

## Рекомбинационные стоки в гетерофазных пленках CdS-PbS

А. Г. Роках, М. И. Шишкин

*Спектр фотопроводимости сублимированных пленок квазимонополярных полупроводников CdS-PbS, в частности CdS(0,9)-PbS(0,1), не обнаруживает отрицательных участков (гашения) фотопроводимости, характерных для монокристаллов и пленок сульфида кадмия. Такое отсутствие связано с наличием дополнительного канала рекомбинации, обусловленного стоком фотоносителей в узкозонную фазу, содержащую PbS, поскольку длина монополярной диффузии превышает расстояние между «стоками» (вкраплениями) узкозонной фазы, а также толщину пленки, поскольку стоки расположены в основном на её поверхности.*

**Ключевые слова:** пленка CdS-PbS, квазимонополярный полупроводник, длина Дебая, гашение фотопроводимости, остаточная проводимость, узкозонная фаза, рекомбинационный сток, радиационная стойкость, время жизни электрона, время пролета электрона.

### Введение

Освещение и инжекция носителей заряда способствует деградационным явлениям в полупроводниках, которые связаны с комплексными фотостимулированными процессами (фотоутомляемостью), в том числе перестройкой дефектов – центров рекомбинации. Эти процессы могут оказывать негативное влияние на работу полупроводниковых устройств и для их устранения, например, в кремниевых микросхемах, применяется технология геттерирования дефектов [1]. Причиной возникновения фотоутомляемости в полупроводниках типа A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> также уделялось внимание [2], в том числе и одним из авторов данной статьи [3, 10]. Одним из проявлений фотоутомляемости в полупроводниках A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>, в частности, в CdS, может быть гашение фотопроводимости в процессе исследования. Спектр фотопроводимости сублимированных пленок ограниченных твердых растворов CdS(0,9)-PbS(0,1) (рис. 1 и 2) не обнаруживает отрицательных участков (гашения) фотопроводимости, как это имеет место для монокристаллов и пленок сульфида кадмия (рис. 2). Интерпретация этого факта без подробных исследований уже была использована для объяснения радиационной стойкости пленок CdS-PbS [3], а также при обсуждении механизма аномального вторично-ионного фотоэффекта [4–6].

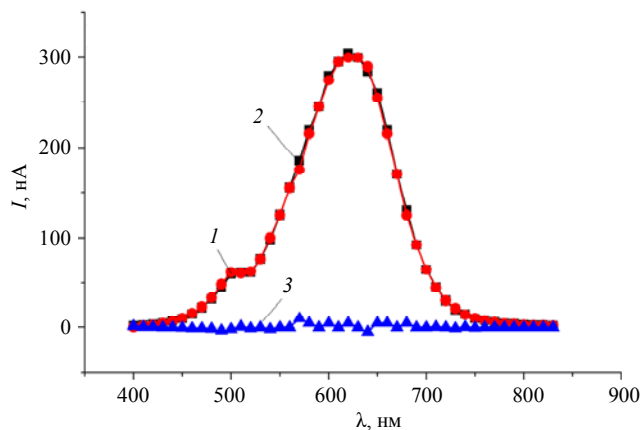


Рис. 1. Спектр фотопроводимости отожженного образца CdS(0,9)-PbS(0,1). Кривая 1 – направление увеличения длины волны; 2 – направление уменьшения длины волны; 3 – относительное изменение. Вертикальная ось графика – фототок, горизонтальная – длина волны.

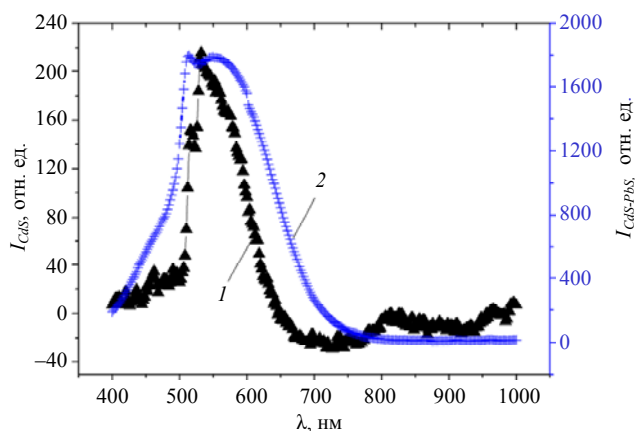


Рис. 2. Сравнительная характеристика чистого монокристалла CdS и отожженного образца CdS(0,9)-PbS(0,1). Кривая 1 – монокристалл CdS; 2 – поликристалл CdS-PbS. Вертикальная ось графика – фототок CdS (слева), фототок CdS(0,9)-PbS(0,1) (справа), горизонтальная – длина волны.

Роках Александр Григорьевич, профессор, д.ф.-м.н.

Шишкин Михаил Игоревич, аспирант.

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского.

Россия, 410012, Саратов, Астраханская, 83.

Тел. 8 (8452) 52-27-05. E-mail: rokakhag@mail.ru

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2016 г.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы является исследование особенностей рекомбинации в гетерофазных пленках CdS-PbS, для чего требовалось решить задачу по определению пространственно-энергетических особенностей рекомбинации в этих пленках.

### Исследуемые образцы и методика исследований

На рис. 3 показано сопоставление изображения отожженной пленки CdS-PbS во вторичных электронах и той же поверхности в режиме катодоллюминесценции (детектируемом в диапазоне

350–650 нм). Изображения получены на электронном микроскопе MIRA II LMU Tescan. Видно, что более светлые участки на изображении слева (фаза с более тяжелыми элементами) соответствуют темным, т. е. неизлучающим участкам (справа). Эти темные участки мы относим к узкозонной фазе, люминесценция от которой не детектируется на используемом электронном микроскопе.

Узкозонная фаза обогащена свинцом [7] и представляет собой ограниченный твердый раствор сульфида кадмия в сульфиде свинца. Энергодисперсионный анализ показывает, что свинец присутствует и на светлых участках поля зрения, хотя и в меньшем количестве.

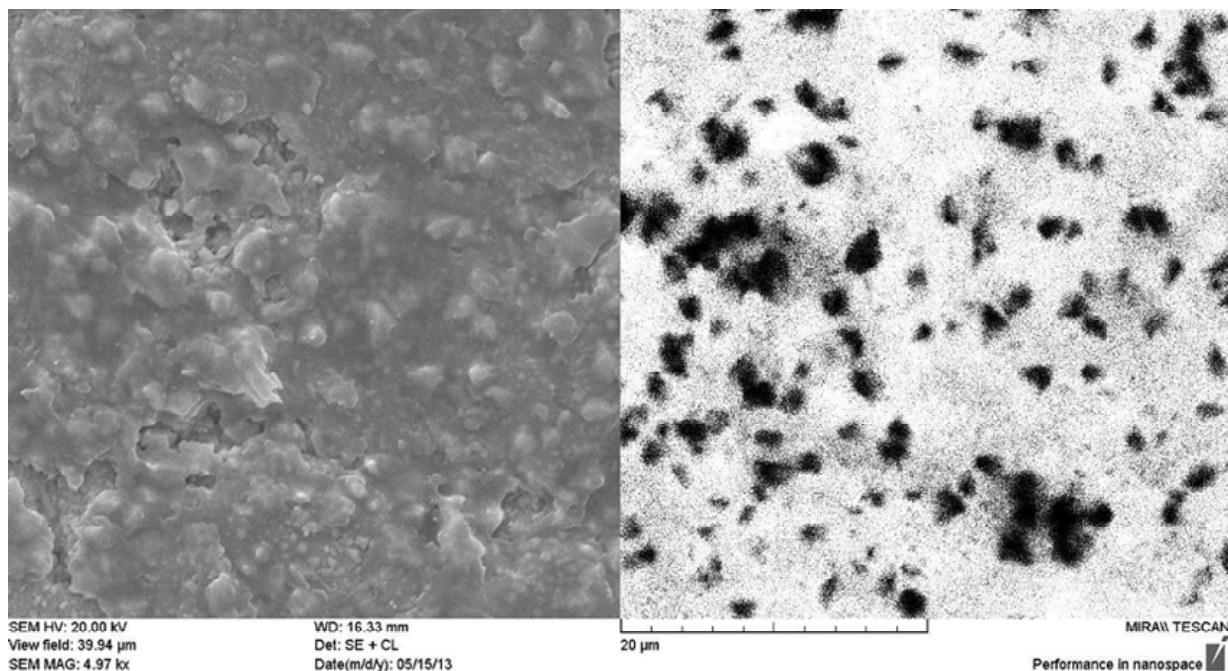


Рис. 3. Изображение участка поверхности отожженного образца CdS-PbS с помощью детектора вторичных электронов (слева) и панхроматического детектора катодоллюминесценции (справа).

Площадь, приходящаяся на «зону влияния» одной черной частицы, является площадью поверхности, деленная на сумму черных частиц разных размеров, находящихся на ней:

$$N \approx 5 \times 10^4; S = 1,6 \times 10^{-5} \text{ см}^2;$$

$$S_N = S/N = 3,2 \times 10^{-10} \text{ см}^2.$$

Линейные размеры, приходящиеся на одну частицу, будут пропорциональны  $\sqrt{S_N}$ , т. е. имеют величину  $\sim 1,79 \times 10^{-5} \text{ см} = 179 \text{ нм}$ .

Предположим, что разность потенциалов, затягивающая носители заряда на сток, равна 0,03 В («тепловой барьер»). Тогда напряженность электрического поля равна приблизительно  $10^3 \text{ В/см}$ , и время пролета электроном расстояния между частицами  $t_{\text{пр}} = 2 \times 10^{-9} \text{ с}$ , что на несколько порядков

величины меньше времени жизни. Таким образом, фотоносители быстрее уйдут на узкозонные стоки, чем рекомбинируют в широкозонной фазе.

Поскольку толщина исследуемой пленки около 1 мкм, необходимо вычислить длину Дебая, чтобы знать ее соотношение с толщиной пленки и с расстоянием между скоплениями узкозонной фазы. Отметим, что толщина пленки является в данном случае максимальным расстоянием от места генерации фотоносителей до стоков (узкозонной фазы), расположенных в основном на поверхности пленки.

Для оценки отвлечемся от пространственной неоднородности исследуемого объекта. Тогда формула для длины Дебая  $L_D$ , характеризующей глубину проникновения электрического поля в монополярный полупроводник, с учетом усредненной равновесной концентрации носителей  $n_0$ ,

определяемой по темновой проводимости, имеет вид [8]:

$$L_D = \sqrt{\frac{\varepsilon k T}{4\pi e^2 n_0}}$$

Авторы работы [9] с помощью профиля распыления при вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) для ионов свинца показали для пленок того же типа уменьшение содержания свинца с глубиной. При этом выход ионов свинца на глу-

бине 1 мкм (после травления) убывал в 4 раза по сравнению с выходом с поверхности.

Полученные данные для фотопроводимости используются для расчета длины Дебая по вышеприведенной формуле и представлены в таблице. При этом следует учитывать, что концентрация приводится при достаточно слабом освещении от монохроматора и наиболее близка к темновой для 400 нм. Значения подвижности, времени жизни и времени фотоответа получены ранее на аналогичных пленочных фотопроводящих структурах при постоянном и модулированном освещении [10].

Таблица

Данные для фотопроводимости

Длина волны $\lambda$ , нм	Время фотоответа $\tau_{ф.о.}$ , мс	Время жизни $\tau$ , мс	Фотоэлектрическое усиление $G$	Подвижность $\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	Концентрация $n_0$ , см <sup>-3</sup>	Длина Дебая, мкм
400	0,12	0,018	296	9,7	$2,15 \times 10^{11}$	7,6
530	0,11	0,059	4803	49	$4,13 \times 10^{12}$	1,74
800	0,03	0,019	1,4	0,41	$7,62 \times 10^{12}$	1,28

Длина Дебая в последнем столбце таблицы рассчитана с использованием концентрации носителей заряда, вычисленной из удельной электропроводности при освещении от монохроматора. Поскольку эта концентрация превышает темновую, то можно считать, что мы имеем дело с длиной Дебая, которая меньше истинной. Это только усиливает наше основное утверждение о том, что фотоносители имеют возможность уйти на стоки в узкозонную фазу, освободив тем самым широкозонную фазу от остаточной проводимости и фотохимических реакций, ведущих к деградации (как правило, к уменьшению) фотопроводимости.

### Заключение

Спектральные исследования фотопроводимости показывают, что пленки CdS-PbS не обнаруживают оптического гашения фототока вследствие отсутствия остаточной проводимости. Такое отсутствие связано с наличием дополнительного канала рекомбинации, обусловленного стоком фотоносителей в узкозонную фазу, поскольку длина монополярной диффузии превышает расстояние между «стоками» (вкраплениями) узкозонной фазы. Дополнительный канал рекомбинации фотоносителей является причиной высокой радиационной стойкости исследуемых пленок.

Работа поддержана грантами РФФИ 16-07-00226 и 16-08-00524.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Красников Г. Я., Зайцев Н. А. Физико-технологические основы обеспечения качества СБИС. – М.: Микрон-Принт, 1999.
2. Георгобиани А. Н., Шейнкман М. К. Физика соединений А<sup>III</sup>В<sup>VI</sup>. – М.: Наука, 1986.
3. Роках А. Г. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. Вып. 13. С. 820.
4. Rokakh A. G., Zhukov A. G., Stetsura S. V. and Serdobintsev A. A. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B. 2004. Vol. 226. No. 4. P. 595.
5. Роках А. Г., Стецюра С. В., Жуков А. Г., Сердобинцев А. А. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 58.
6. Роках А. Г., Матасов М. Д., Жуков А. Г. // Российские нанотехнологии. 2010. № 5–6. С. 69.
7. Rokakh A. G., Serdobintsev A. A., Stetsyura S. V., Zhukov A. G., Matasov M. D., Malyar I. V. Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis, and Applications. – N.Y., 2009.
8. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М.: ГИФМЛ, 1963.
9. Стецюра С. В., Мальяр И. В., Сердобинцев А. А., Климова С. А. // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43. Вып. 8. С. 1102.
10. Роках А. Г. // Изв. Сарат. ун-та. Нов.сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15. Вып. 2. С. 53.

## Recombination drains in the heterophase CdS-PbS films

A. G. Rokakh and M. I. Shishkin

N. G. Chernyshevsky Saratov State University  
83 Astrakhanskaya, Saratov, 410012, Russia  
E-mail: rokakhag@mail.ru

Received November 3, 2016

*A photoconductivity spectrum of sublimated films of the quasi-monopolar CdS-PbS semiconductors, in particular CdS (0.9)-PbS (0.1), does not reveal negative sites (quenching) of the photoconductivity characteristics for single crystals and thin films of cadmium sulfide. This lack is due to the presence of an additional channel of recombination resulting from the flow of the photocarriers to the narrow-band phase, because the length of the monopolar diffusion exceeds the distance between the "drains" (inclusions) of the narrow-band phase, containing PbS, as well as the thickness of the film because drains are mainly located on its surface.*

*Keywords:* CdS-PbS film, quasi-monopolar semiconductor, Debye length, photoconductivity quenching, residual conductivity, narrow-band phase, recombination drain, radiation firmness, electron lifetime, electron transit time.

### REFERENCES

1. G. Ya. Krasnikov, N. A. Zaytsev, *Physical and technological basis for ensuring the quality of VLSI* (Micron-Print, Moscow, 1999) [in Russian].
2. A. N. Georgobiani, M. K. Sheynkman, *Physics of compounds A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup>*. (Nauka, Moscow, 1986) [in Russian].
3. A. G. Rokakh, *Pis'ma v ZhTF*. **10**, 820 (1984).
4. A. G. Rokakh, A. G. Zhukov, S. V. Stetsura, and A. A. Serdobintsev, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, B. **226**, 595 (2004).
5. A. G. Rokakh, S. V. Stetsura, A. G. Zhukov, and A. A. Serdobintsev, *JTP Lett.* **32**, 58 (2006).
6. A. G. Rokakh, M. D. Matasov, and A. G. Zhukov, *Rossiyskie Nanotehnologii*, No. 5-6, 69 (2010).
7. A. G. Rokakh, A. A. Serdobintsev, S. V. Stetsyura, A. G. Zhukov, M. D. Matasov, and I. V. Malyar, *Handbook on Mass Spectrometry: Instrumentation, Data and Analysis, and Applications*. Ed. by J. K. Lang (New York, 2009).
8. S. M. Ryvkin, *Photoelectric Phenomena in Semiconductors*. (GIFML, Moscow, 1963) [in Russian].
9. S. V. Stetsyura, I. V. Malyar, A. A. Serdobintsev, and S. A. Klimova, *Semiconductors*. **43**, 1102 (2009).
10. A. G. Rokakh, *Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Fizika*. **15**, 53 (2015) [in Russian].