

文章编号:1001-9014(2006)05-0333-05

128 × 1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的研究

吕衍秋^{1,3}, 徐运华^{1,3}, 韩冰^{1,3}, 孔令才¹, 亢勇^{1,3},
庄春泉^{1,3}, 吴小利^{1,3}, 张永刚², 龚海梅¹

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:报道了用分子束外延(MBE)方法生长的掺杂 InGaAs 吸收层 PIN InP/InGaAs/InP 双异质结外延材料,通过干法刻蚀和湿法腐蚀相结合制作台面、硫化及聚酰亚胺钝化、电极生长等工艺,制备了 128 × 1 台面正照射 InGaAs 探测器阵列.测试了器件的变温 $I-V$ 响应光谱和探测率,在 278K 时平均峰值探测率为 $1.03 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$. 实现了 128 元 InGaAs 探测器阵列与 CTIA 结构 L128 读出电路相互连,经封装后,在室温(291K)时成功测出 128 元响应信号.焦平面响应的不均匀性为 18.3%,并对不均匀性产生的原因进行了分析.

关键词:探测器;焦平面;InGaAs;钝化

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A

STUDY ON 128 × 1 ELEMENT LINEAR InGaAs SHORT WAVELENGTH INFRARED FOCAL PLANE ARRAY

LV Yan-Qiu^{1,3}, XU Yun-Hua^{1,3}, HAN Bing^{1,3}, KONG Ling-Cai¹, KANG Yong^{1,3},
ZHUANG Chun-Quan^{1,3}, WU Xiao-Li^{1,3}, ZHANG Yong-Gang², GONG Hai-Mei¹

- (1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on doped-InGaAs absorbing layer in MBE-grown p-InP/n-InGaAs/n-InP double-heterostructure epitaxial materials, 128 × 1 front-illuminated mesa InGaAs detector arrays were made with the techniques of mesa-making by dry and wet etching, passivation by sulfidation and polyimide, growth of electrode and so on. $I-V$ curves, response spectra and detectivity of the devices were measured. The mean peak detectivity of the detectors is $1.03 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ at 278K. 128 element InGaAs detector arrays are connect with CTIA-structure L128 read out integrate circuits. The response signals of the 128 elements were successfully measured at room temperature (291K) after packaged. The ununiformity of response is 18.3%, and the reasons of the ununiformity are discussed.

Key words: detector; focal plane array; InGaAs; passivation

引言

InGaAs 红外焦平面在有效工作波长范围 0.5 ~ 2.5 μm , 具有高的量子效率和灵敏度^[1]; R_0A 值要高出 HgCdTe 的 1 ~ 2 数量级, 信噪比可提高 3 ~ 10 倍, 可实现室温 (1.7 μm) 热电温差制冷工作^[2]; 成熟的 MBE 和 MOCVD 技术也提供了可靠的批量生

产的技术, InGaAs 比 HgCdTe 更容易生长, 并且 III-V 族衬底具有较高质量和比较坚固的性能. 因此, InGaAs 红外焦平面在航天遥感、医学成像、精确武器制导、红外报警与识别、侦察与监视等领域有广泛的应用前景. 目前, 美国传感器无限公司在 InGaAs 探测器的研究方面处于世界领先地位, 已研制成功 640 × 480 焦平面. InGaAs 红外焦平面在空间遥感的

收稿日期: 2005-12-12, 修回日期: 2006-06-22

Received date: 2005-12-12, revised date: 2006-06-22

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50632060); 国防预研项目

作者简介: 吕衍秋(1978-), 男, 山东汶上人, 中科院上海技术物理研究所博士生, 主要从事短波红外探测器的研究.

应用国外也起步较早,如法国的 SPOT4 和 SPOT5 卫星上采用了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面^[3];欧洲空间局(ESA)新一代的环境卫星(ENVI-SAT)上采用了 1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面. 因为 InGaAs 探测器有效探测波段都在 HgCdTe 探测器的探测范围内,所以国内目前在近红外波段还是以 HgCdTe 探测器为主^[4]. 随着系统灵敏度的提高,对红外探测器的性能要求越来越高,国内开始注意并发展 InGaAs 红外焦平面,但目前还处于起步阶段.

InGaAs 线列和面阵焦平面多采用背照射 Zn 扩散平面结探测器,但是存在扩散工艺复杂和光敏面扩大等问题^[5],本文报道了用分子束外延(MBE)方法生长原位掺杂的 PIN InP/InGaAs/InP 外延材料,通过干法刻蚀和湿法腐蚀相结合制作台面、硫化化和聚酰亚胺钝化新工艺,制备了 128 × 1 正照射台面 InGaAs 焦平面,工艺较为简单和稳定. 并对器件及焦平面进行了测试和分析.

1 实验

InGaAs 台面探测器的结构如图 1 所示, p-InP/n-InGaAs/n-InP 结构是用分子束外延技术在 2 英寸 InP 半绝缘衬底上依次生长厚度为 1 μm 掺 Si 的 n-InP 缓冲层, $n \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$; 厚度为 2.5 μm 并且与 InP 晶格匹配掺 Si 的 n-In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层, $n \approx 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$; 厚度为 0.5 μm 掺 Be 的 p-InP 窗口层, $p \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 表面和侧面有 2 μm 聚酰亚胺钝化层, p 型和 n 型接触电极都为 Ti/Pt/Au.

外延片经过清洗,结合材料性质及干法刻蚀和湿法腐蚀的优点,我们先用 Ar⁺ 刻蚀 p-InP 窗口层,再用酒石酸/H₂O₂/H₂O 腐蚀液腐蚀 InGaAs 层,这样即提高光敏面的图形保真度,又减小 InGaAs 吸收层侧面损伤,腐蚀后的台面扫描电镜图如图 2 所示. 从图中可以看出,台面完好,钻蚀很小. 然后在恒温

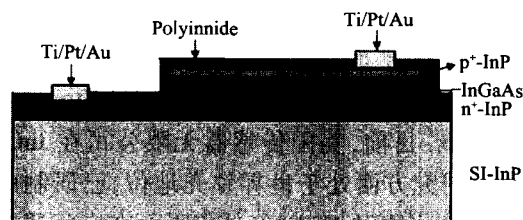


图 1 InGaAs 台面探测器结构示意图
Fig. 1 Schematic illustration of the mesa InGaAs detector structure

60℃ 的 (NH₄)₂S 溶液中硫化 30 分钟,去掉表面氧化层,并覆盖 2 μm 聚酰亚胺钝化膜,聚酰亚胺可以起到很好的钝化作用,可以增加探测器的量子效率和减小暗电流. 在 n 型和 p 型电极孔处同时生长 Ti/Pt/Au,厚度分别为 200/300/3000 Å,然后 300℃ 退火 5 分钟,该电极与 n-InP 是非常好欧姆接触,与 p-InP 接触电阻较大,实验证明,对器件性能影响不大.

图 3 为 InGaAs 线列探测器照片,中间为共用电极,两侧各有 128 元探测器,光敏元面积为 60 × 300 μm²,元间距为 40 μm. 我们选取一片线列 InGaAs 探测器封于杜瓦中连续抽测相邻 10 元的 I-V 曲线、响应光谱、信号和噪声. 另取一片与读出电路芯片置入 28 脚双列直插式管壳中,用金丝一一互连,按一定定义用硅铝丝将芯片键压连接至各管脚,如图 4 所示. 然后用 Pulse Instruments 4000 系统测试焦平面的信号响应,红外光源由 900K 黑体提供.

2 结果与讨论

2.1 变温 I-V 及响应光谱测试

用 Keithley236 I-V 测试仪测试了 128 元其中 1 元 InGaAs 探测器的变温曲线,器件封装在变温杜瓦

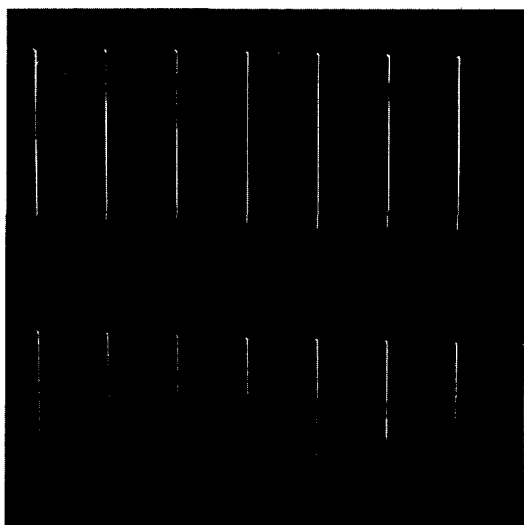


图 2 腐蚀后台面的扫描电镜图
Fig. 2 Figure of the mesa by SEM after etching



图 3 128 元线列 InGaAs 探测器照片
Fig. 3 Photograph of 128 element linear InGaAs detector array

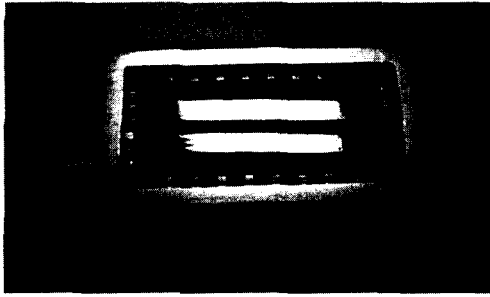


图 4 128 元 InGaAs 探测器与读出电路连接封装后的照片

Fig. 4 Photograph of 128 element InGaAs detector array connected with ROIC after package

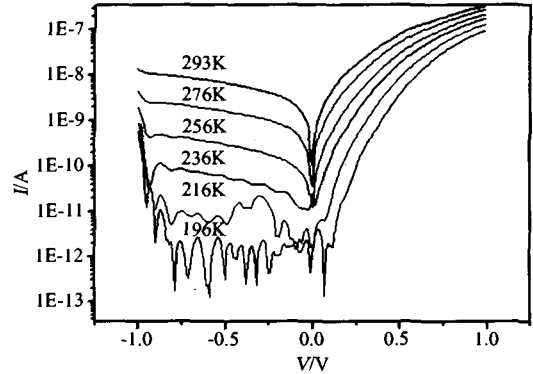


图 5 InGaAs 探测器在不同温度下的 $I-V$ 曲线
Fig. 5 $I-V$ curves of InGaAs detector at different temperature

中,由液氮控制温度,测试电压范围 $-1 \sim 1V$,变温范围在 $96 \sim 296K$,温度每升高 $20K$,测量一次.由于低于 $196K$ 暗电流小于仪器测试量程,图 5 中只列出 $196 \sim 296K$ 的测试结果,从图中可以看出,随着温度的降低,由于在基区的扩散电流和空间电荷区的产生-复合电流减小,暗电流逐渐降低,零偏压电阻(R_0)和优值因子(R_0A)增大, A 为光敏元面积.从正向偏压 $I-V$ 可以看出,温度降低,器件的开启电压逐渐增大.适当的低温能减小器件的暗电流,提高器件的性能,特别是在半导体制冷器范围内具有重要的意义.一般受热噪声限制的光伏型红外探测器的探测率可表示为:

$$D_{\lambda}^* = \frac{q\eta\lambda}{hc} \sqrt{\frac{R_0A}{4kT}} \quad (1)$$

式中 D_{λ}^* 为在波长(λ)处探测率; q 为电子电量; η 为量子效率; h 为 Planck 常数; c 为光速; k 为 Boltzmann 常数; T 为结的温度.一般来讲 R_0A 值越大,探测率越高.从 $296K$ 到 $216K$, R_0A 值从 $6.68 \times 10^5 \Omega cm^2$ 增加到 $1.48 \times 10^6 \Omega cm^2$.但是并非温度越低,探测率就一定增大,在 $85K$ 测试探测器信号电压时,噪声非常大,这与低温下的欧姆接触,噪声产生机理等因素有关.用 NICOLET 红外光谱仪测试了探测器的短波响应光谱,掺杂 InGaAs 和非掺杂 InGaAs 探测器响应波段一样,室温截止波长(λ_c)为 $1.7\mu m$.

2.2 探测率测试

把 128 元线列探测器封装在杜瓦瓶中,抽真空,抽取相邻 10 元测试了 $291K$ 和 $278K$ 两个温度的零偏压电阻、暗电流(I_D)、响应光谱、信号电压(V_s)和噪声电压(V_n).虽然温度降低 $13K$,零偏压电阻平均增加 1 倍多(如图 6a),暗电流降低一个数量级(如图 6b).由于响应光谱的稍微变化, g 因子却减小,

平均值由 96.43 降到 79.59 (如图 6c).峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 由以下公式得出:

$$D_{\lambda_p}^* = gD_{bb}^* = \frac{2\sqrt{2}\pi L^2 V_s \sqrt{\Delta f}}{V_n \sigma \epsilon (T_B^4 - T_0^4) A_B \sqrt{A}} \quad (2)$$

式中 D_{bb}^* 为黑体探测率, $2\sqrt{2}$ 为调制因子, L 为黑体和探测器距离, Δf 为频率带宽, σ 为斯忒藩常数, ϵ 为黑体比辐射率, T_B 为黑体温度, T_0 为调制盘温度, A_B 为黑体出射孔面积.降温后,由于信号的增加和暗电流的减小,峰值探测率平均增加了 $3.09 \times 10^{11} cmHz^{1/2} W^{-1}$ (如图 6d),在 $278K$ 时,平均峰值探测率为 $1.03 \times 10^{12} cmHz^{1/2} W^{-1}$.

2.3 线列焦平面测试

采用的 L128 读出电路是为实现探测器响应信号的顺序读出而设计制作的,可提供低噪声前置放

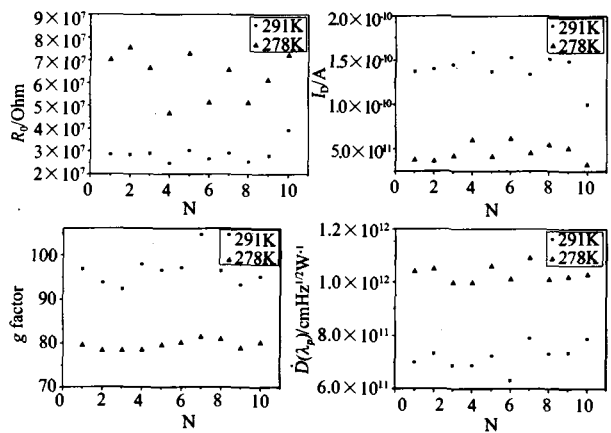


图 6 相邻 10 元 InGaAs 探测器分别在 $291K$ 和 $278K$ 时的性能 (a) 零偏压电阻 (b) 暗电流 (c) g 因子 (d) 峰值探测率

Fig. 6 Characters of ten neighbor InGaAs detector at $291K$ and $278K$ respectively (a) the shunt resistances (b) the dark currents (c) the g factors (d) the peak detectivity

大和多路传输. 其原理主要是: 电路在设定的积分时间(t_{int})内对光敏感元产生的光电流信号进行积分并转换成电压信号, 积分电容(C_{int})为 1pF, 开始脉冲起始扫描过程, 并将储存的电荷信号经采样, 差分放大和多路传输后顺序输出, 扫描结束时给出 EOS 信号. CTIA 结构读出电路的单元电路原理图如图 7 所示. 由于芯片采用较低的输入偏置(仅为毫伏量级), 因此本读出电路适用于光伏器件, 要求较小的积分时间. 该芯片主要包括低噪声前置放大器、相关双采样电路、移位寄存器等. 低噪声前置放大器又称为电容反馈互阻抗放大器 (CTIA), 其输入端与行列探测器芯片耦合, 工作于运放积分模式, 将相应的光电流信号积分后输出. 测试短波红外光源是温度为 900K 的黑体, 封装后的管壳放在屏蔽盒中, 环境温度为 291K, 用 Pulse Instruments 4000 系统测试焦平面的信号响应, 积分时间 400 μ s, 每一元读出时间为 20 μ s. 焦平面中每元探测器的响应电压(V_{res})为参考电压(V_{ref})和信号输出电压(V_{out})的差, 128 \times 1 InGaAs 焦平面响应直方图如图 8 所示, 没有死像元, 不均匀性为 18.3%. 根据公式:

$$V_s = \frac{I_{ph} t_{int}}{C_{int}}, \quad (3)$$

$$V_s = \frac{V_{ref}}{0.606} - \frac{V_{out}}{0.55}, \quad (4)$$

$$R_{\lambda_p} = gR_{bb} = \frac{\pi g V_s L^2}{\sigma \epsilon (T_B^4 - T_0^4) A_B A}, \quad (5)$$

式中 V_s 为积分电压, I_{ph} 为探测器感生电流, R_{λ_p} 为峰值相应率, R_{bb} 为黑体相应率, 0.606 和 0.55 为源极跟随器电压增益, 计算出焦平面在 291K 时平均峰值响应率为 0.35A/W. 探测器的理论相应率(R_i)为^[6]:

$$R_i = \frac{\lambda \eta}{hc} q g_0, \quad (6)$$

式中 η 为量子效率, g_0 为光电增益. 对于光伏型探测器 g_0 取 1, 在 291K 时峰值波长 1.435 μ m 处, 量子效率取 80% 时, 理论响应率的最大值为 0.928A/W. 焦平面平均响应率与探测器实际响应率相比较小, 我们认为探测器和电路耦合及测试的影响较大.

2.4 不均匀性产生原因分析

128 \times 1 InGaAs 焦平面响应不均匀性为 18.3%, 距使用要求还有一定距离. 不均匀性产生的原因, 其中包括光敏元面积的不均匀性, 电路的电容、增益和偏压的不均匀性, 黑体光源的不均匀性(测试所用的是点光源, 不是面光源). 但我们认为

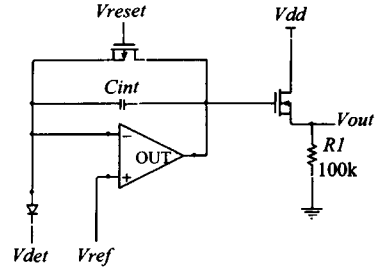


图 7 CTIA 结构单元电路原理图
Fig. 7 Schematic of a capacitive transimpedance amplifier unit cell

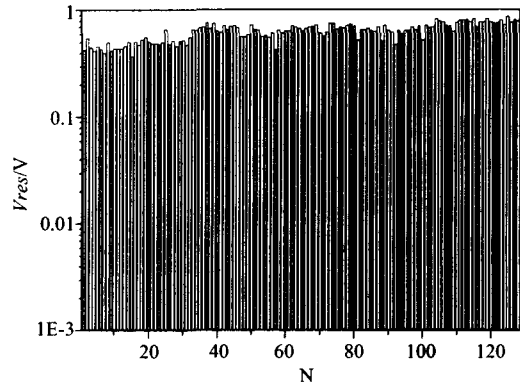


图 8 128 \times 1 InGaAs 焦平面响应直方图
Fig. 8 The histogram of the response of the 128 \times 1 element InGaAs FPA

产生不均匀性的主要原因是外延材料的不均匀性和钝化效果的影响. 外延材料的不均匀性主要包括: 各层外延厚度、In/Ga 比和掺杂浓度的不均匀. 我们用微波反射光电导衰减法 (μ -PCD) 在 300K 测试了 22 \times 35mm² 外延片 p-InP/n-InGaAs/n-InP 异质结的寿命分布图. 图 9 为 300K 时寿命分布图及各段寿命的百分比, 平均寿命为 168.2 ns. 寿命为 InGaAs 吸收层的体寿命, 寿命分布图可以表征 InGaAs 层材料的均匀性. 图中清晰的表明寿命分布, 寿命大部分在 118.85 到 119.11ns 之间, 也有少部分寿命大于 250ns, 表明 MBE 生长均匀的 p-InP/n-InGaAs/n-InP 外延层, 还有一定的挑战性.

3 结论

我们用分子束外延 (MBE) 方法生长的掺杂 InGaAs 吸收层 PIN InP/InGaAs/InP 双异质结外延材料, 制备了 128 \times 1 台面正照射 InGaAs 探测器阵列, 并与 CTIA 结构 L128 读出电路相连接形成焦平面, 测试了器件的变温 I-V, 响应光谱和探测率. 在 278K, 探测器平均峰值探测率为 1.03 \times 10¹² cmHz^{1/2}

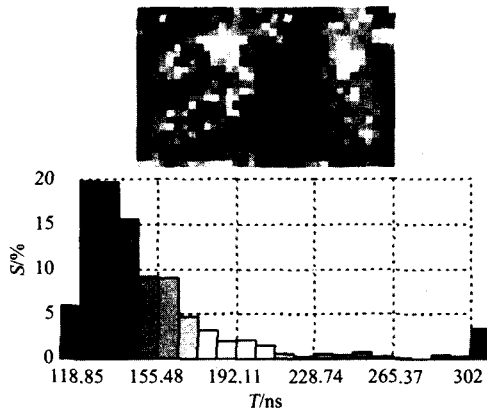


图9 300 K 时 p-InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结中寿命 T 分布图

Fig. 9 The lifetime map and distribution in p-InP/n-InGaAs/n-InP DH at 300 K

W^{-1} , 焦平面响应的不均匀性为 18.34%。我们认为外延材料的不均匀性和钝化效果是引起响应不均匀性的主要原因, 所以必须进一步提高材料的均匀性, 并且改进器件的钝化效果, 尤其是台面的侧面钝化。

(上接 332 页)

以及入射光波长和强度等参数相关, 定量地确定它们之间的关系需要进一步的研究。

3 结论

本文在理论上验证了在平面结型 MCT 焦平面阵列上应用微透镜的可行性, 提出了微透镜结构参数的设计思路。根据该设计思路设计了组分为 0.22 的 MCT 三元阵列的微透镜结构, 并利用器件模拟软件对 4 种不同结构的器件进行了光响应模拟计算。设计计算结果与模拟计算结果定性地给出了一致的结论。理论上证明了微透镜的设计能增大器件的光响应率, 同时大大降低了元与元之间的光串音。模拟计算结果表明, 少数寿命为 10ns 时, 经优化设计后的结构获得了更为优越的性能, 相比未经任何修改的结构, 光响应率提高了 9.6%, 而光串音则从 5.23% 减小到 1.05%。随少数寿命的增加, 光串音增大; 优化结构减小光串音的效果稍稍有所降低。少数寿命为 10ns 时, 优化后的结构 (a) 的光串音为未优化结构 (b) 的 20%; 而少数寿命为 100ns 时, 则上升到 25.7%。

致谢 感谢上海新思科技公司袁海江博士和夏仲平

REFERENCES

- [1] ZHANG Yong-Gang, GU Yi, ZHU Cheng, *et al.* Fabrication of short wavelength infrared InGaAs/InP photovoltaic-detector series [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张永刚, 顾溢, 朱诚, 等. 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1): 6—9.
- [2] Kozlowski L J, Tennant W E, Zandian M, *et al.* SWIR staring FPA performance at room temperature [J]. *SPIE*, 1996, **2746**: 93—100.
- [3] Moy J P, Hugon X, Chabbal J, *et al.* 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for the spot 4 SWIR channel [J]. *SPIE*, 1989, **1107**: 137—151.
- [4] JIA Jia, CHEN Gui-Bin, GONG Hai-Mei, *et al.* Study on the junctions of SWIR HgCdTe photo diodes at room temperature with laser beam induced current [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (贾嘉, 陈贵宾, 龚海梅, 等. 室温短波碲镉汞结区的 LBIC 方法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1): 11—14.
- [5] Olsen G H, Joshi A M, Mykiety E, *et al.* Room-temperature InGaAs arrays for 1.0—1.7 μm [J]. *SPIE*, 1989, **1107**: 188—193.
- [6] Zemel A, Gallant M. Carrier lifetime in InP/InGaAs/InP by open-circuit voltage and photoluminescence decay [J]. *J. Appl. Phys.*, 1995, **78**: 1094—1099.

博士在软件应用上给予的帮助和指导。

REFERENCES

- [1] YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, ZHANG Hai-Yan, *et al.* Study of dark current for mercury cadmium telluride long-wavelength photodiode detector with the different structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 胡晓宁, 张海燕, 等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(2): 96—90.
- [2] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Ning *et al.* Study of HgCdTe p^+ -on-n long-wavelength heterojunction detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 碲镉汞 p^+ -on-n 长波异质结探测器的研究. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(5): 423—426.
- [3] Antoni Rogalski. Infrared detectors; status and trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27**: 59—210.
- [4] Kozlowski LJ, Vural K, Luo J, *et al.* Low-noise infrared and visible focal plane arrays [J]. *Opto-Electronics Review*, 1999, **7**: 259—269.
- [5] Jozwikowska A, Jozwikowski K. Generation-recombination effects on dark currents in CdTe-passivated midwave infrared HgCdTe photodiodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**: 014504.
- [6] Lopes VC. Minority carrier lifetime in mercury cadmium telluride [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**: 824—841.
- [7] Ashok Sood, Jim Egerton, Yash Puri, *et al.* Design and development of multi-color detector arrays [J]. *SPIE*, 2004, **5564**: 27—33.