

纳秒 - 连续组合激光辐照硅基APD探测器电学参数变化研究

于浩然, 王 颀*, 叶文镇, 朱小勇, 张翠恒

长春理工大学物理学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年3月8日; 录用日期: 2024年5月17日; 发布日期: 2024年5月24日

摘要

硅基APD探测器是一种高灵敏度, 适用于弱光探测的光电探测器, 在激光对抗等领域广泛使用。本研究通过实验研究了纳秒 - 连续组合激光对硅基APD探测器的电学参数的影响, 旨在为激光辐照光电探测器及光电对抗领域研究的发展提供理论指导和实验依据。实验使用1064 nm (波段内)的纳秒、连续双光束组合激光对硅基APD探测器进行了辐照。实验结果表明, 随着连续激光功率密度的增加, 硅基APD探测器的输出电流“平台期”增长, 恢复时间增加, 响应度和暗电流呈现出逐渐增加的拐点现象。通过计算发现硅基APD探测器受激光辐照后, 实测的光谱响应度与实际的光谱响应度变化趋势相反, 实际的光谱响应度会随着探测器损伤程度的加深而逐渐降低直至为0, 此时的硅基APD探测器完全损伤。

关键词

光学, 硅基APD探测器, 实验研究, 电学参数

Study on the Change of Electrical Parameters of Silicon-Based APD Detector Irradiated by Nanosec-Continuous Laser Combination

Haoran Yu, Di Wang*, Wenzhen Ye, Xiaoyong Zhu, Cuiheng Zhang

School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 8th, 2024; accepted: May 17th, 2024; published: May 24th, 2024

Abstract

Silicon-based APD detector is a kind of photodetector with high sensitivity and suitable for low
*通讯作者。

文章引用: 于浩然, 王颀, 叶文镇, 朱小勇, 张翠恒. 纳秒-连续组合激光辐照硅基 APD 探测器电学参数变化研究[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(3): 368-379. DOI: 10.12677/jsta.2024.123040

light detection, which is widely used in laser countermeasures and other fields. The effect of nanosecond-continuous laser on the electrical parameters of silicon-based APD detector was investigated experimentally in order to provide theoretical guidance and experimental basis for the development of laser irradiation photodetectors and photoelectric countermeasures. The silicon-based APD detector was irradiated by a nanosecond, continuous two-beam laser at 1064 nm (within the band). The experimental results show that with the increase of continuous laser power density, the output current "plateau period" increases, the recovery time increases, and the responsiveness and dark current show a gradually increasing inflection point phenomenon. Through calculation, it is found that after the silicon APD detector is irradiated by laser, the measured spectral responsivity is opposite to the actual spectral responsivity, and the actual spectral responsivity will gradually decrease with the increase of the detector damage degree until it reaches 0, at which time the silicon APD detector is completely damaged.

Keywords

Optics, Silicon Based APD Detector, Experimental Research, Electrical Parameter

Copyright © 2024 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

硅基 APD 探测器是一种常见的光电探测器,它利用光电效应将入射光信号转换成器件内的光电子,并可以通过雪崩倍增过程对光电子放大,因此它有着响应速度快、响应度高和量子效率高等优点[1] [2] [3] [4] [5]。在形貌损伤方面,钟海荣等人[6]总结了不同光斑面积的激光对光电探测器的破坏机理,主要是光斑面积大于探测器光敏面面积时和激光光斑面积小于光敏面面积时,两种情况下探测器损伤的现象。在损伤机理方面,李云飞等人[7]通过建立仿真模型,分析了连续和脉冲两种情况下,诱导 CCD 击穿的损伤机理。赵宏宇等人[8]对脉冲串激光辐照光电二极管的热损伤进行了数值模拟,得到了激光脉冲数为 130 时对应的能量密度范围。李莉等人[9]进行了双光束组合激光辐照 CdS 光电探测器的研究,实验结果表明 CdS 光电探测器对波段内和波段外的激光均有响应,但是在这两种情况下,探测器两端电压在激光开始和停止的瞬间突变方向相反。寇子龙等人[10]阐明了纳秒 - 皮秒组合激光辐照 CCD 探测器时,探测器在热和热应力的共同作用下硅电极的完整损伤机制。李靖祎等人[11]进行了不同脉冲延时的毫秒 - 纳秒组合脉冲激光辐照硅的损伤特性的实验研究。实验结果表明当纳秒脉冲激光延迟时间为 0.8 ms 时,飞溅现象开始明显,且损伤形貌中心产生小孔。欧渊等人[12]开展了 416 nm 纳秒激光辐照 CCD 探测器的损伤效果实验,实验中观察到了 CCD 探测器从点损伤再到线损伤最后到达面损伤的过程,分别测量了损伤的能量密度阈值。陈酒等人[13]进行了长脉冲激光辐照硅基 APD 探测器的实验研究,研究结果表明探测器不仅吸收了激光热能,还需要考虑电场做功产生的焦耳热。王嶝[14]进行了长脉冲激光辐照硅基 APD 的电学研究,得到了随着长脉冲激光能量密度的增加,探测器的输出电流增加的结论。

纳秒 - 连续组合激光辐照硅基 APD 探测器电学参数变化研究可以分为在线实验研究部分的输出电流变化和离线实验研究的响应度、暗电流变化。本论文开展纳秒 - 连续组合激光辐照硅基 APD 探测器的实验研究,获得不同功率密度与不同纳秒激光延迟时间的激光辐照下不同外置偏压的硅基 APD 探测器的输出电流、暗电流和响应度等参数,给出其变化规律。为激光辐照硅基 APD 探测器的研究提供实验依据

和理论指导。

2. 理论研究

硅基 APD 光电探测器是一种具有内部增益的半导体探测器，自身具有许多独特的优势，包括体积小、受磁场影响小、低功耗、低工作电压等特点。在纳秒 - 连续组合激光与硅基 APD 光电探测器相互作用过程中，激光作用硅基 APD 光电探测器使探测器内部产生电子 - 空穴对，由于激光辐照产生的电子 - 空穴对也叫做光生载流子。由于硅基 APD 探测器此时施加了反向偏压，在硅基 APD 探测器内建电场的作用下，空穴载流子向 P 区进行漂移运动，电子载流子向 N 区进行漂移，在 P 区空穴产生积累，在 N 区电子产生积累。在这个过程中，硅基 APD 探测器的电学参数产生变化。

$$\alpha_{FC}(T) = \frac{0.5 \left(\frac{\lambda}{3.4} \right)^2}{\rho} \frac{T}{300} + 4478 \left(\frac{\lambda}{3.4} \right)^{1.5} \left(\frac{T}{300} \right)^{2.5} \exp\left(-\frac{6917}{T}\right) \quad (1)$$

$\alpha_{FC}(T)$ 是探测器的自由载流子吸收系数， ρ 是探测器的电阻率， λ 是入射光的光子波长。当光照射到半导体时，如果光子携带的能量大于等于禁带宽度那么价带电子吸收能量进入导带产生电子空穴对，这样产生的载流子称为光生载流子。

$$n_L(T, z) = \alpha_{FC}(T) \phi_0 \exp(-\alpha_{FC}(T) z) \quad (2)$$

$$\phi_0 = \frac{I_0}{h\nu} \quad (3)$$

ϕ_0 是激光的光子流密度， I_0 是激光光斑峰值功率。

半导体内的载流子有三种运动方式，分别是载流子的扩散运动、载流子的漂移运动和载流子的热运动。不存在电场时，电子只能产生热运动，但是这种自行产生的热运动是无规则的，载流子运动效果会相互抵消，载流子的产生率约等于复合率所以不会产生电流。有电场存在时，电场对载流子产生作用使载流子沿着电场的方向运动，这种载流子的运动方式就是漂移运动。电子运动方向与电场方向相反，空穴运动方向与电场方向相同，就会产生电子电流和空穴电流，产生漂移电流。

$$(J_p)_{dri}(T, r, z, t) = qN_A(r, z, t)\mu_p(T)E(T, r, z, t) \quad (4)$$

$$(J_n)_{dri}(T, r, z, t) = qN_D(r, z, t)\mu_n(T)E(T, r, z, t) \quad (5)$$

$(J_p)_{dri}(T, r, z, t)$ 是电子漂移电流密度， $(J_n)_{dri}(T, r, z, t)$ 是空穴漂移电流密度， $\mu_p(T)$ 是电子迁移率， $\mu_n(T)$ 是空穴迁移率。

$$\mu_n(T) = \mu_{\min,n} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha_n} + \frac{\mu_n^{ref}(300) \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_n}}{1 + \frac{N}{N_n^{ref} \left(\frac{T}{300} \right)^{\gamma_n}}} \quad (6)$$

$$\mu_p(T) = \mu_{\min,p} \left(\frac{T}{300} \right)^{\alpha_p} + \frac{\mu_p^{ref}(300) \left(\frac{T}{300} \right)^{\beta_p}}{1 + \frac{N}{N_p^{ref} \left(\frac{T}{300} \right)^{\gamma_p}}} \quad (7)$$

N 是总掺杂浓度， $\mu_{\min,n}$ 和 $\mu_{\min,p}$ 是电子和空穴最小的迁移率， $\mu_n^{ref}(300)$ 和 $\mu_p^{ref}(300)$ 是参考温度下，电子和空穴的迁移率， N_n^{ref} 和 N_p^{ref} 是电子和空穴参考杂质浓度， α_n 、 α_p 是迁移率参考最小指数， β_n 、

β_p 是迁移率参考指数, γ_n 、 γ_p 为杂质浓度参考指数。

扩散电流的产生与电场无关, 而是因载流子浓度不均匀而造成的扩散运动。在很多情况下, 扩散电流是非平衡载流子电流的主要形式。

$$(J_n)_{dif}(T, r, z, t) = qD_n(T) \frac{d\Delta N_D(r, z, t)}{dz} \quad (8)$$

$$(J_p)_{dif}(T, r, z, t) = qD_p(T) \frac{d\Delta N_A(r, z, t)}{dz} \quad (9)$$

$$D_n(T) = \mu_n(T) \frac{kT}{q} \quad (10)$$

$$D_p(T) = \mu_p(T) \frac{kT}{q} \quad (11)$$

$(J_n)_{dif}(T, r, z, t)$ 是电子运动产生的电流的密度, $(J_p)_{dif}(T, r, z, t)$ 是空穴运动产生的电流的密度, $D_n(T)$ 代表电子扩散系数, $D_p(T)$ 代表空穴扩散系数。

$$J_L(T, r, z, t) = q\phi_0(1-R(T)) \left(1 - \frac{\exp(-\alpha_{FC}(T)W(T, z, t))}{1 + \alpha_{FC}(T)L_n(T)} \right) - \frac{\alpha_{FC}}{\alpha_{FC} + \alpha} \exp(-(\alpha_{FC} + \alpha)W(T, z, t)) (f_{cw}(r)g_{cw}(r) + f_{ns}(r)g_{ns}(r)) \quad (12)$$

其中, $J_L(T, r, z, t)$ 是光生电流密度, $W(T, z, t)$ 是耗尽层的总长度, $L_n(T)$ 是扩散长度, $f_{cw}(r)$ 和 $g_{cw}(r)$ 分别是连续激光的空间分布和时间分布, $f_{ns}(r)$ 和 $g_{ns}(r)$ 分别是纳秒激光的空间分布和时间分布。

$$W(T, z, t) = W_{L_n}(T, z, t) + W_{L_p}(T, z, t) \quad (13)$$

$$L_n(T) = \sqrt{\tau_n D_n(T)} \quad (14)$$

$$f_{cw}(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{r_{cw}^2}\right) \quad (15)$$

$$f_{ns}(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{r_{ns}^2}\right) \quad (16)$$

$$g_{cw}(t) = \begin{cases} 1 & (0 < t \leq t_{cw}) \\ 0 & (t > t_{cw}) \end{cases} \quad (17)$$

$$g_{ns}(t) = \begin{cases} 1 & (\Delta t \leq t \leq \Delta t + \tau) \\ 0 & (0 < t < \Delta t, \Delta t + \tau < t < t_{cw}) \end{cases} \quad (18)$$

$D_n(T)$ 是电子扩散系数, τ_n 是电子寿命。

3. 实验研究

3.1. 在线实验研究

实验在线测量系统如图 1 所示, 利用数字延时脉冲器控制纳秒和连续两台激光器, 连续激光作用时间为 1 s, 纳秒激光在连续激光作用 0.3 s、0.5 s、0.7 s、0.9 s 后, 对空气中的硅基 APD 探测器进行单脉冲(10 ns)辐照, 纳秒和连续两束激光波长均为 1064 nm, 纳秒激光功率密度为 $7.95 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$, 光束半

径为 0.22 mm，连续激光功率密度分别为 3020.657 W/cm²、3936.507 W/cm²、5050.124 W/cm²、6108.414 W/cm² 4 种情况，光束半径为 0.26 mm，硅基 APD 探测器偏置电压分别为 0 V、30 V、60 V、120 V、180 V，两束激光均为高斯光。在反光镜和偏振镜的作用下两束激光均垂直于光敏面入射，利用示波器实时记录硅基 APD 探测器输出电流的变化情况。

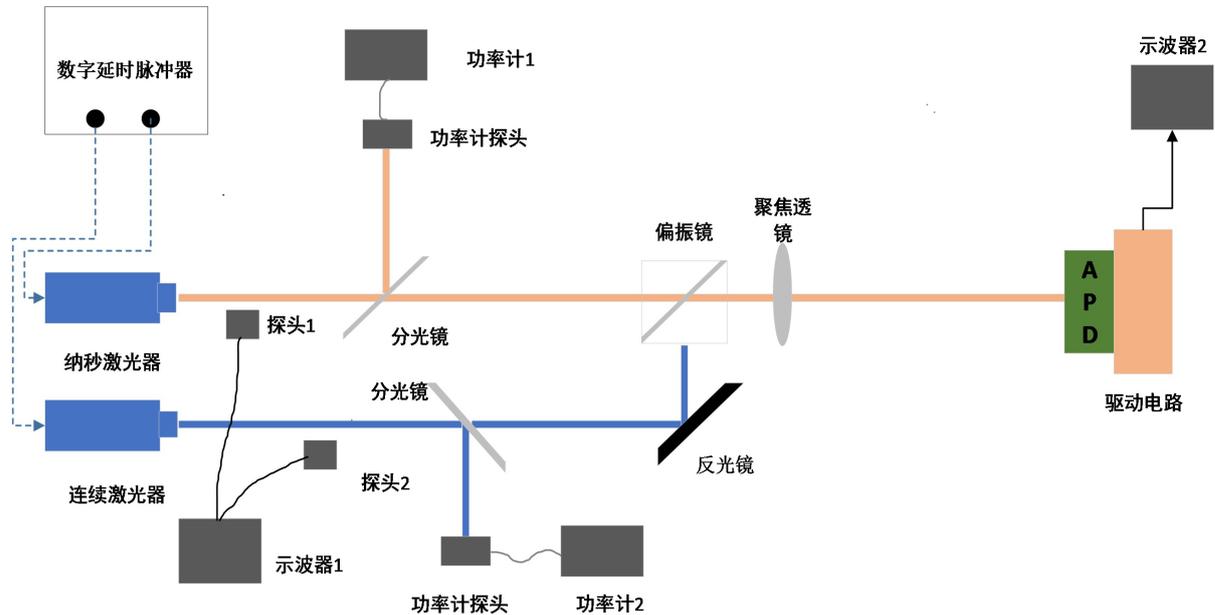


Figure 1. Online experimental device for the change of electrical parameters of silicon-based APD detector irradiated by nanosecond-continuous combination laser

图 1. 纳秒 - 连续组合激光辐照硅基 APD 探测器电学参数变化在线实验装置图

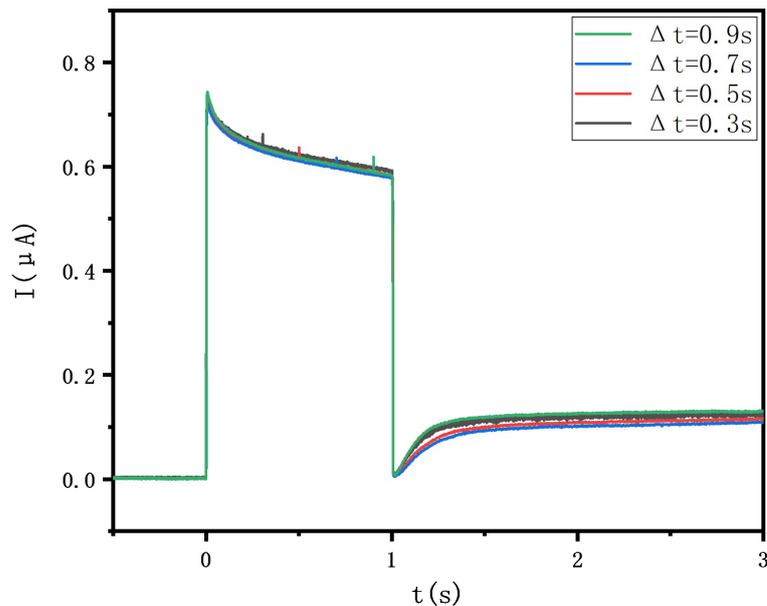


Figure 2. The output current changes with time under different conditions of nanosecond, continuous laser power density 3020.657 W/cm², bias voltage 0 V, and nanosecond laser delay time

图 2. 纳秒、连续激光功率密度 3020.657 W/cm²，偏置电压 0 V，纳秒激光延迟时间不同条件下，输出电流随时间变化关系图

图2为连续激光功率密度 3020.657 W/cm^2 ，硅基 APD 探测器偏置电压 0 V ，纳秒激光延迟时间不同条件下，硅基 APD 探测器输出电流随时间变化关系图。从图中可以看出，纳秒-连续组合激光辐照硅基 APD 探测器的过程可以分为三个阶段：初始阶段、作用阶段、恢复阶段，在组合激光的作用下，硅基 APD 探测器输出电流在初始阶段迅速升高到峰值，这是因为短时间内大量光子进入探测器，导致探测器内部的载流子浓度发生变化，从而产生一个峰值的输出电流。进入激光的作用阶段后，输出电流的值缓慢下降，这是因为探测器内部的载流子浓度逐渐恢复平衡，导致输出电流的波动逐渐减小。当激光作用结束后，输出电流快速恢复。在这个过程中，纳秒激光的作用使得探测器输出电流产生一个峰值，这是因为纳秒激光注入时，短时间内大量光子进入探测器使得探测器内部载流子浓度发生变化，输出电流产生波动，形成一个峰值，这也是探测器内部载流子浓度再平衡的过程。

图3为纳秒激光延迟时间 0.9 s ，硅基 APD 探测器偏置电压 30 V ，连续激光功率密度不同条件下，输出电流随时间变化关系图。从图中可以看出，在连续激光作用开始后，硅基 APD 探测器受强激光作用，当探测器由于温升和激光辐照产生大量载流子，在一瞬间载流子浓度会超过掺杂浓度的 $1/10$ ，导致势垒消失进入平台期。当激光作用结束后，热生载流子数随着温度的降低而降低，光生载流子随着激光作用结束而消失，势垒逐渐恢复。值得注意的是，纳秒激光作用产生的输出电流变化值很小，平均值为 $0.002142 \mu\text{A}$ 所以在偏置电压不为 0 V 时的输出电流随时间变化中不明显。

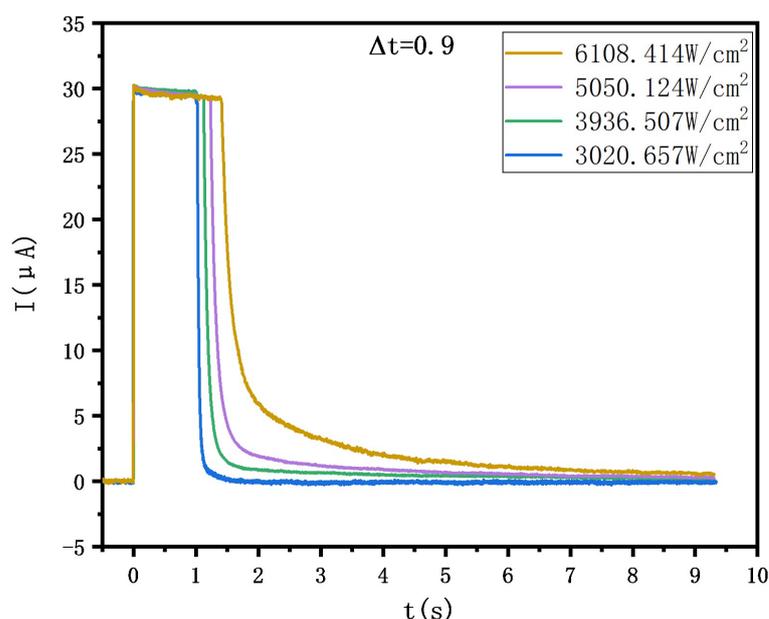


Figure 3. The output current changes with time under different conditions of nanosecond laser delay time of 0.9 s , bias voltage of 30 V , and continuous laser power density

图3. 纳秒激光延迟时间 0.9 s ，偏置电压 30 V ，连续激光功率密度不同条件下，输出电流随时间变化关系图

并且从图3中可以看出，硅基 APD 探测器输出电流的恢复时间随着连续激光功率密度的增加而变长，而硅基 APD 探测器峰值输出电流随着连续激光功率密度的增加而增大。这是由于纳秒-连续组合激光与硅基 APD 探测器相互作用的初期，探测器整体温度上升，产生光生载流子的同时热生载流子也在大量产生，在探测器内建电场的作用下载流子产生一系列的碰撞电离，极短时间内产生大量的电子-空穴对，即初始阶段，并形成一峰值。随着连续激光功率密度的增大，硅基 APD 探测器的温度升高，热生载流

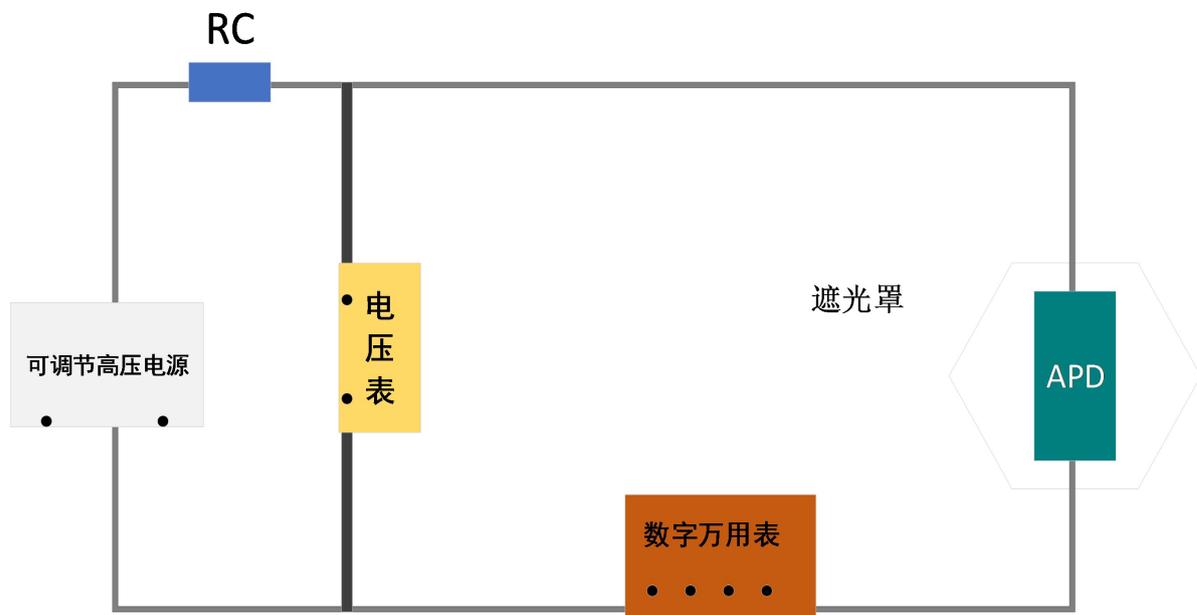


Figure 4. Schematic diagram of the dark current experimental device of silicon-based APD detector
图 4. 硅基 APD 探测器的暗电流实验装置示意图

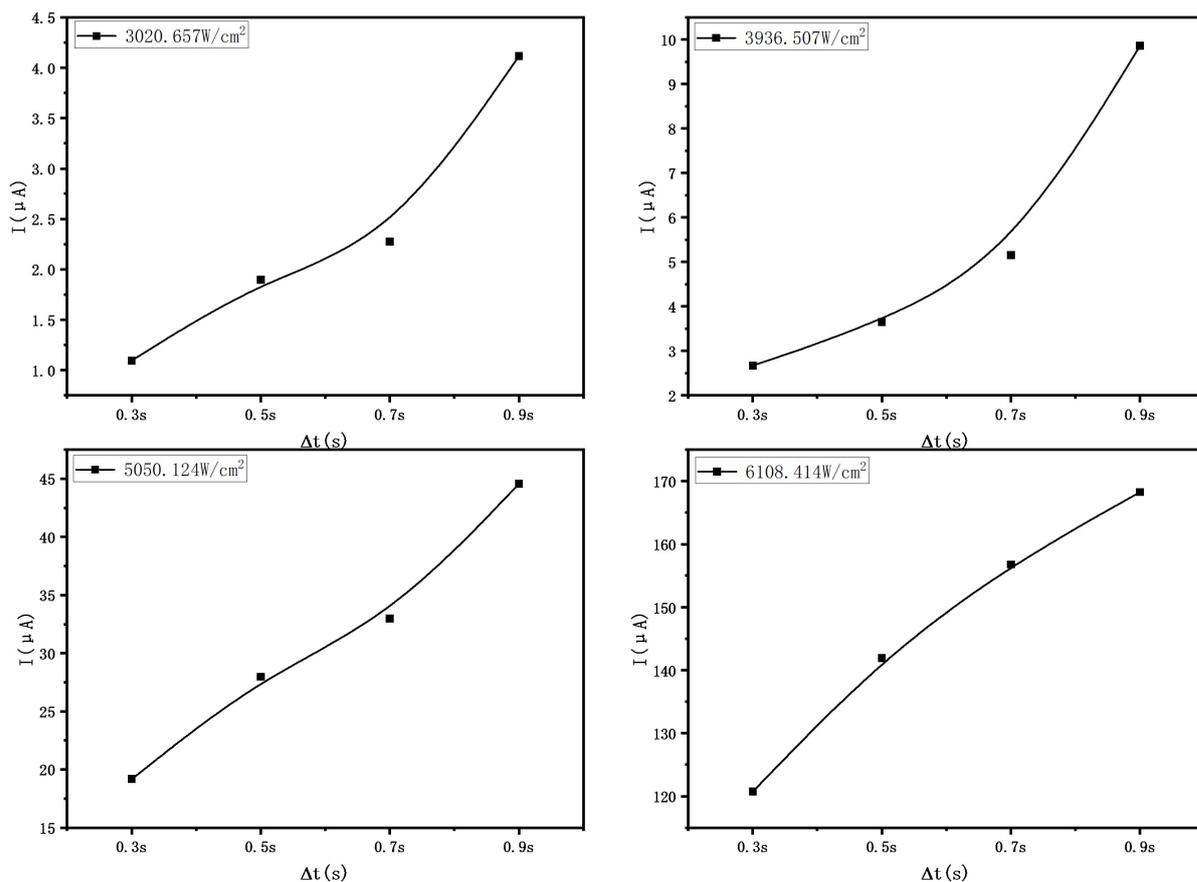


Figure 5. The relationship between the dark current of silicon-based APD detector and nanosecond laser delay time under the external bias of 0 V
图 5. 外置偏压 0 V 条件下，硅基 APD 探测器暗电流随纳秒激光延迟时间变化关系图

子数量增加, 因此峰值输出电流和恢复时间增加。

3.2. 离线实验研究

不存在光照的条件下, 光敏二极管、光导原件、光电二极管等受光元器件中流动的电流叫做暗电流。硅基 APD 探测器的暗电流是指探测器在反偏压的条件下产生的反向直流电流。在规定的偏置电压下, 用遮光罩将硅基 APD 探测器的光敏面遮挡, 用数字万用表测得其产生电流, 为硅基 APD 探测器损伤后暗电流的变化提供对比数据, 实验原理如图 4 所示。

图 5 表示在偏置电压 0 V 条件下, 组合激光辐照硅基 APD 探测器时, 暗电流随纳秒激光延迟时间的变化关系。从图中可以看出随着纳秒激光延迟时间增加, 硅基 APD 探测器的损伤程度不断加深, 暗电流数值也随之增大, 这是由于硅基 APD 探测器的暗电流由表面漏电流、载流子产生复合电流和扩散电流组成。在纳秒 - 连续组合激光辐照硅基 APD 探测器时, 探测器受到两种力的作用, 一种是由连续激光产生的热效应, 导致硅基 APD 探测器出现温度梯度, 产生热应力; 另一种是纳秒激光对硅基 APD 探测器表面产生的冲击力。当热应力的大小超过硅基 APD 探测器的晶格屈服应力后, 晶键会断裂, 导致晶格损伤, 晶体杂质增多, 扩散电流增大。随着纳秒激光作用延迟时间的增加, 纳秒激光作用时刻探测器表面温度逐渐升高, 在连续激光的热作用下, 探测器表面虽然没有达到熔点, 但是会出现变软, 晶格间作用力增大等现象, 此时, 在纳秒激光的力学作用下, 探测器表面温度越高损伤越强, 导致暗电流升高。同时, 电离杂质也会增多导致复合电流增加。纳秒激光的冲击力会损伤硅基 APD 探测器表面形貌, 增加表面缺陷和复合率, 进而导致表面漏电流增大, 最终, 这些因素共同导致暗电流的增大现象。

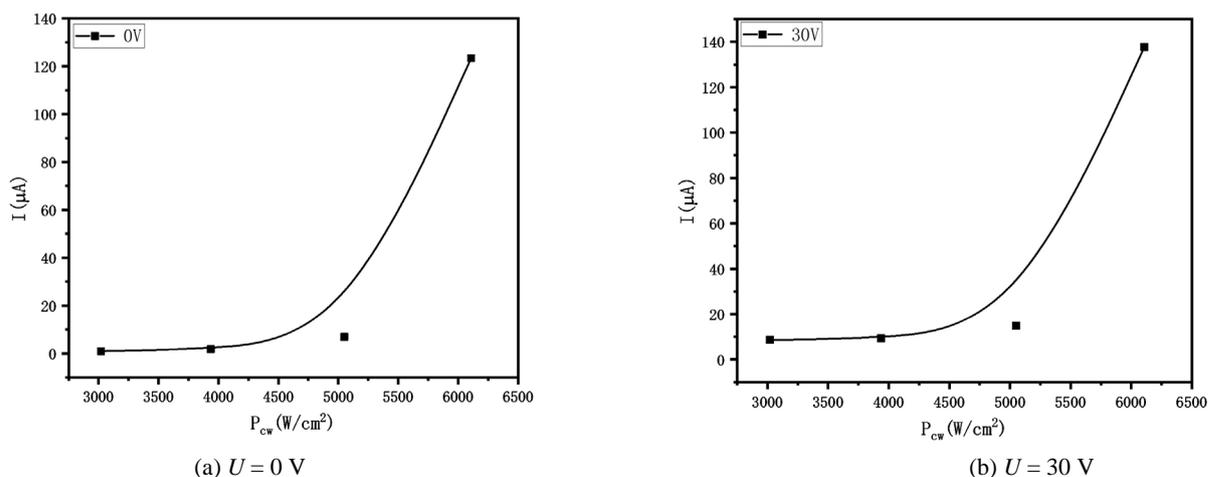


Figure 6. The relationship between the dark current of silicon-based APD detector and the continuous laser power density at different bias voltages with a nanosecond excitation delay time of 0.7 s (a) $U = 0 V$; (b) $U = 30 V$

图 6. 纳秒激光延迟时间 0.7 s, 不同偏置电压条件下, 硅基 APD 探测器暗电流随连续激光功率密度变化关系图(a) $U = 0 V$; (b) $U = 30 V$

图 6 表示纳秒激光延迟时间 0.7 s, 不同偏置电压条件下, 暗电流随连续激光功率密度的变化关系。从图中可以看出随着连续激光功率密度的增加, 暗电流不断上升, 表明随着连续激光功率密度的增加, 硅基 APD 探测器损伤程度不断加深。并且从图中可以看出连续激光功率密度从 $5050.124 W/cm^2$ 到 $6108.414 W/cm^2$ 时, 损伤程度加深十分明显, 证明纳秒 - 连续组合激光与硅基 APD 探测器相互作用时, 纳秒激光功率密度不变的条件下, 探测器的损伤阈值在这个范围内。

并且, 纳秒 - 连续组合激光辐照硅基 APD 探测器的损伤效果相较于单连续激光或单纳秒激光主要有以下两点优势: 1) 光热效应增强, 纳秒激光的脉冲时间较短, 功率密度较高, 会导致在探测器表面产生

高温区域。当连续激光与纳秒激光组合时，连续激光会持续加热高温区域，使其无法有效散热，从而加剧光热效应，导致探测器损伤。2) 载流子损伤效应增强，由于纳秒激光功率密度较高，在辐照硅基 APD 探测器时产生大量载流子，而连续激光的持续输入会继续激发和产生更多载流子。这些过多的载流子会引起局部电场的扭曲和电荷聚积，导致探测器的恢复时间变长和损伤程度加深。

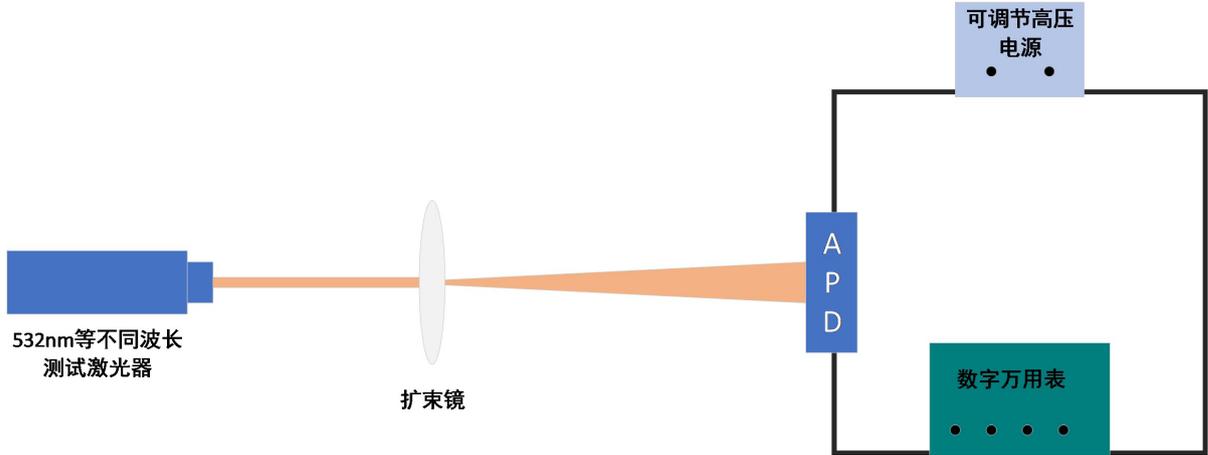


Figure 7. Spectrum responsivity measurement device
图 7. 光谱响应度测量装置图

硅基 APD 探测器在一定波长的激光辐照和偏置电压下，单位光功率产生的光电流就是硅基 APD 探测器的响应度。响应度的大小反应了硅基 APD 探测器的灵敏度，是表征探测器性能强弱的一个重要参数指标。图 7 为光谱响应度测量装置图。

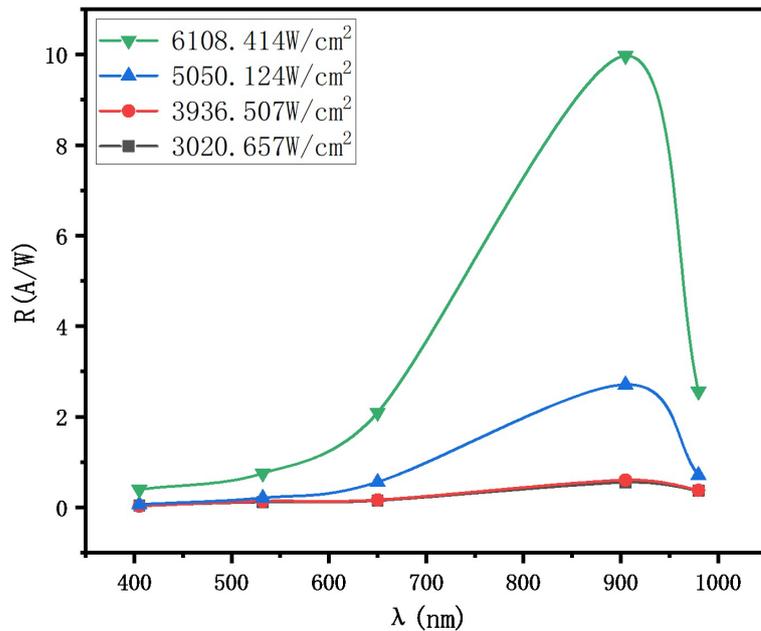


Figure 8. The spectral responsivity of silicon-based APD detector varies with wavelength under the conditions of external bias of 30 V, nanosecond laser delay time of 0.3 s, and different continuous laser power densities
图 8. 外置偏压 30 V，纳秒激光延迟时间 0.3 s，不同连续激光功率密度条件下，硅基 APD 探测器光谱响应度随波长变化关系图

图 8 表示在纳秒激光延迟时间 0.3 s, 探测器外置偏压 30 V, 连续激光功率密度不同条件下硅基 APD 探测器光谱响应度随波长的变化关系。从图中可以看出, 随着连续激光功率密度的增加, 硅基 APD 探测器的光谱响应度逐渐增加, 这是由于响应度的大小取决于光生电流和测试激光功率密度, 而测量得到的硅基 APD 探测器输出电流为光生电流和暗电流的总和。随着硅基 APD 探测器的损伤程度加深, 暗电流不断增强, 导致响应度上升, 这表明探测器的光电性能有所下降。特别是连续激光功率密度为 6108.414 W/cm^2 时, 响应度的增加非常明显, 与暗电流的表现相一致。

图 9 表示连续激光功率密度 3020.657 W/cm^2 , 探测器外置偏压 0 V 的条件下, 硅基 APD 探测器光谱响应度随纳秒激光延迟时间的变化关系。从图中可以看出, 随着纳秒激光作用延迟时间的增加, 探测器的光谱响应度值逐渐增加。这是因为在纳秒 - 连续组合激光辐照硅基 APD 探测器的过程中, 纳秒激光主要产生力学效应, 随着纳秒激光延迟时间的增加, 连续激光作用时间也变得 longer, 探测器表面温度更高。同时, 纳秒激光作用时边界条件变化也增强了热力耦合效应。这些因素共同导致了探测器的损伤效果随着纳秒激光延迟时间增加而增强。

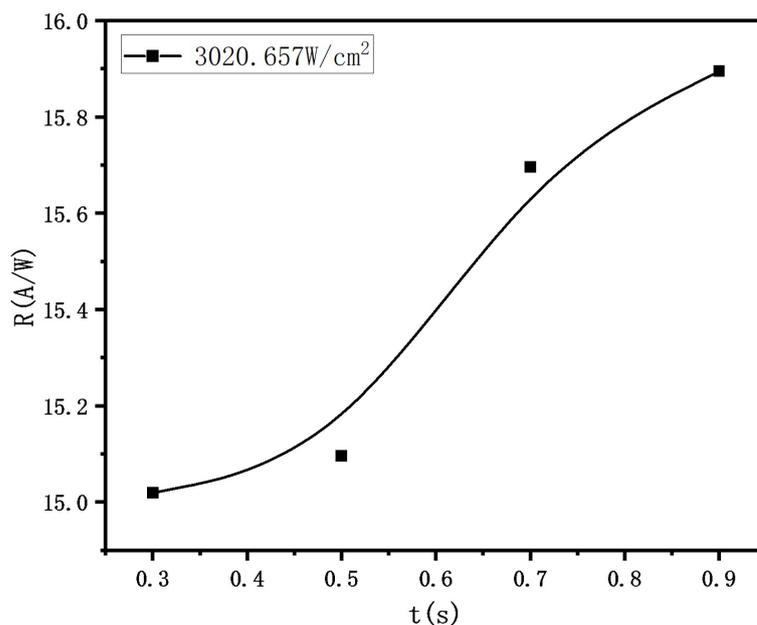


Figure 9. The spectral responsivity of silicon-based APD detector varies with nanosecond laser delay time under the condition of continuous laser power density of 3020.657 W/cm^2 and external bias of 0 V

图 9. 连续激光功率密度 3020.657 W/cm^2 , 外置偏压 0 V 条件下, 硅基 APD 探测器光谱响应度随纳秒激光延迟时间变化关系图

图 10 表示纳秒 - 连续组合激光辐照硅基 APD 探测器时, 纳秒激光作用延迟时间 0.3 s, 硅基 APD 探测器外置偏压 0 V 的条件下, 通过计算得到的实际响应度随连续激光功率密度变化的关系图。从图中可以看出, 实际响应度与实测响应度随连续激光功率密度的变化关系相反。这是因为硅基 APD 探测器的响应度是在规定波长和偏置电压下, 单位光功率所产生的光电流。可以通过给定输入激光功率时产生的光电流除以入射光的功率得到。然而, 在纳秒 - 连续组合激光辐照后, 硅基 APD 探测器产生了软损伤甚至硬损伤。随着损伤程度的加深, 暗电流逐渐增大。实测的输出电流包括了光生电流和暗电流, 随着硅基 APD 探测器损伤程度的不断加深, 探测器的输出电流中暗电流占比逐渐大于光电流比例, 导致硅基 APD 探测器的实测响应度逐渐增大, 但是实际响应度逐渐减小。

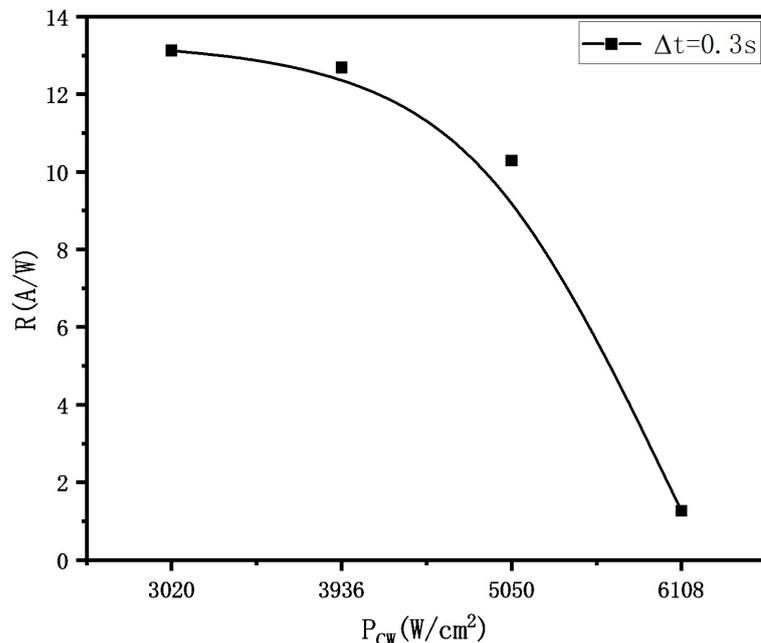


Figure 10. The relationship between the actual responsivity and the continuous laser power density under the condition that the excitation delay time is 0.3 s and the detector external bias is 0 V

图 10. 纳秒激延迟时间 0.3 s, 探测器外置偏压 0 V 的条件下, 实际响应度随连续激光功率密度变化的关系图

4. 结论

本研究结合理论和实验, 探究了纳秒 - 连续组合激光对硅基 APD 探测器电学参数的影响。我们建立了在线和离线实验系统, 监测了探测器的输出电流、暗电流和光谱响应度。结果显示, 连续激光功率密度增加导致输出电流“平台期”延长和恢复时间延迟。同时, 功率密度和延迟时间增加导致暗电流和响应度上升, 因为探测器受损导致暗电流比重增加。进一步分析发现, 随着功率密度增加, 实际响应度降低, 直至彻底失效。

综上所述, 纳秒 - 连续组合激光对硅基 APD 探测器的影响是逐渐增强的。随着连续激光和纳秒激光延迟时间的增加, 探测器表面温度、热应力和热力耦合效应增加, 导致载流子寿命减少、晶格缺陷增加和表面漏电流增大。这进一步导致暗电流增加, 实际响应度逐渐减小直至消失。该研究为光电探测器抗激光损伤提供了理论和实验支持。

参考文献

- [1] Schwarz, B., Wang, C.A., Missaggia, L., *et al.* (2017) Watt-Level Continuous-Wave Emission from a Bifunctional Quantum Cascade Laser/Detector. *ACS Photonics*, **4**, 1225-1231. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00133>
- [2] Bartoli, F., Esterowitz, L., Allen, R., *et al.* (1976) A Generalized Thermal Model for Laser Damage in Infrared Detectors. *Journal of Applied Physics*, **47**, 2875-2881. <https://doi.org/10.1063/1.323064>
- [3] 周德. 大带宽、高功率硅基锗光电探测器及其应用[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2020. <https://doi.org/10.27157/d.cnki.ghzku.2020.001668>
- [4] 高巍. 波导集成型锗/硅雪崩光电探测器研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020. <https://doi.org/10.26991/d.cnki.gdlu.2020.000536>
- [5] 方飞超, 王頔, 魏智, 等. 1064 nm 连续激光辐照硅基 APD 探测器电学性能退化的研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2022, 45(4): 25-30.

-
- [6] 钟海荣, 刘天华, 陆启生, 等. 激光对光电探测器的破坏机理研究综述[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 423-428.
- [7] Li, Y., Kou, Z., Wang, G., *et al.* (2022) Recent Advances of Short-Pulse Laser-Induced Breakdown Effect on Charge-Coupled Device Detectors. *Optics & Laser Technology*, **156**, 108533. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108533>
- [8] 赵宏宇, 魏智, 金光勇. 脉冲串激光辐照光电二极管损伤的数值研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 100-105. <https://doi.org/10.3788/LOP54.040401>
- [9] 李莉, 陆启生, 江厚满, 等. 双光束组合激光辐照光导型 CdS 光电探测器的实验研究[J]. 光学学报, 2007(1): 85-89.
- [10] Kou, Z., Li, Y., Wang, G., *et al.* (2022) Temporal Evolution Characteristics and Mechanism Analysis of CCD Breakdown Induced by Nanosecond and Picosecond Pulse Lasers. *Optik*, **262**, 169313. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169313>
- [11] Li, J.Y., Zhang, W., Zhou, Y., Zhang, X.Y. and Jin, G.Y. (2020) Experimental Study of the Damage Morphology Induced by the Millisecond-Nanosecond Combined-Pulse Laser with Different Pulse Delay on Silicon. *Proceedings of the SPIE*, **11780**, id. 117800R 5. (prepublish) <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165904>
- [12] 欧渊, 石根柱, 李点点, 吕勇, 牛春晖. 416 nm 纳秒脉冲激光对 CCD 损伤机理研究[J]. 应用光学, 2021, 42(3): 534-541.
- [13] 陈酒, 张焯, 王嶝, 等. 长脉冲辐照在线硅基 APD 的温度研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(3): 15-18.
- [14] 王嶝. 长脉冲激光辐照硅基 APD 光电探测器研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2018.