



**Лекция 11.
ВОЗМОЖНОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РАДИАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ И ЭФФЕКТОВ. МЕТОД
ПОЗИТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Дисциплина: Радиационные эффекты и современная спектроскопия твердого тела.

Преподаватель: Phd, и.о. доцента Мархабаева А.А.



Цель лекции: Рассмотреть основные направления практического применения радиационных явлений в науке, промышленности, медицине и материаловедении, а также изучить физические основы, методы и возможности позитронной спектроскопии для исследования дефектов в твёрдых телах.

Основные вопросы лекции

- Области практического использования радиации.
- Радиационные технологии в промышленности, энергетике и медицине.
- Применение радиационных эффектов в материаловедении.
- Принцип метода позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС).
- Источники позитронов и схемы аннигиляции.
- Время жизни позитрона и его связь с микродефектами.
- Методы позитронной спектроскопии: ПЖВ (PALS), ДАЭ (Doppler broadening), корреляционные методики.
- Применение ПАС для анализа дефектов и радиационно-индуцированных структурных изменений.



В основе радиационной физики твердого тела лежат, как известно, процессы взаимодействия высокоэнергетических частиц и излучений с различными материалами. В настоящее время физика этих процессов служит основой (базисом) для современных технологических разработок. Достаточно вспомнить, например, технологии, связанные с

- формированием скрытых легированных, пористых и дефектных слоев;
- легированием радиационными дефектами;
- ядерным трансмутационным легированием;
- ионно-лучевым перемешиванием;
- формированием квантово-размерных структур;
- изготовлением структур «кремний на изоляторе» («Smart Cut» технология) и другими.



В последние 10-15 лет в области радиационной физики твердого тела сформировалось актуальное научное направление - радиационная инженерия материалов (РИМ). Под этим собирательным термином понимается комплексное использование радиационных эффектов, индуцированных высокоэнергетическим воздействием частиц и излучения для получения, обработки и конструирования материалов с целью направленного изменения их свойств и изготовления различных изделий с новыми и улучшенными характеристиками и параметрами.

Направление РИМ включает в себя в первую очередь использование научных знаний неравновесных диаграмм состояния и радиационно-индуцированных явлений и эффектов, необходимых для выбора состава материала и создания его структурно-фазового состояния, обеспечивающих требуемые физические и химические свойства материала.



5. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Следует отметить, что ни одна из ныне действующих и проектируемых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) не имеет аналога по уровню предъявляемых требований к ее безопасности по сравнению с ТЯР. Трудно даже представить, какими свойствами должен обладать материал первой стенки общей площадью в несколько сот квадратных метров, подвергающийся в течение десятков лет воздействию мощного потока ионизирующих излучений, высокой температуры, агрессивных сред и сохранять при этом все свои конструкционные качества, оставаясь одновременно водородно-непроницаемым и, вне всякого сомнения, вакуумно-плотным. Именно эти обстоятельства предопределяют необходимость проведения широкого фронта исследований по разработке новых материалов, обладающих, с одной стороны, определенным спектром качественно новых, специфических, иногда уникальных свойств, а с другой - быть доступными из не дефицитного сырья, извлекаемые с привлечением ресурсосберегающих технологий.



Современная физика радиационного материаловедения предполагает два пути решения этой проблемы: моделирование процессов взаимодействия ионизирующих излучений с веществом и решения кинетических уравнений, описывающих пространственное и энергетическое распределение бомбардирующих и других частиц, участвующих в этом процессе. В первом случае игнорируется электронная структура вещества, а во втором- сама кристаллическая структура металла. Кроме того, предполагаемые при этом отдельные механизмы не могут объяснить всего комплекса экспериментально наблюдаемых явлений, связанных с выделением и распадом новых фаз, образованием и модификацией стоков точечных дефектов, эволюцией дефектной области и перестройкой ее электронной структуры.

5.1 МЕТОД ПОЗИТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Источники позитронов, характеристики и методы получения

Релятивистская квантово - механическая теория, разработанная Дираком (1928 г.), позволила объяснить все основные свойства электрона и получить правильные значения его спина и магнитного момента. Самое главное, из этой теории следовала вероятность существования двух разных областей энергии - положительной и отрицательной, разделенные между собой промежутком $2mc^2$:

$$E = \pm \sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2}, \quad (5.1)$$

где p и m_e - соответственно импульс и масса покоя электрона; c - скорость света. Данное обстоятельство возможно только в том случае, если положительной энергией обладает электрон, то отрицательная может соответствовать частице противоположного знака, которая была названа позитроном.



Открытие Андерсоном в 1932 г. в составе космических лучей позитрона полностью подтвердило взгляды Дирака. Вслед за этим электроны и позитроны получили названия частицы и античастицы. Таким образом, позитрон является античастицей электрона, обладающий такой же, как и электрон, массой $m_{e+} = m_{e-} = 9.1 \cdot 10^{-27}$ г, энергией покоя $m_0 c^2 = 0.511$ МэВ и элементарным, но противоположным по знаку, зарядом $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ К и спином $S = 1/2\hbar$. Для позитрона магнитный момент определяется из соотношения $\mu = e\pi/2mc = 9.27 \cdot 10^{-21}$ эрг/Гс. Позитрон принадлежит к классу лептонов с лептонным зарядом $L_{e+} = -1$, а для электрона он равен $L_{e-} = +1$. Как и все лептоны, позитрон вступает во взаимодействие с другими элементарными частицами посредством электромагнитного и слабого взаимодействий. Сила электромагнитного взаимодействия характеризуется постоянной тонкой структуры $\alpha = e^2/hc = 1/137$, в то же время слабому взаимодействию соответствует эффективная постоянная связи по величине порядка 10^{-14} .



В природе не существует естественных источников позитронов. Поэтому обычно их получают за счет ядерных реакций в различных ядерных энергетических установках. Основные, наиболее приемлемые типы источников и способы их получения сведены в таблицу 5.1. Среди перечисленных ^{64}Cu и ^{58}Co являются чисто реакторными и получают их путем облучения исходных материалов потоком тепловых нейтронов. Остальные изотопы получают облучением ускоренными заряженными частицами на циклотронах. Причем, изотопы ^{58}Co , ^{55}Co и ^{90}Nb можно получить за счет различных реакций и из разных исходных материалов. К сожалению, не все указанные изотопы пригодны для экспериментов с использованием электронно-позитронной аннигиляции.

Таблица 5.1 Основные источники позитронов

Изотопы	Период полу-распада	Способы получения	Максимальная энергия позитронов (МэВ)
^{22}Na	2.58 лет.	$^{25}\text{Mg}(\text{p}, \alpha) ^{22}\text{Na}$	0.54
^{65}Zn	245 дн.	$^{64}\text{Zn}(\text{n}, \gamma) ^{65}\text{Zn}$	0.33
^{64}Cu	12.8 час.	$^{63}\text{Cu}(\text{n}, \gamma) ^{64}\text{Cu}$	0.66
^{58}Co	71 дн.	$^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p}) ^{58}\text{Co}$; $^{65}\text{Mn}(\text{a}, \text{n}) ^{58}\text{Co}$	0.48
^{55}Co	18.2 час.	$^{58}\text{Ni}(\text{p}, \alpha) ^{55}\text{Co}$; $^{56}\text{Fe}(\text{p}, 2\text{n}) ^{55}\text{Co}$	1.50
^{68}Ge	275 дн.	$^{66}\text{Zn}(\text{a}, 2\text{n})$; ^{68}Ge 275 дней ^{68}Ga	1.90
^{57}Ni	36 час.	$^{56}\text{Fe}(3\text{He}, 2\text{n}) ^{57}\text{Ni}$	0.85
^{90}Nb	14.7 час.	$^{90}\text{Zr}(\text{p}, \text{n}) ^{90}\text{Nb}$; $^{90}\text{Zr}(\text{d}, 2\text{n}) ^{90}\text{Nb}$	1.50
^{44}Ti	4.8 лет.	$^{45}\text{Sc}(\text{p}, 2\text{n})$; ^{44}Ti 4.8 лет ^{44}Sc	1.47

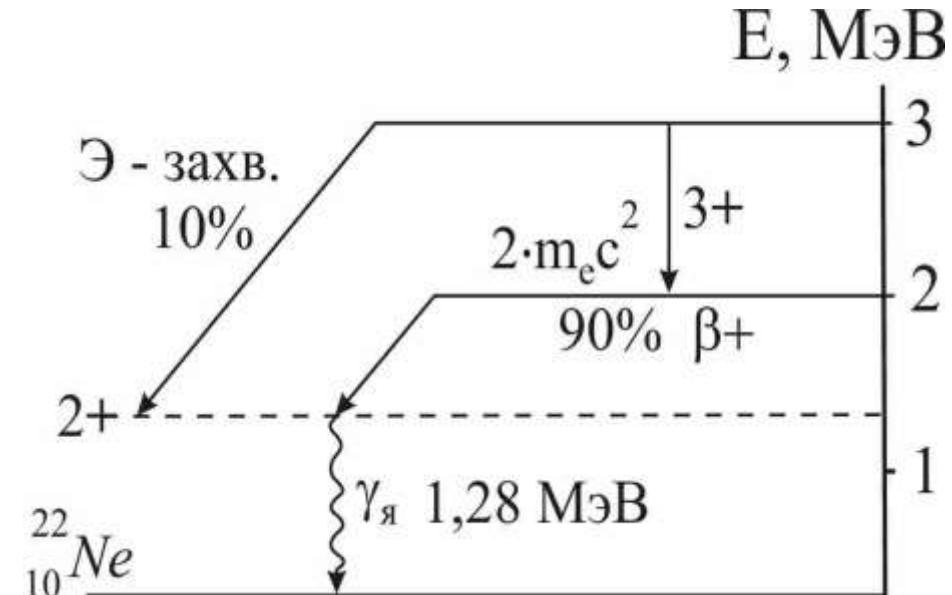


Рис. 5.1

Диаграмма распада ядра изотопа ^{22}Na с испусканием позитрона и ядерного γ - кванта с $E = 1,28$ МэВ



Диффундирующий позитрон может вступить во взаимодействие с фононом, электроном и примесями. При комнатной температуре наиболее вероятно рассеивание термализованного позитрона на фононах, благодаря чему позитрон может пройти путь порядка сотен нанометров до аннигиляции. Последующая судьба позитрона после термализации определяется взаимной ориентацией спинов электрона и позитрона. Если при вступлении во взаимодействие полуцелые спины электрона и позитрона параллельны, суммарный спин пары равен единице, то такое связанное состояние называется триплетным, а сама пара носит название ортопозитрония (o-Ps). При антипараллельных спинах суммарный спин пары равен нулю. В этом случае образуется парапозитроний (p-Ps) в синглетном состоянии.

В определенной степени позитроний, размеры которого достигают ~ 0.1 нм, напоминает атом водорода (H), в котором протон замещен позитроном, поскольку вид энергетических спектров и волновых функций H и Ps подобны, хотя приведенная масса позитрона в два раза ниже водородной, но обладает вдвое большим, чем атом H, боровским радиусом. При отсутствии внешних и других магнитных полей ортопозитроний образуется в 751 всех случаев, а в остальных - парапозитроний. Находясь в свободном пространстве p-Ps распадается на два γ -кванта со временем жизни

$$\tau_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{8\pi}{\alpha^3 mc^2} = 1.25 \cdot 10^{-10} c \quad (5.3)$$

тогда как o-Ps распадается на три γ -кванта со временем жизни

$$\tau_t = \frac{1}{\lambda_t} = \frac{9\pi\tau_s}{4(\pi^2 - 9)\alpha} = 1.4 \cdot 10^{-7} c \quad (5.4)$$

где λ_s и λ_t - соответствующие скорости аннигиляции p-Ps и o-Ps.



Завершая обсуждения различных свойств позитрона и позитронсодержащих систем, хотелось бы отметить о том, что здесь не ставилась цель всеобъемлющего анализа всех аспектов физики и химии этого уникального явления природы, которое в настоящее время находит широкое практическое применение в физике твердого тела, химии и даже биологии. Главное - осветить наиболее важнейшие его моменты, подчеркнув тем самым насколько важно продолжение исследований в этой области, которые могут принести человечеству в будущем новые области приложения методов ЭПА и откроют эффективные пути решения сложнейших проблем по изучению структуры, состояния и свойств вещества.



Контрольные вопросы:

1. В каких областях применяются радиационные технологии?
2. Какие эффекты лежат в основе радиационной полимеризации и стерилизации?
3. Что такое аннигиляция позитрона и каков её энергетический результат?
4. Почему позитронная спектроскопия чувствительна к дефектам в кристаллах?
5. Какие параметры измеряются в методе PALS?
6. В чём суть метода доплеровского уширения аннигиляционной линии?
7. Как интерпретируется увеличение времени жизни позитрона?
8. Какие преимущества ПАС по сравнению с традиционными методами (XRD, TEM)?
9. Приведите примеры использования ПАС в материалах для энергетики и нанотехнологий.
10. Почему позитронная спектроскопия важна для радиационной физики твёрдого тела?



Рекомендуемая литература:

1. Гребенюк В. Д. Радиационная физика твёрдого тела. М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. Михайлов М. Н. Основы радиационной физики и дозиметрии. СПб.: БХВ-Петербург, 2013.
3. Dupasquier A., Mills A. P. Positron Spectroscopy of Solids. IOS Press, 1995.
4. Krause-Rehberg R., Leipner H. S. Positron Annihilation in Semiconductors: Defect Studies. Springer, 1999.
5. Kondo K., Applications of Positron Annihilation Spectroscopy to Nanostructured Materials. Elsevier, 2018.