

碲镉汞线列光导器件的失效模式及原因分析

乔辉, 王妮丽, 兰添翼, 赵水平, 田启智, 陆液, 王仍, 霍勤, 施帆,
汤亦聃, 储开慧, 贾嘉, 周青, 孙晓宇, 姜佩璐, 罗毅, 陈心恬, 李向阳*
(中国科学院上海技术物理研究所 中科院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

摘要: 针对不同项目研制过程中碲镉汞线列光导器件在筛选测试和应用中出现的失效模式进行了归纳和总结, 并综合碲镉汞材料参数、器件结构尺寸、器件物理、器件制备工艺和器件测试等几个方面因素对器件失效的可能原因进行了分析, 首次提出碲镉汞线列光导器件的优值因子作为失效判据, 为进一步理解碲镉汞线列光导器件的物理机理以及更好优化器件的筛选过程提供了参考, 为碲镉汞线列光导器件应用中出现的失效问题提供了分析和解决的方向。

关键词: 碲镉汞; 光导器件; 失效分析

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Failure modes and analysis for HgCdTe linear photoconductive detectors

QIAO Hui, WANG Ni-Li, LAN Tian-Yi, ZHAO Shui-Ping, TIAN Qi-Zhi, LU Ye, WANG Reng,
HUO Qin, SHI Fan, TANG Yi-Dan, CHU Kai-Hui, JIA Jia, ZHOU Qing,
SUN Xiao-Yu, JIANG Pei-Lu, LUO Yi, CHENG Xin-Yi, LI Xiang-Yang*

(Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Failure modes during screening tests and application processes have been summed up for HgCdTe linear photoconductive detectors which have been applied in several programs. The mechanisms behind these failure modes have been analyzed based on the combination of HgCdTe material parameters, device structure dimensions, detector physics, fabrication processes and device test techniques. Criteria of failure modes have been firstly proposed for deeper understanding of HgCdTe linear photoconductive detector and better optimization of detector screening process, which are also helpful for the analysis and resolution of problems encountered in the application of HgCdTe linear photoconductive detectors.

Key words: HgCdTe, photoconductive detector, photoconductor, failure analysis

引言

碲镉汞材料相较其它红外探测器材料具有禁带宽度可调、介电常数小以及少子寿命高等优点, 自 1959 年被提出以来已经成为红外探测器制备的首选材料之一^[1]。碲镉汞光导线列器件属于第一代光子型红外探测器; 尽管基于光伏型器件的焦平面阵列器件(FPA)已经成为第二、第三代碲镉汞器件

发展的主流^[2], 量子阱(QWIP)^[3]、二类超晶格(T2SL)^[4]和硅掺杂阻挡杂质带(BIB)^[5]等类型红外器件在相关红外探测需求的推动下也得到了充分的发展和应用, 碲镉汞线列光导器件由于具有结构和工艺简单、成本低和成品率高等特点, 截至目前在红外遥感尤其是光谱探测中仍有大量的应用^[6-7]。在碲镉汞线列光导器件的测试筛选以及应用中难

收稿日期: 2022-05-30, 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1454800)

Foundation items: Supported by the Shanghai Sailing Program(19YF1454800)

作者简介(Biography): 乔辉(1979-), 男, 山东莱阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为红外光电材料与器件。E-mail: qiaohui@mail.sitp.ac.cn

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

Received date: 2022-05-30, Revised date: 2022-09-05

免会遇到各种各样的性能异常现象,影响器件的筛选过程和应用效果。本文中作者基于多个碲镉汞线列光导器件相关项目的研制经验,对各个项目研制过程中遇到的线列光导器件异常现象和失效模式进行了概括和总结,并结合碲镉汞材料性能参数、光导器件物理机理、碲镉汞光导器件的制备工艺和结构尺寸以及测试方法对各种性能异常现象的原因进行了分析,为失效问题的解决以及后续工作中避免类似问题的重复出现提供参考。文章中涉及到的碲镉汞光导器件涵盖中波和长波红外波段,线列规模涵盖8元、10元、15元、16元、32元和40元等。文章第1部分将首先对碲镉汞材料和碲镉汞光导器件的基本原理以及器件工艺和测试过程进行介绍;第2部分将对碲镉汞光导器件有关的性能异常现象和失效模式进行了分类介绍,并针对这些异常现象进行分析,给出器件性能失效的原因和分析方法;第3部分对第2部分中介绍的碲镉汞线列光导器件的失效模式进行了概括;第4部分首次提出了碲镉汞线列光导器件的优值因子作为器件的失效判据;第5部分则是对全文的总结。

1 碲镉汞材料和碲镉汞光导器件的基本介绍

1.1 碲镉汞材料的基本性能参数

碲镉汞材料($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)可以视作是由半金属材料 HgTe 和半导体材料 CdTe 以组分 x 配比形成的三元系化合物半导体材料。由于 Te-Hg 化学键较弱,很容易在材料中产生汞空位缺陷,这是碲镉汞材料生长和器件制备中需要关注的核心问题^[8]。碲镉汞材料的禁带宽度由组分 x 决定,通过改变 x 值可以调整材料的禁带宽度,从而改变对应探测器的截止波长。碲镉汞材料的禁带宽度 E_g 已经有多个经验公式,这里采用CXT公式^[9],如下所示:

$$E_g(x, T) = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2)10^{-4}T + 0.35x^4, \quad (1)$$

式中 T 为绝对温度,计算得到的禁带宽度单位为eV。根据材料的禁带宽度通过式(2)计算得到材料吸收的截止波长 λ_c ,单位为 μm 。需要指出的是,由式(1)和(2)计算得到的截止波长为响应降到峰值50%处的波长,以下若无特别说明,截止波长均指50%截止波长。根据统计经验,对于大于 $8\mu\text{m}$ 的长波红外,由于碲镉汞材料带边能级和组分均匀性的影响,其截止波长比峰值波长长大约10%^[10];对于中短波红外,可以忽略带边影响和组分均匀性影响,认为峰值波长和截止波长相同。

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} \quad (2)$$

碲镉汞另一个关键的光学参数是光吸收系数 α ^[8],吸收系数大是碲镉汞材料优于其它竞争对手的重要优势。如式(3)所示,碲镉汞材料吸收系数与材料的禁带宽度和入射光子能量有关,直接决定了器件吸收层厚度的选择。根据Piotrowski的计算,碲镉汞吸收层的厚度通常取 $1.26/\alpha$ ^[11],一个经验数值是在碲镉汞材料截止波长的基础上再加 $1\mu\text{m}$ 即其吸收层的最佳厚度。

$$\alpha = \alpha_g \exp[\beta(E - E_g)]^{1/2}, (E \geq E_g), \quad (3)$$

其中 $\beta = -1 + 0.083T + (21 - 0.13T)x$, $\alpha_g = -65 + 1.88T + (8694 - 10.31T)x$

载流子浓度、迁移率和电阻率是碲镉汞材料的基本电学参数,通常利用范德堡法进行测试得到的霍尔浓度,以此作为碲镉汞材料的载流子浓度,再结合四点法测试得到的电阻率即可得到材料的霍尔迁移率。碲镉汞材料的透过率和组分 x 通常利用傅里叶变换红外(FTIR)光谱方法测试得到。由于碲镉汞属窄禁带半导体材料,热激发足以导致电子发生从价带到导带的跃迁即本征跃迁而形成本征载流子浓度,关于本征载流子浓度, Hansen 和 Schmit 给出的表达式为^[8]

$$n_i = (5.58 - 3.82x + 0.001753T - 0.001364xT) [10^{14} E_g^{0.75} T^{1.5} \exp(-E_g/2kT)], \quad (4)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数。对于红外探测尤其是长波红外波段探测,碲镉汞材料中的本征热激发载流子浓度与红外辐射信号产生的载流子浓度相当甚至更高,因此利用碲镉汞器件进行微弱红外信号探测时需要对其进行制冷以尽量降低器件中的热激发载流子浓度,本征载流子浓度与入射辐射光生载流子浓度之间的关系决定了碲镉汞器件的工作温度范围。碲镉汞器件通常采用的制冷方式有辐射制冷、机械制冷机制冷、热电制冷以及制冷剂制冷等^[12]。

1.2 碲镉汞光导器件的结构和制备工艺

碲镉汞光导器件的基本结构如图1(a-b)所示,由于碲镉汞材料在 $1\sim 16\mu\text{m}$ 的红外波段具有较高的吸收系数,因此碲镉汞光导器件中的碲镉汞有源层厚度通常为 $10\sim 20\mu\text{m}$ (具体厚度根据工作波段确定),这么薄的碲镉汞材料在工艺操作中极易碎裂,因此需要将其固定在较厚的衬底上。项目研制中使用的碲镉汞体晶材料由移动加热器工艺生长^[8],其直径为 15mm ,厚度为 $500\mu\text{m}$,器件制备前先将

碲镉汞材料与衬底材料(通常为蓝宝石)先用环氧胶通过压片工艺粘贴到一起,环氧胶的厚度通常小于 $1\ \mu\text{m}$ (从导热的角度环氧胶的厚度越薄越好,但压片压强过大容易裂片)。然后利用抛光工艺将碲镉汞材料抛光至需要的厚度,然后进行光导器件的制备。碲镉汞材料生长中由于Hg元素具有较高的平衡蒸气压,材料中很容易缺Hg形成Hg空位。Hg空位在碲镉汞材料中起到双重角色,一是电学受主,会使材料呈现p型导电特性;二是载流子产生复合中心(即Shockley-Read中心或S-R中心)^[8],会导致材料载流子寿命的降低。因此需要在材料生长后对其进行长时间的低温热处理以尽量消除材料中的Hg空位,因此通常采用n型碲镉汞材料来制备光导器件;同时由于碲镉汞材料中的电子迁移率远大于空穴迁移率,使用n型材料制备的光导器件进

是一个重要的技术方向^[14]。

碲镉汞材料达到预定厚度后,首先通过专门的清洗工艺去除材料表面残留的杂质,然后在溴甲醇或溴乙醇溶液中进行腐蚀去除其表面损伤层,之后利用电化学工艺对其表面进行阳极氧化形成阳极氧化膜(即AO膜),在碲镉汞材料表面生成一层厚度为 $50\sim 100\ \text{nm}$ 厚的致密钝化膜,虽然在碲镉汞光导器件的发展中曾经尝试过各种不同的表面钝化工艺,时至今日阳极氧化膜(包括二次阳极氧化膜)仍然是n型碲镉汞光导器件的最佳表面钝化工艺,如同热氧化二氧化硅膜在硅器件工艺中的地位一样。AO钝化膜通过降低表面复合速率提高器件响应率以及降低低频噪声来明显改善器件的信噪比。之后根据器件的工作波段在AO膜上进行增透膜生长以增加工作波段的红外吸收率,增透膜通常选用ZnS薄膜。生长增透膜后通过光刻工艺定义出像元的大小,同时在光敏元的两端通过湿法腐蚀和离子束溅射工艺形成器件的信号电极。最后通过光刻工艺和离子束干法刻蚀工艺将光敏元和电极区域之外的碲镉汞材料全部,对于线列器件该步工艺尤其重要,需要将相邻像元之间的沟槽刻蚀干净以避免相邻像元之间由于刻蚀残留而连通,增加像元之间的串音;此外还需要关注离子束刻蚀对碲镉汞材料电学参数的影响,避免离子束刻蚀在碲镉汞材料中引入损伤降低器件性能^[15]。

根据应用需求会对探测器的像元结构进行相应的设计。对于像元面积较大的器件(像元尺寸达到毫米级),由于电阻较小需要通过增大工作偏流来提高响应率,这样会使器件具有较大的焦耳功率,对功耗和散热要求更高;为了提高碲镉汞光导器件的电阻,像元会采取干法刻蚀开槽结构,如图1(c)所示,很明显开槽越多器件的电阻越大,理论上开槽后器件的电阻会增加为开槽前的 $(N+1)^2$ 倍, N 为开槽数目。但由于槽的存在会降低有效像元的大小(即填充因子下降),因此在进行器件结构设计时需要对此进行一并考虑。碲镉汞线列光导器件即包含多个图1中所示单元结构的器件,下图给出一个一线列光导器件的部分芯片照片,其中图2(a)的像元属于图1(a-b)结构,图2(b)中的像元属于图1(c)结构。

红外遥感对红外探测器像元尺寸的要求越来越小^[16],比如风云二号气象卫星上的扫描辐射计红外探测器像元尺寸为 $82\ \mu\text{m}\times 82\ \mu\text{m}$ ^[13],对于像元尺

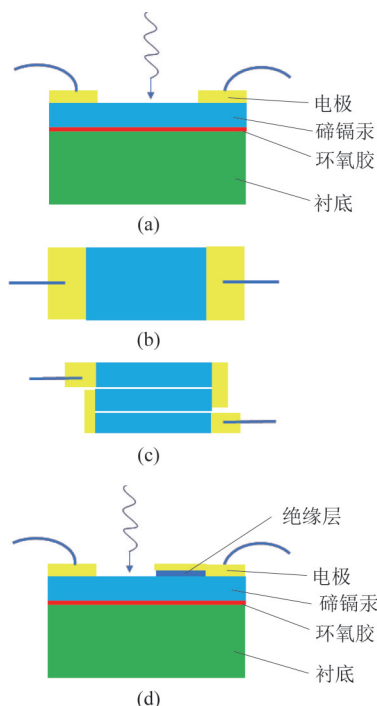


图1 碲镉汞光导器件结构示意图 (a)为侧视图,(b)为俯视图,(c)像元开槽结构俯视图,(d)叠层结构侧视图

Fig.1 The schematic diagram of HgCdTe photoconductive detector (a) side view, (b) vertical view, (c) vertical view of serpentine geometry pixel, (d) side view of overlap contact geometry

行红外探测时会产生更大的光电导增益从而增大器件的响应率^[13]。近年来随着微纳光子学技术的发展,通过在碲镉汞表面加工形成针对性设计的人工微纳结构可以提高材料的红外吸收系数(尤其是长波红外)从而进一步降低碲镉汞材料的厚度,这对于提高长波碲镉汞光导器件的工作温度和性能

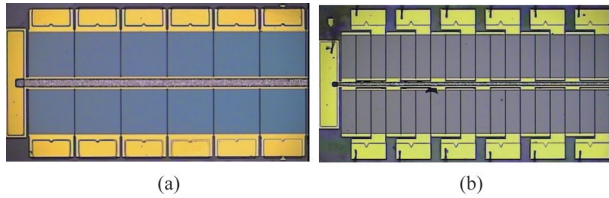


图2 两种不同像元结构的碲镉汞光导器件照片
Fig. 2 Photographs of HgCdTe photoconductive detector with two kinds of pixel geometry

寸较小的碲镉汞光导器件,由于载流子扫除效应的影响会降低器件的响应率,此时会采用所谓的叠层结构^[17],如图1(d)所示,相比图1(a)的结构,叠层结构最大的改变是在一部分电极下方增加了一层绝缘层,相当于增加了载流子到达接触电极之前的运动距离。胡晓宁^[18]等利用载流子连续性方程对叠层碲镉汞光导器件的性能进行了详细的分析,认为相对无叠层器件,叠层结构相当于提供了一个少数载流子存储区(即电极和绝缘层共同覆盖下的区域),可以有效提高少数载流子寿命,从而提高器件响应率。叠层结构在风云二号扫描辐射计的碲镉汞光导器件中得到了成功应用。

外延碲镉汞材料比如液相外延(LPE)和分子束外延(MBE)碲镉汞薄膜也可以用来制备光导器件^[19]。相比体晶材料器件,采用外延材料的碲镉汞光导器件制备工艺减少了贴片和抛光减薄工艺,其它的制备工艺基本相同。

1.3 碲镉汞光导器件的性能测试方法

碲镉汞光导器件的性能测试主要包括三部分内容,一是器件的阻值,二是器件的响应光谱,三是器件的响应率、噪声和探测率以及像元之间的电串音。器件的阻值通常采用高精度万用表来直接读数测量。器件的响应光谱通常采用傅里叶变换红外(FTIR)光谱仪来进行测试^[20],干涉光源从傅里叶光谱仪引出后入射到探测器像元上,利用采样保持得到干涉信号,干涉信号经放大后返回到光谱仪主机,然后经傅立叶变换得到器件的响应光谱图,测试原理如图3所示。通过该光谱图可以得到器件响应的峰值波长、截止波长以及峰值响应G因子(即峰值响应率与黑体响应率的比值)^[21]。

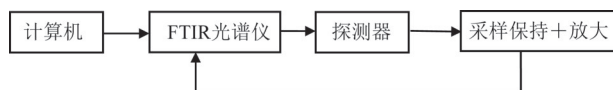


图3 碲镉汞光导器件 FTIR 光谱测试图
Fig. 3 Diagram of FTIR spectrum of HgCdTe photoconductors

器件的响应率通常采用黑体测试得到,测试在一定条件下入射黑体产生的响应信号,然后除以计算得到的黑体入射功率即可得到器件的黑体响应率。根据碲镉汞器件阻值较小的特点,通常对其采用恒定偏置电流方法的测试方法,器接受红外信号辐射后电阻会发生变化,继而引起两端电压的变化,通过对这一变化电压的测量可以得到器件的响应信号;由于器件的阻值变化很小(通常为原阻值的十万分之几),对这一电压信号的测量必须采用交流方法,即对入射黑体辐射进行一定频率的调制,然后采用锁相放大器对同样频率的电压信号进行测量,同样条件下对黑体信号进行遮挡后可以测量得到器件的噪声^[20]。测试原理如图4所示,图中 R_L 为负载电阻,阻值远大于碲镉汞器件的阻值, R_{D0} 和 V_0 分别为没有信号时的器件阻值和两端电压, ΔR_D 和 ΔV 分别为施加信号辐射后器件阻值和两端电压的变化量^[22]。

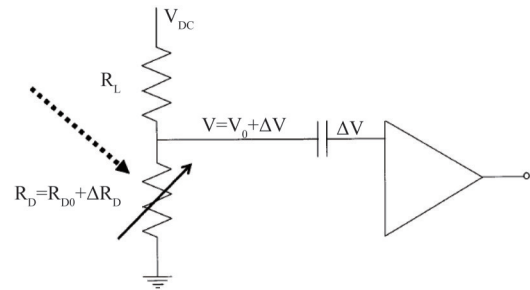


图4 碲镉汞光导器件的信号和噪声测试原理图
Fig. 4 Diagram of signal and noise measurement of HgCdTe photoconductive detectors

从理论上分析,碲镉汞光导器件的性能与器件中光生载流子的浓度和寿命密切相关。碲镉汞光导器件采用N型碲镉汞材料制备,材料中的多子电子浓度远大于空穴少数子浓度,即 $n_0 \gg p_0$,同时少数子空穴的迁移率比多子电子小得多,即 $\mu_e \gg \mu_h$ 。在两端电极的外加电场作用下多子电子会先于少数子空穴到达电极端,因此在电中性要求下会产生所谓光电导增益,即在一个少数子空穴运动的过程中会有多个电子通过电极。经过光电导增益后的电压响应率 R_V 为^[13]

$$R_V = \frac{V_b \cdot \tau \cdot \eta \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot n_0 \cdot l \cdot w \cdot t} \quad (5)$$

式(5)中, V_b 为芯片两端的偏置电压, τ 为少数子寿命, η 为内量子效率, λ 为入射红外辐射波长, h 和 c 为普朗克常数和真空光速, l 、 w 、 t 分别为芯片光响应区域

的长度、宽度和厚度。可以看出,在偏压、芯片体积和入射辐射固定的条件下,为了提高光导器件的响应率,需要尽量提高器件的少数寿命和内量子效率,降低器件的载流子浓度(即增加器件电阻)。

碲镉汞光导器件的噪声包括约翰逊噪声、产生复合噪声和低频噪声。测试时由于对黑体信号施加了1000 Hz的正弦调制,在测量噪声时采用了(1000±50) Hz的带通滤波,此时器件的噪声以产生复合噪声为主,考虑到 $n_0 \gg p_0, \mu_e \gg \mu_h$,噪声电压公式为

$$V_{g-r} = \frac{2V_b}{n_0} \sqrt{\frac{p_0 \cdot \tau \cdot \Delta f}{l \cdot w \cdot t}} \quad (6)$$

由式(5)和(6)可以得到器件的归一化探测率 D^* ,即

$$D^* = \frac{\lambda \cdot \eta}{2hc} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{p_0 \cdot t}} \quad (7)$$

由式(7)可以得到提高碲镉汞光导器件 D^* 的方向,即提高少数寿命和量子效率,降低少数浓度和厚度,这里需要注意的是空穴浓度 p_0 ,材料中的空穴可以通过热激发和光激发产生。如果是热激发产生为主,就需要降低器件的工作温度(这就是为何大部分碲镉汞器件需要制冷工作);如果是光激发产生为主,则需要降低器件的背景辐射光子通量,即限制器件的视场角(FOV),在碲镉汞器件(尤其是长波器件)的测试中对杜瓦冷屏的视场角必须加以考虑。

线列光导器件所有像元共用一个地线电极,理论上地线电极上各处的电平应该保持一致,这样就为各像元的信号输出提供了一个共同的电平基准。实际制备的器件中地线总有一定的阻值,当通过地线的电流较大时就会导致地线各处的电平不同,每个像元的输出信号基准不同导致一个像元信号的变化会传导到其它像元从而导致串音。碲镉汞光导线列器件相邻像元之间的电串音需要进行测试,测试方法是对一个像元施加一个1 mA的交流信号,然后测相邻元的信号大小,两者相比就得到两个像元之间的电串音^[20]。

2 碲镉汞光导器件的失效模式及其原因分析

2.1 光谱异常

碲镉汞光导器件的响应光谱特征与碲镉汞材料的镉组分 x 、工作温度 T 以及入射光在到达光敏面过程中的反射、透射和吸收等有关。碲镉汞光导器件的探测波段选择需要根据红外遥感系统设计指

标(即所谓设计输入)来确定,红外系统设计中碲镉汞光导器件通常会有宽谱和窄带两种光谱探测模式^[23]。碲镉汞光导器件工作于宽谱模式时,光路中没有滤光片或者只有一个前截止滤光片,光谱的峰值波长和截止波长由探测器自身决定。图5给出一个工作温度为100 K、波段为3.2~4.2 μm 的碲镉汞线列光导器件响应光谱,其前50%截止波长为3.1 μm ,由前截止滤光片决定,对应工作波段的前端;后截止波长为4.3 μm ,对应工作波段的后端,因此在器件的工作温度和工作波段确定后,就可以根据其波段的前端确定滤光片膜层的设计,根据波段的后端和工作温度来确定碲镉汞材料组分 x 的选择,当组分 x 偏大时,会造成器件的响应光谱后截止波长偏短而影响探测效率,若组分 x 偏小较多,器件的响应光谱虽然可以覆盖整个工作波段,但是会导致器件的电阻变小,降低器件在工作波段内的信噪比。

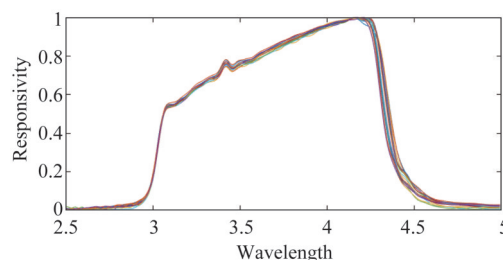


图5 宽谱工作的碲镉汞光导器件响应光谱

Fig. 5 FTIR spectra of wide-band-spectrum HgCdTe photoconductive detectors

碲镉汞光导器件工作于窄带情况下,光路中会使用窄带带通滤光片进行分光,此时器件响应光谱的前后波长均由滤光片确定,为了提高带内红外辐射能量的利用率,通常将芯片的响应峰值移到工作波段的后端,然后根据器件的截止波长与峰值波长的经验关系来确定器件的截止波长,再结合其工作温度来确定所选用碲镉汞材料的组分 x 值。图6(a)为一10元线列光导器件的响应光谱,其前后截止波长均由探测器组件的窄带滤光片决定。如果碲镉汞材料的组分 x 偏大,则会导致器件的响应光谱截止波长向短波方向移动,如图6(b)中所示,由于材料组分 x 具有非均匀性,部分像元的组分 x 偏大,导致部分像元的截止波长不是由滤光片而是由器件本身决定,因此在进行线列器件制备时对碲镉汞材料组分 x 的均匀性进行评价是材料筛选的必需步骤。在碲镉汞器件与滤光片尤其是多波段滤光片封装后形成的组件光谱测试也会出现光谱异常,通

常表现为通道间光串,即一个光谱通道的入射信号被另一个光谱通道探测器吸收探测,这一现象通常与滤光片的拼接工艺有关,在此不再赘述。另外在测试中针对不同波段的碲镉汞器件需要选择相应的杜瓦窗口,比如宝石窗口虽然透过率高,但在7 μm 处就开始截止,如果线列芯片的光谱都整体偏短并且截止波长基本一致,很有可能是测试窗口选用不当导致。

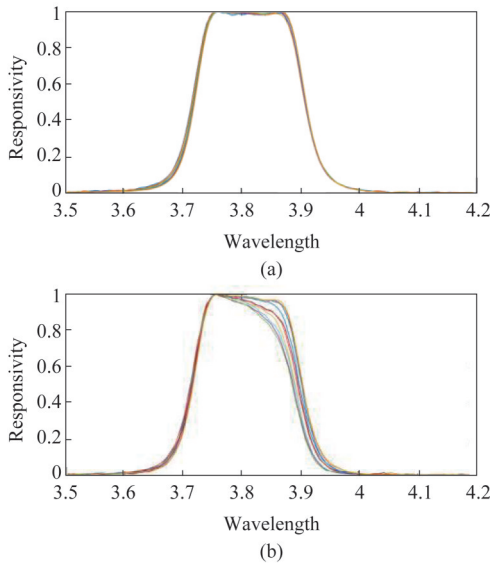


图6 窄带光谱探测光导器件的正常和异常响应光谱
Fig. 6 Normal and abnormal spectra of narrow-band-spectrum photoconductive detectors

碲镉汞光导器件响应光谱的另一个异常现象表现为光谱中出现异常的吸收峰,图7对一像元在室温和液氮温度下进行了响应光谱测试,可以发现,低温光谱除了由于碲镉汞材料禁带宽度随温度变小而导致器件光谱截止波长向长波方向移动以外,在3 μm 左右的位置还出现一个很明显的吸收峰。经过分析,该器件的表面蒸镀了一层二氧化硅薄膜作为额外的保护层(单独的AO层容易在外界环境作用下影响表面钝化效果,因此需要在AO层上再覆盖一保护层),由于二氧化硅具有良好的吸潮特性,因此低温下在3 μm 位置处产生了一个明显的与水汽有关的吸收峰(测试杜瓦的真空度优于0.5 Pa),因此在该工作波段要避免使用二氧化硅薄膜进行表面保护,这一点对工作于该波段的光伏器件同样适用。将保护层换为ZnS后低温下3 μm 处的吸收峰就可以被消除。碲镉汞光导器件FTIR光谱测试中经常遇到的吸收峰干扰来自水汽(包括羟基水)和二氧化碳,因此对碲镉汞器件表面介质层的选择以及FTIR

测试环境的处理都必须对此有所考虑。

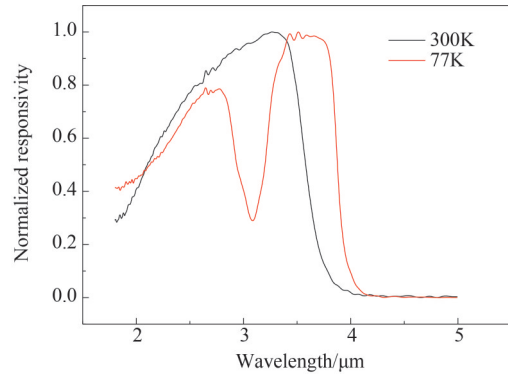


图7 表面有SiO₂膜的碲镉汞光导器件在300 K和77 K下的响应光谱

Fig. 7 Spectra of HgCdTe photoconductor passivated with SiO₂ film at 300 K and 77 K

2.2 像元阻值异常

碲镉汞光导器件的阻值与碲镉汞材料的载流子浓度、迁移率、工作温度、表面AO钝化膜、电极接触以及像元尺寸有关,其表达式如式(8),其中 e 为电子电荷, n_0 和 μ_e 为多子电子的浓度和迁移率, n_s 和 μ_s 为AO膜导致的表面积累层的电子浓度和迁移率, l 、 w 、 d 分别为像元的长度、宽度和厚度, r_c 为电极接触电阻。对器件的电阻特性通常可以按照公式中提到的相关参数进行分析。在实际工艺中经常需要关注器件的方块电阻,长波碲镉汞光导器件的液氮温度方块电阻通常为20~50 Ω/\square ,中波碲镉汞光导器件的方块电阻则可以达到200~400 Ω/\square 。

$$R_D = \frac{1}{e[n_0\mu_e + (2n_s\mu_s/d)]} \frac{l}{wd} + 2r_c \quad (8)$$

碲镉汞光导线列器件的像元阻值是一个关键参数,一方面像元阻值与像元的响应率、噪声和功耗密切相关,另一方面,要选择像元阻值大小合适的芯片使其噪声大于后端电子学的噪声^[24],同时还要求线列中所有像元的阻值分布尽量均匀以降低后端电子学负载电阻匹配的难度^[25]。在项目研制过程中会遇到多种与像元阻值有关的失效模式,有的涉及到线列中部分像元,有的则涉及到线列所有像元。

图8给出一个15元线列光导器件各像元的阻值分布,容易看出6/7两元的阻值明显比其它像元小,将芯片取下后在显微镜下进行检查,发现在两个像元之间的隔离槽中存在多余物,SEM/EDS测试确认该多余物的主要成分为金,经分析是在氩离子

干法刻蚀成型过程中表面的电极金膜由于离子束溅射作用在侧壁产生沉积而形成类金膜,这一侧壁多余物在后续工艺中脱落留在刻蚀沟槽中导致两个像元发生短路,如图9所示,后来对刻蚀工艺进行改进而消除了这一现象。如果碲镉汞器件的封装结构中存在导电多余物,也会产生类似问题,因此在芯片操作过程中需要按照质量体系要求进行严格控制。

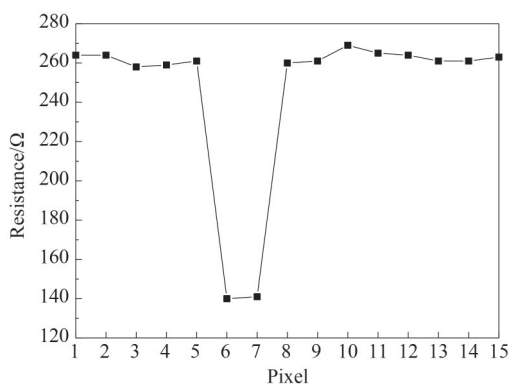


图8 两个像元异常的线列器件阻值分布

Fig. 8 Distribution of resistance of a linear detector with two abnormal pixels

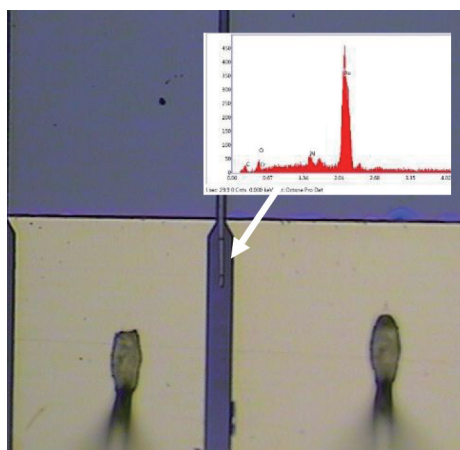


图9 阻值异常的两个像元的照片与EDS分析结果

Fig. 9 Photograph of two abnormal pixels together with EDS result

线列器件中阻值异常的另一个现象是部分像元电阻变大,图10中给出某一线列芯片的阻值分布,可以看出18/19/20三个像元的阻值明显比周围像元大。将芯片取下在高倍显微镜偏光模式下镜检发现阻值增加的部分像元区存在细微的孪晶或晶界结构,如图11所示,这些结构对载流子电场下的漂移运动产生散射作用^[26],使载流子的迁移率降低,从而增加了芯片的电阻。同时也可以看出,除

了18/19/20三个像元,周围的其它几个像元在阻值方面也比周围像元略大,虽然显微镜下看不出异常,但晶界和孪晶的影响已经显现出来。因此在材料筛选过程中必须对表面进行详细的镜检以剔除具有孪晶或晶界线的晶片材料,必要时需要通过腐蚀工艺将这些特征进行显现放大以增加材料筛选的有效率。

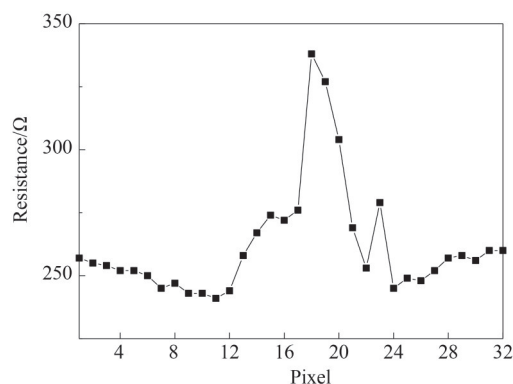


图10 部分像元阻值异常的线列阻值分布

Fig. 10 Distribution of resistance of a linear detector with some abnormal pixels

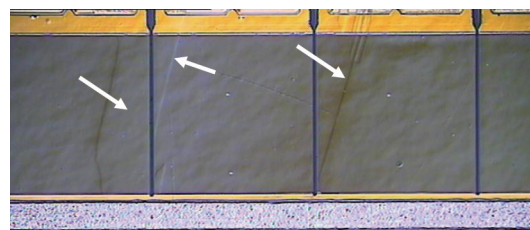


图11 阻值异常像元的偏光显微图

Fig. 11 Polarizing microphotograph of pixels with abnormal resistance

其它会导致碲镉汞光导线列器件中部分像元阻值变化的因素包括表面划痕、钝化层脱落以及接触电极接触异常,这些原因利用普通金相显微镜很容易就可以进行检查确认,且均会导致器件阻值变大,在此不再赘述。

以上提到的都是线列中部分像元的阻值出现异常,除此之外,还会碰到整个线列像元阻值异常的情况,包括线列中像元的阻值呈现逐渐变化或者整体偏高或偏低的情况。

从公式(4)可以看出,碲镉汞器件的电阻与像元的面积和厚度有关,光刻工艺精确复制可以保证像元面积($w \times l$)的一致性,另外一个导致器件电阻异常的因素则与像元厚度 d 有关, d 的控制主要与抛光和腐蚀工艺有关。厚度 d 异常主要表现在两个方

面,一是线列器件光敏元之间材料厚度的不均匀,阻值曲线会呈现单向倾斜或者两头大中间小,如图12所示,这通常与抛光工艺有关,如果抛光时碲镉汞材料贴在抛光头上产生倾斜,就会导致材料的厚度呈现单向倾斜从而引起线列像元阻值的单向变化,如果抛光时抛光液对边缘碲镉汞产生腐蚀作用,则会导致抛光成型的碲镉汞材料呈边缘薄中心厚的形状,这一情况在进行化学机械抛光时尤其容易发生,此时线列器件像元的阻值变化趋势与芯片的位置有关,对于尺寸较长的线列器件,线列容易

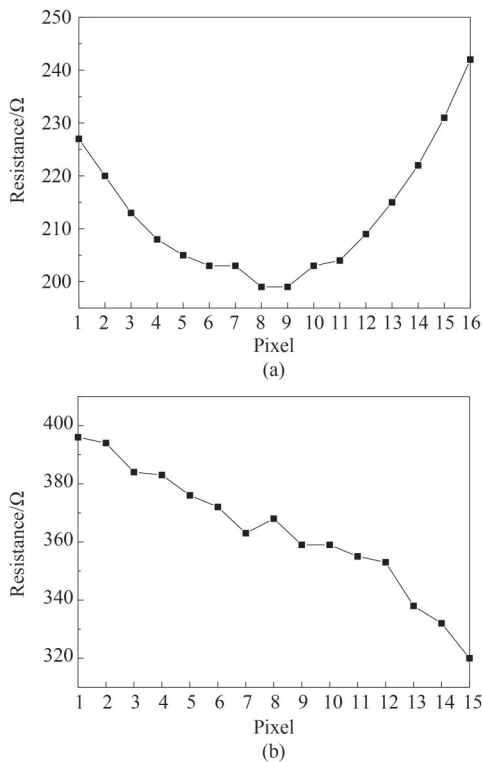


图12 两个不同线列器件像元阻值分布

Fig. 12 Distribution of resistance of two linear detectors

横跨材料中心区域,其阻值会呈现中间小两端大,如图10(a)所示,该16元线列器件的长度为8.6 mm;对于整体长度较小的线列器件,则仍然会呈现阻值的单向变化趋势,如图10(b)所示,该15元线列器件的长度为4.8 mm。

另一种与厚度有关的阻值异常现象是某一片晶圆制备的器件电阻值比另一片晶圆的器件电阻值普遍高或低,但两片晶圆材料的起始载流子电学参数没有明显差别,此时可以根据器件的 D^* 来进行判断,如果其中一片材料制备的器件 D^* 明显偏低,原因可能在于器件在工艺过程中可能经历了表面沾污,或者在工艺和应用过程中经历了高温过程。

前面已经提到,碲镉汞材料中的Te-Hg键很弱,高温下容易发生断裂而使材料参数恶化,因此在整个器件工艺过程中必须对温度进行严格的控制;如果该片材料的表面发生沾污(由于AO电化学工艺是每一片单独进行,这一情况有一定发生概率),则会影响AO膜的表面钝化效果,前面已经提到,碲镉汞光导器件的AO膜可以提高信号降低噪声,如果AO膜受到沾污影响则会起到相反的效果。

如果两片材料制备的器件 D^* 没有明显的差别,此时最大的可能就是晶圆材料在抛光工艺的厚度控制中出现异常,如图13中的两个10元线列光导器件,其材料电学参数和 D^* 均没有明显差别,但阻值相差近一倍,将芯片取下后利用Z轴显微镜测量了像元的厚度,Array 1的厚度均值为15 μm ,而Array 2的厚度均值为11 μm 。某些应用场景中会对碲镉汞光导器件的功耗进行严格要求,比如利用辐射制冷方式对探测器进行制冷时由于冷量有限需要限制红外探测器的功耗。在固定偏流的工作条件下器件的阻值增加会提高其响应率,但同时也会增加其发热功耗,在探测器的响应率和功耗之间进行折中的结果就是探测器的阻值需要折中选择。

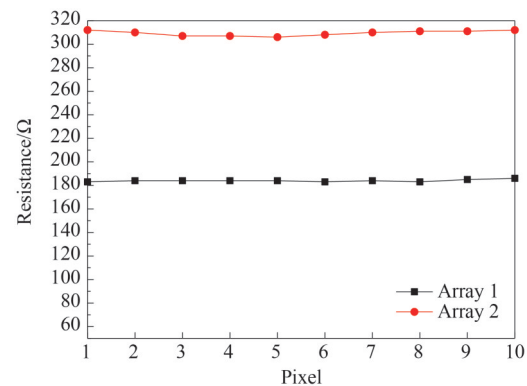


图13 两个不同线列的阻值分布

Fig. 13 Distribution of resistance for two linear detectors

2.3 信号&噪声(信噪比)异常

碲镉汞器件的信号反映了器件在红外辐射下产生非平衡载流子浓度的大小以及存活时间,与器件的阻值、偏流、量子效率和少数寿命有关;碲镉汞器件的噪声包括约翰逊噪声、低频噪声和产生复合噪声^[22],通常器件工作于产生复合噪声限,此时噪声作为与器件中非平衡载流子浓度起伏有关的参数,其大小同样与器件的阻值、偏流、量子效率和少数寿命有关,此外还需要考虑系统的电子学带宽。衡量红外探测器探测性能的核心指标是器件在特

定工作条件下的信噪比,信噪比越大的器件探测性能越高。为了在不同规格和工作条件的探测器之间建立统一的评价标准,人们引入了归一化探测率 D^* 这一参数,即1W辐射能量入射到单位面积的红外探测器上在单位带宽内产生的信噪比。在碲镉汞光导器件的筛选测试中,根据黑体温度、出射孔径、黑体辐射调制因子以及黑体与探测器光敏面之间的距离,可以测试得到器件在某一调制频率下的信号和单位带宽噪声,进而计算得到器件的响应率和黑体 D^* 。

如同2.2中已经提到的一样,综合各项目研制中的数据,发现当碲镉汞光导器件的电阻异常时,其信号和噪声通常也呈异常状态,表1是某型号碲镉汞线列光导芯片老练过程中发现有两元(13/14)阻值异常,相比其它像元电阻偏大,对器件的信号和噪声测试后发现两个像元的信号偏小,噪声偏大。之后对器件拆解后进行表面镜检,发现13/14像元的表面有微裂痕发生,如图14(b)所示,芯片封装之前表面完好,如图14(a)所示。经过分析和故障重现,发现是工艺操作中低温环氧胶进入像元之间的刻蚀沟槽中,由于器件每次测试都是在液氮温度下进行,多次测试过程相当于对器件进行了多次高低温冲击,环氧胶的热膨胀系数比碲镉汞大,在多次高低温循环后靠近刻蚀沟槽的碲镉汞材料(13/14两个像元)在环氧胶张力作用下发生了破裂,像元失效的表现是阻值和噪声变大的同时信号变小,探测率相比其它正常的像元大幅降低。其它导致类似现象的原因包括像元表面划伤以及光敏区内存在较大的位错区域,比如碲夹杂等。其物理机理是这些损伤区域构成了载流子散射中心和复合中心,降低了载流子迁移率和少子寿命。当芯片表面钝化膜脱落时也会出现类似现象,碲镉汞表面的钝化膜(即AO膜)中带固定正电荷,会在碲镉汞材料表面形成一层薄的表面电子层降低器件阻值,同时

会对光生少子空穴产生排斥作用提高少子寿命,当钝化膜脱落后,器件表面电子层消失导致阻值增加,同时光生少子空穴很容易扩散到表面高复合区而降低少子寿命,导致信号下降的同时噪声增加。

另外如果测试杜瓦控温出现问题或者碲镉汞器件与杜瓦的冷头热接触不良,碲镉汞器件的实际温度会偏高,也会导致器件的信号小噪声大,温度漂移较大时器件的阻值会偏大,但这些现象是整条线列器件所有像元的整体表现而非个别像元。

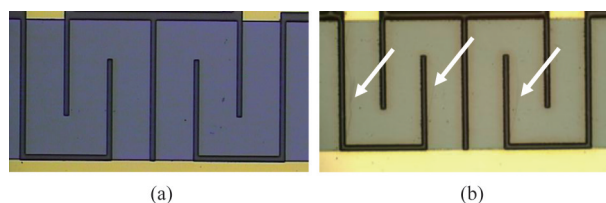


图14 信号和噪声异常的两个像元在封装前后的照片

Fig. 14 Photographs of two pixels with abnormal signal and noise before and after packaging

表2为图8中碲镉汞线列光导器件部分像元的黑体探测性能,18、19和20三个像元的电阻明显比其它偏大,其黑体信号和噪声同样表现异常,但与表1中碲镉汞光导器件的失效模式不同,这三个像元的信号和噪声都偏小,信号减小幅度更大,所以像元的探测率更小。通过图10知道,像元的阻值偏大与其中的孪晶和晶界结构有关,通过信号噪声的对比发现晶界结构的影响非常明显,但与表1中的信号变小噪声变大相比,此处信号和噪声都变小,只是信号降低更多,说明孪晶/晶界和位错损伤在碲镉汞材料中起到的作用有所不同,对这一点还需要更详尽的研究。

碲镉汞线列光导器件信号与噪声异常的第三个现象与电极结构有关,图13(a)重新给出光导器件的结构示意图,如果芯片的电极牢度不够而发生了如15(b)所示的起翘,此时光导器件就与图1(d)

表1 两个像元信号和噪声异常的线列器件

Table 1 A linear detector with two pixels of abnormal signal and noise

像元编号	电阻/ Ω	偏流/mA	信号/V	噪声/(V/Hz ^{1/2})	响应率/(V/W)	黑体 $D^*/(\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1})$
9	233	1.7	7.05×10^{-6}	3.51×10^{-9}	4.98×10^2	3.84×10^9
10	227	1.7	6.36×10^{-6}	3.11×10^{-9}	4.50×10^2	3.90×10^9
11	226	1.7	6.99×10^{-6}	3.49×10^{-9}	4.94×10^2	3.83×10^9
12	225	1.7	6.92×10^{-6}	3.38×10^{-9}	4.90×10^2	3.91×10^9
13	258	1.7	5.98×10^{-6}	7.25×10^{-8}	4.23×10^2	1.58×10^8
14	248	1.7	6.34×10^{-6}	2.66×10^{-8}	4.48×10^2	4.55×10^8

表2 三个像元信号和噪声异常的线列器件

Table 2 A linear detector with three pixels of abnormal signal and noise

像元编号	电阻/ Ω	偏流/ mA	信号/ V	噪声/ $(\text{V}/\text{Hz}^{1/2})$	响应率/ (V/W)	黑体 D^* / $(\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1})$
14	267	5	3.16×10^{-4}	1.30×10^{-8}	5.80×10^3	2.37×10^{10}
15	274	5	3.17×10^{-4}	1.28×10^{-8}	5.82×10^3	2.41×10^{10}
16	272	5	3.66×10^{-4}	1.37×10^{-8}	6.72×10^3	2.60×10^{10}
17	276	5	3.50×10^{-4}	1.43×10^{-8}	6.43×10^3	2.39×10^{10}
18	338	5	1.16×10^{-4}	8.29×10^{-9}	2.13×10^3	1.36×10^{10}
19	327	5	1.31×10^{-4}	8.46×10^{-9}	2.40×10^3	1.50×10^{10}
20	304	5	1.81×10^{-4}	1.01×10^{-8}	3.32×10^3	1.75×10^{10}
21	269	5	2.51×10^{-4}	1.15×10^{-8}	4.60×10^3	2.12×10^{10}
22	253	5	2.81×10^{-4}	1.28×10^{-8}	5.15×10^3	2.13×10^{10}

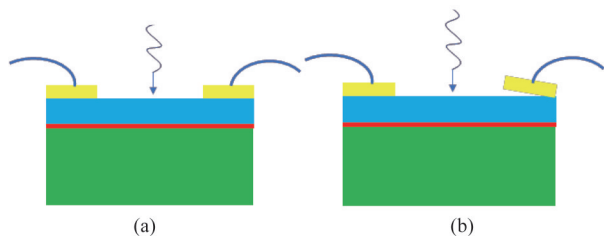


图15 电极接触正常和异常的芯片示意图

Fig. 15 Diagram of detector with normal and abnormal metal contact

中的叠层结构很像,可以预见器件的信号会增大,同时由于电极接触的不稳定,器件的电阻和噪声也会增加。表3中给出了某型号线列光导芯片中在老练过程中出现异常的三个像元的阻值、信号和噪声的变化。将该芯片进行拆解后进行检查,发现异常芯片的公共电极处高度明显要比周围芯片高,认为该处电极金层发生了隆起,从而导致像元性能异常。

2.4 像元之间串音异常

碲镉汞线列光导器件像元之间的串音包括光学串音和电学串音,这里提到的串音以电学串音为主。前面已经提到,当碲镉汞光导线列器件中存在导电多余物,当该多余物落到两个像元中间的沟槽中会把两个相邻的像元并联到一起,测试中的表现

表4 两元串音出现异常的线列器件

Table 4 A linear detector with two pixels of abnormal crosstalk

像元编号	电阻/ Ω	偏流/ mA	信号/ V	噪声/ $(\text{V}/\text{Hz}^{1/2})$	响应率/ (V/W)	黑体 D^* / $(\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1})$
5	276	2	$1.16\text{E}-04$	$8.75\text{E}-09$	$3.73\text{E}+03$	$1.71\text{E}+10$
6	266	2	$1.13\text{E}-04$	$8.75\text{E}-09$	$3.65\text{E}+03$	$1.67\text{E}+10$
7	136	2	$5.69\text{E}-05$	$3.72\text{E}-09$	$1.83\text{E}+03$	$1.97\text{E}+10$
8	136	2	$5.69\text{E}-05$	$3.67\text{E}-09$	$1.83\text{E}+03$	$2.00\text{E}+10$
9	272	2	$1.07\text{E}-04$	$9.16\text{E}-09$	$3.44\text{E}+03$	$1.50\text{E}+10$
10	272	2	$1.09\text{E}-04$	$8.95\text{E}-09$	$3.50\text{E}+03$	$1.56\text{E}+10$

表3 老练中三元出现异常的线列器件

Table 3 A linear detector with three abnormal pixels due to power burn-in

像元编号	阻值/ Ω		信号/ V		噪声/ $(\text{V}/\text{Hz}^{1/2})$	
	老练前	老练后	老练前	老练后	老练前	老练后
10	43.4	56.7	4.92×10^{-6}	5.60×10^{-6}	9.00×10^{-8}	1.00×10^{-7}
11	43.5	74.5	4.48×10^{-6}	5.01×10^{-6}	8.00×10^{-8}	9.00×10^{-8}
12	43.5	122.2	4.44×10^{-6}	5.21×10^{-6}	8.00×10^{-8}	1.40×10^{-7}

就是这两个像元之间的串音很大甚至达到100%。表4中给出一个10元线列中7/8两元之间发生了100%的串音,原因与图7类似,此时两个像元的阻值由于并联的原因基本减半,与之相对应的是信号和噪声也发生了接近同样比例的减小,探测率则基本保持不变。

如1.3中所述,另一个会引起像元之间电学串音的因素来自公共地线电极。由于线列器件上所有像元共用一个公共地线,当地线电阻相对像元阻值不是足够小时,一个像元上电平的变化会通过地线传导到别的像元,可以看出,与地线有关的电学串音会涉及到线列中所有像元。

2.5 线列器件工作状态下公共地线导致的异常

碲镉汞光导器件是在恒定偏流状态下工作。

对于线列光导器件来说,如果线列像元数较多,所有像元同时工作时在公共地线上会流过很大的电流,由于每一像元的位置离公共端不同,因此会在与每一像元相连的地线上产生不同的电压降从而影响与后端电子学的阻抗匹配,通常芯片的筛选测试是对每一像元单独测试,即同时只有一个像元的偏流通过公共电极,公共电极压降的影响不会体现出来。采用图16所示的接线图对一16×2的碲镉汞光导线列器件进行了全负载偏流测试,偏流大小由偏置电阻 R 和电源电压 V_b 决定, R_n 为每一像元的静态阻值(即不通电状态),全负载偏流开始工作后利用精密万用表测量每一像元与相连公共底线两端的电压 V_n ,利用式(9)可以计算得到与每一像元相连的公共地线上的压降 ΔV_n 。

$$\Delta V_n = V_n - \frac{V_b}{R + R_n} \times R_n \quad (9)$$

图17中A和B给出线列上下两排的16个像元对应的公共地线归一化压降分布,可以看出中间像元由于距离地线公共端距离最长,产生的地线压降也最大。当对地线进行加粗厚,地线的阻值进一步降低,此时中间像元与边缘像元上产生的地线压降基本相同,如图17中曲线C和D所示。需要指出的是,地线在加粗前后的静态阻值只相差 $0.1\ \Omega$ 甚至更少,这一差别只有在所有像元满负载偏流状态下才能明显表现出来。

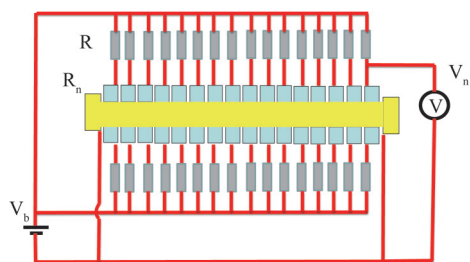


图16 各像元相连地线压降的测试示意图

Fig. 16 Diagram of voltage drop measurement for pixel-related ground electrode

3 碲镉汞线列光导器件的失效模式与可能原因分类

通过以上对碲镉汞线列光导器件在筛选和应用过程中异常现象的描述,可以看出,碲镉汞线列光导器件的性能失效可以从器件的光谱、阻值、信号、噪声和串音等方面表现出来,表5中将器件的各种失效模式和背后的可能原因以及检查鉴定方法进行了综合,可作为碲镉汞线列光导器件失效分析

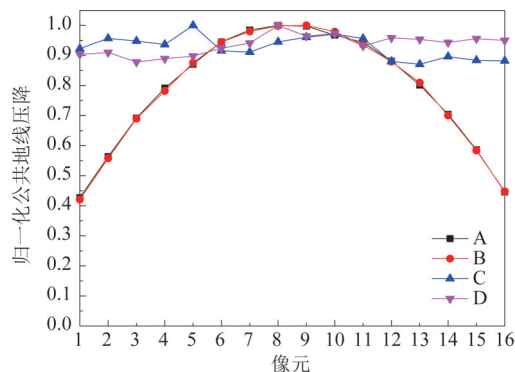


图17 公共地线加粗前后各像元相连地线压降对比

Fig. 17 Comparison results of pixel-related voltage drop before and after ground electrode thickening

的切入点。

4 碲镉汞光导线列器件的失效判据

碲镉汞光导器件的本质是一光敏电阻,电阻的核心参数是阻值。通过2和3两部分可以看出,任何一种失效模式发生后在器件的阻值方面总会有所反映,因此可以通过监测器件的阻值变化来对碲镉汞器件是否正常进行判断,尤其是对于应用状态的器件,此时器件已经封装完毕,无法对芯片表面状态进行检查,建立一个有效的失效判据尤为重要。

在碲镉汞线列光导器件的芯片筛选、组件装配、老练和装机使用过程中,会在各个阶段对器件进行性能测试,这些不同阶段中的碲镉汞器件状态会有所差别,即使状态正常芯片的阻值也会有所变化,比如碲镉汞组件装配滤光片前后由于背景差异其阻值必定不同,因此单单通过监测器件阻值的绝对值变化不足以反映器件的状态是否正常。本文中以器件的阻值为基础构建了一个优值因子(FOM)作为碲镉汞光导器件的失效判据,用来对碲镉汞线列光导器件在不同阶段的状态是否正常进行判断。这一判据的构建基础是正常线列器件中的各个像元之间保持一个基本固定的相对关系。在优值因子的构建中,首先将线列中每一像元的阻值对所有像元阻值的平均值进行归一化,然后将所有像元阻值的归一化值的统计标准差作为线列光导器件的优值因子,如果线列状态正常,则每一次测试的优值因子应该基本保持稳定,代表各像元阻值大小在整个线列中的相对位置基本保持不变;反之,如果优值因子突然增加,代表有部分像元阻值大小在整个线列中的相对位置发生了较大的变化,即阻值出现异常,代表线列状态异常。图18中给出了两个15元线列器件在不

表5 碲镉汞线列光导器件的失效模式、可能原因与检查鉴定方法汇总

Table 5 Summary of failure modes, origins and identification methods

编号	失效模式					涉及像元数	可能原因	检查鉴定方法
	阻值	信号	噪声	探测率	串音			
1	增加	增加	增加	正常		部分	光谱偏短,材料不均匀	FTIR 光谱测试
2	降低	降低	降低	降低		部分	光谱偏长,材料不均匀	FTIR 光谱测试
3	正常	降低	降低	正常		全部	窗口截止	更换窗口
4	增加	降低	降低	降低		部分	像元中存在晶界结构	偏振模式显微镜
5	增加	降低	增加	降低		部分	光敏元损伤,包括划痕、钝化层脱落和位错增值等	显微镜
6	增加	增加	增加	降低		部分	电极层部分脱开	测厚显微镜
7	增加	增加	增加	正常		整体	芯片厚度偏薄	测厚显微镜
8	降低	降低	降低	正常		整体	芯片厚度偏厚	测厚显微镜
9	降低	降低	增加	降低		整体	芯片温度较大漂移	检查测温元件和芯片/冷头热接触
10	增加	降低	增加	降低		整体	芯片工艺中表面沾污或经历高温	检查工艺过程记录,测试器件电阻温度曲线
11	降低且相同或接近	降低	降低	正常	增加	相邻像元	像元并联	显微镜
12	正常或偏大	正常	正常	正常	增加	整体	公共地线阻值偏大	检查地线电阻

同阶段的测试结果,图中线列像元的阻值对平均值进行了归一化,(a)为一正常线列,从图中可以看出,经过4次不同阶段的测试后器件的阻值归一化曲线基本重合,说明各像元阻值大小在线列中的位置基本稳定,图19中给出不同阶段测试后器件优值因子FOM的变化,看出其FOM因子基本不变。相比之下,(b)中的线列器件在第二次测试时FOM因子就开始变大,将组件拆开显微镜下发现芯片表面有类似图14中的裂纹,说明该优值因子可以作为判断线列器件状态是否正常的判据。

5 总结

在碲镉汞器件的研发中经常出现一种材料和器件研制人员“相互推诿责任”的现象,这再次说明碲镉汞材料性能和器件工艺过程相互耦合在一起,共同影响碲镉汞器件的性能参数,因此面对筛选中遇到的性能异常器件以及应用过程中出现的失效现象,切不可轻易下结论是材料特性或者器件工艺的原因。本文中作者结合在几个项目研制过程中的经验和数据,对碲镉汞线列光导器件筛选和装配应用中遇到的常见异常现象进行了描述,对其失效模式进行了概括和总结,并对失效机理和鉴定方法进行了初步的分析。文章首次针对碲镉汞线列光导器件提出了光导器件优值因子(FOM)作为评价

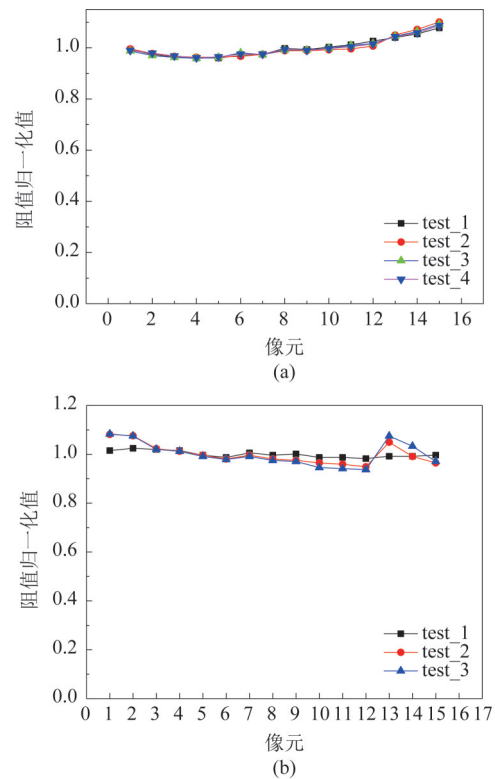


图18 两个线列器件不同阶段测试后的阻值归一化对比

Fig. 18 Comparison of normalized resistance for two linear detectors after successive tests

器件状态的失效判据,在相关项目中已经得到应用并取得了良好的效果。

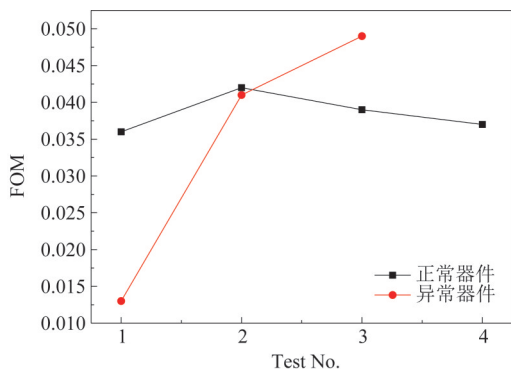


图 19 两个线列器件在不同阶段测试中优值因子的变化

Fig. 19 Variation of FOM for two linear detectors after successive tests

References

- [1] Elliott T. Recollections of MCT work in the UK at Malvern and Southampton [J]. *Proceedings of SPIE - Infrared Technology and Applications XXXV*, 2017, **7298**:72982M
- [2] Rogalski A. Next decade in infrared detectors. Next decade in infrared detectors [J]. *Proceedings of SPIE - Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV*, 2017, **10433**:104330L.
- [3] LU Wei, LI Ning, ZHEN Hong-Lou, *et al.* Quantum well infrared photodetector in infrared photo-electronics [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* (陆卫, 李宁, 甄红楼等. 红外光电子学中的新族——量子阱红外探测器. *中国科学*) 2009, **39**(3):336-343.
- [4] CHEN Jian-Xin, LIN Chun, HE Li. InAs/GaSb type II superlattice infrared detection technology [J]. *Infrared and laser engineering* (陈建新, 林春, 何力. InAs/GaSb II 类超晶格红外探测技术. *红外与激光工程*) 2011, **40**(5):786-790.
- [5] Yunlong Xiao, He Zhu, Ning Dai, Weida Hu. Progress and challenges in blocked impurity band infrared detectors for space-based astronomy [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, **65**(8):287301.
- [6] QI Cheng-Li, GU Ming-Jian, HU Xiu-Qing, *et al.* FY-3 Satellite infrared high spectral sounding technique and potential application [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology* (漆成莉, 顾明剑, 胡秀清, 等. 风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用. *气象科技进展*) 2016, **6**(1):88-93
- [7] YE Zhen-Hua, LI Hui-Hao, WANG Jin-Dong, *et al.* Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 李辉豪, 王进东, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势. *红外与毫米波学报*) 2022, **41**(1):1-25
- [8] YANG Jian-Rong. Material physics and technology of mercury cadmium telluride [M]. Beijing: National Defense Industry Press. (杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术) [M]. 北京, 国防工业出版社. 2012:103-109
- [9] Chu J H, Sher A. Physics and properties of narrow gap semiconductors [M]. New York, Springer, 2008:208
- [10] Hartley L M, Reine M B, Terzis C L, *et al.* Photoconductive HgCdTe detector assemblies for the GOES imager and sounder instruments [J]. *Proc. SPIE*, 1996, **2812**:518-527.
- [11] Piotrowski J, Rogalski A. High operating temperature infrared photodetectors [M]. SPIE Press. 2007:21-23.
- [12] ZHOU Shi-Chun. Introduction to advanced infrared optoelectrical engineering [M]. Beijing, Science Press. (周世椿. 高级红外光电工程导论. 北京, 科学出版社.) 2014:269-272.
- [13] CHEN Bo-Liang, LI Xiang-Yang. Infrared imaging detectors for space applications [M]. Beijing, Science Press. (陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器. 北京, 科学出版社) 2016:34-37.
- [14] Ge H N, Xie R Z, Guo J X, *et al.* Artificial micro- and nano-structure enhanced long and very long-wavelength infrared detectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, **71**(11):110703.
- [15] Liu L F, Chen Y Y, Ye Z H, *et al.* A review on plasma-etch-process induced damage of HgCdTe [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **90**:175-185.
- [16] Liu M, Wang C, Zhou L Q. Development of small pixel HgCdTe infrared detectors [J]. *Chinese Physics B*, 2019, **28**(03):17-25.
- [17] Kinch M A, Borrello S R, Breazeale B H, *et al.* Geometrical enhancement of HgCdTe photoconductive detectors [J]. *Infrared physics*. 1977, **17**(2):37-145.
- [18] HU Xiao-ning, FANG Jia-xiong. Carrier concentration distribution and performance of overlap photoconductive detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (胡晓宁, 方家熊. 叠层 HgCdTe 光导器件载流子浓度分布及器件性能. *红外与毫米波学报*). 1996, **15**(4):681-685.
- [19] Royer M, Fleury J, Lorans D, *et al.* The infrared detector development for the iasi instrument [J]. *Proc. SPIE*, 1996, **3122**:203-213.
- [20] Measuring methods for parameters of infrared detectors. GB/T 13584-2011 (红外探测器参数测试方法, GB/T 13584-2011, 中华人民共和国国家标准)
- [21] KANG Rong, LI Li-Hua, PENG Man-Ze, *et al.* How to determine the peak detectivity from measuring blackbody detectivity—the calculation of factor G [J]. *Infrared technology* (康蓉, 李立华, 彭曼泽, 等. 由黑体 Db λ^* 确定峰值 $D\lambda^*$ 以及黑体波段 $D^*\Delta\lambda G$ 因子的计算. *红外技术*) 2005, **27**(3):263-265.
- [22] Reine M B, Broudy R M. A review of HgCdTe infrared detector technology [J]. *Proc. SPIE*, 1977, **124**:80-90.
- [23] CAO Hong-Hong. Current status and applications of filter technology for infrared detectors [J]. *Infrared* (曹红红. 红外探测器用滤光片的技术现状与应用. *红外*) 2017, **38**(1):43-47
- [24] Reine M B, Krueger E E, O'Dette P, *et al.* Advances in 15 μ m HgCdTe photovoltaic and photoconductive detector technology for remote sensing [J]. *Proc. SPIE*, 1996, **2816**:120-137.
- [25] LI Da-Yu, DAI Zuo-Xiao, WEI Huan-Dong. Design of a low noise preamplifier with constant current bias for HgCdTe photoconductive detector [J]. *Infrared*. (李大宇, 代作晓, 魏焕东. HgCdTe 光导探测器的一种恒流偏置的低噪声放大电路的设计. *红外*) 2010, **31**(3):6-10.
- [26] Blatter G, Greuter F. Carrier transport through grain boundaries in semiconductors [J]. *Phys. Rev. B*. 1986, **33**(6):3952-3966.