

и горячей партии мало отличается (0,665 и 0,686), но уменьшается примерно на 20% по сравнению с холодной партией. Для бетона на жидком стекле тангенс угла уменьшается на 13% для горячей партии и на 34% для облученной по сравнению с холодной партией.

Из данных настоящей работы следует, что образцы хромитового бетона в результате облучения потоком $(2 \div 2,4) \cdot 10^{21}$ нейтр/см² при температуре 200—550° С сохраняют достаточно высокую прочность и упругие свойства. Кроме того, такие характеристики бетона, как теплопроводность и коэффициент температурного расширения, заметно не меняются. Следовательно, радиационная стойкость данного типа бетона не ограничивает его применения в конструкциях тепловой защиты ядерного реактора.

В настоящее время продолжают работы по изучению влияния облучения на усадку бетонов и их прочностные и упруго-пластические характеристики.

В заключение авторы выражают благодарность А. Н. Комаровскому, по инициативе которого были проведены указанные исследования, а также А. Н. Воробьеву, В. Ф. Гуляевой, М. Я. Кулаковскому, П. Г. Пинчуку и В. И. Савицкому за помощь в работе.

Поступила в Редакцию 8/XII 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. Clark. Hanford Works, HW-56495, July 31, 1958.
2. J. Struct. Div. Proc. Amer. Soc. Civil Engrs, NST-I, 123 (1962).
3. Б. Прайс, К. Хортон, К. Спинни. Защита от ядерных излучений. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
4. В. Б. Дубровский и др. «Атомная энергия», 19, 524 (1965).
5. К. Д. Некрасов. Опыт применения жароупорного бетона в тепловых агрегатах. М., Госстройиздат, 1957.
6. А. Н. Воробьев и др. «Бетон и железобетон», № 2, 11 (1966).
7. А. Ф. Милованов. Жаростойкий железобетон. М., Госстройиздат, 1963.

Радиоактивный источник мягкого рентгеновского излучения для физических исследований, техники и медицины

Л. Д. ДАНИЛИН, С. И. ЛОВОВ, А. И. ПАВЛОВА-ВЕРЕВКИНА,
В. А. ЦУКЕРМАН

УДК 539.26:615.849

Описаны характеристики и способы получения источников с изотопом железа Fe⁵⁵. Рассматриваются примеры использования мягкого характеристического рентгеновского излучения этого изотопа при исследовании атомной структуры материалов и в контактной микрорентгенографии. Обсуждаются перспективы применения мощных источников с изотопом Fe⁵⁵ в медицине и других исследованиях.

ратов со специальными рентгеновскими трубками с бериллиевыми окнами и монохроматорами.

Характеристики и способы получения

Изотоп Fe⁵⁵ (период полураспада $T_{1/2} = 2,9$ года, энергия перехода $E = 220$ кэв) путем захвата ядром K-электрона превращается в стабильный изотоп марганца Mn⁵⁵. При восстановлении электронных оболочек атома испускается характеристический спектр марганца. Коэффициент образования рентгеновских квантов на один акт захвата K-электрона составляет 0,3 [1]. Радиоактивный распад по схеме K-захвата сопровождается внутренним тормозным рентгеновским излучением, однако его интенсивность по сравнению с интенсивностью характеристического спектра очень мала. Отношение числа испущенных квантов внутреннего тормозного излучения к числу K-захватов при энергии перехода 220 кэв

Железо Fe⁵⁵ относится к сравнительно небольшому числу радиоактивных изотопов, при распаде которых испускается характеристический рентгеновский спектр без жесткого γ -излучения. В последнее время были найдены способы изготовления источников с высоким удельным содержанием этого изотопа, очищенных от посторонних радиоактивных примесей. Это позволяет использовать компактные и удобные в обращении источники с изотопом Fe⁵⁵ для получения характеристического рентгеновского излучения во многих исследованиях и технике взамен громоздких аппа-

составляет $3,8 \cdot 10^{-5}$ [1], поэтому Fe^{55} излучает практически чистый характеристический рентгеновский спектр.

Энергия характеристического рентгеновского излучения марганца сравнительно невелика и составляет для K_{α} -линии $5,9 \text{ кэВ}$ ($\lambda = 2,103 \text{ \AA}$). Ослабление таких мягких рентгеновских лучей веществом весьма значительно. Так, в железной фольге пробег излучения с энергией $5,9 \text{ кэВ}$ (ослабление в e раз) составляет 15 мк .

Существуют различные способы получения Fe^{55} . Бомбардируя протонами с энергией несколько мегавольт стабильный изотоп марганца Mn^{55} , радиоактивное железо можно получить в поверхностных слоях образца по реакции $p - n$. Таким путем на электростатическом генераторе для начальной стадии наших исследований было получено небольшое количество Fe^{55} (около 10 мкюри). Однако для получения источников радиоактивного железа высокой активности этот способ мало пригоден.

Более перспективно облучение изотопа железа Fe^{54} тепловыми нейтронами с использованием ($n - \gamma$)-реакции. К сожалению, одновременно с получением Fe^{55} идет реакция $n - p$, при которой образуется радиоактивный марганец Mn^{54} ($T_{1/2} = 290$ дней, энергия γ -излучения 835 кэВ). Хотя сечение этой реакции почти в 250 раз меньше сечения реакции $n - \gamma$ ($0,011$ и $2,5 \text{ барн}$ соответственно), активность Mn^{54} составляет около 2% активности Fe^{55} . Для реализации основного преимущества Fe^{55} как источника практически чистого характеристического рентгеновского излучения необходимо удалять Mn^{54} и другие возможные радиоактивные примеси.

В нашей работе использовалась фольга из Fe^{54} после облучения потоком тепловых нейтронов интегральной интенсивностью $10^{22} \text{ нейтр/см}^2$. Содержание Fe^{55} составляло около 0,25%, что соответствует удельной активности $5,5 \text{ кюри/г}$. Хроматографическим методом железо было отделено от марганца, кобальта и других примесей и нанесено тонким слоем на подложку. Активность полученных источников составляла около 50 мкюри/см^2 . На γ -спектрограммах очищенных источников обнаружен пик в области 70 кэВ , соответствующий средней энергии внутреннего тормозного рентгеновского излучения Fe^{55} . По расчету, его интенсивность не должна превышать 0,01% интенсивности мягкого характеристического излучения. Кроме того, имелись два небольших пика с энергиями $1,1$ и $1,29 \text{ МэВ}$, соот-

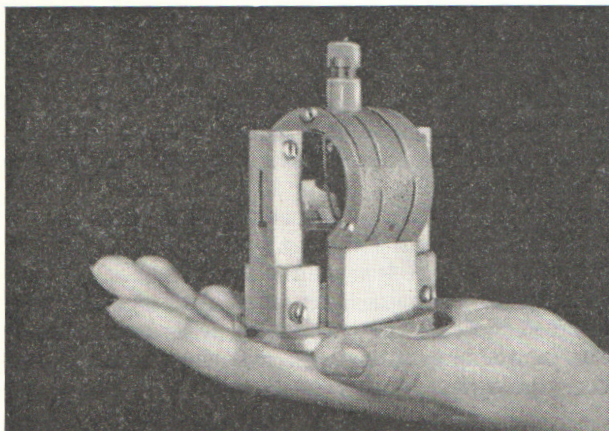
ветствующие излучению Fe^{59} . Активность этого изотопа не превышала $10^{-4}\%$ активности Fe^{55} .

Положительная особенность источников с Fe^{55} — сравнительно простая защита от излучения. Рентгеновские лучи с энергией $5,9 \text{ кэВ}$ ослабляются более чем в 10^6 раз слоем латуни толщиной 1 мм . Целесообразно применять в защитных устройствах титан, селективно поглощающий K -излучение марганца. Хорошо очищенные от радиоактивных примесей источники Fe^{55} безопасно хранить и транспортировать в легких титановых или латунных пеналах (толщина стенки $1-2 \text{ мм}$).

Структурный анализ и микрорентгенография

Характеристическое рентгеновское излучение марганца, испускаемое при распаде Fe^{55} , особенно удобно использовать для исследования атомной структуры вещества. Расчеты и первые опыты, приведенные в работе [2], показали, что при источниках активностью 5 мкюри интерференционные максимумы от железного образца можно зарегистрировать в камере Дебая небольших размеров с экспозицией 5 ч . В работе [3] показано, что преимущество радиоактивного метода рентгеноструктурного анализа наиболее полно реализуется в светосильной съемочной аппаратуре. Были получены рентгенограммы технических металлов в камере с фокусированием широко расходящихся пучков рентгеновских лучей при экспозициях $18-20 \text{ ч}$. В опытах, описанных в работах [2, 3], использовалась железная фольга с Fe^{55} , не очищенная от посторонних радиоактивных примесей, поэтому основное преимущество методики — отсутствие дополнительного фона на рентгенограммах — не было реализовано.

Источники Fe^{55} , очищенные от посторонних радиоактивных примесей, позволяют упростить и усовершенствовать приборы для радиоактивного рентгеноструктурного анализа. На рис. 1 показан общий вид камеры для подобных исследований, разработанной В. Н. Фуниным и В. А. Цукерманом и получившей сокращенное название «Рада». Здесь, как и в работе [3], использован светосильный метод аксиального фокусирования широко расходящихся пучков рентгеновских лучей по Престону — Альтшулеру [4]. Камера допускает регистрацию интерференций в диапазоне брэгговских углов $55-82^\circ \theta$. Последнее особенно

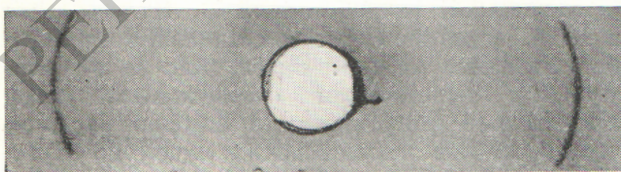


Р и с 1. Аппарат «Рада» для рентгеноструктурного анализа поликристаллических образцов.

существенно для точного определения периодов атомных решеток.

На рис. 2 показана рентгенограмма хорошо отожженного железного образца, полученная на установке «Рада». Зарегистрированные интерференционные кольца представляют собой отражения от атомных плоскостей (112) α -железа. В принятой геометрии съемки угловое разрешение в 1,33 раза превышает угловое разрешение стандартных камер Дебая с кассетой диаметром 57,3 мм.

Радиоактивные источники характеристического излучения для рентгеноструктурных исследований обладают рядом положительных особенностей по сравнению с традиционной техникой. Размеры радиоактивной структурной камеры во много раз меньше размеров обычной установки с рентгеновской трубкой и трансформатором высокого напряжения. Анализ не требует источника электрической энергии, что позволяет получать рентгенограммы в полевой обстановке. Облегчаются исследования структуры вещества в специальных случаях — при температурах, близких к абсолютному нулю, в инертных или агрессивных газовых средах. В подобных условиях компактный источник радиоактивного железа вводится непосредствен-



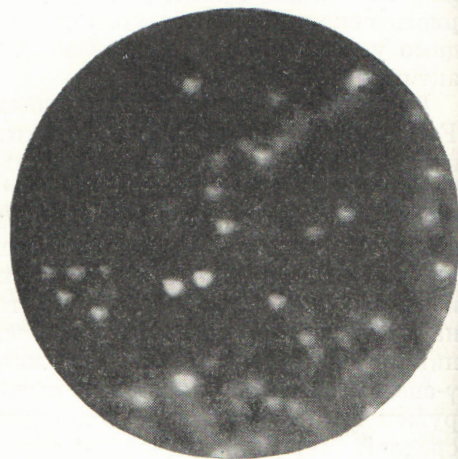
Р и с 2. Рентгенограмма железного образца, полученная на установке «Рада».

но в сосуд Дьюара или камеру, заполненную соответствующим газом.

Изотоп Fe^{55} — удобный источник мягкого рентгеновского излучения для контактного микрорентгенографирования. Этот метод за последние 15 лет получил значительное распространение в металлведении, энтомологии, ботанике и гистологии [5, 6]. Как и при структурном анализе, источником излучения здесь являются рентгеновские трубки с бериллиевыми окнами, работающие при напряжениях 5—10 кв. Расположив тонкий объект в плотном контакте с мелкозернистой фотопластинкой, после облучения мягкими рентгеновскими лучами можно получить четкое и контрастное изображение внутренних деталей. Проявленная фотопластинка увеличивается в 10—100 раз обычным оптическим путем.

Замена рентгеновской трубки при контактном микрорентгенографировании источником с очищенным Fe^{55} оказалась вполне оправданной. Устройство, предназначенное для таких исследований, очень несложно. Это полый металлический цилиндр, на нижнем основании которого помещена фотопластинка с плотно прижатым к ней объектом. На расстоянии 10 см от фотопластинки расположен источник Fe^{55} диаметром 5 мм. При такой геометрии съемки размытие изображения на рентгенограмме для объектов толщиной до 0,1 мм не превышает 5 мк.

На рис. 3—5 приведено несколько микрорентгенограмм, полученных в описанных условиях. Съемки выполнялись на фотопластинках



Р и с 3. Репродукция микрорентгенограммы алюминий-цинкового сплава. Толщина темплета 0,08 мм; светлые места соответствуют дендритам марганца, сильно ослабляющим излучение $\times 30$.

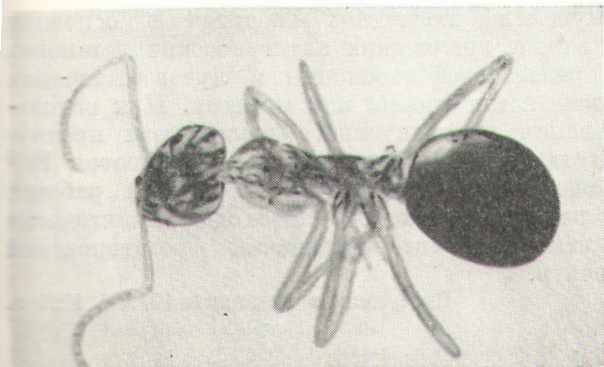


Рис. 4. Отпечаток микрорентгенограммы муравья. Источник излучения Fe^{55} . Оптическое увеличение $\times 13$.

НИКФИ типа МР (разрешение — 250 линий на 1 мм).

На рентгенограмме темплета из алюминий-цинкового сплава хорошо выявляются расположение и форма цинковых дендритов (см. рис. 3). Отчетливо видны внутренние органы муравья (см. рис. 4) и расположение капилляров вблизи ножки кленового листа (см. рис. 5).

Характеристическое излучение марганца особенно удобно использовать при микрорентгенографировании костных срезов. Благодаря значительному ослаблению излучения марганца в кальции на фотографиях можно получить четкое и контрастное изображение распределения этого элемента в костной ткани.

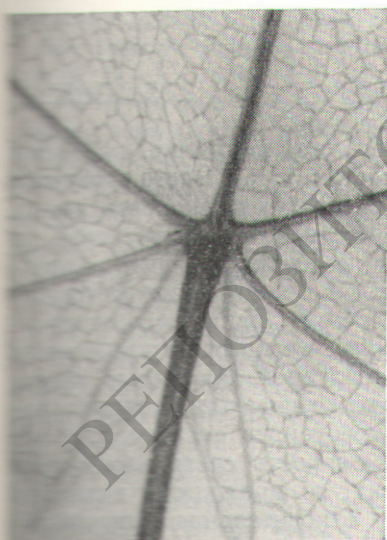


Рис. 5. Отпечаток микрорентгенограммы кленового листа. Источник излучения Fe^{55} . Оптическое увеличение $\times 13$.

Применение в медицине и технике

Оценки и дозиметрические измерения показали, что наши источники площадью 1 см^2 с содержанием $0,25\%$ Fe^{55} при непосредственном контакте с облучаемым объектом обеспечивают дозу около 150 р/ч . В настоящее время ясны пути приготовления источников более высокой удельной активности. При облучении потоком тепловых нейтронов интегральной интенсивностью $10^{22}\text{ нейтр/см}^2$ содержание Fe^{55} возрастает до $2\text{--}3\%$, а доза рентгеновского излучения — до 1500 р/ч . При обогащении источника изотопом Fe^{55} до $20\text{--}30\%$ доза излучения превысит $15\,000\text{ р/ч}$.

Такие мощные излучатели мягких рентгеновских лучей представляют определенный интерес для рентгенотерапии. По глубине проникновения и лечебному действию характеристическое излучение марганца с энергией $5,9\text{ кэв}$ соответствует тормозному излучению рентгеновской трубки, работающей в диапазоне напряжений $10\text{--}15\text{ кэ}$. Рентгеновские лучи с такой энергией (лучи Букки) широко используются в рентгенотерапии при лечении экзем и других кожных заболеваний. Качественно не отличаясь от тормозного излучения установок для Букки-терапии, излучатели из радиоактивного железа представляют ряд удобств и новых возможностей врачу-рентгенологу. Отпадает необходимость в специальных терапевтических трубках с окнами, прозрачными для мягких рентгеновских лучей. Диск, на поверхность которого нанесен слой радиоактивного железа, может быть введен в полости, в которые трудно поместить рентгеновскую трубку. Сравнительно просто можно облучать экземы или злокачественные новообразования в полости рта, на глазном яблоке и т. д. Помимо способа аппликаций, когда активная поверхность источника располагается в непосредственной близости к облучаемому участку, возможны и другие приемы, например введение стальных игл, содержащих Fe^{55} , в опухоль больного.

Весьма удобным представляется использование мощных источников радиоактивного железа для флуоресцентного рентгеноспектрального анализа в полевых условиях. В литературе описаны попытки применения для подобных работ радиоактивного туллия [7]. Однако это не получило сколько-нибудь широкого практического распространения. Радиоактивное железо можно эффективно использовать для возбуждения К-спектров хрома, ванадия, титана,

скандия, кальция и других элементов, атомные номера которых меньше атомного номера марганца. Возможно также возбуждение L_1 -спектров у элементов с энергией L -уровня, меньшей энергии K -спектра марганца (лантан, барий, цезий и пр.).

Изотоп Fe^{55} — удобный источник мягкого рентгеновского излучения для измерения толщин тонких пленок и покрытий. В работе [8] в качестве радиоактивного источника для таких измерений использовались цирконий-третиевые мишени. Тормозное рентгеновское излучение, возникающее при взаимодействии β -частиц трития с атомами циркония, либо непосредственно пропускать через контролируемую фольгу, либо возбуждало характеристический рентгеновский спектр вторичной (флуоресцентной) мишени. Интенсивность получаемых таким путем мягких рентгеновских лучей на несколько порядков меньше интенсивности характеристического спектра Fe^{55} . Поэтому использование последнего при измерении толщин тонких фольг и покрытий упрощает регистрирующую аппаратуру, повышает точность и сокращает время контроля.

Отметим в заключение, что по разнообразию применения Fe^{55} в физике, медицине и технике он не уступает таким известным радиоактивным изотопам, как Co^{60} и Cs^{137} . Практические пре-

имущества последних сводятся в основном к замене громоздких электрических установок в рентгенодефектоскопии и лучевой терапии более компактными источниками. При использовании радиоактивного железа эти преимущества сохраняются. Кроме того, изотоп Fe^{55} может быть использован во многих работах и исследованиях, где необходим практически чистый характеристический рентгеновский спектр.

Поступила в Редакцию 10/XII 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Стародубцев, А. М. Романов. Превращения ядер и атомная оболочка. Ташкент, Изд-во АН УзССР, 1958.
2. С. И. Лобов, В. А. Цукерман. «Докл. АН СССР», 165, вып. 6 (1965).
3. С. И. Лобов, В. Н. Фунин, В. А. Цукерман. «Кристаллография», № 4, 599 (1966).
4. Л. В. Альтшулер. ЖЭТФ, 13, вып. 11—12 (1943).
5. Д. В. Рогоберидзе. «Усп. физ. наук», 50, вып. 4, 577 (1953).
6. V. Cosslett et al. X-Ray Microscopy and Micro-radiography. N.Y., 1957.
7. К. И. Нарбутт, Р. Л. Баринский, И. С. Смирнова. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 24, вып. 4, 354 (1960).
8. С. И. Лобов, В. А. Цукерман. «Приборы и техника эксперимента», № 4, 164 (1963).

Цифровая следящая система для ядерной техники

ПАВЕЛ КОВАНИЦ, ЯРОСЛАВ РЫГЛ

(Институт ядерных исследований Чехословацкой академии наук, Ржеж под Прагой, ЧССР)

УДК 621.039.564

В работе приведено описание цифрового устройства, предназначенного для измерения относительного отклонения скорости счета импульсов от заданного значения. Такое устройство можно использовать для создания цифровых следящих систем, работающих с импульсными детекторами, например для измерения и автоматического регулирования мощности и периода реактора.

Импульсный режим работы детекторов ионизирующих излучений наиболее часто используется в ядерной технике: при измерении уровней ионизирующих излучений, проводимых с целью обеспечения безопасности условий труда; для контроля работы ядерного реактора и т. д. В этих случаях измеряемый параметр характеризуется скоростью счета импульсов. Скорость счета импульсов является также выходной информацией от датчиков различ-

ных физических величин (например, давления газа, расхода жидкости и т. п.). Часто требуется измерить не только среднюю скорость счета, но и отклонение средней скорости счета от заданного значения, особенно в случае использования измерителя скорости счета (интенсиметра) в следящей системе. Такая система предназначена для автоматического регулирования величины, характеризуемой скоростью счета, или для сигнализации отклонений контролируемого процесса от требуемого состояния. Если при этом средняя скорость счета изменяться в широких пределах, то приходится измерять не абсолютное, а относительное отклонение средней скорости счета от требуемого значения, чтобы сохранить независимость коэффициента усиления следящей системы от значения средней скорости счета входных импульсов.