

# 晶体中滑移的位錯机构研究\*

孙瑞蕃 M. II. 沙斯柯里斯卡娅

## 提 要

在研究岩盐型晶体的塑性变形中，用偏振光方法观察晶体中在塑性变形时出现的双折射光带，并结合用显微干涉仪对晶体表面的研究，观察到晶体中发生滑移时滑移带两端所发生的滑移距离不相等。根据这一结果，用腐蚀方法观察晶体中的位错排列，并和双折射光带及表面干涉图形的研究对比，全面地验证了离子型晶体中滑移过程的位错机构。此外，还证明了腐蚀坑和位错之间的一一对应的关系，并用实验方法证明了晶体滑移面内存在着符号不同的位错。

## 1. 引 言

位错理论最初是为了解释晶体中塑性变形的机构而产生的。近十年来，这一理论得到了很大的发展，它已被用来解释有关晶体机械性能的一系列的现象。特别是由于找到了观察单个位错的实验方法，位错的研究为我们深入地了解晶体中塑性变形的微观机构开辟了新的途径。本文报导用实验方法验证晶体塑性变形中位错理论的一些基本原理的结果。

我们的实验是在岩盐型晶体中 ( $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$ 、 $\text{LiF}$ ) 进行的。在研究晶体中塑性变形的基本规律及其内部机构中，这种类型的晶体具有许多优点：构造简单；易于得到单晶；具有完善的解理面，因而避免了因磨光晶体表面而引起的对塑性变形过程的影响；最后，它们是透明的，而在塑性变形时具有双折射现象，并且在某些晶体中已经找到了观察位错的选择性腐蚀剂。所有这些特点，使我们能够在这类晶体中应用各种方法来研究塑性变形的机构。正因为这样，这一类晶体，特别是岩盐晶体，虽然并不是技术上常用的材料，但一直是很多理论的和实验的研究对象。而根据晶体的一些普遍性质可以肯定，在这类晶体的研究中所得的结果，可以在包括金属在内的各种其他晶体中经过适当的修改而加以推广。

在研究岩盐型晶体的塑性变形时，我们应用了双折射光带的方法。双折射现象是这样的：立方系晶体原来是各向同性的，但在塑性变形时出现双折射性质，在偏振光下沿结晶方向呈现明暗光带。下面我们将这种塑性变形时在偏光显微镜下观察到的晶体中明暗区域的分界线（在  $[110]$  方向）称为双折射光带。

我们应用双折射的现象研究塑性变形，并且把它和用显微干涉仪所观察的表面凹凸作了对比。晶体试样从人工培养的单晶上沿解理面劈开而得，试样长度为 12~15 毫米，

\* 转载哈尔滨工业大学学报 1959 年第 4 期。

截面积为 8~15 毫米<sup>2</sup>。試样退火后放在偏光显微鏡台上特制的装置上进行压缩或拉伸(用銅片粘在試样上拉)。压缩沿着試样的长軸进行。压缩时,試样在偏光显微鏡中觀察,显微鏡中尼科耳棱鏡处在正交位置,而且其光軸分別和压缩的方向平行和垂直。当双折射光带出現后,将試样移到显微干涉仪上研究表面(图1)。实验中所用干涉仪系 ИЗК-46 型,上面添装了一个小台,小台可以带着試样在两个相互垂直的方向移动,并且可以改变試样相对于干涉仪的傾斜角度。实验时記下当干涉显微鏡趋近于試样表面时干涉条紋移动的方向。从这个方向以及干涉条紋弯曲的方向可以决定晶体表面凹凸的性质。将干涉图形和双折射光带对照,便可以决定晶体中塑性变形的机构。

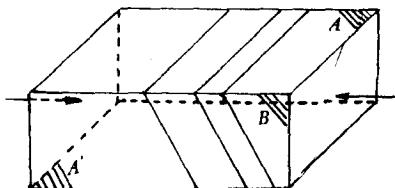


图1 实驗的示意图,試样沿長軸方向受压。通过 B 面觀察双折射图形,在 A 及 A' 面上研究表面凹凸

实验的結果證明<sup>[1]</sup>: 在开始阶段,变形是通过滑移而发生的(滑移面(110),滑移方向[110]),双折射光带就代表滑移面。同时还发现,在滑移面的两端滑移的距离总是不相等的(图2),因此,在光带的一边,晶体处在被拉伸状态,而另一边处在被压缩状态。这个殘留的应力就是引起双折射光带的原因。

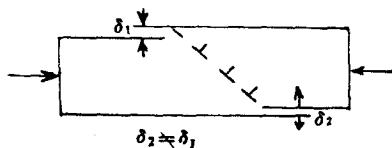


图2 滑移面两端滑移距离的不等引起滑移面两边的內应力

在位錯理論中,晶体中滑移是通过位錯的移动而发生的。在位錯移动的过程中,部分位錯在晶体中受到阻碍,滞留在晶体中,这样就引起滑移面两端滑移距离的不同。所以上述結果和位錯理論是完全符合的,我們利用腐蝕方法來觀察晶体表面的位錯分布,并与双折射光带的觀察及显微干涉仪的表面凹凸研究比較来研究滑移的位錯机构,同时也研究了腐蝕坑和位錯之間的对应关系。

## 2. 双折射光带上的腐蝕坑和位錯

近年来研究位錯时广泛地采用了腐蝕方法。許多工作<sup>[2-5]</sup>証明了,如果采用适当的腐蝕剂,则在晶体表面位錯露头处就形成腐蝕坑。在变形的晶体中,腐蝕坑排列在相应于滑移面和觀察面相交的晶向上<sup>[4,6-10]</sup>。

从上节所述的结果，我們應該預期，如果将变形后的試样进行腐蝕，則腐蝕坑將排列在双折射光帶上，这样我們可以直接地驗証滑移的位錯机构。

實驗是在岩盐和氟化鋰的晶体上进行的。岩盐的腐蝕剂是木精<sup>[7]</sup>，氟化鋰的腐蝕剂是氯化鉄水溶液<sup>[11]</sup>；对于岩盐晶体，腐蝕時間很短，約在1~2秒鐘，所以比較难于控制，而且腐蝕时必須摆动試样，否則会得到不清晰的平底的腐蝕坑。这种情况可能是由于已經溶解的岩盐重新在腐蝕坑上結晶的緣故<sup>[12]</sup>。对于氟化鋰晶体，腐蝕的条件要比岩盐容易控制得多，腐蝕時間一般选在20~40秒之間，腐蝕时試样的摆动只是加快腐蝕速度，对腐蝕坑形状并无影响。腐蝕后的試样，在金相显微鏡上觀察，或者，为了便于和双折射光帶的图形进行比較，可以在取去检偏鏡的偏光显微鏡下觀察并拍照，但在这种情况下所得的照片衬度很差。

图3和图4分別是岩盐及氟化鋰晶体上腐蝕坑的照相和相应的双折射光帶照相。由图中可以見到，除了少数散乱分布的腐蝕坑外，大多数腐蝕坑沿着相应于双折射光帶方向作有規則的排列，这正是我們所預期的結果。在图中，我們把双折射光帶和相应的腐蝕坑排列用線連結起来表示。从这两个图及类似的图中可以注意到下面的这些腐蝕坑排列的特点。

- (1) 有些双折射光帶对应于双排或三排腐蝕坑，有时这些双排或三排腐蝕坑挤在一起形成一粗大的排列，相应于这种粗大排列的双折射光帶明暗往往不是很明显的。
- (2) 亮度比較弱的双折射光帶对应于腐蝕坑浓度較小的排列。往往在一个排列上的腐蝕坑的浓度是不均匀的；对于腐蝕坑浓度較小的地方，双折射光帶較弱。
- (3) 在任一排上，腐蝕坑的排列不是严格地在一一直線上。这說明了位錯不是位于同一“原子平面”內，或者換句話說，滑移不是在穿过整个晶体的同一面上发生的。

所有这些事實都証明了前面所說的、双折射光帶代表滑移面，而双折射現象是由于滯留在晶体中的位錯所产生的应力引起的。而且，腐蝕坑的排列还告訴我們，双折射光帶并

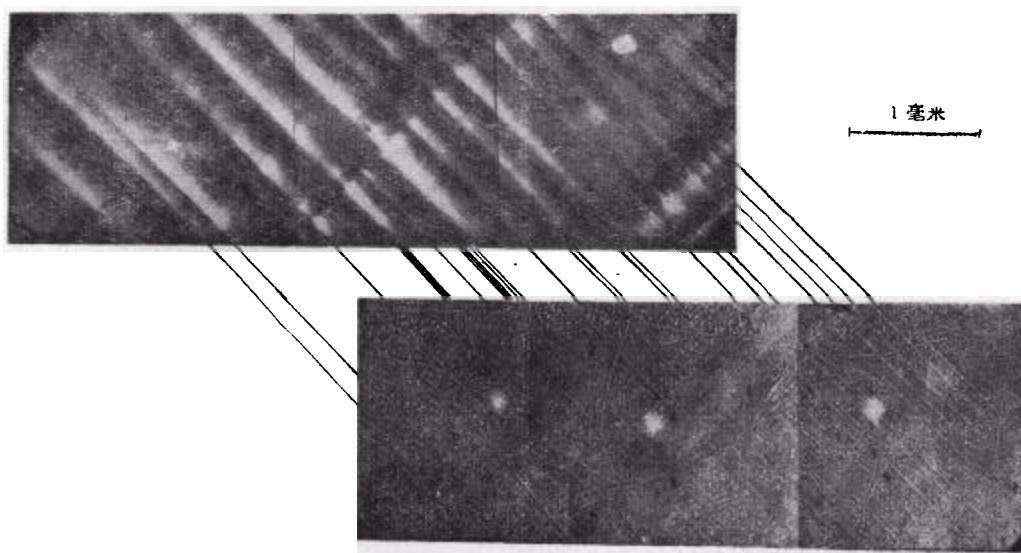


图3 試样 T-5 (NaCl) 上腐蝕坑的排列和相应的双折射光帶

不代表一个滑移的平面，而是代表着很多互相靠近的滑移面組——即代表滑移带。这一結果用电子显微鏡的照相也得到了證明。

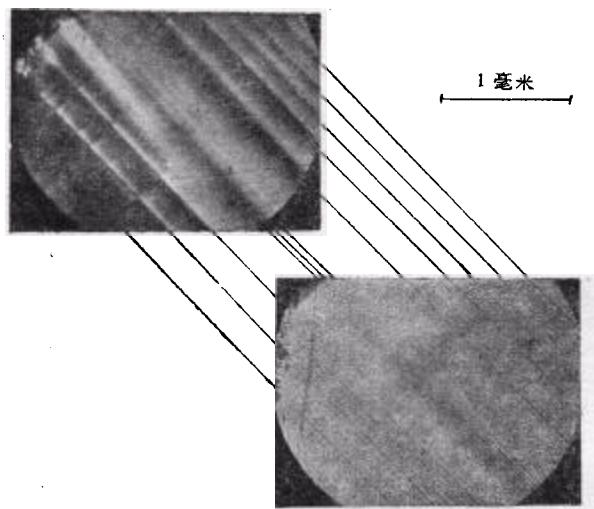


图 4 LiF 試样上腐蝕坑排列和相应的双折射光帶

还可以指出，有时觀察到一些腐蝕坑的排列沒有对应的双折射光帶（由于照片的衬度較差，沒有把照片举出来）。可以这样來說明：在这些地方存在着两种符号的位錯，因而应力抵消了。

所有这些事實都說明了，腐蝕方法要比双折射光帶的方法灵敏得多。

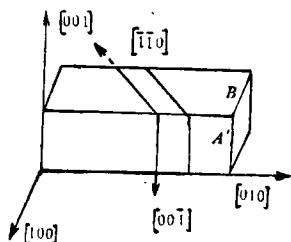


图 5 岩盐型晶体中滑移的示意图

根据岩盐型晶体中滑移的几何性质可以知道，和双折射光帶相应的腐蝕坑排列（沿的[110]方向排列）是直边位錯（图5）。沿[100]方向排列的腐蝕坑則相应于螺旋位錯。它們應該位在晶体的侧面上（图5中晶面A'及其对面A）双折射光帶露头的地方。因此一个晶面上的直边位錯排列（[110]方向）必然和相邻两个晶面上的螺旋位錯排列（在[100]方向）相对应。

图6及图7表示这种直边位错排列和螺旋位错排列的对应关系。图6上表示岩盐晶体的情形，在这试样上，在偏振光下通过B面（图5）观察时可见双折射光带。在A'面上看不到双折射光带，这个面上腐蚀坑沿 $(110)$ 的方向排列。它们正是和B面的排列相对应。在这个图上，为了对照方便起见，同时也列举了B面双折射光带的照片。在这个图上我们又看到，腐蚀坑并不位于一条直线上，而且偏离还要比上面照片上看到的大些。这是因为在这表面上， $(110)$ 面之间的距离增大了 $\sqrt{2}$ 倍的缘故。还可以注意到，在 $[011]$ 方向有两排腐蚀坑，然而每排上腐蚀坑的数目不多，因此在偏振光下看不到和它们相应的显明的双折射光带。

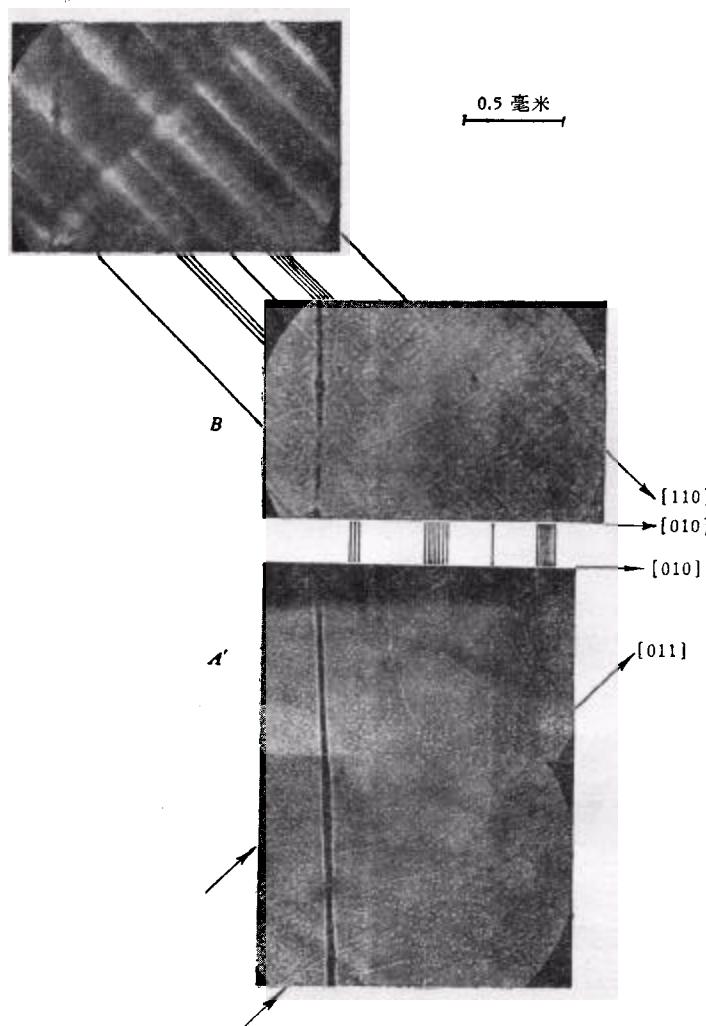


图6 在NaCl试样的相邻面上(B面和A'面)腐蚀坑排列之间的对应关系

图7是在氟化锂试样上得到的，这个试样的两个表面上都同时有直边位错和螺旋位错的排列。照片清楚地表示了，一个面上直边位错排列和另一面上的螺旋位错排列相应。部分相应的排列我们用直线连接表示，在这个图上还可以看出关于滑移过程的一些特点。

在两个表面上，滑移都几乎是发生在一个方向上的：在  $B$  面上（上面一张照片）滑移带主要是在  $[110]$  方向，而在  $A'$  面上则是在  $[011]$  方向。在另外两个方向，如果有的话，那末也是要弱得多。这说明了，在一个滑移系中的滑移会妨碍另一个系中的滑移，这也解释了在偏振光下常常观察到的现象，即双折射光带往往只在一个方向发生。

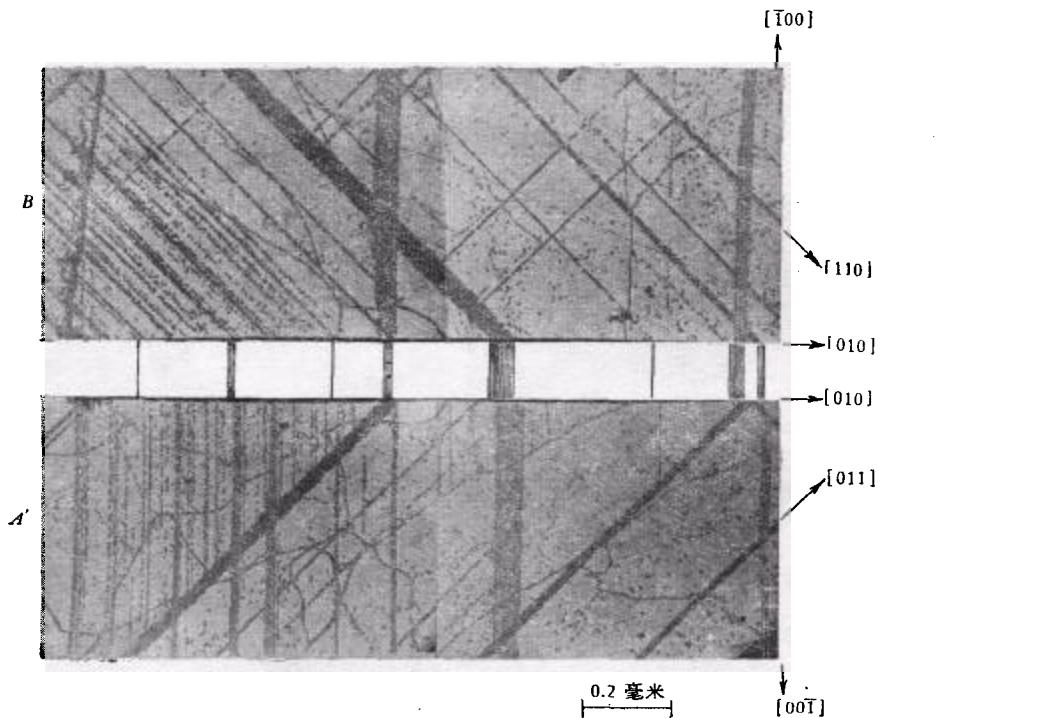


图 7 在 LiF 試樣的相鄰面上( $B$  面和  $A'$  面)腐蝕坑排列之間的對應關係

在同一图上还可以直接看到滑移系之间的相互干扰。图中可以看到很多腐蚀坑的排列终止在粗大的排列处。

### 3. 腐蝕坑与位錯之間的一一對應關係

晶体中是否存在腐蚀坑与位错之间的一一对应关系的问题决定了在研究位错时能否应用腐蚀的方法。到目前为止，这种一一对应关系只在小角度晶界上<sup>[3,7,13]</sup> 及弯曲晶体中<sup>[8,14,15]</sup> 比较理论上的位错密度和实验中的腐蚀坑密度而得到验证。不久以前，在刚玉晶体中<sup>[10]</sup>，比较由腐蚀坑密度所计算出来的和用光弹性方法测量出来的滑移面处的法向应力的跳跃也证实了这一对应关系。

根据在上两节得到的结果，我们可以提出另外一种验证这一对应关系的方法；而这种方法还同时直接地验证晶体中滑移的位错机构。

因为，我们确立了：(1) 岩盐型晶体中的双折射光带代表直边位错的排列；(2) 在滑移面内双折射光带的两端具有可以测量得出的滑移距离的差。如果一排腐蚀坑中每一个腐蚀坑都相应于同一种符号的位错，那末，在腐蚀坑与位错之间存在着一一对应关系的条件

下，同一排上腐蚀坑的数目和 Burgers 向量的乘积必然等于双折射光带两端滑移距离的差，而另一方面，这个滑移距离之差可以根据干涉图形从两相对侧面上阶梯的高度差直接测量出来。

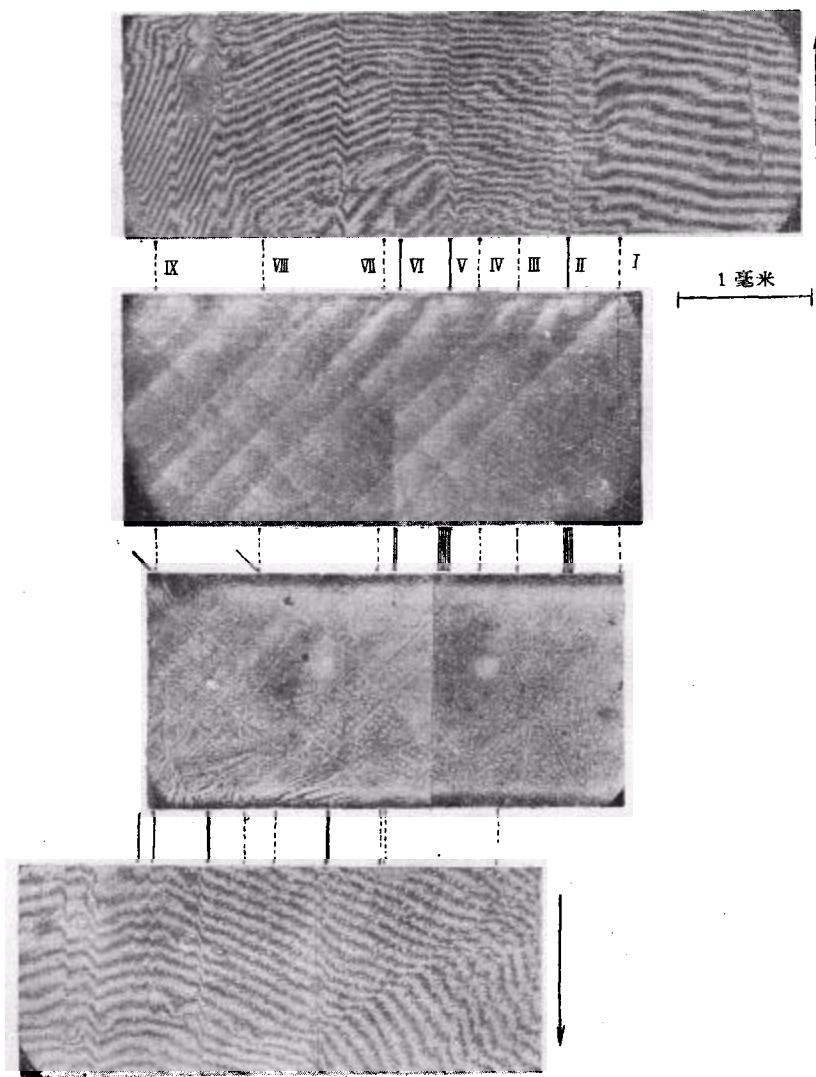


图 8 岩盐試样頂面双折射光带及此面上腐蚀坑的图形和两相对侧面的干涉图形的对比

要精确地进行这样的测量，在实验上有相当大的困难。同时还考虑到每一个滑移带中显然同时存在着两种不同符号的位错。因此，根据滑移带上腐蚀坑数目所计算出来滑移距离的差，必然要比滑移带两端直接测量出来的距离差为大。所以我們就限于作一个粗略的測定。

沿双折射光带的腐蚀坑数目及在光带两端阶梯高度差的测量是在一个岩盐的試样上进行的。图 8 比較了腐蚀坑的图样和相应的側面上的干涉图样，并且为了便于对照，图中

也列出了双折射光带图样。图中，侧面上的阶梯(干涉条纹的弯曲)和相应的腐蚀坑排列(及双折射光带)用直线相连接着。在这个图上，由于腐蚀图形的照片衬度很差，腐蚀坑数目不易计数，所以腐蚀坑图形另在较大的放大倍数下用金相显微镜拍下照片(这里没有举出)。干涉图形右侧的箭头表示干涉显微镜趋于试样表面时干涉条纹移动的方向。

在讨论测量结果之前，先说明一下腐蚀坑排列和光带两端表面阶梯高度之间对应的特点。从图中可以看出，和所有单排的腐蚀坑排列(I, III, IV, VIII, IX 排)相应的侧面阶梯高度都不超过半波长的 1/10，即不超过 300 Å，而高度能够从干涉条纹上看得出来的阶梯或者和双排的腐蚀坑排列(VI排)相应，或者和很粗大的排列 (II, V 排) 相应。这一个特点也是可以理解的，因为，滑移的距离愈大，滞留在晶体中的位错当然也应该愈多。

下面表中我们列出在试样中九条光带上的腐蚀坑数目及阶梯高度差，以及根据它们所计算出来的滑移距离的差(单位为 Å)。

腐蚀坑 排列编号 (图 8)	排列的性质	全排上腐 蚀坑数目 $N$	$\text{ИБ} (\text{\AA})$	两端阶梯高度差 $\delta_2 - \delta_1 (\text{\AA})$	两端滑移距离的差 $\sqrt{2}(\delta_2 - \delta_1) (\text{\AA})$
I	单排	190	760	<300	<420
II	粗大	860	3400	2100	3000
III	单排	200	800	300	420
IV	单排	150	600	<300	<420
V	粗大	800	3200	300	420
VI	双排	350	1400	900	1300
VII	单排	300	1200	600	850
VIII	单排	200	800	<300	<420
IX	单排	180	720	<300	<420

表中第四和第六列分别表示由光带上腐蚀坑数目及由光带两端侧面上阶梯高度差所计算出来的滑移距离差。从表中可以看出，对于所有的光带，根据腐蚀坑数目计算出来的数值都要比根据表面阶梯高度计算出来的数值大；对某些光带，这两个值相差得多些，但对另一些光带相差得少些。这说明了，某些光带中相反符号的位错对多些，而在另一些光带中相反符号的位错对少些。

虽然这些测量并不直接解决腐蚀坑和位错之间的——对应关系，但是，在多数情况下，较多的腐蚀坑数目相当于较大的表面阶梯高度差，而较少的腐蚀坑数目相当于较小的表面阶梯高度差，仅仅这一个事实就已经说明了腐蚀坑与位错之间存在着一定的数量上的关系。如果认为一个腐蚀坑相当于几个位错的情况是不可能的（否则我们将观察到相反的情形，即根据表面阶梯高度差所得出的滑移距离的差值将会比根据腐蚀坑数目所得出的差值大），那末很自然地可以得出结论：在腐蚀坑与位错之间存在着一一对应的关系。

#### 4. 滑移带中存在相反符号位错的实验验证

上节中我们看到了，在滑移带中存在着相反符号的位错。这一个事实我们另外用实验方法进行了验证，实验的原理如下：在同一个滑移面内，不同符号的位错相互之间有吸

引力作用，在較高的溫度下，位錯較易于运动，它們將相互靠近而抵消，这种現象應該可以在溫度不高的退火中觀察出来。

觀察位錯的移动最好是用重腐蝕方法<sup>[4]</sup>。但是，如果在滑移帶中位錯密度大时，重腐蝕后就很难看出位錯數目的減少。而在岩盐晶体上，由于腐蝕条件的不易控制，这种重腐蝕的方法根本无法应用，所以我們采用了另一种方法。

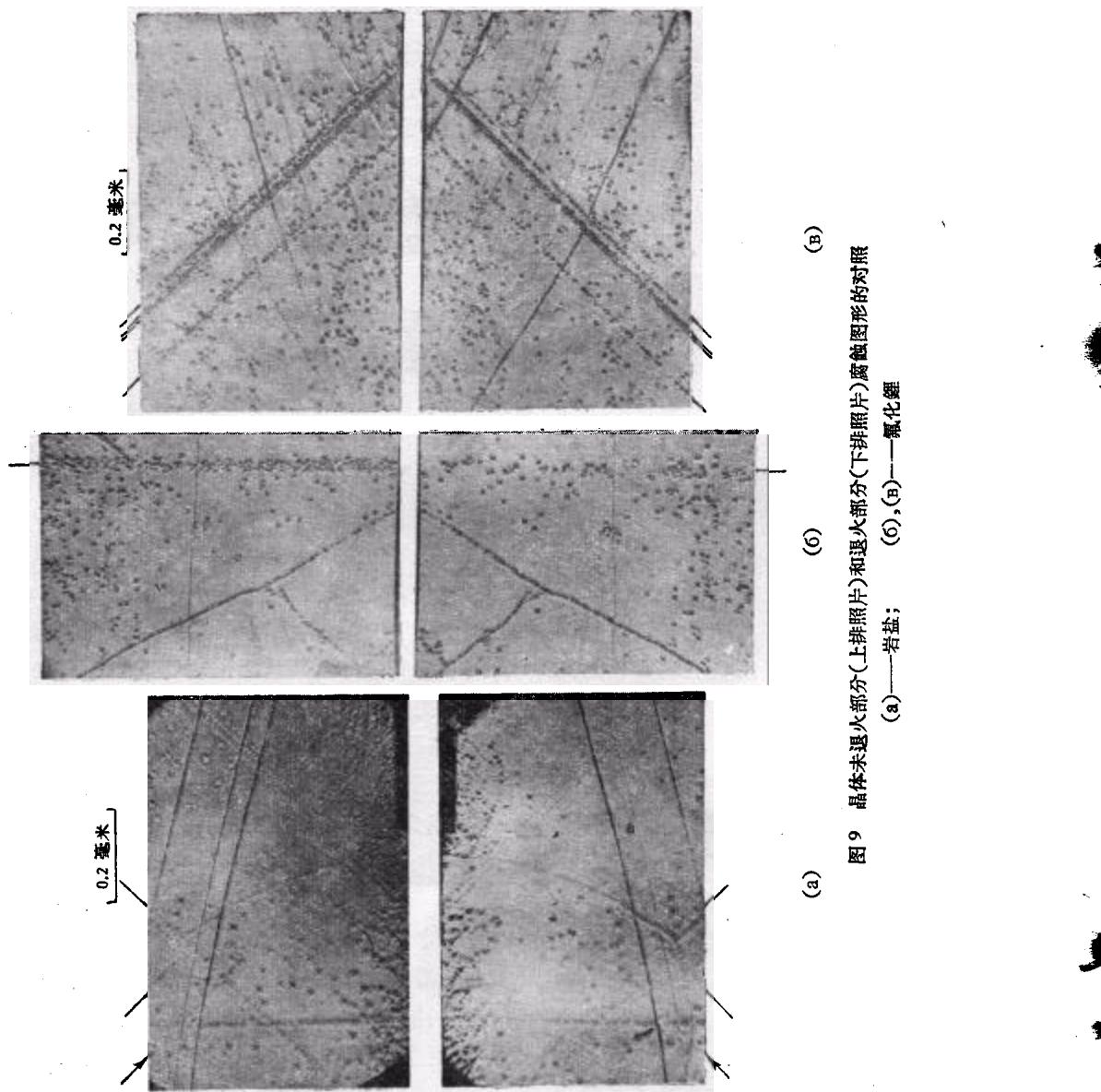
我們知道，如果将一个試样沿解理面劈成两半，进行腐蝕，则在两个相对的晶面上形成完全对应的腐蝕图形<sup>[4,7]</sup>。現在，我們将变形后的試样劈成两半，将一半先腐蝕，另一半先退火，然后腐蝕，那末，比較这两个相对的表面上的腐蝕图就可以很容易地看出滑移帶上腐蝕坑數目的減少。

我們在岩盐及氟化鋰晶体中进行了这样的实验。退火的条件是：岩盐，250℃，8小时；氟化鋰，100℃，2小时。可以看出，这样的退火溫度是很低的。

比較退火的和未退火的晶体表面的腐蝕图形（图9），可以看出下列几点：1)两表面上不在滑移帶上的腐蝕坑完全相應，說明退火并未使它們移动；2)在滑移帶上的腐蝕坑數目，不管是在[100]方向或是在[110]方向，退火后都減少了；3)在某些滑移帶上減少得很多些，在另一些帶上減少得少些。也有这种情形 [图9(a)]：一条滑移帶上腐蝕坑的数目显著地減少了，但是在同一試样中和它相邻的另一条滑移带上这种減少几乎看不出来。

一般地說，滑移帶上位錯的減少是由于几种原因：(1)由于相反符号位錯的抵消；(2)由于位錯沿滑移面的移动而跑出晶体表面；(3)由于纵向移动(climb, переползание)，即直边位錯垂直于滑移帶的移动。位錯纵向移动时，必然要有一排空位产生或消失，所以这种移动一般只在足够高的溫度下才发生。在岩盐晶体中，位錯的纵向移动只在~600℃的溫度才开始<sup>[16]</sup>。在我們的实验中，纵向移动确实沒有发生，因为在图9中，退火后的試样上滑移帶的近旁并沒有觀察到新的腐蝕坑。至于說到位錯沿滑移面移动而跑出晶面的情况，那末一般地說它是可能的。但是我們認為，即使它在这里发生了，但这也不可能是腐蝕坑數目減少的唯一原因。因为，第一，位錯跑出表面时要在表面形成阶梯，因而增加表面能量，所以从能量角度講，这种过程是不利的。很湊巧，在图9(a)中可以看到表面的边缘处很多腐蝕坑。它們的数目并沒有因退火而減少。显然，这些位錯会对滑移帶中位錯起作用而妨碍它們跑出表面。第二，如果滑移帶中位錯的減少是由于它們沿滑移帶移动而跑出表面，那末在退火后在滑移帶上我們應該可以觀察到腐蝕坑分布的一些規律：靠近表面边缘处的腐蝕坑應該比远处少些，但在图9中并沒有这个現象。第三，如果位錯是由于沿滑移帶跑出表面而減少，则在腐蝕坑較多的滑移带上，这种減少應該比較显著些，因为在这种滑移帶中的位錯比在腐蝕坑數目較少的滑移帶中的位錯更为不稳定一些。但是这个現象也沒有发现。在图9(a)中，我們恰好觀察到了相反的現象：在两相邻的滑移帶中，腐蝕坑的較显著的減少恰好是发生在那腐蝕坑較少的滑移带上。根据这些事实，我們認為：在这里所發生的腐蝕坑數目的減少，主要是由于相反符号的位錯互相抵消而造成的。

这种相反符号位錯在同一滑移面內存在的事實說明了，晶体中滑移是通过晶体中局部地方以位錯环的形式传播而发生的。



## 5. 討論

这样，我們看到，上述的实验結果完全証明了岩盐型晶体中滑移的位錯机构：滑移是通过位錯的移动而发生的；在滑移面內，滑移是很不均匀的，滑移并不是在整个平面上发生，而是在滑移面局部地方以位錯环的形式传播而发生的。至于位錯环形成的机构以及滑移带形成的原因，目前尚未完全明了。

我們認為，以上所得的結果，同样也适用于金属晶体，而且这里所用的实验方法，也可以推广到金属中去研究塑性变形的微观机构。

对于腐蝕坑与位錯之間的一一对应关系，則應該提到，除了在某些晶体中，它已經被确立之外，也有一些工作表明，在某些金属中，例如鉛中<sup>[17-19]</sup>，这种关系并不存在。但是考慮到腐蝕方法对于腐蝕剂及腐蝕条件极端灵敏的依賴关系，我們認為，对于这些材料，与其說腐蝕坑与位錯之間不存在一一对应关系，不如說現在還沒有找到适当的腐蝕剂及适当的腐蝕条件。一般說來，在应用腐蝕方法研究位錯理論时，对于每一种晶体和它的腐蝕剂都應該個別地研究腐蝕坑与位錯之間的关系。但是，腐蝕坑的方法，特別是把它和其他方法适当地結合起来，确是研究晶体塑性变形的微观机构的一个簡易而灵敏的方法。

最后，作者謹向莫斯科鋼鐵学院的 Б. Н. Финкельштейн 教授及鋼院物理教研室全体同志致謝，感謝他們在进行這項工作时給予的亲切的指导和无私的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Шаскольская, М. П., Сунь Жуй-фан, *Кристаллография* **4** (1959), 74.
- [2] Horn, F. H., *Phil. Mag.* **43** (1952), 1210.
- [3] Vogel, F. L., Pfann, W. G., Corey, H. E., Thomas, E. E., *Phys. Rev.* **90** (1953), 489.
- [4] Gilman, J. J., Johnston, W. G., *J. Appl. Phys.* **27** (1956), 1018.
- [5] Dash, W. C., *J. Appl. Phys.* **27** (1956), 1193.
- [6] Breidt, P., Greiner, E. S., Ellis, W. C., *Acta Metall.* **5** (1957), 60.
- [7] Amelinckx, S., *Acta Metall.* **2** (1954), 848.
- [8] Hirbhard, W. R., Dunn, C. G., *Acta Metall.* **4** (1956), 306.
- [9] Шаскольская, М. П., Векилов, Ю. Х., *Кристаллография* **2** (1957), 548.
- [10] Инденбом, В. Л., Томиловский, Г. Е., *Доклады АН СССР* **115** (1957), 723.
- [11] Gilman, J. J., Johnston, W. G., Dislocations & Mechanical Properties of Crystals (Report of the Lake Placid Conference 1956), 1957.
- [12] Кузнецов, В. Д., Кристаллы и Кристаллизация, 1954, 127.
- [13] Okada, J., *J. Phys. Soc. Japan* **10** (1955), 1018.
- [14] Suzuki, H., Dislocations & Mechanical Properties of Crystals (Report of the Lake Placid Conference 1956), 1957, 172.
- [15] Vogel, F. L., *Trans. AIME* **206** (1956), 947.
- [16] Barber, D. J., Harvey K. B., Mitchell, J. W. *Phil. Mag.* **2** (1957), 704.
- [17] Forsyth, J. E., *Phil. Mag.* **45** (1956), 344.
- [18] Wyon, G., Marchlin, J., *Phil. Mag.* **46** (1955), 1119.
- [19] Forty, A. J., Frank, F. C., *J. Phys. Soc. Japan* **10** (1955), 656.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОГО МЕХАНИЗМА СКОЛЬЖЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ

Сунь Жуй-фан М. П. Шаскольская

### Резюме

При изучении пластической деформации в кристаллах типа каменной соли полосы двупреломления, наблюдаемые в поляризованном свете, сопоставляются с изучением поверхностного рельефа боковых граней кристалла микроинтерферометрическим методом. Было обнаружено, что в процессе скольжения величины сдвига у двух концов плоскости скольжения всегда не равны. На основании этого факта в данной работе исследуется распределение дислокаций в кристалле при пластической деформации методом фигур травления. Сопоставлением с полосами двупреломления и соответствующим поверхностным рельефом всесторонне доказывается дислокационный механизм скольжения в кристаллах типа каменной соли.

Путем сравнения в пластически деформированном кристалле каменной соли с разностью величин сдвига, соответствующих выходам той же полосы на боковые грани кристалла, показано однозначное соотношение между фигурой травления и дислокацией. Кроме того, экспериментально доказано, что в полосе скольжения задерживаются дислокации противоположных знаков, которые при повышенной температуре способны двигаться друг к другу и уничтожаются.