

新型 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器 暗电流特性

史衍丽¹ 邓 军¹ 杜金玉¹ 廉 鹏¹ 高 国¹ 陈建新¹ 沈光地¹ 尹 洁² 吴兴惠³

(1 北京工业大学, 北京光电子技术实验室, 北京 100022)

(2 华北光电技术研究所红外室, 北京 100015)

(3 云南大学物理系, 昆明 650091)

摘要: 对基于 GaAs/AlGaAs 量子阱吸收的一种新型量子阱红外探测器, 采用 Poisson 方程和 Schrodinger 方程, 计算了新器件结构的能带结构、电子分布特性, 在此基础上采用热离子发射、热辅助隧穿模型对器件的暗电流特性进行了模拟, 计算结果与器件实测的暗电流特性吻合得很好, 说明热离子发射、热辅助隧穿机制是形成器件暗电流的主要构成机制, 增加垒高、降低阱中掺杂浓度及降低工作温度是抑制器件暗电流的主要途径, 计算结果对进一步优化器件的设计将起到重要的理论指导作用。

关键词: 新型 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器; 暗电流特性分析

PACC: 7340L; 0762; 0260

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)04-0503-04

1 引言

1987 年美国贝尔实验室首次研制成光电导型 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器(QWIPs)^[1]. 由于利用先进的薄膜生长技术, 通过精确设计材料的能带结构, 从而可获得指定波长的探测器, 加之 GaAs/AlGaAs 量子阱材料本身的优点: 好的热稳定性、抗干扰能力、抗辐射能力、容易获得大面积均匀的材料及成熟的器件工艺, GaAs/AlGaAs QWIPs 在近二十年来得到了迅速发展^[2-4]. 但是 GaAs/AlGaAs QWIPs 器件还存在着量子效率低, 暗电流较大、光谱响应较窄因而黑体探测率低于 HgCdTe 器件的问题^[5,6]. 针对常规 GaAs/AlGaAs QWIPs 存在的不足之处, 我们提出了一种新型 GaAs/AlGaAs QWIPs 新结构. 该器件具有大光电流、超高速响应和低暗电流等特点; 本文利用 Poisson 方程和 Schrodinger 方程对新结构的能带结构、电子分布进行了计算, 并在此基础上采用热离子

发射、热辅助隧穿模型对器件的暗电流特性进行了模拟, 计算结果与器件实测的暗电流特性得到很好吻合, 说明热离子发射、热辅助隧穿机制是形成器件暗电流的主要构成机制; 对暗电流和器件结构参数关系的进一步分析计算表明, 增加垒高、降低阱中掺杂浓度及降低工作温度是抑制器件暗电流的主要途径. 暗电流是构成 GaAs/AlGaAs QWIPs 噪声的主要因素^[2], 因而计算结果对进一步优化器件设计、降低噪声, 提高器件性能将起到重要的理论指导作用。

2 基本方程

2.1 器件基本方程

Poisson 方程:

$$\nabla \cdot \nabla (\epsilon V) = -e(p - n + N_d^+ - N_a^-) \quad (1)$$

式中 ϵ 为介电常数; N_d 、 N_a 为掺杂浓度; n 、 p 为电子、空穴浓度.

Schrodinger 方程:

史衍丽 女, 1969 年出生, 博士, 主要从事光电子材料及器件的研究.

沈光地 男, 1939 年出生, 博士生导师, 从事光电子材料及器件、物理的研究.

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \times \frac{d^2\varphi}{dx^2} + V = E\varphi(x) \quad (2)$$

式中 $\varphi(x)$ 是基态波函数; V 是整个区域的势能分布, 即导带底.

2.2 暗电流特性方程

常规 GaAs/AlGaAs QWIPs 的暗电流形成机制主要有: 与温度有关的热辅助隧穿、热离子发射和与温度无关的场辅助隧穿^[2,3,7], 场辅助隧穿是阱间低束缚能态间的隧穿, 与温度关系微弱, 在低于 50K 的温度下才能观察到, 在 77K 温度下可忽略其贡献. 考虑通过热激活构成的热辅助隧穿、热离子发射机制, 暗电流可写为:

$$I_d = eA_D v_d n_i \quad (3)$$

式中 A_D 为器件面积; n_i 、 v_d 为可动载流子浓度及相应的平均漂移速度, 可动载流子浓度 n_i 为

$$n_i = \frac{1}{L_p} \int_{E_1}^{\infty} T(E, V_1) f(E) \rho(E) dE \quad (4)$$

式中 L_p 为器件的周期长度; $f(E)$ 为费密因子; $\rho(E)$ 为对应于一个周期长度内的二维态密度; $T(E, V_1)$ 为电子以能量 E 在外加偏置为 V_1 时穿过宽度为 L_B 的势垒的投射系数.

采用 Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) 近似, 投射系数 $T(E, V_1)$ ^[6] 为:

当 $E_0 < E < \Delta E - eV_1$ 时

$$T_{\text{WKB}}(E, V_1) = \exp \left\{ -\frac{4}{3eV_1} \sqrt{\frac{2m_B^* L_B^2}{\hbar^2}} \right. \\ \left. \times [(\Delta E - E)^{3/2} - (\Delta E - E - eV_1)^{3/2}] \right\} \quad (5)$$

当 $\Delta E - eV_1 < E < \Delta E$ 时

$$T_{\text{WKB}}(E, V_1) = \exp \left\{ -\frac{4}{3eV_1} \sqrt{\frac{2m_B^* L_B^2}{\hbar^2}} \right. \\ \left. \times [(\Delta E - E)^{3/2}] \right\} \quad (6)$$

式中 E_0 为阱中基态能量; ΔE 为 GaAs、AlGaAs 带隙差构成的势垒高度; m_B 、 L_B 分别为垒区的有效质量及宽度.

3 实验

利用 AIXTRON-200 LP-MOCVD 设计生长了一个周期和十个周期的器件, 器件结构参数为: 采用碳和硅作为 p 型、n 型掺杂剂, p^+ GaAs、 n^+ GaAs 掺杂浓度分别为: $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 和 10^{20} cm^{-3} . p^+

GaAs、 n^+ GaAs 和 $i \text{ Al}_x \text{ Ga}_{1-x} \text{ As}$ 的宽度分别为 10、30 和 50nm, Al 组分值 $x = 0.45$; 采用二次离子质谱仪(SIMS)对十个周期的结构进行了测试分析, 测试结果如图 1 所示, 从图中可看到 Al、Ga、As、Si 元素呈十个规则排列的周期峰, 并与相同掺杂条件下生长材料的 $C-V$ 测试结果比较, 表明获得了设计的结构. 图中由于仪器对 C 元素的检测灵敏太低所致, C 元素峰较弱.

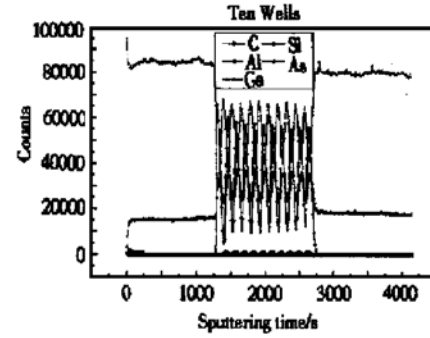


图 1 十个阱的器件的 SIMS 测试结果

FIG. 1 SIMS Measurement of Novel GaAs/AlGaAs QWIPs with Ten Wells

通过光刻和湿法腐蚀工艺制成 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 的台面形式单管, 蒸发 AuGe/Ni 合金并在适当条件下退火以形成欧姆接触, 在 77K 温度下利用 HP4145B 参数仪进行暗电流特性测试.

4 计算结果及分析

4.1 器件电子能带结构

利用上述 Possion 方程和 Schrodinger 方程, 采用有限差分的方法^[8], 对一个周期的器件结构 p^+ GaAs- n^+ GaAs- $i \text{ Al}_x \text{ Ga}_{1-x} \text{ As}$ 的能带及电子分布进行了数值计算, 计算结果如图 2 所示. 从图中可看到, 左边重掺杂 p^+ GaAs 结形成了 1.546eV 的势垒, 右边由于 GaAs、AlGaAs 带隙差形成了 0.376eV 的势垒, 对电子而言构成了一个较深的电子势阱, 通过控制阱宽及 Al 含量值可控制量子化电子能级的位置, 从而得到不同波段的光谱响应.

4.2 暗电流特性

采用上述方程式(3)~(6)构成的热电子发射、热辅助隧穿模型, 对所设计的一个阱及十个阱的器件暗电流进行了模拟计算, 计算与实际测量的结果

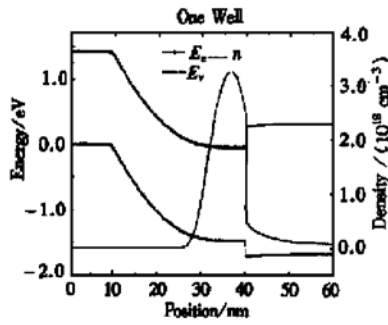


图2 器件能带结构及电子分布

FIG. 2 Energy Band and Electron Density for Single Well Device

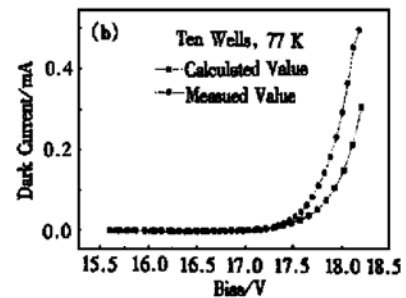
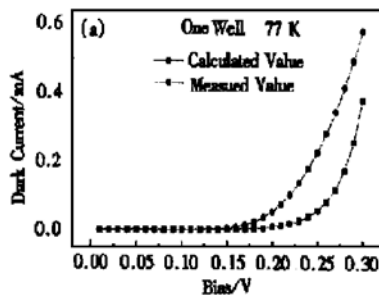


图3 器件暗电流测试及计算结果 (a) 一个阱; (b) 十个阱

FIG. 3 Comparison of Measurement and Calculated Results of Dark Current for Devices Under 77K (a) with One Well; (b) with Ten Wells

垒高度及阱中掺杂浓度的关系, 计算结果以自然对数坐标给出, 见图 4(a)、(b) 和 (c)。

从图(4)中可看到, 随着提高势垒高度、降低阱中掺杂浓度, 暗电流呈指数关系降低; 在低偏置情况下, 以热离子发射为器件暗电流的主要构成机制时, 暗电流和温度也成较好的指数关系, 随着温度升高, 暗电流指数下降; 因此上述计算结果表明, 提高势垒高度、降低阱中掺杂浓度及降低器件工作温度是抑制器件暗电流、提高器件性能的主要途径。

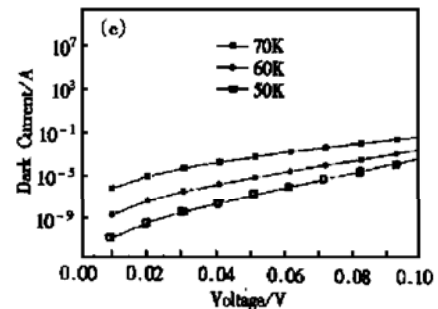
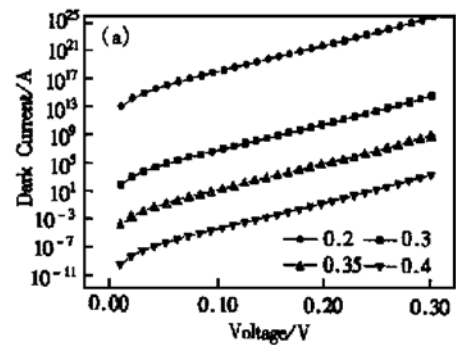
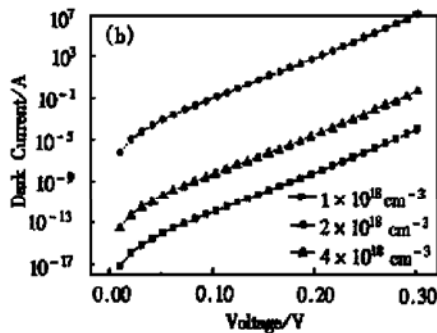


图4 一个阱的器件暗电流与器件工作温度、势垒高度及阱中掺杂浓度的关系 (a) 势垒高度; (b) 阱中掺杂浓度; (c) 器件工作温度
FIG. 4 Dependence of Dark Current of Device with One Well on Parameters (a) Barrier Height; (b) Doping Density in Well; (c) Temperature

5 结论

(1) 利用 Poisson 方程和 Schrodinger 方程对所设计的新型 GaAs/AlGaAs QWIPs 的能带结构、电子分布进行了计算;

(2) 采用热离子发射、热辅助隧穿模型对器件的暗电流特性进行了模拟, 计算结果与器件实测的暗电流特性吻合得很好, 说明热离子发射、热辅助隧穿机制是器件暗电流的主要构成机制; 对暗电流和器件结构参数关系的进一步分析计算表明, 增加垒高、降低阱中掺杂浓度及降低工作温度是抑制器件暗电流的主要途径; 计算结果对优化器件的设计起到了重要的理论指导作用。

致谢 特别感谢北京市光电子技术实验室工作人员韩金茹、董欣、刘莹、王丽森等在器件制备过程中给予的大力协助。

参考文献

- [1] B. F. Levine, K. K. Choi *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**: 1092.
- [2] B. F. Levine, J. Appl. Phys., 1993, **74**: 1.
- [3] M. O. Manasreh, Semiconductor Quantum Wells and Superlattice for Long-Wavelength Infrared Detectors, Artech House, Boston London, 1993.
- [4] Li Jinmin, Zheng Haiqun, Zeng Yiping *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 1995, **16**(1): 48 (in Chinese) [李晋闽, 郑海群, 曾一平, 等, 半导体学报, 1995, **16**(1): 48].
- [5] Chen Zheng-Hao and Wang Yu-Tang, Journal of Optoelectronics • Laser, 1993, **4**: 193 (in Chinese) [陈正豪, 王玉堂, 光电子 • 激光, 1993, **4**: 193].
- [6] Chen Shi-Da, Infrared Technology, 1990, **13**: 10 (in Chinese) [陈世达, 红外技术, 1990, **13**: 10].
- [7] S. R. Andrews and B. A. Miller, J. Appl. Phys., 1991, **70**: 993.
- [8] Mark S. Lundstrom and R. J. Schukla, IEEE Transactions on Electronics Devices, 1983, **ED-30**: 1151.

Analysis of Dark Current Characteristic of Novel GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Photodetectors

SHI Yan-li¹, DENG Jun¹, DU Jin-yu¹, LIAN Peng¹, GAO Guo¹, CHEN Jian-xin¹,
SHEN Guang-di¹, YIN Jie² and WU Xing-hui³

(1 Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China)

(2 North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

(3 Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: A new type of GaAs/AlGaAs quantum well Infrared photodetectors has been proposed. The electronic energy-band structure and the distribution of electrons in the well have been numerically calculated based on the Poisson Equation and the Effective Mass Equation. Dark current characteristics of the devices with one well and ten wells are simulated, respectively, by a model, considering the thermionic emission and thermally assisted tunneling in the Wentzel-Kramers-Brillouin approximation. The influences of the key parameters, including barrier height, doping concentration in the well and temperature on the dark current, have been further analyzed based on this model. In consequence, the dark current can be greatly reduced by increasing the barrier height or decreasing the doping in the well and the temperature.

Key words: novel GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetectors; analysis of dark current characteristics

PACC: 7340L; 0762; 0260

Article ID: 0253-4177(2001)04-0503-04

SHI Yan-li female, Ph. D, born in 1969, her current interest is semiconductor optoelectronic.

SHEN Guang-di professor, born in 1939, director of doctoral student, his current research interest is physics and device of semiconductor heterojunction and semiconductor optoelectronics.

Received 11 March 2000, revised manuscript received 12 July 2000

©2001 The Chinese Institute of Electronics