

## 基于等效电路参数提取的硅光电二极管激光损伤机理分析

师宇斌,张检民,张震,林新伟,程德艳,窦鹏程

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024)

**摘要:**通过硅光电二极管激光辐照效应实验获取了辐照前后器件的 I-V 特性曲线,利用粒子群优化算法对二极管的等效电路参数进行提取,考察受损前后等效参数的变化规律。认为光电二极管在激光辐照受损后,其反向饱和电流会减小,等效串联电阻会增大,等效并联电阻会减小。随后,基于半导体物理理论,对这些参数变化的内在因素进行了定性分析。认为反向饱和电流减小是由掺杂离子浓度减小造成的,串联电阻增大是因掺杂离子浓度以及载流子寿命减小共同引起的,并联电阻减小则是由半导体表面及内部的缺陷引起的。

**关键词:**二极管等效电路; 激光辐照效应; 粒子群优化算法

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0106002

## Analysis of laser-induced damage mechanism in Si photodiode based on parameter extraction of equivalent circuit

Shi Yubin, Zhang Jianmin, Zhang Zhen, Lin Xinwei, Cheng Deyan, Dou Pengcheng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Combined with particle swarm optimization (PSO) algorithm, the parameter of photodiode was extracted from I-V characteristics curve based on the equivalent circuit which was obtained before and after irradiation on Si photodiode. Then the experimental law of equivalent parameter before and after being damaged was acquired. When the photodiode was damaged, the reverse saturation current was decreased and the series resistance was increased, and the shunt resistance was decreased. The damage mechanism was given qualitatively based on semiconductor physics theory. The decrease of the reverse saturation current was on account of decrease in doping concentration. The increase of series resistance was due to the decrease in doping concentration and carrier lifetime. The decrease of the shunt resistance was caused by the defects in the surface and internal of semiconductor.

**Key words:** equivalent circuit of diode; laser irradiation effect; particle swarm optimization algorithm

收稿日期:2017-06-15; 修订日期:2017-08-20

基金项目:国家自然科学基金(11405132);西北核技术研究所长线预研课题(12111502)

作者简介:师宇斌(1988-),男,助理研究员,硕士,主要从事激光辐照效应方面的研究。Email: shiyubin@nint.ac.cn

## 0 引言

硅光电探测器能够对从短波到近红外波段的光及热辐射进行定量测量,且具有高敏感性、低噪声、体积小、质量轻等特点,被广泛应用于军事和工业领域<sup>[1]</sup>。在一些测试条件下,由于激光引入的热、热应力可能会导致探测器性能退化乃至失效<sup>[2-5]</sup>,因此,半导体光电探测器激光辐照效应研究在改善半导体器件性能方面具有重要意义。

20 世纪 70 年代,美国海军实验室对硅光电器件在激光辐照下的器件性能变化开展了细致的研究<sup>[6-9]</sup>。不仅测量了辐照后探测器的暗电流、响应率、饱和电流、开路电压、结电容等参数并进行系统分析,还采用二次离子质谱技术对激光辐照前后器件内部掺杂离子分布进行测量比对,结果表明掺杂离子分布变化是影响器件性能的重要因素。国内长春理工大学也对硅光电探测器辐照后的响应率以及微观形貌进行了测量<sup>[10]</sup>,认为在器件材料熔融和再凝固过程中,形成的漏电通道是探测器响应度下降的主要原因。在 90 年代末,Moeglin 对硅基探测器光辐照性能退化进行了深入研究<sup>[11]</sup>,分析认为是耗尽区引入的缺陷造成器件性能下降。Podlipskas<sup>[12]</sup>的研究表明,激光辐照后,器件内部载流子寿命下降也是影响器件性能的重要因素<sup>[12]</sup>。

为了便于研究二极管的工作特性,常采用等效电路手段对器件的 I-V 特性进行分析<sup>[13-15]</sup>,通过这些方法能够准确地从实测 I-V 特性曲线获取所需特性参数,还可以为光电器件的设计分析提供重要依据。但目前国内外尚未有文献结合等效电路模型对硅光电二极管激光辐照受损进行细致分析。文中首先开展了硅基光电探测器的激光辐照效应实验,再结合粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对硅基探测器的等效电路参数进行提取,获取了硅二极管在激光辐照效应受损前后等效参数的变化规律,并结合半导体物理理论对这些参数变化的内在因素进行分析。

## 1 激光辐照效应实验

激光辐照实验系统如图 1 所示。辐照激光(Nd:YAG 脉冲激光器)脉冲时长 8 ns,最大输出为 300 mJ。通过调节激光器工作电压并与衰减透镜组配合实现

辐照能量调整,利用分束镜实现分束后,通过能量计进行实时监测,主激光经透镜( $f=25\text{ cm}$ )聚焦到受辐照的硅光电探测器(滨松 S1336-44BQ 型)上,实验光斑平均半径约为 0.74 mm,如图 2 所示。用于检测探测器工作状态的信号光经斩波器后,利用分光镜耦合到探测器。实验前后,利用显微镜对实验样品形貌观测,利用 Keysight B1500A 半导体参数测试仪对二极管的 I-V 特性进行分析测试。

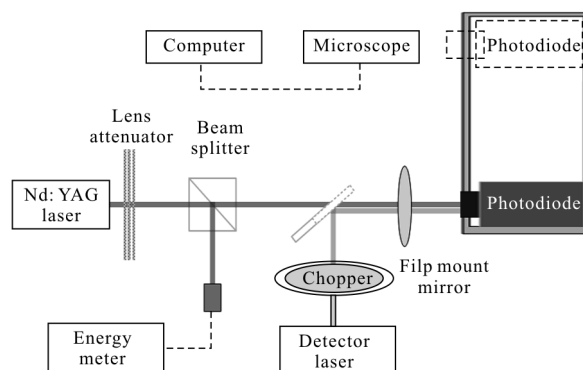


图 1 激光辐照硅基探测器实验布局

Fig.1 Layout of experiment on laser irradiating Si detector

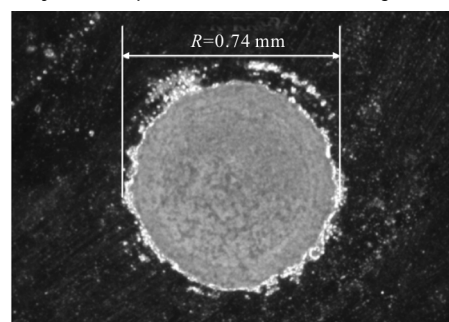


图 2 激光光斑大小

Fig.2 Spot size of the laser

硅光电二极管在激光辐照损伤前后,利用显微镜观测结果如图 3 所示。

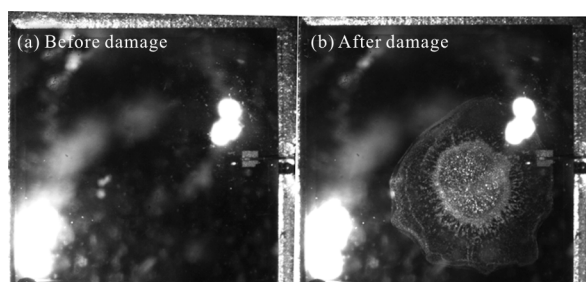


图 3 样品 S1 辐照前后损伤形貌

Fig.3 Variation of morphology of the sample S1 before and after irradiation

图 3 结果表明, 激光辐照作用后的探测器表面已经受到一定程度的损伤, 与此同时, 其 I-V 特性也发生了明显的变化, 如图 4 所示。

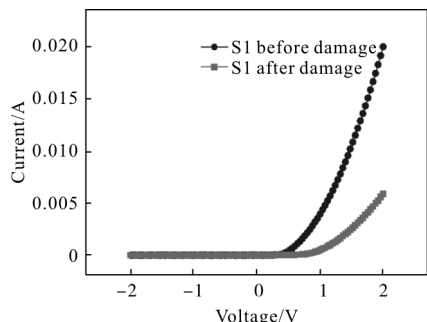


图 4 样品 S1 受损前后 I-V 特性

Fig.4 Variation of I-V characteristic of sample S1 before and after irradiation

## 2 等效电路参数提取分析

可以看出探测器的 I-V 特性发生了较为明显的改变, 为对探测器的伏安特性进行分析, 需引入等效电路分析模型, 对其中的各个参数进行解耦分析。通常, 光电二极管可用 pn 结二极管 D、恒流源  $I_{ph}$  以及探测器内部的等效串并联电阻  $R_s$  和  $R_{sh}$  构成, 如图 5 所示<sup>[16-17]</sup>。

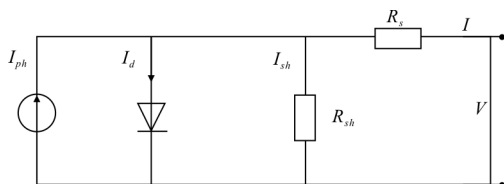


图 5 光电二极管等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of photodiode

二极管的输出电流与电压存在以下关系:

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{sh} = I_{ph} - I_{SD} = \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{n_1 kT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中:  $I$  为终端电流;  $V$  为终端电压;  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_{D1}$  为二极管电流;  $I_{sh}$  为并联电流;  $I_{SD}$  为二极管反向饱和电流;  $R_s$  和  $R_{sh}$  分别为二极管的等效串联电阻和并联电阻;  $n$  为二极管的品质因数。串联电阻  $R_s$  主要来源于器件本身的体电阻、前电极金属栅线的接触电阻以及金属电极本身的电阻, 而并联电阻  $R_{sh}$  是为了解释分流现象而引入的概念, 主要反映器件 pn 结漏电流, 包括 pn 结内部漏电流<sup>[16]</sup>。

由于在计算精度以及收敛速度方面, PSO 算法

具有明显优势, 因而它也在等效电路参数提取方面得到一定的应用<sup>[15,18-19]</sup>。文中也基于 PSO 算法对辐照前后器件的等效参数进行提取分析。

PSO 算法从随机解出发, 通过迭代寻找最优解, 利用适应度来评价解的品质。其核心部分是对评价函数进行计算, 并更新现有粒子的速度以及位置, 其中, 粒子的速度和位置更新公式如下:

$$v_i^{k+1} = w_i v_i^k + c_1 \text{rand} \times (pbest_i - s_i^k) + c_2 \text{rand} \times (gbest - s_i^k) \quad (2)$$

$$s_i^{k+1} = v_i^{k+1} + s_i^k \quad (3)$$

式中:  $v_i^k$  表示第  $k$  次迭代的第  $i$  个粒子的速度;  $w$  为第  $i$  个粒子的权重;  $c_1$  和  $c_2$  称为学习因子;  $\text{rand}$  表示 0-1 之间的随机数;  $pbest_i$  表示第  $i$  个粒子评价函数的最优值;  $gbest$  表示全局粒子评价函数的最优值。

根据图 5 中所示等效电路模型, 可定义函数  $f$ :

$$f(I, V, \varphi) = |I - I_{ph} + I_{D1} + I_{sh}| \quad (4)$$

当光电流不存在时, 函数  $f$  的解向量  $\varphi$  记作  $\varphi = [I_{SD}, R_s, n_1, R_{sh}]$ 。因此, 针对此模型, PSO 算法的评价函数可通过 RMS 函数定义:

$$F = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(I_k, V_k, \varphi)^2} \quad (5)$$

## 3 计算结果与分析

计算过程中学习因子  $c_1$  和  $c_2$  均取 2, 权重因子  $w$  按照从 0.9-0.4 线性递减<sup>[19]</sup>。对图 4 中所示的受损前后的参数进行计算分析, 结果如图 6 所示。

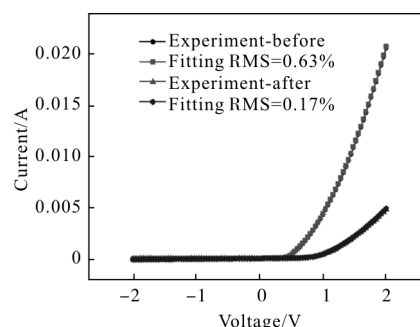


图 6 样品 S1 受损前后 I-V 实测结果与拟合结果

Fig.6 I-V characteristic of the measurement and fitting results of sample S1 before and after damage

图 6 中给出了利用 PSO 算法得到参数的拟合结果与实测 I-V 曲线的比较, 结果表明该方法能够在

有效范围得到准确的参数值, RMS 残差也表明该计算结果误差较小。表 1 给出三个不同样品 50 次计算均值。

表 1 样品受损前后计算结果均值

Tab.1 Variation of average results of sample before and after damage

	Damaged or undamaged	Reverse saturation current $I_{SD}/A$	Equivalent series resistance $R_s/\Omega$	Quality factor n/arb unit	Equivalent shunt resistance $R_{sh}/\Omega$	Evaluation function
Search range	-	[0, 1e-3]	[100, 300]	[0, 2]	[1e3, 1e4]	-
Sample S1	Undamaged	3E-51	201	1.98	8 635	0.63%
	Damaged	2E-24	210	1.91	6 786	0.17%
Sample S2	Undamaged	4E-90	201	1.96	8 258	1.36%
	Damaged	2E-30	211	1.99	5 304	0.24%
Sample S3	Undamaged	5E-43	201	1.98	8 587	0.53%
	Damaged	4E-25	211	1.93	7 624	0.16%

表中计算结果说明,在激光辐照作用后,光电二极管的反向饱和电流  $I_{SD}$  增大,等效串联电阻  $R_s$  增大,等效并联电阻  $R_{sh}$  减小。且受损前后,二极管品质因数  $n$  也会有所变化。

由于理想的二极管反向饱和电流  $I_{SD}$  的电流密度可以表示为<sup>[20]</sup>:

$$J_s = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} = q \left( n_{p0} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + p_{n0} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) = q \left( n_{p0} \sqrt{\frac{K_0 T}{M_n}} + p_{n0} \sqrt{\frac{K_0 T}{M_h}} \right) \quad (6)$$

式中:  $L_n$  与  $L_p$  分别为光电二极管的电子空穴扩散长度;  $D_n$  与  $D_p$  分别为电子空穴扩散系数;  $\tau_n$  和  $\tau_p$  分别为电子空穴寿命;  $n_{p0}$  为  $p$  型材料中的电子浓度;  $p_{n0}$  为  $n$  型材料中的空穴浓度;  $M_n$  和  $M_h$  分别为半导体电子空穴的有效质量。从上式看出,掺杂浓度会影响反向饱和电流密度。

对于硅基器件而言,根据文献报道,在激光辐照作用下,其表面掺杂离子的扩散系数会发生明显变化<sup>[6,11,21]</sup>,影响器件表层掺杂离子的浓度分布,造成器

件表层掺杂离子浓度下降。由于半导体中存在关系<sup>[20]</sup>:

$$n_{p0} \cdot N_a = n_i^2 \quad (7)$$

$$p_{n0} \cdot N_d = n_i^2 \quad (8)$$

式中:  $N_a$  与  $N_d$  分别为受主和施主浓度;  $n_i$  为硅材料中的本征载流子浓度。从上式可以看出,在激光辐照作用后,对实验中选用的  $n-p$  型光电探测器而言,这即意味着表层掺杂离子浓度  $N_d$  减小,将会造成  $p_{n0}$  增大。故而会导致公式(6)所示反向饱和电流密度变大。

在金属电极接触电阻可忽略的情况下,光电二极管的等效串联电阻  $R_s$  大小取决于体电阻。对于一个理想二极管,其半导体材料的电阻率可记作<sup>[17]</sup>:

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p} \quad (9)$$

式中:  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别为电子及空穴迁移率;  $n$  和  $p$  分别为电子浓度和空穴浓度。对于  $p-n$  结二极管,其  $n$  型区存在关系  $n \gg p$ ,其  $p$  型区存在  $p \gg n$ ,故其体电阻可记作:

$$R_s = R_n + R_p = \frac{I_n}{qs(\mu_n N_d)} + \frac{I_p}{qs(\mu_p N_a)} = \frac{I_n}{q^2 s \left( \frac{\tau_n N_d}{M_n} \right)} + \frac{I_p}{q^2 s \left( \frac{\tau_p N_d}{M_h} \right)} \quad (10)$$

式中:  $I_n$  和  $I_p$  分别为  $n$  型和  $p$  型区等效电阻长度,其分别正比于  $n$  型层厚度和  $p$  型层厚度;  $s$  为器件横截面积。对  $n-p$  型探测器,假定离子扩散过程中,  $n$  型层离子总数不变,设其为  $M$ ,即  $I_n \cdot N_d$  与  $s$  的乘积保持为  $M$ 。在上述基础上,存在以下关系:

$$R_s = R_n + R_p = \frac{I_n}{qs(\mu_n N_d)} + \frac{I_p}{qs(\mu_p N_a)} \approx \frac{C_1}{C_2 \tau_n N_d} + \frac{C_3}{C_4 \tau_p} \quad (11)$$

式中:  $C_1$  为  $M$ ;  $C_2$  为  $\frac{m_n}{q^2 s}$ ;  $C_3$  为  $I_p$ ;  $C_4$  为  $\frac{m_h}{q^2 s}$ 。由于  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  以及  $C_4$  均为常数,认为二极管的等效串联电阻仅与其内部掺杂离子浓度以及载流子寿命相关。对于  $n-p$  型光电二极管,如前文所述,当激光引入损伤,造成其表面掺杂离子浓度  $N_d$  下降时,器件  $n$  型区的电阻  $R_n$  会下降。与此同时,在激光作用下,器件内部形成大量的缺陷,这些缺陷会形成新的复合中心,导致器件内部载流子寿命相应减小,故光电二极

管的 n 型区电阻  $R_N$  和 p 型区电阻  $R_p$  均会减小。对于 p-n 型光电二极管, 推导过程类似。

二极管等效并联电阻  $R_{sh}$  是为了解释二极管漏电流引入的参量, 其大小反映出器件漏电流的大小<sup>[17]</sup>。初步认为当器件漏电流增大, 其等效并联电阻减小, 当器件漏电流减小时, 其等效并联电阻增大。通过漏电流与等效并联电阻之间的对应关系也可以判断等效并联电阻的变化情况。根据文献报道, 漏电流又分为表面漏电流以及体内漏电流。表面漏电流主要有表面产生-复合电流、表面隧道电流以及表面沟道电流。在一般的分析当中, 主要考虑器件的表面产生-复合电流<sup>[22]</sup>。它主要产生于表面态和表面空间电荷区, 与表面复合速率  $s$ 、表面态  $N_T$  密度正相关。器件体内漏电流主要与内部晶体缺陷相关。根据文献报道, 器件在激光辐照受损后, 一方面, 器件表面受损伤, 使器件表面复合速率  $s$  以及表面态  $N_T$  均会受到影响而增大<sup>[1,17]</sup>, 造成表面漏电流的增大。另一方面, 器件内部会形成大量缺陷中心, 导致器件体内漏电流增大<sup>[1]</sup>。故而, 在激光辐照作用后, 器件的漏电流增大也说明了其等效并联电阻会减小。

#### 4 结束语

文中通过激光辐照效应实验获取了辐照前后实验样品的 I-V 特性, 利用 POS 算法, 结合等效电路模型对辐照前后硅光电探测器进行参数提取, 考察了二极管反向饱和电流变化、等效串并联电阻变化。结果表明, 在激光辐照作用后, 硅光电二极管反向饱和电流会增大, 等效串联电阻会有所增大, 而等效并联电阻有所减小。基于半导体物理相关理论对这些变化量内在机制进行了讨论, 分析认为, 反向饱和电流的增大反映出器件掺杂离子浓度的降低; 等效串联电阻的增大则反映出掺杂离子浓度降低以及载流子寿命的减小; 等效并联电阻的减小则反映出二极管体内以及表明缺陷的增多。

#### 参考文献:

[1] Moeglin J P, Gautier B, Joecklé R, et al. Electrical behaviour of laser-damaged silicon photodiodes[J]. Optics & Lasers in Engineering, 1997, 28(5): 317-330.

- [2] Sheng Liang, Zhang Jianmin, Zhang Zhen. Pixel upset effect and mechanism of CW laser irradiated CMOS cameras [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 39-42. (in Chinese)
- [3] Zhu Zhiwu, Zhang Zhen, Cheng Xiang' ai. Damage phenomenon and probability of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 113-118. (in Chinese)
- [4] Nie Jinsong, Wang Xi, Li Hua, et al. Thermal and mechanical damage in CCD detector induced by 1.06  $\mu$ m laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(s2): 380-386. (in Chinese)
- [5] Zhang Zhen, Zhou Menglian, Zhang Jianming. Shadows of laser spots in CCD and their mechanism [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1365-1371. (in Chinese)
- [6] Marquardt C L, Giuliani J F, Fraser F W. Observation of impurity migration in laser-damaged junction devices [J]. Radiation Effects, 1974, 23(2): 135-139.
- [7] Giuliani J F, Marquardt C L. Electrical effects in laser-damaged phototransistors [J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(11): 4993-4996.
- [8] Kruer M, Esterowitz L, Bartoli F, et al. Thermal analysis of laser damage in thin-film photoconductors [J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(7): 2867-2874.
- [9] Kruer M, Allen R, Esterowitz L, et al. Laser damage in silicon photodiodes [J]. Optical and Quantum Electronics, 1976, 8(5): 453-458.
- [10] Xu L, Cai H, Li C, et al. Degradation of responsivity for photodiodes under intense laser irradiation [J]. Optik, 2013, 124: 225-228.
- [11] Moeglin J P, Gautier B, Joeckle R C, et al. Photoelectric performance degradation of several laser-irradiated Si detectors [C]//SPIE, Optoelectronics and High-Power Lasers & Applications, 1998, 3287: 60-66.
- [12] Podlipskas Ž, Aleksiejūnas R, Nargelas S, et al. Photomodification of carrier lifetime and diffusivity in AlGaIn epitaxial layers[J]. Current Applied Physics, 2016, 16(6): 633-637.
- [13] Bouzidi K, Chegaar M, Bouhemadou A. Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2007, 91(18): 1647-1651.
- [14] Chegaar M, Azzouzi G, Mialhe P. Simple parameter extraction method for illuminated solar cells [J]. Solid-State Electronics, 2006, 50(7): 1234-1237.
- [15] Erees Queen B, Macabebe C J S E. Parameter extraction from I-V characteristics of PV devices [J]. Solar Energy,

- 2011, 85(1): 12-18.
- [18] Lee M K, Wang J C, Horng S F, et al. Extraction of solar cell series resistance without presumed current - voltage functional form [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2010, 94(3): 578-582.
- [17] Xiong Shaozhen, Zhu Meifang. *The Principle and Application of Solar Cells*[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [16] Jiang Tian, Cheng Xiang'ai, Xu Zhongjie, et al. Generation mechanism of two different over-saturation phenomena of photovoltaic HgCdTe detectors irradiated by CW band-in laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 097303.
- [19] Ye Meiyong, Wang Xiaodong, Xu Yousheng. Parameter extraction of solar cells using particle swarm optimization[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(9): 094502.
- [20] Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jingsheng. *Semiconductor Physics* [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [21] Li Zewen. Research on the damage mechanisms of silicon and silicon-based photodetectors irradiated by millisecond laser [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [22] Sun Tao. Surface leakage current mechanism and passivation of  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  photovoltaic detectors [J]. *Infrared*, 2004, 17(2): 17-24. (in Chinese)
- 孙涛.  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  光伏探测器的表面漏电流机制及其钝化[J]. *红外*, 2004, 17(2): 17-24.