

紫外可见 NMOS 线阵图像传感器量子效率的定标研究

崔程光^{1,2}, 王淑荣¹, 李博¹, 王俊博¹, 黄煜¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 作为一种新型紫外可见线阵图像传感器, 紫外可见 NMOS 已经应用于国外的空间遥感探测中, 但是目前国内相关研究甚少。在紫外可见波段针对 NMOS 的重要光电性能参量——量子效率进行了定标研究, 为 NMOS 线阵图像传感器在紫外空间遥感探测的应用奠定了基础。基于美国标准技术研究院(NIST)标定的标准探测器, 构建了一套 NMOS 量子效率高精度定标系统。在 250~700 nm 波段范围内, 通过直接标定 NMOS 入射窗口处接收到的光子数, 结合 NMOS 信号处理及读出单元得到 NMOS 的响应电子数, 标定其量子效率。结果表明 NMOS 线阵图像传感器的量子效率在紫外波段达到 34% @275 nm, 在可见波段达到 80% @550 nm。通过不确定度分析, 量子效率的测量不确定度为 2.5%。

关键词: 遥感; 量子效率; 标准探测器; 线阵图像传感器; 定标

中图分类号: TP722.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2844-05

Study on the calibration for quantum efficiency of ultraviolet/ visible NMOS linear image sensors

Cui Chengguang^{1,2}, Wang Shurong¹, Li Bo¹, Wang Junbo¹, Huang Yu¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a new type of ultraviolet-visible linear array image sensor, NMOS has been applied to ultraviolet remote sensing abroad, but its research is still less domestically at present. This thesis aims at calibrating quantum efficiency of NMOS linear image sensor, which permits further application at space ultraviolet remote sensing. On the basis of standard detector provided by NIST, a high-accuracy calibration system was established to research quantum efficiency of NMOS linear image sensor. The number of photons, received by NMOS linear image sensor, was calibrated directly in this paper. And the number of electrons was calculated according to the signal processor and signal readout circuit of NMOS linear array image sensor. Then quantum efficiency of NMOS linear image sensor in 250–700 nm spectral range was calibrated. The result shows that quantum efficiency of NMOS linear image sensor reaches 34% @275 nm and 80% @550 nm. Through uncertainty analysis of quantum efficiency, the combined uncertainty is determined as 2.5%.

Key words: remote sensing; quantum efficiency; standard detector; linear image sensors; calibration

收稿日期: 2015-01-12; 修订日期: 2015-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(41105014, 41575023)

作者简介: 崔程光(1988-), 男, 博士生, 主要从事紫外光学遥感技术方面的研究。Email: gift.918@qq.com

导师简介: 王淑荣(1961-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间紫外光学遥感技术及光学检测、紫外辐射计量测试等方面的研究。

Email: srwang@ciomp.ac.cn

0 引言

随着大气痕量气体监测的需求和迅速发展,大气定量遥感已从非成像过渡至成像探测,相应的光谱响应器件也从单元器件发展至成像阵列探测器。欧空局(European Space Agency, ESA)先后于 1993 年发射搭载于 ENVISAT-1 卫星的扫描成像大气吸收光谱仪(SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY, SCIAMACHY)^[1]及 1995 年发射搭载于 ERS-2 卫星的全球臭氧监测仪(Global Ozone Monitoring Experiment, GOME)^[2]采用的探测器均为阵列硅 CCD。美国也先后发射了 OGO6, SNOE 卫星,其探测器件均为成像器件^[3-4],相应的探测器的性能研究也从光电倍增管等非成像器件过渡到 CMOS、NMOS 等成像器件^[5]。

紫外 NMOS 二极管阵列探测器具有大有效面积、低噪声、高紫外波段响应度等特点,逐渐受到大气痕量气体监测的青睐。NMOS 二极管阵列的量子效率将直接关系到空间遥感器的信噪比等重要性能,因此对 NMOS 线阵图像传感器量子效率的定标研究尤为重要,对其性能特点的研究和利用对我国的大气微量气体探测遥感仪器的研究和发展具有重要意义。然而,目前国内对 NMOS 阵列在紫外波段的应用研究较少。文中以标准探测器为基准,研究 NMOS 线阵图像传感器在紫外可见波段量子效率定标方案以及数据处理程序等,为空间紫外遥感仪器探测器选择提供了新的思路。

1 量子效率定标原理

NMOS 线阵图像传感器的一项重要光电参量是外量子效率,由量子效率的定义可知, $EQE = n_{\text{electron}} / n_{\text{photon}}$,得到 NMOS 的入射光子数和响应电子数,可以计算出它的量子效率^[6]。

入射光子数通过标定 NMOS 线阵图像传感器入射窗口处的辐射通量 ϕ_{NMOS} 得到。当 ϕ_{NMOS} 已知,结合普朗克光量子理论可知 $\phi_{\text{NMOS}} = n_p \cdot h \cdot c / n \cdot \lambda$, h 为普朗克常数, c 为真空光速, n 是空气的折射系数, e 基本电荷。则 NMOS 入射窗口处光子数为:

$$n_p = \frac{\phi_{\text{NMOS}} \cdot \lambda \cdot n}{h \cdot c} \tag{1}$$

建立的实验定标系统以 NIST(美国标准技术研究院)标准探测器为基准,标定 NMOS 线阵图像传感

器入射窗口处的辐射通量 ϕ_{NMOS} 。首先测得实验装置的后置光学系统出射的平行光束的辐照度,计算得到探测器入射窗口处的辐照度值。然后将标准探测器替换为待测线阵图像传感器,标定其入射窗口处辐射通量 ϕ_{NMOS} ^[7]。实验光路图如图 1 所示。

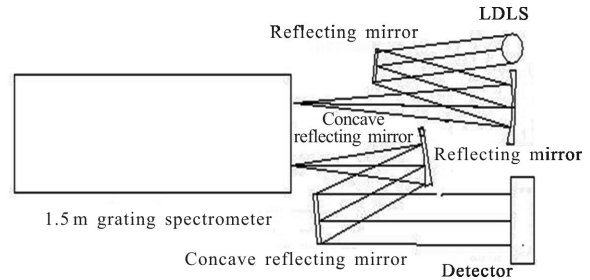


图 1 NMOS 量子效率实验光路图

Fig.1 Optical pathway diagram of quantum efficiency of NMOS

激光驱动白光光源 (Light Drive Light Source, LDLS)光通量为 ϕ_0 ,在经过前置光学系统、光栅光谱仪光学系统及后置光学系统传输的过程中,其受到的影响为 τ_{total} ,即出射辐射通量为 $\phi_{\text{const}} = \phi_0 \tau_{\text{total}}$,辐照度为 $E_{\text{const}} = \frac{\phi_{\text{const}}}{A_1}$ (A_1 为出射平行光束的截面积),则探测器窗口处接收到的光通量为 $\phi = E_{\text{const}} \cdot A$ 。对于 NIST 标准探测器,其输出信号为 I_0 ,暗信号为 I_{0d} ,NIST 标准探测器光通量响应度已知为 R_{NIST} ,则有, $\phi_{\text{const}} = \frac{I_0 - I_{0d}}{R_{\text{NIST}}}$ 。那么 NMOS S5931-1024 探测器窗口处的辐通量为^[8-9]:

$$\phi_{\text{NMOS}} = E_{\text{const}} \cdot A_{\text{NMOS}} = \frac{I_0 - I_{0d}}{R_{\text{NIST}}} \cdot \frac{A_{\text{NMOS}}}{A_{\text{NIST}}} \tag{2}$$

NMOS 线阵图像传感器的响应电子数可以通过 NMOS 数据处理器得到,其数据处理器如图 2 中虚线部分所示。根据日本滨松公司提供的产品手册可知,数据处理器可以分为四个部分,第一部分包括重

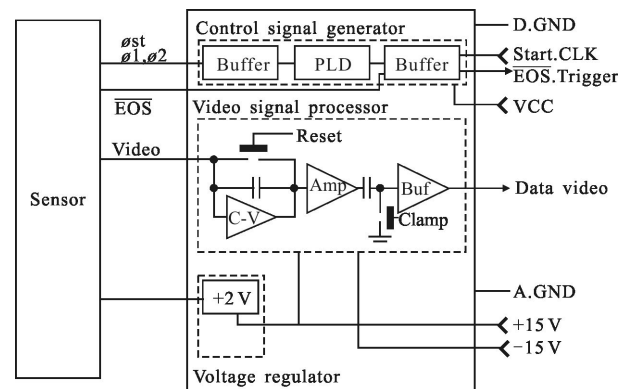


图 2 NMOS 信号处理器

Fig.2 Signal processor of NMOS

置开关来控制像元数据读出, 并实现电子数和电压值的转换, 此时有 $V_{out}=Q_{out}/C$ 。第二部分是一个 3 倍增益放大器及低通滤波器。第三部分用作消除随机噪声以及第一部分带来的复位噪声。第四部分是单倍增益放大器及低通滤波器。最后读出信号从 NMOS 线阵图像传感器录像终端得出。此时, 输出信号电压值 V_{out} 与内部电荷量 Q_{out} 关系为:

$$V_{out}=3 \cdot Q_{out}/C \quad (3)$$

式中: $Q_{out}=n_e \cdot e$, $C=10 \text{ pF}$, 则:

$$n_e=V_{out} \cdot C/3 \cdot e \quad (4)$$

结合公式(3)、(4)可得 NMOS 的量子效率:

$$\eta=\frac{V_{out}}{\phi_{NMOS}} \cdot \frac{C \cdot h \cdot c}{3 \cdot n \cdot e \cdot \lambda} \quad (5)$$

2 定标装置

定标装置由激光驱动白光光源(LDLS)、前置光学系统、高分辨率单色仪、后置光学系统、NIST 标准探测器和待测 NMOS 线阵图像传感器组成。光源发出的光由前置光学系统聚焦成像在单色仪的入射狭缝上, 经单色仪分光后得到单色光, 最后经后置光学系统平行出射在探测器的入射窗口处。

2.1 NIST 标准探测器

所采用标准探测器是美国国家标准技术研究院(National Institute of Standard Technology, NIST)以高精度低温辐射计(High Accuracy Cryogenic Radiator, HACR)为基准, 经陷阱探测器及热释电探测器实现量值传递^[10], 自身不确定度优于 2%。其结构小巧紧凑, 使用方便, 稳定性高。

2.2 光源

采用 LDLS, 型号为 EQ-99, 波长范围 170~2100 nm, 具有重复性高, 紫外响应度高等特点, 其时间稳定性如图 3 所示。

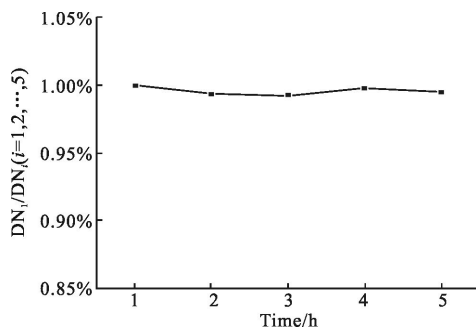


图 3 LDLS 时间稳定性测试

Fig.3 Stability of LDLS

2.3 高分辨率光栅光谱仪

所用单色仪为长春光机所研制的 1.5 m 光栅光谱仪, 其光学结构为 C-T 结构, 平面光栅刻线密度 2400 g/mm, 工作波段 200~700 nm, 由步进电机基于正弦机构驱动^[11], 采用 LabVIEW 软件控制。

2.4 待测滨松 NMOS 线阵图像传感器

NMOS 线阵图像传感器是特定设计的自扫描光电二极管线阵图像传感器, 扫描单元是由 MOS 晶体管的 N 极组成, 具有功耗低、易于操作的特点。每个光电二极管具有有效面积大、紫外波段响应度高和噪声低的特点。NMOS 线阵图像传感器具有内置热电制冷单元, 从而在积分时间较长时, 低照度下依然可以获得较高的信噪比。

NMOS 信号采集系统由二极管阵列芯片、头部及 MCD 控制器 C7557-01 组成。实验中, 型号为 S5931-1024S, 共 1024 个像元, 像元尺寸为 25 μm × 2500 μm , 石英窗口。NMOS 线阵图像传感器置于后置光学系统出射的平行光束中, 由 MCD C7557-01 控制器控制, 其连接方式如图 4 所示。

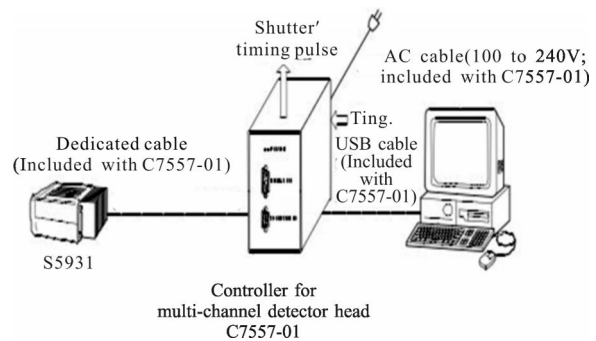


图 4 NMOS 控制单元及数据读出单元连接图

Fig.4 Control circuit and signal readout circuit of NMOS linear image sensor

3 量子效率定标结果

在暗室中进行定标, 测量的波长范围为 250~700 nm。测试过程中在长波波段加滤光片过滤紫外波段。LDLS 光源发出的光经过前置光学系统进入 1.5 m 光栅光谱仪, 通过计算机控制光栅转动, 使不同波段的单色光从单色仪出缝发出, 经过后置光学系统后, 成像在探测器转台上的接受面上, 在单色仪扫描过程中, 分别对标准探测器和 NMOS 线阵图像传感器进行数据采集。

NMOS 线阵图像传感器量子效率定标结果如

表1所示,量子效率曲线如图5所示。可知,在紫外波段量子效率优于30%,在可见波段优于60%,高于常用CCD量子效率^[12]。

表 1 NMOS 线阵图像传感器量子效率定标结果

Tab.1 Calibration for quantum efficiency of NMOS linear image sensors

Wavelength /nm	Source of NIST/nA	SPR of NIST /A · W ⁻¹	Voltage of NMOS/mV	Quantum efficiency
200	0.040 881	0.112	0.141 384 482	0.522 778
225	0.196 605	0.1238	0.732 941 685	0.509 194
250	0.894 618	0.1283	2.120 241 093	0.342 65
275	2.187 75	0.106	7.254 901 961	0.343 238
300	2.674 387	0.1396	9.670 913 761	0.446 142
325	3.020 58	0.1531	9.099 972 025	0.380 783
350	2.878 191	0.1564	10.898 502 07	0.458 583
375	4.102 058	0.1565	15.622 186 62	0.425 473
400	12.510 87	0.1866	44.276 595 2	0.441 309
425	13.981 46	0.2083	69.294 524 55	0.651 556
450	15.509 52	0.2264	78.195 366 34	0.680 438
475	14.701	0.243	63.632 410 16	0.593 677
500	13.246 96	0.2586	56.509 244 42	0.591 544
525	14.009 74	0.2736	73.127 590 85	0.727 719
550	15.998 44	0.2883	92.060 222 27	0.806 933
575	18.422 46	0.3027	96.230 767 27	0.735 066
600	19.375 89	0.317	88.148 572 01	0.642 729
625	19.096 86	0.3311	84.120 698 86	0.624 311
650	18.290 72	0.345	67.747 895 53	0.524 113
675	16.603 95	0.3589	58.204 013 12	0.498 197
700	14.813 3	0.3728	52.354 975 71	0.502 151

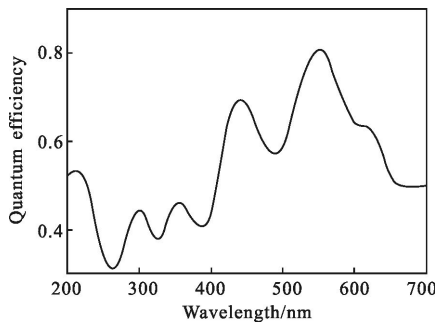


图 5 NMOS 线阵图像传感器量子效率曲线

Fig.5 Quantum efficiency of NMOS linear image sensor

4 不确定度分析

依照国际同行规范对 NMOS 线阵图像传感器量子效率的不确定度进行了分析^[12],根据公式(2)、(5)分析定标过程中的影响因素,得到 NMOS 量子效率的不确定度为^[13]:

$$\frac{\delta\eta(\lambda)}{\eta(\lambda)} = \left(\left| \frac{\delta V_{out}(\lambda)}{V_{out}(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\delta I_0(\lambda)}{I_0(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\delta A_{NMOS}}{A_{NMOS}} \right|^2 + \left| \frac{\delta A_{NIST}}{A_{NIST}} \right|^2 + \left| \frac{\delta R_{NIST}}{R_{NIST}} \right|^2 + \left| \frac{\delta \lambda}{\lambda} \right|^2 \right)^{1/2}$$

在 NMOS 线阵图像传感器量子效率的研究,传递标准为 NIST 标准探测器,其在定标波段范围内不确定度为 2%,如表 2 所示。测量过程中光栅光谱仪的波长重复性也会对定标结果带来 0.5%的影响,其由波长定标给出。标准探测器及 NMOS 线阵图像传感器的面积测量不确定度由读数显微镜决定,其对定标结果影响为 0.35%。标准探测器和 NMOS 线阵图像传感器的读数误差包括探测器自身的稳定性和位置重复性,它通过重复性测量得到,分别为 0.2%、0.4%。实验在暗室中进行,并做了遮光处理,杂散光影响约为 0.3%。

表 2 NMOS 线阵图像传感器量子效率的不确定度 Tab.2 Uncertainty of quantum efficiency of NMOS liner image sensor

Source of uncertainty	Relative uncertainty
Uncertainty of standard detector	2.0%
Measurement repeatability of spectrometer	0.5%
Reading error of standard detector	1.0%
Reading error of NMOS linear image sensor	1.0%
Uncertainty of area of detector	0.35%
Stray light	0.3%
Combined standard uncertainty	2.5%

5 结论

作为一种新型探测器,NMOS 具有噪声低、紫外波段响应度高等特点,目前在国外的遥感仪器中已经得到的应用,但是国内对 NMOS 的紫外波段的光电性能研究甚少。文中在完成 NMOS 线阵图像传感器量子效率的理论推导的基础上,构建了一套定标

系统。以标准探测器为传递基准对 NMOS 线阵图像传感器的紫外-可见波段的量子效率进行了定标研究。定标系统中重要参量 NMOS 入射窗口处的辐通量标定,基于标准探测器的替代测量,消除了多项影响因子。作为定标基准的 NIST 标准探测器综合不确定度达 2.5%。NMOS 线阵图像传感器的量子效率在紫外可见波段也高于其他通常用于空间紫外遥感探测的 CCD,紫外波段尤为明显,为其应用于国内紫外遥感仪器提供了新的思路和选择。

参考文献:

- [1] Mager R, Fricke W G, Burrows J P, et al. A new generation of hyperspectral remote sensing instrument [C]// SPIE, 1997, 3106: 84-94.
- [2] Sierk B, Richter A, Rozanov A. Retrieval and monitoring of atmospheric trace gas concentrations in nadir and limb geometry using the space-borne sciamachy instrument [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 120: 65-77.
- [3] Costa M J, Cervino M, Cattani E. Aerosol characterization and optical thickness retrievals using GOME and METEOSAT satellite data [J]. *Meteorol Atmos Phys*, 2002, 81: 289-298.
- [4] Li Bo, Wang Shurong, Wang Junbo. Optical design of space-based ultraviolet tracking and detailed reconnaissance system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0916003. (in Chinese)
李博, 王淑荣, 王俊博. 天基紫外跟踪详查光学系统设计 [J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0916003.
- [5] Mark Weberl, John P Burrowsl, Richard P Cebula. Solar UV/VIS irradiance measurements between 1995 and 1997 - first results on proxy solar activity studies [J]. *Solar Physics*, 1998, 177: 63-77.
- [6] Jin Young Choi. A comparison study of input ESD protection schemes utilizing NMOS, thyristor, and diode devices [J]. *Communication and Network*, 2010, 2: 11-25.
- [7] Jerald W Harder, Juan Fontenal. The spectral irradiance monitor: measurement equations and calibration [J]. *Solar Physics*, 2005, 230: 169-204.
- [8] Wang Rui, Wang Shurong, Guo Jin, et al. Calibration of high accuracy UV standard detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(8): 1696-1702. (in Chinese)
王锐, 王淑荣, 郭劲, 等. 高精度紫外探测器的定标 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1696-1702.
- [9] Chen Yinghang, Sui Zuoning, Sun Hongsheng, et al. Facility for calibration of ultraviolet and vacuum ultraviolet spectral irradiance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 998-1002. (in Chinese)
陈应航, 隋左宁, 孙红胜, 等. 紫外-真空紫外光谱辐照度校准系统 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(4): 998-1002.
- [10] Kohler R, Goebel R, Pelp R. Experimental procedures for the comparison of cryogenic radiometer at highest accuracy [J]. *Metrologia*, 1996, 33(6): 549-554.
- [11] Wu Kun, Xue Song, Lu Qipeng. Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for gating sine mechanism of SX -700 monochromator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 46-48. (in Chinese)
吴坤, 薛松, 卢启鹏. SX -700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 46-48.
- [12] Chen Junhong, Yang Xiaoli. Research of detectors in UV communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 87-89. (in Chinese)
陈君洪, 杨小丽. 紫外通信中探测器的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37: 87-89.
- [13] Yang Xiaohu, Wang Shurong, Huang Yu, et al. Spectral irradiance calibration research of the solar backscattered ultraviolet spectro-radiometer in air/vacuum conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1). (in Chinese)
杨小虎, 王淑荣, 黄煜, 等. 大气真空环境紫外臭氧垂直探测仪光谱辐照度定标研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1).