

ВЫХОД ЭЛЕКТРОНОВ ОКОЛОНУЛЕВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ РАДИОАКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ

В.Т. Купряшкин, Л.П. Сидоренко, А.И. Феоктистов, И.П. Шаповалова

С целью изучения зависимости выхода электронов околонулевой энергии e_0 от толщины источников для различных видов радиоактивного распада (β -распад, электронный захват, внутренняя конверсия) методом ($e\gamma$)-совпадений исследованы источники разной толщины (от 1 до 10 мкг/см²). Показано, что основную роль в образовании e_0 -электронов играет приповерхностный слой радиоактивных атомов. Обсуждается природа образования e_0 -электронов.

1. Введение

В спектрах электронов от радиоактивных источников наблюдается интенсивный пик "нулевой энергии". Максимум его распределения находится при энергии около 0.5 эВ [1]. Электроны, образующие этот пик, называем электронами околонулевой энергии e_0 . В работах [2, 3] были получены данные о выходе e_0 -электронов с поверхности радиоактивного источника ¹⁵²Eu, толщина активного слоя которого составляла 10 мкг/см², что соответствует примерно 40 атомным слоям. Выход e_0 -электронов при различных видах радиоактивного распада (бета-распад, электронный захват, внутренняя конверсия) определялся как среднее число испускаемых e_0 -электронов на один акт распада независимо от положения распадающегося ядра в источнике. Однако основную роль в образовании e_0 -электронов играет распад ядер в слоях, находящихся вблизи поверхности источника [2, 4]. Выход e_0 -электронов от распада таких ядер должен быть больше, чем среднее значение, приведенное в работе [3]. Определение зависимости выхода e_0 -электронов от толщины источника помогает понять природу этого явления. Данная работа и посвящена изучению этого вопроса.

2. Приготовление источников

Для проведения исследований необходимо было изготовить более тонкие источники различной толщины. Источники ¹⁵²Eu приготавливались из источника, ранее использованного нами для ядерно-спектроскопических исследований. Примерно половина активности была смыта с него и разделена на две части в соотношении 1:2. Затем каждая часть была высажена электролизом на хорошо отполированную поверхность пластины из нержавеющей стали. Активное пятно при этом представляло собой круг площадью 1 см², что на порядок величины больше, чем площадь источника ¹⁵²Eu толщиной 10 мкг/см² (0.04 × 1.8 см²), который использовался в работах [2, 3]. Кроме того, приготовленные источники были слабее его по активности в 2 и 4 раза соответственно. Таким образом были получены два источника толщиной около 1 и 2 мкг/см², что соответствует примерно 4 и 8 атомным слоям.

3. Проведение измерений

Измерения проводились методом ($e\gamma$)-совпадений [2, 3]. Для регистрации γ -лучей использовались HPGe-детекторы, а для регистрации электронов - шеврон из двух микроканальных пластин (МКП). Снимались три спектра: простой γ -спектр и два спектра ($e\gamma$)-совпадений при разном напряжении между источником и МКП. Один из них измерялся при напряжении, когда регистрируются быстрые электроны и электроны околонулевой

энергии, а второй - при запирающем напряжении, когда e_0 -электроны не попадают на МКП, а регистрируются только быстрые электроны. Разность этих двух спектров определяет спектр $(e_0\gamma)$ -совпадений. Тогда вероятность регистрации e_0 -электронов R_γ , приходящаяся на один акт распада от ветви, выделяемой γ -квантом, определяется по формуле $R_\gamma = N_{e_0\gamma}/N_\gamma(1 - R_e)$, где $N_{e_0\gamma}$ - интенсивность γ -линии в спектре $(e_0\gamma)$ -совпадений, N_γ - интенсивность γ -линии в простом γ -спектре, а $R_e = N_{e\gamma}/N_\gamma$ - вероятность регистрации быстрых электронов ($N_{e\gamma}$ - интенсивность γ -линии в спектре совпадений с быстрыми электронами). Выбирая различные γ -кванты в схеме распада, можно выделять интересующие ветви и определять значения R_γ для радиоактивного распада разного типа. Выход e_0 -электронов n при радиоактивном распаде определяется формулой $n = \ln(1 - R_\gamma)/\ln(1 - \epsilon_0)$, где ϵ_0 - эффективность регистрации отдельного e_0 -электрона микроканальными пластинами.

Установка, на которой проводились измерения, описана в работах [2, 3]. Ее характеристики были улучшены за счет замены микроканальных пластин на новые, имеющие более высокую эффективность регистрации e_0 -электронов ($\epsilon_0 = 0.15$) и более высокую стабильность в работе. В отдельных случаях для улучшения условий измерений расстояние между источником и МКП увеличивалось до 7.3 см.

^{152}Eu распадается электронным захватом и β -распадом. При β^- -распаде ^{152}Eu возбуждаются уровни ^{152}Gd , которые затем разряжаются γ -квантами на первое возбужденное состояние с энергией 344 кэВ. Эти γ -переходы имеют высокую энергию и, следовательно, малые значения коэффициентов внутренней конверсии (КВК). При таких переходах практически не создаются e_0 -электроны. Выделяя γ_{344} кэВ в простом спектре и в спектре $(e_0\gamma)$ -совпадений, можно по описанной процедуре определить $R_{\gamma_{344}}$. Поскольку в выделенной ветви кроме β -распада других источников образования e_0 -электронов нет, то $R_{\gamma_{344}} = R_\beta$, где R_β - вероятность регистрации e_0 -электронов, приходящаяся на один акт β -распада. Выход e_0 -электронов при β -распаде n_β можно определить из значения R_β по вышеприведенной формуле.

Электронный захват (ЭЗ) ^{152}Eu идет на возбужденные уровни ^{152}Sm , которые разряжаются высокоэнергетическими γ -квантами, в основном на первое возбужденное состояние с энергией 122 кэВ. Они также имеют малые значения КВК и не создают e_0 -электронов. Тогда можно записать, что $R_{\gamma_{122}} = R_{\text{ЭЗ}}$, где $R_{\text{ЭЗ}}$ - вероятность регистрации e_0 -электронов, приходящаяся на один акт электронного захвата. Выход e_0 -электронов при электронном захвате $n_{\text{ЭЗ}}$ определяется аналогично n_β .

Для определения выхода e_0 -электронов на один акт внутренней конверсии $R_{\text{ВК}}$ мы выбрали переход γ_{244} кэВ, который происходит после электронного захвата и идет на уровень 122 кэВ ^{152}Sm . Поэтому γ_{244} кэВ находится в совпадении с e_0 -электронами, образуясь как при электронном захвате, так и при внутренней конверсии γ_{122} кэВ. Выход электронов околонулевой энергии при внутренней конверсии $n_{\text{ВК}}$ определяется из соотношений

$$R^* = \frac{R_{\gamma_{244}} - R_{\gamma_{121}}}{1 - R_{\gamma_{121}}}, \quad n_{\text{ВК}} = \frac{1 + \alpha}{\alpha} \cdot \frac{\ln(1 - R^*)}{\ln(1 - \epsilon_0)}.$$

Здесь R^* - вероятность регистрации e_0 -электронов, приходящаяся на один акт распада возбужденного состояния 122 кэВ, включающая в себя возможность разрядки как путем внутренней конверсии, так и испусканием γ -кванта. Поскольку при излучении γ -квантов e_0 -электронов не возникает, то в выражении для $n_{\text{ВК}}$ появляется множитель $1 + \alpha/\alpha$, где α - полный коэффициент внутренней конверсии для γ_{122} кэВ.

Для всех источников ^{152}Eu было проведено несколько серий измерений в различной геометрии, которые хорошо согласуются между собой. Результаты измерений приведены в таблице.

Выход e_0 -электронов n при различных процессах радиоактивного распада в зависимости от толщины источника ^{152}Eu

Толщина источника электронов	n_β	$n_{\text{эз}}$	$n_{\text{вк}}$
1 мкг/см ²	0.34	3.6	3.3
2 мкг/см ²	0.27	2.3	2.2
10 мкг/см ²	0.12	0.28	0.28

Примечание. Статистические погрешности значений выходов e_0 -электронов составляют не более 10 %.

4. Обсуждение результатов

Как видно из таблицы, при увеличении толщины источника ^{152}Eu от 1 до 10 мкг/см² выход e_0 -электронов при электронном захвате и внутренней конверсии уменьшается более чем в 10 раз. Это показывает, что выход электронов из источника толщиной 10 мкг/см² связан, главным образом, с распадом ядер, находящихся в его приповерхностном слое толщиной примерно 1 мкг/см². Распад радиоактивных ядер, находящихся вне приповерхностного слоя, дает малый вклад в образование e_0 -электронов.

При β -распаде увеличение толщины источника в 10 раз приводит к уменьшению выхода e_0 -электронов только примерно в три раза. Откуда следует, что в образовании e_0 -электронов играют роль не только радиоактивные атомы приповерхностного слоя, но и атомы, находящиеся в более глубоких слоях источника. Можно представить себе источник толщиной 10 мкг/см² как состоящий из 10 слоев, каждый из которых имеет толщину 1 мкг/см². Тогда выход e_0 -электронов для него n определяется как среднее значение выхода от каждого слоя n_i :

$$n = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} n_i .$$

Первым слагаемым в этой сумме является значение выхода для источника 1 мкг/см². Оно составляет 28 % от полного выхода. Источник толщиной 2 мкг/см² можно представить себе как состоящий из двух источников по 1 мкг/см² каждый. Тогда второй слой дает выход e_0 -электронов 0.20 и его вклад в источнике 10 мкг/см² составляет 17 %. Последующие слои вносят все меньший и меньший вклад в общий выход. Это показывает, что электроны, которые приходят из других слоев в приповерхностный слой и участвуют в формировании e_0 -электронов, имеют небольшую энергию. Так, например, электроны с энергией 250 эВ имеют пробег в европии 2 мкг/см² (для вычисления пробегов мы пользуемся формулами, приведенными в работе [3]). Энергия, соответствующая пробегу электрона в источнике толщиной 10 мкг/см², составляет 760 эВ. Такие энергии имеют оже-электроны в гадолинии. Они возникают при встряске в процессе β -распада, когда происходит заполнение вакансий, образующихся после стряхивания электронов с оболочек атома. Сечение взаимодействия электрона с атомом с энергией 250 эВ больше, чем сечение для электрона с энергией 760 эВ. Кроме того, электроны с энергией 250 эВ образуются в процессе β -распада после встряски на N-оболочке атома, а с энергией 760 эВ - после встряски на M-оболочке. Вероятность

встряски на М-оболочке меньше, чем на N-оболочке. Этим и объясняется уменьшение вклада глубоких слоев в выход e_0 -электронов с поверхности источника.

5. Заключение

По нашим представлениям процесс возникновения и испускания e_0 -электронов в приповерхностном слое источника происходит следующим образом. В процессе внутренней конверсии или при электронном захвате возникает вакансия на одной из глубоких оболочек атома. При ее заполнении происходит вылет большого числа оже-электронов. Это приводит к быстрому, почти внезапному, появлению большого заряда атома q . Если атом находится в приповерхностном слое, то это приводит к вылету электронов за пределы поверхности, что можно трактовать как их стряхивание с поверхности. Это явление аналогично обычной встряске при β^- -распаде или внутренней конверсии, только причиной появления большого заряда является не вылет β -частицы или конверсионного электрона, а вылет значительного количества оже-электронов. Выход e_0 -электронов должен быть пропорционален q^2 . В случае β -распада первоначальная вакансия образуется в результате эффекта встряски. Далее процесс развивается аналогично внутренней конверсии или электронному захвату. Однако в отличие от внутренней конверсии и электронного захвата, где первоначальная вакансия образуется на глубоких оболочках атома, при β -распаде вероятность встряски значительна лишь для наружных оболочек. Это приводит к меньшему заряду атома q и значительно меньшему выходу e_0 -электронов.

Чем ближе к поверхности источника находится атом, испытывающий радиоактивный распад, тем больше эмиссия e_0 -электронов. Она максимальна для ядер, распадающихся на поверхности, и сходит на нет где-то в пятом - шестом атомном слое источника [4]. Распределение e_0 -электронов по энергии при этом не изменяется. Если радиоактивный распад происходит вне приповерхностного слоя, то испускание e_0 -электронов вызывается появлением вакансий в атомах приповерхностного слоя в результате выбивания из них остовных электронов. Далее процесс развивается аналогично описанному выше.

В тонких источниках сами β -частицы и конверсионные электроны, а также оже-электроны большой энергии не принимают участие в образовании e_0 -электронов [3]. В толстых радиоактивных источниках, когда приповерхностный слой составляет лишь малую долю от общей толщины, появление e_0 -электронов связано с выбиванием остовных электронов из атомов приповерхностного слоя всеми электронами, достигающими его. Проведенные исследования подтверждают эти представления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Freedman M.S., Porter F.T., Wagner F.J., Day P.P. // Phys. Rev. - 1957. - Vol. 108. - P. 836 - 841.
2. Купряшкин В.Т., Митрохович Н.Ф., Сидоренко Л.П. и др. Исследование электронов околонулевой энергии в различных видах радиоактивного распада // Изв. РАН. Сер. физ. - 1998. - Т. 62. - С. 82 - 88.
3. Купряшкин В.Т., Сидоренко Л.П., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Электроны околонулевой энергии в радиоактивном распаде // Изв. РАН. Сер. физ. - 1999. - Т. 63. - С. 159 - 167.
4. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. // Вторичная электронная эмиссия. - М.: Наука, 1969.

**ВИХІД ЕЛЕКТРОНІВ БЛИЗЬКОНУЛЬОВОЇ ЕНЕРГІЇ
РАДІОАКТИВНИХ ДЖЕРЕЛ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ****В.Т. Купряшкін, Л.П. Сидоренко, О.І. Феоктистов, І.П. Шаповалова**

З метою вивчення залежності виходу електронів близьконульової енергії e_0 від товщини джерел для різноманітних видів радіоактивного розпаду (β -розпад, електронне захоплення, внутрішня конверсія) методом $(e\gamma)$ -збігів досліджувались джерела ^{152}Eu різної товщини (від 1 до 10 $\text{мкг}/\text{см}^2$). Показано, що основну роль в утворенні e_0 -електронів грає приповерхневий шар радіоактивних атомів. Обговорюється природа цього явища.

**YIELD OF NEAR ZERO ENERGY ELECTRONS FROM
RADIOACTIVE SOURCES OF DIFFERENT THICKNESS****V.T. Kupryashkin, L.P. Sidorenko, A.I. Feoktistov, I.P. Shapovalova**

For the purpose of study the near zero energy electron e_0 yield dependence on source thickness for different mode of radioactive decay (β -decay, electron capture, internal conversion) ^{152}Eu isotopes were investigated by $(e\gamma)$ -coincidence method. It was shown that surface layer of radioactive atoms takes main part in e_0 -electron formation. The nature of this phenomenon is discussed.