

[5] *Ishikawa Y., Hoshino S., Endoh Y.* // J. Phys. Soc. Jap. 1967. V. 22. N 10. P. 1221—1230.

[6] Костина Т. И., Меньшов В. Н., Тугушев В. В. // ФММ. 1985. Т. 59. № 3. С. 430—439.

[7] Sato H., Maki K. // Int. J. Magn. 1974. V. 6. N 1. P. 183—209.

ЦНИИчермет  
Москва

Поступило в Редакцию  
5 апреля 1989 г.

УДК 537.533

Физика твердого тела, том 31, в. 9, 1989  
Solid State Physics, vol. 31, N 9, 1989

## ДИФфуЗИОННО-КОНТРОЛИРУЕМЫЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ ЭКЗОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ В LiF

В. И. Курна, В. С. Кортов, И. А. Тале, А. И. Слесарев

Первые синхронные измерения термостимулированной экзоэлектронной эмиссии (ТСЭЭ) и люминесценции (ТСЛ) кристаллов LiF в режиме фракционного нагрева (ФН) позволили установить взаимосвязь обоих явлений в области температур разрушения  $V_K$ -центров, однако детального исследования кинетики ТСЭЭ и ТСЛ не проводилось [1].

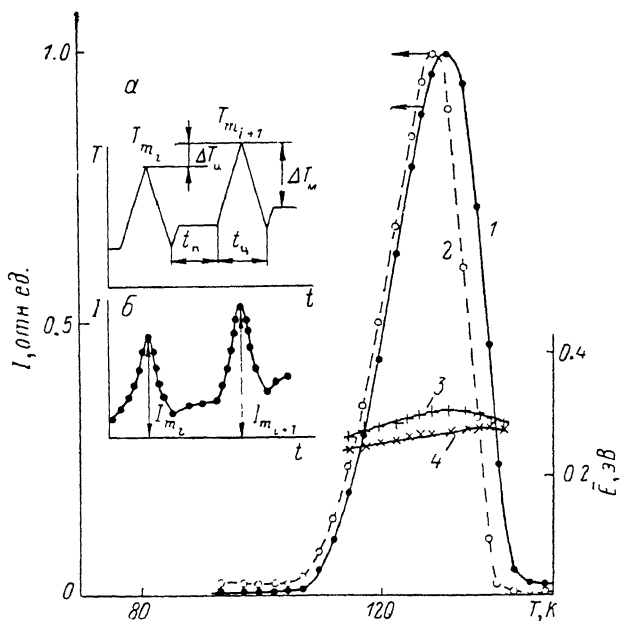


Рис. 1. Измерения ТСЭЭ и ТСЛ в режиме фракционного нагрева.

1, 2 — ТСЭЭ (1) и ТСЛ (2) кристалла LiF в интервале температур разрушения  $V_K$ -центров (каждая точка представляет собой максимальное значение интенсивности процесса в цикле нагрев—охлаждение); 3, 4 — температурные зависимости средних значений энергии активации ТСЭЭ (3) и ТСЛ (4). На вставке: а — схема линейного осциллирующего нагрева; б — зависимость интенсивности ТСЭЭ и ТСЛ от времени в цикле нагрев—охлаждение ( $T_{m_i}$  — максимальное значение интенсивности в цикле нагрева до максимальной температуры  $T_{m_i}$ ).

Вместе с тем известно, что за ТСЛ щелочно-галогидных кристаллов (ЩГК) в области низких температур ответственны процессы диффузионно-контролируемой туннельной рекомбинации  $V_K$ -центров с электронными центрами окраски [2]. Инерционность термоактивированной диффузии  $V_K$ -центров должна проявляться и в кинетике ТСЭЭ, что следует учитывать при измерениях ее параметров.

В нашей работе поставлена цель экспериментально обосновать на примере кристалла LiF проявление диффузионно-контролируемого механизма экзоэлектронной эмиссии в ЩГК.

Исследовались оптически чистые монокристаллы LiF в виде пластинок  $8 \times 6 \times 0.7$  мм, выращенные методом Стокбаргера. Синхронные измерения ТСЭЭ и ТСЛ в режиме ФН проводились на высоковакуумной установке при давлении  $\sim 10^{-6}$  Па [3]. Для выявления нестационарных стадий в кинетике ТСЭЭ и ТСЛ медленный равномерный подъем температуры образца ( $0.012\text{--}0.02$  К $\cdot$ с $^{-1}$ ) модулировался быстрыми линейными осцилляциями температуры, в течение которых измерялись зависимости интенсивности экзоэмиссии, люминесценции и температуры от времени (рис. 1, вставка).

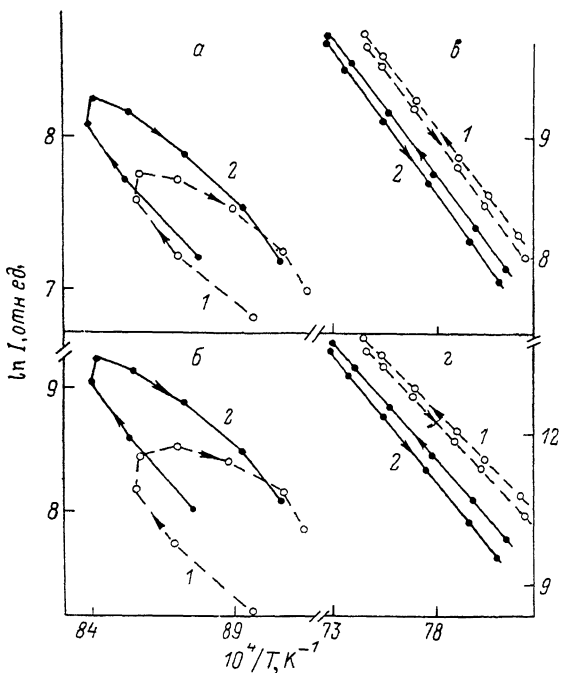


Рис. 2. Температурные зависимости интенсивностей экзоэлектронной эмиссии (а, в) и люминесценции (б, з) кристалла LiF на восходящем участке (а, б) и в районе максимума (в, з) кривых ТСЭЭ и ТСЛ в интервале температур разрушения  $V_K$ -центров. Стрелками указана последовательность отсчетов времени в циклах нагрев—охлаждение, цифрами — последовательность циклов.

Глубина модуляции температуры  $\Delta T_m$  составляла 6—8 К, приращение температуры образца за один цикл  $\Delta T_n$  — от 1.2 до 2 К. Продолжительность осцилляции  $t_n$  была равна 40 с, а длительность паузы между осцилляциями  $t_p \sim 60$  с. Управление режимом нагрева, сбор и обработку экспериментальных данных осуществляли с помощью микро-ЭВМ. Алгоритм обработки данных и расчета кинетических параметров ТСЭЭ и ТСЛ в основном совпадал с изложенным в [4].

Результаты исследований кристалла LiF, возбужденного рентгеновским излучением (трубка БСВ2-Со, 35 кВ, 10 мА), представлены на рис. 1, 2. Интервал температур, в котором регистрируются ТСЭЭ (рис. 1, 1) и ТСЛ (рис. 1, 2), соответствует температурам  $V_K$ -центров [5].

Известно, что отжиг  $V_K$ -центров в неактивированных ЩГК связан с диффузией автолокализованных дырок (АЛД) по регулярным узлам решетки к электронным центрам захвата  $F$ ,  $F'$ ,  $M$ -типа с последующей излучательной или безызлучательной рекомбинацией. Поэтому если ТСЭЭ и ТСЛ в кристаллах LiF обусловлены прыжковой диффузией АЛД, то диффузионный характер движения  $V_K$ -центров должен проявляться в кинетике обоих процессов.

Для выявления отличительных признаков диффузионной кинетики температурные зависимости интенсивностей экзоэмиссии и люминесценции в циклах нагрев—охлаждение контролировались на протяжении всего интервала температур разрушения  $V_K$ -центров. Как следует из рис. 2, а, б, на восходящих участках кривых ТСЭЭ и ТСЛ в кинетике обоих процессов обнаруживается инерционность. При быстром нагреве и охлаждении образца изменения интенсивности экзоэмиссии и люминесценции отстают от изменений температуры, что проявляется в сдвиге во времени максимумов интенсивности регистрируемых процессов относительно максимумов температуры в циклах ФН. В координатах  $\ln I - 1/T$  указанным особенностям кинетики соответствуют своеобразные петли (рис. 2, а, б), характерные для диффузионно-контролируемой туннельной рекомбинации [6].

С ростом температуры инерционность ТСЭЭ и ТСЛ уменьшается и в высокотемпературной части  $V_K$ -пика интенсивности экзоэмиссии и люминесценции безынерционно следуют за изменениями температуры. При этом температурные зависимости интенсивностей ТСЭЭ и ТСЛ в координатах  $\ln I - 1/T$  образуют полупрямые (рис. 2, в, г), наклон которых характеризует энергию активации исследуемых релаксационных процессов (рис. 1, 3, 4).

Совпадение в деталях кинетики ТСЭЭ и ТСЛ на всех стадиях разрушения  $V_K$ -центров свидетельствует о том, что экзоэмиссия кристалла LiF в исследованном интервале температур, так же как и люминесценция, обусловлена диффузионным процессом — термически активированной прыжковой диффузией  $V_K$ -центров. Поскольку диффундирующая АЛД большую часть времени находится на узле решетки, безызлучательная рекомбинация  $V_K$ -центров, сопровождаемая Оже-процессом делокализации электронов, носит туннельный характер и лимитируется скоростью диффузионного сближения  $V_K$ -центров с электронными центрами окраски.

Инерционность ТСЭЭ и ТСЛ в начальной стадии разрушения  $V_K$ -центров вызвана малыми значениями коэффициента диффузии АЛД и соответственно большим временем установления квазистационарного распределения  $V_K$ -центров и электронных ловушек по взаимным расстояниям, что определяет при данной температуре эффективный радиус туннельной рекомбинации [7]. При повышении температуры коэффициент диффузии АЛД увеличивается, а время установления нового квазистационарного распределения центров уменьшается. В конечной стадии разрушения  $V_K$ -центров изменение распределения туннелирующих частиц по расстояниям, а следовательно, и интенсивности ТСЭЭ и ТСЛ безынерционно следует за изменениями температуры.

Таким образом, полученные экспериментальные данные указывают на возможность возникновения экзоэлектронной эмиссии в ЦГК при низких температурах по механизму диффузионно-контролируемой туннельной рекомбинации. В этом случае из измерений кинетики ТСЭЭ можно оценить квазистационарный радиус туннельной рекомбинации  $V_K$ -центра с электронным центром захвата. Для LiF при температуре 130 К он составляет  $\sim 4$  нм.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Tale I. A., Kortov V. S., Popov V. V. // Phys. St. Sol. (a). 1982. V. 90. P. 395—401.
- [2] Тале И. А., Гайлитис Л. А. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1971. Т. 35. С. 1336—1339.
- [3] Кирпа В. И., Кузьминых А. О., Попов В. В. // Радиационно-стимулированные явления в твердых телах. Свердловск, 1983. С. 33—38.
- [4] Тале И. А. // Изв. АН СССР, сер. физ. 1981. Т. 45. № 2. С. 245—252.
- [5] Пунг Л. А. // Электронные возбуждения и дефекты ионных кристаллов. Тарту, 1979. С. 7—33.
- [6] Була В. Г., Тале И. А. // Электронные и ионные процессы в ионных кристаллах. Рига, 1974. С. 52—65.
- [7] Котомин Е. А. // Там же. С. 93—107.