

毫秒脉冲激光致硅光电二极管电学损伤的有限元分析及实验研究

赵宏宇 王顿 魏智 金光勇

Finite element analysis and experimental study on electrical damage of silicon photodiode induced by millisecond pulse laser

Zhao Hong-Yu Wang Di Wei Zhi Jin Guang-Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 104203 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.104203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.104203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光诱导等离子体的气体动力学和燃烧波扩展速度研究

Gas dynamics and combustion wave expanding velocity of laser induced plasma

物理学报.2017, 66(9): 094202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094202>

共轴双脉冲激光诱导击穿光谱结合双谱线内标法定量分析植物油中的铬

Quantitative analysis of chromium in vegetable oil by collinear double pulse laser-induced breakdown spectroscopy combined with dual-line internal standard method

物理学报.2017, 66(5): 054206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.054206>

近表面层黏性模量梯度变化的复合平板中激光热弹激发声表面波的传播特性

Propagation characteristics of laser-generated surface acoustic waves in composite plate with gradient changes of near-surface viscous moduli

物理学报.2016, 65(22): 224201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224201>

浓悬浮液中纳米 SiO<sub>2</sub> 团聚体的渗透率

Permeability of nano SiO<sub>2</sub> aggregates in concentrated suspension

物理学报.2016, 65(14): 144203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144203>

基于飞秒激光微加工的介质膜损伤修复研究

Study on damage mitigation for dielectric mirrors by using femtosecond laser micromachining

物理学报.2015, 64(15): 154207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154207>

# 毫秒脉冲激光致硅光电二极管电学损伤的有限元分析及实验研究\*

赵宏宇 王頔 魏智 金光勇†

(长春理工大学理学院, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 长春 130022)

(2016年12月22日收到; 2017年3月6日收到修改稿)

为了研究毫秒脉冲激光致硅基PIN光电二极管电学损伤, 基于热传导及弹塑性力学理论, 在光电二极管内部材料各向同性并且P-I-N三层结构之间满足温度连续和热流平衡条件下, 建立毫秒脉冲激光辐照硅基PIN光电二极管二维轴对称模型, 采用有限元方法模拟分析了1064 nm Nd:YAG毫秒量级脉冲激光辐照硅基PIN光电二极管的温度场与应力场分布, 并实验测量了硅基PIN光电二极管实验前后的电学参数. 结果表明, 激光辐照硅基PIN光电二极管时, 温升使材料表面熔融、烧蚀, 并且在空间上存在温度梯度变化, 即激光辐照产生的热与应力使光敏面及硅晶格晶键损伤, 最终造成光电探测器的探测性能下降. 研究结果可为毫秒脉冲激光辐照硅基PIN光电二极管电学损伤机理奠定基础.

**关键词:** 毫秒激光, 光电二极管, 响应度, 暗电流

**PACS:** 42.62.-b, 85.60.Dw, 44.10.+i

**DOI:** 10.7498/aps.66.104203

## 1 引言

激光对光电探测器的损伤研究一直是激光与物质相互作用研究领域中的重要内容之一<sup>[1-5]</sup>, 人们对其本质机理认知有限, 主要是因为激光损伤过程是一个多物理场耦合问题, 并且在辐照时材料参数的改变增加了研究难度. 电学性能是评价光电探测器性能优良的关键, 激光与光电探测器相互作用研究可为激光对光电探测器电学性能损伤机理奠定基础, 为光电探测器抗损伤研究提供支持.

目前, 国内外关于激光损伤光电探测器主要对HgCdTe材料研究较多, 对硅基PIN光电二极管的研究鲜有报道, 硅基光电探测器相比于HgCdTe光电探测器具有量子效率高、响应速度快、质量小、测量精度高等优点, 硅基光电探测器逐渐

成为研究热点, 因此, 对于激光辐照硅基PIN光电二极管其电学性能退化产生的损伤效果、损伤机理, 用于改进光电探测器在光电方面的应用具有

非常重要的研究价值. Watkins等<sup>[6]</sup>研究了光电探测器形貌损伤、损伤深度对光电探测器电学性能的影响. Moeglin<sup>[7]</sup>发现引起响应度发生明显的变化所需要的入射激光能量远比光电二极管上表面发生熔融的阈值大得多, 随着入射激光能量密度的升高, 损伤阈值逐渐降低. Vest和Grantham<sup>[8]</sup>观察到响应度下降与脉冲激光的能量密度有关, 提出了响应度下降模型. Shaw等<sup>[9]</sup>发现激光辐照后, 部分光电二极管恢复了初始的响应度. 刘天华等<sup>[10]</sup>分析了光电材料对激光能量的吸收, 提出了激光损伤光电二极管的计算模型. 江继军<sup>[11]</sup>得到了载流子浓度与反射率之间的关系, 并根据速率方程得到了激发与弛豫过程微分方程. Li等<sup>[12,13]</sup>得到了形貌损伤阈值随着掺杂浓度和结深增加而减小, 伴随结深度的增加, 电学损伤阈值上升. 综上, 已有的实验研究多为光电探测器损伤阈值研究, 对其电学损伤机理研究较为浅显, 因此本文着重对其电学损伤进行研究.

\* 吉林省科学技术厅项目(批准号: 20150622011JC)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jgycust@163.com

本文针对毫秒脉冲激光辐照硅基PIN光电二极管的热损伤建立了二维轴对称模型, 对其辐照过程进行了模拟, 明确了热源、光电二极管的各项参数对温度场以及应力场变化的影响, 阐述了热应力对硅晶格晶键的作用, 进一步分析了应力对光电探测器性能的影响, 并给出了相应的应力场分布规律和光电二极管电学损伤阈值.

## 2 激光辐照理论模型

模拟使用的元件为硅基PIN光电二极管, 峰值响应波长在950 nm左右, 对于1060 nm左右的光谱有较高的响应采用1064 nm Nd:YAG激光进行辐照. 其中P层是硅掺杂硼, 浓度为 $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ , 厚度1  $\mu\text{m}$ . N层是硅掺杂磷, 浓度是 $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ , 厚度1  $\mu\text{m}$ . I层是N型本征硅, 浓度是 $2 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ , 厚度200  $\mu\text{m}$ , I层可以增大耗尽区的宽度, 达到减小扩散运动的影响、提高响应速度的目的. 在P层的上表面镀有 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 增透膜, 其厚度为0.35  $\mu\text{m}$ ,

直径1 mm. 其硅<sup>[14]</sup>与 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 增透膜的物理参数见表1与表2, 表1中 $T$ 为温度.

本文针对激光束垂直辐照硅基PIN光电二极管, 入射光束为高斯光束的情况, 建立了二维轴对称模型, 如图1所示.

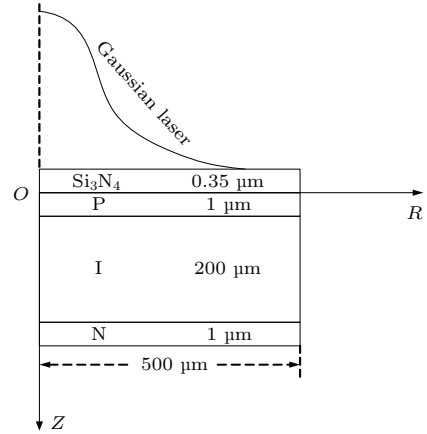


图1 激光辐照硅基PIN光电二极管二维轴对称模型图  
Fig. 1. 2D axisymmetric model of Silicon-based PIN photodiode.

表1 硅层材料参数  
Table 1. Parameters of silicon material.

	固态	液态
热导率 $k/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$22.23 + 422.52 \exp(-T/255.45)$	62
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$	$2330 - 2.19 \times 10^{-2}T$	$2540 - 2.19 \times 10^{-2}T$ $-1.21 \times 10^{-5}T^2$
吸收率	0.33	0.72
热容 $C/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$352.43 + 1.78T - 2.21 \times 10^{-3}T^2$ $+1.3 \times 10^{-6}T^3 - 2.83 \times 10^{-10}T^4$	1021.84
泊松比 $\gamma$	0.28	0.28
吸收系数 $\alpha/\text{m}^{-1}$	$1023(T/273)^4$	$8.6 \times 10^7$
杨氏模量 $E/\text{GPa}$		
300 K		163
500 K		155
700 K		148
900 K		141
1100 K		80

表2  $\text{Si}_3\text{N}_4$  增透膜参数  
Table 2. Parameters of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  antireflection film.

热导率 $k/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	63.6
热容 $C/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	624.2
密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$	2500
杨氏模量 $E/\text{GPa}$	314
泊松比 $\gamma$	0.285

PIN光电二极管选用的是中科44所GT102型光电二极管, 其参数见表3.

在模拟中使用1064 nm Nd:YAG毫秒激光辐照硅基PIN光电二极管, 在这个过程中光电二极管吸收激光能量<sup>[15,16]</sup>并转化为热能, 从而使探测器温升, 此时存在着温度梯度<sup>[17-23]</sup>的变化瞬态热传导方程为

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial t} = k_i \left( \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial r} \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial z^2} \right) + \rho_i c_i L_i \frac{\partial f_{si}}{\partial t} + Q_i, \quad (1)$$

表3 PIN 光电二极管参数  
Table 3. The PIN photodiode parameters.

参数	符号	测试条件	数值	单位	
光敏面直径	$\Phi$		1.0	mm	
光谱响应范围	$\lambda$		400—1100	nm	
光参数	响应度	$R_e$	$V_R = 40 \text{ V}, \lambda = 1060 \text{ nm}$	0.20	A/W
	响应时间	$t$	$V_R = 40 \text{ V}, R_L = 50 \Omega$	6	ns
电参数	暗电流	$I_{\text{dark}}$	$V_R = 40 \text{ V}$	8	nA
	反向击穿电压	$V_{\text{BR}}$	$I_R = 10 \mu\text{A}$	80	V
	电容	$C_v$	$f = 1 \text{ MHz}, V_R = 40 \text{ V}$	2.0	pF
工作电压	$V_R$		40	V	

式中,  $f_{\text{si}}$  为固相率,  $L_i$  为熔融状态相变潜热, 热源为  $Q_i$ ;  $T_i$  为  $t$  时刻第  $i$  层温度;  $\rho_i$  为第  $i$  层材料的密度;  $c_i$  为第  $i$  层材料的比热;  $k_i$  为第  $i$  层材料的热导率. 光电探测器内部材料各向同性, 热传导方程可以简化 [14] 为

$$\beta T \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial t} + \rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} - \rho \frac{\partial r}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

式中,  $\beta$  为各向同性体的应力-温度系数,  $\varepsilon_{ij}$  为无限小应变张量,  $c_v$  为热熔给定初始条件: 设定初始时刻 PIN 光电探测器的温度为 298 K.

$$T_i(r, z, t)|_{t=0} = T_i(0) = 298 \text{ K}. \quad (3)$$

给定边界条件: 设定表面为绝热.

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{r=500 \mu\text{m}} = 0, \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{z=202.35 \mu\text{m}} = 0. \quad (5)$$

由于光斑半径小于光敏面半径, 所以入射激光只穿透进硅层内一定的深度, 则有 [12]

$$Q_{\text{Si}}(T, r, t) = I_0(1 - R_{\text{Si}}(T))\alpha_{\text{Si}}(T)f(r) \times g(t) \exp(-\alpha_{\text{Si}}(T)z), \quad (6)$$

式中, 入射激光中心点的峰值功率为  $I_0$ , 硅的吸收率为  $R_{\text{Si}}(T)$ , 激光束的空间分布为  $f(r)$ , 激光束的时间分布为  $g(t)$ , 硅的吸收系数为  $\alpha_{\text{Si}}(T)$ . 对于 TEM<sub>00</sub> 模的脉冲激光, 可以表达为

$$f(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{a_0^2}\right), \quad (7)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq \tau, \\ 0, & t > \tau, \end{cases} \quad (8)$$

$$I_0 = \frac{E}{\pi a_0^2 \tau} = \frac{E_s}{\tau}, \quad (9)$$

式中,  $a_0$  为光斑半径, 脉冲宽度为  $\tau$ , 激光输入能量为  $E$ , 能量密度为  $E_s$ .

由热弹性方程 [21]:

$$\begin{aligned} S_r &= \frac{\mu E}{1 - \gamma^2}(\varepsilon_r + \varepsilon_q - 2\alpha T) \\ &\quad + \frac{E}{1 - \gamma}(\varepsilon_r - \alpha T), \\ S_q &= \frac{\mu E}{1 - \gamma^2}(\varepsilon_r + \varepsilon_q - 2\alpha T) \\ &\quad + \frac{E}{1 - \gamma}(\varepsilon_q - \alpha T), \end{aligned} \quad (10)$$

其中,  $S_r$  与  $S_q$  为应力分量,  $\varepsilon_r$  与  $\varepsilon_q$  为应变分量,  $\gamma$  为材料的泊松比,  $E$  为杨氏模量,  $\alpha$  为材料的膨胀系数, 可以得到光电二极管内三维热应力分布 [21]:

$$S_r = -\frac{4bEP_0(1-t)}{kr_0^2 l \rho n_0(1-z)} \left[ f_m \frac{J_1(\beta_m r)}{r} g_m + \delta_m \frac{J_1(\beta_m r)}{r} (1 - e^{-\frac{k}{rc} \beta_m^2 t}) \right], \quad (11)$$

$$S_z = -\frac{4bEP_0(1-t)}{kr_0^2 l \rho n_0(1-z)} \left[ f_m J_0(\beta_m r) g_m + \delta_m J_0(\beta_m r) (1 - e^{-\frac{k}{rc} \beta_m^2 t}) \right] \quad (12)$$

$\rho$  为密度,  $f_m$  为屈服函数,  $g_m$  为热流密度,  $\beta_m$  为第一类一阶贝塞尔函数的根  $m = 0, 1, 2, \dots$ .

### 3 结果与分析

#### 3.1 温度场与应力场分析

光电二极管在不同的能量密度下作用 1 ms 后, 辐照中心点的温度变化随时间的关系如图 2 所示. 可以观察到光电二极管的温度随着辐照时间的增加温度逐渐升高, 当温度到达硅层熔点 1687 K 前, 光电二极管的温度上升得非常快. 这是因为: 1) 光电二极管中硅的吸收系数发生了改

变, 温度越高吸收系数越大, 其数值从  $10^3 \text{ m}^{-1}$  上升到了  $10^6 \text{ m}^{-1}$ ; 2) 材料的热传导系数随着温度的升高而降低, 其数值从  $156 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  降低到了  $21.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 使得探测器吸收了更多的激光能量并以热的形式沉积在光电探测器中. 在  $1687 \text{ K}$  后温度上升速度降低, 可以观察到入射光能量密度降低, 温升速度减缓. 这是因为; 1) 在硅由固态向液态转变时, 材料需要吸收大量的激光能量来维持温度上升; 2) 由于发生了相变, 硅层的发射系数突然增大, 使基底对激光能量的吸收大幅度减弱, 造成了温升速度缓慢上升, 并且由于热扩散和固态-液态相变吸收热量, 使得温升速度降低.

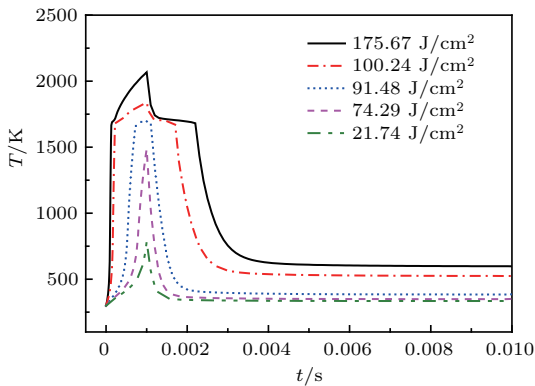


图2 (网刊彩色) 不同激光能量密度下辐照中心点温度随时间的变化  
Fig. 2. (color online) Temperature of the irradiation center spot vs time under the different laser fluence.

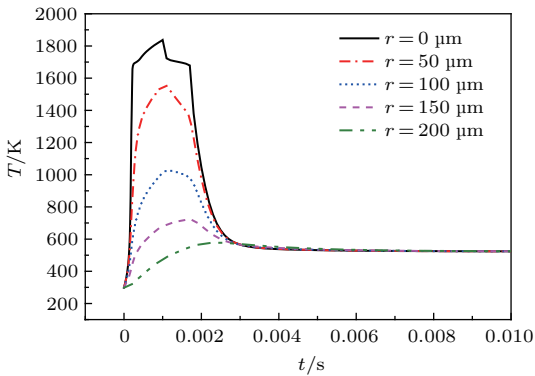


图3 (网刊彩色) 光电二极管辐照中心点轴向不同深度温度随时间的变化  
Fig. 3. (color online) Temperature of the irradiation center axis vs time under the different junction depths.

光电二极管辐照中心点轴向不同深度温度随时间的变化关系如图3所示. 当  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$ ,  $I = 100.24 \text{ J}/\text{cm}^2$  时, 可以观察到随着激光辐照时间增加, 热能逐渐沉积, 探测器辐照中心点轴向温度随着深度的增加温度逐渐下降. 由图可见, 在探测器表面其温度高于硅的熔融温度  $1687 \text{ K}$ , 上表面

发生了固态-液态相变, 曲线温升减缓, 这表明相变仅仅发生在探测器表面的区域内.

上表面不同位置温度随时间的变化关系如图4所示. 当  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$ ,  $I = 100.24 \text{ J}/\text{cm}^2$  时, 在激光入射表面选取5个点. 可以观察到在靶材的中心点位置处温度是最高的, 因此, 在这个位置最先发生固态-液态相变现象, 随着距离的增加, 温度逐渐降低. 并在温度为  $1687 \text{ K}$  时, 曲线偏折程度越来越缓.

设定硅基PIN光电二极管在激光脉宽为  $1.0 \text{ ms}$  下进行辐照, 通过模拟仿真得到了应力分布图.

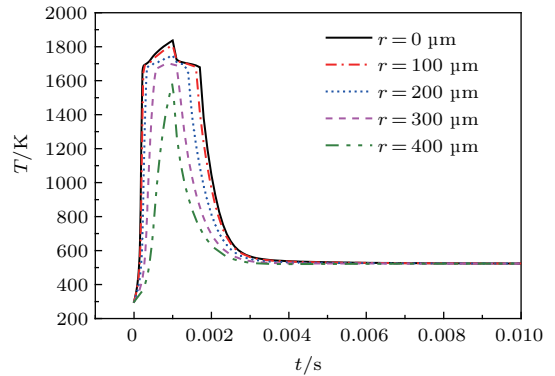


图4 (网刊彩色) 上表面不同位置温度随时间的变化  
Fig. 4. (color online) Evolution of temperature at the different points of the top surface.

光电二极管上表面应力随位置变化关系如图5所示. 图5(a)为光电二极管上表面径向应力随位置的变化关系, 为  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$ ,  $I = 100.24 \text{ J}/\text{cm}^2$  时, 其径向应力最大值发生在  $0.23 \text{ ms}$  时, 最大应力值为  $-1.70 \text{ GPa}$ . 从图中可以观察到, 光电二极管表面径向应力数值<sup>[21]</sup>是小于零的, 此时为压应力. 图5(b)为光电二极管上表面Mises应力随位置变化关系, 当  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$ ,  $I = 100.24 \text{ J}/\text{cm}^2$  时, 其应力最大值发生在  $0.23 \text{ ms}$  时, 最大应力值为  $1.73 \text{ GPa}$ . 可以观察到, 光电二极管表面Mises应力数值是大于零的, 此时为拉应力.

光电二极管中心轴应力随位置变化关系如图6所示. 图6(a)为光电二极管中心轴径向应力随位置的变化关系, 当  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$ ,  $I = 100.24 \text{ J}/\text{cm}^2$  时, 其径向应力最大值发生在  $0.23 \text{ ms}$  时, 最大应力值为  $-1.71 \text{ GPa}$ , 此时应力的存在形式为压应力. 图6(b)为光电二极管中心轴Mises应力随位置的变化关系, 当  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$ ,  $I = 100.24 \text{ J}/\text{cm}^2$  时, 其应力最大值发生在  $0.23 \text{ ms}$  时, 最大应力值为  $1.72 \text{ GPa}$ , 此时应力的存在形式为拉应力.



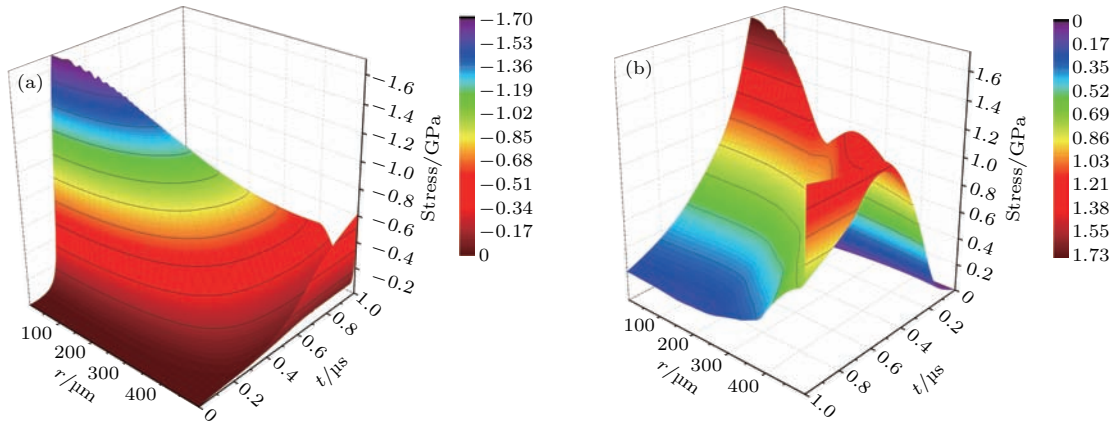


图5 (网刊彩色) 光电二极管上表面应力随位置的变化 (a) 径向应力; (b) Mises 应力

Fig. 5. (color online) Stress distribution of the top surface with the different positions. (a) Radial stress; (b) Mises stress.

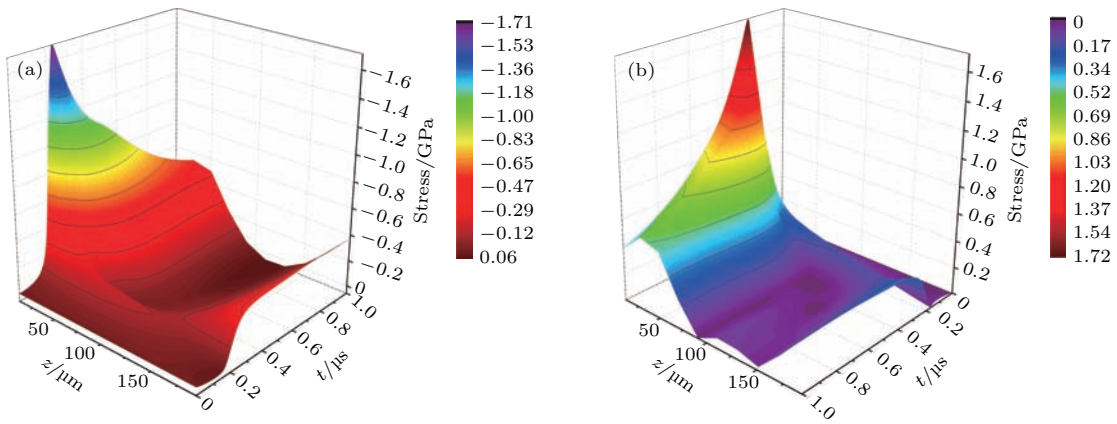


图6 (网刊彩色) 光电二极管中心轴应力随位置的变化 (a) 径向应力; (b) Mises 应力

Fig. 6. (color online) Stress distribution of the center axis with the different positions: (a) Radial stress; (b) Mises stress.

### 3.2 实验结果测量

实验装置如图 7 所示. 实验中所使用的激光器为镭宝光电 Melar-10, 输出能量范围 1—10 J, 脉宽 0.5—3.0 ms 可调, 激光空间分布为高斯分布. 实验时使用的激光脉宽为 1 ms, 能量计测得的激光能量分别为 0.195, 0.169, 0.121, 0.067, 0.029 J. 通过使用激光辐照靶面处的相纸得到光斑形状, 再使用金相显微镜进行测量得到激光光斑半径. 探测器表面

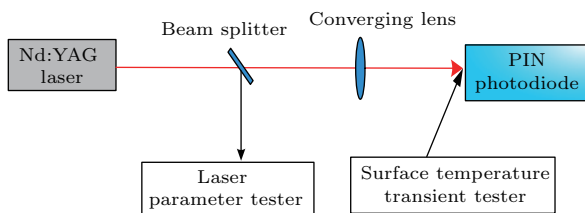


图7 (网刊彩色) 实验装置示意图

Fig. 7. (color online) Schematic of the silicon-based PIN photodiode irradiated by millisecond pulse laser.

温度通过 KBU 1600-USB 型点温仪进行测量, 测量精度为测量值的 0.75%, 时间响应为 10 μs.

在  $\tau_p = 1.0$  ms 的不同能量密度激光辐照下上表面中心点温度随时间的变化关系如图 8 所示, 从图中可以得到其入射的激光能量密度为 14.93—99.59 J/cm<sup>2</sup>. 当辐照光电二极管器激光能量密度为 14.93—86.15 J/cm<sup>2</sup> 时, 硅基 PIN 光电二极管的上表面没有达到熔点 1687 K, 当辐照光电二极管的激光能量密度  $I = 99.59$  J/cm<sup>2</sup> 时, 硅基 PIN 光电二极管在辐照 0.3 ms 后达到硅层熔点, 并且之后一段时间内观察到有平台期(平台期在这里定义为 1687 K 后温度缓慢增长时期)出现, 在辐照 1.0 ms 后, 硅基 PIN 光电二极管上表面中心点温度开始下降, 并在 2.67 ms 上表面中心点完成降温过程. 可以明显地观察到, 当激光脉宽一定时, 辐照光电探测器的入射光能量密度越大, 硅基 PIN 光电二极管的光敏面温度越高. 当辐照光电探测器激光能量密度较低时, 硅基 PIN 光电二极管上表面温

升速度较为缓慢, 并且其最高温度没有达到硅层熔点, 也未出现平台期. 在入射激光能量密度较高时, 硅基PIN光电二极管的温升现象十分明显, 并且在这个过程中发生固态-液态相变, 在辐照结束的时间点其温度达到最大值, 此后中心点温度开始回落.

在  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$  激光作用下, 硅基PIN光电二极管上表面损伤形貌如图9所示. 当  $I = 14.93 \text{ J/cm}^2$  的入射激光作用于硅基PIN光电二极管时, 硅基PIN光电二极管的上表面出现了固-液相变以及液-固相变, 并且为不可恢复的塑性形变<sup>[18-20]</sup>. 当入射激光能量密度  $I = 86.15 \text{ J/cm}^2$  时, 在硅基PIN光电二极管的表面上出现了熔坑(熔坑定义为激光辐照后熔融处形成的坑其最低点低于光敏面位置). 通过实验测量的金相损伤图可以看出, 随着入射激光能量密度的增加, 硅基PIN光电二极管先后发生了热熔融损伤、热应力破坏、热喷溅. 已有理论和实验表明: 随着入射激光能量密度的增加, 温度逐渐升高, 硅基PIN光电二极管中的半导体硅吸收系数逐渐增大, 同时热传导率降低, 这是温度场发生变化的主要影响因素, 并且随

着距离的增加, 产生了温度梯度, 从而产生了热应力. 同时, 半导体材料硅具有连续性, 其限制了辐照中心区域硅材料的自由膨胀, 因此, 非均匀的热膨胀将产生巨大的热应力. 与此同时, 半导体材料硅在高温的条件下性质转为塑性, 其屈服强度将大幅降低. 一旦最大的热应力超过临界应力, 半导体材料硅将发生塑性形变并产生裂纹, 这些发生塑性形变的原子将被转移到新的位置.

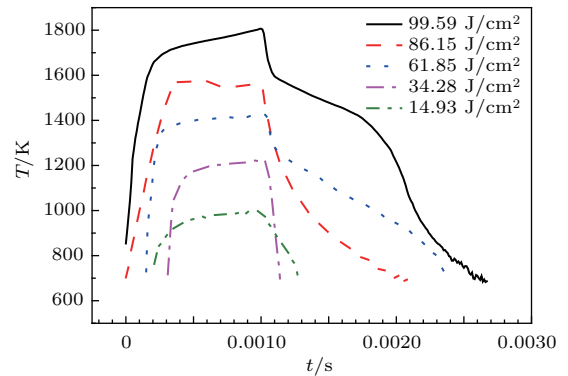


图8 (网刊彩色) 不同能量密度辐照下上表面中心点温度随时间的变化

Fig. 8. (color online) Temperature of the irradiation center spot vs time under the different fluence.

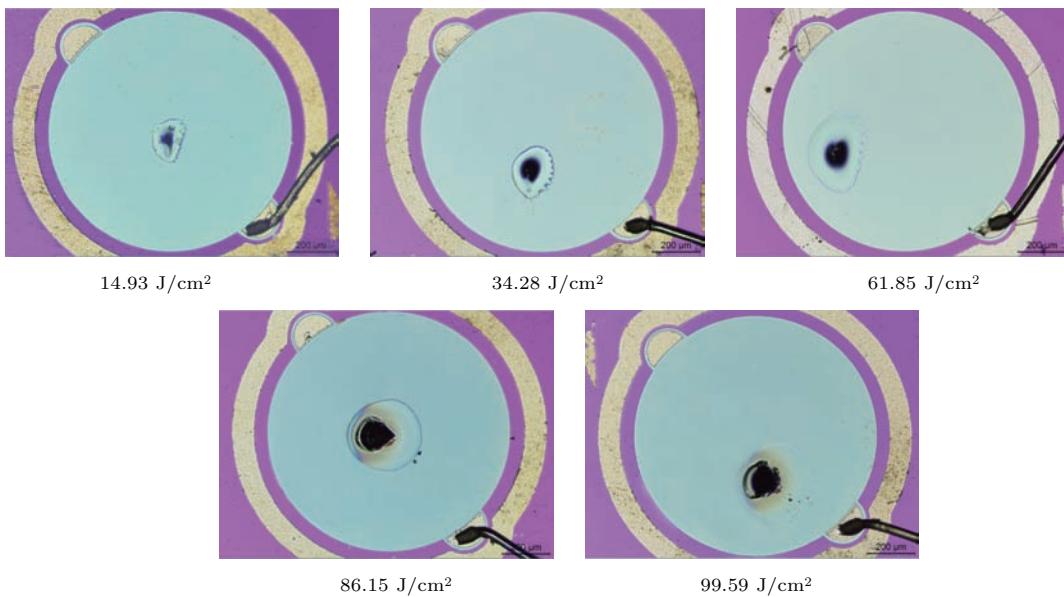


图9 (网刊彩色) 硅基PIN光电二极管上表面损伤形貌

Fig. 9. (color online) Damage morphology of the silicon-based PIN photodiode on the top surface.

在  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$  激光作用下, 光电二极管响应度下降比与损伤面积及最高温度的关系如图10所示. 根据中华人民共和国电子工业部SJ 2354.6-83方法进行响应度测量. 硅基PIN光电二极管的响应面积下降率与响应度下降比随入射激光能量密度

的增加而增加. 随着入射激光能量密度的增加, 响应面积下降率与响应度下降比的增长趋势基本相同, 因此响应度下降可能与感光面积降低有关. 并且硅基PIN光电二极管的温度与响应度下降比随着入射激光能量密度的增加而增大, 最初温度上升

与响应度下降比增加得较快,但随着入射激光能量密度的增加,温升与响应度下降比增速逐渐减缓.当  $I = 99.59 \text{ J/cm}^2$  时,响应度下降 9.98% 响应度测量误差的估计值为  $\pm 0.001 \text{ A/W}$ .

在  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$  激光作用下,光电二极管暗电流与损伤面积及最高温度的关系如图 11 所示.根据中华人民共和国电子工业部 SJ 2354.3-83 方法进行暗电流测量.硅基 PIN 光电二极管的损伤面积与

暗电流随着激光能量密度的增加而增加,在入射激光能量密度较低时,损伤面积增长速度较快,暗电流上升速度较为缓慢.硅基 PIN 光电二极管的最高温度与暗电流随着激光能量密度的增加而增加,在入射激光能量密度较低时,温升速度较快,暗电流上升速度较为缓慢在能量密度达到  $90 \text{ J/cm}^2$  附近时,暗电流急速上升,相比于初始值  $2 \text{ nA}$  提升了 3 个数量级暗电流测量误差为 0.003%.

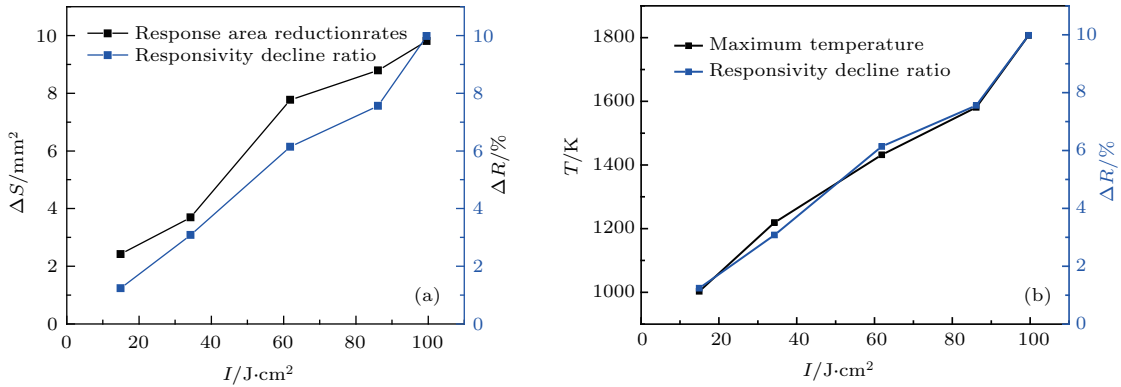


图 10 (网刊彩色) 光电二极管响应度下降比与损伤面积及最高温度的关系 (a) 响应面积下降率与响应度下降比; (b) 最高温度与响应度下降比

Fig. 10. (color online) The relation of responsivity decline ratio to lesion area and maximum temperature. (a) The relation between responsivity decline ratio and response area reduction rates; (b) the relation between responsivity decline ratio and maximum temperature.

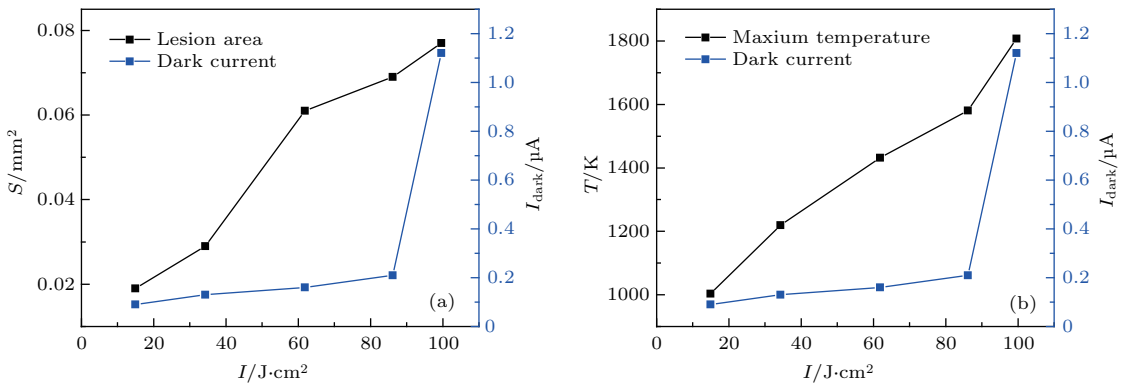


图 11 (网刊彩色) 光电二极管暗电流与损伤面积及最高温度的关系 (a) 损伤面积与暗电流; (b) 最高温度与暗电流

Fig. 11. (color online) The relation of dark current to lesion area and maximum temperature. (a) The relation between dark current and lesion area; (b) the relation between dark current and maximum temperature.

### 3.3 仿真与实验对比分析

将已有的实验结果与模拟仿真对比分析,可以得到:毫秒脉冲激光辐照硅基 PIN 光电二极管时,随着入射激光能量密度增加,光电探测器表现出明显的温升现象,并且损伤效果越加明显.

在  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$  时,仿真与实验温度对比分析如图 12 所示.当前模拟设定的激光能量密度为

$I_{\text{仿真}} = 100.24 \text{ J/cm}^2$ ,其最高温度为  $1837 \text{ K}$ .实验中入射激光能量密度  $I_{\text{实验}} = 99.59 \text{ J/cm}^2$  时,其最高温度为  $1807 \text{ K}$ .从图 12 模拟温度与实验温度对比分析可以看出,模拟与实验符合度较高.在  $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$  时,其上表面应力与中心轴方向屈服应力分别为  $1.73 \text{ GPa}$  与  $1.72 \text{ GPa}$ ,响应度下降 9.98%,暗电流与初始值相比提高了 3 个数量级.在硅晶体的 111 晶面的 110 晶向,其晶格屈服应



力<sup>[24,25]</sup>为1.7 GPa, 而得到的仿真数据大于硅晶格的屈服应力, 可能造成晶键断裂, 使晶格发生损伤, 晶键断裂会使载流子输运通道发生改变, 输运时间变长, 并且在这个过程中电子空穴快速复合, 载流子寿命降低, 载流子浓度升高<sup>[26]</sup>, 导致了暗电流上升, 而光敏面的损伤使响应度降低, 这严重的影响了光电探测器的电学性能. 实验中定义响应度下降10%时为其电学损伤阈值, 通过实验与仿真能量密度对比分析, 其符合度较好, 因此硅晶格的屈服应力1.7 GPa也是其电学损伤阈值点.

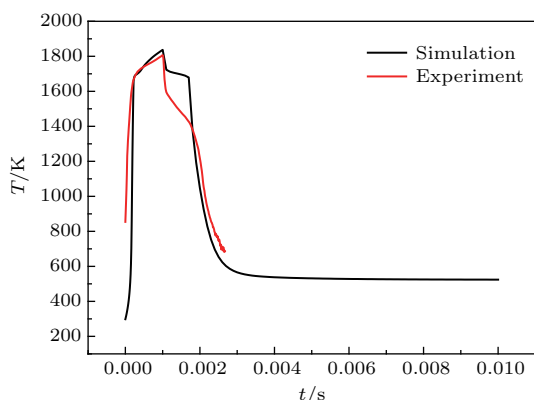


图12 (网刊彩色) 在 $\tau_p = 1.0$  ms时仿真与实验温度的对比

Fig. 12. (color online) Comparative analysis of the temperature distribution between simulation and experimental when the laser pulse width is  $\tau_p = 1.0$  ms.

## 4 结 论

本文研究了毫秒脉冲激光辐照硅基PIN光电二极管时光电二极管内部的温度场与应力场的变化, 实验过程中考虑了温升致材料参数变化, 获得了其温度场与应力场的变化规律, 并测量了光电二极管实验前后的电学参数变化. 结果表明: 由于激光辐照硅基PIN光电二极管时, 温升使材料表面熔融、烧蚀等, 光敏面面积减小, 响应度降低; 并且温度梯度发生了改变, 从而产生了应力变化, 当拉应力或压应力大于1.7 GPa时, 造成晶格损伤, 晶键断裂, 而使暗电流上升, 这严重地降低了光电探测器的探测性能. 因此, 在制作PIN光电二极管的过程中, 退火的掌控是十分重要的, 防止材料的晶格损伤, 进而提高良品率. 而从使用角度来看, 工作环境的稳定可以延长其使用寿命, 并且探测精度也有所保证. 研究结果可为激光辐照硅基PIN光电二极管电学损伤机理奠定基础.

## 参考文献

- [1] Xu L J, Cai H X, Li C L, Tan Y, Jin G Y, Zhang X H 2013 *Optik* **124** 225
- [2] Giuliani J F, Marquardt C L 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 4993
- [3] Matsuoka Y, Usami A 1974 *Appl. Phys. Lett.* **25** 574
- [4] Dou X A, Sun X Q, Shao L 2013 *Laser Eng.* **25** 117
- [5] Hameiri Z, Mai L, Puzzer T, Wenham S R 2011 *Sol. Energ. Mat. Sol. C* **95** 1085
- [6] Watkins S E, Zhang C Z, Walser R M, Becker M F 1990 *Appl. Opt.* **29** 827
- [7] Moeglin J P 2002 *Opt. Laser Eng.* **38** 261
- [8] Vest R E, Grantham S 2003 *Appl. Opt.* **42** 5054
- [9] Shaw P S, Gupta R, Lykke K R 2005 *Appl. Opt.* **44** 197
- [10] Liu T H, Zhong H R, Lu Q S, Jiang Z F, Wang Y P 2001 *Laser J.* **22** 5 (in Chinese) [刘天华, 钟海荣, 陆启生, 姜宗福, 王云萍 2001 激光杂志 **22** 5]
- [11] Jiang J J 2005 *M. S. Thesis* (Sichuan: Sichuan University) (in Chinese) [江继军 2005 硕士学位论文 (四川: 四川大学)]
- [12] Li Z W, Wang X, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2012 *Appl. Opt.* **51** 2759
- [13] Li Z W, Wang X, Shen Z H, Lu J, Ni X W 2015 *Appl. Opt.* **54** 378
- [14] Wei Z 2014 *M. S. Thesis* (Changchun: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [魏智 硕士学位论文 (长春: 长春理工大学)]
- [15] Geist J, Zalewski E F, Schaefer A R 1980 *Appl. Opt.* **19** 3795
- [16] Arora V K, Dawar A L 1996 *Infrared Phys. Techn.* **37** 245
- [17] Arora V K, Dawar A L 1996 *Appl. Opt.* **35** 7061
- [18] Brand A A, Meyer F, Nekarda J F, Preu R 2014 *Appl. Phys. A* **117** 237
- [19] Sun H Y 2006 *M. S. Thesis* (Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology) (in Chinese) [孙赫颖 2006 硕士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [20] Du L Y, Wu Z M, Li R, Tang F, Jiang Y D 2016 *Opt. Lett.* **41** 5031
- [21] Zhao F 2010 *M. S. Thesis* (Changchun: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [赵菲 2010 硕士学位论文 (长春: 长春理工大学)]
- [22] Wang Y Z, Song X N 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234601 (in Chinese) [王颖泽, 宋新南 2012 物理学报 **61** 234601]
- [23] Wei Z, Jin G Y, Peng B, Zhang X H, Tan Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 194205 (in Chinese) [魏智, 金光勇, 彭博, 张喜和, 谭永 2014 物理学报 **63** 194205]
- [24] Kumar B U, Pardo T, Passi V, Hoshi Y, Raskin J P 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 031911
- [25] Kahn H, Heuer A H 2002 *Science* **298** 1215
- [26] Tayagaki T, Usami N, Pan W, Hoshi Y, Ooi K, Kanemitsu Y 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 133905

# Finite element analysis and experimental study on electrical damage of silicon photodiode induced by millisecond pulse laser\*

Zhao Hong-Yu Wang Di Wei Zhi Jin Guang-Yong<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Solid Laser Technology and Applications of Jilin Province, School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China )

( Received 22 December 2016; revised manuscript received 6 March 2017 )

## Abstract

In this paper, based on the thermal elasto-plastic constitutive theory and the equivalent specific heat method, the electrical damage in the silicon-based positive-intrinsic-negative (PIN) photodiode irradiated by millisecond (ms)-pulsed laser is investigated. On condition that the internal material of the photodiode is isotropic and threelayer structure of the P-I-N satisfying temperature continuity and heat flow balance, a two-dimensional (2D) simulation axisymmetric model for silicon-based PIN photodiode irradiated by ms-pulsed laser is built. The thermal and stress field distribution are simulated in the silicon-based PIN photodiode irradiated by the Nd:YAG ms-pulsed laser at 1064 nm through using the finite element simulation software. At the same time, electrical parameters before and after the experiment of the silicon-based PIN photodiode irradiated by pulsed laser are measured. The experimental results show that the surface is melted and ablated gradually with the increase of temperature in the high energy pulsed laser, and there is a gradient change for the temperature in spatial distribution. With the increase of laser energy density, photoelectric detector shows the temperature rise phenomenon and damage effect is more obvious. When the tensile stress or compressive stress is greater than 1.7 GPa, the photosensitive surface and the silicon lattice are damaged with the changes of thermal and stress fields. Bond cleavage can change the photogenerated carrier transport channel, and the transport time can be longer. In this process, the photogenerated electron-hole pairs are readily recombined, carrier lifetime decrease and carrier concentration increase, which leads to the increase of the dark current and the decrease of the responsivity. Eventually the performance of photodetector detection is reduced. Through comprehensive comparison between experiment and simulation, one can confirm that this theoretical model has a considerable level of reliability. The conclusion we can draw is that the threshold of electrical damage is 1.7 GPa. So the control of annealing temperature is extremely important for the process of making PIN photodiode. Preventing the lattice damage of the material can improve the product yield rate. In addition, from the point of view of the use of products, the stability of the working environment can extend the service life of products, and the detection accuracy is guaranteed. Conclusively, the results in this paper establish the foundation to investigate the electrical damage mechanism in the silicon-based PIN photodiode irradiated by ms-pulsed laser.

**Keywords:** millisecond laser, photodiode, responsivity, dark current

**PACS:** 42.62.-b, 85.60.Dw, 44.10.+i

**DOI:** 10.7498/aps.66.104203

\* Project supported by science and technology department of Jilin Province in China (Grant No. 20150622011JC).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [jgycust@163.com](mailto:jgycust@163.com)