

## Дозовые зависимости $E'_1$ -центра в образцах кварца, содержащих незаряженные вакансии кислорода

© О.И. Щербина, А.Б. Брик

Институт геохимии, минералогии и рудообразования Академии наук Украины, 252680 Киев, Украина

(Поступила в Редакцию 13 октября 1997 г.)

Методом ЭПР изучены дозовые зависимости  $E'_1$ -центра (вакансия кислорода, захватившая один электрон) в образцах кварца, содержащих незаряженные вакансии кислорода. Экспериментально показано, что практически для всех образцов кварца доза облучения порядка 400 Gy достаточна для того, чтобы все вакансии кислорода захватили по два электрона. Линейный участок дозовых зависимостей  $E'_1$ -центра в образцах, отожженных при 300°C в течение 15 min, может быть использован для восстановления доз облучения до 60–70 Gy. Если концентрация вакансий кислорода в исходном образце больше  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , то по интенсивности  $E'_1$ -центров можно определить дозу облучения, равную 1–3 Gy. Это значение может быть существенно ниже минимально регистрируемой дозы облучения для других парамагнитных центров в кварце.

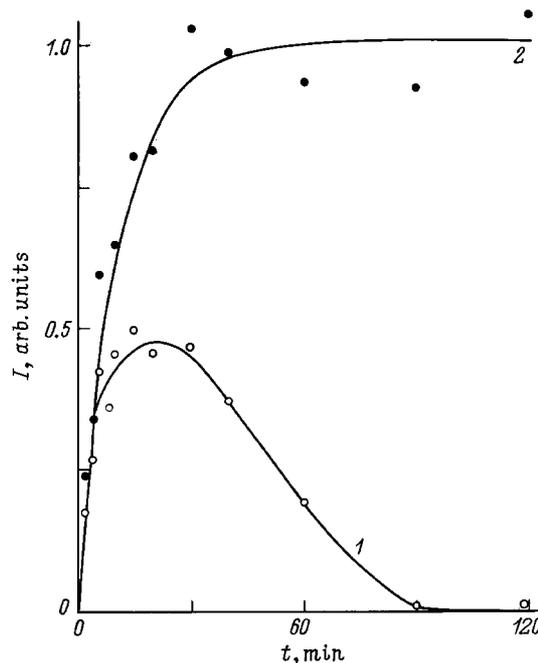
1. Несмотря на то что  $E'_1$ -центр [1] является одним из хорошо изученных парамагнитных центров в кварце, его структура и механизм образования требуют дальнейших исследований (обзор работ по исследованию кварца методом ЭПР дан в [2]). Считается, что  $E'_1$ -центр появляется в сильно облученных образцах кварца после кратковременного отжига при 300°C [3], а дозовая зависимость этого центра остается линейной в интервале доз от 0.01 MGy до 0.1 GGy [3]. Эти свойства делают  $E'_1$ -центр идеальным для дозиметрии при указанных дозах облучения. Однако нами было установлено, что в образцах кварца, содержащих незаряженные вакансии кислорода, можно зарегистрировать  $E'_1$ -центр при гораздо меньших дозах облучения.

2. Для создания образца, содержащего незаряженные вакансии кислорода, мы отожгли при температуре 470°C в течение 30 min кварц (так называемый морион), который получил большую дозу облучения в природных условиях. После отжига в образце исчез сигнал ЭПР  $E'_1$ -центра. Регистрация сигналов ЭПР от этого центра производилась с помощью спектрометра трехсантиметрового диапазона ERS-231. Потом этот образец был разделен на порции, каждая из которых была облучена на рентгеновской установке РУП-120 (2 mA, 65 kV). Облучение в течение 60 min на этой установке соответствует дозе, приблизительно равной 290 Gy. Облученные образцы были выдержаны в течение месяца при комнатной температуре для того, чтобы в них распались короткоживущие центры. После этого в них была измерена интенсивность  $E'_1$ -центра. Затем образцы были отожжены при температуре 300°C в течение 15 min и была проведена повторная регистрация сигналов ЭПР.

3. Полученные значения интенсивности сигнала ЭПР были отнормированы так, чтобы уровень, на котором насыщается сигнал ЭПР  $E'_1$ -центра в отожженном образце, был равен единице. На рисунке представлены результаты этих измерений. На оси ординат отложена интенсивность отнормированного сигнала ЭПР  $I$ , а на оси

абсцисс — время облучения соответствующей порции образца  $t$ . Необходимо отметить, что максимальное значение интенсивности  $E'_1$ -центра в облученных образцах оказалось равным интенсивности этого центра в исходном морионе, который подвергся отжигу при 300°C в течение 15 min.

Представленные дозовые зависимости позволяют определить зависимость от дозы облучения  $E'_1$ -центра (вакансия кислорода без электронов),  $E'_1$ - и  $E''_1$ -центров (вакансия кислорода, захватившая один и два электрона). Действительно, расстояние от прямой, параллельной оси абсцисс и проходящей через единицу на оси ординат, до графика 2 пропорционально концентрации  $E'_1$ -центра, расстояние между графиками 1 и 2 — концентрации



Дозовые зависимости  $E'_1$ -центра в кварце после облучения (1) и после последующего отжига (2).

$E_1''$ -центра, а график 1 является дозовой зависимостью  $E_1'$ -центра.

Дозовые зависимости  $E_1'$ -центра остаются линейными в области доз порядка МГу [3], где насыщаются сигналы ЭПР от  $[AlO_4]^{0-}$ -центра [4]. Изменение зарядового состояния  $[AlO_4]^{0-}$ -центра происходит в результате захвата свободных дырок из валентной зоны и потери иона-компенсатора. Наличие иона-компенсатора возле парамагнитного алюминиевого центра можно однозначно установить с помощью электрополевых эффектов, обусловленных туннелированием парамагнитной дырки в двухъямном энергетическом потенциале алюминиевого центра [5]. Ион-компенсатор искажает этот двухъямный потенциал и делает невозможными туннелирование дырки и соответственно проявления электрополевых эффектов. Насыщение дозовых зависимостей  $[AlO_4]^{0-}$ -центра свидетельствует о насыщении имеющихся в образце ловушек электронов, дырок и ионов-компенсаторов и о установлении динамического равновесия в процессах их освобождения, захвата и рекомбинации. Линейность дозовых зависимостей  $E_1'$ -центров при этих условиях свидетельствует о том, что при рассматриваемых условиях эксперимента [3] облучение создает вакансии кислорода, которые захватывают свободные электроны, образовавшиеся при поглощении радиационного излучения.

В нашем эксперименте максимальная интенсивность  $E_1'$ -центра в отожженных и затем облученных образцах совпадает с интенсивностью  $E_1'$ -центра в исходном образце после кратковременного отжига при 300°C. Следовательно, наше лабораторное облучение не создало в образце вакансии кислорода. Таким образом, в нашем случае изменение заряда имеющихся в образце вакансий кислорода (или, иными словами, дозовые зависимости  $E_1'$ -центра) обусловлено захватом свободных носителей, появившихся при поглощении энергии рентгеновского излучения. Процесс захвата электронов вакансиями кислорода проходит намного эффективнее процесса образования самих вакансий, и поэтому практически все вакансии кислорода захватывают два электрона при дозе облучения, равной приблизительно 400 Gy.

Полученные экспериментальные результаты важны для ретроспективной дозиметрии на основе кварца [6]. В задачи этой дозиметрии входит восстановление доз облучения местности и сооружений, подвергшихся нежелательному облучению в случае аварии на атомной станции или производстве, использующем радиоактивные вещества. Ретроспективная дозиметрия, как известно, использует кварц, выделенный из строительных конструкций. Как показывает практика, значительная часть проб кварца, выделенного из кирпичей и плиток, содержит достаточное количество вакансий кислорода, которые полностью потеряли электроны в ходе изготовления этих материалов. Следовательно, такие пробы аналогичны образцу, исследованному нами. Необходимо учитывать, что зарегистрированный сигнал ЭПР от  $E_1'$ -центра в таких образцах не свидетельствует в этом случае о большой дозе облучения, а указывает на значительную

концентрацию вакансий кислорода. Если концентрация вакансий кислорода в образце равна  $10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , то, используя для дозиметрии линейную область дозовой зависимости  $E_1'$ -центров, можно восстановить дозу облучения, равную 1–3 Gy.

Работа выполнена в рамках проекта 2.4/689, финансируемого Миннауки Украины.

## Список литературы

- [1] R.A. Weeks. J. Appl. Phys. **27**, 1376 (1956).
- [2] J.A. Weil. Phys. Chem. Minerals **10**, 149 (1984).
- [3] A. Wieser, D.F. Regulla. Appl. Rad. Isot. **40**, 911 (1989).
- [4] А.Б. Брик, В.Я. Дегода, Ю.А. Маразуев, М.И. Самойлович, О.И. Щербина. ФТТ **37**, 1, 107 (1995).
- [5] A.B. Brik. Ferroelectrics **161**, 59 (1994).
- [6] S. Toyoda, J.W. Rink, H.P. Schwarcz, M. Ikeya. Appl. Rad. Isot. **47**, 11/12, 1393 (1996).