

文章编号 1004-924X(2017)06-1425-08

紫外光阴极辐射灵敏度的测量误差

拜晓锋*, 杨书宁, 侯志鹏, 石峰, 贺英萍, 程宏昌

(微光夜视技术重点实验室 中国兵器工业集团第二一一研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 光阴极辐射灵敏度是衡量紫外探测器响应能力的一项重要指标, 实现其准确测量至关重要。本文建立了某型紫外探测器光阴极辐射灵敏度测量方法, 搭建了实用的紫外光阴极辐射灵敏度测量装置, 重点分析了利用该装置进行紫外光阴极辐射灵敏度测量时的影响因素, 对比了紫外窄带滤光片、光栅单色仪、辐射照度计和辐射功率计等不同组合方式进行光阴极辐射灵敏度测量时的误差情况, 得出光栅单色仪配辐射功率计方式在光阴极辐射灵敏度测量时的误差最小, 扩展不确定度为9%, 相比其它三种组合19.4%、19%和11.2%的扩展不确定度具有绝对优势。该研究成果用于辅助国产紫外探测器技术研发, 为进一步改进提升其技术性能提供了有效且准确的检测手段。

关键词: 紫外探测器; 光阴极辐射灵敏度; 窄带滤光片; 光栅单色仪; 测量误差

中图分类号: TH23; O434.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1425

Measurement errors of ultraviolet photocathode radiant sensitivity

BAI Xiao-feng*, YANG Shu-ning, HOU Zhi-peng, SHI Feng, HE Ying-ping, CHENG Hong-chang

(*Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China*)

* Corresponding author, E-mail: baixiaofeng2001@163.com

Abstract: Photocathode radiant sensitivity is an important index to measure response capability of ultraviolet detector, thus its accurate measurement is necessary. Herein, measurement methods of photocathode radiant sensitivity for some type of ultraviolet detector were built, and practical measuring equipment of ultraviolet photocathode radiant sensitivity was constructed. Influencing factors for the measurement of ultraviolet photocathode radiant sensitivity by the equipment were analyzed emphatically. In addition, errors in the measurement of photocathode radiant sensitivity with combinations of UV narrow band filter, optical grating monochromator respectively with radiant illuminometer and radiant power meter were compared, obtaining that the error for measuring photocathode radiant sensitivity by the combination of combined optical grating monochromator with radiant illuminometer was minimum. The expand uncertainty was 9%, which had absolute advantages than other three combinations with expand uncertainties of 19.4%, 19% and 11.2%. The research achievement can support the research and development of domestic ultraviolet detectors, thus providing an effective and accurate detection method for improving and promoting the technical performance of ultraviolet detectors.

收稿日期: 2016-12-05; 修订日期: 2017-01-16.

基金项目: 微光夜视技术重点实验室基金项目资助(No. J20140702)

Key words: ultraviolet detector; photocathode radiant sensitivity; narrow band filter; optical grating monochromator; measuring error

1 引言

紫外导弹告警系统具有虚警率低、体积小、重量轻、功耗低等良好特性^[1-2],并已大量装备在欧美的先进战机上^[3],其核心器件——紫外探测器的技术性能和发展也被越来越多的国家和机构所重视。紫外光阴极辐射灵敏度反映了探测器对紫外波段某一特定波长辐射的响应能力,是决定紫外探测器使用性能的重要指标。相关标准中未明确定义紫外光阴极辐射灵敏度的概念,综合 GJB 743-1989《军用光学仪器术语、符号》中定义的光阴极辐射灵敏度和单色灵敏度,可知紫外光阴极辐射灵敏度是用紫外波段内某一特定波长的紫外光照射器件,其光阴极输出的辐射电流与入射光的辐射通量(或辐射功率)之比,即为该波长下紫外探测器的光阴极辐射灵敏度。

对于紫外探测器的光阴极辐射灵敏度,目前国内尚没有统一的标准测量装置,各研究机构基本上都在用自己搭建的试验装置进行测量。而测量标准和装置的不统一,极易导致同一器件在不同试验装置上得到的结果差异较大,该问题在某型紫外探测器光阴极辐射灵敏度的测量过程中表现得非常明显。本文分别在基于窄带滤光片和光栅单色仪输出紫外单色辐射、使用辐射照度计和辐射功率计探测辐射强度两种不同的组合方式下,对光阴极辐射灵敏度的测量误差进行了分析和对比,结果表明光栅单色仪和辐射功率计的组合方式具有较好的测量优势。

2 测量原理

由紫外光阴极辐射灵敏度的定义,其测量原理如下:用特定辐射功率紫外光照射探测器光阴极的规定区域,分别测量光阴极在有单色光照射时的辐射电流 $I_{\lambda 1}$ 和无单色光照射时的辐射电流 $I_{\lambda 0}$,测量光阴极入射单色光的辐射通量 Φ_{λ} ,然后计算紫外光阴极辐射灵敏度为:

$$S_{\lambda} = \frac{I_{\lambda 1} - I_{\lambda 0}}{\Phi_{\lambda}} \quad (1)$$

3 测量方法

3.1 基于紫外窄带滤光片和辐射照度计的测量方法

基于紫外窄带滤光片测量紫外光阴极辐射灵敏度的装置原理见图 1。该装置由紫外光源(氙灯/低压汞灯+恒流稳压电源)、窄带滤光片、中性密度滤光片、测试暗箱、直流高压电源、微电流计和测试夹具等组成。其中,氙灯和低压汞灯的光谱辐射特性曲线分别如图 2 和图 3 所示。

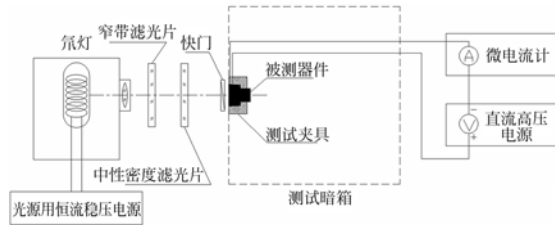


图 1 基于窄带滤光片的测量装置原理图

Fig. 1 Block diagram of measuring devices based on narrow band filter

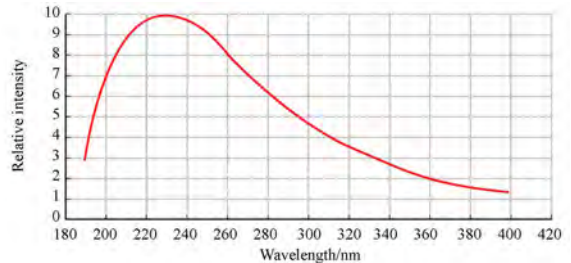


图 2 氙灯相对光谱辐射特性曲线

Fig. 2 Deuterium lamp arc spectrum relative to 254 nm intensity

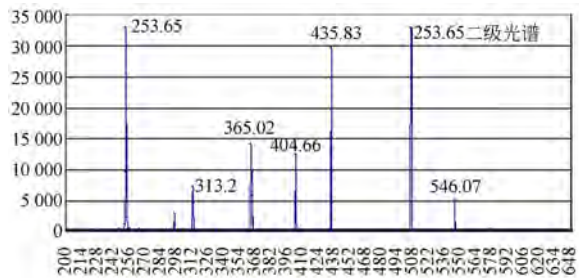


图 3 低压汞灯相对光谱辐射特性曲线

Fig. 3 Low pressure mercury arc spectrum relative to 254 nm intensity

在本测量方法中,若被测紫外探测器光阴极感光面的响应度均匀,则入射至光阴极表面的光斑大小通常可不做要求;若被测紫外探测器光阴极感光面的响应度不均匀,则入射至光阴极表面的光斑大小通常需要加以规定。光斑尺寸会影响入射光至光阴极表面辐射功率的测量准确度。

3.2 基于光栅单色仪和辐射功率计的测量方法

基于光栅单色仪测量紫外光阴极辐射灵敏度的装置如图 4 所示。该装置由紫外光源(氙灯+

恒流稳压电源)、光栅单色仪、传导光纤、中性密度滤光片、测试暗箱、被测器件、测试夹具等组成。测量时,首先利用紫外会聚透镜将氙灯输出的连续紫外光谱辐射输入至光栅单色仪,入射光辐射经光栅分光,由单色仪出射狭缝输出既定波长的单色光。该单色光经传导光纤扩束成与被测器件光阴极尺寸相符的光斑形状,同时用增加中性密度滤光片的方式调节入射到被测器件表面的单色光辐射功率。

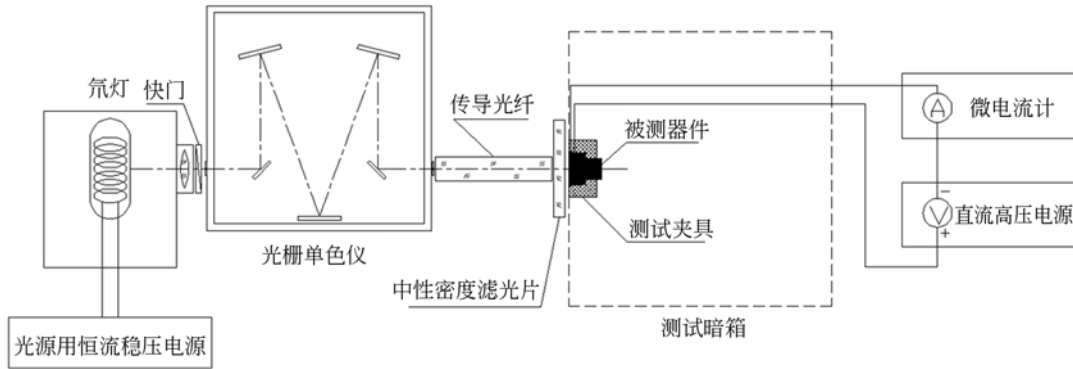


图 4 基于光栅单色仪的测量装置原理图

Fig. 4 Block diagram of measuring devices based on optical grating monochromator

被测器件与直流高压电源、微电流计组成测量回路。其中,直流高压电源提供被测器件工作所需的偏置电压,微电流计在快门开启、关闭的条件下,分别测量被测器件光阴极输出的辐射电流和暗电流。用辐射功率计直接测量入射至被测器件表面的单色光辐射功率,并根据式(1)计算得到光阴极辐射灵敏度。

在本测量方法中,若被测紫外探测器光阴极感光面的响应度均匀,则对由传导光纤扩束后的光斑大小可不做要求;若被测紫外探测器光阴极感光面的响应度不均匀,则对由传导光纤扩束后的光斑大小需加以规定。光斑尺寸决定着传导光纤的制作难度,但不会影响入射光至光阴极表面辐射功率的测量准确度。

4 误差分析及合成

由式(1)可知,紫外光阴极辐射灵敏度测量的影响因素有光阴极辐射电流 $I_{\lambda 1}$ 、光阴极暗电流 $I_{\lambda 0}$ 以及光阴极接收到的辐射功率 Φ_{λ} ,其误差传递关系为:

$$\sigma_{S_{\lambda}} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial I_{\lambda 1}}\right)^2 \sigma^2 I_{\lambda 1} + \left(\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial I_{\lambda 0}}\right)^2 \sigma^2 I_{\lambda 0} + \left(\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial \Phi_{\lambda}}\right)^2 \sigma^2 \Phi_{\lambda}} \quad (2)$$

采用辐射照度计测量辐射功率时,辐射功率测量受光阴极有效感光面积 A 和光阴极感光面接收的辐射照度 E_{λ} 的影响,它们之间的误差传递关系为:

$$\sigma_{\Phi_{\lambda}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Phi_{\lambda}}{\partial E_{\lambda}}\right)^2 \sigma^2 E_{\lambda} + \left(\frac{\partial \Phi_{\lambda}}{\partial A}\right)^2 \sigma^2 A} \quad (3)$$

4.1 采用紫外窄带滤光片和辐射照度计的误差

由式(2)和式(3)可知,该方法的测量误差项主要有光阴极辐射电流测量误差 $\sigma_{I_{\lambda 1}}$ 、光阴极暗电流测量误差 $\sigma_{I_{\lambda 0}}$ 、光阴极面的辐射照度测量误差 $\sigma_{E_{\lambda}}$ 和有效感光面积测量误差 σ_A 。其中,光阴极辐射电流和暗电流的测量误差主要来源于微电流计,其数值在微电流计经具有计量检验资质的检定部门检验后,直接由检定/校准结果给出。此外,在电流测量时隐含着光阴极负偏置电压的问题,因此需要将提供负偏置电压的高压电源送具有计量检验资质的检定部门检验校准。

有效感光面积的测量是通过测量光阴极的有效直径 D 来间接完成的,两者间的误差传递关

系是:

$$\sigma A = \frac{\pi D}{2} \sigma D. \quad (4)$$

通常,紫外探测器光阴极的有效直径远大于 2 mm。当光阴极的有效直径和有效感光面积均为 mm 量级时,光阴极有效直径的测量误差会在放大后传递给有效感光面积。

光阴极面的辐射照度测量误差主要有辐射照度计的计量误差、光源出射光线的单色性和带通抑制特性、光斑的均匀性等,同时还与辐射照度计的使用方法有关。辐射照度计的计量误差由具有计量检验资质的检定部门检验后直接给出。目前,国内针对辐射照度计的计量误差较大,最大校正系数达到了 1.50,最高不确定度接近 20%。

紫外光阴极的辐射灵敏度测量需要尽可能准确地了解某一特定波长下的数值,而紫外窄带滤光片可以起到光谱选择的作用,即通过需要测量的光谱,屏蔽带外杂光。一般要求紫外窄带滤光片在通带之外的光谱透射比要小于 10^{-4} 水平^[4]。但实际应用中,不同厂家生产的紫外窄带滤光片存在较大的差异,会给最终测量带来较大的误差。为了提高测量的准确度,需要测量窄带滤光片的单色性及带通抑制效果,最好在辐射照度计标定和使用选用相同的紫外窄带滤光片,可减少误差。

有关研究表明,紫外单色光源的不均匀性会造成测量结果至少 3% 以上的误差^[5]。因此,在实际测量过程中,应尽量保证单色光源输出光强的均匀性,可在光源前放置紫外漫透射板等匀光装置,但要注意匀光装置对光谱分布的影响,以不改变光谱分布为佳。在紫外光阴极辐射灵敏度的测量过程中,辐射照度计测量的是探测面内单位面积上的辐射通量,其显示数值是在光斑充满整个探头的前提下给出的。因此,在实际使用时,必须保证光源的出射光斑大于辐射照度计的探头,

它们的关系如图 5 所示。

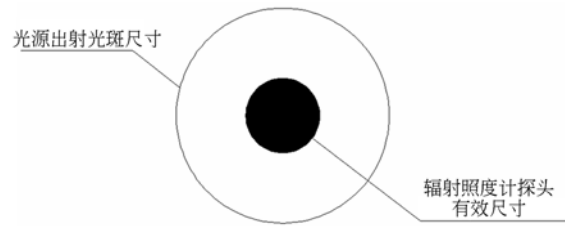


图 5 辐射照度计探头与光斑尺寸的关系示意图

Fig. 5 Dimensional diagram of radiation illuminance meter probe and spot

在用紫外辐射照度计测试时,紫外辐射源往往与探测器的轴线存在一定的偏向角,或者是较大尺寸的扩展光源,不满足点光源近似的条件。扩展光源从各个方向上向探头投射紫外辐射,也就是探头要接收从各个角度入射的辐射。为得到精确的测量结果,应使辐射照度计的探测平面与光源光轴垂直^[6-7],并使投射到光探测器上的响应值严格符合照度的余弦定理,即^[8]:

$$E_{\lambda}(\theta) = E_{\lambda}(0) \cdot \cos \theta. \quad (5)$$

但在实际应用中,辐射照度计的余弦性能并不十分理想,所以在计量测试时需及时了解并改善漫射器的余弦特性。

受其内部各元器件的自身缺陷的影响紫外辐射照度计的光谱响应度并不是理想的矩形分布;再加上带外杂光等因素的影响,如果测试时和标定时光源的光谱分布相差较大的话,必然会带来严重的测量误差,所以标定和测量时光源的光谱分布应尽量接近,最好选用相同的光源进行测量和标定^[9],以降低测量误差。

辐射照度计应在计量有效量程内使用,超量程使用会带来较大误差。

综上所述,基于窄带滤光片和辐射照度计测量紫外光阴极辐射灵敏度的误差为:

$$\sigma_{S_{\lambda}} = \sqrt{\left[\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial I_{\lambda 1}} \right]^2 \sigma^2 I_{\lambda 1} + \left[\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial I_{\lambda 0}} \right]^2 \sigma^2 I_{\lambda 0} + \left[\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial E_{\lambda}} \right]^2 \sigma^2 E_{\lambda} + \left[\frac{\partial \Phi_{\lambda}}{\partial D} \right]^2 \sigma^2 D = \sqrt{\left[\frac{4}{E \times \pi \times D^2} \right]^2 (0.2\%)^2 + \left[-\frac{4}{E \times \pi \times D^2} \right]^2 (0.2\%)^2 + \left[-\frac{4(I_{\lambda 1} - I_{\lambda 0})}{E^2 \times \pi \times D^2} \right]^2 (9\%)^2 + \left[-\frac{8(I_{\lambda 1} - I_{\lambda 0})}{E^2 \times \pi \times D^2} \right]^2 (0.01)^2}. \quad (6)$$

紫外光阴极辐射灵敏度测量时的辐射功率约为 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ W,则由式(6)可以得到:辐射照度

计的误差传递对紫外光阴极辐射灵敏度测量结果的影响最大。

该组合下紫外光阴极辐射灵敏度测量不确定度的4个分量如表1所示。

4.1.1 测量辐射电流引入的测量不确定度分量

微电流计的计量校准结果表明,其不确定度为0.4%($k=2$),按B类标准不确定度方法评定有 $u_1=0.4\%/2=0.2\%$ 。

4.1.2 测量辐射照度引入的测量不确定度分量

辐射照度计校准结果表明,其不确定度约为18%($k=2$),按B类标准不确定度方法评定有 $u_2=18\%/2=9\%$ 。

4.1.3 测量光阴极有效直径引入的测量不确定度分量

读数显微镜的计量校准结果表明,其不确定度为 $\pm 0.02\text{ mm}$ ($k=2$),按B类标准不确定度方法评定有 $u_3=0.02/2=0.01$ 。

4.1.4 测量重复性引入的测量不确定度分量

利用贝塞尔公式对6次测量结果计算相对试验标准差,由此引入的不确定度分量按A类不确定度方法评定,经计算该项不确定度为3.5%。

表1 使用窄带滤光片和辐射照度计测量紫外光阴极辐射灵敏度的测量不确定度

Tab.1 Uncertainties of ultraviolet photocathode radiant sensitivity measured by narrow band filter and radiant illuminometer

| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 不确定度值 |
|--------|------------|-------|
| u_1 | 微电流计的不确定度 | 0.2% |
| u_2 | 辐射照度计的不确定度 | 9% |
| u_3 | 读数显微镜的不确定度 | 0.01 |
| u_4 | 测量重复性的不确定度 | 3.5% |

由于各分量之间独立不相关,所以有:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{(0.2\%)^2 + (9\%)^2 + 0.01^2 + (3.5\%)^2} = 9.7\%$$

要求置信水平为0.95%,取 $k=2$,则扩展不确定度为: $U=k_c=19.4\%$ 。

4.2 采用光栅单色仪和辐射功率计的误差

由式(2)可知,该方法下的测量误差项主要有光阴极辐射电流测量误差 σI_{λ} 、光阴极暗电流测量误差 $\sigma I_{\lambda 0}$ 、光阴极面接收的辐射功率测量误差 $\sigma \Phi_{\lambda}$ 。其中,光阴极辐射电流和暗电流测量的误差

情况以及隐含的负偏置电压情况与4.1节中的情况相同;光阴极面接收的辐射功率测量误差主要有辐射功率计的计量误差、光栅单色仪出射光线的单色性和带通抑制特性等,同时还与辐射功率计的使用方法有关。

辐射功率计的计量误差由具有计量检验资质的检定部门检验后直接给出。中国计量科学研究院给出某型激光辐射功率计在有效适用范围内的校准系数为1.02,不确定约为8%,远优于辐射照度计的计量误差。

单级光栅单色仪输出的单色光通常存在二级衍射问题,采用两级光栅单色仪可以在一定程度上加以抑制,并可取得优于窄带滤光片的单色光和带通抑制效果。该项性能可以由具有计量检验资质的检定部门检验并给出结果。

在紫外光阴极辐射灵敏度的测量过程中,辐射功率计测量的是探测面内单位时间内收集到的辐射能量,其显示数值是在光斑尺寸不超过探头面积的前提下给出的。因此,在实际使用时,必须保证光源出射光斑小于辐射功率计的探头,如图6所示。鉴于辐射功率计测量时接收了全部的光谱辐射,因此对光斑的均匀性不做要求^[10]。

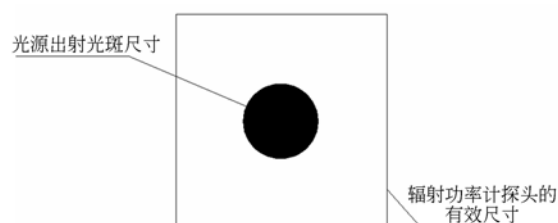


图6 测量时辐射功率计探头与光斑的尺寸关系示意图
Fig.6 Dimensional diagram of radiation powermeter probe and spot

在用紫外辐射功率计测试时,紫外功率计接收的是光斑投影面积的辐射通量。若光斑投影与功率计探测器表面存在一定的夹角,会降低实际接收的辐射通量,即:

$$P_{\lambda}(\theta) = P_{\lambda}(0) \cdot \cos \theta, \quad (7)$$

因此,在实际计量测试时,应保证辐射功率计的探头与光轴垂直。

辐射功率计应在计量有效量程内使用,超量程使用会带来较大误差^[11]。

综上所述,基于光栅单色仪和辐射功率计测量紫外光阴极辐射灵敏度的误差为:

$$\sigma_{S_{\lambda}} = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial I_{\lambda 1}}\right)^2 \sigma^2 I_{\lambda} + \left(\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial I_{\lambda 0}}\right)^2 \sigma^2 I_{\lambda 0} + \left(\frac{\partial S_{\lambda}}{\partial \Phi_{\lambda 1}}\right)^2 \sigma^2 \Phi_{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{1}{\Phi_{\lambda}}\right)^2 (0.2\%)^2 + \left(-\frac{1}{\Phi_{\lambda}}\right)^2 (0.2\%)^2 + \left(-\frac{I_{\lambda 1} - I_{\lambda 0}}{\Phi_{\lambda}^2}\right)^2 (4\%)^2}. \quad (8)$$

由式(8)可以得到,辐射功率计的测量误差对紫外光阴极辐射灵敏度测量结果的影响最大。

该组合下紫外光阴极辐射灵敏度的测量不确定度分量如表 2 所示。

4.2.1 测量辐射电流引入的测量不确定度分量

微电流计的计量校准结果表明,其不确定度为 0.4%($k=2$),按 B 类标准不确定度方法评定有 $u_1=0.4\%/2=0.2\%$ 。

4.2.2 测量辐射功率引入的测量不确定度分量

辐射功率计计量校准结果表明,其不确定度为 8.2%($k=2$),按 B 类标准不确定度方法评定,有 $u_2=8\%/2=4.1\%$ 。

4.2.3 测量重复性引入的测量不确定度分量

利用贝塞尔公式对 6 次测量结果计算相对实验标准差,由此引入的不确定度分量按 A 类不确定度方法评定,经计算该项不确定度为 2.1%。

表 2 使用光栅单色仪和辐射功率计测量紫外光阴极辐射灵敏度的测量不确定度

Tab. 2 Uncertainties of ultraviolet photocathode radiant sensitivity measured by optical grating monochromator and radiant power meter

| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 不确定度值/% |
|--------|-------------|---------|
| u_1 | 光电流测试仪的不确定度 | 0.2 |
| u_2 | 辐射功率计的不确定度 | 4.1 |
| u_3 | 重复性测量不确定度 | 2.1 |

由于各分量之间独立不相关,所以有:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} =$$

$$\sqrt{(0.2\%)^2 + (4\%)^2 + (2.1\%)^2} = 4.5\%$$

要求置信水平为 0.95%,取 $k=2$,则扩展不确定度为: $U=k_c=9\%$ 。

4.3 采用光栅单色仪和辐射照度计的误差

由前述分析可知,基于光栅单色仪和辐射照度计测量紫外光阴极辐射灵敏的误差传递情况同式(6),辐射照度计的误差传递对紫外光阴极辐射灵敏度测量结果的影响最大。

该组合下紫外光阴极辐射灵敏度的测量不确

定度分量主要如表 3 所示。

4.3.1 测量辐射电流引入的测量不确定度分量

微电流计的计量校准结果表明,其不确定度为 0.4%($k=2$),按 B 类标准不确定度方法评定有 $u_1=0.4\%/2=0.2\%$ 。

4.3.2 测量辐射照度引入的测量不确定度分量

辐射照度计校准结果表明,其不确定度约为 18%($k=2$),按 B 类标准不确定度方法评定有 $u_2=18\%/2=9\%$ 。

4.3.3 测量光阴极有效直径引入的测量不确定度分量

读数显微镜的计量校准结果表明,其不确定度为 ± 0.02 mm($k=2$),按 B 类标准不确定度方法评定有 $u_3=0.02/2=0.01$ 。

4.3.4 测量重复性引入的测量不确定度分量

利用贝塞尔公式对 6 次测量结果计算相对试验标准差,由此引入的不确定度分量按 A 类不确定度方法评定,经计算该项不确定度为 2.8%。

表 3 使用光栅单色仪和辐射照度计测量紫外光阴极辐射灵敏度的测量不确定度

Tab. 3 Uncertainties of ultraviolet photocathode radiant sensitivity measured by optical grating monochromator and radiant illuminometer

| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 不确定度值 |
|--------|------------|-------|
| u_1 | 微电流计的不确定度 | 0.2% |
| u_2 | 辐射照度计的不确定度 | 9% |
| u_3 | 读数显微镜的不确定度 | 0.01 |
| u_4 | 测量重复性的不确定度 | 2.8% |

由于各分量之间独立不相关,所以有:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} =$$

$$\sqrt{(0.2\%)^2 + (9\%)^2 + 0.01^2 + (2.8\%)^2} = 9.5\%$$

要求置信水平为 0.95%,取 $k=2$,则扩展不确定度为: $U=k_c=19\%$ 。

4.4 采用窄带滤光片和辐射功率计的误差

由前述分析可知,基于窄带滤光片和辐射功率计测量紫外光阴极辐射灵敏的误差传递情况同

式(8),辐射功率计的测量误差对紫外光阴极辐射灵敏度测量结果的影响最大。

该组合下紫外光阴极辐射灵敏度的测量不确定度分量如表4所示。

表4 使用窄带滤光片和辐射功率计测量紫外光阴极辐射灵敏度的测量不确定度表

Tab.4 Uncertainties of ultraviolet photocathode radiant sensitivity measured by narrow band filter and radiant power meter

| 不确定度分量 | 不确定度来源 | 不确定度值/% |
|--------|-------------|---------|
| u_1 | 光电流测试仪的不确定度 | 0.2 |
| u_2 | 辐射功率计的不确定度 | 4.1 |
| u_3 | 重复性测量不确定度 | 3.8 |

4.4.1 测量辐射电流引入的测量不确定度分量

微电流计的计量校准结果表明,其不确定度为0.4%($k=2$),按B类标准不确定度方法评定有 $u_1=0.4\%/2=0.2\%$ 。

4.4.2 测量辐射功率引入的测量不确定度分量

辐射功率计计量校准结果表明,其不确定度为8.2%($k=2$),按B类标准不确定度方法评定有 $u_2=8\%/2=4.1\%$ 。

4.4.3 测量重复性引入的测量不确定度分量

利用贝塞尔公式对6次测量结果计算相对实验标准差,由此引入的不确定度分量按A类不确定度方法评定,经计算该项不确定度为3.8%。

由于各分量之间独立不相关,所以有:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{(0.2\%)^2 + (4.1\%)^2 + (3.8\%)^2} = 5.6\%$$

要求置信水平为0.95%,取 $k=2$,则扩展不确定度为: $U=k_c=11.2\%$ 。

5 结 论

本文对不同组合方式下紫外光阴极辐射灵敏度的测量误差进行了分析,结果表明:由于辐射照度计存在较大的计量误差,同时经窄带滤光片后出射光线的单色性和带通抑制特性不好,故紫外光阴极辐射灵敏度的测量结果最差,其不确定度为19.4%;采用光栅单色仪和辐射功率计的方法测量得到的紫外光阴极辐射灵敏度结果最好,其不确定为9%。该研究为后续紫外光阴极辐射灵敏度的测量提供了一种更加合理、科学的手段。

参考文献:

- [1] 胡绍华,杨丽娜. 导弹紫外告警技术综述[J]. 飞航导弹, 2005(3): 33-36.
HU SH H, YANG L N. Review of missile ultraviolet warning technology[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2005(3): 33-36. (in Chinese)
- [2] 赵勋杰,张英远,高稚允. 紫外告警技术[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(1): 5-9.
ZHAO X J, ZHANG Y Y, GAO ZH Y. UV warning technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(1): 5-9. (in Chinese)
- [3] 李炳军. 紫外探测技术在导弹来袭告警系统中的应用[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
LI B J. *Ultraviolet Detecting Technology and its Applications in the Missile Approaching Warning System*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [4] 黄勃. 提高紫外辐射照度计测量准确度的方法研究[D]. 北京:中国计量科学研究院, 2009.
HUANG B. *The Research on Promoting the Measuring Accuracy of UV Radiometers*[D]. Beijing: National Institute of Metrology, China, 2009. (in Chinese)
- [5] 黎俊. 紫外辐照计校准和测量能力(CMC)评定方法[J]. 江苏现代计量, 2012(6): 36-38.
LI J. Calibration of ultraviolet radiation illuminance meter and measurement capability (CMC) assessment method[J]. *Jiangsu Present Day Metrology*, 2012(6): 36-38. (in Chinese)
- [6] 石丽平,孙威,何长伏,等. 影响紫外辐射照度计测量结果的若干因素[J]. 中国计量, 2011(1): 113-114.
SHI L P, SUN W, HE CH F, et al.. Some factors affecting the measurement results of ultraviolet radiant illuminometer [J]. *China Metrology*, 2011(1): 113-114. (in Chinese)
- [7] 黄勃,代彩红,于家琳. 影响紫外辐射照度计准确测量的因素及解决方法[C]. 2009年中国计量测试学会光辐射计量学术研讨会论文集,中国计量测试

- 学会, 2009.
- HUANG B, DAI C H, YU J L. Sources of error in ultraviolet irradiance measurements and resolution methods[C]. *Acta Metrologica Sinica, Chinese Society for Measurement*, 2009. (in Chinese)
- [8] 刘怡轩, 颜昌翔, 李先锋, 等. 分光测色仪中的光谱仪系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1965-1971.
- LIU Y X, YAN CH X, LI X F, *et al.*. Design of spectrometer in color measuring spectrophotometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1965-1971. (in Chinese)
- [9] 许梦泽, 郭阳宽, 祝连庆, 等. 光栅单色仪中光谱重建的影响因素分析[J]. *光学仪器*, 2014, 36(2): 112-115.
- XU M Z, GUO Y K, ZHU L Q, *et al.*. Research on influencing factors of spectra reconstruction in grating monochromator [J]. *Optical Instruments*, 2014, 36(2): 112-115. (in Chinese)
- [10] 李志刚. 真空紫外分波前傅里叶变换光谱技术进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 736-743.
- LI ZH G. Progress of wavefront-division Fourier transform spectrometry in the vacuum ultraviolet [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 736-743. (in Chinese)
- [11] 李文昊, 姜岩秀, 吴娜, 等. 极紫外波段变栅距光栅刻槽密度变化及光谱分辨能力分析[J]. *发光学报*, 2015, 36(9): 1094-1099.
- LI W H, JIANG Y X, WU N, *et al.*. Analysis for groove density and spectral resolution of varied-line-space gratings in EUV spectrum [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(9): 1094-1099. (in Chinese)

作者简介:



拜晓锋(1982—),男,陕西大荔人,博士研究生,高级工程师,主要从事微光像增强器性能评价及微光器件系统应用等技术的研究。E-mail: baixiaofeng2001@163.com



杨书宁(1988—),女,陕西西安人,硕士,助理工程师,2010年、2014年于西安工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微光像增强器测试与检测技术的研究。E-mail: yangshuning@163.com