

11;12

Способ измерения эффективности выноса энергии осколками деления через поверхность делящегося материала

© Г.В. Влох, С.В. Фролова, А.В. Лисёнков

Российский федеральный ядерный центр
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Институт ядерной и радиационной физики
607190 Саров, Россия
e-mail: sofifrol@rol.ru

(Поступило в Редакцию 29 августа 2005 г. В окончательной редакции 1 марта 2006 г.)

Часть энергии деления, выделяемой в некотором объеме делящегося материала, выносится через поверхность этого объема осколками деления и может быть эффективно использована, например, для накачки газовых лазеров.

Рассмотрена возможность оценки этой доли энергии по результатам прямых измерений выхода альфа-частиц, возникающих при альфа-распаде делящегося материала, через поверхность рассматриваемого объема. Результаты получены в первом приближении для максимально простой расчетной модели.

PACS: 24.75.+i

Для возбуждения активной газовой смеси лазеров с ядерной накачкой в основном используется кинетическая энергия осколков деления урана-235. Инжекция осколков в лазерный канал производится специальными устройствами — энерговыделяющими элементами (эвэлами), содержащими уран-235 в виде тонкого поверхностного слоя толщиной от 1 до 5 μm .

Важной характеристикой эвэла является его эффективность (доля полной энергии деления, выносимой осколками из слоя). Существующие расчетные схемы (например, [1]) позволяют, в принципе, провести расчетные оценки эффективности с учетом неоднородности распределения урана по глубине активного слоя эвэла, задаваемой технологией изготовления. Однако с течением времени эффективность может уменьшаться (осаждение на поверхности микронных слоев пыли, диффузия активного слоя в подложку, распыление активного слоя вылетающими осколками деления и т.п.), что неконтролируемо изменяет распределение энергии накачки по объему лазерного канала, приводит к появлению недопустимых оптических неоднородностей в нем и ухудшению качества лазерного пучка, вплоть до полного срыва генерации. Поэтому эффективность каждого эвэла должна быть известна не только при изготовлении, но и регулярно контролироваться в процессе эксплуатации.

Непосредственное измерение эффективности может быть осуществлено лишь в сложном и дорогостоящем эксперименте при облучении эвэла потоком нейтронов значительной интенсивности (например, на импульсном ядерном реакторе [2]). Совершенно очевидно, что подобные эксперименты на реакторе могут носить разовый характер и должны предназначаться для калибровки более простых и оперативных косвенных методов измерения эффективности.

В данной работе на основании построенной авторами математической модели предлагается оперативный

способ экспериментальной оценки эффективности энерговыделяющего элемента. Речь идет о моделировании вероятности выхода осколков деления вероятностью выхода альфа-частиц, испускаемых эвэлом в результате естественного альфа-распада делящегося изотопа.

Целью данной работы является обоснование принципиальной возможности предлагаемого моделирования. Результаты носят предварительный характер, требуют дальнейшего расчетного и экспериментального уточнения с целью оценки метрологических характеристик метода.

Рассмотрим сначала общую модель эффективности выноса энергии осколками. По определению, эффективность ε энерговыделяющего элемента дается выражением

$$\varepsilon \equiv \frac{Q^\wedge}{Q}, \quad (1)$$

где Q^\wedge — суммарная энергия осколков, вышедших из энерговыделяющего элемента; Q — суммарная начальная энергия осколков, рожденных в энерговыделяющем элементе.

Используя для расчетных оценок величин Q и Q^\wedge модельные подходы, изложенные в [1], можно получить следующее выражение для расчетного значения эффективности:

$$\varepsilon_p = \frac{\int_{V_1} \Psi_U(\mathbf{r}) dV \int_0^\infty \Psi(E) dE \int_0^{4\pi} E^\wedge P d\Omega}{4\pi \int_0^\infty E \Psi(E) dE}, \quad (2)$$

где $\Psi_U(\mathbf{r})$ — распределение ядер урана в активном слое энерговыделяющего элемента; $\Psi(E)$ — распределение рождающихся осколков по энергии; $E^\wedge(\mathbf{r}, \Omega, E)$ — энергия осколков при вылете из энерговыделяющего элемента

как функция начальных параметров; $P(\mathbf{r}, \Omega, E)$ — вероятность вылета осколка из энерговыделяющего элемента.

Соотношение (2) позволяет получить расчетную оценку эффективности для осколков деления с учетом неоднородности распределения урана по толщине энерговыделяющего элемента и энергетического спектра осколков. Основная погрешность подобной оценки связана с отсутствием информации о реальном распределении урана-235 $\Psi_U(\mathbf{r})$ в активном слое данного энерговыделяющего элемента и, в еще большей степени, с недостаточно точным знанием вида функции $P(\mathbf{r}, \Omega, E)$ в каждом конкретном случае. Вид этой функции может неконтролируемо меняться во время хранения и в процессе эксплуатации эвэла в результате:

— незначительного случайного загрязнения поверхности энерговыделяющего элемента;

— незначительного изменения распределения $\Psi_U(\mathbf{r})$ и объема активного слоя V_1 в результате возможной диффузии активного слоя (урана) в материал подложки.

Кроме того, также неконтролируемо может меняться по указанным причинам энергия вылетающих осколков E^\wedge . Таким образом, вычисления эффективности энерговыделяющего элемента для осколков деления по формуле (2) носят характер средней оценки, которая может использоваться, например, для характеристики применяемой технологии изготовления эвэлов.

Однако существует возможность более точной оценки эффективности, учитывающей потенциальные неконтролируемые изменения функций $\Psi_U(\mathbf{r})$ и $P(\mathbf{r}, \Omega, E)$. Эта возможность связана с измерением средней вероятности μ вылета осколков из слоя

$$\mu = \frac{1}{4\pi} \int_{V_1} \Psi_U(\mathbf{r}) dV \int_0^\infty \Psi(E) dE \int_0^{4\pi} P d\Omega. \quad (3)$$

Действительно, с одной стороны, измеренное значение μ автоматически учитывает возможные вариации функций $\Psi_U(\mathbf{r})$ и $P(\mathbf{r}, \Omega, E)$, как это видно из (3). С другой стороны, очевидна связь эффективности ε с выходом осколков μ

$$\varepsilon = \mu \frac{\langle E^\wedge \rangle}{\langle E \rangle} = \mu F(\mu), \quad (4)$$

где $\langle E \rangle$, $\langle E^\wedge \rangle$ — средние энергии осколков при рождении и вылете соответственно.

По физическому смыслу функция $F(\mu)$ связывает вероятность выхода энергии осколков из энерговыделяющего элемента с вероятностью выхода самих осколков и относительно точно рассчитывается по модельным схемам [1].

Необходимо отметить, что функция $F(\mu)$ неоднозначна относительно μ . Незначительные вариации функции при данном значении μ являются источником модельной погрешности соотношения (4). Хотя эта погрешность

невелика, ее оценка в дальнейшем требует дополнительного анализа.

Непосредственное измерение величины μ для осколков деления столь же затруднительно, как и измерение самой эффективности, так как и в этом случае требуется постановка облучательных экспериментов на импульсном ядерном реакторе.

Однако можно попытаться косвенно определить выход осколков μ по результатам прямых измерений выхода альфа-частиц μ_α (проведение подобных измерений не вызывает затруднений). Для выяснения возможностей такого подхода проанализируем выражение для выхода альфа-частиц μ_α

$$\mu_\alpha = \frac{1}{4\pi} \int_{V_1} \Psi_U(\mathbf{r}) dV \int_0^\infty \Psi_\alpha(E) dE \int_0^{4\pi} P_\alpha d\Omega. \quad (5)$$

При сравнении выражений (2) и (5) можно отметить следующее:

— пространственная плотность распределения рождающихся частиц в обоих случаях одна и та же и равна плотности распределения ядер урана в объеме активного слоя $\Psi_U(\mathbf{r})$;

— спектральные плотности для осколков $\Psi(E)$ и альфа-частиц $\Psi_\alpha(E)$ известны с высокой точностью;

— вероятности выхода осколков P и альфа-частиц P_α определяются геометрически и вычисляются по совершенно идентичным формулам (в предположении, что толщина слоя урана меньше пробега осколков).

Средняя вероятность выхода осколков деления из энерговыделяющего элемента μ связана с соответствующей вероятностью для альфа-частиц μ_α соотношением

$$\mu = \mu_\alpha f(\mu_\alpha). \quad (6)$$

Функция $f(\mu_\alpha)$ очень слабо зависит от своего аргумента, и поэтому расчетные оценки ее значений достаточно надежны. Это подтверждает, что альфа-частицы удачно „моделируют“ выход осколков деления из энерговыделяющего элемента. Расчетный анализ показывает, что для слоя урана, толщина которого не превосходит пробега осколка, можно положить $f(\mu_\alpha) = \text{const}$.

Таким образом, с учетом (4) и (6) предлагается способ экспериментального определения эффективности ε через измеряемый выход альфа-частиц из энерговыделяющего элемента μ_α

$$\varepsilon = A(\mu_\alpha) \mu_\alpha, \quad (7)$$

где μ_α — достаточно просто измеряемая в лабораторных условиях величина, а вид переходной функции $A(\mu_\alpha)$ нетрудно определить в рамках принятой математической модели из соотношения

$$A(\mu_\alpha) = F(\mu) f(\mu_\alpha). \quad (8)$$

По физическому смыслу переходная функция $A(\mu_\alpha)$ связывает вероятность выхода энергии осколков из энерговыделяющего элемента с вероятностью выхода альфа-частиц из того же эвэла.

Для переходной функции $A(\mu_\alpha)$ с учетом формул (2), (5) можно получить выражение

$$A = \frac{\varepsilon}{\mu_\alpha} = \frac{\int_{V_1} \Psi_U(\mathbf{r}) dV \int_0^\infty \Psi(E) dE \int_0^{4\pi} E^\wedge P d\Omega}{\int_{V_1} \Psi_U(\mathbf{r}) dV \int_0^\infty \Psi_\alpha(E) dE \int_0^{4\pi} P_\alpha d\Omega \int_0^\infty E \Psi(E) dE} \cdot 1, \quad (9)$$

В первом приближении переходная функция $A(\mu_\alpha)$ рассчитывалась при следующих модельных предположениях: 1) распределение урана по объему V_1 активного слоя однородно; $\Psi_U(\mathbf{r}) = \text{const} = 1/V_1$; 2) все осколки рождаются с одной и той же энергией E_0 ; $\Psi(E) = \delta(E - E_0)$; 3) все альфа-частицы рождаются с одной и той же энергией E_0^α ; $\Psi_\alpha(E) = \delta(E - E_0^\alpha)$; 4) вылет частиц характеризуется аксиальной симметрией относительно нормали к поверхности эвэла, поэтому, например, вероятность вылета осколка с глубины ξ слоя можно представить в виде

$$P(\mathbf{r}, \Omega, E) = P(\xi, \theta_{\max}) = \begin{cases} 1 & \text{при } \theta \leq \theta_{\max}(\xi) \\ 0 & \text{при } \theta > \theta_{\max}(\xi), \end{cases} \quad (10)$$

где $\theta_{\max}(\xi) = \arccos(\xi/R(E))$ — максимальный угол, при котором осколок еще может выйти в газ (определяется из равенства нулю энергии вылетающих осколков).

В этой упрощенной модели для функции $A(\mu_\alpha)$ получена аппроксимация

$$A(\mu_\alpha) = 294.3\mu_\alpha^3 - 342.1\mu_\alpha^2 + 134.6\mu_\alpha - 17.64, \quad (11)$$

$$0.36 < \mu_\alpha < 0.47.$$

Геометрия измерения величины μ_α очень проста: исследуемый образец размещается между детекторами альфа-частиц и гамма-излучения. Средняя вероятность выхода альфа-частиц с поверхности измеряемого эвэла определяется из следующего выражения

$$\mu_\alpha = \chi \frac{n'_\alpha}{n'_\gamma}, \quad (12)$$

где $\chi = \frac{b_\gamma \mu_\gamma}{b_\alpha G} = \text{const}$; b_α и b_γ — светосила альфа- и гамма-спектрометра соответственно; μ_γ — вероятность выхода гамма-квантов из эвэла (близка к единице); $G = \text{const}$ — постоянная изотопного состава, определяющая соотношение количества гамма-квантов и альфа-частиц, рождающихся в активном слое в результате одних и тех же процессов, распада изотопов урана; n'_α — число альфа-частиц, зарегистрированных

альфа-детектором; n'_γ — число гамма-квантов, зарегистрированных гамма-детектором.

Метрологическая константа χ есть величина постоянная для данного изотопного состава и данной геометрии измерительной системы, не зависящая от свойств эвэла. Она определяется заранее в специальном градуировочном эксперименте с энерговыделяющим элементом, для которого μ_α известен. В качестве такого „образцового“ энерговыделяющего элемента может быть использован энерговыделяющий элемент с очень тонким активным слоем. Для такого эвэла $\mu_\alpha \cong 0.5$.

По измеренному значению μ_α из зависимости $A(\mu_\alpha)$ (11) определяем значение переходной функции для данного эвэла. Эффективность данного эвэла определяем по формуле (7).

Градуировочный эксперимент для определения константы χ проводился дважды с различной геометрией измерения: 1) образец удален от альфа-детектора, 2) образец расположен на альфа-детекторе. Эксперимент проводился на образце урана-235 толщиной менее $0.2 \mu\text{m}$. Для такого образца вероятность выхода альфа-частиц с поверхности известна и равна $\mu_\alpha \cong 0.5$.

Для данного изотопного состава слоя получены соответствующие данной геометрии измерительной системы константы $\chi = 1.27 \cdot 10^{-6}$ (образец удален от детектора); $\chi = 7.19 \cdot 10^{-6}$ (образец расположен на детекторе).

Согласно формуле (12), по числу альфа-частиц, зарегистрированных альфа-детектором n'_α , и гамма-квантов, зарегистрированных гамма-детектором n'_γ , определялась средняя вероятность выхода альфа-частиц μ_α с поверхности образца урана-235 с толщиной активного слоя $2 \mu\text{m}$. Для обоих случаев (т.е. для $\chi = 1.27 \cdot 10^{-6}$ и $7.19 \cdot 10^{-6}$) было получено одинаковое значение вероятности выхода $\mu_\alpha \cong 0.36 \pm 0.02$.

По измеренному значению μ_α из зависимости (11) определялось значение переходной функции $A(\mu_\alpha)$ для данного образца ≈ 0.25 .

Эффективность эвэла определялась по формуле (7). Для исследуемого образца $\varepsilon = 0.1 \pm 0.01$.

Отметим, что модельная погрешность при измерении эффективности реальных эвэлов составляет от 7 до 15% и определяется в основном принятыми модельными упрощениями.

Очевидно, что предложенная упрощенная модель требует дальнейшего анализа с целью определения ее возможностей при отказе от перечисленных модельных ограничений, так как осколки деления и альфа-частицы, рождающиеся в активном слое эвэла, не являются моноэнергетическими частицами, а характеризуются энергетическим спектром. Кроме того, распределение урана по объему энерговыделяющего элемента может в реальности оказаться далеко не однородным.

Предложенный способ измерения эффективности является косвенным. Естественно, он требует калибровочных экспериментов, т.е. получения градуировочной зависимости $A(\mu_\alpha)$ путем прямых измерений эффективности с использованием импульсного реактора. Подобные

эксперименты предполагается провести в дальнейшем по мере совершенствования измерительных методик, позволяющих достичь необходимой точности.

Список литературы

- [1] *Казазян В.Т., Литвиненко Б.А., Рогинец Л.П.* и др. Физические основы использования кинетической энергии осколков деления в радиационной химии. Минск, 1972. 248 с.
- [2] *Влох Г.В., Сиянский А.А., Филиппов Г.Э.* и др. // Тр. конф. „Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой“. Арзамас-16, 1994. Т. 1. С. 47.