

实验室光学仪器

〔苏〕Л. А. 诺维茨基

中国计量出版社

实 验 室 光 学 仪 器

[苏] Л. А. 诺维茨基 主编

朱源宏 廉育英 刘家增 译

中 国 计 量 出 版 社

内 容 提 要

本书为苏联高等院校仪器制造专业教科书(1979年5月修订增补第二版)。全书共七章,分章论述的光学仪器有:显微镜、光学测量仪器、干涉仪、比影仪、偏振仪器、光度测量仪、比色仪以及光谱仪等。各章均从仪器原理、结构、应用等方面作系统的论述。对以新技术为基础的光学仪器,亦作了概括介绍。

本书可供光学仪器的设计、制造和使用人员,大、中专院校有关专业的师生,以及中学教师等参考。

Лабораторные оптические приборы

Л. А. Новицкий

Москва «Машиностроение» 1979

实 验 室 光 学 仪 器

〔苏〕Л. А. 诺维茨基 主编

朱源宏 廉育英 刘家增 译

责任编辑 陈小林

++

中国计量出版社出版

北京和平里11区7号

河北省三河县中赵甫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

++

开本 787×1092 /32 印张 16.75 字数 390 千字

1986年3月第1版

1988年6月第2次印刷

印数 8001—18000

ISBN 7-5026-0118-X/TB·93

定价 4.90 元

译者的话

有关实验室光学仪器的原理、结构、使用、性能等的基本知识，不但对于从事光学专业的人员，而且对于与光学有关的其他专业研究和工作人员来说，都是十分重要的。本书比较系统、全面地论述了各种实验室光学仪器，并被确定为苏联高等院校仪器制造专业的教科书，初版于1966年。初版问世十多年后，为了适应已经发展了的光学仪器的状况，于1979年修订增补再版，仍被选定为专业教科书。考虑到国内尚缺乏有关内容的专著，我们翻译了此书。由于水平所限，译文中不妥之处在所难免，希读者批评指正。

本书的第一、三、四、五、六章由朱源宏同志译出；第二章由刘家增同志译出；第七章由廉育英同志译出；清华大学精密仪器系张鸿澄同志和原七机部二院梁振和同志作了校订。本书承国家计量局王宣同志和中国计量科学研究院光学试验室李在清同志推荐，为此，译者表示深切的谢意。

前 言

本书的基础是作者在莫斯科 H.Э. 鲍曼高等技术学校讲授多年的《实验室光学仪器》教程。

书中探讨了显微镜、干涉仪、测量仪器、偏振器、光度计、比色计和光谱仪。仪器类别的选择是由该学科的教学大纲确定的。

笔者自我提出的一项任务是：编写一部参考书，使仪器制造专业的大学生和光学工业的工程技术人员获取有关类别实验室仪器的必要理论和实际知识。因此，其中任何一章均具相当独立性的内容，并可单独研讨而与其它各章并无联系。

本书各章均从相应类别的仪器制造的理论基础与物理原理开始叙述（前提是：学习本教程的大学生业已充分熟悉教学大纲中的物理、物理光学和光学仪器的教程内容）。继而概述仪器装置及操作方法。

关于全息仪器，其它学科有详细叙述，本书仅简略一提。基于同样的原因，作者几乎没有涉及仪器零件的制造工艺、装配和调修问题。对于辐射源和接收器也未作详细介绍。

本书再版是在第一版（P.C.伊林、Г.И.费道托夫、Л.А.费金，《实验室光学仪器》，1966年）出版十余年后问世的，内容上有较大的区别，修改了许多章节，删除了对过时仪器结构的描述，而代之以对比较现代的仪器结构的叙述；采纳了读者对初版的有关意见和希望；修正了印刷错误和欠确切之处。

本书执笔人为：第一章，В.Е.朱巴列夫、Л.А.诺维茨基、Г.И.费道托夫；第二、五、六章，Г.И.费道托夫；第三章，В.Е.朱巴列夫；第四章，Л.А.诺维茨基；第七章，戈麦纽克等。编写第三、四和七章时，作者重温了过早离开我们的初版同行作者Р.С.伊林写的资料。

作者们将以感激的心情接受本书读者无疑会提出的意见和建议。

引 言

在分析光学仪器制造业漫长的发展道路上，可以毫不夸张地说，苏联科学家在光学机械生产的形成和进步事业上，贡献确实很大。

革命前的俄国，各方面均落后于欧洲国家，沙皇政府的保守主义和鼠目寸光未给国内发展光学生产创造充分条件。只是在十月革命后苏联光学工业才有了广泛的发展。

1918年在彼得格勒（今列宁格勒），为解决光学玻璃制造工艺和光学机械生产领域的科学技术问题，建立了国家光学研究所。在以后的年代里，苏联各地以中型企业和修理基地为基础，建立了当时第一流的光学机械工厂。其中在彼得格勒俄罗斯光学与机械生产股份公司基础上，建立了以修理工厂为基础的巴甫辛光学仪器厂（今克拉斯诺戈尔斯克市机械厂）。

党和政府十分重视培养业务熟练的光学工业技术干部。十月革命之后，在彼得格勒很快就建立了精密机械和光学技术学校。1930年间，在该校的基础上建立了苏联第一所培养本国光学机械生产工程师的高等学校——列宁格勒精密机械与光学学院。

从1938年起，在以鲍曼命名的莫斯科高等技术学校开始培养光学机械专家。在国内主要高等院校组织进行培养，保证了本国光学工业所需要的高级专家，并使苏联的光学仪器生产达到世界水平。

自然，任何一种设计，包括光学仪器制造业方面的设计，

其价值在很大程度上取决于这些设计投入生产的广度。

为解决党和政府提出的进一步改善光学仪器制造业方面的任务，要求建立高准确度检定器具（基准器、基本标准装置等）并尽快地运用到生产中去。

我国在这方面占主导地位的是全苏光学物理测量科学研究所，它以拥有独创的计量学用途的光学仪器并在工业中得到广泛应用而著称。

苏联杰出的学者们Д.С.洛什杰斯特文斯基、С.И.瓦维洛夫、А.А.列别捷夫、И.В.格列标什科夫、И.И.格列标什科夫、А.И.泰勒宁、А.И.图多洛夫斯基、Б.В.菲符伊洛夫、Г.С.兰德斯别尔格、А.Н.扎哈里耶夫斯基、Д.Д.马克苏托夫、С.И.弗列依别尔格、И.А.屠黎金等，在光学仪器制造的理论 and 实践方面，均做出了相当的贡献。

目前，有一大批学者和卓越的光学专家在光学仪器制造领域和为光学工业培训高水平的干部方面顺利地工作着。

苏联工业的现状足以保证复杂程度相当高的光学仪器的设计和生产。

目 录

译者的话	(i)
前言	(ii)
引言	(iv)
第一章 显微镜	
§ 1 显微镜的理论基础	(1)
§ 2 显微镜的分辨率	(8)
§ 3 显微镜的物镜	(11)
§ 4 显微镜的目镜	(15)
§ 5 实验标本的照明方法	(17)
§ 6 显微镜检验的相衬法与干涉法	(22)
§ 7 显微投影与显微照相	(30)
§ 8 显微镜的机械部件与附件	(32)
§ 9 生物显微镜	(37)
§ 10 紫外显微镜	(41)
§ 11 红外显微镜	(44)
§ 12 荧光显微镜	(49)
§ 13 偏振显微镜	(50)
§ 14 电视显微镜	(52)
§ 15 全息显微镜	(54)
第二章 光学测量仪器	
§ 1 技术测量基础	(58)
§ 2 线值相对测量仪器	(64)
§ 3 线值绝对测量仪器	(79)
§ 4 角度测量仪器	(100)
§ 5 投影仪器	(110)

§ 6	测量显微镜	(120)
§ 7	机械制造中制件尺寸的光电自动检验法	(129)

第三章 干涉仪与比影仪

§ 1	干涉仪的理论基础	(133)
§ 2	干涉仪的几何光学理论基础	(143)
§ 3	平板中的干涉	(145)
§ 4	干涉图样的记录方法	(150)
§ 5	平板中的多光束干涉理论基础	(156)
§ 6	长度测量用的干涉仪	(160)
§ 7	检验表面形状用的干涉仪	(166)
§ 8	测量微观不平度高度用的干涉仪	(173)
§ 9	测定液体与气体折射率用的干涉仪	(180)
§ 10	研究透明物体不均匀性用的干涉仪	(185)
§ 11	位移干涉仪	(196)
§ 12	全息干涉仪	(200)
§ 13	用白光工作的双光束干涉仪的特点	(203)
§ 14	对干涉仪结构的基本要求	(205)
§ 15	比影仪器	(208)

第四章 偏振仪器

§ 1	双折射	(214)
§ 2	二向色性	(221)
§ 3	反射时介质引起的光偏振	(224)
§ 4	偏振光的干涉	(227)
§ 5	相位片、补偿器	(232)
§ 6	偏振面的旋转	(236)
§ 7	人造各向异性	(241)
§ 8	偏振仪器	(247)

第五章 光度测量仪器

§ 1	辐射量与光照技术量	(263)
§ 2	辐射通过光学介质时的特性	(277)
§ 3	等光亮度的表面的辐射	(286)

§ 4	光度计中采用的光源	(290)
§ 5	光度测量基础	(293)
§ 6	滤光器	(301)
§ 7	光度的目视测量方法	(314)
§ 8	客观光度测量法	(331)
第六章 比色仪器		
§ 1	色	(350)
§ 2	眼与视觉	(356)
§ 3	混色定律	(361)
§ 4	色的测量	(375)
第七章 光谱仪		
§ 1	光谱仪的用途及光谱分析的种类	(389)
§ 2	光谱仪的基本特性	(391)
§ 3	光谱仪的分类	(397)
§ 4	狭缝光谱仪	(400)
§ 5	光谱棱镜	(411)
§ 6	衍射光栅	(421)
§ 7	光谱仪中狭缝的照明	(442)
§ 8	单色仪	(448)
§ 9	目视发射光谱分析	(464)
§ 10	摄谱仪	(470)
§ 11	分光计和分光光度计	(482)
§ 12	高分辨率分光镜	(492)
§ 13	选择调幅干涉分光计	(497)
§ 14	激光光谱仪	(518)

第一章 显 微 镜

§ 1 显微镜的理论基础

只有当物体对人眼的张角不小于某个值时，肉眼才能区别其各个细部。该量称为目视分辨率 ε 。在最佳条件下，即物体的照度为50—70 lx及其对比度较大时，可达到1'。为易于观测，一般将该量加大到2'并取此为平均目视分辨率。

物体视角的大小与该物体的长度尺寸和物体至眼睛的距离有关。该距离不能取得很小，因为眼睛的调节能力有一定的限度。尤其是眼睛在接近调节能力的极限范围内工作时，会使视力极度疲劳，并且，也是不适宜的。

对于标准眼（正视）而言，最佳的视距规定为250mm。这意味着：在没有仪器的条件下，目视分辨率 $\varepsilon=2'$ 的眼睛，能清楚地区分大小为0.15 mm的物体之细部。

在观测视角小于1'的物体时，使用放大仪器。放大镜和显微镜是用于观测放置在观测人员近处应予放大的物体的。

放大镜是单片透镜或类似这种透镜的简易光学系统。在放大镜的前焦点上放置物体，而眼睛的瞳孔则在后焦点上。眼睛在水晶体放松的状态下可观测无限远处的物体，因此，成象系统诸元的这种位置为最佳。由于各观测者视力上的特点，会引起诸元位置的差别。例如，对于近视眼，物体应向放大镜靠近，使虚象调整到适于这种眼力的最佳距离。

放大镜的放大倍数

$$\Gamma = \frac{250}{f'} \quad (1.1)$$

式中 250——最佳视距，单位为mm，

f' ——放大镜焦距，单位为mm。

该放大倍数是指在 250 mm 的距离内用放大镜观察到的物体象的视角同没有放大镜观察到的物体视角的比值。

按式 (1.1) 可求出放大镜的放大倍数，当物体或眼睛的位置与计算所规定的位置不同时，换言之，当眼睛的工作条件恶劣时，可能出现标称值偏差。标准放大倍数本身具有假定性质，因为最佳视距是随意选择的。由于这个原因，放大镜和显微镜的放大倍数只能按标称值估计，不计由于偏离标称值而可能产生的偏差。

小倍数（至 $7\times$ ）的放大镜是单片形式的透镜，中倍数（至 $15\times$ ）和大倍数（至 $40\times$ ）的放大镜，则具有复杂的系统，一般是由 3—4 面透镜构成的。就象差校正而言，一般是焦距短和工作间隔小的消球差和消象散透镜系统，质量上接近显微镜物镜。

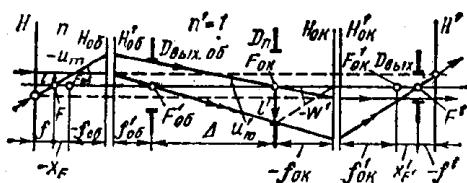


图 1.1 显微镜原理图

显微镜是用以观测近距离目标的复杂系统，放大倍数大，分辨率高。

在显微镜的原理示意图（图1.1）中标出了物镜、目镜和整个显微镜的主平面、焦点及其相互位置。

物体 l 位于距物镜前焦点 $F_{o\kappa}^*$ 的某个距离 X_F 处。物镜使物体在与目镜的前焦点 F_{κ}^* 重合的平面上成放大的倒实象 l' 。目镜的作用和放大镜相同，再次成放大的正虚象 l'' 于无穷远处。可见，处于复杂的放大镜——显微镜的前焦点上的物体，显微镜可给出其经放大相当大倍数的倒象。

在原理示意图上给出了显微镜计算公式中的量值符号。以 Δ 表示从物镜的后焦点至目镜的前焦点的距离，称为显微镜光学间隔。

根据光学系统及其各元件的焦距关系式，显微镜前焦距和后焦距可用下列表达式确定：

$$f = -f' = \frac{f'_{o\kappa} f'_{\kappa}}{\Delta} \quad (1.2)$$

所谓显微镜的放大倍数，指的是用显微镜观测时在眼睛视网膜上形成的标本象的尺寸与同一标本在最佳视距内用肉眼观测时在视网膜上得到象的尺寸之比。显微镜的这个放大倍数称作可见放大倍数。

关于放大镜放大倍数的定义也适用于显微镜。因此，显微镜可见放大倍数可写为：

$$\Gamma = \frac{250}{f'} \quad (1.3)$$

式中 f' 为整个显微镜的焦距，单位为 mm。

若式 (1.3) 中的 f' 代之以式 (1.2) 的表达式，则显微镜的放大倍数为

$$\Gamma = -\frac{\Delta}{f'_{o\kappa}} \frac{250}{f'_{\kappa}} \quad (1.4)$$

负号表示由显微镜形成的象是倒象。

按几何光学公式，物镜的横向放大倍数为：

* 下角标 $o\kappa$ 代表物镜， κ 代表目镜，下同——译者注

$$\beta_{00} = - \frac{\Delta}{f'_{00}} \quad (1.5)$$

而起放入镜作用的目镜放大倍数为：

$$\Gamma_{0\kappa} = \frac{250}{f'_{0\kappa}} \quad (1.6)$$

所以 $\Gamma = \beta_{00} \Gamma_{0\kappa} \quad (1.7)$

上式为确定显微镜的总放大倍数的最普遍采用的表达式，即总放大倍数等于物镜放大倍数与目镜放大倍数之乘积。

在某些显微镜中，标本位于物镜前焦点上，而象则在无穷远处。在这种情况下，可以说显微镜的光学间隔等于无穷远。焦距为 f'_{π} 的镜筒透镜安装在物镜后面的平行光路中。在该透镜的后焦点上可得标本的实倒象，其放大倍数为：

$$\beta_{00 \cdot \pi} = - \frac{f'_{\pi}}{f'_{00}} \quad (1.8)$$

用之置换式 (1.7) 中的 β_{00} 项，以求出该显微镜的总放大倍数。

与显微镜其它重要特性有关的不是光轴上的元件位置，而是透镜系统的光阑直径和镜框。仪器的光强度、视场、象的景深和分辨率，均与此有关。

由标本轴心点射出并凭借最小镜框或孔径光阑的光锥决定着显微镜的光强度。该光锥顶端的半角称为孔径角 u_m (参见图1.1)。

孔径光阑在物空间中的象称为入瞳，在象空间中的象则称为出瞳。在显微镜物镜上，以最后一面透镜框或专用光阑作为出瞳。在这两种情况下均可以认为显微镜出瞳 $D_{aux \cdot 00}$ 与其后焦面是重合的 (参见图1.1)，而物镜 (以及整个显微

镜)的入瞳则位于无穷远。显微镜出瞳 $D_{\text{ВЫХ}}$ 是目镜形成的物镜出瞳的象。

显微镜物镜是消球差系统,即是说,它满足正弦条件:

$$n \sin u_m : n' \sin u'_m = \beta_{00} = \text{常数} \quad (1.9)$$

量 $A = n \sin u_m$ 称为数值孔径。正弦条件可写为:

$$A = \beta_{00} A' \quad (1.10)$$

式中 A 为物空间中的物镜数值孔径,而 A' 为象空间中的物镜数值孔径。

物镜出瞳的直径

$$D_{\text{ВЫХ} \cdot 00} = 2 \Delta \operatorname{tg} u'_m$$

象空间中的孔径角 u'_m 小,因此可由 $\operatorname{tg} u'_m = \sin u'_m = A'$ 代替,则

$$D_{\text{ВЫХ} \cdot 00} = 2 \Delta A' \quad (1.11)$$

横向放大倍数公式将物镜出瞳及其成象——显微镜出瞳联系起来:

$$D_{\text{ВЫХ}} = D_{\text{ВЫХ} \cdot 00} \frac{f'_{0K}}{\Delta}$$

利用公式 (1.6), (1.10) 和 (1.11), 可将上式化简为:

$$D_{\text{ВЫХ}} = \frac{2 \Delta A}{\beta_{00}} \cdot \frac{250}{\Delta \Gamma_{0K}} = \frac{500 A}{\beta_{00} \Gamma_{0K}}$$

$$\text{或写成: } D_{\text{ВЫХ}} = \frac{500 A}{\Gamma} \quad (1.12)$$

由上式可得结论:放大倍数大的显微镜,其出瞳小(显著地小于肉眼的瞳孔)。例如:当 $\Gamma = 1000 \times$, $n = 1$, $\sin u_m = 1$ 时,出瞳 $D_{\text{ВЫХ}} = 0.5 \text{ mm}$ 。这表明:为在眼睛视网膜上得到足够的光照度,标本的照明必须足够充分。此外,若瞳孔小,在眼

的不均质组织中，光的衍射会使象暗淡和降低象的质量。

显微镜的视场受到中间象平面上的视场光阑 D_n 的限制。线视场决定于象布满视场光阑的物体的大小。该视场按下式确定：

$$2l = \frac{D_n}{\beta_{06}} \quad (1.13)$$

视场光阑的直径决定于目镜的视场 $2\omega'$ 及其焦距。对于中型目镜，该直径为13—18 mm。由于视场光阑的存在，在显微镜中的象边缘轮廓分明，而象平面亦被均匀照明（因无倾斜光束的渐晕）。

清晰象的景深是由三个量——眼睛的调节本领、几何景深和波长决定的。

在立体标本观测过程中，眼睛不断地调节和观察着深度不同的物体各部位。所产生的印象是：整个物体均清晰可见。若眼睛从无穷大处调至250 mm，则位于显微镜前焦平面和距离焦点为 T_{ax} 的平面之间的物体之细部，均清晰可见。该物体的景深 T_{ax} 称为调节景深，并按下式确定：

$$T_{ax} = \frac{(f')^2}{250} = \frac{250}{\Gamma^2} \quad (1.14)$$

设眼睛已调节到无穷远。这时，在眼睛视网膜上清晰成象的仅是位于显微镜前焦平面上的物体的那些点。离焦平面较远或较近的各点，在视网膜上成象为一弥散圆。若弥散圆的视角不超过目视分辨率 ε ，则物体相应的点清晰，而其间的距离则称为几何景深。

几何景深的计算见图1.2。从物体中分解出两个点：A点在焦点上，而B则在距物镜焦点为 x 的点上。图上未表示出物体和显微镜，但给出了上述各点经显微镜后所成的象A'和B'。象B'与眼睛的距离 x' 按下式确定：