

Метод малоуглового рассеяния нейтронов для исследования наноуглеродных структур и материалов

Кульвелис Ю.В.¹

kulvelis_yv@npi.nrcki.ru

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН), как правило, позволяет определить особенности тонкой структуры объекта на масштабе 1-100 нм (надмолекулярные структуры). Нейтронная волна, длина волны которой (2–20 Å) сравнима с межатомными расстояниями в конденсированном веществе или превышает это расстояние, вступает во взаимодействие сразу с коллективом атомов, что позволяет рассматривать рассеяние медленных нейтронов, используя общие оптические понятия когерентного и некогерентного рассеяния, применяемые к рассеянию волн любой природы. Атомы ансамбля рассеивают нейтроны двояким образом: либо как единый коллектив, либо как набор отдельных независимых рассеивающих центров. Этот факт выражается в разбиении сечения рассеяния s на два слагаемых – когерентное (s_c) и некогерентное (s_i): $s = s_c + s_i$.

Эксперимент по МУРН сводится к измерению кривой рассеяния нейтронов на образце, которая представляет собой зависимость интенсивности I или сечения когерентного рассеяния нейтронов $d\Sigma/d\Omega$ в единичный телесный угол Ω от длины вектора рассеяния $q = \frac{4\pi \sin(\theta/2)}{\lambda}$, который пропорционален переданному импульсу ($p = \hbar q$), где q – угол рассеяния, а λ – длина волны нейтронов. Анализ кривой рассеяния $I(q)$, являющейся Фурье-образом корреляционной функции, имеющей смысл распределения рассеивающих объектов по размерам, позволяет установить характерные размеры и форму рассеивающих частиц в образце, их пространственное распределение и взаимную организацию [1].

Важной особенностью МУРН является природа рассеяния – нейтроны, взаимодействуя с атомами, рассеиваются в основном только на их ядрах. Это приводит к тому, что амплитуды b_c когерентного рассеяния нейтронов на ядрах разных изотопов одного химического элемента могут сильно различаться. Особенно важным при исследовании углеродных и других структур является различие b_c для водорода и дейтерия, что дает возможность изотопного контрастирования в МУРН-эксперименте. Для углеродных структур (наноалмазы, графен, фуллерены) МУРН позволяет определить организацию кластеров, образующихся из первичных частиц в водных суспензиях, а контрастированием можно определить наличие неалмазной компоненты на поверхности алмазных наночастиц. Метод МУРН хорошо зарекомендовал себя при исследовании тонкой структуры протонопроводящих мембран, изготовленных на основе фторсодержащих полимеров типа Nafion®, где наблюдаются тонкие гидрофильные каналы в гидрофобной полимерной матрице со строго упорядоченной структурой, которые собираются в пучки и имеют несколько уровней структурной организации.

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-23-00129).

Ссылки

1. Д.И. Свергун, Л.А. Фейгин Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. (Наука, М., 1986).