

航空胶片的 X 射线标定

赵青春*

张小秋 雷志远 刘秀琴 龚美霞 常增虎 侯洵

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘要 利用光谱扩展的荧光型软 X 射线单色光源产生的多条谱线, 通过时间递增和光强递增的方法首次标定了国产高速航空胶片在软 X 射线和超软 X 射线波段的响应特性. 给出了这种胶片的响应特性曲线即光学密度与曝光量的关系和相对光谱灵敏度曲线.

关键词 航空胶片; X 射线; 标定

0 引言

感光胶片是一种有效的软 X 射线辐射的探测工具, 已广泛应用于等离子体和 X 射线激光的研究中^{1,2}, 其优点是它具有高灵敏度和空间分辨能力、宽动态范围、简单方便等. 胶片的 X 光响应不同于它对可见光的响应. 它不存在互易律失效, 具有各波长的特性曲线相互平行的特点. 这主要是因为单个光子的能量足以使卤化物元显影, 而可见光则需要几个光子. 胶片的响应特性直接影响实验数据处理及实验的准确性和可靠性. 因此在胶片作为记录介质进行 X 射线定量测定工作使用前, 需对其进行标定, 给出胶片的响应特性曲线, 即黑度和曝光量的定量关系等.

以 Henke 管产生 X 射线辐射经荧光靶单色化的 X 光作为光源进行胶片标定的工作国际上已有一些报道³⁻⁵, 其中具有代表性的是 Loppel 等人的工作³, 他们利用 Henke 管产生特征辐射, 荧光靶单色化, 获得了光子能量 1keV 以下的几条单色 X 射线. 用此为光源, 标定了 Kodak 101-01 和 Kodak No-1-Screen 两种类型胶片在软 X 射线区域的响应特性. 但是他们的工作中所用的光源输出谱线少, 且局限于很窄的光谱区域.

本文提出一种新的标定方法, 它是采用光谱扩展的荧光型软 X 射线单色仪为标定光源, 以时间递增和光强递增的方法标定了胶片的软 X 射线和超软 X 射线响应^{6,11}, 其特点是光谱范围宽、实验数据多. 最近几年, 软 X 射线胶片日益受到重视, 开发应用国产软 X 射线胶片已刻不容缓. 本文首次报道国产某航空胶片在软 X 射线和超软 X 射线区域的响应特性. 该航空胶片是西安光学精密机械研究所瞬态光学国家重点实验室小型激光打靶和软 X 射线皮秒条纹和分幅相机研究中使用的国产探测胶片.

1 工作原理

高速电子轰击适当的靶材料, 靶材料就会产生韧致辐射(连续谱)和靶元素的标识辐射(特征谱), 即原级 X 射线. 原级 X 射线 I_0 激发荧光靶就会得到靶元素的特征谱线, 即荧光辐射 I_f . 这种荧光辐射即为单色 X 射线. 原理如图 1 所示.

实验中只要将待测软 X 射线胶片放在单色仪的样品室内, 就可实现对胶片的曝光. 然后通过时间递增法和光强递增法(预先在胶片前面放置对已知波长已知厚度和透过率的阶梯滤膜), 形成对应某一

* 作者单位为西安交通大学电子材料研究室, 西安 710049

收稿日期: 1995-11-13

波长不同曝光量(光强与时间的乘积)的黑度变化. 转动荧光靶的位置可变化 X 射线的光子能量(波长), 从而可得到对不同波长的标定和光谱响应.

根据 Henke 等人的理论, 胶片的黑度与曝光强度间可用下列公式表示^{6,11}

$$H = a \exp(bD) + c$$

式中 D 为黑度, H 为曝光量, a, b, c 是与胶片结构、入射光子能量(波长)、胶片冲洗条件有关的常数. 对于某一波长, 根据实验获得的一系列胶片黑度和对应曝光量, 利用非线性最小二乘法, 可确定出 a, b, c 参数, 从而获得胶片对某波长的响应特性.

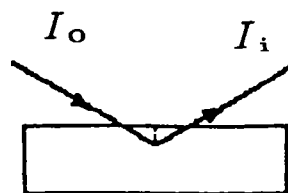


图 1 荧光辐射原理图
Fig. 1 The diagram of the principle of fluorescent radiation

2 实验过程

标定装置如图 2 所示^{6~8,11}. 它主要由光源、样品室、探测分析部分和控制部分组成. 光源和样品室在低真空系统中. 探测分析部分主要包括超薄窗流气式正比计数管和 1024 道分析仪. 控制处理部分为计算机. 它可控制曝光的时间和高压电源, 接收和处理实验数据. 光源为自行研制光谱扩展的荧光型软 X 射线单色仪, 输出的单色光为荧光靶的特征辐射. 系统在不改变真空的前提下, 可通过转动荧光靶改变输出的波长; 变化 X 射线管的电压与电流来改变输出光强大小.

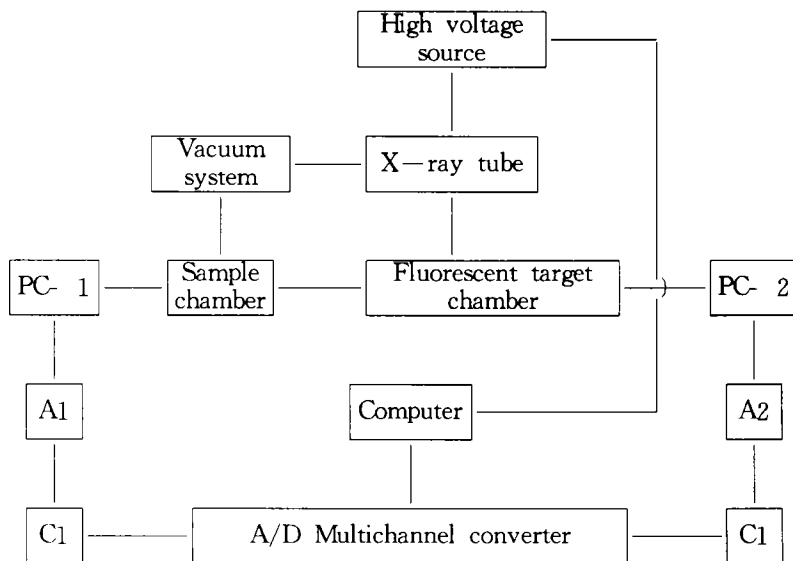


图 2 X 射线标定装置原理方框图, PC1 和 PC2 为流气式正比计数管, A1 和 A2 为线性放大器和前置放大器, C1 和 C2 为计数器

Fig. 2 The diagram of X-ray film calibration. PC1 and PC2—gas flow proportional counter, A1 and A2—Linear amplifier and preamplifier, C1 and C2—Counter

本实验所用的软 X 射线单色仪突出特点是: 输出的谱线数量多、光谱范围宽 (109eV~7469eV)、空间分布均匀、强度高、稳定性好. 实验证明该单色仪完全可用于各种膜片的透过率的测量和标定, 如 X 射线光电阴极, X 射线介质膜等的研究^{6~8}.

实验中, 样品室每次可装六个待测样品, 即一次开机就可获得多组数据, 保证了标定条件的同一性. 待测胶片装在带有透射窗口材料的暗盒内部. 其作用是一方面挡外来光影响, 另一方面由于此窗口材料和探测器的窗口材料相同, 保证探测器探测的光强即为入射到胶片样品上的光强, 从而提高了实验精度. 窗口直径为 20mm, 成分为两种有机物薄膜. 变化膜层数, 可得到光强的变化. 膜的透过率经测量

和计算获得. 胶片改变是通过样品室的转动机构手动实现的, 不破坏真空, 保持了光强的稳定.

根据所选谱线不同, 采用时间递增法, 在 15~10000s 范围内依次成倍地变化曝光时间; 或采用光强递增法, 通过膜的层数多少变化光强. 从而得到一系列的曝光量和对应的光学密度数据. 在曝光过程中, 与样品室相对称的另一侧, 相同的正比计数管同时记录和监测光强的变化以便保证输出光强的稳定. 曝光量的值可由计算机直接给出或通过测得的光强与时间相乘计算得到, 实验表明二者一致. 光强大小由超薄窗流气式正比计数管测定, 工作气体为 P-10, 工作气压为 101.325kPa.

不同显影液, 显影条件(如温度, 时间)对胶片感光特性有很大的影响. 其中总的背景密度随显影温度及时间变化的测试结果如图 3 所示. 横轴代表不同显影时间和温度, 纵轴表示胶片未曝光的背景光学密度. 为了减少测量误差, 根据测得的结果选择如下的胶片处理条件: 显影液按产品说明书要求选择 D72、显影温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、曝光后的胶片先在水中浸泡 3min, 然后显影 7min、在水中显影停止 1min、定影时间为 7min、最后在水中冲洗 20min, 自然阴干. 处理后的胶片光学密度是在 Level-Jovel MP-Ⅱ型显微密度计扫描测得的, 物镜数值孔径为 0.25. 测量时, 取放不透明黑纸时的透过率为 0%, 胶片不曝光部分透过率为 100%. 仪器误差为 ± 0.01 密度单位.

3 结果及讨论^{6,11}

实验中对 109~7469eV(对应波长 11.4~0.179nm)软 X 射线和超软 X 射线区域中的感兴趣的 5 个光子能量点进行了测定, 图 4 和图 5 分别用线性和对数坐标给出了 $\text{Be}_{K\alpha}$, $\text{C}_{K\alpha}$, $\text{Al}_{K\alpha}$, $\text{Cu}_{K\alpha}$, $\text{Ni}_{L\alpha}$ 对应的五条特性曲线. 图中符号代表实验数据点. 图 4, 5 中虽然高 H 端出现饱和, 但光学密度已相当大. 此结果与其它软 X 射线胶片相似^{3~5}, 说明这种胶片对软 X 射线有较高的灵敏度.

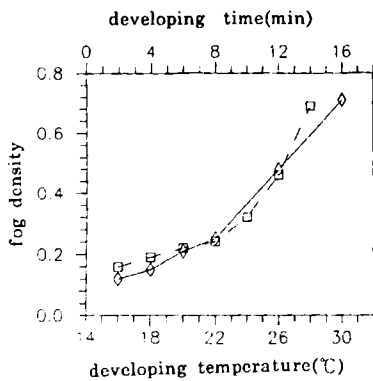


图 3 不同显影时间和温度下的灰雾密度(包括背景密度)

Fig. 3 Total fog and background density for different developing time and temperature. \diamond temperature ($^{\circ}\text{C}$), \square time(min)

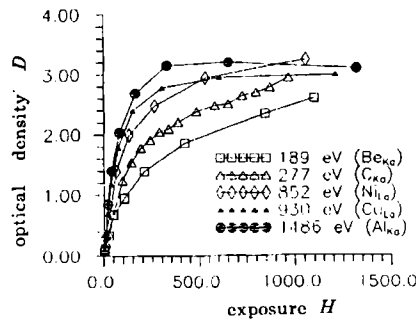


图 4 实验测得的胶片特性曲线

Fig. 4 Measurements of characteristic curves of the film

图 4 结果可见, 在线性坐标中, 光学密度在 $D=0.3\sim 0.9$ 的区域内, 胶片黑度与曝光量成正比线性的关系, 并且斜率随着波长的增大而减小. 这主要是由于胶片明胶部分地吸收了落入其中的光子引起的. 图 5 结果可见, 在对数坐标中, 光学密度在 $D=0.6\sim 2.5$ 的区域内, 胶片黑度与曝光量的对数 $\log H$ 成线性变化关系. 线性区斜率随波长的变化不明显. 这是因为此时胶片明胶全部吸收投射其中的 X 射线光子的缘故. 结果表明, 对于不同波长, 胶片响应特性的线性范围及斜率不同. 这反映了胶片响应特性随波长和胶片自身结构的依赖关系.

由于所标定的胶片的结构参数未知, 与文献中的标定结果进行了比较^{3~5,10}, 说明在软 X 射线波段区域具有相似的响应特性, 但是差别也很大, 其可能的原因: ①胶片结构的差异; ②胶片的冲洗条件不同; ③曝光条件不同. 作者认为胶片结构不同是影响胶片响应特性差异的主要原因.

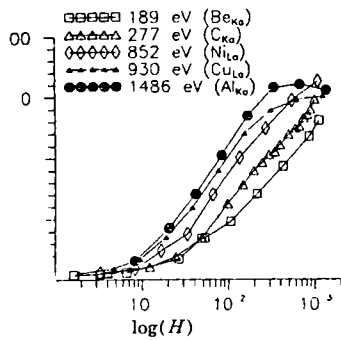


图 5 实验测得的胶片特性曲线,横坐标为曝光量取对数
Fig. 5 Measurements of characteristic curves of the film

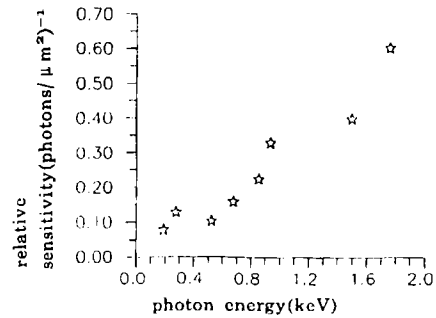


图 6 在 0~2.0keV 区域测得的胶片相对光谱灵敏度,星号为数据点
Fig. 6 The relative spectral sensitivity of the film

图 6 还给出了这种胶片在 0.109~1.739keV(对应波长 0.731~11.4nm)光子能量范围内的相对光谱灵敏度曲线,是用对应不同波长的 X 射线获得到 1.0 的标准散射密度所需曝光量的倒数关系来表现的.从图中可见曲线的几个特点,这可能是因为胶片成分对 X 射线吸收和传输不同所致.在光子能量 0.277keV(波长 4.47nm)处,由于胶片明胶主要成分为 C,增加了对 C 线的吸收,从而使其传输灵敏度提高,出现光子能量 0.277keV(4.47nm 波长)处的响应高于 0.5keV 响应的反常现象.在这之后,随着光子能量的增加光子在明胶中吸收和传输效率也不断提高,则胶片的灵敏度也随之增加,即恢复正常状态.到了溴的 L 边(1.55~1.78keV)灵敏度曲线无反常现象.因为在这一区域内,乳胶是完全吸收的.在大于 2.0keV 之后,灵敏度将随着光子能量的增加而减少,这是因为卤化银传输,吸收边作用不明显的缘故.在 2.0keV 以后的结果图中没有给出,只是预测的.根据 Henke 的胶片响应理论,^{9,10}除了吸收边附近的响应特性随光子能量出现明显的跳跃外,在其它光子能量区域只是缓慢有规律的变化.我们的标定结果与此相一致.

影响标定结果准确度的因素有:曝光强度确定、胶片光学密度测量、有限实验数据点以及随机误差.确定曝光强度的误差来源于光源自身的测量系统误差、光源的单色性、光强的稳定性和均匀性、测量的随机误差、阶梯膜及挡光膜的不均匀性、以及阶梯膜各层的透过率测量误差、时间测量误差.实验过程中监测光强的稳定性,稳定度低于 17%,高能区低于 10%.用胶片的线性响应区测量,黑度扫描表明光强不均匀度和膜片不均匀度均小于 2%.分析表明,这些因素造成的强度测量相对误差低于 25%.胶片黑度测量误差产生于光源不均匀、阶梯膜及挡光膜不均匀、以及胶片保管与胶片自身由于划痕而造成的黑度涨落.黑度测量的误差低于 5%.

综上误差分析,标定结果的总的相对误差不超过 30%.标定结果与计算结果相一致¹¹.

4 结论

利用光谱扩展的荧光型软 X 射线单色仪作为标定光源,提出了一种标定 X 光响应胶片的新方法.作者首次标定了某航空胶片在软 X 射线和超软 X 射线区域的响应特性.这种胶片已用于我室激光打靶和软 X 射线皮秒条纹及分幅相机的研究中,标定结果也已用于实验数据处理.提高光源的稳定性和负载,可获得单色性更高,稳定性更佳,均匀性更好的标定光源.从而可进一步提高胶片标定的精度.

作者对西安光机所有老同志在实验上给予的大力协助表示衷心的感谢.对与上海光机所范品忠、林尊棋、王晓方等同志的有益讨论表示感谢.对我的导师姚熹院士的指导表示感谢.

参考文献

- 1 Matthews D L, et al. Appl Phys Lett, 1982, 10, 951
- 2 Henke B L, Yamada H T, Tanaka T J. Rev Sci Instrum, 1983, 54: 1311~1330

- 3 Koppei L N. X-ray Calibration of Film Types SB-5 and RAR2492 in the 1.5~8keV Region, 1982, ARACOR Document No TR-112-08-02
- 4 Rockett P D. et al. *Applied Optics*, 1985, 24(16), 1536~1537
- 5 Armistead R A. *Rev Sci Instrum*, 1974, 45(8), 996~997
- 6 赵青春等. 航空胶片的X射线标定, 中国光学学会第四届全国青年光学工作者学术报告会论文集, 广州, 1991:197
- 7 雷志远等. 用于高速摄影变像管的软X射线光电阴极特性研究, 第二届全国光电器件学术交流会, 西安, 1985
- 8 雷志远等. 透软X射线衬底薄膜和软X射线滤膜, 第二届全国惯性约束核聚变会议文集, 第四册, 厦门, 1987
- 9 Henke B L. et al. Low-energy X-ray response of photographic films I. Mathematical models. *J Opt Soc Am*, (B), 1984, 1, (6), 818
- 10 Henke B L, et al. Low-energy X-ray response of photographic films II. Experimental characterization. *J Opt Soc Am*, (B), 1984, 1(6):828~829
- 11 Zhao Qingchun, et al. X-ray calibration of film and application of Monte-Carlo Method. submitted to *J Appl Phys*.

X-RAY CALIBRATION OF AERIAL FILM

Zhao Qingchun

Xi'an Jiaotong University, Electronic Materials Research Laboratory, Xi'an 710049

Zhang Xiaoqiu, Lei Zhiyuan, Liu Xiuqin, Gong Meixia, Chang Zenghu, Hou Xun

Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an 710068

Received date: 1995-11-13

Abstract Many X-ray monochromatic radiations of fluorescent type monochromatic soft X-ray source of wider radiation are used. As an application of such X-ray source, new methods are described for calibration of photographic film by time increment and intensity increment. The characteristic curves (the response of film density versus relative exposure) and the relative spectral sensitivity of the film are showed. Based on this method, the film is calibrated for the first time in the soft X-ray and supersoft X-ray region.

Keywords Aerial film; X-ray; Calibration

Zhao Qingchun was born on December 24, 1964, in Heilongjiang Province, China. He received the B. S. degree in Optronics from Beijing Institute of Technology in 1987, the M. S. degree in electronic physics from the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica in 1990 and the Ph. D. degree in electronic materials & devices from Xi'an Jiaotong University in 1995. From 1990 to 1992 he worked as an assistant professor in the department of Physics, Xi'an Jiaotong University. His research activities include the preparation of the nanocomposite and semiconductor materials for optoelectronic application, nonlinear optical and/or ultrafast phenomena, semiconductor laser, application of short pulse, and photonic and optoelectronic devices. He has published or presented over 30 technical papers. Currently he is a postdoctoral fellow of Centre for Electrophotonic Materials and Devices, McMaster University, Canada.

