

光栅衍射效率与闪光光谱仪的输出

梁 培

(西安应用光学研究所, 陕西长安)

提 要

闪光光谱仪应用电荷耦合器件和数字化技术, 可以获取瞬间光源的光谱能量分布。文中通过对闪光光谱仪能量关系的分析, 结合 $0.36\mu\text{m}\sim 1.0\mu\text{m}$ 区域的脉冲氙灯光谱曲线实例, 阐述了光栅相对衍射效率对闪光光谱仪输出的影响。

关键词: 闪光光谱仪, 光栅衍射效率。

在光谱仪器的设计中, 根据工作区域预先选定了闪耀波长的正常规格光栅, 它的相对衍射效率可以很好地满足使用要求。当仪器需要使用在较宽的波长范围内, 一块光栅不能满足时, 可以采用多块光栅替换的办法使问题得到解决。任何光学元件都不可能是完全线性的。对于有定量分析要求的摄谱仪和分光光度计, 可以采用对比的方法来摆脱或减少元器件非线性对最终分析结果的影响。闪光光谱仪的设计要求是在瞬时获取待测光源在规定工作区的光谱全貌, 光栅的相对衍射效率对最后输出结果的能量比例准确性影响很大。

一、能量关系式

闪光光谱仪主要用来测定瞬态光源的光谱成分, 给出具有一定能量比例精度的相对光

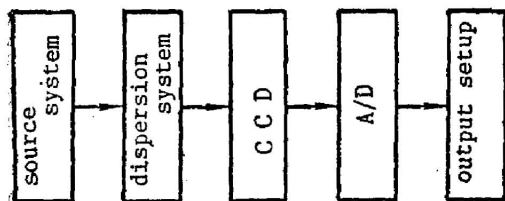


Fig. 1 Block diagram of the flash spectrograph

谱曲线。我们制作的闪光光谱仪使用 $1501/\text{mm}$ 刻线的平面闪耀光栅作色散元件, 接收器采用线阵电荷耦合器件。其简要原理如图 1 所示。

对电荷耦合器件起作用的应是辐照度。光源的辐射经色散系统后射到电荷耦合器件面上的照度 E 可以表示为^[1]

$$E = \tau B \Delta\lambda \frac{s'}{f_2^2} \cos \sigma, \quad (1)$$

式中 τ 为系统总透过率, B 为光源的辐亮度, $\Delta\lambda$ 为连续光谱中与 E 相关的一段光谱元的宽度, s' 是色散元件的出射有效光束断面, f_2 为成像物镜的焦距, σ 为照度 E 所在的光谱焦面与成像镜高斯焦面的倾斜角度。这些参量多半为波长 λ 的函数。为了看清楚波长的作用, 将(1)式改写为

$$E(\lambda) = C_1(\lambda)\tau(\lambda)B(\lambda), \quad (2)$$

式中

$$C_1(\lambda) = \Delta\lambda(s'/f_2^2)\cos\sigma,$$

由光路设计和使用条件所决定。总透过率 $\tau(\lambda)$ 中包含了光栅的相对衍射效率和其它光学元件对入射辐射能的影响。将总透过率 $\tau(\lambda)$ 表示为

$$\tau(\lambda) = \tau'(\lambda)R_G(\lambda), \quad (3)$$

式中 $R_G(\lambda)$ 为光栅的相对衍射效率, $\tau'(\lambda)$ 为除了 $R_G(\lambda)$ 外其余光学元件的透过率。

电荷耦合器件的视频信号 $V_s(\lambda)$ 既与投射到其工作单元上的辐照度 $E(\lambda)$ 有关, 也与电荷耦合器件自身的光谱响应 $R_C(\lambda)$ 有关。 $V_s(\lambda)$ 可以写成

$$V_s(\lambda) = C_2 R_C(\lambda) E(\lambda), \quad (4)$$

式中 C_2 的意义为除光谱响应 $R_C(\lambda)$ 外, 整个电荷耦合器件工作电路的光电转换放大率。 C_2 不总是恒量, 它本身又可以是入射辐照度 $E(\lambda)$ 的函数。为了使 C_2 摆脱 $E(\lambda)$ 的影响, 使 $V_s(\lambda)$ 在确定的 λ 处只是 $E(\lambda)$ 的函数, 应该使电荷耦合器件工作在线性区, 此时 C_2 是常量。将(2)式、(3)式代入(4)式并令 $C(\lambda) = C_1(\lambda)C_2\tau'(\lambda)$, 则(4)式可写成

$$V_s(\lambda) = C(\lambda)R_C(\lambda)R_G(\lambda)B(\lambda), \quad (5)$$

(5)式为使用光栅作色散元件、电荷耦合器件作光电转换器件的光谱仪器的能量关系式。闪光光谱仪采用了垂直对称结构的光栅色散光路, 又是超小色散仪器, 实际光路中可近似认为 $\cos\sigma=1$, f_2 、 S' 和 $\Delta\lambda$ 也可认为是对各波长都一样的量, 则 $C_1(\lambda)$ 与波长关系不大。且全部使用表面镀铝的反射元件, 在关心的 $0.36\mu\text{m}\sim 1.0\mu\text{m}$ 工作区域中, $\tau'(\lambda)$ 随波长 λ 的变化也不明显。在定性地讨论闪光光谱仪的能量关系时, 比如在初始阶段的设计工作中, 可以使用

$$V_s(\lambda) = CR_C(\lambda)R_G(\lambda)B(\lambda). \quad (6)$$

这样, 在不致影响结果的性质时可以更清楚地看出 $R_C(\lambda)$ 和 $R_G(\lambda)$ 对输出的作用。

二、设计中对光栅相对衍射效率的考虑

闪光光谱仪的使用要求和结构特点使得它无法采用对比输出的办法消除非线性影响, 由于一次性获取闪光光源在宽光谱工作区间能量分布的设计要求, 使它不能象波长扫描仪器那样通过更换光栅来分段得到光谱结果, 所以闪光光谱仪必须对所使用的光栅的相对衍射效率给予充分考虑。

对于刻划角不大的光栅, 如果相对于一级闪耀波长 λ_0 的衍射光强为 I_0 , 在波长 λ 处的光强为 I , 一级衍射强度按波长 λ 分布的理论值为^[2]

$$\frac{I}{I_0} = \left\{ \frac{\sin \pi [1 - (\lambda_0/\lambda)]}{\pi [1 - (\lambda_0/\lambda)]} \right\}^2. \quad (7)$$

现在的光栅刻划技术可以使光栅实际的衍射效率与理论强度分布相当完满地吻合。闪光光谱仪设计使用的光栅规格比较特殊为 150l/mm 刻线, 基本使用在可见光区域。很小的闪耀角(约 2° 多)使得光栅刻划时中心波长难以控制准确, 厂家有时只给出一个参考范围。在讨论光栅衍射效率随波长的变化对焦面照度以及对视频输出的影响时, 重要的不是光栅实际相对衍射效率对理论值的偏离, 而是在整个工作区域中随波长变化的相对程度。因此, 可

以将各个光栅的衍射效率归一化后进行讨论, 归一化的因子可以合并到(6)式中的系数 C 中。图 2 给出三块 1501/mm 工作在 I 级的光栅实测相对衍射效率曲线, 分别将这三块光栅称为 $G(a)$ 、 $G(b)$ 和 $G(c)$ 。图中的纵坐标是归一化后的相对值。

从(6)式看, 影响 $V_s(\lambda)$ 的是 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$, 只要乘积 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$ 确定了, 对于确定的光源, 其视频输出 $V_s(\lambda)$ 也就确定了。不同的 $R_c(\lambda)$ 和 $R_g(\lambda)$ 可以在工作区间组成不同波长特性的 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$ 。为了讨论不同的光栅相对衍射效率对视频输出 $V_s(\lambda)$ 的影响, 可以在(6)式中给 $R_c(\lambda)$ 赋以确定的值, 相当于实际工作中确定了某一个电荷耦合器件接收器后换用不同的光栅进行比较。目前市售的电荷耦合

器件有多种型号, 但对于在可见光区作光电转换用的电荷耦合器件, 其光谱响应 $R_c(\lambda)$ 的峰值多在 $0.7 \mu\text{m}$ 左右, 这是由电荷耦合器件的感光材料和覆盖层所决定的。图 3 为某种型号线阵电荷耦合器件的实测光谱响应曲线。如同图 2 一样, 图 3 中纵轴给出的也是归一化后的相对值。将图 3 中的 $R_c(\lambda)$ 与图 2 中给出的三种光栅的 $R_g(\lambda)$ 分别相乘, 再将乘积 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$ 分别归一化后绘于图 4。 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$ 的意义为仪器的光谱响应, 它决定了光谱仪器的使用性能。对于同样的工作区间, 光谱分布不同的光源会对 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$ 有不同的要求。一般来讲, 应选用这样的 $R_c(\lambda)$, 使其乘积 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$ 有效地覆盖工作区间, 相对值大, 变化平缓。闪光光谱仪主要用来测试脉冲氙灯的光谱分布。图 5 为分别换用光栅 $G(a)$ 、 $G(b)$ 和 $G(c)$ 时对同一脉冲氙灯所得的电荷耦合器件视频输出。光栅相对衍射效率的差异通过 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$ 乘积引起了图 5(a)、图 5(b) 和图 5(c) 中不同的视频输出。图 4 中三条 $R_c(\lambda)R_g(\lambda)$ 函数曲线都随波长变化, 因此可据此判断, 图 5(a)、图 5(b) 和图 5(c) 的三种输出都偏离了该氙灯真实的光谱能量分布。图 4 中三条曲线的区别主要在 $0.65 \mu\text{m}$ 以前的短波区。其中的 $R_c(\lambda)R_{Ga}(\lambda)$ 在这一区域里变化平缓, 相对数值较大; $R_c(\lambda)R_{Gc}(\lambda)$ 在 $0.5 \mu\text{m}$ 以前短波区的数值几乎为零, 从 $0.55 \mu\text{m}$ 开始随波长的增加而急剧上升, 到 $0.65 \mu\text{m}$ 处达

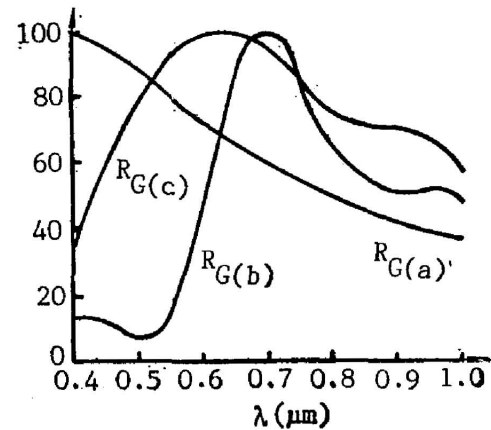


Fig. 2 Relative efficiency curves of 1501/mm grating

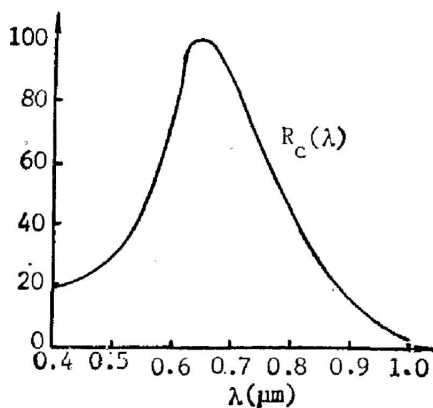


Fig. 3 Spectral response of a sort of CCD

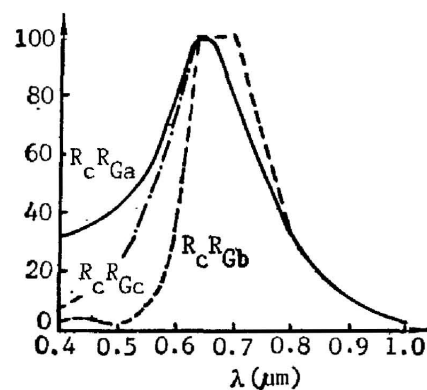


Fig. 4 The product of $R_c(\lambda)$ and $R_g(\lambda)$

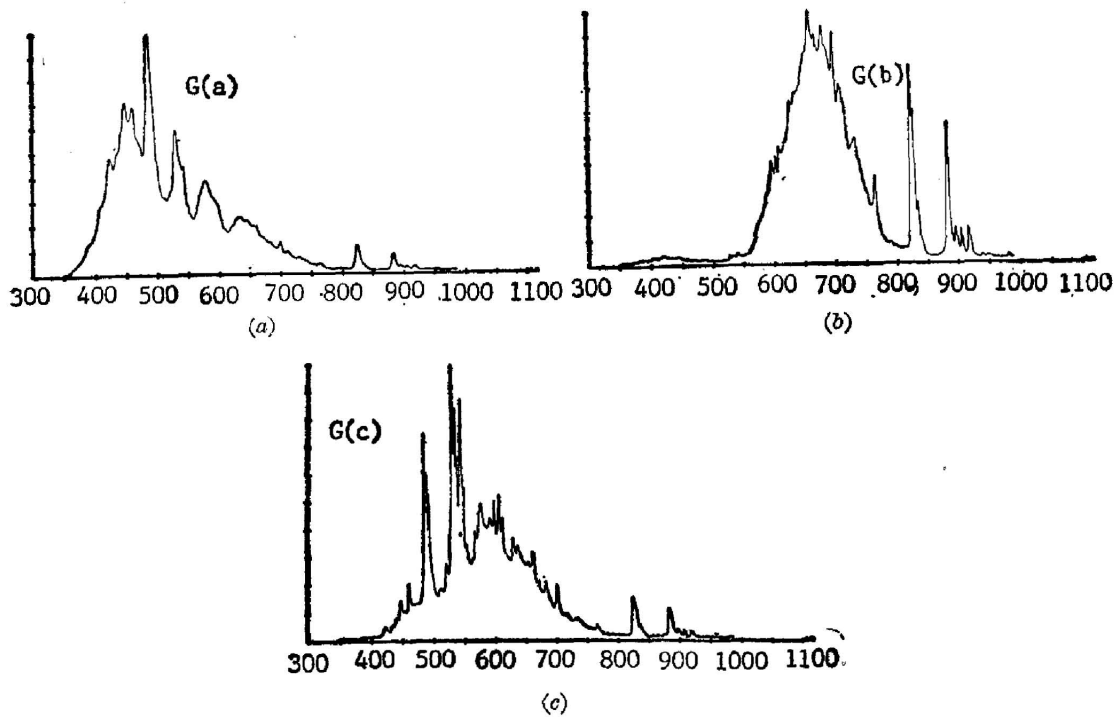


Fig. 5 Video output of a flash xenon lamp

(a) by grating $G(a)$; (b) by grating $G(b)$; (c) by grating $G(c)$

最大值; $R_c(\lambda)R_{G_o}(\lambda)$ 在这一区域内的数值比 $R_c(\lambda)R_G(\lambda)$ 的偏低些。图5中三种视频输出在 $0.65 \mu\text{m}$ 以前的上述区域内的行为与图4中各自的 $R_c(\lambda)R_G(\lambda)$ 相对值变化是相仿的。随着波长的增加,图4中三条曲线在 $0.65 \mu\text{m}$ 以后的变化趋于一致, $0.75 \mu\text{m}$ 以后基本上汇合在一起了;尽管幅度不同,图5中三种视频输出在这一区域内的比例确实是相同的。

利用 $R_c(\lambda)R_G(\lambda)$ 乘积曲线可以对不同的光栅和电荷耦合器件组合所产生的影响进行估计和分析,从而给光谱仪的设计带来了便利。从工作区间考虑,闪光光谱仪选用了光栅 $G(a)$ 作为色散元件。

三、原始输出的系统修正

闪光光谱仪的原始输出指的经过数字化技术量化后的电荷耦合器件的视频输出。图5中,同一脉冲氙灯由于光栅的相对效率不同而得出了不同的电荷耦合器件输出。为能给出正确的光谱结果,使光谱仪的最后输出具有一定的相对能量精度,必须对视频输出进行修正。

引入函数 $K(\lambda)$,使它与视频输出 $V_s(\lambda)$ 的乘积能与光源辐射的光谱能量成正比,即是说令

$$K(\lambda)V_s(\lambda) = C_s B(\lambda), \quad (8)$$

式中 C_s 为比例常数。将(6)式代入(8)式可得到

$$K(\lambda) = C'/R_c(\lambda)R_G(\lambda), \quad (9)$$

式中 $C' = (C_s/C)$, C' 在求相对能量比时并不重要。如认为 C' 与波长无关,(9)式中的 $K(\lambda)$

其实就相当于前面讨论过的光谱仪光谱响应函数的倒数。在设计工作阶段定性分析光谱仪工作性能时,用乘积 $R_c(\lambda)R_G(\lambda)$ 是较为方便的,但要对视频输出进行修正时,应当准确地测定 $K(\lambda)$ 的分布值。为此,在最后输出的修正时应当使用(5)式,(5)式中的 $O(\lambda)$ 使得 O' 不再能简单地当作求相对值时的比例系数而予以忽略。除了讨论过的一些外, $O(\lambda)$ 中还包含了许多未曾涉及的因素。如电荷耦合器件方程(4)式中的 O_2 ,即使使用在线性区也存在着单元间灵敏度的不均匀,光谱响应的差异和转移效率等,甚至可能出现由于晶体缺陷引起的信号畸变。就是作为实测得出的 $R_c(\lambda)$ 和 $R_G(\lambda)$,当要满足系统修正要求时,可能会对它们的测试精度提出很高的要求。(9)式提示了修正函数与 $R_c(\lambda)R_G(\lambda)$ 乘积的关系,但不能用它来准确求出 $K(\lambda)$ 。比较实用的办法是避开众多的中间环节,从整个系统考虑直接由(8)式得出所需的 $K(\lambda)$

$$K(\lambda) = C_3 B(\lambda) / V_s(\lambda) \quad (10)$$

根据(4)式和(2)式,电荷耦合器件工作在线性区时的 $V_s(\lambda)$ 与 $B(\lambda)$ 成正比,所以 $K(\lambda)$ 与 $B(\lambda)$ 无关。只要给定 $B(\lambda)$,就可以用(10)式定出 $K(\lambda)$ 。为避免 $K(\lambda)$ 出现奇点,应当选择工作区域中光谱能量分布连续、光滑的光源,如标定过的钨带灯。图6为使用上述几块光栅时仪器对钨带灯的视频输出 $V_{ST}(\lambda)$ 。图7为该钨带灯的相对光谱辐亮度 $B_T(\lambda)$ 。此时(10)式写为

$$K(\lambda) = C_3 B_T(\lambda) / V_{ST}(\lambda) \quad (11)$$

这样,经修正后闪光光谱仪的最后输出 $V(\lambda)$ 为

$$V(\lambda) = K(\lambda) V_s(\lambda) = \frac{C_3 B_T(\lambda)}{V_{ST}(\lambda)} V_s(\lambda) \quad (12)$$

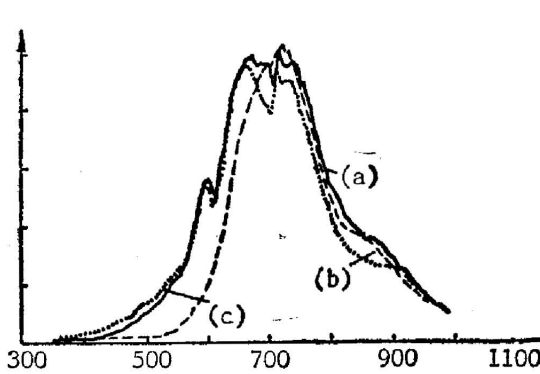


Fig. 6 Video output $V_{ST}(\lambda)$ of a tungsten-tape lamp
(a) by grating $G(a)$; (b) by grating $G(b)$;
(c) by grating $G(c)$

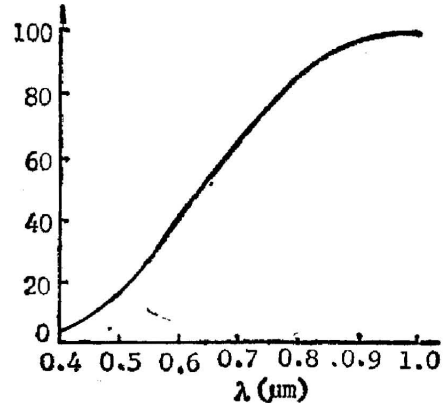


Fig. 7 The tungsten-tape lamp's spectral
brilliance $B_T(\lambda)$

四、光栅的相对衍射效率对闪光光谱仪输出的影响

光栅的相对衍射效率影响电荷耦合器件的视频输出,进而对光谱仪的最后输出产生影响。

前面在设计考虑时谈过光栅对一种脉冲氙灯的影响。由于钨带灯光能输出的稳定和光谱分布的连续、平滑,从图6中的三种不同输出可以更清楚地看出光栅相对衍射效率的影

响。图 6(a) 中 $V_{ST}(\lambda)$ 在 $0.65 \mu\text{m}$ 前的短波区与图 7 的 $B_T(\lambda)$ 比例接近; 图 6(b) 的在 $0.5 \mu\text{m}$ 前短波区的输出近于零; 图 6(c) 与图 6(a) 相似, 只是在 $0.45 \mu\text{m}$ 左右的响应低些。三种 $B_T(\lambda)$ 的视频输出在 $0.75 \mu\text{m}$ 以后的长波区形状相近。选择光栅 $G(a)$ 会使系统修正工作进行得较为顺利。这些结论与图 4 给出的 $R_C(\lambda)R_G(\lambda)$ 相应曲线一致。由于综合了电荷耦合器件光谱响应的作用, 利用图 4 可以更直接看出光栅对视频输出的影响, 可以进一步用 (5) 式验证 $R_C(\lambda)$ 和 $R_G(\lambda)$ 在闪光光谱仪视频输出中所起作用的程度。忽略 (5) 式中的 $O(\lambda)$ 时, $R_C(\lambda)R_G(\lambda)$ 乘积再与 $B(\lambda)$ 相乘的结果应该和 $V_S(\lambda)$ 的比例相同。利用图 4 和图 7 所给的结果进行计算并归一化后和图 6 的 $V_{ST}(\lambda)$ 分别对照, 可以发现它们之间符合得不错。这种符合一方面说明 $B_C(\lambda)$ 和 $R_G(\lambda)$ 的测值可信, 另一方面则说明了闪光光谱仪中的 $O(\lambda)$ 确实近似线性, 对视频输出影响最大的是 $R_C(\lambda)$ 和 $R_G(\lambda)$ 。我们难以随意选择和改变

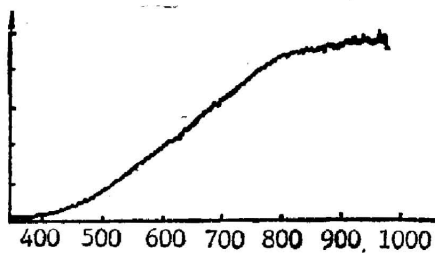


Fig. 8 The corrected tungsten-tape lamp spectral curve

电荷耦合器件的光谱响应, 但可以根据不同的设计要求通过闪耀角和其它刻划技术来获取合用的衍射光栅。

从 (12) 式看, $K(\lambda)$ 是视频信号的修正因子, $V_S(\lambda)$ 与 $K(\lambda)$ 的乘积作为光谱仪的最后输出。对不同的 $V_S(\lambda)$, $K(\lambda)$ 数值的大小会对最后输出产生不同的影响。由 (10) 式中求出的 $K(\lambda)$ 可以预先用较高的精度加以确定, 它的量化误差相比 $V_S(\lambda)$ 可以忽略。

$V_S(\lambda)$ 是闪光光谱仪即时转化的待测光源的视频输出, 数字化后可能有绝对误差 1。相对误差 $1/V_S(\lambda)$ 。据 (12) 式, 经修正后的最后输出 $V(\lambda)$ 会产生数值上相当于 $K(\lambda)$ 的绝对误差。当因仪器在某一波段的光谱响应太低而使得 $V_{ST}(\lambda)$ 值偏低时, 会产生较大的 $K(\lambda)$, 给修正值 $V(\lambda)$ 带来不良影响。对光谱分布平滑的光源的测试如不采用曲线弥合措施, 大的 $K(\lambda)$ 会使最后输出由于绝对误差大而呈现发散状。图 8 为修正后光栅 $G(a)$ 的钨带灯光谱曲线, 比例正确, 但 $0.8 \mu\text{m}$ 以后的长波区由于光栅衍射效率低而使曲线发散。对于带有线光谱的脉冲光源, 由于难以采用弥合措施, 大的 $K(\lambda)$ 会使最后修正值比例失真。当 $V_S(\lambda)$ 值接近量化误差时, 大的相对误差使修正后的比例失真, 甚至会丢失信号或产生假信号。图 5 中 $G(b)$ 的视频输出在短波区难以修正。

五、结 语

结合电荷耦合器件和数字化技术, 光栅的相对衍射效率决定了闪光光谱仪的工作性能。不同的闪耀波长的光栅使仪器在不同的波段获得良好的输出。光栅相对衍射效率和电荷耦合器件光谱响应的乘积可以用来分析光谱仪的工作能力, 从而给设计工作带来帮助。光栅衍射效率的影响连同仪器其它随波长变化的因素在内, 可以用系统修正的办法加以校正。系统修正方法可以避免众多中间环节带来的麻烦, 诸如光栅和电荷耦合器件性能的精确测定、各工作镜面以及滤光片的影响等。系统修正方法对仪器的光谱响应有一定的要求, 大的修正因子会给修正带来不良影响。为能在宽波段范围内有效地工作, 可以利用光栅衍射效率长波方向向下降缓慢的特性, 如图 2 中光栅 $G(a)$ 的曲线所示。图 9 为用系统修正方法对图

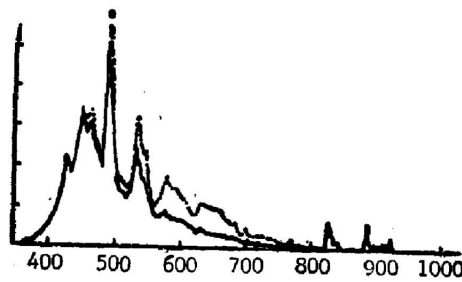


Fig. 9 The corrected result of the video output in Fig. 5 (a), the solid for corrected value

5(a)的视频输出修正的结果。

进一步提高闪光光谱仪的工作性能,应当选择更适合仪器使用要求的光栅,数字化的位数的选择应考虑电荷耦合器件动态比和输出精度要求。可以改变数字化技术的比较电压以适应不同波段修正精度的要求,但不应与一次获取光谱全貌相背离。当电荷耦合器件传送速率较低时可用程控数字化技术提高量化精度,但长积分时间会增加背景噪声,也损失了电荷耦合器件应有的时间分辨率。时间分辨率和空间分辨率,工作区间和能量精度,这些矛盾同时存在于闪光光谱仪这一矛盾同一体中。

本文得到李硕中和贾福熙的指导和帮助,谨在此致以谢意。

参 考 文 献

- [1] 吴国安;《光谱仪器设计》, (科学出版社,北京,1978), 6。
 [2] И. В. Пейсахсон; «Оптика спектральных приборов», (Машиностроение, Ленинград, 1970), 52.

Grating relative diffraction efficiency and the output of flash spectrograph

LIANG PEI

(Xi'an Institute of Applied Optics, Chang'an, Shanxi)

(Received 21 March 1988; revised 10 July 1989)

Abstract

By means of CCD and A/D, flash spectrograph can be used to obtain spectral energy distribution of an instantaneous illuminant. Through the analysis for the energy relation of flash spectrograph, it is expounded in this article that how the output of flash spectrograph is affected by the relative diffraction efficiency of grating, with examples of flash xenon lamp spectra in the wavelength range from $0.36\mu\text{m}$ to $10\mu\text{m}$.

Key words: flash spectrograph; grating relative diffraction efficiency.