

Л. П. Сидоренко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

**СПЕКТР И УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАСПАДА ^{152}Eu**

Измерено угловое распределение низкоэнергетических электронов из распада ^{152}Eu . Геометрия измерений – цилиндрическая, что позволяет проводить измерения углового распределения с наименьшими искажениями. Полученные данные подтверждают наличие зависимости углового распределения от энергии испускаемых электронов, но характер зависимости отличается от предсказанной теорией. Отмечено, что теория предсказывает заниженное значение интенсивности испускания электронов околонулевой энергии e_0 ($E_e \sim 1\text{-}2$ эВ), а также то, что используемое в теории статическое экранирование заряда не должно влиять на эмиссию e_0 -электронов.

Ключевые слова: распад ^{152}Eu , низкоэнергетические электроны, угловое распределение.

В спектре электронов, испускаемых из твердых мишеней при их облучении заряженными частицами (e , p , α , тяжелые ионы), наблюдается интенсивный пик в районе энергий электронов $\sim 1\text{-}2$ эВ. Эти электроны относятся к истинно вторичным электронам, энергия которых условно ограничена диапазоном $E_e \leq 50$ эВ. Вклад этих электронов в полный выход электронов из мишени составляет порядка 90 % [1].

Такой же низкоэнергетический пик электронов обнаруживается и в спектре излучения электронов радиоактивными источниками [2, 3]. Его интенсивность, как и для истинно вторичных электронов, возрастает от нуля при энергии 0 эВ до максимума при 1 - 2 эВ, а затем быстро спадает более чем на порядок до энергии 20 эВ.

Основными характеристиками спектра истинно вторичных электронов или электронов вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) являются: форма спектра вторичных электронов, величина выхода и его зависимость от материала мишени и вида налетающих частиц, угловое распределение вторичных электронов. Эти характеристики широко изучались и изучаются в настоящее время как экспериментально, так и теоретически (особенно это касается ВЭЭ под воздействием электронов). И если в экспериментальных исследованиях имеются очень серьезные успехи, которые привели к многочисленным приложениям, то теоретические исследования явления натолкнулись на серьезные затруднения и до настоящего времени ведется поиск теоретического подхода к описанию явления и дискуссии. Общепринятой теории, описывающей эмиссию истинных вторичных электронов в целом, пока не разработано.

Испускание электронов околонулевой энергии радиоактивными источниками экспериментально изучено достаточно детально (см., например, работы [4 - 6]), хотя значительно менее объемно, чем вторичных электронов. Кроме

того, появились теоретические работы [7, 8], в которых это явление в металлах трактуется как испускание слабосвязанных электронов проводимости под действием внезапно появившегося у поверхности радиоактивного источника заряда ΔZ , обусловленного распадом ядра приповерхностного атома. Заряд ΔZ равен +1, так -1 и -2 для бета-распада, электронного захвата и альфа-распада соответственно. Этот заряд, подвергшийся статическому экранированию, и вызывает испускание электронов проводимости из металлов. Теория качественно дает правильную форму спектра излучаемых электронов, а также угловое распределение этих электронов относительно поверхности кристалла, в котором находится атом, ядро которого подверглось радиоактивному распаду. Это угловое распределение, в отличие от [1], зависит от энергии испускаемых электронов E_e . Оно несколько более широкое, чем принятое в [1], и по мере уменьшения энергии электронов E_e приближается к косинусоидальному виду. Мы изучали угловое распределение низкоэнергетических электронов [5, 9] и получили результат, также отличающийся от косинусоидального углового распределения для электронов околонулевой энергии ($E_e \leq 24$ эВ). Поэтому представляет интерес измерение углового распределения электронов низкой энергии из распада ^{152}Eu ($T_{1/2} = 13,3$ лет, $\text{EC-}72,1\% + \beta^- -27,9\%$), проведенное в определенной правильной геометрии (цилиндрической или сферической) и сравнение его с теоретическим [7]. Это и является целью настоящей работы.

Главная трудность при измерении угловых распределений электронов околонулевой энергии заключается в их малой энергии и связанной с этим сильной зависимостью движения электронов не только от наличия небольших потенциалов вблизи источника электронов, но даже от расположения заземленных электродов и, возможно,

© Л. П. Сидоренко, 2015

от размеров самого источника. Поэтому радиоактивный источник нужно экранировать металлической сеткой, а детектор электронов размещать около внешней поверхности этой цилиндрической сетки, чтобы исключить его влияние на траектории электронов малой энергии. Необходимо также проверить, насколько сильно влияет напряжение, подаваемое на источник, на результаты измерений. Для этого выполнено два вида измерений – с подачей напряжения на источник и без подачи напряжения, разделение электронов по энергии при этом производится на входе в детектор с помощью двойной энергоанализирующей сетки.

Измерения проведены на установке, схема которой приведена на рис. 1.

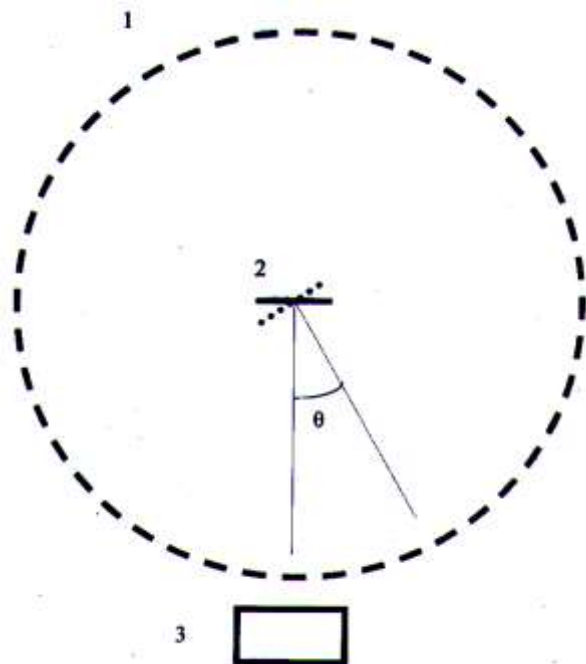


Рис. 1. Схема установки для измерения углового распределения электронов.

Установка состоит из заземленной цилиндрической металлической сетки 1 диаметром 90 мм и высотой также 90 мм, укрепленной на крышке вакуумной камеры. В центре этого цилиндра на вращательном штоке укреплялся радиоактивный источник ^{152}Eu 2 – тонкий слой радиоактивного материала на подложке из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. Диаметр радиоактивного пятна 8 мм. Вне цилиндрической сетки вплотную к ее поверхности располагался детектор электронов 3 – шеврон микроканальных пластин (МКП) с входным окном $10 \times 20 \text{ мм}^2$, ограниченным диафрагмой диаметром 10 мм или двойной сеткой энергоанализатора, которая имела прямоугольную форму с размерами $10 \times 20 \text{ мм}^2$. Центровка цилиндрической сетки и оси вращения источника производилась при укреплении сетки на крышке

вакуумной камеры, положение нуля определялось с помощью зеркальной поверхности радиоактивного источника. При измерениях в камере поддерживался вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$

Для определения углового распределения электронов низкой энергии относительно нормали к поверхности снималась зависимость скорости счета электронов шевроном МКП от угла поворота источника от нулевого положения (направление на входное окно МКП). Такая зависимость измерялась для электронов с энергией $E_e \geq 0 \text{ эВ}$ и для $E_e \geq 24 \text{ эВ}$ (быстрые электроны). Разности этих скоростей счета дают угловую зависимость испускания околонулевых электронов e_0 .

Скорость счета электронов с энергией $E_e \geq 0 \text{ эВ}$ измерялась при заземленном радиоактивном источнике ($U_{\text{и}} = 0$), а скорость счета быстрых электронов – при подаче на тот же источник напряжения +24 В.

Для проверки влияния электрического поля на угловое распределение электронов проведено измерение этого распределения без подачи напряжения на источник. При этом на переднюю поверхность шеврона МКП укреплялась двойная сетка, передняя по ходу электронов заземлялась, что исключало ее влияние на поле внутри цилиндра, а на заднюю (изолированную) подавалось необходимое напряжение ($U_c = 0 \text{ В}$ и -24 В). Чтобы уменьшить потери электронов очень низкой энергии (около 0 В) из-за осаждения их на сетке цилиндра, в последней вырезалось окошко, закрываемое заземленной сеткой энергоанализатора – двойной сетки на входе в шеврон МКП.

Измерения углового распределения проведены через 15° для углов от 0 до 75° в обе стороны от нормали к поверхности источника. Точки $\pm 90^\circ$ не измерялись, для определения фона использовалось среднее значение скоростей счета на углах $\pm 105^\circ$ (на обратной поверхности радиоактивного источника). Скорости счета на углах от 15° до 75° нормировались на скорость счета при угле 0° , уменьшенной на величину фона.

Результаты измерений приведены в таблице.

В таблице три первых столбца результатов получены из измерений с подачей напряжения $U_{\text{и}} = +24 \text{ В}$ на источник, три следующих – с подачей напряжения $U_c = -24 \text{ В}$ на сетку энергоанализатора, а в последнем столбце приведены для сравнения значения $\cos \theta$ для соответствующего угла.

Из таблицы видно, что результаты двух измерений хорошо согласуются, особенно для $E_e > 24 \text{ эВ}$. Небольшие отличия обусловлены, по-видимому, несовершенством установки, а также неравномерностью распределения радиоактивного вещества по площади источника. Отметим

Угловые распределения испускания электронов радиоактивным источником ^{152}Eu

θ , град	$U_{\text{н}} = 0 \text{ В}$	$U_{\text{н}} = +24 \text{ В}$	e_0	$U_{\text{с}} = 0 \text{ В}$	$U_{\text{с}} = -24 \text{ В}$	e_0	$\text{Cos } \theta$
-75	0,42(1)	0,49(2)	0,13(2)	0,45(1)	0,51(1)	0,04(2)	0,259
-60	0,64(1)	0,73(1)	0,33(2)	0,67(1)	0,72(1)	0,34(3)	0,500
-45	0,80(1)	0,86(1)	0,59(3)	0,82(1)	0,85(1)	0,61(2)	0,707
-30	0,91(1)	0,95(1)	0,76(3)	0,92(1)	0,93(1)	0,81(3)	0,866
-15	0,98(1)	0,99(1)	0,92(3)	0,98(1)	0,98(1)	0,94(3)	0,966
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
+15	0,97(1)	0,97(1)	0,97(3)	0,98(1)	0,99(1)	0,93(3)	0,966
+30	0,90(1)	0,91(1)	0,87(3)	0,92(1)	0,94(1)	0,83(3)	0,866
+45	0,79(1)	0,81(1)	0,72(3)	0,82(1)	0,86(1)	0,59(2)	0,707
+60	0,63(1)	0,68(1)	0,46(3)	0,67(1)	0,71(1)	0,36(2)	0,500
+75	0,41(1)	0,46(1)	0,20(3)	0,42(1)	0,46(1)	0,10(2)	0,259

также, что фон очень мало влияет на результаты измерений. Изменение фона на 50 % и даже больше вызывает изменение углового распределения на всего лишь на 1 - 2 %, что не может оказать существенного влияния на результаты.

Из приведенной таблицы также видно, что наблюдается зависимость углового распределения испущенных электронов от их энергии. Эта зависимость имеет такой характер: для низкоэнергетических электронов (околонулевых, $E_e \leq \leq 24 \text{ эВ}$) эта зависимость несколько более узкая по углу θ , чем косинусоидальное распределение, а для быстрых ($E_e > 24 \text{ эВ}$) угловое распределение заметно шире косинусоидального. Такое поведение углового распределения качественно согласуется с предсказанным [7] в том, что зависимость от энергии существует. Но характер распределения несколько отличается от предсказанного теорией, которое приближается к косинусоидальному с уменьшением энергии электронов, но при этом остается шире последнего. Это может служить указанием на то, что теория [7] дает заниженную интенсивность эмиссии электронов низкой энергии. Причиной здесь может быть заниженная прозрачность поверхностного барьера для электронов с очень малой энергией, выходящих из поверхности твердого тела. Заряд ΔZe , возникающий у поверхности твердого тела вследствие радиоактивного распада ядра приповерхностного атома, вызывает эмиссию электронов проводимости, но при этом он должен вызывать локальное уменьшение величины поверхностного барьера или его полное снятие. Из-за этого электроны очень малой энергии выходят за пределы твердого тела с интенсивностью заметно большей той, которая обуславливается нормальным поверхностным барьером. Таким образом, экспериментальные данные настоящей работы показывают, что теория [7] несколько занижает интенсивность эмиссии электронов очень низкой энергии при радиоактивном распаде.

Такой же вывод следует из сравнения на рис. 3

работы [7] экспериментального спектра околонулевых электронов, испущенных из кристалла кобальта [10], с расчетным. Видно что интенсивность низкоэнергетического пика электронов относительно интенсивности высокоэнергетического хвоста ($E_e > 20 \text{ эВ}$) значительно большая, чем это предсказывает теория. Такая картина должна наблюдаться в случае занижения теорией интенсивности эмиссии электронов низкой энергии. На рис. 2 показан полученный в одном из измерений спектр электронов околонулевой энергии источника ^{152}Eu , угловое распределение которого измерялось в настоящей работе. В этом спектре отношение интенсивности электронов в пике низкой энергии к интенсивности электронов при энергии 16 эВ равно приблизительно 60, что значительно больше, чем величина, близкая к 5, следующая из теории. Но при этом следует отметить, что измерения проведены для углов вылета электронов из источника, близком к нормали.

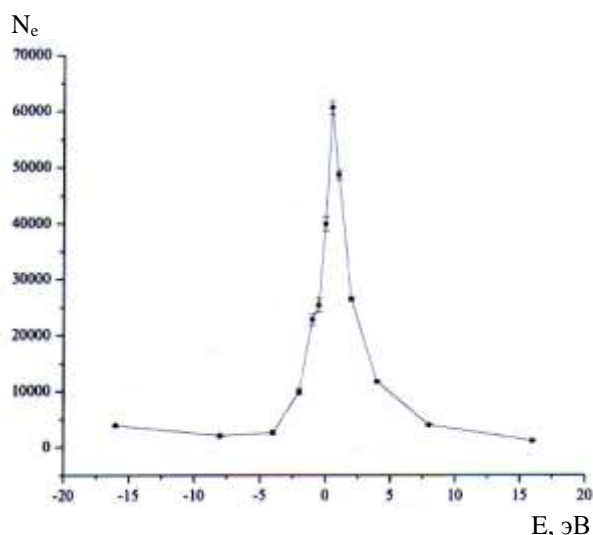


Рис. 2. Спектр электронов околонулевой энергии радиоактивного источника ^{152}Eu .

Рассмотрим далее рис. 1 и 2 работы [7]. На них показано влияние длины экранирования на форму спектра и выход околонулевых электро-

нов. Если судить по величине отношения интенсивности эмиссии электронов в пике низкой энергии к ее интенсивности при энергии около 20 эВ, то можно видеть, что для большей длины экранирования результат лучше согласуется с экспериментом. Это ставит под сомнение использование статического экранирования для заряда ΔZ , вызывающего эмиссию низкоэнергетических электронов в радиоактивном распаде. Этим зарядом не может быть изменение заряда ядра при радиоактивном распаде. Им является заряд атома в решетке кристалла, ядро которого подверглось радиоактивному распаду и изменило свой заряд.

До распада ядра атом находится в кристаллической решетке и имеет при этом свой равновесный заряд. Изменение заряда ядра вызывает перестройку электронной оболочки атома, которая приводит к появлению дочернего атома в возбужденном состоянии. Возбуждение снимается путем рентгеновских и оже-переходов. После завершения этого процесса дочерний атом оказывается с зарядом, отличным от нуля на величину ΔZ . Этот заряд вызывает испускание низкоэнергетических электронов с поверхности кристалла (стряхивание). При этом он путем захвата электронов проводимости кристалла нейтрализу-

ется до нового равновесного значения. Новый равновесный заряд атома (поскольку он отличается от окружающих его зарядов) статически экранируется.

Образование заряда ΔZ – процесс заметно более быстрый, чем испускание электронов проводимости с поверхности, и является причиной встряски для процесса эмиссии электронов.

Суммируя все сказанное выше, можно сделать такие выводы. Во-первых, угловое распределение электронов низкой энергии из распада ^{152}Eu зависит от энергии испущенных электронов E_e . Для быстрых электронов ($E_e > 24$ эВ) оно шире косинусоидального, что согласуется с теорией, а для околонулевых электронов ($E_e < 24$ эВ) – заметно уже последнего, что противоречит расчетам [7]. Во-вторых, теория [7] дает сильно заниженную интенсивность эмиссии электронов околонулевой энергии, на что указывают как форма спектра, так и угловое распределение излучения, получаемые из эксперимента. Причиной этого может быть то, что теория не учитывает влияние заряда ΔZ на величину поверхностного барьера в кристалле. И, в-третьих, сравнение теории и эксперимента показывает, что статическое экранирование не влияет на заряд ΔZ , вызывающий эмиссию околонулевых электронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев В.П. Вторичные электроны. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 178 с.
2. Freedman M.S., Porter F.T., Wagner F.I., Day P.P. Transition in ^{235}U Less Than 23 Electron Volts // Phys. Rev. - 1957. - Vol. 108. - P. 836.
3. Бобыкин Б.В., Бурминский В.П., Любов С.К. Изучение электронной системы адсорбированных пленок посредством радиационной эмиссии // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1992. - № 9. - С. 71 - 75.
4. Купряшкин В.Т., Сидоренко Л.П., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Природа и свойства эмиссии электронов околонулевой энергии с поверхности радиоактивных источников // Изв. РАН. Сер. физ. - 2003. - Т. 67, № 10. - С. 1467 - 1474.
5. Купряшкин В.Т., Сидоренко Л.П., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Угловое распределение электронов околонулевой энергии, испускаемых с поверхности источника при радиоактивном распаде // Изв. РАН. Сер. физ. - 2004. - Т. 68, № 8. - С. 1208 - 1213.
6. Феоктистов А.И., Вальчук А.А., Коваленко А.В. и др. Исследование зависимости выхода e_0 -электронов от места возникновения радиоактивного распада в источниках ^{64}Cu // Изв. РАН. Сер. физ. - 2008. - Т. 72, № 2. - С. 285 - 288.
7. Dzyublik A.Ya., Spivak V.Yu. Shake-off for conductivity electrons in metals caused by nuclear decay // Ukr. J. Phys. - 2008. - Vol. 53, No. 2. - P. 120 - 125.
8. Dzyublik A.Ya., Spivak V.Yu. Temperature dependence of the shake-off effect for conductivity electrons in metals // Ukr. J. Phys. - 2010. - Vol. 55, No. 4. - P. 428 - 433.
9. Вальчук А.О., Купряшкин В.Т., Сидоренко Л.П. та ін. Дослідження кутового розподілу електронів, що випромінюються з поверхні радіоактивних джерел // УФЖ. - 2004. - Т. 49, № 11. - С. 1062 - 1068.
10. Kovalik A., Gorozhankin V.M., Vylvov Ts. et al. The low energy electron spectrum from the EC-decay of ^{57}Co : 0 eV up to 15 keV // J. Electron Spectrosc. and Related Phenomena. - 1998. - Vol. 95, No. 1. - P. 1 - 24.

Л. П. Сидоренко

Институт ядерних досліджень НАН України, Київ

СПЕКТР ТА КУТОВИЙ РОЗПОДІЛ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ЕЛЕКТРОНІВ ІЗ РОЗПАДУ ^{152}Eu

Виміряно кутовий розподіл низькоенергетичних електронів із розпаду ^{152}Eu . Геометрія вимірювань – циліндрична, що дозволяє проводити такі вимірювання з найменшими спотвореннями. Одержані дані підтверджують наявність залежності кутового розподілу від енергії електронів, що випромінюються, але характер залежності

відрізняється від передбаченої теорією. Відзначено, що теорія передбачає занижену інтенсивність випромінювання близьконульових електронів e_0 ($E_e \sim 1 - 2$ eV), а також те, що використане в теорії статичне екранування заряду не повинно впливати на емісію e_0 -електронів.

Ключові слова: розпад ^{152}Eu , низькоенергетичні електрони, кутовий розподіл.

L. P. Sydorenko

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

SPECTRUM AND ANGULAR DISTRIBUTION OF LOW ENERGY ELECTRONS FROM ^{152}Eu DECAY

Angular distribution of low energy electrons from ^{152}Eu decay was measured. Measurements were carried out in cylindrical geometry, which permits minimum distortions of data. These data confirm existence of angular distribution dependence on the energy of emitted electrons but this dependence somewhat differs from theory predicted. It is noted that the theory predicts too low intensity of nearzero energy electrons e_0 ($E_e \sim 1 - 2$ eV) emission and that is used in theory static screening of charge and should no influence on the emission of e_0 -electrons.

Keywords: ^{152}Eu decay, low energy electrons, angular distribution.

REFERENCES

1. *Kovalev V.P.* Secondary electrons. - Moscow: Energoatomizdat, 1987. - 178 p. (Rus)
2. *Freedman M.S., Porter F.T., Wagner F.I., Day P.P.* Transition in ^{235}U Less Than 23 Electron Volts // *Phys. Rev.* - 1957. - Vol. 108. - P. 836.
3. *Bobykin B.V., Burminskij V.P., Lyubov S.K.* // *Poverkhnost'. Fizika, khimiya, mekhanika.* - 1992. - No. 9. - P. 71 - 75. (Rus)
4. *Kupryashkin V.T., Sidorenko L.P., Feoktistov A.I., Shapovalova I.P.* // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 2003. - Vol. 67, No. 10. - P. 1467 - 1474. (Rus)
5. *Kupryashkin V.T., Sidorenko L.P., Feoktistov A.I., Shapovalova I.P.* // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 2004. - Vol. 68, No. 8. - P. 1208 - 1213. (Rus)
6. *Feoktistov A.I., Val'chuk A.A., Kovalenko A.V. et al.* // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 2008. - Vol. 72, No. 2. - P. 285 - 288. (Rus)
7. *Dzyublik A.Ya., Spivak V.Yu.* Shake-off for conductivity electrons in metals caused by nuclear decay // *Ukr. J. Phys.* - 2008. - Vol. 53, No. 2. - P. 120 - 125.
8. *Dzyublik A.Ya., Spivak V.Yu.* Temperature dependence of the shake-off effect for conductivity electrons in metals // *Ukr. J. Phys.* - 2010. - Vol. 55, No. 4. - P. 428 - 433.
9. *Valhuk A.O., Kupryashkin V.T., Sydorenko L.P. et al.* // *UFZh.* - 2004. - Vol. 49, No. 11. - P. 1062 - 1068. (Ukr)
10. *Kovalik A., Gorozhankin V.M., Vylvov Ts. et al.* The low energy electron spectrum from the EC-decay of ^{57}Co : 0 eV up to 15 keV // *J. Electron Spectrosc. and Related Phenomena.* - 1998. - Vol. 95, No. 1. - P. 1 - 24.

Надійшла 05.12.2014

Received 05.12.2014