

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что уменьшение ширины базы в биполярном n - p - n -транзисторе позволяет пропорционально увеличить коэффициент усиления по току. Это справедливо только для среднего и высокого уровня инжекции. При низких ($I_c \leq 10^{-6}$ А) уровнях инжекции и наличии в приборах высокой концентрации технологических примесей (таких, как Fe, Cl, Ca, Cu, Zn и др.) весьма существенным становится вклад рекомбинационно-генерационного тока вследствие наличия большого количества поверхностных состояний в обеднённой области эмиттера на границе раздела кремний-окисел по сравнению с полезным диффузионным током неосновных носителей в базе. Увеличение темпа рекомбинации носителей в эмиттерном переходе в приборах с высоким содержанием технологических примесей приводит к уменьшению коэффициента инжекции и, как следствие, к уменьшению коэффициента усиления по току. Этот процесс при низких ($I_c \leq 10^{-6}$ А) уровнях инжекции преобладает над эффектом, достигаемым при увеличении ширины базы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Исследование влияния технологических примесей на вольт-амперные характеристики биполярного n - p - n -транзистора / В.С. Просолович [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тех. наук. –2018. –Т.63, №2, –С.244–249.
2. Челядинский А.Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии/ А.Р. Челядинский, Ф.Ф. Комаров // УФН. –2003. –Т. 173. № 8. – С.813—846.
3. Проектирование интегральных микросхем с пониженным энергопотреблением/А.И. Белоус, В.А. Емельянов, В.С. Сякерский // Интегралполиграф. – Минск.: 2009. –320 с.
4. SEMI M33-0988
5. Surface analysis for Si-Wafers using total reflection X-ray fluorescence analysis / W. Berneike [et al.] // Anal. Chem. –1989. –Vol.333. – P. 524–526.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. —М.: Мир, 1984.— Кн. 1. – 455 с.

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ БОРОМ НА ТЕРМОДЕЛОКАЛИЗАЦИЮ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКЕ - ПОЛУПРОВОДНИКЕ TlInS_2

А. П. Одринский¹, М. Н. Yu Seyidov^{2,3}, А. И. Наджафов³, V. B. Aliyeva³

¹⁾ *Институт технической акустики НАН Беларуси, пр. Любникова, 13,
210723 Витебск, Беларусь, e-mail: a.odrinsky@gmail.com*

²⁾ *Department of Physics, Gebze Technical University, 41400 Gebze, Kocaeli, Turkey,
e-mail: smirhasan@gtu.edu.tr*

³⁾ *Институт Физики НАН Азербайджана, пр. Г. Джавида, 33, AZ-1143 Баку, Азербайджан,
e-mail: a.najafov@mail.ru*

Представлены результаты исследования центров локализации заряда (ЦЛ) легированного бором кристалла сегнетоэлектрика - полупроводника TlInS_2 методом фотоэлектрической релаксационной спектроскопии (PICTS). Обсуждаются особенности регистрации термоделокализации носителей заряда в области температуры фазовых переходов (ФП), в сравнении с нелегированным кристаллом и $\text{TlInS}_2\text{:La}$, и их связь с проявлением у TlInS_2 свойств релаксора.

Ключевые слова: TlInS_2 ; сегнетоэлектрики; центры локализации заряда; PICTS.

EFFECT OF BOR DOPING ON CHARGE - CARRIERS THERMAL DELOCALIZATION IN FERROELECTRIC - SEMICONDUCTOR TlInS_2

A. P. Odrinsky¹, M. H. Yu Seyidov^{2,3}, A. I. Nadjafov³, V. B. Aliyeva³

¹⁾ *Institute of Technical Acoustics NAS Belarus, Ludnikova av.13, 210723, Vitebsk, Belarus,*

²⁾ *Department of Physics, Gebze Technical University, 41400 Gebze, Kocaeli, Turkey,*

³⁾ *Institute of Physics NAS Azerbaijan, H. Javid av. 33, AZ-1143 Baku Azerbaijan,*

Corresponding author: A. P. Odrinsky (a.odrinsky@gmail.com)

Results of charge localization centers (LC) investigation in the TlInS_2 crystal of ferroelectric - semiconductor with boron dopant by photo-induced current transient spectroscopy (PICTS) technique are presented. Features of charge – carriers thermal delocalization registration in the temperature region of phase transitions (PT) are discussed with comparison to $\text{TlInS}_2\text{:La}$ and not doped crystals, and their connection with relaxor properties of $\text{TlInS}_2\text{:B}$.

Key words: TlInS_2 , ferroelectrics, charge localization centers, PICTS.

ВВЕДЕНИЕ

Использование сегнетоэлектриков в технике нуждается в понимании роли активности дефектов и примесей, как центров локализации свободных носителей заряда, влияющих на электрическую однородность кристалла. Эмпирические сведения такого рода крайне скудны.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследовали монокристаллы $\text{TlInS}_2\text{:B}$, выращенные методом Бриджмена—Стокбаргера в предварительно откачанной (10^{-5} Торр) и запаянной кварцевой ампуле из смеси навесок исходных компонентов, взятых в стехиометрической пропорции. Легирование проводилось добавкой соответствующей навески бора в ампулу с предварительно синтезированным TlInS_2 . Кристаллы обладали проводимостью p -типа с концентрацией носителей заряда $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при 300 К. Образцы имели размеры $2 \times 4 \times 1 \text{ мм}$. Омические контакты формировались пайкой индием на торцевых поверхностях образца, с частичным захватом фронтальной поверхности – плоскости скола. Геометрия протекания тока - вдоль слоев кристалла. Качество контактов оценивалось по вольтамперной характеристике, которая была линейна при комнатной температуре. Условия PICTS-эксперимента не отличались от описанных ранее [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В спектрах PICTS легированного бором кристалла доминировали интенсивные пики в интервалах температуры $\Delta T \sim 85\text{--}110 \text{ К}$, $244\text{--}293 \text{ К}$, а также $173\text{--}223 \text{ К}$, связанные с процессами термоэмиссии носителей зарядов. Также наблюдался пик в области $\Delta T \sim 110\text{--}130 \text{ К}$ и пики малой интенсивности при $\Delta T \sim 131\text{--}158 \text{ К}$ и $217\text{--}284 \text{ К}$. На рисунке представлена зависимость скорости термоэмиссии обнаруженных процессов от температуры, сопоставленные с данными, полученными на не легированном кристалле TlInS_2 . Заметно хорошее совпадение температурных зависимостей

скорости термоделокализации с центра В7, наблюдавшейся на нелегированном кристалле, и процесса регистрируемого при $\Delta T \sim 244\text{--}293$ К. Определенное соответствие можно отметить и для ВТ23 и ТЕ2, где вариации графика Аррениуса можно объяснить влиянием внутреннего электрического поля кристалла вследствие эффекта Пула-Френкеля [2]. Полученные в рамках DLTS (PICTS) анализа величины энергии активации делокализации - E_a и эффективного сечения захвата σ_t совместно с ΔT – диапазоном температуры ее регистрации, приведены в таблице.

Таблица

	TlInS ₂ :B			TlInS ₂		
	T (K)	E_a (eV)	σ (cm ²)	T (K)	E_a (eV)	σ (cm ²)
TE	85-110	0.12	$1.8 \cdot 10^{-16}$	93-110	0.16	$6.9 \cdot 10^{-15}$
BT	110-130	0.24	$7.4 \cdot 10^{-13}$	115-135	0.18	$2.9 \cdot 10^{-16}$
K1	131-158	0.31	$5.1 \cdot 10^{-12}$			
B5				190-240	0.30	$1.8 \cdot 10^{-16}$
Bx5	173-223	0.22	$1.1 \cdot 10^{-17}$			
K2	217-284	0.56	$1.1 \cdot 10^{-11}$			
B7	244-293	0.51	$6.5 \cdot 10^{-14}$	240-300	0.48	$1.9 \cdot 10^{-14}$

Соответствующие пикам слабой интенсивности зависимости, обозначенные на рисунке как К1 и К2, наблюдаются только в спектрах легированного бором кристалла, что предполагает связь их природы с атомами примеси бора. При малой интенсивности этих процессов, концентрацию соответствующих ЦЛ следует полагать низкой. Приняв порядок оценки концентрации собственных дефектов в нелегированном кристалле в соответствии с данными термостимулированной проводимости [3] $N_t \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, из сравнения интенсивности соответствующих пиков в спектрах грубая оценка концентрации для К1 и К2, по крайней мере, на порядок меньше. Вместе с тем, при процентном соотношении введенного бора и фактически отсутствующей сегрегации, верхний предел оценки концентрации образовавшихся ЦЛ составляет $N_t \sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. Можно заключить, что бор либо встраивается в решетку по принципу замещения, без образования локальных уровней в запрещенной зоне, как изовалентная примесь [4], либо образует более мелкие уровни.

Особый интерес представляют процессы термоэмиссии, обозначенные на рисунке как В5 и Вх5, в области температуры $\Delta T \sim 190\text{--}240$ К, включающей температуры ФП кристалла. (Согласно [6], при 216 К расположен переход из пара- в несоизмерную сегнето- фазу, а при 201 К – в соразмерную сегнетоэлектрическую фазу.). Заметна существенная разница их положения, что принято интерпретировать как регистрацию не идентичных центров различной природы [5]. Отметим, что в исследованиях электрической активности дефектов полупроводниковых материалов важно обеспечить условия близкие к термодинамически равновесным, позволяющим рассматривать набор дефектов как термодинамическую подсистему, взаимодействие которой с кристаллической решеткой сведено к тепловому обмену. Эти условия в сегнетоэлектрическом кристалле принципиально не достижимы и для интерпретации результатов необходим более подробный анализ. Процесс делокализации носителей заряда в области ФП TlInS₂ ранее наблюдали на кристалле легированном лантаном [1, 7]. Со-

ответствующая зависимость – $B5'$ также показана на рисунке. Заметно, что на легированных кристаллах зависимости смещены в область более низких температур. Таким образом, при любой фиксированной температуре термоэмиссия на этих кристаллах больше, что хорошо согласуется с известным фактом уменьшение температуры ФП при легировании кристалла, и свидетельствует в пользу ранней интерпретации связи этих процессов делокализации с доменной стенкой [7].

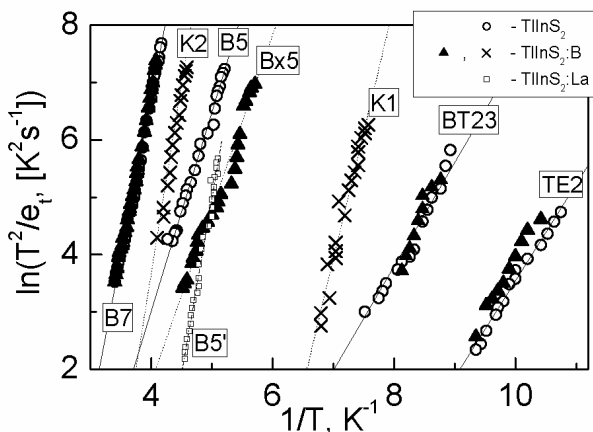


Рисунок – Зависимость от температуры скорости термоэмиссии с дефектов с учетом T^2 коррекции

На $TlInS_2:La$ наблюдали [8] значительные изменения диэлектрической проницаемости в окрестности ФП, с явно выраженной структурой ее температурной зависимости, сопоставимой с поведением не легированного кристалла. Добавление бора, при номинально равной доле введенной примеси, ведет к размытию аналогичной зависимости, а также появлению других особенностей диэлектрических свойств кристалла, характерных для релаксорных сегнетоэлектриков [9]. Наблюдаемые в наших исследованиях в области температуры $\sim 140\text{--}200$ К незначительные изменения кинетики фотоотклика $TlInS_2:B$, ее «демпфированный характер», также свидетельствует в пользу заключения [9].

Релаксорное поведение связывают с беспорядком в расположении центров локализации заряда [10], предполагая, что релаксорные свойства обусловлены совпадением температуры ФП с областью температуры изменения зарядового состояния ЦЛ. В нашем эксперименте в области ФП термоэмиссия уверенно регистрируется на $TlInS_2:B$, а также на не имеющих свойств релаксора образцах. Процесс делокализации в области ФП логично связать с дефектами специфической природы, обусловленной нарушениями периодической структуры кристаллической решетки - доменными стенками. Для существования доменной структуры в течение длительного времени и широкого диапазона изменений внешних условий - давления, температуры, приложенного электрического поля, требуется механизм, регулирующий величину заряда, локализованного на доменной стенке. Следовательно, она должна обладать свойствами дефекта кристаллической структуры - способностью локализации свободных носителей заряда и их делокализации. Однако, в области ФП, при формировании либо исчезновении самой доменной структуры, процесс делокализации за-

рядов следует рассматривать как связанный с образованием специфического дефекта - доменной стенки. Таким образом, интерпретированы и процессы B5, B5' и Bx5.

Учитывая взаимодействие доменной структуры с ЦЛ и отсутствие возможности их раздельного исследования, необходимо рассмотреть также и вклад от ЦЛ, вынуждено изменяющих зарядовое состояние в области ФП. Не вникая в механизмы их взаимодействия, ограничимся центрами, способными оказать наибольшее влияние на кинетику релаксации фотоотклика. Рассмотрим BT23, регистрируемые в области температуры ниже ФП. В зависимости от локальных вариаций потенциального рельефа им может быть энергетически выгодно находиться в том или ином зарядовом состоянии. Важно, что при малой энергии термоактивации, в области ФП величина скорости делокализации зарядов с BT23 будет значительна и их вклад в релаксацию фотоотклика не будет обнаружен в отслеживаемом диапазоне характеристических времен релаксации. В этом диапазоне существенного вклада можно ожидать преимущественно от центров, с ΔT лежащей выше температуры ФП. Здесь основные различия составляет пик B7, хорошо различимый в спектрах нелегированного и $\text{TlInS}_2\text{:B}$ и отсутствующий в спектрах $\text{TlInS}_2\text{:La}$ [1]. В области ФП термоэмиссия с B7 мала, однако, как у всякого спонтанного вероятностного процесса может быть ускорена в результате внешних воздействий, например вследствие эффекта Пула-Френкеля. В пользу предположения о влиянии делокализации с B7 свидетельствуют более широкие диапазоны температуры регистрации B5 и Bx5 (см. таблицу: $\Delta T \sim 50$ K, а для B5' $\Delta T \sim 39$ K). Эффект размытия ФП при легировании сегнетоэлектрика хорошо известен из исследований диэлектрической восприимчивости. На TlInS_2 он предполагается обусловленным B7 – собственным структурным дефектом, либо характерной технологической примесью. С этой точки зрения стабилизацию диэлектрических характеристик кристалла легированного лантаном, по-видимому, можно объяснить нейтрализацией электрической активности B7. Например, путем образования комплекса, включающего данный центр и атом лантана.

Это предположение отличается от известной концепции [11], и сопоставимо с фактом возникновения у TlInS_2 свойств релаксатора при легировании бором, марганцем и хромом [12], германием [13], а также γ -облучении кристалла [14]. По видимому, роль вводимых дефектов сводится к экранирующему действию на доменную структуру и снижению энергии термоактивации образования доменной стенки (см. таблица, сравнение E_a для B5 и Bx5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы процессы делокализации носителей заряда в легированном бором TlInS_2 . Сделано предположение о связанности свойств релаксатора $\text{TlInS}_2\text{:B}$ с собственным дефектом кристалла, что планируется проверить в дальнейшем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Фотоэлектрическая активность структурных дефектов монокристалла сегнетоэлектрика-полупроводника $\text{TlInS}_2\text{:La}$ / А.П. Одринский [и др.] // ФТТ. — 2014. — Т. 56, № 8. — С. 1554-1558.
2. К теории электрического пробоя в диэлектриках и электронных полупроводниках / Я.И. Френкель // ЖЭТФ. — 1938. — Т. 8, № 12. — С. 1292-1301.
3. Characteristics of traps in TlInS_2 single crystals / S. Ozdemir, M. Bucurgat // Current Applied Physics. — 2013. — V. 13, № 9. — P. 1948-1952.

4. Understanding defects in semiconductors as key to advancing device technology / E.R. Weber / Physica B. — 2003. — V. 340-342. — P. 1–14.
5. Глубокие центры в монокристаллах сульфида кадмия: новый метод сопоставления данных DLTS различных авторов / А.А. Истратов, О.Ф. Вывенко. // ФТП. . – 1995. – Т. 29, № 4. – С. 654–664.
6. Несоизмеримый фазовый переход в кристалле TlInS_2 / С. Б. Вахрушев [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 1984. — Т. 39, № 6. — С. 245-247.
7. Фотовольтаические токи и активность структурных дефектов монокристалла сегнетоэлектрика-полупроводника $\text{TlInS}_2\text{:La}$ / А.П. Одринского [и др.] // ФТТ. — 2016. — Т.58, № 4. — С. 696-701.
8. Фотодиэлектрический эффект в TlInS_2 , активированном примесью La. / М.-Н.Yu Seyidov [и др.] // ФТТ. — 2009. — Т.51, — С. 250-255.
9. Диэлектрическая дисперсия, поляризация и пирозлектрические свойства легированных бором кристаллов TlInS_2 / А.И. Наджафов // Fizika (Баку) — 2005. — №5 — С.95-99.
10. К теории фазовых переходов в релаксорах / Р.Ф. Мамин // ФТТ. — 2001. — Т.43, 7. — С.1262-1267.
11. Влияние катионных примесей на фазовые переходы в соединении TlInS_2 / Р.М. Сардарлы [и др.] // ФТТ. — 2003. — Т.45, № 6. — С.1085-1087.
12. TlInS_2 , легированный Cr и Mn, - новый релаксорный сегнетоэлектрик / Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, И.Ш. Садыхов // ФТТ. — 2004. — Т.46, № 10. — С. 1852-1855.
13. Релаксорные свойства TlInS_2 , легированного Ge / Р.М. Сардарлы, О.А. Самедов, И.Ш. Садыхов // Неорг.мат. — 2004. — Т. 40, № 4. — С. 1163-1167.
14. Релаксорные свойства и механизм проводимости γ -облученных кристаллов TlInS_2 / Р.М. Сардарлы [и др.] // ФТТ. — 2005. — Т.47, №9. — С. 1665-1669.

ЕМКОСТЬ В РЕЖИМЕ СИЛЬНОЙ ИНВЕРСИИ СТРУКТУР $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ КСЕНОНА

**Н. А. Поклонский¹, Н. И. Горбачук¹, С. В. Шпаковский²,
В. А. Скуратов³, А. Wiek⁴**

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: gorbachuk@bsu.by*

²⁾ *ОАО «Интеграл», Минск, Беларусь*

³⁾ *Объединенный институт ядерных исследований,*

⁴⁾ *Ruhr-Universitaet Bochum, Bochum, Germany*

Исследованы зависимости комплексной электрической емкости структур $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$, облученных ионами ксенона с энергией 166 МэВ, от частоты переменного тока и постоянного напряжения смещения. Предложена эквивалентная схема замещения облученных структур, находящихся в режиме сильной инверсии, учитывающая генерационно-рекомбинационные процессы на радиационных дефектах в области пространственного заряда и разброс времен перезарядки поверхностных состояний на границе раздела $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$.

Ключевые слова: кремний; МОП-структуры; импедансная спектроскопия; радиационные дефекты; высокоэнергетическая ионная имплантация; эквивалентная схема.