

文章编号 1004-924X(2009)03-0482-06

氟化镁窗口氘灯的真空辐射衰减特性

张振铎^{1,2}, 王淑荣¹, 李福田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 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对真空环境下使用氟化镁窗口氘灯时, 氘灯表面易受污染, 导致氘灯的紫外-真空紫外辐射强度逐渐衰减的问题, 对紫外-真空紫外波段辐射传递标准光源氘灯的真空辐射衰减机理进行了分析。在此基础上, 研制了液氮制冷屏装置来抑制氘灯衰减。建立了氘灯真空辐射特性测试系统, 利用该系统对液氮制冷屏装置的有效性进行了考察。测试结果显示, 在160~300 nm波段, 氘灯平均衰减率可由原来的7%/h下降为1%/h, 表明液氮制冷屏装置能有效地抑制氟化镁窗口氘灯在真空环境下的辐射衰减。

关键词:辐射传递标准光源; 真空辐射衰减; 液氮制冷屏; 氘灯

中图分类号:TP732; O536 **文献标识码:**A

Radiation degradation characteristics of deuterium lamp with MgF₂ window in vacuum environment

ZHANG Zhen-duo^{1,2}, WANG Shu-rong¹, LI Fu-tian¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*;

Abstract: When a deuterium lamp with MgF₂ window is used as the UV-VUV radiation transfer standard source, the radiation intensity will be gradually degraded by the window surface pollution of deuterium lamp in vacuum environment. This paper analyzes the vacuum radiation degradation mechanism of the deuterium lamp with MgF₂ window. Based on this, a liquid nitrogen cooled screen device is developed to control the radiation degradation of deuterium lamp. Then, an equipment for studying the radiation characteristics of deuterium lamp in vacuum environment is established to analyze the effectiveness of the liquid nitrogen cooled screen device. The experimental results show that the average degradation rate of deuterium lamp decreases from 7%/h to 1%/h in 160~300 nm, which shows that developed liquid nitrogen cooled screen device can very effectively control the radiation degradation of deuterium lamp with MgF₂ window in vacuum environment.

Key words: radiation transfer standard source; radiation degradation in vacuum environment; liquid nitrogen cooled screen; deuterium lamp

收稿日期: 2008-03-25; 修订日期: 2008-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40675083); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目

1 引言

近20~30年,随着科学技术和工业的发展,紫外-真空紫外波段的辐射测量已广泛应用于材料科学、能源科学、空间科学、环境科学、医疗卫生及许多其他科学技术领域。20世纪70年代,世界各国相继开展了同步辐射特性研究并建立了基于同步辐射的紫外-真空紫外光谱辐射国家标准。但是同步辐射装置规模庞大,造价昂贵,运转及维护费用高,因此在应用方面受到极大的限制。目前,世界各国主要以氙灯作为紫外-真空紫外波段的辐射传递标准光源^[1-5],同步辐射以其本身具有的辐射可计算性、重复性好、可靠性高等优点作为标准辐射源使用,其量值通过氙灯进行传递。

在紫外-真空紫外波段,各国通用的光谱辐射传递标准光源为英国Cathoden公司制造的V型氙灯,窗口可用熔石英或氟化镁两种材料。由于氟化镁材料与熔石英相比具有更短的透过波长(氟化镁材料最短透过波长为115 nm,熔石英材料为160 nm),所以在实际工作中的应用更广泛。但在使用这种氟化镁窗口氙灯的过程中,人们遇到了一个共同的问题^[6-7],即在真空环境下使用时,氙灯窗口表面极易受到污染,导致氙灯的紫外-真空紫外辐射强度逐步衰减,衰减率最大达20%/h左右。这就给紫外-真空紫外波段辐射标准传递、光谱仪器的辐射定标及其他的一些计量研究工作带来很大的困难。

为抑制氟化镁窗口氙灯在真空环境下的辐射衰减,本文研制了一套液氮制冷屏装置,并利用建立的氙灯真空辐射特性测试系统对液氮制冷屏装置的有效性进行了考察。结果表明,液氮制冷屏能有效地抑制氙灯在真空环境下的衰减,在160~300 nm波段,平均衰减率由7%/h下降为1%/h。

2 氙灯

氙灯结构如图1所示。窗口采用氟化镁材料,其在紫外-真空紫外波段具有较高的透射比。阳极由钼制成,能经受高温。阴极由旋转的钨丝镀钽、铈、钙混合氧化物组成,直热式阴极。为了屏蔽杂散光,灯丝周围加了屏蔽罩。氙灯的发光

点直径约1 mm,这种氙灯的辐射亮度较高,在灯的中心处有最大的辐射亮度,沿轴向对称减少,直到发射面的边缘。氙灯的工作电流为300 mA,工作电压约70 V,功率为30 W。

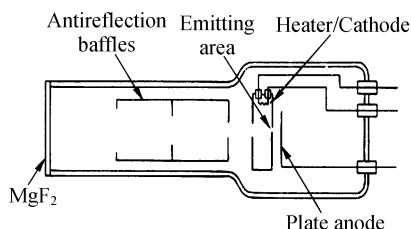


图1 氙灯结构图

Fig. 1 Schematic drawing of a deuterium lamp

3 氙灯衰减及液氮制冷屏

3.1 氙灯衰减机理

在高真空环境下,真空室内的少量分子几乎不相互碰撞,分子从一个表面到另一个表面主要以直线形式运动,这就意味着只有在外力的作用下,它们才会改变原来的运动轨迹而发生偏折。文献[6]曾报道过,当真空紫外辐射照射在氟化镁晶体材料上时,其上会产生静电电荷,这个电荷能在氟化镁窗口前端建立一个电场。另一方面,真空系统中或多或少(与真空系统的洁净程度有关)会有碳氢化合物及其它一些污染物残留在真空室内,它们在真空紫外辐射照射下被电离,被电离的分子根据氙灯窗口前端建立的电场的极性,一部分远离氙灯窗口,另一部分可附着在窗口表面形成一层沉积膜,随着辐照时间的增加,沉积膜的厚度逐渐增大,从而造成氙灯辐射强度的逐步衰减。

3.2 液氮制冷屏

通过对氙灯衰减机制的分析,本文研制了一套液氮制冷屏装置来抑制氟化镁窗口氙灯辐射强度的衰减,示意图如图2所示。将该装置放置在氙灯窗口前,它主要起到三方面作用:(1)制冷的作用。液氮可以在装置内循环,利用液氮的蒸发吸热来降低氟化镁窗口区域的温度,提高该区域的真空度,从而减少窗口附近污染物分子的数量,即减少被电离分子的数量,从而抑制氙灯辐射强度的衰减;(2)遮挡屏的作用。由上面的分析可知,在高真空环境下,分子从一个表面到另一个表面主要以直线形式运动。该装置放置在氙灯窗口

前,能够限制除氙灯辐射方向外真空室内其它各个方向的污染物分子靠近窗口,减少了窗口附近污染物分子的数量。(3)限制辐照的作用。在满足氙灯能够照亮所要求视场的前提下,可尽量减小制冷屏中心圆孔的开口尺寸,限制氙灯光源对真空室内的辐射立体角,由此减少被电离分子的数目,抑制氙灯辐射强度的衰减。

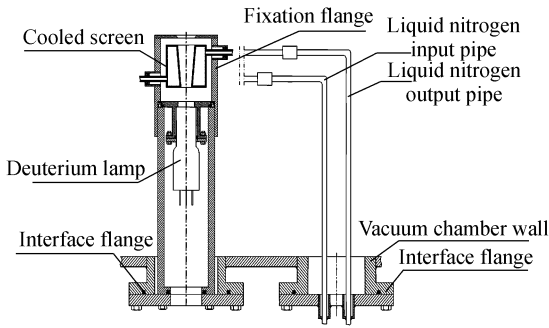


图 2 液氮制冷屏

Fig. 2 Liquid nitrogen cooled screen

4 实验过程及结果

4.1 氙灯真空辐射特性测试研究系统

为了讨论液氮制冷屏装置的有效性,本文构建了氙灯真空辐射特性测试研究系统。该系统由氙灯光源室、真空室、无油高真空机组、空间紫外遥感仪器(SURSI)及计算机等辅助设备组成,系统结构示意图如图 3 所示。

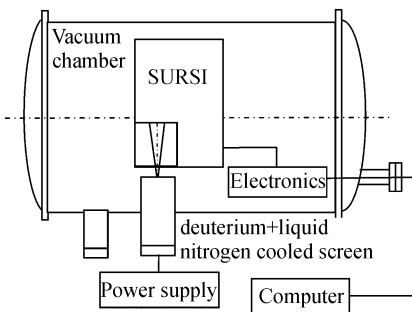


图 3 真空辐射特性测试系统

Fig. 3 Equipment for studying radiation characteristics of deuterium lamp in vacuum environment

4.1.1 真空室

真空室采用卧式结构,由真空室本体、热沉、阀门、支架、温度和真空度测量传感器组成。真空

室内有放置试件的滑轨支架及照明灯。外形尺寸 $\Phi 1\ 200\ \text{mm} \times 1\ 500\ \text{mm}$,内空间净尺寸 $\Phi 900\ \text{mm} \times 1\ 200\ \text{mm}$ 。

4.1.2 无油高真空机组

选用法国 ALCTEL 公司 11 升 ACP40 干式泵和美 APD 公司 4000 升 M16 低温泵构成,极限真空度可达 $10^{-5}\ \text{Pa}$ 。

4.1.3 空间紫外遥感仪器

风云三号气象卫星上的有效载荷^[8],光路如图 4 所示。它由前置铝漫反射板、消偏器、调制器、Ebert-Fastie 光栅双单色仪、光电倍增管探测器及电控系统组成。Ebert-Fastie 光栅双单色仪由球面准直—聚光镜、平面和屋脊转向镜、光栅及入射、出射和中间狭缝组成。仪器工作波段 $160 \sim 400\ \text{nm}$,光谱分辨率 $0.15\ \text{nm}$, $300\ \text{nm}$ 处光谱带宽 $1.0\ \text{nm}$,视场角为 11° 。仪器在轨工作时有两种工作模式:(1)太阳模式:每轨道周期在星下点太阳高度角为零时,铝漫反射板移入光路,太阳辐射经过铝漫反射板进入仪器,完成一次太阳紫外光谱辐照度测量;(2)大气模式:太阳模式后,铝漫反射板移出光路,太阳后向散射辐射不经过漫反射板而直接进入仪器,进行大气的太阳后向散射紫外光谱辐亮度测量。在氙灯真空辐射特性测试系统中,为了避免仪器铝漫反射板漫反射率在氙灯辐照下发生衰减^[9],给氙灯测试结果带来影响,本文选择空间紫外遥感仪器的工作模式为大气模式。

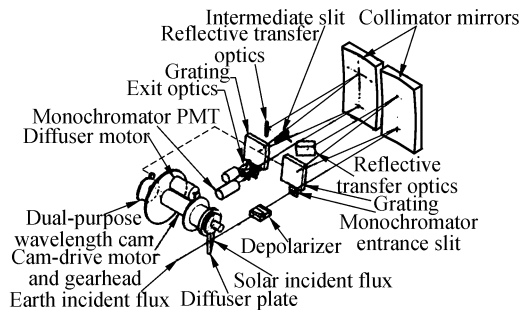


图 4 空间紫外遥感仪器结构图

Fig. 4 Configuration of space ultraviolet remote sensing instrument

4.1.4 系统测量程序

为实现测量的自动化,利用计算机对测量的各个环节进行自动控制,如波长扫描、数据采集与处理、文件存储等。采用 VC++ 编制了在 Win-

dows 操作环境下的自动测量程序。程序软件具有良好的界面,丰富的菜单选择,如图5所示。可进行连续扫描和单点测量,连续扫描设定了起始波长、终止波长、间隔点数(电机步数,每步 0.035 nm)及积分次数(每点采集次数)。单点测量功能可走到指定波长处,输入采集点数,给出测量值及均值。纵坐标还具有档位调节功能,图像纵坐标设3档:5 V、7.5 V 和 10 V,程序具有图像显示、保存及回放功能。

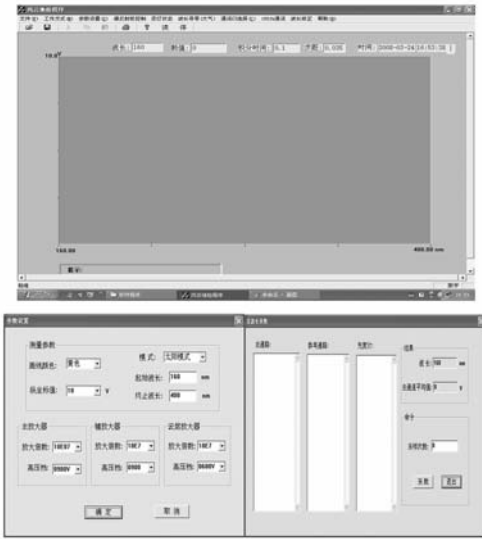


图5 测量程序界面

Fig. 5 Interface of measuring software

测试过程中,当真空度达 10^{-5} Pa 时,氙灯辐射直接进入 SURSI 入射狭缝,通过消偏器、Ebert-Fastie 光栅单色仪,在单色仪出射狭缝平面形成光谱带。当单色仪光栅转动时,不同波长的单色辐射依次通过出射狭缝,经探测器、放大器,然后经 232 接口上传到计算机,由计算机采集与处理。

4.2 测试结果

4.2.1 未加“液氮制冷屏”测试结果

光源采用由英国 Cathoden 公司制造、德国 PTB 标定的氟化镁窗口传递标准氙灯 V0248。测试前,先使用高纯氧化铝抛光氙灯窗口,能有效清除氙灯窗口表面的污染物,使氙灯辐射强度值与标定值一致。氙灯在真空状态下长开 5 h,其辐射强度的相对变化(氟化镁窗口透过率)可表示为:

$$\rho_i(\lambda) = \frac{V_i(\lambda)}{V_0(\lambda)}, \quad (1)$$

其中, $V_0(\lambda)$ 为氙灯点亮时,空间紫外遥感仪器对氙灯光谱的读出值。由于在氙灯的预热时间内(一般为 30 min),其辐射强度衰减值远大于氙灯自身趋于稳定时的辐射强度变化值,所以测试从点亮氙灯时开始。 $V_i(\lambda)$ 为任意时刻空间紫外遥感仪器对氙灯光谱的读出值。按照式(1)处理后的测试结果如图6所示。由图6可见,在 160~300 nm 波段,氙灯光谱的辐射强度逐步衰减,且不同波长呈现出不同的衰减速率,最大衰减率出现在 200 nm 附近。测试开始 1 h,衰减现象最明显,200 nm 处的衰减率约 10%/h 左右,160~300 nm 波段平均衰减率约为 7%/h。1 h 过后,衰减率有所减小,200 nm 处约为 3.5%/h,160~300 nm 波段约为 3%/h。KAY P. J. 和 NETTLETON D. H. [6] 曾在 110~200 nm 波段对氙灯的真空辐射特性进行过考察,在 160~200 nm 重叠波段,本实验观察到的衰减规律与他们相似。

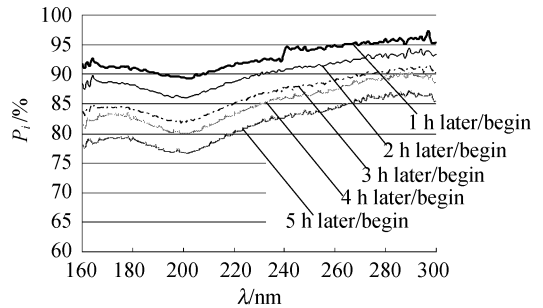


图6 未加液氮制冷屏衰减结果

Fig. 6 Degradation results without liquid nitrogen cooled screen

4.2.2 加“液氮制冷屏”测试结果

测试前,同样先使用高纯氧化铝抛光氙灯窗口,清除窗口表面的污染物,使氙灯辐射强度值与标定值一致。对真空室抽真空,当真空度达 10^{-5} Pa 时,通液氮,利用液氮制冷屏装置降低氙灯窗口附近温度,40 min 内可达 -80 °C 左右。这时,点亮氙灯,开始考察其真空辐射衰减情况。测试时间为 3 h,按式(1)处理后的结果如图7所示。由图7可见,加液氮制冷屏装置后,氙灯辐射强度衰减情况明显减小,且衰减率随波长变化不明显。测试开始 1 h,160~300 nm 波段平均衰减率仅为 1%/h;3 h 的平均衰减速率仅为 0.9%/h。由此可见,液氮制冷屏装置能够十分有效地抑制氟化

镁窗口标准氘灯的真空辐射衰减,提高其在紫外-真空紫外波段的辐射稳定性。

5 结 论

对氟化镁材料窗口、紫外-真空紫外波段辐射传递标准光源氘灯的真空辐射衰减机理进行了分析,在此基础上,研制了液氮制冷屏装置来抑制氘灯衰减。建立了氘灯真空辐射特性测试系统,利用该系统对液氮制冷屏装置的有效性进行了考察,在 160~300 nm 波段,氘灯平均衰减率可由原来的 7%/h 下降为 1%/h。测试结果表明,液氮制冷屏装置能十分有效地抑制氟化镁窗口氘灯在真空环境下的辐射衰减。

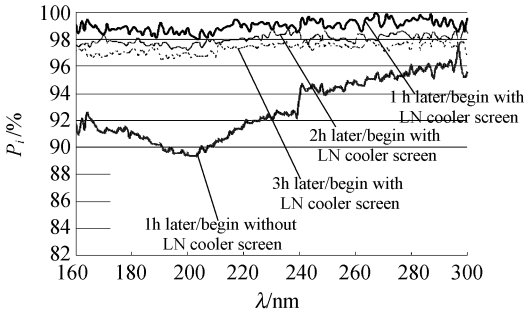


图 7 加液氮制冷屏衰减结果

Fig. 7 Degradation results with liquid nitrogen cooled screen

参考文献:

- [1] SPERFELD P, STOCK K D, RAATZ K H, *et al.*. Characterization and use of deuterium lamps as transfer standards of spectral irradiance [J]. *Metrologia*, 2003, 40: S111-S114.
- [2] HOLLANDT J, BECKER U, PAUSTIAN W, *et al.*. ULM. New developments in the radiance calibration of deuterium lamps in the UV and VUV spectral range at the PTB [J]. *Metrologia*, 2000, 37: 563-566.
- [3] HUANG L K, CEBULA R P, HILSEN RATH E. Determination of deuterium lamp irradiance drifts in the SSBUV laboratory [J]. *Metrologia*, 1998, 35: 373-379.
- [4] 邢进, 王淑荣, 李福田. 紫外-真空紫外辐射标准光源的比对[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(4): 373-379.
- [5] XING J, WANG SH R, LI F T. Comparisons between radiometric scales on UV-VUV radiant standard light sources [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 373-379. (in Chinese)
- [6] 黄煜, 王淑荣, 张振铎, 等. 用 150 W 氘灯标定 200~300 nm 光谱辐照度[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1215-1219.
- [7] HUANG Y, WANG SH R, ZHANG ZH D, *et al.*. Calibration of 200~300nm spectral irradiance using 150W deuterium lamp [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1215-1219. (in Chinese)
- [8] KEY P J, NETTLETON D H. Determination lamps as transfer standards for spectral radiance measurements[R]. *BCR Information Applied Metrology, Commission of the European Communities, Report, EUR 10234 EN*, 1985.
- [9] KEY P J, PRESTON R C. Magnesium fluoride windowed deuterium lamps as radiance transfer standards between 115 and 370 nm[J]. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1980, 13: 866-870.
- [10] 邢进, 王淑荣, 李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 185-190.
- [11] XING J, WANG SH R, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 185-190. (in Chinese)
- [12] JAROSS G, CEBULA R, DELAND M, *et al.*. Backscatter ultraviolet instrument solar diffuser degradation[J]. *SPIE*, 1998, 3427: 432-444.

作者简介:



张振铎(1982—),男,吉林长春人,中科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在读博士研究生,主要从事空间紫外遥感技术与辐射定标方面的研究。E-mail: zhenduo69@163.com



李福田(1941—),男,天津人,1964年南开大学物理系毕业,研究员,博士生导师,主要从事短波光学与空间遥感技术的研究。E-mail: Li_futian@yahoo.com.cn

通讯作者:



王淑荣(1961—),女,吉林长春人,硕士学位,研究员,博士生导师,FY-3卫星紫外臭氧垂直探测仪主任设计师。主要从事光学检测、紫外辐射计量测试及空间紫外光谱遥感技术研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

●下期预告

基于人眼光学模型的角膜模型的研究

孔梅梅¹,高志山¹,陈磊¹,李新华²,瞿小妹³

(1. 南京理工大学电光学院,南京 210094;2. 金陵科技学院视光学技术学院,南京 210001;
3. 复旦大学附属眼耳鼻喉科医院,上海 200031)

基于角膜面型的非球面特性,应用光学设计软件 Zemax,从光学成像角度,提出了结合人眼光学模型的角膜双二次曲面模型的建立方法,并结合国人正视眼和近视眼的有关实测数据和分析结果,以人眼的波像差为评价函数,对初始模型眼进行优化。给出了符合我国人眼特点的正视眼和近视眼模型中的角膜模型,讨论了矫正近视的矫正眼模型中的角膜理想模型和可用于角膜屈光手术中的切削模型,切削深度的最大值在角膜中心处,约 $26.5 \mu\text{m}$ 。结果表明:基于人眼光学模型的角膜双二次曲面模型,符合角膜的面型特点,更适合实际的临床应用,也可为波像差引导的个性化角膜切削方案提供一个更适于实际应用的数字化模型。