

энергии ловушек. В качестве модельного приближения в [2] полагается, что уровни энергии ловушек совпадают с серединой запрещенной зоны, а величины таких параметров, как времена жизни носителей выбираются исходя из наилучшего согласия рассчитанных значений плотности тока с экспериментальными данными. В наших расчетах мы не ставили задачи детального исследования этой проблемы и ограничились определенным диапазоном значений этих параметров в соответствии с [2]. При этом во всех случаях степень влияния генерации носителей заряда через ловушки на величину плотности тока оказалась существенно меньшей, чем генерации путем межзонного туннелирования.

Таким образом, результаты численного моделирования на основе многочастичного метода Монте-Карло позволяют сделать вывод о том, что в рассматриваемых условиях важнейшим механизмом, влияющим на ток диода при обратном смещении на электродах, является межзонное туннелирование. При этом расчеты показали, что лавинное умножение происходит в основном вследствие ударной ионизации носителями, сгенерированными в области пространственного заряда в результате межзонного туннелирования.

УДК 621.382

## КОРРЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ РАСТЕКАНИЯ ТЕПЛА В МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

Методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС) с использованием непрерывных и дискретных спектров теплового сопротивления во временной области [1] проведен анализ электротепловой модели мощных полупроводниковых приборов. Исследовались тепловые параметры микросхем линейных стабилизаторов напряжения 5318EP-015, в металлокерамическом корпусе H02.8-1B.

Известно, что переходная зависимость кумулятивного теплового сопротивления  $R^*$  с несколькими временами релаксации  $\tau_i$ , (при распространении тепла по элементам структуры прибора с тепловыми сопротивлениями  $r_i$ ) при нагревании образца имеет вид:

$$R^*(t) = \sum_i^n r_i (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_i})). \quad (1)$$

На рисунке 1 представлена временная зависимость кумулятивного теплового сопротивления  $R^*$  микросхемы линейного стабилизатора напряжения 5318EP-015.

Структуру теплового сопротивления определим из дифференциального спектра первого порядка во временной области [2]:

## Литература

1. Hurkx G.A.M. A new analytical diode model including tunneling and avalanche breakdown / G.A.M. Hurkx [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 1992. – Vol. 39, no. 9. – P. 2090–2098.
2. Hurkx G.A.M. A new recombination model for device simulation including tunneling / G.A.M. Hurkx, D.B.M. Klaassen, M.P.G. Knuvers // IEEE Trans. Electron Devices. – 1992. – Vol. 39, no. 2. – P. 331–338.
3. Jiao Y. Comparison of band-to-band tunneling models in Si and Si-Ge junctions / Y. Jiao [et al.] // Journal of Semiconductors. – 2013. – Vol. 34, no. 9. – P. 092002-1–092002-5.
4. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц: пер. с англ / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
5. Борздов В.М. Оценка эффективной пороговой энергии межзонной ударной ионизации в глубокосубмикронном кремниевом n-канальном МОП-транзисторе / В.М. Борздов [и др.] // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 188–192.
6. Kamakura, Y. Impact ionization model for full band Monte Carlo simulation / Y. Kamakura [et al.] // J. Appl. Phys. – 1994. – Vol. 75, no. 7. – P. 3500–3506.
7. Kunikiyo T. A model of impact ionization due to the primary hole in silicon for a full band Monte Carlo simulation / T. Kunikiyo [et al.] // J. Appl. Phys. – 1996. – Vol. 79, no. 10. – P. 7718–7725.

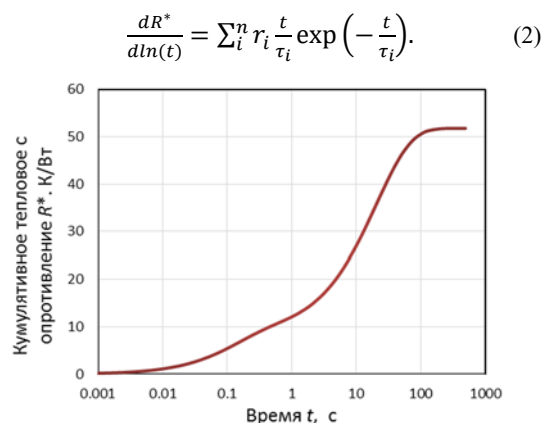
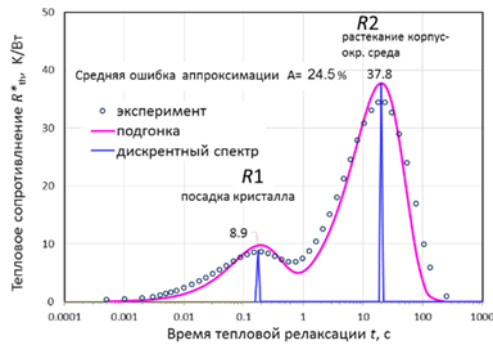


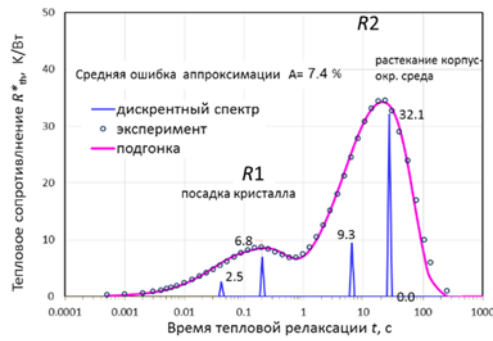
Рисунок 1 – Зависимость кумулятивного теплового сопротивления  $R^*$  от времени разогрева образца

Как видно из рисунка 2 непрерывный спектр микросхемы 5318EP-015 имеет две характерные области (два пика), обозначенные  $R1$  и  $R2$ , которые можно идентифицировать как тепловое сопротивление посадки кристалла и переходной границы корпус-окружающая среда [3]. Аппроксимация с двумя временами релаксации  $\tau_i$  для

данных образцов имеет недостаточное приближение к экспериментальным данным ( $\bar{A} = 24,5\%$ , рисунок 2, а). На рисунке 2, б представлена аппроксимация с 4-мя временами релаксации  $\tau_i$ , дающая более точное приближение ( $\bar{A} = 7,4\%$ ).



а



б

Рисунок 2 – Непрерывный и дискретный спектр  $R^*$  с экспоненциальной аппроксимацией  $\sum r_i k \cdot \exp(-t^k/\tau_i)$ : а –  $k = 1$ ,  $n = 2$ , б –  $k = 1$ ,  $n = 4$

Вместе с тем указанное выше описание переходных тепловых процессов экспоненциальным приближением в виде уравнения (1) имеет ограничения. Так на начальном участке нагрева в приповерхностном слое полупроводниковой структуры наблюдается корневая зависимость от времени температуры перегрева активной области прибора и соответственно теплового сопротивление прямо пропорционально  $t^{0,5}$ ) [4].

Второе ограничение приближения (1) связано с послойным тепловым растеканием. Анализ экспериментальных данных электротепловых измерений образцов разного типа мощных полупроводниковых транзисторов показывает, что лучшее приближение в таком случае достигается за счет экспоненциальной аппроксимацией функцией вида  $\exp(-t^k/\tau_i)$  с степенным показателем  $k$  в первом приближении равном 0,8.

$$R^*(t) = \sum_i^n r_i \left(1 - \exp\left(-\frac{t^k}{\tau_i}\right)\right). \quad (3)$$

Для поиска оптимального значения  $k$  определим функцию  $\Phi$  в виде двойного логарифма от  $R^*$ .

$$\Phi(t) = \sum_i^n \lg\left(-\ln\left(1 - \frac{R^* - r_{i-1}}{r_i}\right)\right) = \sum_i^n \lg(\tau_i) + kt \quad (4)$$

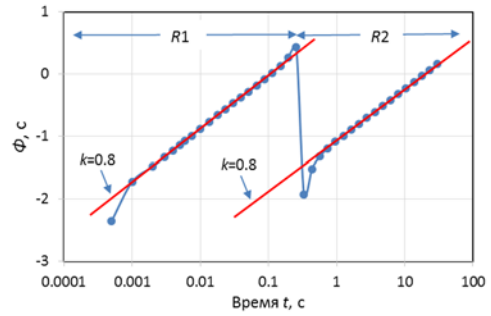


Рисунок 3 – Подгонка функции  $\Phi$  методом линейной регрессии с наклоном  $k = 0,8$

На участках  $R1$  и  $R2$  функция  $\Phi$  близка к линейной с угловым коэффициентом  $k = 0,8$ .

Временное распределение коэффициента  $k$  представлено на рисунке 4.

$$k(t) = \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5)$$

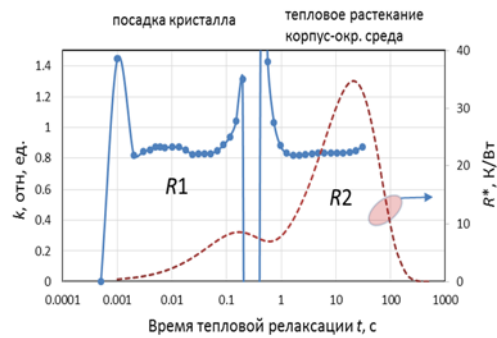


Рисунок 4 – Иллюстрация временного распределения углового коэффициента  $k$

На основе выражения (3) и определенного значения  $k$  (рисунок 3,4) проведена аппроксимация данных для спектра образцов 5318EP-015, функциями вида  $\exp(-t^k/\tau_i)$  со степенным показателем  $k = 0,8$  и двумя временами релаксации  $\tau_i$ , которая показала более высокую точность приближения ( $\bar{A} = 3\%$ ) (рисунок 5), чем в первом случае (рисунок 2).

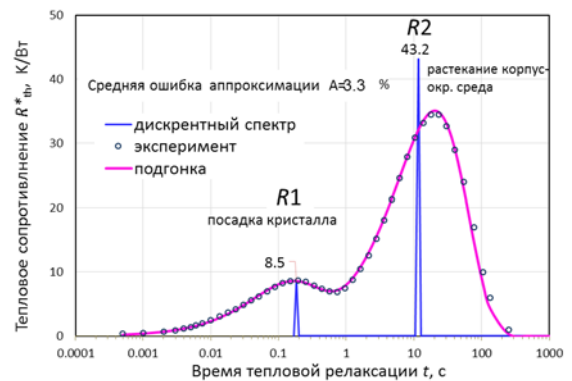


Рисунок 5 – Непрерывный и дискретный спектр  $R^*$  с экспоненциальной аппроксимацией  $\sum r_i k \cdot \exp(-t^k/\tau_i)$ :  $k = 0,8$ ,  $n = 2$

### Литература

1. Нисс В.С. Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии / В.С. Нисс, О.С. Васьков, А.С. Турцевич, А.Ф. Керенцев, В.К. Кононенко // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256.

2. Васьков О.С. Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов / О.С. Васьков, В.С. Нисс, В.К. Кононенко, А.С. Турцевич, И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, А.Ф. Керенцев // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2014. – № 1. – С. 47–52.

3. Бумай Ю.А. Анализ тепловых параметров линейных стабилизаторов напряжения / Ю.А. Бумай, О.С. Васьков, В.С. Нисс, В.В. Грибович, А.А. Цивако // Приборостроение–2019: материалы 12 Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–15 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: О.К. Гусев (предс.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 264–266.

4. Zakgeim A.L. Comparative Analysis of the Thermal Resistance Profiles of Power Light-Emitting Diodes Cree and Rebel Types / A.L. Zakgeim, A.E. Chernyakov, A.S. Vaskou, V.K. Kononenko, V.S. Niss // EuroSimE 2013: 14th Intern. Conf. on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems. – 2013. – № 01. – P. 1/7–7/7.

УДК 667.7 + 681.7

### ФЛУОРИСЦЕНТНЫЕ ПИГМЕНТЫ ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ КРАСОК НА ОСНОВЕ ОКСИСУЛЬФИДОВ РЗЭ

Гайдук Ю.С.<sup>1</sup>, Голодок Р.П.<sup>2</sup>, Моховиков М.А.<sup>1</sup>, Савицкий А.А.<sup>1</sup>, Паньков В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт порошковой металлургии НАН Беларуси  
имени академика О.В. Романа  
Минск, Республика Беларусь

Люминофоры на основе соединений редкоземельных элементов отличаются высоким квантовым выходом люминесценции, термической и химической стабильностью и находят применение в различных областях науки и техники. Разработка новых составов и создание экономически целесообразных технологий производства, повышение эксплуатационных характеристик известных люминофоров является актуальной научно-практической задачей. По сравнению с люминофорами на основе оксидов редкоземельных элементов [1], материалы на основе оксисульфидов редкоземельных элементов отличаются более высокой интенсивностью свечения, особенно при возбуждении длинноволновым УФ-излучением (360 нм), и более сложными способами производства. В настоящей работе представлены результаты исследования порошков люминофоров, полученных восстановлением смесей сульфатов редкоземельных элементов (сульфата иттрия и активирующих добавок).

**Методика эксперимента.** Рентгенографические исследования проводились при помощи дифрактометра ДРОН-3 (Со<sub>Kα</sub>-излучение).

Метод СЭМ применяли для изучения структуры поверхности поликристаллических и плёночных образцов. Образцы изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 1420.

Спектры флуоресценции при длине волны возбуждения 270 и 360 нм получены для образцов различного состава (концентрации активирующих добавок) на спектрофлуориметре «Carry Eclils» (производство Varian, Австралия).

Метод ПЭМ применяли для изучения размеров и морфологии структуры композиций на микроскопе Hitachi H-800 с ускоряющим напряжением 200 кэВ. Суспензию пигмента наносили на поливинилформальевые опорные сетки.

**Результаты и обсуждение.** Интенсивность свечения неорганических люминофоров определяется не только химическим составом, но и особенностями морфологии, дисперсностью и гранулометрическим составом порошка пигмента. Традиционным способом получения оксисульфидов, обеспечивающих достаточно высокий уровень свечения в тонких пленках (краскооттиках) является ампульный метод, являющийся экономически нецелесообразным при получении больших количеств порошков. Другие известные методы вследствие наличия загрязнений не обеспечивают достаточного для пигментных целей качества продукта, или требуют проведения сложных дополнительных операций.

Путем сочетания состава (оптимального количества активатора), условий синтеза (восстановитель, температура и время) смеси сульфатов и последующей механической обработки продукта достигнуты удовлетворительные показатели с целью использования порошков оксисульфидов иттрия в качестве пигментов печатных красок.

Размеры кристаллитов для порошковых образцов, синтезированных 600 °С, составляли 20 нм. В процессе восстановления смеси сульфатов РЗЭ формировалась кубическая структура твердого раствора на основе оксисульфида иттрия Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S (карточка № 43-1036) (рисунок 1).