

文章编号:1001-5078(2018)07-0827-05

· 激光应用技术 ·

激光辐照碲化铟红外探测器的热应力损伤研究

刘 洋, 张 悦, 牛春晖, 吕 勇

(北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘 要:通过介绍碲化铟红外探测器的基本构成及其材料热力学相关特征,阐述了激光辐照碲化铟红外探测器造成的损伤机理,采用有限元分析法,分析相关的辐照环境和条件并建立了一种三维仿真模型。仿真模拟了波长为 $10.6\ \mu\text{m}$ 的 CO_2 激光辐照碲化铟红外探测器时各部分的温度变化及应力变化情况,通过数值分析比较了在光斑面积一定的情况下经过不同功率的激光辐照后碲化铟探测器表面径向及内部轴向发生的温度场变化及应力场变化;探测器表面应力值经过 $10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的激光辐照后很快达到最高点,造成损伤,碲化铟与铟柱接触部分的应力值随光斑半径大小不同而有所变化。将碲化铟探测器材料的应力损伤阈值及变化趋势同已有实验数据进行对比,验证了模型的精确性。

关键词:碲化铟;有限元;应力场变化;损伤阈值

中图分类号:TN215;TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.07.005

Research on the thermal-stress damage of InSb infrared detector under laser irradiation

LIU Yang, ZHANG Yue, NIU Chun-hui, LÜ Yong

(College of Instrumentation Science & photoelectric Engineering,
Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The basic structure and the materials thermal-stress properties of InSb infrared detector are introduced. The damage mechanism of InSb infrared detector caused by laser irradiation is elaborated. A 3D simulation model is built and related irradiation environment and condition are analyzed by using finite element method. The temperature changing and stress changing in each part of InSb infrared detector under CO_2 laser irradiation with a wavelength of $10.6\ \mu\text{m}$ is simulated. The changes of temperature field and the stress field along the surface radial direction and the internal axial direction respectively under different laser power densities are compared by numerical analysis method when spot area is unchanged. The surface stress of the detector reached the highest point quickly after $10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$ laser irradiation, and then the detector is damaged. The stress value of the contact part between InSb and indium columns varied with the radius of laser spot. The accuracy of the InSb detector model is verified by comparing with the existing experimental data of stress damage threshold and changing trend.

Key words: InSb; finite element method; variation of stress field; damage threshold

1 引 言

大面阵碲化铟(InSb)红外探测器在类型上属于第三代红外探测器,与之前两代探测器相比较,其

本身在量子效率、成本效益及可靠性方面都有明显卓越的优势。大面阵碲化铟红外探测器在雷达探测方面、激光远距离测距方面、光电能量对抗方面以

作者简介:刘 洋(1982-),男,博士,讲师,主要研究方向为微光及热成像技术,成像光谱技术,光电探测技术等。E-mail: peteroof@bistu.edu.cn

收稿日期:2017-11-27

及光纤通信方面都具有重要的用途,尤其在军用凝视制导及制备光电设备上,具有重要的作用^[1]。铟化铟红外探测器采用半导体材料,工作波段主要位于空气的中波窗口 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,受到激光照射会造成其温度场和应力场的变化,严重的会导致探测器损坏。为抑制背景噪声、提高信噪比,高灵敏度的面阵探测器通常工作于液氮温度。在激光辐照过程中,相邻材料间线膨胀系数的不同,将在面阵探测器中引入热应力/应变,引起 InSb 光敏元芯片碎裂。这制约着 InSb 面阵探测器的适用性,成为批量生产中急需解决的问题。因此对于铟化铟红外探测器受到激光辐照产生碎裂损伤现象的研究计算就非常有必要。铟化铟探测器制造工艺复杂、市场价格高,研究过程中对于其损伤特性无法采用大量实验的方法,计算机可以通过仿真软件模拟实验环境,从而解决这一难题,本文主要针对于建立能够高度仿真模拟实验环境的计算机模型这点来进行研究^[2]。

2 理论模型

2.1 仿真模型建立

仿真模型用 11×11 小面阵像素元等效 128×128 大面阵进行热应力分析。如图 1 所示,模型简化为三层结构:第一层是铟化铟芯片(厚度设定为 $10 \mu\text{m}$),第二层是 11×11 的铟柱(厚度设定为 $10 \mu\text{m}$),第三层是硅读出电路(厚度设定为 $300 \mu\text{m}$)。铟化铟红外焦平面探测器一般在液氮的温度(77 K)下进行检测执行,如此可以提高信噪比、减少背景噪声,使探测器的灵敏度增加。为了模拟实验条件中液氮冷却的过程,仿真模型时采用了设置传热模块温度为 77 K 恒温的方式。

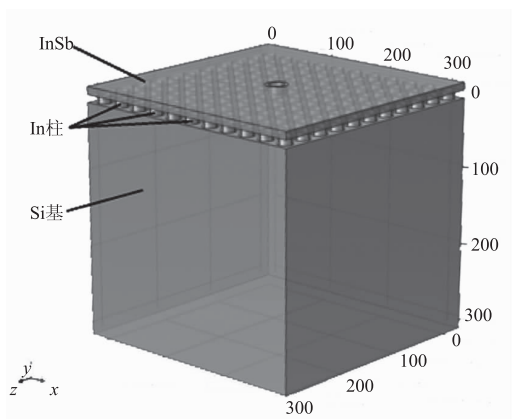


图1 仿真模型结构

Fig. 1 The structure of simulation model

2.2 应力场解析计算

热应力的产生有三种情况:一是温度改变时,由于物体热胀冷缩受到约束时产生热应力,即外部变形受到限制产生的热应力;二是同一物体内部存在温度场,各部分受到相邻部分温度的影响不能自由收缩引起的热应力,即相互变形受到约束产生的热应力;三是由不同材料组成的构件因不同部分的热膨胀系数不同或膨胀方式不同,各部分相互制约、不能自由伸缩产生的热应力,即各部分之间变形受到约束产生的热应力。在高温部分产生压应力,低温部分则产生拉应力。在轴对称瞬态温度场下的二维热应力可由如下的热弹性方程给出^[2-3]:

$$\varepsilon_r = \partial u / \partial r, \varepsilon_\theta = ur/r, \varepsilon_y = \partial w / \partial y \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\partial u_r}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial r}, \gamma_{r\theta} = \gamma_{\theta y} = 0 \quad (2)$$

本构方程:

$$\sigma_r = \frac{2G}{1-2\nu} \left\{ (1-\nu) \frac{\partial u_r}{\partial r} + \nu \left(\frac{u_r}{r} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \frac{E}{1-2\nu} \alpha T(r, y, t) \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2G}{1-2\nu} \left\{ (1-\nu) \frac{u_r}{r} + \nu \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right\} - \frac{E}{1-2\nu} \alpha T(r, y, t) \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{2G}{1-2\nu} \left\{ (1-\nu) \frac{\partial w}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \right) \right\} - \frac{E}{1-2\nu} \alpha T(r, y, t) \quad (5)$$

$$\tau_{ry} = G \left(\frac{\partial u_r}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (6)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{y\theta} = 0 \quad (7)$$

平衡方程:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{ry}}{\partial y} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \tau_{ry}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\tau_{ry}}{r} = 0 \quad (9)$$

式中, ν 为泊松比; E 为弹性模量; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 为剪切模量; α 为热膨胀系数; u 为沿径向 r 方向的位移分量; w 为沿厚度 y 方向的位移分量; σ_r 、 σ_θ 、 σ_y 分别为 r 、 θ 、 y 方向的应力分量, γ 、 τ 分别为相应的剪应变和剪力。

2.3 材料特性

铟化铟是一种直接窄禁带半导体,在液氮温度

下,碲化铟的禁带宽度能够增加到 0.23 eV,使其能够在整个中波红外波段工作^[4]。中波 3~5 μm 波段作为空气中透过率较高的大气窗口,长波长光在其中散射率较低,碲化铟材料在该空气窗口波段内工作时具有良好的探测率和量子效率。表 1 给出碲化铟的热力学参数^[5-8]。

表 1 碲化铟材料的热力学参数

Tab.1 The thermodynamic parameters of InSb

参数	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	热传导系数 $k / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	泊松比 μ
InSb	5.78	0.18	0.35
参数	热膨胀系数 α / K^{-1}	杨氏模量 E / Pa	碎裂应力值 σ / MPa
InSb	5.04×10^{-6}	4.1	100

2.4 软件 COMSOL Multiphysics 简介

COMSOL Multiphysics 这款基于有限元计算方法的软件能够快速大规模进行数值仿真,在模拟科研实验和进行项目前期设计时起到了重要作用,目前已经在声学、光学、电磁学、流体动力学、热传导、结构力学、波的传播等领域得到了广泛的应用^[5]。

本文中对红外探测器材料进行热力学效应的数值有限元分析计算时所使用的仿真软件版本为 COMSOL Multiphysics 5.0。在进行建模时主要用到了电磁波频率模块、传热模块和固体力学模块三部分。求解建模时,首先建立符合实际的三维几何模型,然后对模型的物理参数进行设置,根据所需结果的精度对模块进行网格单元的划分,求解时根据实际情况选用合理的求解器并在结束后运用后处理模块,后处理模块可以通过图像或线图形象直观地表现出运算结果。

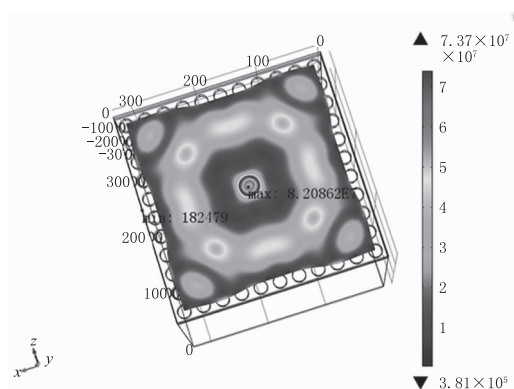
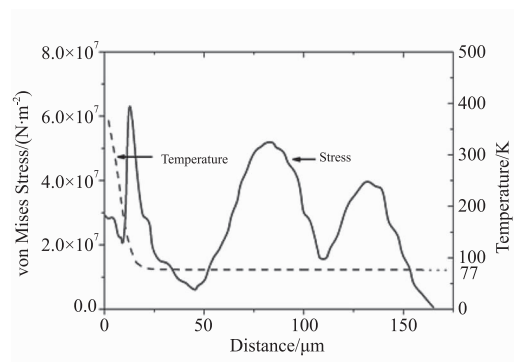
3 仿真计算和讨论

3.1 探测器的应力分布

本文所用到的连续激光波长为 10.6 μm ,仿真时间为 4 μs ,探测器中心接收到圆形激光光斑,假设半径为 15 μm ,光斑内部激光能量分布均匀,初始温度为 77 K,进行仿真并记录仿真结果。

图 2 为 InSb 红外探测器受到激光功率密度为 10^6 W/cm^2 的辐照后,探测器的应力分布情况。由米塞斯应力准则可知,应力最大值所在的位置为探测器结构最不稳定的位置,往往在该位置最容易发生碎裂^[1,5]。由图 2 可以看出,InSb 红外探测器受激

光辐照后能够达到的最大应力值在光斑边缘附近,应力分布呈现波动的趋势,并且在距离辐照中心光斑位置越远的地方应力值也越低。图 3 为激光功率密度为 10^6 W/cm^2 时,结束辐照后在探测器表面对角线方向上的应力分布情况和温度分布情况,其中 x 轴表示与光斑中心的距离。

图 2 功率密度为 10^6 W/cm^2 时探测器三维应力图Fig.2 Three dimensional stress of detector under 10^6 W/cm^2 power density图 3 功率密度 10^6 W/cm^2 时 InSb 层对角线方向应力分布Fig.3 Diagonal stress distribution of InSb under 10^6 W/cm^2 power density

由图 3 可以看出,光斑中心处($x=0$)的温度值为最高,大约达到 369 K,离中心处越远温度越低,由于仿真计算设置在液氮环境下,因此最终温度下降到液氮温度 77 K 并保持不变。最大应力值出现在距离光斑中心约 14 μm 的位置,数值约为 64 MPa,之后应力值随远离光斑中心距离的增加而逐渐降低。增加激光的功率密度到 10^7 W/cm^2 ,辐照结束后的温度场与应力场变化情况如图 4 所示,光斑中心处温度最高值达到 3270 K,应力最大值出现的位置较激光功率密度为 10^6 W/cm^2 时更靠近光斑中心,距离光斑中心约 12.5 μm ,达到 165 MPa。由于激光功率密度增大,探测器所受到的辐射能量增

大,因此温度最大值与应力最大值也随之增高。远离光斑中心处的应力变化情况与上图相似,只是波动变化没有上图明显。

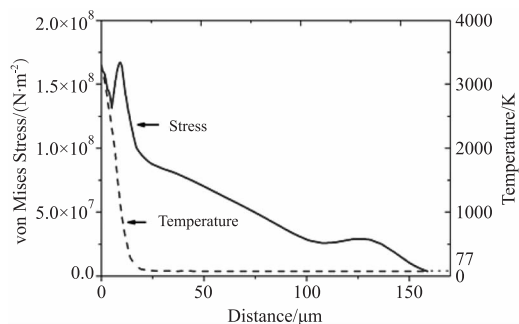


图4 功率密度 10^7 W/cm^2 时
InSb 层对角线方向应力分布

Fig. 4 Diagonal stress distribution of InSb under
 10^7 W/cm^2 power density

对于 InSb 红外探测器内部,由于 InSb 层上下表面各材料导热系数不同,同一时刻一定会产生不均匀的温度场,因此应力数值会有相应的变化。图 5、图 6 分别是功率密度为 10^7 W/cm^2 和 10^6 W/cm^2 的激光辐照探测器时,InSb 层纵向的应力变化情况与温度变化情况,其中横坐标表示与钢柱相接处的垂直距离。可以看出,在 InSb 层内部应力最大值出现在大约中间的位置,温度最大值出现在 InSb 层表面受辐照处,图 5 中激光功率密度为 10^7 W/cm^2 时应力最大值为 260 MPa,温度最大值为 3300 K;降低激光功率密度到 10^6 W/cm^2 ,如图 6 所示,应力最大值也随之降低到 80 MPa,温度最大值降低到 398 K。应力值分布从 InSb 层的中心到两端,呈逐渐降低的趋势。温度值则随着远离光斑辐照位置而逐渐降低,在 InSb 层与钢柱层相接处达到最小。

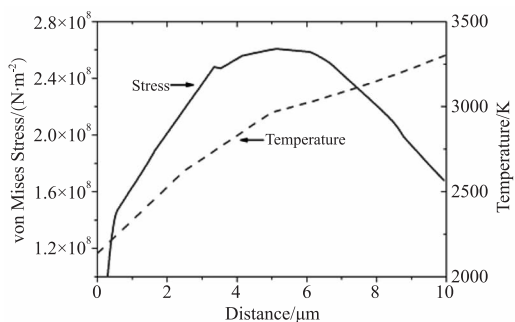


图5 功率密度 10^7 W/cm^2 时 InSb 层内部纵向应力分布
Fig. 5 Internal longitudinal stress distribution of InSb
under 10^7 W/cm^2 power density

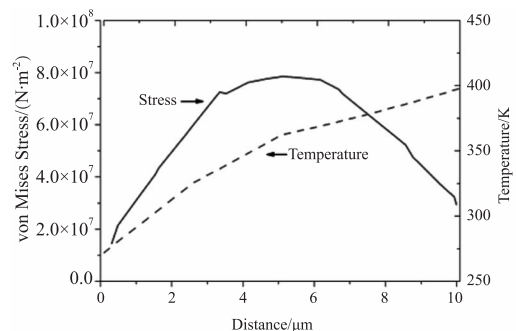


图6 功率密度 10^6 W/cm^2 时 InSb 层内部纵向应力分布

Fig. 6 Internal longitudinal stress distribution of InSb
under 10^6 W/cm^2 power density

3.2 应力分布随钢柱半径大小的变化

在低温条件下工作,当 InSb 红外探测器刚开始受到激光辐照时,探测器表面温度快速升高,应力增加迅速,在较短的时间内就能达到最大值。如图 7 所示,以功率密度为 10^6 W/cm^2 的连续激光开始辐照探测器,辐照时间为 $3 \mu\text{s}$,温度随辐照时间增长而逐渐增加,结束辐照时温度达到最高为 355 K,并未达到 InSb 的熔点(约 798 K);同时经过约 $0.18 \mu\text{s}$,应力达到最大值 110 MPa,之后下降并进行波动。造成 InSb 探测器碎裂损伤所需要的应力值为 100 MPa,由图中可以看出经过 $0.10 \mu\text{s}$ 时已经达到该数值,故功率密度为 10^6 W/cm^2 的激光已经能够造成 InSb 探测器的应力损伤,损伤阈值为 0.1 J/cm^2 。由于一定的激光功率密度辐照探测器,探测器温度所能达到的最大值是固定的,因此一段时间后 InSb 探测器的温度场趋于平稳,受温度差影响造成的热应力消失,此时仍然存在应力,但峰值明显下降并且波动明显低于开始。

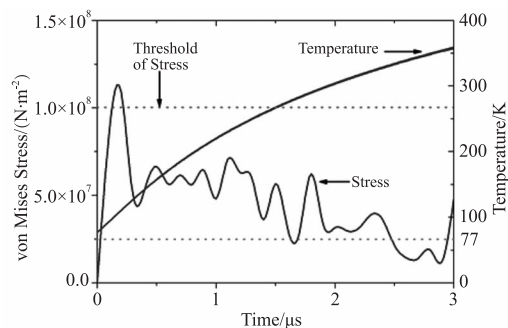


图7 探测器应力随时间变化情况

Fig. 7 The stress changing of detector with time changing

由图 2 可以看出仿真模型中 InSb 层与钢柱相接触,应力值分布在接触位置和非接触位置有所差别。表 2 为随着钢柱半径的改变,接触位置应力的

变化情况。可以看出,保持钢柱的高度及形状不变,随着钢柱半径从 10 μm 开始以 1 μm 的步长逐渐减小,当半径为 8 μm 时 InSb 层应力达到最大值 131 MPa,之后钢柱半径继续减小,应力值进行波动,但总趋势为逐渐降低。

表 2 接触位置应力随钢柱半径减小的变化

Tab.2 The contact changing stress with the decrease of indium column radius

钢柱半径/ μm	应力最大值/($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)
10	8.2086×10^7
9	8.6513×10^7
8	1.3120×10^8
7	7.0956×10^7
6	7.8479×10^7
5	4.9039×10^7
4	5.0472×10^7

3.3 与实验数据对比

河南科技大学的孟庆端、余倩等人研究了基于热冲击下 InSb 芯片的典型形变特征^[9],实验中典型裂纹与本文研究所得应力趋势位置相符合;天津大学的牛燕雄研究了光电系统的强激光破坏^[10],模拟计算结果中应力损伤阈值为 0.1 J/cm²,与实验数据保持一致。

4 结 语

本文采用有限元仿真工具 COMSOL Multiphysics 设计模型并在阐述原理的基础上模拟了碲化铟红外探测器受到激光辐照时的热应力损伤效应情况。激光波长为 10.6 μm 时最大应力值出现在靠近光斑中心的位置,且激光能量越强,离中心处越近;在 InSb 层内部,由中心向两端方向应力值逐渐降低。维持 InSb 层下钢柱的高度不变,改变钢柱的半径,当半径为 8 μm 时最大应力值为最高。仿真结果在数据量级及变化趋势方面都与实验基本保持一致,具有实用性。

参考文献:

- [1] LI Pengfei. The thermal - stress coupling analysis of Infrared Focal Plane Array Detector[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
李鹏飞. 红外焦平面探测器热 - 应力耦合分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.
- [2] QIANG Xiwen, ZHANG Jianquan, LIU Feng, et al. Analytical investigation on mechanical effects of detector materials induced by laser beams[J]. Infrared and Laser Engineering, 1999, 28(6): 47 - 51. (in Chinese)
强希文, 张建泉, 刘峰, 等. 强激光辐照探测器材料力学效应的解析研究[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(6): 47 - 51.
- [3] FAN Guangxin. Research of pulsed laser induced damage on photodetector[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
范广鑫. 脉冲激光对光电探测器损伤效应的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [4] F Bartoli, L Esterowitz, R Allen. A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors[J]. Applied Physics, 1976, 47(7): 2875 - 2881.
- [5] LI Juan. Numerical analysis of thermal effects of semiconductor materials based on continuous wave laser irradiation[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2012. (in Chinese)
李娟. 连续激光作用下半导体材料热效应的数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2012.
- [6] V N. Strekalov. Absorption of laser light by ions as a mechanism of optical damage in solids[J]. SPIE, 1998, 3244: 26 - 31.
- [7] MENG Qingduan, ZHANG Xiaoling, ZHANG Liwen, et al. Structural modeling of 128 $\times$ 128 InSb focal plane array detector[J]. Acta Phys. Sin., 2012, 62(19): 190701. (in Chinese)
孟庆端, 张晓玲, 张立文, 等. 128 $\times$ 128 InSb 探测器结构模型研究[J]. 物理学报, 2012, 62(19): 190701.
- [8] Meyer J R, et al. Optical heating in semiconductors; Laser damage in Ge, Si, InSb, and GaAs[J]. Appl. Phys., 1980, 51(10): 5513.
- [9] MENG Qingduan, YU Qian, ZHANG Liwen, et al. Mechanical parameters selection in InSb focal plane array detector normal direction[J]. Acta Phys. Sin., 2012, 61(22): 226103. (in Chinese)
孟庆端, 余倩, 张立文, 等. InSb 面阵探测器法线方向力学参数选取研究[J]. 物理学报, 2012, 61(22): 226103.
- [10] NIU Yanxiong. Research on high - power laser - induced damage and protective technology of optoelectronics systems[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)
牛燕雄. 光电系统的强激光破坏及防护技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.