

文章编号: 1002-2082(2007)05-0587-06

HgCdTe-IRFPA 成像器件光谱响应率标定 方法比较与误差分析

陶坤宇, 李福巍, 傅 森, 周彦平

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 红外焦平面成像器件的光谱响应率是天基红外遥感的基本物理指标。为了准确应用该项参数去除器件在制造工艺中的不均匀性对产品质量的影响, 必须在系统使用之前对其重新标定, 获取真实值。总结了目前较为普遍的 IRFPA 产品光谱响应率标定方法, 通过比较选择标准代替法对产品进行标定。根据所得到测量数据, 分析了其可能存在的误差, 总结了在对 IRFPA 产品进行标定时应注意的问题。同时提出了一种调整积分时间的方法, 以弥补有些波段标定黑体辐射功率过低带来误差过大的缺陷。

关键词: 红外焦平面成像器件; 光谱响应率; 标定方法; 误差来源

中图分类号: TN215-34

文献标志码: A

Error analysis and comparison of spectral responsivity calibration methods for HgCdTe-IRFPA imaging detector

TAO Kun-yu, LI Fu-wei, FU Sen, ZHOU Yan-ping

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institution of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The spectral responsivity of IRFPA imaging detector is a basic physical parameter for the space infrared remote sensing. In order to use this parameter to eliminate the influence of the non-uniformity on the product quality in the fabrication process, the spectral responsivity of detectors must be calibrated and the real value should be obtained before the systems are put into use. Because of the uncertainty of the calibration data-acquisition methods and the limitation of some calibration methods, the measured value is not accurate. Thus it is very important to select a proper method and to analyze its error. In this paper some methods for calibrating the spectral responsivity of IRFPA detectors were analyzed, and the limitations of the calibration methods available were investigated. The standard substitution method for the products was selected, and the possible errors were analyzed based on the obtained data. Some important issues in the calibration process of IRFPA products were summarized. An integration time adjustment method is put forward to overcome the big error caused by the low radiation rate of calibration blackbody in some wave bands.

Key words: IRFPA imaging detector; spectral responsivity; calibration method; error source

收稿日期: 2007-04-03; 修回日期: 2007-04-28

基金项目: 国家 863 项目 (2004AA5073)

作者简介: 陶坤宇 (1967—), 男, 湖北省应城人, 高级工程师, 在读博士, 主要从事光电探测与识别及空间目标的跟踪瞄准。

E-mail: 3times@sina.com.cn

引言

由于航天航空技术的飞速发展,红外探测器在人造卫星、红外制导、红外遥感、红外测温、红外成像等技术中获得了广泛的应用。红外焦平面成像产品是近些年来红外探测器发展的主要方向,与传统单元红外探测器相比,它具有灵敏度高、视场大、空间分辨力高、探测识别距离远、可直接成像等优点,能比较全面地满足军事应用上的各种需求,在诸如跟踪、识别、制导、火控、夜视、遥感和预警等领域都得到了广泛应用^[1]。特别是HgCdTe 红外焦平面成像产品,由于MCT 材料良好的优值性能(吸收系数 α 与热辐射 G 的比 α/G)和适应性以及稳定的晶格常数等优点,在中波和长波红外方面的应用得到了充分的发展。光谱响应率是红外焦平面成像器件的重要技术参数,它是指红外探测器受不同波长的光照射时,其响应率随波长变化的情况,是探测器的相对响应与入射波长的函数。要设计出合格的红外系统,必须精确了解所采用的红外探测器的光谱响应率,该参数的正确测试对于探测器的机理分析、工艺改进以及红外系统的整体设计有着重要的意义。然而,由于制造工艺的影响,红外焦平面成像器件存在严重的不一致性,制造出的产品更是存在明显的不均匀性叠加,使探测器的实际光谱响应率偏离理论计算得到的响应率,因此在产品使用之前必须对探测器的光谱响应率进行重新标定,获取真实值。鉴于目前标准对标定数据获取方法未作明确规定,以及有些测量方法存在的局限性,导致测量值的准确性受到影响。本文总结了器件光谱响应率标定方法,并选择标准代替法对产品进行了标定,得到了较为满意的结果,同时对可能存在的误差进行了分析,提出标定过程中应注意的事项。

1 红外成像器件光谱响应率的标定方法

由于成像器件光谱响应率的重要性,国内外均提出了一些标定方法,大致可归纳为4种:宽带滤光片法;标准替代法;直接比较法;傅里叶变换法。

1.1 宽带滤光片法

宽带滤光片法是早期应用的方法,它通过在已知红外源前面放置一个带有 N 个宽带滤光通道的滤光片转轮,使转轮旋转产生 N 种不同光谱的光线,并射入到被测探测器。测量来自探测器的 N 种不同输出信号 $\omega_n(n=1,2,\dots,N)$,然后将数据带入

公式^[2]:

$$\omega_n^s = C \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P(\lambda) \tau_n(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

以此求出必要的光谱信息 $S(\lambda)$ 。其中 $P(\lambda)$ 为光源的光谱能量; $\tau_n(\lambda)$ 为带宽形状函数,可以忽略其细节;由于求得的是相对光谱响应,故常数 C 可以忽略掉。

当采用透镜滤波器时,带宽应尽量大,使之可以覆盖多个波长范围。但是,由于 $\tau_n(\lambda)$ 的不确定性和测量值 ω_n^s 存在误差,这种方法目前很少使用。

1.2 标准代替法

与宽带滤光片法相比较,该方法需要标准探测器作为参考,这在一定程度上减少了环境和背景的影响,提高了标定精度。其原理如图1所示^[3]。

1) 首先将一个光谱响应已知的标准探测器放置在单色仪出射狭缝处(如图1中虚线所示),当波长为 λ 的单色光辐照时,标准探测器的输出值为

$$V_n(\lambda) = K_1 \cdot E_0(\lambda) \cdot S_n(\lambda) \quad (2)$$

式中: $S_n(\lambda)$ 为标准探测器的相对光谱响应; K_1 为系数。根据标准探测器的输出信号就可以计算出单色仪的辐射辐照度 $E_0(\lambda)$;

2) 将被测探测器放在出射狭缝处,由数据采集系统测出每个波长点的输出值:

$$V_t(\lambda) = K_2 \cdot E_0(\lambda) \cdot S_t(\lambda) \quad (3)$$

式中: $S_t(\lambda)$ 为被测探测器的相对光谱响应; K_2 为常系数。

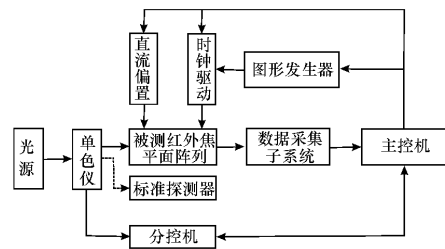


图1 标准代替法标定系统结构的原理图

Fig. 1 Structure of calibration system using standard substitution method

3) 将上面2式相除,可求得被测探测器的相对光谱响应为

$$S_t(\lambda) = K \cdot \frac{V_t(\lambda)}{V_n(\lambda)} \cdot S_n(\lambda) \quad (4)$$

4) 利用软件采集每个像元在各个波长的输出信号,计算出它的相对光谱响应,并绘制出相应的图形曲线。根据曲线情况可以很直观地判断出焦平

面上无效像元,在剔除这些像元后,将所有选定像元的测量结果进行平均,得到被测器件的相对光谱响应。

1.3 直接比较法

直接比较法的原理与标准代替法基本相同,其区别在于直接比较法是将参考探测器(即标准代替法中的标准探测器)始终放置于标定系统中,不需要反复拆卸,但要求参考探测器和前置放大器的稳定度高。数据采集系统采集 2 路信号之后,直接由计算机处理,得到被测探测器的相对光谱响应率。

1.4 傅里叶变换法

该方法采用傅里叶变换红外光谱仪及辅助检测平台,其光谱范围、扫描速度、波长精度、信噪比、线性度均优于由单色仪或光栅型分光计组成的光谱响应检测装置,而且能有效地消除背景光谱的影响,检测方便,速度快,其工作原理如图 2 所示^[4]。

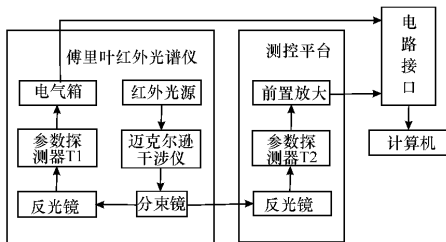


图2 傅里叶变换法标定系统结构的原理图

Fig. 2 Structure of calibration system using the Fourier transform method

1) 根据光的干涉叠加原理,被测探测器 T2 接收到的辐射通量为

$$E_2 \propto B_2 \cos^2(\pi\nu\Delta) = B_2 + B_2 \cos(2\pi\nu\Delta) \quad (5)$$

式中: B_2 为光源照射到 T2 上的光亮度; Δ 为 M1 和 M2 反射到 T2 上 2 束相干光的光程差; ν 为波数; λ 为波长。

红外探测器 T2 接收的全光谱范围内的总辐射通量为

$$E_2(\Delta) \propto \int B_2(\nu) \cos(2\pi\nu\Delta) d\nu \quad (6)$$

$E_2(\Delta)$ 是光源光谱分布 $B_2(\nu)$ 的傅里叶余弦变换,根据傅里叶余弦变换可逆原理可得

$$B_2(\nu) \propto \int E_2(\Delta) \cos(2\pi\nu\Delta) d\Delta \quad (7)$$

$B_2(\nu)$ 是红外探测器 T2 对光源光谱响应的 $B_2(\nu) \sim \nu$ 曲线,即红外探测器 T2 的相对光谱响应曲线。

2) 测试系统中参考探测器 T1 与被测红外探

测器 T2 的光路是完全对称的,于是,有:

$$B_1(\nu) \propto \int E_1(\Delta) \cos(2\pi\nu\Delta) d\Delta \quad (8)$$

$B_1(\nu)$ 是参考探测器 T1 的相对光谱响应曲线。

3) 由于光源 D 发射的红外光符合光谱分布 $B(\nu)$,分束器和反光镜等光学器件对红外光的光谱响应存在传递函数 $I(\nu)$ 。因此,用上述方法得到的 $B_2(\nu)$ 必然是红外探测器 T2 实际光谱响应 $T2(\nu)$ 与背景光谱 $B(\nu)$ 及 $I(\nu)$ 叠加在一起产生的结果,所有的外部因素对实际光谱响应 $T2(\nu)$ 的影响都可看成是器件对不同波长红外光的吸收及反射。测试系统检测到的红外探测器 T2 对光源光谱响应的 $B(\nu) \sim \nu$ 曲线应该是实际光谱响应 $T2(\nu)$ 与 $B(\nu)$ 及 $I(\nu)$ 的乘积,即 $B_2(\nu) = T_2(\nu) \times B(\nu) \times I(\nu)$,因此,测试系统采用同时检测参考探测器的光谱响应可消除背景光谱的影响。由于 T1 和 T2 具有相同的光源和光路,对于参考探测器 T1 可以得到: $B_1(\nu) = T_1(\nu) \times B(\nu) \times I(\nu)$,2 式相除可得红外探测器 T2 的实际光谱响应为

$$T_2(\nu) = [B_2(\nu) / B_1(\nu)] \times T_1(\nu) \quad (9)$$

4) 由上述分析可见,只要在所需光谱范围内采用光谱响应曲线 $T_1(\nu) \sim \nu$ 已知的探测器作为测试系统的参考探测器,利用上述方法即可获得被测探测器的光谱响应曲线 $T_2(\nu) \sim \nu$ 。

2 标定方法的选择及标定数据

通过对以上 4 种标定方法的分析,可以得到:

1) 宽带滤光片法简单易行,且不需要参考探测器,但测量精度较低,系统引入误差较大;

2) 通过与参考探测器比较,标准替代法和直接比较法消除了部分系统误差,使测量准确度提高,但两者都需要系统的光谱具有高度稳定性,即光源的高度稳定、单色仪波长驱动的高精度和高重复性,直接比较法还需要参考探测器和前置放大器具有高稳定度;

3) 傅里叶变换法利用傅里叶光谱仪直接测量,具有灵敏度高,速度快和操作简单等优点,同时还能有效地消除背景光谱的影响,但它需要一个已知分光比谱曲线的分束镜,而且测量结果中包含了标准探测器的幅频特性,影响了测量准确度。

由于目前黑体控温精度能达到很高^[5-6],可获得较高稳定度的光源,采用标准代替法简洁方便,精度可以满足系统设计的要求,因此,采用标准代替法进行标定。

标定试验:

1) 被标定器件:法国 SOFRADIR 公司的 HgCdTe 红外焦平面成像产品,工作波段:3 500 nm~4 800 nm;

2) 标定环境:稳定的室温实验室,非真空环境,充氮气消除空气吸收效应;

3) 标定方法:采用标准代替法,除去相机镜头,电子放大倍数 $\alpha=1$,测试波长为 2 000 nm~5 000 nm;波长步进为 50 nm;

4) 标定主要设备:采用近黑体辐射光源(1 200 C 辐射功率谱曲线如图3 所示)和 DM320 单色仪;

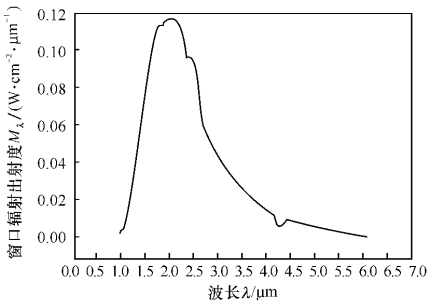


图3 黑体源辐射度曲线

Fig. 3 Curve of the radiant intensity of blackbody

5) 标定依据文件:GB/T13584-92 红外探测器参数测试方法;GB/T17444-1998 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范。

得到的光谱相应率曲线如图4 所示。该响应曲线与理论值接近,经多次测量,数值稳定。为了比较,下面列出采用不适当的数据获取方式对产品定标得到的结果,如图5 所示。其标定依据与上面的方法一致,采用单色仪 OL750-MS,入射狭缝 2.5 mm,出射狭缝 1.25 mm;斩波频率 430 Hz;积分时间 1 024 μ s;100 帧信号平均。其不同之处在于该信号获取方法是视频采集。可以看出两者结果大相径庭,其根本原因在于信号获取的方法不合理。2 种方法标定的信号流程见图6 所示。

从电信号传递的量化过程看,这种方法增加了视频转化过程,其过程包含以下内容:分辨率(从 14bit 的分辨率降为 8bit);8bitPAL 视频转换;亮度/对比度调节;视频全电视信号。电视信号的处理和电路中亮度/对比度调节预设值会对本底产生极大的影响,特别是在辐射源辐射功率较低的频段,这种影响更是决定性的。因此,这种不适当的标定

方法得到的结果中就出现了不可接受的误差,标定方法中应该摒弃视频采集方法。

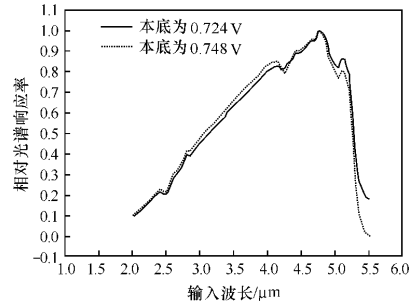


图4 测得的光谱响应率曲线

Fig. 4 Curves of measured spectral responsivity

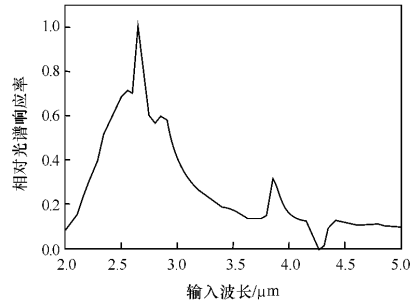


图5 方法不适当的标定结果

Fig. 5 Calibration result obtained by improper method

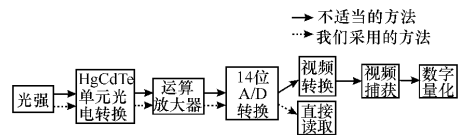


图6 2 种不同数据获取过程的比较

Fig. 6 Comparison between the data-acquisition processes of the two different methods

3 误差分析

3.1 电子学器件引起的误差

3.1.1 放大器

红外焦平面探测器的输出信号一般很微弱,因此想有效地使用这种信号进行后续处理,必须通过放大电路对信号进行放大。放大电路对探测器性能的充分发挥有非常重要的作用。但由于放大器和放大电路本身的性质,也给测量系统的精确测量带来一定的误差。

3.1.2 数据采集设备

对于制作完成的红外焦平面阵列探测器, 需要根据国家标准计算其各项性能指标, 这就需要将红外焦平面阵列探测器接收辐射后产生的信号电压采集并传输到计算机中, 以便于后续的数据处理。由于这种从模拟信号到数字信号的转变必然引入一定的误差量, 影响测量的准确性。主要的误差有:

- 1) 采样误差: 即采样过程中动态数据变化的不确定性所造成的采样数据点的幅值与时间误差;
- 2) 量化误差: 它受系统分辨率的影响, 存在于任何数字测量系统中。测量值的二进制数字的位数越多, 量化误差就越小;
- 3) 非线性误差: 它与模拟量到数字量的量化过程有关。量化误差和数据采集系统有效测量值范围与代表测量值的二进制数的结果成正比(等于相邻测量值间隔的1/2)。在实际测量设备中, 离散的各值之间并不总是相同的, 这就造成了非线性误差。非线性误差非常难于校正, 因为它要求对高精度信号源进行多次测量才能完成;
- 4) 混叠误差: 根据奈奎斯特采样定理, 在理想的采样数据系统中, 数据带宽的每次循环要求最少2次采样, 这样恢复的被采样信号才不会丢失信息。因此, 确定系统采样率时首先要考虑的就是混叠误差, 也就是每次循环中信号频率的采样数量不足所造成的信息丢失。

3.2 积分时间引起的误差

积分时间是指像元积累辐射信号产生电荷的时间。不同积分时间的选取对探测器的性能有很大的影响。因此, 在对红外探测器进行光谱响应测试时, 如果积分时间选取的不适合, 也可能给测量带来误差^[7]。

3.2.1 积分时间对输出信号V的影响

在红外焦平面探测器的线性工作范围内, 随着积分时间增加, 红外焦平面探测器的输出信号线性增大。

3.2.2 积分时间对瞬态噪声的影响

瞬态噪声是指光子噪声、暗电流噪声及读出噪声之和。对于红外焦平面阵列而言, 由于它们使用的是开关积分器电路, 所以带宽应为开关积分器的带宽 $\Delta f = 1/(2t_{\text{int}})$ 。可见, 随着积分时间的增加, 带宽变小, 瞬态噪声降低。另一方面, 积分时间的延长也会使诸如光子噪声和探测器噪声等积分噪声呈增加趋势。积分时间对瞬态噪声的影响取决于积分噪声在红外焦平面探测器总噪声中所占的比例。

3.2.3 积分时间对探测率 D^* 的影响

红外焦平面探测器的探测率 D^* 是指将响应率与均方根噪声电压之比折算到单位带宽与单位像元面积之积所得的均方根值。使用单像元探测器时, 考虑探测器的积分噪声和非积分噪声的影响, 探测率的计算公式为

$$D^* = \frac{I_D K}{C_{f_b} q_e} \sqrt{\frac{A_D \cdot t_{\text{int}}}{2 \cdot [V_{\text{NI}}^2(t_{\text{int}}) + V_{\text{NNI}}^2]}} \quad (10)$$

从上式中可以看出, 延长积分时间可以提高探测率, 但它们之间的关系并不是线性关系。

3.3 空气介质引起的误差

空气中有些介质对标定会产生较大的影响, 特别是在标准辐射体辐射功率较低的谱段, 这种影响更可观。如在标定的谱段中, $4.3 \mu\text{m}$ 是二氧化碳的一个关键吸收点, 同时辐射体的辐射功率在此频率处也比较低, 因此曲线明显存在由于空气中气体吸收导致辐射体功率出现传输凹点。

3.4 工作电压引起的误差

工作电压对焦平面探测器性能的影响主要有2个方面: 一方面是工作电压的大小, 当提高工作电压时, 有利于焦平面探测器的满阱容量增加, 从而增大了动态范围。但这种做法将使系统功耗增大, 脉冲幅值增加, 时钟干扰加大, 从而造成噪声增加^[9]。另一方面是工作电压的稳定性, 如在测量过程中电压变化较大, 将带来较大的噪声。

4 结 论

4.1 标定过程中应该注意的问题

HgCdTe 红外焦平面成像产品光谱响应率的标定不同于单独的探测器的标定, 它应该是包含探测器、信号放大器、信号采集、信号传输的一个完整体系。因此, 必须考虑标定过程中辐射黑体开始的光强度谱、焦平面器件积分时间、信号处理系统、空气介质吸收等环节可能引入的误差, 这样才能得到正确的产品光谱响应率。对于积分时间的选取, 应认真考虑, 并根据多次的比较选择出最为合适的值。对于空气介质的影响, 在标定过程中必须避开气体影响的波段, 也可以采用真空环境标定, 或充入稳定的无吸收性气体来克服。

4.2 低辐射功率时的解决方法

一般红外探测器的积分时间都有较宽的调节范围, 可以通过调节它适当提高探测器的响应。但是必须考虑随之带来的噪声, 以及整体数据处理时的衔接问题。

参考文献:

- [1] 范纪红,侯西旗,杨照金,等. 红外探测器光谱响应度测试技术研究[J]. 应用光学. 2006,27(5):460-462.
FAN Ji-hong, HOU Xi-qi, YANG Zhao-jin, et al. Measurement technology for spectral responsivity of infrared detector [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5):460-462. (in Chinese)
- [2] RASTELLO M L, PREMOLI A, BONICATTO G. Regularized broadband filter method for spectral responsivity measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 22-29.
- [3] 费丰. 红外焦平面阵列相对光谱响应测试系统[J]. 新技术新仪器. 2002, 22(6):26-30.
FEI Feng. Relative spectral responsibility testing system of infrared focal plane array[J]. 2002, 22(6): 26-30. (in Chinese)
- [4] 顾维新,曹新平. 红外探测器光谱响应测量系统[J]. 红外. 2002,10:24-27.
GU Wei-xin, CAO Xin-ping. Spectral responsivity measuring system of infrared detector[J]. Infrared, 2002,10:24-27. (in Chinese)
- [5] BAKUMENKO V L, BEGUCHEV V P, BRJUHOV A S, et al. Methods of measuring of relative spectral responsivity of exemplary detector[J]. SPIE, 2005, 5834: 355-358.
- [6] 胡铁力,李旭东,傅建明,等. 红外热像仪参数的双黑体测量装置[J]. 应用光学. 2006, 27(3):246-249.
HU Tie-li, LI Xu-dong, FU Jian-ming, et al. Double-blackbody unit for measuring parameters of infrared cameras [J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(3):246-249. (in Chinese)
- [7] 王巍,龚启兵,林磊,等. 积分时间和工作电压对焦平面探测器性能的影响[J]. 航空兵器. 2006(2):35-37.
WANG Wei, GONG Qi-bing, LIN Lei, et al. The influence of integration time and power supply on the performance of IRFPA [J]. Aero Weaponry. 2006 (2):35-37. (in Chinese)
- [8] 占春连,李燕梅,刘建平,等. 红外探测器光谱响应的均匀性及直线型测试研究[J]. 应用光学,2004, 25(6):34-37.
ZHAN Chun-lian, LI Yan-mei, LIU Jian-ping, et al. The uniformity and linearity of infrared spectral response of detector[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(6):34-37. (in Chinese)
- [9] CAMPOS J, CORRONS A, PONS A, et al. Spectral responsivity uncertainty of silicon photodiodes due to calibration spectral bandwidth [J]. Measurement Science and Technology. 2001, 12(11):1926-1931.
- [10] THEOCHAROUS E. On the stability of the spectral responsivity of cryogenically cooled photoconductive HgCdTe infrared detectors [J]. Infrared Physics and Technology. 2006, 48(3): 175-180.

美国罗切斯特大学演示新型 nBn 红外探测器

美国纽约罗切斯特大学的研究人员演示了一种新型 nBn 中波红外探测器。与 PN 光电二极管相比,其暗电流更小,而工作温度更高。顾名思义,这种器件在 2 个 N 型半导体层中间夹着一个阻挡层。阻挡层降低了暗电流,钝化或保护了器件的激活层。

罗切斯特大学的研究人员采用分子束外延工艺,首先沉积 1 层 $3\ \mu\text{m}$ 厚的 N 型掺杂 InAs 层作为半导体层,接着沉积一层 $100\ \text{nm}$ 厚的 AlAsSb 阻挡层,再沉积 1 层几十纳米厚的接触层。研究人员利用萨姆·费雪科学公司的扫描傅里叶变换红外探测器测量了面积为 $100\ \mu\text{m}^2$ 的探测器的光谱响应度。当冷却到 $230\ \text{K}$ 以下时,器件的暗电流低于 $295\ \text{K}$ 室内背景下所产生的光电流。研究人员称,这个温度至少要比现有商用 InAs 光电二极管相同的温度点高 $100\ \text{K}$ 。

探测器必须冷却到大约 $200\ \text{K}$ 。为了增强技术的竞争力,制冷器必须是便宜的、可靠而高效的。研究人员正在开发波长更短和更长的器件,但是焦平面阵列和探测器的材料可能不是 InAs。未来的工作将会按照 nBn 概念开发采用不同材料和结构的器件。