

912592

光电测试仪器 原理及应用

[苏] Л. А. 诺维茨基 主编
李世阳 等译 李世阳 唐家驹 审

中国计量出版社

光电测试仪器原理及应用

[苏]Л.А.诺维茨基 主编

李世阳 等译 李世阳 唐家驹 校

中国计量出版社

内 容 简 介

本书阐明了科学研究用光电仪器(光谱、光度、干涉、比影、偏振和测量仪器)的结构与作用原理,并对各精度等级一系列类型的仪器给以简要的叙述。

书中还写进了研制这些仪器时所使用的新的基本原理及其计量保证。

本书供高等学校仪器制造专业学生用作教材,该书是根据《科学研究光电仪器》课程大纲而写的,也可作为从事光学仪器研究、制造和使用的设计人员、工艺员和研究者使用。

光电测试仪器原理及应用

〔苏〕Л. А. 诺维茨基 主编

李世阳 等译

李世阳 唐家驹 审

责任编辑 朱桂兰

—♦—

中国计量出版社出版

北京和平里11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—♦—

开本 850×1168/32 印张 15.75 字数 414 千字

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数 1—4 100

ISBN 7-5026-0297-6/TB·246

定价 8.20 元

译 者 的 话

科学技术的进步同研制高精度的测量仪器是分不开的。现代各种类型的测量仪器中，居首位的应该是光电测量仪器。全面论述光电测试仪器原理及应用的书籍，目前国内尚缺乏。广大工程技术人员以及从事这方面工作的教学人员都渴望有一本比较好的参考书。我们翻译这本书的基本出发点就是为满足这一需求。另外，还考虑到原著有以下特点：

(1) 书中的内容包括的范围比较全。

(2) 该书在写法上是采用从基本概念、仪器结构原理、使用到发展远景，层次清晰，可以给读者一个比较系统和完整的概念。

(3) 书中所列举的基本仪器比较典型，对近几年所研制出的新型仪器重点予以叙述。

(4) 本书主编诺维茨基教授有较高理论水平与实践经验，版本内容新颖。

(5) 本书不仅可使读者了解光电测试仪器的原理、结构、使用性能等方面的基本知识，还可帮助读者解决生产、科研中所遇到的问题。

本书原文名称为《科学研究用光电仪器》。原著内容既包括原理又包括应用，考虑到名称与内容的一致性，我们改译为《光电测试仪器原理及应用》。

译者希望通过本书的翻译出版，对广大读者有所帮助，对培养光电测试仪器专业人材和发展我国的光电测试技术起到积极作用。

本书的第一章由杨国珍同志译出，第二章由郭绍宏同志译

出；第三章由刘毓兰同志译出；第四章和原序、绪论由李世阳同志译出；第五章由崔俊凯同志译出。全书由李世阳同志负责统稿和校译，由唐家驹同志担任主审。

本书的出版得到国家技术监督局的领导和中国计量出版社的领导及有关同志的大力支持和帮助，译者在此一并致深切谢意。

由于译者水平所限，译文中不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

译者

1989年2月

原 序

科学研究光电仪器这门课，是完成十年学业而进入国家高等学校光学专业全日制的第四和夜大的第五年级教学计划中的一门课。然而，按照所命名的这门课，完全适合教学大纲的教材，到目前还没有。

本书是作者在以 H.Э. 鲍曼命名的莫斯科高等技术专科学校多年所讲授的科学研究光电仪器教程为基础而写成的。这个教程是符合科学研究光电仪器这门课的教学大纲的。

书中阐明了用于科学研究的光电仪器的结构和作用原理，同时叙述了每种类型的一系列仪器和仪器的元件基础理论（辐射源、初级测量转换器等），介绍了一系列测量的计量保证（国家原始的和专用的基准、比较样件、标准的文献资料等）。

作者将在各种文献资料中载有的一些专用光学材料的性质适当地写进去，作为参考资料。这些资料的综述可供人们设计光电仪器时、编制仪器的制造工艺时以及当高等学校仪器制造专业的大学生们在完成课程和毕业设计时合理的和有根据的选用材料。

根据科学研究光电仪器的教学大纲和仪器的工作原理将仪器进行相应的分类。每类仪器（光谱仪、光度仪、干涉仪、偏振仪、测量仪）分别在各章中叙述。各章都具有自成体系的特点，并且每章所研究的内容与其他章都有一定的联系。

在编写这本书时，作者根据苏联高等教育部教学大纲，参照其他教程（例如，科学研究时广泛使用的电影和照相设备，其中包括快速的和超速的电影、照相设备，瞄准和自动瞄准仪器等）在教材中针对各种类型的光学仪器进行了叙述。这些仪器的具体型式在本书中没有叙述。

同样还有必要指出第五章的编写原则及其标题《《测量仪器》》。在第一章至第四章中所讲述的所有仪器，同样也是用着测量的仪器。作者采用这种办法来划分第五章，对于整个的现代各种用途测量仪器都这样来进行分类，还没有应有的计量保证。显然，在将来会出现第五章这样分类仪器的可能性。目前在比色法领域中，已经有一些高精度的设备等投入所建立的国家原始基准和专用工作基准中使用，鉴于这些基准的建成，在科学研究光电仪器这本教科书中，将比色仪划归为测量仪器这一章。同样列入这一章的还有某些其他的仪器。

书中还根据近几年国家的一些主要工厂、科研所和高等学校所研制的一系列仪器的样本资料介绍了一些具体型号的光学仪器，属于这一类的单位有以С.И.瓦维洛夫命名的国立光学学院、苏联物理光学测量科学研究所、莫斯科测地学、航空摄影测量和制图学工程师学院、列宁格勒精密机械和光学学院以及以Н.Э.鲍曼命名的莫斯科高等技术专科学校等。

同时必须指出，书中所研讨的这一系列光电仪器，在国民经济中不仅用在科学研究上，而且也使用在生产实际中，本教材在叙述这些仪器时，作者认为对于目前为数不多且用途范围比较窄的相应仪器也给予了适当的包括。

在教材的叙述上，按照高等学校教学大纲的范围，作者拟从读者所熟悉的物理和几何光学的基本概念、光学系统原理、装配和调整工艺进行讲述。

本书所使用的物理量其名称、符号符合于苏联科学院科学技术名词术语委员会所推荐的ГОСТ 7601—78和СТ C9B 1052—78标准。

凡是书中用的有关标准都是摘自相应的苏联国家标准、全苏标准和通用标准。

本书的第一章是由А.С.戈敏尤科编写，第二和第四章由Л.А.诺维茨基编写，第三章由В.Е.祖巴列夫编写，第五章和附录是由А.М.霍罗霍夫编写。

绪 论

近几年在物理学领域中，科学技术进步的方面应当首先指出的是宇宙火箭技术、天文学、原子能、机器人技术、激光技术的发展上，远红外线和真空紫外线光谱部分研究的扩大，物理电子学、等离子物理学、半导体技术、固体物理学、低温学技术、高压和高温技术、脉冲技术的发展等方面。

上述所指出的所有方面其科学研究的成效都同建立高精度的测量装置是分不开的。现代各种类型的测量装置中，居首要位置的乃是光电仪器。

当前科学研究所采用的光电仪器与早在 20~25 年前所使用的仪器是有重要区别的。现代的光学仪器在广阔的光谱和功率范围内以及在强光源、大的温度和压力落差的条件下，不论是在连续还是高速流水作业的测量过程中，都能保证被测参数具有高精度和高度的可靠性（直到毫微和次毫微秒的范围）。除此而外，现代的光学仪器能够自动地分析和处理测量结果。

光电仪器的种类中，首先应提到的有光谱仪、光度仪、干涉仪和偏振仪。

光谱仪用来分解单色辐射成分的复杂光谱和用来测量其波长和光强度。借助于现代的光谱仪可以详细的研究各种材料的性质和结构，以及构成它们的光学成分（根据辐射或吸收光谱确定光谱线）。

光度仪用来研究和测量不论是复杂的光谱还是单色光谱辐射光通量的功率参数。借助于这些仪器所解决的课题在于测量光学区间所获得的波的能量，或者测量同这些波动特性有关的光度值。

干涉仪用来制作干涉图片和借助于这些图片用来确定光学物质和其他物质的性质（光学零件表面的状态，光学系统的象差，物体的几何尺寸，薄膜中的现象，确定核力矩及其光谱线机构的超精细，光谱线内部的强度分布，研究不均匀介质，测量液体和气体折射率等）。

建立在光偏振现象基础上的偏振仪，用来获得偏振光和研究在偏振光线中所发生的各种过程。借助于现代的偏振仪可以研究晶体的光学性质，确定玻璃制品中的应力和机器、设备中零件的应力，测量溶液的浓度，研究在电场和磁场中的各种现象。

除了上述所列举的这些种类的光电仪器，应当提到的是极为广泛使用的且有各种不同用途的一类仪器，这类仪器统称为测量仪器。象其他类型的光电仪器一样，随着科学研究所提出的愈来愈新的测量课题，仪器也在不断地改进。现在广泛使用的还有光度测量仪（特别是光电自准直望远镜和光电显微镜）、新型号的显微镜（激光扫描显微镜、具有扫描点的电视显微镜、全息摄影显微镜）、光栅测量仪、比色仪、光学高温测定法的高精度仪器等。

所研究出的新的光学测量方法和科学研究所用光电仪器的结构原理，在国民经济的各个部门得到广泛的采用。借助于各个国营企业所生产的光电仪器来实现测量的统一和准确性。利用国家基准和从最高精度复制而提供的工作基准系统，在实际的尺寸测量中达到了单位的统一和传递。

为了实现上述目标，现在研制了辐射功率的国家单位基准和其光谱密度、能量、光束横截内功率密度分布的标准，动力照度和它的光谱密度标准；动力亮度和它的光谱密度标准；在广阔的光谱和功率范围内辐射力和它的光谱密度标准等。拟定并同时确立全苏检验系统图，这个系统图规定了基准的用途和从基准向使用的测量仪器的尺寸单位传递系统。建立了新的光电仪器元件库，这个元件库包含有透镜光栅、相位屏蔽、新型号的单晶体、电光陶瓷、注射半导体初级测量变换器、新的自动摄影记录介质。

(专用品种的荧光粉、薄磁性漆膜)、宽频带的光度测量仪和示波器等。

在绝对单位制中，在宽光谱、功率和时间范围内测量光学的连续和脉冲辐射特性，所有这一整套首次在我国成为可能。

当然，在光学仪器制造领域中，这些研究的价值取决它在生产中广泛应用的程度所决定。加快掌握新的高精度光电仪器产品的生产，首先由干部和生产工人技术熟练水平和国家的光学工业的状况所决定。目前在莫斯科包曼高等技术学校、莫斯科测量、空测及制图学院、列宁格勒精密机械学和光学研究所以及在国立的某些其他高等学校都正在进行光学工程师的培养。大多数的专科学校技术学校也都在进行光学技术人员的培养。这样的专家培养机构使可用高技能的工程师和工程技术人员充实了国家的光学工业(该光学工业中具有第一流的光学企业)，并促进了我国的光电仪器好于世界新产品的水平，从而增加出口量。

国家科学技术的进步就光电仪器这一事例就可明显的说明。不断发展的各种新的科学、技术领域要求研制新型号的光学仪器。这就导致不仅要扩大设计人员和制造工人的队伍，而且摆在第一议程上的是从根本上提高他们的科学技术水平。最终目的是制造新的光电仪器。这些光电仪器不仅是广泛使用的，而且还有仅供在标准和极度条件下特别高精度测量所需要的科研专用光电仪器，这些科研专用光电仪器本身具有自动测量、计算和测量结果的处理。

目 录

读者的话	(1)
原序	(1)
绪论	(1)
第一章 光谱仪	(1)
§ 1 光谱仪的用途及光谱分析的种类	(1)
§ 2 光电光谱仪的信号变换	(3)
§ 3 光电光谱仪的空间分光滤波器	(15)
§ 4 光谱仪的基本特性	(21)
§ 5 获得辐射光谱成分信息的基本方法	(26)
§ 6 单色仪	(50)
§ 7 光谱仪中狭缝的照明	(67)
§ 8 分光计与分光光度计	(72)
§ 9 用于发射光谱分析的光电仪	(82)
§ 10 干涉式和光栅式光谱仪	(90)
§ 11 激光光谱仪	(109)
第二章 光度仪	(119)
§ 1 基本光度值和单位	(119)
§ 2 光值和能量间的关系	(125)
§ 3 辐射能的反射、吸收和透射	(132)
§ 4 目视光度学原理	(140)
§ 5 目视光度仪器	(156)
§ 6 客观光度学原理	(165)
§ 7 客观光度仪	(203)
§ 8 能量光度学的计量学保证	(217)
第三章 干涉仪与比影仪	(221)
§ 1 干涉仪的理论基础	(221)
§ 2 平板干涉	(233)

§ 3 干涉图的记录方法.....	(240)
§ 4 测量长度用的干涉仪.....	(250)
§ 5 检验表面形状用的干涉仪.....	(259)
§ 6 测量微观不平度用的干涉仪.....	(258)
§ 7 测定液体和气体折射率用的干涉仪.....	(275)
§ 8 研究透明物体不均匀性用的干涉仪.....	(280)
§ 9 位移干涉仪.....	(292)
§ 10 全息干涉仪.....	(300)
§ 11 等离子体诊断学用激光干涉仪.....	(304)
§ 12 记录快速进行过程的干涉测量法.....	(309)
§ 13 用白光工作的双光束干涉仪的特点.....	(312)
§ 14 对干涉仪结构的基本要求.....	(314)
§ 15 比影仪.....	(316)
§ 16 由通用环节组成的比影与干涉系统.....	(321)
第四章 偏振仪器.....	(324)
§ 1 基本概念和定义.....	(324)
§ 2 获得偏振辐射的方法.....	(327)
§ 3 偏振仪器光学零件所用的材料.....	(333)
§ 4 人造各向异性.....	(343)
§ 5 偏振面的旋转.....	(354)
§ 6 偏振光的干涉.....	(359)
§ 7 偏振辐射的分析装置.....	(363)
§ 8 偏振仪器.....	(380)
第五章 测量仪器.....	(399)
§ 1 光电测量显微镜.....	(399)
§ 2 光电自准直仪.....	(420)
§ 3 光栅测量仪.....	(440)
§ 4 扫描显微镜.....	(456)
§ 5 色度仪.....	(463)
附录.....	(488)
参考文献.....	(491)

第一章 光 谱 仪

§1 光谱仪的用途及光谱分析的种类

将电磁辐射分成单色成分——频率谱（或波长谱）的仪器叫光谱仪。它可以测量单色辐射成分的频率和强度。

光辐射光谱成分的研究，能得到关于物质的下列信息：

研究各种物质的特性以及确定它们的原子、分子、晶体结构、聚合物、各向同性态、同分异构态以及中间态产物，如化学根和分子缔合的组织。

用分析未知试样的光谱线（或群谱线）及其光谱强度来确定未知试样的化学成分，我们把这种确定物质成分的物理方法叫做光谱分析。

根据光谱特性、分析形式可以为：辐射分析（按辐射光谱），吸收分析（按吸收光谱），荧光分析（按荧光光谱），综合分析（按组合散射光谱）。

在辐射分析时，用电弧、电火花、特殊喷枪的火焰或激光辐射将试样加热到几千度，炽热的蒸汽或气体发出具有光谱成分的辐射。

如果被试验的物质能够透过辐射，则应采用吸收分析的方法。由辐射源发出的辐射通过该物质的试样，则辐射的一部分能量被该物质的原子或分子所吸收，在辐射光谱中呈现出吸收线或吸收带。按吸收线的形式、位置和强度可以确定被分析试件的成分。吸收分析可分为原子吸收分析和分子吸收分析。它们在测量原理、使用的测量仪器和测量方法等方面是不同的。

综合分析使用以单色辐射激发的固体、液体、气体试样的组合散射光谱。这一物理现象的特点是：在散射的情况下光波波长发生变化，如果仅仅光强变化，则在吸收和反射的情况下光波波长不会变化。

所以发生这种现象是因为辐射量子入射到待分析物的分子上时，只有它的部分能量能够传给分子，而且也可能借助于分子内的能量。因此，散射量子的能量 $h\nu_{\text{pac}}$ 可能小于或大于入射量子的能量 $h\nu_{\text{nad}}$ ，这个差值等于分子固有振动能量 $h\nu_{\text{mol}}$ ：

$$h\nu_{\text{pac}} = h\nu_{\text{nad}} \pm h\nu_{\text{mol}}$$

根据波长的变化量可以判断分子的固有振动频率。

荧光光谱分析是基于某些物质当可激发光照在它上面时发出一种光能的性质为基础的。吸收入射辐射光时，分子处于具有较高能量的不稳定状态，然后经过辐射，转为另一种稳定状态。这时分子的能量介于初始状态能量与不稳定状态能量之间。结果，荧光辐射波长和激发光波长不同。根据荧光辐射的波长可以判断分子处于不稳定状态的能级。

根据分析结果的准确度要求不同，光谱分析可分为定性分析、半定量分析和定量分析三类。

定性分析可以确定物质的成分，而不需指出组成的数量关系。

半定量分析可能给出近似的定量结果，其误差达 50%。

定量分析可以精确地给出试样中被测成分的含量（误差为 5% 或更低）。

每种分析方法都对所使用的仪器提出特殊的要求，都是以所得的光谱特性为条件的。例如，综合分析和荧光分析，需要仪器中的辐射散射抑制度很高的大光强仪器。由于需要在强激发辐射的本底上记录低强度光谱；对于分子吸收分析，是利用复杂的振动转动光谱，一般需要高分辨率的仪器。但是，工业上生产的仪器多数都是通用的，并能用来进行某些分析之用（带有特殊装置及备件）。

§2 光电光谱仪的信号变换

现代的光电式光谱仪是一种复杂的装置，它可以实现各种形式的信号变换。它由光学系统、机械和电子系统组成。这些系统的物理原理有本质的不同，但从数学的观点来描述实际上大多数重要的场合下这些系统是相似的。光谱仪系统的线性和不变性这些性能是共同的。即对光电光谱仪的分析和综合可以采用调频法，该法是根据傅立叶积分变换的原理。

一、光谱仪的原理

让我们看看在典型的光电光谱仪中信号的传输和变换(图1—1)。

光谱仪的基本组成部分是：Ⅰ——激发辐射系统，光谱特性在于所传输的被测物质的某种特性；Ⅱ——分光系统，它具有分析处理入射辐射光的分光特性；Ⅲ——接收记录系统，从分光系统输出的信号变成便于分析的形式。

激发辐射系统通常包括激发装置1(辐射源当通过物质或电弧放电时改变它自己的分光特性)，被测物质2，照明系统3。

分光系统由入口狭缝光栏 S_1 、出口狭缝 S_2 、入口透镜 O_1 、出口透镜 O_2 及色散系统 D 组成。入口狭缝 S_1 和透镜 O_1 用于形成平行光束，这是色散装置正常工作所必需的。色散装置使空间辐射能产生分散(在该角度情况下)使角度坐标与波长 λ 相吻合。出口透镜 O_2 使入口狭缝的单色图象排在 O_2 的焦平面上。出口光栏 S_2 (或出口狭缝)用于把光束分为一个或几个足够窄的光谱区域以便进一步转换为最后所需要的信号。

接收记录系统由放射能接收器4、信号控制装置5和信号显示装置6组成。放射能接收器把光信号(在出口透镜 O_2 焦平面上的照度)变为电信号，这个电信号参数包括试样信号。在控制信号部件中将电信号放大并滤波以便提高信噪比。在这个部件中

还可以借助于接到光谱仪上的计算机变为数字信号，也可以用计算机记忆或贮存信号。信号显示装置给我们提供光谱仪的测量结果，测量结果的表示形式是便于研究者或计算机进一步分析之用。计算机可以把光谱仪和信号显示装置从外部连结起来。当实验目的改变使它能对我们所希望的被检特性上发挥作用。

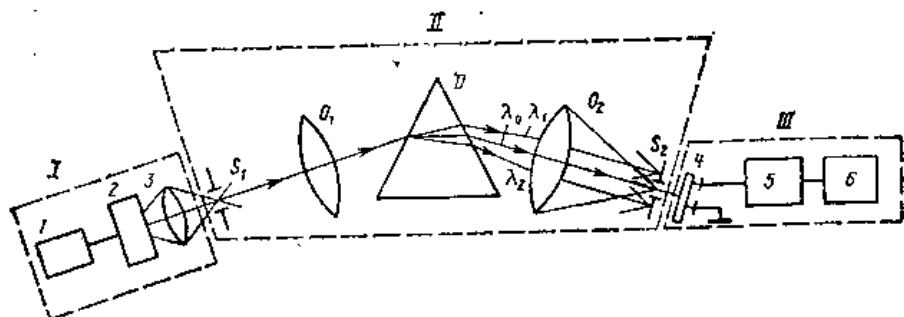


图 1—1 光谱仪的原理图

在光谱仪中还包括操纵仪器工作状态的机械系统，它可以实现分光扫描，改变狭缝工作程序，还可以调制光信号和在双折射仪器中进行光度补偿。光谱仪的全部系统包括操纵和控制系统电路，它们可能是简单的反馈电路，或复杂的分支电路，用电子计算机控制通过它们的信号。

二、光电光谱仪中的信号

被测对象信息的载波基本信号是在激发辐射系统 I 中形成的辐射亮度光谱密度分布 $L_\lambda(\lambda)$ （参看图 1—1）并进入分光系统 II 的入口；这里 λ 是辐射波长。

分光系统将值 $L_\lambda(\lambda)$ 变成照度的分光密度 $E_\lambda(x, y)$ 成空间分布，式中 x, y 是分光系统输出平面上的直角坐标（出口物镜的焦平面或出口光栏平面 S_2 ）。这个平面在出口物镜 O_2 的焦平面上，在一定波长的情况下使其在输出平面上某些点上相对应。这个规律由所采用的色散系统和输入物镜 O_1 和输出物镜 O_2 。

的焦距来决定。在光谱仪中通常制成专用的分光空间译码 $\lambda \rightarrow x$ ，第二个坐标 y 或用于特殊信息量增大时（在输出平面一定波长的辐射流增大），或用于被测辐射其他特性译码，例如偏振光。

这样，在分光系统中将输入信号变换为：

$$L_1(\lambda) \xrightarrow{A_0(\cdot)} E_1(x) \quad (1-1)$$

$$\lambda \xrightarrow{\varphi} x \quad (1-1')$$

式中 $A_0[\cdot]$ ——分光系统的变换算子； φ ——由空间分光译码定律所确定的函数，或者是按色散定律所确定的函数。

式 (1-1) 和式 (1-1') 可写成下述形式：

$$E_1(x) = A_0[L_1(\lambda)] \quad (1-2)$$

$$x = \varphi(\lambda) \quad (1-2')$$

由式 (1-2) 和式 (1-2') 可写成：

$$E'_1(\lambda) = A_0[L_1(\lambda)]$$

式中， $E'_1(\lambda) = E[\varphi(\lambda)]$ 。

当光谱仪进行扫描时，式 (1-2') 随时间 t 面变化：

$$x = \varphi_t(\lambda) \quad (1-3)$$

即在不同的瞬时与出口狭缝相对应的坐标点将不同波长的辐射线射中。在不同的窄分光段内得到被测对象特性的信号。

辐射能接受器 (ПН) 感受面和分光系统出口面对准（或光叠合），并将分光密度照度 $E_1(x)$ 转换成为电信号（ПН 输出电压 u 或输出电流 i ）。用相应的算子 $A_n(\cdot)$ 写成下式：

$$E_1(x) \xrightarrow{A_n(\cdot)} u_1(x)$$

由于 x 是时间的函数（式 1-3），则

$$u_1(x) = u'_1(t) = A_n[E_1(x(t))]$$

这样，根据译码方法，分光信号包括在某时间内的信号特性 $u'_1(t)$ ：振幅、相位、频率、调制度等等。

在信号的初步处理部件中用某种广泛的过滤算子 $A_0(\cdot)$ 可以对信号进一步进行交换：

$$u_1(t) \xrightarrow{A_0(\cdot)} U_1(t)$$