

氮化硅薄膜热性能测试研究

蒲娟, 吴志明, 蒋亚东, 熊昊, 张良昌

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

【摘要】提出了一种可以测试氮化硅薄膜热导、热容的方法。该方法采用微机械加工技术制作成悬空结构,利用Pt薄膜来做加热与测温电阻。设计了合理的测试方案来减小测试过程中Pt薄膜附加热导、热容带来的影响。用Matlab模拟了结构的热响应特性。在Pt薄膜中通入直流电流后,桥面温度逐渐升高,最终达到稳定,在相同的电流输入下,微桥的热容、热导越大,桥面的温升越小。讨论了无效加热电阻和微结构加工工艺对测试精度的影响,并给出了提高测试精确度的方法。

关键词 Pt薄膜; 氮化硅薄膜; 热导; 热容

中图分类号 O484.5

文献标识码 A

doi: 10.3969/j.issn.1001-0548.2009.02.37

Measurement of Thermal Performance of Silicon Nitride Thin Films

PU Juan, WU Zhi-ming, JIANG Ya-dong, XIONG Hao, and ZHANG Liang-chang

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract This paper presents a new approach for measuring the thermal conductance and thermal mass of silicon nitride film with suspended structure fabricated by micromachining technique. In the structure, the Pt thin film is used as both heater and temperature detector based on its temperature resistance characterization. A reasonable scheme has been designed to reduce the additional thermal conductance and thermal mass introduced by Pt thin film. During the test, when DC current is input in the Pt thin film, the microbridge temperature rises gradually until the system reaches steady. The simulation for the thermal response characterization by Matlab indicates that bigger thermal conductance and thermal mass result in higher microbridge temperature at the steady state. Finally, the impact of invalid heating Pt resistance and microfabrication process on the measurement precision is discussed and the methods to improve the precision are given.

Key words Pt thin film; silicon nitride thin film; thermal conductance; thermal mass

在微结构器件的设计中,必须采用适当的方法来判断其多方面的性能,再根据所测试的性能来指导器件的设计^[1]。在光学、力学、热学、电学等性能中,热学性能又显得尤其重要。如在微测辐射热计中,热导 G 、热容 C 是衡量微桥热性能的两个重要参数。热导表征微桥的热绝缘性能,在满足机械支撑的条件下,应当尽量减小氮化硅薄膜的热导值,使桥面在接收红外辐射后得到更大的温升,从而获得更大的器件探测率^[2]。另外,热容也不能过大,太大了会造成桥面在吸收相同的热量后,温度升高较小。因此要在热时间常数 $\tau=C/G$ ^[3]满足帧速要求的同时使热导、热容两项参数值最优。

文献[4]测试了微测辐射热计所用氮化硅薄膜的热导和热容,但是由于在测试过程中忽略了Pt薄膜电阻所带来的附加热导、热容,测试精度比较低。

本文提出的测试结构对其进行了一些改进,扣除了Pt薄膜电阻所带来的附加热导、热容,可以得到与真实值更加接近的热参数。这种测试结构只需在微测辐射热计原有的光刻板基础上增加一张Pt薄膜的光刻板就可以完成了。该方法具有结构简单、成本低、与微测辐射热计制作工艺兼容、测试精确度高等优点。

1 测试原理

热性能测试结构的俯视图如图1所示。在待测的氮化硅薄膜表面溅射一层Pt薄膜用来加热和测温^[5],根据Pt薄膜电阻温度特性来测试桥面的温度。整个测试过程在真空环境中进行。通过在Pt薄膜电阻中通直流电流 I ,引起待测氮化硅薄膜温度升高,达到热平衡时,整个系统散失的能量与通过Pt薄膜电阻

收稿日期: 2007-12-16; 修回日期: 2008-05-23

基金项目: 国家杰出青年基金(60425101); 教育部新世纪优秀人才计划(NCET-04-0896)

作者简介: 蒲娟(1983-),女,博士生,主要从事光电材料与器件等方面的研究。

输入的能量相等。热导^[6]为:

$$G = \frac{P}{\Delta T} = \frac{IR(T)}{\Delta T} \quad (1)$$

式中 $R(T)$ 和 P 分别为热稳定时Pt薄膜的电阻值和Pt薄膜电阻两端输入的功率; G 和 ΔT 分别为桥腿上薄膜的热导和热稳定时悬膜的温升。Pt薄膜电阻值与温度之间的关系式可表示为:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (2)$$

式中 R_0 为室温时Pt薄膜的电阻值; α 为Pt薄膜的电阻温度系数。

在悬膜被加热的瞬态过程中, 由于整个系统处于非绝热状态, 其升温过程随时间的变化规律^[3]为:

$$T(t) = \Delta T \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (3)$$

式中 t 为升温时间; τ 为热时间常数; $T(t)$ 为时间 t 时待测氮化硅悬膜的温度。根据Pt薄膜的电阻温度特性测出悬膜温度随时间变化的曲线, 即可求出热时间常数 τ 。桥面薄膜的热容为:

$$C = G\tau \quad (4)$$

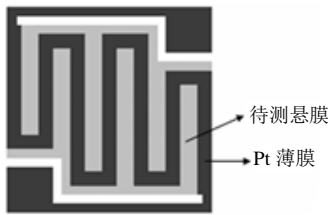


图1 测试结构俯视图

2 测试结构设计

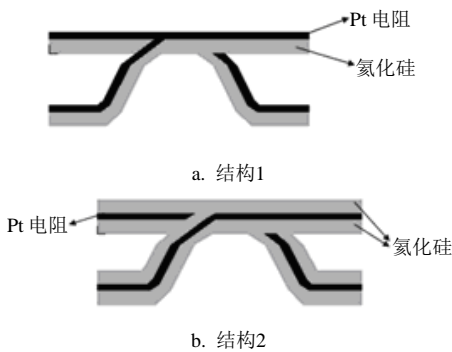


图2 测试结构侧面图

氮化硅在微测辐射热计中作为氧化钽良好的衬底和钝化层, 易于沉积, 机械性能好, 可以起到很好的支撑作用。虽然待测氮化硅薄膜的厚度约是铂薄膜的10倍, 但是由于铂薄膜的热导率约为氮化硅薄膜的9倍^[4,7], 因此铂薄膜的热导在测试中不能忽略。为了能够除去Pt薄膜的附加热导, 本文采用了将两个类似结构进行比较的方法^[8], 如图2所示。

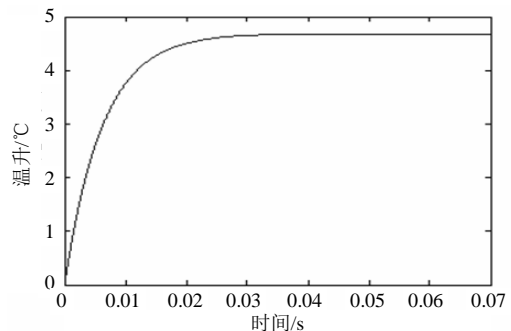
结构特点: 图2a、图2b中最下面一层氮化硅薄膜作为整个结构的支撑层。图2a与图2b中的支撑层氮化硅薄膜和Pt薄膜一样。Pt薄膜在保证电连通的情况下尽量薄, 控制在50 nm左右。图2b中最上面一层氮化硅是待测薄膜, 厚约500 nm。

根据“差动”原理, 将测得的图2b、图2a中结构的热导、热容相减, 得到待测氮化硅薄膜的热导、热容, 就可以计算出它的热导率与比热。

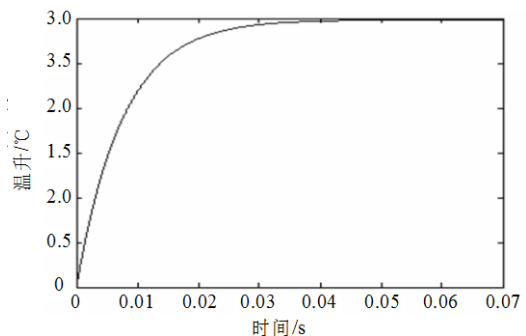
3 讨论

3.1 结构的热响应仿真

用Matlab对图2a和图2b中的结构热响应特性进行仿真^[9], 热响应曲线如图3所示。在Pt薄膜电阻中通入的电流相同, 都为10 mA; Pt薄膜的形状与图1中的相同, 厚度为50 nm。本文的所有模拟都设定Pt电阻率为体材料的电阻率 $0.105 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 。图2a中薄膜温升为4.7 °C图2b中薄膜温升为3.0 °C图2a中薄膜温升大于图2b。这是因为图2b结构的总热容和总热导都比图2a结构的大, 在加载相同的情况下, 结构热容越大、热导越大, 所产生的温升越小。



a. 图2a结构的热相应曲线



b. 图2b结构的热相应曲线

图3 热响应曲线

3.2 无效加热电阻对测试精确度的影响

采用Pt薄膜电阻来加热桥面, 把没有对桥面进行加热的Pt薄膜称为无效加热电阻。桥腿上的Pt薄膜被视为无效加热电阻。无效加热电阻的存在使得悬膜损失功率计算值比实际值大^[10]。设室温时有效加

热电阻值为 R_E , 无效加热电阻值为 R_1 。分别在图2a、图2b结构的Pt薄膜中通相等的恒定电流 I , 桥面温升分别为 ΔT_1 、 ΔT_2 , 则有:

$$G_1 = \frac{P_{T_1}}{\Delta T_1} = \frac{P_{E_1}}{\Delta T_1} + \frac{P_{I_1}}{\Delta T_1} = \frac{P_{E_1}}{\Delta T_1} + \frac{I^2 R_1 (1 + \alpha \beta_1 \Delta T_1)}{\Delta T_1} \quad (5)$$

$$G_2 = \frac{P_{T_2}}{\Delta T_2} = \frac{P_{E_2}}{\Delta T_2} + \frac{P_{I_2}}{\Delta T_2} = \frac{P_{E_2}}{\Delta T_2} + \frac{I^2 R_1 (1 + \alpha \beta_2 \Delta T_2)}{\Delta T_2} \quad (6)$$

式中 G_1 、 G_2 分别为图2a、图2b结构的热导; P_{T_1} 、 P_{T_2} 、 P_{E_1} 、 P_{E_2} 、 P_{I_1} 、 P_{I_2} 分别为热稳定时图2a、图2b结构的总输入功率、有效加热功率和无效加热功率; $\beta_1 \Delta T_1$ 、 $\beta_2 \Delta T_2$ 分别为图2a、图2b结构桥腿的平均温升; α 为Pt薄膜的电阻温度系数。

$$G = G_2 - G_1 = \frac{P_{E_2}}{\Delta T_2} - \frac{P_{E_1}}{\Delta T_1} + I^2 R_1 \left(\frac{1}{\Delta T_2} - \frac{1}{\Delta T_1} \right) + I^2 R_1 \alpha |\beta_2 - \beta_1| \quad (7)$$

式中 G 为待测氮化硅薄膜的热导。因桥面温升最大, 则 β_1 、 β_2 在0~1之间, α 为0.26%^[10]。式(7)右边最后两项是无效加热电阻引入的偏差, 最后一项与第二项相比很小, 可以忽略。

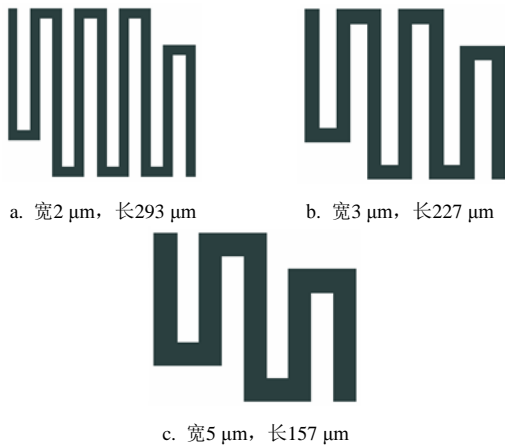


图4 不同Pt薄膜

图4所示为桥面上不同的Pt薄膜电阻图形, 采用Matlab对无效加热电阻引入的偏差进行仿真计算。修正计算前的偏差如表1所示, 从表1可以看出偏差从小到大依次是图4a、图4b、图4c。即桥面上的Pt加热电阻越短、越宽, 无效加热电阻所占比例越大, 引入的偏差就越大。无效加热电阻引入的偏差是很大的, 因此需要对这种计算的方法进行修正。实际上桥腿上的电阻存在温度梯度, 对它的平均温度很难准确计算。对此, 本文假设无效加热电阻(即桥腿上的电阻)温度保持在室温, 从总的输入功率中减去无效加热功率, 式(5)修正为:

$$G'_1 = \frac{P_{T_1} - I^2 R_1}{\Delta T_1} \quad (8)$$

$$G'_2 = \frac{P_{T_2} - I^2 R_1}{\Delta T_2} \quad (9)$$

根据式(7), 则有:

$$G' = \frac{P_{E_2}}{\Delta T_2} - \frac{P_{E_1}}{\Delta T_1} + I^2 R_1 \alpha |\beta_2 - \beta_1| \quad (10)$$

式中 G' 为修正计算得到的待测氮化硅薄膜热导值。偏差部分为式(10)右边的最后一项。Matlab的仿真结果列入表2中。可以看出修正计算以后, 无效加热电阻引入的偏差小多了。

表1 修正计算前的偏差

Pt 图形	无效加热电阻在总电阻中占的百分比/(%)	氮化硅热导偏差/(%)	氮化硅热容偏差/(%)
图4a	20.16	20.14	20.19
图4b	32.84	32.80	32.88
图4c	54.09	54.05	54.16

表2 修正计算后的偏差

Pt 图形	无效加热电阻在总电阻中占的百分比/(%)	氮化硅热导偏差/(%)	氮化硅热容偏差/(%)
图4a	20.16	0.01	0.08
图4b	32.84	0.01	0.13
图4c	54.09	0.01	0.27

3.3 微结构加工工艺对测试精确度的影响

本文采用了将两种不同膜层结构的测试值相减的方法来除去Pt薄膜电阻带来的附加热导与热容, 该方法是在假设两种结构中的同种薄膜完全一样的情况下提出的。然而在不同结构中的同种薄膜不可能制作得完全一样, 这种方法必然会引进一定的误差, 因此实际的测试误差应比表2中的误差大。为了减小工艺误差, 可以将同种薄膜一起沉积、腐蚀, 并且同种结构制作几组样品, 将测出的热导、热容值求平均。

4 结束语

本文提出了一种氮化硅薄膜热导、热容测试结构, 为了得到更加精确的测试结果, 在测试过程中排除了Pt薄膜电阻的影响。对结构的热响应特性进行了模拟, 在加载相同的情况下, 结构热容越大、热导越大, 所产生的温升越小。最后对这种测试方法进行了讨论, 无效加热电阻、结构制作工艺等都会引入一定的误差。能够精确地测量氮化硅薄膜的热性能将极大地促进微结构器件设计的进一步优化。

参 考 文 献

- [1] MURPHY D, RAY M, KENNEDY A, et al. High sensitivity 640×512 (20 μm pitch) microbolometer FPAs[J]. Proceeding of SPIE, 2006, 6206: 62061A-1-14.
- [2] BRASUNAS J C, LAKEW B, FETTIG R. A comment on the reported detectivity of a new uncooled thermal infrared detector[J]. Sensors and Actuators, 2002, 96: 211-213.
- [3] LI Biao. Design and simulation of an uncooled double-cantilever microbolometer with the potential for mK NETD[J]. Sensors and Actuators, 2004, 112: 351-359.
- [4] ERIKSSON P, ANDERSSON J Y, STEMME G. Thermal characterization of surface-micromachined silicon nitride membranes for thermal infrared detectors[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(1): 55-61.
- [5] REVAZ B, ZINK B L, HELLMAN F. Si-N membrane-based microcalorimetry: Heat capacity and thermal conductivity of thin films[J]. Thermochemica Acta, 2005, 432: 158-168.
- [6] GUBLER U, RAUNHARDT M, STUMP A. Measurement technique for thermal conductivity of thin polymer films[J]. Thin Solid Films, 2006, 515: 1737-1740.
- [7] 曹炳阳, 张清光, 张 兴, 等. 纳米Pt膜的晶粒尺寸及其对热导率的影响[J]. 金属学报, 2006, 42(11): 1207-1211.
- CAO Bing-yang, ZHANG Qing-guang, ZHANG Xing, et al. Grain size and its effect on thermal conductivity of Pt nanofilms[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(11): 1207-1211.
- [8] SABATE N, SANTANDER J, GRACIA I, et al. Characterization of thermal conductivity in thin film multilayered membranes[J]. Thin Solid Films, 2005, 484: 328-333.
- [9] 袁宁一, 李 格, 李金华, 等. 微测辐射热计的红外热响应模拟[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(3): 183-187.
- YUAN Ning-yi, LI Ge, LI Jin-hua, et al. Thermal response simulation of microbolometer[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(3): 183-187.
- [10] SONG Qing-lin, CUI Zheng, XIA Shang-hong, et al. Measurement of SiNx thin film thermal property with suspended membrane structure[J]. Sensors and Actuators, 2004, 112: 122-126.

编辑 漆 蓉

(上接第312页)

- [6] 吴 飞. 片上网络适配单元的设计与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- WU Fei. Design and implementation of adaper for network on chip[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [7] DALLY W J. Virtual-channel flow control[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1992, 3(2): 194-205.
- [8] VAN D T E B, JASPERS E G T. Mapping of MPEG-4 decoding on a flexible architecture platform[C]// Proceedings of SPIE. San Jose: SPIE, 2001: 1-13.
- [9] 岳培培, 刘 建, SHEIKH Anjum, 等. NoC映射问题中的列举路径分配算法[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(1): 54-57.
- YUE Pei-pei, LIU Jian, SHEIKH A, et al. Enumeration-based path allocation algorithm in NoC mapping[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(1): 54-57.
- [10] SIA. International technology roadmap for semiconductors (2007 edition)[DB/OL]. [2007-12-31]. <http://public.itrs.net/>.

编辑 漆 蓉