

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.198.06(023)

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**Г. Н. Флеров, В. С. Барашенков****ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФИЗИКИ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Физика тяжелых ионов, занимающаяся исследованием различных процессов, происходящих при столкновениях ускоренных ионов с атомами мишени, и изучением свойств новых ядер, образующихся, когда большие куски ядерного вещества «вгоняются» один в другой, представляет собой совершенно новую область ядерной физики, которая получила развитие уже в послевоенные годы. Первый ускоритель тяжелых ионов — ядер азота — был построен в США в начале 50-х годов вскоре после того, как было установлено, что при атомных взрывах происходят интенсивные взаимодействия ионов воздуха. В 1960 г. был запущен ускоритель тяжелых ионов вплоть до аргона ($Z = 18$) и до настоящего времени остающийся наиболее мощным ускорителем этого типа. Созданная два года назад в Дубне, в Лаборатории ядерных реакций, тандемная система из двух ускорителей, где ионы, выведенные из одного ускорителя, попадают далее во второй ускоритель и получают там дополнительную энергию, дает пучки еще более тяжелых ионов вплоть до ксенона ($Z = 54$) с энергией около одного миллиарда электрон-вольт. В США недавно закончена реконструкция линейного ускорителя SUPERHILAC, который также может ускорять высокоэнергетические ионы ксенона. Еще более мощный ускоритель UNILAC, который позволит ускорять все ядра периодической таблицы Менделеева, в том числе и уран, создается сейчас в ФРГ. Кроме того, на ускорение тяжелых ионов переведен ускоритель протонов в Беркли на энергию 6 Гэв и готовится перевод синхрофазотрона в Дубне на 10 Гэв. С помощью этих ускорителей можно получить пучки ионов с относительно небольшой интенсивностью, но с очень высокой «релятивистской» энергией — 2,3 Гэв/нуклон в Беркли и 5,5 Гэв/нуклон в Дубне.

Чем же обусловлен столь большой интерес, проявляемый учеными различных стран к пучкам тяжелых ионов? Прежде всего — это уникальная возможность проникнуть с помощью тяжелых ионов в совершенно еще не изведанные и, по-видимому, не достижимые другим путем области ядерной физики, связанные с исследованием свойств сверхтяжелых трансурановых элементов и короткоживущих ядерных систем, состоящих из 300—500 нуклонов. До сих пор в физическом эксперименте нам еще никогда не приходилось иметь дело с такими большими квантовыми системами сильно взаимодействующих частиц. Не исключено, что при исследовании динамических и статистических свойств таких объектов

мы встретимся с принципиально новыми законами природы. Образовавшиеся в результате взаимодействия тяжелого налетающего иона с тяжелым ядром-мишенью, многонуклонные системы могут обладать большим угловым моментом и принимать весьма непривычные для нас формы (например, форму гантели, в которой один шар как бы «скользит» по поверхности другого, форму тороида, который образуется, когда очень быстрое легкое ядро выбивает значительное количество нуклонов из центра более тяжелого ядра-мишени или даже форму «пузыря» с внутренней полостью). Изучая большие и быстро вращающиеся сгустки ядерного вещества, мы до некоторой степени можем получить также представление о том, как ведет себя вещество в нейтронных звездах и других астрофизических объектах, поражающих наше воображение. Однако центральной проблемой здесь, несомненно, сейчас является достижение предсказываемой области $Z = 114, 126$ и т. д. (так называемых «островов стабильности»). Реакции с тяжелыми ионами в настоящее время — единственная возможность практически подойти к исследованию таких ядер. Понятно, что открытие долгоживущих сверхтяжелых элементов будет иметь настолько далеко идущие научные, а возможно, и практические последствия, что их значение сейчас трудно даже оценить.

Реакции с тяжелыми ионами позволяют получить большое число новых изотопов, далеких от линии β -стабильности, в частности — сильно перегруженные нейтронами легкие ядра. Изучение таких ядер представляет большой интерес, так как согласно теоретическим предсказаниям в области ядер с очень большим числом нейтронов также возможно существование относительно стабильных элементов («нейтронных капель»).

В настоящее время мы еще очень плохо знаем «географию» атомных ядер. При облучении урановой мишени высокоэнергетическими ионами урана или тория образуется свыше 6000 различных изотопов, что в несколько раз превосходит число всех стабильных и радиоактивных изотопов, вообще изученных до сих пор в ядерной физике. Как очень образно отметил недавно А. Бромли (один из ведущих американских специалистов по физике тяжелых ионов), экстраполяция накопленных нами знаний для предсказаний свойств всех возможных атомных ядер напоминает попытку описания ландшафта целой страны на основе изучения дна и близлежащих склонов одного из принадлежащих ей ущелий.

Чрезвычайно большой интерес представляет возможность проверки законов квантовой электродинамики и изучения процессов, протекающих в электромагнитных полях сталкивающихся ядер, которые являются наиболее сильными среди всех электромагнитных полей, известных нам сейчас во Вселенной. Очень интересны также исследования ядер с предельно большими зарядами Z .

Оценивая перспективы развития ядерной физики, известный теоретик Оге Бор высказал мнение, что ядерная физика ближайшего десятилетия — это в основном физика тяжелых ионов. С этим мнением трудно не согласиться. Тем не менее большая научная значимость в исследовании новых и фундаментальных явлений — это только один аспект физики тяжелых ионов. Другой, не менее важный, ее аспект связан с возможностью широкого практического применения пучков тяжелых ионов в самых различных областях науки и техники. Можно без преувеличения сказать, что в отношении перспектив их практического применения пучки тяжелых ионов сейчас находятся примерно в таком же положении, в каком 10—15 лет тому назад была техника световых пучков, генерируемых лазерами.

Если лазерный пучок воздействует на вещество в основном посредством сильного локального нагрева, то пучок тяжелых ионов может оказывать не только значительное термическое действие, но также меха-

нически посредством столкновений ионов и ядер отдачи с ядрами воздействует на кристаллическую решетку облучаемого вещества и, что особенно важно, может изменять его химический состав по заранее заданной программе. С помощью магнитных линз пучок тяжелых ионов может быть сконцентрирован в очень узкий, иглообразный луч с диаметром, равным лишь нескольким микронам.

Сочетание всех этих замечательных свойств и является основой многочисленных практических применений пучков тяжелых ионов. С их помощью можно воздействовать фактически на любое свойство вещества, которое зависит от его структуры и химического состава.

Таким путем в настоящее время удается изменять свойства поверхности материала и его слоев на глубину вплоть до нескольких десятков микрон (в биологических тканях значительно глубже; см. ниже). Создание высокоэнергетических ускорителей с достаточно интенсивными пучками (а это, по-видимому, дело недалекого будущего — никаких принципиальных трудностей здесь нет) позволит иметь ионы с более длинными пробегами в веществе и воздействовать на очень глубокие внутренние слои облучаемых материалов.

Использование замечательных возможностей, связанных с пучками тяжелых ионов, делает еще только первые шаги, по многим важным направлениям производится лишь первая разведка, а другие, — быть может, наиболее интересные направления — предстоит еще открыть. Однако уже того, что нам известно сейчас, достаточно, чтобы утверждать, что применение интенсивных пучков тяжелых ионов, в какой-то степени аналогично тому, что уже произошло с лазерами, — вызовет революцию в технологии и в методах, используемых самыми различными отраслями современной науки и техники.

В следующих разделах мы рассмотрим ряд практических применений тяжелых ионов, которые представляются сейчас наиболее многообещающими.

ИМПЛАНТАЦИЯ ИОНОВ

Хотя практическое применение пучков тяжелых ионов еще только начинается, они уже сегодня широко используются в электронной промышленности для легирования поверхностных и близких к ним слоев полупроводниковых материалов. По сравнению с другими известными методами легирования «вбивание», или, как сейчас говорят, имплантация, ионов представляет собой весьма универсальный метод. Таким путем можно вводить атомы любого элемента в любой заданный материал. Имплантация ионов дает положительные результаты даже в тех случаях, когда все другие способы легирования оказываются невозможными. Процесс этот может проходить в условиях сравнительно невысоких температур, а побочные радиационные повреждения структуры облучаемого образца устраняются его последующим нагревом также до относительно небольших температур; все это позволяет изменять электрофизические параметры материала в строго заданном направлении и хорошо контролируемым образом. С точки зрения промышленного освоения метода очень важно, что процесс имплантации ионов допускает практически полную автоматизацию и близкую к 100%-ной воспроизводимость свойств создаваемых новых материалов.

Таким путем удастся существенно повысить качества транзисторов и других полупроводниковых приборов; в частности, с помощью облучения ионами бора, фосфора, тантала и более тяжелых элементов значительно улучшаются свойства кремниевых и германиевых детекторов,

широко используемых сейчас в ядерной физике, при активационном анализе в горнорудной промышленности и геологоразведке, для экспрессного анализа загрязненности окружающей среды и т. д.

При ионном легировании имеется возможность очень точно управлять профилем вводимой смеси, благодаря чему внутри облучаемого образца можно создать весьма сложные по своей архитектуре структуры с комплексными электрофизическими свойствами. Это открывает пути к созданию сложных и в то же время в высшей степени компактных и удобных в обращении электронных устройств.

Простейшим примером в этом отношении могут служить кристаллические кремниевые детекторы, внутрь которых ионным пучком внесены тонкие слои бора и фосфора (рис. 1). Эти слои имеют строго заданную форму с четкими границами, что позволяет с очень хорошей точностью измерять одновременно удельную и полную ионизацию и тем самым определять энергию и тип регистрируемой частицы.

Замечательные возможности имплантации ионов открывает для изготовления и изучения свойств новых сплавов, которые трудно или вообще

практически невозможно получить другими известными сейчас способами, например из-за химической несовместимости компонентов, препятствующей их взаимному проникновению. Обработка слоев компонентов пучками тяжелых ионов позволяет «подавить» их несовместимость и получить сплавы с совершенно необычными прочностью, термостойкостью, антикоррозийностью и т. д. При этом во многих случаях для получения требуемых свойств достаточны лишь очень небольшие добавки соответствующим образом подобранных примесей.

В последнее время большое внимание привлекает еще одна область применений имплантации ионов — создание пластических светопроводов. Как известно, автоматизация современного научного экспери-

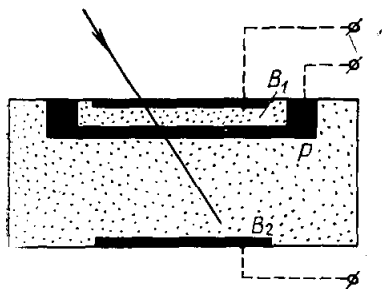


Рис. 1. Имплантацией ионов в кристалл кремния вносятся слои бора B_1 и B_2 и фосфора P .

По изменению напряжения между слоями B_1 и P измеряются ионизационные потери $\Delta E/\Delta x$, по изменению напряжения между слоями P и B_2 — величина полной ионизации, создаваемой частицей.

римента и сложных технологических процессов, когда контролируются десятки, а то и сотни различных факторов, требует создания вычислительных устройств, способных быстро анализировать и передавать огромные потоки разнообразной информации. Дальнейший существенный прогресс в этом направлении, по-видимому, невозможен без применения в вычислительных и управляющих устройствах световых пучков, которые позволяют передавать информацию с наибольшей возможной в природе скоростью, скоростью света, и в то же время, обладая широким диапазоном частот, являются чрезвычайно информационно емкими. Необходимые для этого материалы, которые позволят заменить печатные схемы и сложные переплетения проводников современных радиоэлектронных устройств, могут быть созданы с помощью пучков тяжелых ионов. Облучая такими пучками тонкие оптические проводящие пленки (например, воздействуя тонким пучком ионов лития или углерода, как это делалось в работе ¹), можно в соответствии с заранее составленной программой так изменить их коэффициент преломления, что образуются светопроводы желаемой формы. Обработанные таким образом светопроводящие пленки аналогичны печатным схемам современной радиоэлектроники. Введение в пленки специальных добавок с магнитными свойствами позволяет создать эле-

менты, которые обладают большим объемом распределенной памяти, что также чрезвычайно расширяет возможности вычислительной техники.

Нельзя не согласиться с мнением американских ученых, которые считают, что это направление использования тяжелых ионов окажет глубокое влияние на развитие счетно-решающей техники и в самом ближайшем будущем обещает вырасти в крупную индустрию.

Интенсивные пучки тяжелых ионов могут с высокой эффективностью быть использованы для обработки поверхности материалов с целью повышения ее твердости, пассивации и, наоборот, для того, чтобы сделать поверхность более активной, если это необходимо, к взаимодействиям с определенными веществами. Так, например, поверхностная твердость металлов и их сплавов в ряде случаев существенно возрастает после обработки пучками ионов углерода; в то же время облучение ионами аргона поверхности деталей, состоящих из металлического урана, приводит к их пассивации. С помощью ионных пучков можно производить также полировку и сверхтонкую доводку поверхностей оптических линз и т. д. — здесь имеется бескрайнее поле деятельности для изобретательного ума.

ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВ

Одной из важнейших проблем современной энергетики, сравнимой по своему значению разве лишь с проблемой создания термоядерных реакторов, является разработка высокотемпературных сверхпроводников, сохраняющих свойство сверхпроводимости при больших токах, больших магнитных полях и достаточно высоких температурах, желательно — при «комнатных», ну а в качестве первого «скромного» шага — при температуре кипения жидкого водорода $T_H = 20,4^\circ\text{K}$.

Как известно, для того чтобы сделать металл сверхпроводящим, требуются очень низкие «гелиевые» температуры. Даже у ниобия, который становится сверхпроводником при наиболее высокой по сравнению с другими металлами температуре $T_N = 9,2^\circ\text{K}$, эта температура лишь немногим более чем в два раза превышает температуру кипения жидкого гелия. Переход к «водородным» температурам T_H дал бы возможность использовать существенно более простую и дешевую криогенную технику и позволил бы приступить к широкому промышленному применению сверхпроводников.

В том, что задача создания высокотемпературной сверхпроводимости не является такой безнадежной, как это может показаться с первого взгляда (во всяком случае, в той ее части, которая касается «водородных» температур), убеждает нас тот факт, что уже сейчас известны сплавы, сохраняющие свойство сверхпроводимости при температурах, очень близких к T_H . Например, сплав ниобия с оловом Nb_3Sn остается сверхпроводящим вплоть до $T = 18,2^\circ\text{K}$, а температура $T \approx 20^\circ\text{K}$, при которой исчезает сверхпроводимость твердого раствора $\text{Nb}_3\text{Al} + \text{Nb}_3\text{Ge}$, лишь на доли градуса отличается от температуры кипения водорода T_H .

Возможность создания сверхпроводников при температурах, в полтора или даже два раза превышающих T_H , не противоречит также и современной теории сверхпроводимости, согласно которой основной (так называемый фононный) механизм, ответственный за образование сверхпроводящего состояния, действует, по-видимому, в диапазоне температур $T < 25\text{--}30^\circ\text{K}$ ². Вместе с тем теория еще недостаточно совершенна, чтобы исключить и значительно более высокие температуры, вплоть до $T \approx 40\text{--}50^\circ\text{K}$.

Дальнейший прогресс в изучении сверхпроводников при $T > T_H$ в настоящее время зависит прежде всего от детального и систематического

исследования свойств различных многокомпонентных растворов и сплавов. Использование пучков тяжелых ионов является чрезвычайно эффективным способом практически неограниченно расширить диапазон таких исследований; тяжелые ионы позволяют непрерывно и строго направленно изменять состав как бинарных, так и сколь угодно сложных многокомпонентных сверхпроводящих соединений, в том числе и таких, которые очень трудно или вообще невозможно приготовить с помощью других известных нам сейчас способов. С помощью пучков ионов можно, образно говоря, обойти с тыла термодинамику сплавов и изготавливать многокомпонентные метастабильные, термодинамически неравновесные системы.

Есть еще один очень важный аспект применения пучков тяжелых ионов для создания высокотемпературных сверхпроводников. Следует ожидать, что свойства сверхпроводимости, определяемой специфическими

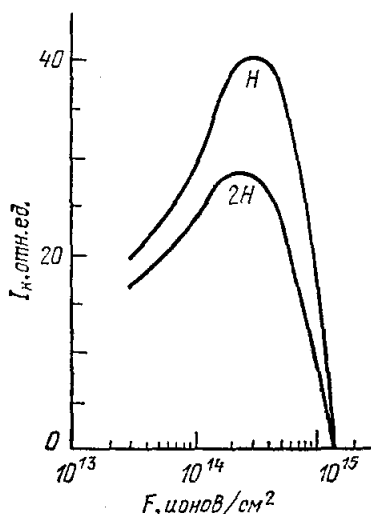


Рис. 2. Зависимость критического тока (в отн. ед.) в фольге из сплава Nb_3Sn от дозы облучения ионами кислорода ⁵.

Верхняя кривая относится к случаю, когда поперечное магнитное поле H было в два раза меньше, чем для нижней кривой.

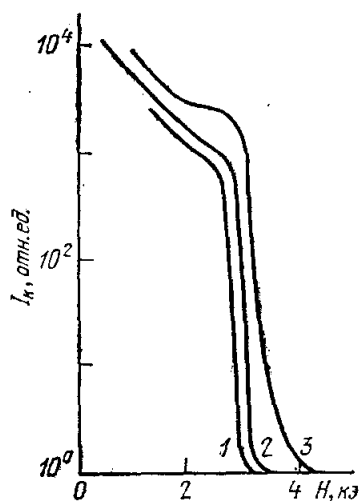


Рис. 3. Зависимость критического тока в фольге из ниобия от величины поперечного магнитного поля ³.

1 — необлученная фольга, 2, 3 — фольга, облученная потоком ионов азота соответственно в $4 \cdot 10^{14}$ и $1,25 \cdot 10^{15}$ частиц/см².

взаимодействиями электронных пар и колебаний кристаллической решетки, должны быть чувствительными даже к небольшому числу вводимых в решетку инородных атомов, а также к создаваемым в ней радиационным дефектам. Наглядно действие таких вкраплений на характер колебаний кристаллической решетки можно уподобить действию гирь с различной массой, прикрепляемых в различных местах к раскачиваемой волейбольной сетке. Определенным подбором вводимых атомов и радиационных повреждений можно так изменить частоты колебаний решетки, чтобы воспрепятствовать возвращению сверхпроводника в нормальное состояние при изменении внешних условий.

Как показали недавние работы ленинградского физика С. И. Цыпкина и его соавторов ^{3, 4} и совсем недавние измерения западно-германских физиков ⁵, после облучения тяжелыми ионами характеристики сверхпроводников в ряде случаев, действительно, намного улучшаются. В частности, существенно возрастают значения критического магнитного поля H_k и тока I_k , уничтожающих свойство сверхпроводимости (рис. 2 и 3). Послед-

нее обстоятельство становится особенно важным, если учесть, что значения H_K и I_K для многокомпонентных сплавов с высокой температурой сверхпроводимости часто оказываются весьма низкими.

Большой интерес представляет также изучение сверхпроводимости в сложных слоистых и нитеподобных структурах из проводящих материалов и диэлектриков², которые можно создать с помощью пучков тяжелых ионов. (Мы благодарны Н. Е. Алексеевскому и С. И. Цыпкину за обсуждение этих вопросов.) Исследования сверхпроводящих материалов с использованием пучков тяжелых ионов делают еще только первые шаги, однако дальнейшие перспективы этого направления представляются чрезвычайно интересными и многообещающими.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Еще одной чрезвычайно важной областью применения пучков тяжелых ионов является использование их для моделирования радиационных повреждений, вызываемых нейтронами в тепловыделяющих элементных и конструктивных материалах атомных реакторов. Сталкиваясь с атомными ядрами, быстрые нейтроны выбивают ядра из занимаемых ими положений, рассеивают их по всему материалу и сообщают им значительное количество энергии, благодаря чему эти разлетающиеся ядра в свою очередь могут вызывать дальнейшие радиационные повреждения, изменяющие структуру облучаемого вещества. Одним из следствий этого является образование в веществе большого количества микроскопических полостей с размерами порядка сотни межатомных расстояний, что приводит к соответствующему увеличению внешних размеров облучаемого образца — к его распуханию. Развитие таких полостей связано с процессами диффузии образовавшихся вакансий и других точечных дефектов, поэтому увеличение радиационной пористости происходит особенно быстро при достаточно высоких температурах, когда точечные дефекты более подвижны. Например, для нержавеющей стали это соответствует температурам около 400—800 °С, что как раз является областью рабочих температур атомных реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Увеличение объема конструктивных материалов вследствие распухания здесь может достигать 10—15%, а поскольку нейтронные потоки и температуры распределяются в реакторе весьма неоднородно, его конструктивные детали деформируются, в них создаются большие градиенты напряжений. Это ставит очень серьезные проблемы перед проектировщиками реакторов, особенно если учесть, что радиационное распухание материалов во многих случаях сопровождается изменением их ползучести, благодаря чему материалы становятся весьма чувствительными к различным деформациям^{6, 7}.

Эффект распухания (или «свеллинг», как часто называют его в специальной литературе) впервые был обнаружен шесть лет тому назад английскими учеными для аустенитовой стали. В последующем это явление наблюдалось практически для всех металлов.

Облучение нейтронами не только разрушает структуру вещества, но изменяет также его химический состав вследствие ядерных реакций, особенно реакций (n, α), в которых в результате поглощения нейтронов ядрами образуются атомы гелия, в свою очередь существенно влияющие на зарождение и рост вакансионных пор. Значительные изменения в химическом составе и структуре делящегося вещества вызывают осколки деления.

В бридерных системах на быстрых нейтронах, которые, по-видимому, получат широкое распространение в ближайшие 5—10 лет, потоки нейтронов будут в сто-тысячу раз превосходить те, с которыми мы имеем дело в современных атомных реакторах. Проблемы радиационной стойкости материалов при этом приобретут решающее значение. Эти проблемы важны также и для реакторов других типов, в частности для разрабатываемых сейчас систем на основе термоядерного синтеза. По оценкам американских ученых замена современных конструкционных материалов на новые, значительно более устойчивые по отношению к радиационным повреждениям, может дать для десятилетней национальной программы развития ядерной энергетики США экономию в несколько миллиардов долларов^{8, 9}.

Многочисленные исследования, выполненные в последние годы, показали, что эффекты радиационного повреждения, в частности радиационная пористость, представляют собой очень сложные многогранные явления, зависящие как от дозы и условий облучения, так и от состава и предварительной термомеханической обработки облучаемого материала. Иногда даже очень небольшие присадки к основному материалу значительно изменяют характер его поведения в радиационных полях. Поэтому перенести результаты исследований, выполненных для одних материалов, на другие сейчас зачастую оказывается просто невозможным; тем более, что теория, которая позволяла бы предсказывать и достаточно точно рассчитывать сложный комплекс явлений радиационного повреждения, пока еще не существует. В то же время экспериментальное изучение радиационных повреждений различных материалов непосредственно в существующих атомных реакторах весьма затруднено тем, что для этого требуются очень длительные облучения: как правило, заметная радиационная пористость образуется лишь после облучения материала интегральной дозой порядка нескольких единиц 10^{22} нейтрон/см², а поскольку типичные потоки быстрых нейтронов в современных реакторах составляют $\sim 10^{15}$ нейтрон/см²сек, такая доза достигается приблизительно лишь за год; поэтому для определения стойкости материалов за все время проектного выгорания делящегося вещества в быстрых реакторах (интегральная доза $\sim 10^{23}$ нейтрон/см²) необходимы многие годы.

Что же касается поведения материалов в потоках нейтронов $\geq 10^{16}$ нейтрон/см²сек, характерных для проектируемых термоядерных реакторов и бридерных систем ближайшего будущего, то сведений об этом мы с помощью современных атомных реакторов вообще практически не можем получить.

В этих условиях чрезвычайно важным становится моделирование радиационных повреждений, испытываемых различными материалами в атомных и термоядерных реакторах с помощью пучков тяжелых ионов. Тяжелые ионы имеют сечение рассеяния, приблизительно на пять-шесть порядков большее, чем нейтроны*), благодаря чему в отношении радиационных повреждений они, грубо говоря, в сто тысяч или даже миллионы раз более эффективны, чем нейтроны (рис. 4). Радиационный эффект, который в самых мощных действующих сейчас атомных реакторах достигается в течение нескольких лет, с помощью пучка тяжелых ионов с интенсивностью порядка нескольких микроампер может быть воспроизведен всего лишь за несколько часов. При этом исследуемые образцы практически совсем не обладают активацией, в отличие от того, что имеет место после облучения их в атомном реакторе, что значительно упрощает работу

*) При небольших энергиях налетающий ион взаимодействует сразу со всем атом-мишенью, в то время как нейтрон взаимодействует лишь с ядром этого атома.

с ними; в опытах с ионами можно более точно определять дозу облучения, осуществлять более строгий контроль за температурой и другими условиями облучения.

Используя ионы различных типов, можно изучать радиационные дефекты «в чистом виде», не вводя в материал каких-либо инородных атомов, а, с другой стороны, моделировать разнообразные эффекты, обусловленные возникновением химических неоднородностей в материалах. Как уже отмечалось выше, введение примесей может очень сильно сказаться на радиационной стойкости материала, значительно снижая ее в одних случаях, например после легирования гелием (рис. 5), и, наоборот, повышая в других. Возможность введения с помощью пучков в изучаемый материал ионов примеси практически любого элемента открывает широкие возможности для быстрого исследования радиационных свойств самых разнообразных двух- и многокомпонентных систем.

С помощью тяжелых ионов в настоящее время уже исследуется разрушительное действие радиации в графите, нержавеющих сталях, циркониевых и алюминиевых сплавах, которые в очень больших количествах применяются в реакторостроении. Выполненные исследования, в частности, показали, что некоторые сорта сталей под действием пучка ионов увеличивают свой объем почти в полтора раза. Если такие высокие степени

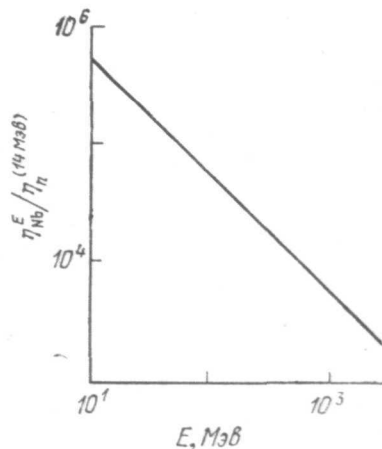


Рис. 4. Отношение эффективностей $\eta_{Nb}^E / \eta_n^{(14 \text{ Мэв})}$ создания радиационных дефектов ионами ниобия с энергией E и нейтронами с энергией 14 Мэв⁹.

Облучаемый материал — фольга из ниобия. Эффективность η определяется как величина, пропорциональная доли кинетической энергии частицы, затрачиваемой на создание радиационных повреждений.

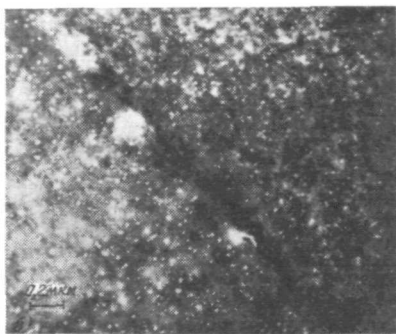
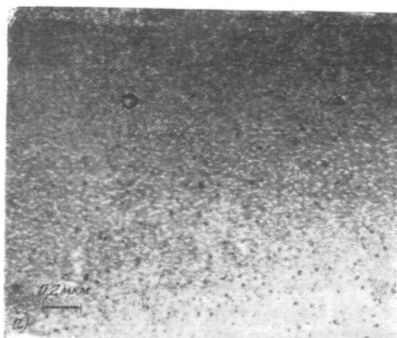


Рис. 5. Влияние примеси атомов гелия на радиационную пористость стали, облученной двухзарядными ионами углерода с энергией 20 Мэв¹⁰.

Доза облучения — 10^{17} ионов/см². Рис. а) относится к образцу, содержащему в тысячу раз больше атомов гелия, чем образец на рис. б). С увеличением концентрации гелия поры становятся более мелкими, но их число и соответственно общий объем значительно возрастают.

распухания будут иметь место в реакторах с большими потоками нейтронов, то это существенно усложнит их конструирование.

Совершенно неожиданным оказался полученный недавно вывод о том, что распределение пор в облучаемых слоях вещества не является совершенно хаотичным, как это могло бы показаться с первого взгляда, а обла-

дает симметричной структурой, повторяющей тип решетки облучаемого материала. При этом пористость выходит на насыщение, и дальнейшее увеличение дозы облучения уже не вызывает увеличения объема образца. Это обстоятельство открывает принципиальную возможность создавать путем предварительного облучения такие материалы, которые будут устойчивы по отношению к радиационному набуханию. Не нужно пояснять, насколько важным является дальнейшее изучение всех этих вопросов.

К сожалению, в настоящее время для анализа облученных образцов пока еще не используется весь богатый арсенал средств, которыми располагает современное материаловедение; анализ ограничивается лишь рассмотрением с помощью электронного микроскопа очень тонких образцов

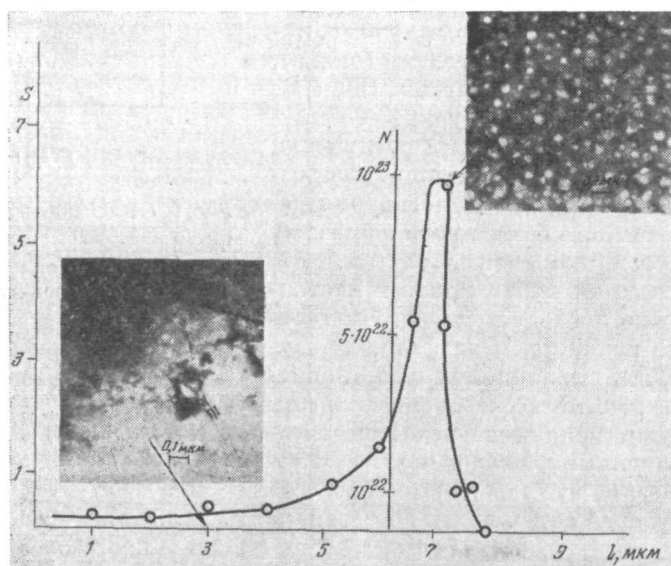


Рис. 6. Величина набухания в различных участках пробега двухзарядного иона углерода с энергией 20 Мэв в никеле при температуре 525°C .

Набухание S определяется как отношение $\Delta V/(V - \Delta V)$, где ΔV — объем радиационных пор, V — объем материала, в котором образовались эти поры. Микрофотографии показывают распределение пор в начале и в конце пробега. Доза облучения — $3 \cdot 10^{17}$ ионов/см². Для сравнения указаны эквивалентные дозы облучения быстрыми нейтронами N .

материалов, что, конечно, существенно ограничивает объем получаемой информации. Это связано прежде всего с тем обстоятельством, что, в отличие от нейтронов, пробеги которых достигают сантиметров и радиационные дефекты распределяются весьма равномерно по значительным толщинам, в случае облучения материала тяжелыми ионами с энергией $\approx 5\text{--}10 \text{ Мэв/нуклон}$ весь радиационный эффект в большинстве случаев сосредоточен в слое, толщина которого не превосходит одного-двух десятков микрон, а при использовании низкоэнергетических ускорителей и очень тяжелых ионов вообще составляет доли микрон. Кроме того, сам радиационный эффект распределяется весьма неравномерно по длине пробега иона; число радиационных повреждений материала в конце пробега иона во много раз превышает их число в начале пробега (рис. 6).

Применение пучков высокоэнергетических ионов с большими пробегами в веществе мишеней позволит получать значительно более детальную информацию о характере радиационных повреждений, что совершенно

необходимо для понимания сложного комплекса физико-химических явлений, протекающих в облученном веществе.

Переход к более высоким энергиям ионов позволит также широко использовать тяжелые ионы Fe, Ni, Nb и др. В настоящее время в мире всего лишь несколько лабораторий обладает достаточно интенсивными пучками таких ионов с микронными пробегами. Использование же низкоэнергетических ионов с пробегами менее одной-двух тысяч ангстрем не может воспроизвести картину радиационных повреждений, вызываемых потоком нейтронов, так как значительная часть образуемых ионами дефектов «стекает» на поверхность облучаемого материала и поры почти не образуются.

подавляющая часть работ по моделированию радиационных повреждений в тяжелых конструкционных материалах выполняется с ионами углерода, что совершенно недостаточно для получения необходимых сведений о радиационной стойкости этих материалов.

ЯДЕРНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Пожалуй, наиболее простым по своей идее и в то же время весьма перспективным с точки зрения возможных применений в самых различных областях науки, техники и даже сельского хозяйства является применение пучков тяжелых ионов в качестве «микроигл» для производства ультрамелких по размерам и уникальных по качеству фильтров.

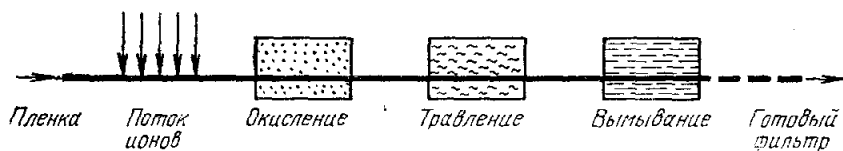


Рис. 7. Процесс изготовления фильтров с помощью пучка ионов.

Пленка из пластического материала последовательно проходит различные части установки. Горизонтальными стрелками показано направление движения пленки.

Схематически процесс изготовления таких фильтров изображен на рис. 7. Проходя сквозь пленку облучаемого вещества — слюду, стекло или слой какого-либо пластического материала, — тяжелый ион образует канал сильного радиационного повреждения, где сложные молекулы облучаемого вещества оказываются разорванными и расщепленными на более мелкие компоненты (радикалы). В атмосферном кислороде или под действием более энергичных окислителей (например, с помощью перекиси водорода) эти весьма активные в химическом отношении компоненты захватывают атомы кислорода и образуют кислоты, а последующее травление переводит эти кислоты в легко растворимые соли. В результате после промывки в тех местах пленки, которые были «пробиты» ионами, образуются сквозные отверстия, диаметр которых зависит от типа и энергии иона, от облучаемого материала и от условий травления¹²⁻¹⁶.

Возможны также другие способы химической обработки облученной пленки. Кроме того, в целях ускорения процесса травления облученная пленка, как правило, подвергается еще дополнительному облучению жестким ультрафиолетовым излучением, которое производит дальнейшее расщепление частично уже разорванных молекул с ослабленными связями^{*)}. Однако суть процесса во всех случаях остается одной и той же:

^{*)} При этом длина световой волны должна быть подобрана таким образом, чтобы наиболее сильно воздействовать на радиационно поврежденные места пленки. Например, для пленок из поликарбоната оптимальная длина волны составляет около 2800—

подобно тому, как это имеет место для фотопластишки, облученной светом, поврежденные места оказываются наиболее чувствительными к последующей химической обработке, в результате которой и образуются сквозные отверстия.

На рис. 8 для частного случая слюды показано, каким образом повреждающая способность иона зависит от его энергии. Хорошо протравливаются следы при не слишком малых и при не очень высоких энергиях, и тем лучше, чем больше масса иона. Для каждого материала существует некоторая минимальная масса; ионы с меньшей массой не оставляют заметных следов в данном материале. (Следует, однако, иметь в виду,

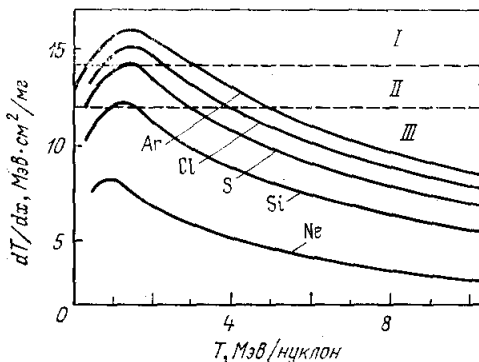


Рис. 8. Потери энергии различными ионами в слюде.

T — первичная энергия иона. Кривые — расчет¹². Указана область, где после травления прослеживаются следы повреждений (I), переходная область с нечеткими следами (II), область, где нет следов (III).

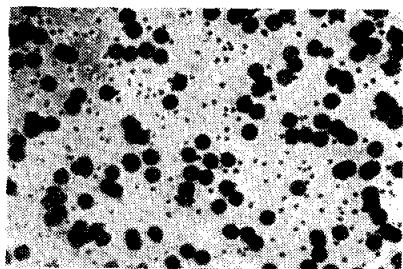


Рис. 9. Следы ионов цинка и серы (более мелкие) в силикатном стекле¹⁴.

что положение областей I—III на рис. 8 лишь ориентировочно и существенно изменяется в зависимости от способа травления и дополнительной обработки облученного материала.)

Сильная зависимость величины отверстий от типа иона хорошо видна также на рис. 9. На следующем рис. 10 сравниваются современный высококачественный химический фильтр (так называемые «миллипоры») и «ядерный фильтр», полученный травлением облученной ядерными частицами поликарбонатовой пленки. Хотя средний размер пор в обоих случаях почти одинаков, в химическом фильтре имеется большое количество крупных и весьма неправильных по своей форме отверстий, поэтому через такой фильтр проходят частицы самых различных размеров, и достаточно надежное отфильтровывание частиц с заданными размерами затруднительно: «спектр» пропущенных фильтром частиц оказывается весьма дисперсным. Наоборот, ядерные фильтры (или «нуклеопоры», как их еще

3000 А, большие длины волн почти не дают эффекта, а при меньших длинах начинают сказываться сильные разрушения всей поверхности пленки¹⁶. Полезное действие ультрафиолета состоит не только в избирательном воздействии на уже поврежденные молекулы, но также и в некотором общем «ослаблении» пленки, способствующем более быстрому растравливанию отверстия от центральной сильно поврежденной ионом части к периферии. Этот эффект в ряде случаев может быть достигнут также путем предварительного (еще до облучения ее ионами) облучения пленки потоком частиц (рентгеновскими лучами, γ -квантами, нейтронами и др.), несколько разрушающим ее структуру. Однако это дополнительное облучение должно производиться так, чтобы не ухудшать заметным образом механической и химической устойчивости фильтра. (Мы благодарны Т. С. Зваровой, В. П. Перелыгину и С. П. Третьяковой за обсуждение этих вопросов.)

иногда называют) характеризуются очень правильной, практически круговой, геометрической формой пор, число и размеры которых легко контролировать и изменять путем изменения времени облучения и продолжительности травления.

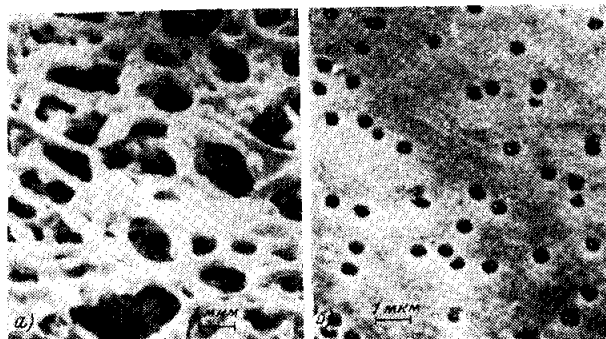


Рис. 10. Полученная с помощью электронного микроскопа фотография обычного химического фильтра со средним эффективным размером пор $0,45 \text{ мкм}$ (а) и ядерного фильтра с размером пор $0,4 \text{ мкм}$ (б) ¹⁵.

Возможность непрерывно варьировать размер пор, толщину фильтрующей пленки, использовать практически неограниченный набор различных полимерных материалов, подбирая их свойства в зависимости от конкретной задачи, — все это является исключительно важным преимуществом ядерных фильтров.

В настоящее время можно получать нуклеопоры с размерами приблизительно от 40 Å и до нескольких десятков микрон ($\sim 10^5 \text{ Å}$). Толщина фильтров варьируется от единиц до нескольких десятков микрон. Что касается размеров фильтров, то при использовании магнитных линз, рассеивающих пучок ионов, они могут достигать квадратных метров; фильтрам можно придавать любую форму — круга, прямоугольника, цилиндра и т. д. в зависимости от рассматриваемой задачи. При интенсивности пучка 10^{13} ион/сек (именно такова интенсивность ионов Хе на ускорителе У-300 в Дубне) можно получать в сутки сотни и тысячи квадратных метров облученной пленки.

На рис. 11, где показана снятая с большим увеличением микрофотография отдельных пор, хорошо видно, что фильтрующие каналы на всем их протяжении имеют практически одинаковое сечение. Благодаря этому, задержанные фильтром частицы собираются на его внешней поверхности; лишь небольшое количество частиц с размерами меньше диаметра пор могут прилипнуть к стенкам каналов. В этом заключается еще одно принципиальное отличие ядерных фильтров от всех других, используемых в настоящее время, фильтрующих систем, которые представляют собой

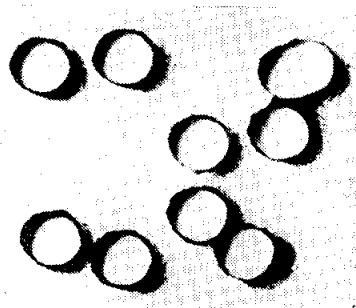


Рис. 11. Микрофотография пор в лавсановой пленке, облученной ионами ксенона.

Каналы идут слева направо под небольшим углом к вертикали к плоскости рисунка. Тени справа показывают глубину и форму отдельных каналов. В правом верхнем углу видна овальная пора, образовавшаяся в результате перекрытия двух пор в процессе травления.

лабиринт сообщающихся полостей, захватывающих частицы, как это имеет место, например, в «миллипорах»¹⁷, или сложное переплетение длинных молекулярных волокон, между которыми запутываются фильтруемые частицы (рис. 12), или что-либо подобное *). Уникальная особенность структуры нуклеопор открывает новые возможности для их применений (см. ниже).

Следует заметить, что для получения ровных цилиндрических каналов очень важно дополнительное облучение пленки ультрафиолетом. В про-



Рис. 12. Структура волокнистых фильтров Петрянова¹⁸.

тивном случае сечения канала на входе и выходе оказываются заметно большими, чем в его средней части; качества фильтра при этом значительно ухудшаются (см. примечание на стр. 361). С первого взгляда может также показаться, что качества ядерных фильтров могут сильно снижать перекрывающиеся поры (такие поры видны, в частности, на рис. 10 и 11). Поскольку точки, в которых ионы попадают на облучаемую пленку, распределяются по закону случайных чисел, число таких перекрытий быстро возрастает с увеличением дозы облучения и роста диаметра пор. Однако направления движения отдельных ионов в пучке практически никогда не бывают строго параллельными, поэтому даже в тех случаях, когда входные отверстия пор перекрываются, каналы внутри пленки, как правило, оказываются разделенными. Слияние каналов происходит, лишь когда их диаметр становится достаточно большим (именно такой случай виден на рис. 11); в этих случаях должна быть уменьшена плотность облучения.

Простые гидродинамические расчеты и непосредственные измерения показывают, что выход (объем) очищенных нуклеопорами веществ V можно с хорошей точностью считать степенной функцией перепада давления на фильтре p : $V = ap^b$, где коэффициенты a и b зависят от числа пор N , их диаметров D , а также от температуры и степени чистоты фильтруемого материала. Из рис. 13 видно, что пропускная способность ядерных фильтров оказывается весьма значительной; например, при давлении 1 атм через 1 дм² поверхности фильтра за секунду проходит свыше 20 л воздуха и свыше 100 см³ воды, полностью очищенных от частиц с размерами больше 0,5 мкм. Фильтр, имеющий в десять раз меньшие поры ($D = 500$ А), пропускает в аналогичных условиях около 0,8 л воздуха и 1,2 см³ воды. Увеличение давления быстро повышает выход отфильтрованных газа и жидкости.

*) В отличие от фильтров других типов, ядерные фильтры могут быть очищены, если фильтруемый газ или жидкость на короткое время толчком пропустить в обратном направлении.

пластические материалы. Именно таким образом производится фильтры «нуклеопоры», выпускаемые на мировой рынок американской фирмой «Nucleopore Corporation»¹⁹. Однако деление ядер урана происходит несимметрично: наряду с группой тяжелых осколков, заряд и масса которых близки к заряду и массе ионов ксенона, образуется также группа значительно более легких осколков (в области криптона) с меньшей деструктивной способностью; кроме того, каждая из этих групп имеет дисперсию по их массе, заряду и величине кинетической энергии. Следствием этого

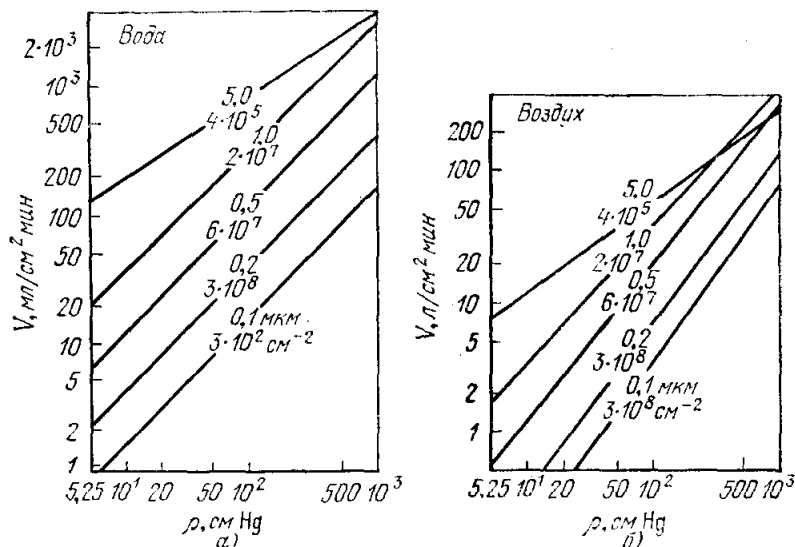


Рис. 13. Объемы воды (а) и воздуха (б), проходящие при комнатной температуре через ядерные фильтры различной пористости¹⁹.

Числа возле кривых — диаметр пор D (в $\mu\text{м}$) и их плотность N (в расчете на 1 см^2). Фильтры изготовлены из поликарбонатовой пленки толщиной 5 мкм в случае $D = 0,1\text{ мкм}$ и вдвое большей толщины для больших значений D .

является значительная дисперсия размеров пор в фильтрах, которая приблизительно на порядок превосходит дисперсию диаметров пор в фильтрах, изготавливаемых с помощью пучка ионов ксенона, выпущенного из ускорителя, а именно малая дисперсия размеров пор является основным достоинством ядерных фильтров. Фильтры, получаемые при помощи пучка тяжелых ионов, не только имеют качественно лучшие показатели, но и позволяют решать значительно более широкий класс задач.

Ядерные фильтры очень устойчивы по отношению к агрессивным средам: различным растворителям, кислотам и т. п.; их можно сделать нечувствительными также и к щелочам. Фильтры хорошо работают как при очень низких, так и при высоких температурах; их можно применять при температуре жидкого воздуха и даже при «гелиевых» температурах, а, с другой стороны, многократно обрабатывать в автоклавах — их свойства при этом практически не изменяются. Ядерные фильтры, например изготовленные из поликарбоната и лавсана, очень слабо поглощают воду*), они устойчиво работают в сильных радиационных полях.

Все эти замечательные свойства фильтров, изготовленных с помощью тяжелых ионов, делают их пригодными фактически во всех без исключе-

*) Поликарбонатный фильтр после суточного пребывания в воде увеличивает свой вес всего лишь на четверть процента¹⁹.

ния случаях, когда требуется тонкая и сверхтонкая очистка и разделение каких-либо веществ.

Области, где применение ядерных фильтров может дать в настоящее время большой эффект, чрезвычайно многообразны. Эти фильтры можно с большой эффективностью использовать для получения очищенной от бактерий питьевой воды в полевых условиях, для фильтрации аэрозолей, очистки газообразных и жидких материалов: воды, растворителей, кислот, фоторезистов, используемых в производстве микроэлектронных приборов. При изготовлении сложных интегральных схем, где десятки деталей размещаются на площади всего лишь в несколько квадратных миллиметров, мельчайшая инородная примесь приводит к нарушению технологического процесса и, в конечном счете, к браку. Использование ядерных фильтров может в несколько раз увеличить выход кондиционной продукции.

Как уже отмечалось выше, частицы с размерами, превосходящими размер пор, остаются на поверхности фильтра. Это позволяет выполнять количественный и качественный анализ природы и свойств

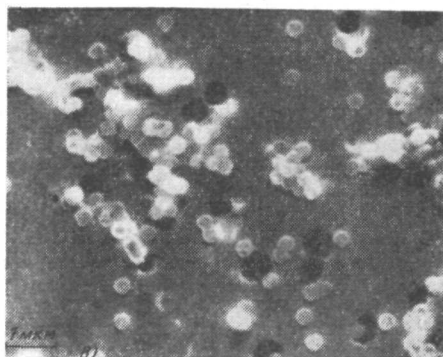
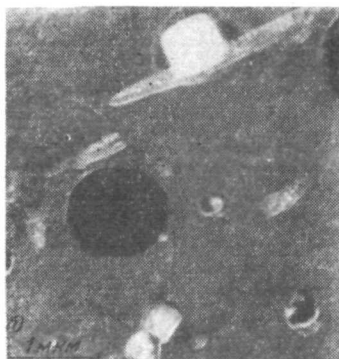
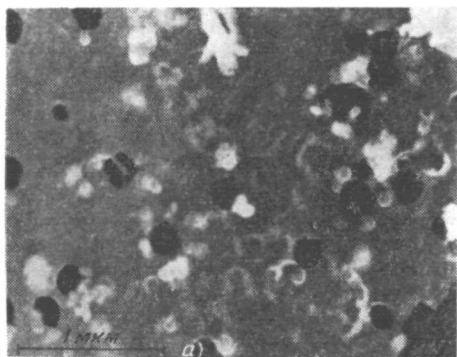


Рис. 14. Электронная микрофотография частиц на поверхности фильтра с диаметром пор D^{20} .

а, б) Результат фильтрации атмосферного воздуха через поры с $D = 0,2$ и 1 мкм; в) фильтрация полистириновых шариков с $D = 0,5$ мкм.

отфильтрованных частиц. Набором фильтров с различающимися отверстиями частицы можно разделить на отдельные группы в соответствии с их размерами. Таким образом можно, например, анализировать характер загрязнения воды и воздуха при экологических исследованиях (рис. 14). Ядерные фильтры с успехом применялись для изучения размеров и формы различных типов клеток крови (в частности, для выделения раковых клеток из крови; рис. 15), для изучения вязкости крови и слипания ее клеток в зависимости от различных условий²¹⁻²⁵, для измерения деформации клеток при цитологических исследованиях и в целях клинической диагностики²⁶⁻²⁸ и т. д.

Ядерные фильтры негигроскопичны, слабо чувствительны к внешним воздействиям, обладают очень малым собственным весом при озолении (1 мкг/см^2) и содержат очень мало (или практически вообще не содержат заметных количеств) таких элементов, как Be, Co, Sr, Pb, U (см. таблицу).

Содержание некоторых элементов в золе поликарбонатного фильтра ¹⁹

Элемент	Be	Co	Sr	Pb	U
Максимальный вес, %	0,004	0,007	< 0,004	< 0,004	< 0,004

Это делает фильтры весьма удобными для использования при активационном анализе отфильтрованной компоненты.

Еще одной интересной областью применения нуклеопор является использование их для «отсеивания» тепловых волн. Как известно, из всех имеющихся в настоящее время термоизоляционных материалов наиболее эффективной является слоисто-вакуумная, состоящая из ряда последовательно расположенных в вакуумной рубашке и термически изолированных друг от друга отражающих экранов с низкой степенью черноты ^{29, 30}.

Однако благодаря поверхностным эффектам внутри этой изоляции сохраняется определенное количество газа, что приводит к значительной теплопередаче (несколько десятков процентов общего теплового потока); поэтому для повышения эффективности изоляции необходимо существенно понизить давление внутри изолирующего слоя. Этого можно добиться, если в качестве тепловых экранов использовать алюминизированные ядерные фильтры, которые характеризуются высокой отражательной

способностью, обладают достаточно хорошей газопроницаемостью (в молекулярном режиме при низких давлениях скорость откачки пропорциональна пористости фильтра) и в то же время практически совершенно не пропускают ту часть излучения, которая имеет длины волн больше половины диаметра пор (рис. 16).

Например, при температурах ниже 300°K почти вся лучистая энергия передается волнами с длиной $\lambda > 5 \text{ мкм}$; в этом случае достаточно использовать фильтры с размерами пор $D < 2\text{--}2,5 \text{ мкм}$ ³⁰. Для более глубоких и, следовательно, более холодных слоев изоляции эти размеры можно увеличить пропорционально понижению температуры; наоборот, фильтры с более мелкими порами позволяют создать изоляцию от более высоких наружных температур.

Ядерные фильтры пассивны в биологическом отношении, они не разрушаются бактериями и не обладают бактерицидными свойствами, их можно подвергать термической и химической обработке — это делает их

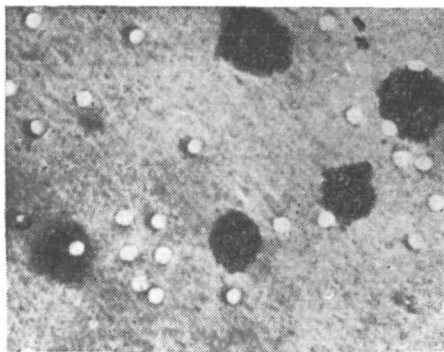


Рис. 15. Выделение раковых клеток из тока крови ²².

Раковые клетки задерживаются на поверхности фильтрующей пленки с диаметрами пор $4,5 \text{ мкм}$. Клетки в процессе фильтрации не деформируются, сам процесс протекает весьма быстро. Все это создает благоприятные условия для исследования.

особенно ценными для биологических и медицинских применений. Поскольку размеры бактерий больше $0,2 \text{ мкм}$, эти фильтры могут с успехом использоваться, в частности, для стерилизации биологических сред в микробиологии, с их помощью можно фильтровать и разделять различные типы вирусов и белковых молекул (минимальный размер вирусов — около 200 Å , размеры белковых молекул — $40\text{--}50 \text{ Å}$) и т. д.

Весьма перспективным представляется использование ядерных фильтров для холодной стабилизации вина, пива и других жидких пищевых

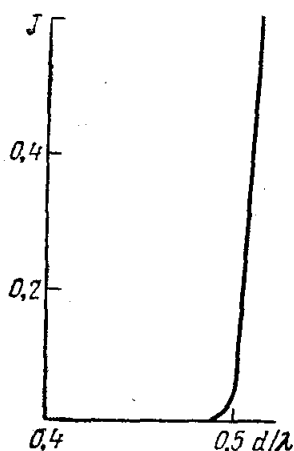


Рис. 16. Количество теплового излучения с длиной волны λ , проникающее сквозь алюминизированный фильтр с диаметром пор d толщиной $h \gg d$ ³⁰.

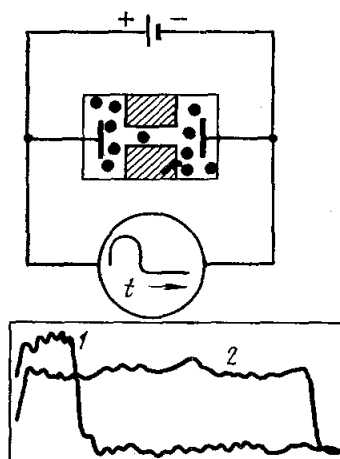


Рис. 17. Принципиальная схема прибора, измеряющего число, размер и форму частиц.

Внизу показана осциллограмма вируса Т2 с размером 1010 Å (1) и полистироновой частицы с размером 910 Å (2) ³¹.

продуктов, что позволяет длительно сохранять эти продукты при комнатной температуре при неизменных вкусовых и ароматических качествах.

Очень остроумным является метод измерения с помощью «нуклеопор» размеров и формы отдельных микрочастиц. Для этого пленка с единственным сквозным отверстием помещается в электролит (рис. 17), а сигнал с электродов, расположенных по обе стороны этой пленки, подается на осциллограф. Когда частица проходит сквозь отверстие, сопротивление в электрической цепи возрастает пропорционально объему частицы, а время прохождения частицы сквозь фильтрующий канал пропорционально ее электрическому заряду. Все это отчетливо видно на осциллограмме и позволяет одновременно измерять две характеристики частицы — ее размер и заряд. Для несферических частиц вид осциллограммы изменяется в зависимости от того, каким образом частица располагается в фильтрующем канале; это дает возможность исследовать форму частиц и уже с успехом применяется, например, для изучения морфологии вирусов ⁷. Таким путем в настоящее время можно измерять размеры $D \geq 600 \text{ Å}$, дальнейшее усовершенствование методики позволит, по-видимому, продвинуться в область масштабов $D \approx 200\text{--}300 \text{ Å}$ ³¹.

Число возможных применений ядерных фильтров можно умножить. Широкое применение их в самых различных областях науки и народного хозяйства представляется особенно перспективным, если учесть простоту

изготовления, низкую стоимость и высокую степень воспроизводимости их свойств при массовом производстве. Применение таких фильтров делает возможным совершенно новые постановки задач в научном исследовании и во многих случаях позволяет перейти к *качественно* более высокому уровню производства.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ

Взаимодействуя с атомами облучаемых материалов, ускоренные ионы с большой эффективностью выбивают электроны с внутренних оболочек этих атомов и тем самым возбуждают характеристическое рентгеновское излучение.

Пучок ионов может быть сконцентрирован в очень тонкий луч, сканирующий поверхность исследуемого материала, поэтому анализ спектра и интенсивности рентгеновского излучения дает сведения о химическом составе различных участков этой поверхности.

Интенсивность характеристических рентгеновских лучей, возбуждаемых тяжелыми ионами, приблизительно в миллион раз превосходит интенсивность рентгеновского излучения, инициируемого пучками электронов и протонов. Кроме того, в случае ионов практически отсутствует фон тормозного излучения. Все это значительно повышает точность измерений и позволяет исследовать даже очень малые, так называемые «следовые» примеси отдельных элементов ^{32, 33}.

Подобная методика весьма перспективна в применении к пленочным материалам, приобретающим все большее значение в современной науке и технике.

Приведем еще один пример, показывающий, какие интересные и порой весьма неожиданные возможности для решения материаловедческих задач таит в себе использование различных особенностей взаимодействия ускоренных ионов с веществом.

В настоящее время перед металлургией стоит проблема освоения сплавов титана с легкими элементами (бериллием, бором и т. д.), обладающих большой прочностью и легкостью. Для этих сплавов очень важно знать распределение компонент. К сожалению, индикация элементов легче железа путем возбуждения рентгеновского излучения пучками легких частиц оказалась очень малочувствительной из-за невозможности достичь достаточно хорошего разрешения для низкоэнергетических рентгеновских лучей. Однако ядра бериллия испускают нейтроны под действием α -частиц. Пучок α -частиц с сечением ≈ 10 мкм и нужной энергией можно сравнительно легко получать с помощью электростатического генератора. Используя, далее, детектор нейтронов, можно получить четкую картину структуры сплавов, видеть распределение компонент по поверхности материала, а если изменять энергию α -частиц, то и по его глубине ³⁴. В этой области имеется еще очень много неиспользованных возможностей.

ПРИМЕНЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Подобно другим видам жесткого излучения пучки тяжелых ионов можно использовать для целей радиотерапии, в частности для лечения злокачественных новообразований.

Как известно, простое хирургическое удаление таких образований часто оказывается недостаточным, так как при этом не удается исключить перенос раковых клеток из больных в здоровые части тела (см. рис. 15). Успеху операции существенно способствует предоперационное облучение самой опухоли и прилежащих тканей, а также послеоперационное облуче-

ние близлежащих лимфатических узлов и других органов, где наиболее вероятно метастазирование. К сожалению, такие широко используемые в медицинской практике типы радиации, как рентгеновские лучи, γ -излучение, потоки электронов и нейтронов, как правило, не удается сфокусировать так, чтобы поразить лишь больной участок тела, не подвергая при этом значительному и весьма вредному облучению и другие его части.

Намного лучшее дозное распределение имеют пучки высокоэнергетических протонов и π -мезонов (рис. 18). Весьма перспективными в этом отношении являются также тяжелые ионы. Как уже отмечалось в преды-

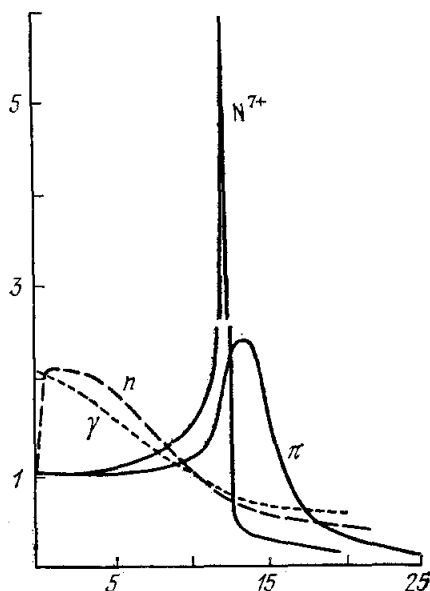


Рис. 18. Экспериментальные распределения радиационной дозы в ткани, облученной γ -лучами ^{60}Co , низкоэнергетическими нейтронами (n), пучком π -мезонов с энергией 65 Мэв и семизарядными ионами азота с энергией 12,3 Гэв/нуклон $^{14}\text{N}^{7+}$.

Во всех случаях доза на поверхности нормирована на единицу.

дущих разделах, высокоэнергетические ионы обладают свойством передавать основную часть своей энергии лишь очень небольшому участку среды в конце пробега. Это позволяет использовать пучки тяжелых ионов для радиотерапии весьма ограниченных участков человеческого тела с минимальным повреждением окружающих тканей. Кроме того, благодаря очень высокой степени ионизации, создаваемой тяжелыми ионами перед их остановкой, поражение клеток происходит независимо от того, какова в них концентрация кислорода. В то время, как эффективность других, относительно слабо ионизирующих видов радиации (в том числе и пучков протонов), в несколько раз снижается во внутренних, более бедных кислородом областях опухоли, тяжелые ионы поражают эти части опухоли столь же эффективно, как и ее периферию ^{7, 35-39}.

Механизм кислородного эффекта весьма сложен. В значительной мере он связан с тем, что при недостатке кислорода радиационно поврежденные части молекул успевают рекомбинировать раньше, чем происходит их окисление, приводящее к необратимым изменениям и последующей

гибели клеток. Возможно, существенную роль при этом играет не только степень радиационного повреждения, но также скорость и величина электрического заряда ионизирующей частицы, так как от этого зависит число повреждений клеток δ -электронами, а эти повреждения, по-видимому, более подвержены процессам окисления, чем радиационные повреждения в центральной части канала ионизации ⁷. Использование тяжелых ионов с различной массой, энергией и зарядом открывает весьма многообещающие возможности в исследовании этого сложного комплекса явлений.

Вместе с тем, испытывая неупругие взаимодействия с ядрами различных элементов, входящих в состав биологических тканей, тяжелые ионы в свою очередь испускают энергичные ядерные частицы (π , n , p , α) и расщепляются на более легкие осколки, имеющие значительные пробеги

в прилегающих тканях и ухудшающие распределение дозного поля. Для очень тяжелых ионов поглощаемая тканями доза по мере углубления в тело может даже уменьшаться — подобно тому, как это имеет место для γ -квантов и нейтронов. Однако в случае «умеренно тяжелых» ионов, например для высокоэнергетических ионов азота (см. рис. 18), радиационный эффект имеет достаточно узкий максимум, глубину которого в теле можно изменять, подбирая соответствующим образом энергию и тип иона.

Суммарное действие сложных ядерных, ионизационных и биохимических процессов, протекающих в живых тканях под действием тяжелых ионов, $\frac{1}{2}$ остается еще весьма неясным и нуждается в детальном изучении.

Исследование этих вопросов в настоящее время привлекает особое внимание в связи с вопросом конструирования защиты организма космонавтов от космических лучей, в состав которых также входят тяжелые ионы. При длительных полетах именно эти ионы определяют основную биологический эффект космического излучения. В частности, как показывают оценки на основе полетов к Луне, если не принимать специальных и очень трудноосуществимых в настоящее время мер, в течение двухлетнего космического путешествия к Марсу проникающей космической радиацией будет разрушено около 0,1 % клеток мозга космонавта, а для некоторых гигантских клеток эта доля составляет даже более 1,5 % ³⁹.

Пучки тяжелых ионов можно использовать не только для поражения злокачественных опухолей, но также и в качестве «ионного скальпеля» для разрушения и бескровного рассечения биологических объектов в тех случаях, когда обычное хирургическое вмешательство нежелательно или весьма затруднено. Этому способствует то обстоятельство, что обладающие большим электрическим зарядом ионы могут быть сфокусированы в чрезвычайно тонкий и в то же время концентрированный пучок. Варьирование энергии и типа ионов позволяет локализовать радиационный эффект на различных глубинах. Это создает исключительные возможности для «хирургических применений» пучков тяжелых ионов.

Концентрированные пучки ионов с сечениями $1-10 \text{ мкм}^2$ могут использоваться для операций внутри отдельных живых клеток, для исследования с помощью активационного анализа распределений различных элементов внутри клетки.

Есть еще один очень важный аспект медицинского применения пучков тяжелых ионов — это создание искусственных изотопов. В настоящее время такие изотопы изготавливаются преимущественно в атомных реакторах, поэтому они получаются нейтроноизбыточными и, как правило, распадаются путем испускания электронов. Под действием тяжелых ионов образуется большое число самых различных изотопов, в том числе и таких, которые обладают избытком протонов и распадаются с испусканием позитрона. Поскольку аннигиляция этого позитрона порождает два γ -кванта, которые вылетают почти точно в противоположных направлениях, это позволяет весьма точно определить область, где испускаются позитроны и где, следовательно, сконцентрировался протоноизбыточный изотоп. На этой основе разработана диагностика и методы лечения заболеваний мозга и других труднодоступных областей человеческого тела. Большой набор различных изотопов, которые можно получать в пучках тяжелых ионов, позволит в каждом конкретном клиническом случае выбрать наиболее подходящий изотоп, радиационный эффект и время жизни которого давали бы желаемый результат с минимальными побочными явлениями.

Даже в случае уже освоенных и широко используемых изотопов применение пучков тяжелых ионов может оказаться весьма выгодным,

поскольку с их помощью иногда удается избежать длинной цепочки радиационных превращений, с помощью которой получается тот или иной изотоп в настоящее время. Таким путем можно существенно упростить и удешевить производство некоторых изотопов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы перечислили лишь некоторые наиболее интересные и важные, по нашему мнению, возможности практического применения пучков тяжелых ионов, однако уже отсюда видна исключительная перспективность этого направления «тонкой ядерной технологии», позволяющего уже сегодня эффективно решать многие насущно необходимые задачи и поставить ряд новых чрезвычайно важных и актуальных проблем. Часть этих проблем может быть решена с помощью уже существующих ускорителей тяжелых ионов, для решения других требуются новые ускорители, которые позволили бы иметь более интенсивные пучки более высокоэнергетических ионов всех элементов вплоть до самых тяжелых.

Объединенный институт ядерных исследований,
Дубна

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. R. D. Standley, W. M. Gibson, J. W. Rodgers, Optical Society of America Meeting, 5—8 April, 1971, p. 37.
2. В. Л. Гинзбург, УФН 95, 91 (1968).
3. С. И. Цыпкин, Р. С. Чуднова, ФТТ 13, 3088 (1971).
4. С. И. Цыпкин, *ibid.* 14, 942 (1972).
5. G. Ischenko, H. Mayer, H. Voit, B. Besslein, E. Haindl, Zs. Phys. 256, 176 (1972).
6. Proc. of the Symposium «Radiation Damage in Reactor Materials», Vienna IAEA, 1969.
7. Proc. of BNES European Conference on Voids Formed by Irradiation of Reactor Materials, Reading University, 1971.
8. R. G. Shewmon, Science 173, 987 (1971).
9. Oak Ridge National Laboratory Report, 1972. Предложение о создании нового ускорителя тяжелых ионов.
10. R. S. Nelson, D. J. Mazey, J. A. Hudson, J. Nucl. Mat. 37, 1 (1970).
11. J. A. Hudson, D. J. Mazey, R. S. Nelson, *ibid.*, 41, 241 (1971).
12. R. L. Fleischer, P. B. Price, R. M. Walker, Science 149, 383 (1965).
13. P. B. Price, R. L. Fleischer, Ann. Rev. Sci. 21, 295 (1971).
14. Г. Н. Флеров, В. П. Перельгин, Н. Отгонсүрен, АЭ 33, 981 (1972).
15. R. L. Fleischer, H. W. Alter, S. C. Furman, P. B. Price, R. M. Walker, Science 178, 257 (1972).
16. Proc. of the Intern. Topical Conference on Nuclear Track Registration in Insulation Solids and Applications, Clermont-Ferrand, 1969.
17. Millipore Catalogue MC/1-1970, Millipore Corporation, Bedford, Mass.
18. И. В. Петрянов, В. И. Козлов, П. И. Басманов, Б. И. Огородников, Волокнистые фильтрующие материалы ФП, М., «Знание», 1968.
19. Nuclepore, Specifications and Physical Properties. Form SPP 10M 5/73, Nuclepore Corporation, Pleasanton, Calif.
20. K. P. Spurny, J. P. Lodge, E. R. Frank, D. C. Sheesley, Environ. Sci. Technol. 3, 453, 464 (1969).
21. P. L. Fleischer, P. B. Price, E. M. Symes, Science 143, 249 (1964).
22. S. H. Seal, Cancer 17, 637 (1964).
23. M. I. Gregersen, C. A. Bryant, W. E. Hammerle, S. Usami, S. Chien, Science 157, 825 (1967).
24. S. Chien, S. Usami, R. J. Dellenback, M. I. Gregersen, *ibid.*, p. 827.
25. S. Chien, S. Usami, R. J. Dellenback, M. I. Gregersen, L. B. Nanninga, M. M. Guest, *ibid.*, p. 829.
26. A. J. Reynaud, E. B. King, Acta Cytol. 11, 289 (1967).

27. З. Е. Jansson, В. Коск, О. Wegelius, *Experientia* **23**, 407 (1967).
 28. Е. В. King, W. M. Russel, *Acta Cytol.* **11**, 319 (1967).
 29. М. Г. Каганер, Тепловая изоляция в технике низких температур, М., «Машиностроение», 1966.
 30. В. И. Веркин, Р. С. Михальченко, В. А. Павлюк, Я. С. Комиссаров, А. Г. Гержин, В. Ф. Гетманец, *ИФЖ* **20** (6), 27 (1971).
 31. R. W. Deblois, C. P. Bean, *Rev. Sci. Instr.* **41**, 909 (1970).
 32. F. W. Saris, *Characteristic X-ray Production by Heavy Ion-atom Collisions*, Proefschrift, Leiden, 1942.
 33. W. D. Metz, *Science* **177**, 156 (1972).
 34. Г. Н. Флеров, Препринт ОИЯИ Р7-7571, Дубна, 1973.
 35. Lawrence Rad. Lab. Report UCRL-1972, Berkeley, 1972.
 36. P. H. Fowler, *Proc. Phys. Soc.* **85**, 1051 (1965).
 37. Л. Л. Гольдин, В. П. Желепов, М. Ф. Ломанов, О. В. Савченко, В. С. Хорошков, *УФН* **110**, 77 (1973).
 38. A. L. Hammond, *Science* **175**, 1230 (1972).
 39. G. M. Comstock, R. L. Fleischer, W. R. Giard, H. R. Hart, G. E. Nichols, P. B. Price, *ibid.* **172**, 154 (1971).
-