

doi:10.3788/gzxb20174604.0404002

外加条件及两种电子传输对量子点红外探测器噪声的影响

金英姬

(西藏民族大学 教育学院, 陕西 咸阳 712082)

摘 要: 基于外加电场对电子漂移速度的影响, 考虑激发能对微米尺度和纳米尺度电子传输的依赖, 通过计算仿真研究了外加条件及两种电子传输对量子点红外探测器噪声的影响. 结果表明: 在 $25 \sim 45$ kV/cm 外加电场下, 噪声模型和实验数据吻合; 噪声随着外加电场和温度的增加而增加, 当温度小于 80K 时噪声增加迅速, 而当温度大于 80K 时噪声增加缓慢, 并且温度越低噪声随外加电场变化越明显; 噪声不随微米尺度电子传输激发能的变化而变化, 随着纳米尺度电子传输激发能的增加而减小, 随着纳米尺度电子传输激发能变化速度的增加而增加. 该研究可为量子点红外探测器的优化设计和性能提高提供理论参考.

关键词: 量子点红外探测器; 噪声; 计算仿真; 外加电场; 温度; 两种电子传输

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0404002-6

Influence of the Preset Condition and the Two Electrons Transport on the Noise of the Quantum Dot Infrared Photodetectors

JIN Ying-ji

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

Abstract: The influence of preset condition and the two electrons transport on the noise of the quantum dot infrared photodetectors was calculated and simulated, which was based on the noise model including the influence of the electric field on the drift velocity of electrons, moreover, with account taken of the dependence of the activation energy on the microscale and the nanoscale electron transport. The results show that the noise model has a good agreement with the experimental data at $25 \sim 45$ kV/cm electric field. The noise increases with the electric field and temperature, the noise increases rapidly below 80K, but it increases slowly above 80K, and when the temperature is lower, the change of the noise is more obvious with the change of the electric field. The noise does not change along with the change of the activation energy under the microscale electron transport, decreases with increasing the activation energy under the nanoscale electron transport, and increases with increasing the change rate of the activation energy under the nanoscale electron transport. The research can guide the design and improve the performance of the quantum dot infrared photodetectors.

Key words: Quantum dot infrared photodetectors; Noise; Calculation and simulation; Electric field; Temperature; Two electrons transport

OCIS Codes: 040.3060; 040.5570; 270.5570

0 引言

量子点红外探测器(Quantum Dot Infrared Photodetectors, QDIPs)和其它的探测器相比具有更低的

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11661073), 西藏自治区自然科学基金(No. 2016ZR-15-19)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: 金英姬(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为量子点红外探测器性能模型及数值计算与分析. Email: 463239462@qq.com

收稿日期: 2016-10-27; **录用日期:** 2017-01-03

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

暗电流,更高的吸收率、响应率、探测率和工作温度等优越特性,已引起了国内外研究者的浓厚兴趣,成为红外探测技术领域研究的热点^[1-5]. 噪声使得探测器灵敏度和探测率大大降低,因此,为了得到更高性能的量子点红外探测器,对其噪声进行系统的研究非常必要^[6-7]. 目前,对于噪声的研究主要是从组成噪声的主要成分暗电流入手. V. Ryzhii 等基于势垒中电势分布满足的泊松方程得到暗电流^[8]; A. D. Stiff-Roberts 等在计算暗电流时考虑了热激发和场辅助隧穿机制的共同作用^[9]; H. D. Jahromi 等为了提升暗电流算法精度,考虑了电子的热激发和场辅助隧穿机制,并考虑了 Richardson 效应,建立了暗电流模型^[10]. H. C. Liu 通过考虑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暗电流^[11]; Z. Y. Zhao 等考虑了纳米尺度电子传输对激发能的贡献得到了暗电流^[12]. 事实上,量子点红外探测器的暗电流由微米尺度和纳米尺度两种电子传输共同决定^[13-16]. 考虑这两种电子传输对激发能的共同作用,及外加电场对电子漂移速度的影响,本文在不同温度下进一步仿真验证了建立的噪声模型,重点分析了外加条件及两种电子传输对噪声的影响,并详细讨论了影响噪声的原因.

1 噪声模型

从上往下看,量子点红外探测器由发射极、多个量子点复合层和接收极构成,量子点层构成了量子点复合层,它们之间被宽禁带材料构成的势垒层隔开,如图 1. 量子点层内周期性分布着密度为 Σ_{QD} 的量子点,量子点横向尺寸 a_{QD} 本身相对非常大,而横向距离 L_{QD} 又远远大于横向尺寸,因此,每个量子点有很多束缚态,这些束缚态可以接受大量的电子,但量子点层间距离 L 比横向距离要大,这使得量子点只能提供与纵向方向相关的两个量化能级. 当探测器光敏面上接收到红外辐射时,如果量子点中的电子或空穴吸收足够大的光子能量,那么它们将实现从基态到激发态的跃迁,由原来的不带电状态变成导电状态,使得探测器的光电导发生改变,从而对红外光进行探测. 因此,量子点红外探测器的噪声主要来源于载流子的产生复合过程^[17],计算公式为

$$i_{\text{noise}} = \sqrt{4eI_{\text{dark}}g_n} \quad (1)$$

式中, e 为电子基本电荷, I_{dark} 为暗电流, g_n 为噪声增益.

暗电流是量子点红外探测器即使在没有入射光时仍有通过自身的电流,它是噪声的主要来源,决定着探测器性能的好坏,根据量子点红外探测器层状结构特点,可通过累加势垒中的电子数目来计算暗电流^[14-15],即

$$I_{\text{dark}} = 2e\mu F \left(1 + \left(\frac{\mu F}{v_s}\right)^2\right)^{-1/2} \left(\frac{m_b k T}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) A \quad (2)$$

式中, μ 为电子迁移率, F 为外加电场, v_s 为电子饱和速度, m_b 为电子有效质量, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, \hbar 为普朗克常数, E_a 为激发能, A 为量子点红外探测器面积.

激发能 E_a 的大小取决于探测器中整个电子传输过程,在量子点红外探测器中,电子以连续耦合的方式同时进行微米尺度电子传输和纳米尺度电子传输^[13-15],即

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

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

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

式中, $E_{a,\text{micro}}$ 表示微米尺度电子传输激发能,它是电子由于热激发而越过有效势垒所引起的激发能,可用从势垒顶端到费米能级之间的能量间隔来计算; $E_{a,\text{nano}}$ 表示纳米尺度电子传输激发能,它强调的是电子由于场隧穿效应而逃逸出量子点势阱所引起的激发能,可用量子点的离化能来计算; $E_{0,\text{micro}}$ 和 $E_{0,\text{nano}}$ 分别表示零外加电场 ($F=0$ kV/cm) 下的微米尺度电子传输和纳米尺度电子传输激发能; 实验参数 F_0 和 β 分别表示微米

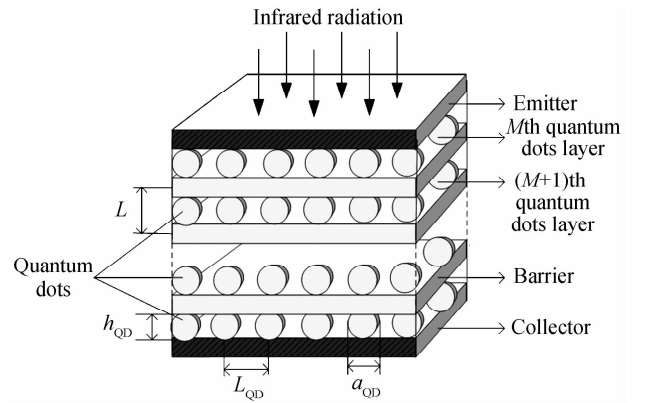


图 1 量子点红外探测器结构
Fig. 1 Schematic diagram of the QDIP structure

尺度电子传输激发能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, F_0 与电子的热激发有关, β 与电子的场辅助隧穿有关.

在量子点红外探测器中,量子点对电子的捕获满足各向同性,具有球对称性,可通过平均矩阵近似方法计算电子复合时间,因此,噪声增益为^[1-2]

$$g_n = \frac{\mu F \left(1 + \left(\frac{\mu F}{v_s}\right)^2\right)^{-1/2}}{Y \sum_{\text{QD}} \left(\frac{4\pi R_t \mu k T}{e}\right) \left\{1 - \left[\frac{\mu k T}{e V_t R_t^2} \tanh\left(\frac{e V_t R_t^2}{\mu k T}\right)\right]^{1/2}\right\}} \quad (6)$$

式中, Y 为探测器长度, \sum_{QD} 为量子点密度, R_t 为量子点有效半径, V_t 为电子捕获率.

将式(2)~(6)代入式(1),可得量子点红外探测器噪声模型,即

$$i_{\text{noise}} = \sqrt{\frac{8e^2 \mu^2 F^2 \left(1 + \left(\frac{\mu F}{v_s}\right)^2\right)^{-1} \left(\frac{m_b k T}{2\pi \hbar^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{0,\text{micro}} \exp(-F/F_0) + E_{0,\text{nano}} - \beta F}{k T}\right) A}{Y \sum_{\text{QD}} \left(\frac{4\pi R_t \mu k T}{e}\right) \left\{1 - \left[\frac{\mu k T}{e V_t R_t^2} \tanh\left(\frac{e V_t R_t^2}{\mu k T}\right)\right]^{1/2}\right\}}} \quad (7)$$

2 仿真与分析

采用建立的噪声模型分别在 78K、100K 和 130K 对量子点红外探测器噪声进行计算仿真. 通过与实测实验数据比较,进一步验证了所建噪声模型的有效性和正确性,分析了外加电场、温度和两种电子传输对噪声的影响及原因. 仿真计算时选取 10 周期 GaAs 或 InGaAs 量子点红外探测器性能参数^[13-14],如表 1.

表 1 GaAs 或 InGaAs 量子点红外探测器参数
Table 1 Parameters of the QDIP from GaAs or InGaAs

Parameter	$E_{0,\text{micro}}$	$E_{0,\text{nano}}$	μ	v_s	\sum_{QD}	V_t
Value	34.6 meV	224.7 meV	1 000 $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$	$1 \times 10^5 \text{ m/s}$	$3 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}$	$1 \times 10^{10} \text{ Hz}$
Parameter	F_0	β	m_b	Y	A	R_t
Value	1.62 kV/cm	2.79 meV cm/kV	$6 \times 10^{-32} \text{ kg}$	514 nm	$100 \times 100 \mu\text{m}^2$	30 nm

图 2 表示的是 25~45kV/cm 外加电场下, 78 K、100 K 和 130 K 温度下噪声电流随外加电场的变化曲线. 其中, 78 K 和 100 K 温度下的噪声电流实验数据来自 InAs (2 ML)、In_{0.15}Ga_{0.85}As (20 ML)、GaAs(130 ML) 10 周期量子点复合层构成的量子点红外探测器^[6]; 130K 温度下的噪声电流实验数据来自 10 周期量子点复合层组成的量子点红外探测器, 它的底部和顶部由 GaAs 接触层 (0.3 μm)、AlGaAs 层 (20 nm)、GaAs 缓冲层 (60 nm) 构成, 并且每个周期内的量子点由 GaAs 空间层 (50 nm) 和 InGaAs (1nm)/InAs_{2.4} (ML)、InGaAs(30 ML) 覆盖层构成^[7].

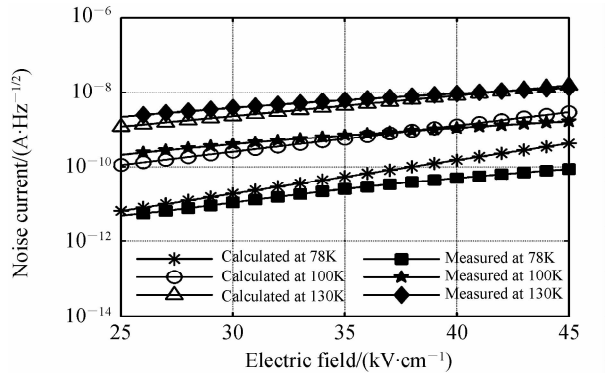


图 2 外加电场对噪声电流的影响
Fig. 2 Influence of electric field on noise current

由图 2 可以看出,在 78 K、100 K 和 130 K 温度下,通过噪声模型计算的结果和实验数据具有很好的吻合性,充分证实了所建立噪声模型的有效性和正确性. 然而图 2 中计算仿真值和实验数据之间并不是完全一致,导致了这一偏差的原因目前还不是完全清楚,极有可能是在建立噪声模型时还没有充分考虑到所有参数对噪声的影响.

进一步地,从图 2 还可以看到,噪声随着外加电场的增加而增加. 比如,温度为 100 K 时,当外加电场是 30 kV/cm 时,噪声电流是 $2.56 \times 10^{-10} \text{ A/Hz}^{1/2}$,而当外加电场增加到 45 kV/cm 时,噪声电流增加到 $2.98 \times 10^{-9} \text{ A/Hz}^{1/2}$,此时的噪声电流是 30 kV/cm 外加电场下噪声电流的 11 倍多. 从图中 78K 和 130K 温度曲线中也能看到类似地增加趋势,在 30 kV/cm 外加电场下,噪声电流分别是 $1.87 \times 10^{-11} \text{ A/Hz}^{1/2}$ 、 $2.34 \times 10^{-9} \text{ A/Hz}^{1/2}$,而当外加电场增加到 45 kV/cm 时,噪声电流相应地增加到 $4.32 \times 10^{-10} \text{ A/Hz}^{1/2}$ 、 $1.56 \times 10^{-8} \text{ A/Hz}^{1/2}$. 噪声

随着外加电场的增加而增加的主要原因在于噪声电流对暗电流的依赖性,当外加电场增加时,能带将变得更加弯曲,载流子势垒由于更大的能带弯曲而减少,这样,越来越多的电子将越过降低的势垒脱离量子点,从量子点中逃逸出来,导致暗电流增加,噪声增加。

另外,图2也表明了噪声随温度的升高而增加。比如,在40 kV/cm 相同的外加电场下,78K 温度时的噪声电流是 1.52×10^{-10} A/Hz^{1/2},而130K 温度时的噪声电流已经增加到 8.32×10^{-9} A/Hz^{1/2},这是78K 温度时噪声电流的55 倍多。为了进一步说明这种现象,通过图3 进行讨论。

图3 给出了25 kV/cm、35 kV/cm 和45 kV/cm 不同外加电场下噪声电流对温度的依赖关系曲线。在35 kV/cm 相同的外加电场作用下,100 K 温度时的噪声电流是 5.83×10^{-10} A/Hz^{1/2},130 K 温度时的噪声电流是 4.43×10^{-9} A/Hz^{1/2},这比100 K 温度下的噪声电流值大7 倍多。噪声随着温度的升高而增加,在25 kV/cm 和45 kV/cm 曲线中也能看到类似的变化趋势。造成这种现象的原因主要是:温度和量子点中电子的热激发指数性决定了量子点红外探测器的暗电流,如果温度升高,由于电子被热激发,越来越多的电子将从量子点中逃逸出来,导致暗电流增加,因此噪声增加。

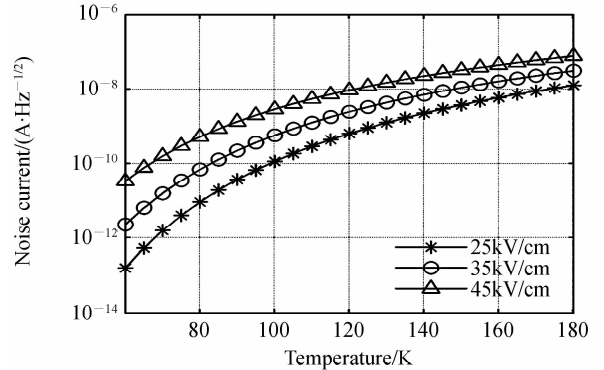


图3 温度对噪声电流的影响

Fig. 3 Influence of temperature on noise current

从图2 和图3 还可以看出,温度越低噪声随外加电场变化越明显,温度越高噪声随外加电场变化越不明显。产生这一结果的原因是:当温度升高时,电子热激发增强,这样脱离量子点的电子数增加,从而使得量子点内所包含的平均电子数降低,因此,当在外加电场作用下再次激发电子时,量子点内就只有更少的电子能激发出来形成暗电流,温度越高,再次激发出来的电子数目就越少,暗电流增加越不明显,导致噪声变化越不明显,反之亦然。

除此之外,图3 也显示了噪声电流随着外加电场的增加而增加,这和图2 得到的结果是一致的。

图4 给出了130 K 温度下两种电子传输性能参数(零外加电场下微米尺度和纳米尺度电子传输激发能 $E_{0,micro}$ 、 $E_{0,nano}$,微米尺度和纳米尺度电子传输激发能变化速度 F_0 、 β)对噪声电流的影响。仿真计算时,各性能参数取值如表1,为了不失一般性进行比较,将130K 的噪声电流作为参考值,在其它参数均不变的情况下,分别改变 $E_{0,micro}$ 、 F_0 、 $E_{0,nano}$ 和 β 可得得到相应的噪声电流值。图中, $E_{0,micro}$ 、 F_0 、 $E_{0,nano}$ 和 β 表示的曲线分别是 $E_{0,micro} = 100$ meV、 $F_0 = 2.29$ kV/cm、 $E_{0,nano} = 220$ meV 和 $\beta = 2.22$ meV cm/kV 时的噪声电流。

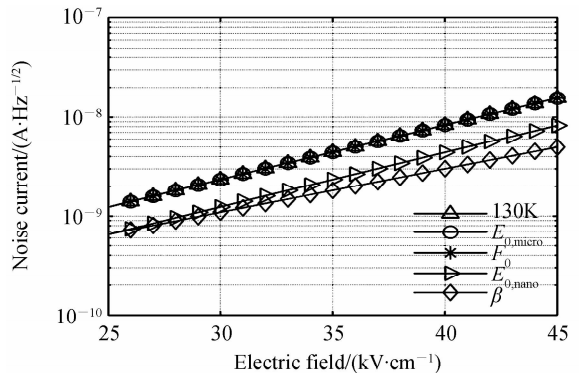


图4 两种电子传输对噪声电流的影响

Fig. 4 Influence of two electrons transport on noise current

由图4 可以看出, $E_{0,micro}$ 、 F_0 曲线和130K 曲线之间不存在差异,比如,在35kV/cm 外加电场下, $E_{0,micro} = 100$ meV 时,噪声电流是 4.43×10^{-9} A/Hz^{1/2}, $E_{0,micro} = 34.6$ meV 时,噪声电流也是 4.43×10^{-9} A/Hz^{1/2}; $F_0 = 1.62$ kV/cm 时,噪声电流是 4.43×10^{-9} A/Hz^{1/2}, $F_0 = 2.29$ kV/cm 时,噪声电流也是 4.43×10^{-9} A/Hz^{1/2}。产生这一结果的原因是:在建立25~45 kV/cm 高外加电场下的暗电流、噪声模型时,仿照0~12 kV/cm^[14]、0~20 kV/cm^[15] 低外加电场下的暗电流模型,考虑了微米尺度和纳米尺度电子传输共同对激发能的作用。低外加电场下噪声随着微米尺度电子传输激发能和激发能变化速度的增加而减小,然而从图4 可以看出,高外加电场下微米尺度电子传输激发能对噪声电流没有影响,噪声不随微米尺度电子传输激发能的变化而变化。造成这一现象的原因目前还不是很清楚,可能是低温下噪声主要来源于隧穿电流,随着温度升高热激发产生的暗电流逐渐增加,并在某一温度超过隧穿电流(这需要后续对二者分别进行计算模拟以发现其规律)。

当 $E_{0,\text{micro}}$ 和 F_0 增加时,虽然增加了量子点中导带边缘顶部和费米能之间的能量间隔,使得电子被热激发时所需的能量也随之增大,表面上看起来电子不容易越过有效势垒,然而实际上,在高外加电场的作用下,当外加温度是 130K 时,电子由于隧道效应(对应着连续耦合模式中的纳米尺度电子传输过程)将迅速地穿过有效势垒,致使电流急剧增大,呈现出异常的非线性关系,这一过程实质上主要是纳米尺度电子传输,而微米尺度电子传输对暗电流没有贡献.因此,当微米尺度电子传输变化时噪声不变.

从图 4 中可以看出 $E_{0,\text{nano}}$ 、 β 曲线和 130K 曲线之间有着较大的差异.比如,在 35kV/cm 外加电场下, $E_{0,\text{nano}} = 220 \text{ meV}$ 时,噪声是 $4.43 \times 10^{-9} \text{ A/Hz}^{1/2}$, $E_{0,\text{nano}} = 224.7 \text{ meV}$ 时,噪声减小到 $2.34 \times 10^{-9} \text{ A/Hz}^{1/2}$; $\beta = 2.22 \text{ meV cm/kV}$ 时,噪声是 $1.82 \times 10^{-9} \text{ A/Hz}^{1/2}$, $\beta = 2.79 \text{ meV cm/kV}$ 时,噪声增加到 $4.43 \times 10^{-9} \text{ A/Hz}^{1/2}$. 这一结果主要是由于纳米尺度电子传输对噪声的影响,噪声随着 $E_{0,\text{nano}}$ 的增加而减小,随着 β 的增加而增加.其原因是,电子的电离能由于 $E_{0,\text{nano}}$ 的增加而增加,电子要从量子点中逃逸出来就必须克服更大的电离能,使得形成暗电流的电子数目减小,导致噪声减小.电子电离能由于 β 的增加而迅速减小,电子在被激发时很容易脱离束缚态,这样形成暗电流的电子数目增加,噪声增加.

3 结论

基于外加电场对电子漂移速度的影响,同时考虑激发能对微米尺度和纳米尺度电子传输的依赖,建立了量子点红外探测器噪声模型.在不同温度下,进一步仿真验证了该噪声模型.从仿真结果可以看出,在 25~45 kV/cm 外加电场下,噪声模型和实测实验数据吻合,所建立的噪声模型更加符合探测器的实际运行机制.对影响噪声的原因的分析结果表明,在 25~45 kV/cm 范围内,噪声随着外加电场的增加而增加,随着温度的增加而增加,当温度小于 80 K 时,外加电场的增加导致噪声迅速增加,而当温度大于 80 K 时,噪声随外加电场增加缓慢,并且温度越低噪声随外加电场变化越明显,温度越高噪声随外加电场变化越不明显;噪声不随微米尺度电子传输激发能的变化而变化,随着纳米尺度电子传输激发能的增加而减小,随着纳米尺度电子传输激发能变化速度的增加而增加.研究成果可为量子点红外探测器进一步优化设计和提高性能提供理论参考.

参考文献

- [1] MAHMOODI A, JAHROMI H D, SHEIKHI M H. Dark current modeling and noise analysis in quantum dot infrared photodetectors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(10): 5504-5509.
- [2] LIU Hong-mei, ZHANG Jian-qi, GAO Zhi-xiang, *et al.* Photodetection of infrared photodetector based on surrounding barriers formed by charged quantum dots[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(3): 6801708.
- [3] 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**(3): 572-577.
- [4] LIU Hong-mei, WANG Ping, SHI Yun-long. Photocurrent and responsivity of quantum dot infrared photodetectors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, **35**(2):139-142.
刘红梅, 王萍, 石云龙. 量子点红外探测器的光电流和响应率[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, **35**(2):139-142.
- [5] 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.
- [6] KIM E T, MADHUKAR A, YE Z, *et al.* High detectivity InAs quantum dot infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letter*, 2004, **84**(17): 3277-3279.
- [7] LU X, VAILLANCOURT J, MEISNER M J. Temperature-dependent photoresponsivity and high-temperature (190K) operation of a quantum dot infrared photodetector [J]. *Applied Physics Letter*, 2007, **91**(5): 051115.
- [8] RYZHII V, KHMYROVA I, PIPA V, *et al.* Device model for quantum dot infrared photodetectors and their dark-current characteristics [J]. *Semi-conductor Science and Technology*, 2001, **16**: 331-338.
- [9] STIFF-ROBERTS A D, SU X H, CHAKRABARTI S, *et al.* Contribution of field-assisted tunneling emission to dark current in InAs - GaAs quantum dot infrared photodetectors [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(3): 867-869.
- [10] JAHROMI H D, SHEIKHI M H, YOUSEFI M H. Investigation of the quantum dot infrared photodetectors dark current [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**(6): 1020-1025.
- [11] LIU H C. Quantum dot infrared photodetector[J]. *Opto-electronics Review*, 2003, **11**(1):1-5.
- [12] 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**(23): 233511.
- [13] 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**(19): 193511.
- [14] LIU Hong-mei, ZHANG Jian-qi. Performance investigations of quantum dot infrared photodetectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, **55**(4): 320-325.
- [15] BAI Hong-gang, ZHANG Jian-qi, WANG Xiao-rui, *et al.* Characteristics analysis of dark current in quantum dot infrared photodetectors[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, **48**(6): 337-342.
- [16] SHI Xin, XU Jian-ping, LI Lin-lin, *et al.* Photoelectrochemical properties of TiO₂ nanorod arrays loaded with carbon quantum dots[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(8): 898-905.
石鑫,徐建萍,李霖霖,等. 碳量子点负载 TiO₂ 纳米棒阵列的光电化学性质[J]. *发光学报*, 2015, **36**(8): 898-905.
- [17] YE Z, CAMPBELL J C, CHEN Z, *et al.* Noise and photoconductive gain in InAs quantum-dot infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letter*, 2003, **83**(6): 1234-1236.