

锑基高工作温度红外探测器研究进展

邓功荣, 赵 鹏, 袁 俊, 信思树, 龚晓霞, 黎秉哲, 马 启, 杨文运, 普朝光
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 锑基红外光敏材料具有优越的光电转换效率, 材料结构稳定、可生产性强, 并具备低暗电流和高工作温度 (HOT) 的优势, 符合未来红外探测系统小尺寸、轻重量、低功耗 (SWaP) 的要求。目前, 工程化研制高工作温度红外探测器的锑基材料主要有 3 类: InSb、锑基 II 类超晶格和 InAsSb, 国外已报道了 640×512 、 1024×1024 和 2040×1156 规格的焦平面阵列, 工作温度提高到 150 K 以上。本文从材料特性和器件结构、像元尺寸及工艺技术来阐述国内外锑基高工作温度红外探测器的研究状况。

关键词: 高工作温度 (HOT); SWaP; InAsSb; InSb; II 类超晶格

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2017)09-0780-05

Status of Sb-based HOT Infrared Detectors

DENG Gongrong, ZHAO Peng, YUAN Jun, XIN Sishu,
GONG Xiaoxia, LI Bingzhe, MA Qi, YANG Wenyun, PU Chaoguang
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Antimony-based infrared photosensitive materials possess the advantages of superior photoelectric conversion efficiency, high structural stability, high yield, low dark current, and high operating temperature (HOT). These characteristics make them especially suitable for future infrared detection systems that should fulfill the requirements of small size, lightweight, and low power consumption. Currently, three main categories of antimony-based materials are used in HOT infrared detectors viz., InSb, antimony-based type II super lattice, and InAsSb. It has been reported that focal plane array sizes of 640×512 , 1024×1024 , and 2040×1156 have led to an increase in the operating temperature to greater than 150 K. This article gives an overview of the status of research (national as well as international) on HOT infrared detectors, with special focus on the material properties, device structures, pixel size, and fabrication techniques.

Key words: high operation temperature (HOT), SWaP, InAsSb, InSb, Type-II superlattice

0 引言

目前, 碲镉汞 (HgCdTe)、锑化铟 (InSb)、量子阱 (QWIP)、超晶格 (SLs) 等高性能中波、长波红外探测器, 均采用低温制冷的方式降低热激发载流子对器件的影响, 进而抑制探测器的噪声。然而, 制冷系统的引入导致红外系统的功耗提高、体积增大、重量增加。此外, 红外探测器常采用 J-T 节流制冷器和斯特林制冷机制冷, J-T 节流制冷需要用高压气体, 系统携带不方便; 斯特林制冷机结构复杂, 使用寿命较短, 价格昂贵。实际应用中的红外探测器寿命往往受到制冷系统的限制, 难以进一步提高。红外探测器的系统尺寸、系统重量、系统功耗 (Size, Weight, and

Power, 简称 SWaP) 成为衡量红外探测系统的一项重要性能指标^[1-2]。

Ashley 和 Elliott^[3]率先提出了高工作温度 (HOT) 探测器的设想和原理。HOT 器件是指在高工作温度的情况下, 探测器仍然表现出较好的性能^[2]。利用具有特定设计结构的探测器芯片, 可以在不降低器件光电性能的情况下, 提高探测器的工作温度。

Kinch^[3]论证了减小探测器像元尺寸有利于获得高工作温度下的背景限性能。他认为, 减小像元尺寸不仅可以减小红外成像系统的体积、重量和功耗, 而且具有潜在的改进系统在极端工作条件下的性能, 如高工作温度。这一潜在能力当然也强烈依赖所选的探测器材料结构和工艺技术所固有的暗电流的大小。

收稿日期: 2017-05-26; 修订日期: 2017-09-12。

作者简介: 邓功荣 (1982-), 男, 云南牟定人, 博士研究生, 主要研究方向为锑基红外探测器。E-mail: kw211dgr@163.com。

基金项目: 云南省应用技术基础研究基金项目 (201701PF00015)。

1 锑基材料及器件结构

1.1 锑基红外材料特性

目前, 工程化研制 HOT 红外探测器的锑基材料主要有 3 类: InSb、锑基 II 类超晶格和 InAsSb。

InSb 材料的基本特性^[4]: 稳定性较好、不会随着工作时间和存储时间发生改变; 另外, 材料的缺陷少, 尺寸在 $50 \mu\text{m}^2$ 以下的缺陷密度小于 $10 \text{ 个}/\text{cm}^2$, 能够满足制备大规格焦平面探测器的技术和经济要求。在 $1\sim 5 \mu\text{m}$ 光谱范围内, InSb 材料具有非常高的量子效率 ($\geq 80\%$), 使得 InSb 探测器在中波红外波段具有极高的灵敏度。

InAs/Ga (In) Sb II 类超晶格材料的基本特性^[5]: 能带结构与电子空穴物理分离机理, 实现对俄歇复合的有效抑制, 从理论上说, 这种材料可能具有超越碲镉汞材料极限的性能。InAs/Ga (In) Sb II 类超晶格作为红外探测材料具有优越的光电性能, 微带带隙可调, 其量子效率高, 暗电流小。另外, 最近的研究表明^[6]: InAs/InAsSb II 类超晶格具有更长的载流子寿命, 理论上器件的暗电流会更小。

InAs_{1-x}Sb_x 材料的基本特性^[7-8]: 属于直接带隙半导体材料, 光电转换效率高, 并且可以通过改变 Sb 组分 (x) 来调整带隙, 进而获得中波、长波红外的光谱信息。InAsSb 与 HgCdTe (MCT) 相比具有以下优势: ①俄歇寿命长, 俄歇电流小; ②电子有效质量大、隧穿电流小; ③晶体结合能大, 材料结构稳定; ④外延生长采用拥有工业化生产水平的 GaSb 和 GaAs 作为衬底材料, 可生产能力强。与 II 类超晶格相比, 材料生长容易控制, 容易获得大面积、均匀的外延材料。

1.2 器件结构设计

1) 光电二极管

光电二极管的暗电流主要来自 3 方面的贡献^[9], 即 $I_{\text{dark}} = I_{\text{SRH}} + I_{\text{diff}} + I_{\text{surf}}$, I_{SRH} 是耗尽区的产生-复合电流, I_{diff} 是中性区的扩散电流, I_{surf} 是表面漏电流, 它们产生的噪声是限制探测器工作温度的主要因素。不考虑表面漏电的情况下, PIN (包括 PN 结) 红外探测器暗电流主要有三部分组成, P 区、N 区的扩散电流和耗尽区的 G-R 电流、隧穿电流, 如图 1 所示。在低温 (200 K 以下) 时, I_{SRH} 是常规 PN 结红外探测器暗电流的主要来源, 其暗电流密度如下:

$$J_{\text{SRH}} \approx q \frac{n_i}{\tau_{\text{SRH}}} W_{\text{dep}}$$

式中: q 是单位电荷; n_i 是半导体的本征载流子浓度; W_{dep} 是耗尽区的宽度; τ_{SRH} 是非本征区少数载流子的 Shockley-Read-Hall 复合寿命。探测器在提高工作温

度后其探测率会显著下降, 甚至响应率都会降低。

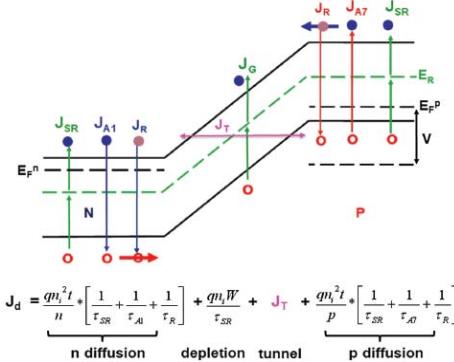


图 1 PN 结 (PIN) 结构-能带及暗电流示意图

Fig.1 The structure - band and dark current of PN(PIN)

2) 非平衡结构器件

光子型红外探测材料在高温下因本征载流子浓度过高, 导致反向扩散电流过大而无法工作。为扩大器件的应用范围, 英国 Ashley 和 Elliott 提出了抑制材料载流子浓度的方法^[11], 设法让材料中的载流子处于“耗尽”状态, 并由此衍生了一些非平衡结构 (图 2)。

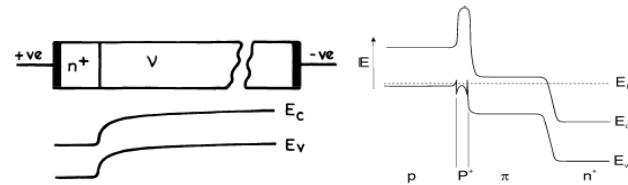


图 2 n^{+} -on- n^{-} 和 p^{+} - p - n - n^{+} 非平衡结构示意图

Fig.2 The non-equilibrium structure for n^{+} -on- n^{-} and p^{+} - p - n - n^{+}

3) 势垒型器件

2006 年, Maimon 和 Wicks^[12]首次在 InAs 材料上实现 nBn 结构, 即“n 型吸收层-B 势垒层-n 型接触层”, 图 3 是其结构示意图。以 nBn 结构为基础衍生出 XBn (XB_n, XB_{pp})、pBp 等多种势垒型结构。

nBn 是一种单极性器件, 该器件利用异质结材料能带差主要落在导带的特点, 用宽禁带隔离层构成的势垒 ΔE_c 来阻止多数载流子的导电。器件需工作在一定的反向偏置电压下, 通过提高内建电场有利于吸收层中的少数载流子穿越势垒 ΔE_v , 形成电流响应信号。

势垒型器件由于没有耗尽区, 势垒层的禁带宽度较大, 其产生-复合电流一般可以忽略, 因而不存在耗尽区的产生-复合电流和带间隧穿电流。另外, nBn 结构具有自钝化作用, 表面漏电能得到抑制, 所以单极势垒异质结器件暗电流主要是吸收区的热激发产生的电流。

计算结果 (图 4) 表明: ①高温下, 暗电流由扩散电流主导, 随着温度降低, 过渡到产生-复合电流主导; ②低温下, 越过扩散限温度 T^0 , PIN 器件的产生-复合电流明显高于 nBn 器件。理论上, 单极势垒结

构通过抑制 SRH 产生-复合减小暗电流，因此在 SRH 寿命较短的 III-V 族材料中比较有用，并能有效地提高探测器的工作温度。

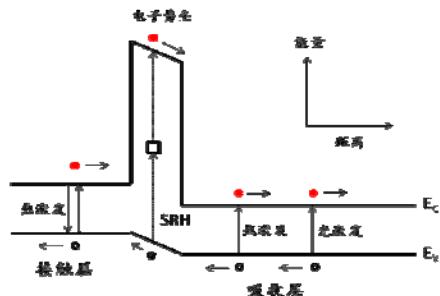


图 3 nBn 结构能带及暗电流示意图

Fig.3 The structure - band and dark current of nBn

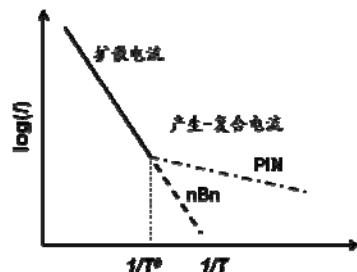


图 4 PIN 和 nBn 器件暗电流-温度曲线

Fig.4 The relationship between dark current and temperature based on PIN and nBn design

1.3 像元尺寸及工艺技术

Kinch^[3]理论计算了不同工作温度下室温冷屏效率与像元尺寸的关系，计算结果表明，减小像元面积有利于提高器件工作温度，进而降低系统体积、重量、功耗和成本。但小尺寸像元焦平面阵列的制造也存在着一些困难，芯片图形化、互连、读出电路电荷容量密度等工艺技术难度较大。

2 HOT 红外探测器研究进展

2.1 InSb HOT 红外探测器

1) Epi-InSb 探测器

以色列 SCD 公司^[13]采用先进的分子束外延 (MBE) 生长技术制备 InSb 薄膜材料，减小了 SRH 复合中心，提高了载流子寿命，外延材料器件暗电流比常规器件减小了 15 倍，所研制的 640×510 epi-InSb 焦平面微型 Pelican-D 探测器^[14](图 5)，95 K 和 110 K 工作温度下性能与 77 K 的相当 (图 6)。



图 5 微型 Pelican-D 探测器图片
Fig.5 An image of the mini Pelican-D Detector

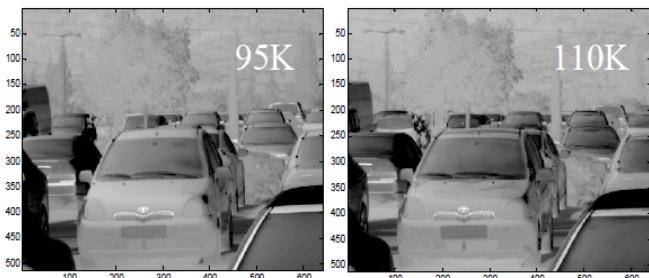


图 6 640×510 15 μm epi-InSb 焦平面 95 K 和 110 K 工作温度下的热成像图 (F/4.1)

Fig.6 Images registered with a 640×512 15 μm pitch Pelican FPA at temperatures of 95 K and 110 K with an aperture of F/4.1

2) InSb/InAlSb 异质结和势垒型 InSb 探测器

InSb PN 结光伏器件由于受 G-R 电流的制约，与 HgCdTe 相比在同样的截止波长和工作温度下暗电流较大。为克服这一缺点，Klipstein 提出了在 InSb 的 P 区插入一个势垒层，以阻挡多数载流子的扩散，从而降低器件暗电流。Ashley 和 Dean^[2]提出了 p⁺-π-n⁺非平衡结构的 InSb 探测器，其中，π 代表低掺杂 p 型材料。当工作温度低于 200 K，光敏二极管的性能取决于 π 区域中发生的 SRH 效应。

英国 QNETIC 在此基础上发展了 InAlSb 焦平面阵列^[15]，图 7 是材料和结构演化思路图，图 8 是 256×256 焦平面阵列在不同温度下获得的热成像图。

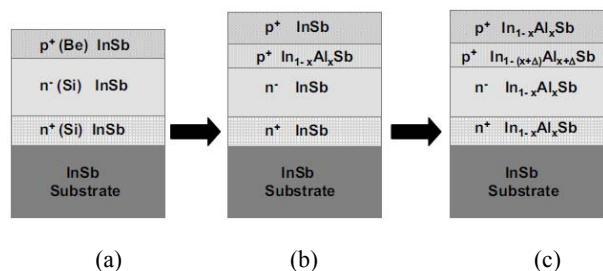


图 7 从 InSb 到 InAlSb 材料和结构演化思路

Fig.7 Schematic diagram of epitaxial structures showing: from InSb to InAlSb

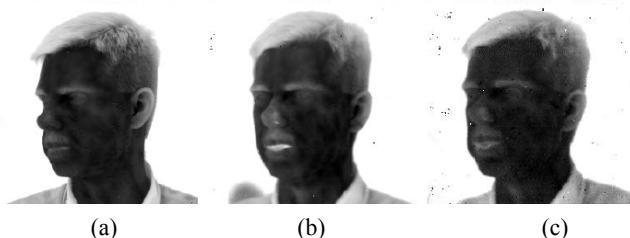


图8 非平衡结构 InSb 320×256 焦平面 80 K、100 K 和 130 K 下热像图

Fig.8 Images from a 256×256 array taken at: (a) 80 K; (b) 100 K and (c) 130 K

法国 Sofradir、Montpellier (蒙彼利埃) 大学以及 DGA 借鉴了以上研究成果, 提出了基于 InSb 的 nBn 结构^[16], 即 InSb/InAlSb/InSb, 其中 InSb 是吸收层, InAlSb 是势垒层。实验表明它的截止波长为 $5.4 \mu\text{m}$, 有望在 150 K 温度条件下工作。

2.2 InAsSb HOT 红外探测器

1) 光导型 InAsSb 探测器

国内中科院上海技术物理所、吉林大学、同济大学等单位先后开展了光导型 InAsSb 红外探测器的研究。同济大学高玉竹^[17]采用熔体外延技术生长的铟砷锑材料, 制备了光导型 InAsSb 探测器。室温下探测器黑体探测率为 $1.4 \times 10^8 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

2) 势垒型 InAsSb 探测器

美国 DRS 公司于 2014 年报道了基于 nBn 结构的 1024×1024 InAsSb 焦平面阵列^[18], GaAs 做为衬底, 采用复合结构的势垒, 像元尺寸 $18 \mu\text{m}$, 工作温度 150 K, 探测率 $1.2 \times 10^{11} \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 响应截止波长 $4.9 \mu\text{m}$, 图 9 是焦平面阵列的热像图。美国喷气推进实验室也报道了室温 nBn 结构的 InAsSb 中波红外探测器^[19], 截止波长 $4.5 \mu\text{m}$ 附近, 室温下的探测率为 $1.0 \times 10^9 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 工作温度 250 K 时的探测率为 $5.0 \times 10^9 \text{ cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

以色列 SCD 是较早开展 InAsSb 红外探测器研究的机构, 研制的 XBn InAsSb $640 \times 512/15 \mu\text{m}$ 的阵列^[20], 吸收层厚度为 $3 \mu\text{m}$, 该焦平面阵列在 150 K 工作温度下的热像图非常清晰 (图 10), 近处几个小黑斑是牛群, 山顶上电线杆有 2 km 远。在 F/3.2 镜头、22 ms 积分时间下, 测得 NETD 为 20 mK , 量子效率为 70%, 有效像元率为 99.5%, 背景限探测率 (BLIP) 工作温度高达 165 K。另外, 研究人员还对探测器进行了变工作温度的热成像 (图 11) 和制冷功耗测试^[12], 当温度升高到 190 K 时性能才出现明显的衰减; 95 K 工作温度, 制冷机功率降低 20%; 150 K 工作温度, 制冷机功率降低 60%。



图9 1k \times 1k InAsSb 焦平面阵列 150 K 温度下热像图 (f/2.3)

Fig.9 Snapshot from video captured at 150 K using f/2.3 optic



图10 640 \times 512 $15 \mu\text{m}$ InAsSb n型焦平面阵列 150 K 温度下的热像图

Fig.10 Images registered with F/3 optics on InAsSb n-type bariode FPAs at 150 K on a $15 \mu\text{m}$ pitch Pelican FPA with 640×512 pixels

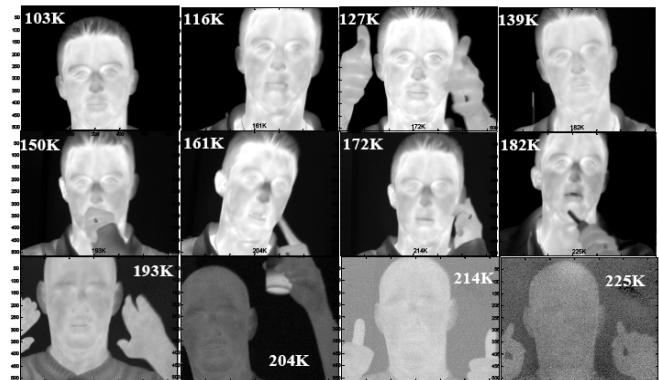


图11 工作温度 103 K ~ 225 K 下焦平面阵列热像图

Fig.11 Images at FPA temperatures between 103 K and 225 K

美国 HRL 实验室于 2017 年报道了在 GaAs 衬底上生长 nBn 结构的 InAsSb 器件^[21], 并研制出 $2 \text{ k} \times 1 \text{ k}$ (2040×1156) 焦平面阵列, 目前该阵列为国际最大规格, 像元间距 $5 \mu\text{m}$, 通过铟柱倒装互连到 Cyan 系统公司的 CS3 ROIC 集成电路系统上。探测器的响应截止波长为 $5.1 \mu\text{m}$, 150 K 工作温度下, 可操作性大于 99.9%, 没带抗反射膜的器件量子效率大于 60%。

2.3 InAs/Ga(In)Sb HOT 红外探测器

美国洛克希德·马丁公司下属的圣·芭芭拉焦平面公司率先开发出了高工作温度 nBn II 类超晶格中波红外探测器^[21], 工作温度为 -143°C (130 K) ~

118°C (155 K) (取决于暗电流要求), 其性能与工作在-193°C (80 K)的 InSb 红外探测器、工作在-178°C (95 K) HgCdTe 红外探测器和工作在-158°C (115 K) 的采用外延技术的 HgCdTe 红外探测器的性能相当。

美国西北大学量子器件中心采用 M 结构研制出 320×256 InAs/GaSb 中波红外焦平面阵列^[23], 150 K 温度下, 量子效率大于 50%, 光谱探测率为 1.05×10^{12} cmHz $^{1/2}$ /W, 获得了不同工作温度下的人体热像图(图 12), 150 K 温度下 NETD 为 150 mK。

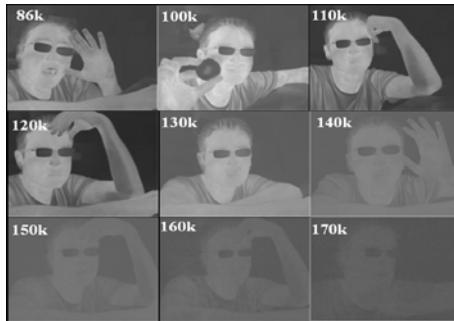


图 12 HOT 器件在不同温度下的热像图

Fig.12 Pictures taken by HOT FPA at different temperatures

昆明物理研究所胡锐和邓功荣^[24]研究了 nBn 型 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器电学特性, 150 K 温度下暗电流比 77 K 温度下大一个量级, 但峰值探测率仅下降到 1/5。研究结果表明, 采用 nBn 结构的 II 类超晶格探测器有望实现较高的工作温度。

3 展望

《2017 年世界军用红外成像探测器及系统市场分析报告》^[21]预测未来 5 年(至 2021 年), 高工作温度(HOT) nBn/XBn 红外焦平面探测器将应用在新兴军事系统中。美国也将其纳入主要的新计划, 包括 F-35 联合攻击战斗机。

高工作温度锑基红外探测器将会使制冷机的寿命至少延长 1 倍以上, 系统的可靠性得到提高, 成本将大幅降低, 在空间探测、卫星遥感、导弹制导、导弹告警、预警跟踪、毒气探测等军事领域方面将有重要的应用。目前, 对于 HOT 探测器来说, 制造费用还比较昂贵, 但随着技术的不断成熟, 费用将有望得到进一步降低。

参考文献:

- [1] J. Piotrowski, A. Rogalski. *High-Operation-Temperature Infrared Photodetectors*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2007: 233-235.
- [2] P. Martyniuk, A. Rogalski. HOT infrared photodetectors[J]. *Opto-Electron. Rev.* 2013, **21**(2): 239-257.
- [3] Kinch M A. The Future of Infrared; III-Vs or HgCdTe?[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(9): 1-8.
- [4] Mark J.Furlong, Gordon Dallas, Greg Meshew. Growth and characterization of 6" InSb substrates for use in large area infrared imaging applications[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **9070**: 907016.
- [5] 史衍丽. 锑基 II 类超晶格红外探测器—第三代红外探测器的最佳选择[J]. 红外技术, 2011, **33**(11): 621-624.
- [6] SHI Yanli. Type-II InAs/GaInSb Superlattices Infrared Detectors—one of the Best Choices as the Third Generation Infrared Detectors [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(11): 621-624.
- [7] Steenbergen, E. H., Connelly. Significantly improved minority carrier lifetime observed in a long-wavelength infrared III-V type-II superlattice comprised of InAs/InAsSb[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **99**: 251110.
- [8] Woolley J. C., Warner J. Optical energy-gap variation in InAs-InSb alloys[J]. *Can. J. Phys.* 1964, **42**: 1879-1885.
- [9] H. H. Wieder, A. R. Clawson. Photo-electronic properties of InAs_{0.07}Sb_{0.93} films[J]. *Thin Solid Films*, 1973, **15**: 217-221.
- [10] A. Rogalski. *Infrared Detector*:2nd[M]. CRC Press, 2010.
- [11] T Ashley, C T Elliott, A M White. Non-equilibrium devices for infrared detection[J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(10): 451-452.
- [12] Maimon, S., Wicks, G.W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 151109.
- [13] Itay Shtrichman, Daniel Aronov, Michael ben Ezra, et al. High operating temperature epi-InSb and XBn-InAsSb photodetectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2012, **8353**: 83532Y.
- [14] Philip Klipstein, Zipora Calahorra, Ami Zemel. 3rd generation infrared detector program at SCD InAlSb focal plane arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2004, **5612**: 580462.
- [15] T. Markovitz, I. Pivnik, Z. Calahorra Digital $640 \times 512/15\mu\text{m}$ InSb detector for high frame rate, high sensitivity and low power applications[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **8012**: 80122Y.
- [16] A. Evirgen, J. Abautret, J.P. Perez. InSb photodetectors with PIN and nBn designs[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **8993**: 899313.
- [17] Tim Ashley, Theresa M. Burke, Martin T. Emeny. Epitaxial InSb for elevated temperature operation of large IR focal plane arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2003, **5074**: 95-104.
- [18] Y. Z. Gao, X. Y. Gong, G. H. Wu, et al. Uncooled InAsSb Photoconductors with Long Wavelength[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2011, **50**(6): 060206-1-060206-3.
- [19] A.I. D'Souza, E. Robinson, A.C. Ionescu, et al. InAsSb Detector & FPA Data and Analysis[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **9100**: 91000B.
- [20] Alexander Soibel, Cory J. Hill, Sam A. Keo. Room temperature performance of mid-wavelength infrared InAsSb nBn detectors[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **105**: 023512.
- [21] Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, et al. High Operating Temperature XBn-InAsSb Bariode Detectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2012, **8268**: 82680U.
- [22] 唐永滋. 2016 年世界红外军用市场出现反弹[J]. 红外信息, 2017(3): 19-20.
- [23] TANG Yongzi. The world's infrared military market rebounded in 2016[J]. *Infrared Information*, 2017(3): 19-20.
- [24] Manijeh Razeghi, Siamak Abdollahi Pour, Edward Huang. High Operating Temperature MWIR photon detectors based on Type II InAs/GaSb superlattice[C]//*Proc. of SPIE*, 2011, **8012**: 80122U.
- [25] 胡锐, 邓功荣, 张卫锋, 等. nBn 型 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器光电特性研究[J]. 红外技术, 2014, **36**(11): 863-867.
- [26] HU Rui, DENG Gongrong, ZHANG Weifeng, et al. Electrical Characterization of InAs/GaSb II Superlattice Infrared Detectors Based on nBn Design[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(11): 863-867.