

文章编号: 0253-2239(2009)07-1881-04

# 叠加法测量紫外探测器非线性性的技术研究

孙权社 陈坤峰 李艳辉

(中国电子科技集团公司第 41 研究所, 电子测试技术国家重点实验室, 山东 青岛 266555)

**摘要** 叙述了在 266 nm 波长点测量紫外探测器和紫外光功率计非线性性的原理。提出了利用功率叠加法测量紫外探测器非线性参数的新思路, 设计并成功研制了精确测量紫外探测器非线性性的装置。利用偏振分光棱镜实现光路的分离与合并, 提高了功率非线性测量的动态范围。采用外界杂散光屏蔽技术, 减小了背景光和杂散信号对测量结果的影响。编写了自动测量软件, 优化了数学模型, 降低了测量不确定度。实验结果表明, 在 1 nW~100  $\mu$ W 的功率范围内, 测量重复性小于 0.3%, 非线性扩展测量不确定度优于 0.8% ( $k=2$ )。

**关键词** 紫外探测器; 非线性性; 叠加法; 偏振分光

**中图分类号** TN206 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1881

## Study on Nonlinearity Measurement of Ultraviolet Photodetectors by Superposition Method

Sun Quanshe Chen Kunfeng Li Yanhui

(The 41st Research Institute, CETC National Key Lab of Electronic Measurement Technology, Qingdao, ShanDong 266555, China)

**Abstract** The principle of measuring nonlinearity of ultraviolet photodetector and power meter at 266 nm was presented in this paper. A new technique is proposed for measuring the nonlinearity of ultraviolet photodetector using the power superposition method. The facility of accurate measuring ultraviolet photodetector nonlinearity has been developed. The power nonlinearity dynamic range is widened by using a polarizing beam splitter cubes for beam splitting and combining. The effect of background and scattering signals on the measurement results is reduced by the light shield. The measurement uncertainties are reduced by automatic test programme and optimized model. Results show that in the power range of 1 nW~100  $\mu$ W, the repeatability of the results is better than 0.3% and the typical expanded measurement uncertainty of nonlinearity is less than 0.8% ( $k=2$ ).

**Key words** ultraviolet detector; nonlinearity; superposition method; polarizing beam splitter

## 1 引 言

紫外探测器是紫外探测技术中应用最为广泛的器件之一。紫外探测器的性能差异决定着紫外设备和装备的优劣。在紫外探测器的诸多参数中, 非线性性是其最重要的参数之一, 因此对紫外探测器非线性性的测试成为近年来计量测试领域一个新的研究方向。由于紫外探测器在应用过程中与信号采集、处理和显示等外围电路等集成在一个整体, 如紫外光功率计, 紫外光度计等, 因此探测器的线性并不等于整个设备的线性。另一方面, 在紫外设备的非线性测量过程中, 如果辐射功率远远大于背景辐射, 那么背景辐

射对非线性测量的影响可以忽略不计, 而当背景辐射大于入射功率的 1% 时, 利用传统交流法、滤光片组合法以及衰减法等方法精确测量紫外探测器及其设备的非线性就比较困难<sup>[1~3]</sup>。研究证明, 用功率叠加法测量可见光及近红外探测器的非线性时, 其测量不确定度主要与探测器自身的性能、测试用光源的稳定性等因素有关, 因此国内外一些实验室开始应用功率叠加法测量紫外探测器的非线性。

## 2 功率叠加法的原理

功率叠加法测量非线性性的基本原理是: 光源发

收稿日期: 2008-09-03; 收到修改稿日期: 2008-11-02

基金项目: “十五”国防计量 A 类课题(J122005A015)和国防科技重点实验室基金(9140C1203020804)资助项目。

作者简介: 孙权社(1970—), 男, 高级工程师, 工程硕士, 主要从事光电测量仪器、紫外探测器参数计量标准装置等方面的研究。E-mail: eiqd@ei41.com

出的光被分成近似相等且可控的两路光,当输入到探测器光敏面上的光辐射功率为  $P_{a1}$  时,探测器输出光电流为  $I_{a1}$ ;当输入到探测器光敏面上的光辐射功率为  $P_{b1}$  时,探测器输出光电流为  $I_{b1}$ ;当输入到探测器光敏面上的光辐射功率为  $P_{a1+b1} = P_{a1} + P_{b1}$  时,探测器输出光电流为  $I_{a1+b1}$ ;如果  $I_{a1} + I_{b1} = I_{a1+b1}$ ,那么探测器在  $P_{a1}$  (或  $P_{b1}$ ) 与  $P_{a1+b1}$  功率范围上的响应是线性的。如果  $I_{a1} + I_{b1} \neq I_{a1+b1}$ ,那么探测器在这个功率范围的响应是非线性的<sup>[4,5]</sup>。

那么探测器非线性系数可定义为:

$$K_1 = \frac{I_{a1+b1}}{I_{a1} + I_{b1}} - 1 \quad (1)$$

通过逐渐改变入射到探测器光敏面上的光功率并重复上述步骤,可测出从  $P_{a2}$  或  $P_{b2}$  到  $P_{a2+b2}$  范围上探测器的非线性系数,记为  $K_2$ 。以此类推,就可得到在某一功率范围上不同量程的非线性系数  $K_1 K_2 K_3 \dots K_n$ 。若令第一个点的非线性修正系数  $C_1 = 1$ ,并以此归一化,则任意点  $P_{am+bm}$  处的非线性修正系数  $C_m$  可逐步求出:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= 1 \\ C_2 &= C_1(1 + K_1) = 1 + K_1 \\ C_3 &= C_2(1 + K_2) = (1 + K_1)(1 + K_2) \\ &\dots \dots \dots \\ C_m &= \prod_{i=1}^{m-1} (1 + K_i) \end{aligned} \right\} (2)$$

理想情况下,线性范围内的修正系数应近似为 1,但实际测量过程中,参考点的非线性系数并不等于零,因此,通常选  $K$  值近似为零的点作为参考点,假设以第  $j$  ( $j > 1$ ) 点为参考点,即  $C_j = 1$ ,则  $m$  点的非线性修正系数

$$\left. \begin{aligned} C_m &= \prod_{i=m}^{j-1} (1 + K_i) \quad (m < j) \\ C_m &= \prod_{i=j}^{m-1} (1 + K_i) \quad (m > j) \end{aligned} \right\} (3)$$

### 3 系统设计

#### 3.1 光路设计和装置的工作原理

叠加法测量光电探测器的非线性要求将一束光分成近似相等的两路,分开的两路光可分别控制,且能在探测器的光敏面处两路光可合成一路。在装置中采用波长为 266 nm 的线偏振激光光源,如果采用普通的分光棱镜,由于光的干涉、反射等因素会给测量结果带来很大影响。因此在过程中,利用线偏振光的特点,设计了适合紫外线偏振光空间传输的功率叠加光路。

装置的原理框图如图 1 所示,可以看出,当稳定的紫外光经过光阑后,可将激光散射光斑滤掉。由于该激光器输出的功率大于 50 mW,因此在此使用了一片滤光片对光进行初级衰减,根据测量的需要,可增加和减少滤光片的数量。每个滤光片都固定在光学滑轨上。经滤光片组后的激光经光阑后入射到紫外衰减器上,紫外衰减器为连续可调衰减器,因此可对通过的光功率进行精确衰减。1/4 波片的作用是将线偏振光变成圆偏振光,当圆偏振光入射到偏振分光棱镜 A 上后,偏振分光棱镜可使圆偏振光中水平方向偏振的光通过,而使垂直方向偏振的光改变 90° 通过,在圆偏振光中,这两种振动方向的光的能量是近似相等的,这样就使分开的两束光的光功率近似相等。分开的两束光经反射镜 A 和反射镜 B 反射后,在偏振分光棱镜 B 处正交,水平振动的光透过棱镜,而垂直振动方向的光被棱镜反射后传输方向改变了 90°,这样分开的两束光又合二为一。通过计算机控制位于传输光路上的电子快门的通和断,并采集被测件在不同光照射下的输出信号,最后根据双光路叠加法的数学模型计算出被测件在测量功率范围上的非线性系数。通过紫外光衰减器改变入射到被测件光敏面上的光功率,按照上述的步骤,可求出不同功率范围上的非线性系数。在光路设计中,所有的光学件都固定在滑轨上,这样方便调节和移动。

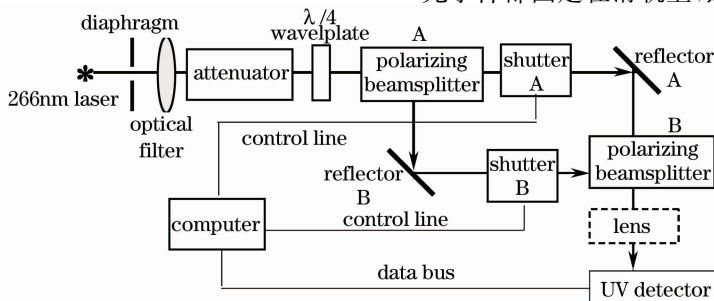


图 1 紫外探测器非线性测量装置原理框图

Fig. 1 Schematic of measurement facility of nonlinearity of UV detector

### 3.2 减小杂散信号的方法

实验发现当测量功率小于  $-40$  dBm 的非线性系数时,即使在测量过程中测量状态保持不变,重复性依然很差。造成这种结果的原因主要有两个方面:一是屏蔽箱内的荧光以及光源通过光学镜片时由于灰尘散射的光超过了  $1$  nW,远远大于屏蔽箱外的杂散光信号,如果将被测件放到屏蔽箱内,那么在小信号测量时,杂散信号就会对测量结果带来很大影响;另一方面,由于供电电源和震动的影响,在测量过程中,紫外激光器的功率会出现突跳,在测量端突跳会使光功率瞬间的变化量达纳瓦级,如果这种突跳发生在测量分路光信号和合路光信号之间,那么就会对小量程档的非线性测量结果造成较大影响。针对这种现象,我们采取以下措施:一是将被测件放在光屏蔽箱外,并在屏蔽箱的光出射端加一个光阑,减小屏蔽箱内紫外杂散光对测量信号的影响;另一方面,在出射端和被测件的光敏面之间设计一个可伸缩的遮光筒,这样可屏蔽掉屏蔽箱外背景光对的影响。这些措施可使杂散辐射减小到了  $0.04$  nW 以下。对于因光源突跳及震动的影响可通过软件模型优化的方法解决。

### 3.3 软件模型的优化

通过实验室条件和其它屏蔽措施的改进,在一定程度上扩展了非线性的测量功率范围。但是通过硬件的改造无法消除激光功率突跳对小功率测量结果的影响,尽管这种突跳出现的几率比较小,但是一旦出现,则会使本次测量前功尽弃。另外,在测量

$1$  nW附近的非线性系数时, $0.04$  nW 的杂散信号会对测量结果产生很大的影响,这种影响通过硬件改造无法消除,因此只有通过自动测量减小光源功率漂移对测量结果的影响<sup>[6,7]</sup>,通过优化数学模型减小光源突跳和杂散辐射对小功率测量地影响。

在自动测量过程中,当测量功率小于  $10$  nW 后,软件对数据采集和处理地方式如下:设置一个阈值,该阈值是在测量光源的稳定性的过程中分析总结出的,根据两次读数的变化量是否超出阈值来判断功率是否发生了突跳。

为减小杂散光对小量程非线性系数的影响,在测量前,通过计算机软件控制光开关处于关闭状态,记录此时被测件的读数,记为  $I_{\text{noise}}$ ,在最终的非线性系数计算过程中,将杂散信号减去。因此在自动测量软件中经过优化的非线性系数计算公式所示:

$$n_{\text{NL}} = K = \frac{I_{\text{am}+\text{bm}} - I_{\text{noise}}}{I_{\text{am}} + I_{\text{bm}} - 2P_{\text{noise}}} - 1 \quad (4)$$

## 4 实 验

为了验证装置的可靠性,减小测量过程中认为因素对测量结果的影响,我们通过自行设计的自动测试软件测量了一台美国 NEWPORT 公司生产的紫外光功率计的非线性,在  $266$  nm 波长点上,从  $-10$  dBm 测量到  $-60$  dBm,共测量了七组数据,根据测出的非线性系数计算出的每个测量点的非线性修正因子,并计算其在 7 组数据的标准偏差  $S(\bar{x})$  如表 1 所示:

表 1 非线性修正因子测量数据

Table 1 Test date of nonlinearity correction factors

	1	2	3	4	5	6	7	$S(\bar{x})$
$C_1$	1.007	1.006	1.004	1.003	1.004	1.004	1.002	0.0013
$C_2$	1.007	1.001	0.997	0.998	1.000	1.001	0.998	0.0023
$C_3$	1.002	1.001	0.996	1.000	0.999	0.999	0.997	0.0016
$C_4$	1.002	1.001	0.998	1.000	1.001	1.000	0.999	0.0010
$C_4$	1.002	1.000	0.997	1.000	1.000	1.000	1.000	0.0008
$C_5$	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	0.0005
$C_6$	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	1.000	0.999	0.0006
$C_7$	1.000	0.997	0.998	1.000	0.997	0.999	1.000	0.0012
$C_8$	0.999	0.996	0.996	0.997	0.997	0.999	1.000	0.0014
$C_9$	0.998	0.996	0.995	0.995	1.000	1.001	1.000	0.0022
$C_{10}$	0.998	0.999	0.996	0.994	1.001	1.001	1.000	0.0021
$C_{11}$	0.995	0.997	0.995	0.992	1.000	1.000	0.998	0.0023
$C_{12}$	0.996	0.996	0.995	0.992	0.999	1.000	0.993	0.0022
$C_{13}$	0.997	0.996	0.994	0.994	0.999	1.002	0.992	0.0026
$C_{14}$	0.999	0.996	0.995	0.999	0.999	1.003	0.993	0.0026
$C_{15}$	1.000	0.996	1.004	1.001	1.004	1.005	0.999	0.0026

经计算,在以上数据中,实验标准偏差最大为 0.26%,即重复性小于 0.3%。可计算标准偏差量大的这三个点的非线性修正因子的平均值为 0.996, 0.998, 1.001, 而该功率计出厂的非线性指标为  $\pm 0.5%$ , 因此可以看出,使用本装置可以对紫外光功率计的非线性指标进行验证和检测。

## 5 测量不确定度分析

在功率计非线性度的测量过程中,激光功率的漂移或起伏是影响测量结果最主要的因素。在  $-60$  dBm 到  $-10$  dBm 的功率范围,完成一组测量需要约 10 min 的时间。因此测量了 15 min 的测量输出端激光功率的稳定性,根据贝塞尔公式计算出的结果为 0.3%,服从均匀分布,因此光源稳定度引入的测量不确定度为:  $u_1 = 0.003/\sqrt{3} = 0.17%$ ,可按 A 类评定。

测量过程中激光波长的漂移会引起光功率计光谱响应度的变化,变化量的大小取决于功率计探测器的吸收材料<sup>[8-10]</sup>,参考不同材料探测器的光谱响应率在 266 nm 波长附近的测量结果<sup>[11]</sup>,由探测器材料自身特性引入的测量不确定度一般小于  $u_2 = 0.3%$ ,可按 B 类评定。

由于仪器显示屏,紫外光在光路传输过程中光学镜片的反射以及在空气中的散射等,即使在暗室中,测试端的光功率也在几十皮瓦左右,这对小信号测量带来很大影响,通过对叠加法数学模型的优化,可使这种影响降到 0.2% 以下,可按 B 类评定,因此杂散光引入的测量不确定度  $u_3 = 0.2%$ 。

由于上述分量互不相关,因此合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.3999\%$$

按正态分布,置信概率为 95%,  $k=2$ ,则扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 2 \times 0.3999\% \approx 0.8\%$$

## 6 结 论

利用光的偏振特性设计出了适合紫外空间光传

输的功率叠加光路,将偏振分光与合光技术应用到功率叠加法中,实现了紫外探测器在 266 nm 非线性的准确测量。并通过光屏蔽、数学模型优化以及自动测试等技术扩展了非线性测量的功率范围,减小了杂散信号和小光源突跳对测量结果的影响。该装置不仅可测量紫外探测器在 266 nm 的非线性,也可测量紫外光功率计在 266 nm 的非线性,因此对紫外探测器和紫外功率计性能评价具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 S. Yang, I. Vayshener, X. Li *et al.*. Optical detector nonlinearity: a comparison of five methods [C]. *Proc. Conf. Precision Electromagnetic Measurements*, 1994: 455~456
- 2 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Li Futian. High precision linearity measurement instrument for ultraviolet photodetectors [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2007, 09: 59~63  
薛庆生, 王淑荣, 李福田. 紫外光电探测器高精度线性测量装置 [J]. *仪表技术与传感器*, 2007, 09: 59~63
- 3 Yao Hejun, Lu Zheng, Lin Yandong. Characterizations of trap detector and its measurements [J]. *Modern Measurement and Test.*, 2007, 02: 3~7  
姚和军, 吕正, 林延东. 陷阱式探测器的特性及其测量 [J]. *现代计量测试*, 2007, 02: 3~7
- 4 S. Yang, I. Vayshener, X. Li *et al.*. Accurate measurement of optical detector nonlinearity [C]. *Proc. Natl. Conf. Standards Laboratories Wordshop & Symposium, Session 5A*, 1994: 353~362
- 5 S. Yang. Optical fiber power meter nonlinearity calibrations At NIST [J]. *J. Research of the National Institute of Standards and Technol.*, 2001, **106**(4):
- 6 R. G. Frehlich. Estimation of the nonlinearity of a photodetector [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**: 5926~5929
- 7 L. Coslovi, F. Rihgini. Fast determination of the nonlinearity of photodetectors [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **19**(18): 3200~3203
- 8 Thomas C. Larason, Christopher L. Cromer. Sources of error in UV radiation measurements [J]. *J. Research of the National Institute of Standards and Technol.*, 2001, **106**(4): 649~656
- 9 Ping-Shine Shaw, Rajeev Gupta, Keith R. Characterization of an ultraviolet and a vacuum-ultraviolet irradiance meter with synchrotron radiation [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(34): 173~178
- 10 J. P. Long, S. Varadaraajan, J. Matthews *et al.*. UV detectors and focal plane array imagers based on AlGaIn p-i-n photodiodes [J]. *Opto-Electron. Rev.*, 2002, **10**(4): 251~260
- 11 Ping-Shine Shaw, Thomas C. Larason, Rajeev Gupta. The new ultraviolet spectral responsivity scale based on cryogenic radiometry at synchrotron ultraviolet radiation facility III [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(5): 2242~2247