

4. ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ

Импульсный источник нейтронов получают двумя основными методами. В одном методе непрерывный пучок нейтронов от источника прерывают специальным механическим затвором, в другом - ускоренные заряженные частицы в ускорителе на короткое время отклоняют на мишень, в которой происходит ядерная реакция с образованием нейтронов. В качестве импульсного источника нейтронов используют также импульсные ядерные реакторы.

Пульсирующие нейтронные источники, используемые в спектроскопии по времени пролета, могут быть механическими устройствами для низкоэнергетической области. Прерыватели для быстрых нейтронов с продолжительностью импульса примерно равной 1 мксек дают еще весьма приемлемые потоки с разумным разрешением в энергетической области ниже 100 эВ. Уникальным видом механических пульсирующих систем является импульсный реактор ИБР-30 в Дубне. При работе ИБР-30 в чисто механическом режиме продолжительность импульса, примерно равная 60 мксек, делает его очень удобным для исследований по физике твердого тела с помощью тепловых нейтронов благодаря чрезвычайно высокой интенсивности. В настоящее время в этой области он не имеет себе равных, так как на один импульс приходится приблизительно 10^{14} тепловых нейтронов.

Источником непрерывного пучка медленных нейтронов служит ядерный реактор. Нейтроны выводят из реактора по специальным каналам, проходящим от активной зоны или отражателя реактора через защиту в лабораторное помещение. Поток нейтронов на выходе канала из защиты реактора зависит от потока нейтронов в начале канала и от диаметра самого канала. Пучок нейтронов прерывают механическим затвором, который называют механическим прерывателем. Его располагают на выходе нейтронного канала из защиты реактора. Он открывает канал для прохода нейтронов на короткое время, образуя импульс нейтронов.

Наиболее распространенной конструкцией прерывателя является вращающийся коллиматор в форме ротора с системой узких щелей по диаметру. Ротор пропускает нейтроны в течение короткого времени, когда щели располагаются параллельно пучку нейтронов. На все остальное время вращения ротора нейтронный пучок прерывается. Современные системы механических прерывателей нейтронов имеют ротор диаметром 50-60 см, вращающийся со скоростью до 30000 об/мин. Механический прерыватель определяет основные характеристики импульса нейтронов. Для ротора с параллельной системой щелей длительность импульса нейтронов находят из выражения

$$T = \frac{h}{\omega R}, \quad (10)$$

где R — радиус ротора; ω - угловая скорость вращения ротора; h - ширина щели.

Длительность T равна времени перекрытия щели шириной h при скорости вращения ω . В течение этого промежутка времени нейтроны проходят через ротор. Формула дает приближенное значение длительности импульса нейтронов, так как на длительность влияет еще ряд факторов. Во-первых, геометрическое закрытие щели (отсутствие «прямой видимости» через щель) не означает закрытия нейтронного канала. Некоторое время нейтроны будут еще проходить ротор, так как толщина материала ротора на их пути невелика. Этот эффект (прострелы нейтронов через ротор при небольших углах поворота системы щелей) увеличивает длительность импульса нейтронов. Во-вторых, длительность импульса нейтронов возрастает за счет расходимости самого пучка нейтронов из реактора. В самом деле, любой коллимированный пучок нейтронов не является строго параллельным. Он расходится под некоторым углом, определяемым диаметром нейтронного канала и его длиной. В пределах этого угла при вращении ротора происходит увеличение «прямой видимости» для нейтронов реактора, что приводит к увеличению длительности импульса нейтронов. Длительность T зависит также от скорости нейтронов v . Эта зависимость весьма существенна при малых энергиях нейтронов, так как время их движения внутри ротора становится сравнимым с временем перекрытия щели. Для этих нейтронов как бы уменьшается время «прямой видимости». Нейтроны могут войти в ротор еще при открытой щели, но не успевают из нее выйти до полного перекрытия. Этот эффект приводит к уменьшению длительности импульса нейтронов при малых энергиях. Для каждого прерывателя нейтронов существует такая скорость (энергия) нейтронов, с которой они не успевают пройти ротор за время перекрытия щели. Эту скорость называют граничной v_{gp} . Она определяет нижнюю границу спектра по энергии нейтронов, которую можно измерить с данным механическим прерывателем. Найдем граничную скорость v_{gp} для ротора с параллельной системой щелей шириной h и параллельного пучка нейтронов.

Время пролета нейтронов через ротор радиуса R со скоростью v_{gp}

$$t_{gp} = 2R/v_{gp}. \quad (11)$$

С другой стороны, для ротора, вращающегося с угловой скоростью ω , значение t_{gp} равно удвоенному времени перекрытия щели шириной:

$$t_{cp} = \frac{2h}{\omega R}. \quad (12)$$

Приравнивая последние два выражения, получим

$$v_{cp} = \frac{\omega R^2}{h}. \quad (13)$$

Определенное значение v_{cp} и зависимость длительности импульса нейтронов в механическом прерывателе от скорости нейтронов приводит к тому, что ротор неодинаково пропускает нейтроны разных энергий. Это явление искажает исходный спектр реактора. Измеренный спектр нейтронов поправляют с помощью функции пропускания механического прерывателя. Эта функция количественно характеризует различие в пропускании прерывателем нейтронов разных энергий. Функция пропускания прерывателя есть отношение числа нейтронов со скоростью v , прошедших через ротор, к числу всех нейтронов той же скорости, вошедших в ротор за время перекрытия щели. Аналитический вид функции пропускания определяется размерами ротора, формой щели и расходимостью пучка нейтронов. Функция пропускания равна нулю для граничной скорости нейтронов v_{rp} .

Граничная скорость v_{rp} автоматически исключает эффект рецикличности в спектрометрии нейтронов во времени пролета и одновременно дает условие для выбора значения пролетной базы L . Рецикличность - это эффект наложения двух и более импульсов нейтронов в детекторе. При большой пролетной базе L быстрые нейтроны из последующего импульса нейтронов могут «догнать» и «опередить» самые медленные нейтроны из предыдущего импульса нейтронов. Без граничной скорости v_{cp} эффект рецикличности мог бы наблюдаться при любых пролетных базах L , так как в реакторном пучке имеются нейтроны всех скоростей, в том числе и очень малых. Эффект рецикличности вносит неопределенность во время пролета t , так как становится неясным момент старта зарегистрированного нейтрона. Граничная скорость позволяет не допустить рецикличности для некоторых значений пролетных баз L . Это достигается при выполнении условия, что интервал времени между стартами двух импульсов нейтронов больше времени пролета t базы L нейтронов с граничной скоростью v_{rp} . Для импульсов нейтронов, следующих друг за другом через пол-оборота ротора, это условие запишется в виде

$$\frac{L}{v_{cp}} \leq \frac{\pi}{\omega}. \quad (14)$$

Отсюда получаем условие для выбора пролетной базы:

$$L \leq \frac{\pi v_{cp}}{\omega}. \quad (15)$$

Момент образования импульса нейтронов в прерывателе фиксируется внешними устройствами. Например, на ротор наносится слой ферролака, узкая полоска которого вблизи щели намагничивается. При вращении ротора эта полоска проходит мимо магнитной головки и индуцирует в ней электрический импульс, возникающий одновременно с импульсом нейтронов. Этот сигнал служит стартовым импульсом спектрометра. От него отсчитывают время пролета.