

несколько выше и принимается равным 93 эрг/г. Это настолько близко к 100 эрг, что в практических дозиметрических расчетах величины 1 фэр и 1 рад обычно можно считать равными друг другу.

Более сложен вопрос о связи единиц поглощенной дозы и интегрального потока. Эта связь зависит как от вида излучения, так и от его энергии. Для рентгеновских и γ -лучей с энергиями от 70 кэВ до 2 МэВ с точностью до 15% выполняется простое соотношение:

$$1 \text{ P} = \frac{2 \cdot 10^9}{E \text{ МэВ}} \text{ фотон/см}^2.$$

5. Как мы увидим ниже в § 4, биологическое действие ядерных излучений зависит не только от дозы облучения, но и от их вида. Поэтому для дозы облучения живых организмов используется новая единица бэр (биологический эквивалент рентгена). Величина дозы D_6 в бэр связана с величиной той же дозы в фэр D_ϕ соотношением

$$D_6 = D_\phi \times \text{ОБЭ}, \quad (13.1)$$

где через ОБЭ обозначен эмпирический коэффициент, называемый *относительной биологической эффективностью*. Значения ОБЭ для разных видов излучений приведены в табл. 13.1. Следует подчеркнуть, что определение величины ОБЭ, а тем самым и единицы фэр не обладает принятой в физике точностью. Кроме того, даже в рамках принятой точности до одного знака значения ОБЭ для одного и того же вида излучения различны для разных биологических объектов.

Таблица 13.1. Коэффициенты ОБЭ для разных типов излучений

Тип излучения	ОБЭ
γ -излучение	1
β -частицы	1
Тепловые нейтроны	5
Быстрые нейтроны	10
Протоны	10
α -частицы	10

§ 2. Действие ядерных излучений на структуру вещества

1. Энергия попадающих в вещество заряженных частиц и γ -квантов в основном тратится на ионизацию и возбуждение атомов (см. гл. VIII). Ионизация в конечном итоге ведет к нагреванию вещества и обычно не вызывает в нем необратимых изменений. Однако некоторая, вполне заметная доля общей энергии потока заряженных частиц или γ -квантов, равно как и значительная доля энергии потока нейтронов, затрачивается на необратимое изменение структуры

вещества. Совокупность этих изменений называется *радиационным повреждением*. Термином «повреждение» подчеркивается, что под влиянием излучений свойства вещества в большинстве случаев (хотя и не всегда) изменяются в худшую сторону.

Изменение структуры твердого тела под действием ядерного излучения обуславливается следующими механизмами:

а) Главным механизмом является ударное выбивание атомов из кристаллической решетки. Заряженные частицы и нейтроны выбивают атомы непосредственно, а γ -кванты — через промежуточные фотоэлектроны или комптоновские электроны. Это выбивание обычно сопровождается разнообразными и многоступенчатыми вторичными процессами.

б) Часто бывает существенным появление в решетке новых атомов за счет внедрения падающих тяжелых частиц, а также за счет ядерных реакций с возможными последующими распадами продуктов реакций. Такого рода явления, как правило, существенны только при облучении нейтронами и практически отсутствуют при облучении электронами и γ -квантами с энергиями до 10—15 МэВ. Нейтроны любых энергий легко захватываются ядрами, причем получающиеся новые изотопы часто оказываются β -активными. В результате распада этих изотопов в кристалле образуются примесные атомы. В делирующихся материалах разнообразные примесные атомы возникают также в результате каскадного β -распада осколков деления. В частности, среди продуктов деления заметную долю составляют инертные газы криптон и ксенон. При интенсивном облучении в реакторе эти газы выделяются в столь заметных количествах, что приводят к пористости и разбуханию материала.

в) Существенным бывает и воздействие на решетку через ионизацию. Так, отрицательный ион в ионном кристалле (например, ион хлора в кристалле поваренной соли) при выбивании из него двух электронов станет положительным и сам «выскочит» из своего места в решетке. Конечный результат такого ступенчатого воздействия — тот же, что и при прямом выбивании атома.

Все эти процессы приводят к созданию дефектов решетки, т. е. к изменению микроструктуры кристалла. При достаточно мощном облучении за счет этих дефектов заметно изменяются и различные макроскопические свойства тела — механические и тепловые. Изменение решетки влияет и на структуру электронных энергетических зон, т. е. на электрические и оптические свойства.

2. Рассмотрим подробнее механизм упругого выбивания. Для того чтобы выбить атом из его положения в кристаллической решетке, ему надо передать энергию выше некоторой пороговой E_d , представляющей собой разность энергий связи в нормальном положении и в междоузлии. Экспериментально энергия E_d определяется по минимальной энергии электронного пучка, необходимой для создания точечных дефектов кристаллической решетки. Величина E_d

имеет порядок десятков эВ (для Cu $E_d = 22$ эВ, для Fe $E_d = 24$ эВ, для алмаза $E_d = 80$ эВ). При упругом столкновении налетающая частица не может передать атому всю свою энергию из-за эффекта отдачи. Из законов сохранения энергии и импульса (4.6), (4.7) в применении к упругому удару следует, что максимальная энергия E_m , которую налетающая частица энергии E и массы M_1 может передать атому массы M_2 , для нерелятивистских налетающих частиц определяется по формуле

$$E_m = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} E, \quad (13.2)$$

а для релятивистских — по формуле

$$E_m = 2EM_2 \cdot \frac{2M_1c^2 + E}{(M_1 + M_2)^2 c^2 + 2M_2E}. \quad (13.3)$$

При $M_1 = 0$ формула (13.3) применима для рассмотрения столкновения γ -кванта с атомом. Под E_m , E в формуле (13.3) понимаются релятивистские кинетические (не полные) энергии (4.8) соответствующих частиц. При столкновениях частиц ядерных излучений с атомами практически всегда $M_2 \gg M_1$. Поэтому из (13.2), (13.3) следует, что для выбивания атомов энергия налетающих частиц должна намного превышать E_d , особенно если эти частицы легкие. Например, даже такая сравнительно тяжелая частица, как нейтрон, имеющий энергию 2 МэВ, может передать при упругом столкновении атому углерода не более 0,5 МэВ, а атому урана — не более 0,033 МэВ. Электрон той же энергии может передать углероду не более 1 кэВ, а урану — не более 0,05 кэВ. Для γ -кванта той же энергии соответствующие цифры в три раза меньше, чем для электрона.

Для того чтобы выбивание атомов шло с заметной интенсивностью, необходимо, чтобы эффективное сечение выбивания было не очень мало по сравнению с сечениями других конкурирующих процессов. Для нейтронов это сечение имеет порядок нескольких барн (в области энергий, достаточных для выбивания) и вполне сравнимо с сечениями конкурирующих неупругих процессов. Для электронов сечение выбивания имеет порядок десятков барн, но сечения возбуждения и ионизации электронов (в пересчете на один атом) имеют значительно большую величину. Для γ -квантов в наиболее интересной для практики области энергий в несколько МэВ наибольшее сечение имеет процесс образования комптоновских электронов (см. гл. VIII, § 4). Поэтому при γ -облучении атомы выбиваются из решетки в основном комптон-электронами. Но если электронный пучок создает выбитые атомы только в поверхностном слое, то γ -излучение выбивает атомы во всем объеме вещества.

Если энергия выбитого атома заметно превосходит E_d , то он способен выбить из решетки другой атом. Таким образом, в результате одного первичного столкновения в кристалле могут возникнуть

несколько выбитых из решетки атомов (рис. 13.1). Для ориентировки укажем следующие теоретические оценки для меди. При столкновении нейтрона энергии 0,42 МэВ с атомами в результате вторичных столкновений в среднем возникает 328 смещенных атомов. Заряженная частица — дейтрон — с энергией 9 МэВ за одно столкновение создает в среднем 6,2 смещенных атома.

Смещенные атомы ионизированы. Поэтому они быстро тормозятся в веществе и останавливаются в междоузлиях. В результате

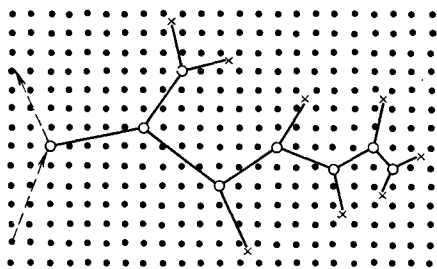


Рис. 13.1. Схема образования смещенных атомов под действием облучения.

Пунктирная линия со стрелкой — траектория движения быстрой частицы, сплошные линии — траектории смещенных атомов; кружочками и крестиками отмечены вакансии и внедренные в междоузлия атомы.

в кристалле образуются два вида точечных дефектов решетки — вакантные узлы и атомы в междоузлиях. В ряде кристаллов смещенный атом может остановиться в «чужом» узле, выбив оттуда своего предшественника. Такие замещающие столкновения также меняют свойства многоатомных кристаллов. При достаточно мощном и продолжительном облучении плотность дефектов может возрасти до такой степени, что наступит полное разрушение кристаллической структуры. Такое явление наблюдается в некоторых урановых и ториевых рудах: вылетающие из урана или тория α -частицы постепенно разрушают решетку и в конце концов переводят ее в коллоидоподобное, так называемое метамиктное состояние. Метамиктные минералы внешне сохраняют кристаллический облик, но по своим свойствам являются аморфными веществами. Они изотропны по оптическим, механическим и другим свойствам, дают раковистый излом. Устойчивость решетки относительно действия облучения сильно зависит от ее прочности. Так, при облучении дозой 10^{21} быстрых нейтронов на 1 см^2 решетка кварца в значительной мере разрушается, а решетка алмаза почти не меняется. Некоторые кристаллы под действием облучения изменяют тип решетки. Например, моноклинная двуокись циркония ZrO_2 под действием нейтронного излучения переходит в кубическую модификацию.

В процессе каскадного упругого выбивания вылетающие атомы претерпевают большое количество столкновений, недостаточных для выбивания, но приводящих к возбуждению колебаний многих атомов. Это приводит к кратковременному локальному перегреву, называемому *тепловым пиком*. Размер и время жизни тепловых пиков очень малы (соответственно десятки ангстрем и десятые доли

В процессе каскадного упругого выбивания вылетающие атомы претерпевают большое количество столкновений, недостаточных для выбивания, но приводящих к возбуждению колебаний многих атомов. Это приводит к кратковременному локальному перегреву, называемому *тепловым пиком*. Размер и время жизни тепловых пиков очень малы (соответственно десятки ангстрем и десятые доли

наносекунды), но температура обычно превышает температуру плавления. Поэтому в области теплового пика происходит частичный отжиг (рекомбинация) точечных дефектов, а также ускоряются процессы диффузии. Особенно велики тепловые пики, вызываемые осколками деления в делящихся материалах.

Другой сопровождающий выбивание эффект состоит в том, что смещающийся атом перед остановкой (когда сечение взаимодействия с другими атомами резко возрастает) может передать свою энергию сразу большому числу атомов. В результате большое количество атомов покидает свои места в решетке. Это явление называется *пиком смещения*. Возникновение пика смещения с последующей его релаксацией приводит к сильному перемешиванию атомов. В результате уничтожаются многие точечные дефекты, но возникают более сложные дефекты, например, дислокационные петли.

3. Посмотрим теперь, как влияют изменения решетки под действием облучений на макроскопические, механические и тепловые свойства твердого тела.

Под действием больших доз облучения изменяется плотность кристалла, а при низкой симметрии — решетка и геометрическая форма. Чтобы дать понятие о порядках величин, укажем, что под действием интегрального по времени потока 10^{20} реакторных нейтронов на 1 см^2 плотность кварца снижается на 15%. В качестве примера сильно и резко анизотропно меняющегося материала можно привести альфа-модификацию урана, имеющую довольно низкую ромбическую симметрию. Монокристалл такого урана под действием облучения в реакторе сжимается в одних направлениях и расширяется в других, причем размеры могут изменяться больше чем вдвое (рис. 13.2).

Облучение сильно влияет на механические свойства. Обычно материал упрочняется из-за того, что возникшие под влиянием облучения дефекты тормозят движение дислокаций. Модуль упругости растет, разрушение вместо пластического становится хрупким*). Эти изменения иллюстрируются на рис. 13.3 графиками деформация — напряжение для малоуглеродистой стали при облучении ее различными потоками нейтронов.

Радиационные изменения механических свойств довольно устойчивы. Их можно уничтожить только отжигом при температуре порядка температуры рекристаллизации.

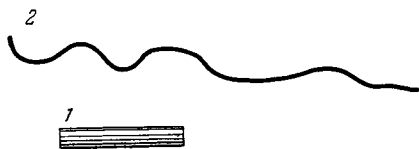


Рис. 13.2. Изменение монокристалла урана под действием облучения.

1 — монокристалл перед облучением,
2 — после облучения.

*) Для последнего из отмеченных изменений в литературе иногда используется режущий ухо термин «охрупчивание».

На создание вакансий и атомов в междоузлиях тратится довольно значительная энергия. При больших дозах облучения эта так называемая скрытая энергия становится большой уже в макроскопическом масштабе. Например, в графите после облучения дозой $3 \cdot 10^{21}$ нейтрон/см² создается скрытая энергия 620 кал/моль. Эта энергия выделяется при отжиге. В некоторых случаях наблюдается самопроизвольное выделение скрытой энергии, приводящее к саморазогреву материала.

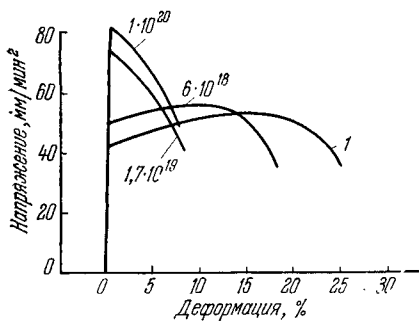


Рис. 13.3. Изменение кривой растяжения малоуглеродистой стали после облучения нейтронами.

Цифры над кривыми — интегральный поток нейтронов, 1 — необлученный образец.

В металлах при облучении возрастает остаточное (т. е. не зависящее от температуры) электрическое сопротивление. Электропроводность диэлектриков после облучения в одних случаях возрастает, в других — падает. Увеличению электропроводности способствует возрастание числа ионных носителей тока. Но если после облучения появляются сложные комплексы (грозди) дефектов, то носители начинают застревать в этих комплексах, что снижает электро-

проводность. Косвенным подтверждением правильности этих механизмов являются два графика (рис. 13.4), на которых приведены температурные зависимости относительного удельного сопротивле-

ния числа ионных носителей тока. Но если после облучения появляются сложные комплексы (грозди) дефектов, то носители начинают застревать в этих комплексах, что снижает электро-

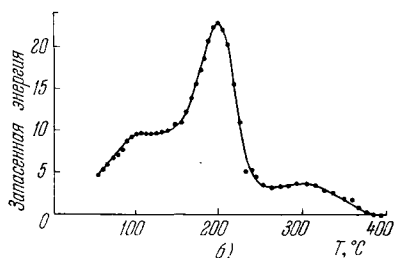
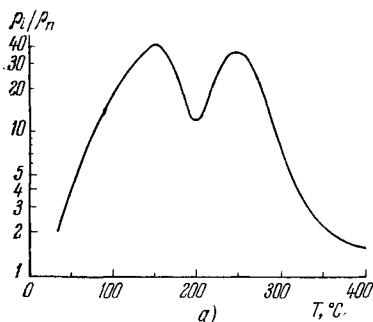


Рис. 13.4. Зависимости от температуры:

а) отношения ρ_1/ρ_0 удельных сопротивлений облученного и необлученного кристалла NaCl;

б) запасенной энергии (в относительных единицах) этого же кристалла. Доза облучения = $8,9 \cdot 10^{16}$ протон/см² с энергией 350 МэВ.

проводность. Косвенным подтверждением правильности этих механизмов являются два графика (рис. 13.4), на которых приведены температурные зависимости относительного удельного сопротивле-

ния и запасенной скрытой энергии для поваренной соли, облученной дозой $8,9 \cdot 10^{15}$ протонов на 1 см^2 с довольно высокой энергией 350 МэВ. Увеличение сопротивления при подходе к первому максимуму соответствует образованию гроздей дефектов. Падение сопротивления после первого максимума соответствует распаду гроздей. Возникшие в результате распада дефекты (в частности, вакансии, см. любую книгу по физике твердого тела) активно участвуют в электропроводности. Сопротивление падает. В минимуме сопротивления скрытая энергия достигает резкого максимума — в отдельных дефектах энергии больше, чем в грозди. Далее начинается отжиг дефектов. Число носителей падает. Сопротивление растет. Наконец, после прохождения второго максимума начинает падать роль дефектов в общем балансе механизма электропроводности. В результате относительное (не абсолютное) сопротивление начинает приближаться к единице, т. е. спадать. Более сложно разобраться в действии на электропроводность нейтронного облучения. Нейтроны, поглощаясь посредством радиационного захвата (n , γ), создают β - и γ -активные ядра. Радиоактивные ядра, находящиеся на поверхности, ионизируют окружающий воздух, делая его проводником. Возникающая поверхностная проводимость сильно искажает общую картину электропроводности.

В неметаллах после облучения падает теплопроводность за счет рассеяния фононов на дефектах.

4. Появление дефектов в кристаллической решетке неизбежно искажает структуру электронных уровней, что приводит к изменению оптических и электрических свойств кристалла. Эти изменения существенны для диэлектриков и полупроводников, но не для металлов, внутри которых имеется большое число свободных электронов, которые, с одной стороны, практически не подвержены действию точечных дефектов решетки, а, с другой стороны, определяют электрические и оптические свойства кристалла.

Мы уже рассмотрели зависящую непосредственно от решетки электропроводность диэлектриков после облучения. Для работы изоляторов в условиях облучений и для ряда других вопросов важно знать электропроводность диэлектрика во время облучения. Эта радиационная электропроводность детально изучена для действия γ -излучения из радиоактивных источников и реакторов. Оказалось, что при напряжениях, достаточно далеких от пробоя, радиационная электропроводность линейно растет с интенсивностью облучения. Этот результат естествен. Облучение непрерывно создает свободные электроны посредством фотоэффекта и комптон-эффекта, причем число электронов, создаваемых в единицу времени, пропорционально интенсивности облучения.

Особенно сильно влияет облучение на электрические свойства полупроводниковых материалов. Это и понятно, так как действие вакансий и атомов в междоузлиях во многом сходно с действием

примесных атомов, а электропроводность полупроводников, как известно, крайне чувствительна даже к очень малым (сотые доли процента и даже меньше) примесям. Главное и очень вредное для технических приложений действие облучения на полупроводники состоит в том, что появляющиеся под влиянием облучения дефекты создают новые электронные энергетические уровни в запрещенной зоне. Эти уровни являются ловушками для носителей зарядов. Дефекты-ловушки сильно снижают времена жизни носителей, что приводит к уменьшению электропроводности. Кроме того, в ловушках накапливается пространственный заряд, искажающий электрические характеристики. Большинство дефектов, созданных электронным или γ -облучением, при отжиге рекомбинирует, после чего полупроводник почти восстанавливает свои первоначальные свойства. Нейтронное облучение создает значительно большее количество дефектов, часть которых необратима. К последним, в частности, относятся примесные атомы, возникающие посредством радиационного захвата нейтронов атомами полупроводника. Этот захват обычно приводит к возникновению в полупроводнике акцепторных или донорных примесей. Механизм возникновения этих примесей можно проследить на примере германия. Германий четырехвалентен. Его кристалл имеет структуру алмаза (каждый атом находится в центре тетраэдра, образованного четырьмя ближайшими соседями). Германий имеет пять стабильных изотопов ${}_{32}\text{Ge}^{70}$, ${}_{32}\text{Ge}^{72}$, ${}_{32}\text{Ge}^{73}$, ${}_{32}\text{Ge}^{74}$, ${}_{32}\text{Ge}^{76}$, содержание которых в естественной смеси составляет соответственно 21, 29, 8, 36 и 8%. Основной изотоп ${}_{32}\text{Ge}^{74}$ при захвате нейтрона переходит путем электронного распада в изотоп ${}_{33}\text{As}^{75}$ пятивалентного мышьяка, являющегося, очевидно, донором, так как на его внешней оболочке имеется лишний для германиевой решетки пятый электрон. С другой стороны, изотоп ${}_{32}\text{Ge}^{70}$, поглотив нейтрон, претерпевает позитронный распад, превращаясь в изотоп ${}_{31}\text{Ga}^{70}$ трехвалентного галлия, являющегося типичным акцептором. Акцепторные уровни на радиационных дефектах появляются и при облучении другими частицами, например дейтронами. Это демонстрируется приведенными на рис. 13.5 зависимостями удельной проводимости акцепторного и донорного германия от дозы облучения дейтронами. Проводимость акцепторного образца при облучении слегка падает из-за образования дефектов, тормозящих носители тока. Проводимость донорного образца сначала падает на несколько порядков из-за компенсации донорных и акцепторных носителей. При более сильном облучении проводимость резко растет, но уже является не донорной, а акцепторной. Этот эффект может быть использован как один из методов создания p - n -переходов, необходимых для использования любого полупроводникового устройства.

Оптические проявления влияния излучений разнообразны и иногда возникают при довольно слабом облучении. Из всех этих

проявлений мы ограничимся примером появления так называемых центров окраски (*F*-центры) в кристаллах поваренной соли. Эти кристаллы при облучении окрашиваются в желтый цвет (длина волны спектральной линии 465 нм). Происхождение этого окрашивания объясняется следующим образом. Вакансия на месте выбитого отрицательного иона хлора замещается электроном. На этот электрон действуют примерно те же силы, что и на ион хлора. Но при одинаковых силах квадраты частот колебаний обратно пропорциональны массам. Электрон в десятки тысяч раз легче атома хлора.

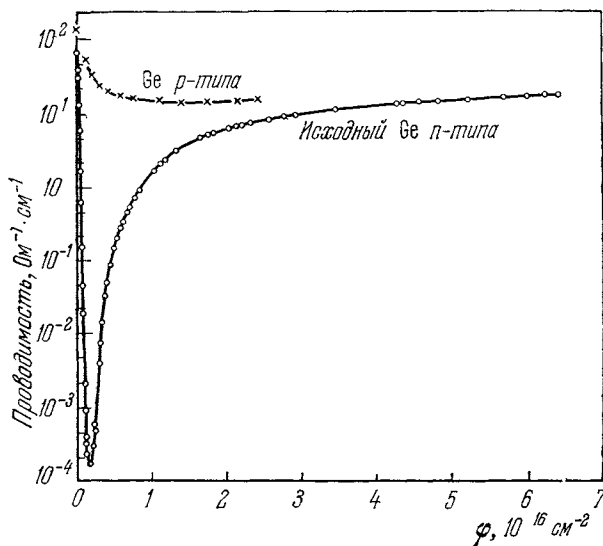


Рис. 13.5. Зависимость удельной проводимости германия от дозы φ облучения дейтронами.

Поэтому частота колебаний электрона, занявшего вакансию, будет в сотни раз больше частоты колебаний атома. А этого как раз достаточно, чтобы «довести» частоту колебаний электрона до оптической области. Правильность такого объяснения радиационного окрашивания подтверждается известным еще сто лет назад эффектом точно такого же окрашивания поваренной соли при нагреве ее в парах натрия с последующим быстрым охлаждением. Этот процесс приводит к избытку натрия, т. е. к хлорным вакансиям, и следовательно, к появлению центров окраски.

5. Изучение различных радиационных повреждений и их зависимостей от вида облучения, температуры и т. д. важно как для практических задач, связанных с работой различных приборов и других устройств в условиях облучения, так и для изучения многих вопросов физики твердого тела.

Для направленного искусственного изменения свойств материалов применяется имплантация (т. е. внедрение) в них тяжелых ионов.

Имплантация ионов оказывается чрезвычайно полезной во многих ситуациях. Например, имплантация ионов бора, фосфора и тантала значительно улучшает свойства кремниевых и германиевых детекторов (см. гл. IX, § 4). Имплантация тяжелых ионов открывает широкие возможности для изготовления и изучения свойств новых сплавов, которые из-за химической несовместимости компонентов невозможно получить другими способами, и т. д.

В некоторых случаях и радиационным повреждением, наносимым веществу тяжелыми ионами, удается найти полезное практическое применение. Примерами могут служить изготовление *ядерных фильтров* и датировка событий по трекам продуктов деления урана. При прохождении тяжелых ионов через непроводящие кристаллы и аморфные тела вдоль трека иона из-за большой плотности ионизации (плотность ионизации пропорциональна z^2 , где z — заряд иона, см. (8.24)) образуется канал сильного радиационного повреждения. Вещество в пределах канала более чувствительно к химическому воздействию и может быть удалено, например, посредством окисления и последующего травления и промывания. В результате на месте канала получаются пустоты.

Поэтому, если облучить полимерную пленку толщиной в несколько микрон тяжелыми ионами и подвергнуть ее указанной выше химической обработке, то в местах прохождения ионов в пленке образуются сквозные отверстия, так что пленка в целом может служить великолепным фильтром. При этом диаметр отверстий фильтра характеризуется небольшим разбросом и может быть заранее задан посредством соответствующего подбора условий травления (временем, температурой и т. д.).

Для примера на рис. 13.6 показаны фотографии (полученные с помощью электронного микроскопа) обычного химического фильтра со средним размером пор 0,45 мкм (рис. 13.6, а) и ядерного фильтра с размером пор 0,4 мкм (рис. 13.6, б). Как видно из рисунка, качество ядерного фильтра намного выше химического. Применение ядерных фильтров исключительно многообразно. Очистка газов, воды, сортировка микропримесей по размерам, изучение размеров и формы типов клеток крови, стерилизация биологических сред, фильтрация и разделение различных типов вирусов и молекул, очистка пива и вина — вот далеко не полный перечень.

Датировка событий по трекам продуктов деления ядра изотопа урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ основывается на том, что треки тяжелых ионов, возникающих при делении ядра, становятся видимыми (естественно, при сильном увеличении) при окислении и травлении.

По числу треков, приходящихся на единицу поверхности, и содержанию урана можно определить время существования образца.

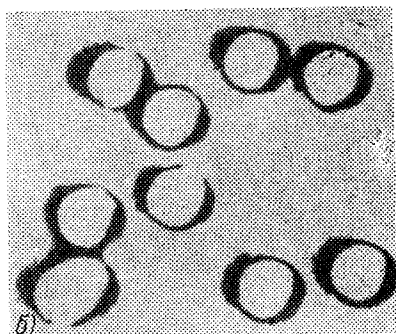
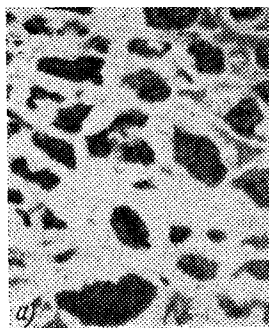


Рис. 13.6. Фотографии химического (а) и ядерного (б) фильтров.

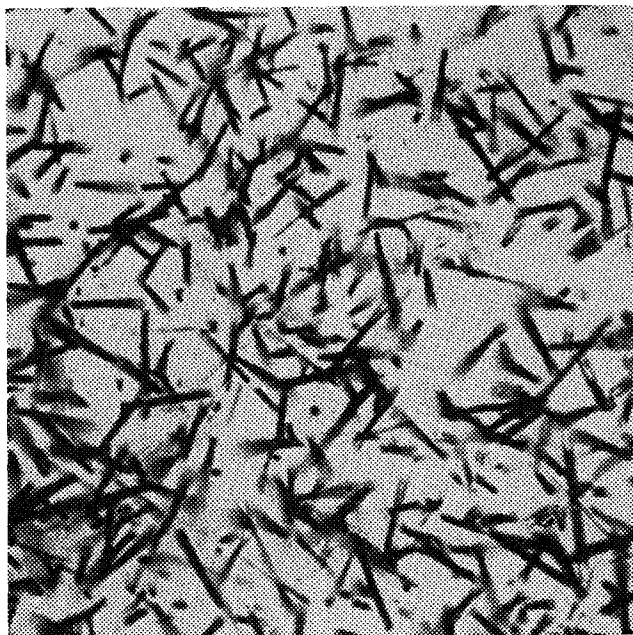


Рис. 13.7. Фотография поверхности облученного кристалла циркония; поверхность была подвергнута специальной химической обработке.

На рис. 13.7 приведена фотография поверхности кристалла циркония, испещренной треками тяжелых ионов, возникающих при спонтанном делении ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$.

Трековый метод датировки событий позволяет в принципе определять как короткие, так и длительные периоды времени и в этом смысле уникален (другой метод датировки исторических событий мы рассмотрим в § 6, п. 5).

Например, этим методом был подтвержден возраст ($\sim 2 \cdot 10^6$ лет) остатков ископаемого зинджантропа, обнаруженного в Танзании в 1959 г. Л. С. Лики, и определен возраст одного из типов цветных стекол в Китае, оказавшийся равным всего лишь 70 годам.

§ 3. Химическое действие ядерных излучений

1. Ядерные излучения могут вызывать в веществах различные химические реакции. Само открытие радиоактивности А. Беккерелем, положившее начало всей ядерной физике, было совершено при наблюдении восстановления бромистого серебра под действием α -излучения природного урана. Изучение и использование этих реакций выделилось в специальный раздел науки — радиационную химию *).

Механизм радиационно-химических реакций таков. Поток ядерных частиц вызывает в среде возбуждение, ионизацию, диссоциацию и диссоциативную ионизацию молекул. Возникшие при этом возбужденные молекулы и ионы вступают в химические реакции либо непосредственно, либо через промежуточное образование химически высокоактивных свободных радикалов. В последнем случае в реакции могут вовлекаться молекулы, не подвергавшиеся непосредственному облучению. Так как энергия ядерных излучений значительно превышает энергию любых химических связей, то облучение может разрывать и очень прочные связи. Это ведет к образованию таких химически высокоактивных ионов и радикалов, которые не удастся получить традиционными химическими методами. Тем самым открываются возможности осуществления сильно эндотермических реакций и реакций, запрещенных высоким активационным барьером.

Интенсивность радиационно-химической реакции характеризуется ее выходом G , равным числу прореагировавших молекул на 100 эВ поглощенной энергии. Для большинства реакций характерны выходы $G = 4 - 10$. Для наиболее устойчивых к радиации молекул (о причинах устойчивости см. ниже в п. 3) радиационный выход снижается до 0,1. В цепных радиационно-химических процессах выход может достигать значений $10^5 - 10^6$.

*) Радиационную химию не следует путать с радиохимией, предметом которой является изучение химических свойств радиоактивных элементов.