

文章编号: 1672-8785(2014)01-0001-08

论红外焦平面器件的串音

王忆锋 马 钰

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 红外探测系统通常需要将探测器密集排列以增加它们的分辨率。在焦平面阵列中, 当投射到某一特定探测器光敏面上的红外光子在另一个探测器中产生信号时, 这种现象称为串音。串音可能会影响焦平面阵列的分辨率性能。在高性能光伏阵列中, 串音的主要成分是光生载流子在焦平面阵列的相邻探测器之间的横向扩散。从基本概念入手, 介绍了相关串音研究的发展情况以及对串音问题的理解和体会。

关键词: 串音; 光电二极管; 红外探测器; 焦平面阵列; 红外成像系统

中图分类号: TN362 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.01.001

On the Crosstalk of Infrared Focal Plane Array

WANG Yi-feng, MA Yu

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Infrared detection systems usually need close-packed detectors in order to increase their spatial resolution. The crosstalk between individual elements in a focal plane array (FPA) occurs when the infrared photons incident on a particular detector's active area in the array generate signals in another detector. The resolution performance of a FPA may be limited by the crosstalk. The dominant form of the crosstalk occurring in a high performance photovoltaic array is associated with the photogenerated carriers diffusing laterally between adjacent elements within the FPA. Starting from basic concepts, the research progress and the understanding and comprehension of crosstalk are presented.

Key words: crosstalk; photodiode; infrared detector; focal plane array; infrared imaging system

0 引言

近年来, 红外焦平面阵列技术已经呈现出规格越来越大、像元中心距越来越小以及多光谱探测应用越来越多等发展趋势。基于 pn 结的光伏探测器是焦平面阵列器件的一种主要结构。简单地说, 串音是指本应在某一特定探测器中出现的 (光子或电子) 信号跑到另外一个探测器中的现象。在红外成像系统中, 串音会使图像的清晰度降低, 导致系统性能衰减^[1]。串音可以

分为光学串音和电学串音两类。本文从相关基本概念出发, 对红外探测系统的串音问题进行讨论和分析。

1 关于由衍射效应引起的光学串音

根据光量子理论, 光在传播过程中表现出波动的性质, 而在与物质发生相互作用时则具有粒子的性质, 即波粒二相性。光线聚焦后在焦平面阵列上所形成的不是一个理想的点, 而是呈现为一个环状的衍射光斑, 如图 1(a) 所示。衍

收稿日期: 2013-11-06

作者简介: 王忆锋 (1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

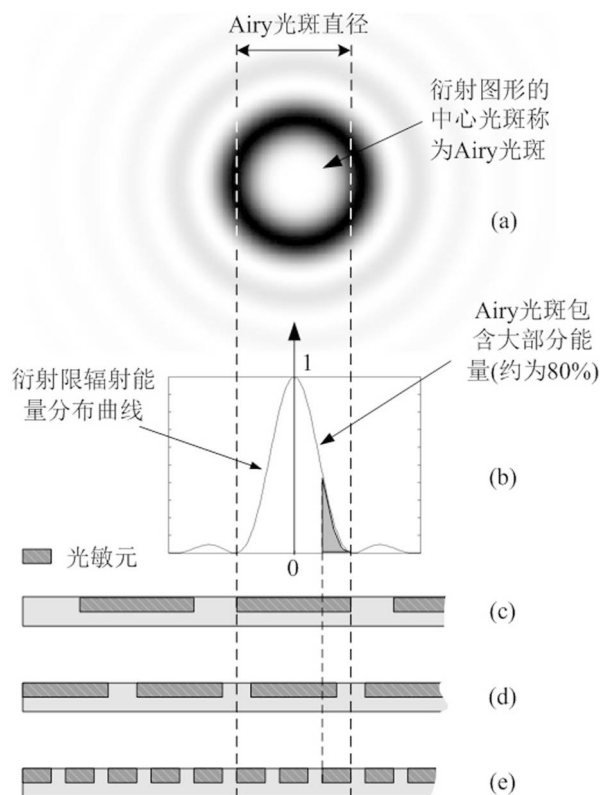


图1 由衍射效应引起的光学串音

射效应是由于光的波动本质和透镜的有限大小造成的。

衍射图形的中心光斑称为 Airy 光斑, 其能量分布曲线见图 1(b)。它包括大部分的辐射能量 (约为 80%; 极限条件下为 84%)^[2]。Airy 光斑的直径可按式 (1) 进行计算:

$$d_{diff} = 2.44\lambda_c(F/\#) \quad (1)$$

式中, $F/\#$ 为光学系统的 F 数; λ_c 为截止波长。设透镜为圆形, 则 $F/\#$ 的定义为

$$F/\# = \frac{F_o}{D_o} \quad (2)$$

式中, D_o 为透镜的直径; F_o 为焦距。一般说来, 系统性能越高, 光敏元和 $F/\#$ 就越小^[2]。根据工作波长的不同, 焦平面阵列可以分为短波红外 ($1 \sim 2.5 \mu\text{m}$)、中波红外 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 和长波红外 ($8 \sim 12 \mu\text{m}$) 器件等。由于受式 (1) 中截止波长项 λ_c 的影响, 长波红外系统受衍射的影响较为严重, 使设计难度变得更大^[3]。

除了光敏元之外, 焦平面阵列的探测器 (单元) 还有部分非光敏区 (又称为“死区”), 包括制

作过程中形成的芯片间距、芯片边缘的附属电路等。有时候, “死区”并未完全死掉。如果在制备过程中没有将其完全掩蔽住, 那么它就可能响应某些辐射, 从而引起模糊或者串音。文献 [4] 对由死区产生的串音进行了测量和讨论。光敏元与“死区”共同构成像元。两个像元中心之间的距离称为中心距。

通过比较 Airy 光斑与光敏元的相对大小, 可以判断是否出现了光学串音。若一个光敏元的面积大于 Airy 光斑, 则没有串音, 如图 1(c) 所示; 反之, 若 Airy 光斑的覆盖范围大于一个光敏元, 则光斑能量就会溢出到相邻光敏元, 形成光学串音, 使成像变得模糊^[2], 如图 1(e) 所示。从计算的角度来讲, 若将光敏元的尺寸映射成图 1(b) 所示的能量分布曲线, 通过数值积分就可以求出图 1(b) 中的阴影区域面积, 其在总面积中所占的比例即可反映出串音的大小。

假设某双色器件的两个响应范围分别为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 和 $\lambda_3 \sim \lambda_4$, 其理想情况下的光谱响应见图 2(a)。由于红外波段内各光谱段的间距较小, 实际上两条光谱响应曲线很有可能会出现交叉现象, 如图 2(b) 所示。其中的交叉阴影区域即为串音。首先求出两条光谱曲线的交叉面积^[5-6]。该交叉面积与其中一条光谱曲线的面积之比即为串音。具体的计算方法可以参见文献 [7]。如果两个光谱段的间距较大, 例如紫外/红外双波段器件^[8], 那么基本上就没有串音了。

从图 1 中可以看出, 如果中心距变小, 而且假定要消除光学串音, 那就意味着 Airy 光斑的直径也应该同步变小。要做到这一点, 根据式 (1), 只有使 $F/\#$ 变小, 并相应地让 D_o 变大, 即必须使用体积较大的光学系统。而由于受空间尺寸等因素的限制, 某些应用 (比如导弹红外导引头) 必须使用小型光学系统^[2]。换言之, 这些场合可能很难完全消除光学串音。事实上, 当 Airy 光斑的能量溢出不是很多时, 宁愿听之任之, 不作特殊处理^[3]。若 Airy 光斑比光敏元大, 则可采用插值、过采样等处理算法来提高精度^[2]。

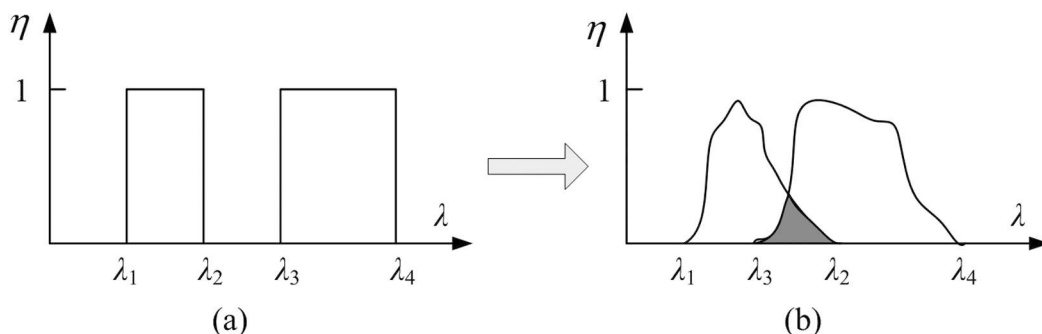


图 2 (a) 理想双光谱器件的光谱响应; (b) 实际双光谱器件的光谱响应 (阴影区域为串音)

除了衍射之外, 反射、折射和散射等光学现象也可能与光学串音有关^[1]。例如, 本应在一个光敏元上被吸收的光子被反射到另外一个光敏元上并被吸收, 此时其贡献便为串音。一般需要采用合适的镀膜手段来减少反射的影响^[9]。碲镉汞的反射损失量约为 30%。在所选的波段内, 通过采用合适的抗反射镀膜 (增透膜), 几乎可以消除反射损失^[10]。另外, 从直观上可以想像, 如果有某种结构能够使得光子进去之后便很难出来, 那么也就无需镀制一层抗反射膜。这种结构就是所谓的光子陷阱。据文献^[11]报道, 由周期性柱列阵形成的微结构表面具有光子陷阱的功效; 用该结构替代抗反射膜后, 光学串音略高, 但是总的电学串音显著降低。串音中的非线性部分称为光晕或模糊^[12]。文献^[13]研究了 InSb 焦平面阵列中的光晕效应。文献^[14]利用 Comsol 软件对光学串音进行了数值计算, 并研究了不同探测器的结构尺寸、温度和材料等参数对光学串音的影响。结果表明, 器件内部的衬底外延层厚度与器件外部的真空层对光串扰的影响最大。

2 关于电学串音

光子被半导体材料吸收后会形成光生载流子。当辐射源被撤掉以后, 由于半导体的内部作用, 光生载流子将会逐渐消失, 最后恢复至热平衡状态, 这一过程称为复合。根据电子和空穴所经历的状态, 光生载流子的复合过程可以分为直接复合和间接复合两种类型。一般情况下, 间接复合不能产生光子, 故又称为非辐射复合

^[15]。在直接复合过程中, 电子由导带直接跃迁到价带的空状态, 使电子和空穴成对消失。如果直接复合过程中同时发射光子, 则称为直接辐射复合, 或者称为光子循环^[16-18]、再吸收。光子循环中释放出来的光子能量大小等于跃迁前后两个能级差的能量; 如果该光子能量大于或者等于禁带宽度 E_g , 那么它又可以为输出信号贡献一个电荷。文献^[17-18]通过对载流子输运方程进行数值求解, 分析了碲镉汞器件的光子循环效应。重掺杂可使光子循环效应最小化^[16]。文献^[19]研究了顺序工作模式下的双色 (中波红外) 碲镉汞器件中由辐射复合引起的光谱串音, 并介绍了光谱串音实验及器件建模的结果。

电学串音对载流子扩散长度和吸收系数的依赖性很强, 但是对扩散速度的依赖性则非常弱^[20]。光生载流子可以从它们产生之处开始扩散至很远的距离。例如, 文献^[10]指出, 在中等或较低的载流子浓度下, 光生载流子在 p 型碲镉汞 ($x=0.2$) 中的扩散长度可达 $45\ \mu\text{m}$, 在 p 型碲镉汞 ($x=0.3$) 中的扩散长度可达 $100\ \mu\text{m}$ 。文献^[10]给出的另外一个数据是, 在中低浓度掺杂的 p 型碲镉汞中, 扩散长度在 $20 \sim 50\ \mu\text{m}$ 之间。另一方面, 在过去的二十多年里, 红外焦平面阵列的像元中心距从 $50\ \mu\text{m}$ 左右开始不断减小。 $12\ \mu\text{m}$ 中心距现已成为中波红外和长波红外探测器的标准, 而且还出现了中心距为 $10\ \mu\text{m}$ 甚至 $5\ \mu\text{m}$ 的器件^[21]。显然不管是哪一个数据, 光生载流子的扩散长度均已大于现有先进碲镉汞焦平面阵列的像元中心距。光生载流子的扩散方向是随机的, 它们朝相邻像元运动的概率很大^[22]。这就意味着如果不采取一些制约措施, 那

么就必然会有若干数量的光生载流子扩散到相邻像元。

碲镉汞的带隙 E_g 可以根据材料组分值 x 的不同在 $-0.3 \sim 1.605$ eV 之间变化。如果让组分值 x 呈现梯度变化, 那么由此形成的内建电场将会把光生载流子扫向表面。这可以相应地减少往其他方向扩散的光生载流子的数量, 从而明显减小串音^[23]。此外, 重掺杂可使光生载流子的扩散长度变得相对较小^[24]。事实上, 绝大多数的二极管中总有结的一边是重掺杂(用上标“+”表示重掺杂), 通常见到的是 p^+-n 结或 n^+-p 结。

在器件设计中, 一般是通过调节有关参数来控制或影响电学串音的^[12]。文献[1]指出, 光生载流子形成区域与采集 pn 结之间的距离是影响串音大小的主要因素; 由电信号给出的总串音中, 同时混杂着光学串音和电学串音。后者通常占据主导地位, 要将两者分离开来极为困难。文献[22]介绍了一种可将电学串音和光学串音区分开来的焦平面阵列结构。

高性能光伏器件中的串音主要是由于光生载流子扩散而产生的^[1], 其相关研究大体可以分为实验测试和仿真计算两个方面。求解(偏)微分形式的扩散方程是仿真计算中的重点。扩散方程有一维^[25-26]、二维^[20,27]和三维^[28-29]之分, 可以根据数值算法通过自编程序, 或者使用商用软件包完成^[1,14]。一维模型最为简单, 但是难以用来设计和优化复杂的多色器件^[30]。串音与焦平面阵列的具体构形、读出、信号引线以及放大器结构之间都有密切关系。紧挨像元四个最邻近部分的串音最大, 在对角线上的则小些^[31]。两个相邻像元之间的串音会随着中心距的增加而呈现指数减小^[4]。文献[32]研究了量子效率与像元之间的串音同器件的几何结构和材料参数之间的关系。文献[20]介绍了一个简化的二维模型, 用来计算液相外延生长过程中的组分梯度以及在碲镉汞外延层中出现的内建电场对背照式焦平面阵列器件串音的影响。计算结果预测, 串音不会随着电场的增加而单调减小。根据材料参数的不同, 零电场下的串音在 $1\% \sim 10\%$

之间变化。当电场在 $1 \sim 10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 之间变化时, 串音减小到可忽略不计的程度 ($<0.01\%$)。第二个最相邻二极管的串音要比第一个最相邻二极管的串音小一个数量级左右; 当电场更小时, 它趋近于零。中波红外器件的串音要比长波红外器件的串音略高。在大多数情况下, 即使是基于二维模型描述也是不充分的, 此时需要引入三维模型^[30]。文献[28]介绍了一个基于扩散-漂移的三维碲镉汞焦平面阵列器件模型, 其中用经过准直处理的红外辐射来计算串音。文献[29]介绍了一种三维模型的分析求解方法。与一维模型相比, 三维模型的预测结果较好。针对由于光生载流子扩散引起的串音问题, 需要根据非均匀边界条件求解三维扩散方程, 为此需要进行各种数学和几何近似^[33]。利用蒙特卡罗方法将扩散串音作为一个随机游动问题来加以处理, 可以避开求解扩散方程的难题^[23,33]。

对于探测器芯片与读出电路芯片之间的钢柱互连而言, 可能会出现以下两个问题^[2]: 第一, 钢会扩散到相邻像元, 使两者之间短路相联, 从而出现电学串音; 第二, 因热循环而使联接钢柱分离, 造成断路。短路或断路都有可能由于信号幅值出现异常而使像元被判为盲元。从这个角度来说, 降低串音需要提高互连工艺的可靠性和稳定性。

如果没有雪崩机制, 那么由于信号太弱, 一个光生载流子经过 pn 结时所产生的一个电子电荷是无法被读出的。电荷量必须累积到一定程度才能转换成可被读出的电信号。势阱就是这样一个电荷累积之处, 其累积过程就是所谓的积分。一般说来, 一个势阱每平方微米可以容纳 $10000 \sim 25000$ 个电荷^[2]。当势阱充满时就会出现饱和。此时, 电荷会溢出到相邻势阱而形成电学串音, 如图 3 所示。在接近饱和时, 串音现象已经变得很强烈了。过饱和也是串音的一种形式, 可以采用过饱和电路将过剩电荷从势阱中引导出去^[2]。

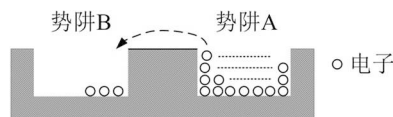


图 3 电子扩散到相邻势阱而引起电学串音

3 关于串音的抑制

串音的本质是“串接”或“交联”,因此简单地从概念上说,降低串音的途径就是阻断或隔绝其“串”起来的途径,即中断通道^[2];或者是在材料中形成阻止光生载流子越过的势垒^[16,34]。与势垒相伴的是势阱。异质结可以形成控制串音所需的势阱^[35]。文献[36]介绍了一种用分子束外延技术生长的 n^-P^+ (大写字母表示带隙较宽的材料;上标“-”表示轻掺杂)结构。由于吸收层具有完全的电学隔离,该结构具有非常低的串音^[36]。

基于等离子工艺的沟道刻蚀可以实现焦平面阵列各光敏元的电学隔离和光学隔离^[16]。沟道的典型尺寸如下:深度为 $10 \sim 15 \mu\text{m}$,宽度为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ ^[37]。纵横交错地刻出沟道之后,平面结实际上就变成了台面结,这一过程称为台面网格化^[34]。平面结也可以不通过刻出沟道来降低串音。具体方法是,围绕光敏面注入一圈材料而形成导电环^[23]。例如,通过在光敏元的间隔带中构建一个 n^+ 区域,就可以获得一个导电环^[38]。假定碰到导电环上的光生载流子无反射地被收集,这就意味着导电环必须理想接地。可以通过适当的金属化将导电环与衬底连接起来以实现接地。接地不理想也可能会引起串音^[33]。文献[39]指出,多元红外光导探测器的电学串音主要由像元间的接地电阻引起,其值与像元间接地电阻的阻值成正比,与偏置电阻的阻值成反比,且与原信号反相;在接地电阻一定时,可以通过提高偏置电阻来抑制电学串音。

即使没有刻蚀沟道,碲镉汞光伏器件表面上存在的电荷也可以在像元之间形成表面沟道。文献[40]计算和测试了载流子通过表面沟道扩散形成的电学串音。结果表明,表面沟道是影响碲镉汞光伏器件串音的重要因素之一。表面沟道越深,串音越大;而且串音会随着多数载流子浓度的增加而减小。文献[41]基于二极管表面沟道电流理论,研究了碲镉汞焦平面阵列器件中由表面沟道引入的电学串音。他们介绍了一个

电学串音的分析表达式。该表达式是一个关于反型层电荷密度、像元中心距、pn 结电阻-面积乘积以及表面电子迁移率的指数函数。另外,他们还计算和讨论了电学串音对一些相关器件参数例如正固定界面电荷密度等的依赖性。结果表明,通过对衬底表面电势进行良好控制以及对一些器件参数进行仔细选择,可以显著降低电学串音。

从理论上讲,碲镉汞的金属化将会形成一个肖特基接触,因此必须考虑通过一个电阻来实现导电环的接地^[23]。pn 结两侧的欧姆接触对焦平面阵列的性能有着重要影响,非欧姆接触也可以引起串音^[42]。据文献[43]报道,通过在减薄后的 InSb 衬底的背面引入十字形欧姆接触,可以在保持较高量子效率的同时显著减小串音。

基于衍射理论和光学与微电子技术发展起来的二元光学工艺具有微型化、阵列化和集成化等特点。利用二元光学工艺可以在每个像元上放置一个微透镜^[2]。文献[44]分析了在器件结构中引入微透镜后对光学串音和电学串音的影响情况。文献[45]研究了微透镜对于降低平面结碲镉汞焦平面阵列串音的效果,并提出了一种结构优化的快速近似设计方法。据文献[46]报道,他们利用微透镜将碲镉汞焦平面阵列的串音降到了小于 1% 的水平。

文献[47]介绍了一种用于双色器件的低串音行差分电路结构。为了处理顺序积分模式下双色焦平面阵列器件中的电学串音问题,文献[48]介绍了一种基于调节偏置电压的改进型直接注入电路结构。通过控制定时顺序,可以实现两个波段信号的轮流积分和同时读出。据文献[49]报道,他们利用多路传输过采样模数转换技术避免了与模拟多路传输和读出有关的大多数串音。

4 关于串音的测试

红外小光点系统是一种重要的串音检测设备,在使用前需要先确定光斑弥散圆的大小^[50]。

在小像元的情况下, 光斑尺寸对串音系数测量具有明显的影响。随着焦平面阵列像元中心距的逐渐减小, 传统小光点测试方法的光斑尺寸已接近甚至大于光敏元的尺寸, 因此需要采用新的测试理论和方法^[51]。文献[52]介绍了一种“光点偏移”方法, 以解决焦平面阵列的像元尺寸小于光斑尺寸时的串音测量问题。文献[51]分析了光斑在焦平面阵列上的典型分布情况, 研究了小像元情况下探测器单元的信号电荷及其相互关系, 建立了基于八邻域的小像元焦平面阵列串音测试的理论模型, 并将四邻域串音模型和传统串音模型作为八邻域串音模型的特例, 给出了相应的测试方法。串音与调制传递函数之间具有密切的联系。文献[52]从串音定义和传统测量方法出发, 分析了串音与调制传递函数之间的定量关系。他们指出, 在 Nyquist 频率处, 串音影响下的总体调制传递函数与无串音时的总体调制传递函数之间存在一个最大差值。他们据此得出了一种通过焦平面阵列的调制传递函数测试曲线计算串音大小的新的方法。

文献[53]介绍了一种基于伺服控制来精确测量串音的方法。该方法允许用光斑大小为 $1\ \mu\text{m}$ 的激光扫描探测器阵列, 同时光斑大小也不会发生漂移。假设有两个探测器 D_n 和 D_{n+1} 。用一个直径比 Airy 光斑还小的光束 (即所谓的小光点, 一般用激光) 扫描探测器 D_n 的光敏面, 测量 D_n 和 D_{n+1} 的输出信号 V_n 和 V_{n+1} 。在理想情况下, 与其相邻的探测器 D_{n+1} 的光敏面由于不受光照而不应有信号输出, 即 $V_{n+1}=0$; 若 $V_{n+1}\neq 0$, 则说明串入了来自 D_{n+1} 的信号, 即有串音存在。将两个相邻探测器之间的串音 C 定义为^[53]

$$C = \frac{V_n}{V_n + V_{n+1}} \quad (3)$$

文献[54]介绍了一种由激光源、扩束器、准直透镜和聚焦透镜等构成的串音测量系统。该系统通过测量一个光敏元与其相邻光敏元的相对响应来计算串音。文献[55]介绍了一个小光点扫描测试台。文献[56]介绍了一种基于网络的焦

平面阵列串音测试系统设计, 详细阐述了网络控制、精密位移、精确调焦、调整器件的最佳工作点以及降低系统噪声的原理及实现方法。

5 结束语

器件结构、外延层厚度、光生载流子扩散、接地或聚焦上的缺陷、入射辐射的多次反射以及读出电路和信号处理器上的各种电学缺陷均有可能引起串音。因此, 串音控制是一个复杂的涉及多个专业领域且集理论与实践于一体的综合性问题^[57]。为了减小串音, 需要通过实际测试或者仿真计算来仔细调节相关参数。另外, 串音基本上又是一个不可逆的问题, 即一旦串音过大, 便很难通过对既有器件进行局部修改来降低串音, 而只有将问题反馈到下一轮的流片工艺中加以处理。在理想情况下, 应在流片过程中选择具有代表性的工艺阶段, 进行不同层次的串音测试。这样做不仅有利于追溯和厘清串音产生的原因, 而且还有利于人们掌握工艺水平和控制器件质量。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Miller J L. Principles of Infrared Technology, A Practical Guide to the State of the Art [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [3] 杨宜禾, 岳敏, 周维真. 红外系统 (第二版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [4] 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.
- [5] Nedelcu A, Marcadet X, Huet O, et al. Spectral Cross-talk in Dual-band Quantum Well Infrared Detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(19): 191113.
- [6] Aifer E H, Tischler J G, Warner J H, et al. Dual Band LWIR/VLWIR Type-II Superlattice Photodiodes [C]. *SPIE*, 2005, **5783**: 112-122.
- [7] 王忆锋, 余连杰, 田紫. 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.

- [8] Ariyawansa G, Rinzan M B M, Alevli M, et al. GaN/AlGaIn Ultraviolet/Infrared Dual-band Detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(9): 091113.
- [9] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] Willardson R K, Beer A C. Semiconductors and Semimetals (Vol.18): Mercury Cadmium Telluride [M]. New York: Academic Press, 1981.
- [11] 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.
- [12] Baars J, Schulz M. Performance Characteristics, Measurement Procedures, and Figures of Merit for Infrared Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 1995, **2470**: 141–155.
- [13] Szafranek I, Amir O, Calahorra Z, et al. Blooming Effects in Indium Antimonide Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 1997, **3061**: 633–639.
- [14] 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): 2324–2330.
- [15] 孟庆巨, 刘海波, 孟庆辉. 半导体器件物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [16] Capper P, Garland J W. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications [M]. London: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [17] Jozwikowski K, Kopytko M, Rogalski A. Numerical Estimations of Carrier Generation-Recombination Processes and the Photon Recycling Effect in HgCdTe Heterostructure Photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, **41**(10): 2766–2744.
- [18] Jozwikowski K, Kopytko M, Rogalski A. Numerical Estimation of Carrier Generation-recombination Processes and Photon Recycling Effect in 3 μ m n-on-p HgCdTe Photodiodes [J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(6): 061003.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 王忆锋, 黄江平. 向高清化和数字化发展的红外成像系统 [J]. *红外*, 2013, **34**(2): 1–9.
- [22] Smith D S, Wimmers J T. Crosstalk in Closely-Spaced Indium Antimonide Detectors [C]. *SPIE*, 1988, **972**: 2–8.
- [23] Juravel Y, Strum A, Fenigstein A, et al. The Transition to II Generation HgCdTe FPA [C]. *SPIE* 1997, **3061**: 652–660.
- [24] Robert F P 著. 黄如, 王漪, 王金延, 等译. 韩汝琦校. 半导体器件基础 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [25] Sanders T J, Caraway E L, Hess G T, et al. Modeling and Test of Pixel Cross Talk in HgCdTe Focal Plane Arrays [C]. *SPIE* 2001, **4369**: 458–466.
- [26] Rosenfeld D, Garber V G, Bahir G. The Effects of Built-in Electric Field on the Performance of Compositionally Graded P-on-n HgCdTe Heterojunction Photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, **77**(2): 925–933.
- [27] Karp L, Musca C A, Dell J M, et al. Characterization of Crosstalk in HgCdTe n-on-p Photovoltaic Infrared Arrays [C]. *SPIE*, 2004, **5274**: 183–193.
- [28] Dai H, Sanders T J. Computation for Crosstalk Effects in p-on-n $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Heterojunction IRFPA Radiated by Using Uniformly Parallel Light [C]. *SPIE*, 2000, **4028**: 365–373.
- [29] Levy D, Schacham S E, Kidron I. Three-dimensional Analytical Simulation of Self- and Cross-responsivities of Photovoltaic Detector Arrays [J]. *IEEE Trans on Electronic Devices*, 1987, **34**(10): 2059–2070.
- [30] Sood A K, Egerton E J, Puri Y R, et al. Design and Development of Multicolor Detector Arrays [C]. *SPIE*, 2004, **5564**: 27–33.
- [31] Wimmers J. Indium Antimonide Detector Technology Development at Cincinnati Electronics Corporation [C]. *SPIE*, 1988, **930**: 125–138.
- [32] Keasler C A, Moresco M, D'Orsogna D, et al. 3D Numerical Analysis of As-diffused HgCdTe Planar Pixel Arrays [C]. *SPIE*, 2010, **7780**: 77800J.
- [33] Fastow R, Strum A. Monte Carlo Simulations of the Cross Talk in InSb Matrices [C]. *SPIE*, 1994, **2274**: 136–146.
- [34] Wehner J G A, Smith E P G, Radford W, et al. Crosstalk Modeling of Small-Pitch Two-Color HgCdTe Photodetectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, **41**(10): 2925–2927.

- [35] Cabanski W, Breiter R, Kocha R, et al. 3rd Gen Focal Plane Array IR Detection Modules at AIM [C]. *SPIE*, 2001, **4369**: 547–558.
- [36] Tung T. Infinite-melt Vertical Liquid-phase Epitaxy of HgCdTe from Hg Solution: Status and Prospects [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1990, **86**(1/4): 161–172.
- [37] Baylet J, Gravrand O, Laffosse E, et al. Study of the Pixel-pitch Reduction for HgCdTe Infrared Dual-band Detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, **33**(6): 690–700.
- [38] Ziegler J, Bruder M, Finck M, et al. Advanced Sensor Technologies for High Performance Infrared Detectors Original Research Article [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, **43**(3/5): 239–243.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Yuan H X, Tong F M. Investigation of Surface-related Electrical Crosstalk in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Photodiode Arrays [C]. *SPIE*, 1992, **1735**: 101–108.
- [42] Capper P. Narrow-gap II-VI Compounds for Optoelectronic and Electromagnetic Applications [M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [43] Bloom I, Nemirovsky Y. Quantum Efficiency and Crosstalk of an Improved Backside-illuminated Indium Antimonide Focal Plane Array [C]. *SPIE*, 1991, **1442**: 286–297.
- [44] Wilson J P, Reardon P J. Proposed Applications of Monolithic Microlens Array Technology to Enhance IR Detector Performance [C]. *SPIE*, 1994, **2269**: 348–355.
- [45] 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.
- [46] Li Y, Ye Z, Lin C, et al. Crosstalk Suppressing Design of GaAs Microlenses Integrated on HgCdTe Infrared Focal Plane Array [J]. *Opt Quant Electron*, 2013, **45**: 665–672.
- [47] Wyles R H, Fyre W H. Low-crosstalk Column Differencing Circuit Architecture for Integrated Two-color Focal Plane Arrays: US5751005 [P]. 1998–05–12.
- [48] Lu W, Ding R, Liu X, et al. 128×128 Dual-color ROIC with Electrical Crosstalk Resistant Design [C]. *SPIE*, 2010, **7658**: 76585Z.
- [49] Mandl W J. Focal Plane Analog-to-digital Conversion Development [C]. *SPIE*, 1995, **2474**: 63–71.
- [50] 王雅杰. 红外光斑弥散圆的检测 [J]. *激光与红外*, 1983, **5**(4): 46–49.
- [51] 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.
- [52] 应承平, 刘红元, 史学舜. “光点偏移法”测量红外焦平面阵列串音 [C]. 中国光学学会 2010 年光学大会论文集, 2010.
- [53] 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]. *激光与光电子进展*, 2011, **48**(4): 51–54.
- [54] Wang W W, Kwor R Y. Cross Talk in Characterization in Photodiode Detector Array using a 1μm Optical Scanning Spot Laser Beam [C]. *SPIE*, 1994, **2274**: 64–67.
- [55] Dang K V, Kauffman C L, Derzko Z I. Infrared Focal-plane Array Crosstalk Measurement [C]. *SPIE*, 1992, **1686**: 125–135.
- [56] Gravrand O, Desplanches J C, DelbEgue C, et al. Study of the Spatial Response of Reduced Pitch $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Dual-band Detector Arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(6): 1159–1165.
- [57] 应承平. 红外焦平面阵列串音测试技术研究 [J]. *计量技术*, 2006, **26**(2): 24–28.
- [58] Sun Y H, Zhang B, Yu M F, et al. Crosstalk of HgCdTe LWIR n-on-p Diode Arrays [J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, **30**(9): 094007.