

- [1] Vecchi M. P., Pereira J. R., Dresselhaus M. S. // Phys. Rev. 1976. V. 14. N 2. P. 298—317.  
 [2] Brown R. N., Mavroides J. C. // Phys. Rev. 1963. V. 129. № 5. P. 2055—2061.  
 [3] Кондаков О. В., Иванов К. Г. // Деп. в ВИНТИ. 1988. № 8078-B-88.

Елецкий государственный педагогический институт  
Елецк

Поступило в Редакцию  
4 июля 1989 г.

Ленинградский государственный педагогический институт  
им. А. И. Герцена  
Ленинград

УДК 548.571; 548.4

© Физика твердого тела, том 32, в. 1, 1990  
Solid State Physics, vol. 32, N 1, 1990

## МЕХАНИЗМЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЦЕНТРОВ ОКРАСКИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$

*В. И. Барышников, Т. А. Колесникова, Е. Ф. Мартынович, Л. И. Щепина*

В [1, 2] исследованы процессы перезарядки центров окраски (ЦО) в монокристаллах лейкосапфира ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), облученных нейтронами с флюенсом  $10^{18}$  н/см<sup>2</sup>. Данная работа посвящена изучению механизмов преобразования ЦО в широком интервале температур с учетом особенностей окрашивания образцов  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

В экспериментах использованы монокристаллы, выращенные методом Вернейля, горизонтальной направленной кристаллизации, окрашенные термохимически, а также нейтронным облучением с флюенсом  $5 \cdot 10^{16}$  н/см<sup>2</sup>. Отбирались образцы с примерно одинаковыми концентрациями F-центров (рис. 1, 1, 2). F<sup>+</sup>-центры в аддитивно окрашенных кристаллах наводились путем оптической ионизации F-центров (рис. 1, 2, 3) в такой же концентрации, как и в нейтронно облученных. Поскольку в процессе нейтронного облучения лейкосапфира образование F и F<sup>+</sup> ЦО сопровождается синхронным выходом междоузельных ионов кислорода и появлением междоузельных ионов алюминия [3], а термохимическое окрашивание исключает образование междоузельных компонентов, появляется возможность выявить вклад F<sup>-</sup>, F<sup>+</sup>-центров и междоузельных ионов в механизмы образования, преобразования и разрушения ЦО в лейкосапфире.

Изохронный отжиг в вакууме термохимически окрашенных кристаллов показал, что F и F<sup>+</sup> ЦО устойчивы до температуры 1800 °С (рис. 1, 5, 6). В спектрах оптического поглощения и фотолуминесценции этих кристаллов, измеренных при 4.2, 77 и 300 К, новых полос после отжига не обнаружено. Кроме того, не наблюдаются изменения в спектрах ЭПР. Все это однозначно свидетельствует об отсутствии миграции F и F<sup>+</sup> ЦО в  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а следовательно, исключает возможность образования F<sub>2</sub>, F<sub>2</sub><sup>+</sup>-центров и в ходе отжига (200—700 °С) нейтронно окрашенных кристаллов по реакциям  $F + F^+ \rightarrow F_2^+$  и  $F + F \rightarrow F_2$ , предложенным авторами [4]. Принимая во внимание высокую термоустойчивость F и F<sup>+</sup> ЦО, необходимо отметить одинаковый ход кривых разрушения этих ЦО в нейтронно облученных образцах (рис. 1, 7, 8), который мы связываем с восстановлением узлов кристаллической решетки освобождающимися междоузельными ионами кислорода. Как следует из рис. 1, 7—11, не наблюдается согласованности в разрушении F и F<sup>+</sup> ЦО, с одной стороны, и группой генетически связанных ЦО [2] с максимумами поглощения на 305, 360 и 460 нм — с другой, тогда как последние также должны разрушаться междоузельными ионами. Данный результат и отсутствие миграции F-

и  $F^+$ -центров в ходе отжига окрашенных  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  противоречат принадлежности полос 305, 360 и 460 нм  $F$ -агрегатным центрам. Вместе с тем эти аргументы не являются достаточными, поскольку при нейтронном облучении

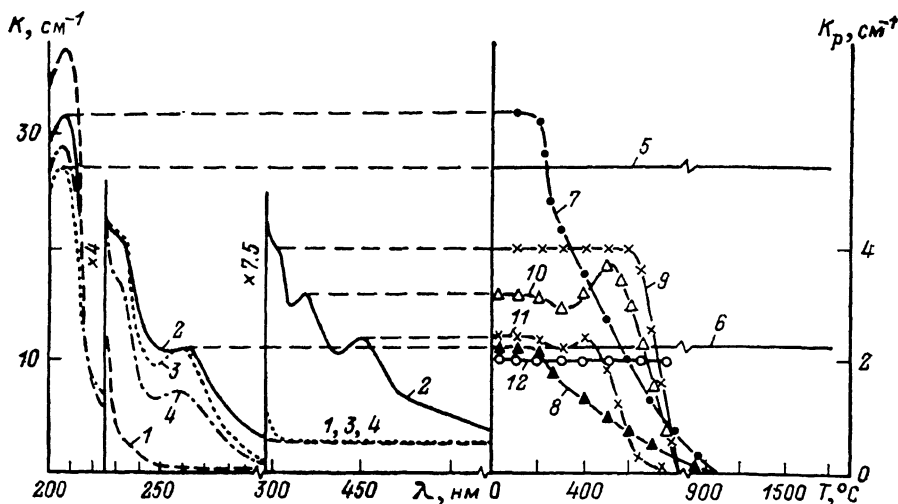


Рис. 1. Спектры поглощения (1—4) и кривые изохронного отжига (5—11) ЦО для монокристаллов  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ : аддитивно окрашенного (1), после облучения  $F$  светом (3) и последующего воздействия в  $F^+$  полосу (4), нейтронно облученного флюенсом  $5 \cdot 10^{16}$  н/см<sup>2</sup> (2). Отжиг  $F$  (5) и  $F^+$  (6)-центров в аддитивно окрашенном и обесцвеченном  $F$  светом кристалле (образец выдерживался 20 мин при каждой температуре);  $F$  (7),  $F^+$  (8) и центров, поглощающих на 305 (9), 360 (10), 460 нм (11) в нейтронно облученном кристалле (образец выдерживался по 5 мин при каждой температуре).

12 —  $K_p = f(T)$ , где  $K_p$  характеризует величину «отставания» в разрушении  $F^+$ -центров при их преобразовании в  $F$ -центры.

чении кристаллов образуются кислородные вакансии ( $F^{2+}$ ), часть которых рекомбинирует с электронами ( $F^{2+} + e \rightarrow F^+$ ,  $F^+ + e \rightarrow F$ ), а другие могут мигрировать, образуя  $F$ -агрегатные центры, по реакциям  $F + F^{2+} \rightarrow F_2^+$ ,  $F_2^+ + e \rightarrow F_2^+$ . В [1] показано, что в нейтронно окрашенных кристаллах

наведенные свободные вакансии «заморожены» при 300 К и эффективно разрушаются радиационным облучением с пороговой для образования кислородных вакансий энергией. Следовательно, для решения вопроса о механизме

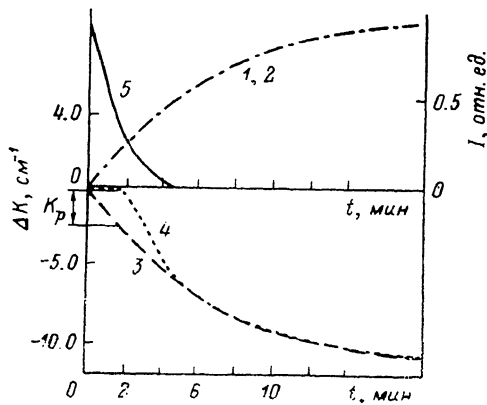


Рис. 2. Изменение концентрации  $F$  (1, 2),  $F^+$  (3, 4) и РЛ  $F^+$ -центров (5) с экспозицией рентгеновского излучения для образца, обесцвеченного  $F$  светом (1, 3),  $F$  и  $F^+$  светом (2, 4, 5).

образования  $F$ -агрегатных центров необходимо знать термическую стабильность  $F^{2+}$ .

В термохимически окрашенных кристаллах  $F^{2+}$ -центры наводились последовательным облучением  $F$  и  $F^+$  светом. Об этом свидетельствует появление интенсивной рентгенолюминесценции (РЛ)  $F^+$  ЦО в обесцвеченных образцах, спадающей с экспозицией облучения  $F^{2+} + e \rightarrow (F^+)^* \rightarrow h\nu (F^+) + F^+$  (рис. 2, 5). Кроме того, несовпадение (более чем в 2 раза) соотношений  $\Delta K_F / \Delta K_{F^+}$  для образца, подвергнутого оптической ионизации в  $F$  полосе ( $F \rightarrow F^+ + e$ ), и образца, прошедшего последующую обра-

ботку  $F^+$  светом ( $F^+ \rightarrow F^{2+} + e$ ,  $F^+ + e \rightarrow F$ ), является результатом того, что не все  $F^+$ -центры преобразуются в  $F$ , а значит, создается и выживает какая-то доля анионных вакансий. Подтверждением этого служит значительная величина «отставания»  $K_p$  в разрушении  $F^+$  ЦО при их преобразовании в  $F$ -центры с экспозицией рентгеновского облучения  $F^+ + e \rightarrow F$ ,  $F^{2+} + e \rightarrow F^+$  для кристалла, облученного  $F$ ,  $F^+$  светом (рис. 2, 4), и  $F^+ + e \rightarrow F$  для образца, облученного только  $F$  светом (рис. 2, 3).

В аддитивно окрашенных кристаллах лейкосапфира, облученных  $F$  и  $F^+$  светом после термической обработки до  $750^\circ\text{C}$ , интенсивность РЛ  $F^+$  ЦО и  $K_p$  остается на исходных уровнях, не изменяются также характеристики сигналов ЭПР, т. е. кислородные вакансии до этих температур устойчивы. Поэтому в нейтронно окрашенных кристаллах  $F$ -агрегатные центры с их участием не создаются, так же как и ЦО, поглощающие на 305, 360 и 460 нм. Эти центры не могут быть связаны и с междоузельными ионами кислорода, так как отсутствует синхронность в их преобразовании с разрушением  $F$  и  $F^+$  ЦО (рис. 1, 7—11). Согласно перечисленным экспериментальным фактам, полосы поглощения с максимумами 305, 360 и 460 нм в нейтронно облученных кристаллах можно отнести к междоузельным ионам алюминия либо к комплексам на их основе с учетом зарядовых состояний, определенных в работе [2].

Таким образом, в монокристаллах лейкосапфира отсутствует миграция  $F$ - и  $F^+$ -центров до температуры  $1800^\circ\text{C}$ , кислородных вакансий до  $750^\circ\text{C}$ ; радиационное дефектообразование происходит без миграции анионных вакансий, а разрушение и преобразование радиационно-наведенных ЦО при термообработке обусловлены восстановлением узлов решетки междоузельными ионами и электронно-дырочной перезарядкой ЦО.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Барышников В. И., Мартынович Е. Ф., Щепина Л. И., Колесникова Т. А. // Опт. и спектр. 1988. Т. 64. № 2. С. 455—457.  
 [2] Барышников В. И., Мартынович Е. Ф. // ФТТ. 1986. Т. 28. № 4. С. 1258—1260.  
 [3] Pells G. P., Phillips D. C. // J. Nucl. Materials. 1979. V. 80. P. 207—214.  
 [4] Atobe K., Nishimoto N., Nakagawa M. // Phys. St. Sol. (a). 1985. V. 89. N 1. P. 155—162.

Иркутский государственный университет  
 НИИ прикладной физики  
 Иркутск

Поступило в Редакцию  
 12 июля 1989 г.

УДК 539.315.592

© Физика твердого тела, том 32, в. 1, 1990  
 Solid State Physics, vol. 32, N 1, 1990

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ АМОРФНОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ

Я. О. Ройзин, Л. В. Цыбесков, В. Р. Шумейко

Известно, что аморфный нитрид кремния ( $a\text{-Si}_3\text{N}_4$ ) обладает свойствами, характерными для неупорядоченных твердотельных систем, в частности большой концентрацией структурных дефектов [1]. Наличие этих дефектов, например оборванных связей кремния [2], обуславливает появление глубоких локализованных состояний в запрещенной зоне  $a\text{-Si}_3\text{N}_4$ . Одним из эффективных способов определения концентрации, энергетического и пространственного распределения таких состояний является исследование малосигнальной проводимости на переменном токе (динамической проводимости) [3].