

## Измерение параметров пучков электронов пироэлектрическим приемником

СТРАКОВСКАЯ Р. Я., СТАСЬ А. Г., КРЕМЕНЧУГСКИЙ Л. С.

В настоящей работе впервые исследована возможность использования пироэлектрических приемников излучения для измерения параметров пучка заряженных частиц — электронов. Так как современные ускорители электронов являются импульсными источниками в широком диапазоне плотности потоков частиц и длительности импульсов, то быстродействующие широкодиапазонные пироэлектрические приемники излучения [1] перспективны для измерения характеристик вышущенного пучка электронов. В отличие от интегрирующих дозиметрических систем с помощью пироэлектрического прибора, благодаря его высокому быстродействию, можно оперативно измерять импульсные характеристики излучения.

Существующие пироэлектрические приемники широко используются в оптическом диапазоне длины волн [1], а также для измерения  $\gamma$ -излучения [2]. Однако при детектировании заряженных частиц в отличие от фотонного излучения помимо пироэлектрического заряда возникает также заряд, внесенный заторможенными электронами. Для разделения этих зарядов предложено решение, описанное, например, в работе [3]. Принцип конструктивного решения состоит в том, что поток ускоренных электронов падает на электрод, одновременно являющийся поглотителем. Полностью поглощенный поток энергии электронов создает в поглотителе тепловое возмущение, которое передается пироактивному элементу приемника. Снимаемый с противоположного электрода заряд создает на нагрузочном сопротивлении сигнал, пропорциональный плотности потока энергии электронов. С другой стороны пироэлемента заряд частиц, попавших в поглотитель, создает сигнал, пропорциональный плотности потока частиц. Отношение двух измеренных значений пропорционально средней энергии электронов. При таком конструктивном решении пироэлектрический сигнал определяется тепловым воздействием излучения, которое попадает в пироактивный элемент через переднюю стенку. Таким образом, задача нахождения отклика пироэлектрического приемника на воздействие потока энергии при электронном облучении решается аналогично тому, как это выполняется при измерении в оптическом диапазоне длины волн, если не учитывать вклад тормозного излучения [4].

Реакция детектора на воздействие импульса электронного излучения в адиабатическом режиме работы, когда длительность импульсов мала

по сравнению с длительностью процессов теплоотдачи, может быть найдена из следующей системы уравнений.

1. Уравнение теплового баланса при отсутствии теплопотерь

$$C \frac{d\bar{T}}{dt} = A_1 \alpha W(t) = A_1 \alpha \bar{E}(t) I(t), \quad (1)$$

где  $C$  — теплоемкость приемника (суммарная теплоемкость пироактивного элемента и поглотителя);  $d\bar{T}/dt$  — усредненное по объему изменение температуры приемника во время действия импульса излучения;  $A_1$  — площадь приемника;  $W(t)$  — плотность потока энергии;  $\alpha$  — коэффициент поглощения излучения по энергии;  $\bar{E}(t)$  — средняя энергия электронов;  $I(t)$  — плотность тока в пучке.

2. Выражение для пироэлектрического тока

$$I_{\pi} = A \gamma (d\bar{T}/dt), \quad (2)$$

где  $A$  — площадь электродов приемника;  $\gamma$  — пироэлектрический коэффициент, который равен величине заряда, выделившегося на единичной поверхности обкладок приемника при нагреве на один градус.

3. Уравнение электрической цепи, состоящей из генератора пироэлектрического тока, нагруженного на параллельную  $RC_0$  цепь:

$$\frac{dU}{dt} + \frac{U}{\tau_0} = \frac{I_{\pi}}{C_0}, \quad (3)$$

где  $U = U(t)$  — выходное напряжение;  $C_0$  — емкость приемника;  $R$  — нагрузочное сопротивление;  $\tau_0 = RC_0$ . Решение уравнений (1)–(3) зависит от вида функции  $W(t)$ . Для импульсов прямоугольной формы с амплитудой  $W_0$  и длительностью  $\tau$  решение получается в виде

$$U(t) = \frac{AA_1 \alpha \gamma R}{C} W_0 \left\{ \eta(t) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] - \eta(t - \tau) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t - \tau}{\tau}\right) \right] \right\}, \quad (4)$$

где  $\eta(t)$  — единичная функция [5]. Если  $\tau_0 \ll \tau$ , то сигнал вырастает до максимального значения:

$$U_0 = \frac{AA_1 \alpha \gamma R}{C} W_0. \quad (5)$$

Таким образом, формулы (4) и (5) выражают отклик приемника на импульс прямоугольной формы. Коэффициент преобразования  $S$  [ $B/(Bt \cdot cm^{-2})$ ], полученный из выражения (5),

равен

$$S = \frac{AA_1\alpha\gamma R}{C} \quad (6)$$

Нами проведен анализ диапазона измерений пироэлектрического приемника электронного излучения. Быстродействие приемника ограничено толщиной поглотителя, которая должна выбираться в соответствии с энергией электронов для полного поглощения пучка. Чем больше энергия электронов, тем больше толщина поглотителя, тем хуже быстродействие приемника.

Нижняя граница динамического диапазона измерений плотности потока энергии электронов определяется шумами приемника и коэффициентом преобразования. Верхняя граница зависит от допустимого перегрева приемника, когда линейность амплитудной характеристики не превышает заданной. Поскольку поглощение электронного излучения происходит в слое поглотителя, а затем тепловое возмущение передается чувствительному элементу приемника, который непосредственно примыкает к поглотителю, максимальный прирост температуры в чувствительном элементе не превышает среднего прироста температуры поглотителя.

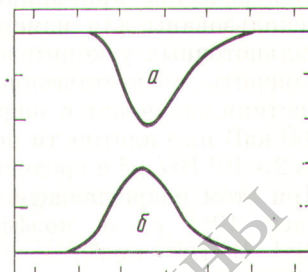
Были изготовлены пироэлектрические приемники излучения на основе поляризованной керамики из цирконата-титаната свинца и алюминиевого поглотителя для измерения параметров пучка электронов энергией до 350 кэВ. Экспериментально установлено, что приемники с металлическими поглотителями толщиной 0,1–0,3 мм удовлетворительно разрешают импульсы длительностью до  $10^{-5}$  с.

Расчеты показывают, что коэффициент преобразования приемника при нагрузке  $10^8$  Ом равен  $\sim 10^{-4}$  В/(Вт · см<sup>-2</sup>), а порог чувствительности  $\sim 50$  мВт/см<sup>2</sup>. Коэффициенты отражения и поглощения электронов для испускаемых материалов поглотителей взяты из работы [6].

Максимальный перенос энергии в импульсе, повышающий температуру приемника на 50°C при толщине поглотителя 0,1 мм, равен 1 Дж/см<sup>2</sup>, а максимальная плотность потока энергии в импульсе  $2 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> при длительности  $5 \cdot 10^{-5}$  с. При этом допустимая средняя плотность потока энергии составляет 1 Вт/см<sup>2</sup>. Для энергии электронов 350 кэВ плотность потока электронов составляет  $10^{12}$ – $10^{19}$  электр./(см<sup>2</sup> · с). Таким образом, для пироэлектрического приемника с поглотителем, предназначенного для измерения параметров пучков энергией электронов 300–400 кэВ, определен диапазон измерений плотности потока энергии и плотности потока частиц. Как видно, перекрывается диапазон измерений в пределах 6–7 порядков.

Разработанные приемники с входным окном 1 см<sup>2</sup> и двумя выходами — пироэлектрическим, пропорциональным плотности потока энергии,

Осциллограмма импульсов напряжения пироэлектрического приемника: *a* — пироэлектрический канал,  $x = 20$  мкс/дел.,  $y = 20$  мВ/дел.; *b* — токовый канал,  $x = 20$  мкс/дел.,  $y = 10$  мВ/дел.



и токовым, пропорциональным плотности потока электронов, — были испытаны на ускорителе с моноэнергетическим пучком электронов при максимальной энергии 300 кэВ и среднем токе в пучке 1–4 мА. Пучок электронов сканировался вдоль раструба с частотой 500–1500 Гц. При этом плотность потока энергии в импульсе  $\sim 10$  Вт/см<sup>2</sup> при токе ускорителя 1 мА, а длительность импульсов  $\sim 10^{-5}$  с.

Измерения проводили при нагрузочном сопротивлении 1 кОм. Измеренный коэффициент преобразования, т. е. отношение выходного сигнала к падающей плотности потока энергии излучения, равен  $(0,90 \pm 0,06) \cdot 10^{-4}$  В/(Вт · см<sup>-2</sup>). Расчетное значение коэффициента преобразования, вычисленное по формуле (6), составляло  $0,95 \cdot 10^{-4}$  В/(Вт · см<sup>-2</sup>). Таким образом, экспериментальные данные соответствуют расчету. На рисунке приведена осциллограмма импульсов напряжения пироэлектрического и токового выходов приемника. Постоянная времени электрической цепи пироэлектрического канала  $5 \cdot 10^{-6}$  с, токового канала  $5 \cdot 10^{-8}$  с. На выходах обоих каналов стояли инвертирующие усилители с одинаковым коэффициентом усиления, равным 100. Направление поляризации выбирали таким образом, чтобы пиросигнал имел направление, противоположное току электронов. Некоторое отличие формы сигналов связано с разницей постоянных времени двух цепей. Отношение амплитуд сигналов двух выходов приемника пропорционально энергии электронов.

Радиационная стойкость использованных для приемника сегнетокерамических материалов достаточно высока —  $> 10^7$  Гр. Кроме того, радиационное воздействие дефибрировано поглотителем. Благодаря наличию поглотителя радиационное действие на приемник оказывает лишь тормозное излучение, интенсивность которого незначительна для электронов относительно низких энергий и поглотителя с низким атомным номером. Испытания на радиационную стойкость в течение 50 ч на ускорителе показали, что при флюенсе  $\sim 5 \cdot 10^{18}$  электр./см<sup>2</sup> характеристики приемников не изменились.

Таким образом, с учетом приведенных расчетов и экспериментов можно заключить, что пиро-

электрические приемники электронов могут быть использованы для измерения параметров пучков сильноточных ускорителей. С их помощью можно измерить энергетические и временные характеристики излучения с энергией электронов до 300—400 кэВ при плотности потока энергии в импульсе до  $2 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> и средней плотности до 1,0 Вт/см<sup>2</sup>. При этом разрешающее время детектора составляет  $10^{-5}$  с, а коэффициент преобразования  $10^{-4}$  В/(Вт · см<sup>-2</sup>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кременчугский Л. С., Ройцина О. В. Пирозлектрические приемники излучения. Киев, Наукова думка, 1979.
2. Кременчугский Л. С., Страковская Р. Я.— Атомная энергия, 1976, т. 41, вып. 3, с. 190.
3. Кременчугский Л. С. и др. Авт. свид. СССР № 496845. Бюл. изобрет., 1979, № 32.
4. Кременчугский Л. С. Сегнетоэлектрические приемники излучения. Киев, Наукова думка, 1971.
5. Anko A. Математика для электро- и радиоинженеров. М., Наука, 1967.
6. Selzer S., Berger M.— Nucl. Instrum. Methods, 1974, v. 119, p. 157.

Поступила в Редакцию 17.03.80

## Рефераты статей

УДК 621.039.587

Митенков Ф. М., Зверева Л. А., Моторов Б. И., Мельников Э. М., Самойлов О. Б. **О применении предохранительного клапана в первом контуре ЯЭУ С ВВЭР.**—Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 308.

Рассмотрены преимущества и недостатки различных способов предотвращения превышения давления выше допустимого первого контура ЯЭУ с ВВЭР. Описаны аварийные ситуации, которые могут привести к повышению давления, указаны способы предотвращения развития аварий, даны примеры наиболее существенных аварийных ситуаций с учетом наложения отказов (рис. 1, список лит. 4 назв.).

УДК 621.039.516.4:519.853.6

Шевелев Я. В., Локшин В. Л., Клименко А. В. **Оптимизация развития топливной промышленности ядерной энергетики.**— Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 310.

В работе сравниваются результаты оптимизации примера развития топливной промышленности ядерной энергетики двумя методами: с помощью удельных затрат и прямой оптимизацией моментов ввода предприятий. Особенность задачи — нелинейная (выпуклая вверх) зависимость капитальных вложений от установленной мощности предприятий.

Показано, что метод прямой оптимизации моментов ввода предприятий позволяет находить лучший план развития топливной промышленности ядерной энергетики (рис. 4, табл. 1, список лит. 20 назв.).

УДК 553.495

Константинов В. М. **К вопросу о классификации месторождений урана, связанных с вулкано-тектоническими депрессиями.**— Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 316.

В качестве класса выделены месторождения урана, связанные с вулкано-тектоническими депрессиями. Установлены три группы месторождений: фундамент, или нижней зоны депрессии, средней зоны депрессии, верхней зоны депрессии. Месторождения объединены в пять подгрупп: в терригенной массе, в эффузивно-осадочных образованиях, в палеовулканических аппаратах и субвулканических интрузиях, в гранитоидах, в осадочных и метаморфических породах геосинклинального комплекса. Путем учета основных структурно-литологических факторов рудоконтроля определены 18 структурно-морфологических типов месторождений. Приведены идеализированная схема рудоконтроля вулкано-тектонической депрессии и рассмотрены ее изменения при различных эрозионных срезах. Сделан вывод о практическом применении классификации (рис. 2, табл. 1, список лит. 7 назв.).

УДК 620.187:621.039.531

Горький И. В., Паршин А. М. **Особенности структурных превращений и радиационное распухание конструкционных сплавов и сталей.**— Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 319.

Рассмотрены закономерности радиационного распухания аустенитных хромоникелевых сталей и сплавов в зависимости от содержания в них никеля и особенностей структурных превращений на ранних стадиях распада твердых растворов. Высокая сопротивляемость ваннадисперсионному распуханию высоконикелевых аустенитных сплавов объясняется усилением рекомбинации точечных дефектов в упругоискаженных областях, образующихся на границах раздела предвыделение — матрица. Проанализирована сопротивляемость радиационному распуханию сплавов и сталей с г. п. у- и о. п. к-решетками. Сделано предположение, что высокое сопротивление этих материалов радиационному распуханию также нужно связывать с особенностями протекания ранних стадий распада (рис. 7, список лит. 13 назв.).

УДК 539.171.016:539.2:581.3

Ганн В. В., Вайсфельд А. М., Ямницкий В. А. **О влиянии подпороговых процессов на самодиффузию в металлах под облучением.**— Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 324.

Рассматривается влияние подпороговых процессов на диффузионные явления в материалах под облучением за счет механизма прямой передачи энергии от движущихся атомов к диффузунту. В связи с коллективным характером развития каскада вблизи его конца применена динамическая модель кристалла. Для никеля, облучаемого частицами различного сорта, получена концентрация нестабильных дефектов при непрерывном облучении и установлено, что вклад нестабильных дефектов в механизм самодиффузии становится определяющим при температуре ниже 60 К (рис. 5, табл. 1, список лит. 6 назв.).

УДК 621.039.538:539.125.52

Болытко В. В., Вырский М. Ю., Илюшкин А. И., Машкович В. П., Сахаров В. К., Строгованов А. А. **Исследование погрешности расчета полей излучения в средах.**— Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 328.

Исследована чувствительность расчетов к изменению входных параметров задачи переноса излучения в средах и оценены погрешности расчетов из-за неопределенности исходных данных. Для решения этих задач разработан комплекс программ ЗАКАТ. Результаты исследований иллюстрируются задачей формирования поглощенной в ткани дозы нейтронов за сталь-графитовой композицией, типичной для быстрых реакторов (рис. 4, список лит. 16 назв.).

УДК 577.3:539.12.04+629.7

Воробьев Е. И., Ковалев Е. Е., Петров В. М., Сакочич В. А. **Нормативы радиационной безопасности для космических полетов.**— Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 331.

Изложены принципы нормирования воздействия космической радиации, принятые в СССР при обеспечении космических полетов. Они основаны на регламентировании уровня облучения в зависимости от длительности полета и установлении требований к надежности противорадиационной защиты космического аппарата. Приведен пример оценки радиационной опасности для случая полета орбитальной станции. Предложено возможное направление дальнейших работ по нормированию воздействия космических излучений (табл. 2, список лит. 4 назв.).

УДК 621.039:502.55+543.52

Якунин М. И. **Основы метода непосредственного альфа-спектрометрического анализа материалов окружающей среды.**— Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 334.

Изложены основы современного варианта метода непосредственного  $\alpha$ -спектрометрического анализа малоактивных материалов. Предложено использовать этот метод для контроля содержания тяжелых радионуклидов в материалах окружающей среды при удельной активности до сотых долей Бк/г. Метод должен упростить и ускорить анализы, которые в настоящее время выполняются исключительно радиохимическим способом (рис. 4, список лит. 8 назв.).

УДК 621.384.326:22.536

Страковская Р. Я., Стась А. Г., Кременчугский Л. С. **Измерение параметров пучков электронов пирозлектрическим приемником.**— Атомная энергия, 1981, т. 50, вып. 5, с. 338.

Исследована возможность применения пирозлектрических приемников излучения для измерения импульсных параметров пучков ускорителей электронов. Приведен расчет приемников электронного излучения. Описан принцип конструктивного решения приемника с поглотителем. Динамический диапазон измерений для пирозлектрического приемника с поглотителем составляет  $10^{-1}-10^4$  В/см<sup>2</sup> по плотности потока энергии,  $10^{12}-40^{19}$  электр./(см<sup>2</sup> · с) по плотности потока частиц при средней энергии электронов 300 кэВ. Разрешающее время приемника для энергии электронов до 400 кэВ составляет  $10^{-8}$  с, а коэффициент преобразования  $10^{-4}$  В/(Вт · см<sup>-2</sup>) (рис. 1, список лит. 6 назв.).