

ИСПУСКАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ОКОЛОНУЛЕВОЙ ЭНЕРГИИ С ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИ РАДИОАКТИВНОМ РАСПАДЕ ИЛИ БОМБАРДИРОВКЕ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

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

Рассмотрены основные характеристики эмиссии электронов околонулевой энергии e_0 с поверхности твердого тела, полученные экспериментальным путем разными авторами. Обсуждаются имеющиеся представления о природе этого явления. Предлагается объяснение возникновения e_0 -электронов как стряхивание электронов с поверхности, вызванное внезапным возникновением заряда вблизи поверхности источника при радиоактивном распаде или бомбардировке мишени заряженными частицами. Рассматривается испускание e_0 -электронов при различных типах радиоактивного распада и в ядерных реакциях.

1. Основные характеристики электронов околонулевой энергии

При радиоактивном распаде с поверхности источника испускаются электроны малой энергии. Максимум их энергетического распределения находится приблизительно при энергии 0,5 эВ, а полуширина распределения составляет примерно 1 эВ. Интенсивность испускания электронов с ростом энергии спадает по экспоненциальному закону и при энергии 20 эВ практически отсутствует [1]. Эти электроны называем электронами околонулевой энергии и обозначаем e_0 . Средняя энергия e_0 -электронов составляет около 2 эВ. Аналогичное излучение наблюдается и при бомбардировке заряженными частицами твердых мишеней. Энергетическое распределение испускаемых e_0 -электронов, примерно одинаковое для разных типов радиоактивного распада, не зависит от сорта бомбардирующих частиц и их энергии. Оно не зависит также от угла, под которым облучается поверхность мишени, или от угла регистрации [2, 3].

Образование e_0 -электронов связано с ионизацией атомов, находящихся в тонком слое у поверхности (5 - 6 атомных слоев). Этот тонкий слой будем называть приповерхностным слоем. Количество e_0 -электронов, которые создаются при ионизации атомов приповерхностного слоя, быстро уменьшается по мере удаления ионизированных атомов от поверхности вглубь источника [4, 5]. Выход e_0 -электронов пропорционален квадрату заряда q^2 налетающей частицы при бомбардировке мишени или квадрату заряда атома q^2 , возникающем при радиоактивном распаде [2, 6].

2. Существующие представления о природе e_0 -электронов

Для объяснения этого явления и его свойств обычно используется теория Штернгласса [7]. По этой теории процесс эмиссии вторичных электронов с поверхности твердого тела при бомбардировке его заряженными частицами рассматривается в две независимые стадии (под вторичными электронами подразумеваются электроны с энергией ≤ 25 эВ). В первой стадии падающая частица взаимодействует со связанными электронами оболочки атома и, по аналогии с ионизацией тяжелых газов, затрачивает на создание одного вторичного электрона $E_0 \approx 25$ эВ. Предполагается, что вся энергия, выделенная на поверхности, затрачивается на создание вторичных электронов. Тогда число вторичных электронов, создаваемых на расстоянии dx от поверхности, будет $dn = 1/E_0 \cdot dE/dx \cdot dx$, где dE/dx - тормозные потери падающей частицы. Во второй стадии процесса происходит миграция вторичных электронов в сторону поверхности. При этом они, испытывая рассеяние

и поглощение энергии, подобно диффузии в газах, выходят на поверхность твердого тела. Вероятность выхода электронов с глубинных слоев пропорциональна $\exp(-x/L_s)$, где L_s имеет значение порядка средней длины электрон-электронного рассеяния. Таковы основные черты теории Штернгласса.

Для объяснения этого явления используется также транспортная теория, которая учитывает различные вторичные процессы при передаче энергии электронам твердого тела [8]. Однако она принципиально не отличается от теории Штернгласса — электроны, которые испускаются с поверхности твердого тела (электроны околонулевой энергии), зарождаются внутри твердого тела подобно тому, как это происходит при ионизации тяжелых газов.

Однако в работах [1, 9] в серии экспериментов по исследованию e_0 -электронов в радиоактивном распаде, когда изменялся химический состав пленки, адсорбированной на поверхности источника, изменялась температура в условиях высокого вакуума, а также некоторые другие условия проведения эксперимента, авторы пришли к выводу, что это явление является чисто поверхностным. Они предложили назвать это явление радиационной электронной эмиссией (РЭЭ) и определили ее следующим образом: "РЭЭ - это истинно вторичная электронная эмиссия адсорбатов, возбуждаемая радиоактивным излучением". Хотя такое определение не полностью раскрывает суть наблюдаемого явления, главное состоит в том, что e_0 -электрон не рождается в недрах источника, как это предполагается в теории Штернгласса, а испускается с его поверхности. В этом отношении явление похоже на экзоелектронную эмиссию. Делается даже предположение, что, возможно, в обоих случаях основную роль играет одна и та же электронная система, находящаяся на поверхности [10].

3. Представления о природе e_0 -электронов

На основании проведенных исследований [3, 5, 6] предлагаем следующее объяснение этого явления. Испускание электронов околонулевой энергии представляет собой стряхивание электронов с поверхности, вызванное внезапным появлением заряда в атомах приповерхностного слоя. В процессе радиоактивного распада или при бомбардировке мишени заряженными частицами в атомах приповерхностного слоя образуются вакансии. При их заполнении происходит вылет большого числа Оже-электронов и за короткое время атомы становятся сильно ионизированными. Появление этого заряда и вызывает стряхивание электронов с поверхности, которые и являются e_0 -электронами. Явление аналогично обычной встряске при β -распаде или внутренней конверсии, только причиной внезапного появления заряда является не вылет β -частицы из ядра или конверсионного электрона из глубокой оболочки атома, а вылет большого числа Оже-электронов при заполнении вакансии. Кроме того, вместо стряхивания связанного электрона с оболочки собственного атома, происходит стряхивание e_0 -электронов с поверхности источника.

Следует отметить, что в момент взаимодействия бомбардирующей заряженной частицы с атомом приповерхностного слоя она дополнительно вносит еще и свой заряд в общий заряд ионизации. Для многозарядных ионов этот заряд становится определяющим в образовании e_0 -электронов. Если вакансия создается в атоме вне приповерхностного слоя, то возникающий при ее заполнении заряд не приводит к стряхиванию электронов с поверхности из-за отдаленности места возникновения от поверхности. В самом приповерхностном слое, чем дальше от поверхности возникает заряд, тем меньше выход стряхиваемых электронов. Выход максимален, когда заряд возникает в атомах на поверхности и он близок к нулю при возникновении его в 5 – 6-атомном слое. Распределение e_0 -электронов по энергии при этом не изменяется.

Выход e_0 -электронов n представляет собой среднее значение числа вылетевших электронов из-за возникновения заряда в атомах, находящихся в различных местах

приповерхностного слоя. Его можно представить в виде $n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i$, где $n_i = n_1 b^{i-1}$ – члены убывающей геометрической прогрессии, знаменатель которой примерно $b \sim 0,5$, n_1 – число e_0 -электронов, вылетающих при возникновении заряда в атомах первого слоя, а k – число атомных слоев в приповерхностном слое ($k \approx 5 - 6$). Отсюда $n = 1/k \cdot n_1 \cdot (1 - b^k)/(1 - b)$.

4. e_0 -электроны в различных типах радиоактивного распада и в ядерных реакциях

Если радиоактивные ядра находятся в приповерхностном слое, то первоначальная вакансия возникает в нем непосредственно при внутренней конверсии, при электронном захвате или вследствие встряски при β^- -распаде. Выход электронов n в этом случае можно записать в виде $n \sim r q^2$, где r – вероятность создания вакансии в атоме приповерхностного слоя, а q – величина заряда атома после ее заполнения. В процессе внутренней конверсии или при электронном захвате с вероятностью $r = 1$ 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 , который вызывает стряхивание электронов с поверхности источника. В случае β^- -распада первоначальная вакансия образуется в результате эффекта встряски. Далее процесс развивается аналогично процессу при внутренней конверсии или электронном захвате. Однако в отличие от внутренней конверсии и электронного захвата, где первоначальная вакансия образуется на глубоких оболочках атома с вероятностью $r = 1$, при β^- -распаде вероятность встряски и, следовательно, вероятность образования вакансии $r \sim 1$ имеет место лишь для наружных оболочек. Это приводит к меньшему заряду атома q и, следовательно, к значительно меньшему выходу e_0 -электронов.

Если радиоактивный распад происходит вне приповерхностного слоя, то электроны, сопровождающие распад, выбивают остовные электроны из атомов приповерхностного слоя и создают в них вакансии. Далее процесс образования заряда и стряхивания e_0 -электронов развивается аналогично описанному выше. Вероятность образования вакансии при выбивании связанного электрона $r \sim \sigma N_s$, где N_s – число атомов на 1 см^2 приповерхностного слоя ($N_s \approx 5 \cdot 10^{15}$). Поскольку σ может иметь большие значения только при выбивании наружных электронов атома, то в этом случае образуется небольшой заряд и выход e_0 -электронов будет малым. Из-за того, что сечение выбивания уменьшается с ростом энергии падающих электронов, в тонких источниках непосредственно конверсионные электроны и β^- -частицы (исключая самую небольшую низкоэнергетическую часть распределения), а также Оже-электроны большой энергии играют незначительную роль в образовании e_0 -электронов. Таким образом, выход e_0 -электронов в тонких источниках определяется вероятностью образования вакансий при распаде ядер, находящихся в приповерхностном слое и, в меньшей степени, вероятностью выбивания из него остовных электронов Оже-электронами малой энергии, которые испускаются радиоактивными атомами, находящимися вблизи приповерхностного слоя. Они образуются в конце каскадов Оже-процессов при электронном захвате, внутренней конверсии или после встряски при β^- -распаде. К ним следует отнести и небольшое число β^- -частиц от низкоэнергетической части β^- -спектра.

Однако в толстых радиоактивных источниках, когда активность приповерхностного слоя составляет лишь малую долю от его общей активности, а Оже-электроны небольшой энергии из глубоких слоев уже не достигают приповерхностного слоя, выход e_0 -электронов сильно падает и роль β^- -частиц, конверсионных электронов и Оже-электронов большой энергии в образовании вакансий в приповерхностном слое становится определяющей. Это становится похоже на случай, когда источник прикрывается фольгой или проводится

бомбардировка мишени электронами - образование вакансий в приповерхностном слое происходит из-за выбивания в нем остовых электронов быстрыми электронами.

При α -распаде причиной образования вакансий в атомах приповерхностного слоя также является выбивание из них электронов α -частицами. Однако, в отличие от предыдущего случая, из-за сильной ионизирующей способности α -частиц при прохождении ими приповерхностного слоя создаются вакансии на внешних оболочках нескольких атомов, что приводит к образованию большого заряда вблизи поверхности. Кроме того, в момент взаимодействия сама α -частица вносит свой заряд $2e$. Поэтому выход e_0 -электронов при α -распаде можно выразить как $n \sim (iq + 2e)^2$, где q – величина заряда ионизации атома после заполнения вакансии, а i – число образующихся вакансий.

Еще большее количество e_0 -электронов образуется при прохождении многозарядного иона через приповерхностный слой. Общий заряд ионизации складывается из суммы зарядов ионизации, образующихся в атомах приповерхностного слоя $\sum_i q_i$ и собственного заряда многозарядного иона Q . Выход электронов в этом случае $n \sim (\sum_i q_i + Q)^2$. При этом предполагаем, что из-за короткого времени прохождения α -частицей или многозарядным ионом приповерхностного слоя ($\Delta t \sim 10^{-16}$ с) электроны, находящиеся на поверхности, воспринимают все образующиеся заряды как один общий большой заряд.

При радиоактивном распаде, в противоположность α -распаду или бомбардировке мишени тяжелыми ионами, когда, например, вслед за β -распадом происходит внутренняя конверсия, наблюдаем, что выходы e_0 -электронов, образующихся при β -распаде и внутренней конверсии, будут складываться, т.е. система поверхностных электронов после встряски от β -распада полностью восстанавливается до наступления внутренней конверсии. Среднее время жизни уровня, который разряжается внутренней конверсией в наших измерениях, составляло не менее 10^{-9} с. Для этих времен выход e_0 -электронов при каскадном излучении носит аддитивный характер. Отсюда следует, что система поверхностных электронов восстанавливается за время меньше, чем за 10^{-9} с. Представляет интерес проследить, сохраняется ли аддитивный характер выхода e_0 -электронов при более быстрых конверсионных переходах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобыкин Б.В., Бурминский В.П., Любов С.К. // Поверхность. - 1992. - № 9. - С. 71.
2. Ковалев В.П. // Вторичные электроны. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С. 102.
3. Купряшкин В.Т., Сидоренко Л.П., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. // Изв. РАН. Сер. физ. - 1999. - Т. 63. - С. 159.
4. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. // Вторичная электронная эмиссия. - М.: Наука, 1969.
5. Купряшкин В.Т., Сидоренко Л.П., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. // УФЖ. - 2000. - Т. 45, № 8. - С. 918.
6. Купряшкин В.Т., Сидоренко Л.П., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. // УФЖ. - 2000. - Т. 45, № 9. - С. 1044.
7. Sternglass E.J. // Phys. Rev. - 1957. - Vol. 108. - P. 251.
8. Schou J. // Phys. Rev. B. - 1980. - Vol. 22. - P. 2141.
9. Бобыкин Б.В., Любов С.К., Невинный Ю.А. // ЖТФ. - 1988. - Т. 58, вып. 8. - С. 1524.
10. Бобыкин Б.В., Любов С.К., Невинный Ю.А. // Изв. АН Каз. ССР. Сер. физ.-мат. - 1985. - № 2. - С. 28.

**ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ БЛИЗЬКОНУЛЬОВОЇ ЕНЕРГІЇ З ПОВЕРХНІ
ТВЕРДОГО ТІЛА ПРИ РАДІОАКТИВНОМУ РОЗПАДІ ЧИ БОМБАРДУВАННІ
ЗАРЯДЖЕНИМИ ЧАСТИНКАМИ**

В. Т. Купряшкін, Л. П. Сидоренко, О. І. Феоктистов, І. П. Шаповалова

Розглянуто основні характеристики емісії електронів близьконульової енергії e_0 з поверхні твердого тіла, отримані експериментальним шляхом різними авторами. Обговорюються існуючі уявлення про природу цього явища. Пропонується пояснення виникнення e_0 -електронів як струсу електронів з поверхні джерела, викликане раптовим виникненням заряду поблизу поверхні джерела при радіоактивному розпаді або бомбардуванні мішені зарядженими частинками. Розглядається випромінювання e_0 -електронів при різних типах радіоактивного розпаду та в ядерних реакціях.

**EMISSION OF NEAR-ZERO-ENERGY ELECTRONS FROM THE SURFACE OF SOLID
STATE IN RADIOACTIVE DECAY OR UNDER BOMBARDMENT
BY CHARGED PARTICLES**

V. T. Kupryashkin, L. P. Sidorenko, A. I. Feoktistov, I. P. Shapovalova

The main characteristics of emission of near-zero-energy electrons e_0 from surface of solid state received by the different authors in experiment are considered. The existing ideas about the nature of this phenomenon are discussed. Our explanation of e_0 -electrons emission is the stress off of electrons from surface caused by a sudden splash of a charge near to the surface of source in radioactive decay or under bombardment of target by charged particles. The emission e_0 - of electrons is considered at different modes of radioactive decay and in nuclear reactions.

Поступила в редакцію 13.02.01