

## 级联倍增 InAlAs/InAlGaAs 雪崩 光电二极管暗电流成分分析

张 承, 黄晓峰, 迟殿鑫, 唐 艳, 王 立, 柴松刚, 崔大健, 莫才平, 高新江  
(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

**摘 要:** 实验制备了级联倍增 InAlAs/InAlGaAs 雪崩光电二极管, 对二极管暗电流随台面直径和温度的变化进行了研究分析。结合暗电流函数模型, 利用 Matlab 软件对暗电流的各成分进行了数值计算, 并仿真研究了芯片结构的缺陷浓度  $N_t$  和表面复合速率  $S$  对暗电流的影响。结果表明, 二极管暗电流主要来自于体暗电流, 而非表面漏电流。在工作点偏压 90 V 处, 受缺陷影响的缺陷辅助隧穿电流  $I_{\text{tat}}$  在暗电流中占据了主导, 并推算出了芯片结构的缺陷浓度  $N_t$  约为  $10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、吸收区中的缺陷浓度  $N_{\text{InGaAs}}$  约为  $7 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 。由于芯片结构的缺陷主要来源于 InAlAs/InAlGaAs 倍增区和 InGaAs 吸收区, 而吸收区缺陷占比很少, 因此认为缺陷主要来自于异质结 InAlAs/InAlGaAs 倍增区。

**关键词:** InAlAs/InAlGaAs 雪崩光电二极管; 暗电流; 表面漏电流; 缺陷辅助隧穿电流; 缺陷浓度

中图分类号: TN312 文章编号: 1001-5868(2020)01-0020-05

### Analysis of Dark Current Components of InAlAs/InAlGaAs Cascade Multiplication Avalanche Photodiode

ZHANG Cheng, HUANG Xiaofeng, CHI Dianxin, TANG Yan, WANG Li,  
CHAI Songgang, CUI Dajian, MO Caiping, GAO Xinjiang  
(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

**Abstract:** InAlAs/InAlGaAs cascade multiplication avalanche photodiode was fabricated experimentally. The dark current of the diode was studied and analyzed with the change of the diameter and temperature of the mesa. The components of the dark current were calculated by MATLAB combined with the dark current function model. The effects of defect concentration  $N_t$  and surface recombination rate  $S$  of the chip structure on the dark current were simulated and studied. The results show that the dark current of the diode mainly comes from the body dark current, not from the surface leakage current. The defect-assisted tunneling current  $I_{\text{tat}}$  affected by defect concentration dominates the dark current at 90 V bias. The defect concentration in the chip structure  $N_t$  is  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  and the defect concentration in the absorption region  $N_{\text{InGaAs}}$  is  $7 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ . Because the defects mainly come from the InAlAs/InAlGaAs multiplication region and the absorption region, and the proportion of the defects in the absorption region is very small, so it believes that the defects mainly come from the heterojunction InAlAs/InAlGaAs multiplication region.

**Key words:** InAlAs/InAlGaAs APD; dark current; surface leakage current; trap-assisted tunneling current; defect concentration

收稿日期: 2019-10-15.

## 0 引言

级联倍增 InAlAs/InAlGaAs 雪崩光电二极管是基于传统 SAGCM 结构在 InP 衬底上外延 InGaAs 材料作为吸收区, InAlAs/InAlGaAs 异质结材料作为倍增区, 运用碰撞电离工程(I<sup>2</sup>E)而形成多级单载流子倍增(Single-Carrier-Multiplication), 用于实现低噪声和高增益的雪崩光电二极管<sup>[1-3]</sup>。暗电流是雪崩光电二极管的重要性能指标之一, 与材料结构生长和工艺制备<sup>[4-7]</sup>紧密相关。

随偏置电压变化, 雪崩光电二极管中各暗电流成分对暗电流贡献不同。在低偏压下暗电流的主要成分包括: 表面漏电流  $I_s$ 、产生-复合电流  $I_{gr}$  和扩散电流  $I_{diff}$ ; 在高偏压下则为: 缺陷辅助隧穿电流  $I_{tat}$  和带间直接隧穿电流  $I_{bbt}$ <sup>[8]</sup>。分析暗电流数据中的各个成分组成, 对于器件设计和工艺制备具有指导意义。

本文从台面直径、温度两个方面结合暗电流各成分模型, 运用 Matlab 数值分析方法, 对级联倍增 InAlAs/InAlGaAs 雪崩光电二极管的暗电流成分进行了研究分析。讨论了倍增区和吸收区的缺陷浓度  $N_t$  与表面复合速率  $S$  对级联倍增 InAlAs/InAlGaAs 雪崩光电二极管暗电流的影响。

## 1 实验制备

材料结构如图 1 所示, 在 n 型 InP 衬底上依次外延 InAlAs/InAlGaAs 异质结倍增层、电荷层、InGaAs 吸收层及 p 型 InAlAs 接触层。采用  $H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O$  (体积比为 1 : 1 : 5) 溶液湿法腐蚀成双台阶, 制备了台面尺寸  $t$  分别为 15  $\mu m$  (样品 A), 30  $\mu m$  (样品 B) 和 60  $\mu m$  (样品 C) 的三种样品; 然后涂覆苯丙环丁烯 (BCB), 经 260  $^{\circ}C$  固化 1 h, 在侧壁形成钝化保护, 并起到平坦化作用。接

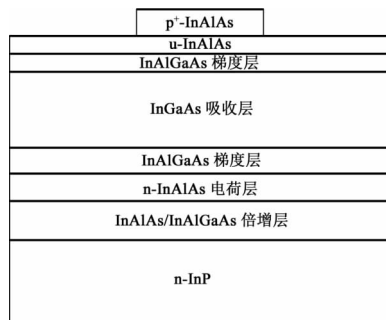


图 1 台面型 InGaAs-InAlAs/InAlGaAs 雪崩光电二极管结构示意图

着, 热蒸发 TiPtAu 定义 p 电极, 并在 350  $^{\circ}C$  下退火 60 s。减薄后, 在背面生长  $SiN_x$  增透膜并光刻出背面光敏区, 最后采用 AuGeNi 制备 n 电极。

## 2 模型

雪崩光电二极管的暗电流成分主要包括: 产生-复合电流  $I_{gr}$ 、扩散电流  $I_{diff}$ 、带间隧穿电流  $I_{bbt}$ 、缺陷辅助隧穿电流  $I_{tat}$  和表面漏电流  $I_s$ <sup>[9]</sup>。

产生-复合电流  $I_{gr}$  (Shockley-Read-Hall, SRH)<sup>[10]</sup> 是位于耗尽区的杂质或缺陷形成的产生复合中心而引起的电流, 可以用式(1)表示; 扩散电流  $I_{diff}$  是耗尽区两侧一个少子扩散长度内的电子-空穴对的随机热产生与复合过程而产生的电流, 如式(2)所示; 带间隧穿电流  $I_{bbt}$  是在反向偏压下, 能带弯曲使 pn 结耗尽区内的电子从价带直接进入导带, 形成隧道效应, 用式(3)表示; 缺陷辅助隧穿电流  $I_{tat}$  (Trap-Assisted Tunneling, TAT)<sup>[11-14]</sup> 是电子借助耗尽区内的缺陷或杂质中间态来实现能带隧穿而产生的电流, 复杂的 TAT 隧穿过程依赖于陷阱在能带中的位置、陷阱密度、陷阱被电子占据的比例以及陷阱势垒的高度和宽度, 因此, 缺陷辅助暗电流与电场强度密切相关, 用式(4)表示。经设计, 吸收区电场低于隧穿电场 15 V/cm, 吸收区的缺陷通过少子寿命  $\tau$  来影响产生-复合电流  $I_{gr}$  和扩散电流  $I_{diff}$ , 所以我们认为缺陷浓度  $N_t$  主要来自于倍增区。表面漏电流  $I_s$  主要由表面产生-复合电流  $I_{s1}$ 、表面隧穿电流  $I_{s2}$  和表面沟道电流  $I_{s3}$  组成, 其中  $I_{s2}$  和  $I_{s3}$  与温度无关, 被称为表面欧姆漏电流  $I_{oh}$ , 与电压成线性关系<sup>[15]</sup>。  $I_s$  与温度和电压的关系如式(5)所示。

$$I_{gr} = \frac{qn_i A w}{\tau_{eff}} [\exp(qV/2kT) - 1] \quad (1)$$

$$I_{diff} = \left( \frac{A q n_i^2 D_p^2}{N_d \tau_p^2} \right) [\exp(qV/kT) - 1] \quad (2)$$

$$I_{bbt} = A \frac{\left( \frac{2m^*}{E_g} \right)^{1/2} q^3 E_m V}{4\pi^2 \hbar^2} \exp\left( \frac{-\theta m_0^{1/2} \epsilon_g^{3/2}}{q \hbar E_m} \right) \quad (3)$$

$$I_{tat} = \frac{A q^2 \pi^2 N_t W m^* F^2 E}{h^3 (E_g - E_t)} \cdot \exp\left( -\frac{8\pi(2m^*)^{1/2} (E_g - E_t)^{1/2}}{3q \hbar E} \right) \quad (4)$$

$$I_s = \frac{n_i q A S}{2} V^{1/2} \exp(-E_g/4kT) \quad (5)$$

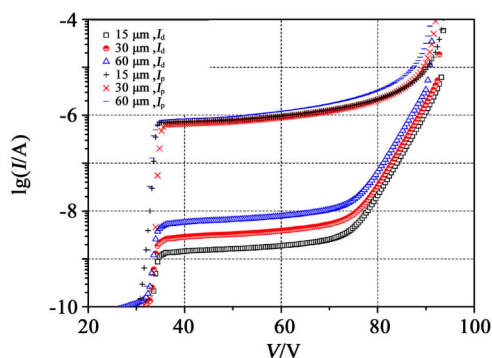
式中,  $q$  是电子电荷,  $n_i$  为本征载流子浓度,  $A$  为有

源区面积,  $W$  为耗尽区宽度,  $\tau_{\text{eff}}$  为有效载流子寿命,  $V$  为偏置电压,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度,  $m^*$  为有效质量,  $m_0$  为静止质量,  $E_m$  为最大电场强度,  $h$  为普朗克常量,  $\hbar = h/2\pi$  为理化普朗克常量,  $E_g$  为带隙,  $\tau_p$  为空穴寿命,  $D_p$  为空穴扩散系数,  $N_d$  为施主杂质浓度,  $N_t$  为耗尽区陷阱浓度,  $E_t$  为陷阱能级,  $\theta$  为有效质量与静止质量比值, 取值  $8.49 \times 10^{-8}$  eV·cm,  $F$  是关于  $a$  的函数,  $F(a) = \pi/2 + \sin^{-1}(1 - 2a) + 2(1 - 2a) \times (a \times (1 - a))^{0.5}$ ,  $a = E_t \times E_g$ ,  $S$  为表面复合速率。

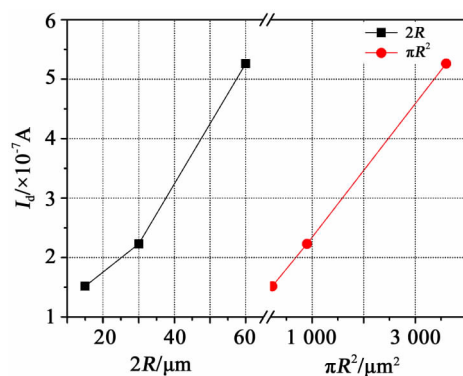
### 3 讨论与分析

图 2 为样品 A~C 在 300 K 下的光电流  $I_p$  和暗电流  $I_d$  随电压变化曲线图, 可以看出, 暗电流随台面直径增加而变大。图 2(b) 中, 在 85 V 偏压下暗电流并不随台面直径 ( $2R$ ) 线性变化, 而是正比于台面面积 ( $\pi R^2$ ), 表明暗电流主要与来自中心区域产生的体暗电流相关。因样品 A 的暗电流最低, 后续将选择样品 A 作为对象进行讨论。

研究了暗电流与温度的关系, 提取了二极管样品 A 在增益  $M=1.0$  下的激活能参数  $E_a$ , 如图 3 所示, 当温度从 293 K 降低至 223 K 时,  $E_a = 0.424$  eV, 约合  $0.57E_g$ , 表明此时暗电流成分主要为产生-复合电流  $I_{gr}$  与扩散电流  $I_{diff}$ 。当温度在 223 ~ 203 K 时,  $E_a = 0.146$  eV, 约  $0.196E_g$ , 暗电流的主要成分是表面漏电流  $I_s$ 。图 4 为样品 A 在 203, 223, 253 和 293 K 温度下的暗电流曲线。从图中可以看出, 随温度从 293 K 降低至 203 K, 暗电流  $I_d$  明显下降, 在低于  $V_p$  拉通点 (34.5 V) 电压范围内暗电流并没有改变, 说明产生复合电流  $I_{gr}$  和扩散电流  $I_{diff}$  已经减少至表面漏电流  $I_s$  之下, 这时的表面漏电流  $I_s$  约 5 pA。



(a) 样品 A~C 在 300 K 下的  $I$ - $V$  曲线



(b) 样品 A~C 直径  $2R$ 、面积  $\pi R^2$  与暗电流  $I_d$  的关系

图 2 芯片样品 A~C 在 300 K 下的特性曲线

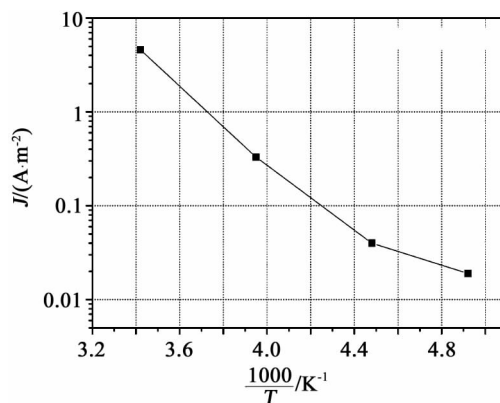


图 3 样品 A (增益  $M=1$ ) 的  $J$ - $T$  关系曲线

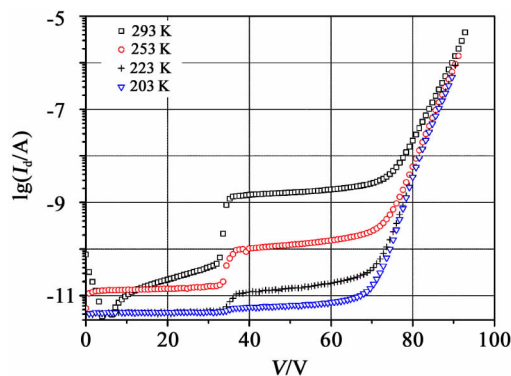


图 4 不同温度下样品 A 的  $I_d$ - $V$  曲线

图 5(a) 给出了样品 A 在 300 K 时暗电流各组成成分曲线, 与实测暗电流基本吻合。表面漏电流  $I_s$  在 0~100 V 范围内均小于 1 nA, 此时表面复合速率为  $5 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 与文献[16]报道的数据在同一数量级, 表明了台面工艺具有良好的表面界面态, 湿法刻蚀与台面钝化并未引入高浓度复合中心与高界面态。当表面复合速率  $S$  增加两个数量级, 如图 5(b) 所示, 表面漏电流  $I_s$  大于产生-复合电流  $I_{gr}$ , 在小于 80 V 时占据了主导, 而在高偏压 90 V 附近缺陷辅助隧穿电流  $I_{\text{tst}}$  对暗电流影响较大。

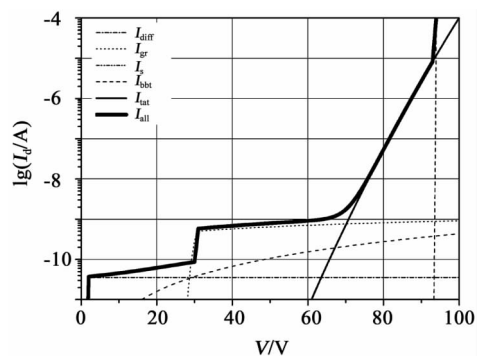
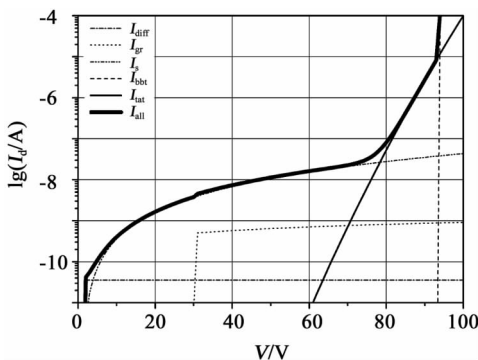
(a) 表面复合速率  $S=5 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) 表面复合速率  $S=5 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 

图5 300 K 时不同表面复合速率下仿真的暗电流曲线

图6所示为样品A的缺陷浓度  $N_t$  与缺陷辅助隧穿暗电流  $I_{\text{tat}}$  的关系曲线。图6(a)与样品A的暗电流曲线基本吻合,工作点在90 V 高偏压下缺陷辅助隧穿电流  $I_{\text{tat}}$  是暗电流的主要成分。TAT 隧穿过程依赖于缺陷在能带中的位置、缺陷密度、缺陷被电子占据比例以及陷阱势垒的高度和宽度,电子借助高浓度缺陷实现能带隧穿,因此辅助隧穿电流与缺陷浓度密切相关。经过计算,此时芯片结构的缺陷浓度  $N_t$  为  $10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。

InGaAs 吸收区材料的缺陷浓度与少子寿命的关系如式(6)<sup>[17-18]</sup>,其中  $C$  是常数,并且可以推算出  $C$  值为  $3.5 \times 10^4 \text{ s/cm}^3$ 。根据暗电流曲线提取样品A的 InGaAs 少子寿命  $\tau_{\text{InGaAs}}$  约为  $5 \mu\text{s}$ ,得到 InGaAs 的缺陷浓度  $N_{\text{InGaAs}}$  约为  $7 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 。由于芯片结构的缺陷浓度来源于倍增区和吸收区,而吸收区缺陷浓度比总缺陷浓度  $N_t$  低3个数量级,因此我们认为相关的缺陷主要来自 InAlAs/InAlGaAs 的倍增区<sup>[19-20]</sup>。

$$N_{\text{InGaAs}} = C / \tau_{\text{InGaAs}} \quad (6)$$

由图6仿真结果可知,为降低高偏压下的辅助隧穿电流,倍增区的缺陷浓度  $N_t$  至少需要降低1~2个数量级,InAlAs/InAlGaAs 级联倍增区  $\text{I}^2\text{E}$  雪

崩光电二极管才能获得较低的暗电流,实现线性模式下的低噪声高灵敏度探测。对于材料生长来说控制缺陷浓度是一项关键技术。

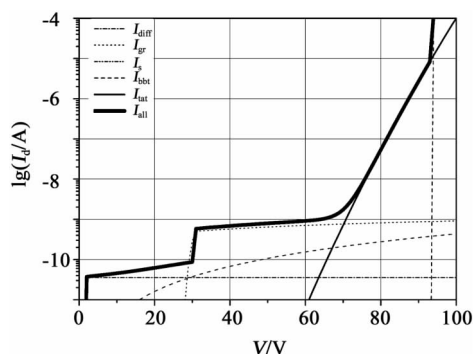
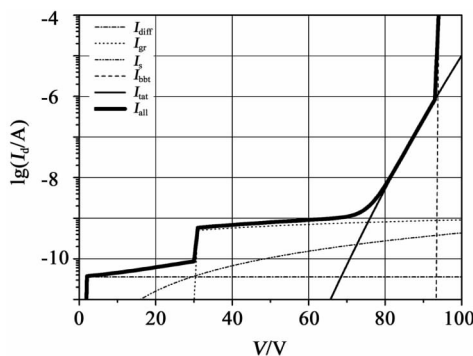
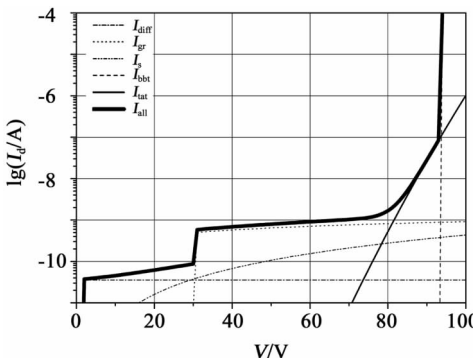
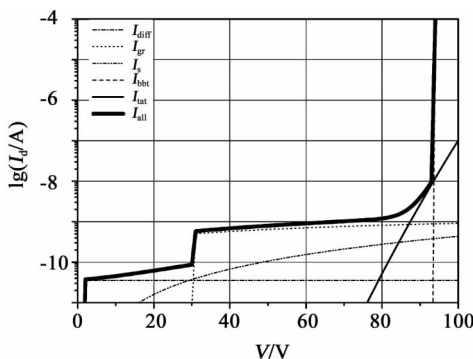
(a) 缺陷浓度  $N_t=10^{19} \text{ m}^{-3}$ (b) 缺陷浓度  $N_t=10^{18} \text{ m}^{-3}$ (c) 缺陷浓度  $N_t=10^{17} \text{ m}^{-3}$ (d) 缺陷浓度  $N_t=10^{16} \text{ m}^{-3}$ 

图6 300 K 时不同缺陷浓度下仿真的暗电流曲线

## 4 结论

实验制备了级联倍增 InAlAs/InAlGaAs 雪崩光电二极管,从台面直径与温度两方面对芯片暗电流成分进行分析,并结合暗电流函数模型与 Matlab 软件对暗电流各成分进行数值仿真,仿真结果与实测暗电流  $I-V$  曲线基本吻合。暗电流主要来自于体暗电流,而非表面漏电流。研究了缺陷浓度对暗电流的影响,结果表明,90 V 偏压下缺陷辅助隧穿电流是暗电流的主要成分。由于芯片结构的缺陷主要来自于倍增区和吸收区,而吸收区缺陷浓度比总缺陷浓度  $N_t$  小 3 个数量级,因此我们认为缺陷来源于 InAlAs/InAlGaAs 的倍增区。倍增区的缺陷浓度至少需要降低 1~2 个数量级,InAlAs/InAlGaAs 级联倍增雪崩光电二极管才能获得较低的暗电流,实现线性模式下的低噪声高灵敏度探测。

## 参考文献:

- [1] Williams G M, Compton M, Ramirez D A, et al. Multi-gain-stage InGaAs avalanche photodiode with enhanced gain and reduced excess noise[J]. IEEE J. of the Electron Devices Society, 2013, 1(2): 54-65.
- [2] Amir H, Mahdi Z. Analysis of single photon detection in avalanche photodetectors with multi-gain-stage multiplication region[J]. Appl. Opt., 2017, 56(6): 1631.
- [3] Williams G M, Ramirez D A, Hayat M M, et al. Time resolved gain and excess noise properties of InGaAs/InAlAs avalanche photodiodes with cascaded discrete gain layer multiplication regions[J]. J. of Appl. Phys., 2013, 113(9): 093705.
- [4] Weisbuch C, Dingle R, Gossard A C, et al. Optical characterization of interface disorder in GaAs-Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As multi-quantum well structures[J]. Solid State Commun., 1981, 38(8): 709-712.
- [5] Kohl M, Heitmann D, Tarucha S, et al. Optical investigation of the exciton transfer between growth islands of different well widths in GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As quantum wells[J]. Phys. Rev., 1989, 39(39): 7736-7743.
- [6] Gottwaldt L, Pierz K, Ahlers F J, et al. Correlation of the physical properties and the interface morphology of AlGaAs/GaAs heterostructures[J]. J. of Appl. Phys., 2003, 94(4): 2464.
- [7] Rouvie A, Reverchon J L, Huet O, et al. InGaAs focal plane arrays developments at III-V lab[J]. Proc. SPIE, 2012, 8353: 1-12.
- [8] 曾巧玉. InGaAs/InP 单光子雪崩光电二极管的制备及研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.  
Zeng Qiaoyu. Preparation and study of InGaAs/InP single-photon avalanche photoelectric secondary tube[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese academy of Sciences, 2014.
- [9] Zhao Y, Zhang D, Qin L, et al. InGaAs-InP avalanche photodiodes with dark current limited by generation-recombination[J]. Opt. Express, 2011, 19(9): 8546.
- [10] Schenk A. A model for the field and temperature dependence of SRH lifetimes in silicon[J]. Solid-State Electronics, 1992, 35: 1585-1596.
- [11] Hurkx G A M, Klaasen D B M, Knuvers M P G, et al. A new recombination model describing heavy-doping effects and low temperature behaviour [C]// IEEE Inter. Electron Devices Meeting, 1990: 307-310.
- [12] Nguyen T, Musca C A, Del J M, et al. Dark current in long wavelength infrared HgCdTe gated photodiodes [J]. J. Electron. Mater., 2004, 33(6): 621-629.
- [13] Ajisawa A, ODA N. Improvement in HgCdTe diode characteristics by low temperature post-implantation annealing[J]. J. of Electron. Mater., 1995, 24(9): 1105-1111.
- [14] Donnelly J P, Duerr E K, McIntosh K A, et al. Design considerations for 1.06  $\mu\text{m}$  InGaAsP-InP Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2006, 42(8): 797-809.
- [15] Willardson R K, Beer A C. Metal Insulator Semiconductor Detectors in Semiconductors and Semimetals [M]. New York: Academic Press, 1981.
- [16] Bothra S, Tyagi S D, Ghandhi S K, et al. Surface recombination velocity and lifetime in InP measured by transient microwave reflectance [J]. Solid-State Electron., 1990, 34(1): 47-50.
- [17] Sheng J J, Leohardt D, Han S M. Empirical correlation for minority carrier lifetime to defect density profile germanium on silicon grown by nanoscale interfacial engineering[J]. J. of Vacuum Science & Technology, 2013, 31(5): 1-8.
- [18] Ji Xiaoli, Liu Baiqing, Tang Hengjing. 2.6  $\mu\text{m}$  MBE grown InGaAs detectors with dark current of SRH and TAT[J]. AIP Advances, 2014, 4(8): 087135.
- [19] Taguchi K, Torikai T, Sugimoto Y, et al. Planar-structure InP/InGaAsP/InGaAs avalanche photodiodes with preferential lateral extended guard ring for 1.0~1.6  $\mu\text{m}$  wavelength optical communication use[J]. J. of Lightwave Technol., 1988, 6(11): 1643-1655.
- [20] Williams G M, Ramirez D A, Hayat M M, et al. Instantaneous receiver operating characteristic (ROC) performance of multi-gain-stage APD photoreceivers[J]. IEEE J. of The Electron Devices Society, 2013, 1(6): 145-153.

## 作者简介:

张 承(1987—),男,硕士,工程师,主要从事近红外光电探测器方面的研究。

E-mail: 1030879833@qq.com