

文章编号 : 0253-2239(2001)06-0744-05

微悬臂梁探测器的理论模型及优化设计^{*}

刘月明¹⁾²⁾ 刘君华¹⁾ 张少君²⁾

(1), 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)
(2), 西安理工大学理学院, 西安 710048

摘要: 对基于微悬臂梁的光学和红外探测技术进行了理论分析, 并建立了相应的理论模型, 在此基础上对该类探测器进行了优化设计, 包括微悬臂梁材料的优化选择、金属镀膜材料及厚度的优化选择以及光辐射吸收层材料的选择。最终给出了一种新型的三层结构微悬臂梁探测器, 理论上这种新型结构的探测器比现报道的同类探测器灵敏度高出 20 多倍, 噪声等效功率降低了 85%~70%。

关键词: 微悬臂梁; 探测器; 光辐射; 优化设计

中图分类号: TN202 文献标识码: A

1 引 言

利用微悬臂梁技术实现光学和红外探测是近几年出现的一种新技术^[1~4], 目前, 该研究主要集中在美、英等少数发达国家^[1]。这种技术与传统的红外探测方法相比具有诸多优点: 第一, 基于半导体工艺的微悬臂梁体积小, 其典型尺寸的长度为 $100\ \mu\text{m} \sim 200\ \mu\text{m}$, 宽度为 $10\ \mu\text{m} \sim 50\ \mu\text{m}$, 厚度为 $0.4\ \mu\text{m} \sim 4\ \mu\text{m}$, 因此这种探测器易于集成为一维或三维的单片器件, 尤适用于红外成像系统; 第二, 这种基于微悬臂梁的红外探测器具有极高的分辨率, 其值可达 $10\ \text{pW}^{[2]}$; 第三, 通过在微悬臂梁上镀上不同的光辐射吸收材料, 可实现对不同波段光的辐射探测, 故该种探测技术具有灵活的光谱响应范围; 第四, 微悬臂梁通过半导体硅微机械加工工艺制成, 故可成批生产, 从而降低器件的成本。正由于该类探测器的上述优点, 目前, 它已经成为光学和红外探测的又一重要发展方向。

用微悬臂梁进行光学和红外探测, 主要基于微悬臂梁在光辐射下的热挠曲, 实现对辐射光的探测。为提高探测灵敏度, 通常需要在微悬臂梁表面镀一层光辐射吸收膜, 这样做目的有两个: 一是微悬臂梁进行镀膜后, 成为双层结构, 由于双层材料存在的“双金属热挠曲效应”, 微悬臂梁的热挠曲将大大增加; 二是微悬臂梁的镀膜同时可作为光辐射吸收层,

提高微悬臂梁对光辐射的吸收系数, 提高热挠曲度。目前通常选择的镀膜材料为高吸收系数、高热胀系数和比热的金属材料^[2~5], 如铝、金、铬等。但是, 这种双层金属镀膜结构的微悬臂梁探测器存在不足之处, 那就是金属镀膜虽能提高热挠曲效率, 但对光辐射的吸收系数太小, 从而又影响了热挠曲效率, 比如铝对 $670\ \mu\text{m}$ 光辐射的吸收系数只有 8.5% 左右。为解决这一问题, 本文优化设计了一种三层结构的微悬臂梁探测器。

2 微悬臂梁光学和红外探测的理论模型及实验验证

2.1 理论模型

图 1(a) 所示为镀膜后双层微悬臂梁的结构简图和挠曲图, 硅基材料的厚度、热膨胀系数、热导率和弹性模量分别为 t_2 、 α_2 、 λ_2 和 E_2 ; 而金属镀层的厚度、热膨胀系数、热导率和弹性模量分别为 t_1 、 α_1 、 λ_1 、和 E_1 。假设在环境温度为 T_0 时悬臂梁未发生热挠曲, 则当微悬臂梁在光辐射下温度由 T_0 升高到 $T_0 + \Delta T$ 时, 悬臂梁将发生热挠曲, 其自由端的最大挠度为 δ , 如图 1(b) 所示。

由弹性力学的梁弯曲理论, 考虑到热应力作用, 则悬臂梁的挠曲微分方程可表达为^[3]

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \alpha(\alpha_1 - \alpha_2) \left\{ \frac{t_1 + t_2}{t_2 K} \right\} (T - T_0), \quad (1)$$

式中, $T - T_0$ 为光辐射下微悬臂梁相对于环境的温度分布, K 为与双层材料有关的常数, 其值为:

^{*} 国家自然科学基金(69776037) 陕西省教委专项科研计划项目(00JK263)

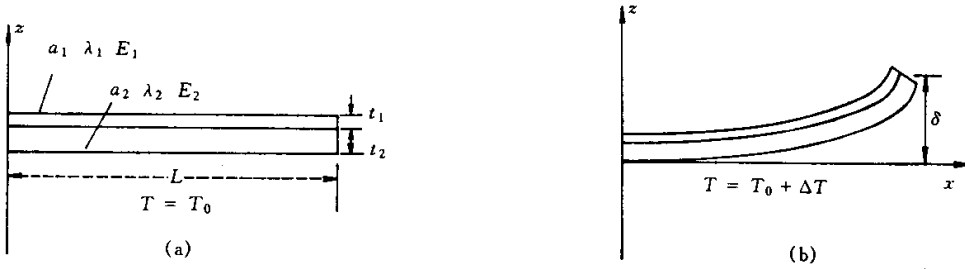


Fig. 1 The structure and deflection of the microcantilever. (a) Structure ;(b) Deflection

$$K = 4 + 6\left(\frac{t_1}{t_2}\right) + 4\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 + \frac{E_1\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^3}{E_2} + \frac{E_2\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{E_1}$$

求微分方程(1)并注意到边界条件：

$$z|_{x=0} = 0, \quad \frac{dz}{dx}|_{x=0} = 0,$$

则求得悬臂梁的挠曲方程为：

$$z = \alpha_1 - \alpha_2 \left\{ \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right\} (T - T_0) x^2. \quad (2)$$

由(2)式可知,悬臂梁的最大挠度在 $x = L$ 处,为：

$$\delta = z|_{\max} = \alpha_1 - \alpha_2 \left\{ \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right\} (T - T_0) L^2. \quad (3)$$

由(3)式可以看出,光辐射下的温度探测可由微悬臂梁的挠度进行检测。

下面分析微悬臂梁用于光辐射的光强度探测。首先考虑光辐射均匀照射到微悬臂梁镀膜上的情况,由一维热传导理论,可推导出悬臂梁中的温度分布为：

$$(T - T_0)(x) = \frac{P\eta}{2LW(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} x^2, \quad (4)$$

P 为红外辐射的功率, η 为悬臂梁对辐射光的吸收系数, W 为微悬臂梁宽度。将(4)式代入(1)式解该微分方程可得此时悬臂梁自由端的最大挠度为：

$$\delta_p = \frac{5}{4} (\alpha_1 - \alpha_2) \left\{ \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right\} \frac{L^3}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} P\eta. \quad (5)$$

其次考虑辐射光聚焦在微悬臂梁自由端的情况,此时的微悬臂梁中的温度分布由一维热传导理论推得为：

$$(T - T_0)(x) = \frac{P\eta}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} x, \quad (6)$$

将(6)式代入(1)式解该微分方程可得此时悬臂梁自由端的最大挠度为：

$$\delta'_p = \alpha_1 - \alpha_2 \left\{ \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right\} \frac{L^3}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} P\eta. \quad (7)$$

以上的(5)式和(7)式即辐射光强激励下微悬臂梁的

挠曲度理论模型。

2.2 理论模型的实验验证

(5)式和(7)式虽然对应两种不同的光激励情况,但其规律是相同的,不同之处在于式中的系数不同,下面将(7)式与实验测试数据进行比较。文献[4]给出了一组光激励下氮化硅微悬臂梁挠曲灵敏度的实验结果,微悬臂梁的参数为:梁长 $200 \mu\text{m}$,宽度 $36 \mu\text{m}$,厚度 $0.5 \mu\text{m}$,镀膜,激励光聚焦在微悬臂梁的自由端。由(7)式可得此种情况下光照挠曲的灵敏度为：

$$S = \frac{\delta'_p}{P\eta} \alpha_1 - \alpha_2 \left\{ \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right\} \frac{L^3}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)}, \quad (8)$$

将文献[4]中的实验结果与(8)式的理论计算值列在表1中进行比较,有关材料的参数参见表2。由表中可见,理论与实验测试值比较一致,但理论值普遍略大于实验值,其主要原因是由于文献[4]采用的为“三角形”微悬臂梁,在理论模拟等效为图1中的标准形状时产生了误差。

Table 1. Comparison between the theoretical sensitivity and experimental values

thickness of Al film t_1/nm	40	80	135	180
theoretical value ($\mu\text{m}/\mu\text{W}$)	0.026	0.035	0.038	0.037
experimental value ($\mu\text{m}/\mu\text{W}$)	0.024	0.032	0.036	0.033

3 微悬臂梁探测器的优化设计

微悬臂梁探测器优化设计的目的,是使其具有高的灵敏度和小的噪声等效功率,以提高该类探测器的精度和探测能力,为此,需从三个方面进行优化设计:一是对微悬臂梁材料的优化选择;二是对金属镀膜材料及厚度的优化选择;三是对光辐射吸收材料的选择。

3.1 微悬臂梁材料的优化选择

微悬臂梁材料采用半导体材料,选用的材料有: Si 、 Si_3N_4 和 SiO_2 。下面对这三种材料进行优化选择。由(3)式可得光辐射下的热挠曲灵敏度为：

$$S_t = \frac{\delta}{\Delta T} = \chi \alpha_1 - \alpha_2 \left(\frac{1+n}{t_2 K} \right)^2, \quad (9)$$

式中, n 为镀膜与微悬臂梁基材料的厚度比, 即 $n = t_1/t_2$ 。

为便于对比, 假设上述三种材料的微悬臂梁均镀上铝膜, 且三种材料的微悬臂梁均取为: 长度 $L = 200 \mu\text{m}$, 厚度 $t_2 = 2 \mu\text{m}$ 。用计算机 MATLAB 语言模拟, 微悬臂梁在光激励下热挠曲灵敏度如图 2 所示, 有关材料的参数参见表 2。可以看出最佳微悬臂梁材料为二氧化硅 SiO_2 。

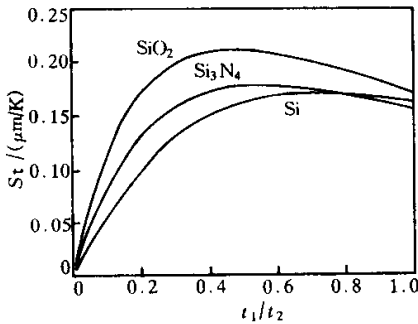


Fig. 2 Sensitivity of materials vs t_1/t_2

3.2 金属镀膜及厚度的优化设计

为提高微悬臂梁探测器的灵敏度和探测能力, 金属镀膜及厚度的选择至关重要, 一般可供选择的金属有三种, 即 Au、Al 和 Cr。下面首先考虑灵敏度问题。假设光辐射均匀照射到微悬臂梁上, 则由(5)式可得探测器的灵敏度为:

$$S_p = \frac{\delta_p}{P} = \frac{5}{4} \eta \frac{\alpha_2}{\lambda_2} \frac{L_3}{t_2^2 W} \left[\frac{(\beta - 1) \chi (n + 1)}{K(m + 1)} \right], \quad (10)$$

式中,

$$\beta = \alpha_1/\alpha_2, \quad n = t_1/t_2, \quad \gamma = \lambda_1/\lambda_2.$$

取微悬臂梁尺寸为: 长度 $L = 200 \mu\text{m}$, 厚度 $t_2 = 2 \mu\text{m}$, 宽度 $W = 30 \mu\text{m}$, $\eta = 0.1$, 悬臂梁材料优选为 SiO_2 , 由计算机模拟出三种金属镀膜情况下的灵敏度与镀膜厚度比的关系, 如图 3 所示, 有关参数参见表 2。由图 3 可以看出, 最佳镀膜金属为铝, 最佳

镀膜厚度比为 0.042, 此时的最大灵敏度为 $4.44 \times 10^{-4} \mu\text{m}/\mu\text{W}$ 。

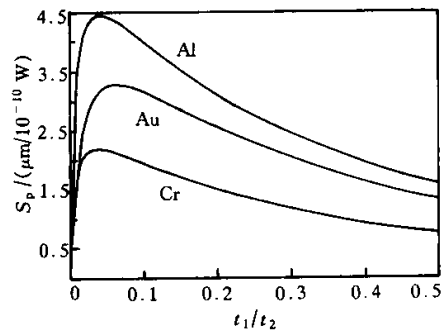


Fig. 3 The sensitivities vs t_1/t_2

然后再考虑微悬臂梁的探测能力优化问题, 即对三种金属镀膜进行优化选择, 使微悬臂梁的噪声等效功率最小 (P_{\min})。噪声等效功率由悬臂梁振幅和灵敏度决定, 其值为:

$$P_{\min} = \delta_{\text{th}}/S_p, \quad (11)$$

式中, S_p 如(10)式所示, δ_{th} 为悬臂梁在远离其谐振状态时的热噪声振幅, 其值为^[5]

$$\delta_{\text{th}} = \sqrt{4K_B T B / (K_0 \omega_0 Q)}, \quad (12)$$

式中 K_B 为玻尔兹曼常数, T 为温度, B 为测量的带宽, K_0 为悬臂梁的等效弹簧系数, Q 为谐振的品质因数, ω_0 为悬臂梁的谐振频率, ω_0 可写为:

$$\omega_0 = \sqrt{K_0/m}, \quad (13)$$

由弹性力学可知,

$$K_0 = [W / (4L^3)] (E_1 t_1^3 + E_2 t_2^3), \quad (14)$$

m 为悬臂梁的等效质量, 其值为:

$$m = 0.24 W L (\rho_1 t_1 + \rho_2 t_2). \quad (15)$$

将(15)式、(14)式、(12)式和(10)式代入(11)式整理得:

$$P_{\min} = \sqrt{\frac{24.5 K_B T B W}{Q L \eta^2}} \left(\frac{\rho_2 \lambda_2}{E_2^3 \alpha_2^4} \right)^{1/4} \times \left[\frac{\phi n + 1}{(\phi n^3 + 1)^3} \right]^{1/4} \frac{K(\gamma n + 1)}{(n + 1) \chi (\beta - 1)}, \quad (16)$$

Table 2. Properties of materials used in microcantilevers^[4]

material	density ρ (kgm ⁻³)	elastic modulus E (10 ¹¹ · N · m ⁻²)	thermal conductivity λ (W · m · K ⁻¹)	expansion coefficient α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	heat capacity C (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)
Si ₃ N ₄	2400	1.80	32.0	0.8	691
SiO ₂	2200	0.70	1.6	0.4	840
Si	2328	1.00	150.0	2.6	700
Au	19300	0.73	296.0	14.2	129
Cr	7100	0.25	96.5	8.5	438
Al	2702	0.8	237.0	23.6	908

式中，

$$\phi = E_1/E_2, \quad \psi = \rho_1/\rho_2.$$

取悬臂梁的尺寸为：长度 $L = 200 \mu\text{m}$ ，厚度 $t_2 = 2 \mu\text{m}$ ，宽度 $W = 30 \mu\text{m}$ ；其材料取为 SiO_2 ，其它参数取为： $T = 300 \text{ K}$ ， $Q = 30$ ， $\eta = 0.1$ ， $B = 8 \text{ mHz}$ ，玻尔兹曼常数为 $K_B = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。用计算机模拟出三种金属镀膜下的噪声等效 P_{min} 与最佳镀膜比的关系如图 4 所示。由图可见，当镀膜厚度比为 0.044 时，噪声等效功率最小为 8.6 pW。此值与图 3 中的结果基本相同，即两者的优化具有等价性。

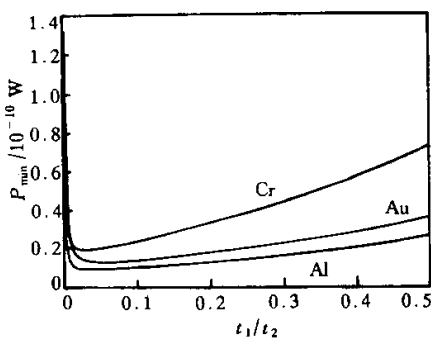


Fig.4 NEP vs t_1/t_2

3.3 光辐射吸收层材料的优化设计

在以上的分析中，对图 1 中的金属镀膜进行了优化选择，但这种优化中仅仅考虑了镀膜后的“双金属效应”，而未考虑另一个关键因素，那就是微悬臂梁对光的吸收系数 η ，比如：在金属镀膜为铝的情况下，用 670 nm 的光作为激励光，悬臂梁对光的吸收系数只有 8.5%^[7]。为此，我们提出一种新型结构的微悬臂梁探测器，如图 5 所示，它为三层结构，它与目前报道的结构相比，多出了一层光辐射吸收层。此时，由这层光辐射吸收层实现对激励光辐射的吸收，而金属镀膜不再作为光吸收层，只需考虑金属镀膜的双金属效应即可，这样一方面可以保证微悬臂梁对光辐射的高吸收，又可以充分利用双层结构的“双金属效应”。

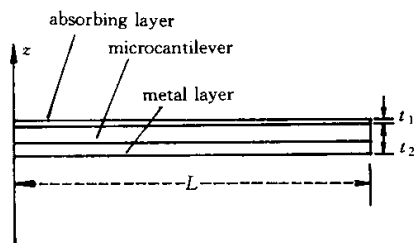


Fig.5 Structure of our novel detector

对光吸收层的选择，有两个基本原则：一是吸收层对光有高的吸收系数；二是吸收层要尽量薄，以减

小对原有双层结构机械性能的影响。一般可供选择的吸收层材料有：金黑、银黑和铂黑等材料。在可见光和近红外区域，以光吸收率达 99% 为标准，需要的金黑、银黑和铂黑的镀膜厚度分别为 $250 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、 $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 和 $1.5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ ^[6]，由此不难看出，最佳的光吸收材料为银黑，它更好地满足了上述两个原则。

综上所述，最后给出最佳的微悬臂梁结构为：银黑、二氧化硅和铝三层结构，镀膜厚度与二氧化硅厚度的比值为 0.042，光吸收层的厚度为 $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的银黑。

4 新型三层结构的微悬臂梁探测器与文献报道结果的性能对比

文献 [2] 中采用的双层材料为 Si_3N_4 和金属 Al，悬臂梁的长度为 $200 \mu\text{m}$ ，宽度为 $40 \mu\text{m}$ ，厚度为 $0.6 \mu\text{m}$ ，金属镀膜 Al 的厚度为 $0.05 \mu\text{m}$ ，光吸收系数为 $\eta = 0.1$ ；文献 [7] 中采用的双层材料为 Si_3N_4 和金属 Au，悬臂梁的长度为 $200 \mu\text{m}$ ，宽度为 $40 \mu\text{m}$ ，厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ ，金属镀膜厚度为 $0.085 \mu\text{m}$ ， $\eta = 0.1$ 。下面将我们设计的新型三层结构的探测器与上述文献中的结构进行理论模拟对比，采用 (9) 式和 (16) 式的模型，为便于对比，我们的悬臂梁结构取为 $200 \mu\text{m}$ 长、 $40 \mu\text{m}$ 宽、 $0.6 \mu\text{m}$ 的二氧化硅梁，镀膜金属为铝，镀膜厚度比为 0.042，光吸收层为银黑， $\eta = 0.99$ 。对比结果如表 3 中所示，可见新型三层结构比文献中结构灵敏度提高了 20 多倍，噪声等效功率降低了 85% ~ 70%。

Table 3. Comparison the new model with reported ones

	sensitivity $S_p / (\mu\text{m}/\mu\text{W})$	NEP $P_{\text{min}} / \text{pW}$
reference [1]	6.73×10^{-4}	2.96
reference [2]	6.21×10^{-4}	5.60
new model	1.53×10^{-2}	0.87

结束语 在对微悬臂梁光学和红外探测器进行理论分析和模拟的基础上，对其结构进行了全面优化，提出了一种新型结构的微悬臂梁探测器，该探测器比现有的同类探测器理论上灵敏度高出了 20 多倍，噪声等效功率降低了 85% ~ 70%。文中所建立的数学模型和优化结果对该类探测器的研制有重要的参考价值。

参 考 文 献

[1] Oden P I. 利用微悬臂梁技术的光学和红外探测. 红外.

- 1998 ,(1) :1~10
- [2] Barnes J R , Stephenson R J , Woodburn C N *et al.* . A femtojoule calorimeter using micromechanical sensors. *Rev. Sci. Instrum.* ,1994 ,**65**(12) 3793~3798
- [3] Raymond J R , Yong W C. *Formulas for Stress and Strain* . New York : McGraw-Hill , Inc. , 5 th ed. ,1975
- [4] Lai J , Perazzo T , Shi Z *et al.* . Performance of high-resolution microopomechanical thermal sensor. *Sensors and Actuators* ,1997 ,**A58**(1) :113~119
- [5] Rebwar M A F. Mechanism of optical activation of micromechanical resonators. *Sensors and Actuators* ,1992 ,**A33**(2) 229~236
- [6] Lang W , Kuhl K , Sandmaie H. Absorbing layers for thermal infrared detection. *Sensors and Actuators* ,1992 ,**A34**(1/3) 243~248
- [7] Nakabeppu O , Chandrachud M , Wu Y *et al.* . Scanning thermal imaging micro-scopy using compsite cantilever probes. *Appl. Phys. Lett.* ,1995 ,**66**(6) 694~696

Model and Optimization of a Novel Detector for Light Radiation

Liu Yueming¹⁾ Liu Junhua¹⁾ Zhang Shaojun²⁾

{ 1) , Electronic Engineering Department , Xi'an Jiaotong University , 710049 Xi'an }
 { 2) , Science Department , Xi'an University of Technology , Xi'an 710048 }

(Received 29 December 1999 ; revised 2 May 2000)

Abstract : The theoretical model of the microcantilever used in the light radiation is given based on the theoretical analysis. A novel detector is designed after the optimization about the material of the microcantilever , the coating and the radiation absorbing layer. Compared with the traditional ones , the sensitivity of this new model is made more than twenty times improvement and the noise-equivalent power is decreased 85% ~ 70% .

Key words : microcantilever ; detector ; light radiation ; optimization