

ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ В LiF, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В (n, γ)-РЕАКЦИИ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

М.И.Булаков, С.П.Боровлев, А.Д.Гулько,
Ф.С.Джепаров, С.С.Тростин

Методом радиоактивной регистрации ЯМР определен тип точечных дефектов в кристалле LiF, возникающих при γ -отдаче радиоактивных ядер ^8Li ($T_{1/2} = 0,84$ сек). Измерены константа квадрупольного взаимодействия ядер ^8Li с дефектом, энтальпия активации и время жизни дефектов в области температур $13 + 295\text{K}$.

Поляризованные β -активные ядра отдачи, получаемые в ядерных реакциях, являются удобными зондами для изучения создаваемых ими же дефектов кристаллической решетки. Наблюдая угловую анизотропию β -излучения этих ядер, можно изучать их спиновую эволюцию, возмущенную взаимодействием с окружающими дефектами.

В настоящей работе методом ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на β -активных ядрах отдачи ^8Li , образованных в реакции $^7\text{Li}(n, \gamma)^8\text{Li}$ на тепловых поляризованных нейтронах, изучались точечные дефекты в кристалле LiF . После испускания захватных γ -квантов энергия ядра отдачи составляет ~ 300 эв, так что можно ожидать создания нескольких пар вакансия-междоузлие на одно ядро ^8Li . Точечные дефекты, локально нарушая кубическую симметрию кристалла, создают градиент электрического поля на ядре ^8Li . В случае близко расположенного к ядру дефекта должно происходить расщепление линии ЯМР, если же дефекты удалены, то можно ожидать ее уширения. Ранее проведенные на образцах LiF при комнатной температуре измерения [1] не обнаружили заметного влияния дефектов на форму линии ЯМР β -активных ядер ^8Li , что свидетельствовало об их отжиге при этой температуре. Однако, понижение температуры образца может привести к "замораживанию" дефектов и проявлению квадрупольной структуры спектра ЯМР.

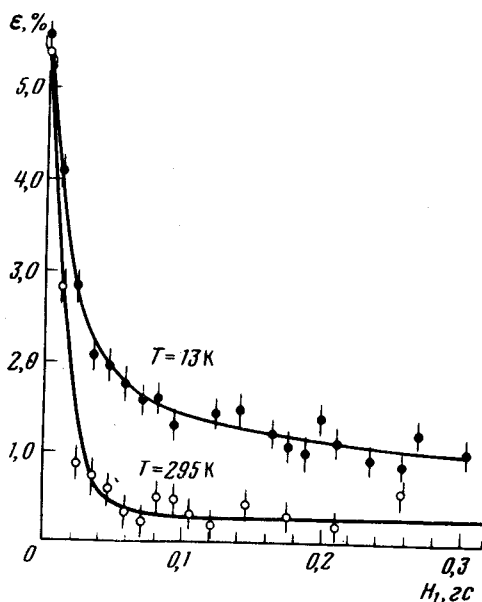


Рис.1. Зависимость анизотропии β -излучения от амплитуды РЧ поля при резонансном значении частоты $\nu_0(^8\text{Li}) = 2404,5$ кГц. Сплошные кривые — теоретический расчет

Резонансная дополяризация β -активных ядер при наличии внешнего радиочастотного (РЧ) и магнитного полей теоретически описывалась решением уравнения движения для спиновой матрицы плотности с гамильтонианом, содержащим член квадрупольного взаимодействия с одиночным дефектом. Параметрами теории являлись: w — вероятность образования дефекта, μ^{-1} — время жизни дефекта, константа квадрупольного взаимодействия $\beta/\gamma = \omega_Q/2\gamma(\omega_Q$ — частота квадрупольного взаимодействия [2], γ — гиромагнитное отношение для ядра ^8Li).

Пропорциональная поляризации величина асимметрии β -излучения ϵ вычислялась по формуле $\epsilon = [N_i(0) - N_i(\pi)]/[N_i(0) + N_i(\pi)]$, где $N_i(0)$ и $N_i(\pi)$ — числа электронов распада, зарегистрированных двумя сцинтилляционными β -счетчиками ($i = 1, 2$), расположенными под углами 0 и π к направлению поляризации ядер ^8Li . Более подробно про установку см. [3].

Измерения проводились на двух монокристаллических образцах с ориентацией кристаллографической оси [111] и [100] параллельно внешнему магнитному полю. На рис. 1 представлены данные по резонансной деполяризации ядер ^8Li , в зависимости от амплитуды РЧ поля для образца [111] при двух температурах. Видно, что при комнатной температуре можно достичь полной деполяризации ядер ^8Li при амплитуде РЧ поля $H_1 \gtrsim 0,1$ гс. Остаточная асимметрия (при $H_1 \gtrsim 0,1$ гс) обусловлена фоновой асимметрией β -распада ^{20}F . Однако, при низкой температуре для этих амплитуд полной деполяризации ядер ^8Li не происходит. Это явление может объясняться тем, что часть ядер ^8Li имеет в своем ближайшем окружении точечные дефекты, которые сдвигают значение их резонансной частоты за счет квадрупольного взаимодействия. Действительно, использование внешнего магнитного поля, модулированного амплитудой, по величине сравнимой с константой квадрупольного взаимодействия, позволяет полностью деполяризовать ядра ^8Li и при

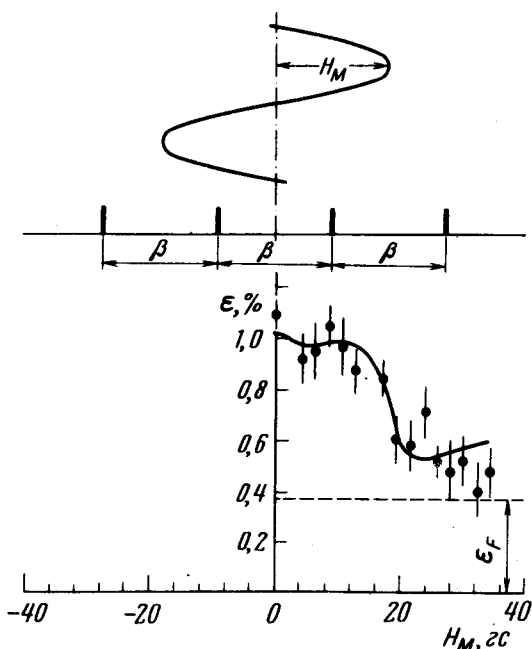


Рис. 2. Зависимость анизотропии β -излучения от амплитуды модуляции H_M внешнего магнитного поля. Параметры используемого РЧ поля: $H_1 = 0,21$ гс, $\nu_0(^8\text{Li}) = 2404,5$ кГц; ϵ_F — анизотропия β -излучения ^{20}F

низкой температуре. На рис. 2 показана полученная зависимость резонансной деполяризации от амплитуды модуляции H_M внешнего магнитного поля: $H = H_0 + H_M \sin 2\pi\nu_M t$ ($\nu_M = 50$ гц). Сплошная линия — результат обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов с учетом диполь-дипольной ширины линии ЯМР и неоднородности модулирующего поля при следующих значениях параметров теории: $w = 0,18 \pm 0,02$, $\beta/\gamma = 18,1 \pm 0,7$ гс. Полученное из этой обработки положение линий квадрупольного квартета (спин ядра ^8Li $I = 2$) схематически изображено в верхней части рис. 2. Наблюдаемые характерные перегибы на кривой соответствуют такой амплитуде модуляции H_M , при которой происходит выполнение резонансных условий деполяризации для новой пары линий квадрупольного квартета.

Как отмечалось выше, теория предполагает наличие лишь одного дефекта вблизи β -активного ядра ${}^8\text{Li}$. Действительно, вероятность образования двух или более дефектов одного типа должна быть значительно уменьшена их взаимным кулоновским отталкиванием. Одиночными дефектами могут быть вакансии фтора, лития и их междоузлия. Квадрупольное взаимодействие с ближайшей вакансией фтора при ориентации образца осью $[111]$ параллельно H равно нулю (вследствие соответствующего направляющего косинуса). Ближайшее литиевое окружение ядра ${}^8\text{Li}$ содержит 12 позиций, в которых вакансии лития обладает одинаковым по абсолютной величине квадрупольным взаимодействием с ядром ${}^8\text{Li}$. Теоретическая оценка этого взаимодействия в пренебрежении поляризацией среды дает значение $\beta/\gamma = 14$ *гс*, при рассмотрении среды как сплошной — $\beta/\gamma = 6,6$ *гс*. Образование междоузлия приводит к константе $\beta/\gamma \sim 200$ *гс*. Как видно, полученное экспериментальное значение β/γ ближе всего к величине константы для вакансии лития в случае пренебрежения поляризацией среды. ¹

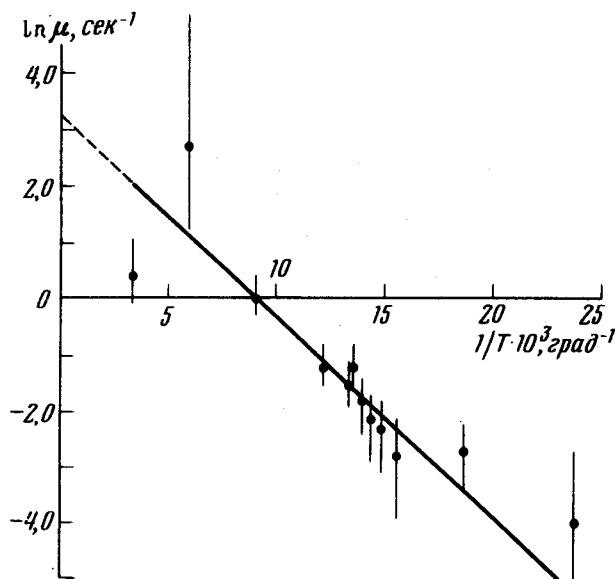


Рис. 3. Зависимость времени жизни вакансии лития от температуры. Прямая линия — закон Аррениуса

С целью изучения квадрупольных взаимодействий ядер ${}^8\text{Li}$ с вакансией фтора были проведены измерения ЯМР на кристалле, ориентированном осью $[100]$ параллельно H . Однако для этого случая значительного влияния квадрупольных взаимодействий на форму линии не было обнаружено. Хотя ранее [4], эти вакансии (с константой $\beta/\gamma = 74 \pm 10$ *гс*) были зафиксированы в аналогичных условиях по производимым ими эф-

фактам быстрой деполяризации ядер ^8Li . Отсутствие их влияния в настоящем эксперименте свидетельствует о том, что время жизни вакансии фтора $\mu^{-1} \ll T_{1/2}$ даже при 13К.

Измерение резонансной деполяризации на образце [111] при различных температурах позволили получить зависимость времени жизни вакансии лития от температуры. Она представлена на рис. 3, где отложены значения $\ln \mu$ в функции $1/T$. Видно, что эта зависимость удовлетворяет закону Аррениуса $\mu = \mu_0 \exp(-h_a/kT)$ при следующих значениях параметра μ_0 и энтальпии активации h_a : $\mu_0 = 10^{1.4 \pm 0.4}$ с, $h_a = 0,030 \pm 0,006$ эв. Полученная величина энтальпии оказалась много меньше известных по литературе значений, описывающих миграцию вакансий ($h_a \sim 1$ эв [5]). Поэтому следует сделать вывод, что отжиг литиевых вакансий, образующихся при γ -отдаче ^8Li в LiF, происходит вследствие рекомбинации френкелевских пар, а полученное значение h_a описывает движение междоузлий. Значение параметра μ_0 оказалось много меньше частоты Дебая ($\mu_0 \ll 10^{13}$ сек $^{-1}$). Качественно, это может соответствовать такой картине — рекомбинация кроудиона с вакансией происходит при одновременном "коллективном" сдвиге всех ионов, расположенных между ними.

Авторы глубоко благодарны Ю.Г.Абову и И.Г.Ивантеру за обсуждения постановки эксперимента и его результатов.

Институт теоретической
и экспериментальной физики

Поступила в редакцию
14 марта 1978 г.

Литература

- [1] М.И.Булгаков, А.Д.Гулько, Ю.А.Оратовский, С.С.Тростин. ЖЭТФ, 61, 667, 1971.
- [2] А.Абрагам. Ядерный магнетизм, ИИЛ, 1963, стр. 217.
- [3] С.П.Боровлев, М.И.Булгаков, А.Д.Гулько, С.С.Тростин. ПТЭ, №1, 251, 1974.
- [4] М.И.Булгаков, С.П.Боровлев, А.Д.Гулько, Ф.С.Джепаров и др. Препринт ИТЭФ, №150, 1976.
- [5] Point Defekts in Solids, eds. J. Growford, L. Slifkin, N. J. - L., 1972.