

## n-on-p 结构深台面延伸波长 InGaAs 探测器的 ICPCVD 钝化工艺

石 铭<sup>1,2,3</sup>, 邵秀梅<sup>1,2</sup>, 唐恒敬<sup>1,2</sup>, 李 涛<sup>1,2</sup>, 黄 星<sup>1,2,3</sup>, 曹高奇<sup>1,2,3</sup>,  
王 瑞<sup>1,2,3</sup>, 李 平<sup>1,2,3</sup>, 李 雪<sup>1,2</sup>, 龚海梅<sup>1,2\*</sup>

(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. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**采用 ICP 刻蚀(inductively coupled plasma etching)工艺制备了深台面 n-on-p 结构的可响应到 2.4  $\mu\text{m}$  的延伸波长  $8 \times 1$  元线列 InGaAs 探测器. 器件表面采用 ICP 源激发的  $\text{N}_2$  等离子体进行处理, 然后再使用 ICPCVD(inductively coupled plasma chemical vapor deposition)沉积一层  $\text{SiN}_x$  薄膜的钝化工艺. 不同面积光敏元件的电流-电压特性分析显示器件在常温和低温下侧面电流均得到有效抑制, 激活能分析显示了器件优异的暗电流特性, 在 -10 mV 偏压下, 在 200 K 和 300 K 温度下暗电流密度分别为 94.2 nA/cm<sup>2</sup> 和  $5.5 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>.

**关键词:**InGaAs; ICPCVD; 暗电流; n-on-p; 钝化

**中图分类号:**TN21 **文献标识码:**A

## ICPCVD passivation of n on p structure deep mesa extended wavelength InGaAs photodetectors

SHI Ming<sup>1,2,3</sup>, SHAO Xiu-Mei<sup>1,2</sup>, TANG Heng-Jing<sup>1,2</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>, HUANG Xing<sup>1,2,3</sup>,  
CAO Gao-Qi<sup>1,2,3</sup>, WANG Rui<sup>1,2,3</sup>, LI Ping<sup>1,2,3</sup>, LI Xue<sup>1,2</sup>, GONG Hai-Mei<sup>1,2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;  
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** InGaAs  $8 \times 1$  linear arrays photodetectors with n-on-p structure and deep mesa, which can response at extended wavelength of 2.4  $\mu\text{m}$ , were fabricated by ICP etching (inductively coupled plasma etching) process in the paper. The device surface was cleaned by  $\text{N}_2$  plasma activated by ICP, then  $\text{SiN}_x$  passivation layer was deposited by ICPCVD (inductively coupled plasma chemical vapor deposition) on the device surface. The current-voltage analysis of different area devices indicated that the lateral surface current was suppressed effectively at both room and lower temperature. Activation energy analysis illustrated the excellent dark current characteristics. At -10 mV bias, the dark current density is 94.2 nA/cm<sup>2</sup> and  $5.5 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup> at temperatures of 200 K and 300 K, respectively.

**Key words:** InGaAs, ICPCVD, dark current, n-on-p, passivation

**PACS:** 01.55. + b

收稿日期:2015-03-10, 修回日期:2015-03-27

Received date: 2015-03-10, revised date: 2015-03-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助 973 项目(2012CB619200);国家自然科学基金(61205105, 61376052 和 61475179)

Foundation items: National Key Basic Research and Development Program of China (2012CB619200); the National Natural Science Foundation of China (61205105, 61376052 and 61475179)

作者简介(Biography):石 铭(1985-),男,博士生,主要从事短波红外探测器的研究. E-mail: shiming104@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn

## 引言

1~3  $\mu\text{m}$  短波红外波段包含 C—O、C—H、C = O、O—H 和 N—H 等化合键的吸收峰位,在天气预报、机器视觉、环境监控、资源调查等方面有着重要的作用<sup>[1-3]</sup>. InGaAs 探测器因其成熟的材料生长工艺和器件制备工艺以及可室温工作的特点,在短波红外波段有着广泛的研究和应用.

对于目前大多数 InGaAs 焦平面器件,器件前电极需要通过 In 柱与 CMOS 读出集成电路实现互联,在这种情况下光从背面透过衬底材料到吸收层.对于背入射结构的器件而言,p-on-n 型结构在光谱响应方面有一定的限制,因为入射光要先进入耗尽层之外靠近背面的吸收层被吸收,且光强随距离的增加指数性下降,到耗尽层的光就更少了,这个过程产生的光生载流子通过扩散作用进入耗尽层而被收集,一方面收集效率没有直接被耗尽层吸收高,而且响应速度也会更慢.田招兵等<sup>[4-5]</sup>研究了基于 InP 衬底 InGaAs 探测器的量子效率,对于背照射结构的器件,n-on-p 结构可以实现更高的量子效率.根据模拟计算结果,对常规波长的 n-on-p 结构器件,在吸收层厚度为 1.5  $\mu\text{m}$  和掺杂浓度为  $2 \sim 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  时,内量子效率可以达到 95% 以上.张永刚等<sup>[6]</sup>研究了 n-on-p 结构截至波长分别为 2.0  $\mu\text{m}$  和 2.4  $\mu\text{m}$  的 InGaAs/InAlAs/InP 器件,缓冲层采用 Be 作 p 型掺杂生长出来的 n-on-p 外延材料比 p-on-n 结构的材料有着更好的质量,器件室温下的峰值探测率分别为  $1.3 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}$  和  $6.5 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2}$ ,性能要优于他们先前制备的 p-on-n 结构器件.朱耀明等<sup>[7]</sup>基于 n-on-p 结构,制备了性能优异的背后照射延伸波长 640  $\times$  1 线列 InGaAs 器件.

对于台面成型工艺的 InGaAs 光电探测器件,需要通过刻蚀成型工艺形成独立的光敏元,而 n-on-p 结构的器件由于需要刻蚀到材料较下面处,刻蚀工艺不仅会形成更多的侧表面,而且使整个吸收层都裸露在空气中,这样引起的表面漏电会严重影响器件的电流特性.对于低背景航天应用而言,暗电流噪声会影响器件的探测极限,是一项需要尽量减小的衡量器件性能的关键参数.在 n-on-p 结构的 InGaAs 探测器制备过程中,表面钝化工艺显得尤为关键.本文基于 ICPCVD 低温生长的低损伤、高质量钝化膜工艺,制备了 n-on-p 结构截至波长 2.4  $\mu\text{m}$  的延伸波长台面型 InGaAs 器件,分析了器件的暗电流特性

及侧表面钝化效果.根据电流分析结果,这种 ICPCVD 低温钝化工艺制备的深台面 n-on-p 结构器件相比于早前的 PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) 钝化工艺器件优质因子  $R_0A$  值得到显著提高<sup>[7]</sup>.

## 1 实验

为了表征表面钝化工艺的作用,器件结构采用了不同光敏元大小的  $8 \times 1$  元线列结构,如图 1 所示.所用材料为在 InP 衬底上 GSMBE 生长 n-on-p 结构可响应到 2.4  $\mu\text{m}$  的  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}/\text{i-In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}/\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  外延材料,外延材料由 P 型重掺杂厚度 1.4  $\mu\text{m}$  的  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  缓冲层、厚度为 2.0  $\mu\text{m}$  本征  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  吸收层、N 型重掺杂厚度 0.25  $\mu\text{m}$  的  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  帽层所组成.

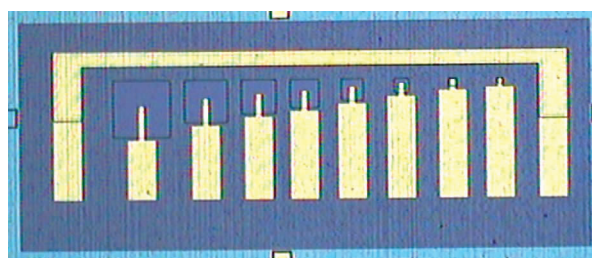


图 1  $8 \times 1$  元线列结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of  $8 \times 1$  linear arrays

$8 \times 1$  元线列结构光敏元均为正方形,光敏元大小从  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  到  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  之间变化,各光敏元具体尺寸见表 1 所示.采用 ICP 刻蚀技术实现台面的成型,刻蚀所用掩膜为 PECVD 工艺所生长厚度 600 nm 的  $\text{SiN}_x$  薄膜,刻蚀台面为一直到缓冲层的深台面结构,在台面成形后用非选择性湿法腐蚀 ( $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 3 : 5$ ) 去除刻蚀残留物及修复部分晶格损伤.p 电极采用电子束蒸发的 Ti/Pt/Au (20 nm/30 nm/20 nm),p 电极后形成欧姆接触的退火条件为  $420^\circ\text{C}$  温度、 $\text{N}_2$  氛围下退火 40 s.器件表面在沉积钝化薄膜之前,经过 3:6:10 的氢氟酸缓冲液 (BHF) 处理,立即转移到 ICPCVD 装置反应腔体,通过 ICP 源激发  $\text{N}_2$  等离子体对样品表面进行预清洗.钝化膜为 ICPCVD 工艺制备的  $\text{SiN}_x$  薄膜,ICP 功率:750 W,RF 功率:0,腔压:12 mTorr,沉积温度: $75^\circ\text{C}$ ,气体流量  $\text{SiH}_4/\text{N}_2$ :15.5/12.5 sccm.器件的 n 电极(加厚电极)采用离子溅射的 Cr/Au (20/400 nm).器件制备工艺流程中,先生长 p 电极退火之后再沉积  $\text{SiN}_x$  薄膜.

表 1  $8 \times 1$  元线列结构各光敏元尺寸  
Table 1 Size of each pixel of  $8 \times 1$  linear arrays

	1	2	3	4	5	6	7	8
光敏元边长/ $\mu\text{m}$	200	150	120	100	75	50	30	20

I-V 测试系统采用了 Agilent B1500A 半导体器件分析仪,样品通过宝石电极版焊接在变温杜瓦内,通过液氮和加热电阻控制测试器件的温度. ICPCVD 设备是牛津仪器 (Oxford Instruments) 的 Plasmalab System 100 ICP180 沉积系统.

## 2 结果讨论与分析

对于  $8 \times 1$  元线列各光敏元,每隔 20 K 温度一个点,测试了其在 200 ~ 300 K 温度范围内的 I-V 曲线,300 K 温度下线列各光敏元的电流特性曲线及  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  光敏元在不同温度的 I-V 曲线如图 2 和图 3 所示.

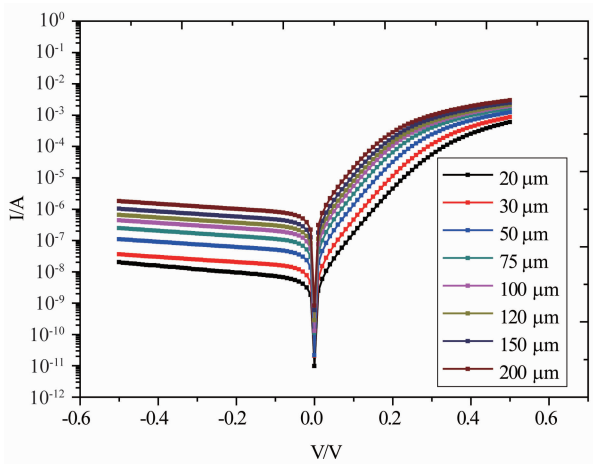


图 2 300 K 温度下线列各光敏元的电流特性曲线  
Fig. 2 I-V curve of each pixel at 300 K

对于 300 K 温度下的各光敏元,随着各光敏元的变大,器件电流也逐渐变大,在反向偏压下,各 I-V 曲线基本平行;对于  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  光敏元,随着温度的增加,电流也逐渐变大,在反向偏压下, I-V 曲线随着温度的降低变得更加陡峭,这是由于随着温度的降低,对电压变化更敏感的隧穿电流及欧姆电流在总电流成份中会占据更大的比例.

对于台面结构的 InGaAs 探测器,其电流成份可以分为与面积成正比的成份和与周长成正比的成份<sup>[8]</sup>,分别表示为:  $Ad^2(I_a)$  和  $Bd(I_p)$ ,  $d$  为方形光敏元的变长,总电流  $I$  表示为:

$$I = Ad^2(I_a) + Bd(I_p) \quad , \quad (1)$$

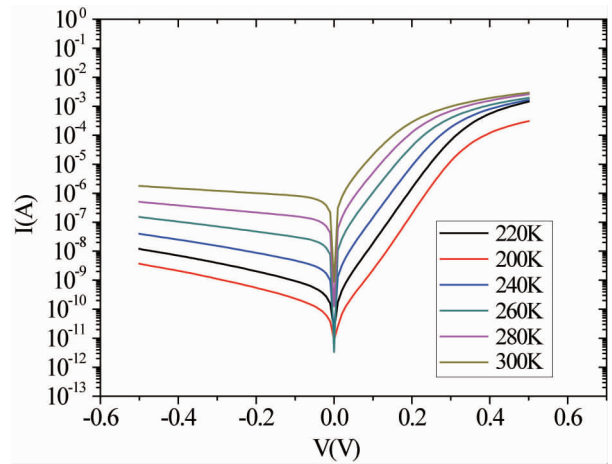


图 3  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  光敏元在不同温度的 I-V 曲线  
Fig. 3 I-V curves of pixel with  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  size at different temperature

1 式两边除以  $d^2$ ,变为:

$$I/d^2 = A + B/d \quad , \quad (2)$$

$I/d^2$  与  $1/d$  成线性关系,根据不同大小光敏元的  $I/d^2$  和  $1/d$  就可以线性拟合出 A 和 B 值的大小,即可以得到各器件与面积相关的体电流和与周长相关的侧面电流成份.对于台面结器件而言,侧面电流大小可以体现出钝化工艺的好坏,器件在 220 K 和 300 K 下的  $I/d^2$  与  $1/d$  的关系曲线如图 4 和图 5 所示:

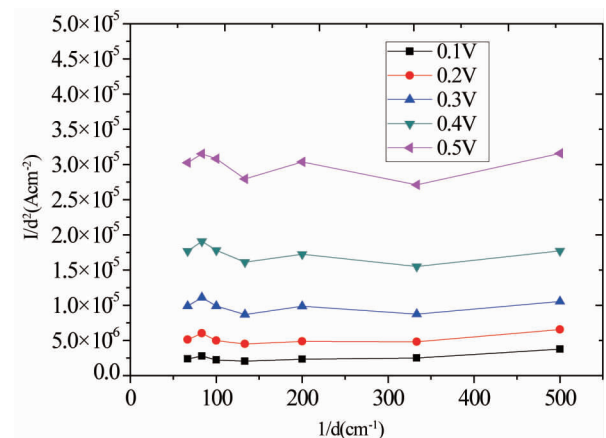


图 4 220 K 温度下的  $I/d^2$  与  $1/d$  关系曲线  
Fig. 4 The curve of  $I/d^2$  varying with  $1/d$  at 220 K

可以看到在 220 K 及 300 K 温度下,曲线几乎水平,没有一个正向的斜率,表明 B 值几乎为 0,这说明了器件侧面电流成份很小,钝化效果较为理想.

器件的电流与温度的变化关系可以表示为:

$$I = C \exp(-E_a/kT) \quad , \quad (3)$$

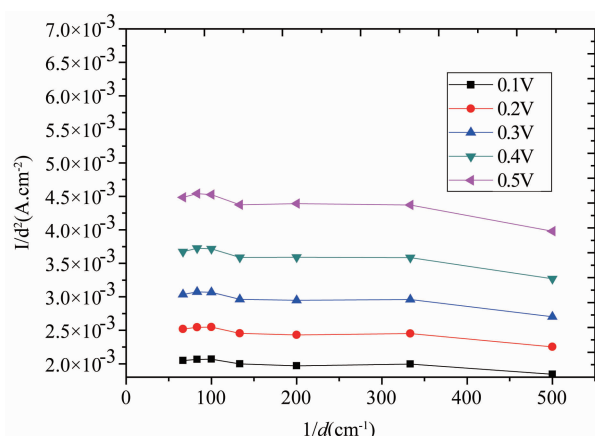


图5 300 K 温度下的  $I/d^2$  与  $1/d$  关系曲线  
Fig. 5 The curve of  $I/d^2$  varying with  $1/d$  at 300 K

通过不同温度下得到的  $\lg I$  与  $1/T$  的关系可以提取  $E_a$  的大小,  $E_a$  称为激活能, 可以通过它来分析器件的电流成份. 在反向  $0 \sim 0.5$  V 偏压下,  $200 \sim 300$  K 温度范围内,  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  器件在侧面钝化工艺较好的情况下, 暗电流主要由以下电流成份组成: 扩散电流, 产生复合电流, 缺陷辅助隧穿电流. 扩散电流和产生复合电流分别正比于本征载流子浓度  $n_i^2$  和  $n_i$  (正比于  $\exp(-E_g/2kT)$ ), 而  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  在 300 K 时禁带宽度约为 0.51 eV<sup>[9]</sup>, 扩散电流和产生复合电流对应的激活能大小为 0.51 eV 和 0.25 eV.

图 6 为反向不同偏压下  $\lg I$  与  $1000/T$  关系曲线, 曲线可以拟合为两段直线, 这是由于电流成份在不同的温度段会有所区别, 由曲线拟合出的激活能大小见表 2 所示.

表 2 反向偏压下拟合的激活能大小

Table 2 The fitted activation energy ( $E_a$ ) values at different reverse bias

$E_a$ (eV)		
-0.1V	0.54(260 ~ 300 K)	0.144(200 ~ 240 K)
-0.2V	0.50(260 ~ 300 K)	0.139(200 ~ 240 K)
-0.3V	0.46(260 ~ 300 K)	0.130(200 ~ 240 K)
-0.4V	0.43(260 ~ 300 K)	0.133(200 ~ 240 K)
-0.5V	0.41(260 ~ 300 K)	0.145(200 ~ 240 K)

随着温度的降低, 隧穿电流在总电流成份中所占比重会逐渐增加, 而隧穿电流与温度并不成指数变化的关系, 因此主要参考在较高温下 ( $260 \sim 330$  K) 的激活能值.  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  在 300 K 时禁带宽度约为 0.51 eV, 当反向偏压从 0.1 ~ 0.5 V 变化时,  $E_a$  从 0.54 到 0.41 eV 范围内逐渐减

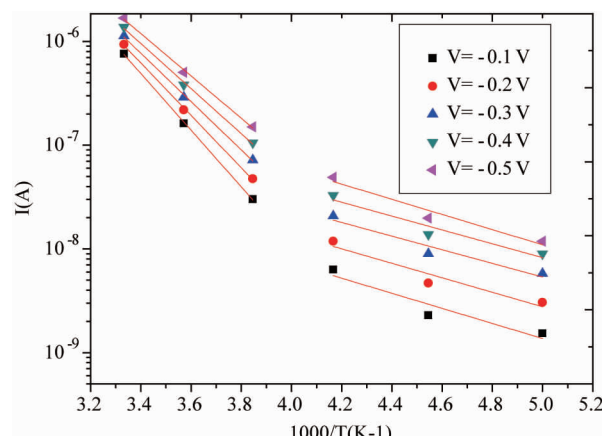


图 6 不同反向偏压下电流随温度变化曲线  
Fig. 6 Curves of current varying with temperature at different reverse bias

小, 因为在反向偏压更大时, 产生复合电流所占比重会更大, 在  $260 \sim 300$  K 温度范围内, 总电流成份主要由扩散电流和产生复合电流组成, 扩散电流 (尤其在低反向偏压) 占有较大的比例, 说明器件从材料到工艺较优异的性能. 在  $-10$  mV 偏压下, 在 200 K 和 300 K 温度下暗电流密度分别为  $94.2$  nA/cm<sup>2</sup> 和  $5.5 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>. 器件在 200 K 温度下优质因子  $R_0A$  值为  $126.7$  k $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 相比于同样采用 GSMBE 方法生长的相同材料结构截至波长  $2.4$   $\mu\text{m}$  的 n-on-p 结构  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  器件, 文献 7 中采用 PECVD 钝化工艺器件在 195 K 温度下  $R_0A$  值为  $16.8$  k $\Omega \cdot \text{cm}^2$ , 而文献 6 中器件在 210 K 温度下  $R_0A$  为  $76.2$  k $\Omega \cdot \text{cm}^2$ .

图 7 为 n-on-p 结构  $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$  器件在 220 K、250 K 以及室温下的相对光谱响应曲线, 曲线经

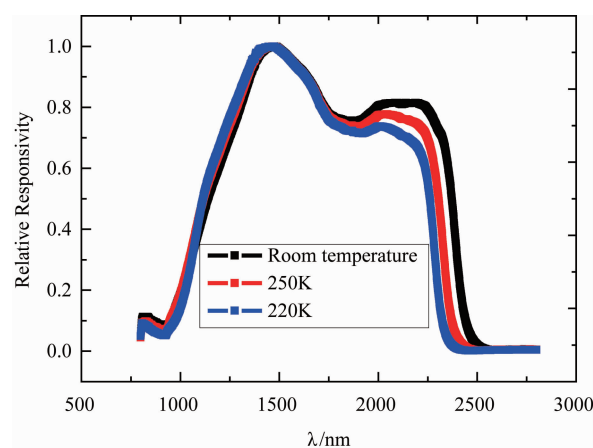


图 7 不同温度下器件的相对光谱响应曲线  
Fig. 7 Curves of relative responsivity for photodetectors at different temperature

标准器件校准. 室温下长波截至波长约为  $2.37 \mu\text{m}$ , 当温度下降到 220 K 时, 截至波长蓝移到  $2.26 \mu\text{m}$ .

### 3 结论

制备了不同光敏元大小的  $8 \times 1$  元线列 n-on-p 结构深台面延伸波长 InGaAs 探测器. 采用了 ICP 源激发的  $\text{N}_2$  等离子体进行处理, 然后再使用 ICPCVD 沉积一层  $\text{SiN}_x$  薄膜的表面钝化工艺. 对不同面积器件的拟合结果显示器件侧面电流在室温和低温下得到有效抑制. 器件在 260 ~ 300 K 温度范围内, 反向 0.1 ~ 0.5 V 偏压下, 电流主要由扩散电流和产生复合电流组成, 在 -10 mV 偏压下, 在 200 K 和 300 K 温度下暗电流密度分别为  $94.2 \text{ nA/cm}^2$  和  $5.5 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ .

### References

- [1] Porod W, Ferry D K, Modification of the virtual-crystal approximation for ternary III-V compounds[J], *Phys. Rev. B*, 1983, **27**(4): 2587 - 2589.
- [2] Ruud W M. Hoogeveen, Ronald J. van der A, Albert P H. Goede, Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4 $\mu\text{m}$ ) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere[J], *Infrared Phys. Technol.*, 2001, **42**:1 - 16.
- [3] Kleipool Q L, Jongma R T, Gloudemans A M S, et al. In-flight proton-induced radiation damage to SCIAMACHY's extended-wavelength InGaAs near-infrared detectors[J], *Infrared Phys. Technol.*, 2007, **50**:30 - 37.
- [4] TIAN Zhao-Bing, Gu Yi, ZHANG Yong-Gang, Quantum efficiency optimization of InP-based  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  photodetectors[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2008, **27**(2).
- [5] TIAN Zhao-Bing, Gu Yi, ZHANG Xiao-Jun, et al. Quantum efficiency optimization of wavelength extended InGaAs Photodetectors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(6):851 - 854.
- [6] Yonggang Zhang, Yi Gu, Zhaobing Tian, et al, Wavelength extended InGaAs/InAlAs/InP photodetectors using n-on-p configuration optimized for back illumination[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2009, **52**:52 - 56.
- [7] ZHU Yao-Ming, LI Yong-Fu, LI Xue, et al, Extended-wavelength  $640 \times 1$  linear InGaAs detector arrays using N-on-P configuration for back illumination[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2012, **31**(1):11 - 15.
- [8] Anne Rouvie, Jean-Luc Reverchon, Odile Huet, et al. InGaAs focal plane arrays developments at III-V Lab[C]//Proc. SPIE, 2012, **8353**(08):1 - 12.
- [9] Goetz K-H, Bimberg D, Jurgensen H, et al. Optical and crystallographic properties and impurity incorporation of  $\text{GaIn}_{1-x}$  ( $0.44 < x < 0.49$ ) grown by liquid phase epitaxy [J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(8):4543 - 4552.
- 
- (上接 36 页)
- [29] Schuster J, and Bellotti E, Numerical simulation of crosstalk in reduced pitch HgCdTe photon-trapping structure pixel arrays [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**, 12, 14712.
- [30] Keasler C A, and Bellotti E, Three-Dimensional Electromagnetic and Electrical Simulation of HgCdTe Pixel Arrays[J]. *J. Electron. Mater.*, 2011, **40**: 1795.
- [31] Schuster J, Pinkie B, Tobin S, et al. Numerical Simulation of Third-Generation HgCdTe Detector Pixel Arrays [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2013, **19**: 3800415.
- [32] Chu J H, Mi Z Y, and Tang D Y, Band-to-band optical absorption in narrow-gap  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  semiconductors[J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, **71**:3955.
- [33] Hu W D, Chen X S, Ye Z H, et al. Accurate simulation of temperature dependence of dark current in HgCdTe infrared detector assisted by analytical modeling[J]. *J. Electron. Mater.*, 2010, **39**: 981.
- [34] Lei W., Antoszewski J., Faraone L., Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors[J]. *Appl. Phys. Rev.* 2015, **2**: 041303.
- [35] Gilmore A S, Bangs J, and Gerrish A, VLWIR HgCdTe detector current-voltage analysis [J], *J. Electron. Mater.*, 2006, **35**: 1403.
- [36] Wehner J G A, Musca C A, Sewell R H, et al. Mercury cadmium telluride resonant-cavity-enhanced photoconductive infrared detectors[J], *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**: 211104.
- [37] Wang K X, Yu Z F, Liu V, et al. Light trapping in photonic crystals[J]. Proc. SPIE., 2014, 9177, 91770N.
- [38] Qiu W C, and Hu W D, Laser beam induced current microscopy and photocurrent mapping for junction characterization of infrared photodetectors, Sci. China-Phys. Mech. [J] *Astron.*, 2015, **58**, 027001.
- [39] Keasler C A, and Bellotti E, A numerical study of broadband absorbers for visible to infrared detectors, *Appl. Phys. Lett.* 2011, **99**: 091109.
- [40] Pinkie B, and Bellotti E, Numerical Simulation of the Modulation Transfer Function in HgCdTe Detector Arrays, *J. Electron. Mater.*, [J] 2014, **43**: 2864.
- [41] Hu W D, Chen X S, Yin F, et al, Analysis of temperature dependence of dark current mechanisms for long-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detectors[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **105**: 104502.
- [42] Qiu W C, Hu W D, Chen L, et al, Dark Current Transport and Avalanche Mechanism in HgCdTe Electron-Avalanche Photodiodes [J]. *IEEE T. Electron Dev*, 2015, **62**: 1926.