

1107200'89'11

矿物晶体微形貌学概论

山东地质学院

50005

37201号

前 言

晶体表面微形貌学 (Surface Microtopography) 是从五十年代初至今三十多年来发展起来的, 深入研究矿物晶体形貌与生长机制的新领域。它主要是以现代光学显微镜 (相衬, 微分干涉和干涉测量技术)、扫描电子显微镜等为手段, 以晶体生长理论为依据, 研究天然矿物和人工晶体的微形貌现象, 并据以解释一定的地质作用和实验条件、鉴定晶体和宝石的品质。因而矿物晶体表面微形貌的研究代表着现代矿物学和宝石学发展的一个前沿部分, 值得我们充分重视并开展研究工作。

三十多年来, 国外在已故英国伦敦大学塔仑斯基 (S. Tolansky) 教授的倡导与培养下, 许多著名的结晶矿物学家如砂川一郎, 科斯托夫等人对晶体表面微形貌的研究已发表了大量著作, 作出了卓越贡献。国内1981年刘国彬作了一般的介绍, 1983年开始在此领域有了一些关于水晶的有实际意义的研究工作。

鉴于目前我国还没有关于矿物晶体表面微形貌学比较系统的论述, 有关结晶学矿物学教材中尚缺少对于晶体表面微形貌基本内容的介绍, 在武汉地院矿物教研室的组织与帮助下, 编者主要收集了国外的一些重要研究成果, 特别是近年来日本砂川一郎学派的研究资料, 以及我们自己的少量观察, 汇编成这一小册子供地质学界岩矿专业工作者和冶金、材料工业表面研究工作者等参考, 亦可作为岩矿专业等在校学生约30学时选修课的参考教材。按矿物种的晶体表面微形貌各论, 作为本书的续篇在编写中。

由于编者水平所限, 书中漏误不当之处, 敬希指正。

本书在编写过程中陈光远教授、彭志忠教授给予关怀和指导, 并承白桦、刘树汉同志协助, 及我院潘兆榭教授, 王根元、薛君治副教授、陈升平、赵爱醒、张汉凯同志详细审阅了原稿, 并提出许多宝贵的修改意见; 插图由绘图室唐核之、温丽丽清绘, 部分照片由照相室杨国勋摄制, 谨此一并致谢。

编 者

1984.10

目 录

第一章 晶体表面微形貌的研究方法	5
一、样品处理	(1)
1. 清洗	(1)
2. 镀银	(1)
二、相衬显微镜	(2)
1. 概述	(2)
2. 相衬显微镜的光学原理	(4)
3. 相衬显微镜的性能与成象特征	(9)
4. 使用相衬显微镜的注意事项	(10)
5. 相衬显微镜的应用范围	(12)
6. 主要相衬显微镜简介	(13)
三、微分干涉显微镜	(13)
1. 述概	(13)
2. 微分干涉显微镜的光学原理	(14)
3. 反射微分干涉显微镜	(19)
4. 微分干涉显微镜的性能和成象特征	(21)
5. 使用微分干涉显微镜的注意事项	(24)
6. 应用范围	(25)
7. 主要微分干涉显微镜简介	(25)
四、相衬显微镜与微分干涉显微镜的比较	(26)
五、双光束干涉测量	(27)
1. 牛顿环	(27)
2. 迈克松干涉仪	(28)
六、多光束干涉测量 (MBI)	(30)
1. MBI 的原理	(31)
2. MBI 的光学系统	(32)
3. MBI 的测量手续	(32)
4. MBI 的应用	(34)
5. 主要 MBI 介绍	(34)
七、缀饰法	(34)
八、各种显微镜技术的联合应用	(35)
第二章 晶体表面微形貌及其成因意义	
一、概述	(36)

二、层生长理论和螺旋生长理论概要	(40)
三、螺旋生长层的几何形态及其相互作用	(44)
1. 阿几米德螺线——理想的螺旋纹	(44)
阶梯间距 λ_0	(45)
螺旋生长层的基本形态	(46)
螺旋生长层的相互作用	(46)
圆形和多角形螺旋纹	(50)
2. 影响阶梯间距 λ_0 的因素	(50)
3. α 因子及其对螺旋纹形态的影响	(51)
4. 偏心螺线、束合螺线和复合螺线	(55)
四、螺旋生长层的形态、方位与晶体结构的关系	(58)
1. 生长层的厚度	(59)
2. 晶面的对称性与螺旋生长层形态的关系	(60)
3. 左右型晶体和极性晶体的螺旋层形态特征	(65)
4. 交织图形与多型结构层的叠置	(66)
五、螺旋生长层的形态与晶体生长条件的关系	(69)
1. 阶梯间距 λ_0	(69)
2. 生长条件与表面结构	(69)
3. 在不同环境相中形成的螺旋生长层的形态	(71)
4. 天然晶体和人工晶体	(73)
第三章 晶体表面微形貌揭示的天然结晶作用	
一、小引	(76)
二、岩浆中的结晶作用	(77)
三、气相和热水溶液中的结晶作用	(80)
四、热液交代的结晶作用	(81)
五、变质作用中的结晶作用	(81)
六、地表条件下的结晶作用	(89)
七、关于天然结晶作用的几点结论	(89)

第一章 晶体表面微形貌的研究方法

晶体表面微形貌的研究主要是采用现代光学显微镜和扫描电镜进行的。泽尼克 (Zernike) 1934 年对光学现象中“位相差”的发现, 奠定了观察一般光学仪器不能观察出来的, 表面微形貌的理论基础。他为此在 1953 年获诺贝尔物理学奖金, 并根据位相差的光学理论制成了相衬显微镜 (phase contrast microscope)。同样, 由于英国伦敦大学物理学教授塔伦斯基 (S. Tolansky) 在光的干涉测量方面的卓越贡献, 在本世纪四十年代出现了微分干涉显微镜 (differential interference microscope) 和多光束干涉仪 (multiple-beam interferometer)。这些现代光学仪器的出现, 使晶体表面微形貌的研究进入到一个划时代的新阶段, 使观察表面微观现象达到了 \AA 级的分子水平。

本章简要叙述上述光学仪器的基本光学系统以及用以观察晶体表面微形貌现象的主要原理。

一、样品处理

研究晶体的表面现象时, 都是以在反射光下观察表面的微形貌为主。所以要达到高精度的观察效果, 必须对样品表面彻底清洗处理, 以提高其反射率。

1. 清洗 对于非水溶性或与 H_2O_2 无作用的晶体, 要依次用蒸馏水、稀 H_2O_2 溶液、中性洗涤剂将样品表面的机械附着物、油污等彻底清除洗净后, 用脱脂棉轻轻拭干; 直至对着样品表面哈气时, 在表面上所形成的气晕瞬即消失。具体清洗的过程如下:

- ①用树胶或其他适当的粘结剂将样品固定在载玻片上, 以洁净棉絮蘸清洁液体拭擦样品的表面和载玻片, 然后再用蒸馏水清洗。
 - ②按同样手续再用 H_2O_2 稀溶液清洗。
 - ③有条件时将标本和玻片一起, 放入蒸馏水中用超声清洗器清洗。
 - ④最后用擦镜纸或棉絮擦干, 直至哈气在样品表面上自动瞬即消失。
- 注意任何手指的轻微触摸即能污染样品的表面, 所有操作用竹制或不锈钢镊子夹住进行。

对于水溶性的或能被 H_2O_2 浸蚀的样品表面, 最好是进行复制 (replication)。但这样只能复制出样品的表面微形貌, 而不能复制出该样品表面几个埃的三维内部结构。

样品的新鲜表面, 如解理面, 不用清洗就能直接观察或镀银。
样品表面清洗处理好后就可镀银。

2. 镀银 若样品表面的反射率太低, 不适于在显微镜下观察时, 就需要在真空喷镀仪中镀银。镀银在观察或测量表面微形貌时都是很必要的, 特别对下面要讲到的多光束干涉测量中, 参比镜和样品表面上的良好镀膜, 是获致最好观察效果的关键。表面镀银的最佳条件是:

①在优于 1×10^{-5} torr 的高真空条件下操作。

②金属源和样品表面间的距离不小于20厘米。

③银膜厚度应大于500 Å，一般厚1000-1500 Å。实验证明500-7000 Å厚的银膜，都能如实地反映出晶体表面的微形貌。能呈高反射率和低吸收率的银膜是在30—40秒大约沉积1000 Å厚的银膜。这样在载玻片上镀膜的反射率就在90%以上，在明亮的光源照射下呈淡紫兰色。

样品表面清洗好或镀膜后，最好是立即观察，不用时一定要在干燥器中存放。银膜用稀 H_2O_2 液容易清洗掉。

如上所述处理好的样品表面即可用相衬显微镜、微分干涉显微镜等高灵敏度仪器在反射光下观察。如用相衬显微镜，在良好条件下可观察到10—20 Å左右的阶梯 (step)。如再用高反差胶片和反差显影液，用显微摄影可拍摄出厚仅数 Å 的阶梯。用微分干涉显微镜观察曲面或凹凸不平的表面十分有效。测量晶体表面螺旋阶梯高度用多光束干涉方法最有效。下面分别叙述这些仪器的结构、性能和使用方法。

二、相衬显微镜

1. 概述

相衬显微镜，最初用于生物学方面的研究，对辨认生物细胞的微细结构很有效，用途广泛。后来发展到在透射和反射偏光显微镜上使用，能够观察到矿物晶体表面上 Å 级单个分子厚度的螺旋生长层，对晶体表面微形貌的研究起了很大的促进作用。

一般的光学显微镜系统能使人们的眼睛看到样品物平面中的细小结构，是因为有颜色差别，或进入眼的光波振幅 (强度) 减弱，或光折射率不同所产生的差别。暗视场亦有助于检测细微现象，但极细微的结构，特别是在透明标本中就模糊不清或根本看不见。透明样品中一般来说，各部分的厚度和折光率都不同，在透射光中产生位相差。可是人眼并不能辨认位相差，而是只能辨认由于“振幅”差或颜色差所形成的图像。

为了克服这个困难，泽尼克设计了一种光学系统，将物体使入射光产生的位相差转变为振幅 (强度) 差，这样人们的眼睛就能够辨认出，位相差所反映的物体表面 (反射) 或内部 (透射) 的结构细节。他所设计的一种物镜使光的强度减小，并在没有被样品偏转 (衍射) 的直接光中引入位相差，进而使此光与被样品偏转的衍射光聚焦在象平面中。结果，图象各部分 (厚度不同或折光率不同) 间产生强烈的可见反差。这就是位相差光学系的基本情况。

光的位相和位相差

近代光学一致认为，光的本质是物质运动形式的波动性与微粒性的对立统一，具有波粒二象性。一束光是由一个个光子组成的，而光子的运动又具有波动性。

光在物质中传播时，能量从物质的一部分迁移到另一部分。这种迁移可能依靠波动，亦可能依靠移动着的微粒。波动的特征是能量以振动的方式在物质中依次转移，物质本身并不随波移动。相反，依靠微粒来迁移能量时，能量随着微粒一起移动。这是关于光的运动最一般的概念。

现在以波动的形式来说明光波的位相 (phase) 和位相差 (phase difference)。

光传播前进的过程可看成是光子微粒的运动与光的前进方向相垂直，并且具有简单的简谐运动的特性 (图1)。这种运动的波形为正弦曲线。例如波形上的A点相当于微粒从圆上的

位置1移动至2。移动的角距为 30° 。这时微粒在波形上的位置就是它的相(phase)。所以一个波粒的相可用微粒在参考圆上运动的弧度来表示,如B点的位相是 90° ,C点的位相是 180° 等。这亦可以说成是一个光波在光路上一定点的位相。图2中两个光波的相差为 90° 。光波的位相亦可用波长表示,如图1,B点的光波的位相是 $\lambda/4$ 。

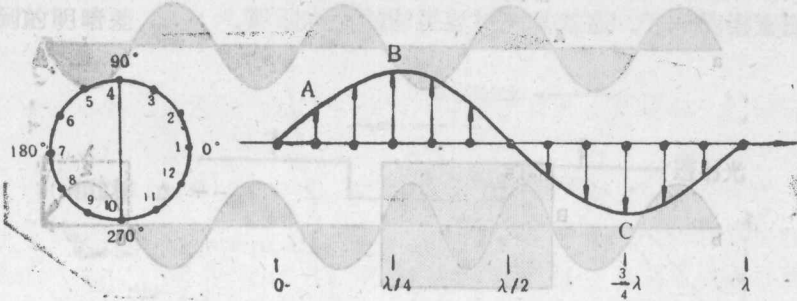


图1 光微粒在与光波前进方向相垂直的振动,所形成的光波图解

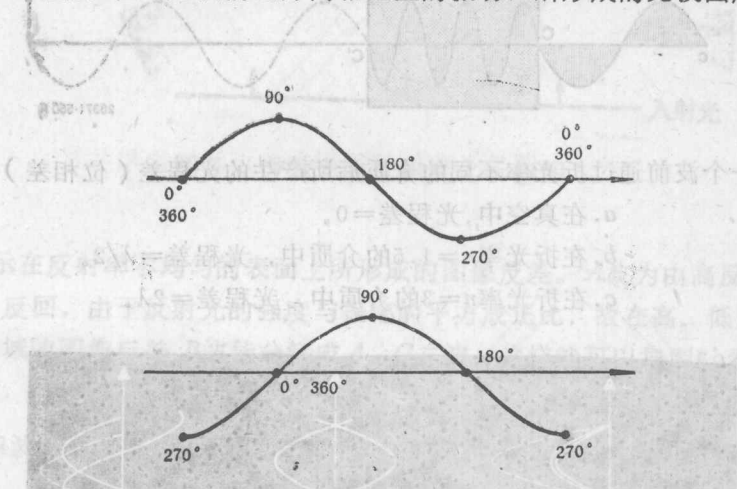


图2 光路平行,相差为 90° 的二光波

位相差 光在真空中传播的速度是299,550公里/秒,在水中的速度是225,000公里/秒。光速在真空(空气)中,比在任一种介质中的速度快的因数称为该介质的折光率 n 。这样,水的折光率就是 $n=1.33$ 。因而光从一种介质进入另一种折光率不同的介质时,其波速就要改变,由低折光率的介质进入高折光率的介质时光速减小,反之增大。在光学显微镜中这种光速迟差(retardation)的变化,并不用具体波速的数字表示,而只考虑这种变化对光波位相的影响,即其产生的位相差。如图3所示, a 、 b 、 c 三个波束最初的位相一致,但当 b 、 c 二光通过折光率较高的介质时就产生减速。各光的波前同时在 A 、 B 、 C 点到达三种折光率不同的介质。在经过三种波相的传播前进后,它们分别到达 A' 、 B' 、 C' 点。 b 波与 a 波相比减速了 $\lambda/2$, c 波减速 2λ 。在光学中这种光程的迟差称为位相差。位相差(Γ 或 Δ)的度量单位用波长(如 $\lambda/2$)或米制单位(如275nm)。随着波速减小,波长亦减小,但光的颜色效果保持不变。波速 c' ,频率 ν (常数)与波长 λ' 的关系如下:

$$c' = \lambda' \cdot \nu$$

干涉 当二光波满足下列条件时,可以严格地合并在一起产生干涉现象。

- a. 光波的振动方向相同, b. 光波的波长相同, c. 光波具有共同的光源点。

如图4所示，二波的位相相同时，它们的振幅相加(a)；二波的振动方向严格相反（位相差 $\lambda/2, 3\lambda/2 \dots$ ，波峰与波峰相对），振幅相消(b)；二波的位相差 Γ 既非波长的整数亦非半波长时，则合成波的振幅可大于、小于、或等于原始波(c)。景和所均可衣发，等。081

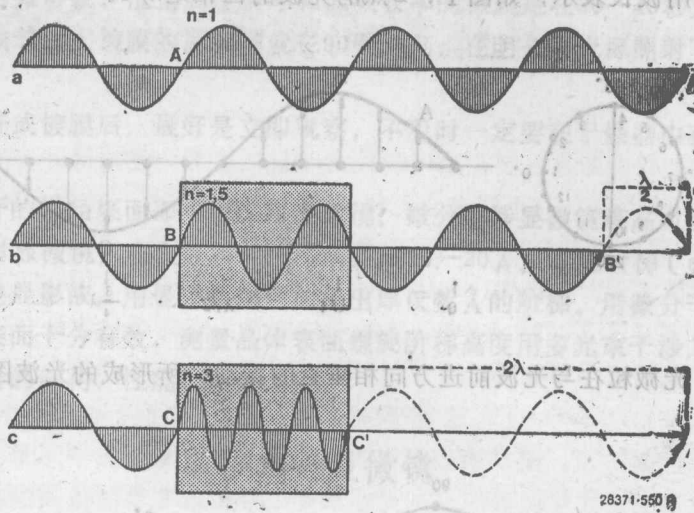


图3 一个波前通过折光率不同的介质后所产生的光程差（位相差）

- a. 在真空中，光程差=0。
- b. 在折光率 $n=1.5$ 的介质中，光程差= $\lambda/2$ 。
- c. 在折光率 $n=3$ 的介质中，光程差= 2λ 。

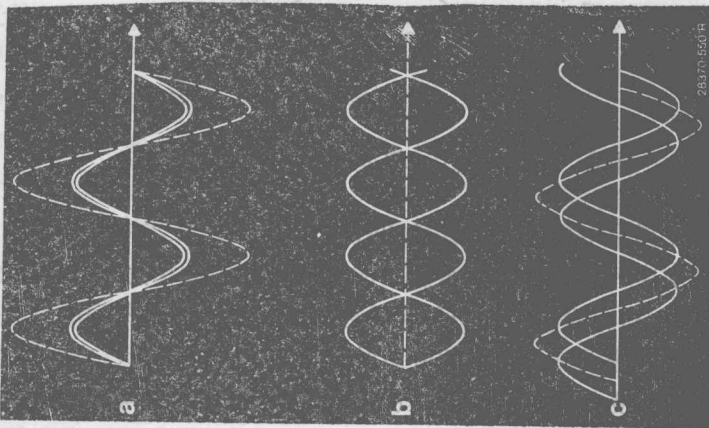


图4 振幅相同的各光波的干涉图解

- a. 位相差 $\Gamma=0$;
- b. 位相差 $\Gamma=\lambda/2$;
- c. 位相差 $\Gamma=\lambda/4$ 。虚线示合成波

2. 相衬显微镜的光学原理

人的眼睛与摄影胶片对光的明暗（振幅的平方）和颜色（波长）有感觉；而对于光波的位相（phase）则无感觉。因而在透明均质玻璃片上折光率很小透明度很大的部分，用一般方法都不能看到光的位相情况。这是由于没有光的吸收，明暗反差和颜色反差都反映不到人的视觉中。

现在先讨论光在透射情况下的位相。当入射光的平面波通过玻璃片时,如图5所示,通过高折光率部分和低折光率部分的光波产生相当于光程(折光率×厚度)的位相差 Γ (或 Δ)。因而对透射光(变形波)来说,折光率在玻璃片上的分布状态就表现为位相的变化,称为位相分布曲线。若将位相分布曲线转变为振幅分布曲线,那么光的位相变化就表现为人眼和摄影胶片都能感觉到的明暗差。

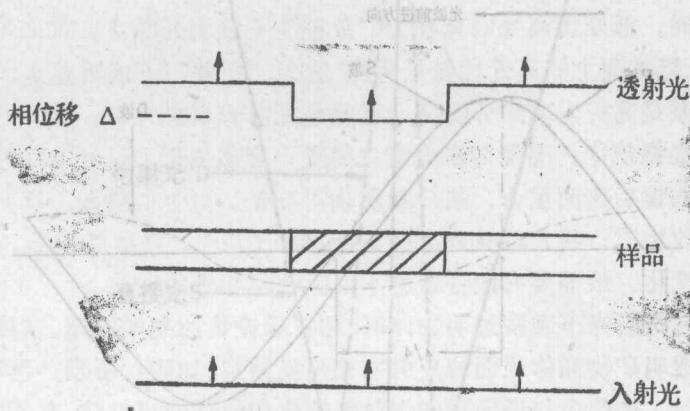


图5 透射光的位相变化示意图

图6a表示在反射率不均匀的表面上所形成的图像反差。A波为由高反射率区反回,B波由低反射率区反回。由于反射光的强度与振幅的平方成正比,故在高、低反射率的交界处就看到了明暗区域的图像反差。B波能分解成A、C二波,这样就可以把图6b看成是6a。C波相当于一种衍射波,它与A波相合时就互相干涉形成一种图像。重要的是这种图像是由于其位相差是 π (或 $\frac{1}{2}\lambda$ 波长)的A、C两种波干涉而成的。这就是在振幅目标(amplitude object)中所产生的反差。

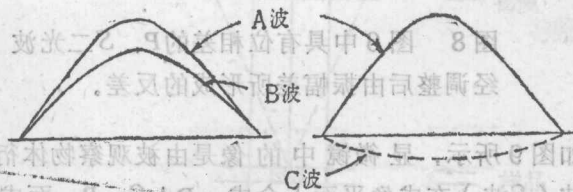


图6 A波、B波与C波(衍射波)的关系

下面我们来看在位相目标(phase object)中,各光波的位相关系。图7表示在介质S中有微粒P,如果二者的折光率基本相同时,则它们的光波在位相与振幅上亦基本相同。对于振幅相同的二光波肉眼不可能识别,于是P就无法观察到。图7是在透射光中,P为通过样品高折光率部分的波,S为通过样品周围均质玻片部分的波。P比S的位相迟后 Δ 。如在反射光中亦可把P看作是从样品较低部位反射的波,S为从较高部位反射的波。P-S=D衍射波。D与S相合时干涉形成图像P。虽然P与S波的位相不同,但因它们的振幅相同,故不产生人眼

睛可见的图像反差。但若在D和S在像平面上互相干涉成像之前，使S对D错开 $\pm \frac{1}{4}\lambda$ ，如图8所示，由于 $D+S=P$ ，则P波与S波之间就出现了振幅差，人眼睛就可以看到原来具有位相差的P波和S波，经调整后的振幅差所产生的图像。亦即通过这种操作，过去无法识别的P波像，人眼就能直接看到了。这就是相衬显微镜的基本原理。

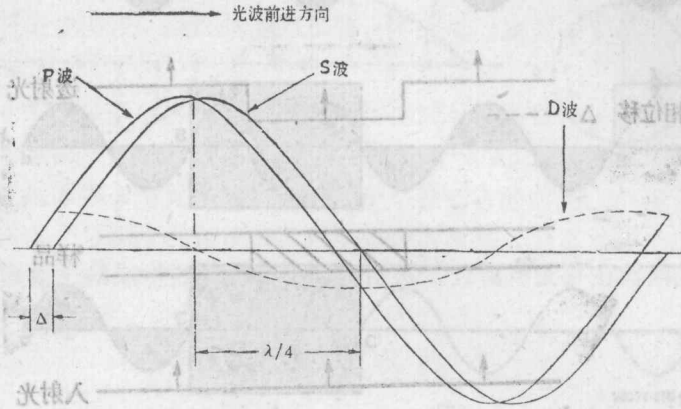


图7 在位相目标中各光波的位相关系

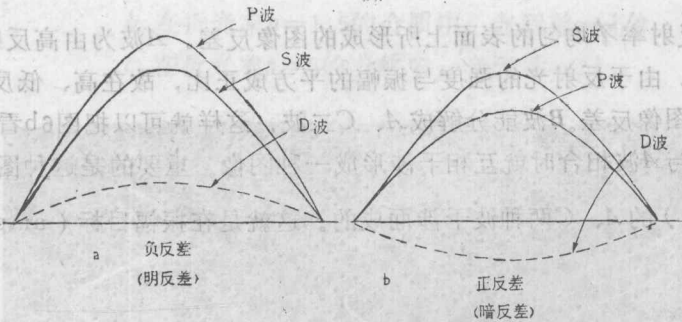


图8 图6中具有位相差的P、S二光波经调整后由振幅差所形成的反差。

根据阿贝原理，如图9所示，显微镜中的像是由被观察物体衍射的衍射波(D波)与通过物体周围的直接波(S波)在成像平面上合成， $D+S=P$ ，而成像(P波)的。图中仅表示出0次衍射波(直接波S)和一次衍射波(D)。(高次衍射波与观察物体图象细节的再现有关，不在本质上起作用，此处从略)。实线表示直接波，虚线表示衍射波，二者同在物镜后焦面上，成为等次同类波的点而成像。如在0次衍射波(直接光)的成像点上，放置一小遮光板，将直接光遮断，而只让衍射波通过时，则折光率变化的部分在暗背景中明亮，称为暗视场象。反之，如将衍射波遮断，只让直接光通过时，实验证明成象面上虽然同样显示光亮，实际却没有成像。很明显直接光是没有通过被观察物体的光，它根本不含有任何成像信息。从这点就可以理解，直接波(S)关系着背景的反差，而衍射波才与成象有关。

如此看来，在直接波S上做些调整，似应可以在成象面上显示明暗的反差，而并不影响成象。现在物镜后焦点处放置一透明的位相物件(位相板)，调节直接波S比衍射波D快或慢

图9 透射相衬显微镜光学系统

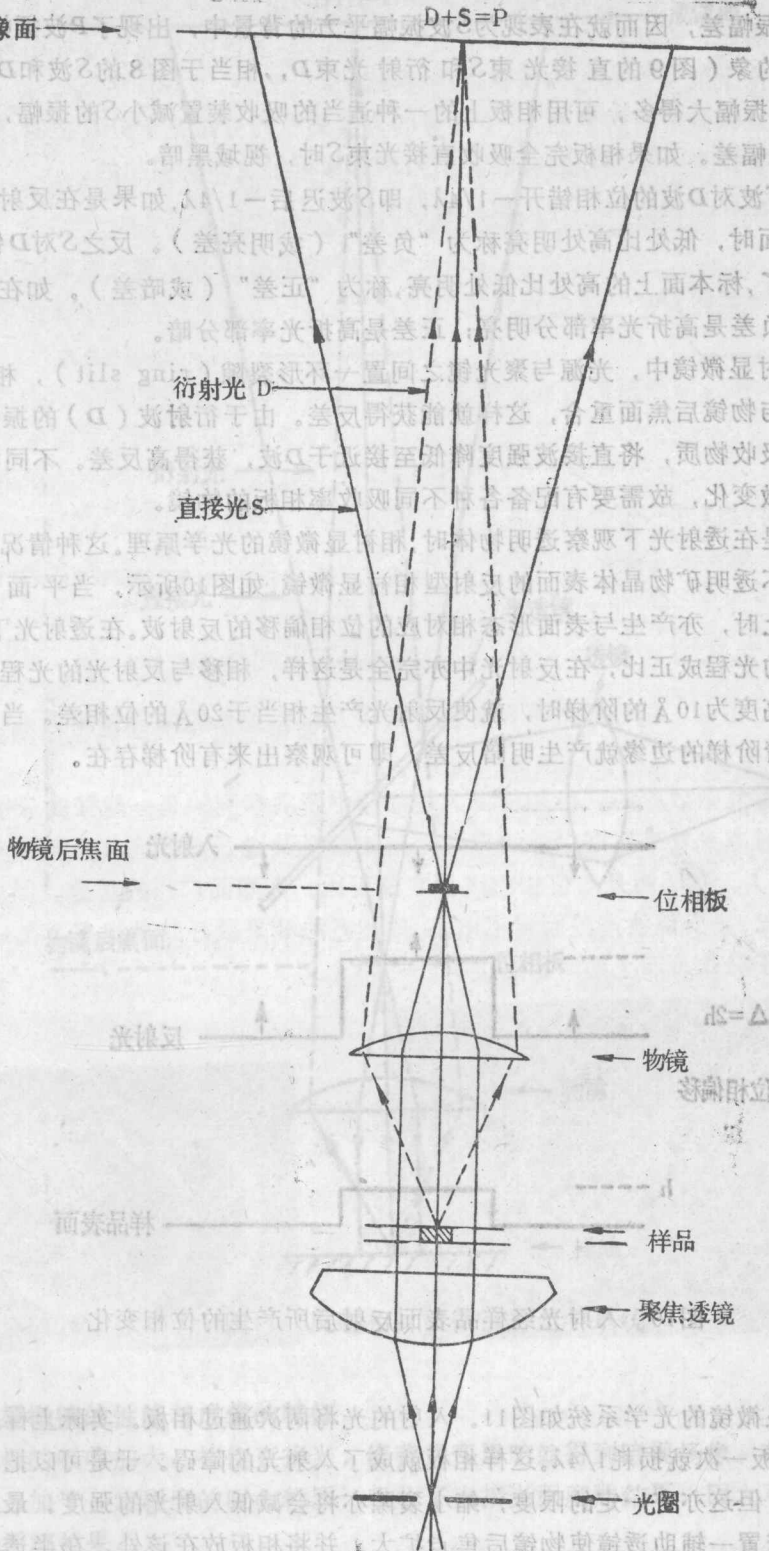


图9 透射相衬显微镜光学系统

1/4波长,则图3中的S波就调成图4所示。这样就使图3中振幅相同的S波与P波转变为图4,二者之间产生了振幅差,因而就在表现为S波振幅平方的背景中,出现了P波振幅平方所表现的被观察物体的象(图9的直接光束S和衍射光束D,相当于图8的S波和D波)。同时因S的振幅比D的振幅大得多,可用相板上的一种适当的吸收装置减小S的振幅,以便在S和P间产生最大的振幅差。如果相板完全吸收直接光束S时,视域黑暗。

图8表示,S波对D波的位相错开 $-1/4\lambda$,即S波迟后 $-1/4\lambda$,如果是在反射光下观察不透明矿物晶体表面时,低处比高处明亮称为“负差”(或明亮差)。反之S对D错开 $+1/4\lambda$ 则相衬就反过来了,标本面上的高处比低处明亮,称为“正差”(或暗差)。如在透射光下观察透明物体时,负差是高折光率部分明亮;正差是高折光率部分暗。

实际上在相衬显微镜中,光源与聚光镜之间置一环形裂隙(ring slit),相当于一环形相板,使其象与物镜后焦面重合,这样就能获得反差。由于衍射波(D)的振幅强度低,在相板上加一层吸收物质,将直接波强度降低至接近于D波,获得高反差。不同被观察物体的反差可能有细微变化,故需要有配备各种不同吸收率相板的物镜。

以上所述,是在透射光下观察透明物体时,相衬显微镜的光学原理。这种情况亦同样适用在反射光下观察不透明矿物晶体表面的反射型相衬显微镜。如图10所示,当平面光波入射在被观察物体表面上时,亦产生与表面形态相对应的位相偏移的反射波。在透射光下中的相于,移与被观察物中的光程成正比,在反射光中亦完全是这样,相移与反射光的光程成正比。假如晶体表面上有高度为 10 \AA 的阶梯时,就使反射光产生相当于 20 \AA 的位相差。当位相差转变为振幅差时,沿着阶梯的边缘就产生明暗反差,即可观察出来有阶梯存在。

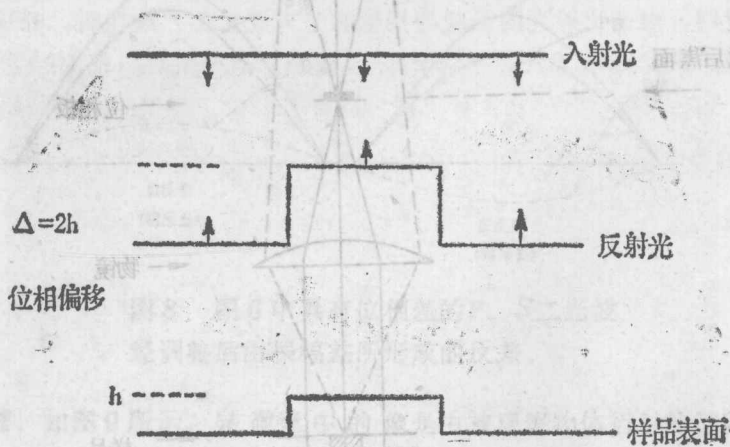


图10 入射光经样品表面反射后所产生的位相变化

反射型相衬显微镜的光学系统如图11。入射的光将两次通过相板。实际上样品表面的反射波,只要通过相板一次就损耗 $1/4\lambda$ 。这样相板就成了入射光的障碍。于是可以把环形裂隙和相板都尽量缩小。但这亦有一定的限度,缩小裂隙亦将会减低入射光的强度。最后解决的办法是在显微镜内安置一辅助透镜使物镜后焦点扩大。并将相板放在该处,在半透镜上方结成环形裂隙像。此外,这样安置还有一个好处是可以使用普通物镜,并能使用各种反差的相板和裂隙在一起很方便。

(暗视场效果产生0次衍射光,纹影效果产生0次和将衍射光的正负任何一方除掉后的级次的衍射光)。由于这些影响,只有在有折光率梯度的部分反差表现得很好。

应用相衬方法时,被观察物体中有折光率差的部分,全部作为反差表现出来。因之反映在实际位相显微镜像上的反差必然是所有这些效果的综合反映,如图12所示。

所以在相衬显微镜中所看到的,一个图像的真实强度的分布是十分复杂的。解释图像时要很谨慎。这种复杂性是由于相板的有限大小和不对称衍射波等所引起的。

图13是复合螺旋生长层的一种正相衬显微图像。

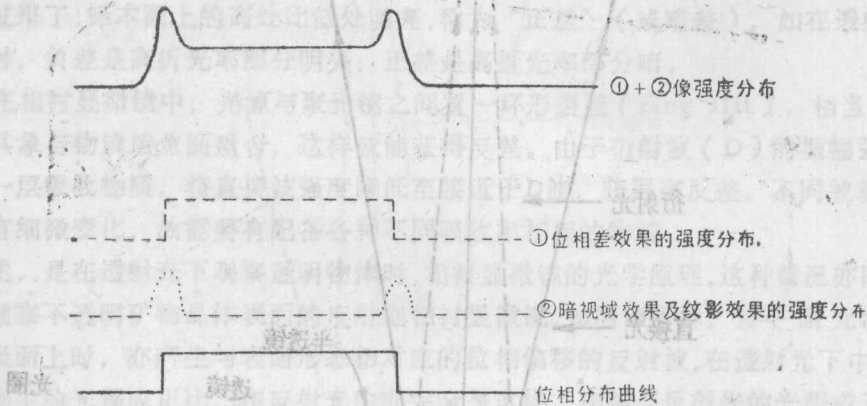


图12 位相差效果和暗视野效果及纹影效果的综合效应

此外,在具有复杂效应的,位相梯度大的部分中所观察到的是一些强度分布复杂的像。其中一些超出相衬本身效果范围以外的部分,在相衬显微镜下亦都难以隐蔽而表现为晕圈(halo)(图14)。光晕圈是与位相曲线梯度成正比,强烈而广泛的现象,因而物体结构边缘上的细节情况,就大都都被掩盖而看不出来。位相差法效果最好时是相差 Δ 在 $1/10-1/1000$ 波长,大致相当于晶体表面上的阶梯高度为 $5-500 \text{ \AA}$ 。



图13 复合螺旋生长层的正相衬显微

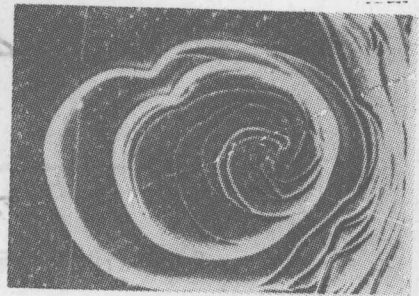


图14 SiC (0001) 面上的螺旋生长丘(正相衬像,约 $\times 90$),光晕圈出现于阶梯高的一侧,其亮度与阶梯高度有关

横向分解能没有除去与成象直接相关的衍射光,与一般显微镜无大差别。有人指出,反差强,分解能就会有所提高。

相衬显微镜图像的特点如下：

①极微小的相差可在明暗反差中表现出来。其检测极限大致为 $1/2,000$ 波长(即最小的阶梯高度)，适宜检测的最佳阶梯高差为 $500\text{Å} - 10\text{Å}$ 。

②明暗反差可随着相板(快或慢 $1/4$ 波长)而倒过来。同时相板吸收率的变化可能导致不同程度的明暗反差。

③在折光率差异极小时亦可辨别高低。在反射光下只有微小的高低差时，亦可辨别它们的相对高低。利用阶梯边棱上出现的光晕圈，在阶梯高差只 10Å 时亦能测定出高边和低边。

④在平坦的标本表面上所以能观察到表面微形貌，主要是由于下列两个原因：(a)同一相差的灵敏度在整个视域中是均匀一致的；(b)根据阶梯边棱上晕圈的强度大致可以估计阶梯高度。

⑤在图像中除位相效应外，同时还存在着暗视场效应和纹影效应。所以根据所观察的图像推断实际物体的情况时需要谨慎些。

⑥位相板使用不当时，图像反差有倒转的可能。

⑦位相分布曲线的曲率平缓时，入射光可向各不同方向转变，这时只根据物镜后焦平面上的相板就不能直接使全部光发生位相变化，位相差的效果锐减。这就像是急倾斜的锯齿状表面那样，入射光突然散射，位相差的效果等于零。

以上所述①—④为相衬显微镜方法的优点，⑤—⑦为其缺点，观察相差图像时应多注意。

4. 使用相衬显微镜时的注意事项

相衬显微镜与一般的光学显微镜没有多少不同，使用时应注意的要点如下：

①首先应该知道，相衬显微镜最宜用于观察人工晶体的平坦表面，天然晶面，或像解理面那样十分平坦的表面，以及由明显阶梯构成的表面。特别是在看起来似是没有生长层存在的镜状表面上观察效果最好。

相衬显微镜不适于观察弯曲的或凹凸不平的粗糙表面，因为大部分入射光向各方向反射或散射出去，只有小部分光聚焦在物镜的真实焦平面上，即只有在垂直于光轴的小范围内可产生反差，其他部分的相差效应被破坏了。晶体表面上的阶梯受光晕圈的影响，难以有效观察。

②将欲观察的样品表面放在与光轴垂直的位置上。最好使用像三轴弗氏台那样的支架，可以任意调整样品表面的位置。

③有时在显微镜下亦不易看清楚的表面构造，用高反差底片和高反差显影液配合起来处理的显微照像，就能显示出许多细微结构现象。单分子厚的螺旋生长层就是这观察到的。

④在相衬显微镜下，样品表面上沿着螺旋阶梯边棱出现亮的光晕。在正相衬图像中光晕出现于高的一侧，而在负相衬图像中出现于低的一侧。所以根据光晕的位置可以直接确定表面形貌的凹凸形状。这是其他显微镜所没有的优点。

⑤沿阶梯出现的光晕的亮度与宽度，随阶梯的高度而异。高低差小的阶梯，光晕幅度窄，亮度亦弱。因之观察者熟悉了之后，根据光晕的性状就能判断样品表面上螺旋阶梯的高度。阶梯高度在 $\lambda/2$ 以上时就出现干涉色，反而看不清楚，难以判断凸凹。

具体操作时要注意如下几点：

①使环形裂隙像准确投在相板上，否则稍不准就会导致反差结果混乱，产生错误的结果。尤其是在调换相板和样品时，必须细心校准。一般用中心调整望远镜校准。

②样品的准备情况直接影响观察效果。透射型相衬显微镜用的样品越薄越好，厚度要均匀。反射型显微镜用的样品表面反射率高好。因为相衬显微镜是用环状裂隙照明，视域较暗。反射率低（10%以下）的样品必须在表面镀银。

③注意区别样品的吸收率与反射率差所产生的反差，与光的相差所产生的反差。在应用相衬法观察之前，必须先要在明亮视域中观察。

④根据样品的情况选用相板的反差。一般计数用负反差，观察微细结构和测量长度用正反差。此外，对相板的吸收率的选择，以观察现象最清楚为宜。一般，透射样品用吸收率小的正相板；反射样品用吸收率高的正相板为宜。无论观察整体和细微情况时都这样选用相板。

⑤前述相衬图像的特征中⑤、⑥两点应十分注意。

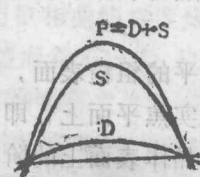

⑥相衬显微镜中的正、负反差，及反差的强弱可以任意调节，选择几个不同的相板使用。在观察极小的阶梯，要求有极强烈的反差效果时，可以特别订制相板。

⑦观察细微的表面构造，做10 Å以下极薄阶梯的显微摄影时宜用相衬显微镜。

⑧实际观察时，先将位相差物镜安好。然后将位相差聚光镜调至“ph”位置。注意装在干涉差聚光镜中的环形光隙并不能用于所有的位相差物镜。这可以用聚焦望远镜检查。光环和相环的直径必须相同。用调整中心的螺扭，调节光环和相环的中心一致（在聚焦望远镜下观察）。

表1为关于反差论述的总结。充分了解以上关于相差显微镜原理之后，在具体的研究工作中要以实际观察为主。

表1 相衬法反差的特点

反差	负反差（亮反差）	正反差（暗反差）
		
i. 透射型观察	高折射率一方明亮	高折射率一方暗淡
ii. 反射型观察	相对低的一侧明亮	相对高的一侧暗淡
用途	概略观察	细微观察

5. 相衬显微镜的应用范围

①透射型相衬显微镜：

a. 检测晶体内部光学非均质性。

b. 测定薄片的光学厚度。

c. 检查光性均质体的光面、斑痕。

d. 观察晶体中的裂隙。

e. 观察不透明物体复制膜的凹凸。

②反射型相衬显微镜：

a. 观察晶体生长的表面现象。

- b. 观察薄片的表面形态。
- c. 测量极浅的蚀坑。
- d. 检测抛光面的斑痕。
- e. 观察解理面，断裂面。
- f. 观察镍缀饰面。
- g. 检测晶粒界限。

6. 主要相衬显微镜简介

荷兰物理学家泽尼克 (F. Zernike) 1934年发现了光的位相差，并且把它应用于制造相衬显微镜。其后相继出现了许多不同型式的相衬显微镜。

①日本的相衬显微镜在世界上是生产很早的，也在不断地研究发展。日本最早的相衬显微镜是久保田广教授于1949年指导试制成功的透射式显微镜。后来奥林巴斯光学公司制成透射和反射式两种相衬显微镜，日本光学公司亦制成透射式的。它们两家公司所生产的透射式相衬显微镜都是以专用物镜和环形裂隙的聚光镜配合使用的。七十年代初日本的反射型相衬显微镜尚未制成。奥林巴斯光学公司已生产出专用的位相差物镜。

②德国的Leitz, Zeiss, 以及美国的光学公司等已制成多种相衬显微镜。

三、微分干涉显微镜

微分干涉显微镜 (differential interference microscope) 亦称为干涉反差显微镜 (interference contrast microscope)。

1. 概述

微分干涉显微镜是一种普通偏光显微镜与能产生两种偏光干涉形成色差的偏光切变干涉计的联合装置*。这种显微镜的基本原理是将两个相移的图像微分开，然后又合起来进行干涉，产生干涉色使人的眼睛能够通过颜色变化观察晶体表面的结构。

由于在泽尼格式相衬显微镜下，晶体表面螺旋状阶梯上出现的光晕圈过强，隐蔽了微细的表面结构现象，以及不适用于观察曲面等一系列缺点，这就需要用其他方式来补充它的不足。相衬显微镜是运用显微镜成像原理将透射光或反射光的位相差转变为人眼睛可辨别的振幅差所形成的明暗反差。假如将光的位相差转变为光的波长差，则可利用光的干涉作用形成颜色反差，亦可以表现晶体表面的细微构造。这就是微分干涉显微镜最重要的光学理论基础。并且前者是通过观察光的衍射现象所形成的振幅大小的明暗反差，而后者与衍射无关**，是把光的波长差的干涉现象引用到显微镜中去的。因之，在相衬显微镜中所无法避免的光晕圈现象，而微分干涉显微镜中就无此现象，图像适于作定量测定。这样就补救了相衬显微镜的缺点。以后将要概括地谈谈相衬显微镜和微分干涉显微镜的性能是互为补充相辅相成的。

这类显微镜主要有诺玛斯基式和山本—弗兰肯式两种 (包括反射和透射型)。它们的心脏部分是一个具有两种主要功能的偏光棱镜：(i)使一平面偏光分解为两个平面分偏光 (即常光与非常光)，(ii)使两个分偏光间产生适当的侧向错位。这个部件一般是采用一个萨瓦特 (savart) 板，或沃拉斯顿 (wollaston) 棱镜，或诺玛斯基 (nomarski) 棱镜 (改进的沃拉斯顿棱镜)***。

* M. Francon & T. Yamamoto, *Optica Acta* 9(1962), 359.

** E. 赫克特等著：《光学》，下册，683页，1983。干涉和衍射之间并不存在实质性的物理差别，习惯上当只考虑几个波的叠加时称为干涉；而讨论大量波的叠加时称为衍射。而同一现象有时称为多光束干涉，而有时则叫做光栅上的衍射。

*** M. Francon, "Progress in Microscope" (1961) 107, Pergman. M. G. Nomarski, *J. Phys. Rad.*, 16(1955)