焦继伟,熊斌,等. 一种新颖的基于 MEMS 技术的光读出热成像系统性能的分析与制作[J]. 红外与毫米波学报,2004,23(2): 125-130.
FENG F, JIAO J W, XIONG B, *et al.*. Design and fabrication of a novel optically readable thermal imaging system based on MEMS technology[J]. *Journal Infrared Millimeter and Waves*, 2004, 23(2): 125-130. (in Chinese)
- [7] ISHIZUYA T, SUZUKI J, AKAGAWA K, *et al.*. 160×120 pixel optically readable biomaterial infrared detector [C]. *IEEE MEMS*, 2002: 578-581.
- [8] DUAN ZH H, ZHANG Q CH, WU X P, *et al.*. Uncooled optically readable bimaterial micro-cantilever infrared imaging device[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, 20(12): 2130-2132.
- [9] BAO M H. *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*[M]. Amsterdam, Oxford: Elsevier, 2005.

作者简介:杨广立(1977-),女,中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士研究生,主要从事 MEMS 光读出红外成像阵列器件的研究。E-mail: yanggl@mail.sim.ac.cn