

# 不同光敏元尺寸对InGaAs探测器光电流的影响

黄郑东

上海理工大学理学院, 上海

收稿日期: 2025年4月10日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月28日

## 摘要

InGaAs光电探测器因其优异的短波红外响应特性、低暗电流和高响应度, 在红外成像、激光通信和光谱检测等领域具有广泛应用。光敏元作为探测器的核心结构, 其面积大小不仅影响光通量的吸收效率, 还关系到器件的空间分辨率和光电性能。然而, 光敏元面积对光电流特性的具体影响规律仍需系统实验验证。为此, 本文设计并制备了光敏元面积从 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 至 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ 的InGaAs探测器样品, 测试并分析了其在暗态和光照条件下的电流-电压(I-V)特性。结果表明, 随着光敏面积的增加, 光电流呈明显增强趋势, 且I-V曲线形状保持一致, 反映出材料制程的一致性。在暗态下, 暗电流随光敏元面积的增大而增大, 但单位面积暗电流密度基本稳定, 说明其主要来源为体电流。在光照条件下, 不同面积器件的光电流接近线性增长, 验证了光敏面积对光响应能力的直接影响。研究结果为InGaAs光电探测器在高分辨率与多像元集成应用中的结构设计提供了重要参考。

## 关键词

InGaAs光电探测器, 光敏元, 光电流, 电流-电压特性

# The Influence of Photosensitive Pixel Size on the Photocurrent of InGaAs Photodetectors

Zhengdong Huang

School of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 10<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 19<sup>th</sup>, 2025; published: May 28<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This InGaAs photodetector, with its excellent short-wavelength infrared response, low dark current, and high responsivity, has been widely applied in infrared imaging, laser communication, and spectral detection. As the core structure of the detector, the area of the photosensitive element not only affects the efficiency of light flux absorption but also relates closely to the spatial resolution

and photoelectric performance of the device. However, the specific influence of the photosensitive area on photocurrent characteristics still requires systematic experimental verification. To this end, this study designs and fabricates InGaAs detector samples with photosensitive areas ranging from  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  to  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ , and investigates their current-voltage (I-V) characteristics under both dark and illuminated conditions. The results show that as the photosensitive area increases, the photocurrent exhibits a significant rising trend, while the overall I-V curve shape remains consistent, reflecting the uniformity of the material fabrication process. Under dark conditions, the dark current increases with the photosensitive area, but the dark current density per unit area remains nearly constant, indicating that the primary source is bulk current. Under illumination, the photocurrent of devices with different areas increases nearly linearly, confirming the direct impact of the photosensitive area on light response capability. These findings provide valuable reference for structural design in high-resolution and multi-pixel integrated applications of InGaAs photodetectors.

## Keywords

InGaAs Photodetector, Photosensitive Pixel, Photocurrent, Current-Voltage Characteristics

Copyright © 2025 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

随着光电探测技术在红外成像、环境监测、光通信以及精密测量等领域的广泛应用，对光电探测器的性能提出了更高的要求[1]-[3]。InGaAs(铟镓砷)作为一种具有直接带隙、可调带隙宽度和高量子效率的三元合金半导体材料，因其在短波红外(SWIR)波段( $0.9\sim 1.7 \mu\text{m}$ )具有优异的光电转换能力，成为当前短波红外探测器的主流材料之一[4] [5]。相较于传统的硅探测器，InGaAs 在响应波段上覆盖了更宽的红外区域，并具备更高的探测灵敏度和更低的本征噪声，尤其适用于低光强、高动态范围的探测场景。InGaAs 探测器在低暗电流、高响应度和良好线性度方面具有显著优势，同时还具备优良的可集成性与工艺兼容性，适用于大规模阵列化和系统集成。在军事侦察、光纤通信、空间遥感、激光测距和医疗成像等高性能探测系统中，InGaAs 光电探测器已展现出广泛的应用前景和重要的战略价值。因此，围绕其结构优化与性能提升开展深入研究具有重要的现实意义和应用价值。

光敏元作为光电探测器中将光信号转化为电信号的核心区域，其几何尺寸不仅决定了器件的感光面积，还直接影响光电流输出、暗电流大小、空间分辨率、响应速度以及信噪比等关键性能指标。较大的光敏元面积能够接收更多的入射光通量，从而获得更高的光电流，有助于提升器件的光响应能力和探测灵敏度；但同时，也可能带来暗电流增大、电容效应增强以及响应速度下降等不利影响。相反，减小光敏元尺寸有利于提升空间分辨率和响应速度，适用于高像素密度、快速响应的焦平面阵列(FPA)系统，但由于接收光能有限，可能导致光电流减弱、光响应降低，且在边缘区域更容易受到表面态和漏电通道的影响。尤其在短波红外 InGaAs 探测器中，器件的光敏元尺寸设计对系统性能有着直接影响。因此，深入研究不同光敏元面积条件下探测器的电学响应特性与光响应变化规律，对于优化探测器结构设计、提升整体性能、满足多应用场景需求具有重要的理论意义与工程价值。

本论文分析不同光敏元面积的 InGaAs 光电探测器在暗态和光照条件下的电流 - 电压(I-V)特性变化规律，探讨面积尺寸与光响应之间的关系。通过对一系列具有相同材料结构、不同感光面积的 InGaAs 探

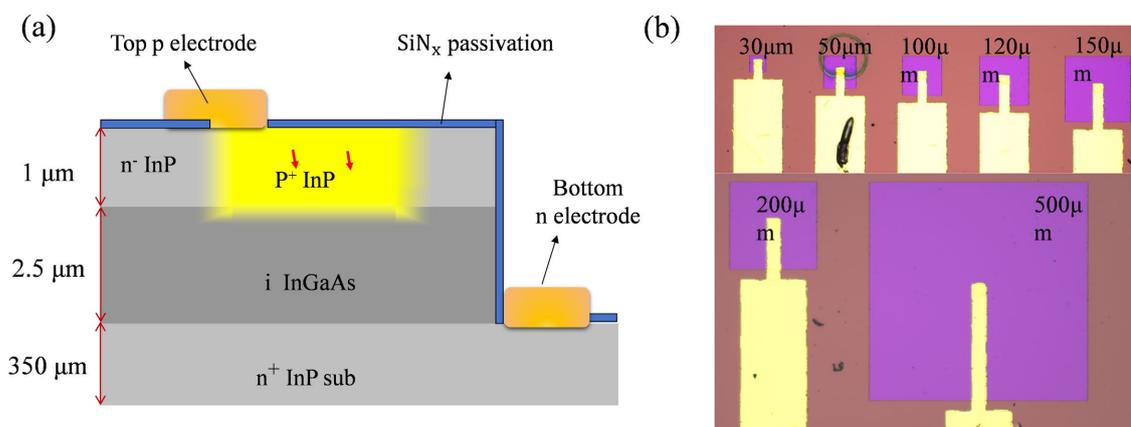
测器样品进行系统测试, 探讨其在暗态与光照条件下的电学响应特性。所选面积范围覆盖常见尺寸设计区间为  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  至  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ , 以确保具有良好的代表性和对比性。所有器件采用相同的外延材料与工艺流程进行制备, 以保证结构一致性, 从而排除材料或工艺差异带来的影响。通过对比分析不同面积器件在相同偏压条件下的光电流输出, 评估面积变化对光电转换效率的影响。研究结果将为 InGaAs 光电探测器在不同应用场景(如高分辨率成像、阵列集成、低光强探测)下的结构优化设计提供数据支持和理论参考。

## 2. 器件制备

图 1 所示为不同光敏元尺寸的平面型 InGaAs 光电探测器的光学显微图像, 其中包含个不同光敏元边长( $500 \mu\text{m}$ ,  $200 \mu\text{m}$ ,  $150 \mu\text{m}$ ,  $120 \mu\text{m}$ ,  $100 \mu\text{m}$ ,  $50 \mu\text{m}$ ,  $30 \mu\text{m}$ )的平面型 InGaAs 探测器结构。外延层结构主要包括三层: 最上层为  $1 \mu\text{m}$  厚、掺杂浓度为  $1.25 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  的 n-InP 帽层, 用于增强器件表面稳定性与电极接触; 中间为  $2.5 \mu\text{m}$  厚、掺杂浓度为  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的 InGaAs 吸收层, 主要吸收入射光子完成光电转化; 底部为  $1 \mu\text{m}$  厚、掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  的 InP 刻蚀阻挡层。这些外延层结构通过金属有机化学气相沉积(MOCVD)的方法生长在掺杂浓度为  $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的 InP 衬底之上。在器件制备过程中, 首先在外延结构表面采用等离子增强化学气相沉积(PECVD)技术沉积一层  $\text{SiN}_x$  薄膜作为钝化层, 用于保护电路和减小表面态对暗电流的影响。随后, 通过干法刻蚀在帽层形成形成不同尺寸的扩散窗口, 随后采用 Zn 源在闭管扩散工艺下对帽层进行掺杂处理, 形成 P 型区域。最后, 为分析光敏元面积对器件性能的影响, 在室温下使用波长为  $980 \text{nm}$  的激光作为光源, 对不同光敏尺寸的器件进行光照条件下的电流 - 电压(I-V)特性测试。

## 3. 结果与讨论

在光电探测器中, 光敏元(Photosensitive Pixel)是实现光电信号转换的核心单元, 其性能直接决定了探测器的光响应效率与整体功能表现。光敏元的几何尺寸不仅影响其对入射光的吸收能力, 还对暗电流水平、响应速度等关键参数产生显著作用。光敏元的大小不仅决定了单位面积内接收光子的数量, 还可能影响器件内部载流子的扩散路径与复合, 从而对暗电流的大小和分布产生重要影响。因此, 深入研究不同光敏尺寸条件下光电流与暗电流的变化规律, 对于理解光电探测器工作机制、优化探测器结构设计, 以及提升其在高分辨红外成像和精密测量系统中的应用能力, 具有重要的理论价值和工程意义。



**Figure 1.** (a) Schematic diagram of a single photodetector structure (b) Microscope images of photodetectors with different photosensitive area sizes

**图 1.** (a) 单个光电探测器的结构示意图; (b) 不同光敏元尺寸的光电探测器的显微镜图片

### 3.1. 暗电流理论

InGaAs 光电探测器的暗电流是指在无光照条件下,器件在外加偏压作用下产生的电流,是影响探测器性能、尤其是信噪比和最低可探测光强的关键因素。平面型 InGaAs 光电探测器采用扩散的方法制备光敏元 PN 结,制备的 PN 结埋藏于材料内部,因此其暗电流主要来源于以下几个方面:缓冲层与有源层的界面处、吸收层内、吸收层与帽层的界面处、帽层表面与钝化层界面处以及钝化层表面。平面型 InGaAs 光电探测器的暗电流的主要成分为:扩散电流、产生复合电流、表面和界面的陷阱辅助隧穿电流[6]。少子扩散电流起源于耗尽区边缘附近一个少子扩散长度范围内。该区域中,由热激发产生的电子-空穴对在未进入耗尽区之前,通过扩散运动至 PN 结附近。进入耗尽区后,在内建电场作用下,电子-空穴对迅速分离并分别漂移至结区两端,从而形成扩散电流,扩散电流是光电二极管中普遍存在的一种形式。对于 P<sup>+</sup>N 结,轻掺杂区的扩散电流占主导地位为:

$$I_{\text{diff}} = \frac{Aqn_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} (e^{qV/kT} - 1) = I_0 (e^{qV/kT} - 1) \quad (1)$$

其中, A 是光敏元面积,  $n_i$  是本征载流子浓度,  $N_D$  是掺杂浓度,  $D_p$  是空穴的扩散系数,  $\tau_p$  是少子寿命。

空间电荷区内的杂质和缺陷常常充当 Shockley-Read-Hall 类型的产生-复合中心,能够在载流子传输过程中引发产生-复合电流。当 PN 结处于热平衡状态时,耗尽层中的非平衡载流子的生成与复合过程处于动态平衡,二者速率相等,因此不会引起净电流。然而,当 PN 结两端施加偏压后,这一平衡被打破,热激发产生的载流子将不再完全被复合,而是在电场作用下运动,从而对外部电流产生实际贡献。由载流子在结区内的热激发和复合机制所引起的这一类电流,被称为产生-复合电流,其可以表示为:

$$I_{\text{gr}} = \frac{Aqn_i W}{2\tau_{\text{eff}}} (e^{qV/2kT} - 1) \quad (2)$$

其中, W 是耗尽区宽度,  $\tau_{\text{eff}}$  是有效载流子寿命,其表达式为:

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{1}{\sigma_i v_{\text{th}} N_t} e^{E_i - E_i/kT} \quad (3)$$

其中  $N_t$  是复合中心密度,  $\sigma_i$  是捕获界面,  $v_{\text{th}}$  是载流子热速率,  $E_i$  是能级缺陷。从上面的式子可以看出产生复合电流与耗尽区的杂质离子、缺陷和污染物有关,这些因素会降低载流子的有效寿命。同时由于本征载流子浓度会影响非平衡载流子的复合速率,因此也会对产生复合电流有影响。

界面处存在的位错和缺陷可作为载流子的俘获中心,导致非平衡载流子在该区域发生复合。由于这一过程通常依赖于界面态在能带中的能级位置,并通过陷阱态中转完成,因此属于一种间接复合机制。这种复合不仅降低了载流子的寿命,还会引入额外的复合电流,进而影响器件的暗电流特性和整体光电性能,界面复合电流的表达式为:

$$I_{\text{if}} = \frac{q}{2} An_i \sqrt{\sigma_p \sigma_n} v_{\text{th}} N_{\text{is}} e^{\frac{q\phi}{kT}} \propto e^{\frac{qE_g}{kT}} \quad (4)$$

其中, S 是界面复合速率,  $\sigma_p, \sigma_n$  分别为电子和空穴的捕获界面,  $N_{\text{is}}$  是界面态密度,  $\phi$  是界面接触势垒。可以看出界面复合电流与外加偏压无关。表面电流主要来源于探测器材料表面或器件边缘的缺陷态和悬挂键,这些缺陷会在禁带中引入中间能级,导致载流子的非辐射复合。当器件未进行有效钝化处理时,表面会成为载流子复合中心,在反偏条件下形成沿器件表面的泄漏通道。此外,小尺寸器件由于表面积与体积之比增大,其边缘区域对整体电流的影响更为突出,导致表面电流在总暗电流中占比较高。尽管表面和界面电流的微观机制各有差异,但近年来研究发现它们都可被陷阱辅助隧穿模型统一描述,由该

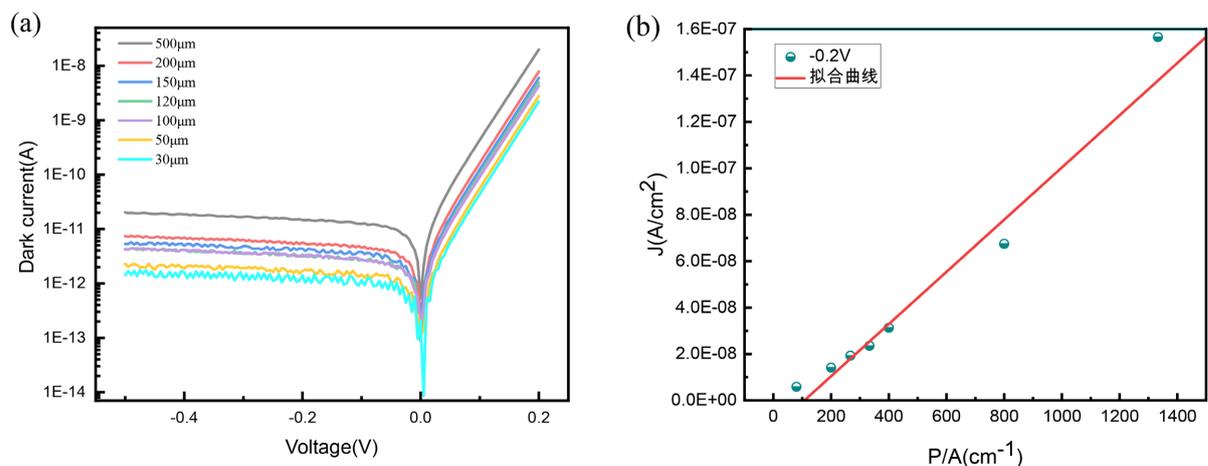
模型可得在低偏压下，一般陷阱辅助隧穿电流不起决定作用。

### 3.2. 暗电流特性

图 2(a) 是黑暗条件下不同光敏元尺寸的 I-V 特性曲线。从图中可以观察到，暗电流随着光敏元面积的增大而上升。这种趋势可能源于随着面积的增加，SRH (Shockley-Read-Hall) 复合寿命的降低所致。由于这 7 个探测器是在同一片外延材料上制备的，其本征产生电流应当基本一致，因此暗电流差异主要反映了复合过程的影响。暗电流中包含体内复合电流和表面复合电流两个组成部分。InGaAs 探测器的 P 区是通过 Zn 杂质扩散形成的，光敏元面积越大，对应 P 型 InP 帽层中引入的杂质数量也越多，进一步加剧了复合中心的密度，降低了载流子的 SRH 复合寿命，进而导致暗电流增加。因此，这种暗电流密度的增长与 SRH 复合机制有关，特别是与扩散区内杂质引起的复合中心增加密切相关。光电探测器中的暗电流主要由两部分组成：体内漏电流和侧面漏电流。其中，体内漏电流来源于器件内部的载流子热激发与复合过程，其大小通常与光敏元的面积成正比；而侧面漏电流则主要由器件上表面与钝化介质层之间的泄漏通道以及异质结界面之间的电流泄漏所引起，其强度与光敏元的周长密切相关。假设光敏元面积为  $A_0$ ，光敏元周长为  $P$ ，则探测器的总暗电流密度可表示为由面积相关项与周长相关项共同构成的形式

$$J = \frac{I}{A} = J_B + J_s \frac{P}{A} \quad (5)$$

其中， $J_B$  是体内漏电流密度， $J_s$  是侧面漏电流密度[7]。图 2(b) 展示了在  $-0.2\text{ V}$  偏压下，根据公式(5)对暗电流密度进行拟合的结果。从图中可以看出，暗电流密度与  $P/A$  参数之间呈现出良好的线性关系，说明当光敏元尺寸较小时，器件表现出更高的单位面积暗电流。这一现象可能是由于小尺寸探测器更易受到边缘效应和表面态的影响，从而导致侧面漏电流占比较大。拟合曲线的斜率反映了探测器的侧面漏电流密度，其数值约为  $1.17 \times 10^{-10}$ ，可用于评估侧面漏电对整体暗电流的贡献程度。



**Figure 2.** (a) Variation of dark current with reverse bias for photodetectors of different photosensitive area sizes. (b) Trend of dark current density as a function of the perimeter-to-area ratio ( $P/A$ ) of the photosensitive element

图 2. (a) 不同光敏元尺寸探测器在各自反向偏压条件下的暗电流变化关系；(b) 暗电流密度随光敏元周长与面积之比 ( $P/A$ ) 的变化趋势

### 3.3. 光电流特性

光敏元的尺寸直接影响其对入射光子的吸收能力以及光生载流子的收集效率，因此在光电探测器性能中起着关键作用。为进一步探究光敏元尺寸对光电流的具体影响，本文对不同面积的光敏元在多种光

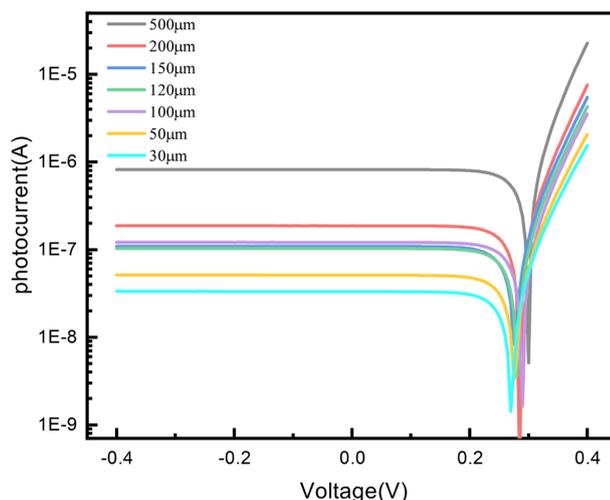
照强度下进行测试, 测量其对应的光电流响应, 并分析其变化规律。平面型 InGaAs PIN 光电探测器在黑暗和光照条件下的 I-V 特性曲线可由光电二极管的基本方程得到[8]。在黑暗条件下, PIN 结的电流表达式为:

$$I = I_0 \left( e^{qV/nkT} - 1 \right) \quad (6)$$

其中,  $I_0$  是饱和电流,  $q$  为电荷量,  $V$  为外加偏压,  $n$  为理想因子,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为温度。在光照条件下, 入射光子会在吸收层内激发出过剩载流子, 因此在电流中引入一个光生电流项  $I_{ph}$ , 此时总电流为:

$$I = I_0 \left( e^{qV/nkT} - 1 \right) - I_{ph} \quad (7)$$

其中  $I_{ph} = qAG(L+W)$  是光生电流,  $G$  是产生率,  $L$  是扩散长度,  $W$  是耗尽区宽度。这个式子表明光电流的大小与光照强度及光敏元面积密切相关, 同时表明只有在耗尽区内部以及其边缘附近、距离约为一个少子扩散长度范围内产生的光生载流子, 才能被有效收集并对光电流产生贡献。



**Figure 3.** Current-voltage (I-V) characteristics of photodetectors with different photosensitive area sizes under illumination conditions

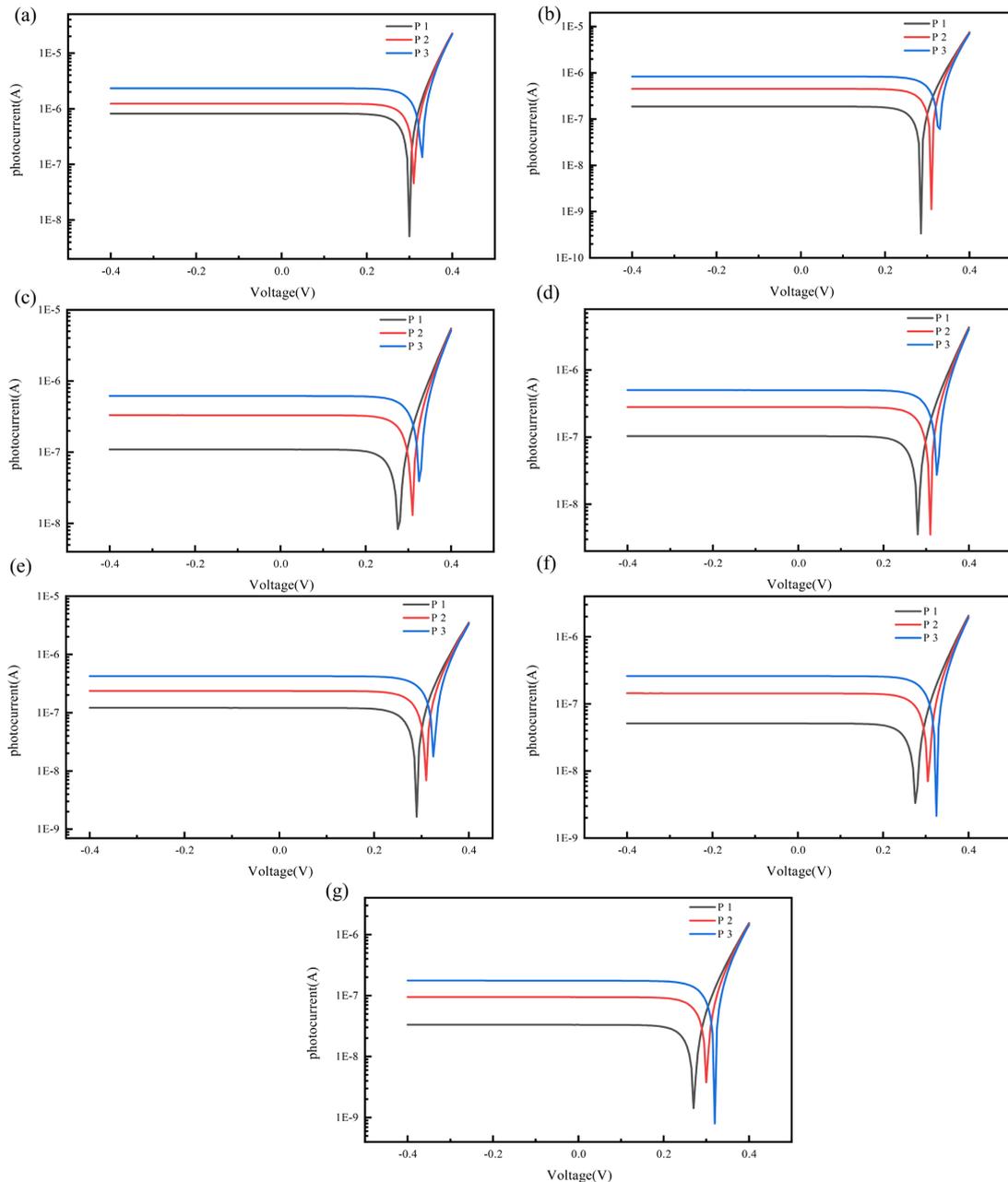
**图 3.** 在光照条件下, 不同光敏元尺寸探测器的电流 - 电压(I-V)特性曲线

图 3 显示了在相同光照强度下, 不同光敏元尺寸下的光电流与电压的关系。实验结果表明, 随着光敏元面积的增大, 器件的光电流随之上升。当光敏元尺寸增大时, 其 PN 结的横截面积  $A$  相应增大, 从而导致通过结区的光生电流增加。另一方面, 面积越大, 器件接收到的光子数量也随之增多, 进而产生更多的光生电子 - 空穴对。在反向偏压作用下, 这些光生载流子迅速在内建电场驱动下分离并被收集至电极, 导致反向光电流增强。此外, 随着反向偏置电压的提高, PN 结的耗尽层宽度也随之扩大, 更有利于光生电子 - 空穴对的有效分离, 从而提升光电流输出。因此, 光敏元尺寸的增加不仅提升了光吸收能力, 还增强了光生载流子的收集效率, 对器件整体光电响应性能具有积极作用。

图 4 展示了 7 种不同光敏元尺寸的 InGaAs 光电探测器在不同光照强度下的 I-V 特性曲线。实验结果表明, 随着光照强度的增加, 所有尺寸的探测器光电流均有不同程度的上升。这是由于较强的光照会增强器件的内光电效应, 使更多光子进入吸收层并激发出更多的光生载流子, 从而提升了光电流和器件的灵敏度。总体趋势显示, 光敏元面积越大, 其吸收光子的能力越强, 产生的光生电流也越大, 因此相应的光电流值更高。

然而, 当光敏元边长为  $500 \mu\text{m}$  和  $200 \mu\text{m}$  时, 光电流对光照强度变化的响应不够明显, 表现出一定

程度的光响应饱和现象；而其余尺寸的探测器则显示出更显著的光电流提升。这说明虽然增加光敏元面积有助于提高器件的光响应能力，但并非所有尺寸在高光照条件下都能线性增强光电流输出。总体来看，大尺寸光敏元有利于提升光子吸收效率，获得更大的光电流和信号输出，但同时也会引入更高的暗电流，并降低器件的空间分辨率。相对而言，小尺寸光敏元更适用于高分辨率成像系统，但其有效吸光面积较小，光电流较低，同时易受边缘效应和表面态影响，导致器件噪声上升。



**Figure 4.** The current-voltage (I-V) characteristics of InGaAs photodetectors with different photosensitive area sizes under varying illumination intensities are shown below (a)  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  (b)  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  (c)  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  (d)  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  (e)  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  (f)  $300 \times 300 \mu\text{m}^2$  (g)  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$

**图 4.** 不同光敏元尺寸的 InGaAs 光电探测器在不同激光强度下的电流-电压(I-V)特性, (a)  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  (b)  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  (c)  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$  (d)  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  (e)  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  (f)  $300 \times 300 \mu\text{m}^2$  (g)  $500 \times 500 \mu\text{m}^2$

## 4. 结论

本论文研究了不同面积探测器在暗态和光照条件下的电流 - 电压(I-V)特性。实验结果表明, 随着光敏元面积的增大, 光电探测器的光电流显著增强, 这是由于较大面积可吸收更多光子, 因而可以产生更多光生载流子; 同时, 反向偏压下的耗尽区扩大也有利于光生电子 - 空穴对的有效分离与收集。但是, 随着光敏元面积的增加, 光电探测器的暗电流也会上升, 暗电流密度的变化趋势揭示了 SRH 复合机制在扩散区中起主要作用。此外, 分析表明暗电流由体内漏电流和侧面漏电流两部分组成, 其中体内漏电流与光敏元面积成正比, 侧面漏电流与周长有关。通过对暗电流密度与 P/A 参数进行线性拟合, 进一步验证了侧面漏电流在小尺寸探测器中所占比重更高。另一方面, 在不同光照强度下的 I-V 测试中, 除极小尺寸器件外, 所有探测器的光电流均随光强增加而增强, 表明器件具有良好的线性响应能力。综合实验数据可知, 光敏元尺寸对探测器的光电流、暗电流密度和空间分辨率具有显著影响。合理优化光敏元尺寸, 在获得高响应的同时抑制暗电流, 是提升 InGaAs 光电探测器综合性能的关键。本研究为后续高性能红外探测器结构设计提供了实验依据与理论支持。

## 参考文献

- [1] Choi, K., Oduor, P., Dhar, N.K. and Dutta, A.K. (2023) Resonant InGaAs Detectors and Emitters for Passive and Active Imaging Application. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **59**, Article ID: 5000113. <https://doi.org/10.1109/jqe.2022.3231260>
- [2] Jiao, J., Ji, R., Yao, L., Rao, Y., Ke, S., Xu, J., et al. (2024) InGaAs/Si PIN Photodetector with Low Interfacial Recombination Rates Realized by Wafer Bonding with a Polycrystalline Si Interlayer. *Applied Physics Letters*, **124**, Article ID: 121101. <https://doi.org/10.1063/5.0192394>
- [3] Mohammadnejad, S. and Aasi, M. (2023) Analysis of Structures and Technologies of Various Types of Photodetectors Used in Laser Warning Systems: A Review. *Optical Engineering*, **62**, Article ID: 090901. <https://doi.org/10.1117/1.oe.62.9.090901>
- [4] Song, B., Shi, B., Suran-Brunelli, S.T., Zhu, S. and Klamkin, J. (2022) Low Dark Current and High Speed InGaAs Photodiode on Cmos-Compatible Silicon by Heteroepitaxy. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **28**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2021.3123052>
- [5] Ye, Y., Ma, H., Wu, J., Sun, B., Jian, J., Wei, M., et al. (2024) Flexible InGaAs Photodetector with High-Speed Detection and Long-Term Stability. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **30**, Article ID: 3801308. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2024.3350431>
- [6] 崔星宇, 林逢源, 张志宏, 唐吉龙, 方铉, 房丹, 王登魁, 李科学, 魏志鹏. 低噪声 InGaAs/Inp 雪崩光电二极管的模拟分析[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 10-16.
- [7] Zhang, J., Liu, A., Xing, H. and Yang, Y. (2022) Study on Surface Leakage Current at Sidewall in Inp-Based Avalanche Photodiodes with Mesa Structure. *AIP Advances*, **12**, Article ID: 035336. <https://doi.org/10.1063/5.0080656>
- [8] 李庆法. InGaAs 探测器的光电性能仿真与结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2016.