чилась, а при напряжениях свыше 1 В – уменьшилась. Это обусловлено изменением при облучении контактной разности потенциалов вследствие компенсации радиационными дефектами *i*-области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. Imaging lidars for space applications / J. Pereira do Carmo [and etc.] // Novel Optical Systems Design and Optimization XI. -2008. V. 7061. P. 70610J-01-70610J-12.
- 2. Intersatellite link for earth observation satellites constellation / P.M. De Carlo [and etc.] // SPACEOPS, Roma, Italy. 2006. P. 19-23.
- Влияние γ-облучения на вольт-амперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов /Н.И. Горбачук, С.Б. Ластовский, В.Б. Оджаев, А.Н. Петлицкий, В.С. Просолович, Н.С. Ковальчук, В.А. Филипеня, В.В. Черный, Д.В. Шестовский, Ю.Н. Янковский // Материалы 13-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение 2020» Минск, 18-20 нояб. 2020 г. –Минск: БНТУ, 2020. С.325–326.
- 4. Электрофизические параметры *p-i-n*-фотодиодов / В.Б. Оджаев, А.Н. Петлицкий, В.С. Просолович, В.А. Филипеня, Д.В. Шестовский, В.Ю. Явид, Ю.Н. Янковский, Г.Х. Мавланов, Б.К. Исмайлов, З.Т. Кенжаев // Сборник научных трудов II международной научной конференции «Наноструктурные полупроводниковые материалы в фотоэнергетике», Ташкент, Узбекистан, 19-20 ноября 2021 г.–Ташкент:ТашГТУ, 2021.–С. 24–29.
- Sze, S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, Lee M.K. Pub. 3. John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited. 2012. – 582 p.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРИСТАЛЛА ТІGaSe₂, Л ЕГИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕМ

А. П. Одринский

Институт технической акустики НАН Беларуси, пр. Генерала Людникова 13, 210009 Витебск, Беларусь, e-mail: a.odrinsky@gmail.com

Метод фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (*PICTS*) использован для исследования процессов делокализации заряда в 2D-структурированном монокристалле сегнетоэлектрика-полупроводника TIGaSe₂:Al. Обнаружено семь процессов делокализации заряда. Сравнением с результатами ранних исследований на нелегированном кристалле установлено четыре процесса предположительно связанные с введением примеси алюминия.

Ключевые слова: центры локализации заряда; PICTS, TlGaSe₂:Al; сегнетоэлектрики-полупроводники; фотоэлектрическая релаксационная спектроскопия.

PHOTOINDUCED CURRENT TRANSIENT SPECTROSCOPY OF TIGaSe₂ CRYSTAL DOPED BY ALUMINIUM

A. P. Odrinsky

Institute of Technical Acoustic NAS Belarus, Ludnikova av.13, 210717 Vitebsk, Belarus Corresponding author: A. P. Odrinsky (a.odrinsky@gmail.com)

Photo-induced current transient spectroscopy (*PICTS*) technique is applied for studying the processes of charge delocalization in 2D-structured single crystal of TlGaSe₂:Al ferro-

electric-semiconductor. The seven delocalization processes are recognized. That was compared with results of early researches on undoped crystal of TlGaSe₂. It is established four processes presumably connected with introduction of the aluminium impurity.

Key words: charge localization centers; PICTS; TlGaSe₂:Al; ferroelectric-semiconductors; photo-induced current transient spectroscopy.

введение

Монокристаллы TlGaSe₂ исследуются на протяжении достаточно длительного времени. Обнаружение фотогальванической эдс в TlGaSe₂ [1] открыло перспективу построения сегнетоэлектрического фотовольтаического преобразователя солнечной энергии принципиально нового типа [2]. В настоящее время дефекты кристаллической структуры, а также примесные атомы, способные выступать в роли центров локализации носителей заряда (ЦЛЗ) в TlGaSe₂, изучены недостаточно хорошо. Вместе с тем, участие ЦЛЗ в формировании пространственной электрической неоднородности кристалла способно влиять на регистрацию действия фотогальванической эдс во внешней электрической цепи, что послужило мотивацией настоящих исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовали кристалл TlGaSe₂ легированный алюминием в концентрации 0,1%. Образец имел размеры 6,5×3×1,1 мм и обладал проводимостью *p*-типа. Омические контакты формировались карбоновой пастой на торцевых поверхностях образца. Геометрия протекания тока - вдоль слоев кристалла. Световое возбуждение падало перпендикулярно поверхности кристалла – плоскости скола. Энергия фотонов составляла hv = 1,22 эВ и 2,4 эВ при плотности потока фотонов на поверхности образца $\sim 10^{15}$ см⁻² с⁻¹. Измерительная установка и методика измерений описаны в [3]. Регистрация релаксации фотоотклика проводилась в процессе нагрева образца со скоростью ~ 2 К/мин в диапазоне температур 78–330 К с шагом 1 К. При регистрации проводилось поточечное накопление и усреднение кинетики сигнала (60 реализаций), содержащей 2000 отсчетов, расположенных через фиксированный интервал времени $\Delta t = 5,63 \cdot 10^{-5}$ с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны наборы PICTS-спектров, полученных на кристалле TlGaSe₂:Al. Прямыми линиями отмечено смещение температурной позиции максимума в спектрах, соответствующих различным характеристическим временам релаксации, идентифицирующее регистрацию процесса активации термоэмиссии с ЦЛЗ.

В спектрах, полученных при возбуждении с hv = 1.22 эВ (рис. 1, *a*), явно различимы пять процессов, обозначенные как L1-L5. Доминирующий в спектрах интенсивный пик L3 имеет размытую форму, что вероятно связано с наложением регистрации нескольких процессов термоэмиссии. С целью получения более полной информации о наборе ЦЛЗ в кристалле, следуя подходу [4, 5] проведены также исследования с использованием возбуждения с энергией фотонов $hv \ge E_g$. Соответствующие спектры представлены на рис. 1, δ , где наблюдающиеся процессы активации термоэмиссии, обозначены как M1-M5.

На рис. 2 представлено сравнение активации термоэмиссии обнаруженных процессов с данными, полученными на нелегированном кристалле TlGaSe₂ из работы [3]. В области температуры фазовых переходов из соразмерной сегнетоэлектрической фазы в несоразмерную T = 107 К и из несоразмерной сегнето-фазы в параэлектрическую T = 120 К [3] графики Аррениуса процессов L1 и L2 фактически совпадают с данными для A1 и A2, что свидетельствует об идентичности соответствующих ЦЛЗ. Аналогично можно интерпретировать процесс L5, сопоставимый с наблюдавшейся ранее перезарядкой ЦЛЗ A6, а также сопоставить M4 и A5. Таким образом, ответственные за эти процессы ЦЛЗ следует идентифицировать как собственные дефекты кристалла либо характерные технологические примеси.



Рисунок 1. Набор *PICTS*-спектров кристалла TIGaSe₂:Al, соответствующих различным характеристическим временам релаксации, полученных при возбуждении с *hv* = 1.22 эВ (*a*) и 2.4 эВ (*б*). Спектры нормированы по высоте доминирующего максимума и последовательно смещены по оси ординат. Пунктирной стрелкой указана последовательность характеристического времени релаксации спектра: *a*) 31.4 мс; 22.2 мс; 18.1 мс; 11.9 мс; 2.87 мс; 1.84 мс; 1.18 мс; 0.72 мс; и 0.46 мс; *б*) 33.9 мс; 20.1 мс; 11.9 мс; 6.3 мс; 2.1 мс и 1.18 мс

Параметры обнаруженных в кристалле TlGaSe₂:Al ЦЛЗ приведены в таблице. Здесь E_t – значения энергии термоактивации перезарядки, σ_t – эффективное сечение захвата, ΔT – диапазон температуры регистрации термоэмиссии с ЦЛЗ.

Отметим, что применение возбуждения с hv = 2,4 эВ позволило идентифицировать в процессах делокализации вклад наблюдавшегося ранее ЦЛЗ A5. Однако и в данном случае форма пика (см. рис. 1, δ) свидетельствует о сложном характере процесса делокализации, участии в процессе вклада от ЦЛЗ иной природы. Также следует учи-



Рисунок 2. Зависимость от температуры скорости делокализации заряда обнаруженных на TIGaSe₂:Al процессов: *L*1 – *L*5 при возбуждении *hv* = 1.22 эВ и *M*3 - *M*5 при *hv* = 2.4 эВ. Также приведены данные термоэмиссии с ЦЛЗ *A*1 - *A*6 нелегированного кристалла TIGaSe₂ из работы [3]

тывать возможность влияния на делокализацию заряда электрической неоднородности образца, характерной для TlGaSe₂ в данном диапазоне температуры [1, 2]. В пользу этого свидетельствуют большие значения сечения захвата для L4 и M3, полученные по стандартной для нестационарной спектроскопии глубоких уровней методике, не сопровождающиеся соответствующими особенностями спектра [6].

	$\Delta T(\mathbf{K})$	$E_{\rm t}$ (9B)	σ (cm ²)	Природа ЦЛЗ
<i>L</i> 1	86-105	0.20	$2.9 \cdot 10^{-12}$	A1 [3]
L2	127-137	0.44	$4.4 \cdot 10^{-6}$	A2 [3]
L3	164-227	0.18	$1.5 \cdot 10^{-18}$	Связан с Al?
L4	240-263	0.77	$2.9 \cdot 10^{-9}$	Связан с Al?
L5	275-315	0.52	$4.9 \cdot 10^{-15}$	A6 [3]
М3	143-163	0.34	$5.2 \cdot 10^{-12}$	Связан с Al?
<i>M</i> 4	210-228	0.45	$4.5 \cdot 10^{-13}$	A5 [3]
M5	250-273	0.46	3.3.10-15	Связан с Аl?

Параметры ЦЛЗ кристалла TlGaSe₂:Al

Более детально влияние электрической неоднородности кристалла на процессы делокализации заряда планируется исследовать в дальнейшем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таким образом, на легированном кристалле TlGaSe₂ обнаружены не наблюдавшиеся ранее процессы L3, L4, M3 и M5. Можно заключить, что введение в кристалл алюминия ведет к образованию центров локализации заряда, ответственных за данные процессы и представляющих собой либо дефект внедрения атома примеси, либо дефект замещения, либо более сложный комплексный дефект с участием атома примеси алюминия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант №Ф22-127.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Параметрический резонанс и фотогальванические токи в слоистом кристалле TlGaSe₂. / А.Π. Одринский [и др.] // ФТТ. – 2017. – Т. 59, №3. – С. 447–452.
- Одринский, А.П. Фотогальванические токи и электрическая неоднородность 2-D структурированного монокристалла. / А.П. Одринский // ФТТ. – 2021. – Т. 63, №8. – С. 1024–1029.
- 3. Identification of Intrinsic Deep Level Defects Responsible for Electret Behavior in TlGaSe₂ Layered Semiconductor /M.-H.Yu. Seyidov [et al.] // Physica B. 2016. Vol. 483. P. 82–89.
- Ikeda, K. Studies of photon energy dependence of photocurrent in semi-insulating GaAs materials by means of Photo Deep Level Fourier Spectroscopy and Photosensitivity Transient Spectroscopy / K. Ikeda, Y. Ishii. // Jap. J.Appl.Phys. – 1987. – Vol. 26, № 3. – P. 377–382.
- 5. Одринский, А.П. Критический анализ исследования ГУ в высокоомных монокристаллах CdS методом PICTS. / А.П. Одринский // ФТП. 2004. Т. 38, № 3. С. 310–315.
- Одринский, А.П. Нестационарная спектроскопия альфа центров Рывкина. / А.П. Одринский // ФТП. – 2011. – Т. 45, № 7. – С. 886-889.