

Optiktechnologie

光学制造技术

[德] 延斯·布利特纳 (Jens Bliedtner)

[德] 京特·格雷费 (Günter Gräfe)

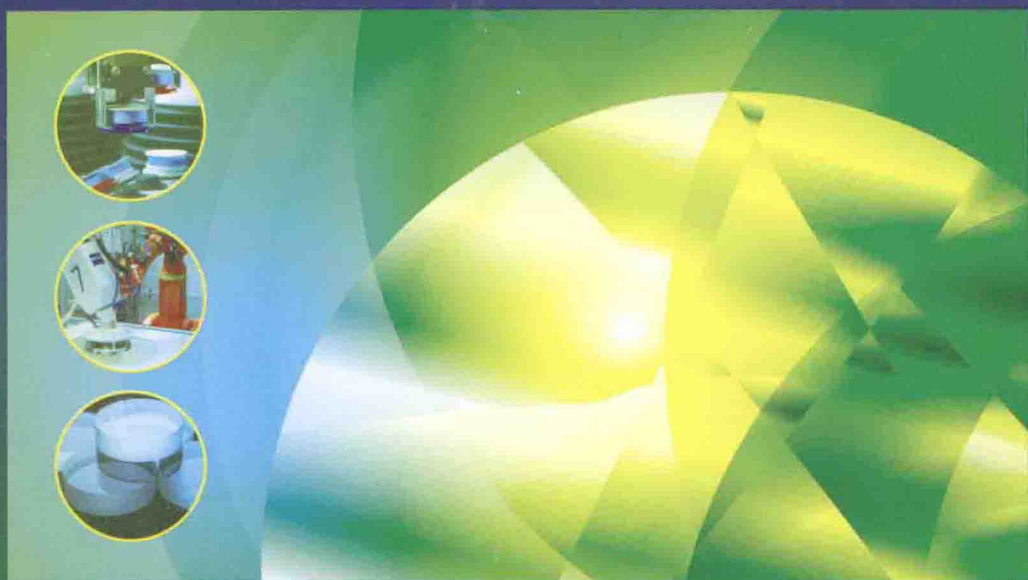
著

[美] 鲁珀特·黑克托尔 (Rupert Hector)

周海宪 程云芳 译

周华君 程 林 校

(原著第2版)



化学工业出版社

Optiktechnologie

光学制造技术

[德] 延斯·布利特纳 (Jens Bliedtner)

[德] 京特·格雷费 (Günter Gräfe)

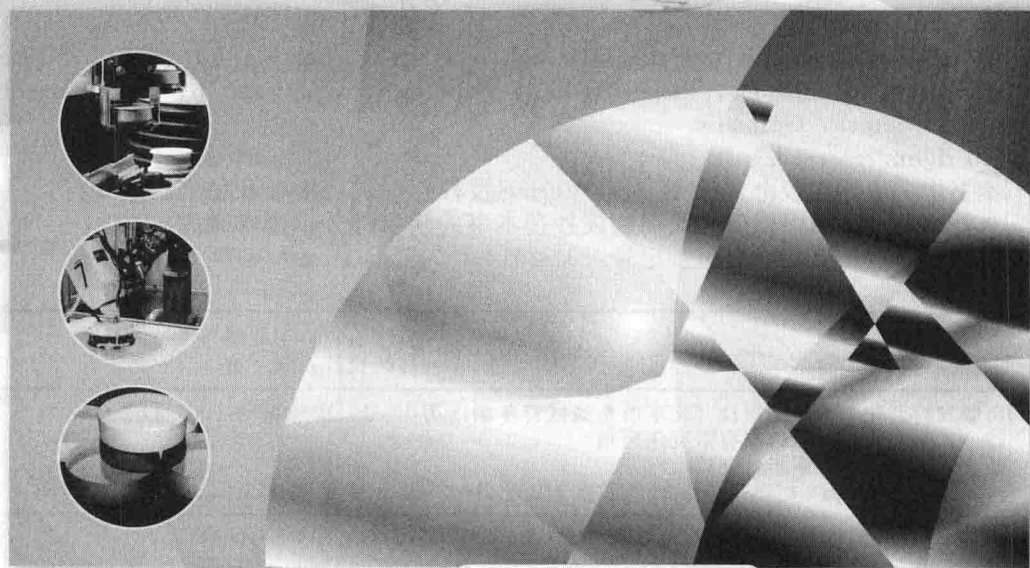
著

[美] 鲁珀特·黑克托尔 (Rupert Hector)

周海宪 程云芳 译

周华君 程林 校

(原著第2版)



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是根据多位专家多年实践经验和研究成果编撰而成。不仅介绍传统的加工方法,也阐述较为现代的制造技术(但并非实验室或研究所级制造工艺)。由于现代光学制造技术是研发和制造高质量光学组件的基本技术,所以,该书作者力求采用一种完整的方法进行阐述。前面三章首先介绍光学的基本原理,以及光学材料,例如无机和有机玻璃、光纤和晶体材料的制造技术。第4章讨论研发和制造工艺的基本知识、制造类型和方法,以及相关的技术数据。第5章阐述一次成型法,因为该方法被认为是光学制造工程后续工艺有重要影响的前提条件。第6章重点是成型技术,诸如精密模压成型、纤维抽拉和凹模冲压成型方法。第7章是本书的重点内容,描述表面加工方法,除了介绍粗磨、精磨和抛光等传统方法外,还将讨论例如超高精度加工和激光光刻成型等最先进的加工技术,介绍古典制造技术以及诸如非球面和自由曲面等最现代制造技术的相关理论,并给出一些应用实例。第8章向读者介绍光学零件镀膜技术,并讨论现代镀膜工艺。连接技术是本书另一个重点,除了阐述现代制造工艺使用的大量连接技术外,本书还介绍重要的光学元件装配技术。最后,有选择性地展示几种棱镜和透镜的加工和装配工艺。

本书既适合于光学工厂和车间技术人员使用,也适合光电技术研究所和光电子仪器公司设计人员使用,还适合相关大学教师和相关专业学生作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光学制造技术:原著第2版/[德]布利特纳(Bliedtner, J.),[德]格雷费(Gräfe, G.),[美]黑克托尔(Hector, R.)著;周海宪,程云芳译.—北京:化学工业出版社,2015.01

书名原文:Optiktechnologie

ISBN 978-7-122-21497-3

I. ①光 II. ①布… ②格… ③黑… ④周… ⑤程… III. ①光学零件-制造 IV. ①TH740.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第172337号

Optiktechnologie/2nd ed./by Jens Bliedtner, Günter Gräfe.

ISBN 978-3-446-42215-5

© 2010 Carl Hanser Verlag

Authorized translation from the English language edition © 2011 by The McGraw-Hill Companies, Inc. originally published in German by Carl Hanser Verlag, Munich, Germany.

All rights reserved.

本书中文简体字版由 Carl Hanser Verlag 授权化学工业出版社独家出版发行。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分,违者必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2014-4371

责任编辑:吴刚

文字编辑:丁建华

责任校对:宋玮

装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张25 字数500千字 2015年01月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:148.00元

版权所有 违者必究



光学技术包括：光学设计，光学制造，光学检测和光学材料。毫无疑问，光学制造技术是将设计思想转换为实际产品的重要手段。

近几年，光学技术发展得非常快，特别是现代光学技术与光电子技术的紧密结合，使光电子器件、光学系统和仪器发生了很大变化，主要表现在：

1. 微米和纳米级微型化光学元件广泛应用；
2. 超大型光学零件的应用；
3. 超高精度光学元件和系统应用；
4. 非球面光学元件大量需求；
5. 非玻璃材料广泛采用；
6. 新产品研发周期越来越短；
7. 多品种、小批量的需求成为发展方向。

光学仪器和光学设计理念的进步必然促进光学制造技术进一步发展，光学零件和光电子元件的选材已经不再局限于玻璃和光学晶体，光学塑料、光学乳胶、金属、陶瓷及半导体材料得到了广泛应用，传统的光学制造方法（例如机械式粗磨、精磨和抛光工艺）也不能完全适应新的光学设计要求（例如二元光学元件、折衍混合透镜、微透镜阵列和全息透镜），光学制造领域的工艺师和操作人员面临一系列的难题和挑战，需要在传统光学制造技术基础上研发和采用新的光学加工设备、制造技术和测量方法。为了验证新的设计思想和采用新的光学材料，人们会更迫切地需要熟悉和掌握更多的光学制造技术，尤其是现代光学制造方面的知识。由 Jens Bliedtner 教授（德国）、Günter Gräfe 首席技术专家（德国）以及 Rupert Hector

工程师（美国）编写的“Optical Technology”（《光学制造技术》）^①一书，就是献给特别需要了解光学制造技术的设计师、尤其是光学制造工艺师的一本好书。

Jens Bliedtner 先生是德国耶拿市应用科技大学科学技术系（The Department of Science and Technology, University of Applied Science, Jena, Germany）教授，Günter Gräfe 先生是德国耶拿蔡司光学公司的首席技术专家（现已退休），Rupert Hector 先生是美国佛罗里达州墨尔本市 DRS 光电公司的光学工程师。

《光学制造技术》一书内容丰富，不仅有成熟的光学成像基础理论，而且有光学材料（包括无机玻璃、有机玻璃和晶体）的基本性质；不仅介绍了光学制造工艺的基础知识，而且阐述了一些先进的光学加工方法，例如无机玻璃和有机玻璃以及晶体的一次成型技术、玻璃变形工艺；考虑到传统的光学制造技术在目前仍然非常具有实用价值，该书比较详细地讨论了机械方式的光学切削技术（包括切割下料、钻孔、粗磨、精磨、抛光、清洗、镀膜和微结构制造工艺）和各种连接工艺（包括胶合、焊接、光胶和装配），其中包括较先进的加工方法，例如激光、水射流、超声波、超精密加工工艺。与其他同类书籍相比，该书全面考虑到设计、制造和过程测量技术的相互影响。既阐述了平面元件、球面透镜、棱镜、反射镜，又讨论了非球面元件的制造工艺。为了便于读者更容易理解和掌握本书内容，在阐述了每种制造技术之后都附有自测题以检验理解程度，并且，第 11 章又以实例形式专门介绍了几种典型光学零件的制造。为便于读者理解，书中还配有一些彩图，读者可通过扫描封底二维码下载阅读。

在中文《光学制造技术》的出版过程中，与原书作者，尤其是 Rupert Hector 工程师进行了充分的交流和沟通，对书中一些印刷错误进行了修订，并增加了“译者注”。为使读者更准确地理解和使用该书，书中保留了英文参考文献。

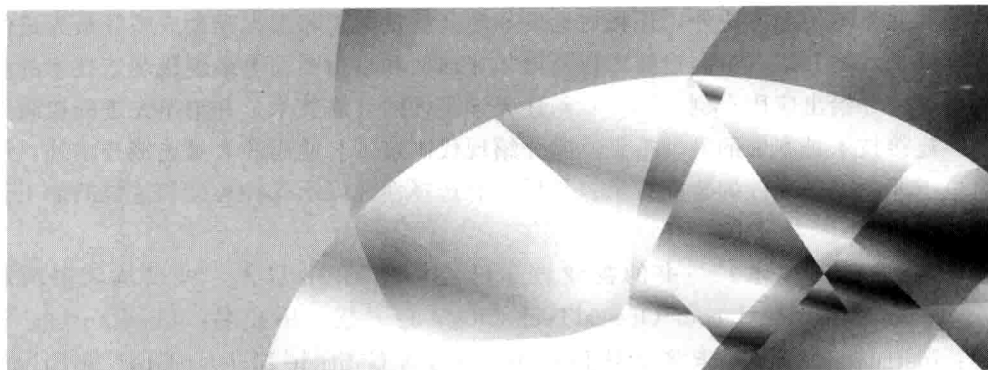
周海宪翻译了第 1~10 章，程云芳翻译了第 11 章。在美国工作的周华君和程林先生对全书进行了认真审校，高级工程师庄纪纲、安世甫、张林超和孙红晓对该书也做了一些工作。

该书出版得到了清华大学教授、中国工程院院士金国藩先生、美国 Rupert Hector 先生和北京理工大学王涌天教授的极大支持；张良、曾威、刘永祥、翟文军和陈建荣等高级工程师，祖成奎、黄存新、孙维国和刘凤玉研究员从不同方面给予了关注，在此表示衷心感谢。

本书可供光电子学领域中从事光学仪器设计、光学系统和光机结构设计的设计师、光学零件制造工艺师阅读，也可以作为大专院校相关专业本科生、研究生和教师的参考书。希望本书提供的材料和例子能够对我国光学仪器的设计和制造提供有益指导。

译者

① 译者注：原文是德文版，由 Carl Hanser 出版公司出版，McGraw-Hill 公司翻译出版了英文版。



前言

“技术 (technology)”一词源自希腊语。“techne”，表示“艺术”、“技巧”或“工艺”及“箴言集”，是知识的一个分支或者一种学科。18 世纪末期，德国科学作家约翰·贝克曼 (Johann Beckmann) 创新了该词，并在 20 世纪开始成为英语常用词汇。现代，技术 (technology) 一词的使用频率大大增加，其覆盖范围已经从技术、结构、工具及计算机程序扩展到系统和一种或几种学科的工艺。

光学技术令人神往之处是其能够实现精确的制造，而且通常一定能达到制造工艺的精度。在古代和中世纪期间，罗马和北欧一些国家就能够抛光制造粗糙度为 $1\mu\text{m}$ 的玻璃表面，成为其他任何工艺无法比拟的成就。现代，随着高度专业化制造技术的应用，可以将光学材料制造成精度高几个数量级的零件，其前提条件是精通高度复杂的研发和制造工程，以及各学科专家间的密切合作。

诸多有益的研发已经使光学技术成为与多种学科密切相关的交叉技术，对于电子、信息技术和计量技术尤其如此。光学技术被认为是 21 世纪的关键技术，具有巨大的增长潜力，在未来，新的技术和想法会更快更好地转化为新产品和解决方案。

为此，本书是奉献给那些有意丰富个人现代光学工程知识的人们，是多位专家根据多年的实践经验和研究成果编撰而成。

由于现代光学是研发和制造高质量光学组件的基础知识，作者力求采用一种完整的方法进行阐述。前面章节首先介绍光学的基本原理，以及诸如无机和有机玻璃、光纤和晶体材料的制造技术；第 4 章讨论研发和制造工艺的基本知识、制造类型和方法，以及相关的技术数据；第 5 章阐述一次成型法，该方法对光学制造工程的后续工艺有重要影响；第 6 章的重点是成型技术，诸如精密模压成型、纤维抽拉和凹模冲压成型方法；第 7 章是本书的重点内容，介绍表面加工方法，除了粗磨、

精磨和抛光等传统方法外，还将讨论例如超高精度加工和激光光刻成型等最先进的加工技术，将介绍古典制造技术以及诸如非球面和自由曲面等最现代制造技术的相关理论，并给出应用实例；第 8 章阐述光学零件的镀膜技术，并给出先进的镀膜工艺；连接技术是本书的另一重点，除介绍现代制造工艺使用的大量连接技术外，还讨论重要的光学元件的装配技术；最后，有选择性地展示几种棱镜和透镜的加工和装配工艺。

《光学制造技术》一书的视频教学已经增加到 2h 以上，可以从该书网站 www.mhprofessional.com/OpticalTechnology 上下载（用户名：bliedtner11；密码：instructor）。作者非常感谢 Jenafilm 公司的 Gabriele Meister-Groß 和 Erhard Schorcht 在视频方面的专业合作，还要感谢许多公司和机构提供相关信息及材料，并允许使用其设备完成记录。有些读者可能会找到计算程序 SagCalc（可以下载），这是为现代加工工艺研发的一种实用“工具”，该程序不断地改进、更新，可以从网站 www.sagcalc.de 下载，对 Florian Hector 编写 SagCalc 程序以及对网站的维护尤其致以谢意。

作者欢迎批评和建议，并竭尽所能解决读者所关心的问题，请通过 E-mail 地址：rhector@cfl.rr.com 与 Rupert Hector 直接联系。

致谢

Jens Bliedtner、Günter Gräfe 和 Rupert Hector 对其家人在本书编撰和出版过程中给予的支持、耐心和理解，深深地致以谢意。此外，还感谢光学界众多朋友的关心和奉献。

Günter Gräfe

Jens Bliedtner

Rupert Hector



目 录

第 1 章	1
玻璃和光学生产发展史	
第 2 章	8
光学基础知识	
2.1 折射、反射和全反射	8
2.2 偏振、干涉和衍射	9
2.3 双折射和多向色性	14
2.4 成像光学元件	15
2.4.1 透射光学元件	15
2.4.2 反射式光学元件	19
2.4.3 部分透射光学元件	21
2.4.4 衍射光学元件	21
2.5 像差	23
2.6 光学系统像质评价	25
2.7 光学元件设计	26

2.7.1 材料标注	27
2.7.2 形状标注	27
2.7.3 表面质量标注	28
测试题	31

第3章

33

光学材料

3.1 光学材料分类	33
3.2 无机玻璃	34
3.2.1 定义和结构	34
3.2.2 无机玻璃的制造	35
3.2.3 无机玻璃的性质	38
3.2.4 无机玻璃的供货方式	45
3.3 有机玻璃	47
3.3.1 定义和结构	47
3.3.2 相关性质	49
3.3.3 应用和合适的形式	50
3.4 晶体	51
3.4.1 设计和结构	51
3.4.2 相关性质	53
测试题	55

第4章

56

制造工艺基础知识

4.1 产品研发和制造工艺	56
4.1.1 研制阶段	56
4.1.2 研制周期	57

4.2	生产方式	59
4.2.1	批量生产	60
4.3	生产原则	61
4.3.1	A 型	61
4.3.2	B 型	61
4.4	生产工艺分类	62
4.5	技术基础	64
	测试题	67

第 5 章

69

光学玻璃的一次成型技术

5.1	无机玻璃的一次成型方法	70
5.1.1	制造熔融玻璃滴料和压制毛坯	70
5.1.2	块状玻璃的制造	71
5.1.3	平面玻璃的制造	73
	测试题	76
5.2	有机玻璃一次成型技术	76
5.2.1	浇注成型	76
5.2.2	注塑模压成型	80
5.2.3	热压成型	86
5.2.4	注射热压成型	91
	测试题	92
5.3	晶体的一次成型技术	92
5.3.1	气相生长工艺	93
5.3.2	晶体的溶液生长	95
5.3.3	熔体生长技术	97
	测试题	102

光学玻璃变形工艺

6.1	基础知识	104
6.2	热压（模压成型）	108
6.2.1	工艺原理	109
6.2.2	成型模具的制造和技术要求	110
6.2.3	模压成型工艺	112
6.2.4	应用领域	114
6.3	热弯成型	115
6.4	拉丝工艺	116
6.4.1	预制件制造	116
6.4.2	光纤拉丝	118
	测试题	121

机械切削技术

7.1	分割工艺	124
7.1.1	机械切割	124
7.1.2	特种修切工艺	126
7.2	粗磨	132
7.2.1	工艺基础	133
7.2.2	粗磨模和机床	135
7.2.3	锯切工艺	140
7.2.4	成型粗磨	143
	测试题	159
7.3	钻孔工艺	159

测试题	163
7.4 精磨	163
7.4.1 工艺基础知识	164
7.4.2 机床与精磨模	166
7.4.3 精磨耗材	167
7.4.4 影响因素	168
7.4.5 精磨工艺	171
测试题	180
7.5 抛光	180
7.5.1 工艺基础	181
7.5.2 机床和抛光模	186
7.5.3 抛光耗材	188
7.5.4 影响因素	190
7.5.5 抛光工艺	192
7.5.6 抛光误差	211
7.5.7 性能和精度	214
测试题	218
7.6 定中心工艺	219
7.6.1 定中心法	221
7.6.2 定中心机床和磨轮	223
7.6.3 制造工艺	225
测试题	226
7.7 使用具有固定几何形状的刀具进行超精密加工	226
7.7.1 工艺基础	227
7.7.2 工艺分类	233
7.7.3 车削工艺	234
7.7.4 铣削工艺	241
7.7.5 超声波微切削工艺	245
7.7.6 性能和精度	246

测试题.....	249
7.8 微结构制造工艺	250
7.8.1 刻印工艺	251
7.8.2 光刻技术	252
7.8.3 金属和乳胶镀层的刻印工艺	254
7.8.4 局部镀膜工艺	256
7.9 清洗工艺	257
7.9.1 人工清洗工艺	258
7.9.2 机械清洗工艺	258
7.9.3 激光清洗工艺	261
7.9.4 烘烤工艺	261
7.9.5 清洗缺陷	261
测试题.....	263

第 8 章

264

镀膜工艺

8.1 保护膜.....	265
8.1.1 喷漆工艺	265
8.1.2 表面硬化	266
8.2 光学膜	267
8.2.1 膜层种类	268
8.2.2 膜层沉积工艺	270
8.2.3 应用	277
8.2.4 膜层特性	283
测试题.....	286

第 9 章

287

材料变性

9.1	退火工艺	287
9.2	玻璃强化工艺	290
9.3	老化工艺	292
9.4	染色工艺	293
9.5	光致变色玻璃	294
	测试题	295

第 10 章

296

连接工艺

10.1	制造过程中的连接	297
10.1.1	上盘（或胶盘）	297
10.1.2	棱镜上盘技术	303
10.1.3	上盘材料和黏结剂	309
10.1.4	固紧工艺	310
10.2	光学元件连接/装配	314
10.2.1	定心、对准和调校	315
10.2.2	胶合	319
10.2.3	黏结	321
10.2.4	软钎焊（低温焊接）	325
10.2.5	光胶	328
10.2.6	光学零件装配工艺	328
10.2.7	扩散焊接工艺	333
10.2.8	总装工艺	336
10.2.9	微装配工艺	343
	测试题	348

第 11 章

350

制造技术实例

11.1	棱镜制造技术	350
11.1.1	直角棱镜制造工艺	350
11.1.2	五角棱镜制造工艺	353
11.2	透镜制造技术	356
11.2.1	利用数控技术制造透镜	356
11.2.2	发光二极管 (LED) 小型放大镜制造技术	358
11.3	非球面零件制造技术	363
11.4	渐变眼镜制造技术	367
11.5	物镜装配	370
11.5.1	单透镜和双胶合透镜 (消色差透镜) 的装配	372
11.5.2	定心车削	374
11.5.3	部件装配	375
11.5.4	最终装配	376
测试题		377

参考文献

379

第1章

玻璃和光学生产发展史

根据考古发现，公元前 3000 年，埃及（Egypt）和美索不达米亚（Mesopotamia）就开始研发玻璃熔化艺术，在装饰品制造中开始采用非常小块的低质量玻璃和链珠。值得注意的是，埃及人是从某些植物的灰烬中提炼和生成重要的苏打粉，其工艺保密了 3000 多年。大约在公元前 1500 年，开始使用沙模和沙芯模技术生产中空玻璃。公元前一世纪，最大可能性是在叙利亚，发明了吹管，对于玻璃制造业，这是一个非常重要的发明，可以用来制造薄壁玻璃器件，并为后续玻璃产品的发展提供了很宽的基础。在罗马共和国后期，玻璃工艺从中东传到意大利，在早期帝国时代，罗马人就知道如何制造透明窗玻璃，不久，又有了彩色窗玻璃。在中世纪，玻璃制造工艺传播开来，并达到顶峰，发展最快的是威尼斯和意大利，在玻璃用于制造光学专用产品以前，它主要用于手工艺品，例如，斯堪的纳维亚人能够利用其原本用于疗伤和生火的晶体石研磨完美的透镜，之后不久，使用脚踏驱动的踏板工作台研磨和抛光透镜。然而，不可否认的是，眼镜的发明是诸如望远镜和显微镜等光学仪器发展的重要里程碑。

眼镜是由 13 世纪的阅读石（图 1.1）^① 和单片眼镜发展而来 [Beez98]，阅读石是一个由绿宝石、石英或者晶体石材料制成的半球形透镜，将阅读的文件放置在其平面侧。随着时间流逝，这些石头变

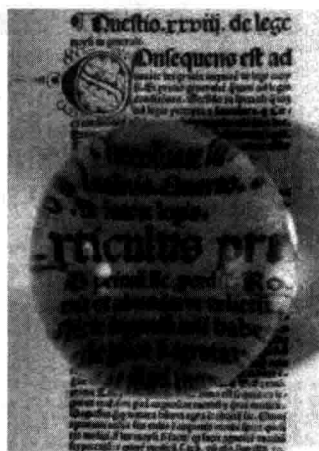


图 1.1 一块阅读石的
复制图 [humb06]

① 译者注，原文作者此处稍有修订。

得较平滑，为了方便，将其放在一个金属框中，进而形成单片眼镜。利用一种铆钉结构将两个单片眼镜相连接，从而发明了第一个金属框眼镜，该发明大约是 1285 年发生在威尼斯。在 18 世纪，从岩盐中提炼出苏打（或碳酸钠），因此，可以将碳酸钠玻璃用于日用品设计，从而增大了玻璃生产的机会。

显微镜和望远镜的发明是光学仪器发展的重要里程碑，通过透镜组合提高正常视力，但无法认定其确切的发明日期，或许是在 1590 年左右，荷兰人利用两块组合透镜构建了简单的显微镜，1830 年，显微物镜实现消色差也是其后的突破性成果。19 世纪初期，物理学家、天文学家和生物学家利用小店铺形式制造这些光学装置，选择和组装物镜（也称为镜头）完全依靠反复试验（试凑法）（图 1.2）。



(a) 1705年，采用倾斜立柱的显微镜

(b) 18世纪和19世纪的初期望远镜

图 1.2 制造光学仪器初期阶段的例子 [Beez98]

几乎是与此同时，研制出望远镜，在航海和天文领域的应用使其得到了快速发展。17 世纪和 18 世纪制造出第一台透镜望远镜，称为荷兰（Dutch）或伽利略望远镜（Galilean telescope），由一组透镜组成物镜，目镜是一个色散透镜 [Beez98]。

19 世纪，毫无疑问，Joseph Von Fraunhofer（夫琅禾费）对透镜式望远镜进行了改进，并具有最终固定形式，同时，使玻璃制造和处理进入新的纪元。夫琅禾费在光学计算以及增加光学玻璃制造工艺品种方面做出了巨大贡献，赢得了尊重，其主要贡献是：建立了光学计量术，用玻璃样板测量表面轮廓，并发现了玻璃的色散现象，尤其是成功地提高了玻璃质量（在条纹和气泡方面），通过改变原材料的混合比而形成新的玻璃类型。此外，还设计了加工较大直径坯件的机器，推动了光学零件的工业化生产，而在此前，这是一个相当精巧的手工艺。夫琅和费的科学研究创建了光学制造技术的基本原理。