

Рисунок 3. – Температурные зависимости коллекторного тока в прямом направлении. Приборы серии А (1) и серии В (2)

нения слитков по методу Чохральского. Исследование вольт-амперных характеристик в прямом направлении для эмиттерного перехода показало лишь незначительное превышение прямого тока эмиттера для приборов из серии В над аналогичной величиной для приборов из А. Для обеих партий приборов в показателе экспоненты прямого суммарного тока $n = 1,1$, что свидетельствует о малом вкладе диффузионного тока в эмиттерный ток в приборах обеих серий. Различия между величинами вклада диффузионного тока в общий прямой ток коллекторного и эмиттерного переходов, очевидно, обусловлены отличиями в технологических режимах их формирования (величина температуры и длительности процессов термической обработки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Оджаев В.Б., Панфиленко А.К., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Шведов С.В., Филипеня В.А., Черный В.В., Явид В.Ю., Янковский Ю.Н., Лановский Р.А. Исследование влияния технологических примесей на вольт-амперные характеристики биполярного $n-p-n$ -транзистора // Материалы 8-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение – 2015». – Мн., 2015, – С. 267–268.
2. Челябинский А.Р., Комаров Ф.Ф. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии // УФН.– 2003.– Т.173.- № 8. С.813–846.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов/–М.: Мир, 1984.–Т.1.–97 с.

АНОМАЛИИ КИНЕТИКИ ФОТООТКЛИКА КРИСТАЛЛА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА – ПОЛУПРОВОДНИКА $TlGaSe_2$

**А. П. Одринский¹, М. Н. Yu Seyidov², R. A. Suleymanov³,
Т. Г. Мамедов³, В. Б. Алиева³**

¹Институт технической акустики НАН Беларуси. a.odrinsky@gmail.com

²Department of Physics, Gebze Institute of Technology, Kocaeli, Turkey

³Институт Физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан

При исследовании электрической активности дефектов в кристалле $TlGaSe_2$ [1] обнаружены аномалии кинетики фотоотклика. В настоящей работе представлены

результаты их феноменологического исследования. Аномалии наблюдаются в области температуры 170 – 300 К, соответствующей параэлектрическому состоянию кристалла, в условиях периодического светового возбуждения с энергией фотонов превышающей или близкой к ширине запрещенной зоны $h\nu_0 \geq E_g$. В остальных условиях измерений не отличались от описанных ранее [1]. Кинетики фотоотклика представлены на рис. 1. Полученная при температуре 170 К кривая 1, хорошо сопоставима реакции полупроводникового кристалла на фотовозбуждение. Кинетика релаксации содержит участок быстрого спада (за время ~ 2 мс), сменяющийся более медленной экспоненциальной релаксацией, что можно интерпретировать как снижение концентрации неравновесных свободных носителей и термоэмиссию неравновесного заполнения дефектов, соответственно. При 180 К в процессе релаксации наблюдается смена медленной компоненты спада ростом. Заметно сокращение начального участка быстрой релаксации так, что при 200 К кинетика сигнала более напоминает фотоотклик обратносмещенного диода Шоттки или $p-n$ перехода структур, со встроенным электрическим полем. Дальнейший нагрев обнаруживает в релаксации дополнительный участок медленного нарастания сигнала, заметный при температуре $T > 200$ К (кривая 5 на рис. 1а). Аномалии связаны с процессами в объеме кристалла, поскольку регистрируются и при возбуждении участка поверхности образца, не граничащей с контактами, а также зависят от предыстории возбуждения.

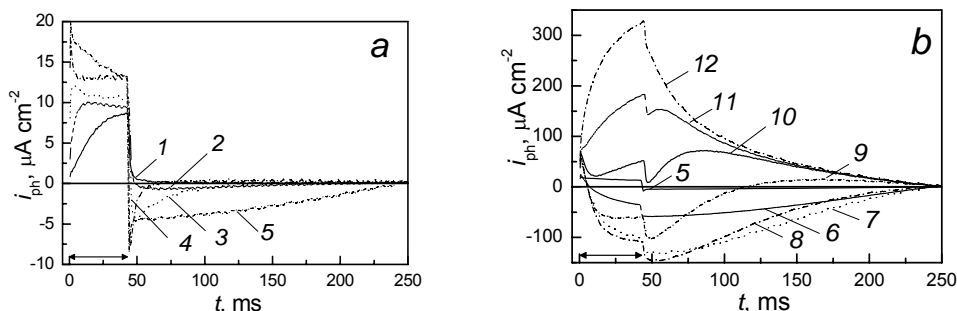


Рисунок 1. – Кинетика фотоотклика образца TiGaSe_2 в области температуры $T = 170\text{--}210$ К (а) и $210\text{--}280$ К (б). Кривая 1 соответствует $T = 170$ К, 2 – 180 К, 3 – 190 К, 4 – 200 К, 5 – 210 К, 6 – 220 К, 7 – 230 К, 8 – 240 К, 9 – 250 К, 10 – 260 К, 11 – 270 К, 12 – 280 К. Стрелкой отмечен период светового возбуждения

Область температуры $T \sim 170\text{--}200$ К (кривые 2–4 на рис. 1 а) хорошо сопоставима обнаруженной в PICTS-исследованиях области регистрации термоэмиссии с центра А4 (165 – 195 К) [1]. Это позволяет объяснить аномалии кинетики фотоотклика размораживанием электрета, сформированного центрами А4. Для сегнетоэлектрического состояния кристалла следует предполагать перераспределение генерируемых светом неравновесных носителей заряда в электрическом поле доменной структуры, что может вести к пространственной неоднородности заполнения центров локализации заряда. В процессе нагрева такие неоднородности заполнения центров в объеме кристалла – электреты, сформировавшиеся при низкой температуре, будут оставаться замороженными вплоть до последовательной термоактивации процессов перезаряд-

ки соответствующих центров. В принципе, можно предположить возможность формирования и системы взаимно скомпенсированных или скрытых электретов.

Эти предположения согласуются с фактом зависимости аномалий от предыстории образца и уместны для области $T \sim 170 - 200$ К, однако не объясняют аномалии при более высокой температуре.

На рис. 2 представлены результаты анализа аномалий в области $T \sim 200 - 300$ К по методике [2] на основе модельной функции:

$$I_{ph}(t) = C_0 + A_0 \exp(-\alpha t) - B_0 \exp(-\beta t) + D_0 \exp(-\gamma t), \quad (1)$$

где $A_0, B_0, D_0, \alpha, \beta, \gamma > 0$ и $\gamma > \alpha$. Значения показателя степени компоненты с отрицательной амплитудой (β -компоненты) малы и фактически не изменяются в области $T \sim 200 - 230$ К, а в последующем экспоненциально растут. В области 200–230 К основной вклад дают β - и γ -компоненты, а вклад α -компоненты на порядок меньше. Эта область температуры хорошо сопоставима с областью регистрации термоэмиссии с центра A5 ($T \sim 200-240$ К) [1], что позволяет связать аномалии фотоотклика с внутренним полем в кристалле. При дальнейшем повышении температуры наблюдается резкий рост вклада в релаксацию α -компоненты с переходом через максимум при $T \sim 255$ К и доминированием ее вклада в последующем. При $T > 255$ К вклад α -компоненты спадает до значений близких к единице, где исчезают и аномалии фотоотклика (при $T \sim 300$ К). Последнее позволяет ассоциировать эту компоненту с током проводимости кристалла. Отметим, что для анализа использовали нормированную кинетику сигнала, так что $\ln \leq 1$. В окрестности максимума ($T \sim 255$ К) вклад α -компоненты превышает единицу и сопоставим наблюдающемуся здесь максимуму вклада β -компоненты (см. рис. 2 б). Зависимости такого типа характерны для параметрического резонанса. В пользу этого свидетельствует и отсутствие выхода на стационарное значение сигнала как в режиме фотовозбуждения, так и за время релаксации фотоотклика (см. рис. 1 б). Можно сделать вывод, что в области $T \sim 230-280$ К фотоотклик кристалла формируется в динамическом режиме, имеет характер автоколебаний, вызванных возмущающим воздействием периодического возбуждения светом. За конечный период фотовозбуждения под воздействием фотовольтаической э.д.с. происходит определенное перераспределение свободных носителей заряда, генерируемых при освещении кристалла. В процессе релаксации принципиально различаются случаи фотовольтаического тока: обусловленного наличием внутреннего электрического поля в кристалле, и не связанного с наличием внутреннего поля [3], называемого еще фотогальваническим. При относительно небольшой подвижности носителей заряда [4] пространственная неоднородность распределения свободных носителей в объеме кристалла, формируемая под действием фотогальванической э.д.с., может вести к возникновению параметрического резонанса.

Обнаружены аномалии кинетики фотоотклика кристалла $TiGaSe_2$ и предложены механизмы его формирования. Аномалии, наблюдающиеся в области $T \sim 170-200$ К и $\sim 200-235$ К, интерпретированы, как обусловленные пространственной неоднородностью заполнения центров локализации заряда. В области $T \sim 235-280$ К фотоотклика формируются вследствие параметрического резонанса, возникающего в условиях периодического возбуждения кристалла светом с $h\nu \geq E_g$ и приложенного к кристаллу внешнего поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Seyidov M.H. [et al.] Identification of Intrinsic Deep Level Defects Responsible for Electret Behavior in TlGaSe₂ Layered Semiconductor. // Physica B, 2016. V. 483. P. 82.
2. Одринский А.П. Анализ релаксации фототока полуизолирующего GaAs в области температур 150–200 К. // ФТП. 2015. Т. 49, С. 294.
3. Белинчер В.И., Стурман Б.И. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии. // УФН. 1980. Т. 130. С. 415.
4. Qasrawi A.F., Gasanly N.M. Electrical conductivity and Hall mobility in p-type TlGaSe₂ crystals. // Material Research Bulletin. 2004. V. 39. P. 1353.

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ Ge+Sn ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

С. Л. Прокопьев, И. А. Сульжич, А. Г. Новиков, П. И. Гайдук

Белорусский государственный университет, prokopyev@bsu.by

Холловскими методами измерений исследовались структуры $p^+Ge/Ge_{99}Sn_{01}/n^+Si$ на подложках Si/SiO₂ после обработки в водородной плазме. Проведены измерения подвижности и концентрации носителей заряда в указанных структурах в зависимости от режимов термообработки, а также на различной глубине структур при полойном сравнении.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что полупроводниковые материалы после обработки в водородной плазме приобретают новые полезные электрофизические свойства [1]. В [2–3] на примере слоев Ge+Sn продемонстрирована возможность повышения концентрации и подвижности носителей заряда вплоть до величин, характерных для монокристаллического кремния. Мы полагаем, что модифицированные водородом слои Ge+Sn могут быть перспективны, например, для создания новых типов фотодетекторов и солнечных элементов на основе как моно- так и поликристаллических слоев. В данной работе исследовались электрофизические свойства структур со слоями Ge+Sn с низким содержанием олова, подвергнутые водородной и термической обработке.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выполнения исследований на подложке Si/SiO₂ на установке молекулярно-лучевой эпитаксии формировалась структура $p^+Ge/Ge_{99}Sn_{01}/n^+Si$. Сначала выращивался слой Ge p-типа (100 нм), затем – слой Ge₉₉Sn₀₁ (500 нм). Верхним слоем являлся n^+Si (100 нм). Предварительно все образцы, подготовленные к дальнейшим исследованиям, отжигались при температуре 450 °С или 500 °С в течение 15–30 минут на воздухе или в азоте. Химическое травление для очистки поверхности структуры и исследования ее свойств по глубине проводилось, соответственно, в водном растворе (HF 5%) и смеси концентрированных кислот (HF:HNO₃ = 1:15).

Водородная обработка структур проводилась при температуре 250 °С в плазме тлеющего разряда. Параметры разряда равнялись: напряжение разряда $U_p=500$ В, ток разряда $I_p=1$ мА, плотность тока $J_p=80$ мкА/см². Длительность обработки – 25 мин.