

激光与 PIN 光电探测器相互作用的响应度研究

徐立君, 张喜和, 吕彦飞, 蔡红星, 李昌立, 谭 勇
(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

摘 要:通过比较短路电流的方法,标定了探测器对 He-Ne 激光的响应度。用 Nd:YAG 激光辐照 PIN 光电探测器,通过测量激光辐照后探测器对 He-Ne 激光的短路电流,获得了探测器响应度变化与辐照激光功率密度的关系。从实验数据可知,探测器被功率密度低于 $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 的 Nd:YAG 激光辐照后,不会发生损伤,激光辐照后,探测器对 He-Ne 激光的响应度不发生改变;当 Nd:YAG 激光的功率密度超过 $9.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器对 He-Ne 激光辐照的响应度开始下降,PN 结遭到破坏是探测器响应度下降的根本原因,扫描电镜的结果与我们的分析相一致。

关键词:响应度;光电探测器;短路电流;激光辐照

中图分类号:TN241

文献标识码:A

Research on responsibility of PIN detector interaction with laser

XU Li-jun, ZHANG Xi-he, LÜ Yan-fei, CAI Hong-xing, LI Chang-li, TAN Yong
(Changchun University of Science and Technology, School of Science, Changchun 130022, China)

Abstract: Responsibility is an important factor reflecting the performance of photoelectric detector and an important basis judging whether the detector was laser-induced damaged. In this paper, compared with the short-circuit current of the standard detector, the responsibility of the detector used in the experiment was calibrated. After the PIN detector was irradiated by Nd:YAG laser, according to the change of short-circuit current, the relationship between the responsibility of detector and the power density of incident laser was obtained. The detector irradiated by laser is fit when the power density of Nd:YAG laser is lower than $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, the responsibility of the detector was constant for He-Ne laser. When the power density of laser is more than $9.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, with increasing incident laser power density, the responsibility of the detector was reduced slowly. And the reason for the fall of responsibility was analyzed. Our conclusion was confirmed by scanning electron microscope photographs (SEM).

Key words: responsibility; photoelectric detector; short-circuit current; laser irradiation

1 引 言

光电探测器以其高灵敏度、低噪声以及体积小、质量轻等特点而广泛的应用于军事、民用等各领域, Si-PIN 光电二极管是可见光、近红外区域的首选探测器。随着光电对抗技术的发展,其越来越容易受到激光武器的损伤。国内外学者对激光与探测器相互作用进行了研究,但以往的研究主要集中在对探测器的损伤阈值和机理的研究^[1-8],而对激光辐照下,探测器响应度的变化研究的较少。

响应度 R 是反映探测器性能的一项重要指标。当光电探测器受到激光损伤后,其响应度 R 将下

降,可以根据探测器响应度的变化来判断探测器是否发生损伤。论文主要研究在强激光作用下探测器的响应度的变化。

2 理论及分析

2.1 探测器的响应度

光谱响应度是硅光电二极管的重要技术参数。光谱响应度也称光谱响应率,其中电压光谱响应率

基金项目:国防预研基金项目(No. A3620060122)资助。

作者简介:徐立君(1973-),男,讲师,博士研究生,主要从事激光与物质相互作用的研究。E-mail: xucust@sina.com

收稿日期:2009-01-21; **修订日期:**2009-04-23

$R_V(\lambda)$, 电流光谱响应率 $R_I(\lambda)$ 是入射光波长 λ 的函数, 记为:

$$R_V(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (1)$$

$$R_I(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (2)$$

式中, $P(\lambda)$ 为波长 λ 时入射光功率; $V(\lambda)$ 为光电探测器在入射光功率 $P(\lambda)$ 作用下的输出信号电压, $I(\lambda)$ 为光电探测器在入射光功率 $P(\lambda)$ 作用下的电流信号。

2.2 激光辐照后探测器响应度的变化

高功率激光辐照光电探测器会造成光电探测器的暂时性和永久性损伤。光电探测器受激光损伤后, 其性能恶化, 相应的响应度 R 将会下降。由硅 PIN 光电二极管的工作原理可知, 硅 PIN 光电二极管光电效应的两个重要过程是光生载流子对的产生和强电场对载流子对的分离。在光电效应过程中载流子对的分离环节是最薄弱的, 激光对光电探测器的永久性损伤就是对载流子分离过程的破坏, 是对其 PN 结的破坏, 使光电探测器收集载流子的电场减弱, 甚至不能建立起收集电场, 使之减弱或丧失分离载流子对的能力。究其原因, Gimlioni^[1] 提出了一种熔融硅材料中杂质原子分离和再分布形成漏电通道的损伤机制, 因为半导体吸收光能产生温升, 温度超过熔点, 材料熔化, 冷却后又快速结晶, 在快速运动的固-液界面上形成杂质原子高浓度聚集区, 这些高浓度区形成漏电通道, 如漏电通道仅使 PN 结宽度变窄, 亦将使得载流子收集电场减弱, 表现为响应度下降。可见, 光电探测器 PN 结处温度达熔点是造成其永久性损伤的必要条件。

激光热效应是激光与半导体相互作用过程中的主要现象, 涉及热能的产生, 聚积和传导等过程。由热传导方程和瞬态圆环热源作用于半无限固体表面的温度分布函数^[9]可导出高斯光束作用下, 半导体内的温度分布函数 T 即:

$$T = \frac{\alpha d^2 (1 - R') e^{-\alpha r} p_0}{\sqrt{\pi K k}^{-1/2}} \int_0^t \frac{p(t) dt}{t^{1/2} (4kt + d^2)} \cdot \exp \left[-\frac{z^2}{4kt} - \frac{r^2}{4kt + d^2} \right] \quad (3)$$

式中, α 为材料对激光的吸收系数; R 为表面反射率; K, k 分别为材料的热导率和热扩散系数; d 为光斑半径的 1.414 倍; p_0 为峰值功率密度; $p(t)$ 为脉冲归一化函数; t 为激光脉冲作用时间; r, z 分别为柱坐标函数, r 为离中心轴的距离, z 的起点从入射面计算。

由于 PN 结的温度达熔点是光电探测器永久性损伤的必要条件。设 PN 结离入射面距离为 a , 熔点温度为 T_{th} , 可求得永久性损伤峰值功率密度阈值 P_{th} 和能量密度阈值 E_{th} 。

对于短脉冲激光 ($4k\tau \ll d^2$), 经过简化后的 P_{th} , E_{th} 为:

$$P_{th} = dK \sqrt{\pi} T_{th} / 4K\alpha (1 - R') \tau \quad (4)$$

$$E_{th} = dK \sqrt{\pi} T_{th} / 4K\alpha (1 - R') \quad (5)$$

从式(4)和式(5)可以看出, 对于给定的光电探测器和给定的激光, 探测器损伤的功率密度阈值和能量密度阈值均与半导体材料的熔化温度成正比。半导体材料的熔点是确定的, 如果由低到高逐渐增加入射激光的能量, 当探测器吸收激光能量之后, 温度升高超过半导体的熔点, 则探测器将发生硬破坏, 探测器的响应度将随之下降。

3 实验结果与讨论

探测器的光谱响应度是波长的函数, 不同波长的光辐照下探测器的响应度也不相同。探测器被激光辐照损伤后, 对不同波长光的光谱响应度都将发生变化, 要测量探测器对所有波长的响应度的变化, 工作量非常大, 也没有太大必要。所以, 可以选定探测器对一特定波长的响应度作为研究对象。我们选择探测器对 He-Ne 激光的响应度, 研究强激光辐照前后, 探测器响应度的变化。

3.1 实验用探测器响应度的定标

在强激光辐照探测器前要先对探测器的响应度进行定标。实验中使用的探测器是光导型的, 所以我们通过测量短路电流来确定探测器的响应度。我们采取对比短路电流的方法对探测器的响应度进行定标。选择相同型号的两个探测器, 一个是响应度已经定标的标准探测器, 另一个是要进行定标的探测器, 在同样的实验条件下, 用相同功率的 He-Ne 激光先后辐照这两个探测器, 根据它们的短路电流确定探测器的响应度。将标准探测器的响应度记为 $R_0(\lambda)$, 要定标探测器的响应度记为 $R_1(\lambda)$, 根据探测器响应度的定义有:

$$R_0(\lambda) = \frac{I_0(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (6)$$

$$R_1(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (7)$$

由式(1)和式(2), 可以得出:

$$R_1(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} R_0(\lambda) \quad (8)$$

只要测出两个探测器在 He-Ne 激光辐照下的

短路电流,就可以通过式(8)计算出实验中使用的探测器对 He-Ne 激光的响应度。在进行强激光辐照之前,采用一套精密的测量装置,测量了两个探测器在功率为 1.75 mW He-Ne 激光辐照下的短路电流,实验中使用的标准探测器对 He-Ne 激光的响应度为 0.23 A/W,根据测得的数据,经式(8)得出,实验中使用的探测器的响应度为 0.20 A/W。探测器在无光照情况下,也存在很小的电流,这个电流被暗电流。实验中测量的短路电流必须将探测器的暗电流减去,以减少误差。

3.2 强激光辐照下探测器响应度的变化

保持测试条件和实验条件不变,用 Nd:YAG 激光对探测器进行辐照,使入射激光的能量由低到高逐渐增加,每次辐照探测器结束后,测量探测器在 He-Ne 激光辐照下的短路电流,并计算探测器的响应度。激光辐照探测器的实验装置如图 1 所示。

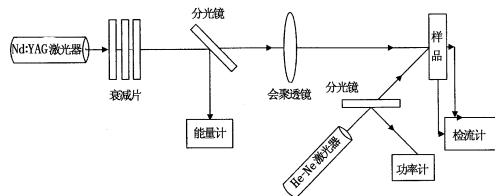


图1 激光辐照探测器的实验装置图

Nd:YAG 激光的波长为 1064 nm,脉冲宽度为 10 ns,重复频率为 10 Hz,会聚前光斑的大小是 6 mm,激光能量按高斯分布,模式 TEM_{00} 。通过衰减片改变入射激光的能量。分束透镜和能量计可以对激光能量的实时监测。实验中 PIN 探测器的型号为 GT102,光敏面为 $\phi 2$ mm。实验中选用了两个样品,样品 1 在短路电流发生轻度下降(比辐照前下降 15%左右)时停止辐照,样品 2 在短路电流发生严重下降时停止辐照。

实验结果如下:图 2 是样品 2 的短路电流与辐照激光功率密度的关系,在 Nd:YAG 激光功率密度低于 $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器对

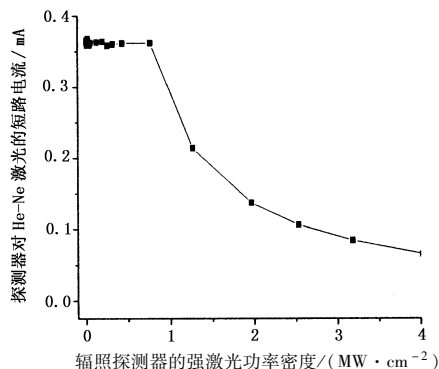


图2 样品2的短路电流与辐照激光功率密度的关系

He-Ne激光辐照的短路电流没有发生变化,是一定值,约为 0.36 mA;当 Nd:YAG 激光的功率密度大于 $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器对 He-Ne 激光辐照的短路电流开始缓慢下降;当 Nd:YAG 激光功率密度超过 $1.27 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器对 He-Ne 激光辐照的短路电流迅速下降;当 Nd:YAG 的激光功率密度达到 $4.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器对 He-Ne 激光辐照的短路电流已经降为 0.06 mA,此时探测器发生了严重损伤。

由图 3 可以看出:在 Nd:YAG 激光的功率密度低于 $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器对 He-Ne 激光的响应度没有发生变化,一直为 0.20 A/W,当 Nd:YAG 激光的功率密度大于 $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器对 He-Ne 激光辐照的响应度开始缓慢地下降,由图 5 的 SEM 照片可以看出,此时探测器已经发生了轻微的损伤,表面开始熔化;当 Nd:YAG 激光功率密度超过 $1.27 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器的响应度迅速下降,当 Nd:YAG 的激光功率密度达到 $4.0 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器对 He-Ne 激光辐照降为 0.036 A/W。

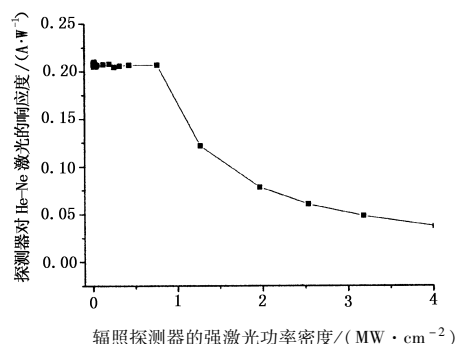


图3 样品2的响应度与辐照激光功率密度的关系

3.3 探测器的 SEM 照片

通过扫描电镜照片(SEM)检测不同功率密度的强激光辐照后探测器的损伤情况。由图 4 可以看出:样品 1 在功率密度为 $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 激光辐照后,没有受到损伤,探测器表面区域保持完好,结构未发生变化,所以对 He-Ne 激光的响应度不变。

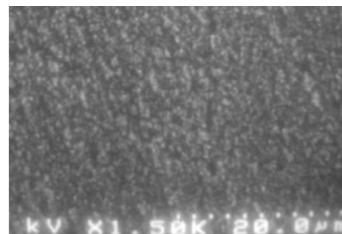


图4 样品1被功率密度为 $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 激光辐照后的 SEM 照片

图 5 是样品 1 在功率密度为 $9.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 激光辐照后的损伤点,从图中可以看出:探测器表面凹凸不平,说明强激光辐照后,探测器表面的温度超过了探测器的熔点,所以探测器发生了熔化。由于实验中使用的是脉冲激光,所以探测器熔化后,由于热扩散和热辐射作用,表面温度又低于了熔点,所以又发生凝固。当杂质半导体发生熔化和再凝固的现象时,半导体材料熔化,冷却后又快速结晶,在快速运动的固-液界面上形成杂质原子高浓度聚集区,这些高浓度区形成漏电通道,导致了 PN 结被局部破坏,使光电探测器收集载流子的电场减弱,所以探测器的响应度下降。从图中也可以看出探测器表面有轻微的断裂现象,这是由于热应力分布不均匀导致探测器出现了炸裂。

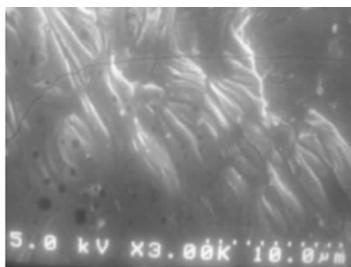


图 5 样品 1 被功率密度为 $9.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 激光辐照后的 SEM 照片

由图 6 可以看出:样品 2 在功率密度为 $4.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 激光辐照后发生了严重的破坏,探测器表面有火山坑和小丘,说明在此功率密度的激光辐照下,半导体材料发生了气化,并且有等离子体产生,等离子体迅速膨胀,等离子体物质喷射出去,同时由于等离子体的反向冲击力在探测器内部形成了一个圆形的坑。同时,由于激光能量的迅速累积,使探测器内部的温度梯度更大,所以在探测器表面形成了一些裂痕,探测器的性能进一步恶化。此时探测器的 PN 结几乎被击穿,杂质原子的重新分布形成了很大的漏电通道,收集载流子电场很弱,导致了探测器响应度的严重下降。

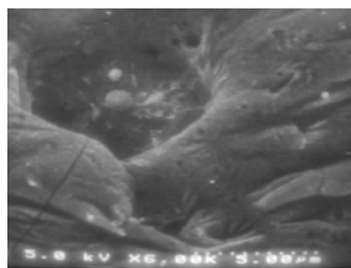


图 6 样品 2 被功率密度为 $4.5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 激光辐照后的 SEM 照片

4 结 论

本文采用半无限大模型,讨论了探测器在高斯激光辐照下被损伤的理论机制,并通过实验得出了探测器短路电流和响应度变化与辐照激光功率密度的关系,扫描电镜照片证实相关的结论。

强激光辐照 PIN 硅光电探测器,当入射激光功率密度低于 $7.6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 时,激光辐照后,探测器仍能正常工作;当入射激光功率密度增大时,探测器将发生轻度损伤,由于熔融和再凝固形成漏电通道将导致探测器响应度下降;当激光的功率密度继续增大时,探测器将发生更严重损伤,等离子体的反向冲击力和热应力使探测器的 PN 结受到更严重破坏,探测器收集载流子的能力变得很弱,所以响应度急剧下降。

参考文献:

- [1] Amit Pratap Singh, Avinashi Kapoor. Laser damage studies of silicon surfaces using ultra-short laser pulses [J]. Optics and Laser Technology, 2002, 34(1): 37-43.
- [2] Zeng Xiongwen, Lu Qisheng, Zhao Yijun, et al. The dynamic response of a PV-type detector under laser illumination [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 1998, 9(6): 461-464.
- [3] A V Kuanr, S K Bansal. Laser induced damage in GaAs at wavelength: surface effects [J]. Optics & Laser Technology, 1996, 28(1): 25-34.
- [4] A L Dawar, Savita Roy, Tirlak Nath, et al. Effect of laser annealing on electrical and optical properties of n-mercury cadmium telluride [J]. J. Appl. Phys, 1991, 69, 69(7): 3849-3852.
- [5] Meyer J R, Bartoli F J, Kruer M R. Optical heating in semiconductors: Laser damage in Ge, Si, InSb and GaAs [J]. Appl Phys, 1980, 51(10): 5513-5522.
- [6] 贺元兴, 江厚满. 激光辐照下 PV 型 HgCdTe 探测器反常响应机理 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(8): 1233-1237.
- [7] 张红, 薛建国, 成斌, 等. $10.6 \mu\text{m}$ CO_2 激光对 HgCdTe 探测器破坏阈值的实验研究 [J]. 光电工程, 2006, 33(5): 41-43.
- [8] 段晓峰, 牛燕雄, 张维. 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析 [J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1057-1061.
- [9] Ready J F. Effects of high-power laser radiation [M]. New York, London: Academic Press, 1971: 103-108.