

文章编号:1001-5078(2007)08-0765-04

集成光电探测器绝对光谱响应度测试研究

陈世军,袁红辉,丁毅,王欣
(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:分析了光电探测器的结构及光谱响应度的测试原理,基于 LabVIEW 图形化软件,研制了一套 $0.2 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 的光电探测器绝对光谱响应度测试装置。本系统采用单光路小光点标准替代法进行测量,系统组成灵活并可扩展,配合自行研制的驱动电路和采样保持电路,可以满足不同器件的需要。采用本系统对上海技物所研制的多种集成光电探测器的绝对光谱响应度进行测试,测试结果表明了系统的可行性。

关键词:光电探测器;绝对光谱响应度;LabVIEW;虚拟仪器

中图分类号:TN364 **文献标识码:**A

Research the Development of Absolute Spectral Response for Integrated Photodetector

CHEN Shi-jun, YUAN Hong-hui, DING Yi, WANG Xin
(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The structure and the testing principle of spectral response of photodetector were analyzed. A device used for testing absolute spectral response with wavelength ranged from $0.2 \mu\text{m}$ to $1.1 \mu\text{m}$ is developed by LabVIEW. This system used single optical channel substituted measurement methods, it is flexible and expandable with clock driver and sample and hold circuit that were developed by ourselves, it can satisfy the needs for measuring various devices. The experiment of testing integrated photodetector was achieved using this system. The result verifies to the feasible of this system.

Key words: photo-detector; absolute spectral response; labVIEW; virtual instrument

1 引言

集成光电探测器是将光电二极管阵列及读出电路集成在同一硅芯片上,它是硅光探测器将来发展的主要方向,与传统的单元探测器相比,具有灵敏度高、视场大、空间分辨率高、探测识别距离远、可直接成像等优点,因此在航天、军工、国防等领域得到广泛的应用。

绝对光谱响应度是硅光探测器的重要技术参数之一,它描述的是探测器绝对响应率与波长之间的关系。该参数的正确测试对于探测器的机理分析、工艺改进以及系统的整体设计有着重要的意义。传统的光电探测器光谱测试系统只能用于单元硅光探测器的光谱响应度测试,该光电探测器光谱测试系

统有效实现了集成光电探测器的绝对光谱响应度测试。

2 测试方法

2.1 光电二极管结构

半导体内因光吸收而产生电子-空穴对,在耗尽区内或其扩散长度内产生的电子-空穴对最后被电场分开,当载流子穿过耗尽层漂移时,就在外电路内流过电流。

不同波长的入射光在硅材料中被吸收的情况是不同的。波长短的光透入深度浅,易被表面层吸收,

作者简介:陈世军(1967-),女,研究方向为半导体器件测试及集成电路设计。E-mail:susan1967@citiz.net

收稿日期:2007-01-19;**修订日期:**2007-03-15

例如波长为 400 ~ 500nm 的光可在表面内零点几微米范围内被完全吸收;波长长的光,例如波长为 900 ~ 1100nm 的光则可以透入硅材料内几十微米。但是光生载流子中,只有那些能扩散进入耗尽区从而能够被收集的光生载流子才对光电流有贡献^[1]。

由图 1 可知:

(1) 波长长的光,吸收一直延伸到结的较深处,在此处产生的光生电子-空穴对,向耗尽区边界的各个方向做扩散运动,由于扩散长度的限制,使得耗尽区边界的大小,对收集到的光生载流子数目起关键性作用,使得入射光斑照在光敏面中央 1 处接受光生载流子的相对有效的耗尽区面积大于入射光斑照射在边缘 2 处,较大地影响了光谱响应度。

(2) 波长短的光,入射光在非常靠近表面处就被完全吸收,入射光斑照在光敏面中央和边缘,两者产生的差别不大。

(3) 若器件表面处理不好,入射光照射在光敏面外 3 处,也有光透过,也会影响光谱响应度的测试,这将产生光敏面扩大效应。

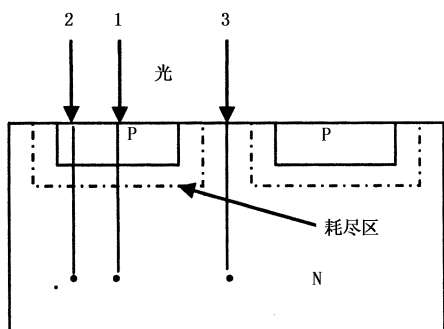


图 1 光电二极管结构

Fig. 1 construction of photodiode

2.2 入射光斑

(1) 入射光斑大于被测光敏面积,这就要求入射光斑能量均匀,定了标,而且保证器件光敏面外无光谱响应,这样测出的光谱较准确,与实际使用相符合,否则误差会很大,其中包括光斑能量不均匀和光敏面的扩大效应。

(2) 入射光斑小于被测光敏面积(光点大小 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$),这就要求器件很均匀,这样测出的光谱中心和边缘差别大,它不能反映光敏面的平均效应,它非常适合小光敏面的光谱绝对响应度的测量。

综合考虑以上各种方法的优缺点后,本系统选择了单光路小光点标准替代法进行集成光电探测器

的绝对灵敏度测量。图 2 是系统工作原理框图。

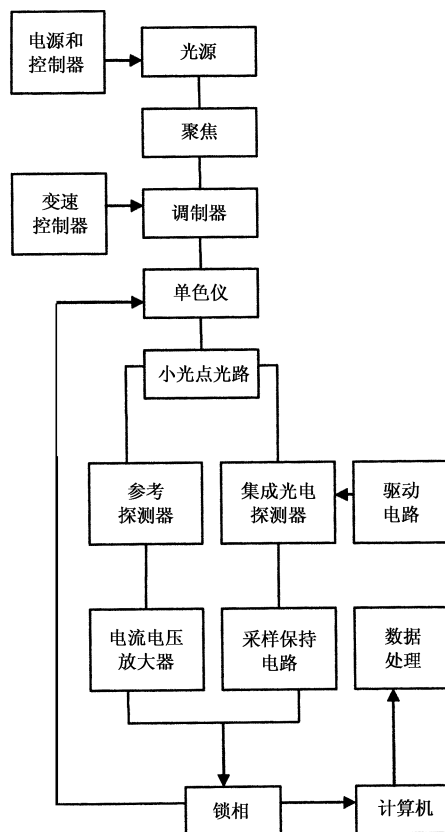


图 2 系统工作原理框图

Fig. 2 block diagram of system principle

从图 2 可以看出,系统主要由六个部分组成:光学系统、参考探测器、驱动电路、采样保持电路、锁相放大器和计算机系统。

3 系统组成

3.1 光学系统

光学系统包括光源、调制器、单色仪和小光点光路。由光源箱提供经过调制的 200 ~ 500nm 氙灯紫外光源和 400 ~ 1200nm 的卤钨灯的可见近红外光源,光源发出的光由聚光镜会聚于单色仪的入射狭缝上,并在狭缝前用同步电机带动的调制盘对入射光束进行调制。单色仪把入射光分解成单色光并从出射狭缝射出经单色仪对入射的光源进行分光后输出单色光,该单色光的确定可通过软件选择,也可手动控制。利用牛顿反射光学系统用一块平面次反射镜把焦点引到有利于放置探测器的位置。图 3 为小光点光路图,凹面镜(M2)聚焦成小光点并通过反射镜(M1)反射到探测器所需要的位置,因为透镜具有色散,这将改变探测器上光点的大小,所以不被考虑用来聚焦,小光点的光斑大小用 CCD 线列测试,可以达到 $80\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$ 。

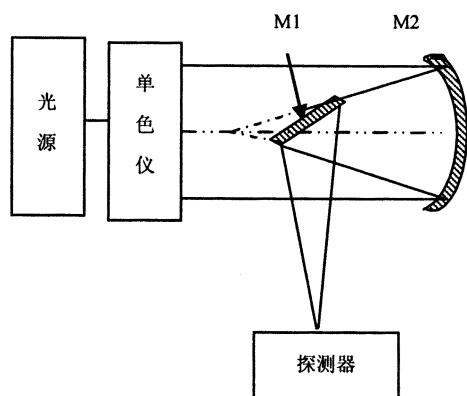


图3 小光点光路

Fig.3 optical channel of spot

3.2 标准探测器

采用性能较好的带放大器的美国 ORIEL 公司 UV-70356 的探测器,并经美国国家实验室标定作为参考探测器,光谱范围 200 ~ 1100nm。

3.3 驱动电路

为不同的硅光探测器阵列提供各种驱动脉冲信号,由于不同器件的电路结构不同,所需驱动脉冲信号的数量、电平等不尽相同,我们研制的驱动模块具有输出脉冲高、低电平电压从 -30 ~ +30V 可调,脉冲频率可调,能够适应不同器件测试的需要。

3.4 采样保持电路

由图4可得带读出电路的硅探测器阵列的电信号输出是离散的,要测出任一光敏元的光谱响应,必须将离散的光信号变成连续的光信号。通过采样保持电路对某一光敏元电信号进行采样并保持得到连续的电信号,连续的电信号调制后经过锁相检波输入计算机,经软件处理得到探测器的光谱响应率。

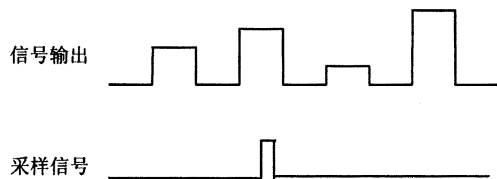


图4 采样保持波形图

Fig.4 diagram of sample and hold

3.5 锁相

为保证测量精度,系统采用了美国 ORIEL 公司的 70100Merlin 锁相系统,经过锁相放大器将含有参考频率的电信号检出,而其他频率的信号(噪声)则被抑制掉,从而提高了系统的信噪比,保证了测量的精度。

3.6 测试系统软件

虚拟仪器是信号采集、处理和计算机技术相结合的产物,借助硬件和软件模块,进行数据采集、处理、分析、存储和输出。采用虚拟仪器技术,使得用

户界面操作简单、修改方便,用户自己就可以通过编程来定义仪器系统的功能。其图形化编程语言 LabVIEW 为用户提供了强大的功能模块,可以实现数据采集、仪器控制、过程监督和自动测试等功能,使得利用计算机平台进行自动控制及测量成为可能,从而开辟了通过软件编程实现测量仪器功能的新途径^[2]。LabVIEW 高度集成了各种 GPIB, RS-232 等标准设备及数据采集的驱动功能,可轻而易举地与外部设备进行通讯和控制^[3]。探测器输出的电信号输入锁相放大器输出与光谱信号相应的电信号,并通过 RS232 通讯串口将数据送入计算机,由 LabVIEW 控制进行数据采集和分析处理,得出光谱数据,实现了系统的自动化功能,图5为操作软件界面。

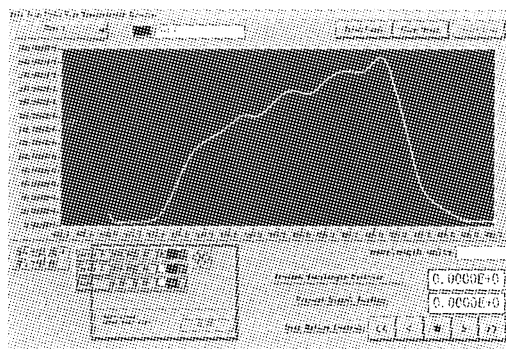


图5 光谱测试系统操作界面

Fig.5 option spectral response testing system

4 测试步骤

利用等能量光谱响应,即在单位波长间隔内、相同辐射功率(或能量)条件下测得的器件响应随波长的变化规律。本系统借助被定标的硅光二极管的光谱响应度作参考探测器与被测探测器进行比较测量,因为辐射到探测器上的小光点小于探测器光敏面积,所以测出的光谱响应度为绝对光谱响应度。

测试采用已校准过的参考探测器替代法^[4],先将参考探测器放在小光点处,对入射单色光的能量进行测量,测出探测器输出的电流值:

$$I_s(\lambda) = R_s(\lambda) \cdot P_s(\lambda) \quad (1)$$

式中, $P_s(\lambda)$ 为探测器上的能量, W; $R_s(\lambda)$ 为参考探测器的光谱响应率, A/W。

然后将参考探测器移去,并将被测探测器装在不同的位置上,再对被测探测器进行测量。在这种方法中,由于被测探测器和参考探测器在同样的条件下被辐照,得到其光电流值:

$$I_x(\lambda) = R_x(\lambda) \cdot P_x(\lambda) \quad (2)$$

式中, $P_x(\lambda)$ 为探测器上的能量, W; $R_x(\lambda)$ 为被测探

测器的光谱响应率, A/W。

由于在同一测试条件下测量, $P_s(\lambda)$ 和 $P_x(\lambda)$ 相同, 根据式(1)和式(2)可得:

$$R_x(\lambda) = \frac{I_x(\lambda)}{I_s(\lambda)} R_s(\lambda) \quad (3)$$

$$R_x(\lambda) = \frac{V_x(\lambda) \cdot R}{V_s(\lambda)} R_s(\lambda)$$

其中, R 为参考探测器放大器反馈电阻, 一般为 $10^6 \Omega$ 。因为 $R_s(\lambda)$ 已知, 只要测出各波段的 $V_x(\lambda)$ 和 $V_s(\lambda)$ 值, 根据公式可求得被测硅探测器阵列的光谱响应度^[5]。

5 误差源

影响测量精度的主要因素为: 光源的稳定性, 光谱仪的测试精度(它的波长精度和重复性), 杂散辐射和电子测试系统引起的误差。

5.1 辐射源

要获得稳定的辐射场, 就要求控制光源的电源保持稳定, 使用电流控制代替电压控制, 以避免接触电阻变化的影响。为此, 我们选择了可使氙灯电流的不稳定度小于 0.05% rms, 卤钨灯电流的不稳定度小于 0.25% rms。

5.2 光谱仪

系统采用美国 ORIEL 公司 Cornerstone130 monochromator 单色仪, 它是一种两光栅式单色仪, 光栅刻线数为 1200l/mm 时波长的准确度为 0.50nm, 精度为 0.11nm。从而有效保证了系统波长的重复性。波长扫描、光栅更换实现了自动化控制。

5.3 杂散辐射

杂散辐射指落到探测器上不是来自单色仪的任何辐射。本系统虽然使用了调制光源和锁相放大器, 但为减小各方面的误差, 如空间的杂散辐射等, 将从单色仪到探测器这部分光路封闭在暗盒内。

6 光谱特性测试实例

6.1 光电探测器光谱响应曲线(如图6所示)

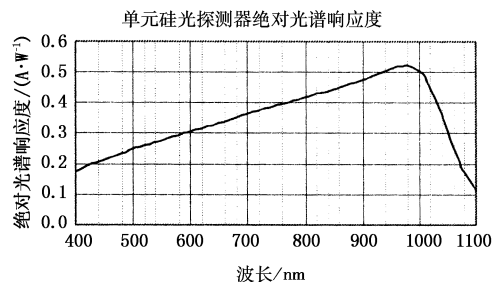


图6 光电二极管光谱响应曲线

Fig. 6 spectral curve of photodiode

6.2 带有读出电路的粘有滤光片的多通道硅光探测器阵列组件光谱响应曲线(如图7所示)

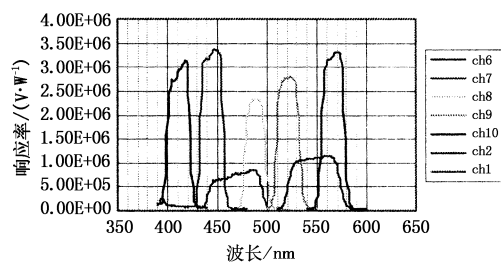


图7 多通道硅光探测器阵列光谱响应曲线

Fig. 7 spectral curve of photodetector array with seven channels

6.3 校正单色仪波长准确度的荧光等光谱曲线(如图8所示)

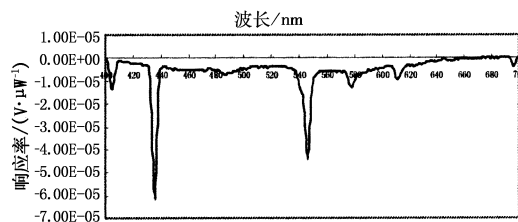


图8 荧光灯光谱曲线

Fig. 8 spectral curve of fluorescent lamp

7 结论

本套测试系统可以满足不同被测光电探测器的需要。测试范围从 200 ~ 1100nm, 自动化程度高。运用了虚拟仪器技术, 数据采集和分析处理功能强。测试操作简便、效率高、精确度好, 是一种实用的测试系统, 为半导体光电探测器的发展提供了有利的技术支持。

参考文献:

- [1] 汤宝元, 糜正瑜, 等. 光电器件概论[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989: 240 - 244, 452 - 454.
- [2] Lu Qi-yong, Li Xiang-hua, Zhang Zhong-hai. Designing a virtual instrument testing platform based on a computer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24 (S1): 546 - 548. (in Chinese)
- [3] Li Lin-feng, Dong Lei, Zhang Lei, et al. Auto-measuring system for light spectrum achieved by LabVIEW[J]. Optical Instruments, 2006, (2): 66 - 70.
- [4] 国际照明委员会. 光辐射探测器光谱响应度测量指南[M]. 李同保, 黄廷忠译. 北京: 中国测试技术研究院, 1984: 5 - 15.
- [5] Zhang hui, Liu Jian-wei, Yang Liang, et al. Study and development of spectral responsibility testing system for ultraviolet-visible detector[J]. Laser & Infrared, 2003, 33 (5): 371 - 373. (in Chinese)