

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.

К. Б. Казенов^{1,2}, Е. Н. Познырев^{1,2}

¹ *Московский государственный институт электроники и математики;*

² *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»*

E-mail: kazenov_kb@mail.ru

Введение

В наши дни к материалам предъявляются повышенные требования по надежности и долговечности. Будь то сталь корпусов реакторов или пластины солнечных батарей космических аппаратов, все они работают в экстремальных условиях радиационного излучения и при повышенной температуре. Создавая эти материалы, мы должны быть уверены в том, чтобы они отработали свой срок службы без разрушения. Поэтому необходимо проводить лабораторные испытания по исследованию изменения структуры и свойств под воздействием облучения и при повышенных температурах. Надежным и неразрушающим методом контроля материалов может стать позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС).

Теория метода

Аннигиляция позитрона и электрона может сопровождаться испусканием одного, двух или трех γ -квантов. Одноквантовый случай мы рассматривать не будем, так как этот процесс чрезвычайно маловероятен и его вклад в общую картину исследований ничтожен. Аннигиляция свободных электрона и позитрона сопровождается испусканием, минимум двух или трех γ -квантов, а также образованием комплекса $e^+ - e^-$ - позитрониях [1,2].

В зависимости от ориентации спинов e^+ и e^- различают два основных состояния атома позитрония: синглетное (спины антипараллельны, суммарный спин равен 0) – пара-позитроний, и триплетное (спины параллельны, суммарный спин равен единице) – орто-позитроний.

Для ортопозитрония различают три подсостояния, отличающихся магнитными квантовыми числами m : -1, 0, +1. Для парапозитрония $m=0$. Поэтому относительный статистический вес орто-позитрония равен $\frac{3}{4}$, парапозитрония – $\frac{1}{4}$. Соответственно орто-позитроний испытывает 3 - γ аннигиляцию, а пара-позитроний 2- γ .

Константа распада для парапозитрония равняется:

$$\lambda_s^0 = 4\pi r_0^2 c \left| \psi_1(0) \right|^2 =$$

$\left| \psi_1(0) \right|^2$ – вероятность нахождения электрона в области расположения позитрона.

Подставляя это выражение, в формулу волновой функции позитрона:

Получим:

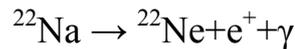
$$\tau_s = 125 \times 10^{-10} \text{ с}$$

Аналогично для пара-позитрония:

$$\tau_t = 140 \times 10^{-9} \text{ с}$$

Измерение времени жизни позитрония в веществе.

В качестве источника позитронов используется радиоактивный изотоп ^{22}Na (период полураспада равен 2.6 года). Суть метода определения времени жизни позитрония заключается в измерении скорости счета запаздывающих совпадений между ядерным γ – квантом с энергией 1.28 МэВ, испускающимся в результате β^+ -распада по следующей схеме:



и одним из γ -квантом с энергией 511 кэВ, испущенным в результате аннигиляции позитрона. Таким образом ядерный γ – квант служит сигналом попадания позитрона в среду, так как испускаются они практически одновременно и точкой начала отсчета времени, а γ -квант с энергией 511 кэВ служит сигналом его гибели и, соответственной стоп-сигналом.

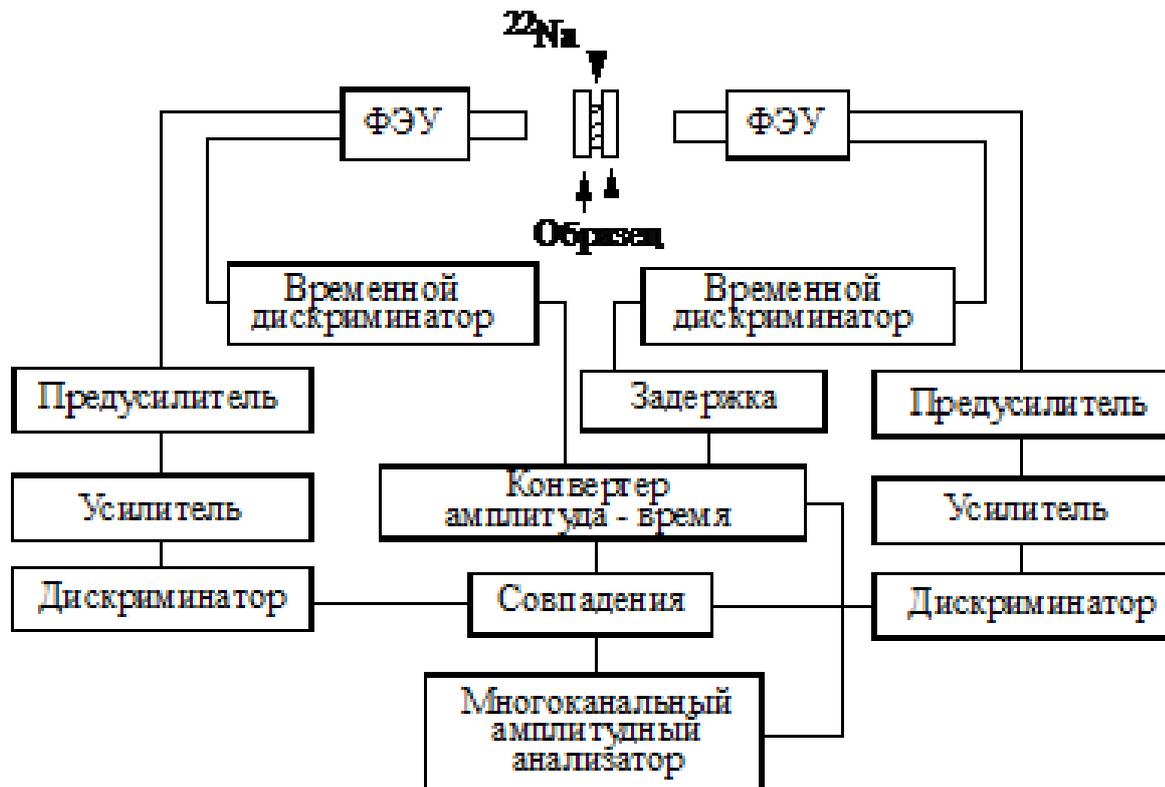


Рис. 1. Принципиальная схема установки

Из источника позитроны попадают в исследуемый образец и аннигилируют в нем. Гамма кванты регистрируются в сцинтилляционных детекторах, где формируют стартовый и стоповый сигналы, величина которого привязана к времени испускания соответствующих γ -квантов. Интервал времени измеряется с помощью блоков наносекундной электроники, включающей в себя дискриминаторы, схему совпадений, время –

амплитудный преобразователь, многоканальный анализатор импульсов (рис. 1).

На выходе, на экране монитора с помощью специального программного обеспечения мы получаем спектр распределения позитронов по времени их жизни в веществе (рис. 2).

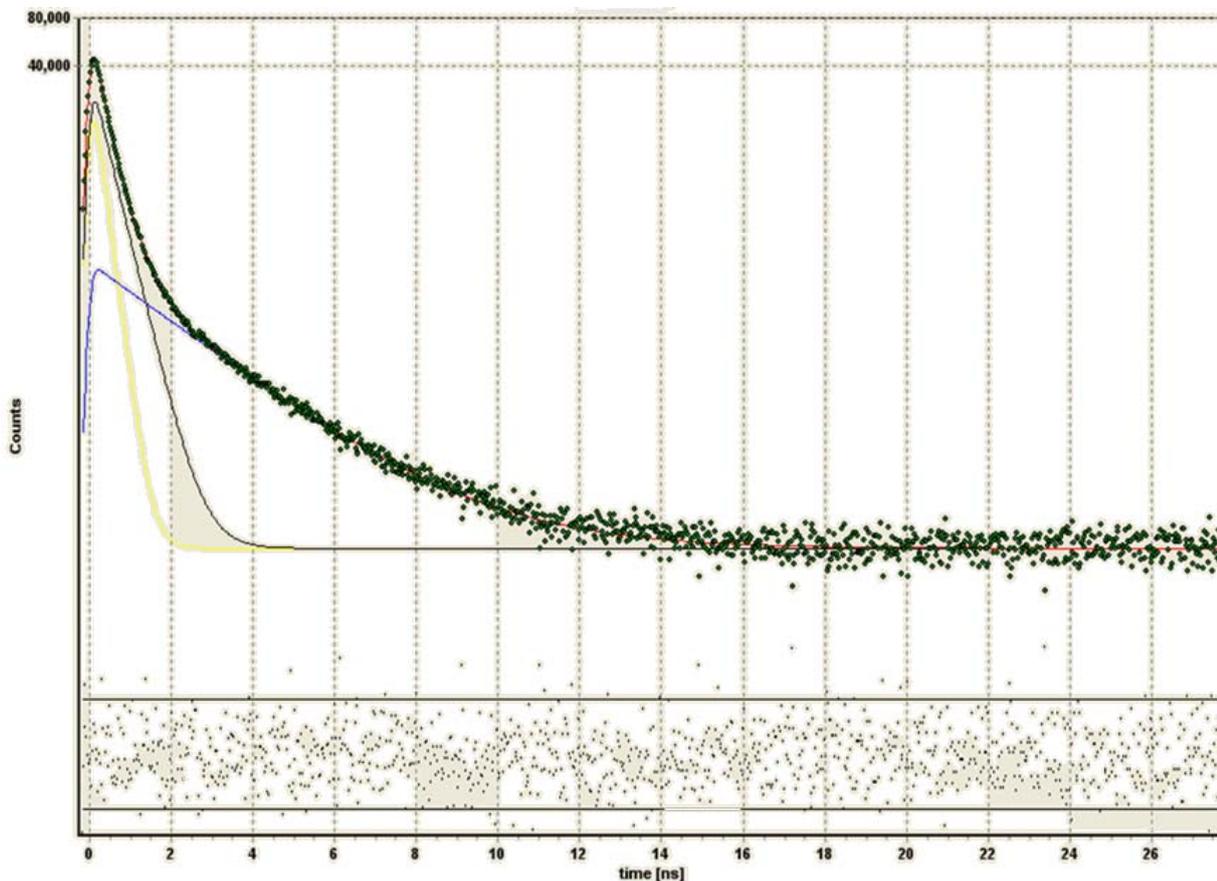


Рис. 2. Вид спектра времени жизни позитрона

Таким образом, время жизни позитрония в материале после воздействия (радиационное облучение, термообработка, введение примесей) будет значительно отличаться от времени жизни позитрония в этом же материале, не подверженному воздействию. Так как эти факторы могут в значительной степени изменять кристаллическую и электронную структуру вещества.

Математическая обработка спектров может дать сведения о концентрации электронов, дефектов кристаллической решетки, которые необходимы для анализа состояния материала, работающего при повышенной нагрузке, что крайне необходимо для таких отраслей как космическая, атомная и микроэлектронная промышленности[3].

Практическое применение метода.

Данные о электронной структуре вещества могут быть полезны для эксплуатации космических аппаратов, так как во время нахождения на околоземной орбите они подвергаются воздействию ионизирующего

излучения, с которым связаны такие эффекты как электризация и разрядные явления между элементами, расположенными на поверхности космических аппаратов; деградация оптических свойств радиационно-защитных покрытий и спад мощности фотоэлектрических преобразователей солнечных батарей; сбои в работе навигационной и телеметрической аппаратуры, приводящие к нарушению или потере связи с космическим аппаратом.

Изучение процессов поверхностной и объемной электризации диэлектриков при облучении заряженными частицами позволяет предвидеть возможные негативные явления во время эксплуатации космического аппарата (КА) в условиях воздействия ионизирующего излучения естественных радиационных поясов Земли и межпланетного пространства.

Одним из методов исследования электризации диэлектриков может стать позитронная аннигиляционная спектроскопия. Накопленный в материале заряд значительно сократит время жизни позитрония в материале за счет, так называемой, pick-off аннигиляции, т. е. аннигиляции на «чужих» электронах в момент соударения. По полученному спектру мы сможем получить данные о скопившемся заряде в диэлектрике и определить величину поля создаваемого им, что впоследствии поможет нам в создании защитных материалов для солнечных батарей.

Данные о кристаллической структуре вещества могут использоваться при эксплуатации ядерных энергетических установок. В реакторе на протяжении всего срока службы образуются структурные дефекты, способствующие радиационному охрупчиванию и термическому старению материала, которые, при достаточно большом скоплении, могут привести к разрушению корпуса и, следовательно, выбросу радиоактивных веществ.

На сегодняшний день все страны, в которых есть атомные электростанции, стремятся продлить срок службы реакторов. А так как значительная часть нынешних реакторов проработали не менее 35 лет, то необходимо знать в каком состоянии находятся материалы корпуса и основных рабочих компонентов.

Исследование процессов дефектообразования поможет предвидеть возникновение состояния корпуса реактора, вычислив концентрацию дефектов кристаллической решетки, и их размеры. Дефекты кристаллической решетки типа вакансий, дислокаций и пор, могут значительно увеличить время жизни позитрония в материале из-за уменьшения электронной плотности вокруг себя. Кроме несовершенств кристаллической структуры ПАС позволяет определить фазовый состав вещества, который также оказывает влияние на механические свойства материала.

Вывод.

Таким образом, ПАС является перспективным методом неразрушающего контроля структуры материалов, применяющихся в разных отраслях науки и техники. Дальнейшее исследование в области ПАС и использование его в связке с другими методами, позволит с высокой точностью прогнозировать

поведение материалов, работающих в экстремальных условиях. Что в будущем поможет в разработке новых материалов.

1. Гольданский В И. Физическая химия позитрона и позитрония. М.: Наука, 1968.
2. Графутин В И, Прокопьев Е П. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества. Успехи физических наук, 2002, т.172, с.67–83..
3. V. Slugen. What kind of information we can obtain from positron annihilation spectroscopy? EUR - Scientific and Technical Research Series; ISSN 1018-5593. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 2006 – 94 pp.