文章编号:1001-5078(2016)06-0713-04

· 红外材料与器件 ·

# 倍增型量子环长波红外探测器研究

李 勇<sup>1</sup>,李 刚<sup>2</sup>,杨林朋<sup>1</sup>,李 亮<sup>1</sup>
(1.河南质量工程职业学院,河南 平顶山 467000;
2.军械工程学院电子与光学工程系,河北 石家庄 050003)

摘 要:为了提高量子环红外探测器(Quantum Ring Infrared Photodetector,QRIP)的灵敏度,抑制QRIP的暗电流,提出了一种具有倍增区、量子环吸收层以及Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As/In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 双势 垒结构的倍增型QRIP结构。基于量子环的三维薛定谔方程建立了QRIP的数值模型,并对 QRIP的光电特性进行了仿真。仿真结果表明,倍增型QRIP的响应度可以达到40 A/W,归一 化探测率可以达到2×10<sup>10</sup> cm·Hz<sup>1/2</sup>/W。

关键词:量子环;倍增效应;红外探测器;双势垒结构 中图分类号;TN362 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2016.06.013

## Research on quantum ring long-wave infrared photodetector with a multiplication region

LI Yong<sup>1</sup>, LI gang<sup>2</sup>, YANG Lin-peng<sup>1</sup>, LI Liang<sup>1</sup>

(1. Henan Quality Polytechnic, Pingdingshan 467000, China;

2. Department of Electronic and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: To improve the sensitivity of quantum ring infrared photodetector (QRIP) and restrain the dark current of QRIP, a QRIP with multiplication region, quantum ring absorption layer and  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/In_{0.1}Ga_{0.9}As$  double barrier structure is designed. The numerical model of the QRIP is built based on the 3D Schrodinger equation of the quantum ring. The electrical and optical characteristics are simulated. The simulation results show that the responsivity of the detector reaches 40 A/W, and the normalized detectivity reaches  $2 \times 10^{10}$  cm  $\cdot$  Hz<sup>1/2</sup>/W.

Key words: quantum ring; multiplication effect; infrared photodetector; double barrier structure

### 1 引 言

工作在长波红外及太赫兹波段的高灵敏度探测 器在医学诊断、安全预警、天文观测、夜视成像等领 域具有广泛的应用价值<sup>[1-3]</sup>。目前工作于该波段的 探测器类型主要包括碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)探测器、II 类超晶格探测器、量子阱 红外探测器(Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)以及量子点红外探测器(Quantum Dot Infrared Photodetector, QDIP)等<sup>[4-6]</sup>。在以上探测器类 型中,基于自组织生长 InAs 量子点的 QDIP 由于具 有高灵敏度和量子限域效应,成为目前的研究热点。 近期,一种新型的量子点——量子环被应用于该类 型探测器,从而构成了量子环红外探测器<sup>[7-8]</sup>。

量子环的制备方法是在量子点制备的基础上, 采用局部盖层的 Stranski-Krastranov 外延方法,然后 进行退火处理,使得量子点中心部分蒸发,从而形成 量子环。由于量子环属于量子点的一种,因此它们 的大部分性质都是一致的。但是,由于量子环的尺 寸更小,且形状为环形,因此其对载流子的量子限域 效应更强,且其子能级更接近导带能级,这使得

基金项目:河南省科技计划项目(No. 132102310495)资助。

**作者简介:**李 勇(1974 -),男,副教授,现主要从事光电仪器性能数字化检测和信息处理。E-mail:liyongoptics@sina.com

收稿日期:2015-12-14;修订日期:2015-12-27

QRIP 更加适用于长波红外探测。目前已有多个研究小组对 QRIP 开展了相关研究<sup>[9-11]</sup>。本文提出了一种倍增型 QRIP 结构,将倍增型器件的高信噪比与 QRIP 在长波红外波段的量子限域效应相结合,从而进一步优化 QDIP 在长波红外波段的探测性能。

### 2 倍增型 QRIP 结构

倍增型 QRIP 的结构及局部的能带分布如图 1 所示。探测器主要包括吸收区和倍增区。入射光在 量子环层通过带间吸收产生光生电子 - 空穴对,光 生电子在电场作用下进入倍增区,通过碰撞电离作 用产生更多的电子 - 空穴对,这种效应使得探测器 的响应度大幅增加。图1中,吸收区和倍增区之间 加入了一层重掺杂的 p 型层,该层的作用是调节探 测器内部的电场分布,使得吸收区的电场强度较低, 倍增区的电场强度足够高。吸收区的电场强度较低 可以产生较低的探测器暗电流,倍增区的电场强度 足够高可以保证探测器具有较高的响应度和较快的 响应速度。由于探测器的暗电流同样会被倍增区放 大,这将严重影响探测器的性能。为此在吸收区添 加了 Al<sub>0</sub>, Ga<sub>0</sub>, As/In<sub>0</sub>, Ga<sub>0</sub>, As 双势垒结构。Al<sub>0</sub>, Ga0.7As/In0.1Ga0.9As 双势垒结构可以阻挡热发射电 子,降低探测器的暗电流和噪声。







### 3 倍增型 QDIP 数值模型

为了计算量子环的带间吸收谱,需要首先计算 量子环的导带能级。为此,采用有效质量估计法求 解三维薛定谔方程,量子环的三维薛定谔方程的表 达式为<sup>[12]</sup>:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*}\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)\phi(x,y,z)+V(x,y,z)\phi(x,y,z)$$

 $=E\phi(x,y,z) \tag{1}$ 

式中, $\hbar$  为普朗克常数; $m^*$  为电子有效质量;V 为量 子环内的电势分布; $\phi$  为电子波函数;E 为量子环内 的电子能态。量子环的带间吸收效率为<sup>[13]</sup>:

$$\alpha(\hbar \omega) = \frac{\pi q^2}{\varepsilon n c m^2 V_{ac}} \cdot \frac{1}{\hbar \omega} \sum |\bar{\alpha} P_{fi}|^2 N(\hbar \omega)$$
(2)

式中, q 为电荷量; c 为光速;  $V_{ac}$  为量子环层的有效 体积;  $\overline{\alpha}$  为入射光的极化矢量;  $P_{fi}$  为动量矩阵中的元 素; N 为量子环内的能带密度, 其计算方法为<sup>[14]</sup>:

$$N(\hbar \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hbar r_{fi}/\pi}{(E - E')^2 + (\hbar r_{fi})^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(E_{fi} - E')^2}{2\sigma^2}\right] \cdot [f_i(E') - f_f(E')] dE'$$
(3)

式中,*E*<sub>f</sub>为*f*子带和*i*子带之间的跃迁能量;**h***r*<sub>f</sub>为洛 伦兹展宽的线宽;*o*为量子环非均匀性高斯方程的 线宽。探测器的响应度为探测器的光电流与入射光 功率之比,其计算方法为:

$$R = \frac{I_p}{P_{in}} = \frac{q}{\hbar \omega} Gg\{1 - \exp[-\alpha(\hbar \omega)L_{eff}]\}$$
(4)

式中,g 为吸收层的光电导增益;G 为雪崩增益;α 为 带间吸收系数;L<sub>d</sub>为吸收区厚度。探测器的暗电流 主要包括倍增区产生的暗电流和量子环层产生的暗 电流,其计算公式为:

$$I_D = I_{D,avalanche} + GI_{D,qr}$$
<sup>(5)</sup>

式中, $I_{D,qr}$ 为量子环层产生的暗电流,其计算方法为<sup>[15]</sup>:

$$I_{D,qr} = qn^* (V)v(V)A$$

$$^* (V) = \int N(E) f(E)T(E,V)dE$$
(6)

式中,v为电子漂移速度;T(E,V)为双势垒的透射 概率;f(E)为费米函数;N(E)为能态密度; $I_{D,avlanche}$ 为倍增区产生的暗电流,主要包括复合电流、漏电流 和隧穿电流,其计算方法为<sup>[16]</sup>:

$$I_{D,avalanche} = \frac{q n_i A W}{\tau_{eff}} \Big[ 1 - \exp\Big(\frac{-qV}{KT}\Big) \Big] + \frac{V}{R_s} + \frac{2m}{E_g} \Big)^{1/2} \frac{q^3 E_m V A}{4\pi^3 \hbar^2} \exp\Big[\frac{-\pi (2mE_g^3)^{1/2}}{4\hbar qE}\Big]$$
(7)

式中, $n_i$ 为本征载流子浓度;W为倍增区的宽度; $\tau_{eff}$ 为载流子寿命; $E_g$ 为倍增区的禁带宽度;E和 $E_m$ 分别为电场强度及其最大值; $R_s$ 为寄生电阻。探测器的归一化探测率是评价探测器性能的重要参数,其计算方法为:

$$D^* = \frac{R \sqrt{A\Delta f}}{i_n} \tag{8}$$

式中,A为探测器面积; $\Delta f$ 为探测器工作带宽; $i_n$ 为 探测器的噪声电流,其表达式为: 9)

$$i_n = \sqrt{4qI_Dg_n\Delta f}$$
 (  
式中, g<sub>n</sub> 为噪声增益。

### 4 倍增型 QRIP 仿真结果及分析

采用上述方法对 QRIP 进行了仿真, 仿真过程 中的部分参数如表 1 所示。

表1 QRIP 仿真过程中的部分参数

Tab. 1 Some parameters of QRIP simulation

参数	取值
$\hbar r_{fi}$	2 meV
$\Delta f$	50 Hz
$R_s$	106 kΩ
$N_D$	$5 \times 10^{10}$ cm <sup>-2</sup>
A	$1.25 \times 10 \ \mu m^2$

图 2 为量子环的带间吸收谱仿真结果,仿真过 程中量子环的内径均为 8 nm,高度均为 2 nm,量子 环的外径 *R*。分别设置为 25 nm 和 40 nm。可以看 出,随着量子环外径的增加,量子环的带间吸收峰向 长波方向移动。这是因为量子环外径的增加使得子 能级间距减小,从而可以吸收波长更长的光子。这 种效应可以用来设计一种可调谐的 QRIP,使其能够 工作于长波红外和 THz 波段。另外,增加量子环外 径使得带间吸收谱的峰值降低,这是由洛伦兹展宽 效应引起的,因此在量子环的结构设计中需要综合 考虑以上影响因素。



图 2 量子环的带间吸收谱仿真结果

Fig. 2 The simulation results of absorption coefficiency of quantum ring 图 3 为探测器光谱响应的仿真结果。当温度 为 77 K 时, 探测器的峰值响应度出现在 20 μm 处,其大小为 40 A/W, 大幅高于已有报道的 QRIP 相关结果<sup>[8]</sup>。这说明通过添加倍增区, 大幅提高 了 QRIP 的灵敏度。随着温度的增加, 探测器的峰 值响应度逐渐降低, 这是因为探测器的量子效率 随着温度的升高逐渐降低。图 4 为 77 K 下探测器 的响应度与偏置电压的关系, 可以看出, 探测器的 响应度随着偏置电压的升高逐渐增加。这是因为 电压升高使得雪崩增益逐渐增加,从而提高了探 测器的响应度。



图 环侧锚几届响应时仍具珀术





图 4 77 K 下探测器的响应度与偏置电压的关系

Fig.4 The detector responsivity vs te bias voltage under 77 K 图 5 为探测器暗电流密度的仿真结果。可以看 出,随着温度的升高,探测器的暗电流密度逐渐增加。 探测器工作的起始电压为 19 V,这是因为探测器需要 一定的电压使得有源区完全耗尽。随着偏置电压的 升高,探测器的暗电流密度逐渐增加。探测器的暗电 流密度相比其它 QRIP<sup>[14]</sup>大幅减小,这说明通过添加 双势垒结构达到了抑制探测器暗电流的效果。





图 6 为探测器的归一化探测率仿真结果。可以看出,温度的升高以及偏压的升高都会使得 *D*\*降低,这 主要是因为温度和偏压的升高使得探测器的暗电流增加,影响了探测器的性能。当温度为 77 K,偏压为 19 V 时,探测器的归一化探测率为 2 × 10<sup>10</sup> cm · Hz<sup>1/2</sup>/W。



Fig. 6 The simulation result of the detector normalized detectivity

5 结 论

本文提出了一种将倍增区和量子环吸收层相结合的倍增型 QRIP 结构,并在吸收区添加了 Al<sub>0.3</sub> Ga<sub>0.7</sub>As/In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 双势垒结构对制探测器的暗电流进行。通过建立 QRIP 的数值模型,对 QRIP 的光电特性进行了仿真。仿真结果表明,77 K 时探测器对 20 μm 入射光的响应度为 40 A/W,探测器的暗电流密度相比其他 QRIP 大幅减小,当偏压为 19 V 时,探测器的归一化探测率达到 2 × 10<sup>10</sup> cm · Hz<sup>1/2</sup>/W。倍增型 QRIP 在医学诊断、安全预警、天文观测、夜视成像等领域具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] CHEN Xiao, ZHOU Dong. Development of processing circuit of laser imaging radar based on APD array[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(9):1018 1022. (in Chinese) 陈肖,周东. APD 阵列激光成像雷达处理电路的研究 进展[J]. 激光与红外, 2015, 45(9):1018 1022.
- [2] Das K, Mukherjee S, Manna S, et al. Single Si nanowire based polarization sensitive near-infrared photodetector with ultra-high responsivity[J]. Nanoscale, 2014, 6(19): 11232 - 11239.
- [3] Sakhno M, Gumenjuk-Sichevska J, Sizov F. Modeling of the substrate influence on multielement THz detector operation [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, 35(9):703 – 719.
- [4] Sizov F, Zabudsky V, Dvoretskii S, et al. Two-color detector: Mercury-cadmium-telluride as a terahertz and infrared detector[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(8):

082104.

- [5] Zhou T, Tan Z Y, Gu L, et al. Three-dimensional imaging with terahertz quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. Electronics Letters, 2014, 51 (1): 85-86.
- [6] He J, Luo M, Hu L, et al. Flexible lead sulfide colloidal quantum dot photodetector using pencil graphite electrodes on paper substrates [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 596:73 – 78.
- [7] Karimi M, Abedi K, Zavvari M. Improving the performance of a far-infrared quantum-ring-based photodetector utilizing asymmetric multi-barrier resonant tunneling [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 62:81-85.
- [8] Karimi M, Abedi K, Zavvari M. InAs/GaAs far infrared quantum ring inter-subband photodetector[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2014,7(1):84 - 90.
- [9] Yusefli A, Zavvari M. Modeling of dark current and photoresponse in quantum ring intersubband photodetectors
   [J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47 (7): 2359 – 2369.
- [10] ZHAO Cuilan, GAO Kuanyun. Influence of phonon and magnetic field on property of polaron in quantum ring[J]. Acta Physica Sinica, 2010,7:070. (in Chinese)
  赵翠兰,高宽云. 声子和磁场对量子环中极化子性质 的影响[J]. 物理学报,2010,(7):4857-4862.
- [11] Samadzadeh R, Zavvari M, Hosseini R. Tunable far infrared detection using quantum rings-in-well intersubband photodetectors [J]. Optical and Quantum Electronics, 2015,47(11):3555-3565.
- [12] Li S S,Xia J B. Electronic states of InAs/GaAs quantum ring[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89 (6): 3434-3437.
- [13] Kochman B, Stiff-Roberts A D, Chakrabarti S, et al. Absorption, carrier lifetime, and gain in InAs-GaAs quantum-dot infrared photodetectors [J]. Quantum Electronics, IEEE Journal of, 2003, 39(3):459-467.
- [14] Mir A, Ahmadi V. Design and analysis of a new structure of InAs/GaAs QDIP for 8 – 12 μm infrared windows with low dark current [J]. Journal of Modern Optics, 2009, 56 (15):1704 – 1712.
- [15] Su X, Chakrabarti S, Bhattacharya P, et al. A resonant tunneling quantum-dot infrared photodetector [J]. Quantum Electronics, IEEE, 2005, 41(7):974-979.
- [16] Sugihara K, Yagyu E, Tokuda Y. Numerical analysis of single photon detection avalanche photodiodes operated in the Geiger mode[J]. Journal of applied physics, 2006, 99 (12):124502.