

脉冲串激光辐照光电二极管损伤的数值研究

赵宏宇, 魏 智, 金光勇

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 所有的光电探测器在受到激光辐照时都可能被损坏,对探测器的性能产生不利的影响。为了研究脉冲串激光辐照对光电二极管造成的损伤,建立了脉冲串激光辐照光电二极管的二维轴对称模型及热源模型,采用有限元软件 COMSOL Multiphysics 模拟了 1064 nm 毫秒级脉冲串激光辐照光电二极管的温度场分布。研究结果表明脉冲个数 N 为 1, 3, 5, 10, 30 的脉冲激光辐照下,达到光电二极管的熔融损伤阈值所需的脉冲能量密度范围为 19.1~76.4 J/cm²。研究结果对毫秒级脉冲串激光在激光加工以及激光防护的应用方面具有指导意义。

关键词 探测器; 高斯脉冲; 毫秒激光; 光电二极管; 损伤阈值

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.040401

Numerical Research on Photodiode Damage by Multi-Pulsed Laser Irradiation

Zhao Hongyu, Wei Zhi, Jin Guangyong

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract All of the photoelectric detectors under laser irradiation are likely to be damaged, which has a bad effect on the detector performance. In order to study the photodiode damage caused by the multi-pulsed laser irradiation, a two-dimensional axisymmetric model and a heat source model of the photodiode irradiated by the multi-pulsed laser are built. Temperature distribution of the photodiode irradiated by the 1064 nm millisecond multi-pulsed laser is simulated by the finite element software COMSOL Multiphysics. Results show that when the pulse number N of the multi-pulsed laser irradiation is 1, 3, 5, 10, 30, respectively, pulse energy density region required by the fusion damage threshold of the photodiode is 19.1-76.4 J/cm². The research results are helpful for the millisecond multi-pulsed laser in laser processing and the application of laser protection.

Key words detectors; Gaussian pulse; millisecond laser; photodiode; damage threshold

OCIS codes 040.5160; 040.1880; 140.6810

1 引 言

光电探测器是气象卫星、红外测温仪、激光测距仪上常用的传感器,对医疗、国防和经济有重大影响。当光电探测器在接收光信号时,容易受到强激光信号的干扰和破坏。硅基 PIN 光电二极管是光电探测器中应用最广泛的一种,具有灵敏度高、暗电流小、响应速度快、可靠性高等特点。Kruer 等^[1]通过激光对光电二极管损伤的实验,研究了强光辐照下硅光电二极管的损伤,在脉冲宽度为 $10^{-8} \sim 1$ s 的激光脉冲辐照硅光电二极管的条件下,得到了明显的微观损伤并且响应度永久性退化,从实验上论证了光电二极管的性能退化是由热损伤造成的。Bartoli 等^[2]基于有限元法提出了一个二维数值模型,解决了大多数激光损伤探测器的阈值问题。孙立辉等^[3]通过激光束在材料内传播时产生的热源效应求解了热扩散方程,并且讨论了温度对探测器的影响。但由于当时的实验条件有限,并且已有的实验研究多为单脉冲对光电探测器的损伤,对于毫秒脉冲

收稿日期: 2016-12-06; **收到修改稿日期:** 2016-12-23

作者简介: 赵宏宇(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光与物质的相互作用方面的研究。E-mail: 408555777@qq.com

导师简介: 金光勇(1970—),男,博士,研究员,主要从事激光物理与新型激光器方面的研究。

E-mail: jgycust@163.com (通信联系人)

串激光辐照光电二极管热损伤阈值数值研究报道十分罕见。本文采用 COMSOL Multiphysics 软件针对毫秒脉冲串激光辐照光电二极管的热损伤进行二维数值模拟,建立了激光辐照光电探测器的二维轴对称模型,明确了热源、光电二极管的各项参数对温度场变化的影响,并给出相应的温度分布规律和熔融损伤阈值。

2 热传导模型

模拟采用了硅基 PIN 光电二极管,峰值波长在 950 nm 左右,光谱响应范围为 400~1100 nm,对于 1060 nm 左右的光谱有较高的响应。使用 1064 nm Nd:YAG 激光进行辐照,激光脉宽为 $\tau_p = 1.0$ ms,脉冲频率 $f = 10$ Hz。针对激光束垂直辐照光电二极管,入射光束为高斯光束的情况,建立了二维轴对称模型^[4],如图 1 所示。

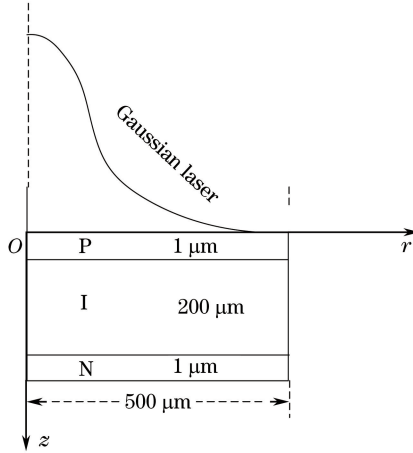


图 1 激光辐照光电二极管二维轴对称模型图

Fig. 1 2D axisymmetric model of the laser-irradiated photodiode

光斑辐照光敏面,辐照在光敏面的激光能量只有一小部分被吸收转化为有用的信号,大部分则转化为热能,造成探测器材料的升温^[5]。瞬态热传导方程为

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

边界条件为

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{r=500 \mu\text{m}} = 0, \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{z=202 \mu\text{m}} = 0, \quad (3)$$

初始条件为

$$T_i(0) = 298 \text{ K}, \quad (4)$$

式中 $T(r, z, t)$ 为瞬时温度; Q_i 为热源项; T_i 为 t 时刻第 i 层的温度; ρ_i 为第 i 层材料的密度; c_i 为第 i 层材料的比热容; k_i 为第 i 层材料的热导率。

由于光斑半径小于光敏面半径,所以入射激光只穿透进入硅层内一定的深度,则硅热源

$$Q_{\text{Si}}(T, r, t) = I_0 [1 - R_{\text{Si}}(T, z)] \alpha_{\text{Si}}(T, z) f(r) g(t) \exp[-\alpha_{\text{Si}}(T, z)], \quad (5)$$

式中 I_0 为入射激光光斑的峰值功率, $R_{\text{Si}}(T)$ 为硅表面的反射系数, $\alpha_{\text{Si}}(T, z)$ 为硅的吸收系数^[4], $f(r)$ 和 $g(t)$ 分别为脉冲激光束的空间分布和时间分布,对于 TEM₀₀ 模的脉冲激光,可以表达为

$$f(r) = \exp(-2r^2/a_0^2), \quad (6)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1 & \frac{n}{f} < t \leq \tau_p + \frac{n}{f} \\ 0 & \tau_p + \frac{n}{f} < t \leq \frac{n+1}{f} \end{cases} \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (7)$$

$$I_0 = \frac{E}{\pi r_0^2 \tau_p}, \quad (8)$$

式中 a_0 为激光光斑半径^[6], 等于 0.5 mm; f 是入射激光频率, 等于 10 Hz; τ_p 为激光脉宽, 等于 1 ms; E 为入射激光能量。

3 数值模拟与结果

图 2 所示为当脉冲能量密度 $I = 76.4 \text{ J/cm}^2$ 、脉冲宽度 $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$ 时, 硅基 PIN 结上表面辐照点温度随时间的变化。从图中可以看出, 光电二极管辐照中心点温度上升趋势非常明显, 其最高温度达到 1687 K, 在 1.0 ms 后, 激光停止辐照, 硅基 PIN 结进入单纯散热阶段, 辐照中心点温度迅速下降, 在 5 ms 左右完成回落过程。因为热扩散的速度由温度在空间上的梯度决定, 所以当表面温度下降到接近 400 K 时, 温度的空间梯度减小, 温度下降缓慢, 当第一个激光脉冲辐照后, 硅基 PIN 辐照中心点的温度无法回落到初始温度 (298 K), 只能回落到 383 K, 这是因为在模型中设定的边界条件为绝热。

图 3 所示为当 $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$, $I = 61.1 \text{ J/cm}^2$, $f = 10 \text{ Hz}$ 时, 硅基 PIN 上表面辐照中心点温度随时间的变化。从图中可以看出, 硅基 PIN 光电二极管完全被损坏所需的脉冲个数为 3 个。在激光辐照期间, 硅基 PIN 上表面辐照中心点温度急剧上升, 在脉冲停止作用的间隔内, 由于没有热源和能量的聚集, 硅基 PIN 处于冷却阶段, 因此硅基 PIN 上表面辐照中心点温度急剧下降, 周而复始, 中心点的温度就表现为锯齿形状。还可以看出, 由于有热积累效应^[7-8], 第一个脉冲峰值为 494 K, 第二个脉冲峰值为 1407 K, 第三个脉冲峰值为 1687 K, 产生了温度累积, 而且每一个脉冲结束后, 整个硅基 PIN 光电二极管温度达到热平衡时的温度随着脉冲个数的增加而升高, 第一个脉冲结束后整个硅基 PIN 光电二极管温度达到 326 K, 第二个脉冲结束后整个硅基 PIN 温度达到 379 K, 第三个脉冲结束后整个硅基 PIN 温度达到 468 K。可以看出, 下一个脉冲对硅基 PIN 的损伤作用将与前一个脉冲的作用效果进行叠加^[9]。

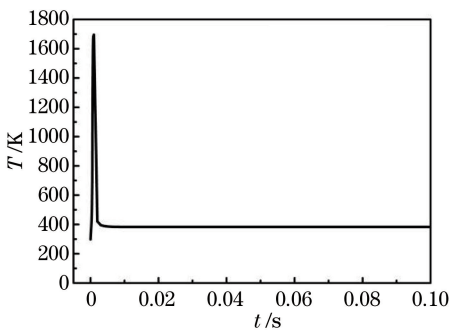


图 2 $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$, $I = 76.4 \text{ J/cm}^2$ 时, 硅基 PIN 上表面辐照点温度随时间的变化

Fig. 2 Temperature of the irradiation spot on the silicon substrate PIN versus time when $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$, $I = 76.4 \text{ J/cm}^2$

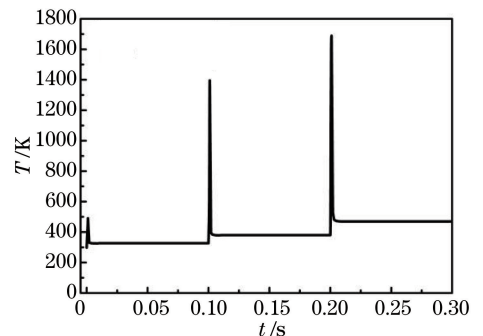


图 3 $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$, $I = 61.1 \text{ J/cm}^2$, $f = 10 \text{ Hz}$ 时, 硅基 PIN 上表面辐照点温度随时间的变化

Fig. 3 Temperature of the irradiation spot on the silicon substrate PIN versus time when $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$, $I = 61.1 \text{ J/cm}^2$, $f = 10 \text{ Hz}$

图 4 所示为 $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$, $I = 61.1 \text{ J/cm}^2$, $f = 10 \text{ Hz}$, 3 个脉冲作用时, 硅基 PIN 光电二极管硅层上表面不同径向位置 ($r = 0, 100, 200 \mu\text{m}$) 温度随时间的变化。在第一个脉冲作用时, 辐照 0.001 s 时达到最大值, 当 $r = 0 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 490 K; 当 $r = 100 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 464 K; 当 $r = 200 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 415 K, 并且它们都在 0.005 s 左右完成温度回落过程。在第二个脉冲作用时, 辐照 0.101 s 时达到最大值, 当 $r = 0 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 1394 K; 当 $r = 100 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 1233 K; 当 $r = 200 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 821 K, 并且它们都在 0.105 s 左右完成温度回落过程。在第三个脉冲作用时, 辐照 0.201 s 时达到最大值, 当 $r = 0 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 1687 K; 当 $r = 100 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 1668 K; 当 $r = 200 \mu\text{m}$ 时, 其峰值为 1377 K, 并且它们都在 0.205 s 左右完成温度回落过程。可以看出, 在不同位置, 硅基 PIN 光电二极管硅层上表面温度随时间的变化趋势相同, 但距离辐照中心点越远, 升温曲线的峰值越低, 但回落都会回到同一温度, 即最后整个硅基 PIN 达到热平衡。

图 5 所示为 $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$, $I = 61.1 \text{ J/cm}^2$, $f = 10 \text{ Hz}$, 3 个脉冲作用时, 不同时刻 ($t = 1.0, 101, 20 \text{ ms}$) 硅基

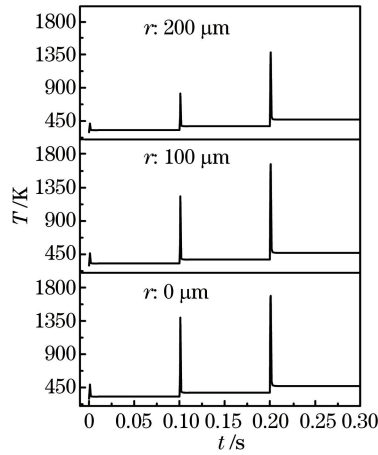


图 4 硅基光电二极管的硅层上表面不同径向位置温度随时间的变化

Fig. 4 Temperature at different radial position of the silicon layer surface of the silicon photodiode versus time

PIN 光电二极管硅层上表面径向温度随位置的变化。可以看出,不同时刻硅基 PIN 光电二极管硅层上表面温度随径向位置的变化趋势相同,但随着脉冲个数的增加,温升越来越明显。随着辐照时间的增加,热能逐渐沉积,探测器中心点温度随着径向距离的增加逐渐下降,并且其上表面最高温度高于硅的熔融温度 1687 K,在上表面发生了固液相变。

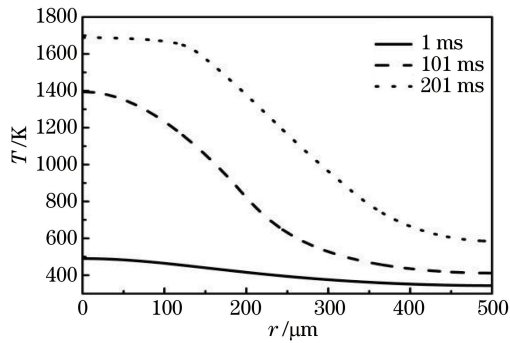


图 5 硅基光电二极管的硅层上表面不同时刻温度随径向位置的变化

Fig. 5 Temperature at different time of the silicon layer surface of the silicon photodiode versus radial position

图 6 所示为 $\tau_p = 1.0 \text{ ms}$, $I = 61.1 \text{ J/cm}^2$, $f = 10 \text{ Hz}$, 3 个脉冲作用时,硅基 PIN 光电二极管轴向 ($z = 0, 100, 202 \text{ μm}$) 损伤温度随时间的变化。可以看出,不同轴向位置硅基 PIN 光电二极管损伤温度随时间的变化趋势基本相同^[10]。在第一个脉冲作用时,辐照 0.001 s 时达到最大值,当 $z = 0 \text{ μm}$ 时,其峰值为 490 K;当

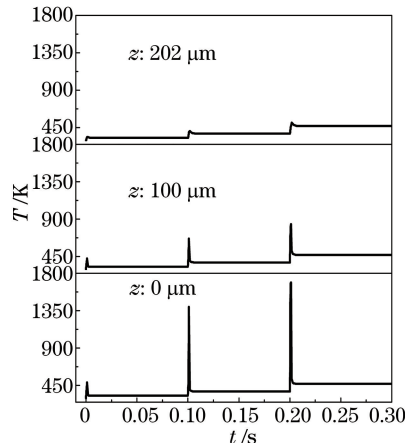


图 6 硅基光电二极管不同轴向位置损伤温度随时间的变化

Fig. 6 Damage temperature of the silicon photodiode at different axial position versus time

$z=100\ \mu\text{m}$ 时,其峰值为 429 K;当 $z=202\ \mu\text{m}$ 时,其峰值为 339 K,并且它们都在 0.007 s 左右完成温度回落过程。在第二个脉冲作用时,辐照 0.101 s 时达到最大值,当 $z=0\ \mu\text{m}$ 时,其峰值为 1394 K;当 $z=100\ \mu\text{m}$ 时,其峰值为 666 K;当 $z=202\ \mu\text{m}$ 时,其峰值为 410 K,并且它们都在 0.107 s 左右完成温度回落过程。在第三个脉冲作用时,辐照 0.201 s 时达到最大值,当 $z=0\ \mu\text{m}$ 时,其峰值为 1687 K;当 $z=100\ \mu\text{m}$ 时,其峰值为 843 K;当 $z=202\ \mu\text{m}$ 时,其峰值为 511 K,并且它们都在 0.207 s 左右完成温度回落过程。距离辐照中心点越远,其温升曲线的峰值越低,但回落都会回到同一温度,即最后整个硅基 PIN 达到热平衡。

图 7 所示为 $\tau_p=1.0\ \text{ms}$, $I=61.1\ \text{J}/\text{cm}^2$, $f=10\ \text{Hz}$, 3 个脉冲作用时不同时刻 ($t=1.0\ \text{ms}$, 101, 201 ms) 硅基 PIN 损伤温度随轴向位置的变化。可以看出,不同时刻硅基 PIN 损伤温度随轴向位置的变化趋势相同,但脉冲个数越多(时间越长),温升越大。

图 8 为 $\tau_p=1.0\ \text{ms}$, $I=61.1\ \text{J}/\text{cm}^2$, $f=10\ \text{Hz}$, 3 个脉冲作用过程中,达到最高损伤温度时,硅基 PIN 损伤温度的三维分布。可以看出,此时辐照中心点达到熔融温度,且高温区仅存在于表面,具有明显的温度表面沉积现象。

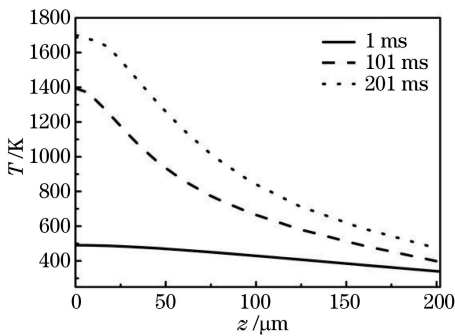


图 7 硅基光电二极管不同时刻损伤温度随轴向位置的变化关系

Fig. 7 Damage temperature of the silicon photodiode at different time versus axial position

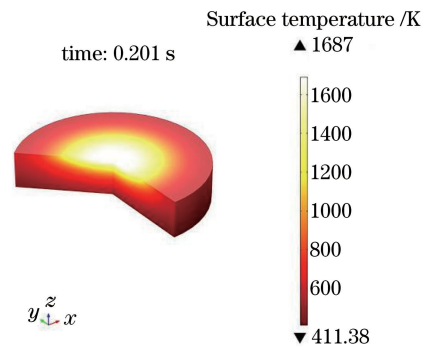


图 8 达到最高损伤温度时硅基 PIN 损伤温度的三维分布图

Fig. 8 Three-dimensional damage temperature distribution of the silicon PIN when it reaches the highest damage temperature

光电二极管的损伤形式为热损伤,在温度达到 1687 K 时 Si 层达到熔点,即判定该点为损伤阈值。达到该损伤阈值所需的脉冲能量密度与脉冲个数之间的关系如图 9 所示。可以看出,随着脉冲个数增加,脉冲能量密度降低,二者呈非线性变化关系。与脉冲个数 N 为 1~30 的脉冲激光辐照硅基光电二极管时,相对应的能量密度范围是 19.1~76.4 J/cm^2 ,其中 76.4 J/cm^2 对应 $N=1$, 61.1 J/cm^2 对应 $N=3$, 44.6 J/cm^2 对应 $N=5$, 30.6 J/cm^2 对应 $N=10$, 19.1 J/cm^2 对应 $N=30$ 。达到损伤阈值所需的脉冲串能量密度低于单脉冲的能量密度。文献[11]给出脉宽为 1 ms,激光能量密度为 71 J/cm^2 的条件下,实验测得辐照中心点的硅发生熔融。与本文脉冲个数为 1 时模拟仿真得到的能量密度 76.4 J/cm^2 符合度较好。

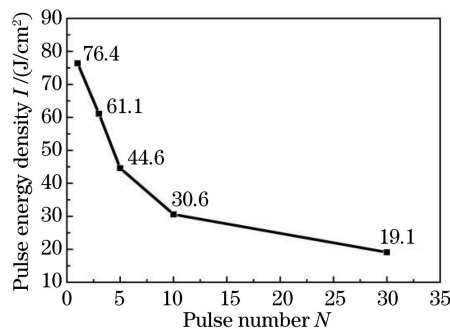


图 9 达到硅基光电二极管损伤阈值所需的脉冲能量密度与脉冲个数之间的关系

Fig. 9 Relationship between the pulse energy density required by the damage threshold of the silicon photodiode and pulse number

4 结 论

对 1064 nm 毫秒脉冲串激光辐照光电二极管的热损伤进行了数值模拟分析,建立了二维轴对称模型及热源模型,采用有限元模拟软件模拟了 1064 nm 毫秒级脉冲串激光辐照光电二极管的温度场分布,模拟分析了在激光作用期间激光作用中心点温度随时间的变化,光电二极管的硅层上表面不同径向位置和不同轴向位置的温度随时间的变化,不同时刻光电二极管上表面温度随径向位置和轴向位置的变化,以及达到光电二极管熔融损伤阈值所需的脉冲能量密度与脉冲个数之间的关系。研究结果表明脉冲个数为 1~30 的脉冲激光辐照光电二极管相对应的能量密度范围为 19.1~76.4 J/cm²。

参 考 文 献

- [1] Krueer M, Allen R, Esterowitz L, *et al.* Laser damage in silicon photodiodes[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1976, 8(5): 453-458.
- [2] 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.
- [3] Sun Lihui, Ma Liqin. Calculation of surface temperature of photoelectric detectors irradiated by laser[J]. *Infrared*, 2006, 27(6): 11-15.
孙立辉, 马丽芹. 受激光辐照的光电探测器表面温度的计算[J]. *红外*, 2006, 27(6): 11-15.
- [4] Ma Liqin, Lu Qisheng, Du Shaojun, *et al.* Imitation of the instantaneous change behaviors of photoconductive detectors [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(3): 342-346.
马丽芹, 陆启生, 杜少军, 等. 光导型光电探测器瞬变行为的仿真[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 342-346.
- [5] Xue Qing, Wu Wenhui, Ye Yunxia, *et al.* Property degradation of GaAs/Ge solar cells after femtosecond laser irradiation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 041405.
薛青, 吴文慧, 叶云霞, 等. 飞秒激光辐照对 GaAs/Ge 太阳能电池的性能退化研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 041405.
- [6] Sun Liguang, Li Yongzheng, Shen Ke. Thermal analysis of laser damage in photoelectric detector[J]. *Laser Journal*, 1991, 12(2): 72-76.
孙利国, 李永正, 沈柯. 光电探测器激光损伤热模型分析[J]. *激光杂志*, 1991, 12(2): 72-76.
- [7] Zhu Yongxiang. The effect of laser irradiation on silicon solar cell[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
朱永祥. 激光辐照对硅太阳能电池的作用[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [8] Geist J, Zalewski E F, Schaefer A R. Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiodes[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(22): 3795-3799.
- [9] Zhang Yingcong, Shen Hua, Zhu Rihong. Three-dimensional temperature field of material irradiated by continuous wave laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0806002.
张英聪, 沈华, 朱日宏. 连续激光辐照材料的三维温度场[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0806002.
- [10] Li Xiuqian, Cheng Xiang'ai, Wang Rui, *et al.* Investigation of thermal effect of HgCdTe detector with irradiation by off-band CW CO₂ laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(12): 1070-1074.
李修乾, 程湘爱, 王睿, 等. 波段外 CW CO₂ 激光辐照 HgCdTe 探测器热效应研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(12): 1070-1074.
- [11] Li Z W, Chen C, Wang X, *et al.* Photoelectric performance degradation of millisecond laser-irradiated silicon photodiodes[C]. *SPIE*, 2013, 8796: 87960R.