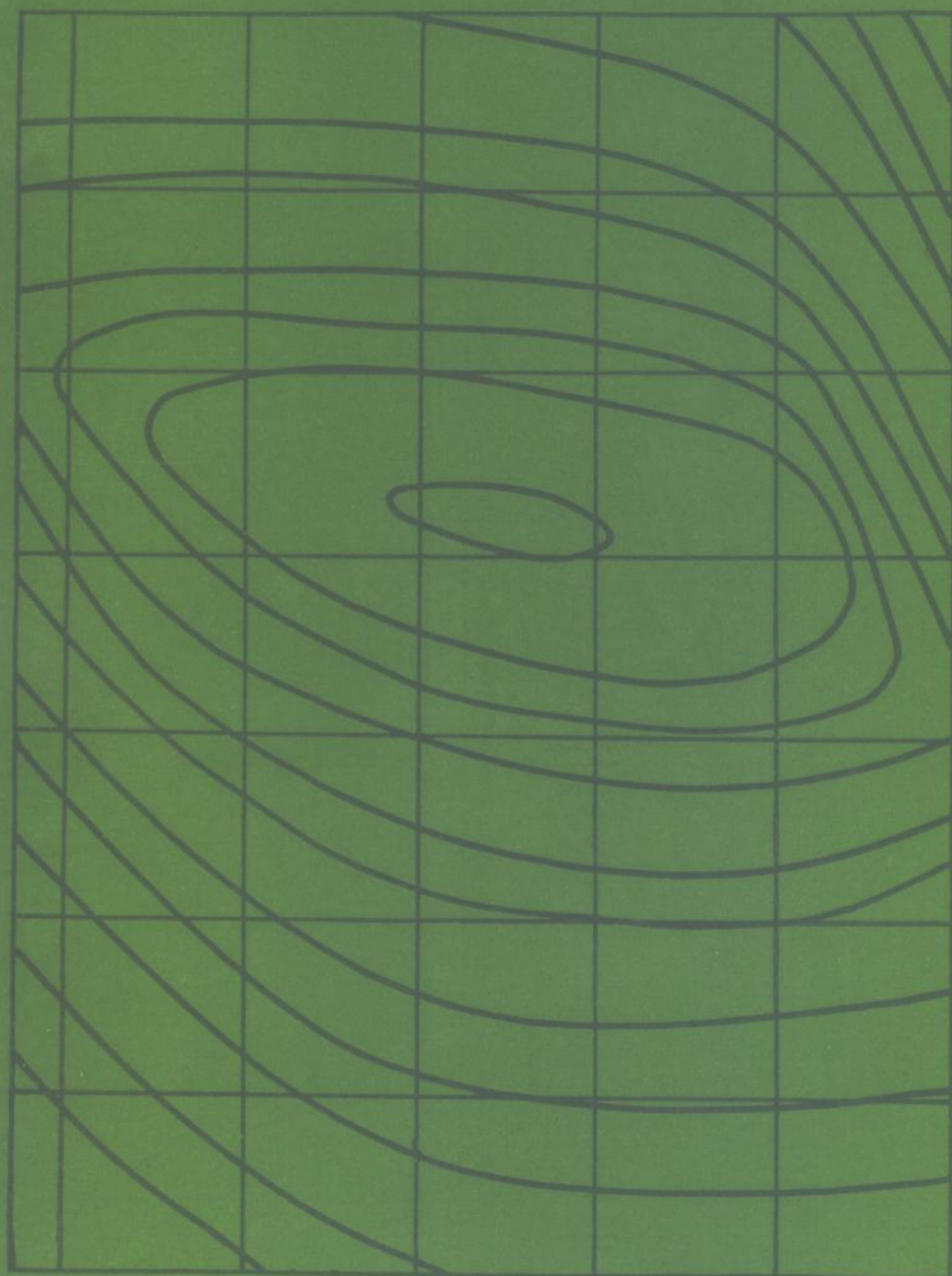


近代物理实验技术

(I)

吕斯骅 朱印康 主编



高等教育出版社

04-33

291

1

352006

近代物理实验技术

I

吕 斯 骅 主 编
朱 印 康



高等教育出版社

(京)112号

内 容 简 介

本书是根据编者多年来在北京大学物理系开设的“近代物理实验技术”课的讲稿整理、扩充而成的。内容包括:光谱技术、电子显微术、真空技术、低温技术、微波技术、磁性测量技术、传感器、微弱信号检测技术、波形测量技术、数字化测量技术和计算机接口技术共十一个方面近代物理实验技术。本书着重介绍了这些技术的工作原理,以及如何在实际中正确地应用这些技术来实现实验目的,还介绍了这些技术的最新进展情况和动态。

本书可供高等学校物理专业高年级学生、研究生和从事物理实验及相关专业的工作人员、科研人员参考,也可作为有关课程的教材和参考书。

本书责任编辑 曹建庭

DZ26.53.05



高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

高等教育出版社激光照排技术部照排

国防工业出版社印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 42 插页 1 字数 1 046 000

1991 年 8 月 第 1 版 1991 年 10 月 第 1 次印刷

印数 0001—1 055

ISBN 7-04-003392-5/O · 1037

定价 15.75 元

前 言

物理学是研究物质运动最普遍、最基本规律的一门基础学科。物理规律是实验事实的总结，物理理论的正确与否需要实验来证明。从本质上讲，物理学是一门实验科学，物理实验在物理学的发展中有举足轻重的作用。绝大部分的物理工作者都从事实验物理工作。

物理学的发展取决于实验技术的进展。当然，实验技术也只有在各种学科(包括物理学)发展的基础上才可能进步。例如，只有超高真空技术、低温技术、精密机械加工和电子技术的高度发达，才能建造出各种大型加速器，从而促使粒子物理学的巨大发展。七十年代以来，随着锁定放大、取样积分等微弱信号检测技术的发展，人们可以在强噪声背景下检测出信号，使测量下限大幅度地降低，促进了表面物理学的发展。特别是计算机引入物理实验后，迅速改变了物理实验的面貌，使实验的自动化程度和测量精度大大提高。对物理工作者来讲，实验技术是实现实验目的的一种工具，一个优秀的实验工作者必须灵活、熟练地应用这些工具，为此，必须了解这些技术的基本原理、应用范围和目前的进展状况。

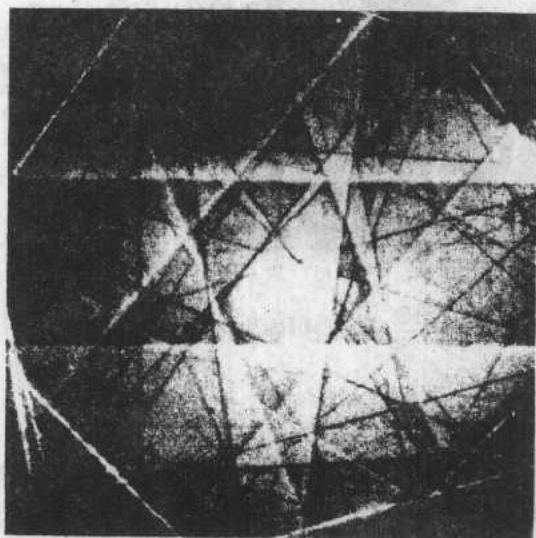
本书着重于如何正确地运用这些技术来达到我们的实验目的，而不过多地涉及仪器制造和具体的线路。譬如，在电子显微镜技术一章中，我们不讨论电镜制造中的问题，而是从使用的角度来讲它的工作原理、如何正确地获得和分析各种电镜图象。在讨论锁定放大器时只讲它的原理框图，介绍在强噪声背景下提取信息的原理，而不讨论具体的电子线路。因为随着微电子学的发展，电路的集成度越来越高，以前用几千个元件组成的仪器现在只需几块集成块就行了，性能却超过前者，但其基本原理、工作框图却没有多大改变。

本书是编者根据多年来在北京大学物理系讲授“近代物理实验技术”课使用的讲稿，经整理、扩充而成的。内容涉及的面较广，这些近代物理实验技术都是物理系学生在毕业论文和今后的教学、科研工作中常用的。本书可作为本科毕业班学生和研究生课程的教材，也可作为物理实验工作者的参考资料。

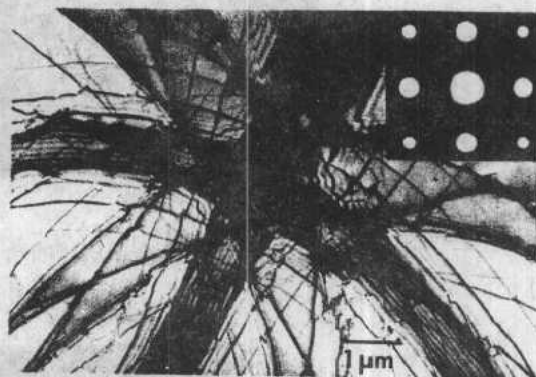
参加本书撰稿的都是在第一线工作的教授和副教授，他们不仅有深厚的理论功力也有丰富的实践经验，大部分人都有有关方面的专著。本书目的在于以不大的篇幅使读者系统地了解有关近代物理实验技术的原理、应用和有关学科的最新动态。本书第一、七、十章的编者是吕斯骅、第二章是冯孙齐、第三章是郭元恒、第四章是陈凯旋、陆果、第五章是朱生传、第六章是周文生、第八、九章是朱印康、第十一章是朱世嘉。我们还要特别感谢陈天杰、梁静国同志，他们均参加了“近代物理实验技术”课的讲授，虽无暇参加本书的编写工作，但和我们共同讨论了编写大纲并提供了宝贵的建议和资料。

吕斯骅、朱印康

一九八九年夏于燕园



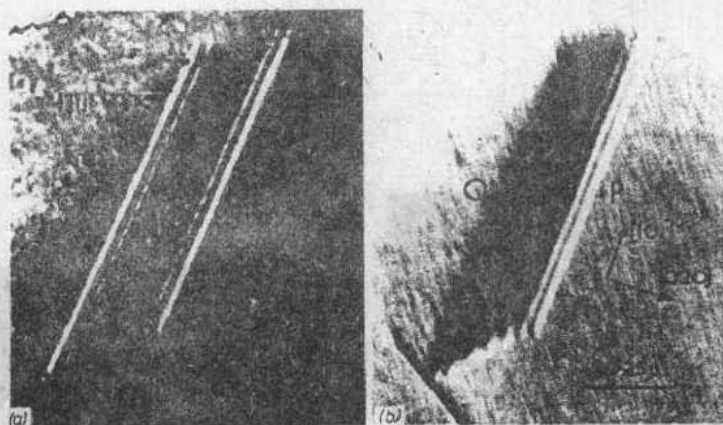
图片 1. Si 中的菊池衍射花样.



图片 2. 弯曲 Al 膜中的消光轮廓.



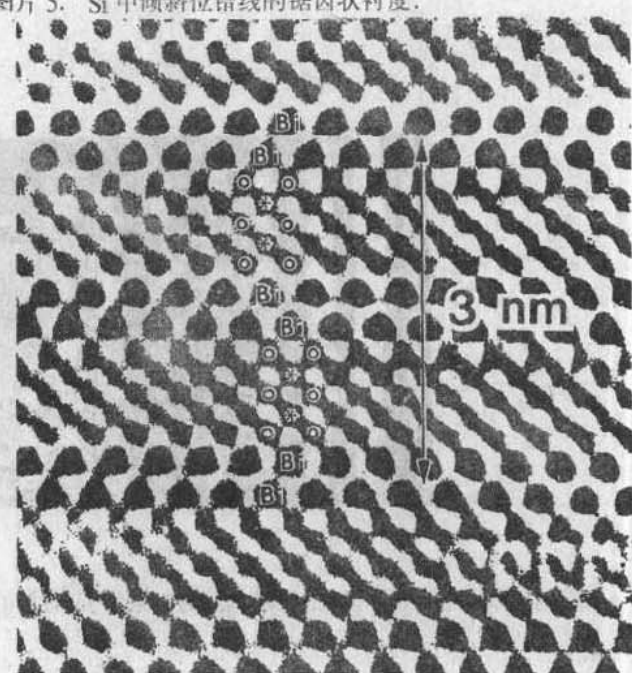
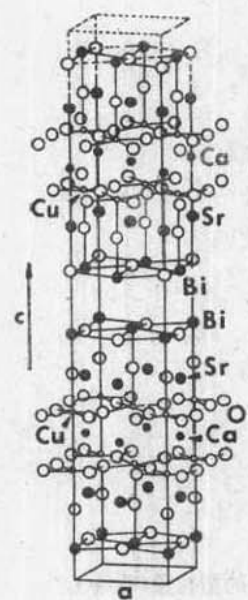
图片 3. 楔形 Al 薄膜中的等厚条纹 (明暗相间的粗条纹) 及位错 (黑色细线) 的衍衬象 (明场).



图片4. Cu+7%Al 合金中层错的动力学衬度象, $\alpha_s + \frac{2}{3}\pi$, (a)明场象, (b)暗场象.



图片5. Si 中倾斜位错线的锯齿状衬度.



图片6. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x$ 高温超导体 ($T_c = 80\text{ K}$) 的高分辨结构象及晶体结构模型. 由高分辨结构象可清楚地看到 Bi-O 双层结构. 结构象是沿 $[110]$ 方向拍摄的.

目 录

第一章 光谱技术	(1)	§2.5 高分辨电子显微象的成象原理	(118)
§1.1 常用的光谱仪	(2)	§2.5.1 成象系统作为空间不变(等晕)线性系统	(119)
§1.1.1 概论	(2)	§2.5.2 电子波的传播与非涅耳传播因子	(120)
§1.1.2 棱镜光谱仪	(9)	§2.5.3 磁透镜的傅氏变换性质及其振幅传递函数	(121)
§1.1.3 光栅光谱仪	(15)	§2.5.4 弱相位体象和电荷密度投影象	(126)
§1.2 干涉光谱仪	(29)	§2.5.5 多层法的物理基础	(131)
§1.2.1 法布里-珀罗干涉仪	(29)	§2.6 电子显微术的新发展	(133)
§1.2.2 傅里叶变换光谱仪	(38)	§2.6.1 分析电子显微术(AEM)	(133)
§1.3 激光光谱技术	(45)	§2.6.2 超高压电子显微术(HVEM)	(139)
§1.3.1 激光器	(45)	§2.6.3 扫描隧道显微术(STM)	(140)
§1.3.2 激光吸收光谱	(50)	参考文献	(142)
§1.3.3 高分辨本领光谱	(51)	第三章 真空技术	(144)
§1.3.4 高时间分辨光谱	(52)	§3.1 物理基础	(144)
§1.3.5 激光微区光谱分析	(55)	§3.1.1 抽气的概念	(144)
§1.3.6 激光雷达	(56)	§3.1.2 真空度与压强	(147)
§1.3.7 激光光-声光谱	(57)	§3.1.3 气体与固体表面的相互作用——吸附和脱附与真空的关系	(152)
参考文献	(58)	§3.1.4 气体的流动 流量与流导	(156)
第二章 电子显微术	(59)	§3.1.5 真空系统的抽气方程	(159)
§2.1 引言	(59)	§3.2 真空泵	(161)
§2.2 电子枪与磁透镜	(60)	§3.2.1 真空泵分类	(161)
§2.2.1 电子枪	(61)	§3.2.2 真空泵的性能指标	(162)
§2.2.2 磁透镜	(62)	§3.2.3 机械泵	(163)
§2.3 透射电子显微术(TEM)	(68)	§3.2.4 罗茨(Roots)泵	(167)
§2.3.1 阿贝成象原理	(68)	§3.2.5 油扩散泵	(168)
§2.3.2 透射电镜的结构及光路图	(69)	§3.2.6 涡轮分子泵	(171)
§2.3.3 电子衍射几何学(运动学)	(72)	§3.2.7 吸附泵	(175)
§2.3.4 衍衬象的成象原理	(84)	§3.2.8 钛升华泵	(178)
§2.3.5 透射电镜薄膜样品的制备	(105)	§3.2.9 溅射离子泵	(180)
§2.4 扫描电子显微术(SEM)	(107)	§3.2.10 冷凝泵	(184)
§2.4.1 扫描电镜工作原理	(107)		
§2.4.2 扫描电镜的结构	(108)		
§2.4.3 扫描电镜的性能	(108)		
§2.4.4 扫描电镜的工作模式、衬度机制	(112)		
§2.4.5 扫描电镜样品制备	(117)		

§ 3.3 真空计	(188)
§ 3.3.1 真空计分类	(188)
§ 3.3.2 真空计的主要性能指标	(188)
§ 3.3.3 热导真空计——热电偶真空计与 电阻真空计	(189)
§ 3.3.4 电离真空计	(194)
§ 3.4 真空系统	(207)
§ 3.4.1 真空系统的性能指标	(207)
§ 3.4.2 各种常用真空机组	(208)
参考文献	(212)
第四章 低温物理实验技术	(214)
§ 4.1 低温的获得及低温液体的使 用	(214)
§ 4.1.1 气体的液化	(215)
§ 4.1.2 低温液体及其使用	(220)
§ 4.1.3 1K以下超低温技术的概述	(225)
§ 4.2 低温温度的获得、控制及低 温恒温器	(227)
§ 4.2.1 低温液体的减压降温及控温	(227)
§ 4.2.2 中间温度的获得与控制	(229)
§ 4.2.3 低温恒温器	(233)
§ 4.3 超导电技术	(242)
§ 4.3.1 超导体的基本性质	(243)
§ 4.3.2 超导材料和超导磁体	(246)
§ 4.3.3 超导量子干涉仪(SQUID)	(252)
§ 4.3.4 高临界温度超导体	(258)
§ 4.4 低温物理实验技术应用简介	(260)
参考文献	(261)
第五章 微波原理与测量	(263)
§ 5.1 引言	(263)
§ 5.2 电磁场理论	(266)
§ 5.2.1 麦克斯韦方程、边界条件、波动 方程	(266)
§ 5.2.2 矩形波导管中的主型波—— TE ₁₀ 波	(269)
§ 5.2.3 波导管和同轴线	(275)
§ 5.2.4 谐振腔	(279)
§ 5.3 等效电路理论	(283)
§ 5.3.1 传输线方程和它的解	(283)
§ 5.3.2 传输线的工作状态	(285)

§ 5.3.3 传输 TE ₁₀ 波的矩形波导管与双线 的等效性	(291)
§ 5.3.4 谐振腔的等效电路	(292)
§ 5.4 微波信号源和微波元件	(299)
§ 5.4.1 小功率微波振荡器	(299)
§ 5.4.2 微波信号源	(302)
§ 5.4.3 常用的微波元件	(303)
§ 5.4.4 铁氧体的微波特性和非互易器件	(304)
§ 5.5 微波测量方法	(306)
§ 5.5.1 驻波测量	(306)
§ 5.5.2 功率测量	(309)
§ 5.5.3 频率测量	(310)
§ 5.5.4 谐振腔 Q 值的测量	(311)
§ 5.6 微波作为重要的科研手段	(312)
§ 5.6.1 用驻波法测量介质的介电常数和磁 导率	(312)
§ 5.6.2 用谐振腔法测量介质的介电常数 和磁导率	(315)
§ 5.6.3 用谐振腔法研究微波磁共振	(318)
§ 5.6.4 用微波法测定铁氧体材料的磁晶各 向异性常数和饱和磁化强度	(320)
参考文献	(322)
第六章 磁性测量	(323)
§ 6.1 引言	(323)
§ 6.2 磁场的测量	(323)
§ 6.2.1 磁通法	(324)
§ 6.2.2 霍尔效应法	(329)
§ 6.2.3 核磁共振法	(331)
§ 6.2.4 弱磁场的测量	(335)
§ 6.3 静态及动态磁性的测量	(341)
§ 6.3.1 积分器法	(341)
§ 6.3.2 振动样品磁强计(VSM)	(344)
§ 6.3.3 磁天平	(348)
§ 6.3.4 交流电桥	(352)
§ 6.4 研究微观磁结构的几种方法	(356)
§ 6.4.1 中子衍射	(357)
§ 6.4.2 核磁共振(NMR)	(362)
§ 6.4.3 穆斯堡尔效应	(367)
参考文献	(373)
第七章 传感器	(374)
§ 7.1 总论	(374)

§7.2 光传感器的种类及光传感器的 主要参数	(376)	§8.4 重复信号的时域平均	(404)
§7.2.1 响应度	(376)	§8.4.1 信号平均	(404)
§7.2.2 光谱响应范围	(377)	§8.4.2 Boxcar 平均器——扫描型信号平均 技术	(487)
§7.2.3 响应时间	(377)	§8.4.3 多点信号平均器——数字平均 技术	(495)
§7.2.4 噪声等效功率和可探测率	(379)	§8.4.4 仪器实例和应用举例	(500)
§7.2.5 线性度	(381)	§8.5 微弱光检测	(503)
§7.3 紫外至红外的量子探测器 ..	(382)	§8.5.1 概述	(503)
§7.3.1 光电倍增管	(382)	§8.5.2 光子计数技术的原理	(504)
§7.3.2 光电导器件	(397)	§8.5.3 现代光子计数技术的进展和应用 举例	(517)
§7.3.3 结型光探测器	(401)	§8.5.4 光学多通道分析器	(519)
§7.3.4 雪崩光电二极管	(406)	§8.6 各种微弱信号检测技术的特点 比较和选用指南	(523)
§7.3.5 电荷耦合器件(CCD)	(407)	参考文献	(525)
§7.4 热探测器	(409)	第九章 信号的波形测量技术——	
§7.4.1 探测器的温升	(409)	示波器	(526)
§7.4.2 测辐射热器	(410)	§9.1 概述	(526)
§7.4.3 温差电偶与温差电堆	(412)	§9.1.1 示波器的功用	(526)
§7.4.4 高莱池	(413)	§9.1.2 示波器的分类	(526)
§7.4.5 热释电探测器	(414)	§9.1.3 示波器的发展过程和目前的水平 ..	(527)
§7.5 相干或外差探测	(418)	§9.2 示波器的基本组成和主要工作 特性	(529)
§7.6 其他探测器	(421)	§9.2.1 现代示波器的时间波形显示原理 ..	(529)
§7.6.1 温度传感器	(421)	§9.2.2 示波器的主要工作特性	(530)
§7.6.2 磁传感器	(424)	§9.3 示波器的多信号显示和双扫描 技术	(534)
§7.6.3 压力传感器	(425)	§9.3.1 示波器的触发特性	(534)
§7.6.4 气敏传感器	(428)	§9.3.2 多信号显示	(536)
参考文献	(429)	§9.3.3 双扫描技术	(539)
附录 各种光电探测器的性能	(431)	§9.3.4 通用示波器实例	(544)
第八章 微弱信号检测技术	(432)	§9.4 取样示波器	(546)
§8.1 引言	(432)	§9.4.1 取样技术的原理	(547)
§8.2 微弱信号检测基础	(433)	§9.4.2 取样示波器的组成及工作原理 ..	(551)
§8.2.1 噪声及等效噪声带宽	(433)	§9.4.3 取样示波器的主要性能指标	(554)
§8.2.2 信号和信噪比	(440)	§9.4.4 取样示波器的使用	(555)
§8.2.3 前置放大器的噪声系统	(441)	§9.4.5 单次取样记录仪	(559)
§8.2.4 接地与屏蔽	(449)	§9.5 存贮示波器	(560)
§8.3 相干检测——锁定放大器 ..	(450)	§9.5.1 存贮示波管的工作原理	(560)
§8.3.1 概述	(450)	§9.5.2 存贮示波器的工作特性	(565)
§8.3.2 相干检测原理	(452)		
§8.3.3 锁定放大器	(457)		
§8.3.4 近代锁定技术	(462)		
§8.3.5 仪器实例和应用	(472)		
§8.3.6 数字相敏检测	(480)		

§9.6 数字存储示波器	(568)
§9.6.1 DSO 的基本工作原理及分类	(568)
§9.6.2 DSO 的基本特性及主要指标	(570)
参考文献	(572)
第十章 数字化测量技术	(573)
§10.1 数字频率计	(575)
§10.1.1 数字频率计的工作原理	(575)
§10.1.2 数字频率计的测量误差	(577)
§10.2 数 - 模转换	(579)
§10.2.1 权电阻 D/A 转换器	(579)
§10.2.2 梯形电阻 D/A 转换器	(580)
§10.2.3 串行 D/A 转换器	(583)
§10.2.4 斜坡式 D/A 转换器	(584)
§10.2.5 D/A 转换器的性能指标	(585)
§10.3 模 - 数转换	(586)
§10.3.1 取样、保持	(587)
§10.3.2 并联直接比较型 A/D 转换器	(588)
§10.3.3 随动跟踪型 A/D 转换器	(590)
§10.3.4 逐次逼近型 A/D 转换器	(591)
§10.3.5 斜坡电压比较型 A/D 转换器	(592)
§10.3.6 双斜式 $V-T$ 转换型 A/D 转换器	(594)
§10.3.7 电荷平衡式 $V-f$ 变换型 A/D 转换器	(596)
§10.4 模 - 模转换	(598)
§10.4.1 AC/DC 电压的转换	(598)
§10.4.2 欧姆 - 电压($\Omega-V$)转换	(602)
§10.4.3 相位 - 电压($\varphi-V$)转换	(605)
§10.5 A/D、D/A 转换的应用	(607)
§10.5.1 $3\frac{1}{2}$ 位数字万用表	(607)

§10.5.2 双积分、三次采样的高精度数字电压表	(613)
参考文献	(614)
第十一章 微机的接口及其应用	(616)
§11.1 微机在实验中的应用简介	(616)
§11.1.1 概述	(616)
§11.1.2 微机接口系统的基本概念	(617)
§11.2 微机的输入/输出	(619)
§11.2.1 CPU 对 I/O 设备的寻址方式	(619)
§11.2.2 I/O 设备与微机间的数据传送方式	(620)
§11.2.3 标准接口芯片	(623)
§11.2.4 标准接口总线	(624)
§11.3 模 - 数(A/D)转换通道和数 - 模(D/A)转换通道	(627)
§11.3.1 采样 - 保持(S/H)电路	(627)
§11.3.2 模拟量多路开关	(628)
§11.3.3 电平转换、匹配电路和低通滤波电路	(629)
§11.3.4 A/D 转换器与 CPU 的连接	(630)
§11.3.5 数据采集系统的误差分析	(633)
§11.3.6 D/A 转换器与 CPU 的连接	(634)
§11.3.7 ADA-168 A/D、D/A 转换板	(636)
§11.4 微机应用实例	(640)
§11.4.1 光学频谱分析仪的数据采集系统	(640)
§11.4.2 连续扫描光谱仪的控制系统	(643)
§11.4.3 真空镀膜的温度自动控制系统	(647)
§11.4.4 智能仪器	(650)
参考文献	(653)
索引	(655)

第一章 光谱技术

光谱技术是一门古老而又充满青春活力的近代物理实验技术。它是研究原子、分子、固体、等离子体结构、辐射与周围物质相互作用的重要工具，也广泛地应用于化工、医药等工业生产。

早在 1666 年，牛顿(Newton)用三棱镜发现了白光是由不同颜色的单色光组成的，就提出了光谱术的概念，但此后近二百年内光谱术并没有什么实际的应用。虽然在十九世纪中期已测量了大量光谱线，如夫琅和费(Fraunhofer)测量了太阳光谱中的吸收谱线和火焰中的发射谱线等。直到 1860 年左右，基尔霍夫(Kirchhoff)和本生(Bunsen)才确定了光谱线的波长和原子之间的对应关系，从而开创了一种新的化学分析方法——光谱化学分析方法。随后几年内，用光谱学的方法陆续发现了一些新元素，如铷、铯、铟等。1868 年还从太阳光谱中发现了氦。到现在，光谱方法还是估计其他星球上原子和分子相对丰度的重要手段。如今，光谱技术在地质、冶金、医药、考古等部门广泛用于测定物质的成分和含量。

1885 年后，巴耳末(Balmer)、里德伯(Rydberg)等提出了氢原子光谱线的经验公式，为建立原子结构与光谱线之间的关系奠定了基础。1896 年塞曼(Zeeman)发现了光谱线在磁场中的分裂现象，洛伦兹(Lorentz)用经典理论解释了塞曼效应，认为这是由振动的带电粒子造成的，它与带电粒子的荷质比有关。接着，1897 年汤姆孙(Thomson)发现了电子，1911 年卢瑟福(Rutherford)提出了原子的行星模型。根据这些实验结果，1913 年玻尔(Bohr)提出了行星模型，初步解决了氢原子结构和光谱之间的关系。从此光谱成为研究微观结构的重要工具。20 世纪 20 ~ 30 年代，原子物理的迅速发展在一定程度上要归功于光谱工作的成果。现在光谱范围已从软 x 射线、紫外一直扩展到微波和射频波段。

1859 年基尔霍夫制作的光谱仪已包含了现代光谱仪的主要部分：平行光管、棱镜和望远镜。这种通过望远镜用眼睛观察光谱的仪器称为分光镜(spectroscope)；如果在望远镜的后焦面上用照相底片来记录光谱，则称为摄谱仪(spectrograph)；而用光电探测器记录光谱的仪器称为光度计(spectrometer)。分光光度计(spectrophotometer)则是一种双光束光度计，单色光被分为两束，一束通过被测物，另一束通过标准样品，最后记录两束光强的比值。它通常用于测量吸收光谱，也可利用附件测量反射光谱。如果仪器不带光电探测器，在它的成象平面上开一出射孔，则称为单色仪(monochromator)，转动色散元件可使不同波长的单色光依次通过出射孔射出。

传统光谱仪的色散元件是棱镜和光栅，在光谱分辨率要求不高的场合(如遥感需要的地物光谱)也可用渐变滤光片。它是一种圆形干涉滤光片，其透射光的波长可随滤光片的转角而连续变化。

根据干涉原理制作的傅里叶变换光谱仪(Fourier transform spectrometer)是一种没有色散元件的光谱仪。它是传统的迈克耳孙干涉仪和计算机相结合的产物，广泛地用于红外和远红外光谱波段，它是这一波段最重要的光谱仪。法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer)

是另一种干涉光谱仪，具有很高的分辨本领，在单色性极高的激光出现后，应用这种光谱仪的场合便越来越多了。

随着激光的出现，光谱仪的概念也在发展、变化。如有了连续可调激光器后，可直接得到高强度的单色光，因而可省去单色仪，使整套设备简化。激光的高亮度促进了高分辨率光谱学的发展，利用饱和光谱、双光子吸收光谱等非线性光谱可获得无多普勒展宽的光谱线，光谱分辨本领可达 10^{10} ，比传统光谱仪的分辨本领高 10^5 以上。用锁模技术得到的激光脉冲宽度已降到 10^{-14} 秒，这种皮秒量级的时间分辨光谱是研究原子、分子瞬态过程的重要手段。

本章先介绍常规的棱镜和光栅光谱仪，接着介绍干涉光谱仪，包括傅里叶变换光谱仪和法布里 - 珀罗光谱仪。最后简单介绍各种激光光谱技术。本章中涉及的一些光学探测器和信号处理技术将在以后几章中介绍。

§.1.1 常用的光谱仪

§.1.1.1 概 论

常用的光谱仪是利用折射、衍射现象使光线色散，采用棱镜、光栅作为色散元件。描述光谱仪的主要参数有光谱范围、分辨本领、色散和聚光本领。光栅的光谱范围可从 x 波段一直到微波波段，棱镜的光谱范围则从 200nm 至 $40\mu\text{m}$ 。一般讲，光栅的光谱分辨本领要比棱镜高一个数量级。在衍射角不大时，光栅的色散是线性的，而棱镜的色散是非线性的。聚光本领和分辨本领有关，在聚光本领相等的条件下，光栅的分辨本领大于棱镜的分辨本领。但光栅光谱有级的交叠现象，而棱镜光谱不存在这个问题。

一、结构

常用光谱仪由准直、分光及聚焦成像三部分构成。图 1.1 是一常用光谱仪的示意图，色散元件可以是棱镜也可以是光栅。入射狭缝的宽度为 a_1 ，高度为 b_1 ，准直透镜的焦距为 F_1 ，孔径为

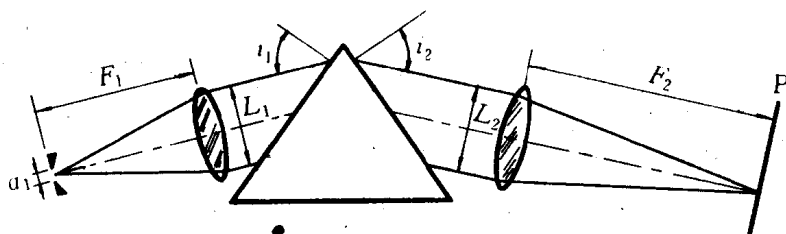


图 1.1 常用光谱仪示意图。

L_1 ，聚焦透镜的焦距为 F_2 ，孔径为 L_2 。P 为出射狭缝平面，在该平面上放一照相底片就构成一台摄谱仪，可拍摄到色散后的全部光谱。如在这位置上开一个宽度为 a_2 、高度为 b_2 的出射狭缝就

构成一台单色仪，移动出射狭缝或转动棱镜(或光栅)可改变出射的单色光波长。如果在出射狭缝后面放一光电探测器来测量各单色光的强度，就成了一台光度计。

聚光系统将光源成象于入射狭缝，狭缝位于准直透镜的焦面上。入射光经准直透镜后成为一束平行光。复色平行光经棱镜或光栅色散变为不同方向的单色平行光。会聚透镜将各单色光成象于焦面上的不同位置。根据几何成象关系，成象面上象的宽度 a' 与入射狭缝的宽度 a_1 之间的关系为

$$a' = \frac{F_2}{F_1} a_1 \quad (1-1)$$

a' 也就是光谱线的宽度。上式说明光谱线就是入射狭缝所成的象。从几何光学的角度看，宽缝得到宽谱线，窄缝得到窄谱线，显然，谱线越窄光谱分辨本领越高，即狭缝越窄越好。但考虑到光学系统的衍射现象，这个结论就不正确，入射狭缝有个最佳宽度。

二、色散

色散率是描述光谱仪性能的一个重要参数，它量度光谱仪色散后不同波长光线的分开程度。设波长为 λ 和 $\lambda + d\lambda$ 的光色散后其偏向角为 θ 和 $\theta + d\theta$ ，则角色散率 D_θ 的定义为

$$D_\theta = \frac{d\theta}{d\lambda} \quad (1-2)$$

线色散率 D_l 的定义是在聚焦透镜象平面上两个象之间的线间距 dl ，即

$$D_l = \frac{dl}{d\lambda} \quad (1-3)$$

若聚焦透镜的焦距为 F_2 ，则线色散率 D_l 与角色散率 D_θ 的关系为

$$D_l = F_2 D_\theta \quad (1-4)$$

在相同角色散条件下，增大成象透镜的焦距可提高线色散。实际上常用的是线色散率的倒数 $d\lambda/dl$ ，在 SI 单位中它的单位是 $\text{nm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，传统用的是 $\text{\AA} \cdot \text{mm}^{-1}$ ，即谱面上相距 1 毫米的两条谱线的波长差。

三、分辨本领

光谱仪的分辨本领指分辨两条波长非常接近的谱线的能力。如果波长为 λ 和 $\lambda + \delta\lambda$ 的两条谱线恰好能被分辨，则分辨本领 R 的定义为

$$R = \lambda / \delta\lambda = \nu / \delta\nu = \tilde{\nu} / \delta\tilde{\nu} \quad (1-5)$$

式中 ν 是频率， $\tilde{\nu}$ 是波数。

分辨本领与仪器函数有关。对理想的无象差棱镜或光栅光谱仪而言，仪器函数由光谱仪孔径光阑的衍射决定，而光谱仪的孔径光阑往往取决于透镜的直径或棱镜的尺寸。通常可用一宽度为 D ，高度为 H 的矩形孔作为孔径光阑。此孔径光阑的横向衍射光强分布为

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (1-6)$$

$$\alpha = \frac{\pi D \varphi}{\lambda} \quad (1-7)$$

式中 φ 是衍射角, λ 为波长. 其强度分布见图 1.2(a).

在象平面上, φ 与距离 x 的关系为

$$\varphi = x/F_2 \quad (1-8)$$

当入射狭缝无限窄时, 光谱仪象平面上的光强分布函数为

$$D(x) = F_2 \left[\frac{\sin(\pi D x / \lambda F_2)}{\pi D x / \lambda F_2} \right]^2 \quad (1-9)$$

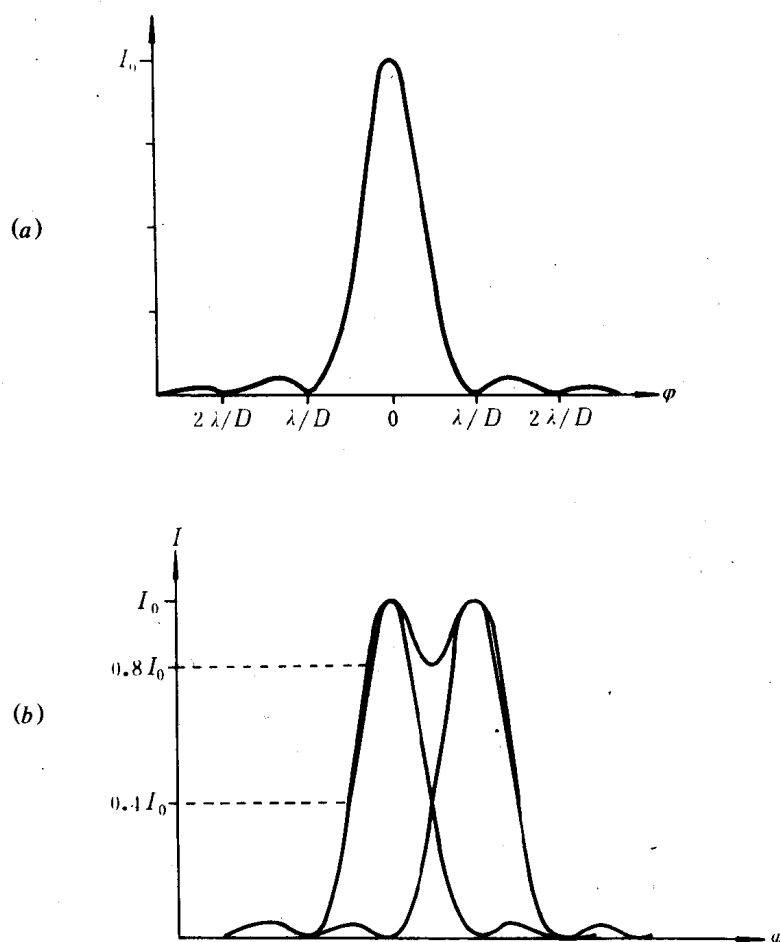


图1.2 (a)夫琅和费衍射的强度分布, (b)瑞利判据的图示.

根据瑞利判据, 当一谱线的极大值落在另一谱线第一极小值的位置时, 这两条谱线恰好能分辨开. 从图 1.2(a)可见, 符合此条件的角宽度 $\delta\varphi = \lambda/D$, 线宽度为 $\lambda F_2/D$. 如仪器的角色散率 $D_\theta = \delta\theta/\delta\lambda$, 此时 $\delta\theta = \delta\varphi$, 故恰好能分辨开的两谱线的波长差 $\delta\lambda$ 为

$$\delta\lambda = \lambda / D D_\theta \quad (1-10)$$

因而由瑞利判据确定的理论分辨本领 R_0 为

$$R_0 = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = DD_0. \quad (1-11)$$

即 R_0 与光谱仪的孔径光阑直径 D 和角色散率 D_0 成正比. 加大仪器的通光孔径(即透镜和色散元件的尺寸)及提高色散元件的角色散率可提高仪器的分辨本领. 仪器的实际分辨本领可接近 R_0 , 但决不可能超过此值.

(1-9)式的仪器函数是在入射狭缝为无穷小的条件下得出的, 而实际的入射缝宽为 a_1 , 因而在象平面上光强分布函数 $F(x)$ 由下述积分决定,

$$F(x) = \int_{x - \frac{1}{2}a_1'}^{x + \frac{1}{2}a_1'} D(x) dx, \quad (1-12)$$

式中
$$a_1' = \frac{F_2}{F_1} a_1. \quad (1-13)$$

实际缝宽 a_1 与由(1-9)式确定的第一极小值的距离 $\lambda F_2/D$ 之比 u 称为简约缝宽,

$$u = \frac{a_1 D}{\lambda F_2}. \quad (1-14)$$

根据(1-12)式算出的简约缝宽 u 与象的半宽度(强度为峰值强度一半时所对应的宽度, 也以 $F_2\lambda/D$ 为单位) U 的关系如图 1.3(a)所示. 由图可见, 当入射缝宽为无穷窄时, 象的半宽度为 $\lambda F_2/D$. 缝宽稍微增宽象宽并不太变, 当缝宽为 $\lambda F_2/D$, 即 $u=1$ 时, 象宽才有显著的变化. 当

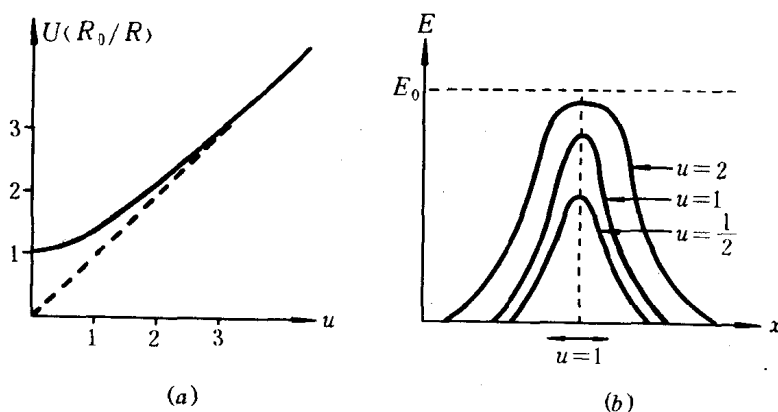


图 1.3 (a)象的半宽度 U 和入射宽度 u 的关系.

(b)象平面上的照度分布, $u = \lambda F_2/D$ 为最佳狭缝宽度, E_0 为狭缝无穷宽时的照度

$u \gg 1$ 时, 象宽与缝宽几乎相等, 衍射的作用可忽略不计. 对摄谱仪而言, 图 1.3(a) 的曲线也表明了理想分辨本领 R_0 与实际分辨本领 R 之比(R_0/R)与 u 的关系. 图 1.3(b) 为不同缝宽时象平面上的照度分布. 在 $u \leq 1$, 即入射狭缝 $a_1 \leq \lambda F_2/D$ 时, 照度的半宽度没什么变化, 而照度的绝对值变化较大; 当 $u > 1$ 时, 半宽度明显增加, 而照度增加趋缓.

在单色仪或光度计情形, 象平面上有一宽度为 a_2 的出射狭缝, 其出射的光通量 $G(x)$ 为

$$G(x) = \int_{x - \frac{1}{2}a_2}^{x + \frac{1}{2}a_2} F(x) dx \quad (1-15)$$

$G(x)$ 是随光谱仪扫描而改变的量。据此式算出的简约入射缝宽 u 与(理论分辨本领和实际分辨本领之比) R_0/R 的关系见图 1.4。在 $u \ll 1$ 时, $R \simeq R_0$, 当 $u=1$ 时, $R=0.65R_0$ 。对 $u \gg 1$ 的情况, 衍射效应可忽略不计, 这时 $F(x)$ 是一宽度为 a_1 的矩形函数, $G(x)$ 则是一基底为 $2a_1$ 的三角形函数, 其半宽度是 a_1 , 即是 $\lambda F_2/D$ 的 u 倍, 所以实际分辨本领 R 是理论分辨本领 R_0 的 $1/u$, 即

$$R = R_0 / u \quad (u \gg 1) \quad (1-16)$$

四. 聚光本领

现在我们讨论如何提高光谱仪探测的信噪比。

对光度计来讲, 是如何提高出射的光通量, 对摄谱仪则是如何增加象的照度。

设入射狭缝的亮度为 L_λ , 面积为 A_s 。由图 1.1 可知, $A_s = a_1 b_1$ 。光束所张的立体角 Ω 为 A_1/F_1^2 , 其中 A_1 是系统的最大通光面积, 等于孔径光阑的高度 H 和宽度 D 的乘积。入射的光通量 φ_λ 为

$$\begin{aligned} \varphi_\lambda &= L_\lambda A_s \Omega \\ &= L_\lambda a_1 b_1 \frac{A_1}{F_1^2} \end{aligned} \quad (1-17)$$

φ_λ 是通过入射狭缝进入光谱仪的有效光通量。由于光学材料的吸收和光学面的反射, 探测器接收到的光通量 φ'_λ 为:

$$\varphi'_\lambda = L_\lambda \tau_\lambda a_1 b_1 \frac{A_1}{F_1^2} \quad (1-18)$$

式中 τ_λ 为仪器的透射率。定义

$$\mathcal{L}(\lambda) = \frac{\varphi'_\lambda}{L_\lambda} \quad (1-19)$$

为仪器的聚光本领, 它与入射狭缝照明情况 L_λ 无关, 而是一个仅与入射狭缝的面积 $a_1 b_1$ 、光束所张的立体角 A_1/F_1^2 和透射率 τ_λ 有关的仪器参数。

一般的光度计常采用对称光路, 即 $F_1' = F_2$, $a_1 = a' = a_2$, $b_1 = b' = b_2$, 式中 a_2 , b_2 是出射狭缝的宽度和高度, 且 $A_1 = HD$, 因而(1-19)式可写成

$$\mathcal{L}(\lambda) = \tau_\lambda \frac{HD}{F_2^2} a_1 b_2 \quad (1-20)$$

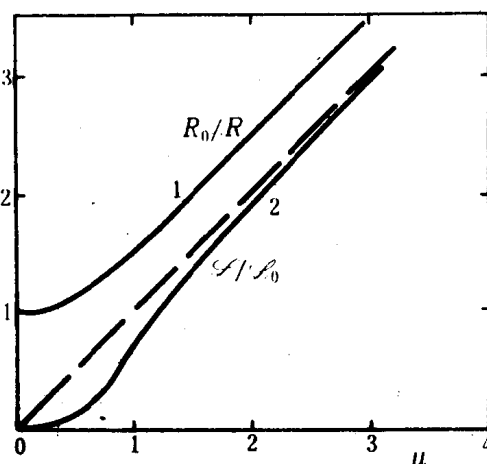


图 1.4 单色仪的简约入射缝宽 u 和 R_0/R 的关系。

把由(1-14)式定义的简约缝宽 u 代入上式, 可得

$$\mathcal{S}(\lambda) = \tau_\lambda H \beta \lambda u \quad (1-21)$$

式中 $\beta = b_2/F_2$ 是出射狭缝的角宽度. 对确定的波长 λ 而言, $\mathcal{S}_0 = \tau_\lambda H \beta \lambda$ 是常数, 故(1-21)式也可写成

$$\mathcal{S}(\lambda) = \mathcal{S}_0 u \quad (1-22)$$

图 1.4 中画出了 $\mathcal{S}/\mathcal{S}_0$ 与 u 的关系. 由图可见, 当狭缝 $u < 1$ 时, 因衍射展宽了象的宽度, 使 $\mathcal{S}$ 急剧下降, 而此时分辨本领趋向理论值 R_0 . 当 $u \gg 1$ 时, $\mathcal{S}$ 随 u 线性增加, 但分辨本领 R 却与 u 成反比, 结合(1-16)式可得

$$\mathcal{S}R = \mathcal{S}_0 R_0 \quad (u \gg 1) \quad (1-23)$$

即分辨本领 R 与聚光本领 $\mathcal{S}$ 的乘积是个常数. 综合考虑两者的要求和影响, 一般认为 $u = 1$, 即缝宽为 $\frac{F_2}{D} \lambda$ 是最佳缝宽. 这时 $R = 0.65R_0$, $\mathcal{S} = 0.67\mathcal{S}_0$, 两者得到了兼顾. 对大多数光谱仪而言, F_2/D 的值在 10—25 的范围, 故对近红外至近紫外波段, 最佳缝宽 $a_1 = a_2$ 为 $10\mu\text{m}$ 的量级. 对远紫外, 理论上最佳缝宽小于 $1\mu\text{m}$, 但由于乳胶版的不均匀以及机械调准上的问题, 实际使用缝宽略小于 $10\mu\text{m}$.

对摄谱仪而言, 感光底片的密度与底片上的照度成正比, 即与单位面积所接收的辐射通量成正比. 由(1-1)式可知, 象的宽度 $a' = \frac{F_2}{F_1} a_1$, 高度 $b' = \frac{F_2}{F_1} b_1$, 象的面积 $A' = a' b'$. 入射的总通量 φ_λ 由(1-18)式决定, 因而象平面上的照度 E_λ 为

$$\begin{aligned} E_\lambda &= \frac{\varphi_\lambda}{A'} = L_\lambda \tau_\lambda \frac{A_1}{F_1^2} \frac{a_1 b_1}{a' b'} \\ &= L_\lambda \tau_\lambda \frac{A_1}{F_2^2} \end{aligned} \quad (1-24)$$

即摄谱仪底片上的密度与入射狭缝的亮度 L_λ 及通光面积 A_1 成正比, 与会聚透镜焦距 F_2 的平方成反比, 而与入射狭缝的大小和准直透镜焦距 F_1 无关.

显然, (1-24)式并没有考虑衍射的影响, 是仅根据几何光学的关系得出的结论. 图 1.3(b)是考虑了衍射效应后所得的结果. 考虑到分辨本领的要求, 摄谱仪的最佳入射缝宽 a_1 仍为 $\frac{F_2}{D} \lambda$.

五. 照明系统

由(1-18)式和(1-24)式可知, 光度计的出射通量和摄谱仪的照度均与入射狭缝的亮度 L_λ 成正比, 即与狭缝的照明情况有关. 图 1.5 为单透镜照明的示意图. (a) 为照明光束的张角大于准直透镜张角 L_1/F_1 的情况, 此时, 一部分光线将射到光谱仪壁上, 这势必增加光谱仪的杂散光强度, 使接收的信噪比下降. 解决的办法如(b)所示, 增加一孔径光阑, 使照明光束的张角与准直透镜的张角相匹配, 并将光源正确地成象于出射狭缝面上. 对小光源则可采用(c)所示的办法, 在狭缝上得到一放大象, 同时用一孔径光阑限制光束的张角.

对自身亮度不均匀的光源, 采用上述照明办法时其入射狭缝上的象也是不均匀的, 从而光