

## ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СЛОИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ $\text{TlInS}_2$

Одринский А. П.<sup>1</sup> Seyidov MirHasan Yu.<sup>2,3</sup>, Mammadov T. G.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт Технической Акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь*  
[odra@mail333.com](mailto:odra@mail333.com)

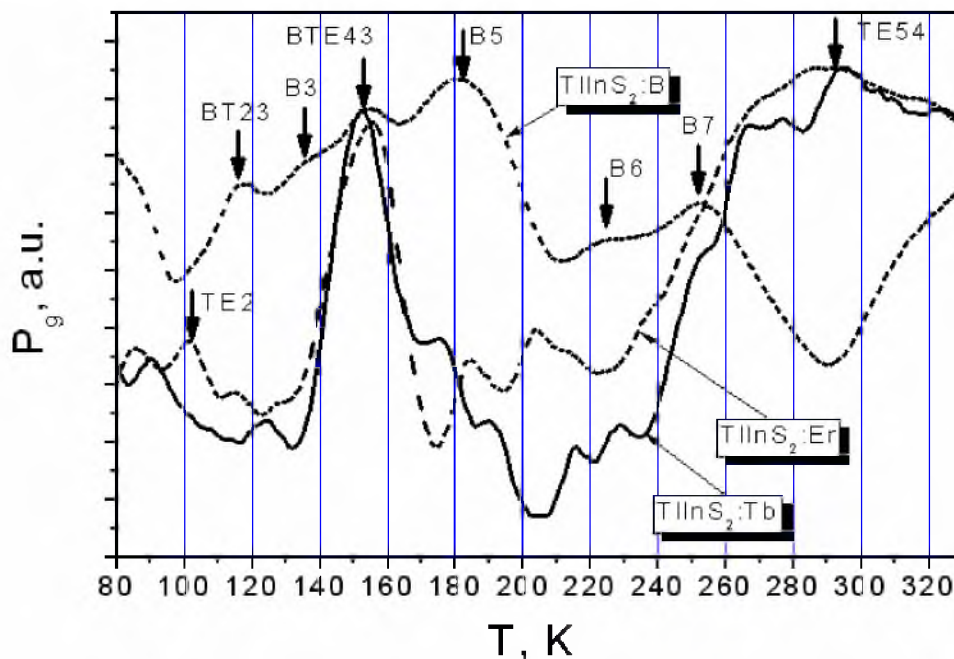
<sup>2</sup> *Department of Physics, Gebze Institute of Technology, 41400, Gebze, Kocaeli, Turkey*

<sup>3</sup> *Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences, AZ-1143 Baku, Azerbaijan*

Исследование дефектов кристаллической структуры слоистых сегнетоэлектриков – полупроводников представляют значительный интерес как с точки зрения прикладного использования данных материалов, так и с точки зрения теории фазовых переходов, связывающей изменение физических свойств кристалла, включая механические, с электрической активностью дефектов [1]. Применение развивавшихся в рамках полупроводникового материаловедения методов исследований на данных объектах сталкивается с проблемой неконтролируемой электрической активности внутренних полей, обусловленных доменной структурой кристалла. В этих условиях эффективно применение фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (PICTS [2]) – разновидности нестационарной спектроскопии, использующей световое возбуждение полупроводника. В настоящей работе впервые представлены результаты исследований данным методом дефектов монокристаллов  $\text{TlInS}_2$ , легированных эрбием, тербием и бором.

Монокристаллы  $\text{TlInS}_2$  растили методом Бриджмена—Стокбаргера. Синтез проводили в предварительно откачанной ( $10^{-5}$  Torr) запаянной кварцевой ампуле из стехиометрической смеси навесок исходных компонентов. Легирование проводилось добавкой соответствующей навески Er, B или Tb в ампулу с предварительно синтезированным  $\text{TlInS}_2$ . Выращенные кристаллы имели  $p$ -тип проводимости с концентрацией носителей заряда  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при 300 К. Омические контакты формировались пайкой индием на торцевых поверхностях образца. Измерительная установка и методика измерений описаны в [3]. Световое возбуждение проводили перпендикулярно поверхности кристалла - плоскости скола, и выбирали из условия получения максимального фотоотклика ( $h\nu = 2,20\text{--}2,35$  эВ). При регистрации релаксации фототока проводилось поточечное накопление и усреднение кинетики сигнала (60 реализаций), содержащей 2000 отсчетов, расположенных через фиксированный интервал времени  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$  с. Регистрация проводилась в процессе нагрева образца со скоростью  $\sim 2$  К/мин в диапазоне температур 78–330 К, с шагом 1 К. Кинетика релаксации фотоотклика анализировалась по методикам DLTS анализа, согласно которым наличие вклада от перезарядки ловушек обнаружимо наблюдением максимума, температурное положение которого смещается в наборе спектров.

В области температур 100–300 К обнаружено восемь процессов перезарядки ловушек. Соответствующие максимумы отмечены вертикальными стрелками на рис. 1.



**Рис. 1.** Сравнение спектров, соответствующих скорости эмиссии  $80 \text{ с}^{-1}$ , полученных на образцах с различным легированием. Спектры нормированы по высоте максимального пика и сглажены усреднением по 10-ти температурным точкам.

Зависимость от температуры скорости перезарядки обнаруженных ловушек с учетом  $T^2$  коррекции представлена на рис. 2. Значения энергии термоактивации перезарядки –  $E_t$  и эффективного сечения захвата –  $\sigma_t$  представлены в таблице совместно с диапазонами температур регистрации перезарядки –  $\Delta T$ . Учитывая значительное удельное сопротивление материала, а также ширину запрещенной зоны – 2,37 эВ, согласно [4], можно предположить, что обнаруженные дефекты являются ловушками основных носителей заряда.

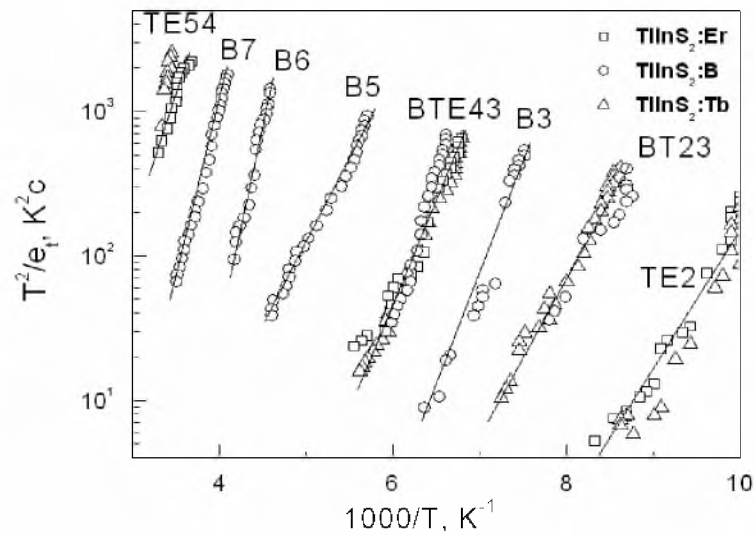


Рис. 2. Зависимость от температуры скорости термоэмиссии с дефектов с учетом  $T^2$  коррекции.

### Параметры дефектов

	$\Delta T$ [K]	$E_t$ [эВ]	$\sigma_t$ [см <sup>2</sup> ]
<b>TE2</b>	100-120	0,21	$4,2 \cdot 10^{-13}$
<b>BT23</b>	114-130	0,23	$1,3 \cdot 10^{-13}$
<b>B3</b>	133-157	0,33	$2,3 \cdot 10^{-11}$
<b>BTE43</b>	147-178	0,27	$1,2 \cdot 10^{-14}$
<b>B5</b>	175-217	0,24	$3,5 \cdot 10^{-17}$
<b>B6</b>	218-239	0,55	$1,2 \cdot 10^{-11}$
<b>B7</b>	244-285	0,48	$2,0 \cdot 10^{-14}$
<b>TE54</b>	272-299	0,32	$1,4 \cdot 10^{-18}$

В низкотемпературной области спектров образцов легированных эрбием и тербием доминирует максимум ВТЕ43, наблюдаемый также на легированных бором образцах на крыле более интенсивного максимума В5. Этот факт свидетельствует в пользу интерпретации ВТЕ43, как собственного дефекта кристалла. На рис.3 приведена зависимость фототока от температуры.

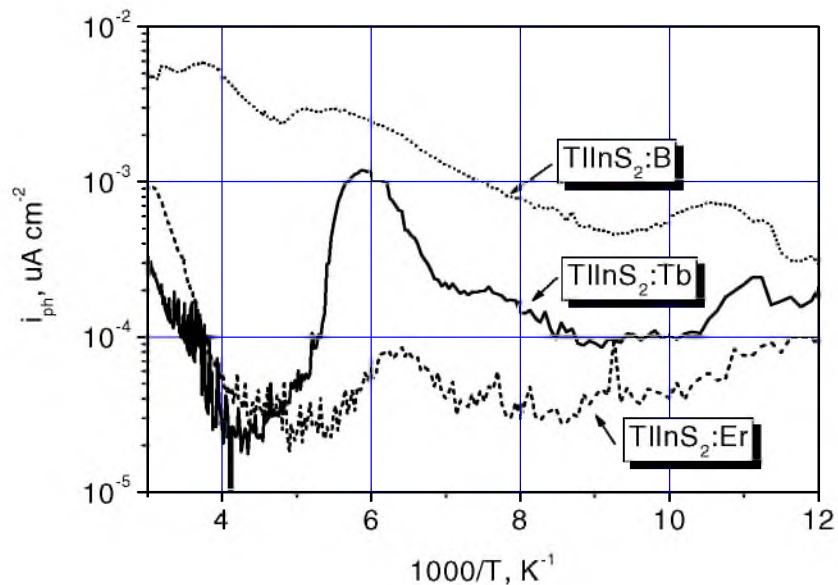


Рис. 3. Зависимость фотоотклика от температуры.

Можно отметить, что в области температур регистрации перезарядки ВТЕ43 наблюдается термоактивация фоточувствительности более заметная на относительно «бедных» перезарядкой дефектов образцах, легированных эрбием и тербием, что согласуется с предполагаемой акцепторной природой дефекта. Мы полагаем, что данный дефект обусловлен вакансией индия по аналогии с более исследованным монокристаллом GaSe, на котором  $V_{Ga}$ , являясь характерным собственным акцептором, наблюдается вне зависимости от легирования [5,6].

Наблюдение перезарядки ловушек, отмеченных как В3, В5, В6, В7 только в образце с примесью бора может указывать на их связь с легирующей добавкой. Регистрация перезарядки В5 в области температур фазовых переходов хорошо согласуется с известным влиянием легирования бором на особенности фазовых переходов кристалла [7]. С другой стороны в области температур регистрации перезарядки В5, В6, В7 фоточувствительность образцов легированных редкими землями снижается на два порядка в сравнении с  $TlInS_2:B$ , где изменение незначительно (см. рис.3). Следует также учитывать, что в данной области температур фотоотклик исследуемых образцов характеризовался наличием в сигнале значительной составляющей шума связанного с различного рода электрическими неустойчивостями, характерными для области температур фазовых переходов составлявших 201 К и 216 К для переходов между соразмерной и несоразмерной сегнетоэлектрическими фазами а также между сегнето и пара фазами, соответственно. Исходя из этого, соотнести с примесью бора можно только ловушку В3. Регистрируемые только на легированных редкими землями образцах ТЕ2 и ТЕ54, также наиболее вероятно связаны с примесными атомами.

Таким образом, методом PICTS в монокристаллах сегнетоэлектрика – полупроводника  $TlInS_2$  обнаружены ловушки с энергией термоактивации перезарядки  $E_t = 0,21 - 0,55$  эВ. Сравнением результатов, полученных на образцах с различным легированием, установлена связь ловушки В3 с  $E_t = 0,33$  эВ с атомом примеси бора и ловушек ТЕ2, ТЕ54 с  $E_t = 0,21, 0,32$  эВ с атомом примеси редких земель. Предложена также интерпретация регистрируемого вне зависимости от легирующей добавки собственного дефекта - ловушки дырок с  $E_t = 0,27$  эВ как вакансии индия.

### Список литературы

1. Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики – полупроводники/ М.: Наука. 1976. 408 с.
2. Ch. Hurter, M. Voilou, A. Mitonneau, D. Bois, Deep - level spectroscopy in high – resistivity materials / Appl. Phys. Lett. **32** (1978), p. 821.
3. И.А. Давыдов, А.П. Одринский. Разработка экспериментальной методики релаксационной спектроскопии фотоиндуцированных токов / РЖ: Электроника 11, 4 (1990).
4. J.C. Balland, J.P. Zielinger, C. Noguét, M. Tapiero, Investigation of deep levels in high-resistivity bulk materials by photo-induced current transient spectroscopy / I. Review and analysis of some basic problems / J. Phys. D: Appl. Phys. **19** (1986), p. 57.
5. G. Micocci, P. Siciliano, A. Tepore, Deep level spectroscopy in p-GaSe single crystals / J. Appl. Phys. **67** (1990), p. 6581.
6. Y. Cui et al., Acceptor levels in GaSe:In crystals investigated by deep-level transient spectroscopy and photoluminescence / J. Appl. Phys., 103, 013710 (2008).
7. F.T. Salmanov, The influence of  $\gamma$ -radiation on relaxing properties of doped vanadium crystals  $TlInS_2$  / Fizika, CILD XII (2006) №1,2, p. 15.