

文章编号: 1672-8785(2024)03-0001-06

分子束外延碲镉汞探测器的 变结面积 I - V 测试研究

赵成城 王 丹 何 斌 戴永喜

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 碲镉汞红外探测器的表面钝化处理对器件暗电流有较大影响, 决定了器件的探测性能。为了研究表面钝化层不同生长方式对暗电流的抑制效果, 使用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 系统在 Si 基衬底上生长碲镉汞材料, 分别通过磁控溅射和原位钝化方法生长 CdTe/ZnS 钝化膜层。采用半导体工艺在碲镉汞材料上制备了变面积光伏探测器。通过测试不同钝化膜层器件的暗电流, 分析零偏电阻和面积乘积 (R_0A) 与周长面积之比 (p/A) 的关系。结果表明, 磁控溅射生长钝化层的 Si 基碲镉汞器件存在较大的隧穿电流, 而原位钝化生长钝化层的 Si 基碲镉汞器件能更有效地抑制表面漏电流。拟合器件 R_0A 因子随 PN 结面积的变化, 得出原位生长钝化层的器件具有更好的钝化效果。变面积器件的制备和测试能够有效且直观地反映器件性能。

关键词: 碲镉汞; 原位钝化; 变结面积; 暗电流测试

中图分类号: TN36 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.03.001

Study on Variable Junction Area I - V Test of Molecular-Beam-Epitaxy Mercury Cadmium Telluride Detectors

ZHAO Cheng-cheng, WANG Dan, HE Bin, DAI Yong-xi

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: The surface passivation treatment of mercury cadmium telluride infrared detectors has a significant impact on the device's dark current, which determines the device's detection performance. In order to investigate the inhibitory effect of different growth methods of surface passivation layers on dark current, a molecular beam epitaxy system was used to grow mercury cadmium telluride material on a Si substrate. CdTe/ZnS passivation film layers were grown by magnetron sputtering and in-situ passivation methods, respectively. A variable area photovoltaic detector was prepared on HgCdTe material using semiconductor technology. By testing the dark current of devices with different passivation film layers, the relationship between zero bias resistance and area product (R_0A) and the ratio of perimeter area (p/A) was analyzed. The result shows that Si-based mercury cadmium telluride devices with magnetron sputtering growth passivation layers exhibit significant tunneling currents, while Si-based mercury cadmium telluride devices with in-situ passivation growth passivation layers can more effectively suppress surface leakage currents. By fitting the variation of the R_0A factor of the

收稿日期: 2023-11-02

作者简介: 赵成城(1992-), 男, 安徽芜湖人, 博士, 工程师, 主要从事红外探测器器件工艺和表面微结构加工方面的研究。E-mail: chchzhao.ucas@139.com

device with the PN junction area, it can be seen that devices with in-situ growth of passivation layers have better passivation effects. The preparation and testing of variable area devices can effectively and intuitively reflect device performance.

Key words: mercury cadmium telluride; in-situ passivation; variable junction area; dark current test

0 引言

碲镉汞(HgCdTe)光伏探测器是一种重要的红外探测器件,其探测波长可以覆盖整个红外波段^[1],被广泛应用于气象监测、太空探索、弹道导弹防御等空间红外系统中。近年来,使用MBE系统生长HgCdTe材料的技术获得迅速发展。在衬底材料上可以选择晶格失配较大的Si衬底或GaAs衬底^[2-3],也可以选择晶格失配很小的碲锌镉(CdZnTe)衬底^[4]。在材料外延方面可以生长大面积HgCdTe材料,也可以生长异质结结构,具有很大的灵活性。HgCdTe材料裸露在外的表面存在大量表面态,其形成原因包括悬挂键和表面Hg溢出等。这些表面态会使HgCdTe表面的电荷积累,造成表面耗尽甚至反型,从而形成像元之间的导通回路,导致器件性能严重下降^[5-6]。目前效果最好、使用最广泛的钝化方法是CdTe/ZnS复合钝化膜层。CdTe与HgCdTe材料的适应性最好,而ZnS则具有良好的绝缘特性与抗辐照特性。

用磁控溅射方法生长的钝化膜层具有覆盖性好、致密度高的优点,是一种常用的钝化方法。但是工艺过程中高能Ar离子轰击产生的沉积原子团能量较高,可能会造成HgCdTe表面的二次损伤。而在MBE系统中生长HgCdTe后直接外延CdTe层,对高真空环境内的HgCdTe材料起到保护作用,避免了常规磁控溅射钝化过程中高能原子团的损伤和暴露在空气中造成的HgCdTe材料氧化^[7]。

本文使用MBE系统在Si衬底上外延生长HgCdTe薄膜,接着分别采用磁控溅射方法和原位钝化方法生长表面钝化层,并利用半导体工艺技术制备具有不同结面积的光电二极管器件。测量这些光电二极管的 $I-V$ 曲线,并通过

分析零偏阻抗与面积的乘积(R_0A)随着二极管周长与面积之比(p/A)的变化规律,研究不同钝化方法对MBE Si基HgCdTe探测器的钝化效果。

1 实验步骤

实验所用的材料是在Si基衬底上使用MBE系统生长的HgCdTe薄膜,材料组分 x 为0.4。将生长完成的材料分别采用磁控溅射生长CdTe/ZnS、180℃原位钝化生长CdTe和磁控溅射ZnS薄膜以及160℃原位钝化生长CdTe和磁控溅射ZnS薄膜,经退火后材料导电类型为p型。在下文中将这3份样品称为样品1、样品2和样品3。

采用光刻、离子注入等半导体工艺在p型HgCdTe材料上进行 B^+ 离子注入形成n型区,再经过电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)刻蚀、金属沉积以及电极刻蚀等步骤,在采用不同钝化方法的HgCdTe芯片上制备具有不同边长的正方形注入区的光电二极管器件。将完成工艺制备的芯片用石蜡粘好后,在划片机上划成独立的测试芯片。使用液氮对芯片进行降温,并且让芯片保持在77 K温度下,然后进行 $I-V$ 测试。

2 暗电流成分分析

光电二极管的暗电流是PN结在没有光照下的反向电流,可以简单地分为表面漏电流和体漏电流。HgCdTe材料表面由于晶格周期性被破坏,形成悬挂键,产生的表面电荷会导致表面附近能带弯曲,使材料表面由隧穿造成的泄漏电流增大,严重影响HgCdTe光电二极管的性能。二极管器件变结面积测试方法是表征器件表面漏电的有效方法。通过拟合动态电阻与结面积之积和二极管周长与面积之比的关系

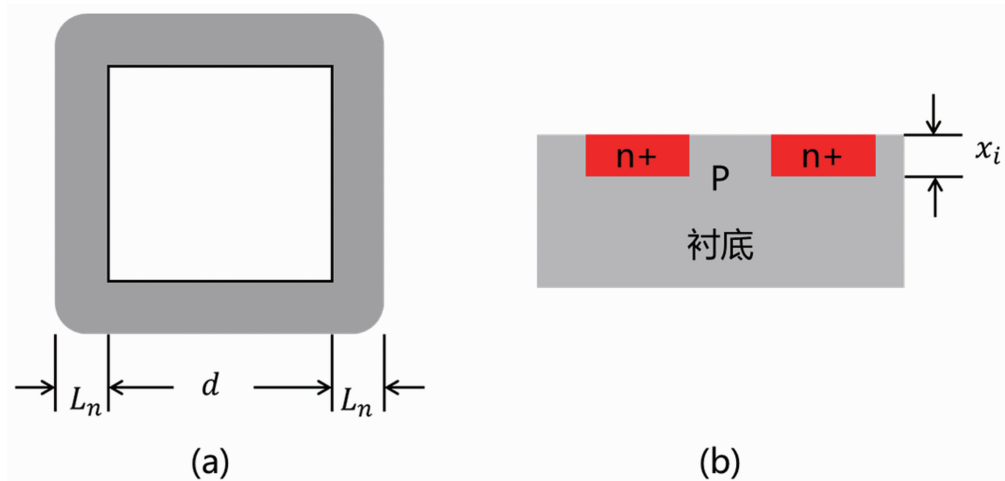


图 1 (a) PN 结注入和扩散面积示意图; (b) 平面结横截面示意图

可以拟合出表面动态电阻、体动态电阻和扩散长度^[8-10]。

对于平面结, 理想二极管的暗电流可以表示为

$$I_{planar} = (A + 4x_id) \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} (e^{qV/kT} - 1) \quad (1)$$

式中, D_n 是少数扩散系数; n_{p0} 是少数浓度; L_n 是少数扩散长度; V 是 PN 结两端电压; A 是 PN 结注入的面积, $A = d^2$; d 是 PN 结注入区的长度; x_i 是 PN 结的结深。

作为一般情况下的近似处理, $e^{qV/kT} - 1 \approx qV/kT$, 那么平面结理想二极管体电阻的零偏阻抗 R_{D0} 可以表示为

$$\frac{1}{R_{D0}} = (A + 4x_id) \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \cdot \frac{q}{kT} \quad (2)$$

为了方便, 令 $A_i = A + 4x_id$, 且 $\mu_n = qD_n/kT$, 那么式(2)可简化为

$$\frac{1}{R_{D0} A_i} = \frac{q\mu_n n_{p0}}{L_n} \quad (3)$$

注入区扩散区域的面积可以近似表示为

$$A_s \approx (d + 2L_n)^2 - d^2 \quad (4)$$

理想二极管的电阻 R_0 是体电阻和表面电阻的并联, 即

$$\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_{D0}} + \frac{1}{R_s} \quad (5)$$

根据上述公式可以求得, 平面结二极管零偏阻抗与面积的乘积($R_0 A$)和其周长与面积之比(p/A)的关系为

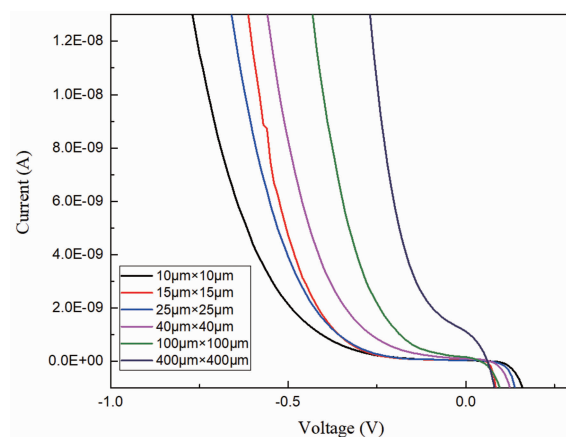
$$\frac{1}{R_0 A} = \frac{L_n^2}{4} \frac{1}{R_s A_s} \left(\frac{p}{A} \right)^2 + \left(\frac{L_n}{R_s A_s} + \frac{x_i}{R_{D0} A_i} \right) \left(\frac{p}{A} \right) + \frac{1}{R_{D0} A_i} \quad (6)$$

因此, 通过拟合实验数据就能计算出 PN 结的体电阻 R_{D0} 和表面电阻 R_s 。

3 结果与讨论

3.1 不同钝化膜结构对器件 $I-V$ 曲线的影响

PN 结是光电二极管的基本结构, 二极管的暗电流直接反映器件性能的好坏。图 2、图 3 和图 4 分别给出了不同样品变面积器件的 $I-V$ 特性曲线。可以明显看出, 磁控溅射生长钝化层的器件在反向偏压较大时暗电流表现出增加的趋势, 而原位钝化生长钝化层的器件在反向偏压增大后暗电流几乎不变。

图 2 采用磁控溅射法生长 CdTe/ZnS 的样品 1 的 $I-V$ 曲线

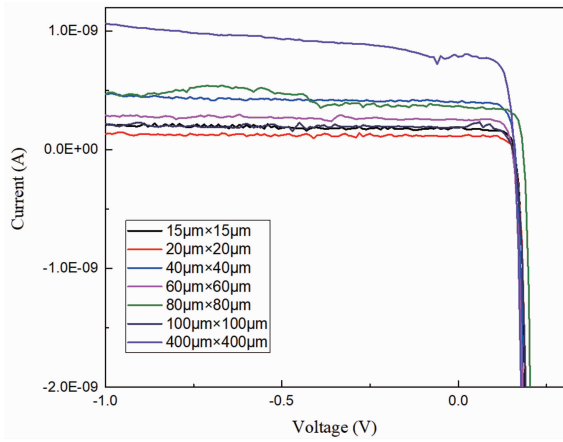


图 3 采用 180℃ 原位钝化生长 CdTe 和磁控溅射 ZnS 薄膜的样品 2 的 I - V 曲线

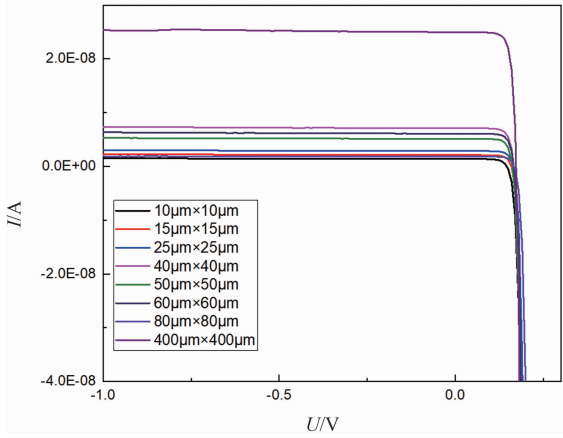


图 4 采用 160℃ 原位钝化生长 CdTe 和磁控溅射 ZnS 薄膜的样品 3 的 I - V 曲线

光电二极管的暗电流机制主要包括扩散电流、产生-复合电流、带间隧穿电流和陷阱辅助隧穿电流等^[11]。扩散电流的表达式为

$$J_{diff} = n_i^2 \left[\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{q}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{q}{N_A} \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

式中, n_i 是本征载流子浓度, N_D 和 N_A 分别是施主和受主浓度, D_p 和 D_n 是利用爱因斯坦关系得到的扩散系数。

反偏情况下, 产生电流的表达式为

$$J_{ge} = \int_0^{W_D} q|U|dx \approx q|U|W_D \approx \frac{qn_i W_D}{\tau_g} \quad (8)$$

式中, τ_g 是载流子寿命。

一般情况下假设势垒为三角形势垒, 得到带间隧穿电流的表达式:

$$J_T = \frac{q^2 E V_b}{4\pi^2 \hbar^2} \left(\frac{2m^*}{E_g} \right)^{1/2} \exp \left[-\frac{4(2m^*)^{1/2} E_g^{3/2}}{3q\hbar E} \right] \quad (9)$$

式中, V_b 为反向偏压, E 是 PN 结内部电场平均值, m^* 是载流子有效质量, E_g 是带隙能量。

价带电子经过陷阱隧穿到导带包括 3 个过程: 一是价带电子热激发到禁带中的陷阱能级 E_t ; 二是价带电子隧穿到陷阱能级; 三是陷阱能级上的电子跃迁到导带。一般情况下导带状态密度 N_c 较小, 可以认为陷阱能级上的电子总是能够跃迁到导带, 所以陷阱辅助隧穿电流为

$$J_T = qN_t \omega \frac{\pi^2 q m^* E M^2}{h^3 (E_g - E_t)} \times \exp \left[-\frac{(m^*/2)^{1/2} E_g^{3/2} F(E_t/E_g)}{2q\hbar E} \right] \quad (10)$$

式中, E_t 是陷阱能级的能量, N_t 是陷阱能级密度。

二极管器件在反偏条件下的电流特性能够反映反偏电流的特性。从以上推导中可以看出, 反偏下扩散电流和产生电流随着电压的增大而基本保持不变, 但带间隧穿电流和陷阱隧穿电流随着电压的增加而呈指数增长。测试实验结果表明, 样品 1 在反偏下隧穿电流占据暗电流的主要成分, 而在样品 2 和样品 3 中反偏下暗电流的主要成分是扩散电流和产生电流。这 3 个样品的制备过程除了钝化膜层生长方法不同, 其余工艺均同时进行。因此, 3 种器件差异最大的地方是钝化膜生长方法不同导致的钝化膜/HgCdTe 界面特性的区别。这表现为隧穿电流的差异, 体现在表面漏电上。从测试结果可以看出, 采用原位钝化的 MBE 生长的 Si 基 HgCdTe 材料比磁控溅射钝化的 Si 基 HgCdTe 材料具有更好的钝化质量。

3.2 不同钝化方法对器件 $R_0 A$ 因子的影响

光电二极管的零偏阻抗与面积之积 ($R_0 A$) 能够衡量器件性能的好坏。器件体内产生的暗电流的零偏阻抗与面积的乘积应该与结面积无关。但是当 HgCdTe 光伏探测器的钝化膜与 HgCdTe 材料的界面状态影响到 PN 结特性时,

表 1 样品的 R_0A 因子随器件 PN 结面积的变化

样品 1		样品 2		样品 3	
结面积/ μm^2	$R_0A/\Omega\cdot\text{cm}^2$	结面积/ μm^2	$R_0A/\Omega\cdot\text{cm}^2$	结面积/ μm^2	$R_0A/\Omega\cdot\text{cm}^2$
10×10	2.893×10^4	15×15	5.477×10^5	10×10	1.065×10^5
15×15	4.170×10^4	20×20	8.286×10^5	20×20	2.360×10^5
25×25	4.563×10^4	25×25	1.198×10^6	25×25	2.936×10^5
40×40	5.174×10^4	40×40	1.747×10^6	40×40	4.805×10^5
100×100	5.203×10^4	60×60	2.917×10^6	50×50	7.425×10^5
400×400	5.170×10^4	80×80	2.388×10^6	60×60	6.093×10^5
—	—	100×100	2.859×10^6	80×80	1.135×10^6
—	—	400×400	3.633×10^6	400×400	2.496×10^6

不同结面积器件的 R_0A 就会产生差异。形成这种差异的原因是不同钝化膜层与 HgCdTe 材料的界面状态会导致表面漏电流表现不同。对于不同钝化方法形成的器件, 由于 HgCdTe 材料的损伤程度不一以及钝化膜层与 HgCdTe 材料的结合程度差异, 钝化膜层中固定电荷的密度存在区别, 从而造成 HgCdTe 表面能带的弯曲程度发生变化。

表 1 展示了 3 种钝化方法处理的样品 1、2 和 3 的 R_0A 因子随器件 PN 结面积的变化情况。可以看出, 随着结面积的增加, 器件的 R_0A 因子不断增大, 说明 3 种钝化方法处理器件的暗电流都存在表面漏电成分。对于每一个样品, 分别分析不同结面积器件的 R_0A 与 p/A 的关系, 表征出体漏电与表面漏电对 PN 结暗电流的贡献, 如图 5、图 6 和图 7 所示。

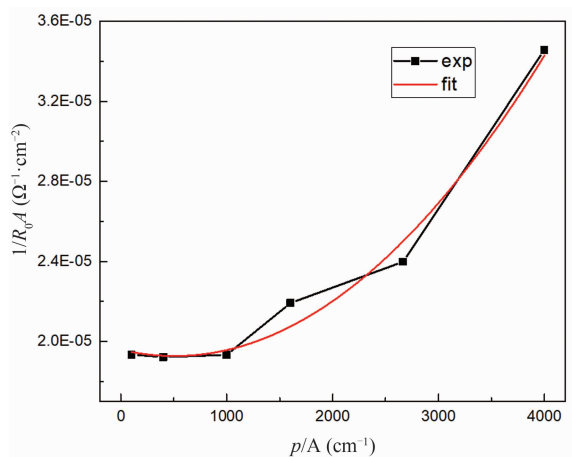


图 5 采用磁控溅射生长 CdTe/ZnS 的样品 1 的 $(R_0A)^{-1}$ 与 p/A 的拟合曲线

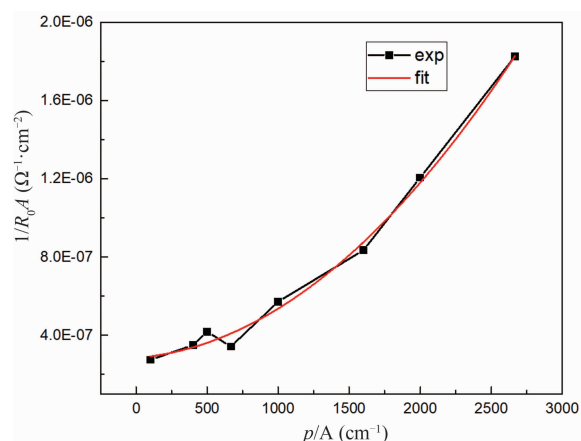


图 6 采用 180℃ 原位钝化生长 CdTe 和磁控溅射 ZnS 薄膜的样品 2 的 $(R_0A)^{-1}$ 与 p/A 的拟合曲线

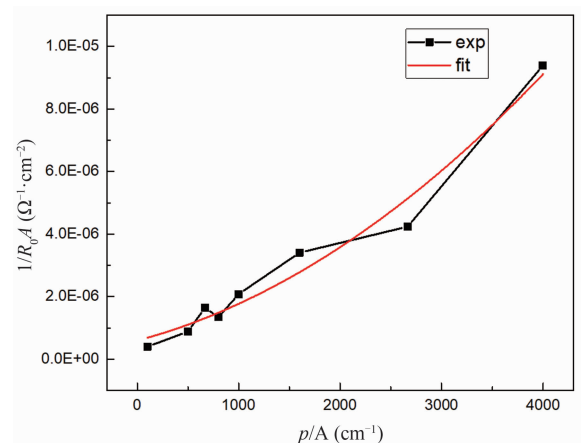


图 7 采用 160℃ 原位钝化生长 CdTe 和磁控溅射 ZnS 薄膜的样品 3 的 $(R_0A)^{-1}$ 与 p/A 的拟合曲线

计算出样品 1、2、3 的体电阻所对应的 $R_{D0}A$ 和表面电阻所对应的 R_sA_s (见表 2)。能够看出, 采用原位钝化的样品 2 和样品 3 的钝化质量优于采用磁控溅射钝化的样品 1。而同

样是采用原位钝化方法, 180℃生长钝化层的样品 2 的性能优于 160℃生长钝化层的样品 1。

表 2 样品体电阻所对应的 $R_{D0}A$ 与表面电阻所对应的 R_sA_s

样品	$R_{D0}A(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$R_sA_s(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
1	4.323×10^4	28.01
2	3.548×10^6	187.11
3	1.522×10^6	130.38

4 结束语

分别采用磁控溅射和原位钝化方法制备了通过 MBE 系统在 Si 基上生长的 HgCdTe 材料的钝化层, 并制作了变结面积光电二极管。通过测量和对比变结面积器件的 $I-V$ 曲线, 拟合了器件 R_0A 因子与 p/A 的关系, 得出了器件体电阻所对应的 $R_{D0}A$ 与表面电阻所对应的 R_sA_s 。对比计算结果发现, 磁控溅射生长钝化层的 Si 基 HgCdTe 器件存在较大的隧穿电流, 而原位钝化生长钝化层的 Si 基 HgCdTe 器件能够有效抑制材料表面的隧穿电流。下一步将针对实验数据存在波动的问题, 优化实验过程, 降低数据离散性, 使测试结果更加准确。

参考文献

- [1] Rogalski A. *Infrared Detectors (2nd Edition)* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [2] 高达, 李震, 王丛, 等. 基于分子束外延的 4 in 硅基碲镉汞材料工艺研究 [J]. *红外*, 2021, **42** (3): 6–10.
- [3] 张伟婷, 陈星, 叶振华, 等. 碲镉汞大面阵红外探测器模块结构应力的有限元分析 [J]. *红外与毫米波学报*, 2021, **40**(3): 308–313.

- [4] Wijewarnasuriya P, Yoo S, Faurie J, et al. P-Type Doping with Arsenic in (211)B HgCdTe Grown by MBE [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1996, **175–176**(8): 1300–1305.
- [5] Kumar V, Pal R, Chaudhury P K, et al. A CdTe Passivation Process for Long Wavelength Infrared HgCdTe Photo-Detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **34**(9): 1225–1229.
- [6] 王忆锋, 刘黎明, 孙祥乐, 等. 碲镉汞材料表面钝化研究的发展(上) [J]. *红外*, 2012, **33**(3): 7–13.
- [7] 王溪. 12.5 μm 长波碲镉汞红外探测器制备与表征 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2018.
- [8] Vishnu Gopal. Variable-area Diode Data Analysis of Surface and Bulk Effects in HgCdTe Photodetector Arrays [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 1994, **9**: 2267–2271.
- [9] Vishnu Gopal. A General Relation Between Zero-bias Resistance-area Product and Perimeter-to-area Ratio of the Diodes in Variable-area Diode Test Structures [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 1996, **11**: 1070–1076.
- [10] Xie X, Hua H, Qiu G, et al. Study of the Characteristics of VLWIR HgCdTe Photovoltaic Detectors in Variable-area Diode Test Structures [C]. *SPIE*, 2011, **8193**: 819335.
- [11] Li Q, Ma W Q, Zhang Y H, et al. Dark Current Mechanism of Unpassivated Mid Wavelength Type II InAs/GaSb Superlattice Infrared Photodetector [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(28): 3696–3700.