

长脉冲激光辐照 Si-APD 温度演化过程的 数值模拟与实验研究

董渊^{1,2}, 王颀², 魏智², 符泰然^{1*}

¹清华大学能源与动力工程系热科学与动力工程教育部重点实验室,

CO₂ 资源利用与减排技术北京市重点实验室, 北京 100084;

²长春理工大学吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 针对 1064 nm 长脉冲激光辐照硅雪崩光电二极管(Si-APD)过程中所引起的温升变化规律进行了理论与实验研究。在考虑 Si-APD 多层结构的前提下,建立了二维轴对称热传导模型,据此进行了不同条件下的模拟仿真研究,并开展了长脉冲激光辐照 Si-APD 的温升实验研究。模拟仿真结果与实验结果相一致,均表明长脉冲激光与 Si-APD 相互作用引起的温升是由入射激光的能量密度和脉冲宽度共同决定的。

关键词 激光光学;长脉冲激光;激光辐照;硅雪崩光电二极管;多层结构

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0514005

Numerical Simulation and Experimental Study of Temperature Evolution of Si-APD Irradiated by Long-Pulse Laser

Dong Yuan^{1,2}, Wang Di², Wei Zhi², Fu Tairan¹

¹Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,

Beijing Key Laboratory of CO₂ Utilization and Reduction Technology, Department of Energy and Power Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²Jilin Key Laboratory of Solid Laser Technology and Application, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The change of temperature rise caused by 1064 nm long-pulse laser irradiation on Si avalanche photodiode (Si-APD) is studied theoretically and experimentally. Considering the Si-APD multilayer structure, we establish a two-dimensional axisymmetric heat conduction model, and simulations under different conditions are carried out. We carry out the experimental study on temperature rise of Si-APD irradiated by long-pulse laser. The simulation results are consistent with the experimental results, which shows that the temperature rise caused by the interaction between long-pulse laser and Si-APD is determined by the energy density and pulse width of incident laser.

Key words laser optics; long-pulse laser; laser irradiation; Si avalanche photodiode; multilayer structure

OCIS codes 140.3538; 140.3430; 140.3330

1 引 言

光电探测器应用广泛^[1-2],在可见光或近红外波段主要用于射线测量和探测、工业自动控制以及光度计量等,在红外波段主要用于红外热成像和红外遥感等。通常将光电探测器置于光学系统的焦平面

处,当其接收光信号时,容易受到强激光信号的干扰和破坏^[3-11]。雪崩光电二极管(APD)因具有量子效率高、体积小、对磁场不敏感、操作电压低以及可在室温下工作等优点,广泛应用于各个领域^[12-17]。Bartoli 等^[18-21]针对激光对光电二极管的热损伤进行了实验研究,在脉冲宽度范围为 $10^{-8} \sim 1$ s 的激

收稿日期: 2017-11-17; 收到修改稿日期: 2018-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(51576110)

作者简介: 董渊(1981—),男,博士,副研究员,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: laser_dongyuan@163.com

* 通信联系人。E-mail: trfu@mail.tsinghua.edu.cn

光辐照条件下,利用显微镜观察到了明显的微观热损伤,并且经测量得到响应度发生永久性退化,从实验上证明了热损伤是光电二极管性能退化的原因。Kohriki 等^[22]对激光辐照探测器产生的热击穿效应进行了理论和实验研究。陈德章等^[23]对纳秒和微秒激光的硅光电探测器和雪崩探测器的永久性热损伤阈值进行了研究,并得出热损伤机理为温升导致PN结失效的结论。截至目前,关于激光辐照硅雪崩光电二极管(Si-APD)的研究较少,且尚无针对毫秒长脉冲激光辐照 Si-APD 时所引起的温升效应的研究。本文针对 Si-APD 的多层结构,建立了毫秒长脉冲激光辐照 Si-APD 时的热传导模型,并进行了不同条件下的模拟仿真和实验研究。

2 模型建立及模拟仿真

2.1 模型建立

长脉冲激光辐照 Si-APD 的理论模型如图 1 所示,根据热传导理论可以模拟出长脉冲激光与 Si-APD 相互作用的热过程。

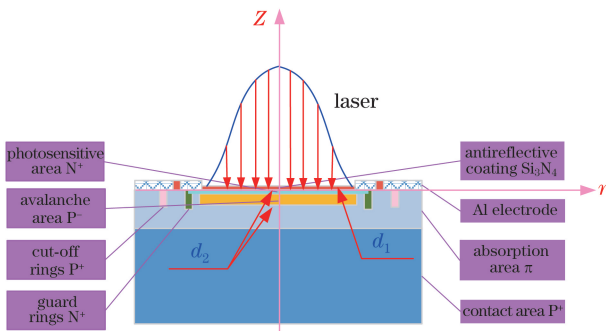


图 1 长脉冲激光辐照 Si-APD 的理论模型

Fig. 1 Theoretical model of Si-APD irradiated by long-pulse laser

柱坐标系下的热传导方程为^[24]

$$\rho c T(r, z, t) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right) + q(T, r, z, t), \quad (1)$$

式中 r 为径向位置, $T(r, z, t)$ 为 t 时刻的温度场分布, ρ 为材料密度, c 为比热容, k 为热传导率, $q(T, r, z, t)$ 为沉积在 Si-APD 中的激光热源项。

假定在 Si-APD 的底部和侧面处无热量交换, 则有

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=300.08 \mu\text{m}} = -k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=750 \mu\text{m}} = 0. \quad (2)$$

此时对称轴上的热通量沿径向方向为零,即

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (3)$$

设初始时刻 Si-APD 的温度为 298 K, 则有

$$\partial T(r, z, t) \Big|_{t=0} = T_0 = 298 \text{ K}. \quad (4)$$

由于入射激光会透射进入 Si-APD 一定的深度, 因此氮化硅(Si_3N_4)和硅(Si)的入射激光的热源项可分别表示为

$$q_{\text{Si}_3\text{N}_4} = I_0 [1 - R_{\text{Si}_3\text{N}_4}(T)] \alpha_{\text{Si}_3\text{N}_4} \exp(\alpha_{\text{Si}_3\text{N}_4} z) n_{\text{Si}_3\text{N}_4}, \quad 0 \leq z \leq d_1, \quad (5)$$

$$q_{\text{Si}}(T, r, z, t) = I_0 [1 - R_{\text{Si}}(T)] \alpha(T) f(r) \times \exp[\alpha(T)(z + d_1)] \exp[-\alpha(T)d_2], \quad d_1 \leq z \leq d_2, \quad (6)$$

式中 d_1 为增透区厚度; d_2 为 Si 层厚度; $R_{\text{Si}_3\text{N}_4}(T)$ 和 $R_{\text{Si}}(T)$ 分别为 Si_3N_4 和 Si 表面的反射系数; $\alpha_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 和 $\alpha(T)$ 分别为 Si_3N_4 和 Si 的吸收系数; $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 为 Si_3N_4 的折射率; $g(t)$ 为激光能量在时间上的分布, 其数学表达式为

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < \tau \\ 0, & t > \tau \end{cases}, \quad (7)$$

式中 τ 为激光的脉冲宽度; $f(r)$ 为脉冲激光的空间分布, 其表达式为

$$f(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right), \quad (8)$$

式中 r_0 为激光光斑半径, I_0 为入射激光峰值功率密度, 其表达式为

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

式中 E 为激光入射能量。

2.2 模拟仿真

利用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件进行数值仿真, 设置激光脉冲宽度分别为 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 ms, 光斑直径为 360 μm 。仿真结果如图 2、3 所示。

图 2 是 Si-APD 表面中心点温度随时间的变化关系。从图中可以看出, 在相同脉冲宽度、不同能量密度的激光作用下, Si-APD 表面中心点温度随辐照时间的增加而升高, 增加到某值时温度上升速度变缓。产生该现象的原因主要有两点: 1) 在温度升高的过程中, Si 的导热系数随着温度的升高而减小, 吸收系数、热容等随着温度的升高而增大; 2) 由于表面与基底之间存在着明显的热传导, 当注入激光引起的升温与热传导的降温趋于平衡时, 温度的提升速度趋于平缓。此外, 在相同能量密度、不同脉冲宽度的激光作用下, 随着脉冲宽度的增加, 温度变化速度也趋于平缓。

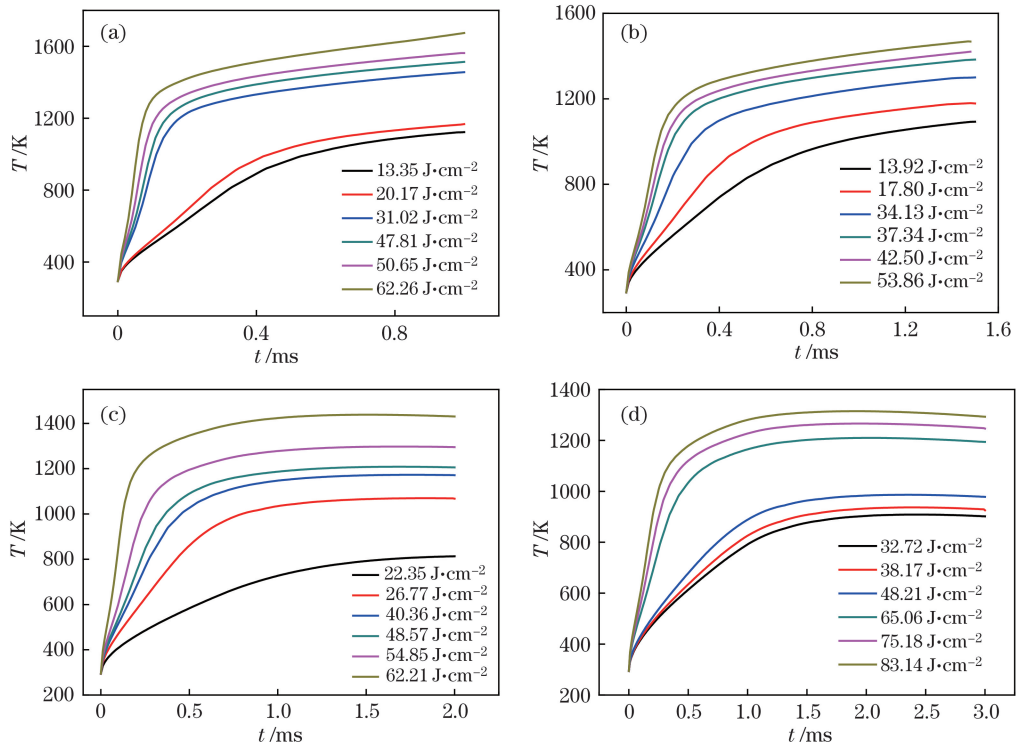


图 2 Si-APD 表面中心点温度随时间的变化关系。(a) $\tau=1.0$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.0$ ms; (d) $\tau=3.0$ ms

Fig. 2 Relationship between temperature of Si-APD surface center and time.

(a) $\tau=1.0$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.0$ ms; (d) $\tau=3.0$ ms

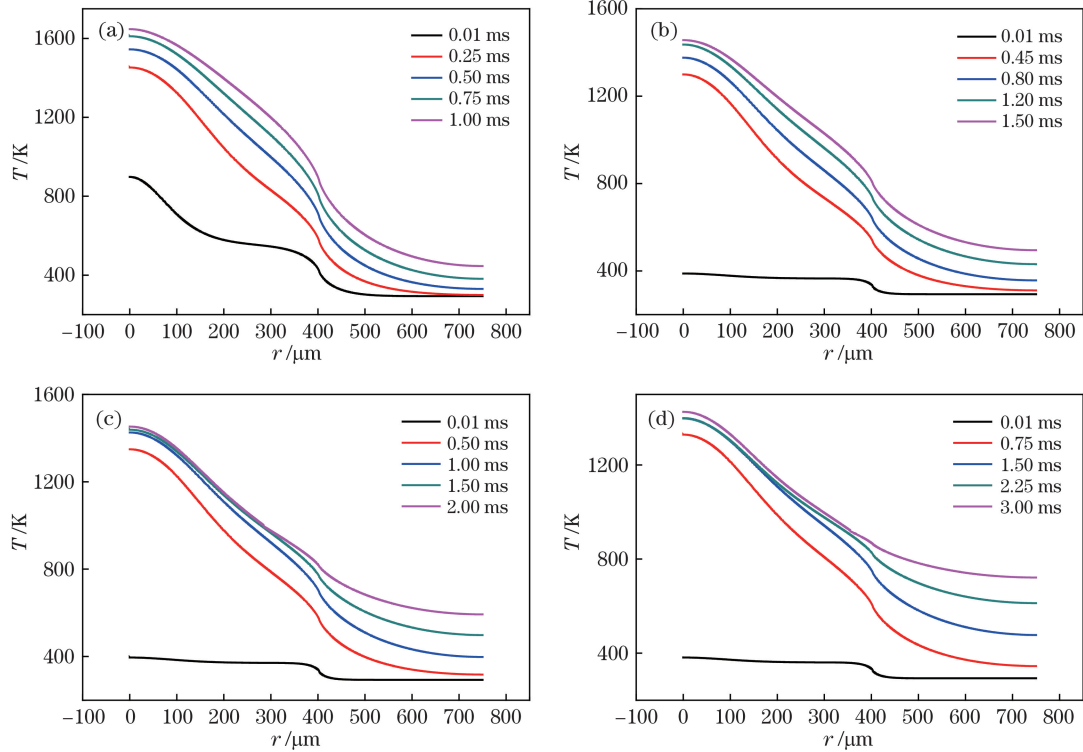


图 3 特定能量密度下特征时刻 Si-APD 表面中心点温度随径向位置的变化。

(a) $\tau=1.0$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.0$ ms; (d) $\tau=3.0$ ms

Fig. 3 Relationship between Si-APD surface center point temperature and radial position at characteristic moments with specific energy density. (a) $\tau=1.0$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.0$ ms; (d) $\tau=3.0$ ms

图 3 是特定能量密度下特征时刻 Si-APD 表面温度随径向位置的变化关系。从图 3(a)可以看出,在脉冲宽度为 1.0 ms 的激光作用下,0.01 ms 时刻 Si-APD 表面温度在径向位置有两个比较明显的温度梯度变化区域。第 1 个温度梯度变化区域在径向位置 180 μm 处,这与激光光斑半径的位置一致,因为在激光作用的初始时刻,中心点附近温升以激光支持温升为主,热传导开始作用,但是中心点附近温度无法迅速传导到更远位置。第 2 个温度梯度变化区域是在径向位置 400 μm 处,该位置是铝电极所在的位置,虽然铝电极的热传导率较高,但是由于交界面的热传导效率等因素的影响,该位置产生了较为明显的温度梯度。在 1.0 ms 时刻,从硅基 APD 上表面的径向方向可以看出,光敏区虽然仍存在温度梯度分布,但是整体趋势趋于线性,而在径向位置 400 μm 处仍有较为明显的温度骤降过程,这与 0.01 ms 时刻的原因是相同的。但由于作用时间的增加,整个径向位置的温度都有所提升,在 750 μm 处,温度上升至 445 K。在其他脉冲

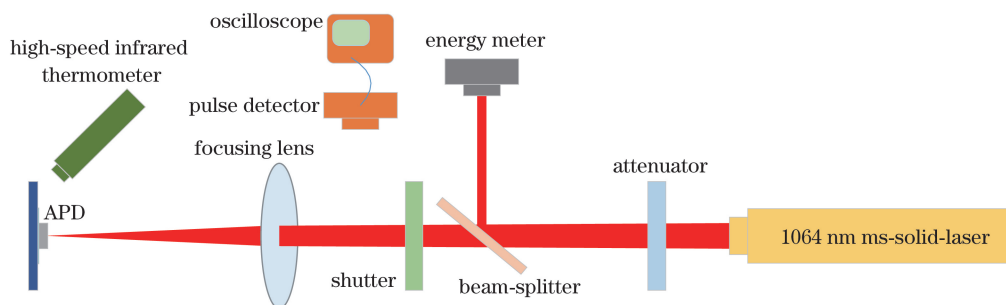


图 4 长脉冲激光辐照 Si-APD 实验装置示意图

Fig. 4 Diagram of experimental setup of Si-APD irradiated by long-pulse laser

3.2 实验结果

实验中测量了激光脉冲宽度为 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 ms 时的上表面中心点温度随时间的演化过程。不同脉冲宽度的单脉冲激光辐照下, Si-APD 探测器上表面中心点温度随时间的变化关系如图 5 所示。从图中可以看出, 4 种脉冲宽度条件下, Si-APD 探测器上表面中心点温度上升的时间均随脉冲能量密度的增加而增加, 其中最短时间为 0.1 ms, 对应的脉冲能量密度为 62.26 J/cm^2 , 脉冲宽度为 1.0 ms, APD 在开始时刻的热损伤最大。

图 5(a) 表征了 1.0 ms 时 APD 热损伤的演化过程, 激光能量密度范围为 13.35~62.26 J/cm^2 , APD 上表面中心点温度随激光能量密度的增加而升高。随着激光能量密度的增加, APD 表面的温度迅速升高, 平台期温度升高不明显。激光能量密度为

宽度的激光作用下, 各个特征时刻的温度沿硅基 APD 探测器上表面径向方向的变化与 1 ms 时刻基本一致, 但是由于激光功率密度的降低, 0.01 ms 时刻的温升明显下降, 再次说明长脉冲激光与 Si-APD 相互作用的温升是由能量密度和脉冲宽度共同决定的。

3 实验研究

3.1 实验装置

实验所用的激光器参数为: 波长为 1064 nm, 脉冲宽度范围为 1~3 ms, 重复频率为 10 Hz, 光斑半径为 180 μm 。示波器和脉冲宽度探头用来实时记录激光器输出激光的脉冲宽度, 能量计用来记录辐照在 Si-APD 探测器上的单脉冲激光能量, 三维平移台用于调节 Si-APD 探测器被辐照的区域, 高速红外测温仪用于实时监测激光作用区域中心点温度随时间的演化过程, 实验装置示意图如图 4 所示。实验过程中, 保持激光垂直照射 Si-APD 探测器表面, 每次实验均对一个位置施加一个脉冲。

13.35 J/cm^2 的激光辐照 1.0 ms 后, APD 上表面中心点温度为 1101.55 K; 激光能量密度为 20.17 J/cm^2 的激光辐照 1.0 ms 后, APD 上表面中心点温度为 1188.91 K; 激光能量密度为 62.26 J/cm^2 的激光辐照 1.0 ms 后, APD 上表面中心点温度为 1617.92 K。可见, APD 上表面中心点温度一直呈上升趋势, 但是均在 0.2 ms 左右产生上升趋势放缓的现象, 当作用完成时达到温度最大值, 随后温度开始下降, 最终 APD 上表面中心点温度恢复至初始温度。

图 5(b) 表征了 1.5 ms 时 APD 上表面中心点温度的演化过程, 激光能量密度在 13.92~17.80 J/cm^2 范围内时, 温度没有出现明显的上升趋势。激光能量密度大于 34.00 J/cm^2 时, 温度出现上升平台区, 平台区的温度随着能量密度的增加而升高, 达到平台区的时间也随着能量密度的增加而缩短, 最终

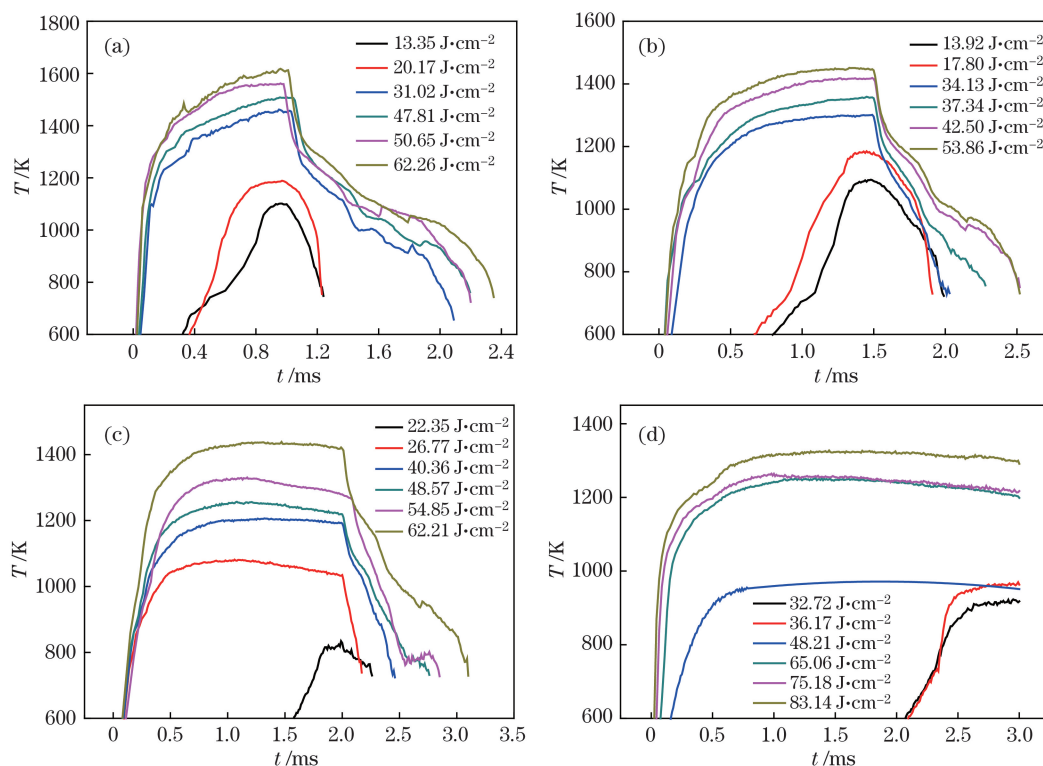


图 5 不同脉冲宽度下单脉冲激光辐照 Si-APD 表面中心点温度随时间的变化。

(a) $\tau=1.0$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.0$ ms; (d) $\tau=3.0$ ms

Fig. 5 Relationship between temperature of Si-APD surface center point irradiated by long-pulse laser and time with different pulse widths. (a) $\tau=1.0$ ms; (b) $\tau=1.5$ ms; (c) $\tau=2.0$ ms; (d) $\tau=3.0$ ms

APD 上表面中心点温度恢复至初始温度。

图 5(c)表征了 2.0 ms 时 APD 上表面中心点温度的演化过程。当激光能量密度小于 22.35 J/cm^2 时,温度变化没有出现平台区。当激光能量密度大于 26.77 J/cm^2 时,温度变化出现平台区,平台区的温度随着能量密度的增加而升高,在 0.5 ms 左右达到最大值,达到温度平台区的时间也随着能量密度的增加而缩短。在 1.0 ms 作用时间后,出现了温度降低的趋势。图 5(d)是脉冲宽度为 3 ms 时 APD 上表面中心点的温度演化过程。不同能量激光作用下,APD 上表面中心点平台区温度存在明显的差异,但基本在 1.0 ms 左右到达温度平台区,达到温度平台区的时间也随着能量密度的增加而缩短。在 2.0 ms 作用时间后,出现了温度降低的趋势,这主要是因为长脉冲激光与硅基 APD 相互作用的过程中,随着探测器整体温度的升高及其与外界的热交换增大,以及作用时间的增加,热交换的作用抑制了温度的升高。

通过对比图 2 和图 5 可以看出,模拟仿真结果与实验结果基本一致,从而验证了理论模型的正确性。

4 结 论

针对 Si-APD 的多层结构,建立了毫秒长脉冲

激光辐照 Si-APD 的热传导模型,并开展了模拟仿真和实验研究。研究表明:当激光脉冲宽度固定时,Si-APD 表面中心点温度随着能量密度的增加而升高;在相同的能量密度下,Si-APD 表面中心点所能达到的最大温度随着脉冲宽度的增加而降低,说明长脉冲激光与 Si-APD 相互作用的温升是由能量密度和脉冲宽度共同决定的。此外,Si-APD 表面的径向温度分布存在 2 个温度梯度,其位置分别位于激光的光斑边缘和铝电极处。模拟结果中得到的温升和温升速度与实验结果和理论推导结果吻合得很好,验证了理论模型的正确性。该研究结果可为激光辐照 Si-APD 光电探测器的热损伤机理的研究提供基础。

参 考 文 献

- [1] Enne R, Steindl B, Zimmermann H. Speed optimized linear-mode high-voltage CMOS avalanche photodiodes with high responsivity[J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4400-4403.
- [2] Gaberl W, Steindl B, Schneider H K, *et al.* 0.35 μm CMOS avalanche photodiode with high responsivity and responsivity-bandwidth product[J]. Optics Letters,

- 2014, 39(3): 586-589.
- [3] Marquardt C L, Giuliani J F, Fraser F W. Observation of impurity migration in laser-damaged junction devices[J]. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 1974, 23(2): 135-139.
- [4] Giuliani J F, Marquardt C L. Electrical effects in laser-damaged phototransistors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(11): 4993-4996.
- [5] Watkins S E, Zhang C Z, Walser R M, *et al.* Electrical performance of laser damaged silicon photodiodes[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(6): 827-835.
- [6] Moeglin J P, Gautier B, Joecklé R, *et al.* Electrical behaviour of laser-damaged silicon photodiodes[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, 28(5): 317-330.
- [7] Cheng X A, Lu Q S, Ma L Q, *et al.* Experimental study of HgCdTe (PV) detector irradiated by CW 1.319 μm laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(5): 622-626.
程湘爱, 陆启生, 马丽芹, 等. 1.319 μm 连续波激光辐照 PV 型 HgCdTe 探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, 23(5): 622-626.
- [8] Li L, Lu Q S, Jiang H M, *et al.* Photoconduction-type CdS detector irradiated by two laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 85-89.
李莉, 陆启生, 江厚满, 等. 双光束组合激光辐照光导型 CdS 光电探测器的实验研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(1): 85-89.
- [9] Li L, Lu Q S. Numerical simulation of dynamic response of PC-type HgCdTe detector irradiated by in-band and out-of-band laser beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1952-1958.
李莉, 陆启生. 光导型 HgCdTe 光电探测器对双波段组合激光辐照动态响应的数值模拟[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1952-1958.
- [10] Lei P, Li H, Bian J T, *et al.* Experimental study of HgCdTe imaging sensor irradiated by TEA-CO₂ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0214002.
雷鹏, 李化, 卞进田, 等. TEA-CO₂ 激光辐照 HgCdTe 图像传感器的实验研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0214002.
- [11] Zhu R Z, Wang R, Xu Z J, *et al.* Investigation of single nanosecond laser pulse induced damage of solar cell at 532 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): s116005.
朱荣臻, 王睿, 许中杰, 等. 532 nm 单脉冲纳秒激光辐照太阳能电池的损伤研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(s1): s116005.
- [12] Ferraro M S, Clark W R, Rabinovich W S, *et al.* InAlAs/InGaAs avalanche photodiode arrays for free space optical communication[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): 182-188.
- [13] Ying M, Mark N. Fast single photon avalanche photodiode-based time-resolved diffuse optical tomography scanner[J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(9): 3596-3609.
- [14] Nada M, Kanazawa S, Yamazaki H, *et al.* High-linearity avalanche photodiode for 40-km transmission with 28-Gbaud PAM4[C]. *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2015: M3C.2.
- [15] Nada M, Yokoyama H, Muramoto Y, *et al.* 50-Gbit/s vertical illumination avalanche photodiode for 400-Gbit/s Ethernet systems[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14681-14687.
- [16] Feng B C, Li Z H, Shi Y F, *et al.* Laser ranging with large dynamic range based on dual-mode detectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0504001.
冯百成, 李召辉, 师亚帆, 等. 基于双模式探测器的大动态范围激光测距[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0504001.
- [17] Fan X K, Zhang L, Song Y S, *et al.* Simultaneous detection technology of tracking and communication based on four-quadrant detector[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0906009.
范新坤, 张磊, 宋延嵩, 等. 四象限探测器的跟踪与通信复合探测技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0906009.
- [18] Bartoli F, Esterowitz L, Allen R, *et al.* A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(7): 2875-2881.
- [19] Kruer M, Esterowitz L, Allen R, *et al.* Thermal models for laser damage in InSb photovoltaic and photoconductive detectors[J]. *Infrared Physics*, 1976, 16(3): 375-384.
- [20] Bartoli F, Esterowitz L, Kruer M, *et al.* Irreversible laser damage in ir detector materials[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(11): 2934-2937.
- [21] Kruer M, Allen R, Esterowitz L, *et al.* Laser damage in silicon photodiodes[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1976, 8(5): 453-458.
- [22] Kohriki T, Kondo T, Iwasaki H, *et al.* First observation of thermal runaway in the radiation damaged silicon detector[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, 43(3): 1200-1202.
- [23] Chen D Z, Zhang C Q, Qing G B, *et al.* Research on laser damage threshold of photoelectric detector[J]. *Laser Technology*, 1995, 19(3): 135-140.
陈德章, 张承铨, 卿光弼, 等. 激光对光电探测器的损伤阈值研究[J]. *激光技术*, 1995, 19(3): 135-140.
- [24] Li Z W, Wang X, Shen Z H, *et al.* Numerical simulation of millisecond laser-induced damage in silicon-based positive-intrinsic-negative photodiode[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(14): 2759-2766.