

光谱仪器设计

吴国安 著

内 容 简 介

本书全面和系统地阐述了光学光谱区应用的光谱仪器设计的基本理论和主要技术问题。同时也介绍了光谱仪器使用和保养方面的知识。

全书共分十五章。前九章为光谱仪器设计的基本理论。第十章至第十三章分析了各种类型的光谱仪器(包括看谱仪、摄谱仪、光电直读光谱仪、单色仪和分光光度计等)的基本特性,并阐述了“光机电”等有关方面的设计要点。第十四章介绍了光谱仪器的新原理——干涉调制光谱仪。第十五章介绍了光谱仪器使用和保养的一般性知识。

本书可供光谱仪器设计、制造和测试工人与技术人员,光谱学和光谱分析工人和技术人员以及高等院校有关专业的教师和学员阅读参考。

光 谱 仪 器 设 计

吴 国 安 著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1978年11月第一次印刷 印张:31 插页:2

印数:0001—12,100 字数:716,000

统一书号:15031·194

本社书号:1168·15—3

定 价: 3.90 元

前 言

光谱仪器是精密机械和光学仪器中一个重要组成部分;同时,它又是光谱学和光谱技术中最基本的测试设备。近二十多年以来,光谱仪器得到了迅速的发展,成了“光机电”三结合的精密仪器电子技术,特别是电子计算技术和六十年代成长的激光技术,不仅武装了光谱仪器(如光量计、赖曼分光光度计等),而且促使了新原理的干涉调制光谱和可调谐激光器的出现和发展。(由于任务和篇幅的限制,本书将不讨论可调谐激光光谱仪。)

解放后,我国光谱仪器从无到有、从小到大获得了很快的发展。特别是无产阶级文化大革命以来,光谱仪器制造工业迅速形成了一定的生产能力,光谱仪器也广泛地应用于国民经济和国防建设的各重要部门。

虽然光谱仪器早已越出了实验室应用的范畴,然而到目前为止,国内外尚无从光谱仪器设计和制造的角度来全面系统地阐述光谱仪器设计原理、测试方法和装调技术的书籍。现有这方面的书籍,绝大多数是从实验物理学、光谱学和光谱分析的角度来叙述光谱仪器的,因而不可能涉及或很少涉及到光谱仪器设计中的各种主要技术问题。

近几年来,在国外出现了一些介绍光谱仪器的书籍,其中有两本较有参考价值。一本是 J. F. James 和 R. S. Sternberg 合著的《The Design of optical spectrometers》(光学分光计的设计,1969年)。另一本是 И. В. Пейсахсон 著的《Оптика спектральных приборов》(光谱仪器的光学,1970年)。前者主要介绍光电光谱仪器的设计理论,它不仅没有讨论光谱仪器的测试和装调,且对工业中广泛应用的光电直读光谱仪也很少提及。后者虽然对光谱仪器的光学设计作了较详细的阐明,但它根本没有叙述光谱仪器的机电部分,当然更涉及不到光谱仪器的测试和装调了。因而这两本书对于研究和设计光谱仪具有相当的局限性。

鉴于上述情况,作者在编写本书时,力求从设计和制造者的角度,全面系统地阐述光谱仪器设计、测试、装调和使用中的各方面的理论问题和实际问题。全书共分十五章。前九章为光谱仪器设计的基本理论。第十章至第十三章分析了各种类型的光谱仪器(包括看谱仪、摄谱仪、光电直读光谱仪、单色仪和分光光度计等)的基本特性,并阐述了“光机电”等有关方面的设计要点。第十四章介绍了光谱仪器的新原理——干涉调制光谱仪。第十五章介绍了光谱仪器使用和保养的一般性知识。

为了保证阐明主要问题时的完整性和连贯性,本书中存在着某些局部的重复。另外,作者虽然力求本书中采用的概念、名称和符号的一致性,但是,由于它们在实际工作中本来就存在着一定的矛盾,便不可能不在书中有所反映(此处所指的主要是符号问题)。

本书得以完成,是和各级领导同志的支持以及有关工厂和研究单位的工人、技术人员的帮助分不开的。特别是王大珩同志在写作过程中的支持和指导;中国科学院长春应用化学研究所黄本立同志的宝贵建议和支持;上海光学仪器厂、上海光学仪器研究室、赤天光学仪器厂、新添光学仪器厂、北京光学仪器厂和北京第二光学仪器厂等单位的有关同志的支持和提供资料;赤天光学仪器厂柏汉祥同志对本书第五章提出了一些好建议;在本书

整理定稿过程中,朱良富和江振东同志花了不少精力,等等。对于上述来自各方面的帮助,作者在此一并致谢。

本书匆促写成,又限于作者的水平,书中难免有缺点、遗漏或错误之处,希望读者批评指正,以便及时修改。

吴 国 安
一九七三年十二月

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 光谱仪器	(1)
§ 1-2 光谱仪器特性	(2)
工作光谱区 (2) 色散率 (3) 分辨率 (4) 光强 (5) 工作效率 (7)	
§ 1-3 光谱仪器的分类	(8)
§ 1-4 光谱仪器发展史概述	(9)
光谱仪器的形成阶段 (10) 光谱仪器作为实验室研究工具的阶段 (11) 光谱仪器 在工业中应用的阶段即光谱仪器制造工业的形成和发展阶段 (13) 光谱仪器实行 光电化、自动化和发展新原理的阶段 (15)	
§ 1-5 光谱仪器的应用	(17)
光谱仪器在重工业中的应用 (18) 光谱仪器在轻工业和农业中的应用 (18) 光谱 仪器在生物学和医学中的应用 (19) 光谱仪器在物理学和化学中的应用 (19) 光 谱仪器在天文学和空间物理学中的应用 (20)	
参考文献	(20)
第二章 光谱和光谱技术	(21)
§ 2-1 光谱	(21)
定义 (21) 特性 (21) 测量单位 (22)	
§ 2-2 光谱与物质结构	(23)
§ 2-3 光谱的激发	(29)
§ 2-4 光的吸收定律	(32)
§ 2-5 谱线增宽效应	(34)
不同粒子的碰撞效应 (34) 同种粒子的碰撞效应 (35) 电场的作用——斯特克效 应 (35) 磁场的作用——塞曼效应 (37) 热运动作用——多普勒效应 (37) 未 激发原子的吸收作用——谱线自蚀效应 (38)	
§ 2-6 光谱分析	(39)
发射光谱分析 (39) 吸收光谱分析 (40) 赖曼光谱分析 (40) 荧光光谱分析 (41) 原子吸收光谱分析 (42)	
参考文献	(42)
第三章 光谱仪器的配用光源	(43)
§ 3-1 火焰、火花和电弧发生器	(43)
火焰 (43) 火花 (46) 电弧 (48)	
§ 3-2 气体放电光源	(50)
气体放电的种类 (50) 气体放电光源的基本特点 (51) 水银灯 (51) 钠光 灯 (53) 铯光灯 (54) 光谱灯 (55) 氢弧灯 (56) 空心阴极灯 (56)	
§ 3-3 热辐射光源	(58)
绝对黑体的热辐射定律 (58) 钨丝灯 (61) 能斯脱灯 (62) 硅碳棒 (63)	

§ 3-4 激光器和它在光谱仪器中的应用	(64)
激光和普通光 (64) 激光器 (64) 激光在光谱仪器中的应用 (66)	
参考文献	(67)
第四章 光谱仪器的色散元件	(69)
§ 4-1 色散原理概述	(69)
透光物质的色散作用 (69) 衍射色散作用 (69) 干涉色散作用 (69) 干涉调制色散作用 (70)	
§ 4-2 三棱镜的色散原理	(70)
概述 (70) 三棱镜的分光原理 (71) 最小偏向的条件 (71) 角色散率 (72) 角色散宽度 (72) 增加三棱镜角色散率的途径 (73) 理论分辨率 (74) 角放大率 (75)	
§ 4-3 分光棱镜组的色散原理	(76)
角色散率 (77) 角色散宽度 (77) 理论分辨率 (78)	
§ 4-4 分光棱镜的种类	(78)
三棱镜 (78) 赖才尔福特棱镜 (78) 直视棱镜 (79) 利脱尔棱镜 (79) 赖才尔福特自准棱镜 (80) 阿贝恒偏向棱镜 (80) 瓦茨沃尔脱棱镜系统 (80) 科纽棱镜 (82) 阿贝棱镜系统 (83) 其他多棱镜组 (83) 棱镜-透镜系统 (84) 费利棱镜 (84)	
§ 4-5 棱镜非主截面的色散作用——光谱线的弯曲	(84)
§ 4-6 光线在棱镜中的损失	(87)
§ 4-7 温度对棱镜色散作用的影响	(88)
§ 4-8 制造分光棱镜的材料	(90)
光谱透明区 (90) 色散率 (90) 光学均匀性 (90) 双折射 (91) 化学稳定性 (91)	
§ 4-9 分光棱镜的设计	(97)
§ 4-10 反射式平面衍射光栅的色散原理	(101)
概述 (101) 色散原理和公式 (102) 光谱级和自由色散区 (102) 角色散率 (103) 角放大率 (103) 理论分辨率 (104) 非主截面内的色散作用(谱线的弯曲) (104) 光谱级的强度分布 (105)	
§ 4-11 空间反射式平面衍射光栅的色散特性	(108)
概述 (108) 光栅的空间色散方程 (109) 角色散率 (111) 自由色散区 (111) 分辨率 (111) 光谱线的倾斜 (112) 光谱的弯曲 (112)	
§ 4-12 反射式衍射光栅的制造	(113)
概述 (113) 机械刻划 (114) 光电刻划 (117) 光栅复制 (119) 全息照相刻划 (119)	
§ 4-13 反射式阶梯光栅的色散原理	(120)
概述 (120) 色散原理 (121) 角色散率和色散区 (121) 分辨极限和分辨率 (122) 光谱强度分布 (123)	
§ 4-14 陆末-盖克平行板	(123)
§ 4-15 法布里-珀罗干涉色散原理	(127)
概述 (127) 干涉极大值条件 (127) 角色散率和色散区 (128) 光强分布及其与反射膜和介质的关系 (129) 分辨极限和分辨率 (132) 光束渐晕对强度的影响, 球面法布里-珀罗干涉仪 (133) 反射面的加工精度对分辨率的影响 (134) 温度对分辨率的影响 (134) 法布里-珀罗干涉仪的主要优缺点 (135) 复合法布里-珀	

罗干涉仪 (135)	
§ 4-16 光谱滤光片	(137)
光学滤光片的种类 (137) 固体吸收滤光片 (139) 干涉滤光片 (140) 干涉滤光片的光谱特性与光束入射角和周围环境的关系 (146) 剩余反射滤光片 (147) 衍射光栅和网格反射滤光片 (149) 磨砂反射滤光片 (150) 散射滤光片 (151) 组合滤光片 (153)	
参考文献	(153)
第五章 光谱仪器的成象系统	(155)
§ 5-1 光谱仪器理想成象系统的基本特点	(155)
概述 (155) 线放大率 (155) 视场 (156) 光瞳和相对孔径 (157)	
§ 5-2 象差和它的种类,象差在光谱仪器成象系统中的作用	(157)
象差的不可避免性 (157) 单色象差的种类 (158) 球差 (160) 彗差 (162) 象散和象面弯曲 (163) 畸变 (165) 色差 (165) 轴向色差 (166) 倍率色差 (166)	
§ 5-3 象差和成象系统的设计	(166)
光谱仪器光学设计的目的和任务 (166) 光谱仪器成象系统的初级象差系数 (167) 光谱仪器成象系统的象差校正要求 (168)	
§ 5-4 透射式物镜的设计	(172)
概述 (172) 未消色差物镜 (176) 消色差物镜 (177) 平谱面物镜的设计方法 (178)	
§ 5-5 反射式物镜的设计	(180)
概述 (180) 凹球面镜 (180) 凹抛物面镜 (182) 双反射面物镜(卡谢克连物镜)(183)	
§ 5-6 反射式成象系统	(185)
反射式成象系统的特点 (185) 水平成象系统的轮廓概算 (185) 摄谱仪水平成象系统的象差计算 (187) 单色仪水平成象系统的象差计算 (190) 垂直对称成象系统 (194) 自准成象系统 (196)	
§ 5-7 凹面衍射光栅理论	(199)
光程差函数 (199) 衍射极大值的条件 (200) 聚焦条件 (200) 凹面光栅光谱的一些特性 (201) 凹面光栅的象差计算 (203) 狭缝象的象散结构 (205)	
§ 5-8 凹面衍射光栅成象系统	(206)
罗兰成象系统 (206) 艾伯尼成象系统 (207) 巴森-隆成象系统 (207) 依格尔成象系统 (208) 垂直入射成象系统 (209) 径向成象系统 (210) 掠入成象系统 (211) 谢亚-那米欧卡 (Seya-Namioka) 成象系统 (211) 欧那卡 (Onaka) 成象系统 (212) 沃茨握尔成象系统 (213) 凹面光栅的消象散系统 (214)	
§ 5-9 色散棱镜和平面光栅在非平行光束中所产生的象差	(215)
色散棱镜在非平行光束中的象差 (215) 平面光栅在非平行光束中的象差 (216) 落入色散元件的光束的非平行性的影响 (217)	
参考文献	(218)
第六章 光谱仪器的接收系统	(220)
§ 6-1 概述	(220)
§ 6-2 眼睛和它的主要特性	(221)
眼球的结构 (221) 视觉生理 (222) 眼睛的象差 (222) 眼睛的分辨率 (222)	

亮度的对比能力 (223)	视见函数——光谱相对灵敏度 (224)	眼睛的适应性 (224)
§ 6-3 感光材料与它的主要特性	(225)	
潜象的构成 (225) 潜象的处理——显影和定影 (225) 乳胶特性曲线 (226) 乳胶的衬度(对比度) (226) 乳胶的宽容度 L (226) 乳胶的分辨率 (227) 光谱灵敏度 (227) 谱片的背景和谱线的扩散 (228) 乳胶特性曲线的制作法和阶梯减光板 (229)		
§ 6-4 摄谱接收法的主要附属设备	(230)	
光谱投影仪 (230) 测微光度计 (231) 光谱比长仪 (231)		
§ 6-5 光电元件和它的电子线路	(232)	
光电元件的基本特性 (232) 内光电效应的光电元件——真空光电管 (233) 外光电效应的光电元件——光电倍增管 (235) 光电倍增管的接线线路和供电 (237) 光电管与光电倍增管的信号与噪音比 (238) 光敏电阻与它的线路 (240) 光电池和它的接线电路 (240)		
§ 6-6 热电元件和它的特性	(242)	
真空热电堆与它的特性 (242) 热辐射计和它的接线图 (243) 气体接收器和它的结构 (245)		
§ 6-7 光电信号的放大	(246)	
放大器工作特性的主要指标 (247) 放大器的干扰 (249) 电子管放大器 (251) 半导体(晶体管)放大器 (254)		
§ 6-8 光电信号的显示	(256)	
参考文献	(258)	
第七章 光谱仪器的装校调试	(260)	
§ 7-1 概述	(260)	
§ 7-2 常用的装校调试仪器	(261)	
水准器 (261) 放大镜 (261) 显微镜 (262) 平行光管 (263) 望远镜 (263) 自准平行光管 (265) 经纬仪 (266) 刀口仪 (266)		
§ 7-3 主要组件的装校	(266)	
狭缝组 (266) 棱镜台与光栅台 (268) 物镜 (269)		
§ 7-4 总体装校	(269)	
§ 7-5 补角棱镜自准定位法	(271)	
§ 7-6 标记定位法	(273)	
§ 7-7 五角棱镜定位法和测角定位法	(275)	
§ 7-8 刀口法(阴影法)	(277)	
工作原理 (277) 反射式物镜位置的校正 (278) 反射镜的装配质量的检查 (280)		
§ 7-9 星点法	(280)	
星点法的工作原理 (280) 轴上象差对衍射象的影响 (282) 轴外象差对衍射象的影响 (283) 典型的星点彩色衍射象 (284)		
§ 7-10 总体精密调试和摄谱精调法	(286)	
§ 7-11 凹面光栅光谱仪的装调	(289)	
绕 x 轴转动的成象关系的变化 (289) 绕 y 轴转动的成象关系的变化 (289) 绕 z 轴转动的成象关系的变化 (290)		
§ 7-12 法布里-珀罗干涉仪的调整	(291)	

参考文献	(291)
第八章 光谱仪器的结构设计	(292)
§ 8-1 概述	(292)
结构设计的要求和任务 (292) 结构设计程序 (293) 基准选择和尺寸标注 (294)	
§ 8-2 光学零件的结构设计	(295)
透镜 (295) 反射镜 (297) 棱镜 (297)	
§ 8-3 狭缝结构的设计	(298)
刀口的设计 (298) 狭缝宽度的调节机构 (299) 狭缝高度的调节 (300) 狭缝倾斜机构 (302) 狭缝的调焦机构 (302)	
§ 8-4 光学零件的固定	(302)
滚边固定法 (302) 压圈固定法 (303) 压板固定法 (305) 胶接固定法 (306) 色散棱镜的固定法 (307)	
§ 8-5 棱镜和光栅的转动机构	(308)
杠杆传动机构 (308) 蜗轮蜗杆传动机构 (310) 钢带滚轮传动机构 (310) 读数机构 (311)	
§ 8-6 凸轮的设计	(312)
§ 8-7 暗盒和板移结构	(315)
参考文献	(317)
第九章 光谱仪器的总体设计	(318)
§ 9-1 总体设计的目的和内容	(318)
§ 9-2 光学系统的选择	(319)
概述 (319) 摄谱仪系统的选择 (320) 单色仪系统的选择 (322)	
§ 9-3 接收系统的选择	(324)
§ 9-4 总体结构的安排	(325)
§ 9-5 模型试验和新产品试造	(328)
§ 9-6 实际线色散率的测定	(329)
§ 9-7 实际分辨率和它的测定	(330)
真实谱线宽度 a'_s (331) 衍射宽度 a'_ϕ (331) 几何宽度 a'_i (332) 象差宽度 a'_s (332) 照明光束的相干性对分辨率的影响 (332) 接收系统对分辨率的影响 (334) 摄谱试验法 (334) 干涉测量法 (335) 电磁场分谱法 (335) 偏振分谱法 (336) 光电扫描法 (337)	
§ 9-8 杂散光的产生和它的消除	(338)
§ 9-9 产品技术质量标准的制定	(340)
制定产品技术质量标准的必要性 (340) 摄谱仪的主要技术质量标准 (340) 分光光度计的主要技术质量标准 (340)	
参考文献	(341)
第十章 看谱仪和摄谱仪	(342)
§ 10-1 看谱仪	(342)
概述 (342) 34W 型验钢镜 (342) 工业看谱仪 (343)	
§ 10-2 摄谱仪的概述	(345)
一般说明 (345) 棱镜摄谱仪与光栅摄谱仪的比较 (346) 摄谱仪与光电光谱仪的比较 (347)	

§ 10-3 摄谱仪的照明系统	(348)
对摄谱仪照明系统的设计要求 (348) 照明方式的分类 (349) 三透镜照明系统的性能和它的设计 (350)	
§ 10-4 棱镜摄谱仪	(352)
中型石英摄谱仪 (353) 大型石英自准摄谱仪 (354) 组合式万能玻璃棱镜摄谱仪 (355) 特大型组合式玻璃棱镜摄谱仪 (358)	
§ 10-5 光栅摄谱仪	(361)
概述 (361) 平面光栅摄谱仪的光学性能 (361) 平面光栅摄谱仪的结构特点 (365) 固定式大型光栅摄谱仪 (366)	
§ 10-6 真空紫外摄谱仪	(367)
应用 (367) 空气对远紫外光谱的吸收 (367) 光学系统的选择 (368) 远紫外光谱区的反射膜 (369) 真空摄谱仪的结构设计 (371)	
§ 10-7 超宽光谱范围的光栅摄谱仪	(371)
参考文献	(374)
第十一章 光电直读光谱仪(光电析钢仪和光量计)	(375)
§ 11-1 概述	(375)
应用 (375) 分类 (375) 光电直读光谱分析的基本原理 (376) 电子计算机在光电直读光谱仪器中的应用 (377)	
§ 11-2 光电析钢仪	(378)
概述 (378) 内标光道的选择 (379) 分析光道的扫描方法 (380) 光电接收系统 (381)	
§ 11-3 光谱的激发和照明系统	(382)
光谱激发过程中的电干扰和它的消除 (383) 氩气在光谱激发中的作用 (383) 氩气火花架和供氩系统 (385) 照明系统 (386)	
§ 11-4 光量计的光学系统	(387)
概述(387) 棱镜光学系统(388) 平面光栅光学系统(389) 凹面光栅成象系统(389)	
§ 11-5 光量计的接收系统	(390)
概述 (390) 聚光镜系统 (391) 接收元件 (392) 积分器和控制系统 (392) 放大-记录系统 (393)	
§ 11-6 谱线位移的校正和消除	(395)
谱线位移的产生原因 (395) 谱面位移的校正方法 (396) 谱线位移消除的根本办法 (398)	
参考文献	(399)
第十二章 单色仪和分光光度计	(400)
§ 12-1 概述	(400)
§ 12-2 单色仪	(400)
透射式单色仪 (400) 反射式棱镜单色仪 (402) 反射式光栅单色仪 (404) 强光单色仪 (405)	
§ 12-3 双单色仪	(406)
双单色仪的色散率和分类 (406) 色散相加的双单色仪 (407) 色散相减的双单色仪 (408) 几点设计注意事项 (409)	
§ 12-4 多次色散的单色仪系统	(410)
§ 12-5 紫外可见和近红外分光光度计	(411)

概述 (411) 光源和照明系统 (412) 分光系统 (413) 光度光学系统 (415) 接收系统 (415) 荧光分光光度计 (416)	
§ 12-6 红外分光光度计	(417)
概述 (417) 双光束红外分光光度计的测量原理 (419) 光源和光度光学系统 (419) 分光系统 (422) 光电接收元件和它的聚光系统 (425) 光电接收系统 (425)	
§ 12-7 远红外光栅分光光度计	(428)
概述 (428) 远红外光源和接收元件 (428) 单光束远红外光栅分光光度计 (429) 双光束远红外光栅分光光度计 (429)	
参考文献	(437)
第十三章 高分辨率光谱仪(经典干涉光谱仪)	(439)
§ 13-1 概述	(439)
§ 13-2 阶梯光栅摄谱仪	(439)
透射式阶梯光栅摄谱仪 (439) 外平行光反射式阶梯光栅摄谱仪 (440) 内平行光反射式阶梯光栅摄谱仪 (441)	
§ 13-3 陆末-盖克板干涉光谱仪	(442)
§ 13-4 法布里-珀罗干涉摄谱仪	(445)
概述 (445) 外平行光法布里-珀罗干涉摄谱仪 (446) 内平行光法布里-珀罗干涉摄谱仪 (447) 会聚光法布里-珀罗干涉摄谱仪 (448) 复合法布里-珀罗干涉摄谱仪 (448)	
§ 13-5 法布里-珀罗分光计	(449)
概述 (449) 仪器函数和实际分辨率 (450) 法布里-珀罗分光计的光强和预色散器 (451) 法布里-珀罗分光计的成像系统 (451) 倾斜法布里-珀罗分光计 (451) 变光学厚度法布里-珀罗分光计 (452) 环形和圆孔出射光栏的设计 (453) 变焦距法布里-珀罗分光计 (455)	
参考文献	(455)
第十四章 干涉调制光谱仪	(456)
§ 14-1 基本思想	(456)
§ 14-2 栅栏分光计	(458)
概述 (458) 狭缝和栅栏 (459) 单光束栅栏分光计 (460) 双光束红外栅栏分光光度计 (462)	
§ 14-3 干涉调幅分光计(SISAM)	(464)
迈克尔逊干涉仪 (464) 选择性调幅原理 (465) 干涉图象的变迹 (466) 设计中几点说明 (466)	
§ 14-4 干涉调频光谱仪	(467)
工作原理 (467) 分辨率与立体角 (468) 迈克尔逊干涉调频光谱仪 (469) 片光栅干涉调频光谱仪 (471)	
参考文献	(471)
第十五章 光谱仪器的使用和保养	(472)
§ 15-1 概述	(472)
§ 15-2 光学零件的清洗与保养	(472)
§ 15-3 光谱仪器工作环境的要求	(473)

§ 15-4	操作安全	(474)
附表		
附表 1	几种常用晶体材料性能表	(476)
附表 2	常用晶体材料的折射率表	(477)
附表 3	常用晶体的折射率的温度关系表	(481)
附表 4	石英玻璃的折射率表	(483)

第一章 绪 论

§1-1 光 谱 仪 器

光谱仪器是一种利用光学光谱的色散原理而设计的光学仪器。所谓光学光谱是指从远紫外或称真空紫外光谱区(波长极限为 10 埃^[1])到远红外光谱区(波长极限为 1 毫米)的整个波段。它仅占电磁波区的一小部分(参看表 1.1)。

表 1.1 电 磁 波 谱 表¹⁾

波谱段	γ 射 线	X 射 线	紫外光线	可 见 光 线	红外光线	无线电波
波长(埃)	$10^{-4} \sim 0.3$	$10^{-1} \sim 3 \times 10^2$	$10 \sim 4 \times 10^3$	$4 \times 10^3 \sim 7.6 \times 10^3$	$7.6 \times 10^3 \sim 10^7$	$6 \times 10^6 \sim 10^{15}$
波数 (1/厘米)	$10^{12} \sim 3 \times 10^8$	$10^9 \sim 3 \times 10^5$	$10^7 \sim 2.5 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4$	$1.3 \times 10^4 \sim 10$	$17 \sim 10^{-7}$
频率(1/秒)	$3 \times 10^{22} \sim 10^{19}$	$3 \times 10^{19} \sim 10^{16}$	$3 \times 10^{17} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$7.5 \times 10^{14} \sim 4 \times 10^{14}$	$4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11}$	$5 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^3$

关于光谱的问题将在第二章中阐述。

光谱仪器是由三部分组成：光源和照明系统，分光系统，以及接收系统。光源可以是研究的对象，也可以作为研究的工具照射被研究的物质。这种物质有气态的，液态的和固体状态的。一般而言，发射光谱学中的光源是研究对象；而吸收光谱学中的光源是照射工具。为了提高由光源发射出的照明分光系统的光强度，必须精心设计光学聚光系统，或称为照明系统。

分光系统是任何光谱仪器的核心部分；它是由准光管、色散工作台和暗箱所组成。分光系统的工作原理如图 1.1 所示。由狭缝 S_1 发出的光束经过准光物镜 O_1 ，变为平行光束射入色散元件 D ；由于色散元件的作用使进入的单束“白光”分解为多束单色光，再经过暗箱物镜 O_2 按波长的顺序成象于焦面 FF' 上。一个由“白光”照明的狭缝经过分光系统而变为若干个单色的狭缝象，这是目前广泛应用的光谱仪器分光系统的基本原理。

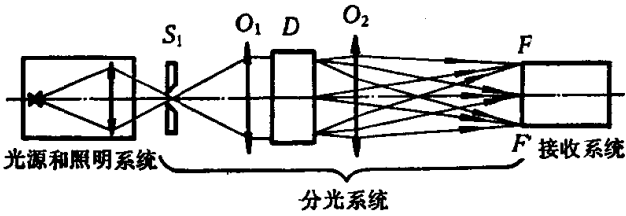


图1.1 光谱仪器的工作原理图

前面所述的色散原理是按光谱的波长顺序(光栅光谱等的排列还与光谱级次有关)而空间分离的。棱镜光谱仪、光栅光谱仪和非调制的干涉光谱仪均是空间分离光谱的。近十几年来，出现了调制干涉光谱仪器，这种仪器并不是建立在空间分离光谱的原理上，而是运用了一种崭新的干涉调制法分离光谱的；换言之，不同波长的光谱元²⁾ 具有不同的调

1) 各波谱段的界线是相对的，不能看成是僵死不变的。波长(λ)，波数(ν)，频率(ν')是按 $\nu' = 3 \times 10^{18} \lambda^{-1}$ ， $\nu = 10^8 \lambda^{-1}$ 公式换算的，其中 λ 的单位为埃($\text{\AA}$)。
2) 此处应用光谱元的概念是为了不与经典光谱仪器中的光谱线的概念相混淆。

制频率。因此,基于空间分离光谱原理的仪器称为经典式的光谱仪器;基于干涉调制分离光谱原理的仪器称为干涉调制光谱仪器或称为新原理光谱仪器。

准光物镜 O_1 和暗箱物镜 O_2 构成了光谱仪器(确切地说是分光系统)的成象系统,它与望远系统形成一个有趣的对比(请参看图1.2a, 1.2b)。光谱仪器成象系统有两个显著特点:(1)目标是一个狭长的光缝; (2) 色散元件参于光路之中。因此,设计光谱仪器的成象系统就必须考虑狭缝和色散元件的作用。

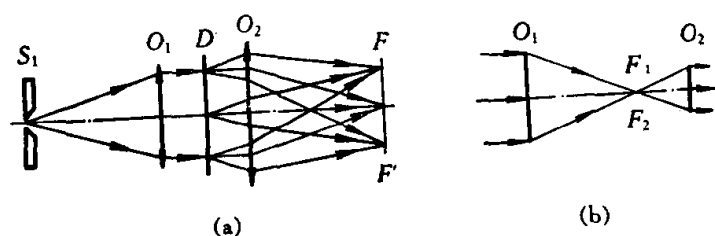


图1.2 光谱仪器成象系统和望远镜系统的比较
(a)光谱仪器成象系统示意图 (b)望远镜系统示意图

光谱仪器的第三组成部分是接收系统,它的作用是测量光谱组成部分(光谱线、光谱带和连续光谱)的波长和强度,从而转告我们被研究物质的参数(例如物质的成分和含量,以及物体的温度、星体运动的速度和它的质量等)。光谱仪器的接收系统包括光谱的接收、处理和显示。光谱的接收元件都是与分光系统连接在一起的。光谱的处理和显示往往是与分光系统分开的;在许多情况下,它是单独的一种设备,例如摄谱仪的光谱感光板的显影、定影都是一套单独使用的器具或设备。光谱的显示和测量使用了独立的光谱投影仪、光谱比长计和测微光度计。带有电子计算机的光电直读光谱仪具有比较完善的统一的接收系统。光谱的接收、处理和显示已经成为光谱仪器的不可分割的一部分。看谱仪由于接收系统只有目镜和观察者的眼睛,因此,它不需要其他辅助设备和仪器配套。

根据上述讨论,光谱仪器的接收系统可分为三种:目视系统、摄谱系统和光电系统。经典光谱仪器根据设计的需要可以采用目视系统、摄谱系统或光电系统;但干涉调制光谱仪器只能采用光电接收系统。

§1-2 光谱仪器特性

光谱仪器的基本特性可归纳为五点:工作光谱区、色散率、分辨率、光强和工作效率。严格地说,色散率是分辨率的数学表达方式,不能单独成为基本特性之一。

工作光谱区

使用光谱仪器所能记录光谱的波长区域称为该光谱仪器的工作光谱区。光谱仪器的工作光谱区主要决定于光学零件的光谱透过率或反射率。对于棱镜光谱仪而言,其工作光谱区主要决定于棱镜材料的光谱透过率。例如,玻璃棱镜光谱仪的工作光谱区为4000埃至10000埃(实际上可到2.5微米),大于10000埃的波长区需要应用红外晶体制造的光谱仪器,小于4000埃的波长区需要应用石英或萤石制造的光谱仪器。改变光栅参数和它表面的光谱反射率,光栅光谱仪就可以应用于整个光学光谱区。这是光栅光谱仪的主要优

点之一。

色 散 率

色散率是光谱在空间按波长分离的尺度,它可以用角度表示,称为角色散率;也可以用线度表示,称为线色散率。色散率对于干涉调制光谱仪器意义是不大的。色散率是一种纯数学的概念,它只能作为研究分辨率的前提。但是,从另一个方面来看,由于实际分辨率与许多因素有关,且与理论分辨率有较大的差别(参看本书第九章),所以在某些场合利用色散率能比较清楚地说明问题。这是色散率这个概念长期被应用的基本原因。

角色散率是表示两条纯数学的光谱线在空间分离的角度,即

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (1.1)$$

线色散率是表示两条纯数学的光谱线在光谱成象焦面上的距离。因此,它与暗箱物镜的焦距 f_2 有关:

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \frac{f_2}{\cos \sigma} \quad (1.2)$$

其中 σ 是焦面相对垂直平面的倾斜角。

有时在实际工作中采用线色散率的倒数显得比较方便

$$\frac{d\lambda}{dl} = \frac{1}{dl/d\lambda} \quad (1.3)$$

例如,在发射光谱分析工作中选择光谱线对的时候就是如此,因为那时已知接收器所能分开的距离,需要估计分析线与比较线的最佳波长差值。它的单位为微米/毫米 (μ/mm) 和埃/毫米 ($\text{\AA}/\text{mm}$)。

在红外光谱区很少用波长,而常应用波数。波数是波长的倒数,即 1 厘米的范围内所包含波长数,

$$\left. \begin{aligned} \nu &= \frac{1}{\lambda} \\ d\nu &= \frac{d\lambda}{\lambda^2} \quad \text{或} \quad d\lambda = \frac{d\nu}{\nu^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

以波长和波数表示的角色散率与线色散率的关系式为

$$\frac{d\varphi}{d\nu} = \lambda^2 \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (1.5)$$

$$\frac{dl}{d\nu} = \lambda^2 \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot \frac{f_2}{\cos \sigma} \quad (1.6)$$

从公式(1.2)和(1.6)中可以看出光谱仪器的线色散率不仅与色散元件的角色散率成正比,而且与暗箱物镜的焦距成正比,与焦面的倾角之余弦成反比。

目前,世界各国生产的小型和中型光谱仪的线色散率倒数约为 100~10 埃/毫米,大型光谱仪的线色散率倒数约为 10~1 埃/毫米。法布里-珀罗干涉光谱仪的线色散率倒数可达 0.1~0.01 埃/毫米,甚至更大。

分 辨 率

在讨论色散率时,我们没有考虑光谱线是有宽度的. 色散率只告诉我们,两个波长分离的角度或距离,它没有说明具有该波长的这两条谱线是否能分辨. 如果我们在色散率的基础上,再考虑谱线的强度分布轮廓,那就基本上能判断这两条谱线是否能分辨.

因此,两条谱线能否分辨不仅决定于仪器的色散率,而且与谱线的强度分布轮廓和它们的相对位置有关(请看图1.3).图1.3中的虚线表示原来谱线的强度分布,实线表示合成后的谱线轮廓. 图1.3a, b是表示波长差值相等,而强度分布轮廓不同的两对谱线所产生的分辨率不同,a图中的能分辨,而b图中的则不能分辨. 图1.3c, d表示波长差值相等强度分布轮廓一样而相对位置不同的两对谱线所产生的分辨率不同,c图中的能分辨的,d图中的不能分辨的. 在实际工作中,两条谱线能否分辨还与接收器的灵敏度有关. 若接收系统的灵敏度大于合成轮廓的最大值与最小值之强度差,则这两条谱线是能分辨的. 谱线的轮廓也是一个复杂的函数,它与谱线的真实轮廓、光谱仪器的照明状态、光学系统的象差、接收器的灵敏度等均有密切的关系.

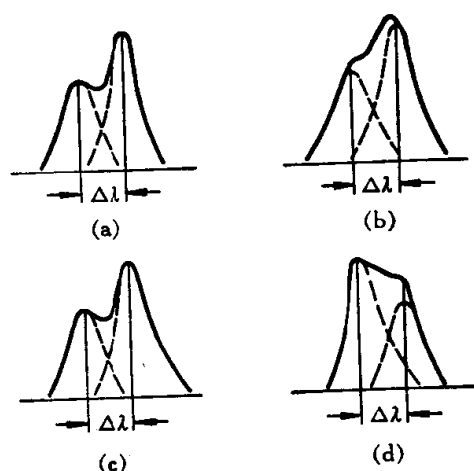


图 1.3 不同轮廓的谱线对光谱仪器的分辨率的影响

因此,我们不得不采用明知不理想的理论分辨率的概念. 这个概念是瑞利^[2]在1888年提出来的,所以又称瑞利准则. 实际分辨率的有关问题,我们将在本书的第九章§9-7中进行比较详细的讨论.

瑞利认为,当两条强度分布轮廓相同的谱线底最大值和最小值相重叠时,它们能被分辨(见图1.4)因此,瑞利准则有两条前提:(1)假设有两条谱线通过光谱仪器以后,其强度

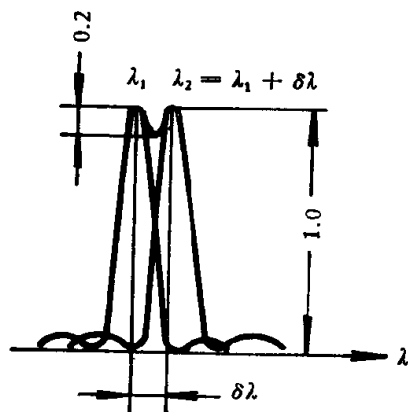


图 1.4 瑞利准则图示

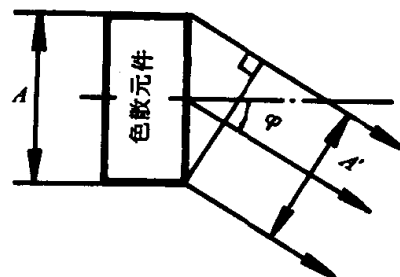


图 1.5 色散元件的有效孔径图示

分布轮廓是完全相同的;(2)假设接收系统的灵敏度大于或等于20%. 这个假设接近于人眼睛的灵敏度. 事实上,人眼睛的灵敏度为10~20%,感光板为5%,而光电接收器一般小于5%.

根据瑞利准则,理论分辨率 R 为

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \quad (1.7)$$

根据矩孔衍射的作用和图 1.5 所示的色散元件的有效孔径, 可以得出

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{dl} = \frac{A' \cos \sigma}{f_2} \quad (1.8)$$

其中 A' 为色散元件的有效孔径的宽度(即在色散平面内). 将(1.8)代入(1.7)得:

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = \frac{\lambda}{dl} \cdot \frac{dl}{d\lambda} = \frac{d\varphi}{d\lambda} \cdot A' \quad (1.9)$$

从公式(1.9)中得出: 任何光谱仪器的理论分辨率为色散元件的角色散率 $\frac{d\varphi}{d\lambda}$ 和有效孔径在子午面(即色散作用的平面)上的宽度 A' 之乘积.

在红外光谱学和赖曼光谱学中经常采用分辨极限 $\delta\lambda$ 或 $\delta\nu$ 衡量光谱仪器的分辨率. 分辨率 R 是无单位的. $\delta\lambda$ 主要应用于可见光谱区和近红外区; $\delta\nu$ 主要应用于红外光谱区. $\delta\lambda$ 的单位为埃或微米; $\delta\nu$ 的单位为厘米⁻¹(cm⁻¹).

一般中、小型的棱镜光谱仪的分辨率为 $10^3 \sim 10^5$. 特大型棱镜光谱仪可达 1.4×10^5 . 衍射光栅光谱仪的分辨率可达到 5×10^5 . 干涉光谱仪的分辨率可高达 5×10^7 .

光 强^[3]

光强是表示光谱仪器传递光能量的本领, 它与接收元件的感光性质有关. 目前所采用的接收元件按感光性质可分为两类: 一类是接收光的照度 E , 一类是接收光通量 Φ . 感光板所接收的光能量与单位面积光通量有关, 接收面积的大小不影响它的感光效果. 所以, 摄谱仪的光强必需以照度表示, 称为照度光强 $G_{照}$. 光电元件和眼睛所接收的是射入的总能量, 所以光电光谱仪和看谱仪的光强均应以光通量表示, 称为通量光强 $G_{通}$.

感光板不仅与光照度有关, 而且与曝光时间有关, 这意味着感光板不仅能将光能量变为黑度, 而且能以黑度的形式储蓄光能量. 光电元件和眼睛本身是不能储蓄光能量的. 但是, 光电元件这个缺点在光电光谱仪的接收系统中, 设计者已采用了其他方法进行补偿. 有关这些我们将在以后详细讨论.

我们先讨论照度光强 $G_{照}$. 光强与光谱仪器的参数有关. 设狭缝的宽度和高度为 a_1 和 b_1 , 它的象的宽度和高度为 a_2 和 b_2 ; 色散元件的有效光束断面 S 和 $S' = A'H'$; γ 为光谱仪器角放大率, 即在子午面的放大率

$$\gamma = \frac{S}{S'} \quad (1.10)$$

根据惠更斯原理, 光谱仪器的狭缝可看作是一个光源, 因此得

$$\Phi = B_\lambda b_1 a_1 \frac{S}{f_1^2} \quad (1.11)$$

式中 B_λ 为单色光的亮度. 必须说明, 只有在光谱仪器照明系统的通光尺寸不影响准光管的通光时, 公式(1.11)才是正确的. 另外, 白光的亮度 B 为:

$$B = \int_{-\infty}^{\infty} B_\lambda d\lambda \quad (1.12)$$

对于线状光谱和连续光谱, 亮度 B 是有所区别的(请看图 1.6). 对于线状光谱若不考虑衍