

53.71

112

波动光学

〔日〕久保田 广著

刘瑞祥 译

王国强 校



科学出版社

1983

1110577

内 容 简 介

本书以光的干涉和衍射为中心,系统地阐述了现代光学的基础——波动光学的理论和应用。

全书分为绪论和四个篇章:绪论中扼要论述了波动光学基础,如电磁波动、反射和折射;第 I 篇为干涉基础论,下分两章论述光的干涉问题;第 II 篇为干涉的应用,分三章介绍了各种干涉仪原理、构造和应用,以及光学薄膜;第 III 篇为衍射,分成两章论述了衍射理论、象的性质及象质评价等;第 IV 篇为波动光学特论,下分两章论述特殊光学系统及相干光学。

本书可供从事现代光学研究、光学仪器设计制造和光学测试的技术工作者、科研人员及大专院校光学专业的师生阅读。

波 动 光 学

久保田 广著

岩波書店,1971年

波 动 光 学

〔日〕久保田 广著

刘瑞祥 译 王国强 校

责任编辑 陈德义

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

*

1983年2月第一版 开本:787×1092 1/32

1983年2月第一次印刷 印张:20 1/8

印数:0001—4,850 字数:458,000

统一书号:15031·467

本社书号:2924·15—4

定 价: 3.10 元

目 录

绪论 波动光学基础	1
§ 1 电磁波动	1
§ 1-1 电磁波	1
(a) 光的电磁波理论 (b) 麦克斯韦理论 (c) 电磁场的基本方程式	
§ 1-2 电磁波的传播	7
(a) 波动方程 (b) 平面波、球面波 (c) 平面电磁波的性质 (d) 偏振光 (e) 导体中的波	
§ 1-3 驻波	19
(a) 波的叠加 (b) 非齐次波 (c) 波导管 (d) 相速与群速	
§ 2 反射和折射	27
§ 2-1 反射·折射定律	27
(a) 电场波和磁场波的公式 (b) 反射·折射定律 (c) 费涅耳系数 (d) 垂直入射 (e) 布儒斯特角 (f) 玻片堆起偏镜	
§ 2-2 全反射	37
(a) 临界角 (b) 费涅耳菱形棱镜 (c) 第二媒质中的波 (d) 全反射中的横向位移 (e) 全反射半透明反射镜	

第 I 篇 干涉基础论

第一章 干涉条纹	46
§ 3 双光束干涉	46
§ 3-1 光的干涉	46

§ 3-2	由波面分割造成的干涉	47
(a)	双缝干涉 (b) 双缝干涉的应用 (c) 费涅耳双棱镜 (d) 罗埃镜	
§ 3-3	干涉与电磁波	53
(a)	TE 波、TM 波 (b) 维纳实验	
§ 3-4	由振幅分割造成的干涉	56
(a)	等厚干涉条纹 (b) 等倾干涉	
§ 4	多束光波的叠加	65
§ 4-1	多束光波干涉的基本公式	65
§ 4-2	由波面分割造成的多光束干涉	66
(a)	光栅造成的干涉 (b) 干涉条纹的各种常数 (c) 干涉与衍射	
§ 4-3	由振幅分割造成的多光束干涉	72
(a)	多次反射光的干涉 (b) 标准具分光器的原理 (c) 干涉滤光片的原理 (d) 特兰斯基法	
第二章	干涉特论	83
§ 5	多色光的干涉	83
§ 5-1	由不同光源发出的光的叠加	83
§ 5-2	多色光的干涉花样	86
(a)	两种波长的光 (b) 连续光谱 (c) 矩形光谱 (d) 吸收光谱	
§ 5-3	白光的干涉花样	93
(a)	白色干涉条纹 (b) 厚板的干涉条纹 (c) 干涉条纹的亮度 (d) 干涉条纹的消色	
§ 6	扩展光源造成的干涉花样	101
§ 6-1	对比度的下降和定域	101
(a)	对比度的下降 (b) 干涉花样的定域	
§ 6-2	干涉花样的位置	106
(a)	楔面的干涉 (b) 费涅耳双棱镜 (c) 罗埃镜	
§ 6-3	天体干涉仪	110

(a) 双星的测量 (b) 星体视直径的测量 (c) 天体干涉仪

第II篇 干涉的应用

第一章 干涉仪	117
§ 7 折射干涉仪	117
§ 7-1 雅曼干涉仪	117
§ 7-2 瑞利干涉仪	120
§ 7-3 泽尼克干涉仪	123
§ 7-4 使用标准具的干涉折射仪	125
§ 7-5 马赫干涉仪	127
§ 8 麦克尔逊干涉仪	129
§ 8-1 构造和原理	129
(a) 构造 (b) 干涉条纹的形状	
§ 8-2 麦克尔逊-莫雷实验	134
§ 8-3 由可见度曲线进行光谱测定	136
§ 8-4 谱线宽度的测量	137
(a) 多卜勒宽度 (b) 自然宽度	
§ 8-5 谱线精细结构的解析	141
(a) Na 的 D 谱线 (b) H _α 线 (c) Hg 的绿线	
§ 8-6 干涉图法	145
§ 8-7 用光波测长	146
(a) 麦克尔逊法 (b) 法卜里-帕罗和布诺阿测量 (c) 长度的国际标准	
§ 9 测长干涉仪	150
§ 9-1 柯斯特斯测长干涉仪	150
§ 9-2 三角光路测长干涉仪	153
§ 9-3 柯斯特斯(双棱镜型)测长干涉仪	155
§ 9-4 测长误差的探讨	156
§ 10 干涉分光器	158
§ 10-1 干涉分光的基本常数	158

(a) 色散 (b) 色散域 (c) 分辨本领	
§ 10-2 分辨本领的标准	161
§ 10-3 衍射光栅	163
(a) 光谱学性能 (b) 凹面光栅 (c) 衍射光栅分光器	
(d) 各种装置的比较	
§ 10-4 阶梯光栅	174
(a) 反射阶梯光栅 (b) 透射阶梯光栅 (c) 阶梯光栅与分光棱镜	
§ 10-5 小阶梯光栅和中阶梯光栅	179
§ 10-6 法布里-帕罗干涉仪	180
(a) 分辨本领 (b) 作为谐振器的标准具 (c) 色散域	
(d) 色散与波长的测量 (e) 二重标准具 (f) 球面标准具	
§ 10-7 鲁麦-戈尔克板	187
§ 10-8 各种干涉分光仪的比较	187
第二章 测量透镜的干涉方法	189
§ 11 台曼透镜干涉仪	190
§ 11-1 原理与构造	190
§ 11-2 象差的干涉图形	193
(a) 反射镜中心的偏离 (b) 球差 (c) 彗差 (d) 象散与象面弯曲 (e) 畸变	
§ 11-3 象差的测定	197
(a) 移动反射镜的方法 (b) 使用偏角器的方法 (c) 干涉条纹解析的方法	
§ 11-4 其它的测量和检查	205
(a) 透镜和光学系统的综合检查 (b) 棱镜等的检查	
§ 11-5 台曼干涉仪的变形	208
(a) 用于大型透镜的干涉仪 (b) 用于显微物镜的干涉仪	
§ 12 以中心光束为基准的干涉仪	209

§ 12-1 迈克尔逊法	209
§ 12-2 戈德纳-贝奈特改进	212
§ 12-3 费涅耳带板法	213
§ 12-4 散射光法	214
§ 12-5 利用双折射的干涉仪	215
§ 13 波面剪切透镜干涉仪	216
§ 13-1 干涉图	218
(a) 干涉条纹表达式 (b) 象差的干涉图 (c) 干涉图 的作图	
§ 13-2 维茨曼干涉仪及其它	223
(a) 维茨曼干涉仪 (b) 鲁奴贝尔棱镜干涉仪 (c) 布 朗干涉仪	
§ 13-3 贝茨干涉仪及其它	226
(a) 贝茨方法 (b) 德留干涉仪 (c) 布朗干涉仪	
§ 13-4 朗奇检验法	228
§ 13-5 三角光路型干涉仪	229
(a) 横向剪切或角剪切干涉仪 (b) 径向剪切干涉仪	
§ 13-6 波前反转干涉	231
§ 13-7 偏光干涉仪	233
(a) 横向剪切干涉仪 (b) 角剪切干涉仪	
第三章 光学薄膜	240
§ 14 单层膜	240
§ 14-1 光学薄膜	240
§ 14-2 减反射膜	243
(a) 振幅和位相条件 (b) 膜的效率	
§ 14-3 干涉色	246
(a) 减反射膜的色 (b) 增反射膜的色	
§ 15 多层膜的反射率	250
§ 15-1 解麦克斯韦方程式的方法	251
§ 15-2 特征矩阵方法	252

§ 15-3 假想表面法	258
§ 16 多层减反射膜	260
§ 16-1 二层膜	260
(a) $n_1d_1=n_2d_2$ 时 (b) $n_1d_1=2n_2d_2$ 时 (c) 任意膜厚 时	
§ 16-2 三层膜	266
(a) $n_1d_1=n_2d_2=n_3d_3$ 时 (b) $n_2d_2=\lambda_0/2$ 时	
§ 16-3 非均质膜	268
(a) 单层膜 (b) 二层膜	
§ 17 干涉滤光片	272
§ 17-1 单色滤光片	273
(a) 增大反射率的滤光片 (b) 加厚中间层的方法 (c) 使厚度为整数比的膜重叠的方法	
§ 17-2 带通滤光片	279
(a) 透过率曲线 (b) 截止带的宽度与位置	
§ 17-3 特殊用途的干涉滤光片	282
(a) 可变滤光片 (b) 增反射膜 (c) 三色分光滤光片 (d) 红外线滤光片 (e) 保护膜 (f) 偏振滤光片	

第 III 篇 衍 射

第一章 衍射基础论	289
§ 18 衍射的基础公式	289
§ 18-1 衍射理论的发展	289
§ 18-2 费涅耳衍射理论	291
§ 18-3 基霍夫积分	295
§ 18-4 衍射象的计算	298
(a) 衍射积分 C 和 S (b) 夫朗和费衍射 (c) 费涅耳 衍射	
§ 18-5 衍射特论	309
(a) 衍射的积分方程式 (b) 边缘波理论	

§ 19 夫朗和费衍射	315
§ 19-1 衍射积分	315
(a) 矩形孔 (b) 圆孔 (c) 小颗粒的衍射象	
§ 19-2 衍射象的一般性质	324
(a) 开孔的平移 (b) 开孔的点对称性 (c) 衍射象的 点对称性 (d) 线对称性 (e) 对称轴上的强度 (f) 相反性 (g) 衍射象的颜色	
§ 19-3 周期开孔的衍射象	330
(a) 基本公式 (b) 双缝的衍射象 (c) 光栅的衍射象 (d) 无限扩展的光栅 (e) 缺级 (f) 正弦波光栅	
§ 19-4 特殊形状的开孔	340
(a) 一部分被遮盖的开孔 (b) 扇形开孔 (c) 正三角 形开孔 (d) 反射望远镜的衍射象	
§ 19-5 有位相差的开孔	348
(a) 位相差为 σ 的圆形开孔 (b) 偏光显微镜的衍射象 (c) 屋脊棱镜的衍射象	
§ 19-6 扩展光源的衍射象	353
(a) 线光源 (b) 半无限面光源 (c) 存在有锐角的光 源 (d) 圆形光源 (e) 环带状光源 (f) 星经过 太阳表面时的情况	
§ 20 费涅耳衍射	362
§ 20-1 圆形开孔的衍射象	362
(a) 衍射积分 (b) 衍射象的强度 (c) 小圆板的衍射 象	
§ 20-2 针孔照相机	368
(a) 帕茨巴尔理论 (b) 主焦点与副焦点 (c) 鉴别率 (d) 其它理论	
§ 20-3 费涅耳环带板	374
第二章 象的性质	379
§ 21 焦点论	379

§ 21-1 焦点附近的位相异常	379
(a) 不考虑衍射时的情况 (b) 考虑衍射时的情况 (c) 实验证明	
§ 21-2 衍射象的强度	384
(a) 衍射积分 (b) 焦平面和光轴上的值 (c) 几何光学影的边界 (d) 焦平面前后的强度分布 (e) 子午面内的强度分布 (f) 大相对孔径时的情况	
§ 21-3 焦深	392
(a) 弥散圆半径与焦深 (b) 中心强度与焦深 (c) 瑞利极限 (d) 环带开孔的焦深	
§ 21-4 最佳象面	396
(a) 小象差时 (b) 大象差时 (c) 有高级象差时	
§ 22 象差的衍射象	408
§ 22-1 赛得象差的衍射象	409
(a) 球差 (b) 彗差 (c) 象散	
§ 22-2 象差按幂级数分类及其衍射象	424
(a) 象差图形 (b) 强度分布	
§ 22-3 象差函数按正交函数系展开	429
(a) 帕塞瓦尔定理 (b) 象差的中心强度 (c) 展开中所用的正交多项式	
§ 22-4 虹的理论	436
§ 23 鉴别率	441
§ 23-1 鉴别率	441
(a) 瑞利分辨极限 (b) 使用瑞利值的注意事项	
§ 23-2 显微镜的鉴别率	449
(a) 照明和鉴别率 (b) 具有周期结构物体的鉴别率 (c) 作为再衍射系统的显微镜 (d) 再衍射系统的鉴别率	
§ 23-3 棱镜分光器的分辨本领	460
(a) 瑞利公式 (b) 狭缝宽度和谱线宽度的校正	
§ 24 光学系统的频率特性	464

§ 24-1 光学传递函数	464
(a) 作为频率滤波器的光学系统 (b) 无象差系统的光学传递函数 (c) 光学传递函数的计算方法	
§ 24-2 光学传递函数和象的性质	472
(a) 对比度和光学传递函数 (b) 明锐度和光学传递函数	
§ 24-3 光学系统的评价方法	475
(a) 光学传递函数和鉴别率 (b) 作为评价指标的鉴别率 (c) 中心强度(S. D.) (d) 其它评价指标 (e) 取样定理	
§ 24-4 象差的光学传递函数	483
(a) 象差的光学传递函数 (b) 波动光学与几何光学传递函数的比较 (c) 象散和彗差的光学传递函数 (d) 用点列图计算光学传递函数	
§ 24-5 光学传递函数的测量方法	492
(a) 电学傅里叶解析法 (b) 对比度法 (c) 相关函数法 (d) 肉眼和感光材料的光学传递函数	

第IV篇 波动光学特论

第一章 特殊光学系统	505
§ 25 干涉显微镜和位相差显微镜	505
§ 25-1 干涉显微镜	506
(a) 透射型干涉显微镜 (b) 落射型干涉显微镜 (c) 利用双折射的干涉显微镜 (d) 多次反射干涉显微镜	
§ 25-2 位相差显微镜	513
(a) 位相光栅的衍射象 (b) 位相差显微镜 (c) 可变位相差显微镜	
§ 26 纹影法	519
§ 26-1 无象差透镜的纹影象	520

(a) 柱透镜的纹影象 (b) 圆透镜的纹影象	
§ 26-2 象差的纹影象	536
(a) 刀口 (b) 用位相差法检测象差	
§ 27 用滤波法改善象质	540
§ 27-1 振幅滤波器	540
(a) 菱形开孔 (b) 环带开孔 (c) 使中心强度变为最大的滤波器 (d) 提高鉴别率的滤波器 (e) 切趾法	
§ 27-2 复数滤波器	548
(a) 模糊象的改善 (b) 双焦滤波器	
§ 27-3 空间频率滤波器	551
第二章 相干光学	555
§ 28 全息照相	555
§ 28-1 波动的记录和再现	555
(a) 波动的记录 (b) 象的再现 (c) 全息照相的光学常数	
§ 28-2 全息照相的应用	562
(a) 立体象的再现 (b) 实时法和多重曝光法 (c) 象差校正 (d) 电子波全息照相 (e) X 射线全息照相	
§ 29 激光光学	568
§ 29-1 光的产生	568
(a) 简谐振子 (b) 阻尼辐射 (c) 同步加速器发光 (d) 史密斯-帕塞尔效应 (e) 波荡器 (f) 切伦柯夫效应	
§ 29-2 受激辐射(激光)	575
(a) 自发辐射和受激辐射 (b) 激光的产生 (c) 激光的特点	
§ 29-3 激光器	581
(a) 固体激光器 (b) 气体激光器 (c) 半导体激光器 (d) 大功率脉冲激光器 (e) 喇曼激光器	

§ 29-4 激光的应用	587
(a) 在干涉仪中的应用 (b) 精密测长 (c) 慢角速度的精密测定 (d) 宇宙通信 (e) 强电场的产生 (f) 高次谐波的产生 (g) 其它	
§ 30 统计光学	595
§ 30-1 光的可干涉性	595
(a) 光的寿命 (b) 寿命和半宽度 (c) 光的相干性 (d) 范希坦尔特-泽尼克定理 (e) 光的差拍	
§ 30-2 统计光学	609
(a) 光波的相关函数 (b) I' 的场 (c) 狭缝的衍射象 (d) 光的“起伏” (e) 强度干涉仪	
附录 衍射象的图形和数值表	621
附录 1 衍射象的等强度线	621
附录 2 衍射象的照片	624
附录 3 著作	625
附录 4 衍射象强度分布图一览表	627
附录 5 主要的数表和公式汇编等	627

(a) 柱透镜的纹影象 (b) 圆透镜的纹影象	
§ 26-2 象差的纹影象	536
(a) 刀口 (b) 用位相差法检测象差	
§ 27 用滤波法改善象质	540
§ 27-1 振幅滤波器	540
(a) 菱形开孔 (b) 环带开孔 (c) 使中心强度变为最大的滤波器 (d) 提高鉴别率的滤波器 (e) 切趾法	
§ 27-2 复数滤波器	548
(a) 模糊象的改善 (b) 双焦滤波器	
§ 27-3 空间频率滤波器	551
第二章 相干光学	555
§ 28 全息照相	555
§ 28-1 波动的记录和再现	555
(a) 波动的记录 (b) 象的再现 (c) 全息照相的光学常数	
§ 28-2 全息照相的应用	562
(a) 立体象的再现 (b) 实时法和多重曝光法 (c) 象差校正 (d) 电子波全息照相 (e) X 射线全息照相	
§ 29 激光光学	568
§ 29-1 光的产生	568
(a) 简谐振子 (b) 阻尼辐射 (c) 同步加速器发光 (d) 史密斯-帕塞尔效应 (e) 波动器 (f) 切伦柯夫效应	
§ 29-2 受激辐射(激光)	575
(a) 自发辐射和受激辐射 (b) 激光的产生 (c) 激光的特点	
§ 29-3 激光器	581
(a) 固体激光器 (b) 气体激光器 (c) 半导体激光器 (d) 大功率脉冲激光器 (e) 喇曼激光器	

绪论 波动光学基础

§ 1 电 磁 波 动

§ 1-1 电磁波

(a) 光的电磁波理论

1865年麦克斯韦在英国皇家学会上，作了题为“电磁场动力学理论”的讲演，整理了到那时为止已经知道的电磁学实验事实，引进了所谓位移电流的新概念，导出了表示电磁场的微分方程式。仔细分析该微分方程的解，就可知道，电磁场的变化将作为波动在空间传播，在平面波的情况下，它具有如下性质¹⁾：

- (i) 电场波与磁场波同时发生；
- (ii) 电场波与磁场波都是横波，其振动面互相垂直；
- (iii) 电场波与磁场波具有相同的位相，它们的传播速度都为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

式中 ϵ 和 μ 分别是媒质的介电常数和导磁率。

这里， c 是静电单位与电磁单位换算时出现的常数。所谓静电单位就是使关于电荷 e 与 e' 在真空中相互作用力的库仑定律表达为如下形式的单位：

$$F = \frac{ee'}{r^2}$$

而在电磁单位中，真空中磁荷 m ， m' 间的库仑定律为

1) C. Maxwell: Phil. Transact. Roy. Soc. (London) **155** (1865) 459.

$$F = \frac{mm'}{r^2}$$

若 e 采用电磁单位表示, 则关于电荷作用力的库仑定律变为

$$F = c^2 \frac{ee'}{r^2}$$

c 具有速度量纲. 韦伯和考尔拉乌修¹⁾测量了电容已知的电容器的电位差, 求得其电荷(静电单位), 再将电容器通过冲击电流计放电, 测得电量(电磁单位), 然后求得它们的比, 得

$$c = 3.1074 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒 } ^{2)}$$

在空气中, 因为 $\epsilon \approx \mu \approx 1$, 所以该值就是空气中电磁波的速度. 麦克斯韦的预言极为卓越, 可是由于电磁波的概念是一个眼睛看不见的难以接受的概念, 又加上当时没有任何实验根据, 所以很长时间没有得到承认.

由于光很容易由眼睛直接看到, 所以人们早就开始研究它, 最初牛顿等人认为光是粒子, 而惠更斯却提出了波动说(1690), 他根据杨氏的双缝实验(1802)和费涅耳对偏振光及衍射的说明(1815)等, 证明了光是横波. 1850年傅科测量了水中的光速, 若光是粒子, 它应比空气中的光速大, 但测量结果却比空气中的光速小, 这是波动说的有力证据. 并且证明了水中光速与真空中光速之比是折射率的倒数(表 1-1). 当时认为光是在以太中传播的, 其速度已经知道, 在空气中是:

裴佐的测定值(1849) $v = 2.98 \times 10^{10}$ 厘米/秒

傅科的测定值(1862) $v = 3.08 \times 10^{10}$ 厘米/秒

这与电磁波的速度 c 极为吻合.

麦克斯韦从这些事实出发, 研究了相同性质的两束光在

1) R. Kohlrausch & W. Weber: Pogg. Ann. Phys. Chem. (2) **99** (1856) 10.

2) 最近的测定值是 $c = 2.997925 \times 10^{10}$ 厘米/秒 (Document U. I. P. **11** (1965), S. U. N. Commission, IUPAP).

表 1-1

年代	电磁学	光
(1690)		惠更斯(光的波动说)
(1702)		牛顿(光的粒子说)
1780	库仑定律	
1800		杨氏(光的干涉)
20	安培定理	费涅耳(偏振光、衍射)
40	法拉第(电磁感应)	
60	考尔拉乌修、韦伯 (光速的实际测量)	傅科(根据水中光速的测定证明了波动说)
80	麦克斯韦(预言 电磁波的存在)	麦克斯韦(光的电磁波理论)
1900	赫兹(证明了 电磁波的存在)	罗伦茨(根据电磁波理论解释了光的 折射定律)

不同媒质中传播的不同现象，将其上升为理论，在前述论文的第 VI 章“光的电磁波理论”中，断定了“光是一种以场的形式按照电磁定律传播的电磁扰动”。在麦克斯韦死后九年，即 1888 年，赫兹首先进行了电磁波的反射、折射和偏振实验，并测定了它的速度，从而证明了电磁波的存在。可是在此之前，光却是电磁波存在的唯一例证。

下面说明麦克斯韦是如何导出电磁波方程式的。

(b) 麦克斯韦理论

麦克斯韦理论的基础是关于电流和磁场相互作用的安培定理和法拉第定律。前者叙述了电流的磁作用，即“当闭合回路中存在电流 i 时，在与电流回路平面垂直的方向上，将产生与条形磁铁相同的磁场，单位正磁荷绕回路一周所作的功等于 $4\pi i$ ”。

如果沿着该磁荷路径 s 的磁场分量为 H_s ，则功为：