

doi: 10.3788/gzxb20164501.0104001

外加条件对量子点红外探测器暗电流特性的影响

白宏刚¹, 金英姬²

(1 武警工程大学 理学院, 西安 710086)

(2 西藏民族大学 教育学院, 陕西 咸阳 712082)

摘 要: 考虑微米尺度和纳米尺度下电子传输对激发能的共同影响, 基于电子漂移速度对外加电场的依赖, 研究外加电场和外加温度对量子点红外探测器暗电流特性的影响. 结果表明: 外加电场在 0~25 kV/cm 范围内时, 暗电流模型和实验数据变化相吻合. 暗电流随着外加电场的增加而增加, 并且当外加电场小于 6 kV/cm 时暗电流增加迅速, 而当外加电场大于 6 kV/cm 时暗电流增加缓慢. 暗电流随着外加温度的增加迅速增加. 该研究为量子点红外探测器的优化设计和性能提高提供了理论参考.

关键词: 外加条件; 量子点红外探测器; 暗电流; 电子传输; 影响分析

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)01-0104001-5

Influence of the Preset Condition on the Quantum Dot Infrared Photodetectors Dark Current Characteristics

BAI Hong-gang¹, JIN Ying-ji²

(1 School of Science, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China)

(2 School of Education, Xizang Minzu University, Xianyang, Shaanxi 712082, China)

Abstract: The influence of the applied electric field and temperature on the dark current of quantum dot infrared photodetectors (QDIPs) was simulated and analyzed, which is based on the dark current model including the common influence of the microscale and the nanoscale electron transport as well as the dependence of the drift velocity of electrons on the applied electric field. The results show that the dark current model has an excellent agreement with the experimental data at 0~25 kV/cm applied electric field. The increasing of the dark current goes with the rise of the applied electric field, and the dark current increases rapidly below about 6 kV/cm, but it increases slowly above about 6 kV/cm. The rapid increase of the dark current goes with the increase of the temperature. The research can provide the theoretical reference in the optimization of the device design and the improvement of the performance of the quantum dot infrared photodetectors.

Key words: Preset condition; Quantum dot infrared photodetectors; Dark current; Electrons transport; Influence analysis

OCIS Codes: 040.3060; 040.5570; 270.5570

0 引言

量子点红外探测器 (Quantum Dot Infrared Photodetector, QDIP) 可以克服量子阱红外探测器红外响应区较窄, 不能直接探测垂直入射红外辐射的缺点, 此外, 它还具有低暗电流、高光电导增益、高响应率、高

灵敏度和高探测率等优点, 目前已受到人们的广泛关注, 成为国内外红外探测技术领域的研究热点^[1-5]. 近年来, 基于激发能的暗电流模型得到迅速发展, 2003 年加拿大国家研究委员会的刘惠春教授采用基于量子点红外探测器中微米尺度电子传输对激发能的贡献, 估算了量子点红外探测器的暗电流, 并给出了相应的

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61307121)、武警工程大学基础研究基金 (No. WJY201405)、武警工程大学军事理论研究课题 (Nos. JLX201518、JLX201519) 和西藏民族大学青年学人培育计划项目 (No. 14myQP01) 资助

第一作者: 白宏刚 (1980-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为量子点红外探测器及量子器件. Email: bhg3399@sina.com

通讯作者: 金英姬 (1981-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为量子器件及数值计算. Email: 463239462@qq.com

收稿日期: 2015-09-08; **录用日期:** 2015-10-29

<http://www.photon.ac.cn>

暗电流模型^[6]. 而 Z. Ye, J. Y. Duboz 和 Z. Y. Zhao 等人在研究量子点红外探测器暗电流激发能时, 仅考虑了纳米尺度电子传输对激发能的贡献^[7-9]. 事实上, 微米尺度电子传输和纳米尺度电子传输同时存在于量子点红外探测器的整个电子传输过程中^[10]. 本文考虑微米尺度和纳米尺度电子传输的共同贡献, 及外加电场对电子漂移速度的影响, 建立暗电流模型. 通过与暗电流实测实验数据比较, 发现所建立的暗电流模型更加符合探测器的实际运行机制, 重点讨论了外加电场和温度对暗电流特性的影响, 同时详细分析了影响的原因. 本文的研究可为量子点红外探测器器件优化及性能的提高提供可靠的理论依据.

1 暗电流模型

暗电流是指在没有入射光存在的情况下仍然有流过探测器本身的电流, 它是评价量子点红外探测器性能好坏的一个重要参量, 对探测器总体性能有着直接的影响. 暗电流的大小主要依赖于量子点红外探测器中的电子传输. 如果通过器件的暗电流过大, 当红外辐射入射到探测器光敏区时, 器件可能会过早的达到饱和, 不能准确地探测信息; 如果通过器件的暗电流过小, 由于器件自身灵敏度的原因可能根本就不能探知到信息. 另外, 探测器中暗电流的存在还会使探测器噪声、响应率、灵敏度和探测率等性能降低. 所以暗电流成为评价探测器性能的一个最基本和最重要的性能指标.

典型的量子点红外探测器结构示意图如图 1. 从下往上看, 在接收极上是由许多量子点组成的量子点层, 在接收极和量子点层之间充满了由势垒组成掺杂的势垒层, 而位于量子点层上的仍然是势垒层, 它与量子点层组成了量子点复合层. 沿着生长方向, 一个量子点红外探测器可以有一个或多个量子点复合层, 最后在发射极与量子点层间加入掺杂势垒层, 从而形成整个量子点红外探测器. 总之, 量子点红外探测器主要由发射极、接收极和夹在发射极和接收极之间的多个量

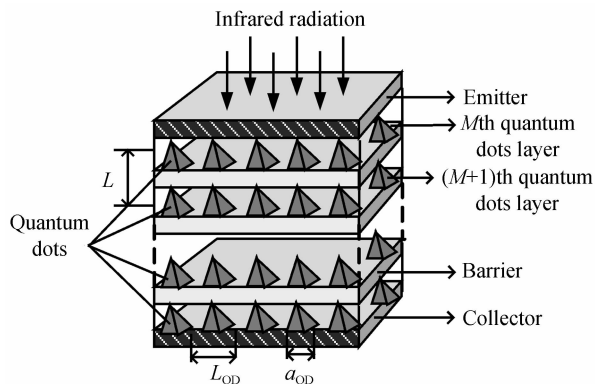


图 1 量子点红外探测器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the QDIP structure

子点复合层构成, 而多个量子点复合层由宽禁带材料构成的势垒层隔离开的量子点层构成.

量子点红外探测器中的载流子可以看做成电子, 并且量子点红外探测器暗电流依赖于探测器中整个电子传输过程. 基于这一原理, 2003 年, 加拿大国家研究委员会刘惠春教授提出可以估算量子点红外探测器暗电流的方法: 由于暗电流形成的主要原因是量子点红外探测器中的电子传输, 因此只要统计出量子点势阱中运动的电子数目即可得到量子点红外探测器暗电流, 它可以表示为^[4,6,11]

$$I_{\text{dark}} = ev_d n_{3D} A \quad (1)$$

式中, e 是电子基本电荷电量, v_d 是势垒中电子漂移速度, n_{3D} 是势垒中电子的三维密度, A 是探测器面积.

在量子点红外探测器中, 由于扩散现象并不明显, 扩散现象可以忽略不计, 因此可以通过式(2)计算量子点势垒中三维电子密度 n_{3D} ^[4,6,11], 即

$$n_{3D} = 2 \left(\frac{m_b k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{E_a}{k T} \right) \quad (2)$$

式中, m_b 是电子有效质量, k 是玻尔兹曼常量, T 是外界温度, \hbar 是归一化普朗克常量, E_a 是热激发能, 它依赖于探测器中整个电子传输过程, 等于量子阱或点中从势垒顶端到费米能级之间的能量间隔.

由式(2)可知, 在量子点红外探测器中电子传输的机理以激发能表征, 要计算量子点势垒中三维电子密度 n_{3D} 关键在于对激发能 E_a 的确定. 分析已有的研究成果可知, 量子点红外探测器中的激发能包含微米尺度电子传输与纳米尺度电子传输的共同作用^[10], 实际作用机理如图 2.

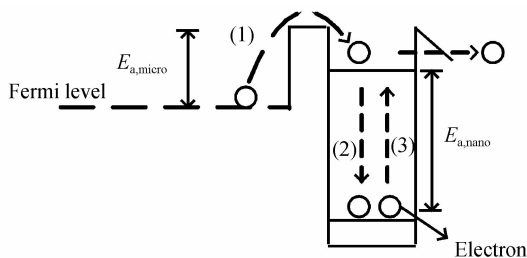


图 2 量子点红外探测器中两种电子传输的连续耦合模式
Fig. 2 Sequential coupling model of two kinds of electron transport in QDIP

在这个模型中, 对暗电流有贡献的总的电子传输是以连续耦合模式进行的, 主要有三个过程:

- 1) 越过有效势垒的热激发 (对应微米尺度电子传输效应);
- 2) 量子点俘获电子过程;
- 3) 电子从量子点的逃逸过程 (对应纳米尺度电子传输效应).

过程 1) 和 3) 的激发能分别代表微米尺度电子传输激发能 $E_{a,micro}$ 和纳米尺度电子传输激发能 $E_{a,nano}$.

基于此,量子点红外探测器的激发能表示为

$$E_a = E_{a,\text{micro}} + E_{a,\text{nano}} \quad (3)$$

$$E_{a,\text{micro}} = E_{0,\text{micro}} \exp(-F/F_0) \quad (4)$$

$$E_{a,\text{nano}} = E_{0,\text{nano}} - \beta F \quad (5)$$

式(3)中, $E_{a,\text{micro}}$ 是微米尺度电子传输激发能,等于量子阱或点从势垒顶端到费米能级之间的能量间隔; $E_{a,\text{nano}}$ 是纳米尺度电子传输激发能,它为量子点的离化能.对照图1和图2,过程1)微米尺度电子传输对应整个电子以微米尺度越过有效势垒的传输行为,即电子越过有效势垒的热激发行为.而过程3)纳米尺度电子传输对应电子(在整个电子传输过程,这些电子为量子点附近纳米环境下的电子)从量子点逃逸出来的行为,这些电子的逃逸与电子的场隧穿有关.本质上而言,微米尺度电子传输激发能主要表征的是电子越过有效势垒的热激发,而纳米尺度电子传输激发能主要表征的是电子脱离量子点的场辅助隧道激发.

式(4)和(5)中的 $E_{0,\text{micro}}$ 和 $E_{0,\text{nano}}$ 分别表示零外加电场($F=0$ kV/cm)下的微米尺度和纳米尺度电子传输机制下的激发能, F_0 和 β 为实验参量,分别表示微米尺度和纳米尺度电子传输激发能随外加电场的变化而变化的速度.本质上, F_0 代表越过有效势垒的热激发对外加电场的依赖性,而 β 代表外加电场对电子脱离量子点行为的影响(对应着电子隧穿机制).

将式(2)~(5)带入式(1),得到量子点红外探测的暗电流表达式为

$$I_{\text{dark}} = 2e v_d \left(\frac{m_b k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \cdot \exp \left(- \frac{E_{0,\text{micro}} \exp(-F/F_0) + E_{0,\text{nano}} - \beta F}{k T} \right) A \quad (6)$$

这个暗电流模型中,电子的漂移速度看作常量,然

表1 GaAs或InGaAs量子点红外探测器参量

Table 1 Parameters of the QDIP from GaAs or InGaAs

$E_{0,\text{micro}} = 34.6, 120.3$ meV	$E_{0,\text{nano}} = 219.2, 224.7$ kV/cm	$F_0 = 1.62, 2.29$ kV/cm	$\beta = 2.22, 2.79$ meVcm/kV
$\mu = 1\ 000$ cm ² · V ⁻¹ · s ⁻¹	$v_s = 1 \times 10^5$ m/s	$m_b = 6 \times 10^{-32}$ kg	$A = 100 \times 100$ μm ²

图3为100 K和130 K温度下暗电流在外加电场(0~25 KV/cm)作用下的函数曲线,其中 $E_{0,\text{micro}} = 34.6$ meV, $E_{0,\text{nano}} = 224.7$ meV, $F_0 = 1.62$ kV/cm, $\beta = 2.79$ meV · cm/kV, $\mu = 1\ 000$ cm² · V⁻¹ · s⁻¹, $v_s = 1 \times 10^5$ m/s, $m_b = 6 \times 10^{-32}$ kg, $A = 100 \times 100$ μm².图中“*”曲线表示130 K时将漂移速度看做常量(1×10^5 m/s)时的暗电流模型计算结果,右三角和圆曲线分别表示温度为100 K和130 K时修正的暗电流模型计算结果,方形和菱形分别表示顶部到底部接触层为10周期的2 mL InAs/20 mL InGaAs/130 mL GaAs量子点堆积层、直径为250 μm的量子点红外探测器在100 K和130 K温度下的暗电流实测实验数据^[16].其它四个曲线分别表示:130K时,通过修正的暗

而在探测器的实际运行机制中,电子的漂移速度与探测器的电子饱和速度、电子迁移率和外加电场等因素有关.因此,为了使暗电流模型的计算更加符合量子点红外探测器的实际运行机制,修正同时考虑微米尺度和纳米尺度电子传输对激发能贡献的暗电流模型,加入电子漂移速度对外加电场的依赖,进而提高了暗电流模型计算的准确性和合理性.

在定量仿真计算中,假设探测器电子迁移率不受外加电场的影响,并且认为探测器中电子的产生过程和捕获过程始终处于动态平衡,那么,电子的漂移速度就可通过式(7)来计算^[12-14],即

$$v_d = \mu F \left(1 + \left(\frac{\mu F}{v_s} \right)^2 \right)^{-1/2} \quad (7)$$

式中, μ 是电子的迁移率, v_s 是电子的饱和速度.

把式(7)带入式(6),最终得到修正的暗电流模型,即

$$I_{\text{dark}} = 2e \mu F \left(1 + \left(\frac{\mu F}{v_s} \right)^2 \right)^{-1/2} \left(\frac{m_b k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \cdot \exp \left(- \frac{E_{0,\text{micro}} \exp(-F/F_0) + E_{0,\text{nano}} - \beta F}{k T} \right) A \quad (8)$$

2 仿真与讨论

采用建立的暗电流模型分别在100 K和130 K对量子点红外探测器暗电流进行计算仿真.通过与100 K和130 K实测暗电流实验数据比较,验证所建立的暗电流模型的有效性和正确性.最后分析和讨论量子点红外探测器外加电场和温度对暗电流特性的影响,并详细讨论了影响的原因.在仿真计算中,量子点红外探测器性能参量来自于10周期的GaAs或InGaAs^[10,14-15],具体参量如表1.

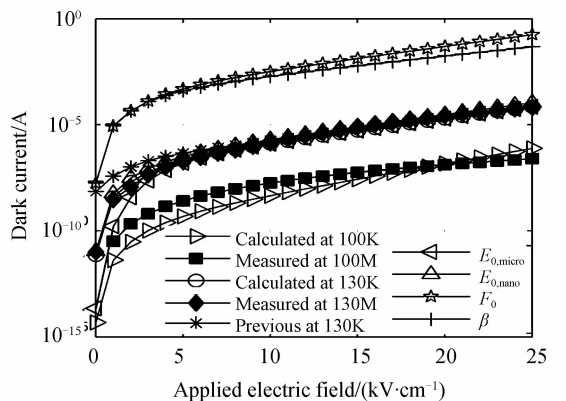


图3 外加电场对暗电流的影响

Fig. 3 The influence applied electric field on dark current

电流模型计算出的零外加电场下微米尺度电子传输激发能 $E_{0,\text{micro}}$ 、零外加电场下纳米尺度电子传输激发能 $E_{0,\text{nano}}$ 、微米尺度电子传输激发能变化速度 F_0 和纳米尺度电子传输激发能变化速度 β 对暗电流的影响曲线。

对比图 3 中 100 K 和 130 K 的暗电流模型理论计算结果和实测实验数据发现:暗电流模型理论计算结果曲线和实测实验数据曲线在 0~25 kV/cm 外加电场范围内吻合的很好,证实了所建立的激发能暗电流模型的正确性.更进一步,和漂移速度取常量 1×10^5 m/s 时的暗电流模型理论计算结果相比,发现修正的暗电流模型模拟数据无论是当外加电场小于 6 kV/cm 还是高于 6 kV/cm 时都与实验结果相吻合。

从图 3 可以看出暗电流随着外加电场的增加而增加.例如,当温度为 130 K 时,8 kV/cm 的外加电场下的暗电流为 6.84×10^{-7} A,而当外加电场增加到 16 kV/cm 时,相应的暗电流增加为 6.95×10^{-6} A,是外加电场为 8 kV/cm 时暗电流的 10 倍多.造成这种现象的主要原因是:当外加电场增加时,更大的能带弯曲使得载流子势垒减少,使越来越多的电子从量子点中逃逸,结果产生了更大的暗电流.温度为 100 K 时的曲线变化与该趋势类似.而且从图 3 中温度为 100 K 和 130 K 的曲线中还可以看出,当外加电场小于 6 kV/cm 时暗电流随着外加电场的增加迅速增加,这可能是由于微米尺度电子传输对激发能的贡献所致,而当外加电场大于 6 kV/cm 时,暗电流随着外加电场的增加缓慢增加,这可能是由于纳米尺度电子传输对激发能的贡献所致。

比较零外加电场下微米尺度电子传输激发能 $E_{0,\text{micro}}$ 、零外加电场下纳米尺度电子传输激发能 $E_{0,\text{nano}}$ 、微米尺度电子传输激发能变化速度 F_0 和纳米尺度电子传输激发能变化速度 β 对暗电流的影响曲线可以发现:微米尺度电子传输和纳米尺度电子传输共同决定量子点红外探测器的暗电流.然而,从仿真结果发现模型计算的暗电流结果和实验数据之间还存在一些微小的差别,造成这些偏差的原因可能是理论模型忽略了其余参量对暗电流的影响。

另外,如图 3,温度在很小的范围内变化(30 K)时暗电流变化明显.例如,在相同的外加电场 8 kV/cm 作用下,当温度为 100 K 时,暗电流仅为 2.04×10^{-9} A,而当温度升高到 130 K 时,暗电流迅速增加到 6.84×10^{-7} A,是 100 K 温度下暗电流值的 335 倍.为了进一步说明这种现象,图 4 详细地描述了温度对暗电流的影响。

图 4 为 8 kV/cm、12 kV/cm 和 16 kV/cm 外加电场下暗电流对温度的依赖关系,其中 $E_{0,\text{micro}} = 34.6$ meV, $E_{0,\text{nano}} = 224.7$ meV, $F_0 = 1.62$ kV/cm, $\beta =$

2.79 meV · cm/kV, $\mu = 1\,000$ cm² · V⁻¹ · s⁻¹, $v_s = 1 \times 10^5$ m/s, $m_b = 6 \times 10^{-32}$ kg, $A = 100 \times 100$ mm². 从图 4 可知,在相同的外加电场 8 kV/cm 作用下,温度为 78 K 时的暗电流为 1.86×10^{-12} A,当温度为 130 K 时,暗电流迅速地增加到 6.84×10^{-7} A,比 78 K 温度下暗电流值要大 5 个数量级.当外加电场为 12 kV/cm 和 16 kV/cm 时有类似的变化趋势.暗电流随着温度的升高而迅速增加的原因是:暗电流指数性的依赖于温度和量子点中电子的热离子发射.如果温度升高,电子的热发射使越来越多的电子从量子点中逃逸,可以获得更大的暗电流.当然,从图 4 还可以看出暗电流随着外加电场的增加而增加,这种变化趋势和图 3 是一致的。

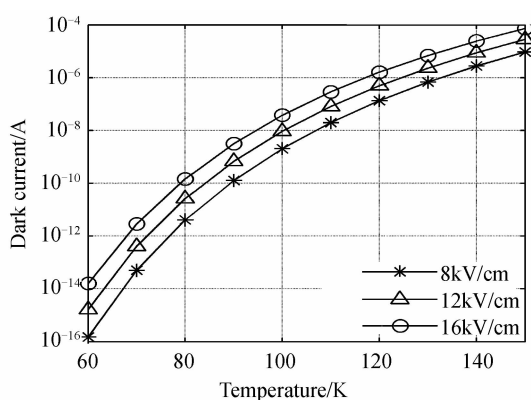


图 4 温度对暗电流的影响

Fig. 4 The influence temperature on dark current

3 结论

考虑微米尺度和纳米尺度电子传输对激发能的共同影响,在电子漂移速度对探测器外加电场依赖的基础上建立暗电流模型.基于实测实验数据,在 100 K 和 130 K 不同温度下仿真验证了该暗电流模型的有效性和正确性,通过和将漂移速度看作常量的暗电流模型相比较,发现修正的暗电流模型更加合理.重点分析了外加电场和温度对暗电流特性的影响.在 0~25 kV/cm 范围内,暗电流随着外加电场的增加而增加,当外加电场小于 6 kV/cm 时,暗电流随着外加电场的增加迅速增加,而当外加电场大于 6 kV/cm 时,暗电流随着外加电场的增加缓慢增加.暗电流随着温度的升高而迅速增加,温度变化为 30 K 左右时,暗电流变化明显。

参考文献

- [1] JAHROMI H D, SHEIKHI M H, YOUSEFI M H. A numerical approach for analyzing quantum dot infrared photodetectors' parameters[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**: 572-577.
- [2] HU Xiao-ying, LIU Wei-guo, ZHOU Shun, et al. Modification for peak wavelength of GaAs/Al_xGa_{1-x}AS quantum well infrared photodetector by Al content [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2013, **24**(4): 649-654.

- 胡小英,刘卫国,周顺,等. Al组分对 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 量子阱红外探测器峰值响应波长的修饰[J]. 光电子·激光,2013, **24**(4): 649-654.
- [3] JAHROMI H D, SHEIKHI M H, YOUSEFI M H. Investigation of the quantum dot infrared photodetectors dark current[J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**: 1020-1025.
- [4] LIU Hong-mei, YANG Chun-hua, LIU Xin, *et al.* Noise characterization of quantum dot infrared photodetectors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(21): 218501.
刘红梅,杨春花,刘鑫,等. 量子点红外探测器的噪声表征[J]. 物理学报,2013, **62**(21): 218501.
- [5] MARTYNIUK P, ROGALSKI A. Insight into performance of quantum dot infrared photodetectors [J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences; Technical Sciences*, 2009, **57**(1): 103-116.
- [6] LIU H C. Quantum dot infrared photodetector [J]. *Opto-Electronics Review*, 2003, **11**(1): 1-5.
- [7] YE Z, CAMPBELL J C, CHEN Z, *et al.* InAs quantum dot infrared photodetectors with In_{0.15}Ga_{0.85}As strain-relief cap layers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **92**(12): 7462-7468.
- [8] DUBOZ J Y, LIU H C, WASILEWSKI Z R, *et al.* Tunnel current in quantum dot infrared photodetectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **93**(2): 1320-1322.
- [9] ZHAO Z Y, YI C, LANTZ K R, *et al.* Effect of donor-complex-defect-induced dipole field on InAs/GaAs quantum dot infrared photodetector activation energy[J]. *Applied Physics Letter*, 2007, **90**: 233511.
- [10] LIN L, ZHEN H L, LI N, *et al.* Sequential coupling transport for the dark current of quantum dots-in-well infrared photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**: 193511.
- [11] LIAO C C, TANG S F, CHEN T C, *et al.* Electronic characteristics of doped inas/gaas quantum dot photodetector; temperature dependent dark current and noise density[C]. SPIE, 2006, **6119**: 611905.
- [12] GHASEMI F, RAZI S. Cuboid GaN/AlGaIn quantum dot infrared photodetector: photoconductive gain and capture probability[J]. *Optik*, 2013, **124**: 859-863.
- [13] CARBONE A, INTROZZI R, LIU H C. Photo and dark current noise in self-assembled quantum dot infrared photodetectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**: 260-263.
- [14] LIU Hong-mei, ZHANG Jian-qi. Dark current and noise analyses of quantum dot infrared Photodetectors[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(13): 2767-2771.
- [15] BAI Hong-gang, ZHANG Jian-qi, WANG Xiao-rui, *et al.* Noise characteristics investigation in quantum dot infrared photodetectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **60**: 207-215.
- [16] KIM E T, MADHUKAR A, YE Z, *et al.* High detectivity InAs quantum dot infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(17): 3277-3279.