

веденное рассмотрение можно обобщить и на случай наличия кулоновской щели в плотности состояний [5]. В заключение отметим, что полученные результаты могут быть уточнены с помощью машинного моделирования (необходимо вычислить значение ξ).

Л и т е р а т у р а

- [1] Силин А. П. УФН, 1985, т. 147, № 3, с. 485—522.
- [2] Баранов М. В., Буздин А. И., Булагский Л. Н. ЖЭТФ, 1986, т. 91, № 3 (9), с. 1063—1073.
- [3] Рудько В. Н. ЖЭТФ, 1985, т. 89, № 5 (11), с. 1676—1684.
- [4] Андрушин Е. А., Быков А. А. УФН, 1988, т. 154, № 1, с. 123—132.
- [5] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1979. 416 с.
- [6] Рудько В. Н., Фищук И. И. ФТТ, 1980, т. 22, № 6, с. 1897—1898.
- [7] Fishchuk I. I., Rudko V. N. J. Phys. C, 1980, vol. 13, N 20, p. L493—L497.
- [8] Böttger H., Bryksin V. V. Phys. St. Sol. (b), 1982, vol. 113, N 1, p. 9—49.

Институт ядерных исследований АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
28 марта 1988 г.

УДК 537.533.2+539.1.043+548.4

Физика твердого тела, том 30, в. 11, 1988
Solid State Physics, vol. 30, № 11, 1988

ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ ЭКЗОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ КРИСТАЛЛОВ КВАРЦА ПРИ МНОГОФОНОННОЙ ИОНИЗАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ E' -ЦЕНТРОВ

А. Ф. Зацепин, В. Г. Мазуренко, В. С. Кортов,
В. А. Калентьев

Эффект термостимулированной экзоэлектронной эмиссии (ТСЭЭ) в силу его многостадийности требует изучения начальных этапов эмиссионного акта, связанных с распадом центров локализации электронов [1]. Заметную роль в механизмах экзоэмиссии играют многофононные процессы [2], одним из проявлений которых может быть ионизация глубоких центров в электрическом поле, протекающая с поглощением определенного числа колебательных квантов.

Для проверки указанного предположения нами проведены экспериментальные исследования и сопоставление с теоретическими расчетами температурных зависимостей энергии электронов ТСЭЭ кристаллов кварца, облученных нейтронами. Исследовались полированные пластины X-среза, облученные потоком быстрых нейтронов (10^{15} — 10^{19} н·см⁻²) с целью создания в решетке дозированной концентрации кислородно-вакансионных дефектов типа E' -центров, наличие которых регистрировалось методом ЭПР. Энергетическое распределение электронов измеряли методом тормозящего поля с применением многоканального амплитудного анализатора, работающего во временном режиме, что позволило в условиях автоматизированного эксперимента регистрировать параметры энергоспектра электронов за время, соответствующее сравнительно узкому (15—20 К) интервалу температур при линейном нагреве образцов со скоростью 0.2 град·с⁻¹. Ошибка в определении энергии электронов не превышала ± 0.05 эВ.

Результаты измерений интенсивности \mathcal{J} эмиссии, средних энергий \bar{E} электронов, эмиттируемых при 650—660 К в области пика ТСЭЭ, соответствующего распаду парамагнитных E' -центров [3], представлены на рис. 1. С увеличением дозы облучения и, следовательно, концентрации E' -центров наблюдается закономерное уменьшение энергии экзоэлектронов. Вместе

с тем из экспериментальных данных следует, что интенсивность пика ТСЭЭ 650—660 К с ростом дозы нейтронов увеличивается. При этом с повышением температуры наблюдается монотонное уменьшение кинетической энергии электронов, достигающее величины, большей 0.1 эВ. Таким образом, имеет место антибатная зависимость интенсивности ТСЭЭ и кинетической энергии электронов от концентрации радиационных E' -центров. Подобная особенность была установлена ранее для механически нарушенной поверхности кристаллического кварца [4], что указывает на общность наблюдаемых закономерностей.

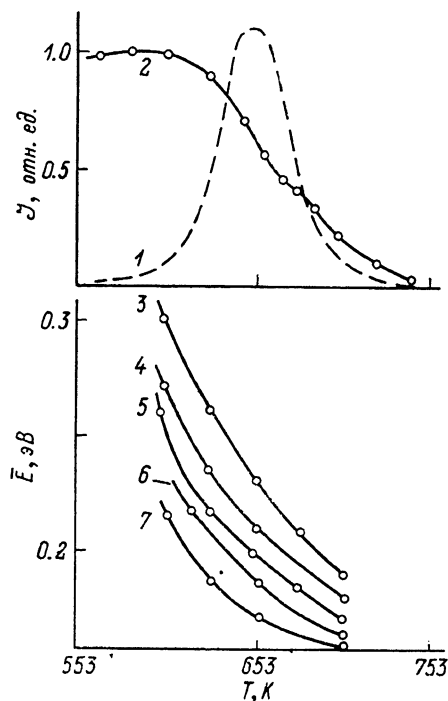


Рис. 1. Характерный максимум ТСЭЭ (1) в области термического отжига сигнала ЭПР ($g_1=2.0006$, $g_2=2.0036$, $g_3=2.0035$) радиационных E' -центров (2) и температурные зависимости средней энергии экзоэлектронов (3—7), эмиттируемых с поверхности кварца после облучения потоком нейтронов.

3 — $1.2 \cdot 10^{15}$, 4 — $7.5 \cdot 10^{17}$, 5 — $1.8 \cdot 10^{18}$, 6 — $6.6 \cdot 10^{18}$, 7 — $8.5 \cdot 10^{18}$ н·см $^{-2}$.

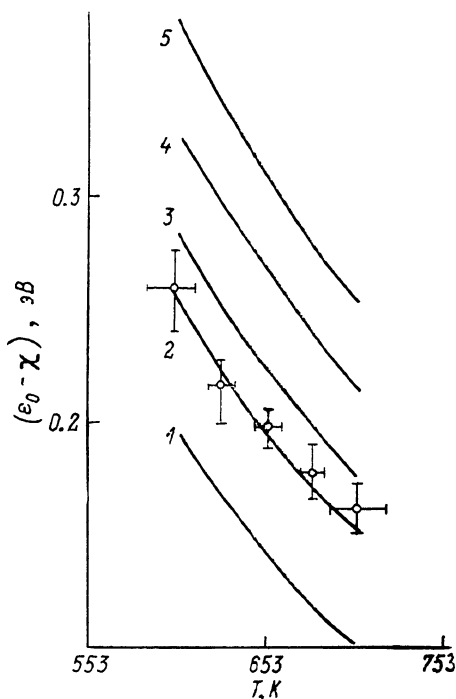


Рис. 2. Расчетные значения энергии экзоэлектронов, эмиттируемых в интервале температур распада E' -центров кварца при варьировании напряженности внутреннего электрического поля.

1 — $1.45 \cdot 10^8$, 2 — $1.50 \cdot 10^8$, 3 — $1.54 \cdot 10^8$, 4 — $1.58 \cdot 10^8$, 5 — $1.63 \cdot 10^8$ В·м $^{-1}$. Точки — экспериментальные энергии для образца, облученного потоком нейтронов $1.8 \cdot 10^{18}$ н·см $^{-2}$.

Экспериментальные результаты могут быть последовательно интерпретированы в рамках механизма многофононной туннельно-активационной ионизации локальных центров в постоянном электрическом поле [5], которое, согласно современным представлениям о природе ТСЭЭ, создается в эмиссионно-активном слое диэлектрика радиационным зарядом и облегчает выход электронов с поверхности. Для центра эмиссии нулевого радиуса аналитическое выражение начальной энергии ϵ_0 делокализованного электрона над нижним краем зоны проводимости имеет вид [5]

$$\epsilon_0 = \mathcal{E}^2 e^2 \tau^2 / 2m^*,$$

где \mathcal{E} — напряженность электрического поля; e — заряд электрона; m^* — эффективная масса; τ — время туннелирования ядерной подсистемы. В модели касания время туннелирования

$$\tau = (1/2\pi\nu) \ln[(1 + \sqrt{1 - \beta}) / (1 - \sqrt{1 - \beta})] + \hbar/2kT.$$

Здесь β — постоянная электрон-фононной связи, зависящая от соотношения величин оптической $\epsilon_{\text{опт}}$ и термической ϵ_r глубины ловушки; ν — частота локального колебания дефекта.

В предположении о преимущественном взаимодействии электрона с локальным колебанием центра эмиссии нами были рассчитаны температурные зависимости энергии ϵ_0 делокализованного с E' -центра электрона (рис. 2). Энергетические параметры E' -центров определены: 1) $\epsilon_r = 2.60 \div 2.75$ эВ из анализа кинетики ТСЭЭ, причем величина ϵ_r уменьшается с увеличением степени радиационного повреждения решетки; 2) $\epsilon_{\text{опт}} \approx 7.5$ эВ на основе квантовохимических расчетов электронной структуры кислородно-вакансионных дефектов в кварце [3]. При указанных величинах ϵ_r и $\epsilon_{\text{опт}}$ параметр $\beta \approx 0.52$. В отличие от [5], где частота локальных колебаний центра использована как подгоночный параметр, в настоящей работе значение $\nu = 22.4 \cdot 10^{12}$ Гц получено из независимых расчетов фононного спектра α -кварца, содержащего в решетке асимметрично-релаксированную вакансию кислорода [6]. С учетом энергии резонансной моды E' -центра оценка числа фононов, участвующих в элементарном акте ионизации, дает значение $n = 10 \div 30$. Величина электрического поля, в котором происходит ионизация E' -центра, определена подгонкой расчетного значения ϵ_0 к экспериментальному при 628 К с учетом электронного сродства кварца $\chi = 0.5$ эВ [7]. При этом предполагалось, что электрон практически не теряет энергию при его движении к границе раздела.

Согласие экспериментальных и расчетных зависимостей $E(T)$ при варьировании напряженности электрического поля позволяет оценить ее реальную величину. Так, для образца, облученного потоком 1.8×10^{18} н·см⁻², рассчитанная напряженность поля, действующего на ионизирующийся фононами E' -центр, составляет $1.5 \cdot 10^8$ В·м⁻¹. Температурная зависимость энергии электронов отражает уменьшение ϵ_0 и τ с ростом температуры в интервале пика ТСЭЭ, тогда как регистрируемый экспериментально с увеличением дозы нейтронов сдвиг кривых $E(T)$ в область малых энергий следует отнести за счет повышенной эффективности релаксации поля в дефектной решетке кристалла. Необходимо подчеркнуть, что пренебрежение рассеянием свободных электронов на дефектах и колебаниях решетки кристалла является справедливым приближением лишь для описания ТСЭЭ с приповерхностных E' -центров, локализованных в тонких слоях, соизмеримых с длиной $\lambda \sim 15 \div 20$ Å свободного пробега электронов в SiO₂. Для объемных центров экзоэмиссии корректное описание механизма ТСЭЭ требует детального рассмотрения стадии транспорта носителей, учитывающей процессы их рассеяния и рекомбинации.

Таким образом, многофононные эффекты могут заметно влиять на начальные стадии ТСЭЭ и параметры энергетического спектра электронов. Дефекты типа E' -центров характерны также для стеклообразных и кристаллических силикатов, поэтому можно полагать, что рассмотренный механизм ТСЭЭ достаточно распространен в экзоэмиссии диэлектриков указанного класса.

Л и т е р а т у р а

- [1] Кортюв В. С., Слесарев А. И., Рогов В. В. Экзоэмиссионный контроль поверхности деталей после обработки. Киев: Наукова думка, 1986. 176 с.
- [2] Сотников В. Т., Старжинский И. Г., Жуж В. А. ФТТ, 1986, т. 28, № 5, с. 1408—1412.
- [3] Кортюв В. С., Губанов В. А., Зацепин А. Ф. и др. Изв. АН СССР. Сер. физ., 1985, т. 11, № 4, с. 490—493.
- [4] Календьев В. А., Зацепин А. Ф., Кортюв В. С. ФХОМ, 1985, № 2, с. 124—126.
- [5] Карпус В., Перель В. И. ЖЭТФ, 1986, т. 91, № 6, с. 2319—2331.
- [6] Мазуренко В. Г., Кортюв В. С., Зацепин А. Ф. УФЖ, 1988, т. 33, № 1, с. 128—130.
- [7] Зацепин А. Ф., Календьев В. А., Кортюв В. С. Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, № 2, с. 102—105.