

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОЧЕНЬ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ С SiB_x И Nb

А.В. Антонов, А.И. Исаков, С.П. Кузнецов, И.В. Мешков, А.Д. Перекрестенко,
А.Н. Семенихин, А.П. Шотов

На спектрометре очень холодных нейтронов в диапазоне скоростей нейтронов $\sim 3 \div 70$ м/с исследованы полные сечения взаимодействия нейтронов с кремнием, легированным бором (SiB_x , $x = 5,78 \cdot 10^{-4}$) и ниобием (Nb).

Данная работа посвящена исследованию зависимостей от скорости нейтрона в веществе $v'/1/$ полных макроскопических сечений Σ_t взаимодействия очень холодных нейтронов (ОХН) с кремнием, легированным бором, и ниобием на спектрометре ОХН [2] по пропусканию пучка нейтронов через образец.

Полные сечения взаимодействия ОХН с твердым телом в диапазоне энергий $10^{-5} \div 10^{-7}$ эВ определяются главным образом процессами захвата нейтронов ядрами вещества, их неупругого рассеяния на тепловых колебаниях решетки, а также упругого некогерентного рассеяния нейтронов на неоднородностях с размером порядка длины волны ОХН [3]. Сечения первых двух процессов следуют закону $\sim 1/v'$, у последнего эта зависимость имеет более сложный вид [3]. Из зависимости некогерентных сечений рассеяния от v' сравнительно легко определить в модельных предположениях средний размер и концентрацию неоднородностей [3].

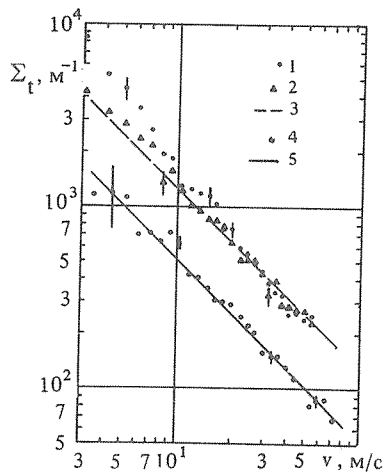
Расчет сечений, а также учет поправок на преломление нейтронной волны при переходе из вакуума в вещество и ее многократное отражение от границ образца проводились так же, как в работе [3].

Кремний, легированный бором (SiB_x , $x = 5,78 \cdot 10^{-4}$). Была сделана попытка проверить предположение о кластеризации атомов В, имплантированных в Si. В качестве образца использовалась пластина монокристалла Si толщиной $(1,024 \pm 0,010) \cdot 10^{-1}$ см, легированного бором до концентрации $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. На рис. 1 представлена экспериментальная зависимость $\Sigma_t(v')$, полученная с образцом при комнатной температуре (300 К). Для выделения вклада в полные сечения от неупругого рассеяния нейтронов при комнатной температуре были проведены измерения с образцом, охлажденным до температуры 80 К. Однако выделить этот вклад не удалось, так как в пределах экспериментальных погрешностей обе температурные зависимости $\Sigma_t(v')$ совпали. Анализ экспериментальных данных методом наименьших квадратов показал, что эти зависимости следуют закону $1/v'$. Отсюда можно заключить, что искомое отклонение от закона $1/v'$, которое могло бы быть вызвано упругим рассеянием ОХН на кластерах атомов бора, в пределах погрешностей измерений не обнаружено. Из полученных результатов следует, что полные сечения взаимодействия ОХН с исследованным образцом определяются захватом нейтронов ядрами Si и В.

В результате экстраполяции изображенной на рис. 1 зависимости $\Sigma_t(v')$ в область тепловых нейтронов для скорости нейтронов 2200 м/с было получено значение $\Sigma_t = 2,53 \pm 0,05 \text{ м}^{-1}$, оказавшееся меньше сечения захвата $\Sigma_c = 3,19 \pm 0,03 \text{ м}^{-1}$, рассчитанного по табличным данным [4] для Si и В (с учетом известного содержания В). Наблюдаемое несовпадение можно объяснить неточностью определения концентрации В в Si. Из найденного значения $\Sigma_t = 2,53 \pm 0,05 \text{ м}^{-1}$ легко рассчитать концентрацию атомов В в исследованном образце:

$$n_B = (\Sigma_t - n_{\text{Si}} \sigma_{\text{Si}}) / \sigma_B,$$

где n_{Si} — концентрация атомов Si; σ_{Si} , σ_B — микроскопические сечения захвата нейтронов соответственно атомами Si и В. Полученная из расчета атомарная концентрация бора в образце $n_B = (2,14 \pm 0,08) \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, что значительно (на 29%) ниже концентрации $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, указанной изготовителем. Из этого можно сделать вывод, что измерение зависимостей $\Sigma_t(v')$ в диапазоне скоростей нейтронов приблизительно от 4 м/с до 70 м/с дает возможность с хорошей точностью определять атомарную концентрацию сильнопоглощающих нейтроны примесей, находящихся в слабопоглощающих эти нейтроны веществах.



Р и с. 1. Зависимости полных макроскопических нейтронных сечений от скорости нейтронов: 1 – отожженный образец Nb; 2 – неотожженный образец Nb; 3 – зависимость $\Sigma_t \sim 1/v'$ для Nb; 4 – образец SiB_x ($x = 5,78 \cdot 10^{-4}$); 5 – зависимость $\Sigma_t \propto 1/v'$ для SiB_x .

Ниобий (Nb). Для исследования структурных особенностей ниобия использовалась холоднокатаная фольга Nb с чистотой 99,9999%. Толщина образца составляла $2,45 \cdot 10^{-6}$ м. Измерения зависимостей $\Sigma_t(v')$ проводились на неотожженном образце и отожженном в вакууме при температуре 1000°C в течение 3,5 часов с последующим медленным остыванием. В обоих случаях измерения осуществлялись при двух температурах образца – 300 и 80 К. При этом в пределах точности измерений различий не обнаружено, что свидетельствует о незначительности вклада неупругого рассеяния в полное сечение. На рис. 1 представлены результаты измерений, полученные с охлаждением образца. Из анализа методом наименьших квадратов полученных зависимостей $\Sigma_t(v')$ следует, что в случае неотожженного образца эта зависимость находится в удовлетворительном согласии с законом $1/v'$ во всем измеренном интервале скоростей нейтронов, а в случае отожженного образца только при $v' \gg 25$ м/с. Причем для нейтронов со скоростями $v' > 25$ м/с обе зависимости $\Sigma_t(v')$ в пределах точности измерений совпали. Экстраполяцией данных, удовлетворяющих закону $1/v'$, в область тепловых нейтронов было определено микроскопическое сечение $\sigma_t = (1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-28}$ м² для скорости нейтронов 2200 м/с, оказавшееся в согласии с табличным значением сечения захвата нейтронов ядрами Nb $\sigma_c = (1,15 \pm 0,05) \cdot 10^{-28}$ м² /4/. Наблюдаемое при $v' < 25$ м/с различие в ходе зависимостей $\Sigma_t(v')$, полученных с неотожженным и отожженным образцом, можно объяснить вкладом в полные сечения упругого некогерентного рассеяния нейтронов на неоднородностях образца. Можно предположить, что после отжига произошло скопление точечных дефектов в более крупные образования, являющиеся источником упругого некогерентного рассеяния ОХН. Оценки размера и концентрации этих неоднородностей, сделанные по описанному ранее методу /3/, в модели пустотелых сфер (пор) дали следующие результаты: средний радиус пор равен 13 нм при их концентрации $1,7 \cdot 10^{-19}$ м⁻³; относительный объем, занимаемый порами, составляет 0,016%.

Авторы благодарны Ю.А.Лапушкину за помощь в проведении измерений и обслуживающему персоналу реактора за предоставленную возможность работать на реакторе ИРТ МИФИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Steyerl A. Nucl. Instr. Meth., 101, 295 (1972).
2. Антонов А. В. и др. Краткие сообщения по физике ФИАН, 10, 10 (1977).
3. Антонов А. В. и др. Физика твердого тела, 26, 1585 (1984).
4. Mughabghab S. F., Kinsey R. R., Dunford C. L. Neutron Cross Sections, V. I., Part A, Brookhaven National Laboratory, Academic Press, New York (1981).

Поступила в редакцию 26 сентября 1985 г.