

热应力对非制冷红外焦平面微桥的影响及控制研究

王志 许向东 周东 杨卓 蒋亚东 陈超

(电子科技大学光电信息学院电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要 非制冷红外焦平面阵列的微桥结构在微加工工艺中,由于温度的剧烈变化,在薄膜中产生热应力而引起微桥的变形,将对器件产生不利影响。利用有限元分析方法,对微桥在热应力作用下产生的变形进行了分析,提出了两种控制热应变的途径:1)选择一种低热膨胀系数、低杨氏模量的电极材料;2)在电极材料的表面沉积一层 SiN_x 薄膜。仿真结果表明,两种途径使微桥的最大形变值从 $1.4740\ \mu\text{m}$ 分别减小到 $0.4799\ \mu\text{m}$ 和 $0.0704\ \mu\text{m}$,达到了减小热应变的目的。

关键词 薄膜;非制冷红外焦平面阵列;热应力;有限元分析;微桥结构;形变

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0331002

Study on Effect of Thermal Stress on Microbridges of Uncooled IRFPA and Controlling Methods

Wang Zhi Xu Xiangdong Zhou Dong Yang Zhuo Jiang Yadong Chen Chao

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract In the micro-fabrication process of microbridges of uncooled infrared focal plane arrays (IRFPA), the microbridges are deformed by the thermal stress in thin films due to the acute temperature changes. Such deformation is harmful to the devices. The deformation of the microbridges is analyzed and two ways to control the deformation are presented: 1) choosing a better electrode material which has a lower thermal expansion coefficient and smaller Young modulus; 2) adding another SiN_x thin film on the surface of electrode. Results indicate that by using above two ways, the deformation can be efficiently reduced from $1.4740\ \mu\text{m}$ to $0.4799\ \mu\text{m}$ and $0.0704\ \mu\text{m}$ respectively, the aim of controlling the deformation is achieved.

Key words thin films; uncooled infrared focal plane arrays (IRFPA); thermal stress; finite element analysis (FEA); microbridge structure; deformation

OCIS codes 310.4165; 310.4925; 250.0040; 310.68451

1 引言

微测辐射热计非制冷红外探测器具有体积小、成本低以及可靠性高等优点,使其成为目前非制冷红外成像技术中主要的研究对象之一^[1]。为了热绝缘的需要,微测辐射热计采用悬空的微桥结构。微桥采用硅表面微加工工艺制作,其工艺步骤包括生长牺牲层,沉积支撑层、热敏感层及电极材料以及释放牺牲层等^[2]。遗憾的是,经过这些工艺制作的微桥往往会发生卷曲变形^[3]。微桥的变形会影响红外共振吸收腔的性能,降低像元的红外吸收率,从而降

低探测器的响应率。另外,较大的变形可能使微桥损坏,器件失效。Hideo Wada等^[3]采用调整支撑层和钝化层厚度的方法来减小微桥的变形,使桥面平坦,但是并没有讨论变形的原因。杨晓喻^[4]、李素等^[5]分析了重力作用下微桥的形变情况。Senturia^[6]认为,在微尺度下,薄膜的残余应力是影响微系统的主要因素。钱进^[7]、肖祁陵^[8]的研究表明,热应力是产生残余应力的重要因素。Motohisa等^[9]讨论了在残余应力作用下Pt/ SiN_x 双层结构微桥的变形,测得微桥的变形值最大达到 $10\ \mu\text{m}$ 。冯

收稿日期: 2010-06-12; 收到修改稿日期: 2010-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(61071032)和国家重点实验室开放基金(KFJJ200917)资助课题。

作者简介: 王志(1985—),男,硕士研究生,主要从事非制冷红外焦平面结构方面的研究。E-mail: zwuestc@163.com

导师简介: 许向东(1969—),男,博士,副教授,博士生导师,主要从事光电材料与器件等方面的研究。

E-mail: xdxu@uestc.edu.cn(通信联系人)

艳等^[10]分析了热应力对光纤布拉格光栅(FBG)传感器的影响,研究表明热应力对FBG起到了温度增敏的作用。上述表明,热应力对微结构有着重要的影响。Hsueh^[11]、Olsen等^[12]对热应力在多层薄膜中的分布进行了研究。这些研究基于经典的梁弯曲理论,仅考虑了薄膜与衬底的作用,而忽略了薄膜之间的作用,这难免会引入误差。计算机技术的发展,使得数值求解复杂问题变得容易。Jun-Hyub Park等^[13]采用有限元分析方法研究了微机电系统(MEMS)器件中多层薄膜的热应力分布情况,并研究了热应力对器件寿命的影响。马良等^[14]利用ANSYS软件对金属激光立体成形热应力场进行了仿真。这些工作对相关器件的研制具有重要意义。

热应力引起的微桥形变对于微测辐射热计是不利的,如若处理不好,将严重影响器件性能。遗憾的是,目前为止,只有极少量的文献涉及相关内容,缺乏系统的深入研究。本文主要研究微桥结构中热应力的分布情况,在此基础上,寻求热应力的控制途径,消除热应力对器件的不利影响。该研究结果对于提高微测辐射热计非制冷红外探测器的成品率、稳定器件性能具有重要意义。

2 模拟方法

2.1 热应变和热应力的计算公式

热应力是由于薄膜和基底材料热膨胀系数的差异引起的,所以也称为热失配力^[7]。热膨胀系数是材料的固有性质,不同材料的热膨胀系数可能会有很大的差异,这种差异是基底上外延生长薄膜时产生残余应力的主要原因。热应力作用下薄膜的热应变为^[7]

$$\epsilon_{th} = \int_{T_1}^{T_2} [\alpha_f(T) - \alpha_s(T)] dT, \quad (1)$$

表1 微桥的结构参数及材料性能

Table 1 Microbridge's structural parameters and material properties

Materials	Young modulus /GPa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion (CTE) /(10^{-6} K^{-1})	Width / μm	Thickness / μm
SiN _x	300	0.26	3.2	3	0.5
NiCr	200	0.312	13.3	1	0.1
Al	70	0.3	25	1	0.1
Au	78	0.42	14.2	1	0.1
Ti	110	0.3	8.6	1	0.1

NiCr是一种常用的电极材料,所以首先采用NiCr作为电极。当微桥采用NiCr作为电极时,图1所示为微桥热应变分布的情况,图下黑白灰度变化表示了形变量的变化。从图1中可以看出,微

桥发生了严重的凹形卷曲。图2所示情形为微测辐射热计微桥制造中经常出现的形变,类似情形日本NEC公司也曾进行报道^[3]。仿真得到的结果(图1)与图2极为相似。这说明,上述所做的假设是比较

$$\epsilon_{th} = (\alpha_f - \alpha_s) \Delta T, \quad (2)$$

式中 $\Delta T = T_2 - T_1$,表示温度的变化。从(2)式可以看出,热应变是与材料的热膨胀系数差以及温度的变化量成正比的。

根据胡克定律,薄膜热应力为^[7]

$$\sigma_{th} = \left(\frac{E}{1-\nu} \right)_f \epsilon_{th}, \quad (3)$$

式中 E 和 ν 分别为薄膜的杨氏模量和泊松比。

2.2 微桥的热应变分析

在(1)式和(3)式中,已经给出了热应力和热应变的表达式,但是,由于微桥是由多层膜构成的复杂结构,很难通过以上两式给出微桥热应力分析的解析结果。本文采用数值分析方法,利用ANSYS有限元分析程序对微桥的热应力进行分析^[15]。在本文仿真中,研究的微桥形状为L形,像素尺寸为 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$,支撑层材料为SiN_x薄膜,金属电极为NiCr。对于其它形状的微桥,也取得了类似的研究结果。

在仿真分析时,还作了如下假设:1)在微桥的变形中,电极与支撑层之间的热应力是主要因素;2)薄膜制备温度都为570 K,观测变形的温度为300 K;3)桥墩是牢固铆钉在衬底上的,所以设定桥墩处位移为0。

3 结果与讨论

根据以上假设,在仿真分析时,设置的边界条件为:1)设定参考温度为570 K;2)设定微桥形变的观测温度为300 K;3)在微桥桥墩处设定位移为0。分析中微桥的结构参数及材料性能如表1所示^[6,16,17]。

合理的。图 1 还显示,微桥最大的形变发生在远离桥墩和桥面的拐角处,最大变形位移为 $1.4740 \mu\text{m}$ 。如此大的形变显然会影响微桥的正常工作,甚至可能导致桥腿折断、微桥坍塌等严重后果。所以,有必要设法减小这种不利变形。

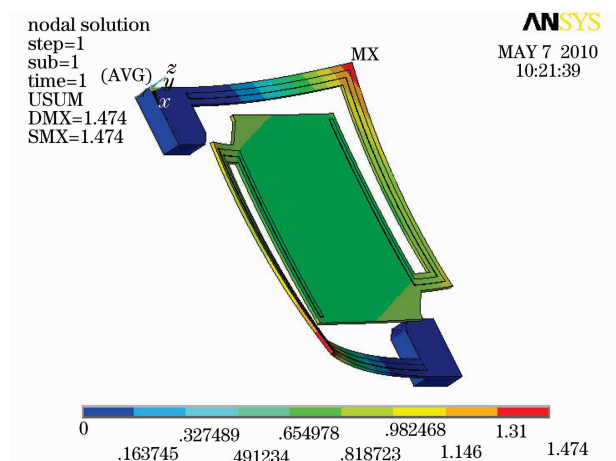


图 1 NiCr 电极微桥的热应变分布

Fig. 1 Thermal strain distribution of microbridge with NiCr electrode



图 2 发生形变的微桥

Fig. 2 Deformed microbridges

探究微桥发生变形的原因,发现是由于 SiN_x 薄膜与 NiCr 电极的热膨胀系数不同而引起的,如表 1 所示。 SiN_x 薄膜的热膨胀系数比 NiCr 电极的小,当温度从 570 K 降为 300 K 时, SiN_x 和 NiCr 薄膜都会发生收缩,但是,两者的收缩量不同。其中 SiN_x 薄膜的收缩小,而 NiCr 电极收缩大,从而导致微桥发生向上的弯曲,如图 1 所示。

4 微桥形变的控制

为了控制像图 1 所示的微桥形变,一种常规的解决方案是变换电极材料。Al, Au 和 Ti 也是常用的电极材料,它们材料性能如表 1 中所示。所以,首先将微桥中的电极分别替换成 Al, Au 和 Ti。图 3 为更换电极材料后微桥的变形情况仿真结果。从图 3(a)可以看出,微桥的热应变分布并没有发生

明显变化,但是最大的变形位移减小为 $1.2760 \mu\text{m}$,这说明电极换为 Al 后,微桥的变形减小了,桥面变得更加平坦。从表 1 中可知,Al 的热膨胀系数为 $25 \times 10^{-6}/\text{K}$,比 NiCr 的热膨胀系数大,由(2)式可得,热膨胀系数之差增大,微桥的变形应该增大,这似乎出现了矛盾的地方。但是,经仔细研究发现,微桥的变形还与材料的力学性能有关。从表 1 中可知,Al 的杨氏模量为 70 GPa,而 NiCr 的杨氏模量为 200 GPa。可见,电极较小的杨氏模量可以减小微桥的变形。

图 3(b)所示为采用 Au 作电极后,微桥的最大变形位移为 $0.8282 \mu\text{m}$ 。与 Al 电极相比,它们的杨氏模量相差不大,但是 Au 的热膨胀系数比 Al 小,所以微桥的最大变形位移有所减小。图 3(c)为采用 Ti 作为电极的微桥的热应变,从图中可以得出,微桥的最大变形位移减小为 $0.4799 \mu\text{m}$,这说明电极换为 Ti 后,与 NiCr, Al 和 Au 等电极相比,微桥形变都大大地减小,而微桥也更加平坦。这是因为, Ti 比 NiCr, Al 和 Au 具有更小的热膨胀系数,而杨氏模量与 Al 和 Au 又相差不大。由此可以预测:电极的热膨胀系数越接近 SiN_x 薄膜,杨氏模量越小,微桥的形变将越小。

上述是从电极种类的改变来调控微桥的热应力,结果显示,材料的选择非常重要。在以上 4 种电极材料中, Ti 电极微桥的形变位移最小。然而,材料的有限种类决定了这种方法有限的调节范围。下面从调整薄膜结构的角度进行热应力的控制。

图 4(a)所示为在 NiCr 电极上继续沉积一层 $0.2 \mu\text{m}$ 厚的 SiN_x 薄膜后,微桥的热应变情况。令人惊奇的是,这种情况下,微桥的最大形变位移竟减小到 $0.2607 \mu\text{m}$,与未沉积 SiN_x 薄膜时的最大变形位移 $1.4740 \mu\text{m}$ 相比,减小非常明显,甚至优于采用 Ti 电极的结果[图 3(c)]。这是因为在热应力作用下,下层氮化硅薄膜有向上弯曲的趋势,而上层氮化硅薄膜有向下弯曲的趋势,而最终效果是二者的综合抵消,由此使微桥的变形减小。此外,由于 SiN_x 薄膜具有高致密性的特点,上层 SiN_x 薄膜还可以作为钝化层保护电极。

类似地在 Ti 电极表面沉积一层 $0.2 \mu\text{m}$ 厚的 SiN_x 薄膜后,微桥的热应变分布如图 4(b)所示。从图 4(b)中可以看出,微桥的最大变形位移进一步减小到 $0.0704 \mu\text{m}$,与微桥的尺寸 $50 \mu\text{m}$ 相比,这样的形变已经十分微小,可以忽略不计。上述研究结果显示,结构是另一个影响微桥形变的重要因素。通

过薄膜结构的优化,可以弥补材料性能的不足,获得更加平坦的微桥。与通过电极种类的改变来调控微

桥热应力的方法相比,结构调节具有更加广阔的改造空间。

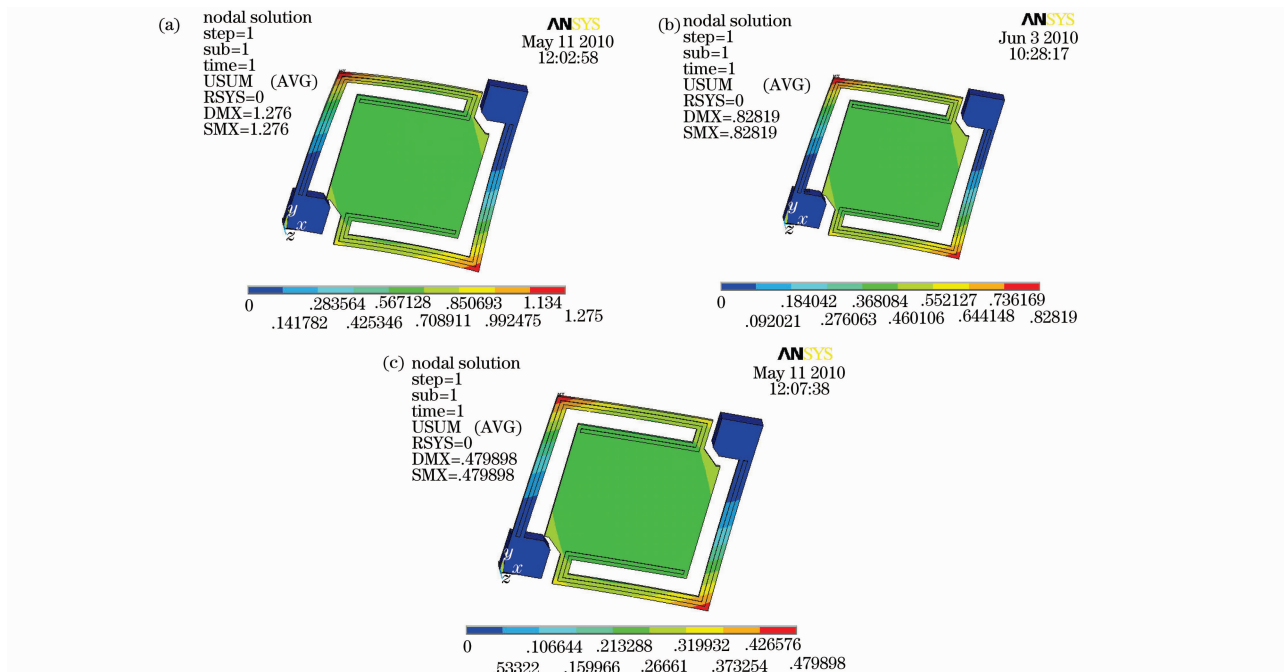


图 3 采用不同电极的微桥的热应变分布。(a) Al 电极, (b) Au 电极, (c) Ti 电极

Fig. 3 Thermal strain distribution of microbridges with different electrodes. (a) Al electrode, (b) Au electrode, (c) Ti electrode

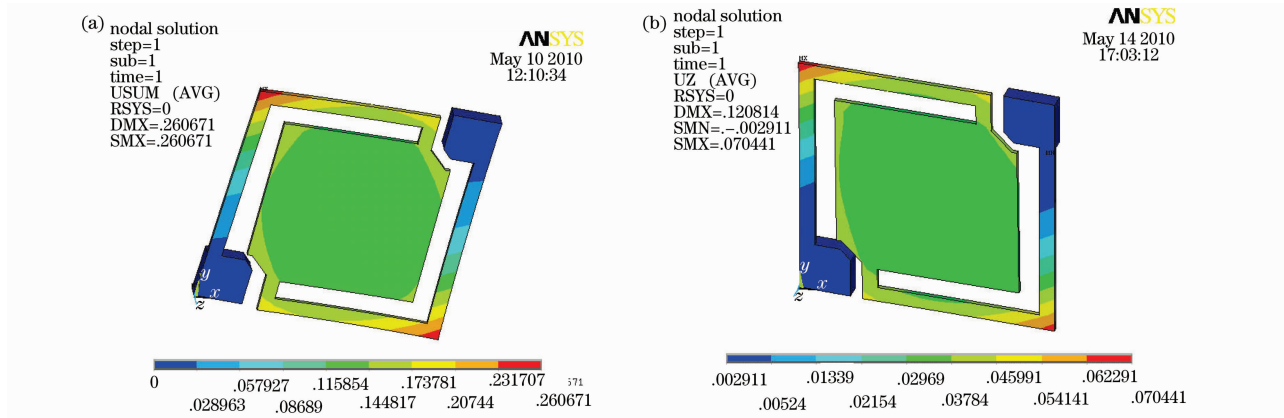


图 4 微桥的热应变分布。(a) NiCr 电极表面和(b) Ti 电极表面进一步沉积 $0.2 \mu\text{m}$ SiN_x 薄膜

Fig. 4 Thermal strain distribution of microbridges. $0.2 \mu\text{m}$ SiN_x thin film further deposited on (a) the surface of NiCr electrode and (b) the surface of Ti electrode

综上所述,通过研究微桥变形的原因,提出两条减小微桥变形的途径:1)选择一种跟 SiN_x 薄膜的热膨胀系数更接近、杨氏模量更小的电极材料;2)改变薄膜结构,即在电极材料上再沉积一层 SiN_x 薄膜,使其产生向下的弯曲形变,从而与下层 SiN_x 薄膜向上的弯曲形变相抵消,达到减小微桥变形的目的。综合这两条途径,可以进一步减小微桥的形变。此外,从(2)式还可发现,若使 ΔT 减小,热应变也会减小。所以,在保证薄膜质量的前提下,适当减小薄膜

制备及退火温度,也可以在一定程度上减小微桥的形变。

5 结 论

由于微桥加工工艺中,结构温度的变化,不可避免地引入热应力,引起微桥变形。虽然前人已经给出了热应力在多层膜中分布的解析解,但是这些解析解只能在一定的假设下对规则几何形状的结构才能求得,具有明显的局限性。本文利用有限元分析

方法分析了微桥热应变的分布情况,并通过材料调节和结构调节来控制热应力。选择 Ti 作电极材料可以使微桥的最大形变量从 $1.4740\ \mu\text{m}$ 减小为 $0.4799\ \mu\text{m}$ 。但是可供选择的电极材料种类是有限的,并且在非制冷红外探测器像元的设计中还要考虑其它非力学的因素。因此,需要找到其它控制微桥形变的有效方法。本文研究表明,通过调整微桥多层薄膜的结构,能使微桥的最大形变量进一步减小为 $0.0704\ \mu\text{m}$,与材料调节方法相比,结构调节方法控制形变的效果更好,其灵活性、可重复性也更优。另外,降低薄膜制备及退火温度,优化氮化硅薄膜的性能也可以使微桥的形变减小。该成果为非制冷红外焦平面器件的优化设计与制备提供了理论依据。

参 考 文 献

- Gong Yuguang, Li Wei, Cai Haihong *et al.*. Simulation of microbolometers based on α -Si: H thin films with thermal and mechanical performance [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2009, **22**(8): 1122~1126
龚宇光,李 伟,蔡海洪等.非晶硅微测辐射热计热学和力学仿真研究[J].传感技术学报,2009,**22**(8):1122~1126
- Wang Tao, Jiang Yadong, Chen Chao *et al.*. Preparation method of a kind of uncooled IRFPAs [P]. China Patent, CN 101357747A
王 涛,蒋亚东,陈 超等.一种非制冷红外焦平面微桥结构的制备方法[P].中国专利,CN 101357747A
- Hideo Wada, Mitsuhiro Nagashima. Fabrication process for 256×256 bolometer-type uncooled infrared detector[C]. *SPIE*, 1997, **3224**: 40~51
- Yang Xiaoyu, Jiang Yadong, Wu Zhiming *et al.*. The optimized design of microbolometer [J]. *Chinese J. Electron. Devices*, 2007, **30**(4): 1171~1174
杨晓喻,蒋亚东,吴志明等.微测辐射热计的优化设计[J].电子器件,2007,**30**(4):1171~1174
- Li Su, Wu Zhiming, Jiang Yadong *et al.*. Performance analysis of microbolometer microbridge structure [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2006, **19**(5): 1728~1730
李 素,吴志明,蒋亚东等.微测辐射热计微桥结构性能分析[J].传感技术学报,2006,**19**(5):1728~1730
- Stephen D. Senturia. *Microsystem Design*[M]. Liu Zewen *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. 136~137
森图里亚.微系统设计[M].刘泽文等译.北京:电子工业出版社,2004.136~137
- Qian Jin, Liu Cheng, Zhang Dacheng *et al.*. Residual stress in micro-electro-mechanical systems [J]. *J. Mechanical Strength*, 2001, **23**(4): 393~401
钱 进,刘 徽,张大成等.微电子机械系统中的残余应力问题[J].机械强度,2001,**23**(4):393~401
- Xiao Qiling, Shao Shuying, Shao Jianda *et al.*. Influences of oxygen partial and deposition rate on residual stress of YSZ thin films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1195~1199
肖祁陵,邵淑英,邵建达等.氧分压和沉积速率对YSZ薄膜残余应力的影响[J].中国激光,2009,**36**(5):1195~1199
- Motohisa Taguchi, Kaoru Kawata, Tsukasa Matsuura *et al.*. Deformation control of metal/nitride microbridges [J]. *IEICE Trans. Electron.*, **80**(2): 221~225
- Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong *et al.*. Temperature sensitization model of fiber Bragg grating with metal coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 336~341
冯 艳,张 华,李玉龙等.金属化保护的光纤布拉格光栅温度传感模型[J].光学学报,2009,**29**(2):336~341
- C. H. Hsueh. Thermal stress in elastic multilayer systems [J]. *Thin Solid Films*, 2002, **418**(2): 182~188
- G. H. Olsen, M. Ettenberg. Calculated stress in multilayered heteroepitaxial structures [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(6): 2543~2547
- Jun-Hyub Park, Hyeon-Chang Choi. FEM analysis of multilayered MEMS device under thermal and residual stress [J]. *Microsystem Technologies*, 2005, **11**(8-10): 925~932
- Ma Liang, Huang Weidong, Yu Jun *et al.*. Parametric finite element model of temperature/stress field evolution by metal laser solid forming [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3226~3232
马 良,黄卫东,于 君等.金属激光立体成形热应力场参数化有限元模型[J].中国激光,2009,**36**(12):3226~3232
- Liu Xiangxin, Meng Xianyi. Basis and Application of ANSYS [M]. Beijing: Science Press, 2006. 470~476
刘相新,孟宪颐. ANSYS 基础与应用教程[M].北京:科学出版社,2006.470~476
- Tai-ran Hsu. MEMS & Microsystems Design and Manufacture [M]. Wang Xiaohao *et al.* Transl.. Beijing: China Machine Press, 2004. 225
徐泰然. MEMS 和微系统设计与制造[M].王晓浩等译.北京:机械工业出版社,2004.225
- Li Biao. Design and simulation of an uncooled double-cantilever microbolometer with the potential for $\sim\text{mK}$ NETD [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2004, **112**(2-3): 351~359