

ЭПР РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛЛАХ ТЕТРАБОРАТА ЛИТИЯ

Г. И. Маловичко, В. Г. Грачев, А. О. Матковский

Зарегистрированы и изучены спектры ЭПР монокристаллов тетрабората лития. Показано, что основными дефектами, возникающими под действием нейтронного облучения, являются вакансии и междоузельные ионы кислорода и бора. Определены спектроскопические характеристики и предложены модели 11 парамагнитных дефектов. Установлены наиболее стабильные и перспективные для использования в качестве парамагнитных зондов дефекты.

Тетраборат лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (ТБЛ) является одним из наиболее исследуемых разными методами материалов [1-9]. Обусловлено это как его перспективностью для практического применения в качестве акустоэлектронных устройств [8-10] и радиационных дозиметров [11, 12], так и интересными физическими свойствами ТБЛ (пироэлектричество [9], высокая ионная проводимость [13, 14]). В недавних работах [15, 16] высказано предположение о существовании у ТБЛ в широком интервале температур несоизмерной фазы.

Литературные сведения о регистрации в монокристаллах ТБЛ спектров ЭПР каких-либо парамагнитных центров (ПЦ) отсутствуют. В свежeverащенных номинально чистых (нелегированных) монокристаллах ТБЛ мы тоже не обнаружили никаких сигналов ЭПР. Попытки создать парамагнитные дефекты путем перезарядки с помощью облучения ультрафиолетовым светом, γ -квантами источника Co^{60} и даже электронами с энергией $E_e \leq 2.8$ МэВ при дозах до 10^6 Гр не увенчались успехом. Лишь при $E_e > 2.8$ МэВ и дозе свыше 10^7 Гр кристаллы слегка желтели и в них появлялись слабые сигналы ЭПР. Это свидетельствует об отсутствии в решетке ТБЛ заметного количества собственных дефектов.

После облучения быстрыми нейтронами ($E_n > 0.1$ МэВ) кристаллы приобретали темно-коричневую окраску и в них были зарегистрированы устойчивые даже выше комнатных температур парамагнитные дефекты. Их подробному изучению и посвящена настоящая работа.

1. У с л о в и я э к с п е р и м е н т а

Исследовались монокристаллы, выращенные методом Чохральского [3, 4]. Одна партия образцов (А), вырезанных в виде пластинок, перпендикулярных кристаллографической оси a , была подвергнута облучению нейтронами с флюенсом 10^{17} см $^{-2}$. Другая партия образцов (С) со срезами, перпендикулярными оси c , облучена с суммарным флюенсом $\sim 6 \cdot 10^{17}$. Поток нейтронов оба раза направлялся перпендикулярно плоскости пластин. Облучение проводилось при комнатной температуре, при ней же кристаллы и хранились.

Измерение спектров ЭПР проводилось на установках 3-см (РЭ-1307) и 8-мм (РЭ-1308) диапазонов длин волн СВЧ в интервале температур 77—

700 К. Для определения стабильности возникших радиационных дефектов и разделения линий разных ПЦ часть образцов была подвергнута изохронному отжигу на воздухе при температурах до 800 К.

2. Результаты эксперимента и их интерпретация

Кристаллы ТБЛ обладают группой пространственной симметрии $I4_1cd$ (C_{4v}^{12}) [17-19], которая допускает наличие дефектов с точечной симметрией C_2 (в общем случае четыре электрически одинаковых, но магнитно-неэквивалентных ПЦ с одной из магнитных осей, параллельной оси c кристалла) и C_1 (восемь ПЦ с осями, не совпадающими с кристаллографическими) [20]. При ориентации постоянного магнитного поля \mathbf{H} вдоль кристаллографических осей линии электрически эквивалентных ПЦ сливаются. Например, при $\mathbf{H} \parallel c$ при отсутствии тонкого и сверхтонкого расщеплений — в одну линию, при наличии только тонкой структуры — в группу из $2S$ линий, только сверхтонкой структуры — в группу из $2I+1$ линий (S, I — значения электронного и ядерного спинов). Линии, входящие в группу, обладают вполне определенным соотношением интенсивностей, что и позволяет отделить их.

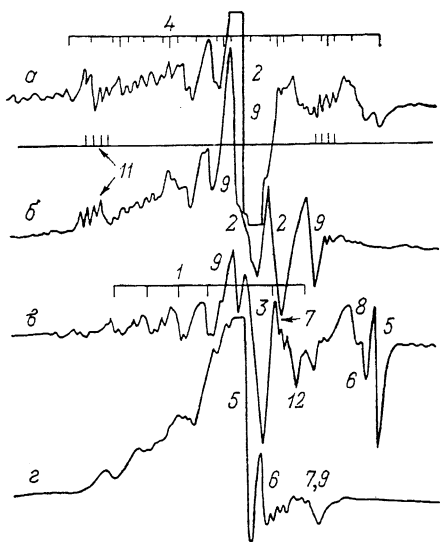


Рис. 1. Спектры ЭПР радиационных дефектов в ТБЛ при $\mathbf{H} \parallel c$ (а, в) и $\mathbf{H} \parallel a$ (б, г) в 8-мм диапазоне длин волн.

а, б — образцы партии А; в, г — партии С. Цифрами 1—12 обозначены линии, относящиеся к центрам K1—K12.

На рис. 1 приведены фрагменты обзорных спектров ЭПР образцов из партий А и С вместе с условными обозначениями линий или групп линий, принадлежащих электрически неэквивалентным центрам. Спектры дают представление о ширине линий и их перекрытии.

Были сняты зависимости спектров от ориентации \mathbf{H} относительно осей кристалла путем его вращения вокруг осей b ($0 \leq \theta \leq 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$; θ, φ — полярный и азимутальный углы, характеризующие ориентацию \mathbf{H} в кристаллографической системе координат) и c ($\theta = 0^\circ$, $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$). Этих угловых зависимостей (рис. 2) оказалось достаточно для определения всех спектроскопических характеристик ПЦ, так как вследствие тетрагональной симметрии кристалла вращение вокруг оси a дает те же зависимости, что и вокруг оси b . Для отслеживания линий отдельных центров применялись насыщение части ПЦ, измерения на разных частотах СВЧ и изохронный отжиг.

Все наблюдавшиеся центры обладали $S=1/2$. Угловые зависимости спектров ЭПР каждого ПЦ описывались спиновым гамильтонианом

$$\mathcal{H} = \beta \mathbf{H} \mathbf{g} \mathbf{S} + \sum_i \mathbf{S} \mathbf{A}^i \mathbf{I}^i,$$

где \mathbf{g} и \mathbf{A}^i — симметричные тензоры спектроскопического расщепления и сверхтонкого взаимодействия (СТВ), i — номер ядра. Для привязки данных ЭПР к результатам рентгеноструктурного анализа оказалось удобным представить шесть независимых компонент тензоров в виде трех главных значений и трех углов Эйлера, характеризующих ориентацию осей тензора относительно a, b, c .

Центры $K1, K4$. При ориентации \mathbf{H} вдоль кристаллографических осей они обладают спектрами, в которых выделяется семь линий с соотношением интенсивности $1 : 2 : 3 : 4 : 3 : 2 : 1$. Такие спектры характерны для ПЦ с СТВ с парой эквивалентных при данных ориентациях \mathbf{H} ядер со спинами $I^1 = I^2 = 3/2$. Собственные элементы ТБЛ обладают следующими ядерными спинами: ${}^6\text{Li} - 1$ (естественная распространенность изотопа 7.5 %), ${}^7\text{Li} - 3/2$ (92.5 %), ${}^{10}\text{B} - 3$ (19.8 %), ${}^{11}\text{B} - 3/2$ (80.2 %). Т. е. парой ядер, дающих семь доминирующих линий, может быть как ${}^7\text{Li} - {}^7\text{Li}$, так и ${}^{11}\text{B} - {}^{11}\text{B}$. Так как магнитные моменты ядер и вероятности

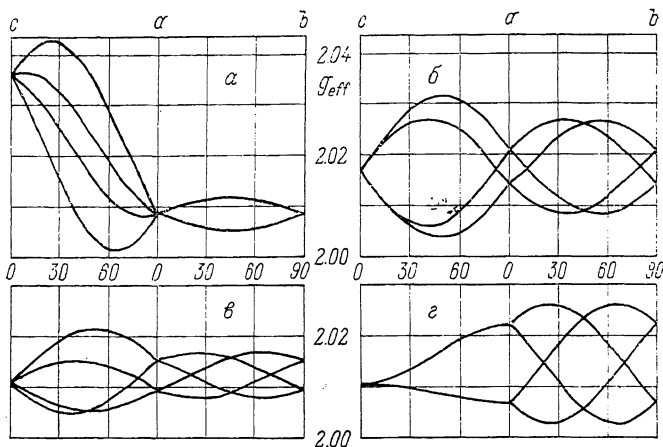


Рис. 2. Характерные угловые зависимости линий ЭПР некоторых дефектов в ТБЛ. а, г — центры линий дефектов $K5, K9$; б, в — центры сверхтонких мультиплетов $K7, K2$. По оси ординат отложены соответствующие наблюдаемым резонансным полям эффективные значения g -фактора.

случайной встречи пар известны (0.006 для ${}^6\text{Li} - {}^6\text{Li}$, 0.14 — ${}^6\text{Li} - {}^7\text{Li}$, 0.85 — ${}^7\text{Li} - {}^7\text{Li}$, 0.04 — ${}^{10}\text{B} - {}^{10}\text{B}$, 0.32 — ${}^{10}\text{B} - {}^{11}\text{B}$, 0.64 — ${}^{11}\text{B} - {}^{11}\text{B}$), мы рассчитали положения и интенсивности линий от пар $\text{Li} - \text{Li}$ и $\text{B} - \text{B}$, синтезировали на ЭВМ предсказываемые спектры и сравнили их с наблюдаемыми. Дополнительные линии, соответствующие сверхтонкому взаимодействию ПЦ с парой ядер ${}^{10}\text{B} - {}^{11}\text{B}$, зарегистрированы у $K4$. Линии центра $K1$ обладают большей шириной и частично перекрываются с линиями других ПЦ, поэтому сделать вывод о типе ионов, входящих в состав $K1$, не удалось.

Характеристики зеемановского и сверхтонкого взаимодействия радиационных центров в тетраборате лития (погрешность определения значений g -тензора ± 0.001 , A -тензора ± 0.2 мТл)

ПЦ	Главное значение g -тензора	Угол Эйлера, град	Главное значение A -тензора, мТл	Угол Эйлера, град
$K1$? ? 2.004 *		? ? 3.7 ? ? 3.7	
$K2$	2.004 2.008 2.024	27 54 —10	0.3 0.8 1.0	70 —46 —30
$K3$? ? 2.013 *			
$K4$	2.003 2.009 2.005 *		5.0 5.0 5.3 5.0 5.0 5.3	
$K5$	2.001 2.008 2.044	20 26 —28		
$K6$	2.001 2.011 2.042	24 28 —23		
$K7$	2.003 2.009 2.040	38 53 —19		
$K8$	2.004 2.011 2.039	28 28 —41		
$K9$	2.003 2.011 2.026	24 90 —90		
$K10$	2.003 2.003 2.003			
$K11$	2.000 2.004 2.008	23 48 40	18.2 21.7 19.1 * 1.5 1.5 1.5 25.8 27.2 28.2 1.0 1.0 1.0	—67 34 13

* См. текст.

Хотя положение линий ПЦ K_4 слабо менялось при вращении \mathbf{H} (т. е. константа изотропного СТВ a оказалась намного меньше константы анизотропного СТВ b), из-за расщепления линий и соответственного уменьшения их интенсивностей при отклонении \mathbf{H} от a , b или c проследить угловые зависимости и определить ориентацию осей анизотропных A^i -тензоров не удалось. Поэтому в сводной таблице характеристик радиационных центров в ТБЛ для K_4 приведены лишь эффективные значения g и A^i при $\mathbf{H} \parallel a, b, c$.

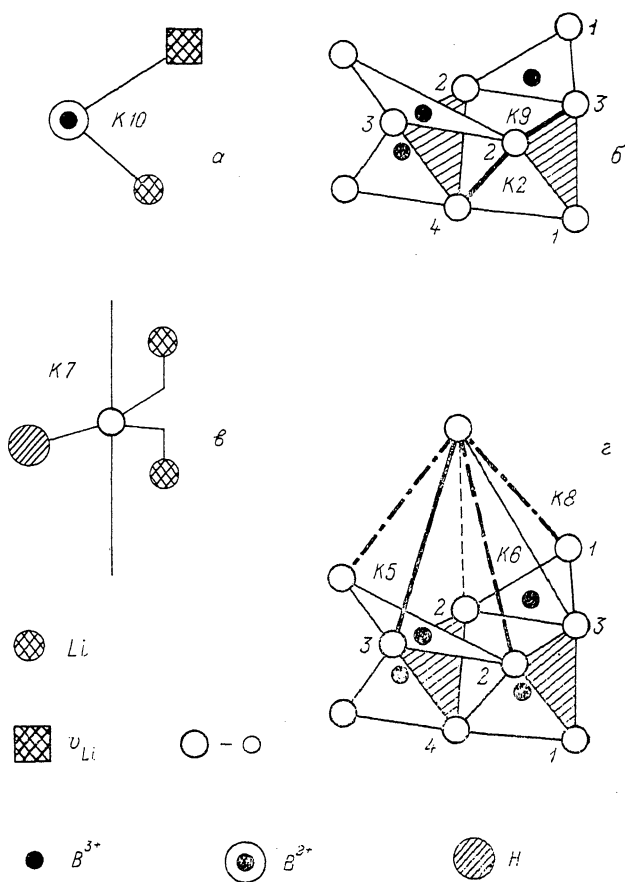


Рис. 3. Модели парамагнитных радиационных дефектов в ТБЛ.

1—4 — позиции неэквивалентных ионов кислорода. Оси z электрически эквивалентных, но магнитно различных центров отмечены линиями одинакового типа, но разной толщины: K_2, K_5, K_9 (сплошные), K_6 (штриховые), K_8 (штрихпунктирные). Разумеется, в кристалле (в отличие от рисунков) все центры разделены пространственно.

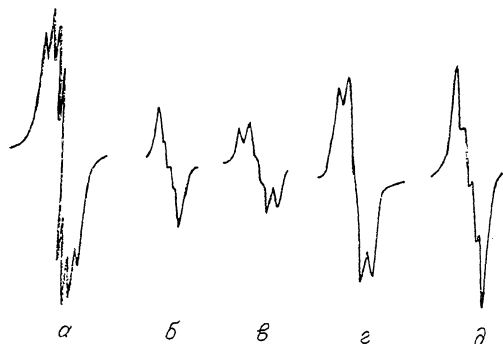
В решетке ТБЛ имеется только одна позиция, вблизи которой расположены два иона бора, остающиеся эквивалентными при любой ориентации \mathbf{H} в плоскости ab . Это кислородный узел $O(4)$ (рис. 3, б). Поскольку значения g -тензора для K_4 близки к значениям F -центра в оксидах [21, 22], мы считаем, что спектр K_4 принадлежит электрону, захваченному кислородной вакансией в позиции $O(4)$.

Положение линий центра K_1 при вращении \mathbf{H} в плоскости ac практически не менялось вплоть до $\theta \approx 35^\circ$. Затем из-за слабой анизотропии g - и A^i -тензоров и, возможно, дополнительного СТВ линии уширились и исчезли. В плоскости ab их линии идентифицировать не удалось. Вероятно, спектр K_1 можно приписать электрону, захваченному кислородной вакансией в какой-либо другой, например $O(1)$, позиции.

Ц е н т р ы K_2, K_3, K_9 . Линии ПЦ K_2, K_9 в образцах партии А были намного интенсивнее остальных. Их угловые зависимости приведены на

рис. 2, в, г. Главные значения g -тензоров $K2$ и $K9$ близки. Отличаются эти ПЦ ориентацией осей g -тензоров и тем, что у $K2$ имеется анизотропное СТВ с одним ядром с $I=3/2$ (см. таблицу). Линии центра $K3$ наблюдались только в образцах партии С. У $K3$ также наблюдалось СТВ с одним ядром со спином $3/2$. Следует отметить, что интенсивности линий ПЦ $K2$ и $K3$ менялись в десятки раз при вращении \mathbf{H} , а при некоторых ориентациях \mathbf{H} линии вообще не наблюдались, что не характерно для ПЦ с $S=1/2$ (потому полный набор параметров $K3$ определить не удалось). Вероятными причинами таких изменений интенсивностей могут быть уширения линий из-за каких-то внутренних движений или из-за неразрешенного СТВ с другими ядрами.

Так как ориентации осей z -центров $K2$, $K9$, задаваемые первыми двумя углами Эйлера, близки к ориентациям кислородных связей $O(4)-$



$O(2)$ и $O(3)-O(2)$, а значения $g_{zz} \approx 2.025$ несколько меньше, чем у комплексов типа O_2 в оксидах [21], мы полагаем, что модели этих центров таковы: комплексы $O^{2-}-V^{3+}-O^{2-}$ после выбивания V^{3+} превращаются в изозарядные комплексы O^0-

Рис. 4. Сверхтонкая структура линий дефекта $K7$ для углов $\theta=0$ (а), 46 (б), 76 (в), 90 (г) и 124° (д).

U_B-O^- (рис. 3, б). Возможно, что и центр $K3$ является подобным комплексом, связывающим другие ионы кислорода.

Ц е н т р ы $K5$, $K6$, $K8$. У линий этих центров нет сверхтонкой структуры, а угловые зависимости (одна из них приведена на рис. 2, а) и значения g -тензора очень близки. Значения $g_{zz} \approx 2.04$ больше, чем g_{xx} , g_{yy} . Это характерно для O_2^- -центров в оксидах: у дырки, захваченной только одним ионом кислорода, т. е. у O^- -центра, $g_{zz} < g_{xx}$, g_{yy} [22]. Ориентации осей z этих ПЦ не совпадают ни с одним из решеточных направлений, соединяющих ионы кислорода. Но если предположить, что в состав центров входят кислородный ион решетки и междоузельный атом кислорода, расположенный на $c/2$ выше $O(4)$ (или, что то же самое, на $c/2$ ниже $O(4)$), то оси z -центров $K5$, $K6$, $K8$ с точностью до 2° совпадают с ориентацией связей $O(c/2)-O(3)$, $O(c/2)-O(2)$, $O(c/2)-O(1)$ (рис. 3, в).

Ц е н т р $K7$. Значения его g -тензора такие же, как и у $K5$, $K6$, $K8$, т. е. он также представляет собой O_2 -комплекс. Однако у этого центра зарегистрирована сложная, имеющая угловую зависимость, сверхтонкая структура (рис. 4). Ее удается понять, если предположить, что в ближайшем окружении центра имеются два эквивалентных при $\mathbf{H} \parallel a$ и $\mathbf{H} \parallel c$ ядра с $I^1=I^2=3/2$ и одно ядро с $I^3=1/2$. Величины СТВ достигают максимума: с I^1 — при $\theta \approx 50^\circ$, $\varphi \approx 0^\circ$; с I^2 — при $\theta \approx -50^\circ$, $\varphi \approx 90^\circ$; с I^3 — при $\theta \approx 90^\circ$, $\varphi \approx 30^\circ$. Параметры изотропного и анизотропного взаимодействий приближенно равны (в мТл): $a^1=a^2 \approx 0.3$, $b^1=b^2 \approx 0.1$, $a^3 \approx 0.4$, $b^3 \approx 0.25$. Из-за большой (порядка $0.2-0.4$ мТл) ширины отдельных компонент и их перекрытия более точную информацию о СТВ можно получить только с помощью двойного электронно-ядерного резонанса (ДЭЯР). Мы полагаем, что в состав $K7$ входят атом кислорода, расположенный на винтовой оси 4, между двумя ионами Li , и протон H^+ (рис. 3, в). Протоны, обладающие $I=1/2$, по-видимому, входят в ТБЛ при выращивании. Следует отметить, что после отжига кристаллов на воздухе в течение 10 мин при $T \approx 700$ К исчезают все ПЦ, кроме $K5$ и $K7$.

Ц е н т р ы $K10$, $K11$. Эти центры обладают суперсверхтонкой структурой в виде квартета с расщеплением порядка $1-1.5$ мТл и гораздо более сильным анизотропным СТВ с другим ядром. Четыре отдельно

стоящих четверки линий $K11$ свидетельствуют о том, что второе ядро, также обладает спином $3/2$. Принадлежит оно ^{11}B , так как наблюдаются еще и слабые дополнительные линии в местах, предсказываемых для ^{10}B . У центра $K10$ зарегистрированы только две четверки малоинтенсивных линий, отстоящих друг от друга на $55-65$ мТл, а промежуток между ними перекрыт более сильными линиями других центров. Если приписать наблюдаемое расщепление ядру со спином $1/2$, то полученные параметры СТВ заметно превосходят величину $40-50$ мТл, характерную для H^0 . Вероятность вхождения в ТБЛ других ионов с $I=1/2$ очень мала. Поэтому мы предположили, что наблюдаемые четверки являются частью СТВ с ядром с $I=3/2$, а две другие четверки спрятаны под линиями других центров. В этом предположении и определены характеристики (см. таблицу). Мы думаем, что спектры $K10$, $K11$ принадлежат V^{2+} в различном окружении. В $^{23, 24}$ для междоузельного V^{2+} в BeO (тетраэдрическое кислородное окружение) найдено $A_{\perp}=25.5$ и $A_{\parallel}=29.3$, а для узельного $A_{\perp}=7.6$ и $A_{\parallel}=12.2$ (в мТл). Точное местоположение V^{2+} в ТБЛ на основании имеющихся данных определить трудно. Возможны следующие простейшие варианты: 1) выбитый нейтроном из узла решетки V^{3+} замещает Li^+ и перезаряжается до V^{2+} , компенсатором оставшегося избыточного заряда является ν_{Li} в ближайшем окружении (рис. 3, а), суперсверхтонкое взаимодействие осуществляется с ядром Li в соседнем литиевом узле либо с ядром ближайшего узельного V^{3+} ; 2) V^{3+} замещает Li^+ , а для компенсации заряда ближайший к нему узельный V^{3+} перезаряжается в V^{2+} , СТВ осуществляет неспаренный эдектрон V^{2+} с собственным ядром, суперСТВ — с ядром $\text{V}_{\text{Li}}^{3+}$.

Другие зарегистрированные центры. При $\text{H} \parallel c$ наблюдалась одиночная линия с $g_{cc}=2.023$ ($K12$), которая расщеплялась на 4 при отклонении H от оси c . Еще несколько ПЦ было зарегистрировано в облученном нейтронами ТБЛ после отжига при 600 К ($K13$ с $g_{cc}=2.041$, $K14$ с $g_{cc}=2.004$), а также после отжига и последующего облучения ($K15$ с $g_{cc}=2.005$ и сверхтонким триплетом с расщеплением порядка 1.2 мТл).

3. Обсуждение результатов

Наши исследования показали, что из двух возможных механизмов образования дефектов — электронного и ударного 25 — в ТБЛ реализуется ударный. Основными типами образующихся при нейтронном облучении дефектов являются стабильные френкелевские пары: междоузельные ионы и вакансии кислорода и бора. ПЦ, связанные с вакансиями лития или междоузельными атомами лития, нами не обнаружены. Обусловлено это, по-видимому, быстрой релаксацией таких пар вследствие высокой подвижности ионов (вакансий) лития.

Обращает на себя внимание возможность избирательно создавать те или иные дефекты путем облучения вдоль направлений a или c . В первом случае преимущественно образуются междоузельные ионы V^{2+} (ПЦ $K10$ или $K11$) и комплексные центры, включающие вакансию ионов бора ($K2$, $K9$ и, вероятно, $K3$); во втором случае доминируют центры, содержащие междоузельный кислород ($K5-K9$) (рис. 1). Дополнительная сепарация дефектов может быть осуществлена путем отжигов и подсветок. Кроме того, так как у каждого из наблюдавшихся типов дефектов имеется 4 или 8 магнитно-неэквивалентных ПЦ, отличающихся ориентациями главных осей взаимодействий, можно попытаться выстроить их электрическим полем или поляризованным светом.

Мы установили, что наиболее стабильными, не исчезающими даже после отжига при 700 К, центрами являются $K5$ и $K7$, содержащие междоузельный кислород. Устойчивость $K5$ обусловлена большей энергией активации ПЦ с наиболее короткой связью из образуемых междоузельным кислородом ($\text{O}(3)-\text{O}(c/2)$), а $K7$ — его электронейтральностью. Эти два центра, по-видимому, наиболее пригодны для использования в ка-

честве парамагнитных зондов при исследовании структурных превращений ТБЛ в широком интервале температур. Следует отметить, что мы не обнаружили существенных различий между спектрами ЭПР, записанными при 77 и 300 К, что не подтверждает выводы [15, 16] о наличии фазовых изменений решетки ТБЛ в этой области температур.

Для уточнения моделей обнаруженных ПЦ представляется целесообразным продолжение исследований методом ДЭЯР — насыщаемость линий большинства центров даже при комнатной температуре вселяет надежду на успешную регистрацию сигналов ДЭЯР. Интересно было бы также сопоставить изменения при отжиге оптического поглощения облученных кристаллов ТБЛ с изменениями спектров ЭПР.

Авторы благодарны Я. В. Бураку за предоставленные кристаллы, Д. И. Сугаку за полезные обсуждения, У. А. Улманису и И. И. Кавке за помощь в облучении кристаллов, А. П. Печеному и Н. Ю. Юрченко за помощь в измерениях спектров ЭПР.

Список литературы

- [1] Paul G. L., Naylor W. // *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1982. V. 15. P. 1753—1764.
- [2] Антоник О. Т., Бурак Я. В., Лысейко И. Т. и др. // *Опт. и спектр.* 1986. Т. 61. № 3. С. 550—553.
- [3] Бурак Я. В., Гицкайло Г. М., Лысейко И. Т. и др. // *Укр. физ. журн.* 1987. Т. 32. № 10. С. 1509—1510.
- [4] Бурак Я. В., Копко Е. Н., Лысейко И. Т. и др. // *Изв. АН СССР, неорг. матер.* 1989. Т. 25. С. 1226—1228.
- [5] Матковский А. О., Сугак Д. Ю., Бурак Я. В. и др. // *Изв. АН ЛатвССР.* 1989. № 6. С. 20—24.
- [6] Борман К. Я., Бурак Я. В., Перро И. Т. и др. // *Сб. ст. «Актуальные проблемы физики и химии сегнетоэлектриков».* Рига, 1987. С. 140—153.
- [7] Kawanishi M., Yamamoto T., Oda K. et al. // *Acta univ. wratisl. mat. fiz. astron.* 1987. N 51. P. 9—18.
- [8] Shiosaki T., Adachi M., Kawabata A. // *Proc. of the 6th IEEE International Symp. on Appl. of Ferroelectrics.* Bethlehem, PA, June 8—11, 1986. P. 455—464.
- [9] Bhalla A. S., Cross L. E., Whatmore R. W. // *Proc. of VI international Meetings on Ferroelectricity.* Kobe, 1985; *Jap. J. Appl. Phys.* 1985. V. 24. Suppl. 24—2. P. 727—729.
- [10] Зеленка Н. *Пьезоэлектрические резонаторы на объемных и поверхностных акустических волнах.* М.: Мир, 1990. 584 с.
- [11] Hübner K., Prokert K., Vizoco S., Bolorin M. // *Kernenergie.* 1983. V. 26. N 3. P. 118—120.
- [12] Kutomi Y., Takeuchi N. // *J. Material Science Letters.* 1986. V. 5. P. 51—53.
- [13] Бурак Я. В., Лысейко И. Т., Гаранни Н. В. // *Укр. физ. журн.* 1989. Т. 34. № 2. С. 226—228.
- [14] Алиев А. Э., Бурак Я. В. // *Тез. докл. VI Всес. конф. по физике диэлектриков.* Томск, 1988. С. 67—68.
- [15] Зарецкий В. В., Бурак Я. В. // *Письма в ЖЭТФ.* 1989. Т. 48. № 4. С. 198—201.
- [16] Зарецкий В. В., Бурак Я. В. // *ФТТ.* 1989. Т. 31. № 6. С. 80—84.
- [17] Krogh-Moe J. // *Acta Cryst.* 1962. V. 15. P. 190—193.
- [18] Krogh-Moe J. // *Acta Cryst.* 1968. V. B24. P. 179—181.
- [19] Радаев С. Ф., Мурадян Л. А., Малахова Л. Ф. и др. // *Кристаллография.* 1989. Т. 34. № 6. С. 1400—1407.
- [20] Мейльман М. Л., Самойлович М. И. *Введение в спектроскопию ЭПР активированных монокристаллов.* М.: Атомиздат, 1977. 256 с.
- [21] Власова М. А., Каказей Н. Г., Калининко А. М., Литовченко А. С. *Радиоспектроскопические свойства неорганических материалов.* Киев: Наукова думка, 1987. 719 с.
- [22] Ueda Y., Kasumata Y., Nishi M. // *Jap. J. Appl. Phys.* 1977. V. 16. N 10. P. 1743—1745.
- [23] Reinberg A. R. // *J. Chem. Phys.* 1964. V. 41. N 3. P. 850—855.
- [24] Herve A., Maffeo B. // *J. Phys. (France).* 1970. V. 31. N 7. P. 673—679.
- [25] Шварц К. К., Экманис Ю. А. *Диэлектрические материалы: радиационные процессы и радиационная стойкость.* Рига: Зинатне, 1989. 187 с.