

量子阱红外探测器最新进展

邢伟荣¹, 李杰²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 总装备部科技信息研究中心, 北京 100073)

摘要:量子阱红外探测器(QWIP)自从20世纪80年代被验证后,得到了广泛积极的研究。基于Ⅲ-V材料体系、器件工艺的成熟和自身的稳定性、响应带宽窄等特有的优势,QWIP成为对低成本、大面阵、双(多)色高精度探测有综合要求的第三代红外焦平面阵列(FPA)的重要发展方向。本文主要总结了国际QWIP器件的最新发展动态,并展望了其发展趋势。

关键词:量子阱红外探测器;进展;趋势

中图分类号:TN214 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.02.005

Recent progress of quantum well infrared photodetectors

XING Wei-rong¹, LI Jie²

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. Scientific and Technological Research Center of the General Armament Department, Beijing 100073, China)

Abstract: Since the initial demonstration of QWIP focal plane arrays in the late 1980's, there has been a world wide lasting effort in developing this kind of detectors. Based on the maturity of Ⅲ-V material system and the processing techniques, together with its intrinsic stability and the narrow absorption spectrum, QWIPs is a competitive candidate for the third FPA, which must be of the advantages of low cost, large format, multi-colour bands and high sensitivity. This article presents a brief overview and prospect of the current progress of the technology.

Key words: QWIP; progress; prospect

1 引言

QWIP是起源于20世纪80年代中期的红外探测领域的新秀,自从AT & T Bell Lab的B. F. Levine等人报道了第一个高探测率、高响应度的MQW红外探测器以来,QWIP由于具有材料生长和制备工艺成熟、易于大面阵集成、稳定性好、器件均匀性好、可操作像元数高、成本低等优点,引起了广泛的研究热潮。在近二十多年的发展中取得长足的发展。尽管由于QWIP的子带间吸收机制限制了其对垂直入射红外辐射的吸收,导致其很低的量子效率,但由于其优良的大面阵材料的易实现性、多色探测时几乎无光谱串扰性,很好地符合第三代红外探测器对大面阵、多色(波段)探测、低成本的要求,因此在即将到来的第三代红外探测器领域中占有重要地位。

本文总结了QWIP的最新进展,主要介绍了其在大面阵双多色(波段),提高探测精度、量子效率、工作温度中取得的新进展和突破,并预测了其未来

发展趋势。

2 大面阵、双多色(波段)研究进展

光谱特征是不同的化学成分物质的固有特性,同时在多个窄红外波段可以获得更多的信息,成为要求有高分辨率的第三代红外探测器的发展方向。

2009年,美国喷气推进实验室(JPL)、空军研究实验室(AFRL)、导弹防御局联合研制出像元中心距30 μm的1024 × 1024中、长波双色同像素同时读出的每个像元使用两个钢柱的探测器阵列^[1-2],为当前QWIP双色大面阵的最高水平。该探测器中、长波吸收层均采用多阱耦合结构。中波为双阱耦合,跃迁模式从束缚态到连续态。长波吸收结构为三阱耦合,跃迁模式为束缚态到准束缚态,如图1所

作者简介:邢伟荣(1986-),男,在读研究生,主要研究方向为Ⅲ-V族半导体材料。E-mail:tureboy@126.com

收稿日期:2012-11-11

示。该器件结构将中波地线用金属桥连接到底部地线,如图2所示,使钢柱总数减少30%,很好地降低了阵列组装工艺中的压力,此方式非常有利于大规模阵列的组装。

该探测器中波峰值波长为 $4.6 \mu\text{m}$,截止波长 $5.1 \mu\text{m}$,在偏压 -1 V 下,工作温度 90 K ,背景温度 300 K ,光学参数 $f/2.5$ 条件下,峰值探测率为 $4 \times 10^{11} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}/\text{W}}$,如图3所示;长波峰值波长为 $8.4 \mu\text{m}$,截止波长 $8.8 \mu\text{m}$,在偏压 -1 V ,工作温度 70 K ,背景温度 300 K ,光学参数 $f/2.5$ 条件下,峰值探测率为 $1 \times 10^{11} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}/\text{W}}$ 。其他条件相同时,工作温度 72 K 时达到背景限制红外探测性能。工作温度在 68 K 时,中波、长波段探测的 NETD 值分别为 27 mK , 40 mK 。

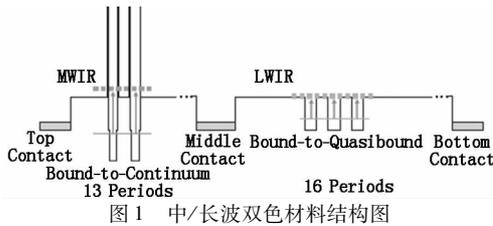


图1 中/长波双色材料结构图

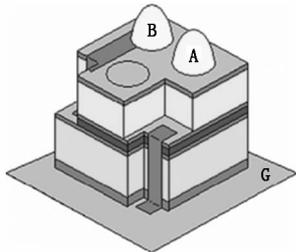
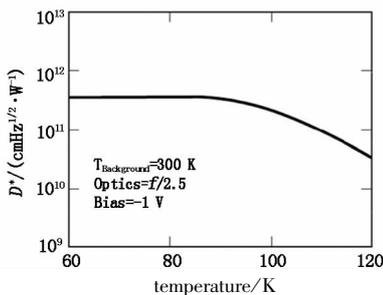
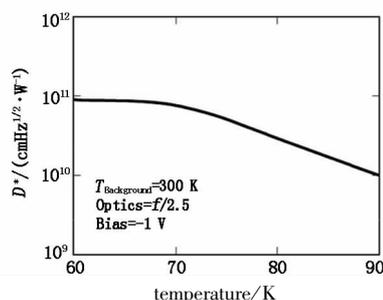


图2 双色 QWIP 器件单元连接示意图



(a) 中波波段探测率随工作温度的变化



(b) 长波波段探测率随工作温度的变化

图3 偏压为 -1 V 时, JPL 等研制的双色探测器的探测率

代表当今世界多色探测最高水平的是 NASA/JPL 在 2004 年研制出的 640×512 四色焦平面器件,由四个 128 器件构成(如图4所示),响应波段为 $4 \sim 5.5 \mu\text{m}$, $8.5 \sim 10 \mu\text{m}$, $10 \sim 12 \mu\text{m}$, $13 \sim 15.5 \mu\text{m}$ 。 300 K 背景温度, $f/5$ 光学系统,在 40 K 时各波段探测器 NETD 值分别为 21 mK , 45 mK , 14 mK 和 44 mK ,探测率均大于 $1 \times 10^{11} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}/\text{W}}$ (如图5所示)。可操作像元比例为 99.9% ,展现出优异的成像质量^[3]。NASA/JPL 四色 QWIP 成像图如图6所示。

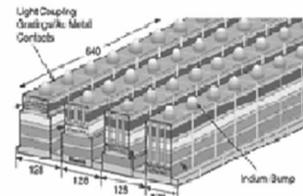


图4 NASA/JPL 四色 QWIP 器件结构

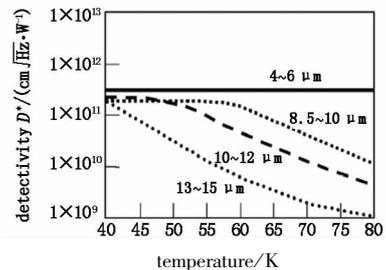


图5 四色 QWIP 探测率随温度变化



图6 NASA/JPL 四色 QWIP 成像图

3 红外偏振探测器

自然界的电磁波由不同偏振度的电磁波组成,这在物体对电磁波的反射和辐射中均有体现,每种物体有着不同的偏振度。而通常人造目标比自然背景有更高的偏振度。同非偏振红外探测相比,偏振探测能够提供物体和场景的反射率、发射率及位向信息,能够更好地区分目标和背景特征。采用红外偏振探测很好的降低了红外干扰、对抗措施对红外探测系统识别、探测能力的影响,减少了目标探测和识别中的误警率^[4-6]。

为了获得高分辨红外探测能力,从复杂背景中辨别目标, Thales Optronics 于 2008 年研制了长波红外偏振光探测器^[7]。该探测器为 $20 \mu\text{m}$ 中心距

640 × 512 阵列,由四个 320 × 256 组成,探测波段在 8 ~ 12 μm。他们将表面二维光栅结构改为一维光栅(如图 7 所示),每四个像元组成一组,表面光栅取向相对转动 45°,组成阵列,以最大限度探测偏振光。这种探测器并没有引起灵敏度的降低和成本的增加,反而可以较好地定位复杂目标。其成像结果如图 8 所示。

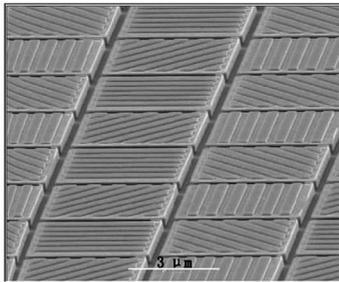
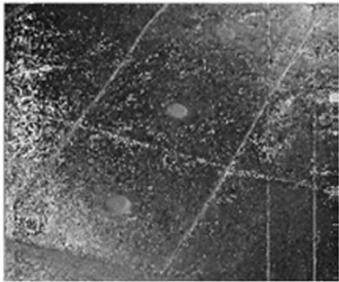
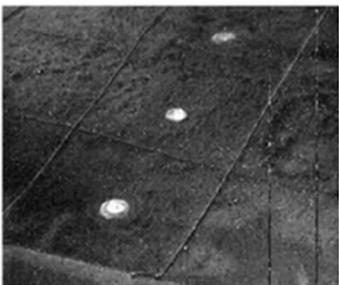


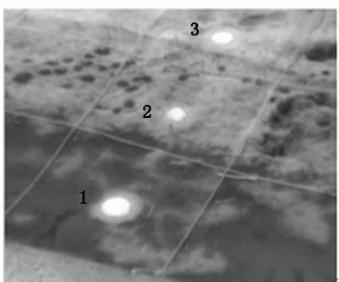
图 7 2 × 2 像元偏振光测定阵列 SEM 图



(a) 非偏振成像



(b) 偏振度成像



(c) 偏振叠加像

图 8 传统非偏振成像与红外偏振成像对比

4 宽谱远红外 QWIP

QWIP 宽谱远红外探测近年来被广泛应用于地球资源监测和空间探测。应用于地球资源卫星上作为红外遥感器,能够提供地球表面的资源分布、空气质量、火山监测及气流流动、云层变动、气候变化等

气象信息。空间应用中包括行星科学探测任务。

欧洲航天局资助 Alcatel-Thales III - V 实验室领导的科研团队正在研发高性能、宽带远红外(11 ~ 15 μm)QWIP。2011 年,他们采用四阱耦合结构^[8],每个阱设计峰值波长分别为 11.5 μm, 12.5 μm, 13.7 μm, 14.7 μm, 合成宽带吸收谱。其响应度在 34 K 下随不同偏压变化如图 9 所示,信噪比在 40 K 时到达 2150。

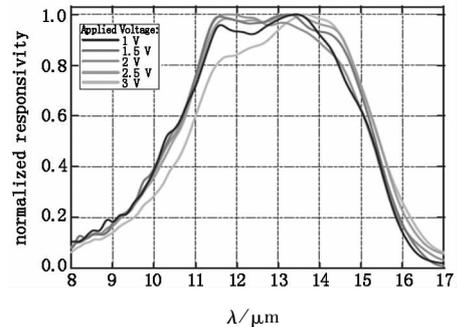


图 9 34 K 时,宽谱探测器的响应度随不同偏压变化

美国 ARL 在 2011 年制作出 1024 × 1024 阵列,响应半峰宽(FWHM)为 8 ~ 11 μm。该探测器量子效率为 20%,在 50 K 时 -3 V 偏压下达到背景限红外探测性能(BLIP)。另外,他们已完成一个新型结构的设计^[9],此结构由数个不同阱宽的阱耦合而组成一个周期,通过阱宽调节能带结构来决定吸收谱的前后截止波长,FWHM 为 13 ~ 30 μm。通过已经被实验验证的理论模型计算,该探测器在 21 K 和 +3 V 偏压下到达 BLIP。在 20 K 时, $f/2$, 3 V 偏压,积分时间 5 ms 时 NETD 可到达 10 mK。

5 超导电子过滤 C - QWIP

为了抑制热激发电子产生暗电流,提高探测精度,QWIP 必须在较低温度下工作。为了克服低温工作的缺点,ARL 最近提出一种利用高温临界温度超导体过滤热激发电子的 C - QWIP^[10],已完成理论设计和性能模拟计算。该探测器通过在上接触层上再沉积一薄层绝缘体和高临界温度超导体后,依靠顶部的这三层的能带结构形成一个高临界温度超导体的单电子隧穿结。由于光电子和暗电子能量不同,通过加合适的偏压,该结构够很好地过滤掉暗电子(如图 10 所示)。

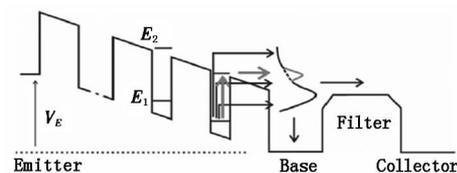


图 10 电子过滤结构

(横向箭头代表能量较高的光电子通过势垒被收集, 竖向箭头表示的暗电子被过滤下来)

探测器的探测精度和工作温度都有很大提升,探测器工作温度可以提高到 90 K(提高了 30 K),同时 NETD 也有 15% ~ 25% 的改进。

6 国内进展

量子阱红外探测器技术经过几十年的发展,国外大面阵 QWIP 技术趋于成熟。受到工业制造水平的影响,国内 QWIP 技术与国际存在较大差距。中科院上海技术物理研究所研制了 320×256 响应波长为 $9.9 \mu\text{m}$ 的 QWIP 焦平面阵列,像元中心距 $25 \mu\text{m}$, 65 K 下峰值探测率 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}/\text{W}}^{[11]}$ 。中国电子科技集团公司第十一研究所报道了长波 640×512 阵列成像,器件盲元率为 0.87%,响应率不均匀性 5.8%^[12]。中科院半导体研究所与中国电子科技集团公司第十一研究所合作研制了 160×128 中/长波双色面阵,吸收峰值分别为 $2.7 \mu\text{m}$ 和 $8.3 \mu\text{m}$, 77 K 工作温度,中、长波段峰值探测率分别为 $1.61 \times 10^{10} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}/\text{W}}$, $2.67 \times 10^{10} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz}/\text{W}}^{[13]}$ 。另外,中国电子科技集团公司第十三研究所报道了 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 双色单元器件,响应波长分别为 $5.2 \mu\text{m}$ 和 $7.8 \mu\text{m}$ 。

7 展望

QWIP 受本身物理机理的限制,不能吸收垂直入射光,光栅耦合导致光电转换效率的降低;量子阱内利用掺杂产生光激发载流子数目远远低于传统体材料的载流子数目,以上导致了 QWIP 非常低的量子效率。另外,为抑制热激发暗电流提高探测精度,其工作温度较低。为充分发挥 QWIP 焦平面阵列的优势,使其在不断发展的红外焦平面探测领域仍然能占有重要席位,持续提高量子效率和工作温度、降低暗电流是其亟待解决的问题。结合最新研究进展,量子阱焦平面器件未来主要有以下几个方面发展:①更大像元的量子阱红外探测器;②双(多)色红外焦平面阵列和多波段结合(红外/紫外)探测器阵列;③长波和甚长波波段(太赫兹探测领域);④更低维结构,量子点、量子线红外探测器。

参考文献:

- [1] S D Gunapala, S V Bandara, J K Liu, et al, 1024 × 1024 Format pixel co-located simul-taneously readable dual-band QWIP focal plane[J]. Infrared Physics & Technology, 2009, 52: 395 – 398.
- [2] S D Gunapala, S V Bandara, J K Liu, et al, Demonstration of 1024 × 1024 pixel dual-band QWIP focal plane array[C]. SPIE, 2010, 7660, 76603L.
- [3] A Soibel, S D Gunapala, S V Bandara, et al. Large format multicolor QWIP focal plane arrays [C]. SPIE, 2009, 7298, 729806.
- [4] Y Aron, Y Gronau. Polarization in the LWIR—a method to improve target acquisition[C]. SPIE, 2005, 5783: 653.
- [5] C Chun, F Sadjadi. Machine recognition of objects using IR polarimetry[C]. SPIE, 1996, 2756: 53.
- [6] C S L Chun, D L Fleming, W A Harvey, et al. Polarization-sensitive thermal imaging sensors for target discrimination[C]. SPIE, 1998, 3375: 326 – 336.
- [7] B Connor, I Carrie. Recent trials results of a LWIR polarimeter[C]. SPIE, 2009, 7298, 72980A – 1.
- [8] V Guériaux, A Nedelcu, A Coulibaly, et al. Design of broadband QWIPs for operation above BLIP temperature [J]. Infrared Physics & Technology, 2011, 54: 177 – 181.
- [9] K K Choi, M D Jhabvala, D P Forrai, et al. C-QWIPs for space exploration [J]. Infrared Physics & Technology, 2011, 54: 170 – 176.
- [10] J Sun, K K Choi. The performance improvement calculation of corrugated quantum well infrared photodetector(C-QWIP) with a high critical temperature(T_c) superconducting electron filter[C]. SPIE, 2011, 8155, 81550G.
- [11] Jin Jupeng, Liu Dan, Wang Jianxin, et al. 320×256 GaAs/AlGaAs long wave QWIP [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(4): 833 – 837. (in Chinese)
金巨鹏, 刘丹, 王建新, 等. 320×256 GaAs/AlGaAs 长波红外量子阱焦平面探测器 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 833 – 837.
- [12] Hu Xiaoyan, Zhou Liqing, Yu Yan, et al. The development of long wave 640×512 GaAs/AlGaAs QWIP [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(11): 1220 – 1223. (in Chinese)
胡小燕, 周立庆, 于艳, 等. 长波 640×512 GaAs/AlGaAs 量子阱红外焦平面探测器的研制 [J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1220 – 1223.
- [13] Zhong Ming, Ma Wenquan, Su Yanmei, et al. Development of large-array chip for dual colour QWIPs [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 782 – 784. (in Chinese)
种明, 马文全, 苏艳梅, 等. 双色量子阱红外探测器大面阵芯片的研制 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 782 – 784.