

# LiTaO<sub>3</sub>薄膜红外探测器热分析

黄大贵<sup>1</sup>, 谢明君<sup>1</sup>, 张德银<sup>1,2</sup>, 董政<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学机电学院 成都 610054; 2. 中国民航飞行学院航空工程学院 四川 广汉 618307)

**【摘要】**利用有限元软件ANSYS对LiTaO<sub>3</sub>薄膜热释电红外探测器进行热分析; 研究了敏感元绝热层的厚度与热导率以及基底的厚度及材料对热分析结果的影响; 提出了优化方案, 并给出优化前后仿真的对比结果。分析结果表明, 探测器的热响应随绝热层的厚度增加而增加, 随绝热层的热导率降低而增加。在硅、镍、蓝宝石三种基底材料中, 使用蓝宝石的探测器的热响应效果最佳。在绝热层厚度为2 μm的情况下, 基底的厚度对探测器响应的影响可以忽略。实验测试结果证实了优化模型的有效性。

**关键词** ANSYS软件; LiTaO<sub>3</sub>薄膜红外探测器; 基底材料; 热分析; 绝热层;  
**中图分类号** TN223 **文献标识码** A

## Thermal Analysis of LiTaO<sub>3</sub> Film Infrared Detector

HUNG Da-gui<sup>1</sup>, XIE Ming-jun<sup>1</sup>, ZHANG De-yin<sup>1,2</sup>, and DONG Zheng<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China Guanghan Sichuan 618307)

**Abstract** Thermal analysis of LiTaO<sub>3</sub> film infrared detector based on ANSYS has been studied in this paper. The influences on the thermal analysis results are obtained, through changing the substrate material and its thickness and the thickness and thermal conductivity of thermal-insulation layer of the LiTaO<sub>3</sub> film infrared sensing element. The thermal response of the infrared detector increases with the thickness of thermal-insulation layer but is in inverse proportion to its thermal conductivity. Among the substrate materials of silicon, nickel, and sapphire, the LiTaO<sub>3</sub> thin film infrared detector with sapphire substrate has the best thermal response. The influence of the thickness of substrate can be ignored when the infrared detector with 2 μm thick thermal-insulation layer. An optimized model is presented and the comparing simulation results of the optimized and the original are given out. The experiment result verifies the validity of the optimized model.

**Key words** ANSYS; LiTaO<sub>3</sub> film Infrared detector; substrate material; thermal analysis; thermal insulation layer

某些电介质铁电薄膜的表面受到调制的红外辐射, 辐射热流被铁电薄膜吸收, 在薄膜内部产生一个变化的温度场分布, 温度的变化引起铁电薄膜自发极化, 从而在铁电薄膜表面会产生电荷的变化, 该类现象称为热释电效应<sup>[1]</sup>。钽酸锂(LiTaO<sub>3</sub>)是一种具有热释电效应的铁电材料, 居里点温度高, 热释电系数大, 而相对介电常数小, 非常适合做热释电红外探测器的敏感材料<sup>[2]</sup>。利用热释电效应制作的红外探测器具有无选择性、体积小、无需制冷、成本低廉的特点, 具有广泛的应用前景。但是与传统的光子型探测器相比响应率低, 因此, 有必要进行提高探测器的响应率的研究。硅基底上热释电薄膜

探测器响应率低的主要原因是硅基底的热导率高, 从而导致热散失大。降低热散失、提高热绝缘度是提高探测器响应的关键之一。提高热绝缘度可通过设置热绝缘结构或者在基底与下电极间增加一层热导率低的薄膜作为绝热层来实现<sup>[3]</sup>。热绝缘结构主要有悬空结构、空气隙结构及微桥结构<sup>[4]</sup>。这3种结构虽然能够在一定程度上阻止热流由热释电薄膜向硅基底散失, 但是工艺复杂, 成品率低及抗震性能差。由多孔二氧化硅作为的绝热层可以提高热绝缘度, 并可提高热绝缘结构的机械强度<sup>[5]</sup>, 因此是较好的解决方法。

ANSYS是一款功能强大的通用有限元软件, 使

收稿日期: 2006-10-23; 修回日期: 2007-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(60572007); 教育部博士点基金(20040614004)

作者简介: 黄大贵(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能机械系统方面的研究。

用该软件首先建立被分析物体的几何模型,并给出所用材料的物理属性,然后划分单元,按给定条件施加载荷,进行求解。最后对结果进行处理,可以输出温度场的云图及各个节点或单元的温度。本文使用ANSYS 9.0对LiTaO<sub>3</sub>薄膜红外探测器进行热分析,找出了影响探测器响应特性的结构因素。

## 1 一维热传导理论

对于薄膜探测器,厚度相对于横向尺寸极小,横向散热可忽略不记,假设辐射以平面波的形式入射,相关问题就变为一维热传导的求解问题<sup>[6]</sup>。热释电薄膜内的传热方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中  $T$ 为温度;  $t$ 为时间;  $x$ 为距离;  $K$ 为热导率;  $\rho$ 为材料密度;  $c$ 为比热。

探测器的响应电流为:

$$i_p = \eta RA \frac{dT}{dt} = \eta RA \frac{K}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2)$$

式中  $\eta$ 为辐射吸收系数;  $R$ 为热释电系数;  $A$ 为吸收面积;  $dT/dt$ 为热释电层的温度变化率。由式(2)可知,响应电流的求解归结为求解  $\partial T^2/\alpha^2$ , 只要求得任意时间点下薄膜内的温度分布,就获得该时间点的  $\partial T^2/\alpha^2$ , 得到响应电流。在  $\eta$ 、 $R$ 、 $A$ 不变的条件下,响应电流的大小与  $dT/dt$ 成正比,即  $dT/dt$ 越大,探测器的响应电流就越大。

## 2 仿真分析

### 2.1 模型的建立

吸收层 Gold black(Au)
上电极 Au
热释电层 LiTaO <sub>3</sub>
下电极 Pt
过渡层 2 TiO <sub>2</sub>
过渡层 1 SiO <sub>2</sub>
绝热层 Porous SiO <sub>2</sub>
基底 Si

图1 探测器敏感元结构图

使用有限元软件ANSYS对探测器的敏感单元进行热分析,可得到模型任意时间点的热场温度分布,进一步可求出  $dT/dt$ 。将不同模型的仿真结果  $dT/dt$ 进行对比,就可获得影响探测器响应率的结构

参数。针对LiTaO<sub>3</sub>薄膜红外探测器的敏感单元建立模型,其截面如图1所示,由最上层开始依次为吸收层、上电极、热释电层、下电极、过渡层2、过渡层1、绝热层、基底<sup>[7-8]</sup>。薄膜面积为  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。在ANSYS中取模型剖面建立模型,采用PLANE55单元,层与层之间使用“黏结”的方式连接,各层的材料特性参数及厚度如表1所示。

表1 复合层膜的材料特性表<sup>[9]</sup>

复合膜结构 厚度/ $\mu\text{m}$	比热/ $\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$	密度/ $10^{-12} \text{g} \cdot \mu\text{m}^{-3}$	热导率/ $10^{-4} \text{W} \cdot (\mu\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
Si(20)	0.702	2.328	1.240 0
Porous SiO <sub>2</sub> (2)	0.787	1.320	0.000 2
SiO <sub>2</sub> (0.5)	0.787	2.202	0.013 8
TiO <sub>2</sub> (0.05)	0.710	3.900	0.006 2
Pt(0.15)	0.134	21.450	0.716 0
LiTaO <sub>3</sub> (1)	0.250	7.450	0.460 0
Au(0.1)	0.130	19.320	3.000 0
Gold black(Au) (0.5)	0.130	0.345	0.020 0

### 2.2 施加载荷

根据实际的测试条件,假定黑体辐射源温度为500 K,吸收层表面温度为293 K,黑体辐射孔的直径为1 cm,吸收层距黑体辐射孔的距离为20 cm,入射到吸收层的热流密度为:

$$H_{\text{HeatFlux}} = \alpha \frac{\sigma(T^4 - T_0^4)A}{\pi L^2} \quad (3)$$

式中  $\alpha$ 为斩波器的调制系数,对于正弦调制取  $\sqrt{2}/2$ ;  $T$ 为黑体温度;  $T_0$ 为环境温度;  $A$ 为黑体辐射孔面积;  $L$ 为黑体辐射孔到探测器辐射面的距离;  $\sigma$ 为斯忒藩-波尔兹曼常数( $5.67 \times 10^{-12} \text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4$ )可求得热流密度为  $6.69 \times 10^{-13} \text{W}/\mu\text{m}^2$ 。设定初始温度为0 K,将温度载荷0 K施加到基底下表面作为第一类边界条件,并将热流密度  $6.69 \times 10^{-13} \text{W}/\mu\text{m}^2$ 施加到吸收层表面作为第二类边界条件<sup>[10]</sup>。忽略非线性因素,横向散热可忽略不计,问题变为一维瞬态热传导的求解。在ANSYS中选择瞬态热分析,仿真时间为1 s,共分为3个载荷步,120个载荷子步施加载荷。

### 2.3 结果讨论

受红外照射1 s后有绝热层和无绝热层的热释电层温度分布如图2所示,取热释电层厚度为横坐标,方向为由下电极指向上电极,纵坐标为温度。由图2可知,当  $t=1$  s时,热释电层内的温度分布,有  $2 \mu\text{m}$ 绝热层的温度为  $2.24 \times 10^{-5} \text{K}$ 远大于无绝热层的  $1.17 \times 10^{-6} \sim 1.23 \times 10^{-6} \text{K}$ ,表明绝热层有助于减少热

损失而提高探测器的响应。

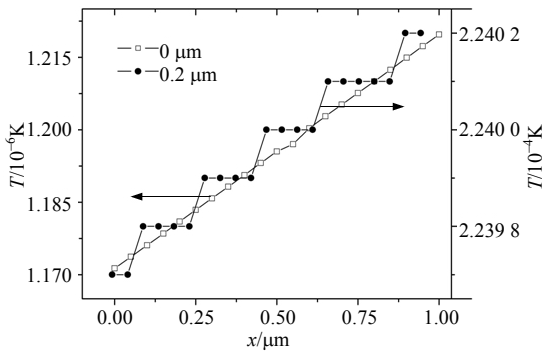


图2 热释电层温度场的分布

为了确定绝热层厚度对于响应速率 $dT/dt$ 的影响, 本文分别对绝热层厚度为0.0、0.5、2.0、10.0、30.0  $\mu\text{m}$ 的模型进行分析, 将其结果进行对比, 如图3所示。在 $1 \times 10^{-6}$  s之前, 绝热层膜厚度的变化对 $dT/dt$ 的影响不大; 在 $1 \times 10^{-5} \sim 0.1$  s内, 随着绝热层薄膜厚度的增加,  $dT/dt$ 明显增大, 在10  $\mu\text{m}$ 以上变化也趋于平稳。30  $\mu\text{m}$ 与10  $\mu\text{m}$ 的区别不大, 0.1 s以后传热方式由非稳态传热变为稳态传热, 因此 $dT/dt$ 慢慢趋近于零。这反映了热释电红外探测器只在斩波、脉冲或其他形式的调制辐射作用下才有信号输出的特性。

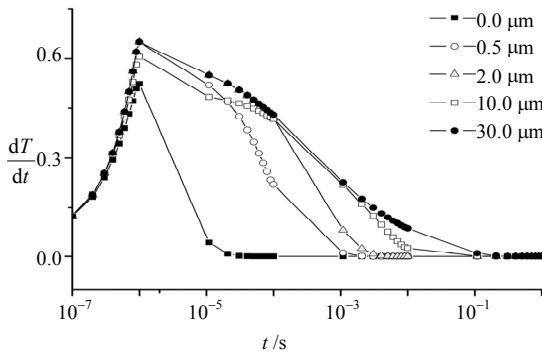


图3 不同绝热层厚度的温度变化率

绝热层的热导率分别为 $2 \times 10^{-7}$ 、 $2 \times 10^{-8}$ 、 $2 \times 10^{-9}$   $\text{W}/(\mu\text{m}\cdot\text{K})$ 时, 分别对模型进行瞬态热分析, 热释电层的 $dT/dt$ 与时间 $t$ 的关系如图4所示。在 $1 \times 10^{-6} \sim 0.1$  s内, 随着绝热层热导率的降低,  $dT/dt$ 逐渐升高。表明绝热层的热导率越低, 探测器的响应电流越大, 而且影响越显著。当基底的材料分别为Ni、Si、蓝宝石时, 探测器的响应率在 $1 \times 10^{-3} \sim 1$  s有较大的不同, 如图5所示。采用蓝宝石和镍为基底的响应性能最佳, 其次为硅。

图6所示为在绝热层厚度为2  $\mu\text{m}$ 的条件下, 基底的厚度为60、120、240、360  $\mu\text{m}$ 进行了分析。由图

可见, 热释电层的 $dT/dt$ 几乎是一致的, 差别很小, 说明该厚度绝热层具有明显的绝热作用, 硅基底上散失的热量已经很小, 可以忽略不记。

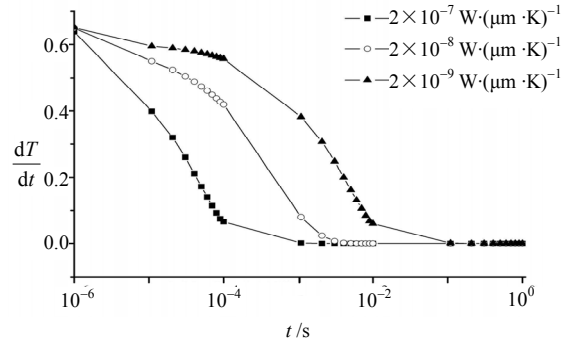


图4 不同绝热层热导率的温度变化率

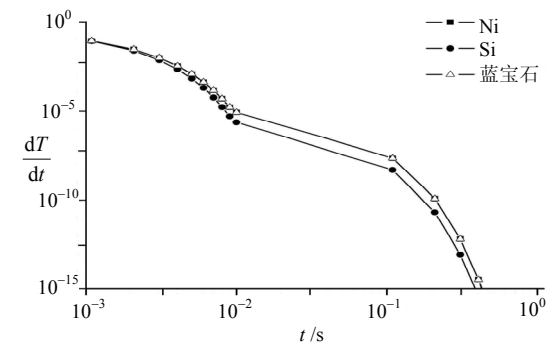


图5 不同材料基底的温度变化率

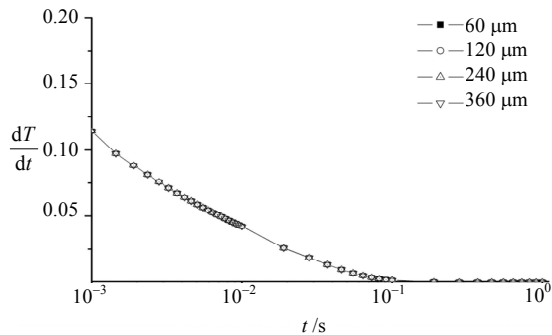


图6 不同厚度基底的温度变化率

### 2.4 优化设计与实验验证

根据以上分析, 本文给出优化后的模型: 采用厚度为10  $\mu\text{m}$ 的多孔二氧化硅作为绝热层(热导率为 $2 \times 10^{-8}$   $\text{W}/(\mu\text{m}\cdot\text{K})$ , 孔率为59%)、0.18  $\mu\text{m}$ 的多孔二氧化硅(孔率为4%)作为过渡层, 采用厚度为120  $\mu\text{m}$ 的蓝宝石为基底。优化后的模型的热分析结果如图7所示(optimized)。本文按优化后模型设计制作了钽酸锂薄膜红外探测器, 通过扫描热显微镜测试了随时间的温度变化, 如图7所示(experiment)。实验结果与仿真结果比较, 最大相对误差为6.41%, 在 $1 \times 10^{-6} \sim 0.1$  s内,  $dT/dt$ 比优化前有大幅度的提高, 相应的探测器响应电流也有大幅度的增加, 显著地提高了探

测器的探测性能。

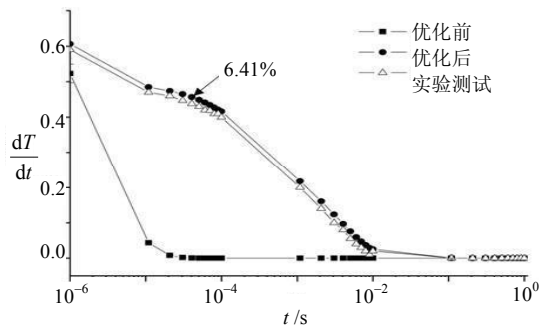


图7 优化前、后和实验测试3种温度变化率的对比

### 3 结束语

本文利用有限元软件ANSYS对LiTaO<sub>3</sub>薄膜红外探测器进行了热分析。根据试验的条件,对不同绝热层的热导率、绝热层厚度、基底材料及基底厚度的模型分别进行了瞬态热分析,得出以下结论:探测器的响应与绝热层的厚度成正比,并与绝热层的热导率成反比;蓝宝石或镍作为基底优于硅;在绝热层的厚度为2 μm时,硅基底的厚度对探测器的响应可忽略不计。仿真结果表明,优化后探测器的响应性能有较大幅度的提高。实验测试热响应结果与仿真结果十分吻合,证实优化后模型是有效的。

#### 参考文献

[1] LI Jin-hua, YUAN Ning-yi, LI kun. Properties of sol-gel PZT film based on Indium-Tin oxide substrate[J]. *Ferroelectrics*, 2001, 260(1-4): 533-538.

[2] ARAKAWA S, NITTA H, HAYASHI S. Synthesis of lanthanum lithium tantalate powders and thin films by the sol-gel method[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, (231): 290-294.

[3] ROGALSKI A. Infrared detectors: An overview[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002,(43): 187-210.

[4] LIENHARD D, PLOSS B. A matrix formalism for the simulation of pyroelectric sensors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, (171): 5426-5433.

[5] 李 靛, 姚 喜, 张良莹. 非制冷薄膜红外探测器绝缘结构的研制[J]. *半导体学报*, 2004, 25(7): 847-851.

LI Liang, YAO Xi, ZHANG Liang-ying. Fabrication of thermal insulation structure for uncooled pyroelectric thin film IR detector[J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(7): 847-851.

[6] 杨建明, 吴小清, 姚 熹. 热释电红外探测器吸收层研究[J]. *红外技术*, 2002, 24(4): 53-54.

YANG Jian-ming, WU Xiao-qing, YAO Xi. Absorbing layers of pyroelectric infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(4): 53-54.

[7] LIU Shi-jian, ZENG Xiang-bin, CHU Jun-hao. Thermal-sensitive BST thin film capacitors for dielectric bolometer prepared by RF magnetron sputtering[J]. *Microelectronics Journal*, 2004, 35(7): 601-603.

[8] KOHLI C H, PRASAD J K, SCHMID P E, et al. Characterization of lithium tantalite thin films sputter-deposited onto RuO<sub>2</sub>/Si substrates[J]. *Microelectronic Engineering*, 1995, 29: 201-204.

[9] CARDARELLI F. *Materials handbook*[M]. London: Springer, 1999.

[10] ZHU Yong-yuan, ZHANG Zhi-yong, GU Ming, et al. Curie temperature and domain inversion in proton exchanged LiTaO<sub>3</sub>[J]. *Materials Letters*, 1996, 27: 333-335.

编辑 黄 莘

(上接第636页)

[4] MURTHY D N P, BULMER M, ECCLESTON J A. Weibull model selection for reliability modeling[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2004, 86(3): 257-267.

[5] PHAM H, LAI C D. On recent generalizations of the Weibull distribution [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2007, 56(3): 454-458.

[6] JIANG R Y, MURTHY D N P. Reliability modeling involving two Weibull distributions[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 1995, 47(3): 187-198.

[7] ATTARDI L, GUIDA M, PULCINI G. A mixed-Weibull regression model for the analysis of automotive warranty data[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2005,

87(2): 265-273.

[8] JIANG S Y, KECECIOGLU D. Graphical representation of two mixed Weibull distribution[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1992, 41(2): 241-247.

[9] JIANG R Y, MURTHY D N P. Modeling failure-data by mixture of 2 weibull distribution: a graphical approach[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 1995, 44(3): 477-488.

[10] KECECIOGLU D, WANG W D. Parameter estimation for mixed-weibull distribution[C]//*Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium 1998*. Florida: IEEE, 1998: 247-252.

[11] NOCEDAL J, WRIGHT S J. *Numerical optimization*[M]. Berlin: Springer, 1999.

编辑 税 红