

УДК 621.315.592

**УНИВЕРСАЛЬНАЯ ДИАГРАММА
ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЦЕНТРОВ ПРИЛИПАНИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА
И СООТВЕТСТВУЮЩИХ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ СПЕКТРОВ
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ**

М. А. Ризаханов

На основе данных теоретических и экспериментальных исследований электронных термостимулированных явлений ТСЯ обосновано существование общей для всего многообразия центров прилипания носителей заряда в твердотельных диэлектриках и полупроводниках диаграммы характеристических параметров этих центров (энергии ионизации E_i , сечения захвата основных носителей заряда s_i , фактора захвата R , равного отношению скорости прилипания к скорости рекомбинации) и соответствующих электронных ТСЯ (температура максимума T_m , скорость нагрева кристалла β). Диаграмма в безразмерных полулогарифмических координатах $[\lg(s_i/s_0(R+1)), (E_i/kT_m)]$ — прямая с наклоном к оси E_i/kT_m и координатами начальной точки, расположенными вблизи чисел 0.5, [5.0]. Параметр $s_0 = \beta(vN_{эфф}T_m)^{-1}$, $N_{эфф}$ — эффективная плотность состояний в зоне основных носителей заряда, v — скорость последних.

Систематика как электронных, так и атомных термостимулированных явлений (ТСЯ) в зависимости от методики эксперимента приводит к двум группам явлений. Одну группу образуют ТСЯ последовательного возбуждения кристалла: на первом этапе — фактором (свет, электрическое поле и др.), обеспечивающим пространственное перераспределение частиц в электронной или дефектной подсистемах решетки, а на втором — теплом для активации процессов релаксации кристалла обратно в равновесное состояние. В другую группу входят явления одновременного возбуждения кристалла электрическим полем и теплом (нестационарная емкость), упругим полем и теплом (внутреннее трение) и др.

Рассмотрим электронные ТСЯ последовательного возбуждения (термостимулированный ток, люминесценция и др.). Согласно теории [1, 2], интенсивность такого рода ТСЯ в процессе раздельного термоопустошения какого-нибудь одного (i -го) центра прилипания (ЦП)

$$I = J_0 \exp \left[-\frac{E_i}{kT} - \int \frac{vN_{эфф}s_i}{\beta(R+1)} \exp \left(-\frac{E_i}{kT} \right) dT \right]. \quad (1)$$

Выражение (1) справедливо при условии, что скорость нагрева кристалла $\beta = \text{const}$, концентрация носителей заряда на i -м ЦП $n_i \gg n$, $n_i \ll N_i$ [2]. Здесь и в выражении (1) n , $N_{эфф}$ — концентрация носителей заряда и эффективная плотность состояний в энергетической зоне кристалла, из которой происходит захват частиц; E_i , s_i , N_i — энергия ионизации, сечение захвата, полная концентрация i -го ЦП; R — фактор захвата, равный отношению скорости прилипания к скорости рекомбинации; v — тепловая скорость основных носителей заряда.

Переход от спектра ТСЯ (1) к точке его максимума, где $T = T_m$, $dI/dT = 0$, обнаруживает равенство

$$\frac{\nu N_{\text{эфф}} s_i T_m}{\beta (R+1)} = \frac{E_i}{kT_m} \exp\left(\frac{E_i}{kT_m}\right), \quad (2)$$

демонстрирующее зависимость температурного положения полос (1) от параметров E_i , s_i , R , β , а также эффективной массы основных носителей заряда m^*/m через величины ν , $N_{\text{эфф}}$.

Применительно к варианту мономолекулярной рекомбинации ($R=0$) на основе равенства (2) в настоящее время предложен ряд методов оценки параметров ЦП [2, 3]. Вместе с тем до сих пор не было обращено внимания еще на одно его следствие, которое может быть причислено к замечательным, поскольку при условии, что отношение $E_i/kT_m \geq 20$ или, что то же самое, $(E_i/kT_m) \lg e \gg \lg(E_i/kT_m)$ приводит независимо от характера термоопущения ЦП к выводу об общей диаграмме этих центров в полупроводниках и диэлектриках, очевидно, справедливой, пока справедливо равенство (1).

Действительно, при названном условии $(E_i/kT_m) \lg e \gg \lg(E_i/kT_m)$ равенство (2) приобретает вид

$$\lg \frac{s_i}{s_0 (R+1)} = \frac{E_i}{kT_m} \lg e, \quad (3)$$

что в безразмерных полулогарифмических координатах $[\lg(s_i/s_0 (R+1)), (E_i/kT_m)]$ представляет собой весьма полезную для контроля результатов исследования ЦП на основе электронных ТСЯ последовательного возбуждения диаграмму — прямую характеристических параметров этих явлений (T_m , β) и соответствующих ЦП (E_i , s_i , R).¹

Существенно, что варибельность величины $s_0 = \beta/\nu N_{\text{эфф}} T_m$, зависящей от природы кристалла через массу m^*/m , мала по сравнению с отношением $s_i/(R+1)$. Поэтому $[\lg(s_i/s_0 (R+1)), (E_i/kT_m)]$ -диаграмма универсальна для всего многообразия ЦП в полупроводниках и диэлектриках.

Диаграмма — прямая на рисунке — отвечает параметрам различных (в том числе и гипотетических) ЦП и семейства соответствующих термостимулированных полос (1), рассчитанных на ЭВМ в зависимости от величины фактора R . Такого рода полосы для ЦП электронов $E_i = 0.32$ эВ, $s_i = 2 \cdot 10^{-19}$ см² в CdSe представлены на рисунке (кривые $a-e$). Как и следует ожидать, наблюдаемая диаграмма по своим параметрам (наклон к оси E_i/kT_m , координаты начальной точки) весьма близка к теоретической диаграмме (3).

Экспериментальному исследованию электронных ТСЯ последовательного возбуждения в полупроводниках и диэлектриках (в том числе и органических) посвящено великое множество работ (см., например, [3]). Основная часть точек разнообразной геометрии на рисунке отвечает исследованиям [4-15], в которых в отличие от всех других известных нам работ достигнуто достаточно строгое измерение всех параметров $[\lg(s_i/s_0 (R+1)), (E_i/kT_m)]$ -диаграммы. Одновременно для усиления вывода об универсальности последней здесь представлены сведения о ЦП в полиэтилене [16], хлорофиле [17], а также в таком экзотическом материале, как китайская керамика VII—IX вв. [18]. Доизмерение всей недостающей информации о ЦП в этих материалах выполнено нами путем анализа соответствующих спектров термостимулированного тока и люминесценции [16-18]. В частности, сечения измерялись как [19]

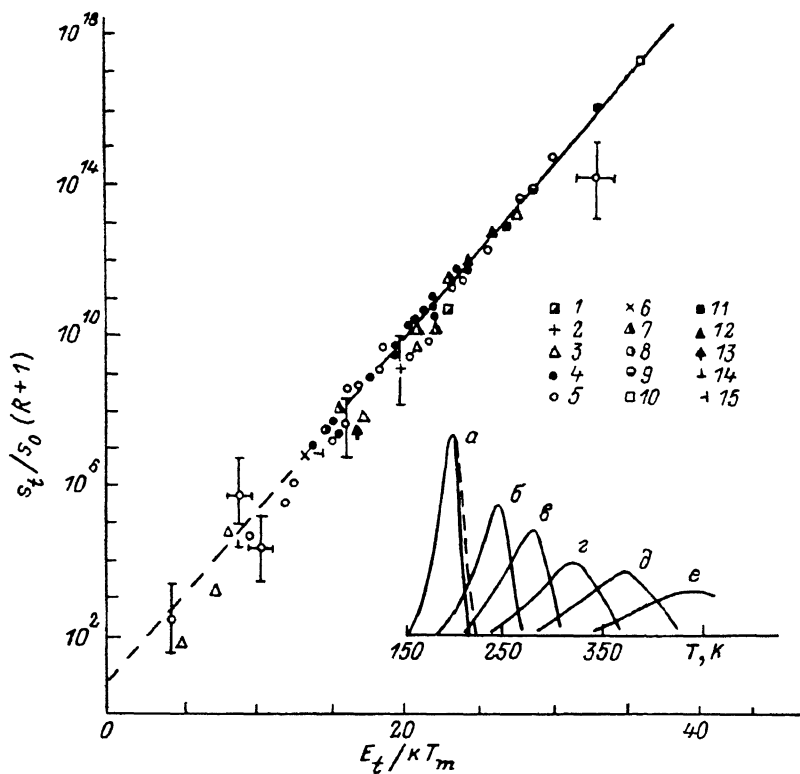
$$s_i = \beta I_{0i} / \nu N_{\text{эфф}} Q_i,$$

где I_{0i} — экстраполированное в соответствии с прямой $\lg I = f(T^{-1})$ на участке начального разгорания полосы (1) значение величины I при $T^{-1} = 0$, $Q_i = \int_0^{\infty} I(T) dT$ — площадь той же полосы. Фактор R оценивался пу-

¹ Если же воспользоваться частотным фактором $\nu_i = \nu N_{\text{эфф}} s_i$, то координаты диаграммы приобретают вид $[\lg(\nu_i T_m / \beta (R+1)), (E_i/kT_m)]$.

тем наложения экспериментальной полосы рассматриваемого ЦП и полос (1), рассчитанных подобно кривым $a-e$ (см. рисунок) на ЭВМ в зависимости от величины этого фактора. Такая процедура, например, для названного выше центра $E_f=0.32$ эВ в CdSe обнаруживает его принадлежность к медленным ловушкам ($R \ll 1$), ибо соответствующий экспериментальный спектр термостимулированного тока (см. рисунок, штриховая линия) укладывается на ту из рассчитанных полос (1), которая отвечает фактору $R=0$ (кривая a).

Как видно из рисунка, несмотря на разницу в природе ТСЯ последовательного возбуждения (ток, люминесценция и др.), несмотря на разницу



$[\lg (s_f/s_0 (R+1)), (E_f/kT_m)]$ -диаграмма (прямая линия).

Полосы $a-e$ — термостимулированные спектры (1), рассчитанные на ЭВМ для ЦП электронов $E_f = 0.32$ эВ, $s_f = 2 \cdot 10^{-19}$ см² в CdSe в зависимости от величины фактора R : $a - 0$, $б - 10^2$, $в - 10^8$, $г - 10^4$, $д - 10^8$, $e - 10^8$. Штриховая кривая — полоса термостимулированного тока, связанного с тем же центром $E_f = 0.32$ эВ. Точки разнообразной геометрии отвечают экспериментальным параметрам ЦП электронов, дырок и соответствующих термостимулированных спектров в полупроводниках, диэлектриках: 1 — n -Si [8]; 2 — n -GaAs [7]; 3 — n , p -CdTe [8, 9]; 4 — CdSe [4, 10, 12]; 5 — CdS [11-13]; 6 — ZnS [14]; 7 — SbSi [15]; 8 — SrS; 9 — ThO₂; 10 — KBr; 11 — NaCl; 12 — KCl [8]; 13 — полиэтилен [16]; 14 — хлорофил [17]; 15 — китайская керамика VII-IX вв. [18].

в типе проводимости, химии полупроводников и диэлектриков, а также на весьма широкий интервал отношений $s_f/s_0 (R+1)$, E_f/kT_m (первое из них, прежде всего за счет сечений взятых ЦП $s_f = 10^{-25} \div 10^{-12}$ см², претерпевает изменение более чем на 15 порядков), наблюдается впечатляющая картина соответствия экспериментальных параметров E_f , s_f , R , T_m , β ожидаемой $[\lg (s_f/s_0 (R+1)), (E_f/kT_m)]$ -диаграмме.

Разброс большинства точек объясняется типичными для термостимулированных методов ошибками измерения энергии E_f на ± 0.02 эВ и параметра $\lg s_f$ на ± 0.5 . Несколько же точек в CdS [12] и GaAs [8], измеренных с меньшей точностью, выделены показом интервалов ошибок. Видно, они обнаруживают больший разброс.

Отмечалось, что линейность $[\lg (s_f/s_0 (R+1)), (E_f/kT_m)]$ -диаграммы справедлива лишь для значений $E_f/kT_m \geq 20$. Однако экспериментальные точки соответствуют и экстраполированной в область меньших значений отношения E_f/kT_m части диаграммы (см. рисунок). Это следствие того, что

ошибки по игнорированию величины $\lg(E_i/kT_m)$ по сравнению с отношением $(E_i/kT_m) \lg e$ одинаково вошли как в экстраполированные, так и опытные данные.

В первом приближении наклон диаграммы (3) к оси E_i/kT_m равен $\lg e$, а координаты начальной точки — $[1, 0]$. Наблюдаемая же $[\lg(s_i/s_0(R+1)), (E_i/kT_m)]$ -диаграмма (см. рисунок) смещена в область меньших значений отношения E_i/kT_m на малую величину $\lg(E_i/kT_m)$, отвечающую (см. выше) точности формулы (3). В результате параметры диаграммы электронных ТСЯ последовательного возбуждения приобретают значения, близкие к числам 0.45, $[5, 0]$.

В заключение добавим, что доказательства существования диаграммы, аналогичной описанной, и в случае названных выше ТСЯ одновременного возбуждения, но, правда, с параметрами, в точности соответствующими теоретически ожидаемым, а именно числам $\lg e$, $[1, 0]$, будут опубликованы.

Список литературы

- [1] Кульсрешта А. П., Горюнов В. А. // ФТТ. 1966. Т. 8. № 6. С. 1944—1946.
- [2] Milnes A. G. Deep impurities in semiconductors. N. Y.—London—Sydney—Toronto, 1973 (см. пер.: Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир, 1977).
- [3] Вертопрахов В. Н., Сальман Е. Г. Термостимулированные токи в неорганических веществах. Новосибирск: Наука, 1979. С. 325.
- [4] Ризаханов М. А. // Автореф. докт. дис. Вильнюс, 1982. С. 34.
- [5] Антонов-Романовский В. В. Кинетика фотолуминесценции кристаллофосфоров. М.: Наука, 1966, С. 32.
- [6] Smith P. C., Milnes A. G. // Int. J. Electron. 1972. V. 32. P. 697—704 (по данным обзора [2]).
- [7] Sacks H. K., Thesis Ph. D. Department of Electrical Engineering. Carnegie—Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1970 (по данным обзора [2]).
- [8] Mancini A. M., Manfredotti C., de Blasi C., Micocci G., Terore A. // Rev. de Phys. Appl. 1977. V. 12. N 2. P. 255—261.
- [9] Legros R., Marfaing Y., Triboulet R. // J. Phys. Chem. Sol. 1978. V. 39. N 2. P. 179—184.
- [10] Opanowicz A., Majchrzak T., Szurgot M. // Zeszyty naukowe politechniki Lodzkiej, Fizyka. 1973. V. 2. N. 181. P. 23—34.
- [11] Nicholas K. H., Woods J. // Brit. J. Appl. Phys. 1964. V. 15. N 7. P. 783—795.
- [12] Габбиров Ф. С., Ризаханов М. А. // Сб. «Неравновесные носители тока в полупроводниках». Махачкала, 1982. С. 63—70.
- [13] Ризаханов М. А., Эмиров Ю. Н., Абилова Н. А. // ФТП. 1980. Т. 14. № 9. С. 1665—1672.
- [14] Ризаханов М. А., Хамидов М. М. // ФТП. 1979. Т. 13. № 8. С. 1518—1522.
- [15] Кикинешви А. А., Семак Д. Г. // ФТП. 1972. Т. 6. № 3. С. 526—528.
- [16] Ito D., Nakakita T. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 6. P. 3273—3277.
- [17] Шкуропатов А. Я., Курбаков К. Б., Столовицкий Ю. М., Евстигнеев В. Б. // Биофизика. 1978. Т. 23. № 1. С. 16—19.
- [18] Fleming S. J. // Archaeometry. 1973. V. 15. N 1. P. 31—52. (по данным кн. Ваганова П. А. «Физики дописывают историю». Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. С. 214).
- [19] Ризаханов М. А. // Изв. вузов, физика. 1971. № 1. С. 153—154.

Дагестанский государственный
медицинский институт
Махачкала

Поступило в Редакцию
24 апреля 1989 г.
В окончательной редакции
13 июня 1989 г.