

材料科学与工程系列

Optical Microscopic Analysis
(Second Edition)

光学显微分析

第2版

孙业英 主编

清华大学出版社

材料科学与工程系列

Optical Microscopic Analysis
(Second Edition)

光学显微分析

第2版

孙业英 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为高等院校材料科学与工程专业“光学显微分析”课程教材。全书共分 18 章,内容包括:光学显微分析的基本方法(第 1 章至第 12 章);金相及岩相的典型组织分析(第 13 章至第 18 章)。

本书除了介绍光学显微分析的基本原理和方法外,每章后附有实验要求及思考题。

本书可作为金属学及热处理专业和无机非金属材料专业有关实验课的教材,也可供工厂、研究单位的材料科学工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

光学显微分析/孙业英主编. —2 版. —北京:清华大学出版社,2003

(材料科学与工程系列)

ISBN 7-302-07021-0

I. 光… II. 孙… III. 金相显微镜—光学分析法—高等学校—教材 IV. TG115.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 070773 号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:宋成斌

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:172×246 印张:19.5 彩插:1 字数:368 千字

版 次:2003 年 12 月第 2 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-07021-0/TG·10

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

第 1 版前言

本教材是为高等院校材料科学与工程专业的《光学显微分析》课程编写的。也可作为金属学及热处理专业 and 无机非金属材料专业有关实验课的教材。

光学显微分析是材料科学研究的基本实验技术。学习本课程的目的是掌握金相及岩相分析的基础知识,加深对材料科学理论知识的理解,培养学生观察、分析、解决问题的能力和严肃认真的科学作风。

本书内容包括三个方面:

1. 光学显微分析的基本方法(第 1 章到第 11 章);
2. 金相及岩相的典型组织分析(第 12 章到第 17 章);
3. 扫描电子显微分析技术(第 18 章)。

本书根据《光学显微分析》课程的教学大纲,在编者多年从事教学实践的基础上,既吸收了国内外光学显微分析的新内容,又照顾到教学的实际要求及现状编写的。除作为相关专业的实验课教材外,还可供工厂、研究单位的材料科学工作者参考。

本书除说明了光学显微分析的基本原理和方法外,还在每章后附有实验要求和思考题,可供学生做实验和复习时参考。

本书由孙业英主编,雷淑玲参加了第 3 章、第 12 章、第 13 章的编写及照片的制作,闫允杰编写了第 18 章。

本书由陈南平主审,其中第 9 章、第 10 章、第 17 章由周和平审阅,他们对本书提出了许多宝贵的意见。谨在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,错误及不妥在所难免,敬请读者批评指正。

第2版前言

光学显微分析是高等院校材料类的一门专业基础课。第1版我们把金属材料和非金属材料的分析方法编在一起,既拓宽了专业面,又减少了授课学时。

随着光学显微技术的发展,其教材内容需要做进一步修改和更新。第2版的光学显微分析在第1版的基础上,增加了“微分干涉衬度显微技术”的新内容。微分干涉相衬显微技术是近年发展起来的分析方法,它使显微镜的垂直分辨率达到纳米级,可以观察到一般显微技术所观察不到的显微组织形貌。现代多功能显微镜都带有此项技术,这使显微镜的应用更加广泛,更能发挥显微镜快捷、方便的特点。微分干涉相衬显微技术使用的是偏振光照明,因为在分析观察结果时要用到偏振光的反射和透射原理,这部分内容应该放在偏光显微镜的原理及其应用之后。

第1版“扫描电子显微分析”一章是作为光学显微技术的扩展而收入此书。因为考虑到一般高等院校材料科学专业中都设有《电子显微镜》一门课,其中对扫描电子显微镜有专门介绍。因此第2版不再列入这部分内容,以使光学显微分析的内容更加集中和精练。

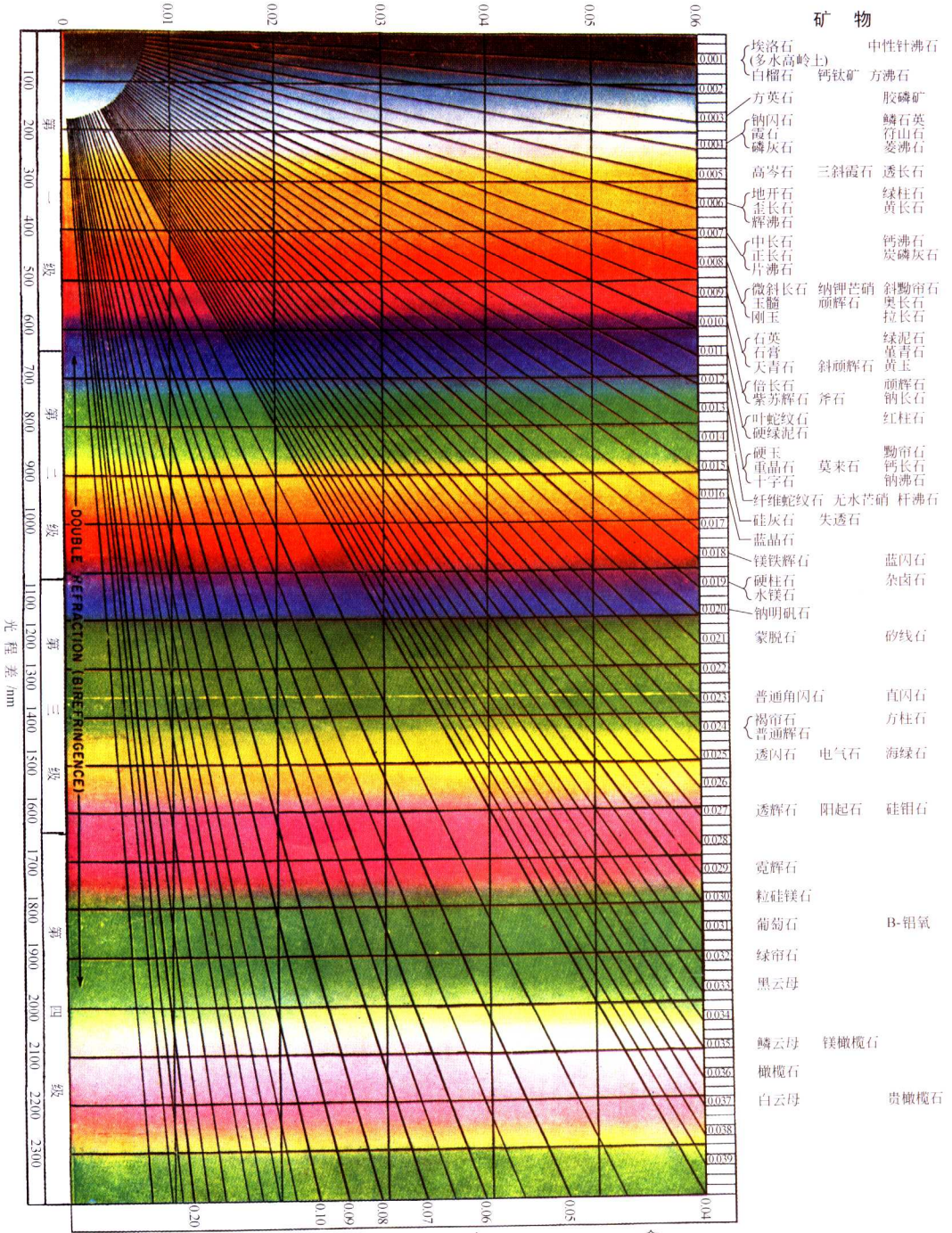
书中有不当之处,敬请批评指正。

编 者

2003年6月

薄片厚度/mm

矿物



干涉色色谱表

矿物

金红石
菱铁矿
白云石
方解石
霞石
滑石
黄铁矿
石膏
方解石
白云石
菱铁矿
金红石

三水铝矿
斜长石
白云石
菱铁矿
金红石
菱铁矿
白云石
方解石
霞石
滑石
黄铁矿
石膏
方解石
白云石
菱铁矿
金红石

伊丁石
硬石膏
金红石
白云石
菱铁矿
白云石
方解石
霞石
滑石
黄铁矿
石膏
方解石
白云石
菱铁矿
金红石

矿物

干涉色色谱表

目 录

第 1 章 金相显微镜的原理、构造及使用	1
1.1 显微镜的成像原理	1
1.2 显微镜的放大率	4
1.3 透镜的像差	5
1.3.1 球面像差	5
1.3.2 色像差	5
1.3.3 像域弯曲	6
1.4 显微镜的物镜	7
1.4.1 数值孔径	7
1.4.2 分辨率	7
1.4.3 焦深(垂直分辨率)	8
1.4.4 工作距离与视场范围	9
1.4.5 物镜的基本类型	10
1.5 显微镜的目镜	11
1.5.1 惠更斯目镜	11
1.5.2 拉姆斯登目镜	12
1.5.3 补偿目镜	12
1.5.4 广视场目镜	12
1.6 金相显微镜的照明系统	12
1.6.1 光源	12
1.6.2 临界照明与科勒照明	13
1.6.3 照明方式与垂直照明器	14
1.6.4 光栏	16
1.6.5 滤色片	17
1.7 金相显微镜介绍	17
1.7.1 XJ-16 型金相显微镜	17
1.7.2 Epignost 型金相显微镜	19
1.7.3 大型卧式显微镜	19

1.7.4 现代金相显微镜的进展	20
1.7.5 显微镜使用注意事项	21
实验	22
思考题	22
第2章 金相显微试样的制备	24
2.1 概述	24
2.2 取样	24
2.2.1 取样部位及检验面的选择	25
2.2.2 试样的截取方法	25
2.2.3 试样尺寸	25
2.3 镶样	25
2.4 磨光	26
2.5 抛光	29
2.5.1 机械抛光	29
2.5.2 电解抛光	30
2.5.3 化学抛光	31
2.6 金相试样的腐蚀	32
2.6.1 化学腐蚀	32
2.6.2 电解腐蚀	34
实验	46
思考题	46
第3章 显微摄影及暗室技术	48
3.1 显微摄影成像原理及摄影装置	48
3.1.1 显微摄影成像原理	48
3.1.2 显微摄影装置	49
3.2 显微摄影的步骤	51
3.2.1 试样制备	51
3.2.2 感光胶片的选择	51
3.2.3 胶片的曝光	54
3.2.4 胶片的冲洗	55
3.3 印相和放大	58
3.3.1 相纸的结构	58
3.3.2 相纸的分类	58

3.3.3 印相	59
3.3.4 放大	59
实验	59
思考题	60
第 4 章 宏观分析与火花鉴别	61
4.1 宏观分析	61
4.1.1 断口分析	61
4.1.2 磨片分析	62
4.1.3 贴印法	64
4.2 火花鉴别	66
4.2.1 火花类型	66
4.2.2 碳钢的火花	67
4.2.3 几种常见合金的火花	69
4.3 钢铁的听音鉴别	71
实验	71
思考题	71
第 5 章 金相定量分析	73
5.1 体视学和定量金相学	73
5.2 基本符号和基本方程	73
5.2.1 基本符号	73
5.2.2 基本方程	74
5.3 定量分析的基本方法	75
5.3.1 比较法	75
5.3.2 计点法	78
5.3.3 截线法	78
5.3.4 截面法	78
5.3.5 联合测量法	79
5.4 定量分析在材料研究中的应用	79
5.4.1 晶粒尺寸的测定	79
5.4.2 第二相颗粒的几何尺寸测定	83
5.4.3 误差分析	84
5.5 自动图像分析仪的应用	86
实验	87

思考题	87
第6章 相衬显微镜的原理及其应用	88
6.1 相衬显微镜的光学原理	88
6.2 相衬显微镜	90
6.2.1 相衬附件	91
6.2.2 相衬显微镜	92
6.3 相衬技术在材料科学研究中的应用	94
6.3.1 相变浮凸的观察	94
6.3.2 过共析钢的球化退火组织的观察	95
6.3.3 铸造合金的枝晶偏析的观察	95
6.3.4 滑移线的观察	96
实验	96
思考题	97
第7章 干涉显微镜的原理及其应用	98
7.1 光的干涉原理	98
7.1.1 尖劈干涉	98
7.1.2 牛顿环	99
7.2 干涉显微镜	100
7.2.1 双束干涉显微镜(林尼克干涉显微镜)	100
7.2.2 多光束干涉显微镜	101
7.3 干涉显微镜的应用	103
7.3.1 表面光洁度的测定	103
7.3.2 相变浮凸的研究	103
7.3.3 材料塑性变形的研究	103
实验	104
思考题	104
第8章 反光偏振光显微镜的原理及其在材料研究中的应用	105
8.1 偏振光的基础知识	105
8.1.1 光的反射及反射率	105
8.1.2 自然光和偏振光	105
8.1.3 直线偏振光、圆偏振光及椭圆偏振光	105
8.2 偏振光的反射原理	109

8.3 偏振光装置的调整及使用	111
8.3.1 起偏振镜位置的调整	111
8.3.2 检偏振镜位置的调整	112
8.3.3 载物台中心位置的调整	112
8.3.4 偏振光照明下的色彩(色偏振)	112
8.4 应用举例	112
8.4.1 材料显微组织的显示	112
8.4.2 非金属夹杂物的鉴定	114
实验	128
思考题	129
 第9章 透光偏振光显微镜的原理及其在材料研究中的应用	130
9.1 光在介质中的传播	130
9.1.1 光学基础知识	130
9.1.2 光在介质中的传播	132
9.2 透光偏振光显微镜的构造和使用	136
9.2.1 透光偏光显微镜的构造	136
9.2.2 偏光显微镜的调节	138
9.3 单偏光系统	141
9.3.1 显微组织形貌的观察	141
9.3.2 贝克线、糙面和突起	143
9.3.3 多色性和吸收性	148
9.4 正交偏光系统	149
9.4.1 正交系统下偏光的干涉原理	149
9.4.2 单色光的干涉	150
9.4.3 白光(多色光)的干涉	151
9.4.4 补色法则与补色器	153
9.4.5 干涉色色谱表及干涉色级序的测定	155
9.4.6 消光类型及消光角的测定	157
9.4.7 延性符号的测定	158
9.5 锥光系统(聚敛偏光系统)	159
9.5.1 锥光系统的特点	159
9.5.2 一轴晶的干涉图	160
9.5.3 二轴晶的干涉图	168
9.6 薄片试样的制备	175

实验	177
思考题	180
第 10 章 油浸法测定透光材料的折射率	183
10.1 油浸法的测定原理	183
10.1.1 直照法	184
10.1.2 斜照法	185
10.2 浸油的配制	187
10.2.1 浸油的配制	187
10.2.2 浸油折射率的测定	190
10.3 油浸法测定透光材料折射率的方法	192
10.3.1 油浸薄片的制备	192
10.3.2 测定方法	192
10.4 半圆柱坐标鉴定系统	193
实验	196
思考题	198
第 11 章 微分干涉衬度显微技术	199
11.1 干涉衬度的概念	200
11.2 微分干涉衬度显微技术	200
11.2.1 光路的组成	200
11.2.2 微分干涉衬度显微技术的光学原理	201
11.3 微分干涉衬度装置及其使用	204
11.3.1 渥拉斯顿棱镜	204
11.3.2 诺曼斯基棱镜	205
11.3.3 起偏振镜和检偏振镜	206
11.3.4 灵敏色片	207
11.3.5 微分干涉衬度装置的调节和使用	208
11.4 微分干涉衬度技术在材料研究中的应用	208
11.4.1 无机物的观察	208
11.4.2 有机物的观察	208
实验	209
思考题	210

第 12 章 各种硬度计的原理、构造及应用	211
12.1 洛氏硬度测试法	211
12.1.1 洛氏硬度的测量原理	211
12.1.2 洛氏硬度计的构造	214
12.2 布氏硬度测试法	214
12.2.1 布氏硬度的测量原理	214
12.2.2 布氏硬度的测试步骤	216
12.2.3 布氏硬度的特点	217
12.3 维氏硬度测试法	218
12.3.1 维氏硬度的测量原理	218
12.3.2 维氏硬度的测试	219
12.4 显微硬度测试法	220
12.4.1 显微硬度的测量原理	220
12.4.2 显微硬度计的构造及其应用	220
12.4.3 影响显微硬度值的因素	224
12.5 摩氏硬度	224
12.6 使用硬度计应注意的事项	225
实验	226
思考题	226
 第 13 章 金属的塑性变形与再结晶	237
13.1 塑性变形的的基本方式及其特征	237
13.1.1 滑移	237
13.1.2 孪生	239
13.2 塑性变形后金属组织与性能的变化	241
13.2.1 显微组织的变化	241
13.2.2 性能的变化	242
13.3 冷变形后金属加热时组织与性能的变化	242
13.3.1 回复	242
13.3.2 再结晶	243
13.3.3 晶粒长大	246
实验	246
思考题	247

第 14 章 二元合金的显微组织	249
14.1 匀晶系相图及其合金的显微组织	249
14.2 共晶系相图及典型合金的显微组织	251
14.2.1 共晶合金	251
14.2.2 亚共晶及过共晶合金	252
14.3 包晶系相图及典型合金的显微组织	254
实验	256
思考题	257
第 15 章 铁碳合金的平衡组织	259
15.1 工业纯铁在退火状态下的显微组织	259
15.2 碳钢在退火状态下的显微组织	260
15.2.1 共析钢	260
15.2.2 亚共析钢	261
15.2.3 过共析钢	262
15.3 白口铸铁的显微组织	263
15.3.1 共晶白口铸铁	263
15.3.2 亚共晶白口铸铁	263
15.3.3 过共晶白口铸铁	264
实验	265
思考题	265
第 16 章 工业用铸铁的显微组织及碳钢中常见的显微组织缺陷	267
16.1 普通灰口铸铁	268
16.2 孕育铸铁	269
16.3 球墨铸铁	270
16.4 蠕虫状石墨铸铁	271
16.5 可锻铸铁	273
16.6 碳钢中常见的显微缺陷	274
16.6.1 带状组织	274
16.6.2 魏氏组织	274
16.6.3 表层脱碳	275
实验	277

思考题	277
第 17 章 三元合金的显微组织	278
17.1 三元合金相图	278
17.1.1 成分表示法	278
17.1.2 等温截面图与变温截面图	278
17.1.3 等温线投影图	279
17.2 Bi-Pb-Sn 三元合金的液相面投影图及典型合金的结晶过程	280
17.2.1 Bi-Pb-Sn 三元合金的液相面投影图	280
17.2.2 典型合金的结晶过程	282
实验	285
思考题	285
第 18 章 陶瓷材料的显微组织	286
18.1 普通陶瓷原材料	286
18.1.1 粘土	286
18.1.2 石英	286
18.1.3 长石	287
18.2 陶瓷材料的显微结构	287
18.2.1 晶相	287
18.2.2 玻璃相	288
18.2.3 气相	289
18.3 典型陶瓷材料的显微组织	289
18.3.1 普通陶瓷	290
18.3.2 日用陶瓷	290
18.3.3 75 氧化铝瓷	290
18.3.4 透明氧化铝瓷	290
18.3.5 电熔刚玉	291
18.3.6 电熔锆刚玉	292
18.3.7 锰锌铁氧体	292
18.3.8 钛酸钡瓷	293
实验	294
思考题	295
主要参考文献	296

第 1 章 金相显微镜的原理、构造及使用

显微分析是材料科学中很重要的研究方法,它可以观察及研究材料中用宏观分析方法无法观察到的组织细节及缺陷。金相显微镜就是进行显微分析的主要工具。

1.1 显微镜的成像原理

显微镜的基本放大原理如图 1-1 所示。其放大作用主要由焦距很短的物镜和焦距较长的目镜来完成。为了减少像差,显微镜的目镜和物镜都是由透镜组构成的复杂的光学系统,其中物镜的构造尤为复杂。为了便于说明,图中的物镜和目镜都简化为单透镜。物体 AB 位于物镜的前焦点外但很靠近焦点的位置上,经过物镜形成一个倒立的放大实像 $A'B'$,这个像位于目镜的物方焦距内但很靠近焦点的位置上,作为目镜的物体。目镜将物镜放大的实像再放大成虚像 $A''B''$,位于观察者的明视距离(距人眼 250mm)处,供眼睛观察。在视网膜上形成的是实像 $A'''B'''$ 。

以上用几何光学原理对显微镜的成像过程进行了分析。但是实际上金相显微镜所观察的显微组织,往往几何尺寸很小,可与光波的波长相比较;根据光的电磁波理论,此时不能再近似地把光线看成是直线传播,而要考虑衍射的影响。另一

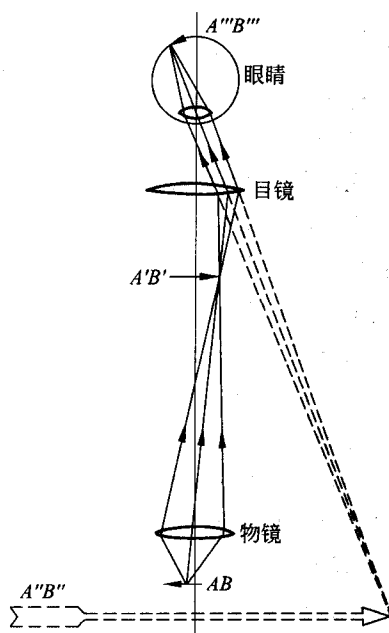


图 1-1 显微镜的成像原理图

方面,显微镜中的光线总是部分相干的,因此显微镜的成像过程是个比较复杂的衍射相干过程。事实上,由于衍射等因素的影响,显微镜的分辨能力和放大能力都受到一定限制。目前金相显微镜可观察的最小尺寸一般是 $0.2\mu\text{m}$ 左右,有效放大率最大为 $1500\sim 1600$ 倍。一百年前,德国物理学家阿贝(E. Abbe)最先用光的衍射和干涉理论解释了透射光显微镜的成像过程,他的学说对反射光显微镜同样适用,现简要介绍如下:

图 1-2 表示一个物镜成像系统,入射光是一束准平行相干光,物体是一个二维周期性组织(比如细的金属网格),图中仅显示一维的情况。光线通过细小的网孔时要发生衍射,衍射光线向各个方向传播,同一方向的衍射光则成为平行光束,通过物镜在后焦面上会聚并发生干涉。其中凡是光程差满足 $\delta = \frac{\lambda}{2}(2n+1)$, $n=0, 1, 2, \dots$ 的,互相抵消;凡是光程差满足 $\delta = k\lambda$, $k=0, 1, 2, \dots$ 的,互相加强。这样在物镜的后焦面上就产生了一个衍射相干图样,在波动光学中称为夫琅和费衍射图样。当 $k=0$ 时,光程差为 0,这部分光未发生衍射偏转,称为直射光,其相干图样称为 0 级最大值; $k=1, 2, \dots$ 的,相干图样分别称为 1 级、2 级等最大值。这里要注意,衍射光干涉图样上的某个亮点是由不同物点的同级衍射光相干加强形成的;同一物点上的

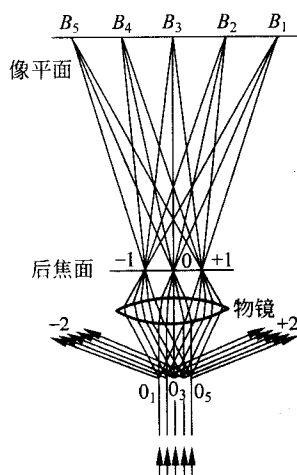


图 1-2 物体为周期性结构时,光线的主要衍射与相干,以及显微镜中像的形成

的光由于衍射分解,对衍射图样上的许多光点有贡献。同一物点上满足相干加强的各级衍射光,在产生相应的衍射亮点后继续传播,在像平面上又相互干涉,形成图像,这个图像就是物像。

物与像之间的相似性是由什么决定的呢?这可以从下述实验看出。一个细金属网在显微镜透射光照射下,在物镜后焦面上产生初级干涉图像。在后焦面上用遮蔽的方法改变允许透光的区域,使这些区域上的最大值亮点数与方位都不一样,并观察相应的最终图像。这些遮光片在光学上又称为滤波器。使用它可以控制由哪些形成最大值亮点的衍射光参与成像。首先让所有的亮点参与成像,最终的物像与物体相似,为一细密网格,见图 1-3(a)。然后让包含中心亮点的一排亮点参与成像,最终图像是一组彼此平行的线栅,见图 1-3(b)、(c)。如果只留下中心最大一个亮点(由直射光相干形成),而把其余的亮点全挡住,则最终图像是一个没有细节的均匀光场,见图 1-3(d)。由上述实验不难得出如下结