

640×512 偏振长波量子阱红外焦平面探测器研制

周旭昌, 李东升, 木迎春, 铁筱滢, 王晓娟, 陈卫业

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 介绍了大面阵偏振长波量子阱红外焦平面探测器组件的研制进展。在 640×512 规模 20 μm 中心距面阵上, 偏振焦平面采用了 2×2 子单元设计, 子单元中每个像元分别刻蚀 0°、90°、45° 以及 135° 方向的一维线性光栅, 来获得入射光不同偏振角度的信息。突破了长波量子阱材料外延和器件制备等关键技术, 制备出面阵探测器芯片, 实现了偏振长波红外探测的单片集成, 配上杜瓦和制冷机, 研制出噪声等效温差优于 30 mK 的长波偏振 640×512 量子阱探测器组件。

关键词: 偏振长波红外探测; 大面阵量子阱焦平面组件; 单片集成

中图分类号: TN362 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0104004

Study on 640×512 polarimetric LWIR QWIP FPA

Zhou Xuchang, Li Dongsheng, Mu Yingchun, Tie Xiaoying, Wang Xiaojuan, Chen Weiye

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The development of the large format polarimetric LWIR quantum well infrared FPA. The 20 μm pitch, 640×512 array was divided into 2×2 unit cells. Each pixel in the unit cell was etched a 1D lamellar grating on it, with four different orientations of 0°, 90°, 45° and 135°, to get the polarimetric information of the incidence irradiation. Based on the QWIP FPA key technologies such as quantum well material epitaxy and chip preparation, the single-chip integration with LWIR and the polarization detection function was realized on the QWIP FPA. The 640×512 polarimetric LWIR QWIP FPA assembly with noise equivalent temperature difference (NETD) better than 30 mK was obtained with the integration the FPA chip with the Dewar and the sterling cooler.

Key words: polarimetric LWIR detection; large format QWIP FPA assembly; single-chip integration

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期: 2016-06-21

作者简介: 周旭昌(1976-), 男, 研究员级高级工程师, 博士, 主要从事 III-V 族红外探测器材料和器件方面的研究。

Email: xchzhou@163.com

通讯作者: 李东升(1974-), 男, 研究员级高级工程师, 硕士, 主要从事红外探测器方面的研究。Email: li_d_s@163.com

0 引言

光电成像探测是实现目标态势感知的重要手段,传统的基于强度成像的探测设备与技术日益复杂的烟幕、伪装、假目标等环境下,目标探测和识别效果受到严重影响。而近年来发展的偏振红外探测技术将偏振和红外面阵技术融合,不仅能获得目标二维空间的红外辐射强度信息,还能获得其偏振信息^[1]。利用增加的偏振维度,偏振红外探测器可明显增强探测系统对伪装、暗弱等目标与背景的差异,显著提高系统对目标的探测与识别能力,在伪装目标检测、海上目标监视、空中和空间目标监测等领域应用需求有着广泛的应用需求^[1]。

常规面阵红外偏振探测的实现方式有两种:第一种是通过光学系统来将目标辐射偏振态分离,但是其光学系统复杂^[1];第二种是直接红外焦平面芯片前集成偏振片,使整机在采用常规光学设计下实现红外偏振成像探测,有效降低了光学系统设计复杂度。其实现方法通常是在焦平面芯片前用胶粘的方法将偏振片和红外探测芯片集成。但该工艺难度大,对红外探测芯片的可靠性也有一定影响,同时器件响应率会下降一半。近年来发展起来的量子阱红外探测器(QWIP)具有热灵敏度高、均匀性好、材料生长与器件加工工艺成熟,成本适中,便于规模装备,易于多色及大面阵器件的单片集成^[2-5],而且还可通过在器件顶部刻蚀线性光栅来获得对红外光的偏振敏感特性,无需另加偏振片,相对常规粘接偏振片的方式很有优势。线性光栅量子阱红外探测器的偏振响应特性是普林斯顿大学 1998 年首先发现的^[6]。在 2001 年美国陆军实验室(ARL)就开展了长波偏振量子阱的研制,通过 0°和 90°两种方向线性光栅叠加排列组合的方式制备出长波 384×288 偏振量子阱芯片^[7]。法国 THALES 公司在长波 Sirius 量子阱组件基础上开展了四象限偏振面阵探测器研制^[8],通过外场成像试验中对道路、地雷、汽车等人工目标的探测,充分展现出偏振长波量子阱阵列探测器的应用价值^[9-10]。目前国内还没有相关研究报道。

根据相关应用的需求,开展了 640×512 规模、20 μm 中心距偏振长波量子阱红外焦平面探测器的

研制,文中报道了器件的最新研制情况和相关结果。

1 偏振量子阱光敏元设计

量子阱光敏元的偏振响应特性是通过光栅的设计来实现的。量子阱芯片采用光导器件结构,通过顶部反射光栅来实现对红外辐射的光耦合。据量子阱子带跃迁的选择定则,只有偏振方向平行于量子阱生长方向的光波才能激发子带跃迁,而面阵探测器主要工作在正入射条件,其电矢量方向垂直于量子阱生长方向,很难被量子阱吸收层吸收、激发子带跃迁形成光电流。光栅决定着量子阱探测器的量子效率,在量子阱芯片中还是实现偏振探测的关键。在量子阱焦平面阵列的像元顶部制作线性光栅,选择性地耦合一定偏振方向的入射红外光,使其可以被器件吸收。

在 20 μm 中心距偏振探测光敏元结构设计中,采用了 4 象限一维偏振光栅方案,焦平面阵列被分为一系列 2×2 的子单元,子单元中的每一个像元刻蚀具有 4 个不同的方向(0°,90°,45°和 135°)的一维线性光栅,如图 1 所示。采用 4 种不同方向线性光栅的量子阱光敏元能够探测入射光不同偏振角度的信息,获得目标辐射 3 个斯托克斯参量的全部特性。通过 4 类偏振方向在阵列中交错排列,热像仪可获得 4 类具有足够高分辨率的子图像,并最终得到目标偏振特性的信息。

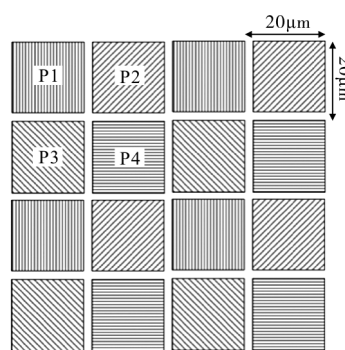


图 1 偏振光敏元结构示意图

Fig.1 Layout of polarization-sensitive elements

采用 FDTD solutions 软件对量子阱器件中的电磁场进行了仿真计算。结构模型如图 2(a)所示,在量子阱吸收区上的 GaAs 层通过刻蚀形成了线性光栅,并蒸镀了金属 Au 反射层,入射光从衬底方向入射,衬底进行了背减薄。图 2(b)给出了波长为 8.5 μm 的

红外光入射时, 器件中电磁场的 $|E_z|$ 分量的仿真结果。通过该仿真获得了器件的吸收效率, 并对线性光栅的周期和高度等方案参数进行了优化设计, 来提高器件量子效率。

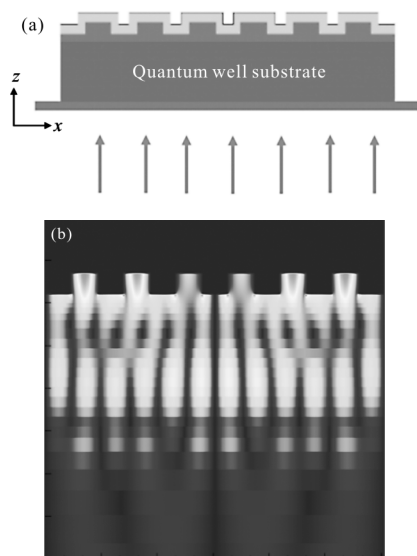


图 2 长波量子阱红外探测器光耦合模型(a)和 8.5 μm 入射光电场 $|E_z|$ 分量分布仿真结果(b)

Fig.2 Optical coupling model of LW-quantum well photodetector (a) and simulation result of the $|E_z|$ at $\lambda=8.5 \mu\text{m}$ (b)

2 偏振长波量子阱焦平面器件研制

为获得高分辨率成像, 同时考虑紧凑结构设计, 在偏振量子阱芯片中采用了 640×512 规格和 $20 \mu\text{m}$ 中心距的设计。 $20 \mu\text{m}$ 是目前规模量产长波量子阱焦平面器件最小的中心距尺寸, 仅有法国 Thales 公司在 Sirius 长波量子阱组件中采用, 其优点是有益于整机系统的紧凑化设计。但随着芯片尺寸的减小, 量子阱芯片的量子效率快速下降。所以需优化器件的设计和制备工艺来提高器件响应。

2.1 材料设计与生长

量子阱材料方案为: 材料生长选用(001)晶面的砷化镓衬底, 长波为 40 周期的 GaAs/AlGaAs 结构材料, 在量子阱的上下分别生长 GaAs:Si 层作为电极接触层, 如图 3 所示。

采用 MBE 49 在 4 in (1 in = 2.54 cm) 半绝缘 GaAs (100) 衬底上进行量子阱材料的生长, 生长过程中采用红外测温仪测试控制生长温度, 调节 V/III 束流比, 使材料生长保持在(2x4)再构表面。生长过程中, 在界面处

GaAs:Si	0.7 μm
GaAs/AlGaAs 40X QWs	2.2 μm
GaAs:Si	0.7 μm
AlGaAs	0.5 μm
GaAs substrate	

图 3 长波量子阱红外探测器材料结构

Fig.3 Structure of LW-quantum well photodetector material

进行了适当的停顿, 以获得平整的界面。过生长条件优化, 完成了 GaAs/AlGaAs 量子阱材料生长技术的制备。

通过高分辨率 X 射线衍射和光致发光谱(PL)对量子阱材料的结构和晶体质量进行了测试分析。量子阱材料的高分辨率 X 射线衍射测试结果中, 出现了多级卫星峰, 零级卫星峰和 GaAs 峰附近出现了清晰的等厚干涉干涉条纹, 零级卫星峰半峰宽优于 $15''$, 如图 4 所示。室温 PL 谱测试中, 出现了电子和重空穴(e-hh)的复合发光峰以及电子和轻空穴(e-lh)的复合发光峰。其中电子和重空穴(e-hh)的半峰宽仅为 7.3 meV, 如图 5 所示。以上结果表明 GaAs/AlGaAs 量子阱材料具有优良的界面质量和晶体质量。

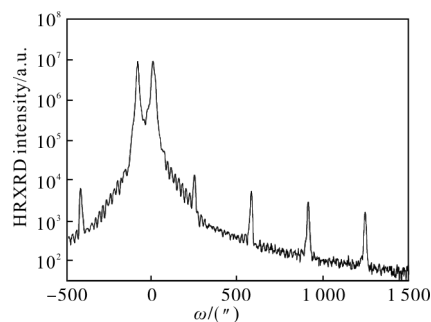


图 4 长波量子阱材料的 HRXRD 测试结果

Fig.4 HRXRD results of the LW QWIP material

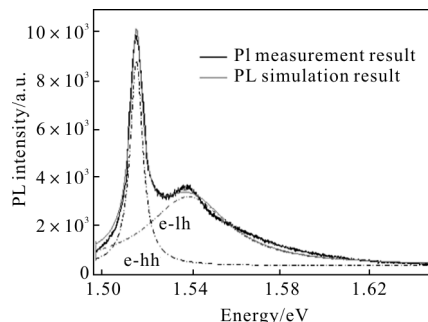


图 5 GaAs/AlGaAs 量子阱材料的室温光致发光谱测试结果

Fig.5 Room temperature PL results of the GaAs/AlGaAs QW material

2.2 偏振量子阱芯片制备

量子阱芯片的制备主要包括在量子阱表面制备光栅、刻蚀台面隔离像元、金属沉积形成反射层、合金化获得欧姆接触、钝化以及顶部电极互连金属制备等过程，其中台面制备过程中的刻蚀以及窄间距反射金属层是其中的关键工艺。

采用反应离子刻蚀技术对量子阱进行刻蚀，台面刻蚀截面如图6所示，表现出较高的陡直度。

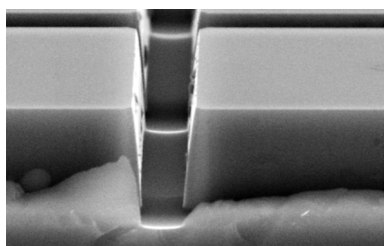


图 6 量子阱台面刻蚀

Fig.6 Etch profile of quantum well material

由于采用 $20\mu\text{m}$ 中心距器件设计，金属反射层间距较以前的量子阱设计方案更窄，采用了翻转光刻技术，通过剥离工艺，制备出边缘非常平整的反射金属层。图7为 $2\mu\text{m}$ 间距反射金属层试验片的照片。

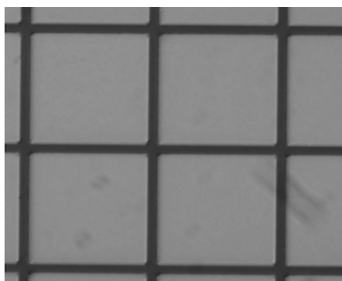


图 7 窄间距金属层

Fig.7 Metal reflection layer with narrow gap

最终制备出的偏振量子阱芯片如图8所示。

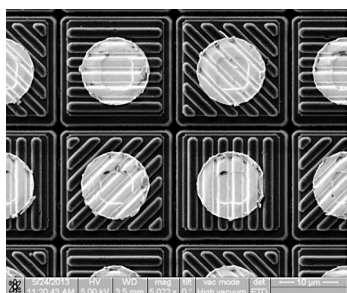


图 8 量子阱芯片的 SEM 照片

Fig.8 SEM picture of QWIP chip

将制备完成的量子阱芯片和 CMOS 640×512 读

出电路倒焊互连，获得偏振量子阱探测器芯片组，通过背减薄/衬底去除工艺来提高器件响应。首先在红外敏感探测器芯片与读出电路芯片之间的缝隙用环氧胶填充。第二步采用机械磨抛去除约 $600\mu\text{m}$ 的 GaAs 层，接着用化学抛光再去除约 $100\mu\text{m}$ GaAs。第三步采用选择性湿化学腐蚀和反应离子刻蚀完全去除最后的 GaAs 衬底。在完成量子阱芯片背减薄以后，对芯片进行镀膜增透，芯片如图9所示。

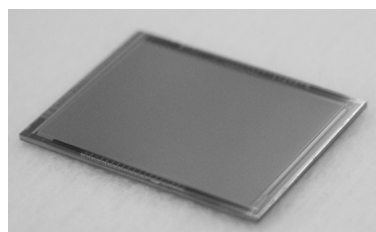


图 9 背减薄后的探测器芯片

Fig.9 QWIP chip after back-lapping

2.3 偏振量子阱探测器组件制备

对偏振量子阱焦平面芯片进行了金属微杜瓦封装，配接集成式斯特林制冷机，制备出偏振长波 640×512 量子阱探测器组件。其中金属微杜瓦采用大直径合金材料薄壁内管，并通过多层隔板薄壁冷屏来消杂光。集成整体式斯特林制冷机由压缩机、膨胀冷指和驱动电路组成，内部充高纯氦气做工质，为贴在冷指冷端的芯片组提供低温工作环境。

3 探测器组件测试分析

对偏振长波 640×512 量子阱探测器组件的评价包括常规红外性能测试和偏振特性测试两部分内容。

3.1 红外性能测试

偏振长波 640×512 量子阱探测器组件(图10)的红外性能测试包括光谱和噪声等效温差测试。器件的响应光谱如图11所示，光谱范围为 $8.1\sim 9.1\mu\text{m}$ ，



图 10 偏振长波量子阱探测器组件

Fig.10 Polarimetric LWIR QWIP FPA assembly

并且由于背剪薄芯片厚度达到微米级别, 响应光谱上出现了干涉多峰。器件的噪声等效温差如图 12 所示, 优于 30 mK, 达到了国外报道^[2]和目前产品水平。

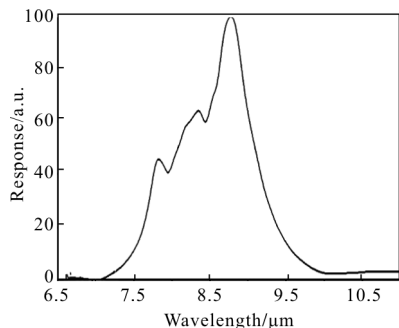


图 11 偏振长波量子阱探测器响应光谱

Fig.11 Responsive spectrum of a polarimetric LWIR QWIP

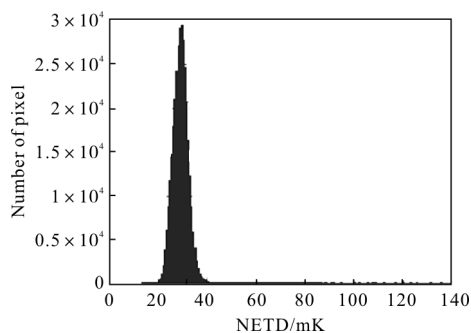


图 12 偏振长波量子阱探测器噪声等效温差

Fig.12 NETD histograms of a polarimetric LWIR QWIP

3.2 偏振特性测试

对器件偏振特性的测试系统如图 13 所示, 通过偏振片的旋转, 获得不同角度的线偏振入射光, 来实现对探测器偏振响应特性的测试。

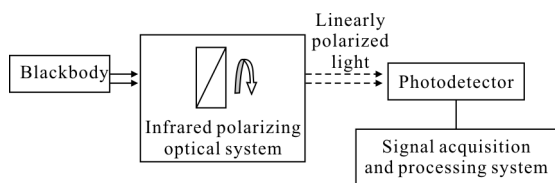


图 13 红外焦平面探测器偏振特性测试系统

Fig.13 Polarization measurement system for IR FPA

探测器芯片上 4 种不同方向光栅器件平均偏振响应测试结果如图 14 所示。结果表明: 器件响应随偏振片角度而表现出类似正弦曲线的变化规律, 但是 4 种不同偏振方向像元响应的最高点角度各不相同, 表现出对不同偏振角度入射光的敏感特性。

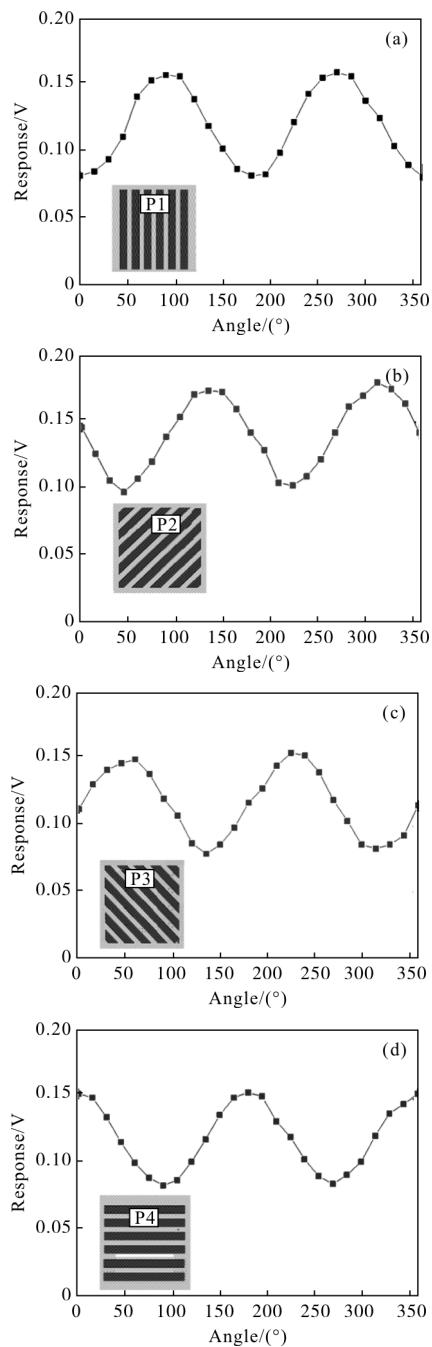


图 14 量子阱焦平面不同方向光栅器件的偏振响应特性

Fig.14 Polarimetric response characteristic of QWIP with different gratings

由偏振对比度 C_p 定义^[7]:

$$C_p = R_{max} / R_{min} \quad (1)$$

式中: R_{max} 和 R_{min} 分别为在偏振片旋转 360° 过程中, 焦平面阵列器件响应平均值的最大值和最小值。由以上公式计算结果如表 1 所示, 该探测器组件 4 种偏振方向器件的偏振对比度结果为 1.86~1.97, 达到了国外研

究机构同类器件文献中公布的水平^[8]。

表 1 四种偏振方向像元的偏振对比度测试结果

Tab.1 Polarization contrast of four different orientations pixels

	P1	P2	P3	P4
R_{max}/V	0.159	0.180	0.156	0.159
R_{min}/V	0.082	0.097	0.079	0.084
C_p	1.94	1.86	1.97	1.89

4 结 论

通过在面阵上 2×2 子单元中的一维线性光栅设计,以及量子阱材料外延、器件制备等关键技术的突破,研制出偏振长波量子阱面阵芯片,实现了偏振探测与长波红外探测的单片集成,获得了具有优良光电性能的偏振长波红外 640×512 量子阱探测器组件。该器件兼获长波大面阵高分辨率图像以及目标偏振信息,可有效提升系统对目标探测辨识的能力,具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

[1] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145–3153. (in chinese)
范晋祥,杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3145–3153.

[2] Schneider H, Liu H C. Quantum Well Infrared Photodetectors

[M]. springer, 2006.

[3] Eric Costarda, Truffera Jean P. Two color QWIP and extended wavebands[C]//SPIE, 2007, 6542: 65420X.

[4] Li Dongsheng, Zhou Xuchang. Study on the dual color QWIP FPA with MW/LW switch architecture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 168–1685. (in chinese)
李东升,周旭昌. 中/长波切换工作模式的双色量子阱红外焦平面研制[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1681–1685.

[5] Zhou Xuchang, Tan Ying, Yang Chunzhang. Study on the Quantum Well Infrared Photodetector material [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 463–466. (in chinese)
周旭昌,谭英,杨春章. 长波量子阱红外探测器材料技术研究[J]. 红外技术, 2013, 35(8): 463–466.

[6] Chen C J, Choi K K. Corrugated quantum well infrared photodetectors for polarization detection [J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(6): 862–864.

[7] Daneil W Beckman, James Van Anda. Polarization sensitive QWIP thermal imager [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42(3): 323–328.

[8] Alexandru Nedelcu, Hugues Facoetti, Eric Costard, et al. Small pitch, large format long-wave infrared QWIP focal plane arrays for polarimetric imagery [C]//Infrared Technology and Applications XXXIII, 2007, 6542: 65420U.

[9] Nicolas Perrin, Eric Belhaire, Patrice Marquet, et al. QWIP development status at Thales [C]// SPIE, 2008, 6940: 694008.

[10] Barry Connor, Iain Carrie, Robert Craig, et al. Discriminative imaging using a LWIR polarimeter [C]//SPIE, 2008, 7113: 71130K.