

**PICTS-СПЕКТРОСКОПИЯ ГЛУБОКОУРОВНЕВЫХ
ЦЕНТРОВ МОНОКРИСТАЛЛА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА–
ПОЛУПРОВОДНИКА TlInS₂**

A. P. Odrinsky¹, Yu.Seyidov MirHasan^{2,3}, T. G. Mammadov³

¹*Институт Технической Акустики НАН Беларуси, Беларусь, odra@mail333.com*

²*Department of Physics, Gebze Institute of Technology, Turkey*

³*Institute of Physics Azerbaijan National Academy of Sciences, Azerbaijan*

Исследование дефектов кристаллической структуры слоистых сегнетоэлектриков – полупроводников представляют значительный интерес как с точки зрения прикладного использования данных материалов, практическое освоение которых только начинается, так и с точки зрения фундаментальной науки, поскольку многие аспекты теории фазовых переходов связывают 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 TlInS₂, легированных эрбием, тербием и бором.

Монокристаллы TlInS₂ были выращены методом Бриджмена–Стокбаргера. Синтез проводили в предварительно откачанной (10^{-5} Torr) и запаянной кварцевой ампуле из смеси навесок исходных компонентов взятых в стехиометрической пропорции. Легирование проводилось добавкой соответствующей навески Er, В или Tb в ампулу с предварительно синтезированным TlInS₂. Кристаллы TlInS₂ обладали проводимостью *p*- типа с концентрацией носителей заряда $\sim 10^{13}$ см⁻³ при 300 К. Образцы имели размеры 2×4×1 мм. Омические контакты формировались пайкой индием на торцевых поверхностях образца. Геометрия протекания тока – вдоль слоев кристалла. Качество контактов оценивали по вольтамперной характеристике, которая была линейна при комнатной температуре. Световое возбуждение направлялось перпендикулярно поверхности кристалла – плоскости скола, и выбиралось из условия получения максимального фотоотклика, что соответствовало энергии фотонов $h\nu = 2,20\text{--}2,35$ эВ при плотности потока фотонов на поверхности образца $\sim 10^{14}$ см⁻² с⁻¹. Измерительная установка и методика измерений описаны в [3]. 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 ~ 2 К/мин в диапазоне температур 78–330 К, с шагом 1 К. Кинетика релаксации фотоотклика образцов анализировалась по методикам DLTS анализа, согласно которым наличие вклада от перезарядки ловушек обнаружимо наблюдением максимума, температурное положение которого смещается в наборе спектров.

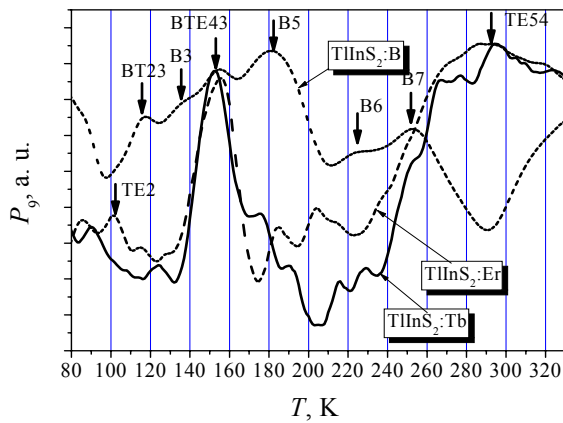


Рис. 1. Сравнение спектров, соответствующих скорости эмиссии 80 с^{-1} , полученных на образцах с различным легированием. Спектры нормированы по высоте максимального пика и сглажены усреднением по 10-ти температурным точкам

Полученные на образцах спектры, соответствующие скорости эмиссии 80 с^{-1} , приведены на рис. 1. В области температур 100–300 К обнаружено восемь процессов перезарядки ловушек. Соответствующие максимумы маркированы и отмечены на рисунке вертикальными стрелками. Смещение температурного положения этих максимумов в наборе спектров позволяет сопоставить их термоэмиссии e_i из ловушек, заполняемых при фотовозбуждении. Зависимость от температуры скорости перезарядки обнаруженных ловушек с учетом T^2 коррекции представлена на рис. 2. Полученные значения энергии термоактивации перезарядки – E_i и эффективного сечения захвата – σ_i представлены в

таблице совместно с диапазонами температур регистрации перезарядки – ΔT . 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.

В низкотемпературной области спектров образцов легированных эрбием и тербием доминирует максимум, обозначенный как ВТЕ43. Данный максимум наблюдается 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. Можно заметить, что в области температур регистрации перезарядки ВТЕ43 наблюдается термоактивация фоточувствительности более заметная на относительно «бедных» перезарядкой ловушек при данных температурах образцов, легированных эрбием и тербием, что согласуется с предполагаемой акцепторной природой ловушки. 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. Отме-

Параметры ловушек

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

тим, что регистрация перезарядки ловушки В5 в области температур фазовых переходов хорошо согласуется с известными из литературы данными о влиянии легирования бором на особенности фазовых переходов кристалла [7]. Температуры фазовых переходов между соразмерной и несоизмерной сегнетоэлектрическими фазами а также между сегнето и пара фазами $TlInS_2$ составляют 201 К и 216 К, соответственно.

С другой стороны в области температур регистрации перезарядки В5, В6, В7 фоточувствительность образца, легированного бором изменяется незначительно, тогда как для образцов, легированных редкими землями она значительно снижается (см. рис. 3) и по величине на два порядка меньше, чем для $TlInS_2:B$. Следует учитывать также, что в данной области температур фотоотклик исследуемых образцов характеризовался наличием в регистрируемом сигнале значительной составляющей шума

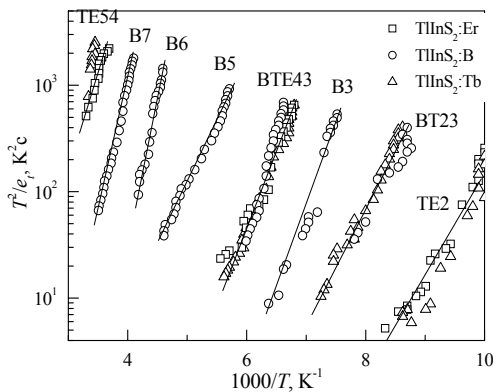


Рис. 2. Зависимость от температуры скорости термоэмиссии с ловушек с учетом T^2 коррекции

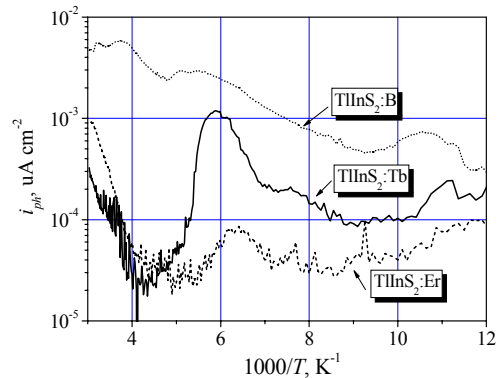


Рис. 3. Зависимость «стационарного» фототока от температуры

связанного с различного рода электрическими неустойчивостями, характерными для данного класса материалов. Таким образом, на настоящем этапе исследований делать вывод о связи В5, В6, В7 с примесным атомом бора не представляется возможным и однозначно соотнести с атомом примеси бора можно только ловушку В3. Ловушки, отмеченные как ТЕ2 и ТЕ54, регистрировавшиеся только на легированных редкими землями образцах, вероятно следует считать связанными 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.

ЛИТЕРАТУРА

- Фридкин, В. М. Сегнетоэлектрики – полупроводники / В. М. Фридкин. М.: Наука. 1976. 408 с.
Hurter, Ch. Deep – level spectroscopy in high – resistivity materials / Ch. Hurter, M. Boilou, A. Mitonneau, D. Bois // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. P. 821.
Давыдов, И. А. Разработка экспериментальной методики релаксационной спектроскопии фотоиндуцированных токов / И. А. Давыдов, А. П. Одринский // РЖ: Электроника. 1990. Т. 11. С. 4.

Balland, J. C. Investigation of deep levels in high-resistivity bulk materials by photo-induced current transient spectroscopy / I. Review and analysis of some basic problems / J. C. Balland, J. P. Zielinger, C. Noguet, M. Tapiero // J. Phys. D: Appl. Phys. 1986. V. 19. P. 57.

Micocci, G. Deep level spectroscopy in *p*-GaSe single crystals / G. Micocci, P. Siciliano, A. Teppe // J. Appl. Phys. 1990. V. 67. P. 6581.

Cui, Y. Acceptor levels in GaSe:In crystals investigated by deep-level transient spectroscopy and photoluminescence / Y. Cui [et al.] // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 013710.

Salmanov, F. T. The influence of γ -radiation on relaxing properties of doped vanadium crystals TlInS₂ / F. T. Salmanov // Fizika. 2006. V. CILD XII. №1, 2. P. 15.