

氙灯对硅PIN光电二极管的损伤规律研究

陈思琪 杜隆坤 曹保锋 李登辉 宁王师

Investigation of damage rules in silicon PIN photodiodes under xenon lamp irradiation

CHEN Si-qi, DU Long-kun, CAO Bao-feng, LI Deng-hui, NING Wang-shi

引用本文:

陈思琪, 杜隆坤, 曹保锋, 李登辉, 宁王师. 氙灯对硅PIN光电二极管的损伤规律研究[J]. *中国光学*, 2026, 19(3): 648–660. doi: 10.37188/CO.2026–0024

CHEN Si-qi, DU Long-kun, CAO Bao-feng, LI Deng-hui, NING Wang-shi. Investigation of damage rules in silicon PIN photodiodes under xenon lamp irradiation[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(3): 648–660. doi: 10.37188/CO.2026–0024

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026–0024>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电泵浦有机发光二极管衬底侧向辐射研究

Lateral radiation of the substrate of electrically pumped organic light-emitting diodes

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 750 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0190>

电泵浦有机发光二极管衬底侧向辐射研究

Lateral radiation of the substrate of electrically pumped organic light-emitting diodes

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 750 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0190>

纳秒脉冲激光对背照式CMOS探测器组件损伤机理研究

Investigation of laser-induced damage mechanisms in back-illuminated CMOS detector modules under nanosecond pulsed irradiation

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1277 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0090>

纳秒脉冲激光对背照式CMOS探测器组件损伤机理研究

Investigation of laser-induced damage mechanisms in back-illuminated CMOS detector modules under nanosecond pulsed irradiation

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1277 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0090>

波导/势垒界面插入GaInP和GaAsP对InAlGaAs量子阱808-nm激光二极管载流子泄漏的影响

Effect of GaInP and GaAsP inserted into waveguide/barrier interface on carrier leakage in InAlGaAs quantum well 808-nm laser diode

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 186 <https://doi.org/10.37188/CO.EN–2024–0006>

波导/势垒界面插入GaInP和GaAsP对InAlGaAs量子阱808-nm激光二极管载流子泄漏的影响

Effect of GaInP and GaAsP inserted into waveguide/barrier interface on carrier leakage in InAlGaAs quantum well 808-nm laser diode

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 186 <https://doi.org/10.37188/CO.EN–2024–0006>

TDLAS气体激光遥测高灵敏光电探测电路设计

Design of a highly sensitive photoelectric detection circuit for TDLAS gas laser telemetry

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 198 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0107>

TDLAS气体激光遥测高灵敏光电探测电路设计

Design of a highly sensitive photoelectric detection circuit for TDLAS gas laser telemetry
中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 198 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0107>

多波长拉曼激光对CCD损伤实验研究

Experimental study on CCD damage by multi-wavelength Raman lasers
中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 373 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0228>

多波长拉曼激光对CCD损伤实验研究

Experimental study on CCD damage by multi-wavelength Raman lasers
中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 373 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0228>

脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究

Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser
中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 256 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0139>

脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究

Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser
中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 256 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0139>

电泵浦有机发光二极管衬底侧向辐射研究

Lateral radiation of the substrate of electrically pumped organic light-emitting diodes
中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 750 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0190>

纳秒脉冲激光对背照式CMOS探测器组件损伤机理研究

Investigation of laser-induced damage mechanisms in back-illuminated CMOS detector modules under nanosecond pulsed irradiation
中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1277 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0090>

波导/势垒界面插入GaInP和GaAsP对InAlGaAs量子阱808-nm激光二极管载流子泄漏的影响

Effect of GaInP and GaAsP inserted into waveguide/barrier interface on carrier leakage in InAlGaAs quantum well 808-nm laser diode
中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 186 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0006>

TDLAS气体激光遥测高灵敏光电探测电路设计

Design of a highly sensitive photoelectric detection circuit for TDLAS gas laser telemetry
中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 198 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0107>

多波长拉曼激光对CCD损伤实验研究

Experimental study on CCD damage by multi-wavelength Raman lasers
中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 373 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0228>

脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究

Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser
中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 256 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0139>

文章编号 2097-1842(2026)03-0648-13

氙灯对硅 PIN 光电二极管的损伤规律研究

陈思琪, 杜隆坤, 曹保锋, 李登辉*, 宁王师*
(核生化灾害防护化学全国重点实验室, 北京 102205)

摘要:为研究硅 PIN 光电二极管(简称 PIN 管)在氙灯辐照下的性能退化规律和损伤机理,本研究定义了 PIN 管的探测能力,搭建了 50 kW 氙灯损伤实验平台,以 S5106 型 PIN 管为对象,通过实时监测其输出光电流和表面温度的变化,探究了 PIN 管损伤时探测能力退化的影响因素和损伤阈值特性。基于一维热扩散理论建立了 PIN 管的损伤阈值模型,通过与实验阈值结果进行对比,验证了模型的准确性。根据探测能力是否可恢复,将 PIN 管损伤分为软损伤和硬损伤。软损伤时探测能力与辐照时间、表面温度均呈非线性负相关关系;硬损伤时辐照度阈值与辐照时间的平方根成反比,与损伤阈值模型一致,其损伤阈值对应的最小辐照度约为 6.6 W/cm^2 (对应辐照时间约为 382 s),此时表面温度范围为 $(385.77 \pm 4.16) \text{ }^\circ\text{C}$ 。理论分析表明,软损伤源于热效应导致的载流子迁移率下降及漏电流增大,硬损伤源于热效应导致的光学窗口硅橡胶熔融开裂与 PN 结热失效。本研究明确了 PIN 管软损伤和硬损伤的影响因素及规律,并确定了其硬损伤阈值,为宽谱强光探测场景下 PIN 管的性能评估与防护设计提供了量化依据。

关键词:硅 PIN 光电二极管;氙灯;宽谱强光;损伤规律;阈值;热效应

中图分类号:O472

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2026-0024

CSTR:32171.14.CO.2026-0024

Investigation of damage rules in silicon PIN photodiodes under xenon lamp irradiation

CHEN Si-qi, DU Long-kun, CAO Bao-feng, LI Deng-hui*, NING Wang-shi*

(State Key Laboratory of Chemistry for NBC Hazards Protection, Beijing 102205, China)

* Corresponding author, E-mail: lidenghui@mail.nankai.edu.cn; ning_wangshi@sina.com

Abstract: This study investigates the performance degradation and underlying damage mechanisms of silicon PIN photodiodes under xenon lamp irradiation. To this end, detectivity is defined and operationalized. A 50 kW xenon lamp irradiation test platform was established, where the S5106-type silicon PIN photodiodes were selected as the representative test device. Real-time monitoring of output photocurrent and surface temperature enabled systematic analysis of the factors governing detectivity degradation, as well as characterization of the damage threshold. A damage threshold model for silicon PIN photodiodes was developed based on the one-dimensional heat diffusion equation. Model accuracy was verified by comparing with the experimentally measured threshold data. Silicon PIN photodiode damage was categorized into two regimes—soft damage and hard damage—based on the recoverability of detectivity. Under soft damage conditions, the de-

收稿日期:2026-02-26; 修订日期:2026-03-13

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2024YFF1400900)

Supported by National Key Research and Development Program Project (No. 2024YFF1400900)

tectivity of the device exhibited a nonlinear negative correlation with both irradiation time and surface temperature. The hard damage irradiance thresholds followed an inverse-square-root dependence on irradiation time, a trend fully consistent with the damage threshold model. Hard damage was observed at a minimum irradiance of approximately 6.6 W/cm^2 , corresponding to an irradiation time of about 382 s. Under this threshold condition, the surface temperature ranged within $(385.77 \pm 4.16)^\circ\text{C}$. Theoretical analysis indicated that soft damage primarily arose from thermally induced degradation of carrier mobility and increased leakage current. Conversely, hard damage resulted from melting and cracking of the silicone rubber optical window, as well as thermally induced functional failure of the PN junction. The findings provide a quantitative basis for performance evaluation and protection design of silicon PIN photodiodes employed in broad-spectrum high-intensity optical detection scenarios.

Key words: silicon PIN photodiode; xenon lamp; broad-spectrum high-intensity light; damage rules; threshold; thermal effects

1 引言

硅PIN光电二极管(简称PIN管)凭借高灵敏度(nA级别)、皮秒级响应速度及宽谱响应范围(300~1100 nm)等优势^[1-3],在核爆探测^[4]、近日轨道光学导航^[5]、太阳辐射监测^[6]等宽光谱强光探测领域得到广泛应用。然而,持续强光辐照会导致PIN管表面升温^[7],发生熔化、蒸发、汽化及再凝固等物理现象^[8],引发硅晶格损伤出现缺陷^[9],最终导致其性能下降、暗电流增大^[10],甚至永久性失效^[11],制约了其在极端强光环境中的可靠性。

近年来,国内外学者围绕PIN管的强光响应与损伤特性开展了系列研究,但相关工作多聚焦于激光对PIN管的损伤效应。目前,研究人员已利用连续^[12-13]和脉冲激光^[14-16]探究了激光辐照下PIN管的损伤规律^[17]。研究发现,激光辐照会导致PIN管响应度、灵敏度下降,结电容、漏电流增大。而对于PIN管的损伤阈值研究,M. R. Kruer等人通过激光辐照实验,探究了PIN管损伤阈值的激光脉宽依赖性和波长依赖性,提出了损伤阈值的理论模型^[18-19]。罗福等人进一步研究了激光脉宽对PIN管损伤阈值的影响,发现在一定脉宽范围内,损伤所需激光能量密度近似与脉宽的平方根成正比^[20]。后续研究通过分析激光辐照后PIN管表面温度、损伤形貌和内部结构的变化^[21],揭示了热熔化、热应力裂纹、掺杂重分布及缺陷生成等热效应损伤机制^[22-24]。现有研究采用激光作为光源,波长单一^[25-26],其损伤规律难以直接应

用于宽谱强光场景。

氙灯具有宽光谱覆盖、高功率密度、与太阳光谱高度重合的特性^[27-28],是模拟宽谱强光环境的理想光源,常被用于太阳光模拟器^[29]和核爆光模拟器^[30]等。目前关于氙灯辐照PIN管的研究报道较少,N. H. Reich等人^[31]利用氙灯研究不同光照强度对晶体硅电池的二极管相关特性的影响,发现改变辐照度与温度可以调控载流子行为、能带结构及内阻,进而使PIN管性能显著下降^[32]。但此类研究存在局限性:一是氙灯辐照度较低^[33],远低于PIN管硬损伤阈值,难以揭示强辐照下PIN管的失效机理;二是研究多针对损伤后的PIN管进行分析,极少在辐照过程中,通过实时测量探究其性能的退化过程。

针对上述问题,本研究搭建50 kW氙灯实验平台,实时监测PIN管输出电流、表面温度等参数,揭示PIN管损伤时探测能力与辐照度、辐照时间、表面温度之间的关系。通过实验得到损伤辐照度阈值、辐照时间阈值及温度阈值,并结合损伤阈值模型验证三者之间的关系。本文结构安排如下:第二节介绍了损伤实验平台组成与参数测量手段,并定义了探测能力 D ;第三节分别介绍了在不同损伤状态下,PIN管探测能力 D 的变化与影响因素,得到PIN管损伤阈值,得到的实验结果与阈值理论模型相符合;最后从内部载流子运动、等效电路变化、机械损伤和伏安特性曲线角度分析损伤机理。研究成果可为PIN管在宽谱强光场景下的防护设计以及可靠性评估提供理论依据与实验支撑。

2 PIN 管损伤实验系统

为研究 PIN 管在氙灯辐照下的损伤规律,搭建氙灯损伤实验平台对 PIN 管进行辐照损伤实验。PIN 管受损时,表现为光电转换能力下降,即

输出光电流减小。因此,通过实时监测 PIN 管输出光电流大小,可知道其接受辐照过程中的损伤情况。实验装置如图 1 所示,包括氙灯光源、快门、辐照度测量系统、硅 PIN 光电二极管光电流测量电路、示波器和红外测温仪。

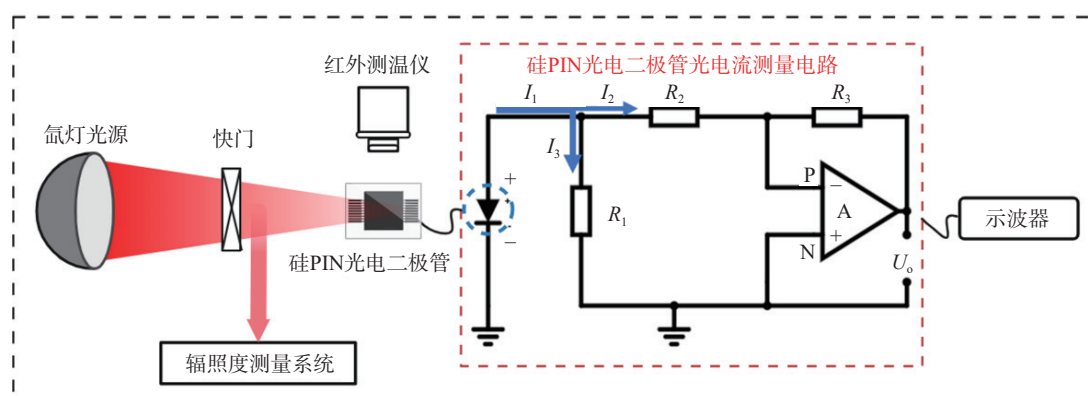


图 1 氙灯损伤平台及 PIN 管光电流测量电路示意图。图中 I_1 为 PIN 管输出光电流, I_2 为流过反相输入端电阻 R_3 的电流, I_3 为流过分流电阻 R_1 的电流, U_o 为运算放大器 A 的输出电压

Fig. 1 Schematic diagram of Xenon lamp damage test platform and silicon PIN photodiode photocurrent measurement circuit.

I_1 : photocurrent of silicon PIN photodiode; I_2 : current through inverting input resistor (R_3); I_3 : current through shunt resistor (R_1); U_o : output voltage of operational amplifier A

本文选用 S5106 型硅 PIN 光电二极管 (Hamamatsu, 光敏面 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 响应波长为 $320 \sim 1100\text{ nm}$) 作为研究对象, 实验时将其置于光源焦平面处。光源由 10 个 5 kW 氙灯 (XHA5000, 光谱范围为 $320 \sim 2500\text{ nm}$, 色温 6000 K) 组成的氙灯阵列及光学聚焦系统构成, 靶面光斑直径约 3 cm , 辐照度范围 $10^{-1} \sim 10^2\text{ W/cm}^2$ 且可调, 能量均匀分布。实验过程中氙灯输出光信号均为稳定直流信号。实验在室温条件下进行, 实验室环境温度保持在 $(25 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$ 。在辐照开始前, PIN 管处于热平衡状态, 其初始温度与环境温度保持一致。

参数监测包括 3 个方面: 通过辐照度测量系统, 实时监测靶面辐照度 $E(\text{W/cm}^2)$; 利用红外测温仪 (ATR61, 响应波段 $8\text{ }\mu\text{m} \sim 14\text{ }\mu\text{m}$, 测温范围 $-20\text{ }^\circ\text{C} \sim 550\text{ }^\circ\text{C}$) 实时监测 PIN 管表面温度; 利用 PIN 管光电流测量电路和示波器 (Tektronix MDO34) 记录 PIN 管输出电流的实时变化。

电路中 I_1 为 PIN 管受到强光辐照时的输出电流, I_2 为流过反相输入端电阻 R_3 的电流, I_3 为流过分流电阻 R_1 的电流, $-U_o$ 为运算放大器 A (LM258P) 的输出电压, 其中 $R_1=0.05\text{ }\Omega$ (分流电

阻)、 $R_2=10\text{ }\Omega$ (反相输入端电阻), $R_3=100\text{ }\Omega$ (跨接电阻), I_1 大小可由示波器测得的 U_o 计算得到:

$$I_1 = \frac{(R_1 + R_2)}{(R_1 R_3)} U_o \quad (1)$$

为了分析 PIN 管损伤程度, 即光电转换能力下降程度, 本研究定义探测能力 (D) 为 PIN 管在实验过程中实时输出电流和初始输出电流 (未损伤) 的比值 (见式 (2)):

$$D = \frac{I_1'}{I_1} \quad (2)$$

式中, I_1 为初始输出电流, I_1' 为实时输出电流。

3 PIN 管的损伤结果和讨论

实验中通过改变氙灯的输出辐照度, 同步监测 PIN 管实时输出电流的动态变化, 计算探测能力的变化情况, 从而了解其光电转换能力的退化程度, 分析其损伤规律。根据 PIN 管探测能力受损后是否可恢复, 可以将 PIN 管损伤划分为“软损伤”与“硬损伤”两类。软损伤表现为辐照过程

中 PIN 管性能退化, 停止辐照后功能可恢复^[34]; 硬损伤则表现为辐照后 PIN 管完全丧失探测能力, 且损伤具有不可逆性^[35]。

3.1 软损伤演化规律

3.1.1 输出电流退化特性

测定 PIN 管在不同辐照度下, 接受辐照瞬间产生的初始输出电流, 以及辐照过程中的实时输出

电流的变化情况。根据实时输出电流偏离初始输出电流的程度, 判定 PIN 管输出光电流性能的退化程度。图 2(彩图见期刊电子版)为不同辐照度条件下, PIN 管输出电流的变化规律。不同辐照度对应初始输出电流如图 2(a)所示, 初始输出电流大小与辐照度呈正相关^[19]。随着辐照度增加, 初始输出电流的增长趋势逐渐下降, 并趋近于饱和。

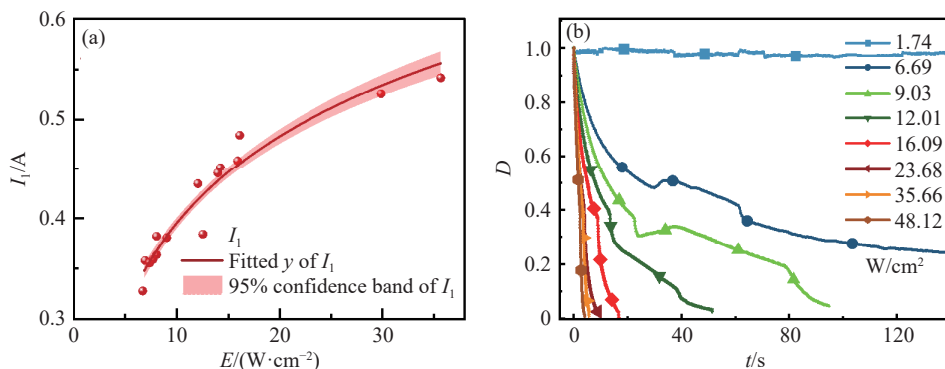


图 2 PIN 管输出电流退化规律。(a) 无损情况下, 初始输出电流 I_1 随辐照度 E 变化曲线。(b) 不同辐照度 E 下, PIN 管探测能力 D 随辐照时间 t 变化曲线

Fig. 2 Output current degradation rules in the silicon PIN photodiode. (a) Initial output current (I_1) versus irradiance (E) for the undamaged device. (b) Detectivity (D) versus irradiation time (t) at various irradiance levels (E)

不同辐照度条件下, PIN 管探测能力随辐照时间增加的变化趋势如图 2(b)所示。当低辐照度($E=1.74 W/cm^2$)直流辐照 200 s 时, 探测能力基本保持不变, 表明此时 PIN 管工作正常。PIN 管的探测能力初始值($t=0$ 时)都为 1, 当辐照度增加时 D 随辐照时间增加逐渐下降。表明此时 PIN 管输出电流信号出现失真, 将该状态定义为软损伤。PIN 管软损伤时, 辐照度越大, 探测能力下降速率越快。

3.1.2 PIN 管软损伤的温度相关性

实验显示, PIN 管输出电流的退化与表面温度变化存在显著相关性。如图 3(彩图见期刊电子版)所示(以部分辐照度为例): 在不同辐照度下, PIN 管的探测能力与表面温度呈现显著的非线性负相关关系。在辐照初始阶段, 探测能力随温度升高下降较快, 随着辐照持续, 热扩散逐渐建立并趋于稳定后, 下降速率趋缓, 整体变化趋势可用指数衰减函数描述。不同辐照度条件下, PIN 管探测能力随温度的变化可以用式(3)高度拟合:

$$D = a + be^{cT} \quad (3)$$

式中, D 为探测能力, T 为表面温度($^{\circ}C$), a 为理论

高温极限下的探测能力, 实际中只能无限逼近于零, b 为探测能力随温度变化的幅度, c 为温度系数, 反映探测能力随温度升高的衰减速率。实验中所有辐照度条件下, 探测能力和温度利用式(3)拟合所得参数如表 1 所示($R^2 > 0.999$)。

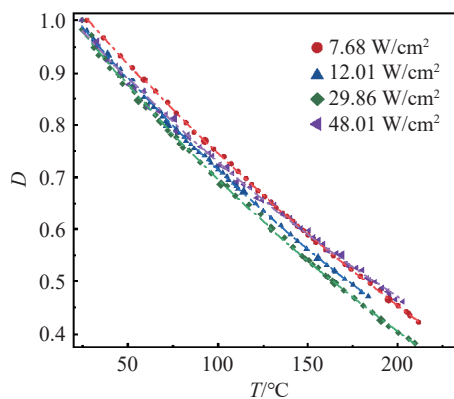


图 3 不同辐照度下, PIN 管探测能力 D 随表面温度 T 变化曲线

Fig. 3 Detectivity (D) versus surface temperature (T) at various irradiance levels

为阐明探测能力与表面温度之间的负线性关系, 从载流子迁移率温度依赖性角度进行分析。辐照过程中, PIN 管在响应波长范围内能量吸收

较强,产生热效应,导致光敏区域表面温度升高^[16],高温加剧内部载流子与晶格原子或声子碰撞^[36],产生散射现象,导致能量损失并改变载流子运动方向,最终造成迁移率下降^[37]。同时,热效应还会诱发 PIN 管硅晶格内缺陷的形成和生长^[38-39]以及

杂质扩散^[40],导致更高的复合速率,降低少数载流子寿命,还会造成迁移率下降。因此, PIN 结构内部载流子迁移率与温度呈负相关^[41-42]。载流子迁移形成光电流,因此热效应会导致输出电流减小,探测能力下降。

表 1 PIN 管探测能力的温度相关性拟合参数取值 ($R^2>0.999$)

Tab.1 Fitting parameters for the temperature-dependent correlation of detectivity of silicon PIN photodiodes ($R^2>0.999$)

$E/(W\cdot cm^{-2})$	6.69	6.93	7.36	7.68	8.04	9.03	12.01	14.21	15.89	16.09	29.86	35.66	42.47	48.01
a	-0.68	-0.35	-0.35	-0.68	-0.82	-0.80	-0.42	-0.43	-0.17	-0.17	-0.41	-0.28	-0.28	-0.27
b	1.77	1.47	1.46	1.79	1.93	1.89	1.51	1.51	1.25	1.23	1.50	1.35	1.40	1.35
c	-0.002	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.004	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003

结合 PIN 管等效电路讨论 PIN 管探测能力变化的温度依赖性^[43]。图 4 为 PIN 管工作时的等效电路。

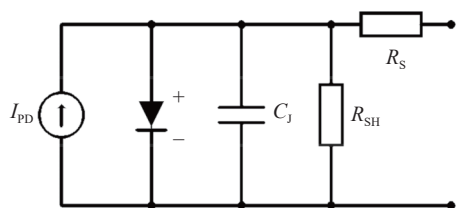


图 4 PIN 管内部等效电路,其中 I_{PD} 为光电流, C_J 为等效电容, R_{SH} 为并联电阻, R_S 为串联电阻

Fig. 4 Internal equivalent circuit of the silicon PIN photodiode. I_{PD} : photocurrent; C_J : junction capacitance; R_{SH} : shunt resistance; R_S : series resistance

其中等效电容 C_J 由偏压决定,并联电阻 R_{SH} 通常为数千欧至数兆欧,串联电阻 R_S 一般小于几十欧, PIN 管整体电阻主要取决于串联电阻^[44]。研究表明, PIN 管电阻(近似为串联电阻)与温度关系如式(4)所示^[45]:

$$\frac{R(T)}{R(T_0)} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2-m}, \quad (4)$$

式中: m 为载流子寿命因子, $R(T)$ 表示温度为 T 时 PIN 管的电阻, $R(T_0)$ 表示初始温度为 T_0 时 PIN 管的电阻。实验表明,不同 PIN 管的 m 值存在差异,且与结电容呈负线性相关^[46]。根据实验所用 PIN 管型号的参数手册可知,实验中 PIN 管结电容大于 100 pF,且随温度的升高而增加^[47]。综上可得实验中 PIN 管的 $m<1$,代入式(4)计算得温度系数 $(2-m)$ 为正且大于 1,表明串联电阻随温度升高

显著增大^[48]。根据等效电路的电流分配规律,串联电阻增大不仅会增强并联电阻的分流效应,直接导致漏电流增大^[49],还会使串联电阻两端的电压升高,进而促使等效二极管两端电压同步增加。当二极管两端电压接近或达到导通阈值时,部分光电流会以正向导通电流的形式非线性流向地,最终导致有效输出光电流减小^[50],探测能力下降。由于辐照产生的热效应导致 PIN 管升温,因此强光辐照下 PIN 管性能退化由热效应主导。

3.2 硬损伤表现及机理分析

3.2.1 硬损伤阈值变化规律

当辐照度和辐照时间超过特定临界值时, PIN 管探测功能完全失效且不可逆,在实验中表现为在某一辐照时刻, PIN 管实时输出电流断崖式下降并不再对光进行响应,且停止辐照后无法恢复。将该临界值定义为硬损伤阈值,其由辐照度与辐照时间共同决定。

为确定这一阈值,本研究对比了不同辐照度下 PIN 管损伤前后的光电流输出的变化情况。如图 5(彩图见期刊电子版)所示,辐照度为 6.39 W/cm² 时,持续辐照 500 s 后 PIN 管仍保持响应能力,未发生硬损伤;当辐照度增大至 6.69 W/cm² 且辐照时间达到 382 s 时,输出电流大幅度下降并不再响应,表明 PIN 管已发生硬损伤;当辐照度持续增大至 7.36 W/cm² 和 8.04 W/cm²,辐照时间分别达到 209 s 和 89 s 时,同样出现硬损伤现象。结果表明随着辐照度增加, PIN 管达到硬损伤所需辐照时间逐渐下

降。进一步延长直流(辐照度为 6.39 W/cm²)的辐照时间, 实验结果如图 5(b) 所示。可见, 在 900~1200 s 辐照时间内, 输出电流基本保持稳定, 未出现断崖式下降的现象, 说明 PIN 管在该辐照条件下进入输出稳定状态, 可以认为该辐照度下不会

发生硬损伤。因此 6.69 W/cm² 约为引发 PIN 管硬损伤的最小辐照度阈值, 当辐照度低于该值时, 即使进一步增加辐照时间, PIN 管输出电流下降至一定水平后会趋于稳定, 在实验观测时间范围内不会出现不可逆失效现象。

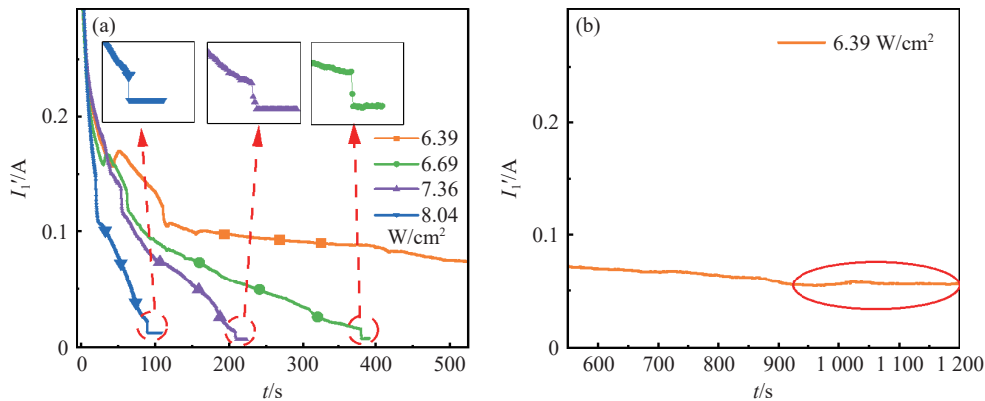


图 5 不同辐照度下, PIN 管的 I_1' 随时间变化情况。(a) PIN 管发生硬损伤的 I_1' 变化情况。(b) 辐照度为 6.39 W/cm² 时, PIN 管的 I_1' 下降至稳定的情况

Fig. 5 Variation of I_1' with time(t) under different irradiances. (a) Variation of I_1' under hard damage conditions in a silicon PIN photodiode. (b) Variation of I_1' of the silicon PIN photodiode decreasing to stability at an irradiance of 6.39 W/cm²

3.2.2 硬损伤的温度相关性

为了确定温度对 PIN 管硬损伤的影响, 通过监测 PIN 管产生硬损伤时的表面温度, 研究硬损

伤的发生与温度之间的相关性。不同辐照度实验中, PIN 管表面温度变化情况如图 6(彩图见期刊电子版) 所示。

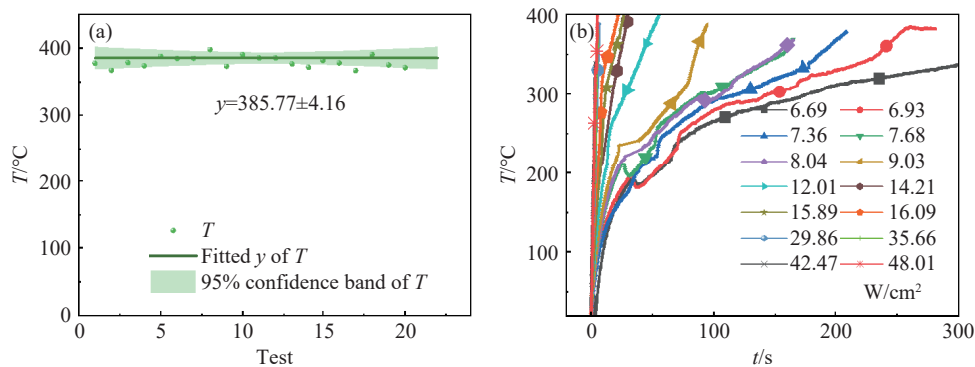


图 6 PIN 管硬损伤表面温度变化情况。(a) 不同辐照度实验中, 硬损伤对应温度, 横坐标为实验次序。(b) 不同辐照度下, 温度 T 随辐照时间 t 变化曲线

Fig. 6 Variation of surface temperature with hard damage in a silicon PIN photodiode. (a) Temperature corresponding (T) to hard damage at different irradiance levels, plotted against the experimental sequence. (b) Temperature (T) versus irradiation time (t) under different irradiance levels (E)

图 6(a) 为不同辐照度实验中, 硬损伤发生时的表面温度, 发现温度均在在 (385.77±4.16) °C 范围内。根据图 6(b) 的 PIN 管表面温度与辐照度、辐照时间关系可知: 同一辐照度下, 温度随辐照时间增加而升高, 升温速率逐渐减小; 辐照度越

大, 升温速率越快。出现升温速率下降一是因为 PIN 管在吸收光能的同时, 会通过热对流(与空气)和热传导(与接触物质)散失热量, PIN 管表面温度越高, 与环境温度差异越大, 散热速率越大; 二是因为随着温度升高, PIN 管的比热容上升,

即 PIN 管温度越高, 每升高单位温度所需吸收的光辐照能量显著增加^[51]。综上所述, 硬损伤与温度直接关联, 辐照度与辐照时间均通过影响 PIN 管吸收光辐照能量的大小来调控升温过程, 间接引发硬损伤。因此 PIN 管需达到阈值温度(约 385.77 °C)才可能发生硬损伤。

当辐照度低于最小辐照度阈值时, PIN 管表面温度在达到硬损伤阈值之前将进入稳定平台阶段, 即吸热与散热达到动态平衡状态, 因此不会产生硬损伤。平衡温度的产生可以通过能量守恒定律解释。在辐照过程中, PIN 管吸收的辐照度与向环境散失的热功率密度之间满足如下关系式:

$$E_{\text{abs}} = E_{\text{diss}} + \rho c V \frac{dT}{dt}, \quad (5)$$

其中 E_{abs} 为吸收光辐照度, E_{diss} 为散失到环境中的热功率密度, ρ 为材料密度, c 为比热容, V 为受热体积, dT/dt 为温度变化率。当温度上升到某一值时, E_{diss} 恰好等于 E_{abs} , 此时 $dT/dt=0$, 系统达到热平衡状态, 温度不再变化, 即形成平衡温度 T_{eq} 。该过程可由热平衡方程(6)描述:

$$E_{\text{abs}} = h(T_{\text{eq}} - T_{\text{amb}}) + \varepsilon \sigma (T_{\text{eq}}^4 - T_{\text{amb}}^4), \quad (6)$$

其中, h 为对流换热系数, ε 为发射率, σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, T_{eq} 为平衡温度, T_{amb} 为环境温度。等式右边第一项为对流散热, 第二项为辐射散热。两者均随 T_{eq} 升高而单调增加, 因此对于任意给定的 E_{abs} , 方程存在唯一解 T_{eq} 。

由式(6)可以看出, PIN 管的平衡温度不仅与吸收的光辐照度 E_{abs} 有关, 同时也受到环境温度 T_{amb} 的影响。当环境温度升高时, PIN 管与环境之间的温差减小, 对流散热项 $h(T_{\text{eq}} - T_{\text{amb}})$ 以及辐射散热项 $\varepsilon \sigma (T_{\text{eq}}^4 - T_{\text{amb}}^4)$ 均会减小。为了维持能量平衡, PIN 管需要达到更高的平衡温度 T_{eq} 。因此, 在相同辐照条件下, 较高的环境温度会使 PIN 管更容易达到阈值温度, 从而降低硬损伤辐照度阈值。反之, 当环境温度较低时, PIN 管散热能力增强, 达到阈值温度所需的辐照度会相应提高。本实验中实验室环境温度保持在 (25 ± 1) °C 稳定范围内, 因此环境温度变化对实验结果的影响较小。进行 PIN 管防护设计和可靠性验证时, 可以将该阈值温度作为核心判据。

3.2.3 损伤阈值理论模型

由于辐照光斑完全覆盖 PIN 管表面, 且为均匀光斑, 可忽略径向热扩散, 因此可以用半无限体一维热传导方程。计算 PIN 管辐照升温后的温度分布情况。假设 PIN 管表面吸收全部入射光, 并且受到直径为 3 cm 的均匀光束照射, PIN 管温度分布可以由一维热传导模型计算得到^[52, 53]:

$$\Delta T(z, t) = \frac{(1 - R_{\text{ref}})E}{\rho c \sqrt{\pi k}} \int_0^t \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4k\tau}\right)}{\sqrt{\tau}} d\tau, \quad (7)$$

其中, $\Delta T(z, t)$ 表示 t 时刻, 厚度为 z 处的温度变化, R_{ref} 表示表面反射率, k 表示热扩散率。

材料表面($z=0$)的温度变化是:

$$\Delta T(0, t) = \frac{2(1 - R_{\text{ref}})E \sqrt{t}}{\rho c \sqrt{\pi k}}. \quad (8)$$

从式(8)可以得到, 表面温度变化 $\Delta T(0, t)$ 与辐照时间的平方根 \sqrt{t} 成正比, 与辐照度 E 成正比。

假设 PIN 管的硬损伤阈值可以被照射表面的温度升高量化, 设 ΔT_{th} 为观测到硬损伤的最小温度变化, 即表面温度阈值, 可计算得到 PIN 管的辐照度阈值:

$$E_{\text{th}} = \frac{\Delta T_{\text{th}} \rho c \sqrt{\pi k}}{2(1 - R_{\text{ref}}) \sqrt{t}}, \quad (9)$$

式中, E_{th} 为 PIN 管硬损伤对应辐照度阈值, 单位为 W/cm^2 。式(9)表明 PIN 管辐照度阈值 E_{th} 与所需辐照时间的平方根 \sqrt{t} 成反比。

基于上述一维热模型, 可通过表面温度阈值计算 PIN 管达到硬损伤时, 对应辐照度与辐照时间的关联, 为硬损伤阈值的实验测量与验证提供理论基础。

3.2.4 基于损伤阈值模型的实验验证

在本研究中, 接受辐照度超过硬损伤阈值的 PIN 管不再输出光电流, 硬损伤时 PIN 管表面温度分布于 (385.77 ± 4.16) °C 内。因此, 在一维热传导模型中使用此温度作为阈值温度^[54], 结合理论推导分析实验结果。得到 PIN 管到达硬损伤阈值温度时辐照度和对应辐照时间的曲线, 如图 7 (彩图见期刊电子版) 所示。其中实线是对 E_{th} 与 \sqrt{t} 进行拟合的理想曲线, 虚线表示 E_{th} 与 \sqrt{t} 无关的极限情况, 即最小的硬损伤辐照度阈值 $E_{\text{th}} =$

6.69 W/cm²。实验中的硬损伤辐照度阈值可以用表达式(10)描述:

$$E_{th} = \frac{79.62}{\sqrt{t}} \quad (10)$$

该表达式符合一维热扩散模型推导中, PIN 管辐照度阈值 E_{th} 与辐照时间的平方根 \sqrt{t} 成反比的结论, 可以用该模型进行阈值预测。而根据一维传热模型式(9)可知^[18], 曲线拟合时 E_{th} 与 \sqrt{t} 的比例系数由 $\Delta T_{th} \rho c \sqrt{\pi k} / [2(1 - R_{ref})]$ 决定, 由于 c 、 k 、 R_{ref} 与辐照波长和 PIN 管温度有关, 存在不确定性, 因此在利用该模型对实验数据进行拟合时, c 、 k 与 R_{ref} 被视为可调参数。根据实验结果拟合, $\Delta T_{th} \rho c \sqrt{\pi k} / [2(1 - R_{ref})]$ 的值为 79.62。该数值为与材料热扩散特性及器件结构散热条件相关的特征参数, 综合反映了材料热导率、热扩散系数及光吸收特性等因素对热损伤形成过程的影响。由于 k 的温度依赖性以及 PIN 管表面的热损耗(表面辐射与热交换)对损伤阈值可能产生影响, 导致拟合曲线存在误差。 $\Delta T_{th} \rho c \sqrt{\pi k} / [2(1 - R_{ref})]$ 的有效取值可用于计算任一辐照时间对应的硬损伤辐照度阈值, 也可用于解释硬损伤发生时温度集中的现象^[55]。

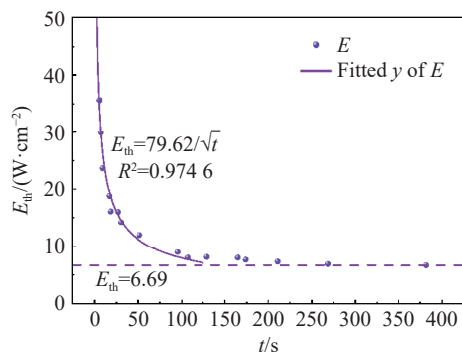


图7 造成 PIN 管硬损伤的辐照度阈值(E_{th})随辐照时间(t)的变化

Fig. 7 Variation of power density threshold (E_{th}) for hard damage of the silicon PIN photodiodes with irradiation time (t)

3.2.5 硬损伤的形貌变化及分析

硬损伤的发生与 PIN 管关键部位的机械损伤有关, 可以通过材料的热学参数和实验现象分析其损伤机理。PIN 管光学窗口采用透明硅橡胶, 其热分解温度为 370 °C 左右^[56]。实验中硬损伤发生时的 PIN 管表面温度为 (385.77 ± 4.16) °C,

达到硅橡胶热分解温度。从图 8 中 PIN 管硬损伤前后的表面形貌差异可以发现, 损伤主要集中于透明硅橡胶材质的光学窗口。因此可以确定氙灯产生的热效应会导致硅橡胶发生热分解等不可逆损伤。具体表现为实验中 PIN 管表面温度达到硬损伤阈值温度时, 硅橡胶因温度超过热分解温度, 发生软化甚至部分熔融。处于熔融、分解状态的硅橡胶的内部应力集中, 进而产生裂隙。温度越高热膨胀越剧烈, 裂隙的数量与尺寸同步增加。辐照结束后, 已形成的裂隙无法恢复, 导致光学窗口透光性能严重受损。再次辐照时, 入射光线被裂隙吸收或折射, 难以到达硅基感光面。当损伤程度较轻时, PIN 管表面无明显形貌变化, 但可能存在肉眼不可见的微小裂隙。由于此类微小裂隙对光学窗口透光性的影响可忽略不计, 此时出现输出电流的下降, 与 PIN 管内部产生的焦耳热导致 PN 结温度升高, 热应力增大, 从而在表面未达熔点的情况下形成凸起损伤^[57]。

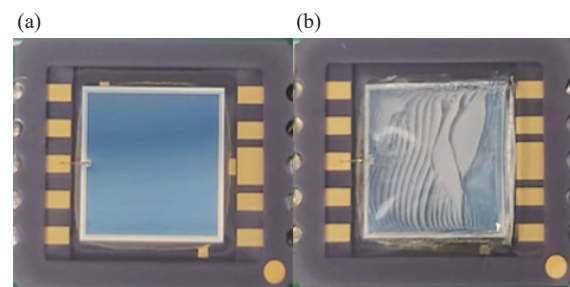


图8 损伤前后 PIN 管的表面形貌差异。(a)损伤前 PIN 管表面形貌。(b)损伤后 PIN 管表面形貌, 表面发生变化的区域为熔融开裂的硅橡胶

Fig. 8 Surface morphology differences of the silicon PIN photodiodes before and after damage. (a) Surface morphology of the silicon PIN photodiode before damage. (b) Surface morphology of the silicon PIN photodiode after damage. The altered surface region is characterized by melting-induced cracking of the silicone rubber

3.2.6 硬损伤电学特性变化及分析

除了表面机械损伤, 还存在其他导致 PIN 管硬损伤的因素, 通过电学测试分析其内部结构损伤机制。在常温环境下对损伤前后 PIN 管进行电学测试, 获取了正向伏安特性曲线(图 9(a))及反向电学参数(图 9(b)和表 2)。实验结果表明, 硬损伤 PIN 管的电学特性呈现显著劣化: 根据正向伏安特性(图 9(a))可知, 未损伤 PIN 管呈现典

型的低电压下电流微弱,电压超过正向阈值后电流急剧上升的整流特性;而损伤后,正向导通电压发生偏移,且相同电压下的导通电流出现显著降低,这表明损伤会导致 PIN 管的正向导通性能下降。根据反向漏电流参数(图 9(b)和表 2)可知,损伤前 PIN 管反向漏电流稳定于低电平, $V_R=$

10 V 时对应漏电流为 $0.3 \mu\text{A}$, 具备优异的反向截止特性;但损伤后,漏电流显著增大,尤其是第三组损伤后的 PIN 管漏电流出现明显波动且数值较大, $V_R=10 \text{ V}$ 时对应漏电流到达 $0.42 \mu\text{A}$, 说明损伤导致 PIN 管反向绝缘性能被破坏,电学稳定性大幅下降。

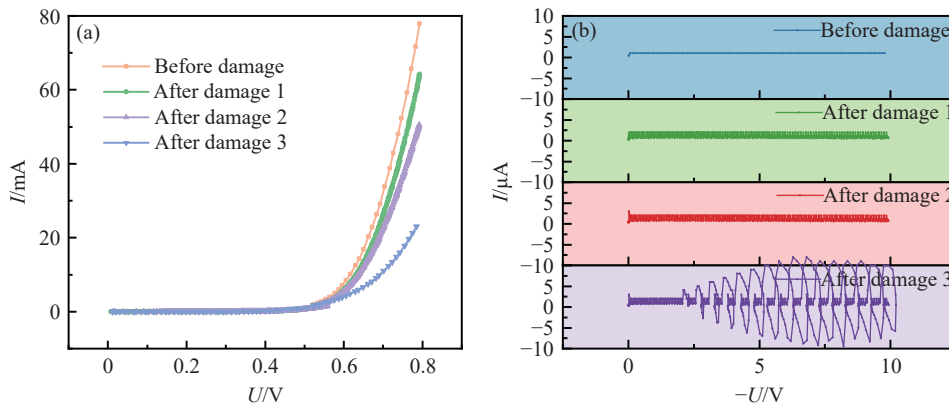


图 9 损伤前后 PIN 管电参数变化。(a)损伤前后 PIN 管的正向伏安特性曲线,橙色代表损伤前 PIN 管的正向伏安特性曲线,绿色、紫色、蓝色分别代表不同程度损伤后 PIN 管的伏安特性曲线。(b)损伤前后 PIN 管的漏电流(I)变化情况,图中纵坐标刻度范围一致,随着损伤程度增大, PIN 管漏电流不稳定性增加

Fig. 9 Variations in electrical parameters of the silicon PIN photodiode before and after damage. (a) Forward current-voltage (I - V) characteristics of the PIN photodiode before and after damage. The orange curve represents the forward I - V characteristic before damage; the green, purple, and blue curves represent the I - V characteristics after damage of increasing severity, respectively. (b) Variations in leakage current (I) before and after damage. The ordinate (vertical axis) scale is consistent across plots. Leakage current instability increases progressively with the extent of damage

表 2 损伤前后 PIN 管漏电流变化情况

Tab. 2 Leakage current of the silicon PIN photodiodes before and after damage

S5106	Leakage current ($V_R=10 \text{ V}$)
Before damage	$0.30 \mu\text{A}$
After damage 1	$0.36 \mu\text{A}$
After damage 2	$0.40 \mu\text{A}$
After damage 3	$0.42 \mu\text{A}$

依据半导体测试标准 GB/T4587,硅基二极管反向漏电流短期正常波动 $\leq 20\%$ ^[58]。实验中漏电流最大增幅为 40%,超出正常波动范围,显著异常^[8]。漏电流增大与正向导通电压偏移同时发生,说明 PIN 管电学特性的变化源于自身硬损伤效应^[59],而非测试误差或外部环境波动。

上述电学特性的劣化根源在于 PN 结结构完整性遭到破坏。正向导通特性方面,正常 PIN 管的导通过程依赖载流子克服 PN 结势垒,而硬损伤会使势垒区缺陷增多,这些缺陷会成为载流子

的复合中心或散射中心,阻碍载流子输运^[60],导致 PN 结势垒上升,最终表现为图 9(a)中损伤后曲线的导通电压升高,且相同电压下的导通电流显著降低。反向特性方面,正常 PIN 管的反向漏电流由耗尽区少子漂移决定^[61]。硬损伤在耗尽区形成缺陷导电通道^[8,62],增加了反向偏置下载流子的输运路径,从而导致漏电流从 $0.3 \mu\text{A}$ 显著增加至 $0.42 \mu\text{A}$ ^[63]。漏电流增大的现象与前文等效电路中,温度升高导致并联电阻分流增大,漏电流增大的结论相互验证^[64]。

综上所述,硬损伤对 PIN 管的影响体现在形貌与电学特性的不可逆劣化:形貌表现为光学窗口硅橡胶因高温熔融产生裂隙,导致透光性能受损;电学特性表现为 PN 结结构完整性被破坏,导致正向导通能力下降和反向漏电流增大。

4 结 论

本研究以滨松 S5106 型硅 PIN 光电二极管

为对象,搭建基于50 kW氙灯的宽谱强光实验平台,通过实时监测输出电流、表面温度,计算探测能力,结合一维热扩散模型,探究PIN管在氙灯辐照下的软损伤与硬损伤规律,结论如下:

(1)氙灯强光辐照会造成PIN管软损伤(可逆),探测能力与辐照时间、辐照度、表面温度呈非线性负相关。软损伤机制为热效应导致PIN管内部载流子迁移率下降,在等效电路中表现为等效串联电阻 R_s 增大,进行导致漏电流增大,最终表现为输出光电流下降。

(2)硬损伤阈值与辐照度、辐照时间、表面温度、环境温度有关:能引发硬损伤的最小辐照度为 6.6 W/cm^2 ,对应辐照时间为382 s,硬损伤发生时PIN管表面温度恒为 $(385.77 \pm 4.16) \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验

中硬损伤阈值结果与损伤阈值模型相匹配,辐照度阈值与辐照时间的平方根成反比,确定了损伤阈值模型中的可调参数 $\Delta T_{th} \rho c \sqrt{\pi k} / [2(1 - R_{ref})]$ 的取值。硬损伤机制为热效应造成光学窗口硅橡胶熔融开裂,破坏PN结结构完整性,导致透光率降低、导通电流下降和漏电流增大。

本研究通过分析辐照度、辐照时间、温度与探测能力之间的关联,系统揭示PIN管在氙灯辐照下的软损伤、硬损伤规律和机理,为极端探测场景中PIN管的强光防护方案提供实验支撑,同时为PIN管宽谱强光损伤领域的机理分析提供实验参考,实验中所得温度阈值可作为PIN管在宽谱强光环境中进行防护设计与可靠性评估的重要判据。

参考文献:

- [1] SCHNEIDER-HORNSTEIN K, GOLL B, ZIMMERMANN H. Ultra-sensitive PIN-photodiode receiver[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(3): 7201409.
- [2] RA H S, LEE S H, JEONG S J, et al.. Advances in heterostructures for optoelectronic devices: materials, properties, conduction mechanisms, device applications[J]. *Small Methods*, 2024, 8(2): 2300245.
- [3] LI L L, ZHAO H T, LIU CH, et al.. Intelligent metasurfaces: control, communication and computing[J]. *eLight*, 2022, 2(1): 7.
- [4] SUBLETTE C. Tumbler-snapper nuclear test series[EB/OL]. (2002-06-19)[2025-12-14]. <https://nuclearweaponarchive.org/Usa/Tests/Tumblers.html>.
- [5] ROCHA R, DE CASTRO J C V, DE CARVALHO SANTANA A. Evaluation of sun position and angular rates using the photovoltaic conversion system for on-board functions in an artificial satellite[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(6): 9193-9203.
- [6] 王启明,郭青,孙若端,等.大动态范围阵列式光谱辐射计线性测量[J]. *光学学报*, 2025, 45(11): 1112001.
WANG Q M, GUO Q, SUN R D, et al.. Linearity measurement of array spectroradiometer over large dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(11): 1112001. (in Chinese).
- [7] GEIST J, ZALEWSKI E F, SCHAEFER A R. Spectral response self-calibration and interpolation of silicon photodiodes[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(22): 3795-3799.
- [8] NIE P, YU J Y, WEI ZH, et al.. Investigation of silicon-based PIN photodetectors' surface damage features caused by continuous-nanosecond pulse combined laser[J]. *Physics Letters A*, 2025, 534: 130259.
- [9] WEI Z, ZHANG W, WANG D, et al.. Structural, optical and electrical behavior of millisecond pulse laser damaged silicon-based positive-intrinsic-negative photodiode[J]. *Optik*, 2017, 131: 110-115.
- [10] MOROZOV A P, LUCHNIKOV L O, YURCHUK S Y, et al.. Improvement of the perovskite photodiodes performance via advanced interface engineering with polymer dielectric[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2025, 6(1): 24.
- [11] 王柯,刘扬,王云哲,等.纳秒脉冲激光对背照式CMOS探测器组件损伤机理研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(6): 1277-1288.
WANG K, LIU Y, WANG Y ZH, et al.. Investigation of laser-induced damage mechanisms in back-illuminated CMOS detector modules under nanosecond pulsed irradiation[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(6): 1277-1288. (in Chinese).
- [12] GAO L, WEI ZH, WANG D, et al.. Experimental study of 1064nm CW laser ablation biased silicon-based PIN photodiodes[C]. *Proceedings of SPIE 12060, AOPC 2021: Advanced Laser Technology and Applications*, SPIE, 2021: 120601F.
- [13] LIANG H, ZHAO SH S, YU H J, et al.. Study on HAZ extension characteristics during laser ablation of CFRP based on

- dimensional analysis[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 275: 111295.
- [14] 叶成, 邱荣, 蒋勇, 等. 1064nm 和 532nm 纳秒激光同时辐照熔石英损伤规律的研究[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(4): 041003.
YE CH, QIU R, JIANG Y, *et al.*. Laser induced damage characteristics in fused silica surface irradiated by 1064nm and 532nm ns laser simultaneously[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(4): 041003. (in Chinese).
- [15] LI S, HUANG L CH, YE J F, *et al.*. Study on radiation damage of silicon solar cell electrical parameters by nanosecond pulse laser[J]. *Electronics*, 2024, 13(9): 1795.
- [16] WANG T T, LI P X, YU X Y, *et al.*. High-energy hundred-picosecond fiber-solid hybrid laser and its application in laser-induced damage in PIN photodiode[J]. *Laser Physics*, 2020, 30(3): 036004.
- [17] 王佳敏, 季艳慧, 梁志勇, 等. 532 nm 皮秒脉冲激光对单晶硅的损伤特性研究[J]. *中国光学*, 2022, 15(2): 242-250.
WANG J M, JI Y H, LIANG ZH Y, *et al.*. Damage characteristics of a 532 nm picosecond pulse laser on monocrystalline silicon[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(2): 242-250. (in Chinese).
- [18] KRUEER M, ALLEN R, ESTEROWITZ L, *et al.*. Laser damage in silicon photodiodes[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1976, 8(5): 453-458.
- [19] KAFKA K R P, HOFFMAN B, HUANG H, *et al.*. Pulse-length dependence of the laser-induced damage behavior of a fused-silica antireflective metasurface[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2025, 13: e64.
- [20] 罗福, 江继军, 孙承纬. 硅光电二极管激光损伤阈值随激光脉宽的变化[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(6): 685-688.
LUO F, JIANG J J, SUN CH W. Variation in damage thresholds of Si photodiodes with laser pulse duration[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(6): 685-688. (in Chinese).
- [21] LOU W H, HU Y SH, JIA B N, *et al.*. Laser-induced damage threshold based on thermal effects in high-purity silica optical fiber[J]. *Optical Engineering*, 2023, 62(7): 076102.
- [22] CHANG H, ZHOU W J, MA Y J, *et al.*. Damage characteristics of silicon solar cells induced by nanosecond pulsed laser[J]. *Photonics*, 2025, 12(8): 804.
- [23] LI Y R, CHEN J W, DUAN SH Y, *et al.*. Thermal-mechanical-chemical coupled model and three-dimensional damage evaluation based on computed tomography for high-energy laser-ablated CFRP[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 258: 110867.
- [24] LIU K Y, ZHANG ZH W, TANG X Y, *et al.*. Experimental and simulation study of single-event leakage current degradation and damage mechanism in 4H-SiC PiN diodes[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(8): 4891-4896.
- [25] MIAO J J, ZHU CH Y, WULIJI H, *et al.*. Study of convexity on nanosecond laser-induced damage growth in fused silica[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192: 113478.
- [26] BULGAKOV A V, SLÁDEK J, HRABOVSKÝ J, *et al.*. Dual-wavelength femtosecond laser-induced single-shot damage and ablation of silicon[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 643: 158626.
- [27] TIAN ZH Y, LOU J H, YANG L ZH, *et al.*. Tunable high-flux solar simulator with enhanced uniformity for concentrated solar energy applications[J]. *Applied Energy*, 2024, 369: 123198.
- [28] WANG Y, SU SH, MENG F L, *et al.*. Continuous irradiance adjustment system design for solar simulators with wide range and high uniformity[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(5): 870.
- [29] MAO J H, WANG Y M, SHI E T, *et al.*. Pre-launch multi-energy radiance calibration of the OMS-N[J]. *Remote Sensing*, 2023, 16(1): 119.
- [30] 黎星宇. 基于光干涉条件下的大气层核爆光辐射信号识别方法研究[D]. 北京: 军事科学院, 2022.
LI X Y. *Research on recognition method of atmospheric nuclear explosion optical radiation under optical interference conditions* [D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2022. (in Chinese).
- [31] REICH N H, VAN SARK W G J H M, ALSEMA E A, *et al.*. Crystalline silicon cell performance at low light intensities[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009, 93(9): 1471-1481.
- [32] HEIDRICH R, BARRETTA C, MORDVINKIN A, *et al.*. UV lamp spectral effects on the aging behavior of encapsulants for photovoltaic modules[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 266: 112674.
- [33] KHAN F, SINGH S N, HUSAIN M. Effect of illumination intensity on cell parameters of a silicon solar cell[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(9): 1473-1476.
- [34] 范永杰, 秦强. 激光辐照 HgCdTe 探测器输出特性与软损伤判定[J]. *红外技术*, 2020, 42(9): 829-832.

- FAN Y J, QIN Q. HgCdTe detector output characteristics and soft damage determination under laser irradiation[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(9): 829-832. (in Chinese).
- [35] VEST R E, HILL S B, GRANTHAM S. Saturation effects in solid-state photodiodes and impact on EUVL pulse energy measurements[J]. *Metrologia*, 2006, 43(2): S84-S88.
- [36] SEEGER K. Miscellaneous semiconductors[M]//SEEGER K. *Semiconductor Physics: An Introduction*. 8th ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002: 471-482.
- [37] 董先声, 施毅, 黎松林. 二维半导体的迁移率物理模型与仿真[J]. *中国科学: 信息科学*, 2025, 55(12): 3080-3098.
DONG X SH, SHI Y, LI S L. Physical models and simulation of carrier mobility in two-dimensional semiconductors[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2025, 55(12): 3080-3098. (in Chinese).
- [38] VAILLON R, PAROLA S, LAMNATOU C, *et al.*. Solar cells operating under thermal stress[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2020, 1(12): 100267.
- [39] ROY S, BARUAH M S, SAHU S, *et al.*. Computational analysis on the thermal and mechanical properties of thin film solar cells[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44(Pt 1): 1207-1213.
- [40] AL MAHDI H, LEAHY P G, ALGHOUL M, *et al.*. A review of photovoltaic module failure and degradation mechanisms: causes and detection techniques[J]. *Solar*, 2024, 4(1): 43-82.
- [41] SZE S M, NG K K. Physics and properties of semiconductors—a review[M]//SZE S M, NG K K. *Physics of Semiconductor Devices*. Hoboken: Wiley, 2006: 1.
- [42] KRISZTIÁN D, KORSÓS F, HAVASI G. Simultaneous measurement of charge carrier concentration, mobility, and lifetime[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2023, 260: 112461.
- [43] COLWELL J, HSIAO P C, SHEN X W, *et al.*. Impact of contact integrity during thermal stress testing on degradation analysis of copper-plated silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 225-232.
- [44] WEI Y W, MA ZH, ZHAO X Y, *et al.*. Improving the performance of $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ thin film solar cells by SCAPS simulation[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2024, 303: 117296.
- [45] IBAÑEZ A, FATÁS E. Mechanical and structural properties of electrodeposited copper and their relation with the electrodeposition parameters[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 191(1): 7-16.
- [46] 顾晓春, 吴思汉. 微波 pin 二极管电阻与温度的关系[J]. *半导体技术*, 2008, 33(12): 1066-1069,1073.
GU X CH, WU S H. Relationship between resistance and temperature of microwave PIN diode[J]. *Semiconductor Technology*, 2008, 33(12): 1066-1069,1073. (in Chinese).
- [47] VAN NIJEN D A, NAOOM S, MUTTILLO M, *et al.*. Analyzing the PN junction impedance of crystalline silicon solar cells across varied illumination and temperature conditions[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2025, 279: 113255.
- [48] RUSCHEL C S, GASPARIN F P, KREZNINGER A. Experimental analysis of the single diode model parameters dependence on irradiance and temperature[J]. *Solar Energy*, 2021, 217: 134-144.
- [49] CHEN P J, GE X, ZHANG ZH C, *et al.*. Silicone-based thermally conductive gel fabrication via hybridization of low-melting-point alloy–hexagonal boron nitride–graphene oxide[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(3): 490.
- [50] CUCE E, CUCE P M, BALI T. An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters[J]. *Applied Energy*, 2013, 111: 374-382.
- [51] HUANG Y, YAN L, WU H, *et al.*. New insights on generalized heat conduction and thermoelastic coupling models[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2025, 46(8): 1533-1550.
- [52] WU SH H, LIU J CH, ZHANG J Y, *et al.*. Transient thermal response of quasi-continuous-wave laser diodes and its impact on saturation power[J]. *Optics & Laser Technology*, 2026, 193: 114269.
- [53] WEI ZH, YU J Y, GAO L, *et al.*. Study of thermal effects in silicon-based PIN detectors with different external bias voltages irradiated by 1064 nm continuous laser[J]. *Applied Physics B*, 2024, 130(4): 58.
- [54] YIN J H, CUI Y W, SHANG Y Y, *et al.*. Laser-induced damage thresholds prediction of functional ceramic films based on 3D thermal diffusion model[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(7): 9100-9111.
- [55] LIU S Q, ZHENG ZH, MA Y, *et al.*. Prediction of the damage threshold of CFRP irradiated by millisecond laser based on back propagation neural network[J]. *Physica Scripta*, 2025, 100(7): 076025.
- [56] KONG S, WANG R, FENG SH Y, *et al.*. Tannic acid as a natural crosslinker for catalyst-free silicone elastomers from hydrogen bonding to covalent bonding[J]. *Frontiers in chemistry*, 2021, 9: 778896.

- [57] WEI ZH, YU J Y, ZUO M H, *et al.*. Experimental study of millisecond pulse laser ablation biased silicon-based PIN photodiodes[J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 135(11): 115701.
- [58] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 4587-2023 半导体器件 分立器件 第 7 部分: 双极型晶体管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 4587-2023 Semiconductor devices - Discrete devices - Part 7: bipolar transistors[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023. (in Chinese).
- [59] LIU H CH, PASANEN T P, FUNG T H, *et al.*. Near-infrared germanium PIN-photodiodes with $>1\text{A/W}$ responsivity[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 9.
- [60] OMAR F A. Analysis of monocrystalline silicon solar cell performance under thermal stress, reverse bias stress, and AC impedance spectroscopy[J]. *Discover Electronics*, 2025, 2(1): 91.
- [61] FENG Y J, LI CH, LIU Q L, *et al.*. Scalability of dark current in silicon PIN photodiode[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(4): 048501.
- [62] MOEGLIN J P, GAUTIER B, JOECKLÉ R, *et al.*. Electrical behaviour of laser-damaged silicon photodiodes[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, 28(5): 317-330.
- [63] ENCINAS-SANZ F, GUERRA J M. Laser-induced hot carrier photovoltaic effects in semiconductor junctions[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(4): 267-294.
- [64] TANG H B, LIN H, WANG G SH, *et al.*. Understanding localized current leakage in silicon-based heterojunction solar cells[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2025, 33(4): 522-530.

作者简介:



李登辉(1991—), 男, 浙江杭州人, 理学博士, 副研究员, 2021 年于南开大学物理科学学院获得理学博士学位, 主要从事光与物质相互作用方面的研究。E-mail: lidenghui@mail.nankai.edu.cn



宁王师(1973—), 男, 山西夏县人, 理学硕士, 正高级工程师, 2006 年于重庆大学数理学院硕士研究生毕业, 主要从事光信号探测方面的研究。E-mail: ning_wangshi@sina.com