

CCD 器件相对光谱响应测试仪

闫 丰, 周 跃*, 章明朝, 陈 雪

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘 要 设计并实现了一种涵盖 400~950 nm 的全自动 CCD 器件相对光谱响应测试仪。分析了成像器件的相对光谱响应测试原理, 采用宽光谱、高灵敏度响应的科学级光纤光谱仪 QE65000 作为参考探测器, 基于单光路直接比较法, 构建了 CCD 器件相对光谱响应测试仪器。该装置可全自动完成 CCD 器件的相对光谱响应测量, 不确定度分析结果表明, 该装置对 CCD 器件开展相对光谱响应的最大不确定度为 6.21%, 满足应用需求, 可为 CCD 等图像传感器甄选、参数性能评价及后续整机测试提供关键数据支撑。

关键词 CCD; 相对光谱响应; 全自动测试; 不确定度

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)10-2865-04

引 言

电荷耦合器件 (CCD) 具有信号输出噪声低、动态范围大、量子效率高以及电荷转移效率高等优点, 以其对信息表达的高灵敏度和高准确性在天文、遥感、军事、医学、安防、工业等诸多领域^[1-7]被广泛应用。目前, 国内 CCD 芯片研制及光电参量测试技术与国外差距较大, 而西方发达国家高端航空级 CCD 价格极为昂贵, 且大部分对我国禁售, 国内在航空、航天领域对高性能 CCD 器件需求又极为迫切。为降低成本, 节约时间, 通常购置国外商业、工业级 CCD 芯片按照器件性能进行甄选。因此, 亟需开发能够完成对 CCD 器件光电参量进行精确测试的仪器设备, 为国内 CCD 器件应用及后续整机性能评估测试提供关键数据支撑。

光谱响应描述了探测器响应与辐照波长之间的关系^[8], 是 CCD 探测器的基本参数之一, 是器件甄选、应用系统设计与性能评估的重要参考。目前, 探测器相对光谱详细测试可归纳为四种基本方法: 宽带滤光片法; 标准替代法; 直接比较法; 傅里叶变换法^[9-11]。宽度滤光片测量由于精度低已很少被使用。傅里叶变换法需要一个已知分光比谱曲线的分束镜, 而且测量结果中包含了参考探测器的幅频特性, 影响了测量准确度。直接比较法和标准替代法采用将探测器在单色辐照下的输出与已知相对光谱响应的参考探测器进行比较获得 CCD 器件的相对光谱响应, 二者的区别在于直接比较法是将参考探测器始终放置于系统中, 不需要反复拆卸, 但要

求参考探测器的稳定度高。数据采集系统采集 CCD 探测器与参考探测器输出信号之后, 经处理得到 CCD 探测器的相对光谱响应。该方法在一定程度上减少了环境和背景的影响, 需要系统光谱的高度稳定性及单色仪的高度重复性, 其测量准确度较高。实际应用中, 多采用直接比较法。

目前, 国内采用直接比较法开展相对光谱响应测试时, 参考探测器多采用无光谱选择性的探测器 (如真空热电堆、腔体热释电探测器^[12-15]), 其响应速度慢, 单色辐照要求高, 与 CCD, 特别是高灵敏度 CCD 实际应用要求相去甚远。面向可见光 CCD 相对光谱响应需求, 本文选用具有高量子效率、高线性度及信噪比的 QE65000 科学级光纤光谱仪为参考探测器, 基于单光路直接比较法设计并实现了一种全自动 CCD 器件相对光谱响应测试仪, 开展了实际测试工作, 并就不确定度进行了分析讨论。

1 测试原理

CCD 器件对入射的单色辐射 λ 产生的电信号 $V(\lambda)$ 与此波长下的光照度 $E(\lambda)$ 之比称为 CCD 器件绝对光谱响应 $s(\lambda)$

$$s(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (1)$$

应用中常用绝对光谱响应最大值 $s_{\max}(\lambda)$ 对各谱段响应进行归一化, 得到 CCD 器件的相对光谱响应

$$S(\lambda) = \frac{s(\lambda)}{s_{\max}(\lambda)} \quad (2)$$

收稿日期: 2013-01-31, 修订日期: 2013-04-08

基金项目: 国家(863)计划重大课题(2012AA03A707)资助

作者简介: 闫 丰, 1975 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室副研究员 e-mail: yan.feng@126.com

* 通讯联系人 e-mail: zhouy385@ciomp.ac.cn

在单光路直接比较法测试中, 首先将一个相对光谱响应已知的参考探测器放置在单色仪出射狭缝处, 调节单色仪, 当波长为 λ 的单色光 $E(\lambda)$ 均匀照射时, 参考探测器的输出值为

$$V_C(\lambda) - V_{C_dark} = k_C E(\lambda) S_C(\lambda) \quad (3)$$

式中 $S_C(\lambda)$ 为参考探测器的相对光谱响应; k_C 为系数; V_{C_dark} 为参考探测器的暗背景噪声。

其次, 将被测 CCD 放置在单色仪出射狭缝处, 通过数据采集卡获取同一辐照场下 CCD 的响应输出

$$V_T(\lambda) - V_{T_dark} = k_T E(\lambda) S_T(\lambda) \quad (4)$$

式中 $S_T(\lambda)$ 为被测探测器的相对光谱响应; k_T 为系数; V_{T_dark} 为被测 CCD 的暗背景信号。

最后, 将式(3)和式(4)相除, 得到式(5), 为在波长 λ 单色辐照下的被测 CCD 的相对光谱响应

$$S_T(\lambda) = K \frac{V_T(\lambda) - V_{T_dark}}{V_C(\lambda) - V_{C_dark}} S_C(\lambda) \quad (5)$$

再按照式(2), 进行归一化, 即可求得被测探测器的归一化相对光谱响应曲线。

2 测试装置

CCD 宽光谱相对光谱响应测试装置如图 1 所示。

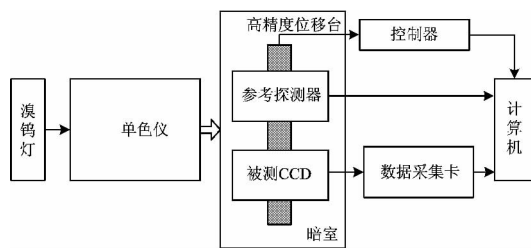


Fig 1 Schematic diagram of the experimental setup

该系统包括如下几个部分:

(1)光源: 由于测试光谱范围为 400~950 nm, 光源色温应在 2 800~3 100 K, 故采用 π 型溴钨灯作为系统基本光源, 其色温为 (3 100 $\pm$ 100) K。该型光源稳定性好, 温度高, 寿命长, 安装方便。为保证光源的高稳定性, 其供电电源采用稳流稳压的直流电源, 稳定性优于 0.03%/0.5 h, 最终溴钨灯发光强度的稳定性优于 0.1%/0.5 h。

(2)单色系统: 光源与单色仪采用照明光学系统耦合, 其相对口径与单色仪匹配, 以充分利用能量, 避免相对口径过大导致色散系统产生额外的杂散光。单色仪选用 TGD-500A 双光栅单色仪(第一块光栅 1 200 l $\cdot$ mm $^{-1}$; 第二块为 600 l $\cdot$ mm $^{-1}$)。光谱范围 350~2 500 nm, 波长准确度为 $\pm$ 0.2 nm, 重复性为 0.05 nm, 线色散为 1.7 nm $\cdot$ mm $^{-1}$, 分辨率为 0.05 nm, 杂散光 <0.05%。为防止二级光谱带来的干扰, 单色仪已安装滤光片轮。

(3)参考探测器: 是相对光谱响应测量的核心, 其性能好坏直接决定测量精度。精心选择了美国海洋光学公司的 QE65000 光谱仪, 它具有 90% 的量子效率, 线性度高达 99.8%, 具有极高的信噪比, 适用于荧光测量、天文学等低

亮度条件下应用。同时, QE65000 采用背照式 Hamamatsu S7031-1006 FFT-CCD 面阵探测器, 在紫外区也具有极高的响应, 其实际涵盖光谱 200~950 nm。为在测试仪中将其作为参考探测器, 首先要确定该科学级光谱仪的光谱响应度曲线。针对测试光谱区域, 采用可溯源于美国国家标准和技术研究所(NIST)的卤钨灯光源 D2000-cal 标准次级光源对 QE65000 进行光谱响应度定标, 卤钨灯光谱辐照度的不确定度 <5%。

(4)精密位移台: 参考探测器与被测 CCD 器件被固定于精密位移台上, 计算机可通过控制器调节参考探测器或被测 CCD 器件对准单色仪出射狭缝, 开展测试。该精密位移台最关键的问题是移动的定位精度能够确保移动中位置的重复性, 其重复精度 <0.05 mm。

(5)采集与数据处理系统: 包括计算机、图像采集卡以及配套软件。采用美国国家仪器公司的图像化编程语言环境 Labview 编写了该系统的专用配套软件, 在固定被测 CCD, 设置波长范围、步进波长等参数后可全自动完成 CCD 相对光谱响应, 并生成测试报告。

同时, 为保证测试精度, 该装置配有专用暗室排除杂散光的影响。

3 相对光谱测试

3.1 参考探测器定标

在使用光纤光谱仪作为参考探测器进行光谱响应测试前, 首先需要对参考探测器定标, 确定其相对光谱响应。这里采用可溯源于美国 NIST 标准的小型化卤钨灯光源, 输出为 SMA905 标准接口, 直接使用直径 600 μ m 的光纤将标准灯的出口与参考探测器的光纤入口相连, 从而有效地屏蔽了杂散光, 提高了定标精度。

定标方法为: 待标准卤钨灯光源加电稳定 15 min 后, 将光纤光谱仪与标准光源通过光纤连接, 通过光谱仪软件直接读出光谱仪在各波长的计数输出值 $C(\lambda)$, 而标准光源的光谱辐照度 $E(\lambda)$ 已经由美国 NIST 定标, 则光纤光谱仪的相对光谱响应 $S_{QE}(\lambda)$ 为

$$S_{QE}(\lambda) = \frac{C(\lambda) - C_{dark}(\lambda)}{E(\lambda)} \quad (6)$$

式中, $C_{dark}(\lambda)$ 为在谱段 λ 的暗计数输出。

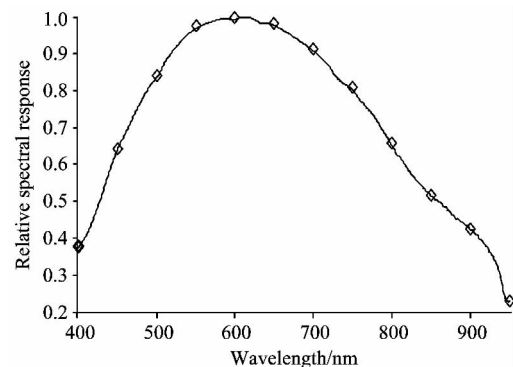


Fig 2 Relative spectral response of spectrometer

光纤光谱仪定标完成后的归一化相对光谱响应度曲线如图 2 所示。

3.2 测试结果

将被测 CCD 与参考探测器固定后, 首先测试二者的暗背景信号, 获得 V_{T_dark} 和 V_{C_dark} 。其次调节单色仪, 在各单色波长辐照场下通过精密位移台使参考探测器和被测 CCD 依次对准单色仪出射狭缝并记录输出 $V_C(\lambda)$ 和 $V_T(\lambda)$ 。根据式 (2) 和式 (5) 计算得到被测 CCD 的归一化相对光谱响应曲线。图 3 为某型号 CCD 的归一化相对光谱响应曲线。

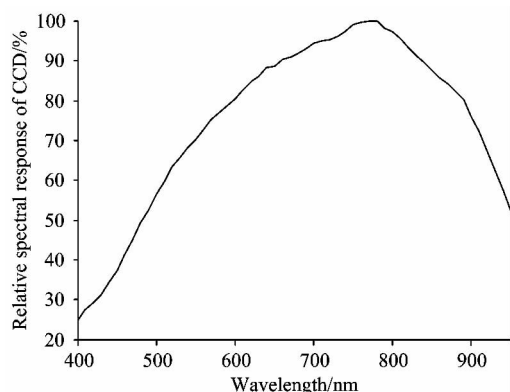


Fig 3 Relative spectral response of CCD

4 误差分析

对 CCD 进行相对光谱响应测试过程中将不可避免地存在各种误差。为准确估算出相对光谱响应测试精度, 需要考虑各个可能带来测试误差的因素。采用不确定度分析是目前通用方法。对该装置开展相对光谱响应测试的不确定度可从以下几个方面加以分析:

(1)光源的不稳定性。直接比较法测试时间长, 光源的稳定性对测试的准确度至关重要, 该装置使用卤钨灯经稳压

的措施后光强稳定度优于 $0.1\%/0.5\text{ h}$, 且测试过程中采用标准参考探测器与被测 CCD 交替测试, 故光源不稳定性可忽略不计。

(2)定标光纤光谱仪的误差。溯源于美国 NIST 的标准灯的光谱辐照度不确定变为 5% , 采用标准卤钨灯定标光纤光谱仪 QE65000 引起的不确定度为 2% 。

(3)波长误差。由单色仪出射的单色光具有一定的带宽, 实际测量值是一窄谱带 $\Delta\lambda$ 内的积分灵敏度。用它来代替波长 λ 处的光谱灵敏度, 就会引起波长误差。该测试中该部分带来的不确定度约为 0.8% 。

(4)被测 CCD 在测试过程中, 由于被测 CCD 的响应非均匀性、测试系统中的杂散光、数据采集的读数误差带来的不确定度为 3% 。

综合上述因素, 该装置测试 CCD 的相对光谱响应的最大不确定度为

$$\sqrt{0.02^2 + 0.05^2 + 0.008^2 + 0.03^2} \times 100\% \approx 6.21\%$$

从应用的角度考虑, 该装置已经能够满足测试需求。

5 结 论

通过研究相对光谱响应的测试技术, 选择在 $400 \sim 950\text{ nm}$ 具有优异响应能力的科学级光纤光谱仪 QE65000, 基于单光路直接比较法, 设计并实现了 CCD 器件的相对光谱响应测试仪, 并完成了 CCD 的相对光谱响应实际测试。分析得到该装置开展测试的最大不确定度 6.21% , 满足了 CCD 应用需求。同时, 光纤光谱仪 QE65000 经标准灯定标后, 可作为标准探测器使用, 完成绝对光谱辐照度测试。

如替换参考探测器, 该装置同样可完成紫外或红外波段成像探测器件的相对光谱响应测试。目前, 该装置已成功用于航天级 CCD 测试甄选。

致谢: 感谢中国测试计量研究院杨华元研究员对本文的支持和帮助!

References

- [1] YUE Jun-hua, LI Yan, WU Xue-ying et al(岳俊华, 李 岩, 武学颖, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17(12):
- [2] Mazurenka M, Jelzow A, Ebert B, et al. SPIE Proceedings, 2011, 8088: 340.
- [3] Greer F, Hamden E, Jacquot B C, et al. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2013, 31(1): 01A103.
- [4] Valeriano F P, Sandy P N, Karsten F, et al. Light: Science & Applications, (2012) 1, e36; doi:10.1038/lssa.2012.36.
- [5] MIAO Jian-yu, ZHANG Li-ping, ZHAI Yan, et al(苗健宇, 张立平, 翟 岩, 等). Chinese Optics(中国光学), 2012, 5(4): 367.
- [6] Stern A, Aloni D, Javidi B. Photonics Journal, IEEE, 2012, 4(4): 1188.
- [7] Muller K, Ryll H, Ordavo I. Applied Physics Letters, 2012, 101(21): 212110.
- [8] Joseph J T, Anand S G, Ryan P S. Light: Science & Applications, (2012) 1, e24; doi:10.1038/lssa.2012.24.
- [9] LU Zhen-hua, GUO Yong-fei, LI Yun-fei, et al(卢振华, 郭永飞, 李云飞, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2012, 20(7):
- [10] ZHANG Hui, LIU Jian-wei, YANG Liang, et al(张 辉, 刘建伟, 杨 良, 等). Laser and Infrared(激光与红外), 2003, 33(5): 371.
- [11] WANG Zhen-chang, YI Qing-xiang, WANG Jie(王振常, 易庆祥, 王 捷). ACTA Metrologica Sinica(计量学报), 1990, 11(1): 1.
- [12] Budde R, Zaaime W, Ossenbrink H A. Photovoltaic Energy Conversion, 1994, 1: 874.
- [13] Ken Suk Hong, Dong-Hoon Led, Seongchong Park, et al. Precision Electromagnetic Measurements(CPEM), 2012 Conferences. 2012,

668.

[14] Bakumenko V L, Beguchev V P, Beguchev A S, et al. SPIE Proceedings, 2005, 5834: 355.

[15] Laurence J Cox, Peter J Key. SPIE Proceedings, 1983, 369: 46.

Test Equipment for Relative Spectral Response of CCD

YAN Feng, ZHOU Yue*, ZHANG Ming-chao, CHEN Xue

State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract The auto-test equipment for relative spectral response of charge coupled devices (CCD) was designed and realized. The equipment covered the range of 400 to 950 nm. Firstly, testing theory of relative spectral response for detectors was introduced. Secondly, taking the high sensitive and broad spectral scientific spectrometer-QE65000 as reference, auto-test equipment for relative spectral response was built up by direct comparison method in the same radiation field. Uncertainty analysis showed that the maximum uncertainty of the equipment was less than 6.21%. This auto-test equipment can be used in the CCD assessment and its photoelectrical parameters testing.

Keywords CCD; Relative spectral response; Auto testing; Uncertainty

(Received Jan. 31, 2013; accepted Apr. 8, 2013)

* Corresponding author