

И. И. ЛУКИРСКИЙ, член-корреспондент АН СССР

### ОПЫТЫ С МОНОКРИСТАЛЛАМИ КАМЕННОЙ СОЛИ

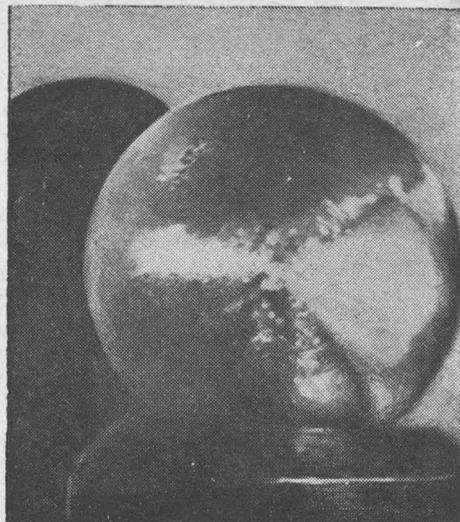
Изучение испускания электронов под действием сильного электрического поля обычно производится с тонкими конусообразными остриями вольфрама или молибдена. При прогревании таких острий в вакууме они закругляются, образуя на своем конце полусферу. Изучение испускания электронов с такой полусферы показывает, что она монокристаллическая, так как пространственное распределение эмиссии имеет ту же симметрию, что и кристаллы данного вещества. Как перекристаллизация, так и изменение формы острия происходит при температурах значительно более низких, чем температура плавления. Изменение формы, а именно превращение острия в полусферу, происходит под влиянием сил поверхностного натяжения.

В таком случае, казалось бы, должна была получаться поверхность монокристалла, отличающаяся от сферы, так как поверхностное натяжение монокристалла зависит от кристаллографического направления. Для выяснения этого вопроса был поставлен ряд опытов с большими монокристаллами, так как изучение поверхностей очень маленьких закругленных острий затруднительно. Опыты производились с монокристаллами каменной соли. Из соли вытачивались шарики диаметром от одного до нескольких сантиметров, которые полировались и прогревались в печи в течение нескольких часов при температурах значительно более низких, чем температура плавления каменной соли. В различных опытах температуры были различны. Они изменялись от 720 до 760° С.

Всякий раз после нагревания на поверхности шара образовывались фигуры, соответствующие кристаллографической симметрии его осей. На всех концах осей 1,0,0, проходящих через центр шара, образовывались восьмигранные фигуры с центром, совпадающим с осью. На концах осей 1,1,0 образовывались ромбические фигуры и, наконец, на концах осей 1,1,1 очень отчетливо выступали пирамиды с осью симметрии третьего порядка. На рис. 1 приведены фотографии соответственных мест кристалла, на которых отчетливо видны указанные фигуры. На первом снимке в центре трех лучей расположена ось 1,1,1, проходящая через центр шара, на втором центр фигуры есть ось 1,0,0 и на третьем ось 1,1,0. Четвертый снимок изображает тот же ромб при несколько другом освещении. Три ярких линии на фотографии 1 выходят из конца оси 1,1,1 и идут к концам трех осей 1,0,0. Кроме них на фотографии видны еще три слабых луча, являющихся бисектрисами углов, составляемых главными яркими линиями. Необходимо указать, что эта фигура повторяется на шаре восемь раз в строгом соответствии с положением концов осей 1,1,1, проведенных через центр шара. Каждый раз ось 1,1,1 является центром описанной фигуры.



1



2



3



4

Рис. 1. 1.  $(1, 1, 1)$ . 2.  $(1, 0, 0)$ . 3.  $(1, 1, 0)$  4.  $(1, 1, 0)$

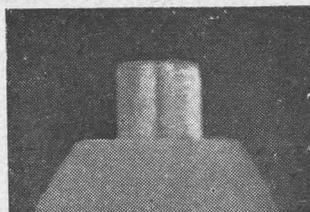


Рис. 2. Цилиндр с образующей, параллельной оси  $(1, 1, 0)$

Другие фигуры, получающиеся на концах других осей, также строго повторяются в соответствии со степенью симметрии той оси вращения, вокруг которой производится поворот. По обе стороны ярких линий, идущих от оси 1,1,1, идут скаты, которые и образуют ту восьмигранную фигуру, которая получается вокруг оси 1,0,0. Образование восьмигранной фигуры естественно, так как ось 1,0,0 есть ось четвертого порядка. Далее два ярких луча, идущих от оси 1,1,1, образуют две стороны того ромба, который изображен на фотографиях 3 и 4. Ромб получается от того, что расстояние по поверхности сферы между ближайшими концами осей 1,1,1 меньше, чем расстояние между двумя осями 1,0,0. Сопоставляя эти фигуры, легко видеть, что под влиянием нагревания монокристаллический шар каменной соли превратился в сорокавосьмигранную фигуру. В том, что такое превращение произошло, можно убедиться, помимо непосредственного наблюдения указанных фигур, следующим простым опытом. Если после прогрева катать шар по гладкой горизонтальной плоскости, то он при катании делает резкие внезапные повороты, траектория его состоит из зигзагов. Кроме этого, катание сопровождается резким постукиванием. Получающаяся сорокавосьмигранная фигура, повидимому, не является правильным геометрическим сорокавосьмигранником. Действительно, на ней наиболее резко выступают оси 1,1,1, затем слегка выступает ось 1,0,0, являющаяся центральной вершиной восьмигранных фигур, и практически нельзя заметить, выступает ли ось 1,1,0, которая находится в середине каждого ромба. Поэтому, если правильный сорокавосьмигранник составлен плоскостями с индексами (3,2,1), то в нашем случае площадки, повидимому, имеют место другие, более сложные индексы.

Опыт с одним и тем же кристаллом может быть повторен много раз. Достаточно сошлифовать кристалл и снова придать ему форму шара, чтобы после прогрева снова получить описанную фигуру. Необходимо заметить, что в получающейся из шара фигуре различие длин разных кристаллографических осей невелико. При первоначальном диаметре шара в несколько сантиметров различие длин осей составляет величины порядка десятка микронов. Это частично связано с тем обстоятельством, что в получающейся фигуре между отдельными ее гранями нет острых ребер. Все ребра и вершины являются слегка закругленными. Наглядно в этом легко убедиться, если вместо шара для опыта взять выточенный из монокристалла цилиндр. На рис. 2 показана фотография такого цилиндра после нагревания. На нем явно видны образовавшиеся площадки, параллельные образующей. При катании по горизонтальной плоскости цилиндр останавливается на площадках. При наклоне плоскости он «переваливается» на другую площадку. Однако для этого нужен наклон плоскости значительно меньший, чем в случае, если бы между площадками цилиндра были резкие ребра. Этот опыт показывает, что одна площадка переходит в другую относительно плавно. Прозвести точные измерения фигуры, получающейся из цилиндра, пока не удалось, так как помимо указанного явления при нагревании цилиндра всегда происходит некоторое его искривление за счет имевшейся в нем остаточной деформации.

Мы изложили основные наблюдаемые явления. Рассмотрим теперь, как они могут быть объяснены. Как уже указывалось, поверхностное натяжение в монокристалле должно зависеть от выбранного кристаллографического направления. В таком случае в монокристаллическом шаре должны существовать тангенциальные поверхностные силы, стремящиеся переместить частицы в области с максимальным поверхностным натяжением. Если при взятых на опыте температурах частицы поверхностного слоя достаточно подвижны, то такое перемещение

и должно происходить. Образующаяся при этом фигура должна быть приближением к «равновесной» фигуре кристалла, которая, как известно, должна соответствовать минимуму свободной энергии при заданном объеме кристалла. В монокристаллическом шаре выражены в одинаковой мере все кристаллографические направления. В получающейся после прогрева многогранной фигуре грани обладают меньшим, а ребра и, в особенности, вершины, большим поверхностным натяжением, если эта многогранная фигура является формой, более близкой к равновесной, чем шар. Из рассмотрения фигуры можно сделать вывод, что наибольшее поверхностное натяжение соответствует направлению 1,1,1, так как по этому направлению располагаются наиболее резко выраженные вершины пирамид. Полученная фигура, может быть, является только стадией приближения к окончательной равновесной форме или промежуточной равновесной формой. Последнее возможно, если существует ряд минимумов в задаче о минимуме свободной энергии.

Дальнейшего изменения формы фигуры каменной соли получить не удалось, несмотря на очень длительное нагревание. Однако вопрос о том, является ли полученная фигура для первоначально взятого монокристаллического шара равновесной, все же не следует считать окончательно решенным. Образование закругленных ребер и вершин в нашей многогранной фигуре, т. е. наличие участков поверхностей с индексами, принимающими большие целочисленные значения, обусловлено, по видимому, тем, что поверхностное натяжение изменяется не в очень широких пределах в зависимости от значений кристаллографических индексов взятых направлений и что эта величина не терпит разрыва. Производная же от величины поверхностного натяжения в зависимости от координат может, конечно, меняться прерывно. Рассмотрим теперь, каков может быть механизм, приводящий к тем изменениям формы, которые наблюдаются в описанных опытах.

Образование равновесной фигуры может осуществляться различными путями. В условиях опыта равновесие могло бы осуществляться или при помощи многократного испарения и конденсации, или же за счет ползания поверхностных атомов. Вторая возможность нам кажется более вероятной, так как теплота активации явления ползания имеет значительно меньшее значение, чем величина теплоты испарения. Кроме того, контрольные опыты со взвешиванием кристалла до и после опыта, а также наблюдение явления при равновесной упругости пара и без нее показывают, что испарение, если оно и имеет место, не определяет скорости процесса превращения формы кристалла. При рассмотрении этих опытов естественно возникает вопрос о том, какова роль начального состояния поверхности. При обтачивании и последующей полировке поверхность кристалла, конечно, исцарапана и искажена. Однако при наличии явления ползания в первой стадии процесса должно происходить «залечивание» поверхности, так как величина поверхности должна стремиться при прочих равных условиях к минимальному значению. Действительно, специально поставленные опыты показывают эту тенденцию.

Если нарочито сделать какую-либо грань кристалла шероховатой, то после прогрева кристалла, в условиях наших опытов, грань становится гладкой и блестящей. Ползающие при высоких температурах частицы будут переходить в места с большим значением поверхностного натяжения под влиянием тех тангенциальных сил, о которых было сказано выше. Скорость этого процесса должна в сильной степени зависеть от температуры тела.

Рассматривая явление ползания как процесс поверхностной диффузии, мы должны этому процессу приписать некоторую теплоту акти-

вации  $Q$ . Однако эта диффузия не будет свободной, а будет происходить под влиянием силы, вызванной разностью поверхностных натяжений. Число частиц, переползающих в единицу времени в направлении к большему значению поверхностного натяжения, можно считать в первом приближении пропорциональным

$$\sim \frac{d\sigma}{ds} e^{-Q/RT},$$

где  $d\sigma$  — изменение поверхностного натяжения вдоль участка пути  $ds$ ; остальные обозначения обычны. Эта формула взята по аналогии с рассмотрением явления диффузии под влиянием постоянно действующей малой силы, например, диффузия ионов в кристалле под действием электрического поля (ток проводимости).

Детальное изучение наблюдаемого явления продолжается. Научный сотрудник М. Н. Флерова произвела многочисленные измерения для определения формы полученной фигуры. Кроме того она помогала мне при производстве опытов. Считаю своим приятным долгом принести ей за это свою благодарность.

Ленинградский физико-технический институт  
Академии Наук СССР

Поступило  
6 X 1944