

Рис. 1 – Блок-диаграмма модели

Предполагаем, что внешнее воздействие представляет собой короткий прямоугольный импульс – блок Discrete Pulse Generator. Установим необходимые параметры блоков, время моделирования и запустим моделирование. Результаты смещения груза от положения равновесия отобразятся в блоке Scope (рисунок 2).

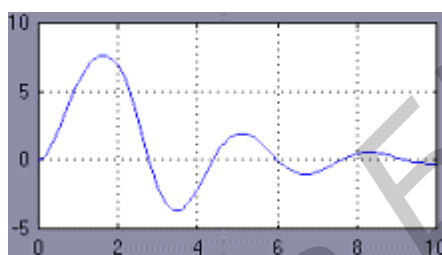


Рис. 2 – График колебания маятника

Изменяя параметры блоков усиления, а также характер и параметры внешнего воздействия, можно изучить влияние этих параметров на вид колебаний маятника и добиться поведения системы, требуемого в задаче. При использовании функций ядра пакета MATLAB получаем массив значений функции-решения дифференциального уравнения на некотором промежутке, которые требуют дополнительного графического отображения. При моделировании с использованием пакетов прикладных программ MATLAB подобная необходимость отсутствует, что позволяет экономить время на рутинных операциях и целиком посвятить его исследованию результатов моделирования.

Список использованных источников:

1. Гуляев. А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: учебный курс СПб: Питер, 2000. – 432 с.;
2. Потемкин В. Г. Система MATLAB 5 для студентов. – М.: Диалог-МИФИ, 1998. –220 с.;
3. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.

СПЕКТРОМЕТРИЯ β -ИЗЛУЧЕНИЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Кукуев А. И.

Алексеев В.Ф. – канд. техн. наук, доцент

Бета-спектрометр – прибор, служащий для анализа β -спектров. β -спектрометр применяют также для исследования энергетического спектра γ -лучей по создаваемым ими в веществе вторичным электронам.

Основными характеристиками β -спектрометра являются светосила и разрешающая способность. Под светосилой понимают отношение числа электронов (или позитронов), которое используется для анализа, к полному числу частиц, испускаемых радиоактивным источником. Светосила β -спектрометров зависит от их конструкции и обычно составляет от нескольких десятых процента до нескольких десятков процентов. Разрешающей способностью называется наименьшее различие в энергии (или, чаще, в импульсе) электронов, которое может быть замечено прибором. Разрешающая способность прецизионных β -спектрометров достигает 0,01%. Как правило, приборы с лучшей разрешающей способностью обладают меньшей светосилой.

Различают β -спектрометры, измеряющие энергию электронов по их воздействию на вещество, и β -спектрометры, действие которых основано на пространственном разделении электронов и позитронов, имеющих различную энергию. К приборам первого типа относятся β -спектрометры, основанные на ионизации, возникающей в веществе при торможении электронов; приборы этого типа обладают большой светосилой, но не дают возможности измерять энергию электронов с

точностью, большей чем несколько процентов (или даже несколько десятков процентов). К приборам второго типа принадлежат β -спектрометры, в которых используются магнитные или электрические (для медленных электронов) поля.

Рассмотрим β -спектрометры, анализирующие импульсы с детектора по их амплитудам. К таким спектрометрам прежде всего относятся сцинтилляционные и полупроводниковые β -спектрометры. Сцинтилляционный β -спектрометр состоит из тех же элементов, что и спектрометр для тяжелых частиц. Он обладает довольно низким разрешением по сравнению с магнитными β -спектрометрами, однако имеет и ряд достоинств. Сцинтилляционный β -спектрометр значительно превосходит магнитный β -спектрометр по светосиле. Если в сцинтилляционном β -спектрометре регистрируется до 50% β -частиц, то в магнитном β -спектрометре – всего лишь 1%. Поэтому сцинтилляционный β -спектрометр пригоден для измерения β -спектра источника очень слабой активности. Далее, сцинтилляционный β -спектрометр имеет лучшее временное разрешение, так как вспышка света в фосфоре, и, следовательно, выходной импульс ФЭУ значительно короче импульса β -счетчика, используемого в магнитном β -спектрометре. Наконец, сцинтилляционный β -спектрометр проще, дешевле и доступнее.

В качестве фосфоров в сцинтилляционных β -спектрометрах применяются органические монокристаллы стильбена и антрацена. Тяжелые неорганические фосфоры типа $NaI(Tl)$ отражают до 80% падающих на их поверхность электронов. В неорганических фосфорах из-за эффекта отражения попадает малая доля электронов. Поэтому такие фосфоры не применяются в β -спектрометрах. Поверхность органических фосфоров типа стильбена отражает лишь несколько процентов β -частиц. Поверхностное отражение органических фосфоров не приводит к сильному искажению формы β -спектра. При измерении β -спектра пригодны фосфоры, толщина которых несколько превышает пробег β -частиц с максимальной энергией. При такой толщине все β -частицы поглощаются в фосфоре. Как и в спектрометрии тяжелых частиц фосфор используют либо без упаковки, либо закрывают тонкой фольгой из алюминия, почти не поглощающей β -частиц. Фольга служит одновременно отражателем света на катод ФЭУ.



Рисунок 1- Траектория электронов в поперечном магнитном поле

На рисунке 1 показана траектория электронов в поперечном магнитном поле. Силовые линии поля перпендикулярны плоскости рисунка. Радиус окружности, которую описывает электрон, пропорционален его импульсу. β -спектрометр градуируют по известным конверсионным линиям стандартных β -источников. Светосила сцинтилляционных β -спектрометров зависит от эффективности фосфора к β -излучению и от потерь β -частиц в алюминиевой фольге, воздухе и в самом источнике β -частиц. В последнее время для спектрометрии β -излучения стали применять полупроводниковые детекторы.

Импульс на выходе такого полупроводникового детектора пропорционален поглощенной энергии β -частицы. Амплитудный анализ этих импульсов позволяет получить спектр β -частиц. Спектрометр состоит из кремниевого поверхностно-барьерного или диффузионного детектора, усилителя импульсов и амплитудного анализатора. Пробег β -частицы с энергией 1 МэВ в кремнии составляет около 1,6 мм. Поэтому для измерения β -спектра с максимальной энергией 3 МэВ необходим детектор с толщиной чувствительного слоя около 5 мм. Такой слой можно получить в полупроводнике

методом дрейфа лития. Для измерения β -спектров с меньшей минимальной энергией пригодны и поверхностно-барьерные детекторы.

Разрешение кремниевого β -спектрометра значительно лучше, чем сцинтилляционного. Так, при энергии β -частиц 1 МэВ разрешение кремниевого β -спектрометра составляет 1%. Кремниевый β -спектрометр более компактен по сравнению со сцинтилляционным. Однако вследствие малых размеров детектора полупроводниковый спектрометр уступает сцинтилляционному по светосиле. Кроме того, высокое разрешение полупроводникового спектрометра требует применения малошумящих усилителей импульсов. β -Спектры с высоким разрешением измеряют на магнитных β -спектрометрах. Точные измерения β -спектров на таких спектрометрах выполняют с разрешением 0,01%. Однако светосила магнитных β -спектрометров невелика, и для измерения спектра требуются источники значительной активности.



Рисунок 2-Траектория электронов в β -спектрометре со счётчиком Гейгера-Мюллера

В β -спектрометрах со счетчиками Гейгера-Мюллера плавно изменяя магнитное поле, к щели спектрометра последовательно подводят частицы с разными значениями импульса p (рисунок 2). Существует много конструкций магнитных β -спектрометров. В них энергия β -частицы измеряется по ее траектории движения в магнитном поле. Поток β -частиц находят по скорости счета детектора на выходе магнитного β -спектрометра. В качестве детектора используют фотопластинки, β -счетчики, сцинтилляционные β -счетчики и т. д.

Найдем связь параметров траектории движения и энергии β -частицы в однородном магнитном поле напряженности H . Пусть β -частица движется со скоростью v перпендикулярно к напряженности поля H . При таких направлениях скорости v и напряженности H β -частица движется по окружности. Если скорость v намного меньше скорости света c , то радиус кривизны r траектории находят из равенства Лоренцовой и центростремительной сил:

$$evH = \frac{m_0 v^2}{r_0},$$

где e - заряд β -частицы, а r_0 - масса покоя β -частицы.

Сократив на скорость v обе части уравнения, получим соотношение, которое связывает импульс β -частицы $p = mv$ с напряженностью H и радиусом кривизны траектории частицы r :

$$p = eHr$$

Таким образом, измеряя радиус кривизны траектории β -частицы при заданном магнитном поле H , можно вычислить ее импульс p . При скорости β -частиц $v \ll c$ импульс p и кинетическая энергия β -частицы связаны простым соотношением

$$E = \frac{p^2}{2m_0}$$

Измеряемым параметром A в магнитном β -спектрометре является импульс p β -частицы, т. е. распределение $\Phi(A)$ есть распределение β -частиц по импульсам p . Дифференцируя последнюю формулу, находим связь интервала импульса Δp с интервалом энергии ΔE :

$$\Delta E = \frac{p \Delta p}{m_0}$$

Чтобы получить число β -частиц с энергией E в интервале ΔE , необходимо измеренное число частиц с импульсом p в интервале Δp умножить на величину m_0/p . Так осуществляют переход от измеренного спектра импульсов $\phi(p)$ к энергетическому спектру β -частиц $f(E)$.

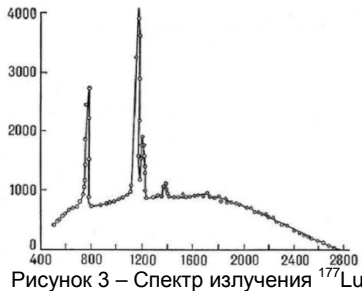


Рисунок 3 – Спектр излучения ^{177}Lu

Источники, применяемые в β -спектроскопии, изготавливают нанесением слоя радиоактивных веществ на тонкие подложки (слюда, алюминий). Торможение электронов в источнике способно вызывать заметные искажения спектра. Наилучшие источники получают испарением в вакууме. В качестве детекторов применяют фотографические пластинки, сцинтилляционные счётчики, счётчики Гейгера - Мюллера. На рисунке 3 приведён β -спектр излучения радиоактивного изотопа ^{177}Lu , снятый с помощью β -спектрометра.

По оси абсцисс отложен импульс электронов, измеренный в единицах Vp , по оси ординат – зарегистрированная детектором интенсивность, поделённая на Vp . Пики на кривой обусловлены электронами, которые возникают при внутренней конверсии γ -лучей, испускаемых при высвечивании дочернего ядра ^{177}He . β -спектр ^{177}Lu образует пьедестал, на котором возвышаются конверсионные пики. Таким образом, были рассмотрен принцип работы β -спектрометра и найдена связь движения β -частицы в однородном магнитном поле напряженности H .

Список использованных источников:

1. Бекман, И. Н. Радиоактивность и радиация / И. Н. Бекман // Курс лекций. – Москва, 2006. – 128 с.
2. Волков Н. Г., Христофоров В. А., Ушакова Н. П. Методы ядерной спектрометрии / Н. Г. Волков, В. А. Христофоров — М. Энергоатомиздат, 1990.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ РАЗРЯДА СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Кистень О.А.

Алексеев В.Ф. – канд. техн. наук, доцент

Электростатический разряд одна из самых серьезных угроз для полупроводниковых приборов, входящих в состав современных технических средств. Это обязывает к более широкому изучению данного явления, в частности с помощью компьютерного моделирования.

Основной метод, используемый для компьютерного моделирования развития разряда статического электричества в газовой среде – решение системы в частных производных для концентрации частиц и электрического поля в осесимметричном приближении. Система уравнений состоит из трех уравнений [1]:

1. Уравнение Нернста-Планка для концентрации положительных ионов

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(-D \cdot \nabla c - Z \cdot u_m \cdot F \cdot c \cdot \nabla V) = R - \bar{u} \cdot \nabla c$$

где D – коэффициент диффузии; R – скорость реакции; u_m – подвижность; F – постоянная Фарадея; Z – заряд частицы; V – потенциал электрического поля; c – концентрация положительных частиц.

2. Уравнение Нернста-Планка для концентрации электронов

$$\frac{\partial c_e}{\partial t} + \nabla(-D \cdot \nabla c_e - Z \cdot u_m \cdot F \cdot c \cdot \nabla V) = R - \bar{u} \cdot \nabla c_e$$

где c_e – концентрация электронов.

3. Уравнение Пуассона

$$-\nabla \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \nabla V = \rho$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость воздуха; ρ – объемная плотность заряда.

Для моделирования воздействия электростатического разряда была выбрана система электродов сфера-сфера. Радиус первой сферы равен 4 мм, радиус второй сферы равен 4.4 мм (рисунок 1).

В геометрической области рисунок 1 решается система уравнений в частных производных. Для каждого уравнения задаются граничные условия. Граничные условия (ГУ) задаются для каждой границы отдельного уравнения:

1. Уравнение Нернста-Планка для положительных ионов. Для этого уравнения ГУ задаются либо как полный поток $n \cdot N = N_0$ для верхней границы, где $N_0 = n \cdot \text{flux_c_check}$, либо как изоляция $n \cdot N = 0$ для нижней и боковой границ.

2. Уравнение Нернста-Планка для электронов. Здесь ГУ задаются как полный поток $n \cdot N = N_0$ для нижней