

条支撑臂与 Si 基底中的信号处理电路互连,同时,热流仅能从支撑臂流入 Si 基底,降低了器件的热导,提高了热能转化为升温的效率;电阻上方用一层 Si_3N_4 或 SiO_2 作为红外吸收薄膜.微桥的设计是微辐射热计的关键技术之一,常规设计思想是^[8]:假定微辐射热计的平均红外吸收率为 \bar{A} (如 100%),在保证结构机械强度的前提下,尽量减少器件热导,同时考虑器件的热响应时间 τ ($\tau = H/G$, H 为器件总热容, G 为热导).一般而言, τ 在十几毫秒内就可满足绝大多数应用场合,但是,往往 τ 越小 ($1/G$ 越小), G 就越大,因此,提高热能转化为升温的效率和提高热响应速度之间存在着一个折衷.人们在考虑这个折衷时,存在的问题是:设计中简单的将平均红外吸收率 \bar{A} 固定下来,没有考虑多层薄膜的光学特性对微辐射热计吸收红外辐射能力的影响.实际上,由于红外吸收率的大小直接影响热学分析的结果,固定 \bar{A} 将不能准确反映红外辐射→温度变化过程.本文在假设 \bar{A} 不固定的情况下,通过分析微辐射热计的多层薄膜的光学特性,研究了 SiO_2 红外吸收层的厚度对多层膜系平均红外吸收率的影响,并将多层膜系平均红外吸收率结合到微桥的热学设计中,获得了有意义的结果.

1 微桥膜系光学特性

我们设计的微测辐射热计采用了四臂支撑的微桥,结构如图 2 所示.从机械强度和电学特性方面考虑,支撑薄膜和热敏感薄膜分别采用 $1.0\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 薄膜和 $0.5\mu\text{m}$ 厚的 poly-Si 薄膜,红外吸收层采用 SiO_2 薄膜,厚度设为 d_1 ,在本节和下节讨论中假定四条支撑臂的长 L 为 $40\mu\text{m}$ 、宽 W 为 $20\mu\text{m}$.我们将通过改变 d_1 的大小,分析 $\text{SiO}_2/\text{poly-Si}/\text{SiO}_2$ 多层薄膜体系的光学特性,得到膜系在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段的平均红外吸收率 \bar{A} .

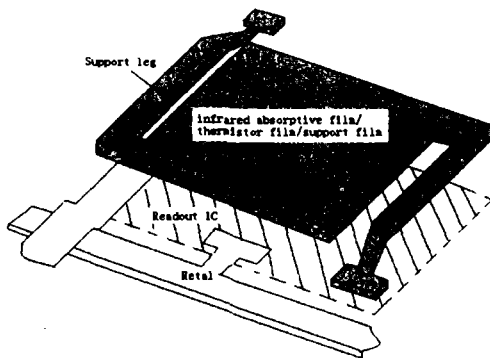


图1 典型微辐射热计结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical microbolometer

按照麦克斯韦电磁理论^[9],在非纯介质中,如在半导体和金属内,光波的振幅随着透入的深度而减小,这是由于介质内部有自由电子存在,波在传播过程中在介质内部激起传导电流,光波的部分能量转换为电流的焦耳热,即存在光的吸收.为计算图 2 所示的 $\text{SiO}_2/\text{poly-Si}/\text{SiO}_2$ 多层薄膜体系的红外吸收率,我们采用光学导纳矩阵法^[10],通过计算膜系在不同波长红外辐射时的特征矩阵,求出反射率 $R(\lambda)$ 和透射率 $T(\lambda)$,进而得到膜系红外吸收谱 $A(\lambda)$.

考虑到器件的实际工作情况,可以作以下假设:①各层是各向同性的均匀薄膜,②输入光是横波(S波),③输入光垂直入射.根据薄膜光学理论,膜系中第 j 层膜的特征矩阵 M_j 为

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, i 为虚部单位, η_j 和 δ_j ($j = 1, 2, 3$) 分别为各层膜的修正导纳和相位厚度,

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j d_j \cos\theta_j, \quad (2)$$

N_j 为各层膜的复折射率, $N_j = n_j - ik_j$, n_j 和 k_j 都与波长 λ 有关, d_j 和 θ_j 分别为各层膜的厚度和折射角,对于 S 波且光垂直入射时, $\theta_j = 0$.

整个膜系的特征矩阵 M 为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, η_{k+1} 为出射介质的光学导纳.从式(3)可知,多层薄膜的组合导纳为 $Y = C/B$,反射率 $R(\lambda)$ 和透射率 $T(\lambda)$ 分别为

$$R(\lambda) = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*, \quad (4)$$

$$T(\lambda) = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}. \quad (5)$$

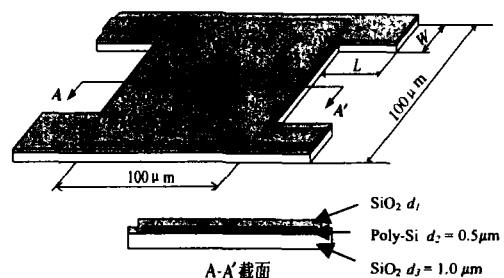


图2 四臂支撑微桥结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of microbridge supported by four legs

式中, η_0 为入射介质的光学导纳. 因此, 膜系的红外光吸收率为 $A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$.

根据 SiO_2 和 poly-Si 红外吸收率^[11,12], 结合式(6), 模拟所得的多层薄膜的红外吸收谱如图 3 所示. 图 3 表明, 对于我们最感兴趣的 8 ~ 14 μm 波段, $\text{SiO}_2/\text{poly-Si}/\text{SiO}_2$ 膜系接连有多个吸收峰, 分别位于 8.2 μm 、8.5 μm 、9.2 μm 、11.1 μm 和 12.3 μm 附近; 红外吸收率 $A(\lambda)$ 随 SiO_2 红外吸收薄膜厚度 d_1 的改变有较大变化, d_1 为 0.5 μm 时吸收谱中的各峰值比 0.1 μm 和 0.9 μm 情况下都高的多, 此时, 除了在波长 11.1 μm 处的吸收率为 29% 外, 其它峰值都在 50% 左右. 因此, 有必要对 d_1 进行优化.

为了评价 SiO_2 红外吸收薄膜厚度 d_1 对微测辐射热计吸收 8 ~ 14 μm 波段红外辐射的影响, 根据图 3 的模拟结果, 膜系的平均红外吸收率 \bar{A} 为

$$\bar{A} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

式中, λ_1 和 λ_2 分别为 8 μm 和 14 μm , 图 4 是 \bar{A} 与 d_1 之间的依赖关系. 可以看出, 随着 d_1 的增加, \bar{A} 呈上下振荡趋势, 振幅的上包络线先上升后缓慢下降, 而下包络线始终逐渐上升, \bar{A} 在 d_1 为 0.244 μm 和 2.5 μm 时分别出现最小值 4.33% 和最大值 50.36%, 最终将收敛于 34.3%. 由于 \bar{A} 随 d_1 的变化十分敏感, 选取好的 d_1 对提高微测辐射热计的红外吸收率至关重要; 同时, 器件的热导 G 也受 d_1 的影响, d_1 越大, G 就越大, 相同热功率下的升温 ΔT 变小, 热响应速度 $1/\tau$ 则提高. 所以, d_1 的选取将影响到器件的热学特性.

2. 微桥热学设计

考虑到实际制备工艺, 仅讨论 SiO_2 红外吸收薄膜厚度 $d_1 \leq 3.0 \mu\text{m}$ 时的热学特性. 我们将通过分析

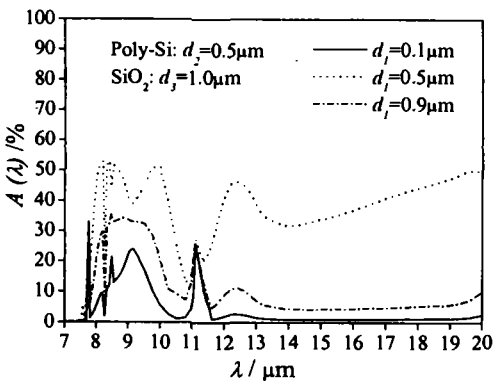


图 3 $\text{SiO}_2/\text{poly-Si}/\text{SiO}_2$ 多层薄膜的计算红外吸收谱
Fig. 3 Calculated infrared absorption spectra of ($\text{SiO}_2/\text{poly-Si}/\text{SiO}_2$) multilayer films

微桥的传热特性, 结合不同 d_1 条件下微桥的平均红外吸收率 \bar{A} , 计算微桥在红外辐射下的升温 ΔT 和热时间常数 τ , 得到最佳的 d_1 .

假设微辐射热计不施加任何偏压, 环境温度为 T_0 , 入射到微桥表面的红外辐射功率为 P , 器件升温 ΔT , 平均红外吸收率为 \bar{A} , 微桥表面工作温度则为 $T = T_0 + \Delta T$, 由能量守恒定律和热传导的基本知识, 器件热平衡方程为^[7]

$$H \frac{d(\Delta T)}{dt} + G \Delta T = \bar{A} P, \quad (7)$$

稳态时, 器件的升温 ΔT 为

$$\Delta T = \frac{\bar{A} P}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}, \quad (8)$$

其中 ω 为红外辐射调制频率, $H = \sum \rho_i c_i V_i$, ρ_i 、 c_i 和 V_i 分别为微桥各层薄膜的密度、热容率和体积, $G = G_s + G_r + G_g$, G_s 、 G_r 和 G_g 分别为器件的辐射热导、固体传导热导和通过环境交换的气体传导^[9]

$$G_s = k \frac{Wh}{L}, \quad (9)$$

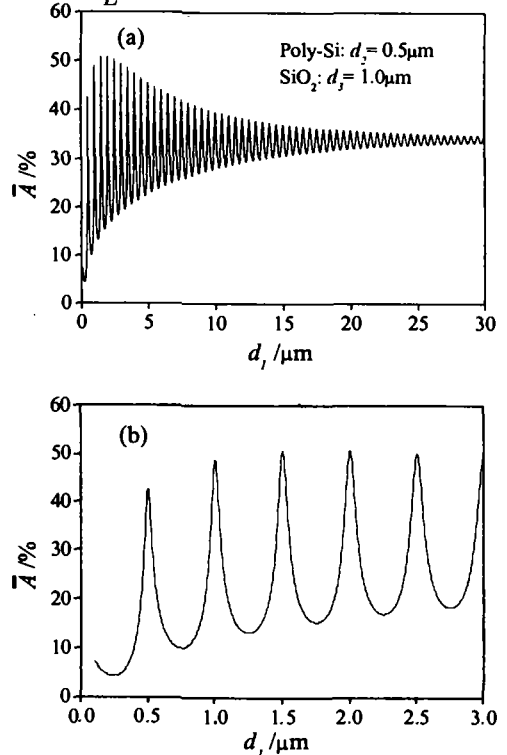


图 4 $\text{SiO}_2/\text{poly-Si}/\text{SiO}_2$ 多层薄膜平均红外吸收率 \bar{A} 与 SiO_2 红外吸收层厚度 d_1 的关系 (a) $0 < d_1 < 30 \mu\text{m}$, (b) $0 < d_1 < 3 \mu\text{m}$.

Fig. 4 Calculated dependence of average infrared absorptivity of multilayer films ($\text{SiO}_2/\text{poly-Si}/\text{SiO}_2$) on the thickness of SiO_2 infrared absorber film d_1 (a) $0 < d_1 < 30 \mu\text{m}$, (b) $0 < d_1 < 3 \mu\text{m}$

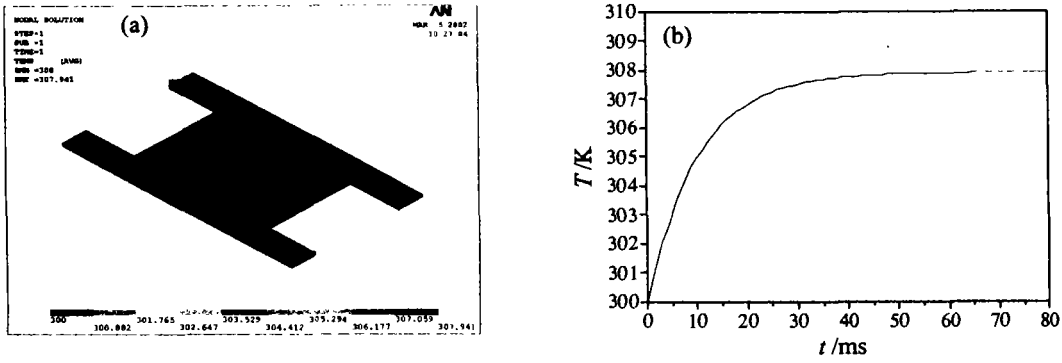


图5 四臂微桥 (a) 温度分布 (b) 热瞬态响应的有限元分析结果

Fig.5 Finite Element analysis results of (a) temperature distribution and (b) transient thermal response for microbridge with four legs

$$G_g = 8\bar{A}ST^3 \quad (10)$$

式中 k 为传热通道的热导率, W 、 h 和 L 分别为传热通道的宽、高和长, S 为辐射面的面积. G_g 的计算较复杂, 与气体种类、压强和温度都有关系. 为分析方便, 假设器件采用真空封装, 此时 $G_g = 0$.

从式(8)可知, 在辐射功率一定的条件下, 影响器件升温 ΔT 的主要因素是 \bar{A} 与 G , 它们与微桥结构参数的关系较为复杂, 用近似解析方法很难作优化分析. 我们采用有限元分析软件 ANSYS5.7 来模拟计算. 由于图 2 中微辐射热计的四条支撑臂都与热沉(硅基底)相连, 故设其边界条件为四臂末端温度是环境温度 300K, 分析中采用 8 节点方块单元, 即 SOLID70. 图 5 是四臂微桥上的 (a) 温度分布和 (b) 热瞬态响应分析的模拟结果, 其中, 初始温度 $T_0 = 300\text{K}$, $d_1 = 0.5\mu\text{m}$, 桥面面积 $S = 100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, 输入辐射热流密度 $F = 0.1\text{W}/\text{m}^2$, 实际辐射热流密度为 $\bar{A}(0.5\mu\text{m}) \cdot F$. 图 5 表明, 微桥桥面中心温度提高, 桥面温度分布在 307.0 ~ 307.9K 之间, 温度落差基本集中在四条支撑臂上, 即桥面热流基本上都从支撑臂流走, 热瞬态分析表明热时间常数 τ 为 10.1ms.

图 6(a) 显示了 $0.25\mu\text{m} \leq d_1 \leq 3.0\mu\text{m}$ 时微桥桥面中心处的升温 ΔT 、热时间常数 τ 与 d_1 依赖关系. 结果表明, $\Delta T \sim d_1$ 的关系与图 4(b) 所示的 $\bar{A} \sim d_1$ 的关系相似, τ 随 d_1 的增加而增加, 结合图 4 可以看出, 当 d_1 为 $1.0\mu\text{m}$ 时, \bar{A} 为 48.9%, ΔT 和 τ 较为理想, 分别为 9.01K 和 12.4ms.

为了进行比较, 将 \bar{A} 设为 100%, 而不考虑 d_1 对 \bar{A} 的影响, 微桥桥面中心升温 ΔT 、热时间常数 τ 与 d_1 的依赖关系如图 6(b) 所示. 随着 d_1 的增加, ΔT 呈线性下降趋势, 但下降幅度较小, d_1 为 $1.0\mu\text{m}$ 时, ΔT 为 18.3K, 远远高于考虑了 d_1 对 \bar{A} 的影响时的 9.01K; τ 的大小与 \bar{A} 是否为常数无关. 由此可见, \bar{A} 对整个微桥的升温起了主导作用, 调制了 ΔT 的变化趋势, 考虑 d_1 对 \bar{A} 的影响是非常必要的.

3 微桥优化设计

对于如图 2 所示的微测辐射热计, 在确定 SiO_2 红外吸收薄膜的厚度为 $1.0\mu\text{m}$ 的情况下, 微桥优化设计的目的是确定支撑臂的臂长 L 和臂宽 W , 得到合适的 ΔT 和 τ 以满足不同的需要. 表 1 是采用 ANSYS5.7 模拟得到的结果, 其中, 微桥表面初始温

表 1 四臂微桥桥面的温度增量/热响应时间与支撑臂长、宽的对应关系

Fig.1 Dependences of the temperature increment and the thermal response time on the width and length of support leg of microbridge with four legs

支撑臂宽 ($W/\mu\text{m}$)	温度增量 ($\Delta T/\text{K}$) 热时间常数 (τ/ms)						
	10	20	30	40	50	60	
支撑臂长 ($L/\mu\text{m}$)	20	8.4/10.2	6.9/9.5	5.4/6.6	3.8/4.8	2.1/3.2	1.8/1.9
	30	9.3/13.2	7.8/11.1	6.3/9.7	4.7/6.5	3.0/4.7	2.4/3.3
	40	10.5/14.7	9.0/12.4	7.5/11.8	5.9/8.8	4.2/6.7	3.4/4.2
	50	11.4/17.6	9.9/16.1	9.2/12.6	6.8/11.7	5.1/9.9	4.6/7.9
	60	12.3/21.8	10.8/19.2	10.0/17.7	7.7/13.1	6.0/11.2	5.3/8.1
	70	13.2/24.1	11.7/22.5	10.2/21.3	8.6/17.1	6.9/14.2	5.5/10.2
	80	14.1/28.9	12.6/26.5	11.1/25.5	9.5/23.8	7.8/20.1	6.4/16.2

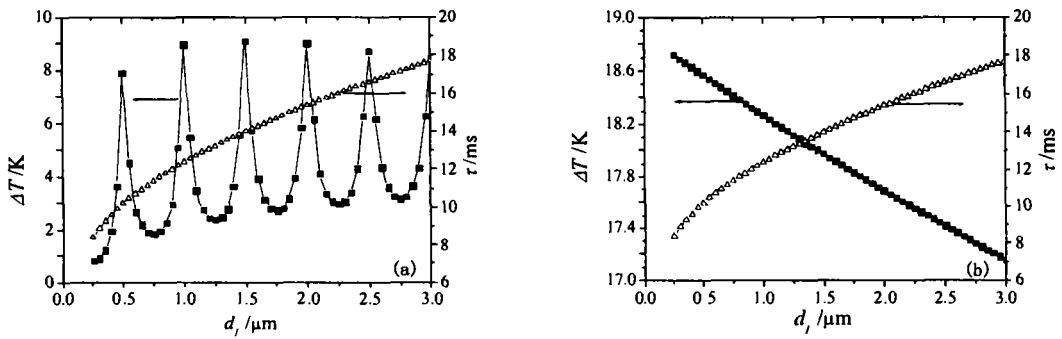


图6 温度增量 ΔT 和热响应时间 τ 与 SiO_2 红外吸收层厚度 d_1 关系的有限元分析。(a)考虑 d_1 对 \bar{A} 的影响,(b) $\bar{A}=100\%$

Fig.6 Finite element analysis results of dependence of temperature increment ΔT and thermal response time τ on the thickness of infrared absorber (SiO_2 layer d_1 . a) considering the influence of d_1 on \bar{A} , (b) supposing that $\bar{A}=100\%$

度为300K。从表1可见,支撑臂的长度 L 越大,宽度 W 越小, ΔT 就越大,而 τ 就越小;设计微桥时,如果追求高 ΔT ,响应速度($1/\tau$)就会变慢,而强调响应速度,就要以减小 ΔT 为代价。

4 结论

本文对于具有四臂微桥结构的微测辐射热计,采用光学导纳矩阵法分析了 SiO_2 红外吸收层/poly-Si热敏感薄膜电阻层/ SiO_2 微桥支撑薄膜层的多层薄膜的光学特性,结果表明在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 波段存在有多个红外吸收峰,微桥的平均红外吸收率随 SiO_2 红外吸收层厚度变化十分敏感,呈上下振荡趋势,并收敛于34.3%,最高吸收率为50.36%。

常规设计中采用固定红外吸收率的方法误差较大,而应将不同厚度的 SiO_2 红外吸收层所对应的红外吸收率用于微桥热学设计中,本例设计中 SiO_2 红外吸收层的理想厚度为 $1.0\mu\text{m}$ 。选取好 SiO_2 红外吸收层的厚度对于提高微辐射热计的性能至关重要。

REFERENCES

- [1] Wood R A. Uncooled thermal imaging with monolithic silicon focal arrays. *SPIE*, 1993, 2020:33—37
- [2] Raymond S B. Uncooled IR imaging: technology for the next generation. *SPIE*, 1999, 3698:110—118
- [3] Sherif S, Paolo F, Kris B, et al. Characterization and optimization of infrared poly SiGe bolometers. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1999, 46(4):675—681
- [4] Hyung K L, Jun B Y, Euisik Y, et al. A high fill-factor Infrared bolometer using micromachined multilevel electrothermal structures. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1999, 46(7):1489—1491
- [5] Liddiard K C, Unewisse D H, Reinhold O. Design and fabrication of thin film monolithic uncooled infrared detector arrays. *SPIE*, 1994, 2225:62—71
- [6] Tsutomu I, Kouichi A, $1/f$ noise in a- $\text{Si}_{1-x}\text{C}_x$: H thin films as novel thermistor materials for micro-machined IR sensors. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, 10:1345—1348
- [7] CHEN Ji-Shu, HU Bian-Rong, Xu Ping-Mao. *Infrared Detectors*. Beijing: National Defence Industry Press (陈继述, 胡变荣, 徐平茂. 红外探测器. 北京: 国防工业出版社), 1986:2
- [8] Unewisse M H, Passnore S J, Liddiard K C, et al. Performance of uncooled semiconductor film bolometer infrared detectors. *SPIE*, 1994, 2269:43—47
- [9] SHEN Kai-Hua, ZHU Wen-Zhang. *Optic-electrical Characteristic of Semiconductor*. Xiamen: Xiamen University Press (沈凯华, 朱文章. 半导体光电性质. 厦门: 厦门大学出版社), 1995:6—7
- [10] TANG Jin-Fa, ZHENG Quan. *Applied film Optics*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press (唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学. 上海: 上海科学技术出版社), 1984:39—81
- [11] Ward L. *The optical constants of bulk materials and films*. England: Philadelphia Adam Hilger Press, 1988:55—62
- [12] Savage J A. *Infrared optical materials and their antireflection coatings*. Boston: Adam Hilger Press, 1985:234—258