

КИНЕТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КАК МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ 2-D СТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ-ПОЛУПРОВОДНИКОВ

А. П. Одринский

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

Исследования электрической активности центров локализации заряда в слоистых кристаллах сегнетоэлектриков-полупроводников TiGaSe_2 и TlInS_2 на основе кинетической спектроскопии релаксации фототока обнаружили электрическую активность в кристалле, формально с центрами не связанную. Описаны внесенные изменения кинетической спектроскопии релаксации фототока, позволившие адаптировать кинетическую спектроскопию релаксации фототока для изучения такой активности. Также приведены результаты исследования эволюции реакции кристалла TiGaSe_2 на свет в изотермическом режиме в области температуры действия фотогальванической эдс как пример применения развитой методики.

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

KINETIC SPECTROSCOPY AS THE METHOD FOR STUDY OF ELECTRIC ACTIVITY IN 2-D STRUCTURED FERROELECTRICS – SEMICONDUCTORS

A. P. Odrinsky

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

Studying of electric activity of the centers of a charge localization in layered crystals of ferroelectrics-semiconductors TiGaSe_2 and TlInS_2 on the basis of kinetic spectroscopy of a photocurrent relaxation have found out electric activity in a crystal, that is not connected with the centers. Introduced changes of kinetic spectroscopy of a relaxation of the photocurrent are described, that are allowed to adapt kinetic spectroscopy of a relaxation of a photocurrent for studying such activity. Also the results of research of evolution of reaction of crystal TiGaSe_2 on light in an isothermal mode are presented in temperature region of action of photogalvanic emf as an example of application of the advanced technique.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получили методы кинетической спектроскопии, отслеживающие изменение с температурой реакции на возбуждение на основе регистрации, анализа и обработки больших объёмов данных «data acquisition»-системой совмещенной с персональным компьютером. Отработка технологии формирования полупроводниковых структур в электронной промышленности

на базе кинетической спектроскопии глубоких уровней (DLTS [1]) породила предложение коммерчески доступных DLTS-спектрометров [2], в том числе с применением возбуждения светом, эффективного с повышением удельного сопротивления материала ($\rho \geq 10^3$ Ом см). Снижение концентрации свободных носителей заряда в высокоомных и полуизолирующих материалах ограничивает экранирование пространственных неоднородностей потенциального рельефа, усиливая влияние активности глубокоуровневых дефектов, в первую очередь, как центров локализации заряда (ЦЛЗ), определяющих потенциальный рельеф кристалла. Здесь изучение процессов локализации и делокализации заряда на базе кинетической спектроскопии релаксации фототока (PICTS), с привлечением апробированных методик DLTS-анализа, представляет интерес, как с точки зрения физики, так и развития методов контроля формирования различного рода нелинейно-оптических, оптоэлектронных и др. приборов и устройств улучшенной функциональности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

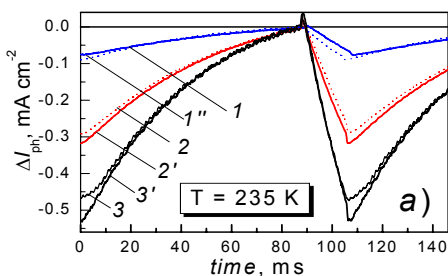
В результате PICTS-исследований процессов делокализации заряда в низкоразмерных системах – 2D-структурированных монокристаллах сегнетоэлектриков-полупроводников TiGaSe_2 и TlInS_2 идентифицирован набор процессов тепловой делокализации заряда, связанных с ЦЛЗ-собственными дефектами кристаллов либо характерными технологическими примесями [3–6]. Температура их регистрации коррелирует с рядом характеристик кристалла. Так в сегнето-фазе TlInS_2 процессы делокализации заряда с ЦЛЗ хорошо сопоставимы изменениям поляризационных характеристик кристалла [3, 4], пьезоэлектрического тока [5], скорости распространения ультразвука [6], термостимулированной проводимости [7]. Вклад ЦЛЗ в формирование пространственной неоднородности локализации заряда в TiGaSe_2 кардинально меняет ток деполяризации кристалла [8]. Определены связанные с нарушением локальной электронейтральности кристалла особенности развития с температурой процессов делокализации заряда [4, 9, 10], включая процессы в области фазовых переходов [4, 9].

Уже на ранних этапах исследований процессов делокализации заряда с ЦЛЗ была обнаружена реакция кристалла на свет не ограниченная изменением проводимости, с аномалиями, предполагающими вклад фотовольтаических явлений. Для корректности последующего off-line анализа массив данных, типовой для кинетической спектроскопии, был дополнен включением регистрации реакции фотоотклика образца. Комплексный анализ прояснил механизм возникновения аномалий реакции TiGaSe_2 на возбуждении с $h\nu_0 \sim E_g$ как связанный с пространственно-неоднородным заполнением ЦЛЗ – электретным состоянием с участием ЦЛЗ A3 в области $T \sim 170\text{--}200$ К, а также ЦЛЗ A4 в области $T \sim 200\text{--}235$ К [11]. Обнаружено также изменение механизма ответственного за аномалии. При температуре $T \geq 235$ К доминируют аномалии фотоотклика обусловленные пространственно-неоднородным распределением свободных носителей заряда в объеме кристалла (нарушение локальной электронейтральности), что предполагает действие сил не электрической природы – фотогальваническую эдс [11].

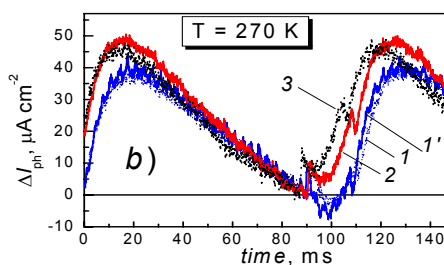
Изменив алгоритм регистрации данных, на основе специально развитого программного модуля интерактивного управления регистрацией, была исследована эволюции реакции TiGaSe_2 на свет в изотермическом режиме при $T \sim 250$ К, в зависимо-

сти от налагаемого внешнего напряжения и энергии фотонов [12]. Развитие аномальной реакции с увеличением напряженности внешнего поля подтвердило действие в TiGaSe_2 фотогальванического тока неколлинеарного тока проводимости кристалла, и межслоевое разделение носителей заряда. Эволюция реакции на свет кристалла, предварительно приведенного в состояние термодинамического равновесия, не охлаждавшегося до температуры сегнето-фазы, вскрыла причинно-следственные связи – доминирующий характер фотогальванического тока в формировании электретных состояний пространственно-неоднородного заполнения ЦЛЗ как результат действия фотогальванического тока [12].

В настоящем эволюция реакции TiGaSe_2 на свет исследована в изотермическом режиме при $T \sim 235 \text{ K}$ и $T \sim 270 \text{ K}$ (см. рис.), в точках лежащих выше и ниже температуры, оптимальной для наблюдения аномалий ($T \sim 250 \text{ K}$). Быстрый выход реакции в стационарный режим при ступенчатом увеличении приложенного напряжения и явно выраженная зависимость фотоотклика от напряжения при $T \sim 235 \text{ K}$ хорошо согласуется с предположением о формировании электрета на основе ЦЛЗ А4 как вторичном явлении, компенсирующим действие фотогальванической эдс.



a



б

Реакция кристалла TiGaSe_2 на фотовозбуждение с $h\nu = 1.9 \text{ eV}$: *a* – при $T \sim 235 \text{ K}$; *б* – $T \sim 270 \text{ K}$.

Приложенное напряжение соответствовало:

кривая 1 – 1.5 В; кривая 2 – 4.5 В; кривая 3 – 9 В.

При изменениях реакции, заметных в течение порядка десятков секунд, приводится дополнительная кривая с соответствующим номером, отмеченным штрихом

Изменение реакции на свет при $T \sim 270 \text{ K}$ согласуется с экранированием фотогальванической эдс в результате существенного увеличения концентрации свободных носителей. Здесь фототклик практически не зависит от напряжения, что по-видимому можно объяснить межслоевым разделением носителей заряда и наличием «горячих точек» в контакте [13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследования 2D-структурированных монокристаллов сегнето-электриков-полупроводников методом кинетической спектроскопии релаксации фототока показали перспективность метода в изучении процессов делокализации заряда с ЦЛЗ в сегнетоэлектрике, в условиях малого возмущения доменной структуры. Лежащий в основе методов кинетической спектроскопии принцип отслеживания эволюции реакции на свет при изменении условий эксперимента является эффективным методом исследования электронной подсистемы кристалла, позволяющим ис-

следовать как активность центров локализации заряда, так и активность, формально с ЦЛЗ не связанную, в частности, действие на носители заряда сил не электрической природы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Lang, D.V. Deep level transient spectroscopy a new method to characterise traps in semiconductors / D.V. Lang // J. Appl. Phys. – 1974. – Vol. 45, № 7. – P. 3023–3032.
2. Sula Technologies develops, manufactures, and markets commercial instrumentation for Deep Level Transient Spectroscopy. [Electronic resource] // Sula Technologies. – Mode of access: <http://sulatech.com/index.shtml>
3. Seyidov, M.-H.Yu Characterization of Deep Level Defects and Thermally Stimulated Depolarization Phenomena in La - doped TlInS₂ Layered Semiconductor / M.-H.Yu Seyidov [et al.] // JAP. – 2015. – Vol. 117. – P. 224104 (11 pp.).
4. Одринский, А.П. Фотоэлектрическая активность структурных дефектов монокристалла сегнетоэлектрика-полупроводника TlInS₂:La / А.П.Одринский [et al.] // ФТТ. – 2014. – Т. 56, №8. – С. 1554–1558.
5. Seyidov, M.-H.Yu Пироэлектрические свойства и дефекты структуры слоистого кристалла TlInS₂, легированного лантаном / М.-Н.Ю. Сейидов [et al.] // ФТТ. – 2014. – Т. 56, №10. – С. 1964–1969.
6. Seyidov, M.-H.Yu Effect of deep native defects on ultrasound propagation in TlInS₂ layered crystal / М.-Н.Ю. Сейидов [et al.] // Physica B: Physics of Condensed Matter. – 2016. – Vol. 497, – P. 86–92.
7. Ozdemir, S Characteristics of traps in TlInS₂ single crystals. / S. Ozdemir, M. Bucurgat // Current Applied Physics. – 2013. – Vol. 13, – P. 1948.
8. Seyidov, M.-H.Yu Identification of Intrinsic Deep Level Defects Responsible for Electret Behavior in TlGaSe₂ Layered Semiconductor / М.-Н.Ю. Сейидов [et al.] // Physica B. – 2016. – Vol. 483. – P. 82–89.
9. Одринский, А.П. Фотоэлектрическая релаксационная спектроскопия сегнетоэлектрика-полупроводника TlGaSe₂ / А.П. Одринский // ФТТ. – 2014. – Т. 56, № 2. – С. 331–336.
10. Одринский, А.П. Эффект модификации вклада термоэмиссии локализованных зарядов в релаксацию фотоотклика монокристалла TlGaSe₂. / А.П. Одринский // ФТТ. – 2020, – Т. 62, №4, – С. 596–602.
11. Одринский, А.П. Параметрический резонанс и фотогальванические токи в слоистом кристалле TlGaSe₂ / А.П. Одринский [et al.] // ФТТ. – 2017. – Т. 59, № 3. – С. 447–452.
12. Одринский, А.П. Фотогальванические токи и электрическая неоднородность 2-D структурированного монокристалла сегнетоэлектрика-полупроводника./ А.П. Одринский // ФТТ. – 2021, – Т. 63, №8, – С. 1024–1029.
13. Das, Saptarshi Where Does the Current Flow in Two-Dimensional Layered Systems? / Saptarshi Das and Joerg Appenzeller // Nano letters. – 2013. – Vol. 13(7). – P. 3396–3402.