

中波碲镉汞红外偏振焦平面探测器的制备研究 (特邀)

杨超伟 封远庆 李东升 李宁 赵永强 舒畅 辛永刚 李永亮 左大凡 唐遥

Preparation of medium wave mercury cadmium telluride infrared polarization focal plane detector (*Invited*)

Yang Chaowei, Feng Yuanqing, Li Dongsheng, Li Ning, Zhao Yongqiang, Shu Chang, Xin Yonggang, Li Yongliang, Zuo Dafan, Tan Yao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20211008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碲镉汞红外焦平面器件技术进展

Development of technologies for HgCdTe IRFPA

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0103010–0103010(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0103010>

非蒸散型吸气剂维持红外焦平面探测器杜瓦组件工作真空度的性能与应用

Performance of non-evaporable getter to maintain vacuum of Dewar module of infrared focal plane detector and its application

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1004001–1004001(9) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1004001>

数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展

Review of digital mid-wave infrared focal plane array detector assembly

红外与激光工程. 2017, 46(1): 102003–0102003(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0102003>

基于中波制冷型碲镉汞探测器的远距离探测/识别连续变焦热像仪

A long-distance detection/identification continuous zoom thermal imager based on MW MCT detector

红外与激光工程. 2018, 47(4): 0404004–0404004(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0404004>

采用长波红外高光谱偏振技术的目标探测实验

Experiment of target detection based on long-wave infrared hyperspectral polarization technology

红外与激光工程. 2017, 46(5): 504005–0504005(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0504005>

线阵碲镉汞探测器对纳秒脉冲激光的反常响应规律及机理

Abnormal response law and mechanism of linear array HgCdTe detector irradiated by nanosecond pulse laser

红外与激光工程. 2017, 46(10): 1003003–1003003(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201748.1003003>

中波碲镉汞红外偏振焦平面探测器的制备研究 (特邀)

杨超伟¹, 封远庆¹, 李东升^{1*}, 李 宁², 赵永强², 舒 畅¹, 辛永刚¹, 李永亮¹, 左大凡¹, 唐 遥¹

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;
2. 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 针对隐身等多类高价值目标精确探测与识别以及探测技术持续发展需求, 为实现复杂战场环境下的高概率真假目标识别和高精度目标检测、定位、跟踪, 开展复杂战场环境下隐身及微弱特征目标探测及抗干扰探测等技术研究意义重大, 其中高集成度的焦平面型偏振红外探测器技术是其中一个重要方向。围绕集成式中波 (MW)256×256 碲镉汞红外偏振焦平面探测器的研制, 介绍了偏振结构的设计、制备到偏振探测器的集成, 以及偏振探测器性能的测试等方面的研究进展状况, 设计加工出了亚波长金属光栅阵列, 采用倒装互连的方式实现了偏振探测器的集成, 并在 MW 256×256 碲镉汞焦平面器件上实现了红外偏振性能的测试和评估。

关键词: 碲镉汞; 红外焦平面探测器; 偏振

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211008

Preparation of medium wave mercury cadmium telluride infrared polarization focal plane detector (*Invited*)

Yang Chaowei¹, Feng Yuanqing¹, Li Dongsheng^{1*}, Li Ning², Zhao Yongqiang², Shu Chang¹,
Xin Yonggang¹, Li Yongliang¹, Zuo Dafan¹, Tan Yao¹

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
2. College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to meet the needs of accurately detecting and recognizing many kinds of high-value targets (such as stealth), the continuous development of detection technology, and realizing high probability true or false target recognition and high precision target detection, location and tracking in complex battlefield environment, it is of great significance to research stealth and weak feature target detection and anti-jamming detection in complex battlefield environment, the high integration of polarization focal plane infrared detector technology is one of the important direction. Focusing on the development of an integrated MW 256×256 HgCdTe polarization focal plane infrared detector, the research progress from the integration of polarization detectors to design and preparation of polarization structures were introduced, as well as the performance testing of polarization detector. A subwavelength metal grating array was designed and fabricated, the polarization detector was integrated by flip chip, and the infrared polarization performance was tested and evaluated on MW256×256 HgCdTe focal plane device.

Key words: mercury cadmium telluride; infrared focal plane detector; polarization

0 引言

随着探测技术和传感技术的发展,红外探测器的精度和灵敏度越来越高,可以探测的目标温差越来越小。虽然探测器的灵敏度提高了,但由于杂乱背景信号的限制,目标发现和识别的概率却仍不是很高。比如,在目标周围放置温度相同的噪声源,那么现有的红外热像仪就无法进行识别。如何解决这一问题,就是将偏振成像引入红外领域的目的。

红外偏振成像技术最显著的特点就是可以将一些传统热像仪无法识别的目标与背景很轻松地区别开来。因为传统热像仪测量的是物体辐射的强度,而偏振测量的是物体在不同偏振方向上的对比度,所以它能够将在辐射强度相同而偏振特性不同的物体区别开来,使用偏振手段可以在复杂背景下检测出有用信号,以成像方式显示出隐蔽军事目标,因此,红外偏振成像在军事上的应用前景相当广阔。

目前大多数红外偏振成像器件,为了实现获得偏振信息,在红外焦平面探测器前设计复杂的光路系统,即在光路中使用光学元件偏振片,从探测器景物中获取偏振信息,进而实现红外偏振成像。但缺点在于,一方面不能实时的获取景物光波的偏振图像,另一方面其光学系统复杂,需要复杂的光学元件,导致其整个设备比较笨重和昂贵。因此,可以把红外偏振片(亚波长金属线栅)直接集成在红外焦平面上,这样就不需要复杂的光学偏振系统,同时能实时获取景物光波的偏振图像。美国雷神公司已制备出集成长波碲镉汞 256×256 偏振探测器和集成长波碲镉汞 512×512 双色偏振探测器^[1],国内华北光电技术研究所研究了集成长波碲镉汞 320×256 偏振探测器^[2]。文中介绍了光栅阵列偏振片的设计与加工技术、碲镉汞红外偏振探测器的集成,以及偏振探测器性能的测试分析等研究工作的进展情况。

1 光栅阵列偏振片的设计与加工技术

1.1 光栅阵列偏振片设计

入射光的偏振态通常采用斯托克斯参量表示,根据斯托克斯公式可知,通过采集入射光经过不同方向线偏振片和相位延迟器调制后的强度信息就可以反演出入射光的偏振信息^[3]。对于文中涉及的线偏振成像系统,只需采集入射光经过不同方向线偏振片调制

的强度信息即可计算出入射光的线偏振信息。研究表明,将线偏振片设置为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向是最大化信噪比和最小化系统误差的选择^[4-5],所以采用如图 1 所示的光栅阵列偏振片排布模式。

线偏振光栅采用硅基多层金属-介质亚波长光栅,具体结构如图 2 所示。光栅设计基于严格耦合波理论^[6]与等效介质理论^[7],并采用时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)技术^[8]对光栅各层金属厚度、周期、占空比以及介质层厚度等结构参数在中红外波段进行优化设计,结合实际加工工艺条件得到光栅结构参数如表 1 所示。

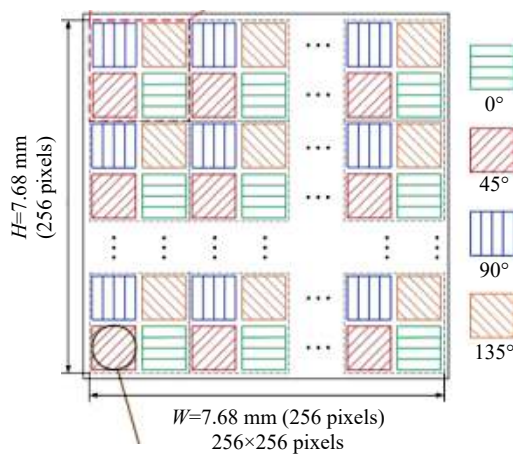


图 1 光栅阵列排布模式示意图

Fig.1 Schematic diagram of arrangement mode of grating array

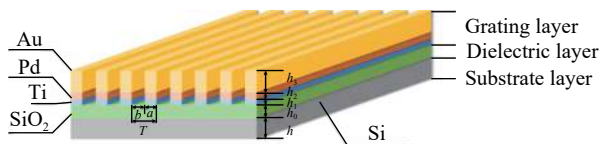


图 2 硅基多层金属-介质亚波长光栅结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of silicon base multilayer metal-dielectric sub-wavelength grating structure

表 1 光栅结构设计参数

Tab.1 Design parameters of grating structure

Parameter	Value
Grating width, a/nm	150
Grating interval, b/nm	150
Grating period, T/nm	300
Dielectric thickness, h_0/nm	270
Depth of grating groove, h_1-h_3/nm	Au: 100 Pd: 50 Ti: 10
Duty ratio of grating, f	0.5

1.2 光栅阵列偏振片的制备工艺

所设计的中波红外偏振光栅为透射光栅,光栅周期较小,光栅基本单元尺寸为微米量级,光栅基本单元中含有四个偏振方向的光栅,基于上述光栅的特点,采用纳米加工技术实现光栅阵列制备。光栅层为金、钯、钛多层金属光栅,光栅图形化采用电子束直写光刻及干法刻蚀技术实现,具体技术实施如图 3 所示。

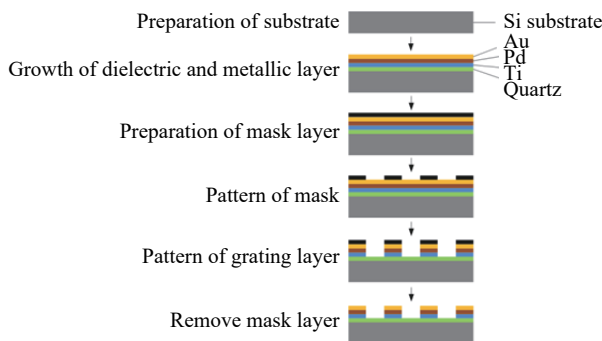


图 3 硅基多层金属-介质亚波长偏振光栅制备流程

Fig.3 Fabrication process of silicon base multilayer metal-dielectric sub-wavelength polarization grating

所设计的红外偏振光栅为透射光栅,且最终光信号需要被光敏单元接收,因此光栅基底需要透光,且衬底材料在中波红外波段需要有较好的通过率,所以选择在单晶硅基底上实现光栅的加工。然后在硅基上采用物理溅射方法依次制备介质层与各金属光栅层。对于掩蔽层,由于光栅均在纳米尺度,后续干法刻蚀需要具有较高的选择比以及陡直的图形形貌,因而采用硬掩蔽方法,即在光栅层上再次利用物理溅射制备氧化硅材料,在氧化硅材料上进行图形光刻。由于设计光栅尺度较小,采用电子束直写光刻方案直接在掩蔽光刻胶上进行直写曝光,完成图形制备。紧接着采用等离子体干法刻蚀的方法制备光栅结构,实现图形转移,相较于其他光栅结构制备方法,等离子体干法刻蚀方法可以实现对光栅形貌与尺寸的最好控制。最后通过干法刻蚀去除剩余掩蔽层材料,完成光栅制备,制备得到的光栅形貌图如图 4 所示。

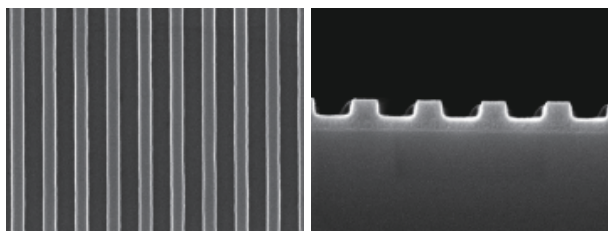


图 4 刻蚀完成后的光栅阵列

Fig.4 Grating array after etching

2 红外偏振探测器的集成

红外焦平面偏振探测器的实现一般分为两种方法:第一种是将微纳偏振片的制备工艺加入探测器的制备工艺中,直接以探测器焦平面衬底当作微纳偏振片制备衬底,实现真正意义上的单片集成(单片集成法),如图 5 所示。

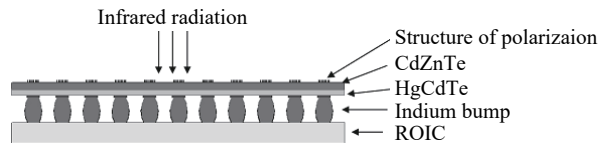


图 5 红外焦平面偏振探测器单片集成示意图

Fig.5 Single-chip integration diagram of infrared focal plane polarization detector

第二种是先制备微纳偏振片,然后将微纳偏振片集成到已制备完成的焦平面探测器上(背面集成法),集成过程中使得微纳偏振片与光敏元一一匹配。针对该方法提出了两种方案如下。

方案 A:把微纳偏振片直接粘接到红外焦平面探测器背面上,即在完全去除衬底的红外焦平面器件表面涂覆环氧树脂胶,然后采用了特殊的倒装互连方式进行粘接集成,即利用倒装互连的方法使得微纳偏振片单元和光敏元一一精确匹配,并施加一定压力实现粘接集成,集成后器件结构如图 6 所示。

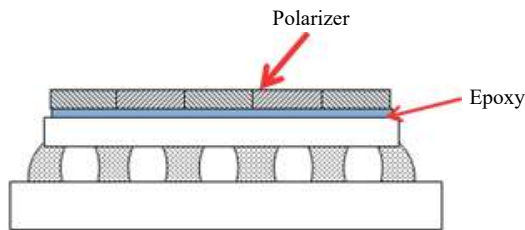


图 6 粘接集成后器件的结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of device after bonding integration

方案 B:在微纳偏振片的外围制备钢柱,通过倒装互连的方式把偏振片焊接到完全去除衬底的焦平面探测器上,如图 7 所示。

图 7 所示的是钢柱倒装互连集成后器件的结构示意图,其制备过程如下:(1)在偏振片衬底的外围制备一圈高钢柱;(2)在焦平面探测器的读出电路衬底上制备一圈金属 pad,并与偏振片上的钢柱一一对应;(3)在金属 pad 上涂覆环氧树脂胶;(4)倒装互连焊接,使得钢柱和金属 pad 实现互连粘接。

通过对上述两种不同方案进行了相关集成实验,结果发现,方案 A 在可靠性方面要优于方案 B。因

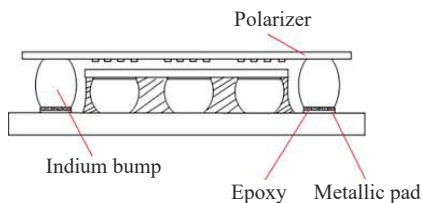


图 7 圆柱倒装互连集成后器件的结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of device after integration by indium bump flip chip

此, 最终采取方案 A 进行偏振片的集成, 方案 B 后续会进一步优化, 提高器件的可靠性。

3 碲镉汞集成偏振探测器性能测试和分析

中波 (MW) 256×256 探测器在未集成偏振片之前的像元平均响应信号为 753 mV, NETD 为 10.8 mK, 盲元 35, 如图 8 所示, 加上偏振片后再次进行测试, 随着偏振光角度的变化, 探测器像元的平均响应信号由 753 mV 降到 400 mV 左右, 由弱到强, 再由强到弱, 呈现正弦波状的变化, 如图 9 所示, 四个方向的像元由

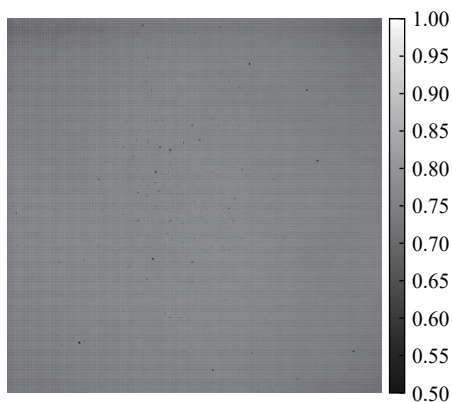


图 8 256×256 中波探测器组件像元信号响应图

Fig.8 Pixel signal response diagram of 256×256 medium wave detector

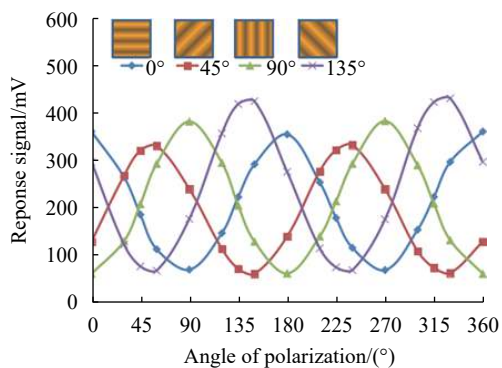


图 9 偏振中波红外探测器组件信号随偏振角度变化

Fig.9 Signal of medium wave polarization infrared detector changes with polarization angle

于偏振片的影响, 每个方向的信号变化曲线有一个 45°的相位差异, 其偏振对比度 C_p 值为 7.5 左右。

4 结 论

采用倒装互连的方式实现了中波 (MW) 256×256 碲镉汞红外偏振探测器的集成, 并对偏振片的设计及制备工艺上开展了相关的研究, 制备的 MW 256×256 碲镉汞集成偏振探测器的偏振对比度 C_p 值为 7.5 左右, 和国外相比还有一定的差距, 后续还需继续优化偏振集成工艺以及偏振片设计参数和制备工艺, 进一步提高偏振探测器的性能。

参考文献:

- [1] Neil R M, Adam K, Roger G, et al. Staring MWIR, LWIR and 2 color and scanning LWIR polarimetry technology[C]//SPIE, 2011, 8154: 81540T
- [2] Lin Guohua, Zhang Min, Meng Lingwei, et al. Polarizer fabricated onto infrared focal detector [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(10): 1234-1238. (in Chinese)
林国画, 张敏, 孟令伟, 等. 集成式偏振红外焦平面探测器的制备[J]. *激光与红外*, 2019, 49(10): 1234-1238.
- [3] Goldstein D H. Polarized Light Revised and Expanded[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [4] Tyo J S. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(4): 619-630.
- [5] Tyo J S. Optimum linear combination strategy for an N-channel polarization-sensitive imaging or vision system [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(2): 359-366.
- [6] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1981, 71(7): 811-818.
- [7] Grann E B, Moharam M G, Pomet D A. Optimal design for antireflective tapered two-dimensional subwavelength grating structures [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(2): 333-339.
- [8] Sullivan D M. Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method[M]. New York: IEEE Press, 2000.



第一作者简介：杨超伟(1988-),男,工程师,理学硕士,主要从事红外探测器的器件工艺研究,申请国家发明专利2项,国防发明专利1项,核心期刊论文3篇。



通讯作者简介：李东升(1974-),男,研究员级高级工程师,理学硕士,中国光学学会红外光电器件专业委员会委员,理论功底扎实,材料和器件研究经验丰富,发明专利5项,发表学术论文20多篇,获得兵器工业集团公司的“红外二代焦平面探测器”项目团队重大科技创新奖,获得兵器工业集团公司科技进步一等奖1项、二等奖1项、三等奖1项。