

03.06.09.10

Процессы делокализации заряда в монокристалле $\text{TlGaSe}_2:\text{Nd}$ и размораживание электретных состояний

© А.П. Одринский

Институт технической акустики НАН Беларуси,
Витебск, Беларусь

E-mail: a.odrinsky@gmail.com

Поступила в Редакцию 24 октября 2023 г.

В окончательной редакции 24 октября 2023 г.

Принята к публикации 25 октября 2023 г.

На кристалле TlGaSe_2 , легированном примесью неодима, методом фотоэлектрической релаксационной спектроскопии обнаружено восемь процессов делокализации заряда. Идентифицированы процессы, связанные с собственными дефектами кристалла и атомами введенной примеси. Обнаружена модификация процессов термоэмиссии заряда, обусловленная формированием электретных состояний в кристалле. Рассмотрен процесс делокализации заряда в области температуры размораживания электретных состояний кристалла. Смещение графика Аррениуса данного процесса в легированном кристалле относительно нелегированного интерпретировано в рамках усиления термоэмиссии заряда в нелегированном кристалле вследствие туннелирования с участием фононов.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики-полупроводники, центры локализации заряда, 2D-кристаллы, усиление термоэмиссии.

DOI: 10.61011/FTT.2024.01.56932.238

1. Введение

2D-структурированные монокристаллы сегнетоэлектрика-полупроводника TlGaSe_2 привлекают интерес исследователей на протяжении ряда лет. При значительной анизотропии они обладают рядом уникальных физических свойств, перспективных для применения в оптоэлектронике [1,2], построении различных датчиков инфракрасного и видимого диапазона [3,4], рентгеновского и гамма-излучения [5], в качестве элементов памяти [6,7], и т.д. TlGaSe_2 предложен как прототип сегнетоэлектрического фотовольтаического преобразователя солнечной энергии принципиально нового типа [8]. При известных эффектах памяти [9], склонности к формированию неоднородности электрических [8,10], а также оптических характеристик [11], не ограниченной областью температуры сегнетоэлектрического состояния, кристалл является достаточно сложным объектом исследований [12]. Ключевой интерес в понимании электрических свойств TlGaSe_2 представляет изучение процессов локализации и делокализации носителей заряда на дефектах кристаллической структуры, включая специально введенные атомы примеси. Обусловлено это прежде всего способностью дефектов участвовать в формировании неоднородностей потенциального рельефа кристалла, играя роль центров локализации носителей заряда (ЦЛЗ). В настоящее время дефекты кристаллической структуры в TlGaSe_2 изучены недостаточно. Это касается как идентификации их природы, так и не менее важного вопроса [13] — понимания их роли и механизмов взаимодействия с иной электрической активностью кристалла, формально с ЦЛЗ не связанной:

поляризацией кристалла, фотовольтаическими токами, включая фотогальванические.

В настоящей работе изложены результаты изучения процессов делокализации заряда в кристалле TlGaSe_2 , легированном неодимом, на основе метода фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (photoinduced current transient spectroscopy или PICTS [14]). Используемое в фотоэлектрической релаксационной спектроскопии неравновесное заполнение ЦЛЗ путем фотовозбуждения кристалла дает уникальную возможность детального изучения электрической активности дефектов на фоне иной электрической активности кристалла, с привлечением при интерпретации результатов методик анализа, используемых в нестационарной спектроскопии глубоких уровней (deep level transient spectroscopy или DLTS), апробированных в полупроводниковом материаловедении для нужд электронной промышленности.

2. Образец и методика измерений

Кристалл TlGaSe_2 легирован неодимом в концентрации 0.1 at.%. Образец имел размеры $5.5 \times 3.8 \times 0.4$ mm и обладал проводимостью p -типа с концентрацией носителей заряда $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ при 300 К. Омические контакты формировались серебряной пастой на торцевых поверхностях образца, с частичным захватом фронтальной поверхности — плоскости скола. Геометрия протекания тока — вдоль слоев кристалла. Световое возбуждение падало перпендикулярно поверхности кристалла — плоскости скола. С целью получения более полной информации о наборе ЦЛЗ, следуя

подходу [15], использовалось возбуждение кристалла с различной энергией фотонов $h\nu = 1.12-2.0\text{ eV}$ при плотности потока фотонов на поверхности образца $\sim 10^{15}\text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Измерительная установка и методика измерений не отличались от описанных в работе [16]. Частота возбуждения образца выбиралась 25–50 Hz, при длительности светового импульса $\sim 3-6\text{ ms}$. Релаксация фотоотклика регистрировалась в процессе нагрева образца со скоростью $\sim 2\text{ K/min}$ в диапазоне температур 78–330 K с шагом 1 K. При регистрации проводилось поточечное накопление и усреднение кинетики сигнала (64 реализации), содержащей 2000 отсчетов, расположенных через фиксированный интервал времени.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны изменения с температурой амплитуды фотоотклика кристалла. Кривые пронумерованы в соответствии с последовательностью проведения испытаний, включавших соответственно регистрацию наборов данных об изменении с температурой кинетики фотоотклика кристалла. Прежде всего, отметим не повторяющийся характер зависимостей, полученных в условиях идентичного фотовозбуждения — кривые 1 и 4. Кривые 5 и 6, полученные на наборах данных, последовательно зарегистрированных при относительно небольшом различии в энергии фотонов светового возбуждения, также существенно различаются в низкотемпературной области $T < 200\text{ K}$, тогда как при более высокой температуре они практически совмещаются. В этой области они слабо отличаются также от зависимости 7, полученной при возбуждении с $h\nu \approx E_g$, где E_g — ширина запрещенной зоны. Здесь в наборах данных, соответствующих кривым 5–7, в области температуры 225–260 K заметны аномалии кинетики релаксации фотоотклика. Примеры наблюдаемых аномалий приведены на рис. 2.

При увеличении $h\nu$ фотовозбуждения аномалии такого вида, однако существенно более интенсивные, характерны и для нелегированного кристалла $TiGaSe_2$ [17]. На легированном неодимом образце аномалии релаксации фотоотклика заметны также в наборе данных, полученных при наименьшей энергии фотонов, но непосредственно после эксперимента с возбуждением $h\nu \approx E_g$, что хорошо согласуется с известными для $TiGaSe_2$ эффектами памяти [9,18], а также формированием электрической неоднородности кристалла [8].

На рис. 3 приведены образцы PICTS-спектров, полученные на кристалле $TiGaSe_2:Nd$. Прямыми линиями отмечено смещение температурной позиции максимума в наборе спектров, различающихся характеристическим временем релаксации — τ_i , где i — номер спектра. Это смещение обнаруживает активацию с температурой процесса делокализации заряда с ЦЛЗ. В спектрах кристалла можно уверенно идентифицировать восемь процессов, обозначенных на рисунке как N1–N8. На рис. 3, а

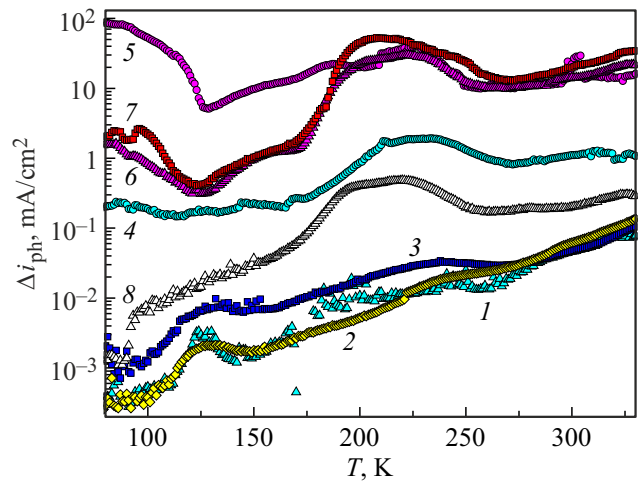


Рис. 1. Температурная зависимость плотности фототока. Кривые 1–8 получены при возбуждении с $h\nu = 1.68, 1.37, 1.23, 1.68, 1.88, 1.81, 2.00$ и 1.12 eV соответственно. Кривые нумерованы в последовательности проведения регистраций, скорректированы на постоянный поток фотонов с учетом спектра ДКСШ-500.

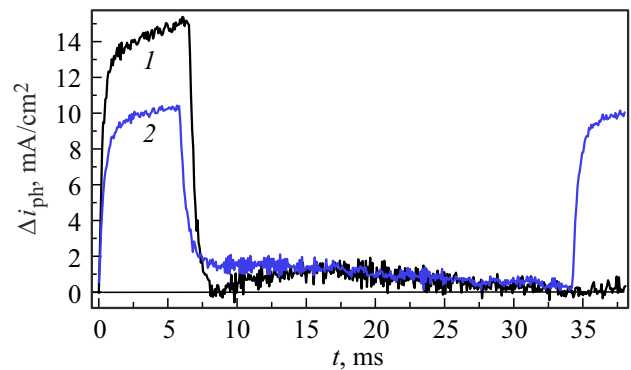


Рис. 2. Кинетика фотоотклика кристалла при температуре 257 K и возбуждении с $h\nu = 2.0\text{ eV}$ — кривая 1 и $h\nu = 1.88\text{ eV}$ — кривая 2.

доминирующее положение в спектрах занимает пик N8, расположенный в области $T > 270\text{ K}$, что свидетельствует о высокой интенсивности данного процесса и предполагает значительную концентрацию соответствующего ЦЛЗ [19]. Доминирующее положение пика N8 наблюдается в спектрах с большими значениями характеристического времени релаксации. С уменьшением τ_i высота пика N8 становится сравнимой с N7, и далее N7 доминирует. Такая же тенденция наблюдается и в наборе спектров, приведенном на рис. 3, б, полученном при возбуждении с более высокой энергией фотонов $h\nu = 1.68\text{ eV}$. При дальнейшем увеличении энергии фотонов светового возбуждения ($h\nu \geq 1.8\text{ eV}$) в спектрах доминирующее положение пика N7 с уменьшением τ_i выражено более отчетливо (см. рис. 3, в), тогда как вклад N8 практически не обнаруживается. Такая осо-

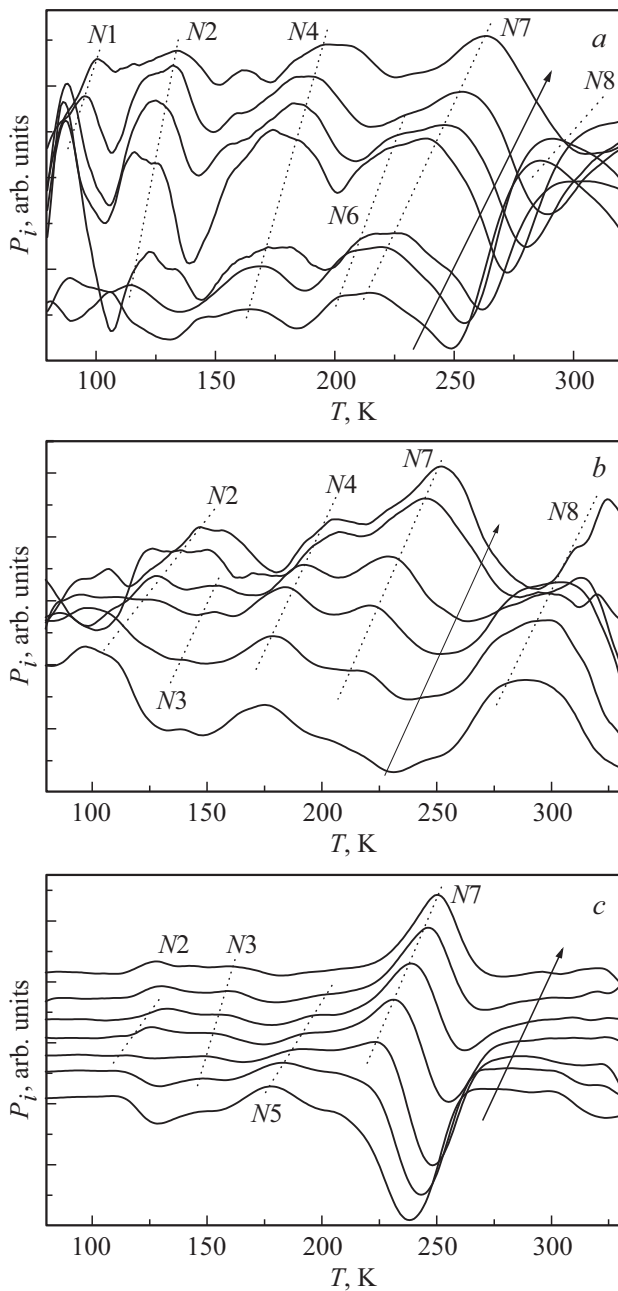


Рис. 3. Наборы PICTS-спектров, полученных на кристалле $\text{TiGaSe}_2:\text{Nd}$ при возбуждении с *a*) $h\nu = 1.37$ eV; *b*) $h\nu = 1.68$ eV; *c*) $h\nu = 1.88$ eV. Стрелкой указана последовательность характеристического времени релаксации спектра: *a*) 33.9, 20.1, 9.88, 3.23, 1.59, 0.82 и 0.35 ms; *b*) 33.9, 20.1, 11.9, 4.76, 1.18 и 0.66 ms; *c*) 31.4, 18.1, 9.88, 4.76, 2.46, 1.18 и 0.61 ms. Спектры нормированы по высоте доминирующего максимума и последовательно смещены по оси ординат.

бенность спектров, а именно рост высоты пика *N7* в сравнении с остальными пиками, наблюдается на всех наборах данных, содержащих заметные аномалии в кинетике релаксации.

На рис. 4 показана зависимость от температуры скорости делокализации заряда для процессов, обнару-

Параметры ЦЛЗ

Процесс	$\Delta_0 T$, К	E_i , eV	σ_i , cm^2
<i>N1</i>	79–104	0.12	$2.8 \cdot 10^{-16}$
<i>N2</i>	108–138	0.15	$1.1 \cdot 10^{-16}$
<i>N3</i>	127–156	0.22	$1.4 \cdot 10^{-15}$
<i>N4</i>	143–169	0.39	$1.4 \cdot 10^{-12}$
<i>N5</i>	166–200	0.37	$8.8 \cdot 10^{-13}$
<i>N6</i>	192–203	0.32	$4.9 \cdot 10^{-15}$
<i>N7</i>	218–256	0.44	$6.4 \cdot 10^{-14}$
<i>N8</i>	286–329	0.54	$4.7 \cdot 10^{-15}$

женных на кристалле $\text{TiGaSe}_2:\text{Nd}$. В таблице приведены диапазоны температуры регистрации процессов делокализации — $\Delta_0 T$ совместно с параметрами соответствующих ЦЛЗ, полученными по стандартной методике DLTS анализа: E_i — энергия термоактивации делокализации и σ_i — эффективное сечение захвата.

Положение графика Аррениуса процесса *N1* на рис. 4 можно сопоставить с процессом термоэмиссии с ЦЛЗ *A1* [16,20], наблюдавшимся ранее в области температуры фазового перехода из соразмерной сегнетоэлектрической фазы в несоизмерную, $T = 107$ К [10]. Также можно идентифицировать *N2* с описанным в работе [16,20] процессом *A2*, протекающим в области температуры фазового перехода из несоизмерной сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую $T = 120$ К [10]. График Аррениуса для процессов *N3* и *N5* хорошо сопоставим с ранее наблюдавшимися процессами *A3* и *A4* [16]. Это позволяет идентифицировать ЦЛЗ, ответственные за данные процессы, как собственные дефекты кристалла. С другой стороны, можно предположить, что *N4* и *N6*, для которых прямая Аррениуса заметно отличается от процессов в неле-

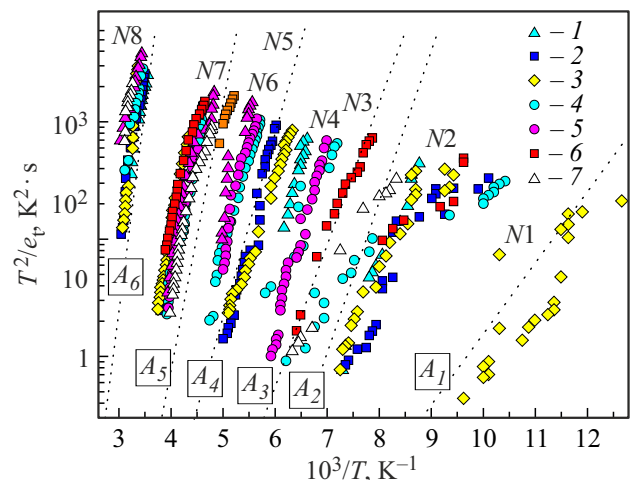


Рис. 4. Зависимость от температуры скорости делокализации заряда с ЦЛЗ в кристалле $\text{TiGaSe}_2:\text{Nd}$. Нумерация данных — в соответствии с рис. 1. Пунктиром показаны процессы делокализации *A1*–*A6* в нелегированном кристалле по данным [16].

гированном кристалле, обусловлены делокализацией центров, связанных с введением примеси неодима.

Для интенсивного процесса $N7$ прямая Аррениуса также заметно отличается от процессов, наблюдавшихся в нелегированном кристалле [16,20], однако его интерпретация как связанного с атомами примеси вызывает сомнения, что обсуждается в следующем разделе.

3.1. Обсуждение идентификации процесса $N7$

Для процесса $N7$ область $\Delta_0 T$ — регистрации делокализации заряда фактически совпадает с областью наблюдения аномалии релаксации фотоотклика нашего образца. В нелегированном $TiGaSe_2$ в данной области отмечалось изменение механизма, ответственного за аномалии реакции кристалла на свет [17]: при температуре ниже ~ 235 К доминирует реакция, обусловленная электретыми состояниями, формирующимися в низкотемпературной сегнетофазе, тогда как при более высокой температуре преобладает действие фотогальванической эдс. Это дает основания рассматривать данный процесс делокализации заряда как размораживание электретных состояний, сопоставив его с характерным собственным дефектом $TiGaSe_2$, вносящим весомый вклад в формирование электретных состояний кристалла.

Высокая интенсивность процессов $N7$ и $N8$ свидетельствует о значительной концентрации соответствующих ЦЛЗ, а следовательно, способности этих процессов существенно влиять на электрические свойства кристалла в целом. Пик $N8$ присутствует в спектрах, полученных с возбуждением фотонами $h\nu < 1.8$ eV, и не наблюдается в спектрах, полученных с возбуждением, провоцирующим аномалию в релаксации (при $h\nu \geq 1.8$ eV). И это хорошо согласуется с электрической неоднородностью исследуемого образца, когда в процессе релаксации термоэмиссия локализованного заряда сопровождается пространственным перемещением свободных носителей заряда во внутреннем поле кристалла. С этой точки зрения, регистрация вклада процессов $N1-N5$ в релаксацию фотоотклика не в каждом из проведенных испытаний также согласуется с электрической неоднородностью образца. Высокая интенсивность процесса $N7$ отмечается не в каждом из проведенных испытаний, что также согласуется с электрической неоднородностью кристалла. Однако он устойчиво регистрируется вне зависимости от выбора $h\nu$ возбуждения, что более сопоставимо с предположением о $N7$ как характерном для $TiGaSe_2$ центре, чем ЦЛЗ, обусловленном атомами введенной примеси.

При возбуждении, провоцирующем аномалию фотоотклика ($h\nu \geq 1.8$ eV), на $TiGaSe_2:Nd$ наблюдаются аномалии релаксации, которые значительно ослаблены в сравнении с нелегированным кристаллом. Исследования эволюции реакции на фотовозбуждение с $h\nu \geq E_g$ в изотермическом режиме по методикам из работы [8] подтвердили существенное ослабление эффектов, связанных с действием фотогальванической эдс в легиро-

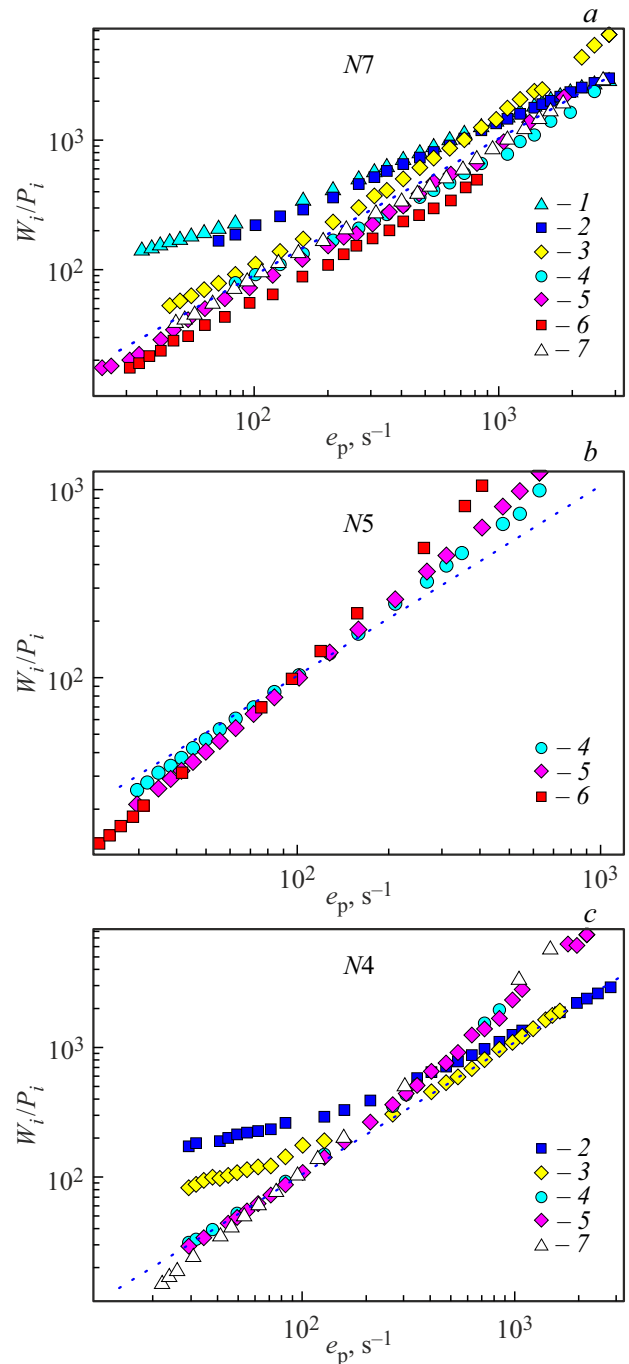


Рис. 5. Зависимость высоты максимума P_i от скорости делокализации заряда e_p для процессов а) $N7$, б) $N5$ и в) $N4$. Кривые пронумерованы в соответствии с рис. 1.

ванном неодимом образце. Вместе с тем возбуждение с $h\nu \geq 1.8$ eV ведет к характерному виду спектров, приведенному на рис. 3, с.

На рис. 5 представлен анализ вариации высоты пика в наборе спектров по методике [21]. Для процесса $N7$ заметны вариации диаграммы $[W_i/P_i, e_{ii}]$, где W_i, P_i и e_{ii} — характеристический коэффициент, высота пика и характеристическая скорость термоэмиссии i -го спектра.

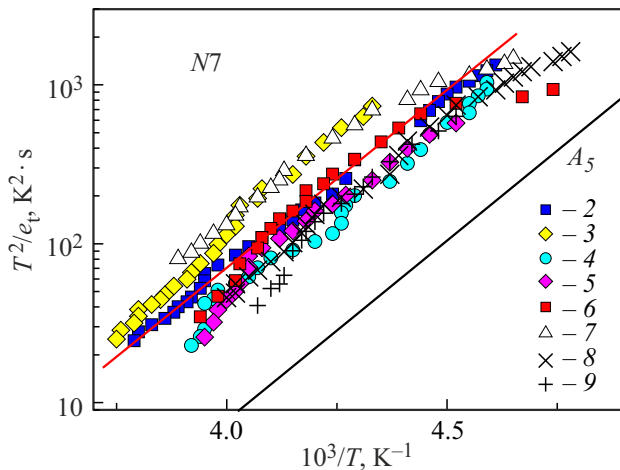


Рис. 6. Изменение с температурной скорости делокализации процесса $N7$ в кристалле $\text{TlGaSe}_2:\text{Nd}$ — зависимости 2–7 (пронумерованы в соответствии с рис. 1), $\text{TlGaSe}_2:\text{Tb}$ — зависимость 8. Зависимость 9 получена на нелегированном кристалле в режиме инжекции с контактов. Пунктиром показан процесс $A5$ по данным [16].

Однако для данных, полученных в режиме возбуждения, провоцирующем аномалии реакции кристалла, зависимости линейны, что характерно для релаксации фототока, определяющейся исключительно рекомбинацией неравновесных свободных носителей заряда [21]: $P_i/W_i \propto n_{i0} = N_i/(1 + \beta)$, где N_i — концентрация ЦЛЗ, n_{i0} — концентрация неравновесно заполненных ЦЛЗ, β — соотношение скоростей заполнения и опустошения ЦЛЗ. В то же время для остальных процессов при возбуждении $h\nu \geq 1.8 \text{ eV}$ диаграмма $[W_i/P_i, e_{ti}]$ исключительно сверхлинейна, как на примерах, приведенных на рис. 5, *b* и *c*. Это свидетельствует о модификации вклада в релаксацию фотоотклика кристалла всех процессов делокализации, за исключением процесса $N7$. Это объясняет характерный вид спектров на рис. 3, *c*. Такого типа диаграмма (завышение вклада при малых значениях характеристического времени релаксации — τ_i и его подавление при больших значениях τ_i) наблюдалась ранее на электрически неоднородном кристалле TlGaSe_2 [22]. Она возникает в результате дополнительного вклада в релаксацию сигнала диффузионных токов фотоинжектированных носителей из высокоомных областей кристалла. Отсутствие модификации для $N7$ хорошо согласуется с особой ролью данного процесса, его интерпретацией как размораживание электрета и интерпретацией соответствующего ЦЛЗ как вносящего весомый вклад в формирование электретных состояний кристалла.

Характерный вид спектров (см. рис. 3, *c*), наблюдался и на иных образцах, легированных редкоземельными элементами (Er, Tb), а также на образце не легированного TlGaSe_2 в режиме инжекции с контактов и возбуждении с $h\nu \geq 1.8 \text{ eV}$. На рис. 6 показано сравнение

графика Аррениуса процесса $N7$ с этими данными. Заметно хорошее соответствие зависимостей 2–7 с данными для $\text{TlGaSe}_2:\text{Tb}$ (зависимость 8) и нелегированного кристалла (зависимость 9).

Таким образом, есть веские основания считать регистрируемый в области температуры $T \approx 220\text{--}260 \text{ K}$ процесс делокализации заряда обусловленным ЦЛЗ, характерным для TlGaSe_2 , вносящим весомый вклад в формирование электретных состояний кристалла, и сопоставить $N7$ с ЦЛЗ $A5$ [16]. Однако, принимая это предположение, необходимо объяснить довольно значительное смещение прямой Аррениуса, составляющее $\sim 20 \text{ K}$. Это смещение следует интерпретировать в рамках усиления термоэмиссии заряда в нелегированном кристалле.

3.2. Эффект усиления термоэмиссии

Оценим влияние электрического поля на процесс делокализации заряда [23]. Известно, что вследствие эффекта Пула–Френкеля [24] наложение внешнего электрического поля с напряженностью E ведет к усилению термоэмиссии $e(E)/e(0) \propto \exp(E_{\text{PF}}/k_B T)$, где $e(E)$ и $e(0)$ — скорость делокализации заряда в присутствии электрического поля и без поля соответственно, k_B — постоянная Больцмана, T — температура. Энергия Пула–Френкеля $E_{\text{PF}} = 2(z e^3 E / \epsilon)^{1/2}$, где z — зарядовое состояние ЦЛЗ, e — элементарный заряд, ϵ — диэлектрическая постоянная. Тогда присутствие в кристалле внутреннего электрического поля, ведущего к интенсификации процесса делокализации заряда, может объяснить смещение прямой Аррениуса по температурной шкале. Смещение можно оценить: $\Delta T \approx -E_{\text{PF}} T_0 / E_t$, где E_t — энергия активации делокализации заряда с ЦЛЗ, T_0 — температура наблюдения заданной скорости делокализации в отсутствие электрического поля. Полагая относительную диэлектрическую постоянную ~ 5 [25], $z = 1$, напряженность поля 200 V/cm , при $T_0 \approx 250 \text{ K}$ получим $E_{\text{PF}} \approx 17 \text{ meV}$, что ведет к усилению термоэмиссии в 2.2 раза и дает оценку смещения $\Delta T \approx 10.6 \text{ K}$. Таким образом, оценка усиления термоэмиссии процесса $N7$ вследствие эффекта Пула–Френкеля не объясняет сдвиг по температуре графика Аррениуса. С другой стороны, существенно более строгая зависимость усиления термоэмиссии от напряженности поля для эффекта туннелирования с участием фононов [23] способна объяснить температурный сдвиг графика Аррениуса. Это предположение хорошо согласуется с известными наблюдениями эффектов памяти для акустической эмиссии в данной области температуры [26].

4. Заключение

На легированном неодимом кристалле обнаружены не наблюдавшиеся ранее процессы делокализации заряда в

областях температуры 143–169 и 192–203 К, предположительно связанные с атомами введенной примеси. Можно заключить, что введение в кристалл неодима ведет к образованию ЦЛЗ, ответственных за эти процессы, представляющие собой либо дефект внедрения атома примеси, либо дефект замещения, либо более сложный комплексный дефект с участием атома примеси.

Установлено, что легирование кристалла неодимом ведет к ослаблению эффектов, связанных с действием фотогальванической эдс в кристалле.

Показано, что процесс делокализации заряда в области температуры $T \approx 220\text{--}260$ К обусловлен характерными для кристалла центрами локализации заряда, вносящими весомый вклад в формирование электретных состояний кристалла. Смещение графика Аррениуса для данного процесса относительно данных, полученных на нелегированном кристалле $TiGaSe_2$, интерпретировано как усиление термоэмиссии на нелегированном кристалле вследствие эффекта туннелирования с участием фононов.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках финансирования Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, грант № Ф22-127.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Qasrawi, A. Omar, A.M. Azamtta, N.M. Gasanly. *Phys. Status Solidi A* **212**, 3, 600 (2015).
- [2] V. Grivickas, V. Bikbajevs, K. Gulbinas, V. Gavryushin, J. Linnros. *Phys. Status Solidi B* **244**, 12, 4624 (2007).
- [3] S. Yang, M. Wu, H. Wang, H. Cai, L. Huang, C. Jiang, S. Tongay. *2D Mater.* **4**, 3, 035021 (2017).
- [4] V. Grivickas, K. Gulbinas, V. Gavryushin, V. Bikbajevs, O.V. Korolik, A.V. Mazanik, A.K. Fedotov. *Phys. Status Solidi RRL* **8**, 7, 639 (2014).
- [5] S. Johnsen, Z. Liu, J.A. Peters, J.-H. Song, S. Nguyen, C.D. Malliakas, H. Jin, A.J. Freeman, B.W. Wessels, M.G. Kanatzidis. *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 26, 10030 (2011).
- [6] M.-H.Yu. Seyidov, R.A. Suleymanov, E. Balaban, Y. Sale. *J. Appl. Phys.* **105**, 15, 152106 (2014).
- [7] B.B. Kandemir, S. Gören, M. Erdem, A. Cengiz, Y. Şale, A.K. Fedotov, T.G. Mammadov, M.-H.Yu. Seyidov. *Semicond. Sci. Technol.* **35**, 12, 125010 (2020).
- [8] А.П. Одринский. *ФТТ* **63**, 8, 1024 (2021). [A.P. Odrinskii. *Phys. Solid State* **63**, 8, 1288 (2021)].
- [9] M.-H.Yu. Seyidov, R.A. Suleymanov, E. Balaban, Y. Sale. *Ferroelectrics* **481**, 1, 77 (2015).
- [10] V. Grivickas, A. Odrinski, V. Bikbajevs, K. Gulbinas. *Phys. Status Solidi B* **250**, 1, 160 (2013).
- [11] N. Mamedov, Y. Shim, N. Yamamoto. *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 11S, 7254 (2002).
- [12] A.M. Panich. *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 29, 293202 (2008).
- [13] E.R. Weber. *Physica B* **340–342**, 1 (2003).
- [14] C. Hurter, M. Boilou, A. Mitonneau, D. Bois. *Appl. Phys. Lett.* **32**, 12, 821 (1978).
- [15] K. Ikeda, Y. Ishii. *Jpn. J. Appl. Phys.* **26**, 3R, 377 (1987).
- [16] M.H.Y. Seyidov, F.A. Mikailzade, T. Uzun, A.P. Odrinsky, E. Yakar, V.B. Aliyeva, S.S. Babayev, T.G. Mammadov. *Physica B* **483**, 82 (2016).
- [17] А.П. Одринский, М.-Н.Ю. Сейидов, Т.Г. Мамедов, В.Б. Алиева. *ФТТ* **59**, 3, 447 (2017). [A.P. Odrinskii, M.-H.Yu. Seyidov, T.G. Mammadov, V.B. Alieva. *Phys. Solid State* **59**, 3, 457 (2017)].
- [18] M.-H.Yu. Seyidov, R.A. Suleymanov, E. Balaban, Y. Sale. *J. Appl. Phys.* **114**, 9, 093706 (2013).
- [19] А.П. Одринский. *ФТП* **39**, 6, 660 (2005). [A.P. Odrinskii. *Semicond.* **39**, 6, 629 (2005)].
- [20] А.П. Одринский. *ФТТ* **56**, 2, 331 (2014). [A.P. Odrinskii. *Phys. Solid State* **56**, 2, 335 (2014)].
- [21] А.П. Одринский, Т.Г. Мамедов, М.-Н.Ю. Сейидов, В.Б. Алиева. *ФТТ* **56**, 8, 1554 (2014). [A.P. Odrinskii, T.G. Mammadov, M.-H.Yu. Seyidov, V.B. Alieva. *Phys. Solid State* **56**, 8, 1605 (2014)].
- [22] А.П. Одринский. *ФТТ* **62**, 4, 596 (2020). [A.P. Odrinskii. *Phys. Solid State* **62**, 4, 682 (2020)].
- [23] S.D. Ganichev, E. Ziemann, W. Prettl, I.N. Yassievich, A.A. Istratov, E.R. Weber. *Phys. Rev. B* **61**, 15, 10361 (2000).
- [24] J. Frenkel. *Phys. Rev.* **54**, 8, 647 (1938).
- [25] F. Salehli, Y. Bakış, M.-H.Yu. Seyidov, R.A. Suleymanov. *Semicond. Sci. Technol.* **22**, 8, 843 (2007).
- [26] Ю.П. Гололобов, В.М. Перга, И.Н. Саливонов, Е.Е. Щиголь. *ФТТ* **34**, 1, 115 (1992).

Редактор Е.В. Толстякова