

О МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КРИСТАЛЛА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА-ПОЛУПРОВОДНИКА

А. П. Одринский

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

Рассматривается вопрос участия глубокоуровневых дефектов как центров локализации заряда в формировании электрической неоднородности слоистого кристалла сегнетоэлектрика-полупроводника. Описаны условия эксперимента, позволившего уточнить механизм формирования электрической неоднородности кристалла TiGaSe_2 . Показано доминирующее влияние в развитии аномальной реакции кристалла на фотовозбуждение фотогальванической эдс, ответственной за нарушение локальной электронейтральности кристалла.

Ключевые слова: слоистые сегнетоэлектрики-полупроводники; центры локализации заряда; фотоэлектрическая релаксационная спектроскопия; фотогальванический ток.

ABOUT THE MECHANISM OF ELECTRIC HETEROGENEITY FORMATION IN THE CRYSTAL OF FERROELECTRIC – SEMICONDUCTOR

A. P. Odrinsky

*Institute Technical Acoustics NAS Belarus, Ludnikova av.13, BY-210009 Vitebsk, Belarus,
Corresponding author: A. P. Odrinsky (a.odrinsky@gmail.com)*

The question of participation deep level defects as centers of charge localization in formation of electric heterogeneity of the layered ferroelectric-semiconductor crystal is examined. The experimental conditions that allowed specifying the mechanism of electric heterogeneity formation of the TiGaSe_2 crystal are described. The dominate influencing of a photo galvanic emf in development of abnormal reaction under a crystal photo excitation has been shown, that is responsible for a breaking of local electro neutrality of crystal.

Key words: layered ferroelectrics-semiconductors; the centers of charge localization; photo-induced current transient spectroscopy; photo galvanic current.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение сферы применений сегнетоэлектриков в современной электронике [1] стимулирует углубление понимания явлений, связанных с пространственными неоднородностями локализации и делокализации заряда в этих материалах, а также разработку соответствующих методик изучения их электронной подсистемы. При исследовании электрической активности центров локализации заряда (ЦЛЗ) в сегнетоэлектрическом кристалле метод нестационарной спектроскопии (DLTS) сталкивается с проблемой неконтролируемой активности внутренних электрических полей, обусловленных доменной структурой. Формирование неравновесного заполнения ЦЛЗ посредством фотовозбуждения дает уникальную возможность изучения их активности при малом возмущении доменной структуры кристалла [2]. Нами впервые на основе фотоэлектрической релаксационной спектроскопии проведены систематические ис-

следования процессов термоэмиссии с ЦЛЗ в 2D-структурированных монокристаллах сегнетоэлектриков-полупроводников TiGaSe_2 и TlInS_2 . Показаны возможности и перспективность метода в изучении ЦЛЗ на данном семействе кристаллов, обнаружен набор идентичных процессов термоэмиссии заряда с ЦЛЗ [2-9]. Наличие у кристалла сегнетоэлектрических свойств дает ощутимое увеличение вариации оценки эффективного сечения захвата ЦЛЗ и энергии активации делокализации [7]. Эти совместно определяемые оценки строго коррелированы в соответствии с правилом Майер – Нельделя и подвержены влиянию электрической неоднородности кристалла [2, 7, 10]. Участие обнаруженных ЦЛЗ в формировании пространственной неоднородности локализации заряда подтверждает корреляция участков температуры регистрации термоэмиссии и диапазонов температуры наложения поляризующего поля, существенно меняющих ток деполяризации кристалла TiGaSe_2 [5]. В области температуры параэлектрической фазы ($T > 120$ К) поляризованное состояние TiGaSe_2 можно представить исключительно как пространственно неоднородное заполнение ЦЛЗ, формирующее систему электретов [5]. Изучение процессов делокализации заряда в электрически неоднородном кристалле (поляризованном в низкотемпературной сегнето-фазе) обнаружило в релаксации фотоотклика процесс пространственного перераспределения заряда под действием кулоновских сил, что хорошо сопоставимо с наличием пространственно-неоднородного заполнения ЦЛЗ [10]. Однако при этом наблюдались и аномалии фотоотклика, аналогичные описанным ранее, интерпретированные как резонанс с участием фотогальванического тока [11]. Действие фотогальванической эдс сопровождается нарушением локальной электронейтральности и, как следствие, также сопровождается пространственным перераспределением заряда в процессе релаксации возбужденного состояния кристалла. Для выяснения механизма, ответственного за электрическую неоднородность фотовозбуждаемого кристалла, проведены исследования зависимости динамики фотоотклика TiGaSe_2 от напряженности внешнего поля, а также энергии фотонов оптического возбуждения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Условия эксперимента и испытываемые образцы не отличались от описанных ранее [4, 5, 7], за исключением начальных условий эксперимента. Предварительно образец приводили в состояние близкое к термодинамическому равновесию (выдержка в темноте в течение часа при температуре 350 К) и охлаждали без освещения до температуры ~ 250 К (соответствует оптимуму наблюдения аномалий фотоотклика [11]). Таким образом, все измерения проводили в области температуры параэлектрической фазы TiGaSe_2 , что исключало возможность формирования электретного состояния в результате активности доменной структуры кристалла в низкотемпературной сегнето-фазе. Исследования проводили на основе специально развитого программного модуля интерактивного управления регистрацией данных. Сбор данных об изменениях в динамике фотоотклика состоял из последовательной регистрации кинетики фотоотклика через фиксированный интервал времени $\tau_0 = 10$ с. При регистрации проводилось поточечное накопление и усреднение сигнала реакции на возбуждение светом (2000 отсчетов, расположенных через фиксированный интервал времени $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с) по 64 реализациям временной зависимости. Длительность отдельного процесса регистрации не превышала τ_0 , позволяя отслеживать эволюцию реакции кристалла на возбуждение светом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

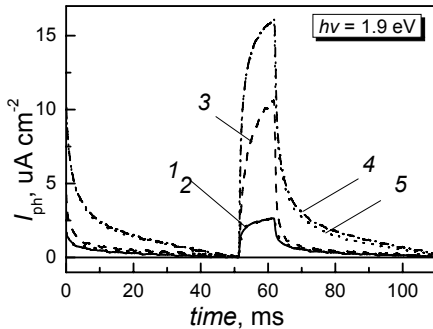


Рисунок 1. – Эволюция реакции кристалла на возбуждение с $h\nu \sim 1,9$ эВ при ступенчатом переключении приложенного напряжения с $U = 3$ В (кривая 1) до 9 В (кривые 2–5). Кривая 2 получена непосредственно после переключения, кривые 3–5 по прошествии 10 с, 20 с, и 30 с, соответственно

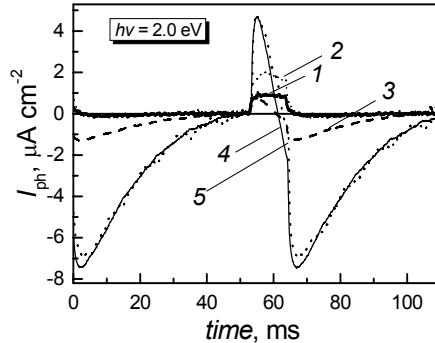


Рисунок 2. – Эволюция реакции кристалла на возбуждение с $h\nu \sim 2,0$ эВ при ступенчатом переключении приложенного напряжения с $U = 3$ В (кривая 1) до 9 В (кривые 2–5). Кривая 2 получена после переключения, кривые 3–5 по прошествии 10 с, 20 с, и 100 с, соответственно

На рис. 1–3 представлены примеры кинетики фотоотклика кристалла TlGaSe_2 , полученные при температуре ~ 250 К на образце в состоянии близком к термодинамическому равновесию, не охлаждавшемся до температуры сегнетоэлектрической фазы. На рис. 1 показаны изменения кинетики при ступенчатом переключении напряжения $U \sim 3$ –9 В. Кривая 2, полученная сразу после увеличения напряжения, фактически совпадает с кривой 1, соответствующей установившемуся режиму периодического фотовозбуждения при $U \sim 3$ В. Для кривых 3 и 4 наблюдается постепенное увеличение фототока, сменяющееся выходом в установившийся режим, в пользу чего свидетельствует фактическое совмещение кривых 4 и 5 с небольшим различием в релаксации сигнала. Такую реакцию фотоотклика можно сопоставить с изменением проводимости кристалла. Существенно меняется реакция кристалла на возбуждение светом с $h\nu = 2,0$ эВ $\sim E_g$. Если кривая 1 на рис. 2, соответствующая установившемуся режиму периодического фотовозбуждения при $U \sim 3$ В, остается вполне сопоставимой с изменением проводимости кристалла, то для кривых 2–5, полученных после ступенчатого переключения напряжения $U \sim 3$ –9 В, наблюдается развитие аномалий фотоотклика. Отметим существенную трансформацию кинетики на начальном этапе ~ 30 с, сменяющуюся слабыми изменениями (ср. кривые 4 и 5). На рис. 3 показаны изменения реакции на возбуждение с $h\nu \sim 2.2$ эВ $\geq E_g$. Здесь наблюдается довольно быстрый выход в относительно стабильный режим изменений сигнала. При дальнейшем увеличении энергии фотонов возбуждения вплоть до $h\nu \sim 2.5$ эВ характер реакции на освещение и ее поведение при переключении внешнего напряжения существенно не изменяются.

Трансформация реакции кристалла на свет, в частности изменение знака фотоотклика (ср. рис. 1–3), хорошо сопоставимы с ранним предположением о формировании реакции как развитии резонанса с участием фотогальванического тока [11] и

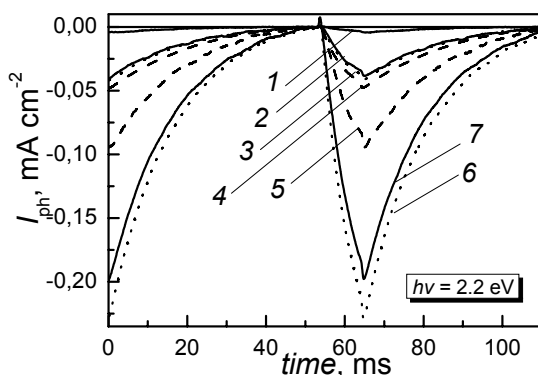


Рисунок 3. – Эволюция реакции кристалла на возбуждение с $h\nu \sim 2,2$ эВ при ступенчатом переключении приложенного напряжения с $U = 9$ В (кривые 1–4) до 21 В (кривые 5–7). Кривая 1 получена после переключения 3–9 В, остальные кривые нумерованы в соответствии с последовательностью их регистрации через интервал $\tau_0 = 10$ с

родности TlInS_2 в результате возникновения протяженных дефектов, в частности, нарушения последовательности чередования слоев в кристалле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в основе возникновения и развития аномальной реакции TlGaSe_2 на фотовозбуждение лежит задающее действие фотогальванической эдс, ведущее к нарушению электронейтральности кристалла в условиях его периодического возбуждения и способствующего формированию пространственно-неоднородного заполнения ЦЛЗ, т.е. электрической неоднородности кристалла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Scott, J.F. Prospects for ferroelectrics: 2012–2022. / J.F. Scott // *Materials Science*. – 2013. – 187313.
2. Одринский, А. П. Фотовольтаические токи и активность структурных дефектов монокристалла сегнетоэлектрика-полупроводника $\text{TlInS}_2\text{:La}$ / А.П. Одринский, М.-Н.Ю. Сейдов, R.A. Suleymanov, Т.Г. Мамедова, В.Б. Алиева // *ФТТ*. – 2017. – Т. 58, № 4. – С. 696–701.
3. Seyidov, M.-H.Yu Characterization of Deep Level Defects and Thermally Stimulated Depolarization Phenomena in La - doped TlInS_2 Layered Semiconductor / M.-H.Yu Seyidov, R. Suleymanov, F. Mikailzade, E. Kargin, A. Odrinsky // *JAP*. – 2015. – V. 117. – P. 224104 (11 pp.).
4. Grivickas, V. Carrier trapping and recombination in TlGaSe_2 layered crystals / V. Grivickas, A. Odrinsky, V. Bikbajevs, K. Gulbinas // *Phys. Status Solidi B*. – 2013. – V. 250, № 1. – P. 160–168.
5. Seyidov, M.-H.Yu Identification of Intrinsic Deep Level Defects Responsible for Electret Behavior in TlGaSe_2 Layered Semiconductor / M.-H.Yu Seyidov, F. A. Mikailzade, T. Uzun, A. P. Odrinsky, E. Yakar, V. B. Aliyeva, S. S. Babayev, T. Mammadov // *Physica B*. – 2016. – V. 483. – P. 82–89.
6. Seyidov, M.-H.Yu Photo - Induced Current Transient Spectroscopy of TlInS_2 Layered Crystals Doped by Er, B and Tb Impurities / M.-H.Yu Seyidov, R.A. Suleymanov, A.P. Odrinsky, A.I. Nadjafov, T.G. Mammadov, E.G. Samadli // *Japanese journal of applied physics*. – 2011. – V. 50, № 5. – P. 05FC08 (2 pp.).
7. Одринский, А.П. Фотоэлектрическая релаксационная спектроскопия сегнетоэлектрика - полупроводника TlGaSe_2 / А.П.Одринский // *ФТТ*. – 2014. – Т. 56, № 2. – С. 331–336.

свидетельствуют о доминирующем характере фотогальванической эдс в формировании реакции кристалла на возбуждение светом с энергией фотонов $h\nu_0 \geq E_g$.

Наблюдения развития аномалий на кристалле, приведенном в состояние близкое к термодинамическому равновесию и не охлаждавшемся до температуры сегнето-фазы, вскрывает причинно-следственные связи, свидетельствуя о формировании электрической неоднородности при фотовозбуждении кристалла как результате действия фотогальванической эдс. Отметим, что это заключение отличается от предложенной в работе [12] модели формирования электрической неоднородности

8. Seyidov, M.-H.Yu Пирозлектрические свойства и дефекты структуры слоистого кристалла TlInS_2 , легированного лантаном / М.-Н.Ю. Сейидов, А.П. Одринский, R. A. Suleymanov, E. Asar, T.Г Мамедов, В.Б.Алиева // ФТТ. – 2014. – Т. 56, №10. – С. 1964–1969.
9. Одринский, А.П. Фотоэлектрическая активность структурных дефектов монокристалла сегнетоэлектрика-полупроводника $\text{TlInS}_2\text{:La}$ / А.П.Одринский, Т.Г. Мамедов, М.Н.Ю. Сейидов, В.Б. Алиева // ФТТ. – 2014. – Т. 56, №8. – С. 1554–1558.
10. Одринский, А.П. Эффект модификации вклада термоэмиссии локализованных зарядов в релаксацию фотоотклика монокристалла TlGaSe_2 . / ФТТ. – 2020. – Т. 62, №4. – С. 596–602.
11. Одринский, А.П. Параметрический резонанс и фотогальванические токи в слоистом кристалле TlGaSe_2 / А.П. Одринский, М.-Н.Ю. Сейидов, Т.Г. Мамедов, В.Б. Алиева // ФТТ. – 2017. – Т. 59, № 3. – С. 447–452.
12. Grivickas, V. Carrier dynamics in highly excited TlInS_2 : evidence of 2D electron–hole charge separation at parallel layers. /V. Grivickas, P. Scajev, V. Bikbajevs, O.V. Korolik and, A.V. Mazanik. // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2019. – V. 21. – P. 2102–2114.

ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА АЛЮМИНИЕВУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

М. П. Патапович¹, А. П. Зажогин², В. А. Акулич¹, М. А. Малец¹

¹⁾ Учреждение Образования «Белорусская государственная академия связи»,
ул. Ф.Скорины, 8/2, 220076 Минск, Беларусь, e-mail: mpetpat@mail.ru

²⁾ Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь

Импульсное лазерное напыление может быть использовано для формирования тонкопленочных структур и покрытий из самых различных металлов. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Установлено, что увеличение числа импульсов в серии обеспечивает рост концентрации оксида алюминия (AlO) за счет сверхзвукового расширения турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия. Выявлено, что воздействие последовательности серий сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга, на поверхность алюминиевой мишени, обеспечивает увеличение количества ионов алюминия в лазерной плазме. Определены оптимальные параметры возбуждающих импульсов при эффективной расфокусировке и угле падения излучения на мишень. Разработанные методики повышения выхода нанокластеров при предварительном оксидировании поверхности алюминия можно использовать при получении высокоактивных нанопорошков.

Ключевые слова: атомно-эмиссионная спектроскопия; сдвоенные лазерные импульсы; оксид алюминия; лазерная абляция; наноконструкции; тонкие пленки.

DYNAMICS OF ALUMINUM OXIDE FORMATION BY EXPOSURE ON ALUMINUM SURFACE LASER PULSES

M. P. Patapovich¹, A. P. Zazhugin², V. A. Akulich¹, M. A. Malets¹

¹⁾ Belarusian State Academy of Communications, st. F. Skarina, 8/2,
220076 Minsk, Belarus, e-mail: mpetpat@mail.ru

²⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: M. P. Patapovich (mpetpat@mail.ru)