

# 硅光电二极管的光谱响应测量及其响应时间研究

曾丽娜, 李林\*, 李再金, 杨红, 李功捷, 赵志斌, 李志波, 乔忠良, 曲轶, 刘国军

海南师范大学, 物理与电子工程学院, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口  
Email: licust@126.com

收稿日期: 2020年8月11日; 录用日期: 2020年8月27日; 发布日期: 2020年9月3日

## 摘要

在气流和温度稳定, 卤素灯照明为背景光的环境下, 当硅光电二极管未达到最大响应时测量了硅光电二极管对入射光波长为400 nm至1050 nm的光谱响应。分析了硅光电二极管的光谱响应的的影响条件和硅光电二极管的光谱响应规律。在测光电路中采用不同的负载电阻和偏置电压测试硅光电二极管的响应时间, 解释了硅光电二极管的物理特性。

## 关键词

硅光电二极管, 光谱响应, 时间响应

# Study on Measurement of Spectral Response and Response Time of Silicon Photodiodes

Lina Zeng, Lin Li\*, Zaijin Li, Hong Yang, Gongjie Li, Zhibin Zhao, Zhibo Li, Zhongliang Qiao, Yi Qu, Guojun Liu

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan  
Email: licust@126.com

Received: Aug. 11<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2020

## Abstract

The spectral response of Silicon photodiodes with incident light wavelengths of 400 nm to 1050 nm is measured when Silicon photodiodes do not reach maximum response in the background

\*通讯作者。

文章引用: 曾丽娜, 李林, 李再金, 杨红, 李功捷, 赵志斌, 李志波, 乔忠良, 曲轶, 刘国军. 硅光电二极管的光谱响应测量及其响应时间研究[J]. 现代物理, 2020, 10(5): 73-78. DOI: 10.12677/mp.2020.105008

light with no external light, steady air flow and temperature, and halogen lighting. The influence of the relevant conditions on the spectral response of Silicon photodiodes and the laws of the spectral response of Silicon photodiodes are analyzed. The response time of Silicon photodiodes is measured by different resistance and bias voltages during the light measuring, and the physical characteristics of Silicon photodiodes are explained.

## Keywords

Silicon Photodiode, Spectral Response, Response Time

Copyright © 2020 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

硅光电二极管主要应用于光纤通信和计算机信息传输两个领域，例如：探测和光通信等，具有量子噪声低、响应快、使用方便等优点，广泛应用于多种光电器件[1] [2] [3]。光纤通信技术的主要作用就是把发送端要传送的信息变成电信号，调制成光信号通过光纤传送，最后在接收端把光信号变成电信号接收。硅光电二极管起到光电信号转换的作用，扮演着信号转换的重要角色。光电二极管的基本特性包括灵敏度、光谱响应度、响应时间、噪声等[4] [5]，其中光谱响应度，表征的是光电二极管对不同波长入射辐射的响应，在一定程度上决定了光电二极管的光谱使用范围。

当光源发光，光线由入射狭缝照射到离轴抛物镜上，通过离轴抛物镜光线平行照射到衍射光栅上，衍射光栅会把接受到的光分散为单色光，并反射回离轴抛物镜上。然后单色光从离轴抛物镜上反射到反射镜中，最后，单色光从反射镜中反射到出射狭缝处反射出来。通过调节衍射光栅的角度，可以获得出射光的不同波长的单色光。当晶体周围的温度升高，使得晶体的温度也随之升高，晶体原子排列发生变化时，会发生电荷偏移，使得表面产生电荷。因此热释电探测器对周围的温度要求较高，同时，气流的波动也会引起干扰。当测量时利用红外辐射热效应，当辐射传送到探测器的探测部位时，就会引起温度上升，从而触发热释电效应。记录参数数据的变化就可以得出探测器所吸收的红外辐射。输出信号的强弱取决于温度变化的快慢，从而反映出入射的红外辐射的强弱，热释电型红外传感器的电压响应率正比于入射光辐射率变化的速率。

光谱响应度指的是光电探测器对单色光的响应能力[2]。使用  $R_v(\lambda)$  来表示电压光谱响应的响应度，假设入射光的波长是  $\lambda$ ，并且在这一波长的光功率照射线下，使得光电探测器响应，在检测端口输出电压信号，用公式表示为：

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

如果使用  $R_i(\lambda)$  来表示电流光谱响应度，在入射光波长为  $\lambda$  的单位入射辐射功率作用下，其响应度可用公式表示为：

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

其中  $P(\lambda)$  表示的是波长为  $\lambda$  的光的入射光功率。 $V(\lambda)$  表示的是当入射光功率为  $P(\lambda)$  波长为  $\lambda$  的照射

到探测上时,探测器的输出电压。 $I(\lambda)$ 表示的是当入射光功率为 $P(\lambda)$ 波长为 $\lambda$ 的照射到探测上时,探测器的输出电流。 $R_v(\lambda)$ 和 $R_i(\lambda)$ 表示的都是探测器,故可以使用 $R(\lambda)$ 来统一表示。

本文在不同环境条件下测试了硅光电二极管的光谱响应。分析了硅光电二极管的光谱响应的相关条件影响和硅光电二极管的光谱响应规律。通过改变硅光电二极管在测光电路中的负载电阻和偏置电压测试硅光电二极管的响应时间,解释硅光电二极管的物理特性。

## 2. 光谱响应装置

硅光电二极管的光谱响应测量装置,该装置包括白光光源、光学调制盘,包括选频放大器和调制盘驱动器、准直透镜、平面光栅、可变光阑、可调微透镜、热释电探测器、锁相放大器和计算机。只需要测出探测器接受波长为 $\lambda$ 的光照,所输出电压 $V(\lambda)$ 或者输出电流 $I(\lambda)$ ,和光功率 $P(\lambda)$ ,便可以计算出相应的光谱响应度。光电探测器在接收到光信号后,会生成电信号输出,输出的电信号会落后于作用在探测器上的光信号,在收到光信号和输出信号之间会相隔一个段时间间隔为响应时间。

图1是硅光电二极管的光谱响应测量装置示意图,1为白光光源,2为光学调制盘,3为第一准直透镜,4为可调离轴抛物镜,5为平面光栅,6为可调微透镜,7为可变光阑,8为第二准直透镜,9为热释电探测器,10为锁相放大器,11为计算机。通过调节离轴抛物镜,可以使得出射光的波长由长到短的顺序出现。为降低光谱测量误差,重复测量3~5次,得到平均值。

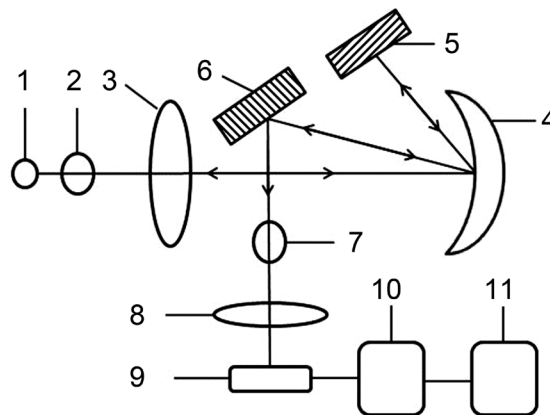


Figure 1. Schematic of measuring device for spectral response of silicon photodiode

图1. 硅光电二极管的光谱响应测量装置示意图

## 3. 光谱响应度分析

测量光谱响应度使用光栅单色仪对卤素灯发出的灯光进行分光,使得从单色仪中输出不同波长的单色光。但是,由于实际光源的辐射功率是与光波长相关的函数,所以不能直接测试结果,只能通过相对测量的方案,这个方案需要利用参考探测器,通过参考探测器来确定输出单色光的光功率 $P(\lambda)$ 。相当于使用一个已知光谱响应度为 $R_f(\lambda)$ 的探测器为基准,然后使用同一波长的单色光分别照射待测探测器和基准探测器。再由基准探测器测得的数据,推出入射单色光的光功率。

已知基准探测器可以测得输出电压为 $V_f(\lambda)$ ,由电压光谱响应度数学计算公式转换可以得到算式:

$$P(\lambda) = V_f(\lambda) R(\lambda) \quad (3)$$

由此可以算出入射光的光功率 $P(\lambda)$ 。因为使用的基准探测器为热释电探测器,但是热释电探测器的响应度与波长无关,所以,就可以推算公式:

$$P(\lambda) = \frac{V_f(\lambda)}{R_f K_f} \quad (4)$$

其中  $K_f$  为热释电探测器的总放大倍数,  $K_f = 100 \times 300$ 。  $R_f$  为热释电探测器的响应度, 在调制盘的调制频率下,  $R_f = 900 \text{ V/W}$ 。当两个探测器在同一光功率  $P(\lambda)$  的单色光下时, 令  $V_b(\lambda)$  表示硅光电二极管的输出电压, 则可以得到相应的硅光二极管的光谱响应度的计算方程为:

$$R(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{P(\lambda)} = \frac{V_b(\lambda)/K_b}{V_f(\lambda)/R_f K_f} \quad (5)$$

其中,  $K_b$  为硅光电探测器的总放大倍数。  $K_b = 150 \times 300$ 。

入射光子的能量、材料的禁带宽度和吸收系数是光谱响应曲线具有波长选择性的主要原因[6] [7]。我们根据已知的测量数据计算出硅光电二极管的光谱响应度。探测器对入射光波长 950 nm 敏感, 影响探测器的响应; 同时环境吸收光也会影响探测器的响应。另外, 气流和温度的变化会影响热释电探测器的正常工作。因此我们在环境亮度小, 气流流动小, 探测器没有达到完全吸收出射光情况下, 选择在两个探测器接受光照下所获得的数据, 如图 2 所示。两组数据趋势线相同, 切换探测器后探测器的受光角度发生了变化, 此变化只会引起探测器的整体响应度, 并不会影响探测器响应所形成的曲线形状。实验结果表明, 探测器不仅吸收了卤素灯调频出的单色光, 同时也吸收了周围的反射光, 环境光也影响着探测器光谱响应度。多组数据的测量结果表明, 入射光波长在 550 nm 到 900 nm 之间, 探测器响应都比较稳定, 尽管强度在一定范围内出现波动, 但曲线的整体趋势是一致的。

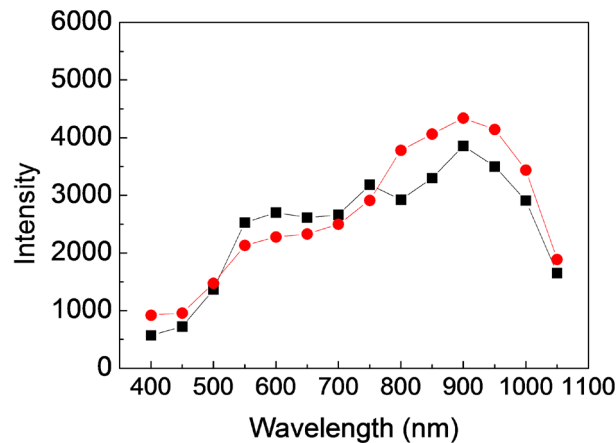


Figure 2. Measurement curve of twice spectral responses

图 2. 两次光谱响应度测量曲线

#### 4. 硅光电二极管的时间响应测试分析

光电探测器在接收到光信号后, 会反应生成电信号输出, 输出的电信号会落后于作用在探测器上的光信号, 在收到光信号和输出信号之间会相隔一个段时间间隔为响应时间。响应时间会影响探测器的持续输出。如果探测器响应时间过长, 就会导致探测器的后输出与前输出曲线重叠, 过长的响应时间就会导致输出图形严重变形, 从而影响探测的性能[7]。幅频特性指的是光电探测器对正弦光信号的响应幅值与调制频率间的关系。幅频特性的数学表达式为:

$$A(\omega) = \frac{1}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (6)$$

其中,  $\omega = 2\pi f$  表示的是调制圆频率;  $f$  为调制频率; 响应时间表示为  $\tau$ ;  $A(\omega)$  表示归一化后的幅频特性。令待测输出电压为  $V(\omega)$ , 则其数学关系式为:

$$V(\omega) = \frac{V_0}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (7)$$

$V_0$  表示的是当入射光的调制频率为零时的输出电压。

当探测器在不同调制频率下工作时, 可以根据调制频率与探测器的输出电压来计算出探测器的响应时间  $\tau$ 。设调制频率为  $f_1$  时, 测量探测器输出的电压为  $V_1$ ; 调制频率为  $f_2$  时, 测量探测器输出的电压为  $V_2$ ; 由输出电压  $V(\omega)$  的数学关系式, 可以得到  $V_1$  和  $V_2$  的关系式如下:

$$\tau = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{V_1^2 - V_2^2}{(V_2 f_2)^2 - (V_1 f_1)^2}} \quad (8)$$

硅光电二极管的响应时间与其偏置电压和负载电阻都有关系, 本实验中光电二极管的偏压与负载电阻分别可调, 偏置电压分别为 5 V、10 V、15 V, 负载电阻分别为 100  $\Omega$ 、1 K $\Omega$ 、10 K $\Omega$ 、50 K $\Omega$  和 100 K $\Omega$ 。光源的驱动电源有脉冲和正弦波两种, 并且频率在一定范围内可调。分别计算出硅光电二极管的响应时间随负载电阻和偏置电压的变化关系。

表 1 为硅光电二极管的响应时间随负载电阻和偏置电压的变化关系, 从表 1 可以看出, 在负载电阻恒定的条件下, 随着负载的偏置电压的增加, 硅光电二极管的响应时间有一个逐渐减小的变化趋势。当偏置电压值不变时, 随着负载电阻的增大响应时间增多。理论上来说, 偏置电压升高, 响应时间降低, 负载电阻增大, 响应时间也相应增大。硅光电二极管从有光照到无光照这一过程中, 光照越强, 响应时间就会越长[8]。当负载电阻为 100 K 时, 随着偏置电压升高, 响应时间呈现出逐渐增大的趋势, 如此时输出状态处于饱和状态或者在示波器上没有完整的显示波形, 则需要调节示波器的显示图形, 否则测试值误差较大, 不能体现出真实的响应时间。因此在使用硅光电二极管的探测器过程中应该适当减小负载电阻, 并适当增大偏置电压。

**Table 1.** Response time of silicon photodiode with different resistance and bias voltages

**表 1.** 硅光电二极管的响应时间随负载电阻和偏置电压的变化关系

偏置电压(V)	负载电阻( $\Omega$ )					
	500	2 K	10 K	50 K	100 K	
5	48.8	51.6	72	192	466	
10	44.8	48.4	54.8	160	412	
15	40.8	45.2	47.2	132	384	

## 5. 总结

本文分析了硅光电二极管的光谱响应的条件以及硅光电二极管的光谱响应规律。分析测试环境对硅光电二极管的光谱响应度的影响, 测试结果表明环境光对硅光电二极管的光谱响应度在 900 nm 至 1000 nm 之间具有明显的作用。硅光电二极管的时间响应特性表明, 当负载电阻值不变时, 硅光电二极管的响应时间随着电压的增大而减少。当偏置电压值不变时, 响应时间随着负载的增大而增大。

## 基金项目

2019 年海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC190, 2019RC192), 海南省自然科学基金(2018CXTD336, 618QN241), 海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020ZD-12, Hnky2020-24), 海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005), 国家自然科学基金项目(61864002, 61964007)和中国工程科技发展战略项目(19-HN-XZ-07)资助。

## 参考文献

- [1] 朱世国, 周积骏. 半导体光电二极管伏安特性的实验测定[J]. 物理实验, 2000, 20(2): 12-14.
- [2] 崔亦飞, 王洪涛, 张雷. 硅光电二极管光谱响应率的测量[J]. 大学物理实验, 2005, 18(3): 61-63.
- [3] 王巍, 陈婷, 李俊峰, 何雍春, 王冠宇, 唐政维, 袁军, 王广. 高光电探测效率 CMOS 单光子雪崩二极管器件[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 0823001-1-0823001-7.
- [4] 张燕, 曾光宇, 洪志刚. 硅 PIN 光电二极管探测系统的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(2): 391-393.
- [5] 赵庆添, 杨连生, 耿秀珍. 半导体光电探测器件光谱响应和响应度的测试[J]. 半导体光电, 1980(4): 35-39.
- [6] 张学骛, 吴昊, 张海良, 王飞, 贾红辉. 硅光电二极管光谱响应度的分析[J]. 大学物理实验, 2011, 24(2): 25-27.
- [7] 富容国, 常本康, 钱芸生, 詹启海. PIN 光电二极管探测器响应特性测试[J]. 光学与光电技术, 2007, 5(1): 11-13.
- [8] 初宁, 曹立军, 黄威. 基于光照强度的 PIN 光电二极管响应时间分析[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 34-37.