

1 ТИПЫ ДИСЛОКАЦИЙ, ИХ ГЕОМЕТРИЯ

Первоначально дислокации были введены Вольтеррой и другими авторами, когда они рассматривали упругие свойства цилиндра с разрезом, деформированного различными способами. Некоторые из этих способов деформации непосредственно соответствуют скольжению, а образующиеся в результате конфигурации — дислокациям. На рис. 1 представлены эти конфигурации. Конфигурации *а* и *б* соответствуют краевой дислокации, а конфигурация *в* — винтовой. Однако связь между результатами этих работ по теории упругости и процессам скольжения в кристаллах оставалась не замеченной до конца тридцатых годов двадцатого века, когда дислокации были постулированы как дефекты кристаллической решетки.



Рис. 1. Деформации упругого цилиндра, рассмотренные Вольтеррой:
а, б — конфигурации, приводящие к образованию краевой дислокации;
в — конфигурация, приводящая к образованию винтовой дислокации

В кристалле дислокацию можно представить как результат сдвига в некоторой кристаллографической плоскости одной части кристалла относительно другой. На рис. 2 представлен сдвиг, создающий краевую дислокацию. ABCD — плоскость сдвига, \vec{s} — вектор сдвига, АВ — линия краевой дислокации. На верхнюю часть кристалла действует сдвигающее напряжение, в результате которого верхняя часть кристалла сдвинется в плоскости сдвига ABCD на одно межатомное расстояние. Тогда в верхней части кристалла (рис. 3) образуется лишняя атомная полуплоскость — "экстраплоскость". Край экстраплоскости — краевая дислокация. Около линии дислокации атомы смещены из своих идеальных положений, решетка искажена. Поперечные размеры области искажений составляют несколько межатомных расстояний, а протяженность — порядка размеров кристалла.

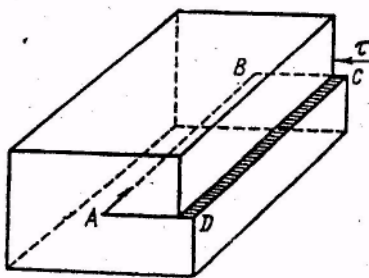


Рис. 2. Сдвиг, создающий краевую область дислокации.

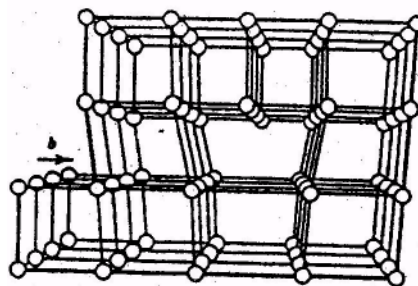


Рис. 3. Расположение атомов в краевой дислокации АВ.

Краевую дислокацию можно представить также, если между плоскостями идеального кристалла вдвинуть сверху полуплоскость или изъять полуплоскость сверху. Условно принято первую дислокацию называть положительной (полуплоскость сверху, значок 1), вторую — отрицательной (полуплоскость снизу, значок T). Из приведенных рисунков видно, что для краевой дислокации вектор сдвига перпендикулярен линии дислокации. Сдвиг одной части кристалла относительно другой части можно провести в направлении, как это показано на рис. 4. В этом случае линия BC, отделяющая сдвинутую часть кристалла от несдвинутой, называется винтовой дислокацией. Вектор сдвига параллелен линии дислокации. Лишняя полуплоскость отсутствует, кристалл состоит как бы из одной атомной плоскости, закрученной по винтовой линии. Выход винтовой дислокации на поверхность кристалла заканчивается моноатомной ступенькой. Так же, как в случае краевой дислокации, искажения в решетке сосредоточены вблизи линии дислокации, в узкой области диаметром несколько межатомных расстояний. В зависимости от направления вращения различают правые и левые дислокации.

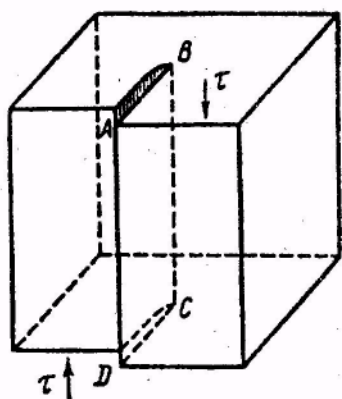


Рис. 4. Сдвиг, создающий винтовую дислокацию. ABCD — плоскость сдвига, τ — вектор сдвига, CB — линия винтовой дислокации.

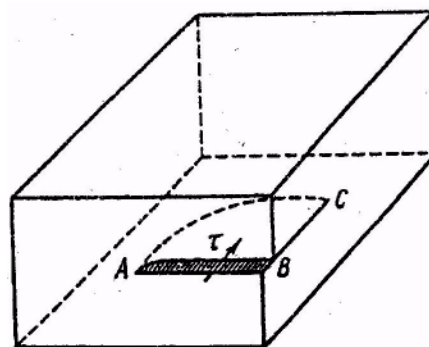


Рис. 5. Сдвиг, создающий криволинейную дислокацию

Краевая и винтовая дислокации являются прямолинейными дислокациями и представляют собой частные случаи. Более общим случаем будет криволинейная дислокация или смешанная. Она образуется, если вектор сдвига имеет как винтовую, так и краевую составляющие (рис. 5). AC — криволинейная или смешанная дислокация. В точке A дислокация чисто винтовая, в точке C — краевая. ACB — плоскость сдвига, τ — вектор сдвига, AC — линия криволинейной дислокации. На рис. 6 представлено расположение атомов для такой дислокации.

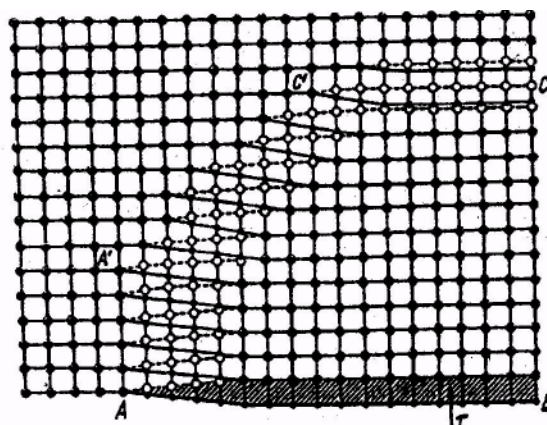


Рис. 6. Расположение атомов в области криволинейной дислокации AC. Плоскость скольжения совпадает с плоскостью чертежа. Черные кружки — атомы под этой плоскостью, белые — атомы над ней. Заштрихованный участок — ступенька, образовавшаяся в результате сдвига.

2 КОНТУР И ВЕКТОР БЮРГЕРСА. ИНВАРИАНТНОСТЬ ВЕКТОРА БЮРГЕРСА

В разобранных выше модельных представлениях дислокаций вектор сдвига называют вектором Бюргерса. Вектор Бюргерса является важной характеристикой дислокации. Он определяет энергию дислокации, в связи с этим его называют еще вектором мощности. Более строгое определение вектора Бюргерса было введено Франком, при этом он использовал понятие контура Бюргерса. Введем две кристаллические решетки: одну — реальную, содержащую краевую дислокацию, и другую — идеальную (рис. 7). Областью хорошего материала назовем область, где выполняется взаимно однозначное соответствие между атомами обеих решеток. Область, где не выполняется такое соответствие, называется областью плохого материала. В реальном кристалле построим некоторый замкнутый контур по следующему правилу: проводим его в хорошем материале из векторов, соединяющих узлы решетки (векторов трансляции): число векторов трансляции, взятых в одном направлении, должно быть равно числу векторов трансляции, взятых в противоположном направлении. Направление обхода по контуру выберем по часовой стрелке. Устанавливая взаимно однозначное соответствие между атомами обеих решеток, проводим контур в идеальном кристалле. Контур окажется разомкнутым. Величина надвязки, которую нужно провести, чтобы замкнуть контур, называется вектором Бюргерса, а контур — контуром Бюргерса.

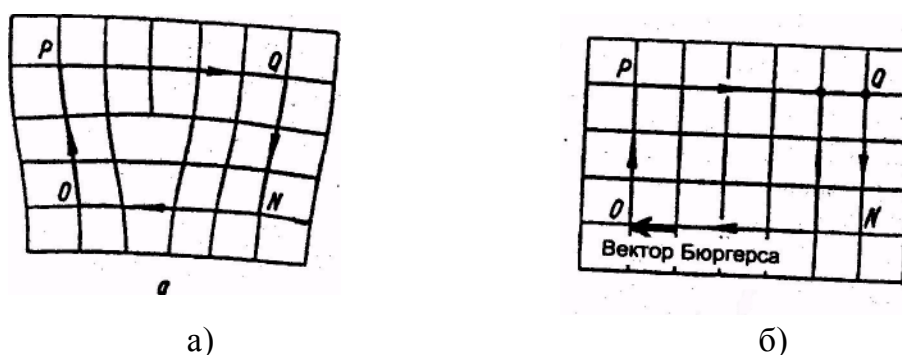


Рис. 7. Построение контура Бюргерса для краевой дислокации: а — замкнутый контур в реальном кристалле, содержащем краевую дислокацию; б — разомкнутый контур в идеальном кристалле.

Аналогичные построения можно выполнить и для винтовой дислокации (рис. 8).

Так как контур Бюргерса целиком лежит в хорошем материале, то вектор Бюргерса обязательно является вектором решетки (вектор трансляции).

Дислокация в этом случае является полной или единичной.

Контур Бюргера может быть смещен вдоль дислокации, а также сжат или растянут в направлении, перпендикулярном оси дислокации, но, учитывая, что он обязательно проходит в хорошем материале, вектор Бюргера будет величиной постоянной – свойство инвариантности вектора Бюргера. Из этого свойства следует важный вывод: дислокация не может оборваться нигде внутри кристалла, а только может выйти на поверхность кристалла, на междислокационную границу, на другую дислокацию или дефект более общего типа. Вообще, дислокации в кристаллах чаще образуют петли или сетки.

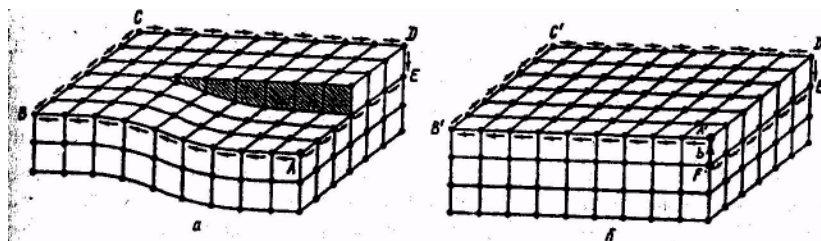


Рис. 8. Построение контура Бюргера для винтовой дислокации: а— замкнутый контур в реальном кристалле, содержащем винтовую дислокацию; б— разомкнутый контур в идеальном кристалле.

Таким образом, покоящаяся дислокация в твердом теле может быть на два вектора — вектором l и вектором Бюргера b . Для движущейся дислокации должен быть задан еще вектор ее смещения η . Вектор l совпадает с направлением линии дислокации для прямолинейных дислокаций. Для криволинейной дислокации вводится вектор dl как единичный вектор, совпадающий по направлению с касательной к линии дислокации в данной точке. На рис. 9 изображена дислокационная петля. Так как вектор Бюргера является величиной инвариантной, то в каждой точке петли его направление и величина будут постоянными, направление же единичного вектора (dl от точки к точке) будет меняться. В точке А дислокация будет винтовой, в точке С — краевой и в точке В — смешанной. Для точки В вектор b можно разложить на две составляющие: одна — b_{\parallel} — параллельна dl — является винтовой составляющей вектора Бюргера, другая — b_{\perp} — перпендикулярна dl — является краевой составляющей вектора Бюргера. Если угол между dl и b обозначить α , то $b_{\perp} = b \sin \alpha$
 $b_{\parallel} = b \cos \alpha$ $b = b_{\perp} + b_{\parallel}$

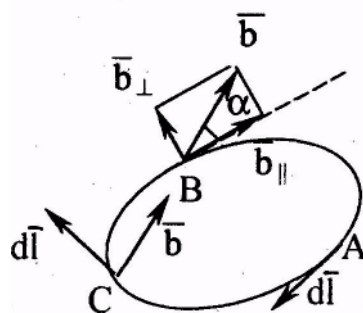


Рис. 9. Дислокационная петля

Возвращаясь к модельному описанию дислокации, видим, что для краевой дислокации \mathbf{b} перпендикулярен l , для винтовой \mathbf{b} параллелен l и для смешанной дислокации вектор Бюргерса составляет произвольный угол с линией дислокации.

3 ПРАВИЛО ЗНАКОВ

При описании дислокаций следует выполнять правило знаков. За положительное направление вектора dl принимается его направление за плоскость чертежа, тогда положительное направление обхода контура Бюргерса — по часовой стрелке (правило правого винта). Это определит положительный знак вектора Бюргерса (справа – налево); лишняя полуплоскость будет расположена сверху (рис. 10 а), для дислокации используется знак \perp . Если лишняя полуплоскость расположена снизу, вектор Бюргерса расположен слева - направо и является отрицательным, знак \top (рис. 10б).



Рис. 10. Правило знаков. Положительная (а) и отрицательная (б) краевые дислокации.

Принимая во внимание правило знаков, можно формализовать определение дислокаций: краевая дислокация винтовая правого вращения винтовая левого вращения

$$\begin{aligned} - (\bar{b}l) &= 0; \\ - (\bar{b}l) &= b; \\ - (\bar{b}l) &= -b. \end{aligned}$$

4 ЧАСТИЧНЫЕ ДИСЛОКАЦИИ. ПЛОТНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ

После прохождения полной дислокации решетка превращается сама в себя. Можно, конечно, представить дислокацию, у которой вектор Бюргерса отличается от вектора решетки. В этом случае контур Бюргерса, окружающий одну такую дислокацию, не может пройти полностью через область хорошего кристалла, так как при прохождении такой дислокации решетка не преобразуется сама в себя. Контур должен пересекать хотя бы один поверхностный дефект, после прохождения которого изменяется кристаллическая структура. Этот поверхностный дефект заканчивается на линии дислокации. Такую дислокацию называют частичной, а связанный с ней поверхностный дефект — дефектом упаковки. Отсюда следует, что дефект упаковки не обязательно проходит через весь кристалл, он может оборваться на другой частичной дислокации с вектором Бюргерса, который с вектором Бюргерса первой дислокации даст полный вектор решетки.

Такая система двух частичных дислокаций, соединенных участком дефекта упаковки, называется растянутой (расщепленной) дислокацией.

Плотность дислокаций определяется как общая длина дислокационных линий в единице объема кристалла

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{V} = [1/\text{см}^2]$$

Более удобной является оценка плотности как числа дислокаций, пересекающих единицу площади $\rho = N/S$.

5 ДВИЖЕНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ

В настоящее время различают два типа движения дислокаций: консервативное и неконсервативное движение.

Под консервативным движением или скольжением подразумевается такое движение, при котором общее число атомов решетки остается неизменным. В этом случае движение дислокации не сопровождается переносом массы, объем кристалла при движении сохраняется.

Движение дислокации, при котором имеет место массоперенос за счет диффузии и возможно изменение объема кристалла, называется неконсервативным движением или переползанием.

5.1 Скольжение дислокаций

Вернемся к модели краевой дислокации (рис. 2, 3). Ее консервативным движением является скольжение в плоскости, определяемой векторами b и l . Эта плоскость называется плоскостью скольжения. Плоскость скольжения краевой и смешанной дислокации есть та плоскость, в которой лежит дислокация и ее вектор Бюргерса. Направление скольжения совпадает с вектором Бюргерса b . Более строго эта плоскость может быть определена нормалью, то есть векторным произведением $[b \ l]$. Для винтовой дислокации $[b \ l]=0$, и нельзя определить плоскость скольжения описанным выше способом. Действительно, плоскостью скольжения винтовой дислокации может быть любая плоскость зоны, ось которой параллельна вектору Бюргерса, и скольжение возможно в любом направлении. В этом заключается одно из отличий винтовой и краевой дислокации. В более общем случае, когда линия дислокации и вектор b не лежат в одной плоскости, вводится понятие поверхности скольжения. Как указывалось выше, линия дислокации не может оборваться внутри кристалла, и чаще дислокации образуют замкнутые петли. Когда вектор b расположен в плоскости петли, плоскость скольжения совпадает с плоскостью петли. Когда же вектор Бюргерса не лежит в плоскости петли, поверхность скольжения, определяемая линией дислокации и ее вектором Бюргерса, представляет собой цилиндр, образующая которого совпадает с направлением вектора b (рис. 11). Такая дислокация называется призматической. Для призматической дислокации возможно консервативное движение - скольжение вдоль цилиндрической поверхности. Пунктиром показаны отдельные положения петли в процессе ее скольжения. В кристаллах, не обладающих жесткими и направленными межатомными связями (многие металлы, щелочно-галогидные кристаллы и т. д.).

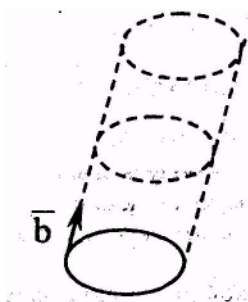


Рис.11. Призматическая дислокация, ее скольжение по цилиндрической поверхности.

Консервативное движение дислокаций определяет макроскопическое скольжение в кристалле и пластическую деформацию.

Для процесса пластической деформации весьма существенна структура кристалла. Скольжение носит анизотропный характер, оно происходит по вполне определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям. Плоскость и направление скольжения определяют систему скольжения. Систем скольжения может быть несколько.

Чаще всего плоскостью скольжения оказывается плотно упакованная плоскость, т. е. плоскость (111) в гранецентрированных кубических кристаллах, (0001) — в гексагональных. В объемноцентрированных кубических кристаллах обычно нет четко выраженной плоскости скольжения: наблюдается скольжение по плоскостям (100), (112) и (123). В ионных кристаллах — по плоскости (110). В то же время наблюдается небольшое скольжение и по другим плоскостям.

Направление скольжения практически всегда совпадает с направлением вектора решетки в плотно упакованной плоскости, т.е. с направлением [110] в гранецентрированных кубических кристаллах, [111] в объемно-центрированных кубических кристаллах и [21 10] в гексагональных. В ионных кристаллах направление скольжения всегда совпадает с направлением, вдоль которого лежат заряды одного знака.

5.2 Переползание дислокаций

Вернемся к схеме краевой дислокации (рис. 3). Если удалить с края лишней полуплоскости ряд атомов, дислокационная линия продвинется вверх на одно межатомное расстояние, выйдя из своей первоначальной плоскости скольжения. Такой процесс называется положительным переползанием - движение под прямым углом к плоскости скольжения. Подобно этому, если добавить ряд атомов ниже лишней полуплоскости, линия дислокации передвинется вниз на одно межатомное расстояние - это схема отрицательного переползания.

6 ДИСЛАКАЦИОННЫЕ РЕАКЦИИ. ПРАВИЛО ФРАНКА

Вектор Бюргерса определяет упругую энергию дислокаций.

$E_{упр} = \alpha G b^2$, где α — коэффициент ($\alpha \sim 0,5 - 1$), G — модуль сдвига.

Из выражений энергии дислокации вытекают важные следствия:

1. В кристаллах предпочтительны дислокации с наименьшим вектором Бюргера.
2. Правило Франка для определения той или иной дислокационной реакции.

Индексы плоскостей и направлений здесь и в дальнейшем изложении следует понимать не в буквальном смысле, а как плоскости и направления этого типа.

Дислокации при движении могут сталкиваться друг с другом. В точках столкновения общий сдвиг равен сумме (геометрической) сдвигов, реализуемых каждой дислокацией, т.е. геометрической сумме векторов Бюргера. В результате сложения векторов Бюргера столкнувшихся первичных дислокаций может возникнуть одна или несколько новых вторичных дислокаций. Такое суммирование, приводящее к появлению дислокаций (одной или нескольких) с другими векторами Бюргера, есть так называемая "дислокационная реакция".

Геометрическая сумма векторов Бюргера дислокаций, возникающих в результате дислокационной реакции, должна быть равна геометрической сумме векторов Бюргера, вступивших в реакцию. Однако, столкновение двух дислокаций может и не идти. Возможность какой-либо дислокационной реакции определяется балансом энергий.

Дислокационная реакция идет, если упругая энергия дислокаций, получающихся в результате реакции, меньше, чем упругая энергия дислокаций, вступивших в реакцию (правило Франка).

Некоторые дислокационные реакции будут показаны далее на примере реальных структур.

7 ДИСЛОКАЦИИ В НЕКОТОРЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ.

В данной работе предлагается, основываясь на вышеизложенных основных положениях о дислокациях, рассмотреть геометрию дислокаций в кристаллах, относящихся к различным структурным типам. Это структурный тип меди — Cu-гранцентрированная кубическая решетка, структурный тип, представителем которого является каменная соль NaCl, и структурный тип алмаза.

Выбраны кристаллы, имеющие практическое значение и разный тип химической связи. Металлы — большинство которых имеют ГЦК — решетку (Ag, Au, Cu, Al и т.д.) — металлический тип связи. Структурный тип NaCl (ионный тип связи) широко распространен среди бинарных соединений. Щелочно-галоидные кристаллы, галоиды серебра, халькогениды свинца, многие окислы, нитриды и карбиды кремния кристаллизуются по типу NaCl. Широко известны полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{IV}$: PbS, PbSe, PbTe, относящиеся к этому структурному типу. Тип связи в этих кристаллах меняется от преимущественно ионной (LiF) до сильно ковалентной. Многие из этих кристаллов обладают важными оптическими и полупроводниковыми свойствами. Широко распространенные полупроводники (ковалентный тип связи) германий и кремний имеют кристаллическую структуру типа алмаза. Разобрав дислокации в элементарных полупроводниках, можно рассматривать дислокации в бинарных полупроводниках типа $A^{III}B^V$ — GaAs, InP, InSb, InAs и т.д. Дислокации в этих соединениях оказывают существенное влияние на полупроводниковые свойства.

Рассматривая возможные типы дислокаций и их свойства в кристаллических

структурах, будем руководствоваться следующими критериями:

1. Учитывая, что энергия дислокации пропорциональна квадрату ее вектора Бюргерса, устойчивыми будут дислокации с минимальным вектором Бюргерса.

2. Следует принять во внимание тип связи в кристаллах, т.к. устойчивость дислокации будет также определяться характером межатомного взаимодействия, т.е. типом связи.

7.1 Дислокации в некоторых металлах с гранцентрированной кубической решеткой.

ГЦК решетка характерна для пластичных металлов Ag, Au, Cu, Al и др. Координационное число равно 12, а число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку, 4 (рис. 12). Если ГЦК решетку описать с помощью положения атомных слоев с идентичным расположением атомов в каждом слое, то последовательность укладки плоскостей типа (100) и (110) будет *...абабаб...*, а последовательность укладки плоскостей типа (111) — *...АВСАВСАВС...* (заглавными буквами обозначают плоскости плотной упаковки). Плотнупакованные плоскости являются в ГЦК решетке плоскостями скольжения. Эти плоскости содержат наиболее плотноупакованные направления типа [ПО], которые являются направлениями скольжения.

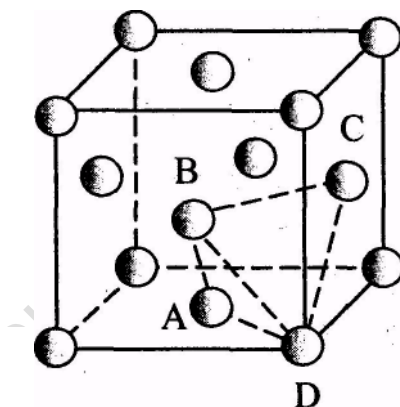


Рис. 12. Элементарная ячейка в ГЦК решетке. Выделен тетраэдр Томпсона

7.1.1 Полная краевая дислокация в ГЦК решетке.

Наименьший вектор в ГЦК решетке — вектор типа $a/2 [110]$ соединяет атом в вершине куба с ближайшим атомом в центре грани. Он и определяет вектор Бюргерса встречающихся в этой решетке полных дислокаций. Полную краевую дислокацию можно получить, если произвести сдвиг в плоскости скольжения (111) на вектор $b_1 = a/2 [110]$.

На рис. 13 изображена последовательность укладки плоскостей плотной упаковки (111) — *...АВСАВСАВС...* Вектор $b_1 = a/2 [110]$ соединяет шары одного сорта (В на рис. 13), поэтому смещение слоя В относительно слоя А на этот вектор не нарушает последовательность укладки плоскостей (111), но приведет к образованию полной краевой дислокации (проследите это на модели ГЦК — решетки). Так как для краевой дислокации лишняя полуплоскость перпендикулярна вектору Бюргерса, то ее индексы должны быть типа (110). Учитывая

последовательность укладки этих плоскостей, линия дислокации будет представлять край двух полуплоскостей — ав (рис. 14). Краевая дислокация лежит в плоскости скольжения (111) и перпендикулярна вектору Бюргерса, нетрудно видеть, что ее направление должно быть типа $[112]$ (убедитесь в этом с помощью модели ГЦК — решетки). На рис. 14 представлена схема краевой дислокации такого типа.

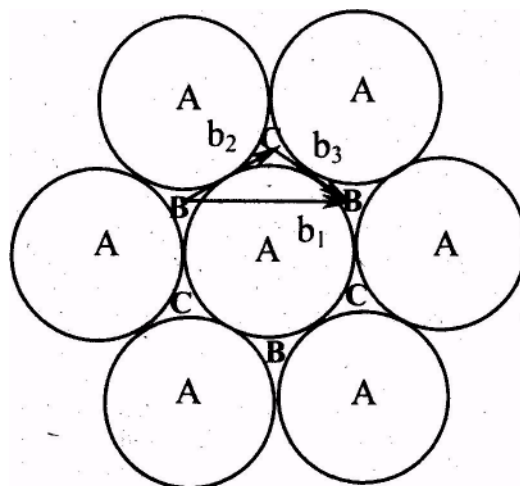


Рис. 13. Направления скольжения в плоскости плотной упаковки (111) в ГЦК решетке, $b_1 = a/2 [101]$, $b_2 = a/6 [112]$, $b_3 = a/6 [211]$.

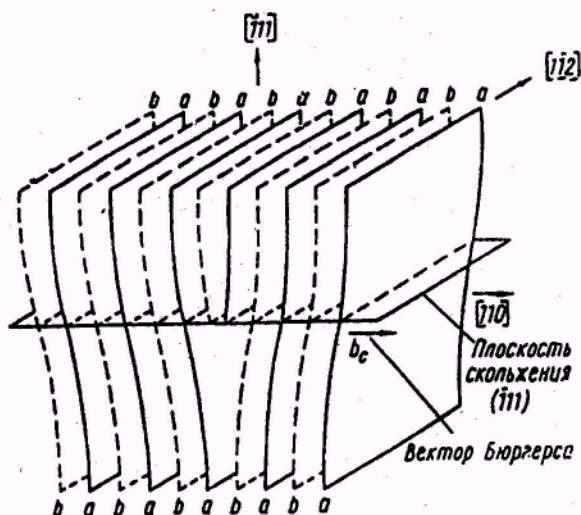


Рис. 14. Полная краевая дислокация с вектором Бюргерса $b = a/2 [101]$ в ГЦК решетке

7.1.2 Расщепление полной краевой дислокации на две частичные, образование дефектов упаковки.

Рассмотрим процесс скольжения в ГЦК структуре. Обратимся к рис. 13. При скольжении в плоскости (111) слоя В относительно слоя А шару В энергетически легко двигаться через лунку С, при этом слой В становится слоем С и порядок укладки плоскостей (111) нарушается ...АВСАСАВС... Возникает дефект упаковки вычитания (отсутствует слой В) — АС прослойка гексагонального материала в кубическом. С другой стороны, сдвиг шара В в лунку С приводит к образованию

частичных дислокаций. Направления от В к С и от С к В в плоскости (111) есть направления типа $a/6 [112]$, они и являются векторами Бюргера частичных дислокаций Шокли. Частичные дислокации Шокли за счет взаимодействия друг с другом отталкиваются. Площадь дефекта упаковки при этом увеличивается, увеличивается его энергия. Из-за стремления энергии дефекта упаковки к минимальной, величине, дефект упаковки стягивает частичные дислокации, т.е. возникает сила притяжения. Равновесная ширина дефекта упаковки "d", т.е. расстояние между частичными дислокациями, определяется равенством силы, с которой взаимно отталкиваются частичные дислокации, и силой, с которой дефект упаковки стягивает частичные дислокации, стремясь к уменьшению своей энергии.

$$d = \frac{G(\bar{b}_2 \cdot \bar{b}_3)}{2\pi\gamma},$$

где C — модуль упругости материала, γ — энергия дефекта упаковки на единицу площади.

Комплекс из двух частичных дислокаций, соединенных между собой дефектом упаковки, показан на рис. 15. Образование такого комплекса связано с дополнительной затратой энергии и может происходить, например, когда к кристаллу приложено внешнее усилие. В этом случае протекает дислокационная реакция:

(рис. 14 трансформируется в рис. 15).

$$\bar{b}_1 = \bar{b}_2 + \bar{b}_3$$

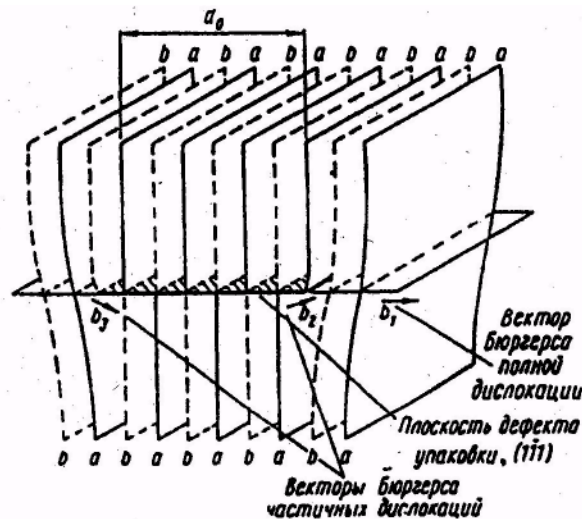


Рис. 15. Образование растепленной дислокации при диссоциации полной краевой дислокации с вектором Бюргера b_1 на две частичные дислокации с векторами b_1 и b_2 разделенных дефектом упаковки

Создать дефект упаковки можно также простым удалением или введением одного плотноупакованного слоя. При этом прилегающие к этому слою плотноупакованные слои смещаются по направлениям $[111]$, сближаясь, если слой удален, или наоборот, уступая место вводимому слою. Если образованный таким образом дефект упаковки ограничен в кристалле, т.е. удалена только часть слоя (111), то дислокация, ограничивающая его, также является частичной. Ее вектор Бюргера нормален к плоскости (111), в которой лежит дефект упаковки, и имеет величину $a/3 [111]$. Эта частичная дислокация получила название "дислокация

Франка". Частичная дислокация франка является краевой, ее вектор Бюргера не лежит в плоскости плотной упаковки и, следовательно, ее скольжение затруднено, хотя она может перемещаться с помощью неконсервативного движения (переползания). Такие дислокации могут возникать в процессе роста или при коагуляции избыточных вакансий или внедренных атомов, образующихся при закалке или при облучении частицами высоких энергий.

7.1.3 Тетраэдр Томпсона.

Расположение в пространстве плоскостей и направлений скольжения, а также векторов Бюргера полных и частичных дислокаций удобно представить с помощью тетраэдра Томпсона (рис. 12, 16). Тетраэдр Томпсона строится для одной восьмой элементарной ячейки ГЦК решетки. Ребра соединяют один вершинный атом D и три атома, центрирующие грани A, B, C (рис. 12). На рис. 16 показана развертка тетраэдра в точке D. Средние точки граней, противолежащие A, B, C, D, обозначены соответственно α , β , γ , δ , а плоскости, противолежащие A, B, C, D, соответственно, a, b, c, d. Плоскости скольжения (111) — грани тетраэдра. Каждая грань содержит три направления скольжения — вектора Бюргера полных дислокаций — ребра тетраэдра, например $D\beta = 1/2 [011]$. (Обозначения вида $[011]$ вместо обычного $[011]$ вводятся, когда хотят показать направление вектора). Всего получается 12 систем скольжения.

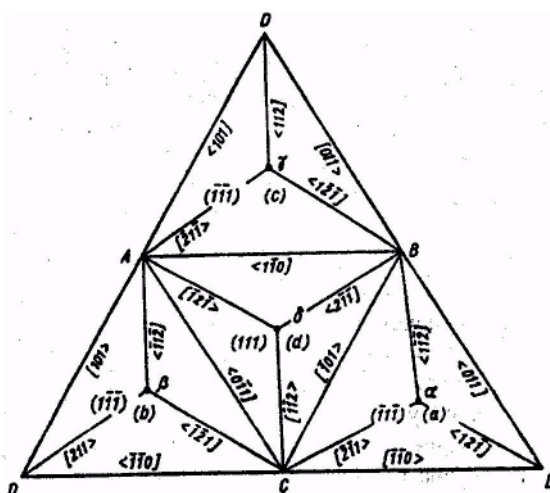


Рис.16. Развернутый в т. D тетраэдр Томпсона. Обозначение $[110]$ вместо обычного обозначения введено, чтобы показать направление вектора.

Частичные дислокации Шокли по направлению совпадают с медианами граней тетраэдра (они же высоты и биссектрисы) и обозначаются латинской или греческой буквами, например $D\beta = a/6 [211]$.

В тетраэдре Томпсона вектор Бюргера дислокации Франка - высота тетраэдра.

7.2 Дислокации в кристаллах со структурой каменной соли

Структурный тип NaCl — трехслойная плотнейшая упаковка из ионов Cl^- , все октаэдрические пустоты заполнены ионами Na^+ . Класс симметрии $m\bar{3}m$. Пространственная группа $Fm\bar{3}m$. Координационное число Na^+ и $\text{Cl}^- = 6$,

координационный полиэдр — правильный октаэдр. Этот структурный тип может быть описан с помощью двух гранцентрированных кубических решеток, сдвинутых одна относительно другой на половину ребра куба (см. модель структуры). Элементарная ячейка содержит 4 формульных единицы, т.е. 4Na^+ и 4Cl^- в частных четырехкратных положениях.

Рассмотрим дислокации, образование которых возможно в этой структуре. В структуре типа NaCl наименьшее расстояние между ионами есть $a/2 [100]$. Но построить краевую дислокацию удалением одной полуплоскости типа $a/2[100]$ (например, полуплоскость В на рис. 17 а) невозможно, т.к. плоскости А и С не сопрягаются трансляцией на $a/2[100]$, в этом случае одноименные ионы плоскостей А и С оказались бы рядом и плоскости будут отталкиваться.

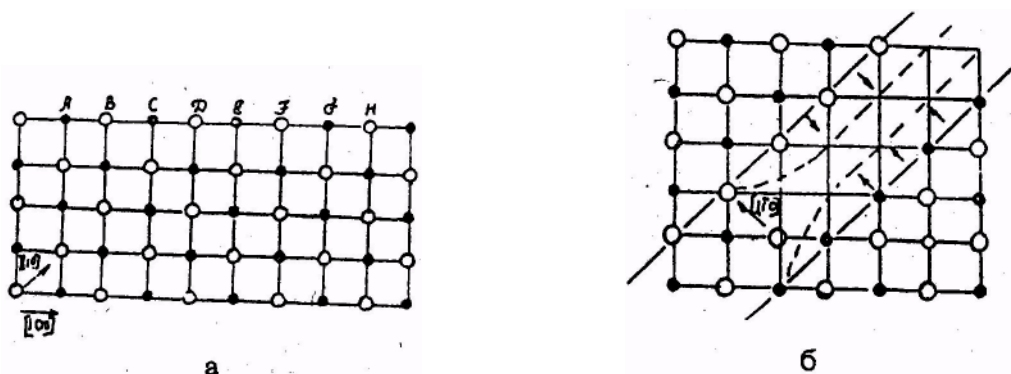


Рис. 17. Образование краевой дислокации с вектором Бюргерса $b = (a/2)[111]$ в структуре NaCl. а — идеальная структура NaCl. Плоскость (100); б — в кристалле удалены две полуплоскости типа (110).

Поэтому для построения краевой дислокации с вектором Бюргерса типа $[100]$ необходимо удалить двойной полуслой BC и сопрягать плоскости А и D трансляцией на величину $b = a[100]$, но этот вектор не является наименьшим в структуре NaCl. Наименьший вектор трансляции, позволяющий построить краевую дислокацию, есть вектор $b = (a/2)[110]$. Удалив парный полуслой типа (110) и транслируя соседние полуплоскости, получим краевую дислокацию с вектором Бюргерса $b = (a/2)[110]$. Образование такой дислокации иллюстрирует рис. 17 б и рис. 18 а, б. Плоскостью скольжения дислокаций является плоскость (110). При высоких температурах наблюдались случаи скольжения и по плоскостям (100). Это связано с тем, что с повышением температуры ослабляется ионная связь и, следовательно, ослабляются ограничения, накладываемые ею на скольжение. Особенностью краевых дислокаций в структуре NaCl является наличие эффективного заряда, связанного с краем полуплоскости дислокации (см. рис. 18 а, б). Эффективный заряд связан также с порогами, которые образуются на линиях дислокации. Края двух лишних полуплоскостей (011) лежат на разной высоте над плоскостью скольжения. Поэтому можно различать ряд «нижних ионов» с зарядом чередующегося знака. Ступенька в такой дислокации соответствует узлам, в ряде атомов. В том случае, когда высота излома равна четному числу межатомных расстояний, чередование знаков заряда вдоль линии дислокации не меняется. Такая ступенька называется нейтральной. Ступенька, высотой, равной четному числу межатомных расстояний, обладает эффективным зарядом и получила название «зарождающейся вакансии» из-за ее способности адсорбировать ион противоположного знака.



Рис. 18. Образование краевой дислокации с вектором Бюргерса $b = (a/2) [110]$ в структуре NaCl. а — процесс смещения; б — вид краевой дислокации в структуре NaCl. Заштрихованная область на рис. 18 а и 18б демонстрирует образование эффективного заряда, связанное с краем полуплоскости дислокации в плоскости (001).

Винтовые дислокации в структуре NaCl также имеют вектор Бюргерса $b = (a/2)[110]$. Образование винтовых дислокаций с вектором Бюргерса $b = (a/2)[100]$ невозможно, т.к. при этом должны сопрягаться ионы противоположных знаков, а появление дислокаций с вектором $b = a[100]$ из-за их большой энергии возможно только при высокой температуре.

Существование в структуре типа NaCl частичных дислокаций невозможно, т.к. неизбежные при этом дефекты упаковки должны приводить к сближению ионов одного знака и, следовательно, энергия таких дефектов слишком велика.

Простейшей дислокационной реакцией является реакция аннигиляции двух дислокаций противоположного знака, движущихся в одной плоскости скольжения, например, $(1/2)a[01\bar{1}] + (1/2)a[011] = 0$.

7.3 Дислокации в структуре алмаза

7.3.1 Структура алмаза

Прежде чем обсуждать дислокации в алмазе, рассмотрим его идеальную структуру. Кристаллы принадлежат к классу $m\bar{3}m$ кубической сингонии. Тип ячейки Браве — гранцентрированная кубическая. Атомы занимают все узлы ГЦК — ячейки, а также центры половины октантов, на которые можно разбить куб (рис. 19 а).

Иначе, структуру алмаза можно представить как совокупность двух ГЦК решеток, смещенных друг относительно друга на $1/4$ телесной диагонали. Структура алмаза является примером структуры с ковалентными связями. Ковалентная связь обусловлена обменом электронов и является насыщенной. Число связей, которые могут образовывать атомы, определяется правилом Юм-Розари $C = 8 - N$, где N - валентность элемента (номер группы периодической системы для данного элемента). При этом число связей будет равно координационному числу K . Связи ориентированы относительно друг- друга под

определенными углами (валентные углы), которые и определяют направленность ковалентной связи. Для алмаза $N = 4$, поэтому число связей и координационное число равно 4, т.е. в этом случае каждый атом образует 4 ковалентные связи. Обращаясь к модели структуры алмаза, видим, что, действительно, каждый атом имеет тетраэдрическую координацию, т.е. окружен 4 атомами, расположенными в вершине тетраэдра (на рис. 19а выделена тетраэдрическая координация для одного из 4 атомов, расположенных внутри элементарной ячейки). Если привлечь атомы из других элементарных ячеек, то такое расположение будет справедливо для любого атома. Направление ковалентной связи совпадает с направлением типа $[111]$, и если пространственную модель структуры изобразить так, что $[111]$ будет вертикально, то она будет иметь вид, представленный на рис. 19 б. Кристаллическая структура получила название тетраэдрической связи. Из рис. 19 отчетливо видно, что плоскость (111) имеет наибольшую ретикулярную плотность, а направления $\langle 110 \rangle$, лежащие в этих слоях, являются наиболее плотноупакованными. Из рисунка видно также, что плоскости (111) как бы состоят из двойных слоев.

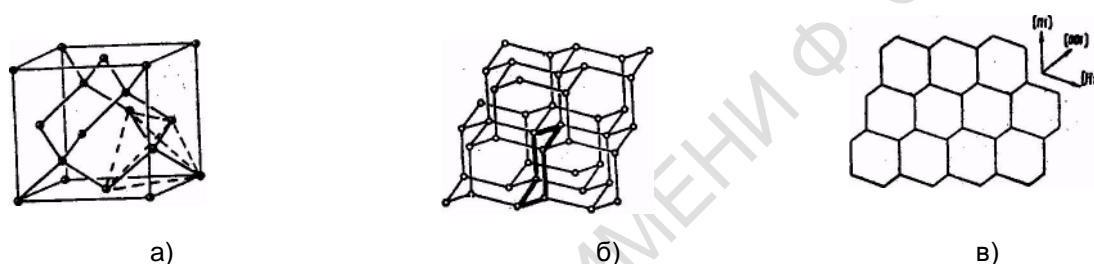


Рис. 19. Структура алмаза: а — элементарная ячейка; б — та же элементарная ячейка с нанесенными атомами, показывающими наличие в решетке зигзагообразных гексагонов; в — та же решетка, но одна из четырех тетраэдрических связей $[111]$ направлена вертикально.

Один из этих слоев состоит из атомов, у которых вертикальные связи $[111]$ направлены вверх, а другой слой — из атомов, у которых связи $[111]$ направлены вниз. Атомы в слоях соединены между собой тремя связями. В структуре имеются шестисторонние каналы, проходящие в направлении типа $[110]$ (рис. 19 в). По этим каналам особенно легко протекает диффузия примесей. На рис. 19б показана конфигурация еще одного элемента структуры алмаза — гексагона. В органической химии эту конфигурацию называют формой «кресла», в отличие от формы «лодки», которая встречается в винтовых дислокациях.

7.3.2 Простые дислокации в структуре алмаза

В структуре алмаза плоскостями скольжения будут плоскости (111) , а направления скольжения типа $[110]$. Вектор Бюргерса — минимальный вектор решетки $b = (a/2)[110]$. Поскольку любой вектор решетки можно представить как сумму отрезков, лежащих в направлении $\langle 110 \rangle$, простыми дислокациями в структуре алмаза будут дислокации, оси которых совпадают с направлениями типа $\langle 110 \rangle$.

Для классификации типов дислокаций в структуре алмаза используем тетраэдр

Томпсона (рис. 16). Выберем направления вектора Бюргерса $b=(a/2) [011]$ вдоль ребра АС. Тогда с направлениями того же типа будут совпадать оси винтовых дислокаций, ребра АД — $[101]$, АВ — $[1\bar{1}0]$, ДС — $[110]$, ВС — $[101]$ - будут представлять оси 60° -дислокаций, а ребро ДВ $[011]$ — ось краевой дислокации для плоскости скольжения (100) . Таким образом, любое ребро тетраэдра Томпсона соответствует осям простых дислокаций.

Простая винтовая дислокация изображена на рис. 20. Вдоль оси дислокации искажена форма характерного для структуры алмаза гексагона, нормальная конфигурация которого в ненарушенной области кристалла отмечена на этом рисунке цифрами 7 - 8 - 9 - 10-11-12-7. Толстыми линиями показан гексагон, искажающийся при образовании дислокации. В ядре дислокации направления связей отличаются от тетраэдрической ориентации, обычной для структуры алмаза.

Шестидесятиградусная дислокация (рис. 21), вектор Бюргерса $b = (a/2) \langle 110 \rangle$ (ребро тетраэдра) образует угол 60° с осью дислокации $\langle 110 \rangle$ (другое ребро Тетраэдра), плоскость скольжения $\{111\}$ — грань тетраэдра. Винтовая компонента равна $b\cos 60^\circ = 0,5b$, краевая — $b\sin 60^\circ = 0,86b$. Жирными линиями показана лишняя двойная полуплоскость. Экстраплоскость завершается атомами, у которых не хватает одного электрона для образования нормальной ковалентной связи. Такие атомы с ненасыщенными связями могут служить акцепторами.

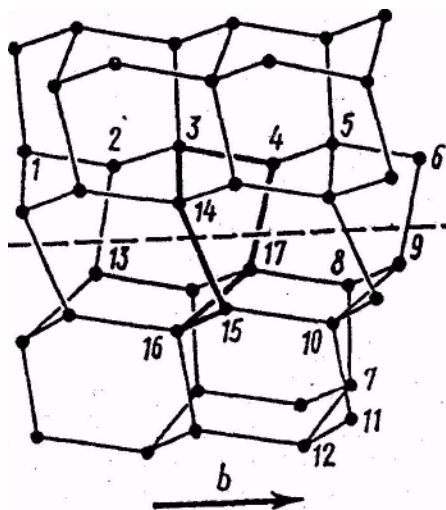


Рис.20. Винтовая дислокация в решетке алмаза

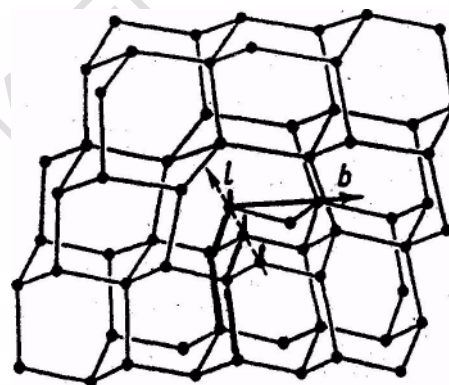


Рис.21. 60° — дислокация в решетке алмаза

Рассмотренные дислокации являются наиболее важными дислокациями, образующимися при пластической деформации. В структуре алмаза возможны еще краевые дислокации с тем же вектором Бюргерса и осью дислокации, но с плоскостью скольжения (001) .

На рис. 22 а и б представлены две формы краевой дислокации с осью $[110]$, вектором Бюргерса $\frac{1}{4}[110]$ и плоскостью скольжения (001) . Возможный выбор двойной экстраплоскости показан на рис. 22а жирными линиями. Две приведенные конфигурации (рис. 22 а, б) не могут быть просто трансформированы друг в друга: конфигурация б получается из конфигурации а путем удаления атомов с двумя свободными связями и соединения образующихся при этом новых

свободных связей между собой. Такая трансформация может происходить только при достаточно высокой температуре в результате диффузии вакансий или междоузельных атомов. В этом случае конфигурация б, не имеющая оборванных связей, будет более устойчивой. Из чертежа видно, что в конфигурации б имеются кольца из пяти и семи атомов вместо обычных шестичленных колец. Тот факт, что в структуре алмаза возможны краевые дислокации, в ядре которых совершенно отсутствуют оборванные связи, имеет очень важное значение.

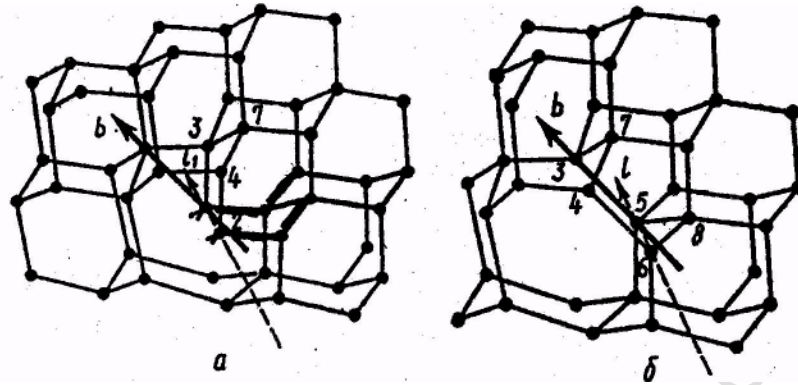


Рис. 22. Простая краевая дислокация в решетке алмаза (а и б — две конфигурации)

Таким образом, характерные особенности дислокаций в структуре алмаза следующие:

- 1) Направления ковалентных связей в ядре дислокации и вблизи от него отличны от их обычной тетраэдрической ориентации. Вдоль оси дислокации искажена форма гексагена.
- 2) Часть атомов вдоль дислокаций, имеющих краевую компоненту вектора Бюргера, имеет ненасыщенные связи. Эти свободные связи могут действовать как акцепторы электронов.

7.3.3 Сложные и частичные дислокации в решетке алмаза

Комбинируя линии, простых дислокаций, можно построить любую сложную дислокацию, направление которой не совпадает с ребром тетраэдра, а вектор Бюргера по-прежнему остается $b = (a/2)[110]$. Примером может служить полная краевая дислокация с осью дислокации $[112]$, плоскость скольжения (111) , которую мы рассматривали в ГЦК—решетке.

Для алмаза такая дислокация также существует, но она является комбинацией двух простых 60° -ных дислокаций, оси которых соответствуют ребрам тетраэдра АД и ДВ. Действительно, реакцию ее образования можно записать: $AD + DV \rightarrow [101] + [011] \rightarrow [112]$.

В структуре алмаза существуют также частичные дислокации, которые возникают в результате расщепления шестидесятиградусной дислокации.

Встречаются также как в ГЦК — решетке частичные дислокации Шокли с вектором типа $b = (a/6)[112]$, и частичные дислокации Франка с векторами типа $b = (a/3)[111]$. Первые соответствуют апофемам, а вторые — высотам в тетраэдре Томпсона. Энергия дефектов упаковки в структуре алмаза довольно низкая, и они часто встречаются в кристаллах, относящихся к структурному типу алмаза.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА «МЕТОД ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ТРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ В КРИСТАЛЛАХ»

Целью работы является исследование дислокаций в кристаллах (определение их плотности, наблюдение движения дислокаций) методом избирательного травления в сочетании с оптической микроскопией.

1 МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ

Существует несколько методов изучения дислокаций. Основные из них: метод избирательного травления, метод декорирования и дифракционные методы — рентгеновский и электронно-микроскопический.

Дифракционные методы основаны на использовании рентгеновских и электронных лучей и имеют общую основу в том, что в области дислокации изменится интенсивность дифракционных лучей. За счет разницы в интенсивности дифракционных лучей в совершенной области кристалла и в несовершенной области вблизи дислокации на рентгеновском или электронно-микроскопическом изображении наблюдаются дислокации (дифракционный контраст). Отличие этих 2-х методов в разрешающей способности, которая определяется, главным образом, шириной изображения дислокации.

В рентгеновских топографических методах эта величина порядка 5 мкм, предельная величина плотности дислокаций, которые можно изучать этим методом, $\sim 10^6 \text{ см}^{-2}$. Метод не позволяет проводить непрерывное наблюдение за дислокациями, невозможно изучение динамических эффектов. Преимуществом метода является возможность исследовать сравнительно толстые образцы без их разрушения.

Электронно-микроскопический метод имеет высокую разрешающую способность, ширина изображения дислокации составляет $\sim 100 \text{ \AA}$, благодаря чему можно изучать кристаллы с высокой плотностью дислокаций (сильно дефектные) до 10^{12} см^{-2} , он позволяет наблюдать динамику дислокационных процессов в кристаллах (скольжение, переползание, размножение и т. д.). Однако изучать в просвечивающей электронной микроскопии можно лишь тонкие фольги или тонкие пленки, прозрачные для электронов, толщина которых не превышает 0,2 мкм.

Метод декорирования основан на взаимодействии примеси с дислокацией и тенденции примеси скапливаться на дислокации (декорировать линии дислокаций), образуя частицы, которые можно наблюдать в оптическом микроскопе. Частицы должны быть достаточно малыми, чтобы можно было разрешить дислокации, и в то же время достаточно большими, чтобы они были видимы в оптическом микроскопе. Частицы можно наблюдать либо в проходящем свете, либо в рассеянном (ультрафиолетовый микроскоп). Метод позволяет выявить дислокации по всей их длине и пригоден для изучения всей геометрии распределения дислокаций в кристалле. Метод декорирования требует подбора примеси и режима температурной обработки. Основные недостатки метода:

- 1) термическая обработка образца может разрушить дислокационную

конфигурацию, так что можно наблюдать структуру отожденного материала;

2) дислокации закрепляются выделениями, и поэтому изучение их движения затруднено. Если в электронном микроскопе наблюдаются, так сказать, "живые" дислокации, то при декорировании мы видим как бы "препарированные" дислокации.

Метод избирательного травления граней кристалла в кристаллографии известен давно, но раньше он применялся как один из способов определения симметрии кристалла. При травлении (растворении) кристалла на его поверхности образуются ямки с теми или иными очертаниями. Их называют фигурами травления. При известных условиях форма отдельных фигур оказывается одинаковой (сходной) и воспроизводимой. Симметрия их определяется элементами симметрии, перпендикулярными данной грани. Следовательно, по форме фигур травления можно судить о порядке осей и об ориентации поверхности. В настоящее время травление применяется почти исключительно с целью выявления дислокаций. Известны и другие способы обнаружения выходов дислокаций: ионная бомбардировка, электротравление и т. д. Но они применяются пока редко.

2 МЕТОД ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ТРАВЛЕНИЯ

Об избирательном травлении говорят, когда ямки травления возникают в точках выхода на поверхность тех или иных дефектов. Это могут быть не только линейные, но и точечные дефекты. Там, где имеется аномальное размещение атомов, их химический потенциал выше, и они более активно вступают в химическое взаимодействие с окружающей средой. Для того, чтобы зародились ямки на атомарно-гладком участке грани, надо вырвать атомы из слоя, а для этого требуется затрата энергии. Все же, если травитель слишком активный, то разница в вероятностях зарождения ямок может стираться.

Известной характеристикой активности взаимодействия кристалла с травителем служит скорость травления. Так, например, из того факта, что в чистом растворителе кристалл растворяется быстрее, чем в слегка недосыщенном его растворе, можно сделать вывод, что с чистым растворителем взаимодействие более сильное. Изменение химического потенциала частицы при растворении в последнем случае больше. Если активность взаимодействия кристалла с травителем существенно превышает разницу в химических потенциалах атомов в дефектном и нормальном участках кристаллов, то эта разница заметной роли играть не будет, избирательность образования ямок отсутствует. Таким образом, чтобы травление было избирательным, надо проводить его при небольшой скорости травления.

Обычно желательно, чтобы выявились не все дефекты, а только дефекты определенного сорта, в нашем случае дислокации. Может понадобиться различить "старые" и "новые" дислокации. Все это вносит дальнейшее усложнение в выбор травителя. Больше того, пригоден не всякий травитель, при воздействии которого ямки начинают образовываться в нужных местах. Травитель должен быть таким, чтобы соотношение между глубиной и шириной ямки находилось в некоторых пределах, иначе ее трудно будет обнаружить. В качестве характеристики процесса травления вводят скорость травления глубины ямки V_1 и скорость ее расширения V_l (рис. 1а). Если травитель таков, что $V_l \gg V_1$, то ямка расплывается и заметна не будет. Травитель приобретает при этом полирующие свойства. Считают, что

достаточно хорошо различимые ямки получаются при $V_n \gg 0,1 V_l$. Существенно также, чтобы ямки были четко огранены.

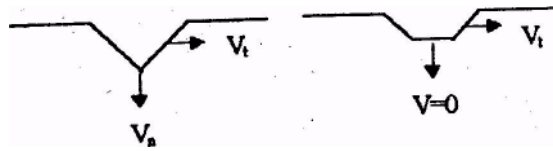


Рис.1. а) б)

Рис. 1 а — дислокационная ямка травления; б — ямка в случае точечного дефекта.

Иметь хороший полирующий состав часто также необходимо для подготовки поверхности к последующему избирательному травлению. Процесс углубления ямки в случае точечного дефекта быстро прекращается, как только дно ее достигает слоя с правильным размещением атомов. Ямка продолжает расширяться, и у нее образуется плоское дно (рис. 1б). Ямка, образующаяся в месте выхода на поверхность дислокации, будет остроконечна, так как линия дислокации не может оборваться внутри кристалла, а является протяженной в его объеме. Величина скорости V_n в случае дислокационной ямки со временем постепенно уменьшается. Причина состоит в затруднении отвода продуктов реакции со дна ямки по мере ее углубления. На глубине ямки и V , будет меньше, чем у поверхности. В итоге ямка становится остроконечной. При длительном травлении, поскольку V_n ближе к поверхности больше, ямка имеет тенденцию расплываться. Оптимальное время травления определяется, с одной стороны, необходимостью получать ямку достаточных для наблюдения размеров, а с другой — требованием четкости ее граней.

Существенное воздействие на процесс травления могут оказывать примеси. В зависимости от концентрации примесей в области дислокации меняется локальный химический потенциал и скорость процесса. При специальном подборе травителя эту зависимость удастся сделать достаточно резкой. Тогда становится возможным различать "старые" и "новые" дислокации. К числу первых относятся дислокации, возникшие в процессе роста или при деформации, но уже давно, так что вдоль них уже успела накопиться примесь. Дислокации, возникшие после пластической деформации, в течение некоторого времени остаются "новыми" в том смысле, что накопление посторонних атомов вдоль них еще незначительно. На формирование ямок большое влияние могут оказывать добавки примесей в травителе. Так известно, примеси способны изменять не только процесс роста, но и растворение кристаллов. Применительно к образованию ямок это воздействие является полезным, если повышается избирательность травления, фигуры травления становятся более четкими, ограненными. Чаще всего проблема заключается в уменьшении тангенциальной скорости V_l .

Для подбора травителя нет однозначных рецептов. Считается, что он должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Основа травителя должна быть слабым растворителем кристалла (растворимость в пределах 0,2 - 0,7 г/л).
2. К основному растворителю целесообразно добавлять хорошо растворимую

примесь, катион которой должен образовывать с веществом кристалла устойчивый комплекс (соль).

3. Радиус катиона примеси должен быть близок к радиусу катиона кристалла.

Эти правила, как показывает практика, не являются универсальными. В частности, на различные грани одного и того же кристалла травитель может действовать по-разному.

Травление краевых и винтовых дислокаций протекает, как правило, с одинаковой скоростью. Краевые дислокации дают более симметричные ямки. Травление выявляет как перпендикулярные поверхности, так и наклонные дислокации. Обычно при наклонном выходе дислокаций на поверхность, подвергающуюся травлению, получаются асимметричные ямки травления (рис.2). Имеются следующие критерии того, что ямки действительно отвечают выходам дислокаций на поверхность.

1. Ямки получаются остроконечными.
2. Повторное травление не приводит практически к увеличению ямок, общая картина сохраняется.

На двух поверхностях одного скола получаются зеркально симметричные картины распределения ямок травления (рис. 3).

Наиболее надежным является последний признак. Но его удастся использовать только для плоскостей спайности, которые имеются далеко не у всех кристаллов.



Рис. 2. а - симметричные ямки травления
б - асимметричные ямки травления.

3 ТРАВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Кристаллы NaCl образуются в растворе в виде кубов. Для сравнения используют обычно сколы, образующиеся благодаря хорошей спайности кристаллов по плоскости куба. В предварительной полировке свежесколотой поверхности нет необходимости. В природных кристаллах каменной соли плотность дислокаций обычно высокая — до 10^9 см^{-2} . Это затрудняет наблюдение ввиду перекрытия ямок. Более пригодны для исследования синтетические кристаллы. Средняя плотность дислокаций в них значительно меньше, хотя встречаются, отдельные области с очень высокой плотностью. Крупные синтетические кристаллы NaCl получают из расплава.

Ямки травления распределяются по полю зрения обычно неравномерно. Можно видеть отдельные ямки, небольшие их группы, цепочки ямок. Линиям с частым, практически сплошным размещением ямок отвечают границы между блоками. На кристаллах NaCl они постоянно выявляются, но при высокой плотности дислокаций, когда ямки заполняют поле зрения сплошь, могут и теряться. При

выявлении межблочных границ, оценив линейную плотность дислокаций на такой границе, можно определить угол разориентации блоков. На рис. 4 представлена модель межблочной дислокационной границы наклона (модель Бюргерса). Блоки мозаики разориентированы на угол Θ , плоскость границы перпендикулярна плоскости чертежа и вектору Бюргерса b , ось поворота лежит в плоскости границы, которая состоит из параллельных краевых дислокаций, расстояние между дислокациями D , т. е. линейная плотность дислокаций - $1/D \text{ см}^{-1}$, тогда $\text{tg } \Theta = b/D$

Если осуществить местную деформацию, например, нажатием иглой (индентором), то ямки травления концентрируются вдоль нескольких лучей, которые являются направлениями скольжения в данном кристалле.

Наиболее часто применяемым травителем для NaCl служит ледяная уксусная кислота (уксусную кислоту приходится вымораживать, так как даже малое содержание воды в ней приводит в размытию ямок). Растворимость хлористого натрия в уксусной кислоте небольшая, и травление протекает небыстро. Время травления 30 сек. При введении ионов кадмия скорость травления становится еще меньше, а в присутствии ионов ртути увеличивается. Фигуры травления для всех этих травителей получаются достаточно четкими.

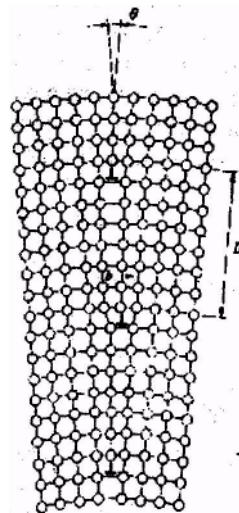


Рис. 4. Межблочная дислокационная граница.

В литературе рекомендуются, и другие составы травителей. (модель Бюргерса).

4 ТРАВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ ГЕРМАНИЯ, КРЕМНИЯ

Для травления служат пластины с достаточно хорошо подготовленной поверхностью. После механической обработки ее подвергают химической полировке. В приборах наиболее часто применяют пластины, параллельные плоскости (111). Поэтому больше всего данных имеется относительно этой плоскости. Форма ямок на ней обычно треугольная, но бывает и более сложной.

В литературе рекомендуются ряд составов травителей. Каждый из них включает, как правило, несколько веществ: кислоты (щелочи), воду, соли. Применяемые у нас травители:

а) Для Ge: 1,2 г КОН: 1,8 г красной кровяной соли: 10 г H_2O Этот раствор довести до кипения и травить образцы 5-6 мин., затем промыть образцы в кипящей

дистиллированной воде.

б) Для Si (травитель Сиртла):

1 ч. HF: 1 ч. CrO₃ (50 %): H₂O

Время травления 3-10 мин.

В связи с тем, что дислокации существенно ухудшают электрические свойства полупроводников, была проведена большая работа по снижению плотности ротовых дислокаций в них. Удалось получить так называемые бездислокационные кристаллы. Точнее, следовало бы говорить о получении бездислокационных областей. Идея выращивания (из расплава) бездислокационных кристаллов германия и кремния состоит в том, чтобы новые дислокации не появлялись, а старые, идущие от затравки, выходили на боковую поверхность. В соответствии с возможными направлениями дислокаций в кристаллах со структурой алмаза затравку надо брать в виде пластины, параллельной (111).

Ямки травления наблюдают под микроскопом в отраженном свете. Обычно используют металломикроскопы.

С устройством микроскопа МИМ - 8 необходимо ознакомиться по инструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Халл Д. Введение в дислокации. М.: Атомиздат. 1968. С. 93- 103,128-131.
2. Шаскольская М.П. Кристаллография. М., 1976. С. 327 - 343.
3. Дефекты в кристаллах полупроводников / Сб. статей. М.: Мир. 1969. С. 15 -21.
4. Дислокации и механические свойства кристаллов / Сб. статей. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. С, 179-198.
5. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 1993
6. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высшая школа, 2000.
7. Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф., Фаддеев М.А. Кристаллография. М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 2000.
8. Амслинкс С. Методы прямою наблюдения дислокаций М.: Мир, 1966.
9. Реггель В. Р. и др. Выявление выходов дислокаций методом травления (обзор) // Кристаллография. 1959. Т. 4, Вып. 6. С. 937.
10. Чупрунов Е.В., Хохлов А.Ф., Фаддеев МЛ. Кристаллография. М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 2000.