

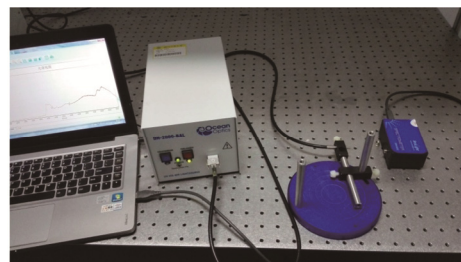


## 微型光谱仪中传感器 S11639 的非线性校正

童建平<sup>1\*</sup>, 高建勋<sup>1</sup>, 汪飞<sup>2</sup>, 杨浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江工业大学理学院, 杭州 310023;

<sup>2</sup>杭州博源光电科技有限公司, 杭州 311400



**摘要:** S11639 线阵传感器常被用于需要紫外测量的微型光谱仪中。但当 S11639 曝光量较大时, 会出现光谱响应的非线性, 从而影响微型光谱仪的动态范围, 因此必须进行非线性校正。利用卤钨灯与氘灯测量微型光谱仪的光电响应特性曲线, 找出 S11639 的曝光量与 A/D 转换输出的线性部分, 对数据进行直线拟合, 获得 S11639 在线性范围内的系数。在此基础上, 外推得到其在非线性范围内的理论值, 求出理论值与实际测量值的差异, 利用最小二乘法进行多项式拟合, 实现 S11639 线阵传感器的非线性校正。同时, 对比实验结果, 分析实验数据的误差成因, 为更好地利用基于 S11639 微型光谱仪的全动态范围光电检测提供实验依据。

**关键词:** 微型光谱仪; 光谱响应; 非线性校正; 动态范围; 多项式拟合

中图分类号: TH741

文献标志码: A

## Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini-spectrometer

Jianping Tong<sup>1\*</sup>, Jianxun Gao<sup>1</sup>, Fei Wang<sup>2</sup> and Hao Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; <sup>2</sup>Hangzhou Brolight Technology Co. Ltd., Hangzhou 311400, China

**Abstract:** Linear array sensor S11639 is often used in mini-spectrometer for UV measurement. However, when the exposure volume of S11639 is relatively bigger, the non-linearity of the spectral response will appear. This nonlinear effect will affect the dynamic range of the mini-spectrometer, and therefore, nonlinear correction must be carried out. Photoelectric response of S11639 is measured with halogen tungsten lamp and deuterium lamp to find out the linear part between the exposure and the A/D conversion output, and straight line fitting of the data is made to obtain the factors of S11639 in the linear range. Based on it, the theoretical value in nonlinear range is got by extrapolation, and the difference between the theoretical value and the actual measurement value was calculated. The nonlinear correction of S11639 is realized by polynomial fitting with the least square method. At the same time, compared with the experimental results, the error causes of the experimental data are analyzed, and the experiment is provided for better utilization of mini-spectrometer based on S11639 for photoelectric detection in the full dynamic range.

**Keywords:** mini-spectrometer; spectral response; nonlinearity correction; dynamic range; polynomial fitting

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.11.010

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(11): 1101–1106

收稿日期: 2017-08-10; 收到修改稿日期: 2017-10-10

\*E-mail: tong559@zjut.edu.cn

## 1 引言

微型光谱仪的检测原理是利用光栅散射将复合光分解为不同波长的光,照射到 CCD 或者 CMOS 光电传感器表面,从而将光信号转换为电信号。微型光谱仪广泛应用于环境监测、食品品质、LED 光谱分析的在线测量<sup>[1-5]</sup>,国内外常用的微型光谱仪的线阵传感器基本上是东芝公司的 TCD1304DG 和索尼公司的 IIX511B 或者它们的改进型。由于透明的多晶硅电极能强烈吸收低于 400 nm 的紫外线,使紫外光线无法穿透线阵传感器表面进入其内部,从而无法被探测到<sup>[6,7]</sup>。S11639 是滨松公司推出的一款高灵敏度 CMOS 线阵传感器,具有在紫外波段的高灵敏度特性,单电源 5 V 供电。2015 年本课题组将 S11639 应用于微型光谱仪<sup>[8]</sup>,2017 年 3 月上海慕尼黑光电展,微型光谱仪研制生产的标杆企业——美国海洋公司在其推出的新品 FX 系列微型光谱仪中也用到了 S11639。S11639 适合于紫外波段的入门级光谱仪,未来可以取代原来入门级微型光谱仪中的紫外增敏 CCD。

理想情况下,一般认为 S11639 的每个像元,在整个动态范围内,光的入射量与光生电荷具有良好的线性,也就是光谱灵敏度  $R$  是一个常数。实际上,从 CMOS 结构看,CMOS 计数非线性产生主要源于成像区内像素势阱间的电荷分享和扩散,电荷间的这种相互作用随着光的曝光量增加而增强从而导致电荷溢出等现象的发生,因此计数值增大导致线性度变差。测量 CCD 或者 CMOS 器件的光电响应特性的方法主要有尖劈法、双缝衍射法、小孔衍射法,其光源主要是激光,也有用 LED 作光源测量器件<sup>[9-12]</sup>。上述方法中,激光与 LED 被认为是单色光,测量的是此波长处的光强或积分时间的改变对器件光电响应的影响。S11639 应用于微型光谱仪,微型光谱仪本身就有一套分光系统,卤钨灯与氙灯可以互补发出从紫外到近红外(215 nm ~ 2500 nm)范围的光谱,与此光源配合,可以测得微型光谱仪中 S11639 的全光谱的光电特性。通过改变积分时间改变 S11639 的曝光量,得到模数(A/D)转换的值。对数据进行直线拟合,从而获得 S11639 在线性范围内的系数,在此基础上,外推得到在非线性的理论值,求出理论值与实际测量值的差异,利用最小二乘法进行多项式拟合,实现 S11639 线阵传感器的非线性校正,扩大了基于 S11639 光谱仪的测量范围。

## 2 实验研究的理论依据

### 2.1 非线性校正的理论基础

光源的光通过光纤被导入光谱仪,经过非对称的 C-T 光学系统,将复合光分解成单色光照射在 S11639 的表面,其信号通过线性放大与 A/D 转换,输出的转换值就是曝光量的函数。理想情况下,入射光信号和最终数字输出之间的转移函数应该随着入射光信号增加而呈线性变化:

$$I(\lambda) = KP(\lambda)Q(\lambda)t + B, \quad (1)$$

式中: $K$ 为线性斜率,是一常数; $P(\lambda)$ 表示稳定光源中在某个波长的光功率; $Q(\lambda)$ 为 CMOS 对波长光响应量子效率; $t$ 为光谱仪的积分时间; $B$ 为读出噪声计数,在某一固定状态设置下,它也为一常量; $I(\lambda)$ 表示 S11639 的输出计数,单位为 A/D 转换单位(ADUS)。图 1 就是光谱仪在不同积分时间下(积分时间分别为 100 ms, 200 ms),对美国海洋公司卤钨灯的光谱响应。S11639 的信号输出被线性放大,用 16 位 A/D 转换电路采集,通过 USB 口送到上位机中。

根据黑体辐射理论,发光体的  $P(\lambda)$  并不是一条直线,在不同波长位置, $P(\lambda)$  相差很大。同样,S11639 对波长光响应量子效率为  $Q(\lambda)$ ,也不是一条直线,也有一根光谱的响应曲线。但是,如果能够找到与  $P(\lambda)Q(\lambda)$  乘积相同的波长位置,使得在不同波长位置两者  $I(\lambda)$  相同,A/D 输出的值就相同。然后再改变积分时间  $t$ ,不同波长位置的两者  $I(\lambda)$  对积分时间的变化如果是重合的(不考虑 CMOS 本身的像素差异),就验证了式(1)的正确性,微型光谱仪的非线性校正的理论基础就源于此。

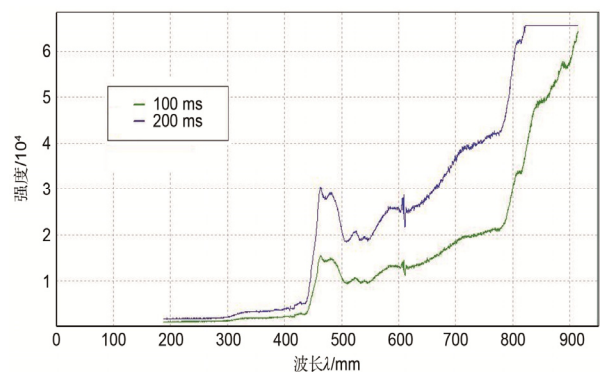


图 1 不同积分时间的光谱响应。

Fig. 1 Spectral response in different integration time.

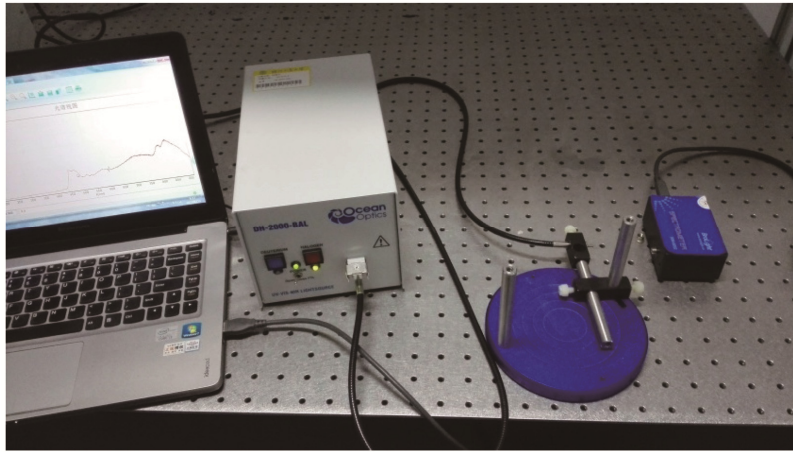


图 2 测试示意图.

Fig. 2 Schematic of test.

## 2.2 S11639 的光电响应特性

为了防止背景光干扰,实验在暗室中进行。测试的示意图如图 2 所示。

光源为美国海洋公司的光源,微型光谱仪是杭州博源光电科技有限公司的 BIM6602(光谱仪只进行了波长标定),在光学平台上固定光纤头,调整光谱仪与光纤头的距离,积分时间为 500 ms,使得微型光谱仪在两个对应最高波长附近处恰好接近饱和,接近 16 位 A/D 转换的最大值 65535。逐步减少积分时间测到光谱仪的最小积分时间。BIM6602 的最小积分时间是 0.5 ms,并且特意选择比较远的四个点(紫外与近红外各 2 点),500 ms 测量起始值之间的误差小于 1%,逐步减少积分时间,测量结果如表 1 所示。四个波长位置数据基本上是重合的。

以 759.842 nm 为例,对应的积分时间与 A/D 转换值如图 3 所示,积分时间越长,S11639 的曝光量越大,越接近饱和,非线性越明显。

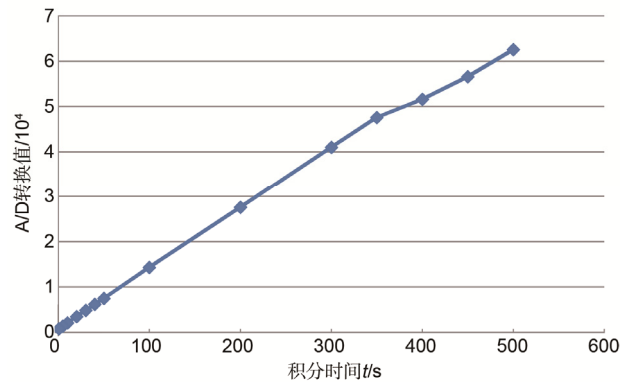


图 3 S11639 的积分时间与 A/D 转换值关系图.

Fig. 3 A/D converter data vs. integral time of S11639.

表 1 S11639 的 A/D 转换值.

Table 1 A/D converter data of S11639.

| 积分时间 $t$ /ms | 波长/nm   |         |         |       |
|--------------|---------|---------|---------|-------|
|              | 256.690 | 263.551 | 759.842 | 807.5 |
| 0.5          | 850     | 878     | 855     | 858   |
| 5.0          | 1473    | 1492    | 1466    | 1478  |
| 10.0         | 2157    | 2210    | 2138    | 2162  |
| 20.0         | 3525    | 3530    | 3541    | 3552  |
| 30.0         | 4852    | 4871    | 4906    | 4881  |
| 40.0         | 6250    | 6288    | 6248    | 6283  |
| 50.0         | 7521    | 7648    | 7543    | 7587  |
| 100.0        | 14100   | 14273   | 14358   | 14440 |
| 200.0        | 27169   | 27432   | 27597   | 27787 |
| 300.0        | 40107   | 40497   | 41030   | 40987 |
| 350.0        | 46158   | 46648   | 47616   | 47323 |
| 400.0        | 51600   | 51666   | 51620   | 51111 |
| 450.0        | 56167   | 56605   | 56595   | 56312 |
| 500.0        | 62618   | 63159   | 62597   | 62819 |

### 2.3 实验数据处理与改进

从2.2节分析可知,如果光谱仪的积分时间增加是线性的,光谱仪的A/D转换值应该是线性的。由于S11639在接近饱和时的非线性,光谱仪的输出表现为非线性,在整个动态范围内,S11639的饱和非线性限制了光谱仪的测量精度范围。为此,可以利用最小二乘法进行数据拟合处理,使得光谱仪在整个动态范围内可以得到良好的线性。拟合0.5 ms~350 ms的直线,其中:

256.690 nm的拟合直线为

$$\begin{aligned} I &= 130.06t + 943.67, \\ R^2 &= 0.9999; \end{aligned} \quad (2)$$

263.551 nm的拟合直线为

$$\begin{aligned} I &= 131.37t + 957.47, \\ R^2 &= 0.9999; \end{aligned} \quad (3)$$

759.842 nm的拟合直线为

$$\begin{aligned} I &= 133.8t + 853.35, \\ R^2 &= 1; \end{aligned} \quad (4)$$

807.5 nm的拟合直线为

$$\begin{aligned} I &= 133.35t + 901.44, \\ R^2 &= 0.9999. \end{aligned} \quad (5)$$

用759.842 nm的已拟合直线的值作为理论值,计算与实际的测量值之间的误差,以理论值作为真值计算百分误差,结果见表2。

通过表2计算可知,在接近S11639的饱和位置,该款光谱仪的A/D转换值在47000以上,开始出现非线性,越靠近65535点,饱和越明显,最大误差可能

达到7.61%。如果用来测量LED的光强特性就会出现误差,影响光谱仪的动态范围。

假定整个光谱仪的测量范围,基线是平直的,即 $B$ 是一个与波长无关的常数,同时 $K$ 为线性斜率,也是一与波长无关的常数,这样就可以对光谱仪测得的曝光量进行修正。做出差值与A/D转换值的函数关系图,利用最小二乘法算出校准曲线,得到曝光量与差值的关系。利用多项式拟合,尝试拟合曲线,需要6次以上拟合才能使 $R^2$ 的值大于98%。拟合公式见式(6),式中 $x$ 表示实际测量值, $y$ 是修正值,将实际测量值与修正值相加,就是修正后的真正值,表示光谱仪的曝光量。

$$\begin{aligned} y &= -1.2838427 \times 10^{-23} x^6 + \\ & 2.1452674 \times 10^{-18} x^5 - \\ & 1.2917481 \times 10^{-13} x^4 + \\ & 3.4400951 \times 10^{-9} x^3 - \\ & 3.9299069 \times 10^{-5} x^2 + \\ & 0.14931689x - 97.878152. \end{aligned} \quad (6)$$

将校准以后式(6)推广应用到其他光谱线,计算256.690 nm光谱线,先用式(2)计算理论值,用拟合式(6)计算修正值,与实际值相加,推出接近饱和时的值,以式(2)算出的值为真值计算误差,去掉超过65535的点,可以看出其误差在2%左右,如表3。

## 3 实验结果与误差分析

S11639饱和的主要原因是电荷势阱的深度有限,不能无限制地容纳内光电效应所产生的电荷。随着曝光量增加内光电效应逐渐明显,为了防止像元饱和后

表2 759.842 nm处A/D的理论值与实际差值。

Table 2 A/D differences between theoretical value and actual value at 759.842 nm.

| 积分时间 $t$ /ms | 理论值   | 实际值   | 两者差  | 百分误差/% |
|--------------|-------|-------|------|--------|
| 0.5          | 920   | 855   | 65   | 7.09   |
| 5.0          | 1522  | 1466  | 56   | 3.70   |
| 10.0         | 2191  | 2138  | 53   | 2.43   |
| 20.0         | 3529  | 3541  | -11  | -0.33  |
| 30.0         | 4867  | 4906  | -38  | -0.79  |
| 40.0         | 6205  | 6248  | -42  | -0.68  |
| 50.0         | 7543  | 7543  | 0    | 0.00   |
| 100.0        | 14233 | 14358 | -124 | -0.88  |
| 200.0        | 27613 | 27597 | 16   | 0.06   |
| 300.0        | 40993 | 41030 | -36  | 0.09   |
| 350.0        | 47683 | 47616 | 67   | 0.14   |
| 400.0        | 54373 | 51620 | 2753 | 5.06   |
| 450.0        | 61063 | 56595 | 4468 | 7.32   |
| 500.0        | 67753 | 62597 | 5156 | 7.61   |

表3 256.690 nm 处 A/D 的理论值与实际差值.

Table 3 A/D differences between theoretical value and actual value at 256.690 nm.

| 积分时间 $t/\text{ms}$ | 理论值   | 实际值   | 修正程度值 | 修正后的值 | 百分误差/% |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 0.5                | 1009  | 850   | 3     | 853   | -15.47 |
| 5.0                | 1594  | 1473  | 47    | 1520  | -4.63  |
| 10.0               | 2244  | 2157  | 73    | 2230  | -0.63  |
| 20.0               | 3544  | 3525  | 72    | 3597  | 1.47   |
| 30.0               | 4845  | 4852  | 28    | 4880  | 0.72   |
| 40.0               | 6146  | 6250  | -37   | 6212  | 1.08   |
| 50.0               | 7447  | 7521  | -98   | 7423  | -0.32  |
| 100.0              | 13950 | 14100 | -173  | 13927 | -0.16  |
| 200.0              | 26956 | 27169 | 151   | 27320 | 1.35   |
| 300.0              | 39962 | 40107 | -434  | 39673 | -0.72  |
| 350.0              | 46465 | 46158 | 333   | 46491 | 0.06   |
| 400.0              | 52968 | 51600 | 2265  | 53865 | 1.69   |
| 450.0              | 59471 | 56167 | 4378  | 60545 | 1.80   |
| 500.0              | 65974 | 62618 | 5147  | 67765 | 2.72   |

过多的电荷溢出到相邻像元中,目前 S11639 采用垂直溢漏技术,其光电响应可用一个 NPN 型耗尽基底的晶体管模型来分析<sup>[13-17]</sup>,N 层相当于发射极,P 层相当于基极和 N 型基底相当于集电极,在基底电压不变的时候,击穿电流  $I_{PT}$  是晶体管 N 层电势的函数:

$$I_{PT} = I_0 \exp\left(-\frac{\beta V_N}{\eta}\right), \quad (7)$$

式中:  $\beta = \frac{q}{kT}$ ,  $I_0$  取决于基底电压工艺参数,  $\eta$  为非理想性因数,  $V_N$  表示晶体管 N 层电势。  $V_N$  的变化为

$$C_{PN} \frac{dV_N}{dt} = -I_\lambda - I_{PT}, \quad (8)$$

式中:  $I_\lambda$  是总电流,  $C_{PN}$  是晶体管等效电容。当  $V_N$  很小时,击穿电流  $I_{PT}$  几乎为零。由式(8)可以推出:

$$V_N = V_N^0 - I_\lambda \frac{T}{C_{PN}}. \quad (9)$$

$T$  可以看成是积分时间,由式(9)可知 S11639 的输出前一部分与曝光量成线性关系,由式(7)可以推出后一部分与曝光量成一个对数关系,将其分别称之为线性区和非线性区。

在短积分时间,理论值与实际测量值也偏差超过 2%,甚至超过 10%,这是由于:1) 待测系统的暗噪声误差;2) 在短时曝光中,快门的响应时间也会影响进入 CMOS 光子数的相对偏差值,从而增加计数误差,影响非线性度;3) 受到加工工艺的限制,每个像素的

材料、面积大小各不相同,导致像元本身的响应不一致,即 CMOS 的 PRNU 参数误差,尽管起始值曝光量可能一样。

## 4 结 论

通过本文的工作可以看出,光谱仪在进行强度测量过程中,为保证光谱仪测量  $\pm 2\%$  的精度要求,如果需要光谱仪的全动态范围应用时,不得不考虑光电传感器的非线性。光谱仪曝光量的最佳范围:起始值为满量程的 5%;终了值为满量程的 80%(未线性校正),通过非线性校正,可以延伸到 100%。校正后的光谱仪大大拓展了光谱仪的上限动态范围,特别对 LED 的辐射度测量与色度测量有比较好的应用价值,为更好地利用基于 S11639 的光谱仪的全动态范围光电检测提供了实验依据。

## 基金项目

国家自然科学基金青年基金资助项目(11605153)。

## 参考文献

- 1 Su Xiaohui, Chen Fei, Xu Shuping, et al. Portable flue gas analyzer based on spectrum[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012(11): 71-74.  
苏小会, 陈飞, 徐淑萍, 等. 基于光谱分析的便携式烟气分析仪[J]. *仪表技术与传感器*, 2012(11): 71-74.
- 2 Fan Shuxiang, Huang Wenqian, Zhang Baohua, et al. Design and experiment on portable apple soluble solids content spec-

- trometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(S1): 219–224.  
樊书祥, 黄文倩, 张保华, 等. 便携式苹果糖度光谱检测仪的设计与试验[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(增刊 1): 219–224.
- 3 Han Xiaozhen, Wen Zhiyu, Xie Yingke, *et al.* Software design of control and signal processing system for multi-parameter water quality detecting instrument[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2014(8): 20–22, 65.  
韩孝贞, 温志渝, 谢瑛珂, 等. 多参数水质检测仪控制与信号处理系统软件设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2014(8): 20–22, 65.
- 4 Zhang Qian, Zhang Xuedian, Chang Min, *et al.* A research of laboratory instrument for LED property measurement[J]. *Optical Instruments*, 2013, **35**(1): 84–88.  
张倩, 张学典, 常敏, 等. 一种用于 LED 特性检测的实验仪器的研究[J]. *光学仪器*, 2013, **35**(1): 84–88.
- 5 Zeng Tianling, Wen Zhiyu, Wen Zhongquan, *et al.* Research progress in water quality monitoring technology based on ultraviolet spectrum analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(4): 1098–1103.  
曾甜玲, 温志渝, 温中泉, 等. 基于紫外光谱分析的水质监测技术研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, **33**(4): 1098–1103.
- 6 Du Chenguang, Sun Liqun, Ding Zhitian. Experiment study of enhancing CCD ultraviolet response using coronene[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(5): 753–757.  
杜晨光, 孙利群, 丁志田. 利用萘苯增强 CCD 紫外响应的实验研究[J]. *光学技术*, 2010, **36**(5): 753–757.
- 7 Zhang Dawei, Tian Xin, Huang Yuanshen, *et al.* Preparation and spectral characterization of lumogen coatings for UV-responsive CCD image sensors[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(5): 1171–1174.  
张大伟, 田鑫, 黄元申, 等. CCD 紫外敏感 Lumogen 薄膜制备与光谱表征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(5): 1171–1174.
- 8 Tong Jianping, Dong Shaobo, Yang Hao, *et al.* The design of UV-VIS spectrometer based on S11639[J]. *Optical Instruments*, 2015, **37**(3): 272–277.  
童建平, 董少波, 杨浩, 等. 基于 S11639 的紫外-可见光谱仪的设计[J]. *光学仪器*, 2015, **37**(3): 272–277.
- 9 Xie Xudong, Chen Bo, Liu Hua, *et al.* Calibration of linear dynamic range for CCD system[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2000, **12**(S1): 182–184.  
谢旭东, 陈波, 刘华, 等. CCD 系统线性动态范围的标定[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(增刊 1): 182–184.
- 10 Wang Shuqing, Duan Haifeng, Yang Zeping, *et al.* Simulation research for double-slit diffraction application to CCD response features scaling[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(4): 19–21.  
王淑青, 段海峰, 杨泽平, 等. 双缝衍射用 CCD 响应特性标定的模拟研究[J]. *光电工程*, 2001, **28**(4): 19–21.
- 11 Lin Xiaogang, Gu Naiting, Yang Zeping. Calibration of CCD photoelectric characteristics by pinhole Fraunhofer diffraction method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(3): 410–414.  
林晓钢, 顾乃庭, 杨泽平. 小孔夫琅和费衍射法标定 CCD 光电响应特性[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(3): 410–414.
- 12 Zhao Youquan, Jiang Lei, He Feng, *et al.* Measurement and analysis of linear CCD nonlinear optical response characteristics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(7): 19–23.  
赵友全, 江磊, 何峰, 等. 线阵 CCD 光电响应非线性特性测定与分析[J]. *光电工程*, 2015, **42**(7): 19–23.
- 13 Gan Zhenhua, Du Min, Gao Yueming, *et al.* Measurement of CCD light intensity response characteristics based on LED[J]. *China Measurement & Test*, 2016, **42**(12): 121–125.  
甘振华, 杜民, 高跃明, 等. 基于 LED 的 CCD 光强响应特性测定[J]. *中国测试*, 2016, **42**(12): 121–125.
- 14 Zhang Zhen, Cheng Xiang' ai, Jiang Zongfu. Mechanism analysis of CCD excessive saturation effect induced by intense light[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2010, **22**(2): 236–237.  
张震, 程湘爱, 姜宗福. 强光致 CCD 过饱和效应机理分析[J]. *强激光与粒子束*, 2010, **22**(2): 236–237.
- 15 Hao Xiangnan, Nie Jingsong, Li Hua. Temperature impact on saturation effect of CCD induced by highlight[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(7): 54–58.  
郝向南, 聂劲松, 李化. CCD 强光饱和效应的温度因素分析[J]. *光电工程*, 2011, **38**(7): 54–58.
- 16 Zhou Jiankang, Shen Weimin, Tang Minxue. Extended dynamic-range techniques of CCD measurements[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(10): 96–100, 114.  
周建康, 沈为民, 唐敏学. CCD 测量动态范围的扩展技术[J]. *光电工程*, 2006, **33**(10): 96–100, 114.
- 17 Lei Renfang, Wang Xiaoqiang, Yang Hong, *et al.* Simulation and fabrication of vertical spillover drain structure of CCD[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2013, **34**(5): 775–777.  
雷仁方, 王晓强, 杨洪, 等. CCD 纵向溢出漏结构工艺仿真与实现[J]. *半导体光电*, 2013, **34**(5): 775–777.