

文章编号:1001-9014(2010)04-0251-04

非制冷微测辐射热计支撑层厚度比研究

许路加, 胡明, 杨海波, 杨孟琳, 张洁

(天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要:根据实验室设计的单层微测辐射热计所采用的 Si_3N_4 和 SiO_2 双层膜复合支撑结构工艺, 分别利用力学的等效截面方法和复合材料热导公式, 从理论上推导了微桥桥腿正应力和热导的解析表达式. 分析在其它因素不变的情况下, 仅调整 Si_3N_4 和 SiO_2 两者厚度比值 (m) 对微测辐射热计力学和热学性质的影响, 并用 ANSYS 有限元仿真的方法验证了理论推导.

关键词:非制冷红外成像; 支撑层; 微测辐射热计; 微桥结构; 厚度比

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

THICKNESS RATIO OF SUPPORT MEMBRANES FOR UNCOOLED INFRARED MICROBOLOMETER

XU Lu-Jia, HU Ming, YANG Hai-Bo, YANG Meng-Lin, ZHANG Jie

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the technology of monolayer microbolometer, which used Si_3N_4 and SiO_2 double-layer membrane supporting materials, the analytic expressions of the normal stress and the thermal conductivity of the microbridge leg were derived by using the mechanical equivalent cross-section methods and the composite thermal conductivity formula. The influence of the thickness ratio m of Si_3N_4 to SiO_2 on the mechanical and thermal characteristics of microbridge was analyzed when other factors were not changed. At last, the theoretical derivation was verified by the method of ANSYS finite element simulation.

Key words: uncooled infrared imaging; support membranes; microbolometer; microbridge structure; thickness ratio

引言

非制冷红外热成像探测器可以为军方提供低成本、低功耗的红外图像探测仪以用于护目镜、便携式武器瞄准镜或者驾驶视觉增强系统^[1,2]. 相对于制冷型光子探测器, 它类似于数字 CMOS 图像传感器 (APS) 的工作条件是其被重视的一个关键原因, 另一方面较低的成本使其民用化成为可能^[3]. 主流的非制冷热成像探测器主要有以下三种: 热电堆红外探测器 (thermopiles detectors)^[4,5]、热释电红外探测器 (pyroelectric detectors)^[6] 以及微测辐射热计 (bolometers)^[1,7]. 微测辐射热计区别于其它热成像传感器的标志是使用了一种电阻随着温度变化而变化的材料来测量温度的改变量. 目前微测辐射热计是三种非制冷红外探测器

中研究和运用最广的一类. 这主要是因为, 微测辐射热计的响应速度比热电堆型高, 制作工艺比热释电型简单, 并且不使用斩波器^[8]. 热绝缘是限制微测辐射热计性能的因素之一. 为此研究者们提出了使用微桥结构来提高其绝热性能的方法^[9]. 随着超大规模集成电路和微电子机械加工技术的发展, 使微测辐射热计的微桥结构从最初的直线形桥腿发展到现在的 S 形桥腿, 从单层结构发展到三层结构微桥, 且像元尺寸进一步缩小, 阵列成倍增长, 占空比、响应率显著提高^[1,3].

虽然双层和多层结构在力学和热学方面可设计变量较多, 改进空间加大, 但是这些结构存在工艺要求过高、成本较大、成品率较难保证的缺点, 并且对于民用和低端微测辐射热计推广而言, 并不是理想的选择. 而单层结构成本相对低, 工艺实现也比较容

收稿日期: 2009-08-12, 修回日期: 2010-02-05

Received date: 2009-08-12, revised date: 2010-02-05

基金项目: 国家自然科学基金 (60371030, 60771019); 天津大学先进陶瓷与加工技术教育部重点实验室开放基金 (ACMT-2008-05)

作者简介: 许路加 (1985-), 男, 云南昆明人, 研究生, 主要从事非制冷微测辐射热计的工艺和 MEMS 研究, E-mail: xulujia1203@sina.com.

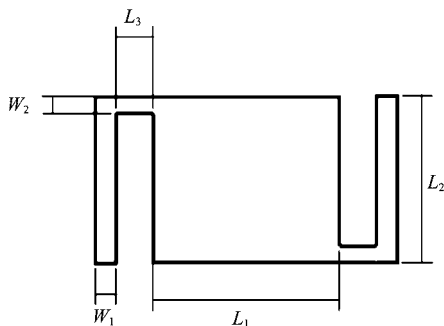


图1 微桥结构俯视平面模型
Fig.1 Top view of the microbridge

易,所以本文主要针对的是单层微桥结构的设计和分析.

1 力学和热学性质理论分析

采用 Si₃N₄ 和 SiO₂ 的双层复合材料作为微桥支撑结构,主要是能较好地缓解表面残余应力问题.但是 Si₃N₄ 和 SiO₂ 具有不同的杨氏模量、泊松比、热导率和比热,所以在总厚度相同的情况下,两者不同的厚度比,会造成不同的力学和热学性质,本文就此问题进行了研究.弯曲变形主要发生在桥腿上,因此重点放在桥腿分析上.表 1 给出了理论分析和仿真中将会用到的材料参数^[10].

1.1 力学理论分析

图 1 给出了微桥结构的俯视平面模型示意图.图 2 给出了微桥桥腿截面模型和等效截面法示意图,其中 H 、 W 分别表示桥腿截面的厚度和宽度. h_1 和 h_2 分别表示 SiO₂ 和 Si₃N₄ 层的厚度. E_1 和 E_2 分别为 SiO₂ 和 Si₃N₄ 层的杨氏模量.

为了集中研究厚度比 $m = h_2/h_1$ 对力学和热学性质的影响,图中定义的变量,除 h_1 和 h_2 外均假设为定值.桥腿所受的诸多应力中,弯曲正应力是最主要的,其它的各力很小,可以忽略不计.利用静力学和材料力学的相关理论,采用等效截面的近似方法^[11],计算推导正应力随厚度比 m 变化的函数解析式,如图 2 所示.

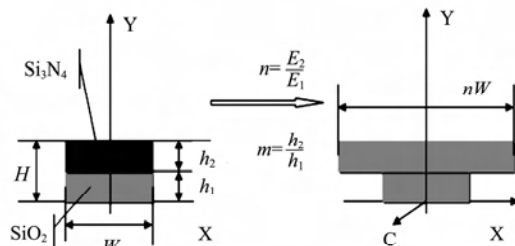


图 2 微桥桥腿截面模型和等效截面法示意图
Fig.2 The cross-section model of the microbridge and the schematic of equivalent section method

首先计算等效后的中性轴 y_c 的位置

$$y_c = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} = \frac{h_1 W \cdot \frac{1}{2} h_1 + h_2 n W \cdot \left(h_1 + \frac{1}{2} h_2 \right)}{h_1 W + h_2 n W}, \quad (1)$$

其中, A_i 为各部分界面面积, y_i 为所求正应力 C 点到各部分截面的中性轴的距离,由 $H = h_1 + h_2$, $h_2 = m h_1$ 可得

$$y_c = H - \frac{1}{2} \cdot \frac{m H}{m + 1} - \frac{1}{2} \cdot \frac{H}{m n + 1}. \quad (2)$$

继而得到等效截面的惯性矩 I_z

$$I_z = I_{SiO_2} + I_{Si_3N_4} = \frac{W H^3}{12} \left[\frac{1}{(m + 1)^3} + \frac{m^3}{(m + 1)^3} + \frac{3 m n}{(m + 1)(m n + 1)} \right]. \quad (3)$$

根据弯曲正应力公式,得到图 2 中 C 点的正应力,在 $m \ll \infty$ 时,随厚度比 m 的变化解析式

$$\sigma = \frac{M \cdot y_c}{I_z} = \frac{6 M}{W H^2} \frac{2(m + 1)^3(m n + 1) - (m^2 n + 2 m + 1)(m + 1)^2}{(m n + 1)(m^3 n + 1) + 3 m n(m + 1)^2}, \quad (4)$$

其中, M 为横截面上的弯矩, y_c 为所求正应力点到中性轴的距离, I_z 为横截面对中性轴的惯性矩. 式中 $\frac{6 M}{W H^2}$ 为单层材料梁的矩形应力值,即桥腿只由 SiO₂ 或只由 Si₃N₄ 构成时的应力值. 令

$$\varphi(m) = \frac{2(m + 1)^3(m n + 1) - (m^2 n + 2 m + 1)(m + 1)^2}{(m n + 1)(m^3 n + 1) + 3 m n(m + 1)^2}, \quad (5)$$

表 1 材料参数^[10]

Table 1 Material parameter^[10]

材料	屈服强度 10 ⁹ N/m ²	杨氏模量 10 ⁵ kg · μm ⁻¹ · s ⁻²	泊松比	密度 10 ⁻¹⁵ kg/μm ³	比热容 10 ³ J/kg · K	热导率 10 ⁻⁴ W/μm · K	热胀系数 10 ⁻⁶ /K	熔点 ℃
Si	7.00	1.90	0.23	2.30	0.68	1.57	2.33	1400
Si ₃ N ₄	14.00	3.85	0.27	3.10	0.69	0.19	0.80	1930
SiO ₂	8.40	0.73	(热法)0.2 (CVD)0.27	2.27	0.70	0.014	0.50	1700

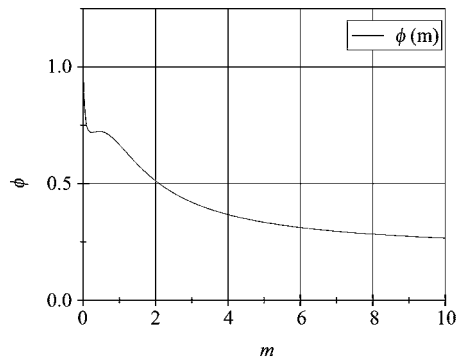


图3 桥腿正应力趋势函数 $\varphi(m)$ 的曲线
Fig.3 The curve of the microbridge stress function $\varphi(m)$

并将重点放在这个变量因子上,根据表1中的材料参数,可以令 $n=5$,利用 origin 绘制 $\varphi(m)$ 的函数曲线如图3所示.从图中可以看出,在采用双层复合材料结构后,弯曲正应力相对于单层变小,且随 m 的增大,应力不断减小,不过减小的趋势放缓.

1.2 热学理论分析

由于厚度比的变化,对相同外界条件下的辐射传热和对流传热的影响相对较小,主要影响的是固体传热热导 G_s ,所以建模时仅考虑 G_s .对于复合材料, G_s 可以用下式表示^[12]

$$G_s = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i A_i}{L_i}, \quad (6)$$

其中, λ_i 为热导率, A_i 为截面积, L_i 是垂直于截面的热流方向的长度.

对于本文的双层材料,将其表示为厚度比 m 的函数

$$G_s(m) = \sum_{i=1}^2 \frac{\lambda_i A_i}{L_i} = \frac{\lambda_1 W h_1}{L} + \frac{\lambda W h_2}{L} = \frac{W H \lambda_1 + \lambda_2 m}{L m + 1}. \quad (7)$$

利用 origin,参考表1中的热导率,描绘 $G_s(m)$ 的变化趋势,如图4所示,作图时将所有不变的参数全部形式化为1,且对数值进行了适当放大.而这并不影响对变化趋势的观察.

2 ANSYS 仿真分析

上节对双层结构的厚度比的变化对微桥结构力学和热学性质的影响做了一定程度上的理论分析.

表2 尺寸参数(μm)

Table 2 Size parameters(μm)				
L_1	L_2	L_3	W_1	W_2
50	60	5	5	5

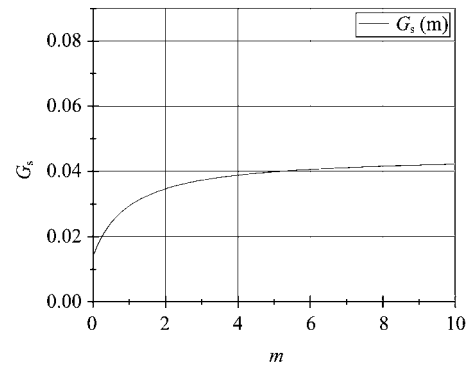


图4 固体热导率 $G_s(m)$ 随厚度比 m 的变化趋势
Fig.4 The trends of solid thermal conductivity $G_s(m)$ with the change of thickness ratio m

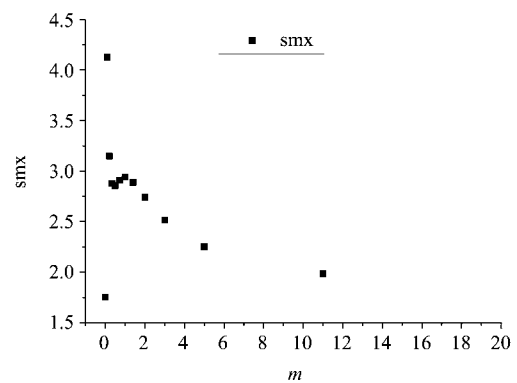


图5 全局最大应力值 smx 随 m 的变化趋势
Fig.5 The trends of overall maximum stress with the change of m

为了避免计算上的复杂,忽略了次要因素采用了等效截面法等近似方法.为了验证所做理论分析,采用有限元分析软件 ANSYS 进行仿真.

2.1 力学仿真

选择 ANSYS 中的 SHELL99 单元建立有限元模型, SHELL99 单元可以通过设置实常数来仿真复合材料层结构.依照图1所示的尺寸进行建模.具体参数的赋值如表2,其中单位统一采用 μm .与之对应所有材料和结果中的距离的基本单位均转化为 μm .

由于研究的是不同厚度比下的应力的变化情况,为了避免仅对应力最大值和最小值分析时可能出现的结果特殊化的问题,在桥腿上两个点也进行应力值采样.

在仿真中,设定总厚度 H 为 600nm ,每种材料厚度的变化的最小值设为 50nm .取了12组不同的厚度比进行仿真.利用 origin 对数据进行描绘,由于趋势基本相同,这里只给出模型中桥腿应力最大点的应力值数据如图5所示.图5与运用解析理论分析得到的图3基本吻合,验证了理论分析过程.

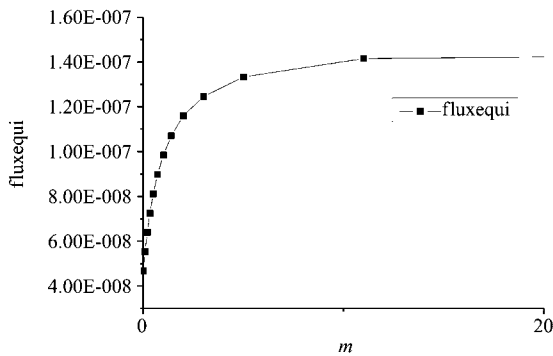


图6 等效热流 fluxequi 随 m 的变化趋势

Fig. 6 The trends of equivalent heat flow (fluxequi) with the change of m

2.2 热学仿真

利用 ANSYS 仿真桥腿双层材料在不同厚度比时,对应的桥腿的导热性能的变化,重点关注单独每层的热流和两层热流之和的变化.在两端温度固定的情况下,固体热导的变化与热流密度的变化相对应.

采用 SOLID70 单元,分别建立两层材料,并且运用 GLUE 操作建立双层材料的联系.选取 12 组不同厚度比 m 数据.运用参数建模的方法,仿真 12 组厚度比数据.

令 flux1 和 flux2 分别为 SiO_2 和 Si_3N_4 层的热流. fluxequi 指的是全局等效热流,即将 flux1 和 flux2 中记录的两个材料层的热流按照其剖面面积进行加权求和.具体公式如下

$$\text{fluxequi} = \text{flux1} \cdot \frac{1}{m+1} + \text{flux2} \cdot \frac{m}{m+1} \quad (8)$$

利用 origin 对 fluxequi 绘图,如图 6 所示.在两端温度固定的条件下,fluxequi 随着 m 的增大,热流增大,这反映的是固体热导的增大.观察图 6 的变化趋势与理论分析得到的图 4 吻合,证明了之前的解析分析.

3 结论

根据等效截面的力学近似方法和复合材料热导公式,从理论上获得桥腿正应力和热导的解析表达式.在其它因素不变的情况下,仅调整 Si_3N_4 和 SiO_2 两者厚度比值 m ,分析了其对微测辐射热计力学和热学性质的影响,并用 ANSYS 有限元仿真的方法验证了理论推导.从整个分析和仿真过程中得出以下几点结论:

(1) 随着厚度比 m 的增大,桥腿应力,逐渐变小,且减小的速率在起初很大,之后逐渐放缓.所以在可能的情况下,适当增大 m ,可以得到较好的力学性质.但过度的增大却反而可能损失热学性质.

(2) 随着厚度比 m 的增大,在每一层单独的材料层中,热导的变化很不规律,但桥腿的总固体热导逐渐增大,增大速度逐步放缓,所以从热学性质的考虑, m 不应太大.

(3) 综合(1)、(2)两点,恰当地选取厚度比需要综合考虑热学和力学性质.

REFERENCES

- [1] Rogalski A. Infrared detectors: status and trends[J]. *Progress in Quantum Electronics*. 2003, **27**(2-3):59—210.
- [2] Tissot JL. IR detection with uncooled sensors[J]. *Infrared Physics & Technology*. 2004, **46**(1-2):147—153.
- [3] Fièqre B, Tissot JL, Trouilleau C, et al. Uncooled microbolometer detector: recent developments at Ulis[J]. *Infrared Physics & Technology*. 2007, **49**(3):187—191.
- [4] Escriba C, Campo E, Est ve D, et al. Complete analytical modeling and analysis of micromachined thermoelectric uncooled IR sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2005, **120**(1):267—276.
- [5] Randjelovic D, Petropoulos A, Kaltsas G, et al. Multipurpose MEMS thermal sensor based on thermopiles[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008, **141**(2):404—413.
- [6] Tian X, Li Y, Xu Z. Laser annealing of Pb(Zr0.52Ti0.48)O3 thin films for the pyroelectric detectors[J]. *Thin Solid Films*. 2009, **517**(20):5855—5857.
- [7] Gonzalez M, Hodgson E R. Radiation resistant bolometers with Al2O3 and AlN substrates, anodized aluminium support frames, and improved electrical contacts[J]. *Fusion Engineering and Design*. 2009, **84**(2-6):829—831.
- [8] CHANG Ben-Kang, CAI Yi. *Infrared Imaging and Display System*[M]. Beijing: Science Press(常本康,蔡毅.红外成像陈列与系统.北京:科学出版社),2006:19—20.
- [9] DONG Liang, YUE Rui-Feng, LIU Li-Tian. Optical and thermal design for microbolometer[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*(董良,岳瑞峰,刘理天.微辐射热计的光学与热学设计.红外与毫米波学报),2003, **22**(2):109—113.
- [10] XU Tai-Ran. *MEMS & Microsystems-Design and Manufacture*[M]. Beijing: China Machine Press(徐泰然. MEMS 和微系统—设计与制造.北京:机械工业出版社),2004,225.
- [11] SHAN Hui-Zu. The second edition of *Mechanics of Materials*[M]. Beijing: Higher Education Press(单辉祖.材料力学第二版.北京:高等教育出版社),2005:159—228.
- [12] ZHANG Yi. *Heat Transfer Theory*[M]. Nanjin: Southeast University Press(张奕.传热学.南京:东南大学出版社),2004,1—10.