

HgCdTe 红外焦平面阵列像素内灵敏度函数仿真

钟 篱^{1,3}, 苏晓锋¹, 胡伟达¹, 陈凡胜^{1,2*}

(1. 中国科学院智能红外感知重点实验室 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州, 310024;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对于 $F\lambda/d < 2$ 的欠采样成像红外搜索和追踪系统, 点目标能量集中在单像素内。由于焦平面阵列像素内灵敏度 (IPS: Intra-Pixel Sensitivity) 存在空间非均匀性, 会降低目标的能量和质心测量精度。传统的光点扫描实验测试和数值仿真方法可有效表征和分析 IPS, 但系统和模型复杂度高、效率低, 且实验测试无法分析 IPS 空间非均匀性与探测器参数的关系。针对上述问题, 提出基于蒙特卡洛方法的 HgCdTe 红外焦平面阵列 IPS 仿真模型, 分析了 IPS 空间非均匀性的影响因素。结果表明, 减小像素中心距或增大吸收层厚度, IPS 的空间非均匀性减小; 随波长增大, IPS 的空间非均匀性增大。该仿真和分析对高能量集中点目标测量精度的提升具有重要参考意义。

关键词: 像素内灵敏度; HgCdTe; 红外焦平面阵列; 非均匀性; 蒙特卡洛方法

中图分类号: TP732.2

文献标识码: A

The simulation of intra-pixel sensitivity for HgCdTe infrared focal plane array

ZHONG Li^{1,3}, SU Xiao-Feng¹, HU Wei-Da¹, CHEN Fan-Sheng^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the under-sampled imaging infrared search and tracking system which $F\lambda/d < 2$, the energy of point target was concentrated on a single pixel. Due to the spatial non-uniformity of intra-pixel sensitivity (IPS) for focal plane array, the calculation accuracy of energy and centroid for point target would be reduced. Light spot scanning test and numerical simulation could effectively characterize and analyze the IPS, but the system and model were highly complex and time-consuming, moreover, experimental tests couldn't analyze the relationship between the spatial non-uniformity of the IPS and the parameters of photo-detector. Aimed at the above problem, Monte Carlo methods were used to simulate the IPS of HgCdTe infrared focal plane array, and the influencing factors of its spatial non-uniformity were analyzed. The results showed that the spatial non-uniformity of IPS can be reduced by reducing the pixel pitch or increasing the thickness of absorber. With the increase in wavelength, the spatial non-uniformity of IPS increased slightly. The results of simulation and analysis are of great significance for improving the measurement accuracy of high energy concentration point target.

Key words: intra-pixel sensitivity, HgCdTe, infrared focal plane array, non-uniformity, Monte Carlo Method

引言

红外搜索和追踪系统主要用于弱小点目标的

搜索、探测和追踪, 系统的 $F\lambda/d$ (F 是光学系统的 $F\#$, λ 是波长, d 是像素中心距) 通常小于 2。因此,

收稿日期: 2020-12-22, 修回日期: 2021-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61975222)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61975222)

作者简介 (Biography): 钟篱 (1995—), 男, 湖南邵阳人, 在读博士生, 主要研究领域为红外高精度量化探测。E-mail: zhongli@mail.sitp.ac.cn

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

Received date: 2020-12-22, Revised date: 2021-07-22

对点目标是欠采样成像,能量集中在单像素内。此外,红外焦平面阵列的IPS存在空间非均匀性,当点目标在单像素内不同空间位置成像时,响应信号具有较大差异,会降低目标的能量和质心计算精度^[1]。

IPS的表征和分析对高能量集中点目标测量精度的提升具有重要意义^[2-4],主要包括实验测试和模型仿真方法。传统的方法,普遍使用光点扫描法对焦平面阵列的单像素进行实验测试,可以直接表征IPS^[5-11]。但是该方法对光学系统像差以及对准精度等要求极高,且扫描过程十分耗时。为此,Ketchazo C等人提出平面波照射连续自成像光栅(CSIG)的测试方法,可表征焦平面阵列的平均IPS^[12-13],但是系统结构过于复杂。此外,实验测试的方法无法从探测器结构层面进行IPS分析,需要建立合理的IPS仿真模型,为实际探测器设计中的IPS非均匀性优化提供指导。基于半导体物理模型的数值仿真方法具有较好的可靠性和完整性,广泛应用于红外探测器建模仿真领域,可以计算焦平面阵列的像素间串扰、光谱响应、探测器MTF和高斯光斑点扫描曲线等参数^[14-17]。但是该方法的建模过程非常复杂,仿真时间长、效率低,且相应的商业软件价格高昂。因此,有学者提出基于蒙特卡洛方法对焦平面阵列光子吸收和少数载流子扩散过程建模,也可用于像素间串扰和像素内局部量子效率等光电特性仿真^[18-21]。但是,当前的仿真研究主要侧重于探测器像素间串扰分析,没有对IPS非均匀性的影响因素进行深入的分析。

本文基于蒙特卡洛方法,对长波HgCdTe红外焦平面阵列的IPS进行仿真分析。结果表明,蒙特卡洛方法仿真的IPS曲线与实验测试结果以及数值仿真结果相符,验证了该方法的可靠性。此外,焦平面阵列结构参数和波长对IPS存在影响,减小像素中心距或增大吸收层厚度,IPS的空间非均匀性减小,随波长增大,IPS的空间非均匀性增大。因

此,可对焦平面阵列结构进行优化,降低IPS非均匀性,另外,在实际探测中可考虑目标波长对IPS非均匀性的影响,以实现高能量集中点目标的高精度测量。

1 模型和方法

1.1 结构和参数

本文研究的长波HgCdTe红外焦平面阵列的参数和结构参考Vishnyakov等人的实验结果,具体如图1所示^[14,23-24]。探测器类型为 $n^+ - on - p$ 类型探测器,填充因子为100%,像素尺寸和像素中心距为 $d=30\mu\text{m}$;吸收层的材料为 p 型掺杂 $\text{Hg}_{0.775}\text{Cd}_{0.225}\text{Te}$,受主掺杂浓度 $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,厚度 $t=10\mu\text{m}$ 。 n 型掺杂注入区域厚度 $r=3\mu\text{m}$,宽度 $l=15\mu\text{m}$ 。探测器截止波长 λ_c 约为 $10\mu\text{m}$,少数载流子扩散长度 $L_d=24\mu\text{m}$,工作温度为77 K。

1.2 蒙特卡洛仿真方法

蒙特卡洛方法是一种随机概率模型,可对HgCdTe红外焦平面阵列的光生少数载流子的产生、扩散和复合过程进行仿真。考虑仿真精度和效率,选择的仿真光子数量为 $N_{ph} = 50000$ 。具体的仿真流程如图2所示,光子入射到焦平面阵列的 (x, y) 位置,对每个光子执行光子吸收模型和少数载流子扩散模型仿真,统计阵列上各个像素收集的载流子数量得到仿真结果^[19-20]。对于IPS仿真,在焦平面阵列上取不同入射位置点进行仿真,得到目标像素响应随入射点位置的变化曲线,归一化处理后得到IPS。

对于光子吸收模型,光生载流子产生的位置 (x, y) 为光子入射位置的坐标值, z 通过均值为 L_{ph} 的指数随机数产生,其概率密度分布函数如式(1)所示。 L_{ph} 为光学吸收长度,通过式(2)~(5)计算^[22]。执行光子吸收模型仿真后,判断 z 是否大于吸收层厚度 t ,如果是,说明光子未被焦平面阵列吸收;否则,说明光子被吸收并产生光生少数载流子,继续

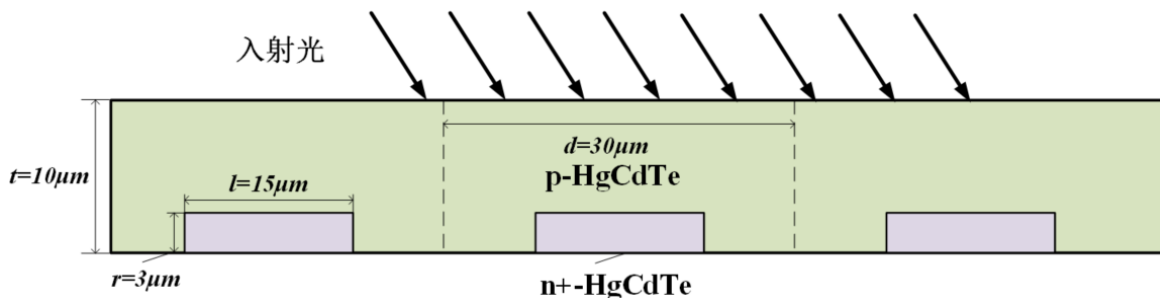


图1 HgCdTe红外焦平面阵列结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HgCdTe infrared focal plane array

执行后续扩散模型仿真。

$$f(z) = \frac{1}{L_{ph}} \exp\left(-\frac{z}{L_{ph}}\right), \quad (1)$$

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

$$\alpha_g = -65 + 1.88T + (8694 - 10.31T)k, \quad (3)$$

$$\beta = -1 + 0.083T + (21 - 0.13T)k, \quad (4)$$

$$L_{ph} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_g \exp\left(\sqrt{\beta(E' - E_g)}\right)}, \quad (5)$$

式中, k 为探测器 Cd 组分, T 为工作温度(K), E' 是光子能量(eV), E_g 是能带隙(eV)。

光生少数载流子在吸收层进行随机扩散运动, 直到复合或被 n 区收集。采用随机迭代模型仿真载流子运动, 迭代总数量 N_s 通过均值为 M_s 的指数随机数产生, 其概率密度分布函数如式(6)所示。其中, M_s 通过少数载流子扩散长度 L_d 和迭代步长 h_s 计算, 如式(7)所示^[20]。少数载流子每次迭代时, 3 个方向的位移偏移量取区间 $[-h_s, h_s]$ 内的均匀随机值, 移动到位置 (x', y', z') 。如果该位置属于阵列某个像素的 n 区, 说明载流子被收集, 对应像素的载流子数量

加 1; 否则, 再判断当前迭代次数是否小于 N_s , 如果是继续迭代, 反之, 说明载流子复合。当 N_{ph} 个光子都仿真完成, 统计阵列每个像素收集的载流子数量得到仿真结果。

$$f(N_s) = \frac{1}{M_s} \exp\left(-\frac{N_s}{M_s}\right), \quad (6)$$

$$M_s = 6 \cdot \left(\frac{L_d}{h_s}\right)^2. \quad (7)$$

2 结果和讨论

2.1 IPS 仿真结果

采用文献[23]和[24]的 HgCdTe 红外焦平面阵列结构参数进行仿真, 具体的探测器结构如图 1 所示。使用蒙特卡洛方法和数值方法仿真 IPS, 并与文献中实验测试结果对比如图 3 所示。可以看到, 蒙特卡洛方法与数值方法仿真的 IPS 曲线几乎重合, 与实验测试的 IPS 曲线十分接近, 验证了蒙特卡洛方法仿真的可靠性。同时, IPS 不是理想的矩形函数, 存在空间非均匀性, 相对于像素中心位置, 像素边缘处灵敏度降低。此外, 当理想点源照射到相邻像素时, 中心像素也存在响应, 主要原因是焦平

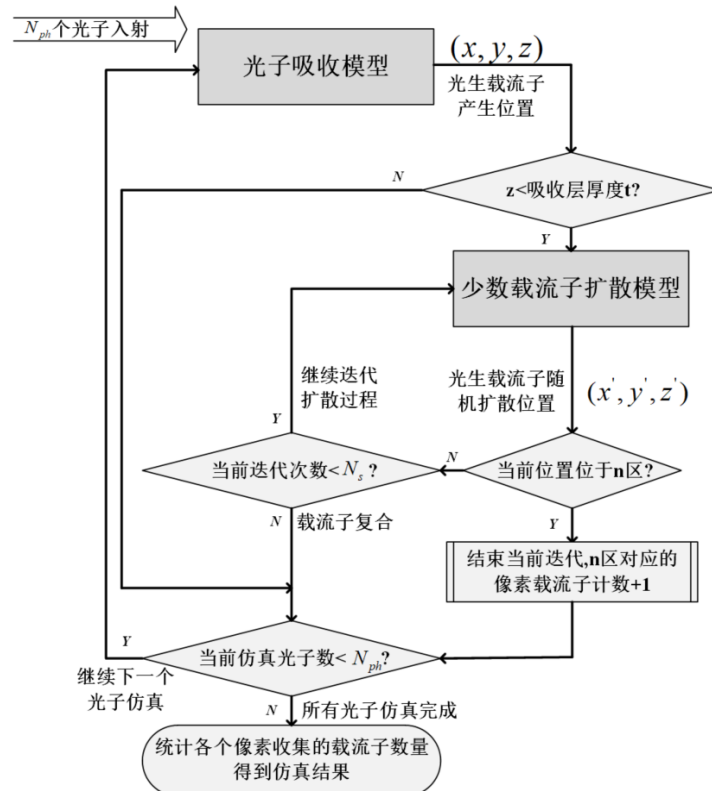


图 2 基于蒙特卡洛方法的 HgCdTe 红外焦平面阵列仿真基本流程

Fig. 2 Basic flow of the simulation of the HgCdTe infrared focal plane array based on the Monte Carlo method

面阵列存在像素间串扰。

2.2 IPS非均匀性分析

选择多种不同参数进行仿真,分析HgCdTe红外焦平面阵列IPS空间非均匀性的影响因素。主要研究像素中心距、吸收层厚度以及入射光波长与IPS非均匀性的关系,具体的参数设置如表1所示。

表1 像素内灵敏度非均匀性分析参数设置

Table 1 The parameter setting for the non-uniformity analysis of intra-pixel sensitivity

序号	研究参数	像素中心距/ μm	吸收层厚度/ μm	吸收层掺杂/ cm^{-3}	波长/ μm
1	像素中心距	15,20,25,30	10	1×10^{16}	9.5
2	吸收层厚度	30	8~16	1×10^{16}	9.5
3	入射波长	30	10	1×10^{16}	5~9.5

图4(a)为不同像素中心距,蒙特卡洛方法仿真的归一化IPS函数,随像素中心距增大,IPS曲线“集中”。为量化表征IPS的非均匀性,对IPS曲线标准差和半高宽进行计算,如图4(b)所示,当像素中心距从15 μm 增大到30 μm ,蒙特卡洛方法仿真的IPS标准差从0.342增大到0.363,半高宽从1.031减小到0.924。当像素中心距增加,扩散到相邻像素的少数载流子概率减小,像素间串扰减小,如图5(c)所示。当串扰减小,像素中心位置的响应增大,边缘处以及像素外的响应相对减小,导致归一化IPS曲线“集中”,非均匀性增大。因此,减小像素中心

距,串扰虽然增大,但是IPS的非均匀性减小,同时空间分辨率提高,有利于高能量集中点目标测量精度的提升。

图5(a)为不同吸收层厚度,蒙特卡洛方法仿真的归一化IPS函数,随吸收层厚度增大,IPS曲线“发散”。不同吸收层厚度对应的IPS曲线标准差和半高宽如图5(b)所示,当吸收层厚度从8 μm 增大到16 μm ,蒙特卡洛方法仿真的IPS标准差从0.387减小到0.346,半高宽从0.910增大到1.021。当吸收层厚度增大,光生少数载流子具有更大的空间进行扩散,被相邻像素吸收的概率增大,像素间串扰增大,如图5(c)所示。当串扰增大,像素中心位置的响应减小,边缘处以及像素外的响应相对增大,导致归一化IPS“发散”,非均匀性减小。因此,增大吸收层厚度,IPS非均匀性减小,同时探测器吸收的光子数会增大,量子效率提高,但也要综合考虑吸收层增大后串扰和暗电流的增大对探测器性能的影响。

图6(a)为不同入射光波长,蒙特卡洛方法仿真的归一化IPS函数,随波长增大,IPS曲线“集中”。不同波长对应的IPS曲线标准差和半高宽如图6(b)所示,当波长从5 μm 增大到9.5 μm ,蒙特卡洛方法仿真的IPS标准差从0.358增大到0.362,半高宽从0.932减小到0.913。当波长为5~9.5 μm ,根据式(2)~(5)模型,计算得到对应光学吸收长度 L_{ph} 为2.080~4.665 μm 。由于光学吸收长度随波长增大而增大,光生少数载流子产生的位置更接近被照射

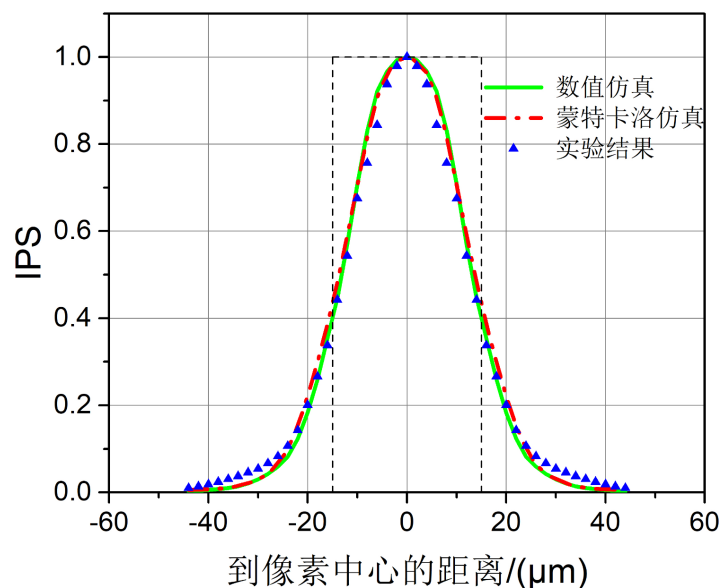


图3 HgCdTe红外焦平面阵列像素内灵敏度仿真结果

Fig. 3 The simulated intra-pixel sensitivity of the HgCdTe infrared focal plane array

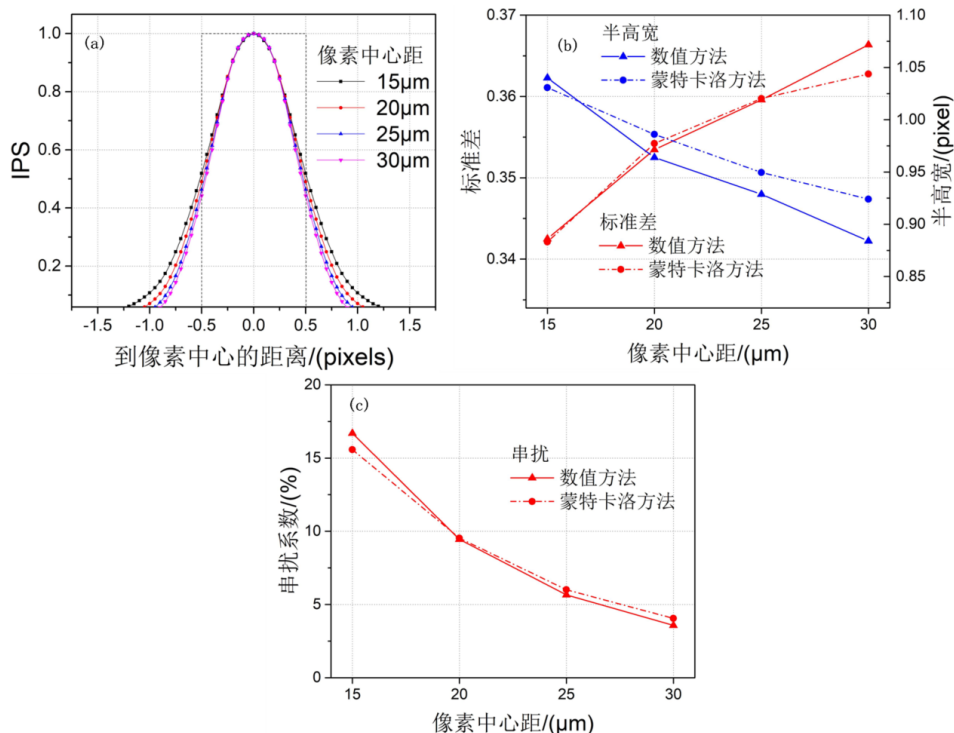


图 4 不同像素中心距的仿真结果:(a) 不同像素中心距,蒙特卡洛方法仿真的 IPS; (b) IPS 标准差和半高宽随像素中心距的变化; (c) 像素间串扰随像素中心距的变化

Fig. 4 The simulation results of different pixel pitch; (a) The simulated IPS with different pixel pitch; (b) The standard deviation and FWHM of IPS varies with pixel pitch; (c) The inter-pixel crosstalk varies with pixel pitch

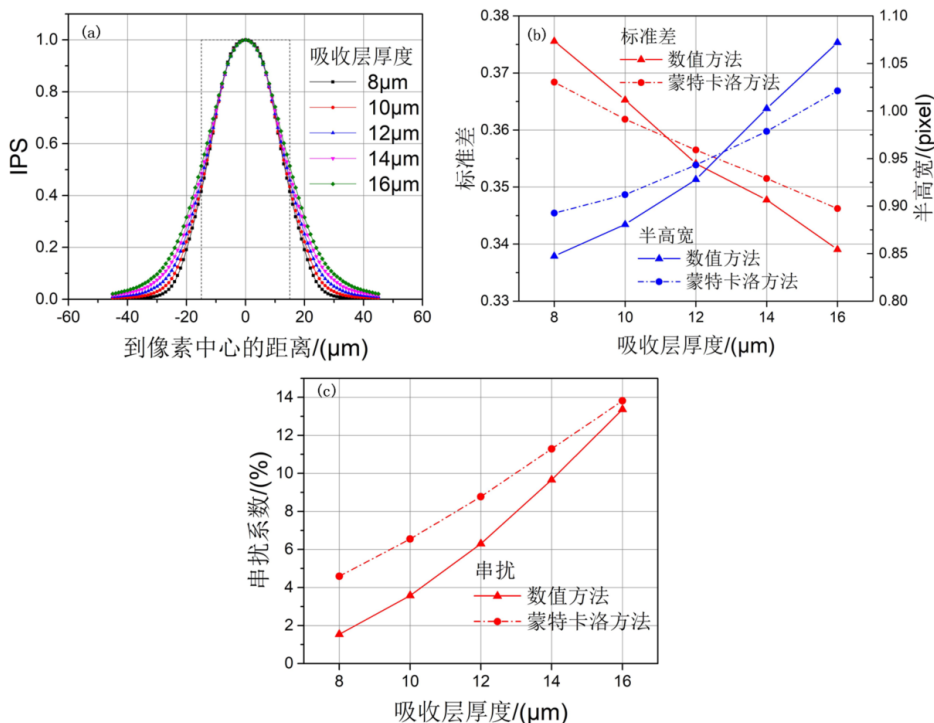


图 5 不同吸收层厚度的仿真结果:(a) 不同吸收层厚度,蒙特卡洛方法仿真的 IPS; (b) IPS 标准差和半高宽随吸收层厚度的变化; (c) 像素间串扰随吸收层厚度的变化

Fig. 5 The simulation results of different absorber thickness; (a) The simulated IPS with different absorber thickness; (b) The standard deviation and FWHM of IPS varies with absorber thickness; (c) The inter-pixel crosstalk varies with absorber thickness

像素的 n 区, 被其收集的概率增大, 像素间串扰减小, 如图 6(c) 所示, 导致 IPS 非均匀性增大。因此, 在对高能量集中点目标进行探测时, 需考虑目标波长引起的 IPS 差异。

2.3 模型差异分析

由图 4~5 和图 6 可知, 蒙特卡洛方法与数值方法仿真结果存在差异, 主要原因包括以下几点:

1) 仿真实论依据不同, 数值方法是基于基础的物理理论进行仿真, 包括有限差分方法求解麦克斯韦方程以及有限元方法求解半导体漂移-扩散方程等过程, 具有严格的理论推导。而蒙特卡洛方法是基于载流子扩散的随机统计模型进行仿真, 结果具有一定的随机性。

2) 数值方法中, 会基于有限差分方法方法进行光学仿真, 其结果包含探测器材料的光学串扰。而蒙特卡洛方法仅考虑载流子的扩散过程, 未进行光学串扰仿真。

3) 数值方法中, 由于无法设置理想点光源, 因此采用高斯光源仿真, 最后通过反卷积解算 IPS。反卷积的计算过程会存在一定误差。

4) 对于蒙特卡洛方法, 关键在于探测器光学吸收长度和载流子扩散长度的设置。光学吸收长度

采用文献[22]的经验近似模型计算, 载流子扩散长度参考文献[23]和[24]的测试结果, 都存在一定误差。

3 结论

基于蒙特卡洛方法对 HgCdTe 红外焦平面阵列的 IPS 进行建模仿真, 该方法具有模型简单、执行效率高优点。仿真得到的 IPS 与数值仿真和实验测试的结果一致, 验证了模型的可靠性。同时, 分析了 IPS 非均匀性与像素中心距、吸收层厚度以及波长的关系。结果表明, 相对于像素中心位置, 像素边缘处的灵敏度会减小; 当像素中心距从 $30\ \mu\text{m}$ 减小到 $15\ \mu\text{m}$ 时, IPS 非均匀性降低 5.79%, 当吸收层厚度从 $8\ \mu\text{m}$ 增大到 $16\ \mu\text{m}$ 时, IPS 非均匀性降低 10.68%, 当入射波长从 $5\ \mu\text{m}$ 增大到 $9.5\ \mu\text{m}$ 时, IPS 非均匀性增大 1.12%。分析结果可为红外焦平面阵列设计优化提供指导, 减小像素中心距或增大吸收层厚度, 可以降低 IPS 的空间非均匀性, 但是像素间串扰会增大, 同时随吸收层厚度增大, 暗电流和量子效率也会增大, 所以要综合考虑各个性能参数的变化实现最优设计。此外, 对不同波段目标探测时, 还需考虑波长引起的 IPS 差异。本文的仿真和分析, 可为高能量集中点目标测量精度的提升提供

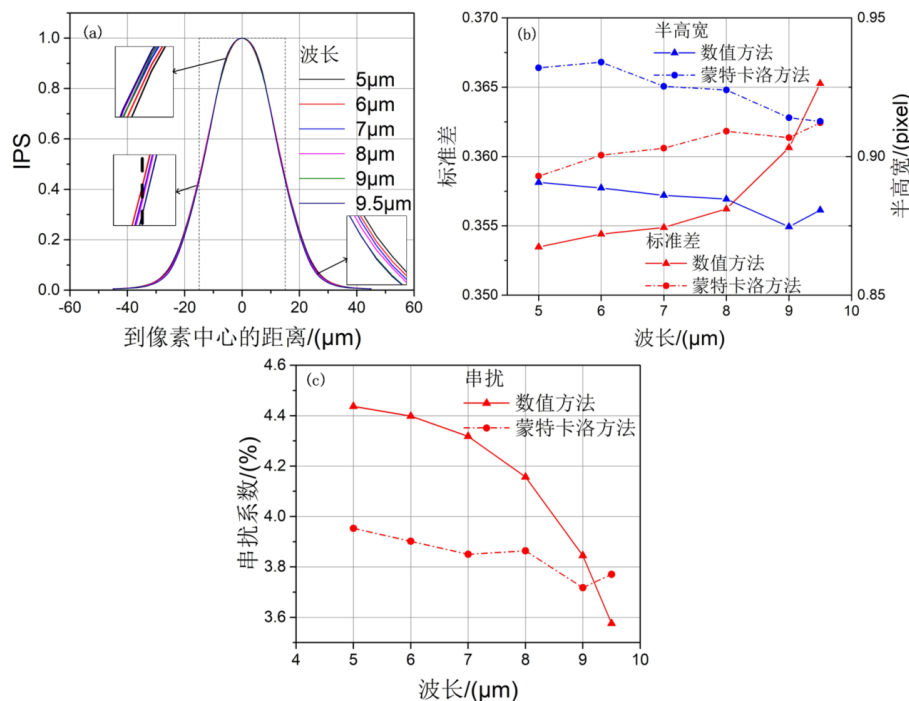


图 6 不同波长的仿真结果:(a) 不同波长, 蒙特卡洛方法仿真的 IPS; (b) IPS 标准差和半高宽随波长的变化; (c) 像素间串扰随波长的变化

Fig. 6 The simulation results of different wavelength: (a) The simulated IPS with different wavelength; (b) The standard deviation and FWHM of IPS varies with wavelength; (c) The inter-pixel crosstalk varies with wavelength

有益参考。

References

- [1] Ketchazo C, Viale T, Boulade O, *et al.* Intrapixel measurement techniques on large focal plane arrays for astronomical applications: a comparative study[C]//International Conference on Space Optics—ICSO 2016. International Society for Optics and Photonics, 2017, **10562**: 105623D.
- [2] Howell, Steve, B, *et al.* Detection and Measurement of Poorly Sampled Point Sources Imaged With 2-D Array[J]. *The Astronomical Journal*, 1996, **112**(3): 1302.
- [3] Lauer T R. The Photometry of Undersampled Point-Spread Functions[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1999, **111**(765): 1434–1443.
- [4] Anderson J, King I R. Toward High-Precision Astrometry with WFC2. I. Deriving an Accurate Point-Spread Function[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2000, **112**(776): 1360–1382.
- [5] Kavaldjiev D, Ninkov Z. Subpixel sensitivity map for a charge-coupled device[J]. *Optical engineering*, 1998, **37**(3): 948–954.
- [6] Barron N, Borysov M, Beyerlein K, *et al.* Subpixel Response Measurement of Near-Infrared Detectors[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2007, **119**(854): 466–475.
- [7] Mahato S B, De Ridder J, Meynants G, *et al.* Measuring intra-pixel sensitivity variations of a CMOS image sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, **18**(7): 2722–2728.
- [8] Shapiro C, Huff E, Smith R. Intra-pixel response characterization of a HgCdTe near infrared detector with a pronounced crosshatch pattern [C]//High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VIII. International Society for Optics and Photonics, 2018, **10709**: 1070936.
- [9] Shapiro C A, Smith R M, Huff E M, *et al.* Precision Projector Laboratory: detector characterization with an astronomical emulation testbed [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2019, **5**(4): 041503.
- [10] Soehnel G, Tanbakuchi A. Simulation and experimental characterization of the point spread function, pixel saturation, and blooming of a mercury cadmium telluride focal plane array [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(33): 7987–7993.
- [11] Vorobiev D, Irwin A, Ninkov Z, *et al.* Direct measurement of the Kepler Space Telescope CCD's intrapixel response function [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2019, **5**(4): 041507.
- [12] Ketchazo C, Viale T, Boulade O, *et al.* A new technique of characterization of intrapixel response dedicated to astronomical detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, **787**: 265–269.
- [13] Viale T, Ketchazo C, Guérineau N, *et al.* High accuracy measurements of the intrapixel sensitivity of VIS to LWIR astronomical detectors: experimental demonstration [C]//High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII. International Society for Optics and Photonics, 2016, **9915**: 991517.
- [14] Berthoz J, Grille R, Rubaldo L, *et al.* Modeling and Characterization of MTF and Spectral Response at Small Pitch on Mercury Cadmium Telluride [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(9): 3157–3162.
- [15] Vallone M, Goano M, Bertazzi F, *et al.* Simulation of small-pitch HgCdTe photodetectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, **46**(9): 5458–5470.
- [16] Vallone M, Goano M, Bertazzi F, *et al.* Diffusive-Probabilistic Model for Inter-Pixel Crosstalk in HgCdTe Focal Plane Arrays [J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2018, **6**(1): 664–673.
- [17] Appleton B, Hubbard T, Glasmann A, *et al.* Parametric numerical study of the modulation transfer function in small-pitch InGaAs/InP infrared arrays with refractive microlenses [J]. *Optics Express*, 2018, **26**(5): 5310–5326.
- [18] Lavine J P, Chang W C, Anagnostopoulos C N, *et al.* Monte Carlo simulation of the photoelectron crosstalk in silicon imaging devices [J]. *IEEE transactions on Electron Devices*, 1985, **32**(10): 2087–2091.
- [19] Fastow R M, Strum A. Monte Carlo simulations of the cross talk in InSb matrices [C]//Infrared Detectors: State of the Art II. International Society for Optics and Photonics, 1994, **2274**: 136–146.
- [20] Polovinkin V, Stuchinsky V A, Vishnyakov A, *et al.* Monte Carlo Simulation of Photoelectric Characteristics of Mercury - Cadmium - Tellurium- Based Infrared Focal-Plane-Array Detectors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, **65**(11): 4924–4930.
- [21] Lee I I, Polovinkin V G. Dependence of the Modulation Transfer Function on the Material and Design Parameters of HgCdTe IR FPAs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, **67**(8): 3175–3179.
- [22] Chu J, Li B, Liu K, *et al.* Empirical rule of intrinsic absorption spectroscopy in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. *Journal of applied physics*, 1994, **75**(2): 1234–1235.
- [23] Vishnyakov A V, Stuchinsky V A, Brunev D V, *et al.* Determination of charge-carrier diffusion length in the photosensitizing layer of HgCdTe n-on-p photovoltaic infrared focal plane array detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(9): 092112.
- [24] Vishnyakov A V, Stuchinsky V A, Brunev D V, *et al.* Analysis of charge-carrier diffusion in the photosensitizing films of HgCdTe infrared focal plane array photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, **118**(12): 124508.