正照射延伸波长 $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ 红外焦平面探测器

邓洪海[1],杨 波[2],邵海宝[1],王志亮[1],黄 静[1],李 雪[2],龚海梅[2]

(1. 南通大学 电子信息学院,江苏 南通 226019;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料和器件重点实验室,上海 200083)

摘 要: 为了研究延伸波长 $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ PIN 短波红外探测器的温度响应光电特性,采用闭管扩散的平面型器件工艺,在金属有机化学气相外延(MOCVD)外延生长的 NIN 型 $InAs_{0.6}P_{0.4}/In_{0.8}Ga_{0.2}As/InAs_{0.6}P_{0.4}$ buf./InP 材料上制备了正照射延伸波长 256×1 线列 InGaAs 红外焦平面探测器,研究了探测器在不同温度下的 I-V 特性、光谱响应特性和探测率。结果表明,随着温度的降低,在小偏压下,器件的正向暗电流由产生复合电流为主逐渐变为以扩散电流为主。在 260~300 K 温度范围内,反向电流主要由扩散电流和产生复合电流组成,当温度低于 180 K 时,器件的反向电流主要为隧穿电流。室温下器件响应截止波长和峰值波长分别为 2.57 μm 和 2.09 μm,峰值探测率为 7.25×10^{8} cm·Hz$^{1/2}$/W,峰值响应率为 0.95 A/W,量子效率为 56.9%。焦平面的峰值探测率在 153 K 达到峰值,约为 1.11×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$/W,响应非均匀性为 5.28%。

关键词: 延伸波长; InGaAs; 红外焦平面; 变温

中图分类号: TN362; TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0504004

Extended-wavelength $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ IRFPA detector arrays for front-illumination

Deng Honghai[1], Yang Bo[2], Shao Haibao[1], Wang Zhiliang[1], Huang Jing[1], Li Xue[2], Gong Haimei[2]

(1. School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to study the temperature-dependent photoelectric characteristics of the extended wavelength $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ PIN infrared detectors, based on planer process with sealed-ampoule diffusion method, front-illuminated 256×1 linear planar InGaAs detector arrays were fabricated on NIN-$InAs_{0.6}P_{0.4}/In_{0.8}Ga_{0.2}As/InAs_{0.6}P_{0.4}$ buf./InP materials by metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). And the I-V characteristics, spectral response and detectivity of the detector at different temperatures were analyzed. The results indicate that the forward dark current is dominated by the generation-recombination current and gradually becomes the diffusion current with temperature dropping. Diffusion current and generation-recombination current were the main resource of reverse current of the detector between 260 K and 300 K. The tunneling current predominated at temperature below 180 K. The cutoff wavelength and

收稿日期: 2017-12-13; **修订日期:** 2018-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61505090);南通市科技项目(GY12015010, GY12016024);江苏省六大人才项目(2016-XCL-052, 2013-XCL-013);南通智能信息技术联合研究中心开放课题基金(KFKT2016A05);江苏省高校自然科学基金(15KJB150023);江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA470007)

作者简介: 邓洪海(1986-),男,讲师,博士,主要从事红外光电探测器技术方面的研究。Email: denghonghai@ntu.edu.cn

通讯作者: 王志亮(1978-),男,副教授,博士,主要从事光电通信技术方面的研究。Email: wangzl@ntu.edu.cn

peak wavelength were 2.57 μm and 2.09 μm at room temperature. The peak detectivity, peak responsivity and quantum efficiency was 7.25×10^{8} cm·$Hz^{1/2}$/W, 0.95 A/W and 56.9% respectively. Furthermore, the average peak detectivity of the detector arrays reached a peak value of 1.11×10^{11} cm·$Hz^{1/2}$/W and the response nonuniformity was about 5.28% at 153 K.

Key words: extended-wavelength; InGaAs; IRFPA; temperature-dependent

0 引 言

1~3 μm 的短波红外波段包含重要的大气窗口,同时覆盖了很多物质的特征吸收谱,例如 CO_2、H_2S、N_2O 等，因此短波红外探测器在航天遥感、微光夜视、军事侦察、空间天文等领域有重要需求[1-2]。三元化合物 $In_{1-x}Ga_xAs$ 半导体材料为直接带隙结构,电子迁移率高,具有很好的材料稳定性及良好的抗辐照性能，具有更成熟的材料生长和器件工艺技术可以利用。在众多红外波段的探测器中,InGaAs 探测器可在相对较高温度下仍有良好的性能，具有可靠性好、量子效率高、响应速度快、近室温工作、与常用可见光光学兼容等特点,有较大的优势,因此可以期望探测器具有更佳的表现[3-4]。

与 InP 衬底晶格常数相匹配的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 探测器长波方向的响应截止波长为 1.7 μm,这种波长的器件广泛应用于光纤通讯领域，但在很多实际应用中,为了实现对目标信息更为丰富的探测,需要探测器的截止波长向长波扩展，比如探测农产品水分需要 1.9 μm 的探测器,“LIDRA” 系统中需要 2.05 μm 的探测器等等。通过调整 $In_{1-x}Ga_xAs$ 中 In 的组分,其禁带宽度在 0.35~1.43 eV 范围内变化，可覆盖 1~3 μm 的短波红外波段[5]。增加 In 组分使 $In_{1-x}Ga_xAs$ 材料响应截止波长向长波方向延伸是一大发展趋势,但由于 $In_{1-x}Ga_xAs$ 材料与 InP 衬底晶格不匹配，会导致生长的外延层中包含大量的缺陷，增加了复合中心,这将会严重降低探测器的光电性能。因此,为了保证较好的材料质量从而实现探测器性能优化,就必须引入合适的晶格缓冲层结构以释放界面应力,阻止位错扩展到 InGaAs 吸收层。$In_{1-x}Ga_xAs$ 延伸波长探测器可以在室温工作，或者在热电制冷的近室温下工作,因此,研究探测器的光电性能特别是光电性能的温度响应特性很有必要。

InGaAs 探测器可以采用正面照射和背面照射两种探测方式，文中采用标准的正照射平面型 InGaAs 制备工艺，以 Zn_3As_2 为扩散源进行闭管热扩散，在 MOCVD 外延生长的 NIN 型 $InAs_{0.6}P_{0.4}$/$In_{0.8}Ga_{0.2}As$/$InAs_{0.6}P_{0.4}$ buf./InP 材料上制备了延伸波长 256×1 线列 InGaAs 光敏芯片，采用金丝将芯片与读出电路键压互连形成了焦平面探测器，并对探测器的变温电流电压特性、变温光谱特性以及探测率的温度响应特性进行了研究，为进一步改进器件制备工艺、提高探测器性能提供了参考。

1 实验过程

器件制备采用金属有机化合物化学气相沉积(MOCVD)生长的 NIN 型 $InAs_{0.6}P_{0.4}$/$In_{0.8}Ga_{0.2}As$/InAsP buf./InP 外延材料，先在掺杂浓度为 3.0×10^{18} cm^{-3} 的 N^+-InP 衬底上生长一层 $InAs_yP_{1-y}$ 缓冲层，然后生长厚度 3 μm 非故意掺杂的浓度为 3.0×10^{16} cm^{-3} 的I-$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 吸收层和厚度为 1μm 掺杂浓度为 3.0×10^{16} cm^{-3} 的 N-$InAs_{0.6}P_{0.4}$ 帽层。图 1 所示为外延材料表面的偏振照片和横截面的扫描电镜(SEM)照片，由于 $InAs_{0.6}P_{0.4}$ 帽层同 $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ 吸收层之间存在

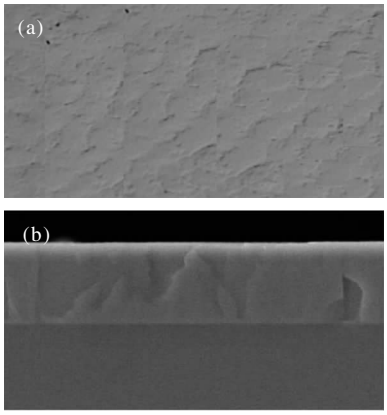

图 1 $InAs_{0.6}P_{0.4}$/$In_{0.8}Ga_{0.2}As$/InAsP buf./InP 外延材料表面的偏振照片(a)和横截面 SEM 照片(b)

Fig.1 Polarized micrograph(a) and SEM micrographs (b) of the cross-section of $InAs_{0.6}P_{0.4}$/$InAs_{0.6}P_{0.4}$/$In_{0.8}Ga_{0.2}As$/InAsP buf./InP epitaxial material

较大的晶格失配，位错等缺陷较多，材料表面和解理面平整度较差。研制的光敏芯片如图 2 所示，器件扩散区面积为 25 μm×500 μm，中心距为 50 μm，P 电极双边引出，公共 N 电极采用背电极结构并通过银胶与导电基板互连后引出，相邻光敏元之间引入保护环结构，保护环宽度 4 μm，保护环距离扩散区 10.5 μm，光敏芯片总面积 13.55 mm×2.7 mm，光敏芯片与读出电路通过金丝键压互连，后与金属管壳封装。

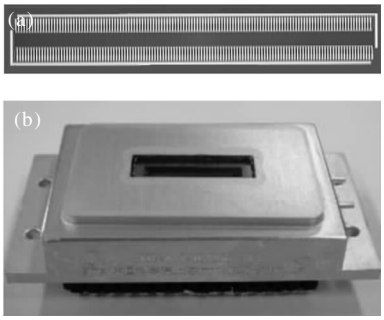

图 2 探测器芯片(a)及管壳封装后(b)照片

Fig.2 Photograph of the detector chip (a) and after shell package (b)

2 结果及讨论

2.1 器件I-V 特性

光敏芯片封装在真空杜瓦中，采用Keithley6430 可编程电流—电压测试仪测试其 I-V 特性曲线。在线列上的不同位置共抽测其中的 24 元，均匀性较好，无盲元。任抽取其中一元器件进行变温 I-V 的测试，在 133~300 K 温度范围内的 I-V 特性曲线如图 3 所示，器件的暗电流随着温度降低出现明显下降。一般认为 InGaAs PIN 探测器的暗电流由扩散电流、产生复合电流及隧穿电流组成。器件在不同反向偏压下的暗电流随温度的变化曲线如图 4 所示，

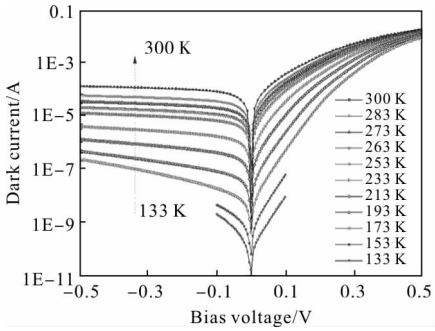

图 3 变温 I-V 特性曲线

Fig.3 Curve of temperature dependent I-V characteristics

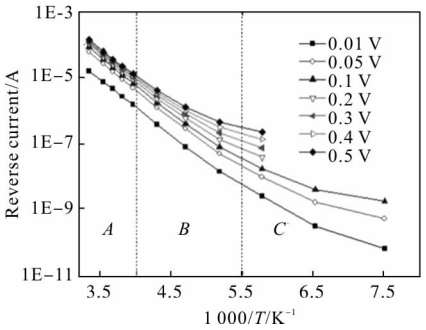

图 4 反向 I-V 的温度响应特性

Fig.4 Temperature-dependent reversed I-V characteristics

器件的反向电流可以分为三个区域，在近室温的 *A* 区，器件的反向电流在不同的偏压下变化不大，此时器件暗电流的主要成分为扩散电流及产生复合电流；在 *B* 区本征载流子浓度随着温度的下降而迅速下降，导致扩散电流与产生复合电流此时急速减小，由缺陷引起的隧穿电流开始变得更为明显，因此器件的暗电流在不同的偏压下开始逐渐发生分离；在温度低于 180 K 的 *C* 区，器件的暗电流与温度的依赖关系变小，扩散电流与产生复合电流降低，此时器件的暗电流与所加偏压的依赖性变大，暗电流主要成分为隧穿电流[6]。当背景和信号光强为零，且流过二极管的电流较小时，器件的 I-V 关系可以表示为[7]：

$$I=I_0\left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right)-1\right] \tag{1}$$

式中：I_0 为反向饱和电流；K 为 Boltzman 常数；T 为器件温度；n 为理想因子，由电流机制决定，当 n 接近 1 时，器件的正向电流主要是扩散电流；当 n 接近 2 时，正向电流主要是产生-复合电流；如果 n 介于 1 和 2 之间则说明为两种电流机制的共同起作用。采用公式(1)对图 3 中 I-V 曲线的正向电流特性曲线进行拟合，如图 5 所示。从 300 K 下降到 133 K，拟

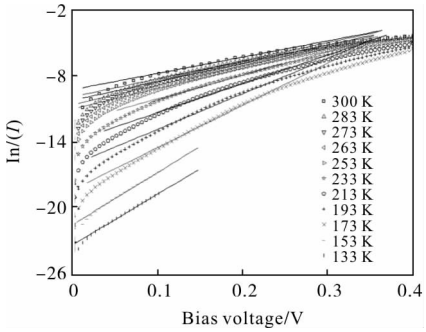

图 5 正向 I-V 特性曲线及拟合结果

Fig.5 Forward I-V characteristics curve and the fitting result

合正向电流得到器件的理想因子分别为 2.65、2.42、2.34、2.23、2.14、1.83、1.50、1.22、1.02、0.83、0.85。在正向大偏压下，器件的耗尽区变小，但是由于晶格失配导致材料体内和不同外延层的界面中存在较多的位错缺陷，这些缺陷表现为产生复合中心，并且掺杂 Zn 元素在晶格失配材料中具有比较大的扩散速度，掺杂 Zn 元素并不能被完全激活。当温度>250 K 时，理想因子比较接近 2，正向电流以产生复合电流为主；当温度在 250~193 K 时，正向电流由产生复合电流和扩散电流共同组成；当温度进一步降低，扩散电流和产生复合电流均降低，但是后者的降低速度更为明显，此时理想因子接近 1，正向电流的主要成分是扩散电流。要降低器件在反向的暗电流，使正向的电流以扩散电流为主，材料的生长及掺杂元素的激活都需要进一步优化。

一般认为优质因子 R_0A 受产生复合电流的影响由下式表示：

$$R_{gr0}A=2kT\tau_{gr}/(q^2n_iW) \tag{2}$$

式中：A 为结区面积；τ_{gr} 为产生-复合少数载流子寿命；W 为耗尽层宽度；n_i 为本征载流子浓度。采用公式(2)对器件在 300~133 K 内的 R_0A 进行拟合，测试结果及拟合结果如图 6 所示，二者吻合很好，R_0A 与温度的倒数 $1/T$ 成指数关系，此时 R_0A 主要受耗尽区载流子的产生-复合影响[8]。李永富等人报道的采用 $InP/In_{0.82}Ga_{0.18}As/InP$ 制备的延伸到 2.55 μm 的探测器在温度<158 K 时，R_0A 趋于一个定值，主要受“陷阱辅助隧穿效应”影响，两者的差异可能是由两种外延材料中的陷阱密度和陷阱态能级不同导致的。

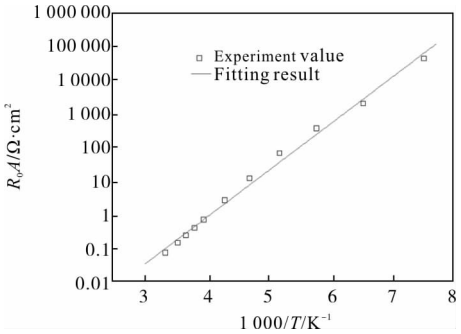

图 6 器件的 R_0A 随温度的变化

Fig.6 R_0A of detector vs temperature

2.2 响应光谱特性

器件的变温响应光谱如图 7 所示，在 300 K，峰值响应半高宽下的长波截止波长和短波截止波长分别为 2.57 μm 和 1.58 μm。对于 $In_xGa_{1-x}As$ 三元体系，禁带宽度随温度及组分的变化可以表示为[9]：

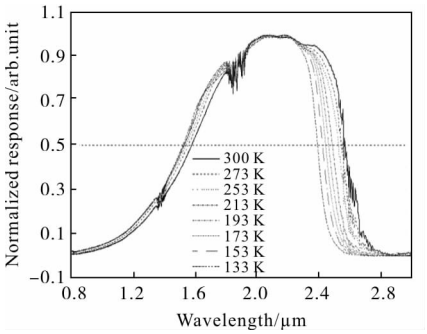

图 7 器件变温相对光谱响应曲线

Fig.7 Temperature dependent response spectrum of detector

$$E_g(x,T)=E_g^{InAs}(0)-\alpha^{InAs}T^2/(T+\beta^{InAs})+\left[E_g^{GaAs}(0)-\alpha^{GaAs}T^2/(T+\beta^{GaAs})-E_g^{InAs}(0)+\alpha^{InAs}T^2/(T+\beta^{InAs})\right]x-0.475x(1-x) \tag{3}$$

式中：$E_g^{InAs}(0)=0.35$ eV；$E_g^{GaAs}(0)=1.43$ eV；$\alpha^{InAs}=2.7\times10^{-4}$ eV/K；$\alpha^{GaAs}=5.1\times10^{-4}$ eV/K；$\beta^{InAs}=83$ K；$\beta^{GaAs}=190$ K。

对于 $InAs_yP_{1-y}$ 四元体系，在温度 300 K 下的禁带宽度可以表示为[10]：

$$E_g(x,y)=1.35+0.668x-1.068y+0.078y^2 \tag{4}$$

由以上两式计算得，T=300 K、x=0.8、y=0.6 时，$In_{0.8}Ga_{0.2}As$ 和 $InAs_{0.6}P_{0.4}$ 的禁带宽度 E_g 分别为 0.48、0.74 eV，对应的截止波长 λ_c 分别为 2.58、1.68 μm，同实验结果比较接近。同实验结果比较接近。为计算不同温度下的峰值探测率，根据响应光谱计算的器件 G 因子列于表1 中。

表 1 不同温度下的器件 G 因子和截止波长 λ_c

Tab.1 G factor and cutoff-wavelength λ_c of detector at different temperature

T/K	G	λ_c/μm
300	9.0	2.57
273	9.4	2.55
253	9.8	2.53
213	10.3	2.49
193	10.7	2.46
173	11.0	2.44
153	11.5	2.42
113	12.2	2.39

2.3 探测率特性

采用黑体作为光源,对抽测器件进行了信号测试，并将杜瓦置于密封的紫铜屏蔽盒中进行噪声测试,测试环境温度 300 K,黑体温度 900 K,黑体孔径 8 mm，固定测试距离 25 cm。由测试结果计算器件在室温 300 K 时的平均峰值探测率为 7.25×10^{8} cm·Hz$^{1/2}$/W,平均峰值响应率 0.95 A/W,量子效率56.9%。焦平面探测器在变温下的测试结果如图 8 所示,随着温度的降低,噪声下降迅速,而响应信号先增大,在 273 K 达到峰值,平均峰值探测率在 153 K 达到 1.11×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$/W,响应非均匀性为 5.28%,器件性能还需要进一步提高。

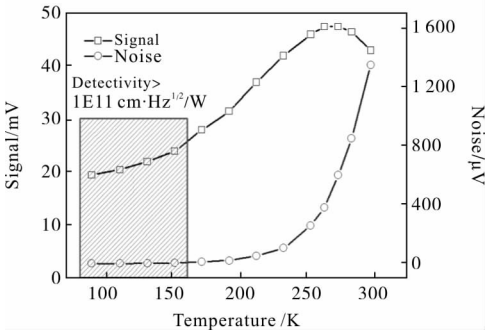

图 8 焦平面探测器的信号、噪声和探测率随温度的变化

Fig.8 Signal, noise and detectivity of FPAs detector vs temperature

3 结 论

采用 $InAs_{0.6}P_{0.4}$ 帽层的材料制备了延伸波长的 256×1 线列 InGaAs 红外探测器,测试并分析了探测器在不同温度下的光电性能，适当降低温度可以有效提高器件性能。随着温度的降低,器件的正向暗电流由产生复合电流为主逐渐变为以扩散电流为主。260~300 K 范围内，反向电流主要是扩散电流和产生复合电流,当温度低于 180 K,隧穿电流起主要作用。室温下器件响应截止波长为 2.57 μm,峰值探测率为 7.25×10^{8} cm·Hz$^{1/2}$/W,峰值响应率为 0.95 A/W,量子效率为 56.9%。将 256×1 元光敏芯片与读出电路耦合制备的焦平面探测器，其峰值探测率在 153 K 达到峰值,约为 1.11×10^{11} cm·Hz$^{1/2}$/W,响应非均匀性为 5.28%，材料的生长工艺和器件制备工艺需要进一步优化。

参考文献:

[1] Shi Yanli, Guo Qian, Li Long, et al. Visible-extended InP/InGaAs wide spectrum response infrared detectors [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2015, 44(11): 3177-3180. (in Chinese)

[2] Shao Xiumei, Gong Haimei, Li Xue, et al. Developments of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane Detectors [J]. ***Infrared Technology***, 2016, 38 (8): 629-635. (in Chinese)

[3] Zang Yonggang, Gu Yi, Wang Kai, et al. Fabrication of wavelength extended (1.7 -2.7 μm) InGaAs high speed photodetectors[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37 (1): 38-41. (in Chinese)

[4] Wei Peng, Huang Songlei, Li Xue, et al. Back illuminated InGaAs detector arrays with extended-wavelength to 2.4 μm [J]. ***J Infrared Millim Waves***, 2013, 32(3): 214-219. (in Chinese)

[5] Li Yongfu, Tang Hengjing, Zhang Kefeng, et al. Temperature -dependent characteristics study of 2.6 μm planar-type InGaAs infrared detector[J]. ***Laser and Infrared***, 2009, 39(6): 612-617. (in Chinese)

[6] Kuan C H, Lin R M, Tang S F. Analysis of the dark current in the bulk of InAs diode detectors [J]. ***Journal of Applied Physics***, 1996, 80(9): 5454-5458.

[7] Robert F Pierret. Semiconductor Devices [M]. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons Incorporation, 1996.

[8] Lars Z, Joachim J, Stefan D, et al. Extended wavelength InGaAs on GaAs using InAlAs buffer for back -side -illuminated short-wave infrared detector [J]. ***Applied Physics Letters***, 2003, 82(17): 2838-2840.

[9] Sjal P, Roy J B, Basu P K. Empirical expressions for the alloy composition and temperature dependence of the band gap and intrinsic carrier density in $Ga_xIn_{1-x}As$[J]. ***Journal of Applied Physics***, 1990, 69(2): 827-829.

[10] Levinshtein M, Rumyantsev S, Shur M. Handbook series on semiconductor parameters [J]. ***World Scientific***, 1996, 24(1): 196-197.