

08,06

Фотовольтаические токи и активность структурных дефектов монокристалла сегнетоэлектрика — полупроводника $\text{TlInS}_2 : \text{La}$

© А.П. Одринский¹, М.-Н. Ю. Сейидов^{2,3}, Р.А. Сулейманов^{2,3}, Т.Г. Мамедов², В.Б. Алиева²

¹ Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь

² Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

³ Department of Physics, Gebze Institute of Technology, Gebze, Kocaeli, Turkey

E-mail: odra@mail333.com

(Поступила в Редакцию 22 июля 2015 г.)

Приведены результаты исследования электрически активных дефектов кристаллической структуры в слоистом кристалле сегнетоэлектрика-полупроводника $\text{TlInS}_2 : \text{La}$ методом фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (PICTS). Обнаружены состояния кристалла, различающиеся величиной фотоотклика, изменяющегося в пределах четырех порядков, что интерпретируется на основе различия в состоянии доменной структуры кристалла. Обсуждаются особенности регистрации термоэмиссии с дефектов при наличии дополнительного вклада фотовольтаической составляющей реакции кристалла на возбуждение светом.

1. Введение

Расширение практического применения сегнетоэлектрических материалов [1] стимулирует углубление понимания процессов, происходящих в кристалле, а также развитие соответствующих методик и методов исследования их электрических характеристик. В настоящее время электрическая активность дефектов в сегнетоэлектрических кристаллах является еще слабоизученной областью исследований. Использование температурной зависимости релаксации фотоотклика для изучения изменений зарядовых состояний центров локализации заряда в кристалле TlInS_2 [2–6] на основе метода фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (PICTS [7]) продемонстрировало перспективность такого подхода при изучении электрически активных дефектов кристаллической структуры в сегнетоэлектриках-полупроводниках. Изменение с температурой термоэмиссии с центров сопоставимо с данными температурной зависимости поляризационных характеристик кристалла [2], результатами термостимулированной проводимости [8] и зависимостью от температуры пирозлектрического тока кристалла [5]. При изучении электрически активных дефектов кристаллической структуры слоистых кристаллов $\text{TlInS}_2 : \text{La}$ было обнаружено явление уменьшения вклада термоэмиссии носителей заряда в кинетику релаксации фотоотклика [3]. Эффект наблюдался на низкотемпературном краю области регистрации изменения зарядового состояния центра в виде снижения высоты PICTS-максимума в спектрах, соответствующих более длинным характеристическим временам релаксации. Эффект сопровождался также увеличением характеристического времени быстрой релаксации фотоотклика. В настоящей работе представлены результаты

дальнейшего исследования электрической активности дефектов в кристалле $\text{TlInS}_2 : \text{La}$ на основе фотоэлектрической релаксационной спектроскопии. Комплексный анализ реакции образца на возбуждение светом позволил пересмотреть природу модификации вклада термоэмиссии с дефектов в релаксацию фотоотклика кристалла.

2. Условия эксперимента

В исследованиях использованы образец и условия эксперимента, не отличающиеся от описанных в [3]. Омические контакты формировались пайкой индием на торцевых поверхностях образца. Геометрия протекания тока — вдоль слоев кристалла. Качество контактов оценивалось по вольт-амперной характеристике, которая была линейной при комнатной температуре. Кристалл имел p -тип проводимости с концентрацией носителей заряда $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ при комнатной температуре. Световое возбуждение образца проводилось перпендикулярно поверхности кристалла — плоскости скола. Плотность потока фотонов на поверхности образца составляла $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Измерительная установка и методика измерений подробно описаны в [4]. Исследования проводились в циклическом режиме. Каждый цикл включал три последовательно проведенные процедуры быстрого охлаждения кристалла с последующей регистрацией данных в процессе медленного нагрева со скоростью $\sim 2 \text{ K/min}$. Диапазон температур термосканирования 78–330 К.

При регистрации фотоотклика использовалась типичная для измерений фототока схема первичной цепи с подачей внешнего напряжения 50 В на последовательно соединенные образец и сопротивление нагрузки

0.1–1.0 МΩ. Сигнал изменения падения напряжения на сопротивлении нагрузки после усиления широкополосным усилителем подавался на аналого-цифровой преобразователь, связанный с персональным компьютером. Регистрация данных включала поточечное накопление и усреднение кинетики релаксации фотоотклика (60 реализаций), содержащей 2000 отсчетов, расположенных через фиксированный интервал времени $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ s. Отдельно регистрировалась кинетика фотоотклика, содержащая 500 отсчетов, расположенных через фиксированный интервал времени $\Delta t = 3 \cdot 10^{-4}$ s. Методика анализа данных регистрации подробно описана [9].

3. Результаты

В процессе исследований обнаружены состояния кристалла, значительно различающиеся реакцией на световое возбуждение. На рис. 1 приведены примеры зависимости величины фотоотклика кристалла¹ от температуры. Кривые *I* и *I'* получены в цикле испытаний с использованием фотовозбуждения с энергией фотонов $h\nu = 2.28\text{--}2.44$ eV. Кривые *2* и *2'* получены в повторном цикле, проведенном через 16 h с возбуждением $h\nu = 2.24\text{--}2.40$ eV. Кривые *I* и *I'*, *2* и *2'*, а также *3* и *3'* получены при первой и третьей регистрациях данных одного цикла соответственно. Кривые *3* и *3'* получены в цикле, проведенном через 120 h с $h\nu = 2.24\text{--}2.40$ eV. Можно отметить существенную разницу положений кривых *I* и *3*, соответствующих различным циклам измерений. Для них различие величины фотоотклика при температуре ~ 180 K превышает четыре порядка, тогда как в цикле между отдельными регистрациями разница не превышает одного порядка во всем диапазоне температур регистрации данных. Так, в высокофоточувствительном состоянии (обозначим это состояние как I) в цикле, соответствующем кривой *I* (первая регистрация данных в цикле), изменение с температурой величины фотоотклика при второй регистрации данных отличалось значительно меньше: в сегнетофазе различие составляло не более 15%, а в парафазе — 2.5 раза. При третьей регистрации (кривая *I'*) начиная с температуры ~ 135 K фотоотклик уменьшался приблизительно на порядок величины. В другом цикле, также соответствующем состоянию I, начиная с температуры ~ 160 K наблюдается существенное уменьшение фотоотклика между первой регистрацией (кривая *2*) и второй и третьей регистрациями, для которых зависимость практически повторялась (кривая *2'*). Таким образом, для состояния I при повторении регистрации в цикле можно отметить определенную тенденцию: уменьшение величины фотоотклика с температурой. Для слабофоточувствительного состояния (обозначим это состояние II) различия между

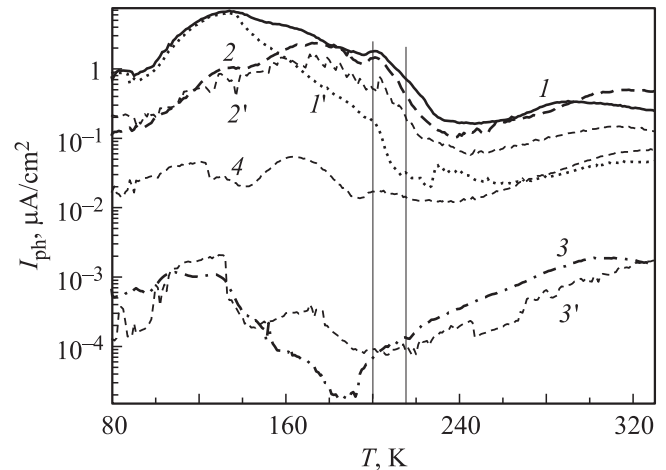


Рис. 1. Зависимость от температуры фотоотклика кристалла в состоянии I (кривые *I*, *2*) и в состоянии II (кривая *3*). *4* — данные [3]. Описание кривых см. в тексте. Вертикальными линиями отмечена температура ФП.

отдельными регистрациями в цикле также находились в пределах одного порядка величины (см. кривые *3* и *3'*), однако имели, скорее, бессистемный характер.

3.1. Результаты фотэлектрической релаксационной спектроскопии. На рис. 2 приведено сопоставление PICTS-спектров, полученных в состояниях I и II, а также по данным [3]. Можно отметить стабильное воспроизведение положения пиков в области температур сегнетоэлектрического состояния кристалла. Соответствующая состоянию II кривая *3* носит наименее структурированный характер, что вполне объяснимо, если учесть, что в данном случае искажения спектров обусловлены относительно малой величиной сигнала фотоотклика, сравнимой с уровнем шумов. Тем не менее и в данном состоянии смещение пика в наборе спектров позволяет с определенной степенью уверенности провести его идентификацию и сравнить регистрацию термоэмиссии дефектов в зависимости от состояния кристалла. На рис. 2 можно отметить общее снижение интенсивности спектров для кристалла в состоянии I, сильнее выраженное для спектров, соответствующих более длительным характеристическим временам релаксации (ср. рис. 2, *a* и *b*). Особенностью кривых *1* и *2* является также отсутствие максимума B5, наблюдающегося на кривой *4* в области температур, включающей температуры фазовых переходов (ФП) из соразмерной сегнетоэлектрической фазы в несообразную ($T_c = 201$ K), а затем в параэлектрическую фазу ($T_i = 216$ K) [10]. Максимум B5 регистрируется и в спектрах, соответствующих низкофоточувствительному состоянию II (кривая *3*), при этом он занимает доминирующее положение в спектрах, соответствующих более длительным характеристическим временам релаксации. Вблизи области температур ФП наблюдался также максимум термостимулированного тока [7].

¹ Величина фотоотклика определялась как максимальное изменение падения напряжения на сопротивлении нагрузки (3.3–330 KΩ) при возбуждении образца светом в течение фиксированного интервала времени.

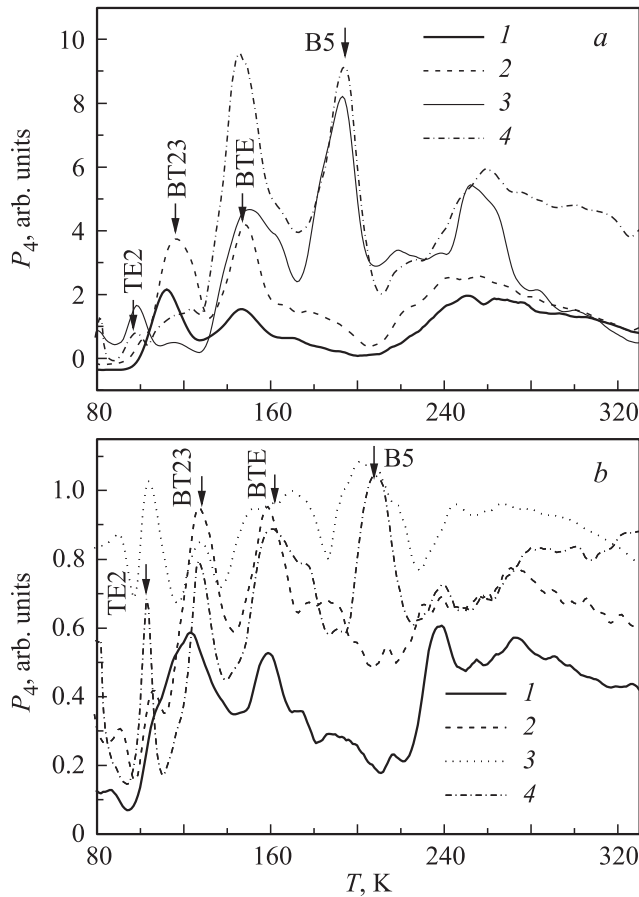


Рис. 2. Спектры кристалла $\text{TlInS}_2:\text{La}$, соответствующие характеристическому времени релаксации $\tau_x = 21.6$ (а) и 2.2 мс (б). Спектры сглажены усреднением по десяти точкам. Кривые пронумерованы в соответствии с рис. 1. Стрелками отмечены температуры регистрации τ_x по данным [3].

Сравнивая спектры, соответствующие различным состояниям кристалла, можно отметить вариации соотношения высоты пиков. Так, на кривой 1 доминирует пик ВТ23. Температурное положение пика оказывается несколько смещенным в низкотемпературную сторону так, что соседний пик ТЕ2 можно различить только в спектре, соответствующем более высокой скорости термоэмиссии в виде полки на низкотемпературном крыле пика ВТ23. В то же время оба пика ТЕ2 и ВТ23 хорошо различимы на кривой 2 в спектре, полученном в другом цикле, соответствующем состоянию I. На кривой 2 (рис. 2, б) высота ВТ23 сопоставима с высотой доминирующего пика ВТЕ, а высота ТЕ2 вдвое меньше ВТЕ. В низкочувствительном состоянии (кривая 3) доминируют два интенсивных пика: В5 и ВТЕ, при этом интенсивность ВТЕ приблизительно вдвое меньше в сравнении с В5, тогда как для кривой 4 (рис. 2, а) их интенсивности сопоставимы.

По интенсивности пика можно судить о концентрации неравновесно заполненных дефектов, поэтому она может использоваться для сравнительной оценки концен-

трации дефектов в кристалле [11]. Изменение высоты пика в наборе PICTS-спектров описывается формулой [12]

$$p_i = W_i p_{i0}(T)/g_i = (W_i/g_i)N_i/(1 + \beta). \quad (1)$$

Здесь W_i — характеристический коэффициент i -го спектра, g_i — скорость генерации неравновесных дырок, p_{i0} — концентрация неравновесно заполненных дефектов при стационарном световом возбуждении, N_i — концентрация дефектов, β — отношение скоростей опустошения и заполнения дефекта,

$$\beta = (e_t + e_p^o)/(p_0 C_{pt} + e_n^o), \quad (2)$$

где e_n^o — скорость оптического заполнения дефекта (переход электрона с дефекта в зону проводимости с поглощением фотона), e_p^o — скорость оптического опустошения дефекта (переход электрона из валентной зоны на дефект с поглощением фотона), C_{pt} — коэффициент захвата дырки из валентной зоны, p_0 — концентрация неравновесных свободных дырок. В приближении пренебрежения тепловым захватом свободных носителей, рассматривая e_n^o и e_p^o как не зависящие от температуры параметры, можно ожидать, что вариация высоты пика в наборе спектров будет определяться зависимостью от температуры скорости термоэмиссии.

Вариации высоты пиков в наборе PICTS-спектров были исследованы с помощью линеаризации уравнения (1) относительно скорости термоэмиссии. Соответствующие диаграммы $[W_i/P_i, e_{ii}]$ для дефектов, регистрируемых в области сегнетоэлектрического состояния кристалла, приведены на рис. 3. Заметно, что предполагаемая в соответствии с уравнениями (1) и (2) линейная зависимость наблюдается только для В5 и в одном случае (кривая 4) для ВТЕ, тогда как по остальным данным диаграмма явно не линейна. Различия положений кривых 2 и 4 на рис. 3, с заметны в области малых значений e_{ii} , что наблюдалось ранее для ТЕ2 и ВТ23 и было интерпретировано как уменьшение вклада термоэмиссии в релаксацию фотоотклика [3]. Однако для ВТЕ кривые 2 и 4 различаются и в области больших значений e_{ii} , так что явление следует характеризовать как модификацию вклада термоэмиссии в релаксацию фотоотклика кристалла. Согласно приведенным на рис. 3 диаграммам, можно предположить, что в области температур сегнетоэлектрического состояния кристалла модификация вклада термоэмиссии дефектов в релаксацию фотоотклика — довольно распространенное явление.

3.2. Анализ кинетики фотоотклика. Обнаруженные состояния кристалла различались также кинетикой фотоотклика, в частности заметными для состояния I более резкими фронтами нарастания и спада, а также аномалиями кинетики нарастания фотоотклика, заметными в окрестности температур ФП. На рис. 4 представлены изменения с температурой характеристического времени τ_0 быстрого спада, определявшегося по тангенсу угла наклона начального участка кинетики

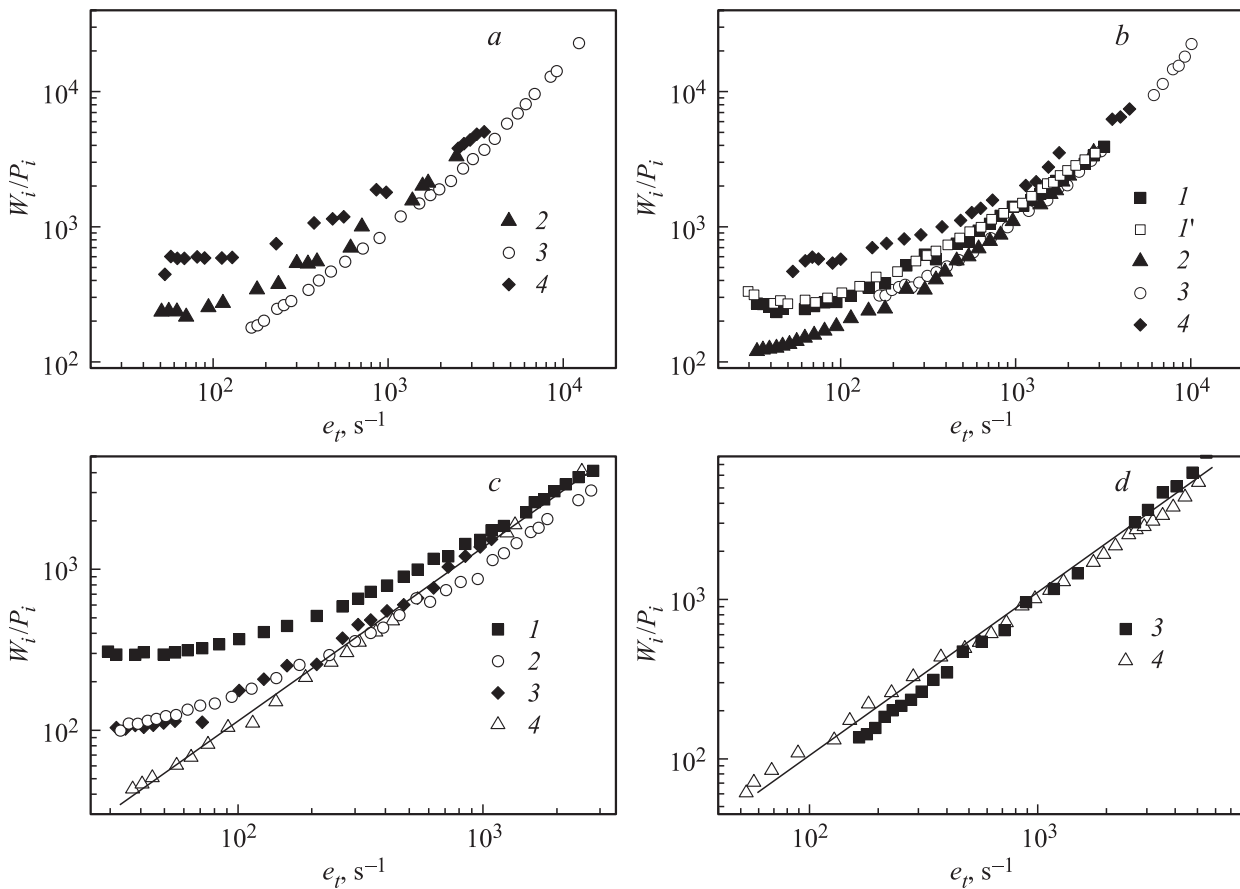


Рис. 3. Диаграмма $[W_i/P_i, e_{pi}]$ регистрации перезарядки дефекта TE2 (a), VT23 (b), VTE (c), B5 (d). Зависимости пронумерованы в соответствии с рис. 1.

релаксации фотоотклика. На зависимостях можно отметить некоторую структуру: воспроизводимость размытых максимумов на участках, по температуре совпадающих с диапазонами регистрации изменений зарядовых состояний дефектов VT23 и VTE [5,6]. Можно также отметить, что на рис. 4 характерное время быстрой релаксации различается в пределах, не превышающих порядка величины. Этого недостаточно для объяснения различия фотоотклика обнаруженных состояний кристалла до четырех порядков величины (рис. 1). Кроме того, наименьшие значения τ_0 соответствуют высокочувствительному состоянию, что не сопоставимо с интерпретацией τ_0 как времени жизни свободных носителей заряда [3]. Обращает на себя внимание и тенденция увеличения τ_0 с уменьшением величины фотоотклика, которую можно заметить, сравнивая попарно зависимости 1 и 1', а также 2 и 2' на рис. 1 и 4 (регистрации из одного цикла для кристалла в состоянии I).

Поскольку в процессе испытаний условия светового возбуждения практически не изменялись, можно полагать, что и концентрация генерируемых светом неравновесных носителей заряда, определяющая изменения проводимости образца, не могла существенно изменяться в зависимости от состояния кристалла. Тогда различия

в величине фотоотклика следует интерпретировать как обусловленные различием в состоянии доменной структуры кристалла. Отметим, что напряженность приложенного к образцу внешнего электрического поля также

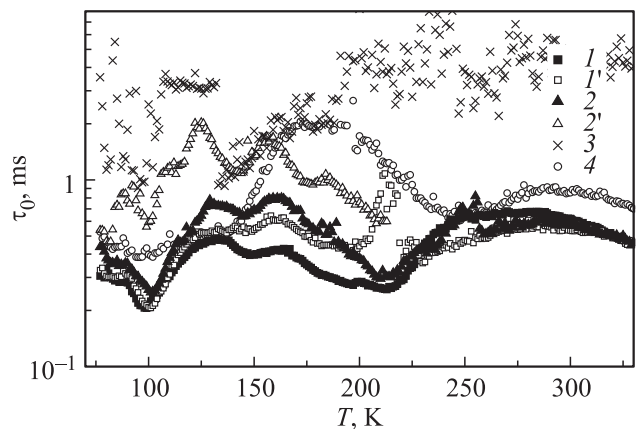


Рис. 4. Зависимость от температуры характеристического времени спада фотоотклика кристалла. Кривые 1, 2 соответствуют состоянию I; 3, 4 — состоянию II. Кривые 1 и 1', 2 и 2' получены в одном цикле при первой и третьей регистрациях данных соответственно.

практически не изменялась. Это дает основания надеяться, что возбужденное светом состояние кристалла можно представить как преимущественное изменение концентрации свободных носителей при минимально возможном возмущении доменной структуры. Если судить об изменении состояния доменной структуры по изменению величины фотоотклика между отдельными регистрациями в цикле, это условие можно считать в принципе выполняющимся. Опираясь на это, попытаемся выяснить, как доменная структура могла влиять на величину фотоотклика.

О состоянии доменной структуры принято судить, исследуя поляризацию образца или наличие некомпенсированного внутреннего электрического поля в кристалле. При освещении полупроводника внутреннее поле способно индуцировать фотовольтаический ток, разделяя генерируемые светом свободные носители заряда. Отметим, что в полупроводниках, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами, наблюдались и иные фотовольтаические явления, связываемые с анизотропией кристаллической решетки и т.д. [13,14]. Фотовольтаические эффекты различного типа имеют характерную особенность: кинетика их развития связана с процессом светового возбуждения вполне определенным образом. В силу своей природы фотовольтаические токи пропорциональны скорости фотогенерации свободных носителей [14,15], что отличает их от тока проводимости кристалла, имеющего лишь интегральную зависимость от скорости фотогенерации. Эту особенность реакции кристалла на световое возбуждение можно использовать для обнаружения вклада фотогальванических токов в регистрируемый сигнал. В частности, при использовавшихся в наших исследованиях импульсах светового возбуждения типа стробов характерные времена нарастания и спада фотовольтаического тока будут определяться длительностью соответствующего фронта строба светового возбуждения. Можно отметить, что на рис. 4 для состояния I значения τ_0 близки к длительности фронтов нарастания-спада импульса светового возбуждения ~ 0.2 ms. Смешанный характер фотоотклика или, иными словами, присутствие в регистрируемом сигнале ощутимой фотовольтаической составляющей хорошо согласуются с отмечавшейся выше тенденцией увеличения τ_0 с уменьшением величины фотоотклика, характерной для состояния I. Присутствие фотовольтаической составляющей объясняет также увеличение фотоотклика до четырех порядков величины в состоянии I по сравнению с наблюдаемым для состояния II (рис. 1) в установленных выше рамках: значительные изменения величины фотоотклика между циклами связаны с различием в состоянии доменной структуры кристалла.

В пользу присутствия фотовольтаической составляющей свидетельствуют и аномалии кинетики нарастания фотоотклика, характерные для температуры в окрестности ФП, наблюдающиеся для кристалла в состоянии I. На рис. 5 приведены примеры кинетики, полученные

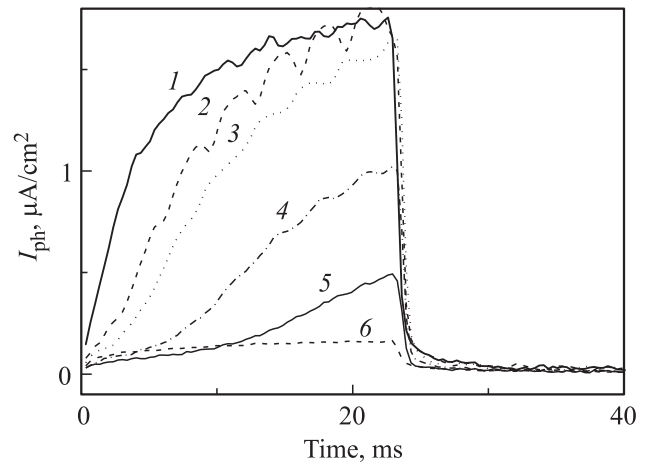


Рис. 5. Кинетика фотоотклика, зарегистрированная при различных температурах. T , К: 1 — 190, 2 — 201, 3 — 204, 4 — 210, 5 — 220, 6 — 240.

последовательно в температурных точках из окрестности ФП. Заметно изменение с температурой кинетики нарастания фотоотклика, не сопоставимое с изменением проводимости кристалла, обусловленной фотогенерацией свободных носителей заряда. В данном случае нарастание фотоотклика можно объяснить присутствием дополнительного вклада, отличающегося более медленной скоростью роста. Сравнив фотоотклик при $T = 240$ К и при более низкой температуре, можно оценить доминирующий характер дополнительного вклада, приблизительно на порядок превышающего фотоотклик при $T = 240$ К. В интервале температур 190–220 К быстрая составляющая релаксации фотоотклика практически не изменяется ($\sim 2 \cdot 10^{-4}$ s) и хорошо соответствует фотовольтаическому характеру дополнительного вклада в реакцию кристалла на возбуждение светом.

4. Обсуждение результатов

Присутствие фотовольтаического тока в регистрируемом сигнале объясняет общее снижение интенсивности PICTS-спектров в состоянии I, что обусловлено используемой процедурой нормировки спектра на стационарное значение фотоотклика [9]. Отмечавшийся выше эффект модификации вклада термоэмиссии с дефектов в релаксацию фотоотклика также связан с наличием дополнительного вклада фотовольтаической составляющей. Это можно заметить, сопоставив случай отсутствия эффекта модификации для ВТЕ (кривая 4 на рис. 3, с) с соответствующими данному случаю умеренной величиной фотоотклика кристалла (рис. 1, кривая 4) и возрастанием на порядок величины характеристического времени быстрого спада τ_0 в области температур регистрации изменения зарядового состояния дефекта 145–175 К (рис. 4, кривая 4).

Из анализа первичной измерительной цепи следует, что для регистрации ощутимого вклада фотовольтаического тока необходимо нарушение условия

$$\Delta R/R_{\text{eff}} \gg E_{\text{ph}}/U_b, \quad (3)$$

где R_{eff} — эффективное сопротивление образца в отсутствие фотовозбуждения, ΔR — изменение сопротивления при освещении, E_{ph} — фотоэдс, генерируемая при возбуждении кристалла светом, U_b — напряжение внешнего источника электрического поля, приложенного к образцу.

Сегнетоэлектрическим кристаллам свойственна неоднородность локальных электрических характеристик, а также склонность к их изменению под влиянием внешних воздействий, что создает проблему оценки R_{eff} . Характерная для доменной структуры неоднородность потенциального рельефа в первую очередь связана с границами раздела доменов [12,16] — доменными стенками. Неоднородности потенциального рельефа известны и для не обладающих сегнетоэлектрическими свойствами полупроводников и более заметны в высокоомных материалах с низкой концентрацией свободных носителей заряда [17,18]. В конечном итоге их влияние на протекание тока через кристалл можно представить как ограничение эффективного сечения токового канала, а также формирование в канале потенциальных барьеров. Очевидно, что для доменной структуры последнее более актуально, поскольку она предполагает замкнутую систему междоменных границ. Введя эффективное сопротивление барьера на границе доменов R_w , в первом приближении эффективное сопротивление образца можно представить в виде

$$R_{\text{eff}} \approx R_0 + KR_w, \quad (4)$$

где R_0 — сопротивление образца в однодоменном состоянии при отсутствии фотовозбуждения, K — количество барьеров в токовом канале. В зависимости от состояния доменной структуры можно ожидать изменения эффективного сопротивления R_{eff} от минимального значения $R_{\text{eff}} = R_0$, соответствующего однодоменному состоянию, до существенно более высоких значений, соответствующих многодоменному состоянию кристалла. Из условия (3) следует, что состоянию I, характеризующемуся существенным вкладом фотовольтаической составляющей в регистрируемый сигнал, должно соответствовать меньшее значение эффективного сопротивления образца, т.е. доменная структура в этом состоянии кристалла ближе к однодоменному состоянию, чем в состоянии II. Таким образом, состоянию I следует сопоставить состояние доменной структуры, содержащее меньшее количество междоменных границ — доменных стенок, чем состояние II. Учитывая это, отсутствие максимума В5 в спектрах, соответствующих данному состоянию (кривые 1 и 2 на рис. 2) можно интерпретировать в пользу связи данного дефекта с границами раздела доменов. Собственный дефект В5 можно представить как дефект упаковки кристаллической решетки, возникающий на границе раздела доменов.

5. Заключение

Обнаруженные значительные вариации величины фотоотклика кристалла $\text{TlInS}_2:\text{La}$, зависящие от предыстории возбуждения образца, интерпретированы на основе присутствия дополнительного вклада фотовольтаической составляющей в регистрируемом сигнале. При сопоставлении данных фотоэлектрической релаксационной спектроскопии с зависимостью от температуры характеристического времени быстрой релаксации, а также величины фотоотклика кристалла уточнен механизм, ответственный за обнаруженный ранее [3] эффект модификации вклада термоэмиссии с дефектов в релаксацию фотоотклика. Явление модификации вклада термоэмиссии с дефектов в релаксацию фотоотклика кристалла обусловлено присутствием дополнительной фотовольтаической составляющей реакции кристалла на световое возбуждение. При значительном вкладе фотовольтаической составляющей в регистрируемый сигнал термоэмиссия с дефектов В5 в области температур 190–230 К, включающей и температуры фазовых переходов, не регистрируется. Сделано предположение о В5 как дефекте упаковки кристаллической решетки, возникающем на границе раздела доменов.

Список литературы

- [1] J.F. Scott. *Mater. Sci.* **2013**, 187 313 (2013).
- [2] M.-H. Yu, Seyidov, R.A. Suleymanov, F.A. Mikailzade, E. Kargin, A. Odrinsky. *J. Appl. Phys.* **117**, 224 104 (2015).
- [3] А.П. Одринский, Т.Г. Мамедов, М.-Н.Ю. Сейидов, В.Б. Алиева. *ФТТ* **56**, 1554 (2014).
- [4] M.-H. Yu, Seyidov, R.A. Suleymanov, A.P. Odrinsky, A.I. Nadjafov, T.G. Mammadov, E.G. Samadli. *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 05FC08 (2011).
- [5] M.-H. Yu, Seyidov, А.П. Одринский, R.A. Suleymanov, E. Acar, T.G. Mamedov, В.Б. Алиева. *ФТТ* **56**, 1964 (2014).
- [6] M.-H. Yu, Seyidov, R.A. Suleymanov, E. Acar, А.П. Одринский, Т.Г. Мамедов, А.И. Наджафов, В.Б. Алиева. *ФНТ* **40**, 1062 (2014).
- [7] Ch. Hurter, M. Boilou, A. Mitonneau, D. Bois. *Appl. Phys. Lett.* **32**, 821 (1978).
- [8] S. Ozdemir, M. Bucurgat. *Current Appl. Phys.* **13**, 1948 (2013).
- [9] А.П. Одринский, Н.М. Казючич, Л.Ф. Макаренко. *Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук* **4**, 102 (2014).
- [10] С.Б. Вахрушев, В.В. Жданов, Б.Е. Квятковский, Н.М. Окунева, К.Р. Алахвердиев, Р.А. Алиев, Р.М. Сардарлы. *Письма в ЖЭТФ* **39**, 245 (1984).
- [11] J.C. Bolland, J.P. Zielinger, M. Tapiero, J.G. Gross, C.N. Nogueta. *J. Phys. D* **19**, 71 (1986).
- [12] А.П. Одринский. *ФТП* **39**, 660 (2005).
- [13] В.М. Фридкин. *Фотосегнетоэлектрики*. Наука, М. (1979). 284 с.
- [14] В.И. Белингер, Б.И. Стурман. *УФН* **130**, 415 (1980).
- [15] K. Buse. *Appl. Phys. B* **64**, 273 (1997).
- [16] J. Seidel, D. Fu, S.-Y. Yang, E. Alarcon-Llado, J. Wu, R. Ramesh, J.W. Ager. *Phys. Rev. Lett.* **107**, 126 805 (2011).
- [17] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. *ФТП* **10**, 209 (1976).
- [18] В.Н. Абакумов, В.И. Перель, И.Н. Ясевич. *Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках*. ПИЯФ РАН, СПб. (1997). 375 с.