

Ф-716

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



12/2-74

P14 - 7754

1823/2-74

Г.Н.Флеров, В.С.Барашенков

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПУЧКОВ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

1974

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P14 - 7754

Г.Н.Флеров, В.С.Барашенков

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПУЧКОВ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Направлено в УФН

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 пятидесятых годов вскоре после того, как было установлено, что при атомных взрывах происходят интенсивные взаимодействия ионов воздуха. В 1960 году был запущен ускоритель тяжелых ионов в Дубне, позволивший получить интенсивные пучки ускоренных 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, даст пучки еще более тяжелых ионов, вплоть до ксенона ($Z = 54$), с энергией около одного миллиарда электрон-вольт. В США недавно закончена реконструкция линейного ускорителя "СУПЕРХАЙМАК", который также может ускорять высокоэнергетические ионы ксенона. Еще более мощный ускоритель "МНИМАК", который позволит ускорять все ядра периодической таблицы Менделеева, в том числе и уран, создается сейчас

в Западной Германии. Кроме того, на ускорение тяжелых ионов переведен 6-гэВный ускоритель протонов в Беркли и готовится перевод 10-гэВного синхрофазотрона в Дубне. 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 неизведанные 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 статических свойств таких объектов мы встретимся с принципиально новыми законами природы. Образовавшись 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 торроида, который образуется, когда очень быстрое легкое ядро выбивает значительное число 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 объек-

тах, поражающих наше воображение. Однако центральной проблемой здесь, несомненно, является сейчас достижение предсказываемой области с $Z = 114, 126$ и т.д. (так называемых "островов стабильности"). Реакции с тяжелыми ионами являются в настоящее время единственной возможностью 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, т.к. 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 изучение 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 Огс 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 — лазеров.

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 механически 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 всего лишь в несколько микрон.

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 удастся 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, как это 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 может производиться 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%-ой 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 геологсразведке, 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 точные слои бора и фосфора (см. рис. I). Эти слои имеют строго заданную форму с четкими границами, что позволяет с очень хорошей точностью измерить одновременно удельную и полную ионизацию и тем самым определить 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 компонент, препятствующей их взаимному проникновению. Обработка слоев компонент пучками тяжелых ионов позволяет "подавить" их несовместимость и получить сплавы с совершенно необычными свойствами прочности, термостойкости, антикоррозийности и т.д. При этом во многих случаях для получения требуемых свойств достаточно 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

эксперимента 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 оптически-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 элементы, 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.

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.

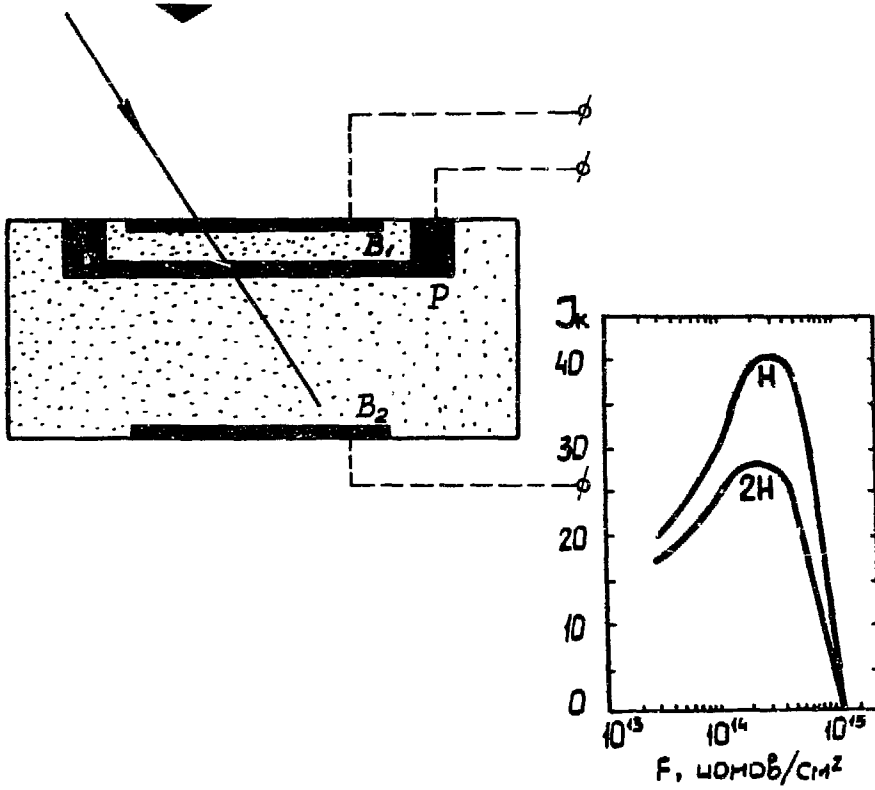


Рис. 2. Зависимость критического тока в фольге из сплава Nb_3Sn (I_k в относит. единицах) от дозы облучения ионами кислорода [5].

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

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 высокотемпературной сверхпроводимости

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 по сравнению с другими металлами становится сверхпроводником при наиболее высокой температуре $T = 9,2^{\circ}\text{K}$, эта температура лишь немногим более чем в два раза превышает температуру кипения жидкого гелия. Переход к "водородным" температурам

дал бы возможность использовать существенно более простую и дешевую криогенную технику (а, может быть, и вообще обойтись без нее) 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 $T = 18,2^\circ K$, а температура, при которой исчезает сверхпроводимость твердого раствора $Nb_3Al + Nb_3Ge$, $T \approx 20^\circ K$ 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 $T < 25-30^\circ K^{1/2}$. Вместе с тем теория еще недостаточно совершенна, чтобы исключить и значительно более высокие температуры, вплоть до $T \approx 40-50^\circ K$.

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 рас-

ширить 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 другими известными нам сейчас способами. 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 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 западногерманских физиков^{/5/}, после облучения тяжелыми ионами характеристики сверхпроводников в ряде случаев, действительно, немного улучшаются. В частности, существенно возрастают значения критических магнитного поля H_c и тока J_k , уничтожающих свойство

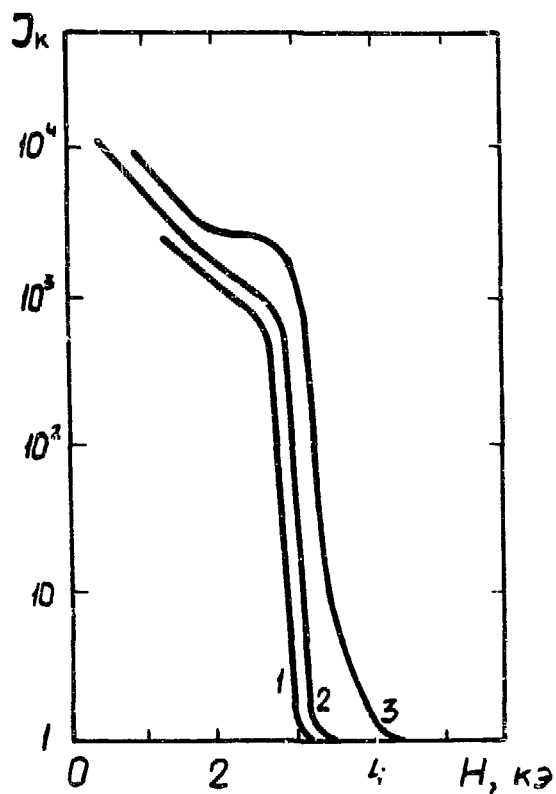


Рис.3. Зависимость критического тока в фольге из ниобия от величины поперечного магнитного поля [3] .

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

сверхпроводимости (см. рис. 2 и 3). Последнее обстоятельство становится особенно важным, если учесть, что значения H_k и T_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 диэлектриков^{/2/}, 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 теплоделяющих элементах 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 числа 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 нержавеющих сталей это соответствует температурам около 400–800°C, 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. Впоследствии 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 в структуре делящегося вещества вызывают осколки деления.

В бриддерных 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 конструктивных материалов на новые, значительно более устойчивые по отношению к радиационным повреждениям, может дать для 10-летней 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 теории, 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 затруд-

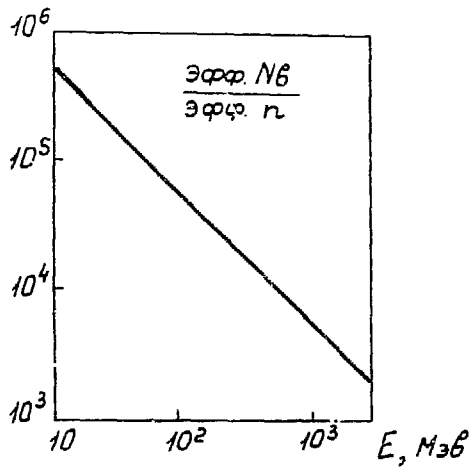


Рис.4. Отношение эффективностей создания радиационных дефектов ионами ниобия с энергией E и 14-мэвными нейтронами^{/9/}. Облучаемый материал - фольга из ниобия. Эффективность определяется как величина, пропорциональная доле кинетической энергии частицы, затрачиваемой на создание радиационных повреждений.

нено 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} нейтронов/ см^2 , а поскольку типичные потоки быстрых нейтронов в современных реакторах составляют $\sim 10^{15}$ н/ см^2 сек, такая доза достигается приблизительно лишь за год; поэтому для определения стойкости материалов за все время проектного выгорания делящегося вещества в быстрых реакторах (интегральная доза $\sim 10^{23}$ н/ см^2) необходимы многие годы.

Что же касается поведения материалов в потоках нейтронов $\geq 10^{16}$ н/ см^2 сек, характерных для проектируемых термоядерных реакторов и бриддерных систем ближайшего будущего, то сведения 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 (см. 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 мка 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

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

реакторе, что значительно упрощает работу 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, см. рис.5 - и, наоборот, повышая в других. Возможность введения в изучаемый материал с помощью пучков 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, нержавеющей стали, 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 набухания будут иметь место в реакторах с большими потоками нейтронов, 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

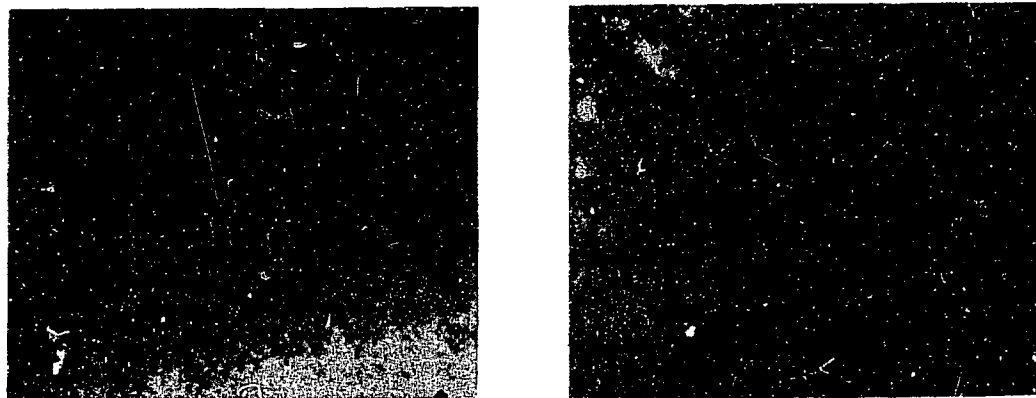


Рис. 5. Влияние примеси атомов гелия на радиационную пористость стали, облученной двухзарядными 20-мэвными ионами углерода $^{12}\text{C}^{2+}$. Доза облучения 10^{17} ионов/см². Левый рисунок относится к образцу, содержащему в тысячу раз больше атомов гелия, чем образец на правом рисунке. С увеличением концентрации гелия поры становятся более мелкими, но их число и соответственно общий объем значительно возрастает.

на первый взгляд, а обладает 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 распуханию.

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 материалов, что, конечно, существенно ограничивает объем получаемой информации. Это связано прежде всего с тем обстоятельством, что в отличие от нейтронов, пробег которых достигает сантиметров и радиационные дефекты от которых распределяются весьма равномерно по значительным толщинам, в случае облучения материала тяжелыми ионами с энергией $\approx 5-10$ 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 микрона. 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 (см. 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 обладают достаточно интенсивными пучками таких ионов с микронными пробегами. Использование же низкоэнергетических ионов с пробегами, меньшими одной-двух тысяч ангстрем, не может воспроизвести картину радиационных повреждений, вызываемых потоком нейтронов, т.к. значительная часть образуемых ионами дефектов "стекает" на поверхность облучаемого материала и поры почти не образуются.

подавляющая часть работ по моделированию радиационных повреждений в тяжелых конструктивных 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 "микроригл" для производства ультрамелких по размерам и уникальных по качеству фильтров.

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 энергетичных 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 травления /12-16/.

Возможны также другие способы химической обработки облученной пленки. Кроме того, в целях ускорения процесса травления облученная ионами пленка, как правило, подвергается еще дополнительному облучению жестким ультрафиолетом, который

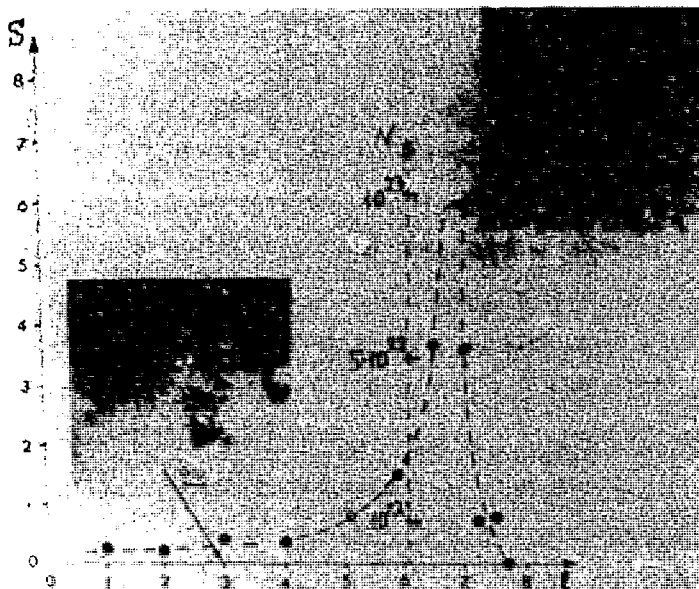


Рис.6. Величина распухания в различных участках пробега двухзарядного 20-мэвного иона углерода в никеле при температуре 525°C [11]. Распухание S определяется как отношение $\Delta V / (V - \Delta V)$, где ΔV - объем радиационных пор, V - объем материала, в котором образовались эти поры. Микрофотографии 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 .

производит дальнейшее расщепление частично уже разорванных молекул с ослабленными связями^{*}). Однако суть процесса во всех случаях остается той же самой: подобно тому, как это имеет место для фотопластики, облученной светом, поврежденные места оказываются наиболее чувствительными к последующей химической обработке, в результате которой и образуются сквозные отверстия.

* 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 2800–3000 Å, большие длины волны почти не дают эффекта, а при меньших длинах начинают сказываться сильные разрушения всей поверхности пленки /16/.

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 облучения пленки, еще до облучения ее ионами, 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.Перельгину и С.П.Третьяковой за обсуждения этих вопросов.

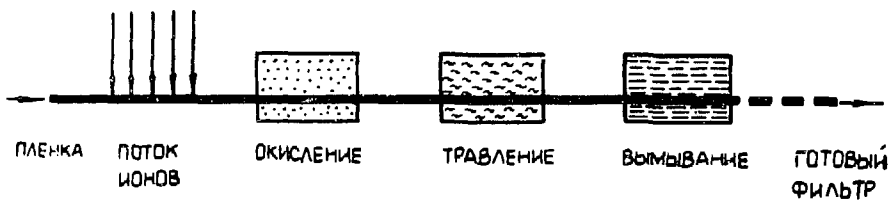


Рис. 7. Процесс изготовления фильтров с помощью пучка ионов.

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

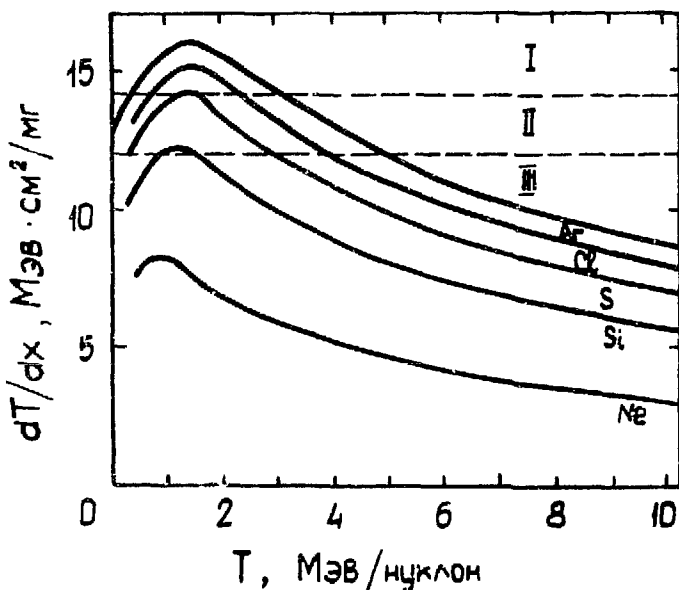


Рис. 8. Потери энергии различными ионами в слюде.

T - первичная энергия иона. Кривые - расчет $|I_2|$.
 Указана область, где после травления прослеживаются следы повреждений (I), переходная область с нечеткими следами (II) и область, где нет следов (III).

На рис.8 для частного случая следы 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, что положение областей I, II, III на рис.8 имеет лишь ориентировочное значение и существенно изменяется в зависимости от способа травления и дополнительной обработки облученного материала).

Сильная зависимость величины отверстий от типа иона хорошо видна также из рис.9.

На следующем рисунке 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 число 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 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.

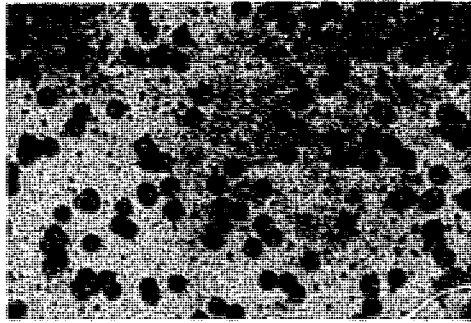


Рис.9. Следы ионов цинка и серы (более мелкие) в семикратном силикатном стекле /14/ .

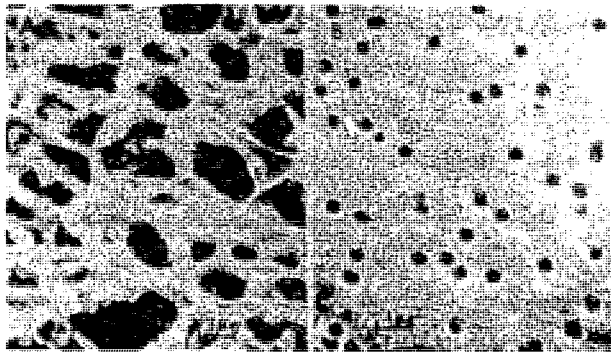


Рис.10. Полученная с помощью электронного микроскопа фотография А) обычного химического фильтра со средним эффективным размером пор 0,45 мкм, В) ядерного фильтра с размером пор 0,4 мкм /15/ .

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

На рис. II, 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 число частиц с размерами, меньшими диаметра пор, может 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 лабиринт сообщающихся полостей, захватывающих частицы, как это имеет место, например, в «миллипорах»^{*/17/}, или сложное переплетение длинных молекулярных волокон, между которыми запутываются фильтруемые частицы (см. рис. I2), или что-либо подобное*).

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

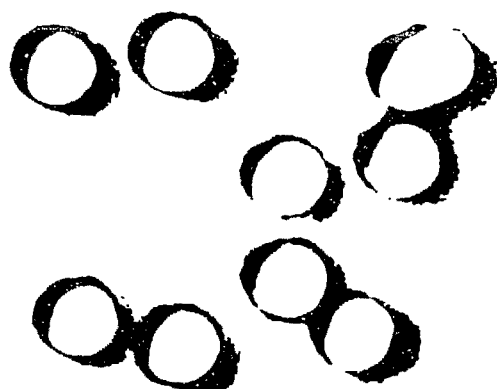


Рис. II. Микрофотография пор в лавсановой пленке, облученной ионами ксенона.

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.

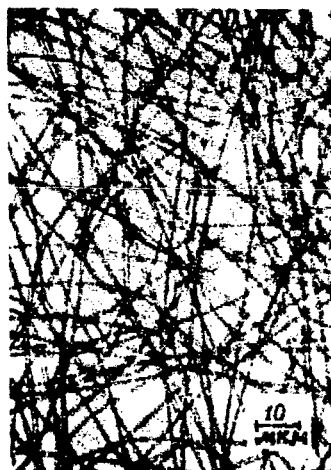


Рис. I2. Структура волокнистых фильтров Петрянова /18/ .

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 противном 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. 22). С первого взгляда может также показаться, что качества ядерных фильтров могут сильно снижать перекрывающиеся поры (такие поры видны, в частности, на рис. IО и II). Поскольку точки, в которых ионы попадают на облучаемую пленку, распределяются по закону случайных чисел, число таких перекрытий быстро возрастет 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 тогда, когда их диаметр становится достаточно большим (см. рис. II); в этих случаях должна быть уменьшена плотность облучения.

Простые гидродинамические расчеты и непосредственные измерения показывают, что выход очищенных нуклеопорами веществ V можно с хорошей точностью считать степенной функцией перепада давления на фильтре ϱ : $V = a \cdot \varrho^b$, где коэффициенты a и b зависят от числа пор N , их диаметров D , а также от температуры и степени чистоты фильтруемого материала. Из рис. I3 видно, что пропускная способность ядерных

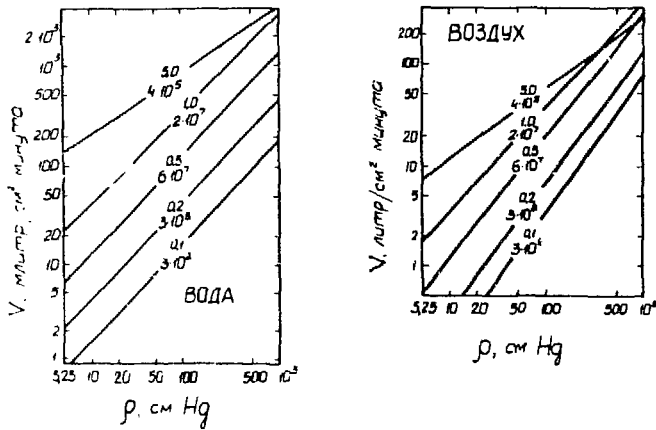


Рис.13. Объемы воды и воздуха, проходящие при комнатной температуре через ядерные фильтры различной пористости^{/19/}.

Числа возле кривых - диаметр пор D [мкм] и их плотность N [в расчете на см^2]. Фильтры изготовлены из полкарбонатовой пленки толщиной 5 мкм в случае $D = 0,1$ мкм и вдвое большей толщины для больших значений D .

фильтров оказывается весьма значительной; например, при давлении в одну атмосферу через 1 дм^2 поверхности фильтра за секунду проходит свыше 20 литров воздуха и свыше 100 см^3 воды, полностью очищенных от частиц с размерами, большими $0,5 \text{ мкм}$. Фильтр, имеющий в десять раз меньшие поры ($D = 500 \text{ \AA}$), пропускает в аналогичных условиях около $0,8$ литра воздуха и $1,2 \text{ см}^3$ воды. Увеличение давления быстро повышает выход отфильтрованных газа и жидкости.

Следует заметить, что для изготовления ядерных фильтров можно использовать не только пучки тяжелых ионов, получаемые на ускорителях, но также и осколки деления, образующиеся при облучении тонкой урановой пластинки (^{235}U) потоком нейтронов из атомного реактора. Эти осколки обладают большим зарядом и массой и весьма эффективно разрушают пластические материалы. Именно таким образом производятся фильтры "нуклеопоры", выпускаемые на мировой рынок американской фирмой "Nuclepore 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 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, имеют не только 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 исключения случаях, когда требуется тонкая и сверхтонкая очистка и разделение каких-либо веществ.

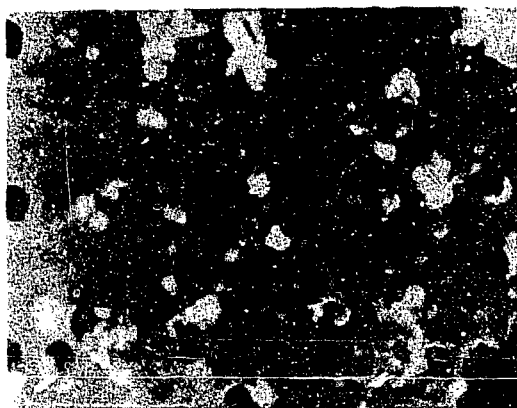
Области, где применение ядерных фильтров может дать в настоящее время большой эффект, чрезвычайно многообразны. Эти фильтры можно с большой эффективностью использовать для получения очищенной от бактерий питьевой воды в полевых условиях, для фильтрации аэрозолей, очистки газообразных и жидких материалов — воды, растворителей, кислот, фоторезистов, — применяемых 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.

^{*}) Поликарбонатный фильтр после суточного пребывания в воде увеличивает свой вес всего лишь на четверть процента [19].

Как уже отмечалось выше, частицы с размерами, превосходящими размер пор, остаются на поверхности фильтра. Это позволяет выполнять количественный и качественный анализ природы и свойств отфильтрованных частиц. Набором фильтров с различными 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, см. рис. 15), для изучения вязкости крови и слипания ее клеток в зависимости от различных условий [21-25], для измерения деформации клеток при цитологических исследованиях и в целях клинической диагностики [26-28] и т.д.

Ядерные фильтры не гигроскопичны, слабо чувствительны к внешним воздействиям, обладают очень малым собственным весом при озолении (1 мг/см^2) и содержат очень мало (или практически вообще не содержат заметных количеств) таких элементов, как Be, Co, Sr, Pb, U (см. таблицу). Это делает фильтры весьма удобными для использования при активационном анализе отфильтрованной компоненты.

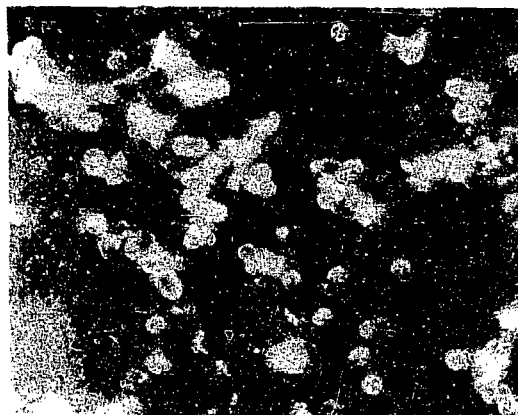
Еще одной интересной областью применения нуклеопор является использование их для "отсеивания" тепловых волн. Как известно, из всех имеющихся в настоящее время термоизоляционных материалов наиболее эффективной является слоистая-вакуумная, состоящая из ряда последовательно расположенных в вакуумной рубашке и термически изолированных друг от друга отражающих экранов с низкой степенью черноты [30, 31]. Однако, благодаря



А



Б



В

Рис. 14. Электронная микрофотография частиц на поверхности фильтра с диаметром пор $R = 20$.

А и Б - результат фильтрации атмосферного воздуха через поры с $R = 0,2$ и 1 мкм; В - фильтрация полистирольных шариков, $R = 0,5$ мкм.

Т А Б Л И Ц А

Содержание некоторых элементов в золе поликарбонатного
фильтра (19).

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

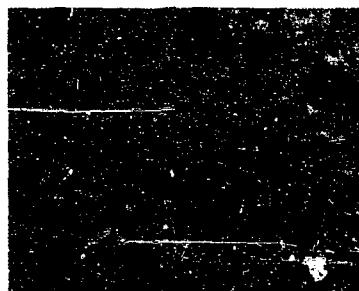


Рис.15. Выделение раковых клеток из тока крови^{/22/}.

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

поверхностным эффектам, внутри этой изоляции сохраняется определенное количество газа, что приводит к значительной теплопередаче (несколько десятков процентов от 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, большие половины диаметра пор (см. 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 $D < 2-2,5 \text{ мкм}$ ^{/31/}. 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 особенно ценными для биологических и медицинских применений. Поскольку размеры бактерий $> 0,2 \text{ мкм}$, то 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 моле-

Рис.16. Количество теплового излучения с длиной волны λ , проникающее сквозь алюминизированный фильтр с диаметром пор d и толщиной $h \gg d$ [31].

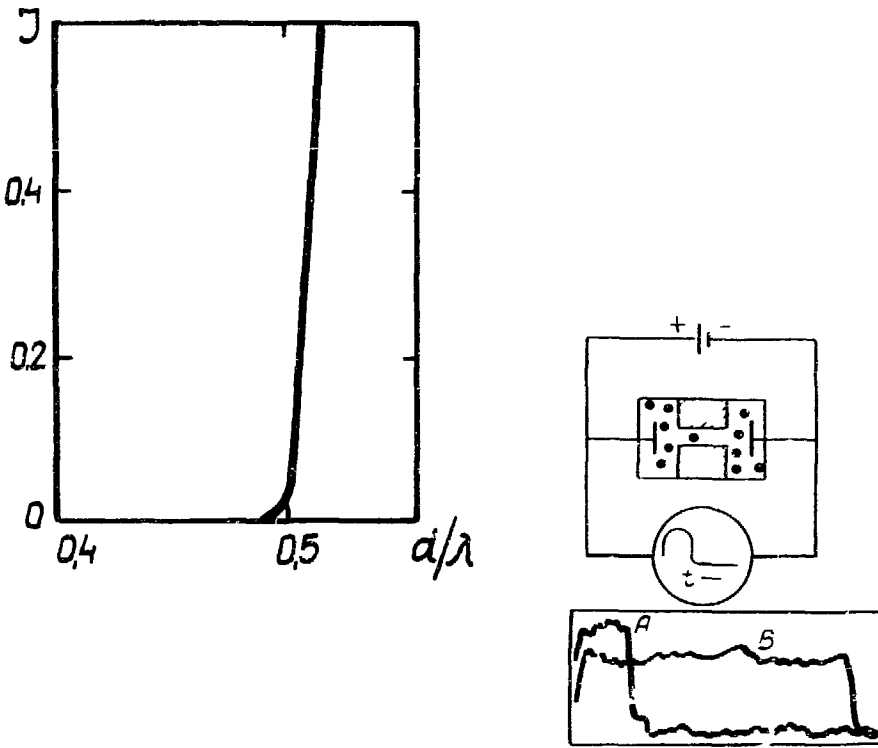


Рис.17. Принципиальная схема прибора, измеряющего число, размер и форму частиц. Внизу показана осциллограмма А) вируса Т2 с размером 1010 \AA и В) полистириновой частицы с размером 910 \AA [29].

кул (минимальный размер вирусов - около 200 \AA , размеры белковых молекул - $40-50 \text{ \AA}$) и т.д.

Весьма перспективным представляется использование ядерных фильтров для холодной стабилизации вина, пива и других жидких пищевых 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 $D \gtrsim 600 \text{ \AA}$, дальнейшее усовершенствование методики позволит, по-видимому, продвинуться в область масштабов $D \approx 200-300 \text{ \AA}$ ^{/29/}.

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

учесть простоту изготовления этих фильтров, низкую стоимость и высокую степень воспроизводимости их свойств при массовом производстве. Применение таких фильтров делает возможными 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 X-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 /37,38/.

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 материаловедче-

ских 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 X-лучей. Однако ядра бериллия испускают нейтроны под действием α -частиц. Пучок альфа-частиц с сечением ≈ 10 мкм и нужной энергии можно сравнительно легко получить с помощью электростатического генератора. Используя далее детектор нейтронов, можно получить четкую картину структуры сплавов, видеть распределение компонент по поверхности материала, а если изменять энергию альфа-частиц, то и по его глубине /39/.

В этой области имеется еще очень много неиспользованных возможностей.

Применение в медицине и биологии

Подобно другим видам жесткого излучения, пучки тяжелых ионов могут использоваться для целей радиотерапии, в частности — для лечения злокачественных новообразований.

Как известно, простое хирургическое удаление таких образований часто оказывается недостаточным, т.к. 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 облучение близлежащих лимфатических узлов и других органов, где наиболее вероятно метастазирование. К сожалению, такие широко используемые в медицинской практике пучки 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 K -мезонов (см.рис.18). Весьма

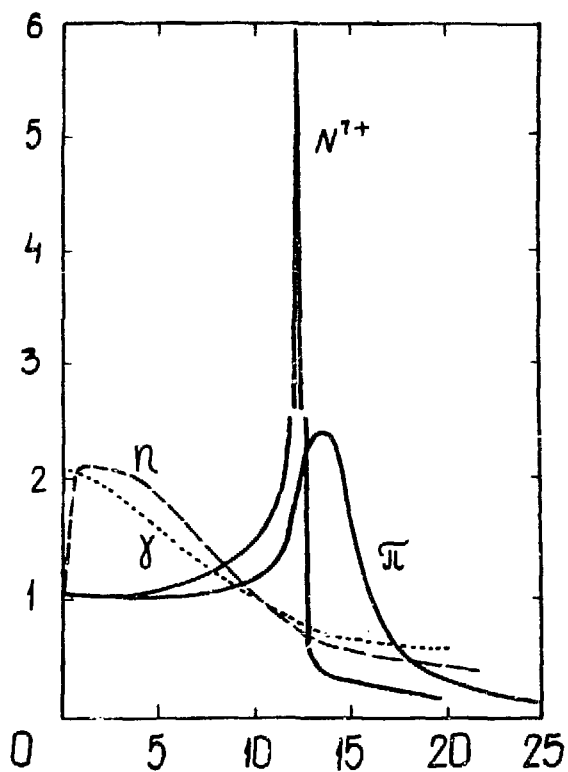


Рис. 18. Экспериментальные распределения радиационной дозы в ткани, облученной γ -лучами ^{60}Co , низкоэнергетическими нейтронами, пучком 65 - мэвных π^- -мезонов и singly заряженными ионами азота с энергией 2,3 Гэв/нуклон 32 . Во всех случаях доза на поверхности нормирована на единицу.

перспективными в этом отношении являются также тяжелые ионы. Как уже отмечалось в предыдущих разделах, высокоэнергетические ионы обладают свойством передавать основную часть своей энергии лишь очень небольшому участку среды в конце своего пути. 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^{/7,32-35/}.

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, т.к. 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, остается еще весьма неясным и нуждается в детальном изучении.

Исследование этих вопросов в настоящее время привлекает особое внимание в связи с задачей конструирования защиты организма космонавтов от космических лучей, в состав которых также входят тяжелые ионы. При длительных полетах именно эти ионы определяют основной биологический эффект космического излучения. В частности, как показывают оценки на основе полетов к Луне, если не принимать специальных и очень трудно осуществимых 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%¹³⁶.

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 друг другу 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 трудно доступных областей человеческого тела. Широкий диапазон 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 удастся 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.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. R.D.Standley, W.M.Gibson, J.W.Rodgers. Optical Society Amer. Meeting, 5-8 April 1971, p.37.
2. В.Л.Гинзбург. УФН, 95, 91 (1968).
3. С.И.Цыпкин, Р.С.Чуднова. Физика тв.тела, 13, 3088 (1971).
4. С.И.Цыпкин. Физика тв.тела, 14, 942 (1972).
5. G.Ischenko, H.Mayer, H.Voit, B.Besalein, E.Haindl. Zs.f.Phys., 256, 176(1972).
6. Proc. of the Symposium "Radiation Damage in Reactor Materials", IAEA, Vienna, 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. Предложение о создании нового ускорителя тяжелых ионов;
Oak Ridge National Laboratory Report, 1972.
10. R.S.Nelson, D.J.Mazey, J.A.Hudson. Journ.of Nucl.Materials 37, 1(1970).
11. J.A.Hudson, D.J.Mazey, R.S.Nelson. Journ. of Nucl. Materials 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.Перелыгин. Атомная Энергия, 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 Conf. 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, Изд-во "Знание", М., 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. Science, 157, 827(1967).
25. S.Chien, S.Usami, R.J.Dellenback, M.I.Gregersen, L.B.Nannipiza, M.M.Guest. Science, 157, 829(1967).
26. A.J.Reynaud, F.B.King. Acta Cytol., 11, 289(1967).
27. S.E.Jansson, B.Kock, O.Wegelius. Experientia, 23, 407(1967).
28. E.B.King, W.M.Russel. Acta Cytol., 11, 319(1967).
29. E.W.DeBlois, G.P.Bean. Rev. Sci. Instr., 41, 909(1970).
30. М.Г. Лганер. Тепловая изоляция в технике низких температур, Изд-во "Машиностроение", М., 1966.
31. Б.И.Веркин, Р.С.Михальченко, В.А.Павлюк, Я.С.Комиссаров, А.Г.Гержин, В.Ф.Гетманец. Инженерно-физич. журнал, 20, № 6, 1971.

32. Lawrence Radiation Lab. Rep. UCRL-1972, Berkeley.
33. P.H.Fowler. Proc. Phys.Soc., 85, 1051(1965).
34. Л.Л.Гольдин, В.П.Джелепов, М.Ф.Ломанов, О.В.Савченко,
В.С.Хорошков. УФН,110, 77 (1973).
35. A.L.Hammond. Science 175, 1230(1972).
36. G.M.Cornstrock, R.L.Fleischer, W.R.Giard, H.R.Hart, G.E.Nichols,
F.B.Price. Science 172, 154(1971).
37. F.W.Saris. Characteristic X-ray production by heavy ion-
atom collisions . Proefschrift, Leiden, 1942.
38. W.D.Metz. Science,177, 156 (1972).
39. Г.Н.Флеров. Препринт ОИЯИ Р7-757Г, Дубна, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 февраля 1974 года.