

Преобразователи ядерной энергии в электрическую на вторичных электронах

В. Б. Ануфриенко, В. П. Ковалёв, А. В. Куликов, В. А. Чернов

ВИКТОР БОРИСОВИЧ АНУФРИЕНКО — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник — советник генерального директора ГНЦ «Физико-энергетический институт» (ГНЦ РФ-ФЭИ). Область научных интересов: взаимодействие излучений с веществом, прямое преобразование ядерной энергии в электрическую. Тел. (48439)9-82-64.

ВАСИЛИЙ ПАВЛОВИЧ КОВАЛЁВ — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. Область научных интересов: физика атомного ядра, взаимодействие излучения с веществом. Тел. (48439)9-82-94.

АЛЕКСАНДР ВЕНИАМИНОВИЧ КУЛИКОВ — кандидат технических наук, Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН (МЦАИ РАН). Область научных интересов: теоретические и прикладные проблемы использования нетрадиционных методов преобразования энергии.

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЧЕРНОВ — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. Область научных интересов: взаимодействие излучения с веществом, регистрация ионизирующих излучений.

249033 Калужская область, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1, ГНЦ РФ-ФЭИ, тел. (48439)9-47-53, факс (48439)9-81-61, E-mail vac.lnfi@ipre.ru

119333 Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2, МЦАИ РАН, тел./факс (495)135-20-58, (495)135-88-25, E-mail mzairan@ipiran.ru

Введение

Современные технологические схемы преобразования ядерной энергии в результате радиоактивного распада ядер или деления атомных ядер основаны на цепочке

$$\frac{\text{распад}}{\text{деление}} \rightarrow \text{тепло} \rightarrow \frac{\text{машинный}}{\text{безмашинный}} \text{ тепловой цикл} \quad (1)$$

Эта цепочка определяет конструкцию, условия эксплуатации, уровень безопасности, ресурс КПД ядерно-энергетических устройств и стоимость производимой энергии. Достигнутые значения КПД существующих ядерно-энергетических устройств ниже и порой в значительной степени предельно возможных значений. Так, КПД радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РТЭГ) малой мощности (~1 мВт) составляет около 0,5%, средней (~1 Вт) — 5%, большой мощности (~10 Вт) — 7%, КПД термоэмиссионных преобразователей (ТЭП) — 10%, КПД АЭС — 30—40%.

Сам по себе процесс преобразования ядерной энергии не предполагает обязательное прохождение теплового цикла. Можно осуществить цикл преобразования энергии первичных частиц, образующихся при распаде/делении ядер, непосредственно в электрическую, а оставшуюся часть непреобразованной первичной энергии сбрасывать в виде тепла через тепловой цикл.

Прямой нетепловой цикл

$$\frac{\text{распад}}{\text{деление}} \rightarrow \text{электроэнергия} \quad (2)$$

позволяет увеличить КПД технологической цепочки (1). При этом потенциально возможны новые конструктивные решения как ТВЭЛов и атомного реактора, так и РТЭГов. Реализация цикла (2) открывает возможности создания низкотемпературных источников энергии, обладающих повышенной технологической безопасностью и длительным ресурсом при функционировании их в экстремальных условиях. В целом цикл (2) можно воспринимать как альтернативу развития современной концепции атомной и радиоизотопной энергетики.

Первые работы по осуществлению цикла (2) были выполнены в начале XX века [1]. Пик интереса к нему достиг в 1950-е годы, когда были сформулированы основные концепции ядерно-электрического генератора (ЯЭГ), реализующего этот цикл. Позже интерес к ЯЭГ спал, что можно объяснить недостаточным уровнем развития технологии в те годы и успехами в разработке схем по цепочке (1). Бурное развитие технологии изготовления тонкопленочных систем в микроэлектронике в 1970—80-х гг. вызвало возобновление интереса к ЯЭГ. В настоящее время разработка ряда технологически «трудных» схем ЯЭГ доведена до практического осуществления.

Цикл (2) послужил основой для создания нескольких типов атомных (ядерных) электрических батарей [2, 3].

В атомных батареях прямого сбора заряженные частицы, возникающие при радиоактивном распаде ядер, либо осколки деления, испускаемые эмиттером, собираются на коллектор, отделенный от эмиттера вакуумным промежутком или диэлектриком, в результате чего между эмиттером и коллектором создается разность потенциалов. Для батарей прямого сбора характерны высокие выходные напряжения (десятки и сотни киловольт) и низкие значения тока (доли мкА).

В атомных батареях с p - n -переходом пары электрон—дырка, возникающие в полупроводнике, облучаемом заряженными частицами, разделяются в электрическом поле и таким образом создается значительный ток электронов. Атомные батареи этого типа имеют низкое выходное напряжение (единицы и десятки вольт) и сравнительно большой ток (десятки и сотни мкА).

В батареях с контактной разностью потенциалов носители тока образуются при ионизации газа, заполняющего пространство между двумя металлическими электродами, имеющими разную работу выхода электронов. Напряжение в таких батареях может достигать нескольких вольт, рабочий ток определяется интенсивностью ионизирующего излучения, составом и давлением газа.

Принцип работы атомных батарей с двойным преобразованием заключается в последовательном превращении энергии радиоактивного распада сначала в световую с помощью люминофоров, а затем световой энергии в электрическую с использованием полупроводникового преобразователя.

В известных атомных батареях с вторичной электронной эмиссией происходит преобразование тока падающих на эмиттер частиц высокой энергии в значительно больший ток вторичных электронов, выходящих из эмиттера. Развиваемое напряжение определяется средней энергией вторичных электронов (десятки вольт в батареях с источником α -частиц и сотни вольт в случае источника осколков деления).

Применение тонких слоев для повышения КПД преобразователей энергии на вторичных электронах

Существенным недостатком атомных батарей всех типов является низкий коэффициент полезного действия. Одна из первых батарей на вторичных электронах с источником α -частиц описана в работах [2, 3], ее КПД не превышает долей процента. КПД батареи на вторичных электронах можно увеличить на несколько порядков, используя параллельное соединение пар эмиттер—коллектор, состоящих из тонких слоев толщиной от 100 до нескольких сотен ангстрем. Такое решение было предложено в 1981 г. в работе [4] для создания батареи с источником осколков деления. В ячейках с тонкими слоями преобразование энергии первичной заряженной частицы в электрическую энергию осуществляется на всей ее траектории. По сравнению с батареей, описанной в [2, 3], в которой имеется лишь одна ячейка с «толстыми» эмиттером и коллектором, в батарее [4] количество ячеек увеличивается в сотни раз, соответственно повышается КПД.

Выбор толщины эмиттера и коллектора в сотни ангстрем обусловлен тем, что выход вторичных электронов из тонкого слоя вещества пропорционален произведению потери энергии частицей в веществе dE/dx на длину неупругого рассеяния электронов. Отсюда вытекают требования и к выбору материалов для эмиттера и коллектора. Материал эмиттера должен удовлетворять требованию, чтобы произведение dE/dx на длину неупругого рассеяния вторичных электронов в эмиттере значительно превышало эту величину для электронов в коллекторе. Данному требованию соответствуют пары медь-бериллий, уран-алюминий, уран-бериллий, вольфрам-алюминий, возможны и другие комбинации. Толщину эмиттера следует выбирать равной порядку глубины выхода вторичных электронов (для металлов ~ 100 Å), что обеспечивает максимальный выход электронов. Для коллектора толщина должна быть порядка 3—5 длин неупругого взаимодействия электронов в материале коллектора, при этом достигается близкий к 100% сбор вторичных электронов, приходящих на коллектор.

Верхний предел напряжения на зажимах пары тонких слоев эмиттер-коллектор определяется максимальной энергией в спектре вторичных электронов. Напряжение на зажимах преобразователя энергии с твердым диэлектриком не может превышать предела, обусловленного электрической прочностью диэлектрика. В реальных условиях все преобразователи имеют некоторое внутреннее сопротивление. Заряд, накапливающийся на коллекторе, неизбежно стекает обратно на электрод-эмиттер через поверхности изолятора или в случае преобразователя с твердым диэлектриком — через диэлектрик. Это снижает допустимое напряжение и оно еще более снижается при подключении внешней нагрузки.

На длине пробега осколка деления ядер в твердом веществе (~ 10 мкм) укладывается несколько сотен пар тонкослойных ячеек «эмиттер—коллектор». Конструкцию сотен таких ячеек в вакууме («вакуумных» ячеек) трудно реализовать практически. Нами в работе [5] исследованы преобразователи энергии с источником осколков деления и вариант, эквивалентный «вакуумной» ячейке. В такой ячейке в качестве диэлектрика используется аэрогель Al_2O_3 с пористостью 99,4%. Толщина слоя аэрогеля составляет 0,4 мкм, что эквивалентно по количеству материала плотной пленке Al_2O_3 толщиной 40 Å [6]. Пленка такой толщины будет прозрачной для вторичных электронов.

При взаимодействии с веществом осколки деления ядер урана теряют до 90% энергии на ионизацию и возбуждение атомов среды, образуя каскад вторичных электронов, которым передается свыше 60% энергии [7]. Энергетический спектр вторичных электронов, генерируемых внутри среды, имеет вид нисходящей кривой в диапазоне энергий от долей электронвольт до нескольких килоэлектронвольт (рис. 1); средняя энергия спектра электронов внутри среды составляет несколько десятков электронвольт. Спектр вторичных электронов с выходом в вакуум после преодоления потенциального барьера проходит через максимум в области энергий 4—5 эВ (см. рис. 1); средняя энергия спектра в вакууме составляет 230—300 эВ. Выход вторичных электронов из слоев тяжелых металлов толщиной несколько сотен ангстрем равен ~ 500 эл/оск.

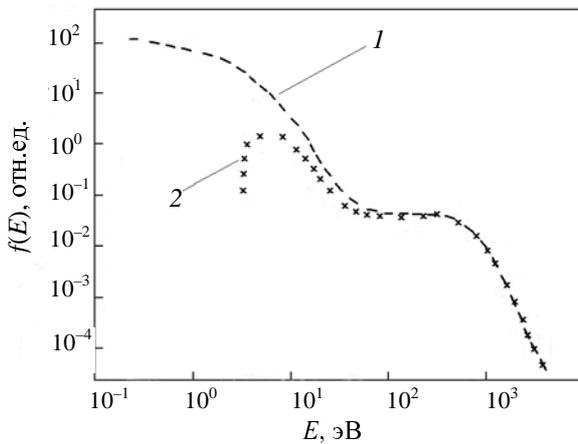


Рис. 1. Энергетические спектры вторичных электронов, эмитируемых из пленки Al_2O_3 толщиной $\sim 10^3 \text{ \AA}$:

1 — эмиссия электронов внутри мишени; 2 — эмиссия электронов в вакууме

Спектры вторичных электронов, эмитируемых различными материалами, близки по форме [7, 8].

В рассматриваемой в [5] «вакуумной» ячейке материалом эмиттера служит уран с 20% обогащением по изотопу ^{235}U , материалом коллектора — алюминий. Толщина и эмиттера, и коллектора равна 100 \AA . Коммутация большого количества таких ячеек обеспечивает высокую выходную мощность преобразователя энергии (рис. 2Б). При толщине слоя урана в 100 \AA достигается выход электронов, близкий к максимальному. По экспериментальным и расчетным данным [9] длина неупругого взаимодействия вторичных электронов в алюминии для основной части спектра составляет $5\text{--}25 \text{ \AA}$. Коллектор толщиной 100 \AA способен собирать практически 100% приходящих электронов.

Возможна конструкция модуля-преобразователя с большим количеством ячеек и внешним источником заряженных частиц (рис. 2А). Количество ячеек «эмиттер—диэлектрик—коллектор» в модуле определяется пробегом заряженной частицы в материалах слоев ячейки, а общая мощность преобразователя зависит от

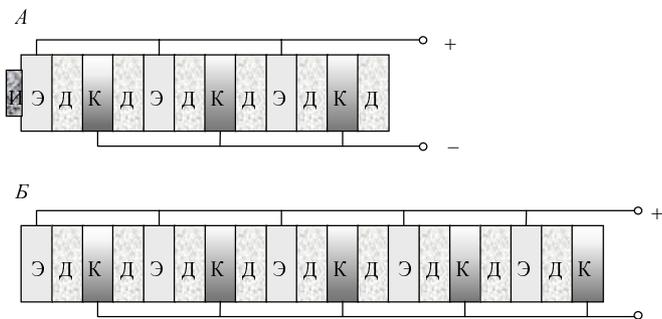


Рис. 2. Многокаскадный источник тока с параллельным соединением элементарных модулей:

А — с внешним источником частиц; Б — с источником частиц в эмиттере. И — источник заряженных частиц; Э — эмиттер; Д — диэлектрик; К — коллектор

числа коммутируемых модулей.

Эмиттер и коллектор в ячейке образуют емкость C , которая заряжается током вторичных электронов до некоторого напряжения V . В эквивалентной схеме (она включает параллельно соединенные сопротивления изоляции R_i и внешней нагрузки R_e) эмиттером является источник тока вторичных электронов, который генерирует ток I_0 при малых напряжениях и значительно меньший ток $I = I_0 K(V)$ при высоких напряжениях, когда тормозящее поле отталкивает электроны с низкой энергией; коэффициент $K(V) \leq 1$.

Коэффициент $K(V)$, если принять угловое распределение вторичных электронов косинусоидальным, для плоских бесконечных электродов определяется соотношением:

$$K(V) = \frac{\int_{eV}^{E_{\max}} f(E) \left(1 - \frac{eV}{E}\right) dE}{\int_0^{E_{\max}} f(E) dE} \quad (3)$$

где $f(E)$ — спектр вторичных электронов; E_{\max} — максимальная энергия электронов в этом спектре; V — разность потенциалов между эмиттером и коллектором.

КПД ячейки η определяется выражением:

$$\eta = \frac{I_0 K(V) V}{W} \quad (4)$$

где $I_0 K(V)$ — ток; V — напряжение на сопротивлении нагрузки; W — мощность, теряемая в ячейке осколком ядерного деления, для рассматриваемой ячейки «эмиттер—диэлектрик—коллектор»

$$W = (dF/dx)_\varepsilon T_\varepsilon + (dE/dx)_\partial T_\partial + (dF/dx)_\kappa T_\kappa \quad (5)$$

где dE/dx , T — потери энергии осколком на единицу длины в слоях ячейки и толщина этих слоев, соответственно; значение I_0 определяется выходом вторичных электронов Q и рассчитывается из соотношения $I_0 = Qe$ (e — заряд электрона).

Оценки КПД ячейки проводились в предположении, что энергетический спектр вторичных электронов близок к спектру 2, представленному на рис. 1, при этом $K \approx 0,4\text{--}0,3$ в области напряжений $V = 200\text{--}400 \text{ В}$. Значения $V = 200\text{--}400 \text{ В}$ достижимы, если утечки тока малы, а электрическая прочность аэрогеля Al_2O_3 близка к электрической прочности тонких пленок ($5 \cdot 10^6\text{--}10 \cdot 10^6 \text{ В/см}$). Оценки проводились для средних потерь энергии осколком:

$$(dE/dx)_\varepsilon = 1,5 \cdot 10^3 \text{ эВ/\AA}, \quad (dE/dx)_\partial = 0,8 \cdot 10^3 \text{ эВ/\AA}, \quad (dE/dx)_\kappa = 0,6 \cdot 10^3 \text{ эВ/\AA}.$$

При этих параметрах с учетом пористости Al_2O_3 КПД ячейки составляет 25%. Коммутируя ячейки «эмиттер—диэлектрик—коллектор», можно сконструировать электрогенерирующий канал заданной мощности и размеров.

Ячейка-преобразователь энергии с твердым диэлектриком

Для «вакуумной» ячейки серьезную проблему вызывает эффект распыления эмиттера и коллектора заряженными частицами, в особенности осколками деления. Чтобы снизить влияние этого эффекта, мож-

но использовать ячейки «эмиттер—диэлектрик—коллектор» с толщиной слоя плотного диэлектрика порядка сотен ангстрем. Современная нанотехнология позволяет посредством послойного напыления в вакууме изготавливать такие ячейки. В этом случае коэффициент распыления будет значительно меньше, чем в преобразователе с «вакуумной» ячейкой.

Введение тонкого диэлектрика в ячейку рассматриваемой структуры смещает рабочее напряжение в область нескольких вольт. В связи с этим особую важность приобретают электрическая прочность диэлектрика в условиях облучения и энергетический спектр вторичных электронов, приходящих на коллектор. Форма спектра электронов, выходящих из эмиттера в диэлектрик, зависит от высоты энергетического барьера на границе металл-диэлектрик, который ниже барьера на границе металл-вакуум, что увеличивает выход вторичных электронов из металла в диэлектрик по сравнению с выходом в вакуум.

В случае ячейки со сравнимыми толщинами слоев необходимо иметь в виду, что вторичные электроны будут генерироваться также и в диэлектрике, причем в большем количестве, чем в эмиттере и коллекторе, так как энергия E_s , идущая на образование одного вторичного электрона в диэлектрике (~5—10 эВ), в несколько раз меньше, чем в металле (~25 эВ) [3].

Первые эксперименты по измерению тока вторичных электронов в ячейке «эмиттер—диэлектрик—коллектор» при облучении осколками деления были проведены нами с использованием трехслойного преобразователя Au-Al₂O₃-Al. Ячейка располагалась в канале графитовой колонки 1200×1400×1400 мм на физическом стенде. Плотность потока тепловых нейтронов в месте расположения ячейки составляла $1,5 \cdot 10^8$ нейтр./(см²·с).

Изучаемый трехслойный преобразователь энергии (рис. 3) представляет собой алюминиевую подложку диаметром 25 мм с нанесенными на нее слоями оксида алюминия толщиной ~10 мкм и золота толщиной

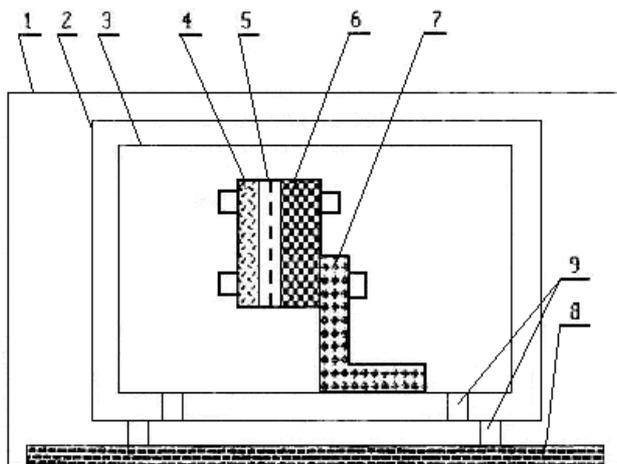


Рис. 3. Схема экспериментального устройства с преобразователем энергии:

1 — кадмиевый чехол; 2 — внешний корпус контейнера; 3 — внутренний корпус контейнера; 4 — источник осколков деления; 5 — сетка; 6 — трехслойный преобразователь; 7 — уголок; 8 — подставка; 9 — изоляторы (8 шт.)

~400 Å. Источник осколков деления — слой ²³⁵U толщиной около 5 мкм, нанесенный на тонкую пластину (40×20×1 мм) из нержавеющей стали и покрытый лаком. Преобразователь помещается в двухстеночный контейнер с внешними размерами 150×150×105 мм, изготовленный из листов меди толщиной ~1 мм (внутренний корпус) и стали толщиной ~1 мм (внешний корпус). В контейнере имеются отверстия для вывода электрических кабелей КММ-6, посредством которых подается напряжение на источник осколков деления (между пластиной из нержавеющей стали и сеткой) и на преобразователь (между слоем золота и алюминиевой подложкой). Во внутреннем корпусе смонтирован уголок для крепления на нем преобразователя и источника осколков деления. В рабочем положении расстояние между источником осколков деления и преобразователем составляет 1,2 мм.

Для снижения токов утечки по краю алюминиевой подложки оставлена кольцевая поверхность шириной 1 мм, свободная от напыленного золота. К алюминиевому диску в центре приварен медный проволочный токовывод.

Ток утечки определялся путем измерения падения напряжения на сопротивлении нагрузки R_H , включенном последовательно с преобразователем, при потенциалах на алюминиевом электроде в интервале 0—8 В (рис. 4). Оцененное значение сопротивления изоляции преобразователя составило $1,5 \cdot 10^{10}$ Ом.

Исследования зависимости тока в преобразователе от сопротивления нагрузки, мощности критической сборки, наличия или отсутствия кадмиевого чехла, потенциала на алюминиевом электроде показали, что при сопротивлениях нагрузки 50 кОм, 500 кОм, 10 МОм, нулевом потенциале на алюминиевом электроде и мощности сборки $W = 200$ Вт значения тока в преобразователе остаются постоянными. Таким образом, данный преобразователь энергии представляет собой источник тока с большим внутренним сопротивлением. Направление тока соответствует движению отрицательного заряда от золотого электрода к алюминиевому. Ток в преобразователе при нулевом потенциале на алюминиевом электроде и мощности сборки 200 Вт равен $3,3 \cdot 10^{-10}$ А без кадмиевого чехла и $2,2 \cdot 10^{-10}$ А с кадмиевым чехлом; минимальный ток вторичных электронов, обусловленный осколками

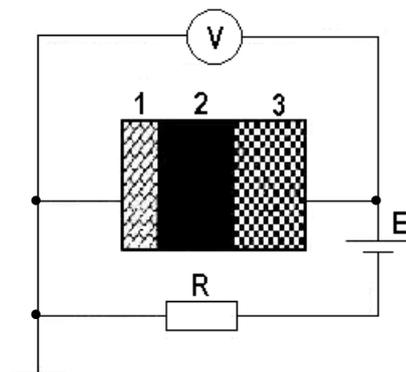


Рис. 4. Электрическая схема измерения тока в преобразователе:

1 — золотой электрод (эмиттер); 2 — слой Al₂O₃; 3 — алюминиевый электрод (коллектор)

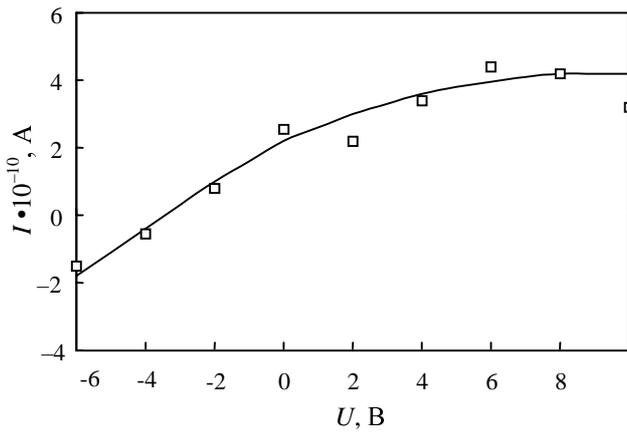


Рис. 5. Зависимость суммарного тока вторичных электронов в преобразователе энергии от потенциала на алюминиевом электроде

деления, составляет $\sim 10^{-10}$ А. Выбранная толщина слоя оксида алюминия (~ 10 мкм) практически исключает возможность попадания на алюминиевый коллектор вторичных электронов, испускаемых эмиттером из золота. Возникающий в преобразователе ток обусловлен в основном вторичными электронами, выходящими из прилегающего к алюминиевому коллектору слоя оксида алюминия толщиной порядка глубины выхода электрона. Глубина выхода близка к средней длине рассеяния вторичных электронов с энергетическим спектром вида I (см. рис. 1). Эта величина, рассчитанная по данным работы [9] для рассеяния электронов в Al_2O_3 , составляет ~ 1000 Å.

На рис. 5 представлена зависимость суммарного тока вторичных электронов в преобразователе, обусловленного осколками деления и фотонами, от потенциала на алюминиевом электроде. При потенциале ~ 6 В наблюдается насыщение суммарного тока, нулевое значение тока получено при отрицательном потенциале $\sim 3,2$ В.

Измерения показали, что суммарный ток вторичных электронов линейно зависит от мощности критической сборки при различных потенциалах на алюминиевом электроде. Это согласуется с представлением, что ток вторичных электронов пропорционален числу падающих на преобразователь осколков деления.

В работе [5] для одного из вариантов сборки была оценена тепловая мощность ячейки $W_T \approx 1,1 \cdot 10^3$ Вт, что при КПД ячейки, равном 25%, дает значение электрической мощности $W_{\text{Э}} \approx 2,75 \cdot 10^{-4}$ Вт/см². Этой мощности соответствует плотность потока тепловых нейтронов $\sim (1,5-2) \cdot 10^{13}$ нейтр./(см²·с).

Для ячейки с диэлектриком толщиной ~ 10 мкм при плотности потока тепловых нейтронов $\sim 1,5 \cdot 10^8$ нейтр./(см²·с) получено экспериментальное значение электрической мощности преобразователя $W_{\text{Э}} \approx 2 \cdot 10^{-10}$ Вт/см², что соответствует мощности $W_{\text{Э}} \approx 3 \cdot 10^{-5}$ Вт/см² при потоке тепловых нейтронов $\sim 10^{13}$ нейтр./(см²·с) в критической сборке. Если учесть, что выход вторичных электронов из тонкой мишени пропорционален фактору $Z^2_{\text{эф}}/E^{1/2}(x)$ ($Z_{\text{эф}}$ — эффективный заряд осколка, имеющего энергию $E(x)$ после прохождения пути x), а потери энергии осколком пропорциональны толщине мишени, то при на-

чальных значениях $Z_0 = 20$ и $E_0 = 80$ МэВ выход вторичных электронов из диэлектрика толщиной, равной глубине выхода, будет примерно на порядок больше. Соответственно, значение электрической мощности будет равно $W_{\text{Э}} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ Вт/см². Таким образом, получаются сопоставимые значения экспериментальной и расчетной электрической мощности ячейки-преобразователя. Это дает основание ожидать достаточно высокого значения КПД преобразователя с тонким слоем диэлектрика.

Использование анизотропии выхода вторичных электронов при создании многослойного преобразователя ядерной энергии в электрическую

Известен эффект анизотропии выхода вторичных электронов из тонких слоев. Анизотропия проявляется в том, что выход вторичных электронов с лицевой поверхности тонкого слоя (со стороны падения первичной заряженной частицы), по принятой терминологии «выход на отражение», в 2–3 раза меньше выхода с обратной поверхности слоя, так называемого выхода «на прострел» [9]. Эффект анизотропии выхода вторичных электронов проявляется при облучении первичными заряженными частицами достаточно тонких слоев, когда длина пробега частицы превышает толщину слоя.

Потери энергии осколком деления на единицу длины для эмиттера из тяжелого металла (например вольфрама), диэлектрика из оксида алюминия Al_2O_3 и коллектора из алюминия соотносятся примерно как 1,5 : 0,8 : 0,6. В ячейке структуры «эмиттер—диэлектрик—коллектор» со сравнимыми толщинами слоев накопление заряда на коллекторе, на которое будет влиять анизотропия выхода вторичных электронов, происходит и за счет электронов, рождающихся в диэлектрике. Для этих электронов отсутствует барьер на границе диэлектрик—коллектор и их генерируется больше, чем в эмиттере.

Нами исследована ячейка с эмиттером из вольфрама, коллектором из алюминия (толщины ~ 100 Å) и диэлектрика Al_2O_3 (толщина ~ 200 Å). В такой ячейке накопление заряда на коллекторе происходит как за счет вторичных электронов, рождающихся в диэлектрике, так и за счет электронов из эмиттера. Оценку КПД этой ячейки проводили по формуле (4) с учетом анизотропии выхода вторичных электронов. При расчете принималось, что суммарный энергетический спектр вторичных электронов близок к спектру I на рис. 1; коэффициент $K(V) \approx 0,1$; электрическая прочность лежит в интервале $(5-10) \cdot 10^6$ В/см, значение E_s — в интервале 5–10 эВ, коэффициент анизотропии равен 3. При оптимальном выборе параметров оценка дает значение КПД преобразования $\sim 20\%$.

Таким образом, анизотропия выходов вторичных электронов из тонких слоев может быть использована для конструирования многослойных преобразователей ядерной энергии, в которых коммутируются чередующиеся ячейки «эмиттер—диэлектрик—коллектор» с разными толщинами диэлектрика. Слои — источники осколков деления — должны располагаться друг от друга на расстоянии двух пробегов осколков. При расположении источников осколков на расстоянии одного пробега, а также при коммутации ячеек с одинаковой толщиной диэлектрика эффекты анизотропии

выходов компенсируются и работа преобразователя осуществляется на разности выходов вторичных электронов из эмиттера и коллектора.

Заключение

Проведенное исследование показывает, что применение тонких слоев (толщина в сотни ангстрем) в ячейке преобразователя ядерной энергии в электрическую позволяет примерно на два порядка повысить КПД преобразователя, работающего на вторичных электронах, по сравнению с ячейкой с «толстыми» слоями. Уточненные параметры преобразователя могут быть получены на основании экспериментального изучения вольтамперных характеристик ячеек «эмиттер—диэлектрик—коллектор» при облучении их осколками деления в зависимости от толщины слоев составляющих ячейки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05-08-33481).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Moseley H.G.J., Harling J.* Proc. Roy. Soc. (Lnd), 1913, v. 88A, p. 471.
2. *Корлисс У., Харви Д.* Источники энергии на радиоактивных изотопах. М.: Мир, 1967, 412 с.
3. *Miley G.H.* Direct Conversion of Nuclear Radiation Energy. American Nuclear Society, 1970.
4. Авт. свид. № 1019964, 1981.
5. *Ануфриенко В.Б., Казанцев Г.Н., Ковалев В.П. и др.* Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2001, № 2, с. 22—29.
6. Патент РФ № 2092437, приоритет от 19.12.95.
7. *Pferdekamper K.E., Clerc H.G.* Z. Phys., 1977, Bd. A280, S. 155.
8. *Дьяченко П.П., Рыков В.А.* Препринт ФЭИ № 2255, 1992.
9. *Ковалев В.П.* Вторичные электроны. М.: Энергоатомиздат, 1987, 177 с.