

величина молярного коэффициента экстинкции на длине волны, соответствующей максимуму линии поглощения;  $\Delta\nu_{1/2}$  — ширина полосы на уровне, где молярный коэффициент экстинкции составляет половину максимального значения. Молярный коэффициент экстинкции  $\epsilon_{\max}$  для  $\text{AsO}_4^{4-}$  составляет около  $10^4$  ( $\text{см}^{-1} \cdot \text{дм}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$ ), а сила осциллятора не менее 0.1. Такая величина силы осциллятора характерна для разрешенных электродипольных переходов.

Таким образом, проведенные исследования показывают эффективность совмещения результатов, полученных методами ЭПР и оптической спектроскопии, для определения природы изменений оптических свойств облученных кристаллов.

Авторы выражают благодарность Е. Р. Панталер и В. А. Коштелову за помощь, оказанную при проведении эксперимента.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Шульга В. М., Левченко А. Н., Кобыжча Т. А. // Тез. докл. Всес. конф. «Применение магнитного резонанса в народном хозяйстве». Казань, 1988. Ч. II. С. 120.
- [2] Шульга В. М., Левченко А. Н., Дорошенко А. О., Щербина Е. В., Островская Е. М. // Там же. С. 121—122.
- [3] Левин А. А., Зайцев А. Р. // ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 2. С. 381—384.
- [4] Эткинс П., Саймонс М. Спектры ФПР и строение неорганических радикалов. М., 1970. 310 с.
- [5] Лебедева Л. И. Комплексообразование в аналитической химии. Л., 1985. 174 с.

Харьковский  
государственный университет  
им. А. М. Горького

Поступило в Редакцию  
4 января 1990 г.

УДК 537.611.43 : 548.4

© Физика твердого тела, том 32, № 8, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 8, 1990

## ОБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА $V^0$ -ЦЕНТРОВ В КРИСТАЛЛАХ ОКСИДА БЕРИЛЛИЯ

*И. Н. Анцыгин, С. В. Горбунов, А. В. Кружалов, Т. Н. Кярнер*

В настоящее время достигнут различный уровень изучения простых дефектов (вакансий) в анионной и катионной подрешетках оксидных кристаллов. Если анионные вакансии в различных зарядовых состояниях ( $F, F^+$ -центры) изучены достаточно полно с точки зрения их структуры, образования, накопления и отжига, то данные об образовании и свойствах элементарных им дефектов ( $V^0, V^-$ -центров) во многом противоречивы. В отношении  $V^0$ -центра в кристаллах оксида бериллия — катионной вакансии с двумя локализованными на ближайших к ней тонах кислорода дырками — в литературе [1, 2] имеется весьма ограниченная информация. Она касается идентификации спектра ЭПР триплетного  $V^0$ -центра, измеренного при 1.5 К в Q-диапазоне.

Целью настоящей работы является более детальный анализ спектра ЭПР, связываемого с  $V^0$ -центрами в  $\text{BeO}$ , изучение их образования, кинетики накопления, температурной стабильности и механизма распада.

Измерения спектров ЭПР номинально чистых кристаллов оксида бериллия, облученных быстрыми нейтронами (флюенс  $10^{16}—10^{19} \text{ см}^{-2}$ ) проведены с использованием радиоспектрометра ЭПР ER201 (X-диапазон) при 10 К. Температура регистрации спектра выбрана из тех соображений, что при 10 К основным состоянием  $V^0$ -центра является триплет ( $S=1$ ), а по достижении температуры выше 16 К значительная часть центров переходит в диамагнитное состояние ( $S=0$ ). Температурная стабильность  $V^0$ -центра исследована методом неизотермической релаксации в условиях изохрон-

ного отжига. Образцы помещали в печь и выдерживали в течение 2 мин при фиксированной температуре из диапазона 400—800 К. После этого кристаллы охлаждали до 10 К и измеряли спектр ЭПР. Эту процедуру повторяли несколько раз, увеличивая температуру отжига на 20 К. Для изучения процессов отжига, связанных с движением интерстициалов, использовали один из calorиметрических методов — метод дифференциального термического анализа (ДТА). Скорость нагрева 10 К/мин позволяла сопоставлять кривые неизотермической релаксации парамагнитных центров и ДТА.

Спектр ЭПР и угловые зависимости линий приведены на рис. 1. В отличие от данных [1] в спектре зарегистрирована новая линия *B*. Результаты измерения спектров ЭПР концентрационной серии образцов и терми-

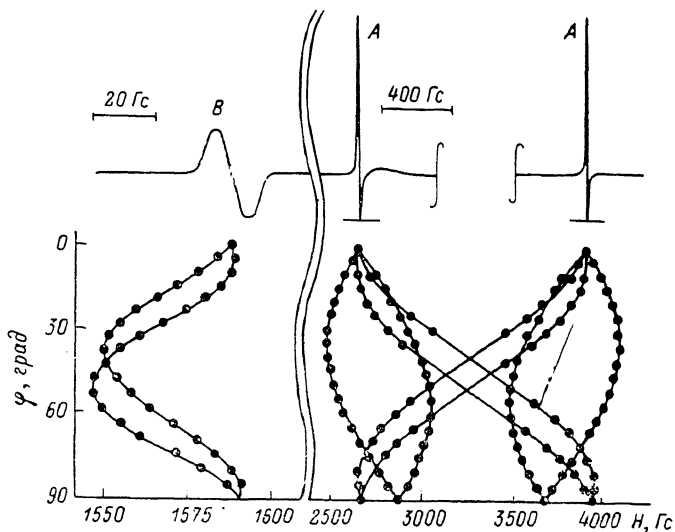


Рис. 1. Спектр ЭПР (*A* — основные переходы, *B* —  $\Delta m_s=2$  переходы) и угловые зависимости линий (точки — эксперимент, сплошная линия — расчет)  $V^0$ -центра в BeO при 10 К.

ческая стабильность линий спектра указывают на принадлежность линии *B* к  $V^0$ -центру. Предположив, что этот сигнал связан с  $\Delta m_s=2$  переходами в  $V^0$ -центре и используя параметры спин-гамильтониана из [2], мы рассчитали соответствующие угловые зависимости линий спектра. Экспериментальная и расчетная угловые зависимости линии *B* хорошо согласуются (рис. 1), что свидетельствует о правильности ее интерпретации как  $\Delta m_s=2$  перехода в  $V^0$ -центре. Обнаруженный нами переход уточняет структуру спектра ЭПР  $V^0$ -центра в оксиде бериллия и согласуется с интерпретацией линий *A* авторами [1].

Дозовое накопление  $V^0$ -центров, так же как и  $V^-$ -центров, происходит в две стадии. Для флюенсов до  $10^{18}$  см<sup>-2</sup> наблюдается линейный рост концентрации  $V^0$ -центров. Выше  $10^{18}$  см<sup>-2</sup> и вплоть до  $10^{19}$  см<sup>-2</sup> заметна тенденция к насыщению, вероятно, связанному с агрегатизацией и рекомбинацией компонентов катионных френкелевских пар. Начальный участок кривой накопления показывает наличие  $V^0$ -центров до облучения нейтронами. Они образуются при перезарядке ростовых катионных вакансий в BeO рентгеновским излучением, имеют концентрацию на 1—2 порядка ниже, чем при образовании по ударному механизму.

Рис. 2 отражает эволюцию центров, связанных с катионными вакансиями, в процессе термического отжига. В области 500—600 К наблюдаются уменьшение концентрации  $V^0$ -центров и одновременное увеличение числа  $V^-$ -центров, что свидетельствует о термической ионизации  $V^0$ -центров ( $V^0 \rightarrow V^- + h^+$ ). Обратный процесс перезарядки при последующем

рентгеновском облучении восстанавливает концентрацию  $V^0$ -центров к первоначальному уровню. Отжиг при 600—650 °K и обратная перезарядка показали, что разрушение  $V^-$ -центров обусловлено двумя процессами. Один из них связан с дальнейшей термической ионизацией ( $V^- \rightarrow V_c^- + h^+$ ), другой — с уменьшением общей концентрации катионных вакансий. Последнее возможно при протекании ионных процессов. Действительно, кривая ДТА (рис. 2) показывает, что в области 650—750 К протекает экзотермический процесс, который приводит к полному исчезнове-

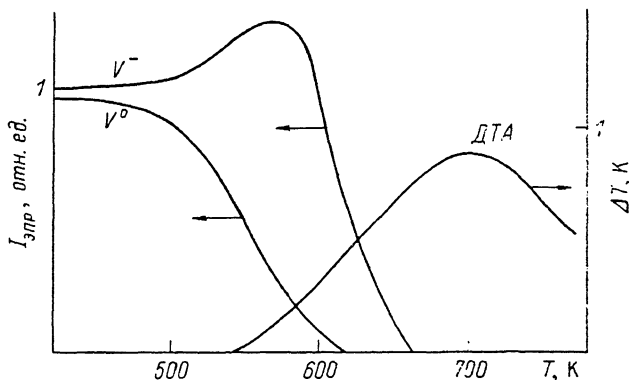


Рис. 2. Температурная стабильность парамагнитных  $V^0$ ,  $V^-$ -центров и кривая ДТА.

нию катионных дефектов, образованных нейтронным облучением. Так как подвижность катионных вакансий в  $BeO$  начинает проявляться при температурах выше 1600 К [3], то кривая ДТА отражает процессы миграции бериллиевых интерстициалов и рекомбинации катионных френкелевских пар.

Таким образом, нами установлено образование стабильных катионных вакансий в виде  $V^0$ -центров в результате нейтронного облучения, обнаружена и идентифицирована новая линия в спектре ЭПР, изучены кинетика накопления и механизмы отжига  $V^0$ -центра — последовательное освобождение дырок в диапазоне 500—650 К и рекомбинация пары катионная вакансия—интерстициал в диапазоне 600—750 К.

Авторы выражают благодарность В. А. Маслову за помощь в работе.

#### Список литературы

- [1] Maffeo B., Herve A., Cox R. // Sol. St. Comm. 1970. V. 8. N 24. P. 2169—2171.
- [2] Maffeo B., Herve A. // Phys. Rev. B. 1976. V. 13. N 5. P. 1940—1959.
- [3] Austerman S. B., Chang R. // J. Nucl. Mater. 1964. V. 12. N 3. P. 337—339.

Уральский политехнический  
институт им. С. М. Кирова  
Свердловск

Поступило в Редакцию  
12 января 1990 г.

## ДИСПЕРСИОННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ ТОНКИХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Б. И. Худик, К. Е. Чернявский

1. Задача о нахождении с заданной степенью точности дисперсионных соотношений электроупругих колебаний тонких пьезоэлектрических пластин произвольной кристаллографической симметрии может быть решена путем перехода от трехмерного описания к двумерному. Разработанные