

硅基PIN红外探测器暗电流的研究进展

王海建, 杨翠侠, 李波, 房建峰, 李有池, 高加林*, 鲁争艳, 王浚宇, 王泉

华东光电集成器件研究所, 江苏 苏州

Email: 1664414893@qq.com, *GJLYANG@163.com

收稿日期: 2021年5月10日; 录用日期: 2021年6月23日; 发布日期: 2021年6月30日

摘要

随着智能化弹药进一步向精准化、小型化发展, 硅基PIN光电探测器由于具有高响应度、短响应时间、小体积、低功耗、强抗干扰等优点而广泛应用于激光制导等领域。然而, 暗电流作为制约PIN探测器性能的重要参数一直备受关注, 减小暗电流可以有效改善探测器的灵敏度, 提高其信噪比。因此, 主要介绍了PIN探测器暗电流的产生机制, 重点探讨了优化探测器暗电流的方法, 主要从钝化工艺、掺杂技术、I层厚度、温度、电场隔离结构、pn结面积等方面综述了暗电流的研究进展, 为PIN探测器在智能弹药导航领域的应用奠定了坚实的理论基础。

关键词

PIN, 暗电流, 激光制导, 光电探测器

Research Progress in Dark Current Regulation of Silicon Based PIN Infrared Detector

Haijian Wang, Cuixia Yang, Bo Li, Jianfeng Fang, Youchi Li, Jialin Gao*, Zhengyan Lu, Junyu Wang, Quan Wang

East China Institute of Optoelectronic Integrated Devices, Suzhou Jiangsu

Email: 1664414893@qq.com, *GJLYANG@163.com

Received: May 10th, 2021; accepted: Jun. 23rd, 2021; published: Jun. 30th, 2021

Abstract

With the further development of precision and miniaturization of intelligent ammunition, silicon

*通讯作者。

文章引用: 王海建, 杨翠侠, 李波, 房建峰, 李有池, 高加林, 鲁争艳, 王浚宇, 王泉. 硅基PIN红外探测器暗电流的研究进展[J]. 传感器技术与应用, 2021, 9(3): 125-133. DOI: 10.12677/jsta.2021.93016

substrate positive-intrinsic-negative (PIN) photodetectors were widely used in laser guidance due to their high responsiveness, short response time, small size, low power consumption, strong anti-jamming. Nevertheless, dark current was paid much attention as an important parameter that restricts the performance of PIN detector. Detector sensitivity and signal-to-noise ratio can be effectively enhanced by reducing the dark current. Therefore, the mechanism of dark current of the PIN detector was introduced in this paper. At the same time, the method of optimizing the dark current of the detector was emphatically discussed. In addition, the research progress of dark current regulation was summarized from the aspects of passivation technology, doping technology, I layer thickness, temperature, electric field separation, pn junction area, which lays a solid theoretical foundation for the application of the PIN detector in the field of intelligent ammunition navigation.

Keywords

PIN, Dark Current, Laser Guidance, Photoelectric Detector

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

低暗电流、高灵敏度的红外光电探测器被广泛应用于航空航天、军事以及医疗等领域[1]。Si 由于具有含量丰富、禁带宽度低(1.12 eV)、易于表面改性、与 CMOS 工艺高度兼容等优势而备受各国研究者的青睐,因此,以 Si 为代表的光电探测器得到了长足发展并且已经在纳米光电子学领域发挥了不可或缺的重要作用[2]。Si 基 PIN 光电探测器由于结构简单、制备工艺不复杂,同时具有较好的响应度、宽频带特性而具备了发展下一代军事探测、制导武器的潜力。但是, Si 基 PIN 探测器的暗电流过大一直是急需解决的问题,暗电流过大会导致红外探测系统的识别距离有所偏差、虚警率变大;同时暗电流产生时会伴随一定的低频噪声的存在,低频噪声与暗电流基本呈线性关系,所以暗电流的增大会导致探测器灵敏度的急速下降[3]。自 1999 年黑硅材料被 Eric·Mazur 发现以来,因其较好的陷光结构、更低的禁带宽度而使黑硅探测器的响应度、灵敏度、探测范围有了质的突破,同时也为暗电流的减小提供了新方向, Si 基 PIN 光电探测器进入了快速发展的阶段。本文主要从钝化工艺、掺杂技术、I 层厚度、温度、电场隔离结构、pn 结面积等方面详细阐述调控暗电流大小的物理机制,为人们进一步理解暗电流的产生机制及掌握调控暗电流的方法提供理论支撑。

2. PIN 探测器暗电流的产生机制

光电探测器本质上就是一种由 pn 结将特定波长的光信号转换成电信号的光电子器件[4]。PIN 的典型结构见图 1,其主要是由一层重掺杂 P 型材料层、一层重掺杂 N 型材料层及中间隔以一定厚度的高纯度、高电阻率、轻掺杂的本征半导体 I 层所构成的。具体工艺制备流程分别为双面氧化行成 SiO₂ 阻挡层,利用光刻工艺在硅面形成隔离槽与阻挡环的窗口,用热扩散的方法对硅面进行 B 元素重掺杂从而使其形成 P+阻挡层,通过相同的方法在探测器光敏区形成 P 层,在探测器正面沉积氮化硅保护层以保护 P 层结构,通过剪薄抛光将硅片背面剪薄至指定厚度,利用飞秒激光对硅表面进行黑硅化处理,同样使用热扩散的方法在硅的下表面形成 N+阻挡层,在下表面沉淀氮化硅薄膜对黑硅层进行钝化处理以减小探测器的暗电

流，最终利用光刻工艺在器件上刻蚀电极孔。

为了掌握降低探测器暗电流、提高其灵敏度的方法，了解暗电流的产生机制是需要解决的首要问题。于是研究人员通过研究偏压对暗电流组分的影响以及不同表面态的暗电流密度分布，发现了当探测器处于工作状态时，除了产生复合机制和扩散机制导致结区暗电流增大之外，器件表面一定程度的表面漏电也进一步增大了探测器的暗电流，而且表面漏电成为产生暗电流的主要因素[5]。为了更深入的探究影响暗电流产生因素，2016年，中国科学院上海技术物理研究所陈效双团队通过 Sentaurus-TCAD 软件同时结合 SRH 模型、BBT 模型、TAT 模型、俄歇复合模型以及辐射复合模型模拟仿真了探测器暗电流的主要成分，发现了 PIN 探测器内部在偏置电压的作用下发生的隧穿、扩散、产生复合、表面复合、以及漏电等现象是导致暗电流增大的主要原因[6]，至此，为高性能、低暗电流的红外探测器的制备指明了方向。

随着人们对暗电流产生过程的日益深入，人们发现探测器的漏电流是噪声的主要来源，直接决定了探测器的灵敏度高和暗电流大小。漏电流主要包括扩散电流、产生电流、表面漏电流及体内漏电流组成。由于表面漏电流是在探测器表面层产生的，所以表面漏电流的大小与表面态密切相关，所以通过采用生长硅氧化层、环氧封装、涂敷有机保护材料、器件本身的特殊形状设计[7]、保证光敏区的离子扩散浓度、结深的均匀性[8]等技术可以大幅改善表面态的质量，减小表面漏电流，从而使暗电流降低 0.5~1 个数量级。由此可以看出，这些研究成果揭示了当前硅基探测器暗电流方面所存在的局限性，但同时也为掌握优化暗电流的方法提供了必要的参考。

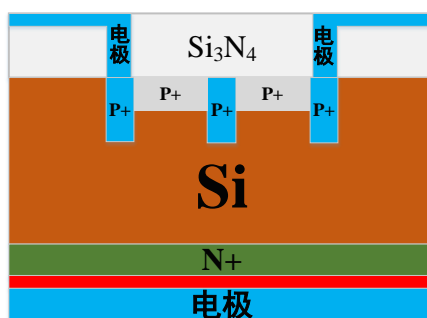


Figure 1. PIN structure diagram
图 1. PIN 结构示意图

3. 优化探测器暗电流的方法

3.1. 钝化技术对暗电流的优化

表面漏电流是探测器在生产时不可忽视的部分，更是影响暗电流大小的重要因素。其主要来源于 p-i-n 结侧壁的少数载流子，并且受到 SRH 过程控制，并在探测器工作过程中由 TAT 过程得到增强[9]。因此，为减小少数载流子的扩散，Yuan Dong 采用了与互补金属氧化物半导体兼容的硅表面钝化技术，在光电二极管的 Al 顶电极和底电极之间镀一层氧化硅薄膜抑制了侧壁的悬挂键、限制了载流子的扩散运动从而使表面漏电流降低了两个数量级[10]。根据已有研究表明过渡金属硫化物电子迁移率较低，与此同时，随着黑硅制备技术的不断发展，利用飞秒激光作用处于 400 mbar 的 SF₆ 气体环境中的硅片可以得到纹理均匀性较好、同质性较高、带有纳米尖锐微结构的黑硅[11]，这为高响应度、低暗电流光电探测器的制备提供了很好的条件。于是进晓荣等人于 2020 年在黑硅光电探测器的制备流程中通过等离子体增强化学气相沉积的方式在黑硅表面沉积了一层 a-Si···H 钝化层，黑硅表面在低温和富氧环境下产生了大量的 Si-H 键，原有的悬挂键密度急速减小，表面态得到了大幅抑制，在 -5 V 偏压下将黑硅光电探测器的暗电流降到了

7.8 μA ，实验结果见图 2 [12]。钝化工艺在降低探测器表面漏电流方面已经得到了各国研究人员的极大认可，同时降低工艺温度和使用两步生长法也为钝化工艺的改进指明了方向。

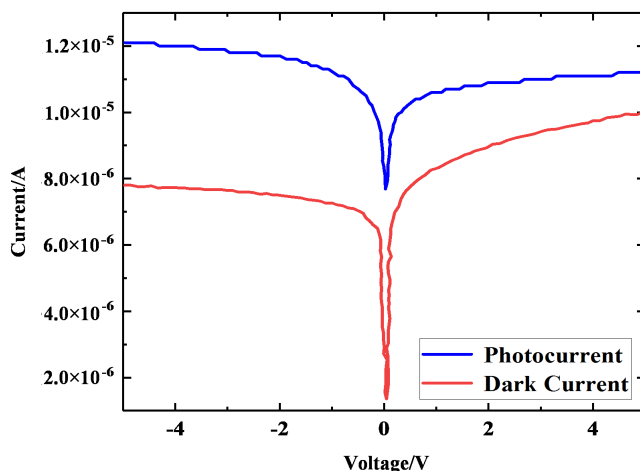
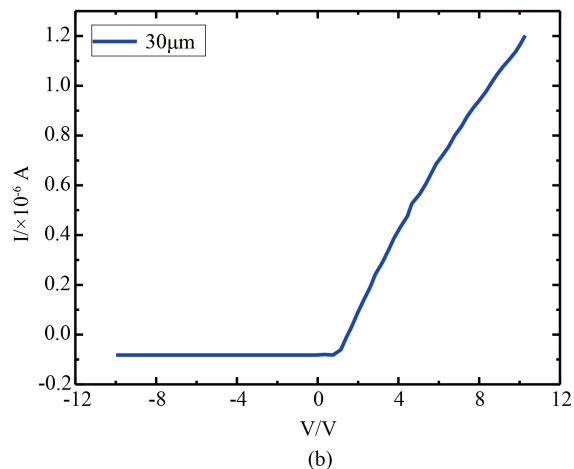
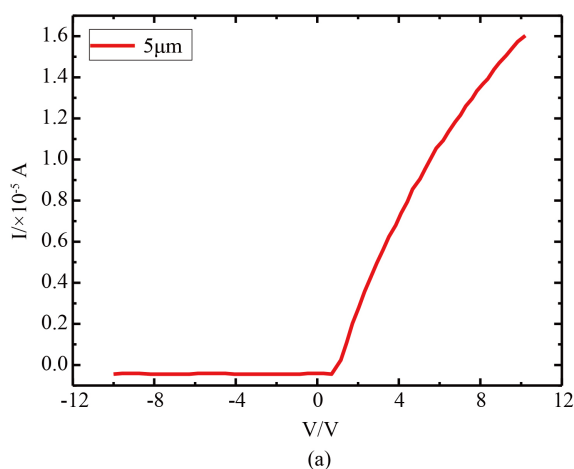


Figure 2. The relation of photogenerated current and dark current with bias voltage in black silicon photodetector

图 2. 黑硅光电探测器光生电流和暗电流随偏压的变化曲线

3.2. I 层厚度对暗电流的优化

对于 PIN 光电探测器，I 层本征层厚度对其暗电流和灵敏度的影响占据重要作用。2013 年，王巍模拟仿真了不同 I 层厚度下探测器的 I-V 特性曲线，并得到了当偏置电压为 10 V 时，I 层厚度为 5 μm 、30 μm 、50 μm 、70 μm 时对应光生电流分别为 16 μA 、1.2 μA 、1.1 μA 、0.09 μA 的结论，由此可以看出，随着 I 层厚度的增加，光生电流不断减小 [13]。由此可见，为了保证探测器响应度以及降低暗电流在光生电流中的比重，应适当增加 I 层厚度，于是，王鑫团队选取了光敏层厚度分别为 120 nm、160 nm、180 nm、200 nm 的探测器，并进行了 150 $^{\circ}\text{C}$ 退火 10 min 的处理，随着器件 I 层厚度的增加，暗电流密度逐渐减小，在 -0.1 V 偏压下，200~120 nm 厚光敏层探测器的暗电流分别为 $2.34 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 、 $2.43 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 、 $2.91 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 、 $4.96 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ，其结果见图 3。综上所述，为保证探测器有较高的响应度和较低的暗电流，适当增加 I 层厚度是较为理想的选择。



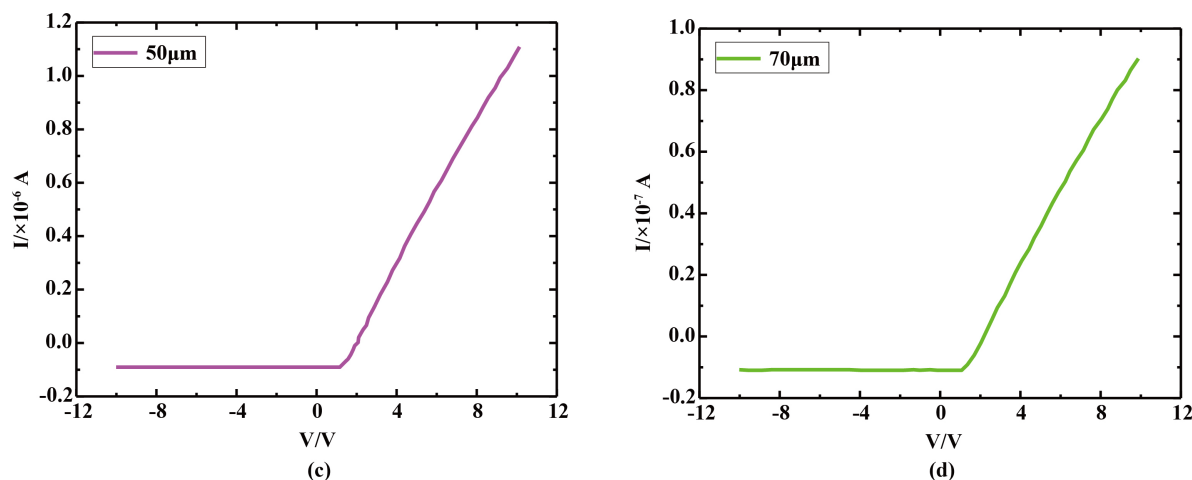


Figure 3. (a) The I-V characteristic curve of the detector, when the thickness of the I-layer is 5 μm ; (b) The I-V characteristic curve of the detector, when the thickness of the I-layer is 30 μm ; (c) The I-V characteristic curve of the detector, when the thickness of the I-layer is 30 μm ; (d) The I-V characteristic curve of the detector, when the thickness of the I-layer is 70 μm

图 3. (a) I 层厚度为 5 μm 时, 探测器的 I-V 特性曲线; (b) I 层厚度为 30 μm 时, 探测器的 I-V 特性曲线; (c) I 层厚度为 50 μm 时, 探测器的 I-V 特性曲线; (d) I 层厚度为 70 μm 时, 探测器的 I-V 特性曲线

3.3. 掺杂技术对暗电流的优化

掺杂技术的不同以及离子注入浓度的变化都会导致光电器件产生不同程度的缺陷、损伤, 最终影响载流子的数量, 致使光电器件性能下降。随着 MBE 原位掺杂技术的出现, 这一问题逐渐得到解决。MBE 原位掺杂技术可以有效避免离子注入过程中对器件造成的损伤, 从而大幅降低缺陷的数量, 改善探测器的灵敏度。为了更深入的探寻降低暗电流的方法, 2017 年赵真典等人使用 MBE 掺杂技术结合能使衬底上缺陷密度大量减小的 HgCdTe 材料, 降低了过多的 S-H 复合中心的数量和陷阱浓度, 最终实现了暗电流的抑制[14]。工艺技术的改进往往离不开参数的优化, 所以 2021 年, 夏少杰等人通过研究 p-i-n InP/InGaAs 光电探测器的暗电流与吸收层掺杂浓度的关系, 发现了探测器的暗电流随着掺杂浓度的增加而不断减小; 当探测器工作在 -0.6 V 偏置电压时, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 、 $1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 、 $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 的吸收层所产生的暗电流分别为 $4.5 \times 10^{-8}\text{ A/cm}^3$ 、 $4 \times 10^{-8}\text{ A/cm}^3$ 、 $2 \times 10^{-8}\text{ A/cm}^3$, 这主要是由于探测器空间耗尽区的宽度正比于接触电势差, 当耗尽区没有完全耗尽时, 随着掺杂浓度的增加, 吸收层的电场强度逐渐变小, 接触电势差一直降低, 进一步导致耗尽区宽度变窄, 最终使光生电流减小, 暗电流迅速下降[15]。因此, 在不影响探测器性能的前提下选择背景掺杂浓度较大的材料作为探测器的衬底可以在一定程度上减小其暗电流。

3.4. 温度对暗电流的优化

光电探测器在生产过程中的退火温度以及实际应用中的工作温度对于探测性能的影响至关重要, 因此, 本节从环境工作温度和退火温度两方面阐述温度影响探测器暗电流的物理机制, 从而找出减小暗电流的方法。覃钢研究团队和张小倩团队发现当工作偏压和背景不变的情况下, 温度升高会导致本征热激发载流子浓度呈现指数增长趋势, 同时温度的升高也会导致每个像元的移动强度差异性变大, 从而大幅增大暗电流[16] [17]。当硅锗波导光电探测器工作在反向偏压时, p-i-n 结的扩散电流成为影响暗电流的主要因素, 并且耗尽区固有的扩散电流与工作温度呈正相关的关系。由于环境温度可以严重影响探测器的热噪声、暗电流噪声以及击穿电压等参数[18]。于是李欣采用 p 型 HgCdTe 薄膜材料, 利用离子刻蚀成结的方式制备光伏探测器, 并利用 LakeShore340 温控仪以及 Keithley4200 进行了 20~200 K 温度范围内

变温 I-V 特性测试, 结果表明暗电流随温度的降低而不断减小, 但是, 值得注意的是不同温度范围主导暗电流的产生机制有所不同, 温度 $< 70\text{ K}$ 时, 暗电流主要是由扩散电流及产生复合电流所主导, 当温度处于 $70\sim 120\text{ K}$ 时, 辅助隧道电流主导暗电流的产生[19]。

为了进一步获得温度对探测器暗电流的影响机制, 2014 年, 白宏刚模拟仿真了不同电场强度下暗电流对工作温度的依赖性, 其结果见图 4; 同时深入阐述了其中的物理机制, 温度升高将直接导致电子的热发射使越来越多的电子从量子点中逃逸, 从而形成更大的暗电流[20]。

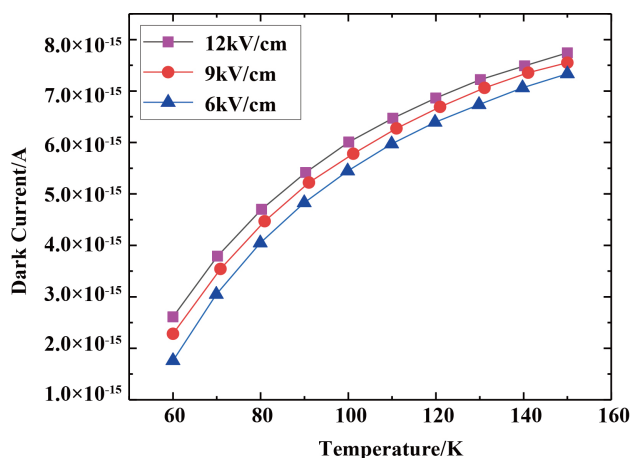


Figure 4. The relationship between dark current and temperature under different electric field intensity

图 4. 不同电场强度下暗电流与温度的关系曲线

2020 年, 高诗佳等人选择了基于 180 nm 光敏层的光电探测器进行了 100°C 、 120°C 、 130°C 、 140°C 、 150°C 的退火实验, 并与无退火的情况下进行对比, 发现了经过退火处理的探测器暗电流明显小于不退火的。而且在 -0.1 V 偏压下, 探测器在 130°C 时, 有最小的暗电流密度 $1.78 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$, 相比于不退火的情况下, 暗电流降低了 28% [21]。

综上所述, 在生产探测器时应选择适当的退火温度, 与此同时, 为了降低实际应用中暗电流对探测器响应度、灵敏度等电学参数的影响, 采用制冷措施降低其工作温度是减小暗电流, 提高信噪比最有效的途径。

3.5. 电场隔离结构对暗电流的优化

由于探测器在生产过程中, 划片、刻蚀等工艺流程会造成晶格失配而引起错配位错和穿线位错等现象, 最终增加漏电流, 所以, 2003 年, 盛丽艳通过在探测器外围加入保护环结构, 减小了光电探测器的漏电流, 达到了降低暗电流的效果[22]。为了降低探测器工作状态下, 载流子的无规则运动, 2017 年, 丰亚洁等人通过研究载流子在半导体中的传输机制, 发现了当小尺寸的光电探测器工作在低偏压时, 与周长有关的暗电流占据主导作用[23], 并且通过采用电场隔离的方法可以将光敏面与外部隔离开以隔绝外界对有源区的干扰, 最终消除器件边缘的漏电通道, 起到减小探测器暗电流的目的。2020 年, 郑照强等人通过脉冲激光沉积技术制备了面外垂直 $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{SnSe}_2$ 异质结构的平面光电探测器阵列, 同时利用垂直内建电场来抑制暗电流的产生并且分离光生载流子, 达到了减小暗电流, 提高探测器信噪比的效果[24]。根据已有研究表明, 在探测器内部引入保护环结构可以有效改善 PIN 结构的暗电流特性, 所以, 王巍模拟仿真了有无保护环的情况下探测器暗电流的大小, 成功的将保护环对暗电流的减小作用由定性分析转变

成了定量计算，同时我们也可以得到，随着偏压的不断增大，暗电流趋于平稳的状态，其主要原因是内部电场与等势面相接时，pn 结的耗尽区不在向侧面扩展，最终导致暗电流不再随偏压发生明显变化[25]。

3.6. 结面积对暗电流的优化

由图 5 PIN 阵列结构可知，通过研究 pn 结面积对探测器暗电流的影响机制有助于掌握减小暗电流的方法。于是 2009 年，张可锋设计了 InP 衬底上分子束外延生长的 PIN In_{0.78}Ga_{0.22}As/InP 原位掺杂外延材料，并得出了暗电流随 pn 结面积增加而增加的结论[26]，为以后从结面积角度降低暗电流奠定了基础，但是 pn 结面积对于暗电流的影响机制尚不明确，因此，王巍通过理论模型，并仿真分析了器件结面积与暗电流的内在联系，其结果见图 6 [27]。从图中可以看出，暗电流、光电流随着结面积的减小而不断减小，但是暗电流的减小幅度远大于光电流，因此通过减小结面积降低探测器暗电流的本质实际上是提高了光电流与暗电流的比值，从而实现了探测器信噪比的提高[28] [29]。所以，我们应在不影响探测器性能的前提下尽量减小 pn 结的结面积。

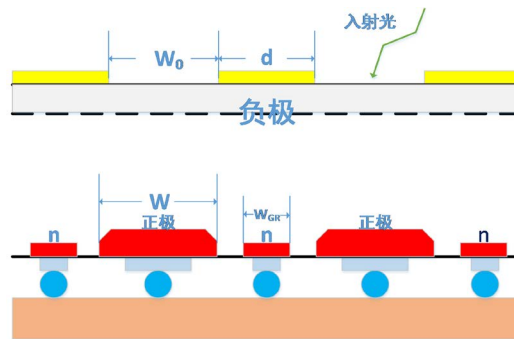


Figure 5. Silicon based PIN array structure

图 5. 硅基 PIN 阵列结构图

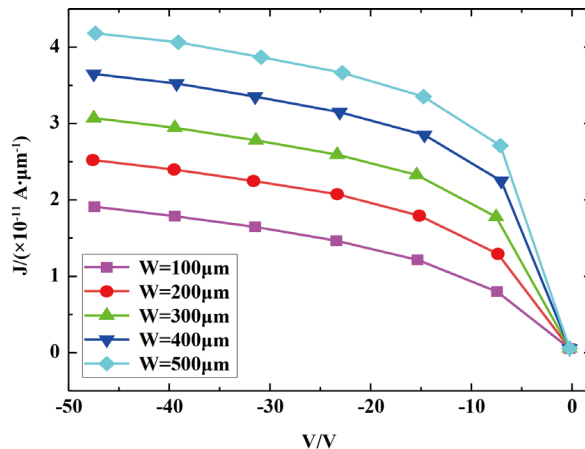


Figure 6. I-V characteristic curve corresponding to different junction area of detector

图 6. 探测器不同结面积对应的 I-V 特性曲线

4. 结束语

本文详细阐述了对 PIN 光电探测器暗电流调控的相关研究，并了解到调控 PIN 光电探测器的暗电流，实质上就是对暗电流产生过程进行调控，根据相关研究发现钝化工艺、掺杂技术、I 层厚度、温度、电场

隔离结构、pn 结面积等都可以在一定程度上影响载流子的寿命、运动状态,进而影响 PIN 光电探测器暗电流的数值。可以看出,目前对于复杂的暗电流产生机制的理解尚不深入,而且没有任何一种方法可以满足同时减小隧穿电流、扩散电流、产生复合电流、表面复合电流和漏电流的要求。对隧穿电流、扩散电流、产生复合电流、表面复合电流和漏电流的产生机制进行研究有助于人们进一步理解 PIN 探测器暗电流的产生过程和探究减小暗电流的方法,为 PIN 探测器在激光制导、红外探测等领域的应用奠定坚实的理论基础。

参考文献

- [1] Rogalski, A. (2010) *Infrared Detectors*. CRC Press, Boca Raton, 2-3. <https://doi.org/10.1201/b10319>
- [2] 赵正平. 超宽禁带半导体 Ga_2O_3 微电子学研究进展[J]. 半导体技术, 2019, 44(1): 8-14.
- [3] 庄东炜, 韩晓川, 李雨轩, 等. 硅基光电子集成光控相控阵的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 050001.
- [4] 林鑫. 基于四象限探测器的激光束二维扫描跟踪系统的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [5] 李龙, 孙浩, 朱西安. 碲镉汞长波探测器暗电流仿真分析[J]. 红外技术, 2014, 36(1): 73-78.
- [6] 许娇. 红外探测器暗电流成分分析和机理研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- [7] 施志贵. 降低高阻硅探测器漏电流的方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国工程物理研究院, 2000.
- [8] 祝威. 近红外增强型硅双四象限光电探测器研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [9] Chen, H., Verheyen, P., De Heyn, P., Lepage, G., De Coster, J., Balakrishnan, S., Absil, P., Roelkens, G. and Van Campenhout, J. (2016) Dark Current Analysis in High-Speed Germanium p-i-n Waveguide Photodetectors. *Journal of Applied Physics*, **119**, Article ID: 213105. <https://doi.org/10.1063/1.4953147>
- [10] Dong, Y., Wang, W., Lei, D., Gong, X., Zhou, Q., Lee, S.Y., Loke, W.K., Yoon, S.-F., Tok, E.S., Liang, G. and Yeo, Y.-C. (2015) Suppression of Dark Current in Germanium-Tin on Silicon p-i-n Photodiode by a Silicon Surface Passivation Technique. *Optics Express*, **23**, 18611. <https://doi.org/10.1364/OE.23.018611>
- [11] Barada, K.N., Mool, C.G. and Kurt, W.K. (2007) Spontaneous Formation of Nanospiked Microstructures in Germanium by Femtosecond Laser Irradiation. *Nanotechnology*, **18**, Article ID: 195302. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/19/195302>
- [12] 进晓荣, 吴强, 黄松, 等. 飞秒激光过饱和掺杂硅基光电探测器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 393-405.
- [13] 王巍, 白晨旭, 冯其, 等. 硅基 PIN 光电探测器结构参数对其性能的影响[J]. 半导体光电, 2013, 3(34): 379-382.
- [14] 赵真典, 陈路, 傅祥良, 等. 替代衬底上的碲镉汞长波器件暗电流机理[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 2(36): 187-190.
- [15] 夏少杰, 陈俊. p-i-n InP/InGaAs 光电探测器的电流及电容特性研究[J]. 红外, 2021, 1(42): 1-5.
- [16] 覃钢, 吉凤强, 夏丽昆, 等. 碲镉汞高工作温度红外探测器[J]. 红外与激光工程, 2020, 50(4): 1-11.
- [17] 张小倩, 王亮. 长波碲镉汞探测器工作温度对输出图像的影响[J]. 红外, 2019, 9(40): 12-17.
- [18] Matukas, J., Palenskia, V., Pralgauskaitė, S., et al. (2006) Photosensitivity and Noise Characteristic Investigation of Ultrafast InGaAs/InP Avalanche Photodetectors. 2006 *International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications*, Krakow, 22-24 May 2006, 173-176. <https://doi.org/10.1109/MIKON.2006.4345132>
- [19] 李欣, 王淑芬, 毛京湘, 等. HgCdTe 环孔 p-n 结光伏探测器暗电流机制[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(z1): 195-198.
- [20] 白宏刚, 张建奇. 量子点红外探测器暗电流及噪声特性研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [21] 高诗佳, 王鑫, 张育林, 等. 光敏层厚度与退火温度调控对聚 3-己基噻吩光电探测器性能的影响[J]. 高分子学报, 2020, 4(51): 338-345.
- [22] 盛丽艳, 韩德俊, 张秀荣, 等. 带保护环结构的条形 X 光阵列探测器[J]. 半导体学报, 2003(2): 198-201.
- [23] 丰亚洁, 何晓颖, 刘巧莉, 等. Si 基 PIN 光电探测器电场隔离结构对暗电流的影响[J]. 半导体光电, 2017, 38(6):

802-805.

- [24] Zheng, Z.Q., Chen, P.F., Lu, J.T., *et al.* (2020) Self-Assembly $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{SnSe}_2$ Heterostructure Array with Suppressed Dark Current and Enhanced Photosensitivity for Weak Signal. *Science China Materials*, **63**, 1560-1580. <https://doi.org/10.1007/s40843-020-1354-2>
- [25] Goushcha, I., Tabbert, B. and Goushcha, A.O. (2007) Optical and Electrical Crosstalk in PIN Photodiode Array for Medical Imaging Applications. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Honolulu, 26 October-3 November 2007, 4349-4356. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2007.4437077>
- [26] 张可锋, 唐恒敬, 李涛, 等. InGaAs 探测器性能与结面积和周长的关系研究[J]. 光电子激光, 2009, 6(20): 714-716.
- [27] 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): 12-15.
- [28] 郝国强, 张永刚, 刘天东, 等. InGaAs PIN 光电探测器的暗电流特性研究[J]. 半导体光电, 2007, 25(5): 341-344.
- [29] 张君和. 提高光电二极管光/暗电流比值的途径[J]. 半导体光电, 1991, 12(3): 284-288.