材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260331001

大光敏面延伸波长InGaAs探测器扩散行为研究

张金龙*，黄晓峰，李凌峰，张圆圆，吴　唯，申志辉，崔大健
（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 大光敏面延伸波长InGaAs探测器的扩散行为对器件暗电流控制具有重要影响。在InAsP/$In_{0.87}Ga_{0.13}As$外延材料上，采用闭管扩散工艺制备了延伸波长InGaAs探测器，其光谱响应范围覆盖0.8～2.6 μm，截止波长达2.65 μm。通过扫描电子显微镜对大光敏面扩散工艺进行表征，获取了不同扩散时间下的延伸波长芯片PN结形貌，并结合暗电流测试分析其暗电流特性。Zn元素在InAsP层和InGaAs层中的扩散行为存在明显差异。通过调控Zn元素越过InAsP/InGaAs界面后的扩散行为，器件在0.5 V反向偏压下，室温暗电流降低至约6.72 μA，－10℃低温暗电流降低至约1.13 μA，显著优化了器件整体暗电流性能。

关键词： InGaAs探测器；延伸波长；扩散行为；暗电流
中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2026)05－0919－06

Diffusion Behavior of a Large Photosensitive Area Extended-Wavelength InGaAs Photodetector

ZHANG Jinlong, HUANG Xiaofeng, LI Lingfeng, ZHANG Yuanyuan,
WU Wei, SHEN Zhihui, CUI Dajian
(**Chongqing Optoelectronics Research Insititute, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: The effect of diffusion behavior on dark current is investigated using an extended-wavelength InGaAs photodetector with a large photosensitive area. The photodetector is fabricated via closed-tube diffusion technology using InAsP/$In_{0.87}Ga_{0.13}As$ epitaxial materials. Its spectral response ranges from 0.8 to 2.6 μm, with a cutoff wavelength of 2.65 μm. Scanning electron microscopy is used to characterize the diffusion process over the large photosensitive area, while the PN junction morphology of extended-wavelength chips are evaluated at different diffusion durations. The dark-current characteristics were analyzed in combination with dark-current measurements. The diffusion behavior of Zn atoms differs significantly between the InAsP and InGaAs layers. The results demonstrate that regulating Zn atoms diffusion across the InAsP/InGaAs interface reduces the dark current of the device at a reverse bias of 0.5 V to approximately 6.72 and 1.13 μA at room temperature and － 10℃ , respectively, thus significantly optimizing the overall dark-current performance of the photodetector.

Key words: InGaAs photodetector; wavelength extended; diffusion behavior; dark-current

0　引言

InGaAs光电探测器具有响应速度快、灵敏度高、探测效率高，以及能在室温下工作等优势，被广泛应用于光纤通信、大气遥感、微光夜视等重要领域。延伸波长InGaAs探测器一般通过高In组

收稿日期：2026－03－31.
基金项目：国家重点研发计划资助项目（2023YFF0715800，2023YFF0715802）.
*通信作者：张金龙

分的InGaAs材料制备。由于高In组分延伸波长InGaAs材料与InP衬底晶格失配严重，外延层材料界面处存在大量的位错、空位等缺陷，造成器件暗电流过高，影响探测性能。因此，通过调节InGaAs外延材料的外延缺陷、钝化以及扩散工艺，降低延伸波长InGaAs探测器暗电流，是近红外光电领域的重要发展方向之一[1]。

高质量的外延层生长一般会在InP层和InGaAs层之间设置缓冲层，以减少外延生长缺陷。常用的缓冲层包括：In组分渐变的$In_xAl_{1-x}As$缓冲层、In组分线性变化的$In_xGa_{1-x}As$缓冲层、组分突变的$InAs_yP_{1-y}$缓冲层[2-8]。InGaAs探测器表面钝化，一般采用化学气相沉积或者原子层沉积，以降低界面态密度，显著改善器件电学性能[9-10]。然而，相比于外延生长和钝化工艺，扩散掺杂对电学特性影响更为直观，p型杂质在材料中的扩散行为直接决定了延伸波长InGaAs器件的光电性能[11]。而大光敏面延伸波长探测器的暗电流抑制更容易受到扩散行为影响，对于扩散工艺的要求更高。因此，延伸波长InGaAs探测器的研制，亟待开展高In组分InGaAs器件扩散行为的研究，以明确扩散行为对器件暗电流和光谱响应性能的影响。

本文设计并制备了大光敏面延伸波长探测器，表征了光敏区域的扩散行为，并测试了其暗电流性能，以分析高In组分InGaAs探测器芯片扩散行为对器件暗电流的影响。实验采用扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope，SEM）对扩散后的PN结形貌进行表征。通过研究扩散行为对器件暗电流的影响，分析掺杂形貌对大光敏面延伸波长器件的电学特性的影响机理，为延伸波长InGaAs探测器向更大的光敏面、更低的暗电流、更宽的响应谱段发展提供参考。

1 实验参数

实验的外延材料为$InAsP/In_{0.83}Ga_{0.17}As$，衬底材料为InP。通过该材料制备的芯片结构为典型的PIN单管结构，其光敏元直径为1 mm。芯片扩散采用闭管扩散工艺，扩散源为Zn_3As_2，扩散温度为550℃，具体样品编号及扩散时间如表1所示。扩散区域PN结形貌测试采用配备Inlens探头的扫描电子显微镜，型号为Zeiss Gemini 560。

表1 不同InGaAs芯片样品的扩散时间

样品编号	扩散时间
K1	3 min 45 s
K2	4 min 00 s
K3	4 min 15 s
K4	4 min 30 s

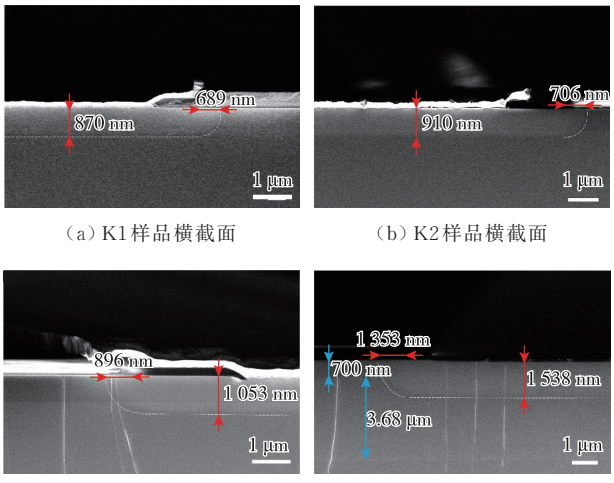
2 实验结果与讨论

2.1 延伸波长InGaAs探测器芯片扩散行为分析

延伸波长的InGaAs外延材料为高In组分，与衬底存在较大的晶格失配，导致在杂质扩散过程中，Zn元素扩散行为与常规波段的InGaAs材料差异较大。而扩散行为影响着器件PN结的形成，是决定器件暗电流、响应波段等性能的关键因素。扩散PN结形貌包含杂质扩散的纵向深度及横向扩散距离，能够相对准确、直观地反映器件的扩散情况。实验采用SEM对样品的Zn扩散行为进行表征，对样品像元区域的横截面进行测试，获取PN结形貌信息。SEM观察PN结的原理是：利用电子束轰击样品，不同区域激发的二次电子产额存在差异，从而形成衬度图像。由于扩散区域的Zn元素含量要远高于吸收层、帽层以及衬底层等区域，即电子束激发的二次电子数量要远高于其他未扩散区域，在Inlens镜筒探头下扩散区域整体亮度会高一些，成像时可显示出PN结的形貌。

图1所示为不同扩散时间芯片样品的像元区域横截面的二次电子图像。可以看到，白色虚线框内是衬度偏亮的区域，展示了芯片样品的PN结结区微观形貌特征。同时，在K3和K4样品的横截面SEM图像中，能够较为清晰地分辨InAsP帽层以及InGaAs吸收层，其中帽层厚度约为700 nm，吸收层厚度约为3.68 μm。对于扩散形成的PN结区域，当其深度跨过帽层和吸收层的界面时，器件暗电流会明显降低[12]。这是因为当Zn元素扩散至吸收层时，会带来大量的自由电子，增加载流子浓度。自由电子在入射光子的作用下被激发跃迁，并在内部电场作用下，在n型和p型区间定向流动，从而实现光谱响应范围延伸和暗电流降低。从图1可以看到，所有扩散样品的纵向扩散深度均大于700 nm，扩散覆盖至InGaAs吸收层。其中，K4样品扩散时间最长，扩散深度达到了1 538 nm，K1样品扩散时间最短，扩散深度最低，为870 nm。因此，延伸波长InGaAs材料的扩散深度与扩散时间成正比，随着扩散时间的增加，扩散深度也逐步增加。值得注意的是，样品K2

的扩散时间比 K1 长 15 s，对应的扩散深度仅增加 40 nm。然而，比 K2 扩散时间长 15 s 的 K3 样品，其扩散深度却比 K2 样品增加 143 nm。可以认为，扩散深度的增加并不随着扩散时间呈线性变化，这与文献[13]中的研究结果也是一致的。当扩散时间再次增加 15 s 时，样品 K4 的扩散深度比样品 K3 要增加 485 nm。这可能是因为延伸波长的 InGaAs 为高 In 组分，吸收层内部材料缺陷密度较高，便于 Zn 原子迁移，所以 Zn 元素在跨过 InAsP/InGaAs 界面后，扩散速度会急剧上升。这说明延伸波长 $In_{0.87}Ga_{0.13}As$ 器件的扩散行为与常规波长 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 器件的扩散行为存在较大差异。常规波长 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 器件的扩散速度往往是在帽层中较快，一旦到达吸收层，扩散速度则会放缓。因此，常规波长 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 器件在扩散过程中，比较容易达成杂质扩散深度刚刚越过材料界面，使得器件性能不容易越过阈值，扩散难度较低。而延伸波长 $In_{0.87}Ga_{0.13}As$ 器件由于自身材料微观缺陷较多，在杂质扩散越过材料界面后，扩散速度反而上升。这就为延伸波长扩散行为的调控带来更大的困难，进而导致延伸波长器件性能难以稳定控制。



（a）K1样品横截面　（b）K2样品横截面

（c）K3样品横截面　（d）K4样品横截面

图 1　延伸波长 InGaAs芯片样品 PN结的 SEM图

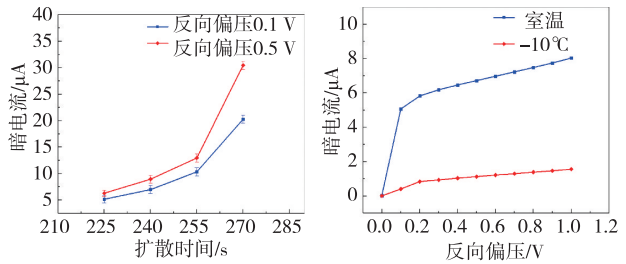
另外，从图 1 中还可以看到，延伸波长的扩散行为也存在杂质元素横向扩散现象。结区边缘因横向扩散呈现圆弧形，导致电场集中，侧面漏电流、产生复合电流、隧道电流显著增大，最终使得暗电流升高。特别是对于延伸波长 InGaAs，扩散边缘横向不均匀，会导致耗尽区宽度和内建电场分布不一致，对光谱响应和量子效率产生影响[14-15]。不过由于杂质元素在 InAsP层扩散速度慢，并且层厚仅有 700 nm，所以 PN结结区横向扩展相对较为平缓，样品 K1 的横向扩散深度仅为 689 nm。因此，延伸波长 InGaAs的芯片制备可考虑采用浅结工艺，尽量降低扩散区域横向扩散行为，避免器件暗电流劣化。

2.2　延伸波长 InGaAs探测器暗电流性能分析

图 2 所示为延伸波长芯片及器件的暗电流测试曲线图。延伸波长芯片样品的暗电流采用探针台进行测试，其中图 2(a)所示为室温下不同扩散时间的样品在 0.1 V 和 0.5 V 的反向偏压测试条件下的暗电流变化情况。从图 2(a)中可以看出，K1 样品的暗电流最低，在 0.1 V 反向偏压下测试暗电流仅为 5.1 μA，在 0.5 V 的反向偏压下测试暗电流为 6.3 μA。随着扩散时间的增加，芯片暗电流呈现上升趋势，在 0.5 V 反偏电压下逐渐从 6.3 μA 升高至最大 30.4 μA。这是因为扩散样品均扩至吸收层，样品扩散时间延长，使得扩散深度变深，导致耗尽区在纵向延伸得更宽，体积更大，单位时间内产生的电子-空穴对更多，表现为暗电流增大。同时，所有扩散样品在 0.1 V 反向偏压下的暗电流要低于在 0.5 V 反向偏压下测试的暗电流数值。这主要是由于在较小的反偏电压下，外加电场对内建电场的增强作用小，耗尽区更窄，芯片暗电流也较低；而随着反偏电压的增加，电场增强，将两侧载流子推得更远，耗尽区变宽，暗电流偏大。并且，从图中可以观察到，随着扩散时间的增加，不同反偏电压下的暗电流差值由 1.2 μA 上升至 10.2 μA。这是因为 PN结结区的横向扩散增加，PN结边缘的扩散深度不一致，导致器件产生漏电流，从而造成暗电流增加。另外，样品在 550℃的高温下扩散时间延长，这容易造成扩散区域表面产生缺陷，进而引发表面漏电流，导致芯片暗电流进一步增加。因此，通过合理调控扩散工艺，使得制备延伸波长芯片的 PN结扩散深度保持在刚刚进入吸收层的状态，能够有效降低芯片暗电流。

为进一步对延伸波长 InGaAs探测器的暗电流性能进行研究，选取暗电流表现较好的芯片样品 K1 进行器件封装，并对器件在室温和－10℃温度下的暗电流进行测试，具体测试结果如表 2 和图 2(b)所示。可以看到，器件 K1 在 0～1 V 的反向偏压下，－10℃的暗电流低于室温下的暗电流。在 0.1 V 反偏电压下，室温下的暗电流为 5.07 μA，而在－10℃温度下的暗电流大幅降低为 0.41 μA，极大提升了器件可靠性。这说明降低工作温度能有效降低延

伸波长InGaAs器件的暗电流。InGaAs器件的暗电流类型为复合电流，主要成分为产生电流。该产生电流来自热激发电子-空穴对，降低温度能有效降低这类电流[16-18]。因此，延伸波长InGaAs探测器可以通过增加制冷的方式来降低自身暗电流，降低芯片工艺制备难度，以提升器件的综合性能。



（a）不同扩散时间下的芯片暗电流测试曲线　（b）K1样品在不同反向偏压及工作温度下的器件暗电流曲线

图2　延伸波长InGaAs器件暗电流性能测试图

表2　K1样品在不同反向偏压、工作温度下的器件暗电流

反向偏压/V	室温下的暗电流/μA	−10℃下的暗电流/μA	反向偏压/V	室温下的暗电流/μA	−10℃下的暗电流/μA
0	0.03	—	0.6	6.98	1.22
0.1	5.07	0.41	0.7	7.23	1.3
0.2	5.83	0.84	0.8	7.49	1.39
0.3	6.19	0.94	0.9	7.75	1.47
0.4	6.47	1.04	1.0	8.04	1.56
0.5	6.72	1.13			

为验证延伸波长InGaAs器件的探测性能，对器件K1的室温光谱响应范围进行测试，最终得到样品校准后的归一化曲线如图3所示。从图中可以看到，延伸波长InGaAs探测器的光谱响应覆盖0.8～2.6 μm区间，截止波长达2.65 μm，峰值响应度出现在2.36 μm波长附近。特别是在2.6 μm波长处的相对响应度达到0.5，这表明器件在近红外延伸波长的范围内具备有效的探测能力。

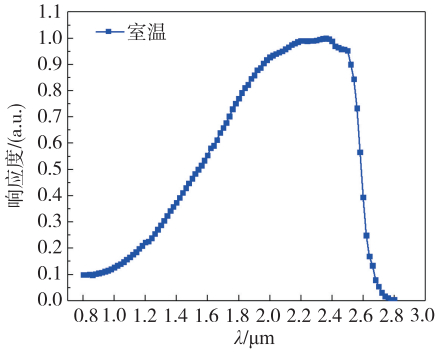


图3　延伸波长InGaAs器件相对响应光谱

2.3　扩散行为对暗电流的影响机理分析

如图4所示为大光敏面延伸波长InGaAs器件扩散的机理图。所研制的延伸波长InGaAs探测器为平面型PIN结构，通过闭管扩散的方式对大光敏面像元区域进行掺杂。在扩散过程中，Zn元素首先需要通过InAsP层，才能进入InGaAs吸收层。Zn元素在InAsP层中的扩散与常规InP层中存在很大的差异。根据相关研究，Zn元素在InAsP材料中的扩散系数为1.341×10^{-12} cm^2/s，在InP材料中的扩散系数为1.067×10^{-12} cm^2/s[19-20]。由于Zn元素在InAsP材料层中的扩散速度较慢，外延采用InAsP层作为帽层，能降低PN结形成过程中的横向扩散距离，有助于降低扩散工艺产生的暗电流。当扩散杂质到达材料界面处时，失配材料界面存在大量的缺陷，在InAsP/InGaAs界面处的Zn元素累积现象较弱。因此，在延伸波长器件中，由掺杂元素跨越界面引起的暗电流贡献较小。然而，由于延伸波长的$In_{0.83}Ga_{0.17}As$材料内部存在晶格失配产生的大量位错、空位等缺陷，Zn元素在跨过InAsP/InGaAs界面后，扩散速度会加快。这是因为失配材料中的位错缺陷能起到增强扩散的作用，沿着位错方向的扩散系数远高于沿着晶格的扩散系数，导致Zn元素在位错密度高的InGaAs材料中扩散速度加快[21]。这也和图1和图2中的扩散测试结果一致，Zn元素在越过界面后，扩散深度随时间快速增加达到了约1 538 nm，暗电流增加至30.4 μA。由此可见，在扩散过程中，Zn元素进入InGaAs吸收层后，纵向和横向的扩散速度都会加快。延伸波长材料扩散时，增加少量的扩散时间，就会导致PN结形成较多的横向扩散，从而造成暗电流急剧上升。随着扩散时间延长，Zn元素在进入InGaAs吸收层后产生了较多的纵向和横向扩散，从而造成器件的耗尽区变宽，暗电流变大。因此，延伸波长InGaAs的扩散关键在于越过界面后的扩散距离控制。综上所述，延伸波长的扩散行为与器件暗电流存在密切关联，通过精细调控杂质元素越过InAsP/InGaAs界面后的扩散行为，能够显著优化器件整体暗电流性能。

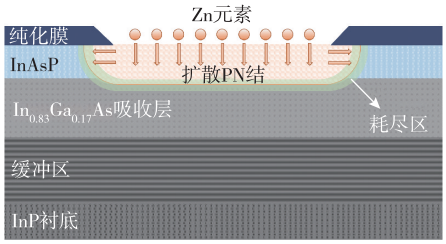


图4　延伸波长InGaAs芯片扩散机理图

3 结论

本文设计并制备了像元直径为1 mm的延伸波长InGaAs探测器，研究大光敏面延伸波长InGaAs探测器扩散行为对暗电流的影响。该探测器的暗电流较低，其光谱响应范围覆盖0.8～2.6 μm，截止波长为2.65 μm。采用SEM对大光敏面像元扩散区域的PN结形貌进行表征，研究延伸波长InGaAs吸收层与InAsP帽层中的Zn扩散行为，并对比Zn在InAsP和InGaAs层的扩散行为差异。通过暗电流测试，研究不同扩散时间、反偏电压、工作温度下的暗电流，分析延伸波长器件扩散行为影响暗电流的机理，明确了延伸波长InGaAs中扩散控制的关键在于调控Zn越过InAsP/InGaAs界面后的扩散行为，从而显著改善器件整体暗电流性能。

参考文献：

[1] Li X, Gong H, Fang J, et al. The development of InGaAs short wavelength infrared focal plane arrays with high performance[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 80: 112-119.

[2] Zhang Y, Gu Y, Tian Z, et al. Wavelength extended 2.4 μm heterojunction InGaAs photodiodes with InAlAs cap and linearly graded buffer layers suitable for both front and back illuminations[J]. Infrared Physics & Technology, 2008, 51(4): 316-321.

[3] John J, Zimmermann L, Merken P, et al. Extended-wavelength InGaAs on GaAs hybrid image sensors[J]. Infrared Spaceborne Remote Sensing XI, 2003, 5152: 263-270.

[4] Wojtczuk S, Colter P C, Jhabvala M D. High-quantum-efficiency 2.2 μm InGaAs MOCVD photodiodes [J]. Photodetectors: Materials and Devices II, 1997, 2999: 204-210.

[5] Martinelli R U, Zamerowski T J, Longeway P A. 2.6 μm InGaAs photodiodes [J]. Applied Physics Letters, 1988, 53(11): 989-991.

[6] Hoogeveen R W M, van der A R J, Goede A P H. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere[J]. Infrared Physics & Technology, 2001, 42(1): 1-16.

[7] Moy J P, Hugon X, Chabbal J, et al. 3 000 in Ga as photodiode multiplexed linear array for the spot 4 S. W. I. R. channel [J]. Infrared Detectors, Focal Plane Arrays, and Imaging Sensors, 1989, 1107: 137-151.

[8] 师艳辉，杨楠楠，马英杰，等. 数字递变异变赝衬底上2.6 μm $In_{0.83}Ga_{0.17}As$/InP光电探测器的性能改进[J]. 红外与毫米波学报，2019，38(3)：275-280.
Shi Yanhui, Yang Nannan, Ma Yingjie, et al. Improved performances of 2.6 μm $In_{0.83}Ga_{0.17}As$/InP photodetectors on digitally-graded metamorphic pseudo-substrates[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(3): 275-280.

[9] Shi M, Li T, Shao X, et al. Research of extended-wavelength 64x64 $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ focal plane arrays [J]. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Infrared Imaging and Applications, 2013, 8907: 890755.

[10] Wan L, Cao G, Shao X, et al. High performance $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ SWIR photodiode passivated by Al_2O_3/SiN_x stacks with low-stress SiN_x films[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(3): 033101.

[11] 张帅君，李天信，王文静，等. 平面型InGaAs探测结构中p型杂质的二维扩散行为研究[J]. 红外与毫米波学报，2022，41(1)：262-268.
Zhang Shuaijun, Li Tianxin, Wang Wenjing, et al. SCM study on the 2D diffusion behavior of p-type impurities in planar InGaAs detectors [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(1): 262-268.

[12] 曹嘉晟，李　淘，王红真，等. 非故意掺杂吸收层InP/InGaAs异质结探测器研究[J]. 红外与激光工程，2021，50(11)：62-69.
Cao Jiasheng, Li Tao, Wang Hongzhen, et al. Study on InP/InGaAs hetero-structure detector with unintentionally doping absorption layer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 62-69.

[13] Zhou Y, Ji X, Shi M, et al. Impact of SiN_x passivation on the surface properties of InGaAs photo-detectors[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(3): 034507.

[14] Liu A, Zhang J, Xing H, et al. Effects of multiplication layers on dark current components of InGaAs/InP avalanche photodiodes[J]. Applied Optics, 2019, 58(19): 5339-5346.

[15] Xing H, Zhang J, Liu A, et al. Design of high linearity InGaAs/InP avalanche photodiode with a hybrid absorption layer structure[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 102: 103018.

[16] 敖天宏，赵江林，童启夏，等. $In_{0.53}Ga_{0.47}As$雪崩光电二极管单光子探测器的温度特性研究[J]. 半导体光电，2022，43(4)：765-769.
Ao Tianhong, Zhao Jianglin, Tong Qixia, et al. A study of temperature characteristics in $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ single photon avalanche diodes detector[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(4): 765-769.

[17] 韩　涛，雷仁方，张建兵. 面向短波红外的混合维度异质结硅APD探测集成研究进展[J]. 半导体光电，2025，46(5)：819-829.
Han Tao, Lei Renfang, Zhang Jianbing. Advances in research on short-wave infrared detection technology of silicon APD based on hybrid dimension hetero-junction material[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2025, 46(5): 819-829.

[18] 王　健，窦志鹏，李光昊，等. 基于DBR增强的850 nm GaAs/AlGaAs单行载流子光电探测器[J]. 半导体光电，

2024, 45(1): 25-28.
Wang Jian, Dou Zhipeng, Li Guanghao, et al. DBR-enhanced 850 nm GaAs/AlGaAs uni-traveling-carrier photodiode [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(1): 25-28.

[19] Wan L, Shao X, Ma Y, et al. Dark current and 1/f noise characteristics of $In_{0.74}Ga_{0.26}As$ photodiode passivated by SiN_x/Al_2O_3 bilayer [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 109: 103389.

[20] Vanhollebeke K, D'Hondt M, Moerman I, et al. MOVPE based Zn diffusion into InP and InAsP/InP heterostructures[J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 233(1/2): 132-140.

[21] 邓洪海, 魏 鹏, 朱耀明, 等. 退火对Zn扩散的影响及其在InGaAs探测器中的应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 279-283.
Deng Honghai, Wei Peng, Zhu Yaoming, et al. Annealing process on Zn diffusion and its application in fabrication of InGaAs detectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 279-283.

作者简介：

张金龙(1995—),男,河北省人,工程师,主要研究方向为化合物半导体光电芯片工艺研发与表征。