

红外成像系统中串扰效应的研究现状与进展

龙 弯 王 睿 许中杰

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

摘要 在红外成像系统中,串扰会降低图像的清晰度,影响焦平面阵列的分辨率性能和成像质量,因此对串扰的测试及产生机理等研究至关重要。对比了串扰效应的3种测试原理和测试方法,从光学串扰和电学串扰两个方面揭示了串扰效应的产生机理,综述了两种串扰类型的解决方案,并对未来红外成像器件的发展趋势进行展望,以期改进相关器件的技术、结构和制造工艺提供有益的借鉴。

关键词 成像系统; 红外; 串扰; 光学串扰; 电学串扰

中图分类号 TN219 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.100004

Research Status and development of Crosstalk in the Infrared Imaging Systems

Long Wan Wang Rui Xu ZhongJie

College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

Abstract In infrared imaging system, crosstalk reduces definition of the image, affects the resolution performance and the imaging quality of focal plane array. Therefore, it is necessary to study the test and generation mechanism of crosstalk. Three types of testing methods and principle of crosstalk effect are compared, generation mechanisms are elaborated from two aspects of optical crosstalk and electrical crosstalk, and solutions of crosstalk are systematically summarized. At the same time, the future development trend of the infrared imaging device are also discussed. In order to offer beneficial reference for improving the relative device technology, structure and manufacturing process.

Key words imaging systems; infrared; crosstalk; optical crosstalk; electrical crosstalk

OCIS codes 040.3060; 060.2390; 260.3060

1 引言

串扰效应是一个常常会遇到但又不容易解决的问题,对于红外成像系统来说,串扰是指一个像素中的信号对其他像素所产生的耦合影响,其本质是一个信号对另外一个信号耦合产生的干扰噪声。目前的研究结果表明串扰效应主要由光学和电学两种串扰机制产生,其大小与组件中的滤光片、光阑、探测器的结构以及放大器通道间的耦合等因素有关^[1-2]。所谓光学串扰是指本应在目标探测器中出现的信号因为光的反射、折射或者衍射等一系列光学现象的作用跑到其他探测器的现象,又可细分为两种形式:1)在阵列的像元上方以较大角度入射的光,在被该像元完全吸收前进入到相邻的像元并被吸收;2)部分大角度入射光没有入射到光敏区,而是入射到阵列元间的互联层并经反射进入到相邻像元的光敏区。电学串扰是指当入射光进入光敏区产生的非平衡载流子发生横向扩散进入相邻像元,被该像元收集而引起的串扰^[3]。串扰的存在会降低图像的清晰度^[4],影响焦平面阵列的空间和时间分辨率性能^[5],严重影响最终输出图像的质量^[6],串扰过大时甚至会引起探测器完全不能工作^[7],导致整个红外系统性能的衰减^[8],因此器件的抗串扰能力越强,其性能也越好。特别是,近年来随着红外焦平面技术的发展,阵列的规模越来越大,探测器的单元尺寸(已达到

收稿日期: 2015-03-17; 收到修改稿日期: 2015-04-16; 网络出版日期: 2015-09-02

作者简介: 龙 弯(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: 352949016@qq.com

导师简介: 王 睿(1976—),女,副教授,硕士生导师,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: xi_g_z@126.com

20~30 μm)和间隔却越来越小,串扰现象越严重,串扰会随着中心距离的增加而呈现指数减小^[9],因此关于串扰问题的研究也备受关注。目前,关于串扰效应的文章虽有报道,但其工作主要局限在对串扰效应的定性描述,没有详细的测量方法和准确的测量结果^[9],或者只论述某一种串扰类型^[10],或其中的某一情况^[11],本文系统综述了前人对串扰效应的研究成果,对比分析了串扰效应的3种测试原理和测试方法,从光学串扰和电学串扰两个方面揭示串扰效应的产生机理及其解决方案,并用定量的数据说明串扰减小的程度。

2 串扰效应的测试原理和测试方法

在红外成像系统中,串扰问题直接影响到器件的性能和成像质量,因此,准确地测试出器件的串扰程度,分析串扰产生的原因,对于提出有效的改进措施十分重要。

光学串扰效应和电学串扰效应各有不同的测试原理和测试方法。通常,光学串扰的测试结果不但能反映器件间的光学串扰的情况,还能反映器件间的电学串扰的情况,然而电学串扰效应的测试结果却只能反映器件间的电学串扰的情况,不能反映器件间的光学串扰的情况。目前,串扰测试技术主要有红外小光点测试技术,检测图形测试技术和激光诱导电流(LBIC)测试技术。

2.1 红外小光点测试技术

红外小光点测试技术是指利用红外聚焦光学系统或者光纤,将红外小光点聚焦后投射在探测器单元上,通过测试该探测器单元及其周边相邻未被照射探测器单元的信号,实现串扰的测量。

近年来,关于红外小光点测试技术的研究已有报导,2006年,应承平^[12]详细介绍了基于网络的红外焦平面阵列串扰测试系统的设计,阐述了网络控制、精密位移、精确调焦、器件最佳工作点调整、系统噪声降低的原理和实现方法。2009年,美国的Jeffrey等^[13]用红外小光点扫描的方法,测试了中波红外HgCdTe电子注入型雪崩光电二极管的串扰。2011年,刘敬等^[14]建立了基于八邻域的小像元焦平面阵列串扰测试的理论模型。2014年,汪洋等^[15]用一套红外小光点测试系统测试了红外探测器组件的线扩展函数(LSF)来评价器件的光学串扰,测试结果表明,11.5~12.5 μm 波段探测器的光学串扰明显比8.0~9.0 μm 波段探测器的大,为红外探测器组件的光学串扰设计提供了参考。

但通常情况下,利用红外小光点测试技术只能够得到总串扰的大小,无法分别确定光学串扰和电学串扰的大小。另外,由于探测器的单元尺寸已进入光学衍射限(即难以将红外小光点的尺寸限制在一个探测器单元之内),且用于红外小光点测试技术的测试系统非常昂贵,一般的研究机构难以承受。因此,红外小光点测试方法和设备在原理上已面临失效的危险,需要研究新的串扰测试方法和设备。

2.2 检测图形测试技术

检测图形测试技术与红外小光点测试技术都依据同样的原理,只是在测试方法上有所区别。检测图形测试技术是指采用遮挡的方法,用于分析红外焦平面阵列的串扰,依据焦平面器件的工作方式分为正面照射和背面照射两种,检测图形测试技术也可分为两种情况:1) 器件正面照射工作方式的检测图形测试原理; 2) 器件背面照射工作方式的检测图形测试原理。

2.2.1 正面照射工作方式的检测图形测试原理

对于正面照射工作方式的阵列,检测图形由一个正面照射检测管和一个掩蔽检测管构成。

图1为正面照射检测图形的测试原理图, D_1 、 D_2 是两个相邻的光电二极管,其中, D_2 为正面照射检测管, D_1 为掩蔽检测管。同时测出检测管 D_1 和 D_2 上的光电响应信号 S_1 和信号 S_2 ,信号 S_1 等效于器件 D_1 的相邻器件受光照时的光电响应信号,信号 S_2 等效于器件 D_2 受直接光照时的光电响应信号,检测管 D_1 和 D_2 的伏安特

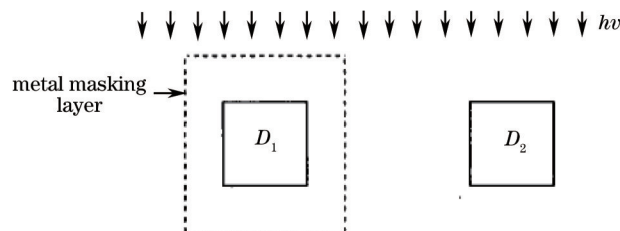


图1 正面照射检测图形的测试原理图

Fig.1 Schematic diagram of the testing device for front illumination

性相同, 可视为同一个检测管 D , 所以, 信号之比 S_1/S_2 就是器件 D_1 和 D_2 之间的光学串扰程度。

2.2.2 背面照射工作方式的检测图形测试原理

对于背面照射工作方式的阵列, 检测图形可以只设计一个掩蔽检测管就可以达到测试目的。

图2为背面照射检测图形的测试原理图, 对于同一个待检测图形, 当正面照射时可以测得暗场信号 S_1 , 背面照射时可以测得光照信号 S_2 。忽略正面照射与背面照射时光电转换效率的差异, 信号之比 S_1/S_2 就是器件之间的光学串扰程度。

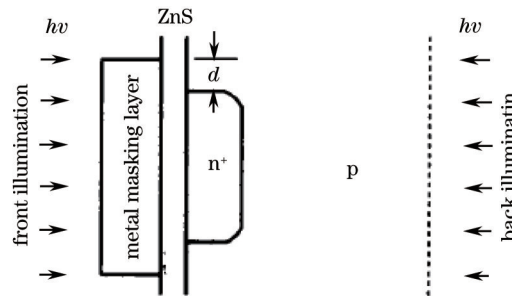


图2 背面照射检测图形的测试原理图

Fig.2 Schematic diagram of the testing device for back illumination

曾戈虹^[16]利用检测图形测量光伏型焦平面器件串扰效应的方法直观、简便, 所用测试设备与常规光电器件测试设备相同。但是, 检测图形测试技术只能测试出电学串扰, 不能测试出光学串扰, 而且, 由于测试管(正照管和掩蔽管)本身工艺的不同, 加之两个测试管光电响应率的差异, 检测图形测试方法在结构设计和测试方法上都可能引入一定的误差。

2.3 激光诱导电流测试技术

激光诱导电流(LBIC)测试技术是指在待测试样品的两边, 分别做一个欧姆接触的电极, 然后用一束低功率的激光束聚焦在待测试样品的特定区域, 使其产生电子-空穴对, 通过观察样品两侧电场的变化, 确定有无串扰产生。LBIC产生信号的机理如图3所示^[17], 当激光束在p-n结表面扫描时, 若连接A和B电极, 光生载流子扩散到空间电荷区边缘时, 会立刻被电极收集, 产生光伏响应信号 I_{AB} ; 若连接A和C电极, 光生载流子扩散到空间电荷区边缘后会被分离, 产生光伏响应信号 I_{AC} 。

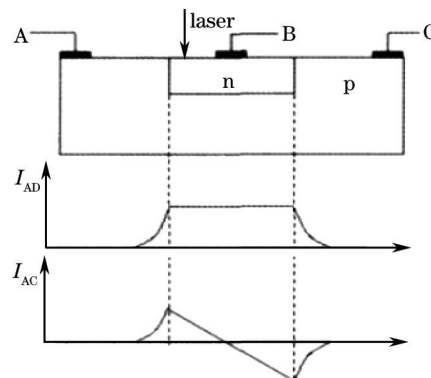


图3 LBIC信号原理图

Fig.3 Schematic of LBIC signal

吕衍秋等^[17]利用激光诱导电流测试技术研究了InGaAs台面探测器的相邻探测器间的串扰, 该技术直观、方便, 可以毫无损伤地研究探测器阵列的串扰和光敏感区的有效面积大小, 对红外焦平面阵列的研究和设计有重要意义。但是, LBIC测试技术只能测试出光学串扰的有无, 不能测试出串扰的大小。

3 光学串扰

光信号落到任何非指定的感光区时会产生光学串扰。

3.1 光学串扰的产生机理

光学串扰现象可以由许多现象引起, 其中包括光的反射或者折射, 光的散射, 目标光点的衍射和光学系

统的像差等。由光的反射导致的光学串扰如图4所示^[6],光束2并没有入射到感光位置,而是入射到了互连层,经互连层间的多次反射进入到相邻像素的感光部位,从而导致光学串扰的发生。

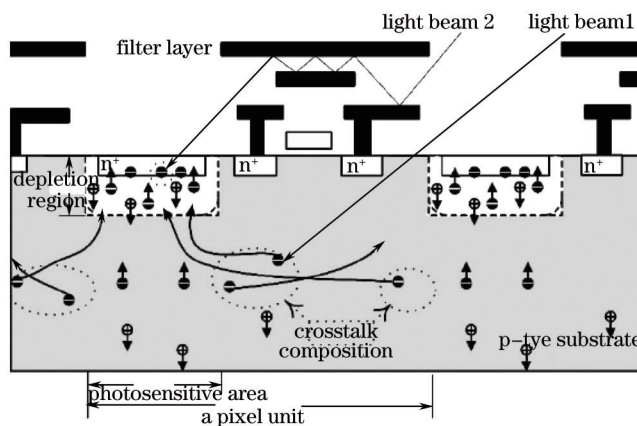


图4 串扰发生的机理

Fig.4 Mechanism of crosstalk

衍射效应是由于光的波动特性和透镜的有限大小造成的,衍射图形的中心光斑称为艾里光斑,如图5(a)所示,其能量分布曲线如图5(b)所示,它包括大部分的辐射能。通过比较艾里光斑与光敏元面积的相对大小,可以判断出是否出现了光学串扰。当某一个光敏元的面积大于艾里光斑的,则没有串扰产生,如图5(c)所示;反之,若艾里光斑的覆盖面积大于一个或者多个光敏元时,则光斑能量就会溢出到相邻的光敏元上,形成光学串扰,如图5(d)、(e)所示。

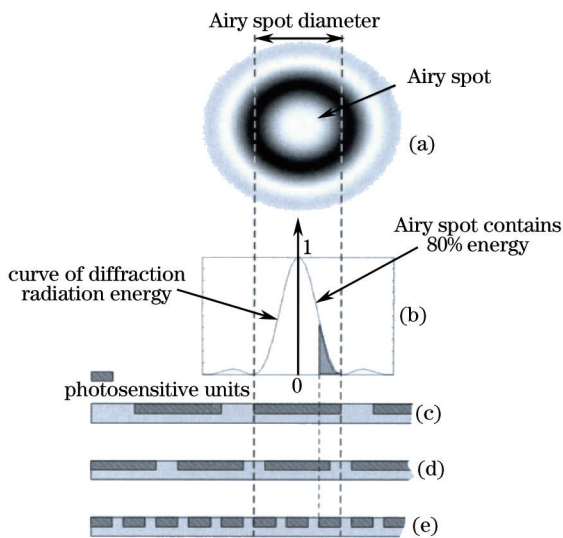


图5 由衍射效应引起的光学串扰

Fig.5 Optical crosstalk cause caused by diffraction effect

详细揭示了导致光学串扰效应的产生来源,具体说明了导致光学串扰的各种产生机理、相应的产生条件以及相关的文献依据。其中,器件内部的反射是在阵列衬底内部从材料的侧面和背面或是从薄膜电极下面产生的多次反射;器件外部的反射,是在阵列正面和系统光学元件(诸如滤光片)之间的多次反射;元件间隙小时,以折射式串扰为主,但随着间隙增大,几何光学串扰的重要性增大。文献[18]表明光学串扰一般由光在光学系统之间以及光学系统和探测器表面之间的多次反射产生,陈敏聪^[19]发现相同能量的光子在垂直入射与斜入射情况下产生的串扰不同。光的散射,散射源有覆盖物的表面、体内和环氧树脂层。Pellicori等^[20]指出环氧树脂层很薄,其散射可忽略不计;同样,因环氧树脂与盖片下表面光学接触,两者的折射率相仿,所以该下表面的散射亦可忽略不计;盖片的上表面是关键,散射能的大小及分布与波长成反函数关系。目标光点的衍射,主要来源于各种光学孔径。光学系统的像差来源于探测元件、窗口、电极、衬底的上、下表面以及附近的滤光片或透镜。

3.2 光学串扰的解决方案

由于产生串扰的原因很多,不同的场合产生的机理也不一样,因此要想完全消除串扰的影响是不现实的。但是可以在明确该器件串扰成因的基础上,采取一些适当的措施来减少串扰的影响,将误差降低到允许的范围内。减少光学串扰的方法,其本质都是通过控制不需要的反射^[21],增加照射到感光部位的入射光线,或者阻挡那些可能成为光串扰源的大角度入射光线等手段实现。随着制造工艺的发展和设计技术的进步,现在对光学串扰的研究已经有了新的突破。在结构设计上,通过优化平面结型MCT平面阵列衬底几何形状的新型结构^[22],光响应率增加了9.6%,光串扰从未优化前的5.23%减小到1.05%;利用微透镜阵列,将碲镉汞焦平面阵列的串扰降到了小于1%的水平^[23];用周期性柱列阵形成的微结构表面替代原来的抗反射膜^[24],光学串扰略高,但是总的电学串扰显著降低。在工艺提升上,发现了一种在碲镉汞光伏探测器背面镀制微孔冷屏的办法^[24],抑制长线条焦平面器件的光学串扰,解决光敏元响应面积扩大的问题。在算法优化上,在红外成像系统中加入像元串扰抑制算法^[25],不但抑制了串扰,而且使图像的对比度显著增强;从实测红外焦平面调制传递函数曲线计算百分比串扰值的一种新方法^[26],通过调制传递函数(MTF)计算百分比串扰值提供了一种新的更加全面的确保器件性能的方法;利用Matlab软件样条函数积分命令测量双光谱红外探测器光谱串扰的方法^[27],该方法容易实现、使用快捷;提出了一种通过构建特定场景作为参考数据来提取光学串扰量的方法^[18],得到光学串扰的大小,并将其用于光学串扰校正。

4 电学串扰

电学串扰对器件性能的影响是无法预知的,如王新德等^[28]指出电学串扰使InSb探测器阵列各探测元的实测结电阻变小,实测探测率变大,实测响应率则可能变小,也可能变大;文献[1]得到一个多元光导碲镉汞探测元的电学串扰大小为 $(N-1)R_c/R_b$,其中, N 为器件的探测元数, R_c 为接地电阻, R_b 为限流电阻,它不仅与器件设计和制备工艺有关,而且也与整机电源电压的选取和前置电路的设计有关,所以对电学串扰问题的研究是一项复杂的工作,也需要具体情况具体分析。

4.1 电学串扰的产生机理

电学串扰的产生机理是光生少子(电子)的横向扩散,与少数载流子的扩散机制有关。电学串扰是指在耗尽区下方产生的电荷,在向上扩散进入耗尽区之前,有一定的几率发生横向扩散进入到相邻的像素区域,进而被相邻区域所收集^[6],如图4所示。电学串扰的产生机理的来源主要包括:载流子(扩散、浓度、扩散长度和吸收系数)、载流子的辐射复合、表面沟道、光敏元和处理电路设计。由载流子导致的电学串扰,文献[29]指出没有势垒层,载流子扩散引起的串扰十分明显,甚至成为串扰的主导因素^[29],而且串扰随着多数载流子浓度的增加而减小^[30],文献[31]还表明电学串扰与载流子的扩散长度和吸收系数有关。由载流子的辐射复合导致的电学串扰是指顺序工作模式下中波红外碲镉汞器件的串扰由粒子的辐射复合导致^[32],而且产生的散射光子和电子被其他相邻的探测器接收造成的^[7]。文献[30]指出表面沟道是引发器件电学串扰的重要因素,表面沟道越深,串扰越大,碲镉汞焦平面阵列中由表面沟道引起的电学串扰^[33]。在光敏元和处理电路设计方面,串扰的来源主要是探测器光敏元^[34]的电串引起的、与PN结结区的深度^[35]有关,探测元间的接地电阻^[36]、漏电阻^[35]引起,还有可能是电路的带宽不够^[34]。

4.2 电学串扰的解决方案

关于减小电学串扰的方案,本质上都是增加进入到感光区的电荷数量,减小电荷横向或向下方的扩散几率,但是,前人的研究工作只表明有电学串扰减小的可能性,并没有明确说明串扰减小的程度。从结构设计上考虑,在探测器阵列的外围加上合适尺寸的保护环结构,有保护环结构的器件性能均优于无保护环结构,且串扰大小仅是后者的1/5,提高了阵列探测器的探测器效率和分辨率^[3]。从工艺提升上考虑,在阵列之间加入适量厚度铅介质的新方法^[37];背面沟槽隔离技术^[36],在相邻的两个像素背面之间插入沟槽隔离区域,并用P+隔离阱将沟槽进行包埋,该技术有效隔离背表面中最为严重的短波串扰源;当沟槽深为3 μm时,相邻像素的串扰量由原来的32.73%降至8.76%;当沟槽深为4 μm时,相邻像素可实现电学串扰的完全抑制;在两个光敏元之间制造人为损伤沟道的方法^[35]和在衬底背面引入十字形欧姆接触的方法^[38],使得原来相邻两元件间串扰高达30%,加10 μm深的沟道后,串扰就小于5%;样品原串扰为50%,加16 μm深沟道后,串扰

降为8%。从电路技术上考虑,提高探测元间的偏置电阻^[2]、减小接地电阻和选择较大的限流电阻^[1],抑制了探测元之间接地电阻引起的电学串扰;改进探测器读出电路的性能^[31]、降低电源电压^[30]和对衬底表面电势进行良好控制^[30],显著地减小了电学串扰的影响。

5 结 论

在红外成像系统中,串扰问题是一个非常复杂、涉及多个专业领域、集理论与实践于一体的综合性问题^[6],详细地阐明了光学串扰和电学串扰效应的解决方案,希望对串扰问题宏观认识的提升有所裨益。随着红外焦平面技术的发展,对红外焦平面器件的抗串扰性能和目标识别能力提出了更高的要求,双色碲镉汞焦平面探测器成为第三代红外焦平面器件的主要代表^[40],在目标辨认、信号识别以及抗串扰方面的性能均优于其他探测器,是红外探测成像技术发展的方向,因此,双色或多色器件中的光谱串扰问题,即一般情况下两个或者多个通道的光谱响应曲线或多或少会有一定程度的交叉或重叠,交叉的部分定义为光谱串扰,也是目前和将来要重点解决的问题。

参 考 文 献

- 1 Liang Honglin, Cai Yi, Yao Ying. Electrical crosstalk of multi-element photoconductive HgCdTe detectors[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 1997, 16(1): 77-80.
梁宏林,蔡毅,姚英.多元光导碲镉汞探测器的电串音[J].红外与毫米波学报,1997,16(1):77-80.
- 2 Li Dayu, Duan Xinghui, Wei Huandong. Study on electrical crosstalk of multi-element infrared photoconductive detectors [J]. Laser&Infrared, 2009, 39(9): 952-955.
李大宇,段星辉,魏焕东.多元红外光导探测器电子学串音研究[J].激光与红外,2009,39(9):952-955.
- 3 Wang Wei, Wu Wei, Bai Chenxu, *et al.*. Analysis on electrical crosstalk of silicon PIN photodiode array[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013: 34(1).
王巍,武透,白晨旭,等.硅PIN光电探测器阵列的串扰分析[J].半导体光电,2013:34(1).
- 4 Musca C A, Dell J M, Faraone L, *et al.*. Analysis of crosstalk in HgCdTe p-on-n heterojunction photovoltaic infrared sensing arrays[J]. Journal of Electronic Materials, 1999, 28(6): 617-623.
- 5 Wang Yifeng, Ma Yu. On the crosstalk of infrared focal plane array[J]. Infrared, 2014, 35(1): 1-8.
王忆锋,马钰.论红外焦平面器件的串音[J].红外,2014,35(1):1-8.
- 6 Su Lin, Huang Qiyu. Crosstalk in CMOS image sensor and its solutions[J]. Sensor and Micro System, 2008, 27(8): 65-68.
苏林,黄其煜.CMOS图像传感器中的串扰与常用解决方案[J].传感器与微系统,2008,27(8):65-68.
- 7 Zhou Rifeng, Zhang Ping, Zhang Zehong. Simulation of cross-talk noise of high energy X-ray detectors[J]. Nuclear Techniques, 2005, 28(12): 937-939.
周日峰,张平,张泽宏.高能X射线探测器射线串扰模拟研究[J].核技术,2005,28(12):937-939.
- 8 Gao Weiwei. Simulation of the crosstalk effect of lasers on the infrared imaging system[J]. Electronic Sci & Tech, 2010, 23(6): 35-37.
高巍巍.红外成像系统激光干扰饱和和串音效应的仿真[J].电子科技,2010,23(6):35-37.
- 9 Sun Y, Bo Z, Yu M, *et al.*. Crosstalk of HgCdTe LWIR n-on-p diode arrays[J]. Journal of Semiconductors, 2009, 30(9): 094007.
- 10 Jia Chen, Li Yushan, Li Xianrui, *et al.*. The Crosstalk for Interconnect Design of CMOS Digital ICs[EB/OL]. Beijing: Chinese Science Paper Online. [2009-02-05]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200902-70>.
贾琛,李玉山,李先锐,等.CMOS数字芯片互连设计中的串扰[EB/OL].北京:中国科技论文在线.[2009-02-05].<http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/200902-70>.
- 11 Qiu Weicheng, Wang Rui, Xu Zhongjie, *et al.*. Optical crosstalk of HgCdTe PV linear array detector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(10): 2325-2330.
邱伟成,王睿,许中杰,等.PV型HgCdTe线阵探测器的光学串扰[J].强激光与粒子束,2012,24(10):2325-2330.
- 12 Ying Chengping. A study of crosstalk measurement technologies of IRFPA[J]. Metrology & Measurement Technology, 2006, 26(2): 24-28.
应承平.红外焦平面阵列串音测试技术研究[J].计测技术,2006,26(2):24-28.
- 13 Jeffrey B, Richard S, Billy S, *et al.*. Performance and modeling of the MWIR HgCdTe electron avalanche photodiode[J]. Journal of Electronic Materials, 2009, 38(8): 1579-1592.

- 14 Liu Jing, Wang Xia, Jing Weiqi, *et al.*. Crosstalk model based on neighboring elements for small element IRFPA[J]. *Journal of Electronics&Information Technology*, 2011, 33(9): 2231-2236.
刘 敬, 王 霞, 金伟其, 等. 一种基于邻域的小像元红外焦平面阵列串音测试方法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(9): 2231-2236.
- 15 Wang Yang, Liu Dafu, Xu Qinfei, *et al.*. Study of crosstalk of infrared photoconductive detector assemblies[J]. *Infrared*, 2014, 35(7): 16-20.
汪 洋, 刘大福, 徐勤飞, 等. 红外光导探测器组件的串音研究[J]. *红外*, 2014, 35(7): 16-20.
- 16 Zeng Gehong. Test pattern method for the crosstalk measurement of photovoltaic FPAs[J]. *Infrared & Laser Technology*, 1995, (3).
曾戈虹. 串音效应的检测图形测试法[J]. *红外与激光工程*, 1995, (3).
- 17 Lü Yanqiu, Qiao Hui, Han Bing, *et al.*. Crosstalk and photoactive area of InGaAs linear detector by LBIC technique[J]. *National Academic Communication Optoelectronic Technology*, 2006: 708-710.
吕衍秋, 乔 辉, 韩 冰, 等. LBIC技术研究InGaAs线列探测器串音及光敏感区[C]. 2006年全国光电技术学术交流会, 2006: 708-710.
- 18 Tao Dongxing, Jia Guorui, Zhao Huijie, *et al.*. Analysis of optic crosstalk correction for pushroom hyperspectral data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(11): 60.
陶东兴, 贾国瑞, 赵慧洁, 等. 推扫型高光谱数据光串扰校正方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(11): 60.
- 19 Chen Mincong. Experimental study on characteristics in linear array detectors[J]. *Nondestructive Testing*, 2014, 36(2): 014.
陈敏聪. 线阵列探测器串扰试验[J]. *无损检测*, 2014, 36(2): 014.
- 20 Pellicori S F, Wurtz H P. Optical crosstalk in infrared detector arrays[C]. 21st Annual Technical Symposium, International Society for Optics and Photonics, 1977.
- 21 Schuster J, Belloti E. Analysis of optical and electrical crosstalk in small pitch photon trapping hgcdte pixel arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(26): 261118.
- 22 Quan Zhijun, Ye Zhenhua, Hu Weida, *et al.*. Study on structural optimization of decreasing the crosstalk of planar HgCdTe focal plane arrays[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2006, 25(5): 329-332.
全知觉, 叶振华, 胡伟达, 等. 降低平面结型碲镉汞焦平面阵列光串音的结构优化研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(5): 329-332.
- 23 Li Y, Ye Z, Lin C, *et al.*. Crosstalk Suppressing Design of GaAs Microlenses Integrated on HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays[J]. *Opt Quant Electron*, 2013, 45(7): 665-672.
- 24 Wang Chenfei, Chen Honglei, Li Yanjin. Study of background illumination reduction of hgcdte photo voltage detector [J]. *Laser& infrared*, 2007, 37(B09): 935-937.
王晨飞, 陈洪雷, 李言谨. HgCdTe 光伏探测器抑制背景通量的研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(B09): 935-937.
- 25 Tang Liangrui, Zhang Yue, Li Shourong. A restraining crosstalk method of infrared image based on fuzzy theory[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(5): 283-286.
唐良瑞, 张 悦, 李守荣. 基于模糊理论的红外图像像元串音抑制算法[J]. *红外技术*, 2006, 28(5): 283-286.
- 26 Xu Zhonghua, Fang Jiexiong. Crosstalk calculation from modulation transfer function curves of infrared focal plane arrays[J]. *Jaser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(4): 041101.
许中华, 方家熊. 利用红外焦平面调制传递函数曲线计算串音值[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(4): 041101.
- 27 Wang Yifeng, Yu Lianjie, Tian Ying. Quantitative analysis and calculation of spectral crosstalk of type ii superlattice bispectral infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(5): 293-295.
王忆锋, 余连杰, 田 莹. II类超晶格双光谱红外探测器光谱串音的量化分析计算[J]. *红外技术*, 2011, 33(5): 293-295.
- 28 Wang Xinde, Hu Wenjun, Shen Shouzheng. The effect of crosstalk on performances of InSb photovoltaic infrared detector linear array[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1982, 1(3): 203-208.
王新德, 胡文军, 沈寿珍. 串音对InSb 光伏型红外探测器列阵性能的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 1982, 1(3): 203-208.
- 29 Xu Xiangyan, Ye Zhenhua, Li Zhifeng, *et al.*. Numerical modeling of middle wavelength two-color photovoltaic HgCdTe detectors[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves* 2007, 26(3): 164-169.
徐向晏, 叶振华, 李志锋, 等. 中波双色光伏型HgCdTe 红外探测器模拟研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(3): 164-169.
- 30 Xu X, Hu Z, Hu X, *et al.*. The influence of surface channel on the crosstalk of HgCdTe photovoltaic arrays[C]. *SPIE*, 1989, 1107: 236-241.

- 31 Dhar V, Bhan R K, Ashokan R. Effect of built-in electric field on crosstalk in focal plane arrays using HgCdTe epilayers [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1998, 39(6): 353-367.
- 32 Coussa R A, Gallagher A M, Kosai K, *et al.*. Spectral crosstalk by radiative recombination in sequential mode, dual mid-wavelength infrared band HgCdTe detectors[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(6): 517-525.
- 33 Yuan H X, Tong F M. Investigation of surface-related electrical crosstalk in Hg_{1-x}Cd_xTe photodiode arrays[C]. *International Society for Optics and Photonics*, 1992, 1735: 101-108.
- 34 Cai Haijiao, Wei Jun, Li Xue. Research on jagged lagging shadow in push-broom imaging with linear sensor array[J]. *Semiconductor optoelectronics*, 2010, 31(2): 300-302.
蔡海蛟, 危峻, 李雪. 线列探测器推扫成像中的锯齿拖影研究[J]. *半导体光电*, 2010, 31(2): 300-302.
- 35 Tong Feiming, Yang Xiuzhen. Some consideration on HgCdTe multiple electrical crosstalk[J]. *Infrared Research*, 1984, 4: 365.
童斐明, 杨秀珍. 关于HgCdTe多元电学串音的一些考虑[J]. *红外研究*, 1984, 4: 365.
- 36 Xu Jiangtao, Sun Yu, Xu Chao, *et al.*. Electrical crosstalk and elimination for back-side illuminated pixel[J]. *China Science Paper*, 2013, (10): 964-968.
徐江涛, 孙羽, 徐超, 等. 背照式像素电学串扰及其抑制[J]. *中国科技论文*, 2013, (10): 964-968.
- 37 Ma Qingli, Tang Shibiao, Xu Shimin, *et al.*. Crosstalk in scintillating fiber array detector irradiated by high-energy X-ray [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(11): 1751-1754.
马庆力, 唐世彪, 许士敏, 等. 塑料闪烁光纤阵列成像探测器在高能X射线辐照下的串扰分析[J]. *光子学报*, 2011, 40(11): 1751-1754.
- 38 Bloom I, Nemirovsky Y. Quantum efficiency and crosstalk of an improved backside-illuminated indium antimonide focal-plane array[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1991, 38(8): 1792-1796.
- 39 Dong Gang, Yang Yintang. Crosstalk effects in mixed-signal CMOS IC[J]. *Semiconductor Technology*, 2002, 27(10): 34-37.
董刚, 杨银堂. CMOS混合信号集成电路中的串扰效应[J]. *半导体技术*, 2002, 27(10): 34-37.
- 40 Wang Chenggang, Sun Hao, Li Jingguo, *et al.*. Trends in two-color infrared focal plane detectors of MCT[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 367-371.
王成刚, 孙浩, 李敬国, 等. 双色碲镉汞红外焦平面探测器发展现状[J]. *激光与红外*, 2009, 39(4): 367-371.

栏目编辑: 苏岑