

На правах рукописи



Ищенко Денис Вячеславович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЁНОК ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ PbTe-SnTe , ЛЕГИРОВАННЫХ
ИНДИЕМ, В ОБЛАСТИ СОСТАВОВ ВБЛИЗИ ИНВЕРСИИ ЗОН**

01.04.10 – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Неизвестный Игорь Георгиевич, член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Войцеховский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий кафедрой квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета.

Хохлов Дмитрий Ремович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии наук, профессор, ФГАОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», заведующий кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук.

Защита состоится «18» июня 2019 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте института: <http://www.isp.nsc.ru/institut/dissertatsionnyj-sovet/zasedaniya/ischenko-denis-vyacheslavovich>.

Автореферат разослан « » марта 2019 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Интерес к изучению соединений A^4B^6 связан с тем, что в солях свинца (в частности, в PbS) в 1930-х годах был обнаружен фотоответ в ближней инфракрасной (ИК) области вплоть до 7 мкм. В 1960-х годах было обнаружено, что соединения PbTe и SnTe образуют ряд твёрдых растворов, у которых наблюдается непрерывное изменение ширины запрещённой зоны [1, 2] от 0,2 эВ в PbTe до 0,3 эВ в SnTe с переходом через 0 эВ. Это приводит к сдвигу теоретической красной границы фоточувствительности материала в область дальнего ИК и терагерцового (ТГц) диапазонов спектра. С тех пор было опубликовано большое количество работ по исследованию данных растворов, в том числе и по созданию фотоприёмников (ФП), например [3, 4]. Так в Институте физики полупроводников СО РАН (ИФП СО РАН) в 1984 году были получены 8-миэлементные линейки ФП на структурах свинец-олова-теллур ($Pb_{1-x}Sn_xTe$) с содержанием олова $x = 0,20$, выращенных методом молекулярной-лучевой эпитаксией (МЛЭ) на подложках BaF_2 с красной границей фоточувствительности $\lambda_{кр} = 12$ мкм. Размер элементов составлял 80×80 мкм² или 50×50 мкм² с зазором между элементами 20 или 10 мкм, соответственно, и обнаружительной способностью $D_{\lambda, max} = (1-2) \cdot 10^{10}$ см·Гц⁻²·Вт⁻¹.

Позднее, при легировании $Pb_{1-x}Sn_xTe$ индием в нем был обнаружен ряд уникальных свойств. При температурах ниже 20 К в $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с концентрацией олова $x \approx 0,22 - 0,28$ наблюдается переход в высокоомное состояние и происходит стабилизация уровня Ферми внутри запрещённой зоны, т.е. материал становится нечувствительным к дополнительному легированию посторонними примесями и собственными дефектами, если их концентрация не превышает концентрацию индия. Моделью для описания эффекта стабилизации уровня Ферми стала модель спонтанной диссоциации нейтральной примеси, предложенной в работе [5].

В $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ при температурах ниже 20 К наблюдается высокая фоточувствительность в дальнем ИК диапазоне при температурах ниже 20 К и долговременная релаксация фототока после выключения освещения, достигающая нескольких часов. Впервые об этом было написано в работе [6]. Для описания этих свойств была предложена «трёхуровневая модель», суть которой заключается в наличии барьера между зоной проводимости и двумя примесными зонами [7], нижняя из которых заполнена электронами, и имеет проводимость прыжкового типа. Зона, расположенная выше по энергии пуста, и имеет проводимость металлического типа. При освещении электроны из нижней примесной зоны переходят в верхнюю, а переход обратно ограничен из-за энергетического барьера между ними. При этом описанные выше модели не учитывают конкретную роль индия в описанных свойствах и относятся только к диапазону составов $x \approx 0,22 - 0,28$.

Указанные свойства $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ позволили разработать технологию получения многоэлементных фотоприёмных устройств (ФПУ) для спектрального диапазона 5 – 20 мкм [3]. Экспериментальные результаты измерения пороговой чувствительности показали, что примерно 85% элементов линейчатых фотоприёмных устройств (ЛФПУ) имеют мощность эквивалентную шуму (МЭШ) менее 10^{-18} Вт/Гц^{0,5}. Достигнутые параметры, по-видимому, не являются предельными для ФП на основе $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$, так как отдельные элементы ЛФПУ при $T = 7$ К имеют МЭШ менее $5 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{0,5}.

В дальнейшем чувствительность твёрдых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ была обнаружена не только в ИК, но и в ТГц областях спектра [8]. В [9] приведены расчёты фототока в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ в ТГц диапазоне при $T = 4,2$ К. Для расчёта был использован энергетический спектр уровней захвата в запрещённой зоне, полученный из анализа вольтамперных характеристик (ВАХ) в режиме токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ). Расчётные зависимости ТГц фотосигнала от напряжения на структуре были сравнены с экспериментальными зависимостями для двух длин волн излучения лазера на свободных электронах (ЛСЭ): 130 мкм и 198 мкм, соответствующими энергия ионизации ловушек 9,5 и 6,2 мэВ. Расчёт и эксперимент для $\lambda = 130$ мкм согласовались удовлетворительно, а для $\lambda = 198$ мкм – только в области низких напряжений. Но в обоих случаях наблюдался рост тока при увеличении напряжения, ведущего к большему заполнению центров захвата электронами вследствие увеличения уровня инжекции из контактов, как это и следует из теории ТОПЗ. В работе [9] была выдвинута гипотеза о том, что $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ можно рассматривать как композиционно неупорядоченную систему, в которой отсутствует дальний порядок, и потенциальная энергия носителей заряда не является периодической функцией координат. Это связано с тем, что в узле металлической подрешетки может с определённой вероятностью оказаться любой из трёх компонентов (олово, свинец или индий). Электронные процессы в подобных системах были рассмотрены в [10]. В соответствии с моделью [11] в запрещённой зоне неупорядоченного вещества содержатся глубокие донорные уровни, лежащие ниже акцепторных уровней, и эти состояния фиксируют уровень Ферми вблизи середины зоны. Однако эта гипотеза не была доведена до уровня разработки модели процессов, происходящих при легировании $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ индием, модели, которая могла бы служить для количественных расчётов.

Недостаточно исследованным вопросом для составов с $x \approx 0,30 - 0,33$ вблизи инверсии зон является возможность получения высокоомного состояния при гелиевых температурах. Имеется несколько работ, например [12], в которых авторы получили переход в высокоомное состояние образцов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с $x = 0,30 - 0,31$, но при больших значениях олова в материале переход в высокоомное состояние достигнут не был.

Таким образом, к моменту начала работы над диссертацией существовал ряд вопросов, которые требовали дополнительного исследования:

- Отсутствовали экспериментальные данные о переходе в высокоомное состояние плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с содержанием олова $x \approx 0,30 - 0,33$, т.е. для составов, вблизи инверсии зон при гелиевых температурах.

- Отсутствовали данные о функциональной связи между составом $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, концентрацией введённого индия и температурной зависимостью концентрации свободных носителей заряда после легирования.

- При анализе ВАХ использовалась теория ТОПЗ в предположении омичности контактов в материалу и не рассматривалось влияние металлических контактов с различной работой выхода на ВАХ в реальных структурах металл – $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ – металл.

- Отсутствовали экспериментальные данные о зависимости времени жизни неравновесных носителей заряда и временах релаксации фототока в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ от состава и пороговых характеристиках таких структур.

- Отсутствовала единая модель физических процессов, происходящих при легировании $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ индием, которая могла бы служить для количественных расчётов наблюдаемых в эксперименте свойств.

Цель и задачи диссертации

Целью диссертационной работы является установление основных закономерностей легирования индием эпитаксиальных плёнок твёрдого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с $x \approx 0,30 - 0,33$ и возможностей их использования в качестве фотоприёмников дальнего ИК и ТГц диапазонов спектра.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Установить физические условия, при которых возможно легирование индием плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с содержанием олова $x \approx 0,30 - 0,33$, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

2. Установить функциональную связь между составом плёнки $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с $x \approx 0,30 - 0,33$, концентрацией введённого индия и температурной зависимостью концентрации свободных носителей заряда, и определить условия, необходимые для перехода в высокоомное состояние.

3. Изучить транспортные свойства носителей зарядов в зависимости от величины потенциального барьера на границах структур металл – $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ – металл на транспорт носителей зарядов.

4. Разработать метод создания $p-i-p$ -структур (p^+ - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ – i - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ – p^+ - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$) и исследовать их электрофизические свойства.

5. Определить механизм рекомбинации неравновесных носителей заряда и природу долговременных релаксаций фототока в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с $x \approx 0,30 - 0,33$.

6. Разработать модель энергетического спектра запрещённой зоны с учётом композиционной неупорядоченности структур $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$, провести на основе модели численные расчёты электрофизических и фотоэлектрических свойств и сравнить расчёт с экспериментальными данными.

7. Изготовить структуры с составом близким к инверсии зон, провести исследование их пороговых характеристик по отношению к излучению моделей абсолютно чёрных тел (АЧТ) с разными температурами и определить возможности использования таких структур для создания ИК приёмников с увеличенной длинноволновой границей чувствительности.

Научная новизна и практическая значимость работы

1. На основе предположения о композиционной неупорядоченности твёрдого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, легированного In, разработана модель энергетического спектра запрещённой зоны с учётом наличия локальных уровней и примесных зон, описывающая его переход в высокоомное состояние при низких температурах. Установлена количественная зависимость между концентрацией свободных носителей заряда и составом плёнки, концентрацией введённого индия и температурой. Определены условия возникновения перехода легированного индием твёрдого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ в высокоомное состояние.

2. Определён механизм рекомбинации неравновесных носителей заряда в $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с $x \approx 0,30 - 0,33$ – излучательная рекомбинация. Получены экспериментальные зависимости релаксации фототока от положения равновесного уровня Ферми и температурной зависимости концентрации свободных носителей заряда, из которых определена природа долговременных релаксаций фототока – захват электронов на локализованные центры в запрещённой зоне. Полученные результаты описываются в рамках предложенной модели.

3. Исследованы ВАХ структур металл – $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ – металл и установлен вклад величины потенциального барьера на границе раздела металл- $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ в их электрофизические и фотоэлектрические свойства.

4. Предложен метод локального прецизионного легирования индием плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с содержанием олова $x \approx 0,30 - 0,33$. Впервые получены и исследованы структуры p^+ - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ – i - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ – p^+ - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$.

5. Изготовлены структуры $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с $x \approx 0,30 - 0,33$, определены их пороговые характеристики по излучению АЧТ с разными температурами и показана возможность использования таких структур для создания ФП для дальнего ИК (фундаментальное поглощение) и ТГц (примесное поглощение) диапазонов длин волн.

Методология и методы исследования

Объектом исследования являлись структуры типа металл – $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ – металл и p^+ - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ – i - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ – p^+ - $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, изготовленные на основе эпитаксиальных плёнок твёрдого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, легированные индием с содержанием олова $x \approx 0,30 - 0,33$.

В качестве основных **методов исследования** использовались измерения температурной зависимости холловских параметров (концентрация носителей заряда и подвижности), фоточувствительности к излучению с различными длинами волн при гелиевых температурах, релаксации фототока при воздействии излучения.

Положения, выносимые на защиту

1. Температурная зависимость концентрации свободных носителей заряда, переход в высокоомное состояние, долговременная релаксация и фоточувствительность при гелиевой температуре твёрдого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с $x \approx 0,30 - 0,33$ описываются в рамках модели энергетического строения запрещённой зоны с учётом наличия локальных уровней и примесных зон.

2. Основным механизмом рекомбинации неосновных носителей заряда в плёнках $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с $x \approx 0,30 - 0,33$ при гелиевых температурах является излучательная рекомбинация, а время жизни неравновесных носителей заряда определяется содержанием олова в плёнке и полевой и оптической инжекцией носителей заряда.

3. Изготовленные фотоприёмники на основе плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In}$ с содержанием олова $x \approx 0,30 - 0,33$ имеют обнаружительную способность по АЧТ с $T_{\text{АЧТ}} = 15 \text{ К}$ $D^* = 8,2 \cdot 10^{16} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$ и могут быть использованы в качестве высокочувствительных приёмников дальнего инфракрасного (фундаментальное поглощение) и терагерцового (примесное поглощение) излучения.

Степень достоверности и апробация работы

Достоверность представленных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием современных методов измерений, воспроизводимостью результатов и хорошим согласованием экспериментальных данных как с расчётными, так и с литературными данными.

Основные результаты, полученные в данной работе, докладывались на 16 международных и российских конференциях: Российская конференция и школа по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоэлектроники «Фотоника 2011», XXII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения 2012, Международная научно-техническая конференции INTERMATIC-2012, 51-й международная научная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс – 2013», XI Российская конференция по физике полупроводников 2013, 32nd International conference on the Physics of

semiconductors в 2014 г., Международный симпозиум «Нанопизика и нанозлектроника» в 2014 г., 15th International conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2014, XXIII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения в 2014 г., Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника 2015», XII Российская конференция по физике полупроводников 2015, XX Международный симпозиум «Нанопизика и нанозлектроника» 2016, XIII Российская конференция по физике полупроводников, РКФП-2017, 18th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2017, The fourth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials ASCONANOMAT 2018, Russia, Vladivostok, 2018, 9th International conference on materials science and condensed matter physics MSCMP 2018, Moldova, Chisinau. По результатам данной работы опубликовано 9 работ [A1 – A9].

Публикации

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 9 печатных работ в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 19 тезисов докладов, представленных на российских и международных конференциях. Полный список публикаций приведён в конце автореферата.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в работу заключался в разработке методик локального прецизионного легирования индием плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ и получения структур $p^+-\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te} - i-\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}:\text{In} - p^+-\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, проведение экспериментов при температуре жидкого гелия, анализе и интерпретации экспериментальных данных, проведении расчётов по времени жизни носителей заряда, релаксации фототока, температурной зависимости концентрации носителей заряда при различном содержании олова и индия в материале, участии в постановке целей и задач исследования, в написание научных статей и тезисов на конференции и симпозиумы, представления научных результатах на конференциях и симпозиумах.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы. Работа изложена на 131 странице текста, содержит 60 рисунков, 5 таблиц и список цитируемой литературы из 89 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, и положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** обобщаются литературные данные о текущем состоянии исследований свойств $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$. В **параграфе 1.1** описываются основные свойства нелегированного $Pb_{1-x}Sn_xTe$. Показано, что ширина запрещённой зоны $Pb_{1-x}Sn_xTe$ зависит от содержания олова в твёрдом растворе. Так при увеличении содержания олова в растворе до $x \approx 0,35$ ширина запрещённой зоны уменьшается, для состава $Pb_{0,65}Sn_{0,35}Te$ $E_g = 0$, а при дальнейшем увеличении доли олова в материале происходит увеличение запрещённой зоны. При этом зоны меняются местами, т.е. происходит инверсия зон.

В **параграфе 1.2** рассматриваются электрофизические свойства $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ в зависимости от концентрации индия и приводятся теоретические модели, описывающие данные свойства. Так «трёхуровневая модель» описывает долговременную релаксацию фототока после выключения предложена авторами в работе [7]. «Модель спонтанной диссоциации нейтральной примеси» приведена в работе [5] для описания стабилизации уровня Ферми и перехода $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ в высокоомное состояние. Также описывается фоточувствительность $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ в широком диапазоне длин волн (от ИК до ТГц диапазонов). Роль индия в твёрдом растворе $Pb_{1-x}Sn_xTe$ подробно описана в работе [13]. В ней авторы утверждают, что при низких концентрациях индия (до 0,8 ат. %), его атомы встраиваются на места вакансий металлов (акцепторов), т.е. свинца или олова, понижая тем самым концентрацию носителей заряда в зоне проводимости. При дальнейшем увеличении атомов индия происходит образование соединения In_2Te_3 , которое является электрически нейтральным. При этом во всех моделях считалось, что контакты к образцам являются омическим, несмотря на тот факт, что концентрация носителей заряда при $T = 4,2$ К составляет $n(p) < 10^{12}$ см⁻³ и литературные данные, которые показывают, что ток в $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ подчиняется закону транспорта носителей заряда, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ).

В **параграфе 1.3** представлены литературные данные по основным параметрам фотоприёмников, изготовленных на основе $Pb_{1-x}Sn_xTe$ и $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$. Показано, что эти параметры близки к предельным. В тоже время отмечено, что в литературе не встречаются данные о влиянии контактных областей на фотосигнал.

В **заключении к главе 1** сформулированы основные проблемы, нерешённые к моменту начала работы над диссертацией.

ГЛАВА 2 посвящена описанию экспериментальных методик и методов создания образцов. В **параграфах 2.1, 2.2 и 2.3** рассмотрена методика получения образцов методом МЛЭ, спо-

собы легирования индием плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с $x \approx 0,30 - 0,33$ и определения состава образцов. Параграфы 2.4 и 2.5 описывают различные типы исследуемых структур полученных на основе плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с $x \approx 0,30 - 0,33$, а так же используемые экспериментальные методики: эффект Холла, освещение структур АЧТ и ЛСЭ в ИК и ТГц-диапазонах спектра, релаксационные измерения фототока, влияние контактных явлений.

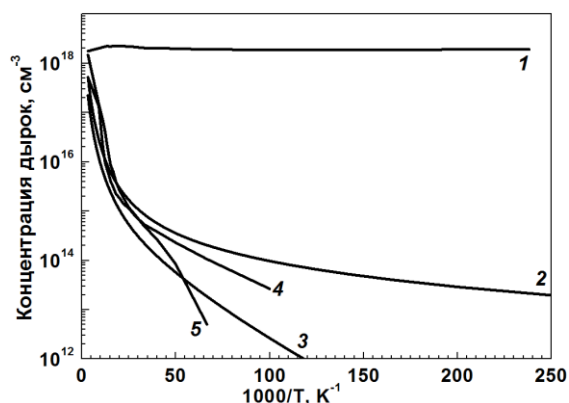


Рис. 1. Температурная зависимость концентрации дырков при различной концентрации введенного индия с образца $Pb_{0,67}Sn_{0,33}Te:In$. Расчетные данные: 2 — $N_{In} = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (0,100 ат.%), 3 — $N_{In} = 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (0,125 ат.%). Экспериментальные данные: 1 — $N_{In} = 0,000$, 4 — $N_{In} = 0,300$ ат. %, 5 — $N_{In} = 1,000$ ат. %.

чества вакансий металлов и теллура (до 10^{20} см^{-3}).

- Случайное заполнение металлической подрешетки атомами олова и свинца.
- Случайное встраивание атомов индия на места вакансий металлической подрешетке.

Описан принятый в модели энергетический спектр состояний в запрещенной зоне при легировании $Pb_{1-x}Sn_xTe$ атомами индия, состоящий из:

1. Уровней вакансий металлов и теллура, которые дают один акцепторный и один донорный уровни, расположенные близи потолка валентной зоны и дна зоны проводимости, соответственно.
2. Акцепторного и донорного уровней, возникающих при легировании индием, причём донорный уровень может лежать ниже акцепторного. При увеличении концентрации эти уровни, согласно модели Андерсона, расщепляются в зоны.
3. Уровня, возникающего при увеличении концентрации введенного индия выше некоторого критического значения $N_{кр}$.

Описано изменение энергетического спектра по мере легирования плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ *p*-типа проводимости индием.

В параграфе 3.2 приведены результаты расчетов температурных зависимостей концентрации носителей заряда при разных уровнях легирования индием с использованием предложен-

ной модели. В ГЛАВЕ 3 предложена модель энергетического строения запрещенной зоны $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с $x \approx 0,30 - 0,33$ как неупорядоченной структуры для описания таких свойств материала как стабилизация уровня Ферми, долговременная релаксация, высокоомное состояние при гелиевых температурах, чувствительность в широком диапазоне длин волн.

В параграфе 3.1 представлены основные положения модели:

• Значительное отклонение от стехиометрии кристалла при росте, т.е. наличие большого количества вакансий металлов и теллура (до 10^{20} см^{-3}).

- Значительное отклонение от стехиометрии кристалла при росте, т.е. наличие большого количества вакансий металлов и теллура (до 10^{20} см^{-3}).

ной модели. Показано, что при отсутствии индия в $Pb_{1-x}Sn_xTe$ $x \approx 0,30 - 0,33$ уровень Ферми лежит глубоко в валентной зоне. По мере добавления индия уровень Ферми поднимается вверх по энергии и пересекает потолок валентной зоны. Приводятся результаты расчёта в сравнении с экспериментальными данными. На рисунке 1 представлены результаты расчёта (кривые 1, 2, 3) температурной зависимости концентрации дырок для состава $Pb_{0,67}Sn_{0,33}Te:In$ в сравнении с экспериментальными данными (кривые 4, 5). Расчётные данные: 2 – $N_{In} = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (0,100 ат.%) , 3 – $N_{In} = 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (0,125 ат.%). Экспериментальные данные: 1 – $N_{In} = 0,000$, 4 – $N_{In} = 0,300$ ат. %, 5 – $N_{In} = 1,000$ ат. %. Расчёт производился для образца с содержанием олова $x = 0,33$, $E_g = 11 \text{ мэВ}$. Из рисунка видно, что по мере увеличения легирования индием наблюдается уменьшение минимальной концентрации носителей заряда при гелиевой температуре как для расчётных кривых, так и для экспериментальных данных.

В ГЛАВЕ 4 на основе предложенной модели энергетического спектра запрещённой зоны $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ как неупорядоченной структуры рассмотрены переходные процессы с учётом наличия уровней захвата в запрещённой зоне.

Основным каналом рекомбинации в $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ для $x = 0,24$ является излучательная рекомбинация. В параграфе 4.1, в предположении, что этот же канал рекомбинации останется основным по мере увеличения олова в материале, приводятся результаты расчёта времени жизни.

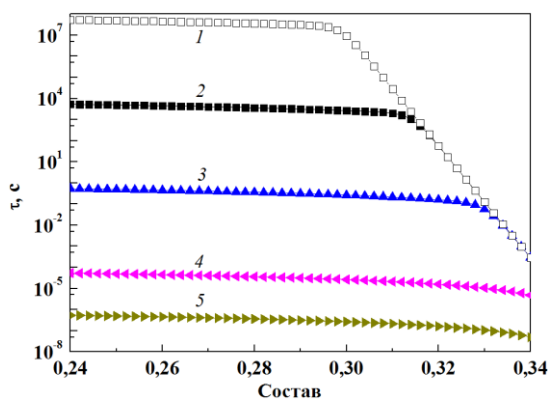


Рис. 2. Зависимость времени жизни излучательной рекомбинации от содержания олова в материале: 1 – $n_{inj} = 10^0 \text{ см}^{-3}$, 2 – $n_{inj} = 10^4 \text{ см}^{-3}$, 3 – $n_{inj} = 10^8 \text{ см}^{-3}$, 4 – $n_{inj} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$, 5 – $n_{inj} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Расчёт производился в соответствии с работой В. Ван Русбрека и В. Шокли [14]. Время жизни носителей заряда при излучательной рекомбинации рассчитывалось для структур $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ $x \approx 0,30 - 0,33$ с контактами, из которых осуществляется монополярная инжекция электронов в диэлектрик. Зависимость времени жизни излучательной рекомбинации при изменении состава в диапазоне $x = 0,24 - 0,34$ для различных величин полевой (n_{inj}) и оптической (g) генерации носителей при $T = 4,2 \text{ К}$ представлено на рисунке 2. Из рисунка видно, что по мере увеличения содержания олова в твёрдом растворе время жизни излучательной рекомбинации уменьшается, причём это уменьшение зависит от уровня оптической и полевой генерации носителей заряда.

В то же время наблюдается резкий экспоненциальный спад времени жизни, зависящий как от состава, так и от уровня инжекции. Этот спад (правая часть кривой 1) определяет ограничение времени жизни собственной концентрацией носителей заряда для любого состава.

Так, расчёт показывает, что для $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ с содержанием олова $x \approx 0,31 - 0,33$ недостижимо время жизни излучательной рекомбинации $\tau_{iR} = 10^6$ с и выше.

Рассчитанные по модели Ван Русбрека и Шокли значения времени жизни не соответствую-

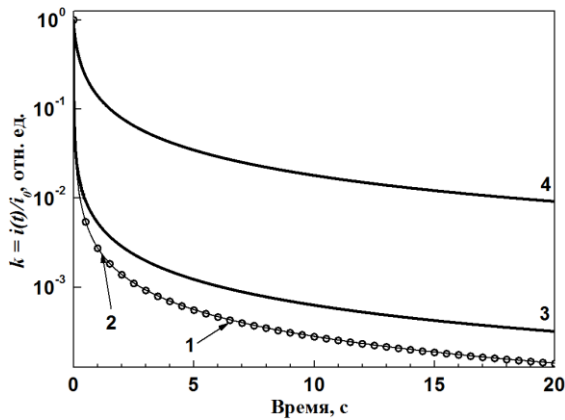


Рис. 3. Релаксация фототока для $\text{Pb}_{0,69}\text{Sn}_{0,31}\text{Te}$ с параметрами: $E_g = 0,022$ эВ; $E_I = 0,017$ эВ; $\gamma_{iR} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$; $\gamma_I = 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$; $g = 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. $M_I = 0$ (1, кружочки); 10^7 (2); 10^9 (3); 10^{11} (4) см^{-3} .

ют экспериментально наблюдаемым временам релаксации фототока, достигающие, согласно различным литературным данным нескольких часов [6, 7]. Всё это говорит о наличии, кроме излучательной рекомбинации, другого механизма, определяющего времена релаксации, которым является захват носителей заряда на ловушки.

В параграфе 4.2 приводятся расчёты релаксации фототока в присутствии центров захвата для электронов. Расчёт приводится для одного уровня, так как этого достаточно, чтобы объяснить основные закономерности релаксации фототока после выключения освещения. Для расчёта релаксации использовалась система дифференциальных уравнений. На рисунке 3 показаны результаты расчёта спада фототока после выключения фототока для случая, когда при одной и той же интенсивности оптической генерации g изменяется концентрация центров захвата. На том же рисунке приведены результаты расчета релаксации фототока, полученные для случая излучательной рекомбинации без захвата в соответствии с теоретической формулой для спада неравновесной концентрации носителей заряда в случае излучательной рекомбинации:

—
 ———, где γ – коэффициент излучательной рекомбинации, g_0 – интенсивность оптической генерации, Δn – неравновесная концентрация электронов, t – время. Остальные обозначения на рисунке: γ_{iR} – коэффициент излучательной рекомбинации, γ_I – коэффициент захвата электронов на центре прилипания, M_I – концентрация центра прилипания, E_I – энергия залегания уровня прилипания относительно потолка валентной зоны. Из рисунка видно, что спад фототока после выключения освещения, рассчитанный по приведенной выше формуле, практически совпадает с кривой при наличии уровня с концентрацией $M_I = 10^7 \text{ см}^{-3}$, полученной численным расчётом (кривые 1 и 2 совпадают). По мере увеличения концентрации центров прилипания релаксация фототока становится всё более затянутой, т.е. спад происходит за более продолжительное время.

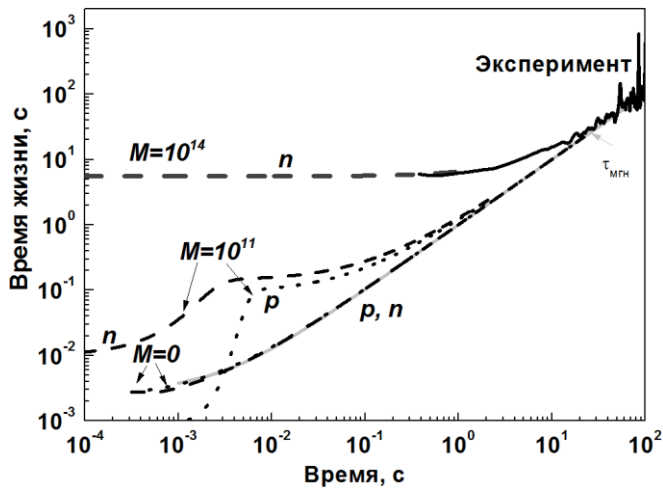


Рис. 4. Зависимость мгновенного времени жизни электронов и дырок от времени с момента выключения оптической генерации при различной концентрации уровней прилипания для электронов M .

Приводится расчёт мгновенных времен жизни для электронов и дырок после выключения освещения и производится сравнение расчёта с экспериментом. Полученные кривые для состава $\text{Pb}_{0,68}\text{Sn}_{0,32}\text{Te}$ представлены на рисунке 4. Параметры расчёта: $E_g = 0,016$ эВ; $E_l = 0,012$ эВ; $\gamma_{ir} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$; $\gamma_l = 2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/\text{с}$; $g_0 = 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Экспериментальные данные (сплошная чёрная кривая) приводятся для образца с $x \approx 0,32$, релаксационные характеристики тока которого были приведены в [A2]. Расчёты показывают, что для малых значений концентрации центров захвата для электронов мгновенные времена жизни электронов и дырок совпадают (кривые с $M = 0$). По мере увеличения концентрации центров, когда увеличивается вероятность захвата на центры, и происходит захват электронов, соответственно, времена жизни электронов и дырок становятся различны (кривые с $M = 10^{11} \text{ см}^{-3}$). Т.е. время жизни электронов в зоне проводимости уменьшается, поскольку существует два механизма рекомбинации электрона: рекомбинация с дыркой из валентной зоны, рекомбинация с дырок с уровня захвата. Поскольку время жизни одного типа носителей заряда обратно пропорционально концентрации другого типа носителей заряда, то время жизни дырок становится больше времени жизни электронов. По мере выброса электронов с центров захвата и их рекомбинации с дырками мгновенные времена жизни электронов и дырок в конечном итоге совпадают. Кривая с $M = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при данных параметрах расчёта совпадает с экспериментальной кривой.

В параграфе 4.3 рассматриваются особенности изменения времени жизни носителей заряда при наличии уровней прилипания для электронов. Поскольку, в данном случае появляется дополнительный канал рекомбинации для электронов (через центры прилипания), то времена жизни электронов и дырок становятся различны. В таком случае вводят понятие мгновенного времени жизни. *Мгновенное время жизни* – физическая величина, показывающая, во сколько раз изменилась концентрация электронов (или дырок) в конкретный момент времени и определяется как:

$$\tau_{\text{мгн}} = \frac{1}{\frac{1}{\tau} \frac{dN}{dt}}$$

В параграфе 4.4 приводится сравнение рассчитанных кривых с экспериментальными данными (на рис.5). В этом случае рассматривался материал $Pb_{0,69}Sn_{0,31}Te$ с шириной запрещённой зоны $E_g = 0,022$ эВ, равновесным положением уровня Ферми $E_f = 0,013$ эВ (потолок валентной зоны – начало отсчёта). Энергетическое положение уровней было определено, как: $E_1 = 0,017$ эВ, $E_2 = 0,019$ эВ, $E_3 = 0,0152$ эВ, а их концентрация бралась равной $M_1 = 10^{11}$ см⁻³, $M_2 = 10^{10}$ см⁻³, $M_3 = 10^{10}$ см⁻³. Расчёт проводился для различного значения скорости оптической генерации g .

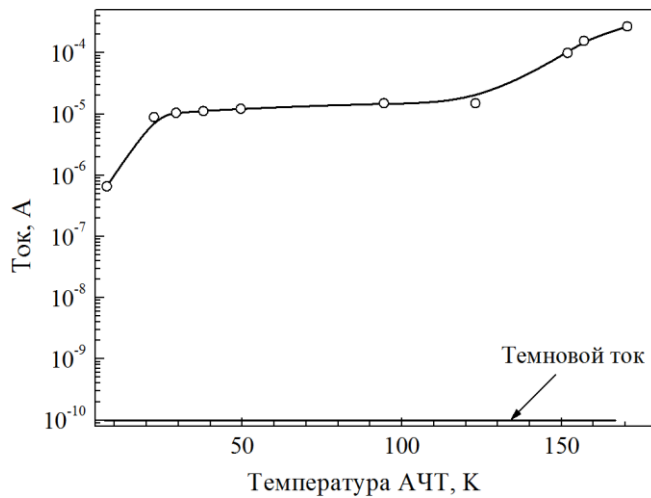


Рис.6. Зависимость полного (полые кружки) тока через образец от температуры излучения чёрного тела. Чёрная прямая – темновой ток. Напряжение смещение на структуре $U_{см} = 0,14$ В, содержание олова $x \approx 0,3$, концентрация индия $N_{In} \approx 0,8\%$.

Как видно из рисунка, при большей интенсивности освещения (кривая 1), первоначальный спад тока является более резким и происходит за более короткий промежуток времени. Максимальный вклад в начальные моменты времени в релаксацию фототока дают свободные электроны в зоне проводимости, которые рекомбинируют со свободными дырками в валентной зоне. По мере уменьшения концентрации свободных электронов и дырок всё большую роль в процессе рекомбинации начинают играть электроны, захваченные на уровни. А, поскольку это вероятный процесс, то процесс уменьшения тока замедляется.

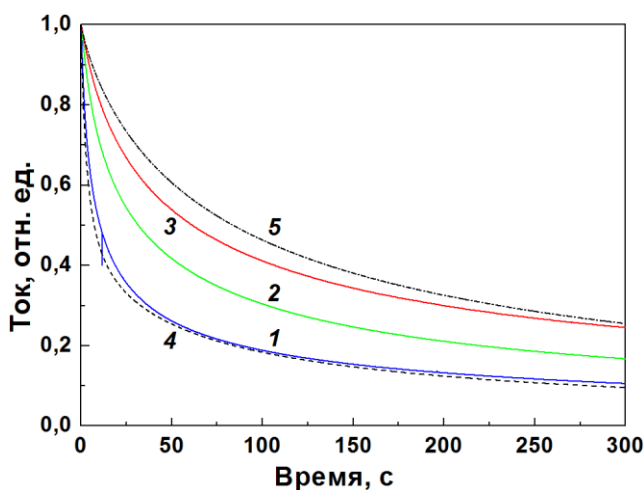


Рис. 5. Кривые релаксации фототока при разной интенсивности освещения. Эксперимент: 1 – $I_{сд} = 470$ мкА; 2 – $I_{сд} = 95$ мкА; 3 – $I_{сд} = 50$ мкА. Расчёт: 4, 5.

На рис.5 кроме экспериментальных кривых 1 – 3 показаны расчётные кривые 4 и 5, в интервал между которыми попадают экспериментальные зависимости. Пунктирная кривая 4: $g = 2 \cdot 10^8$ см⁻³с⁻¹, штрихпунктирная кривая 5: $g = 6 \cdot 10^9$ см⁻³с⁻¹. Экспериментальные данные брались для образца с $x \approx 0,31$.

В ГЛАВЕ 5 приводятся экспериментальные данные по освещению источником АЧТ с различной температурой, освещению ЛСЭ с различной длиной волны, исследовано влияние металлических контактов с различной

работой выхода для определения возможности использования эпитаксиальных плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с содержанием олова $x \approx 0,30 - 0,33$ в качестве фотоприёмников дальнего ИК и ТГц диапазонов спектра.

В параграфе 5.1 представлены результаты эксперимента по освещению структур металл –

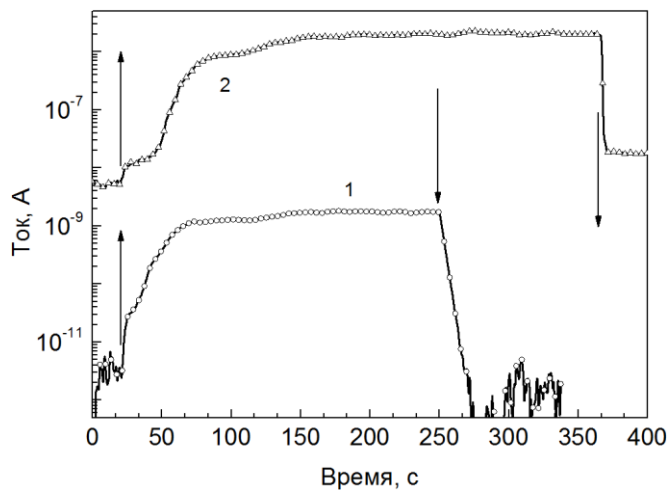


Рис.7. Временная зависимость тока ФП при открытии и закрытии заслонки. 1 – $U_{ФП} = 25$ мВ, 2 – $U_{ФП} = 820$ мВ. Длина волны ЛСЭ $\lambda = 205$ мкм.

структур на основе плёнок составов $PbSnTe:In$ с $x \approx 0,30 - 0,33$ к излучению ЛСЭ с фиксированными длинами волн $\lambda_{ЛСЭ} \approx 141 \pm 0,5$ мкм и $\lambda_{ЛСЭ} \approx 205 \pm 0,5$ мкм ($E \approx 8,8 \pm 0,035$ мэВ и $E \approx 6,0 \pm 0,015$ мэВ). На рис. 7 представлены временные зависимости тока через структуру для $\lambda_{ЛСЭ} \approx 205 \pm 0,5$ мкм для различного напряжения смещения на структуре: $U_{ФП} = 25$ мВ, $U_{ФП} = 820$ мВ. Стрелками показаны моменты включения и выключения освещения. Из рисунка 7 видно, что фототок зависит от напряжения на структуре, и это может быть связано не только с увеличением электрического поля, но и с заполнением уровней захвата вследствие инжекции электронов из контактов. Так, согласно режиму ТОПЗ в присутствии ловушек, для напряжения смещения $U_{ФП} = 820$ мВ, структура находится в состоянии, когда часть уровней заполнена электронами, и фототок обусловлен выбросом электронов с этих уровней. При малых напряжениях смещения (кривая 1) наличие фототока может быть объяснено тем, что из-за разницы работ выхода между металлом и $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ создаётся слой обогащённый электронами, поскольку приложенного напряжения недостаточно для заполнения уровней в запрещённой зоне. Именно этот слой отвечает за наличие тока. Выбросом электронов в зону проводимости с обогащённых уровней под действием света обусловлен фототок в структуре.

В параграфе 5.2 приводятся данные по оценке МЭШ при освещении излучателем АЧТ и ЛСЭ. Ампер-ваттная чувствительность при освещении источником АЧТ рассчитывалась для

$Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ – металл с содержанием олова $x \approx 0,30 - 0,33$ излучателем АЧТ в диапазоне температура $T_{АЧТ} = 10 - 170$ К и ЛСЭ с длинами волн: $\lambda_{ЛСЭ} \approx 141 \pm 0,5$ мкм и $\lambda_{ЛСЭ} \approx 205 \pm 0,5$ мкм ($E \approx 8,8 \pm 0,035$ мэВ и $E \approx 6,0 \pm 0,015$ мэВ). При освещении АЧТ чувствительность наблюдалась во всём температурном диапазоне (рисунок 6). При низких температурах АЧТ, когда энергия падающего излучения меньше ширины запрещённой зоны, фототок обусловлен выбросом электронов с уровней в валентную зону. После этого были проведены эксперименты по определению чувствительности

стационарного значения тока. Падающий поток излучения при этом рассчитывался по формуле:
$$P = \frac{A \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{L}$$
, Вт/элемент, где: d – диаметр выходной диафрагмы излучателя, A – площадь фотоприёмной площадки, L – расстояние от диафрагмы до фотоприёмной площадки; T_1 – температура излучателя; T_2 – температура фотоприемника.

Измерения проводились на структуре с содержанием олова $x \approx 0,32$ ($E_g = 0,016$ эВ, $\lambda_{кр.} = 77$ мкм). Обнаружительная способность D^* и МЭШ, рассчитанные на основе измерений амперваттной чувствительности и измерений шума, представлена в таблице. Так же в таблице представлены эти параметры для ЛСЭ с длиной волны $141 \pm 0,5$ мкм.

Температура АЧТ, К	Обнаружительная способность D^* , см·Гц ^{1/2} /Вт	МЭШ, Вт/Гц ^{1/2}
15	$8.2 \cdot 10^{16}$	$3.1 \cdot 10^{-19}$
42	$1.2 \cdot 10^{15}$	$2.1 \cdot 10^{-17}$
90	$6.4 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{-16}$
ЛСЭ, $141 \pm 0,5$ мкм	10^8	$5 \cdot 10^{-9}$

В параграфе 5.3 приводятся данные по исследованию влияния материала инжектирующих контактов на ВАХ структур типа металл – $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ – металл (Me: In, Al, Al+Ni, Au). Эксперименты показали, что в целом полученные зависимости описывается теорией ТОПЗ. Однако ВАХ для разных контактов имеют различия. Эти различия состоят в следующем: ВАХ для различных металлов сдвинуты по оси напряжений (одно и то же значение тока достигается при различном значении напряжения), ВАХ для структуры с контактом Ni+Al отличается по форме от ВАХ с другими контактами.

Различие в ВАХ можно связать с тем фактором, что граница раздела металл – $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ различна для разных металлов, т.е. различно заполнение уровней в структуре при одном и том же напряжении (разные точки на ВАХ). Следовательно, фототок будет отличаться для различных структур. Это и было получено в эксперименте.

В этом параграфе приводятся данные по чувствительности структур при освещении излучателем типа АЧТ с различными металлическими контактами (Al+Ni, In). Температура АЧТ варьировалась в диапазоне $T_{АЧТ} = 10 - 170$ К. В общем, кривые фототока похожи между собой, однако имеются следующие различия:

- ток для структуры с Ni+Al в области $T_{АЧТ} = 30 - 100$ К примерно на три порядка больше, чем для структуры с Al;

-нарастание тока при $T_{АЧТ} > 100$ К для структуры с Ni+Al, меньше, чем для структуры с Al, так что токи в температурной области $T_{АЧТ} > 150$ К отличаются между собой для этих структур только на порядок.

В заключении приводятся краткие выводы к главе 5.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Впервые методом локального легирования индием были получены образцы $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с содержанием олова $x \approx 0,30 - 0,33$, в которых наблюдается переход в высокоомное состояние при понижении до гелиевой температуры, причём установлено, что минимальная концентрация носителей заряда зависит от состава нелегированного образца и от концентрации введённого индия. При использовании этого метода получены $p^+ - i - p^+$ -структуры ($p^+ - Pb_{1-x}Sn_xTe - i - Pb_{1-x}Sn_xTe:In - p^+ - Pb_{1-x}Sn_xTe$ -структуры).

2. Разработана модель энергетического строения запрещённой зоны $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с учётом наличия локальных уровней и примесных зон, основанная на положениях теории неупорядоченных систем и на представлениях о спонтанной диссоциации нейтральной примеси, механизмах внедрения индия в $Pb_{1-x}Sn_xTe$, а также на имеющихся экспериментальных данных.

3. С использованием развитой модели были проведены расчёты температурной зависимости положения уровня Ферми, рассчитаны температурные зависимости концентрации носителей заряда при различной концентрации введённого индия. Показано, что при концентрации индия $C_{In} \leq 0,1$ % в плёнках $Pb_{1-x}Sn_xTe$ $x \approx 0,30 - 0,33$ концентрация носителей заряда не зависит от температуры, а при $C_{In} \approx 0,1 - 2,0$ % концентрация носителей заряда уменьшается при изменении температуры от комнатной до гелиевой.

4. Проведённые расчёты и сравнение с экспериментом показывают, что при легировании индием в запрещённой зоне $Pb_{1-x}Sn_xTe$ $x \approx 0,30 - 0,33$ образуется система примесных уровней и не исключено образование примесных зон.

5. Установлено, что с увеличением содержания олова время жизни излучательной рекомбинации для собственного полупроводника уменьшается. Динамика фототока определяется наличием центров захвата для электронов. На основе проведённых расчётов показано, что релаксация фототока при излучательной рекомбинации для различного содержания олова и одного центра захвата дают качественное согласие при воздействии на структуру излучения различной интенсивности.

6. Плёнки $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с содержанием олова $x = 0,30 - 0,33$ обладают чувствительностью в температурном интервале АЧТ от 10 до 180 К (максимум излучения, согласно закону Вина, на длинах волн от $\lambda_{max} = 290$ мкм до $\lambda_{max} = 16$ мкм). Установлено наличие двух механизмов, определяющих чувствительность плёнок $PbSnTe:In$ в разных диапазонах длин волн. Первый меха-

низм соответствуют переходам с примесных уровней в зону проводимости и определяет фоточувствительность при низких температурах АЧТ (для состава $\text{Pb}_{0,7}\text{Sn}_{0,3}\text{Te:In}$ с $E_g = 0,027$ эВ при температуре излучателя $T = 62$ К и ниже). Второй механизм соответствует фундаментальному поглощению, и фототок обусловлен возбуждением электронов из валентной зоны в зону проводимости.

7. Плёнки $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$ с содержанием олова $x = 0,30 - 0,33$ могут быть использованы в качестве высокочувствительных приёмников дальнего ИК (фундаментальное поглощение) и ТГц (примесное поглощение) излучения. Максимальное значение обнаружительной способности по интегральному источнику излучения типа АЧТ, полученное при напряжении смещения на образцах $U_{см} = 0,14$ В и температуре $T_{АЧТ} = 15$ К, составило $D^* = 8,2 \cdot 10^{16}$ см \cdot Гц $^{-2}$ \cdot Вт $^{-1}$, что соответствует МЭШ = $3,1 \cdot 10^{-19}$ Вт \cdot Гц $^{-2}$.

8. Показано, что замена металла контакта индия на алюминий сопровождается сдвигом ВАХ по напряжению, что обусловлено изменением работы выхода металлов, при этом плотность энергетически активных ловушек на границе металл – $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$ существенно не изменяется. Использование контакта Ni+Al не приводит к сдвигу ВАХ по напряжению (по сравнению со структурой In – $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$ – In), но существенно изменяет форму ВАХ, что объясняется изменением плотности электрически активных ловушек на границе Ni – $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи

А1 Приёмники излучения в терагерцовом диапазоне на основе плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$ / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, И.Г. Неизвестный, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский, В.С. Эпов // Автометрия. – 2013. – Т. 49. – № 5. – С. 86–92.

А2 Перспективы применения твёрдых растворов $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$ с $x > 0,3$ для фотоприёмников с расширенным спектральным диапазоном чувствительности / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, И.Г. Неизвестный, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // Микроэлектроника. – 2013. – Т. 42, вып. 2. – С. 83–87.

А3 Влияние материала инжектирующих контактов на ВАХ плёнок $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te:In}$ / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, И.Г. Неизвестный, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // Микроэлектроника. – 2013. – Т. 42. – № 2. – С. 88–92.

А4 Твёрдый раствор PbSnTe:In – уровни захвата, гальваномагнитные свойства и ТГц фоточувствительность / Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, В.Н. Шумский, В.С. Эпов // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, вып. 12. – С. 1662–1668.

А5 Ищенко Д.В. Исследование особенностей ВАХ плёнок PbSnTe:In в магнитном поле в режиме инжекции из контактов / Д.В. Ищенко, В.С. Эпов // Автометрия. – 2016. – Т. 52. – № 5. – С. 26–30.

А6 Приёмное устройство радиолокатора дальнего ИК-и ТГц-диапазона / Е.М. Ильин, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, Н.С. Пашин, А.И. Полубехин, С.П. Супрун, Е.В. Федосенко, А.Г. Черевко, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 3. – С. 176–191.

А7 Ищенко Д. В. Разработка методики локального легирования и коррекции проводимости эпитаксиальных слоёв PbSnTe путём диффузии индия из поверхностных нанометровых плёнок / Д. В. Ищенко, Б. М. Кучумов // Микроэлектроника. – 2017. – Т. 46. – № 4. – С. 301–304.

А8 Ищенко Д.В. Излучательная рекомбинация, захват носителей заряда на ловушки и релаксация фототока в PbSnTe:In с составом вблизи инверсии зон / Д.В. Ищенко, И.Г. Неизвестный // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, вып. 7. – С. 694–698.

А9 Особенности протекания фототока в инжекционных структурах на основе плёнок PbSnTe:In / Д.В. Ищенко, И.Г. Неизвестный, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова // Микроэлектроника. – 2018. – Т. 47. – № 4. – С. 3–6.

Тезисы докладов

А10 Исследование гальваномагнитных и фотоэлектрических свойств твёрдых растворах $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ в зависимости от содержания олова / А.Н. Акимов, А.Э. Климов, Д.В. Ищенко, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // Российская конференция и школа по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоэлектроники «Фотоника 2011», август 22–26. – Новосибирск, Россия, 2011. – С. 108.

А11 Влияние материала инжектирующих контактов на ВАХ пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // XXII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 2012, май 22 – 25. – Москва, Россия, 2012. – С. 57–59.

А12 Перспективы применения твёрдых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с $x > 0,3$ для фотоприемников с расширенным спектральным диапазоном / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // XXII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 2012, май 22 – 25. – Москва, Россия, 2012. – С. 190–191.

А13 Ищенко Д.В. Чувствительность плёнок PbSnTe:In в зависимости от температуры излучателя / Д.В. Ищенко // Материалы международной научно-технической конференции INTERMATIC-2012, декабрь 3 – 7. – Москва, Россия, 2012. – Ч. 2. – С. 114–117.

A14 Ищенко Д.В. Влияние температуры излучателя на чувствительность плёнок PbSnTe:In / Д.В. Ищенко // Материалы 51-й международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс - 2013», апрель 12 – 18. – Новосибирск, Россия, 2013. – С. 30.

A15 Время жизни носителей заряда в твёрдом растворе $Pb_{1-x}Sn_xTe$, легированного индием, в области состава $x \approx 0,3 \div 0,33$ / Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, В.Н. Шумский // XI Российская конференция по физике полупроводников, 2013, сентябрь 19 – 20. – Санкт-Петербург, Россия, 2013. – С. 166.

A16 Temperature Resolution of $Pb_{1-x}Sn_xTe$:In-based photosensing film structure under illumination with blackbody radiation / Denis V. Ishchenko, Alexander E. Klimov, Igor G. Neizvestny, Nikolay S. Paschin, Valentina N. Sherstyakova, Vladimir N. Shumsky // 15th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2014, June 30 – July 5. – Russia, Altai, 2014. – Pp. 85–89.

A17 Investigation of Photoelectrical Properties of PbSnTe Doped with Indium with Tin Content $x = 0.3 - 0.33$ / Denis Ishchenko, Aleksey Akimov, Aleksander Klimov, Igor Neizvestny, Nikolay Paschin, Valentina Sherstyakova, Vladimir Shumsky // 32nd International conference on the Physics of semiconductors, 10-17 August 2014. – Texas, USA, 2014. – Режим доступа: <http://www.icps2014.org/program/> (дата обращения: 01.10.2014).

A18 Спектральная чувствительность пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe$:In с $x > 0.3$ / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // Труды XVIII международного симпозиума «Нанопфизика и нанозлектроника», 2014, март 10–14. – Нижний Новгород, 2014. – С. 487–488.

A19 Плёнки PbSnTe:In для сверхдального ИК (свыше 30 мкм) и ТГц диапазонов / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский, В.С. Эпов // XXIII Международная научно-техническая конференция, школа молодых специалистов и выставка по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 28-30 мая, 2014 : труды. – Москва, Россия, 2014. – С. 170–172.

A20 Структуры n-i-p, p-i-p, n-i-p на основе эпитаксиальных плёнок PbSnTe:In: изготовление и свойства / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, Н.С. Пашин, С.П. Супрун, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // Тезисы Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (Фотоника 2015), 12-16 октября 2015. – Новосибирск, 2015. – С. 108.

A21 Особенности ВАХ пленок PbSnTe:In в режиме инжекции из контактов и ограничения тока пространственным зарядом в магнитном поле: эксперимент и расчет / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, И.Г. Неизвестный, В.Н. Шумский, В.С. Эпов // Тезисы XII Россий-

ской конференции по физике полупроводников, 21 – 25 сентября 2015. – Звенигород, 2015. – С. 166.

A22 Термостимулированные токи в PbSnTe:In при заполнении центров захвата освещением и инжекцией из контактов / А.Н. Акимов, Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, И.Г. Неизвестный, В.Н. Шумский, В.С. Эпов // Тезисы XII Российской конференции по физике полупроводников, 21 – 25 сентября 2015. – Звенигород, 2015. – С. 332.

A23 Фотопроводимость плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ с $x \geq 0.3$ вблизи области собственного поглощения / Д.В. Ищенко, А.Э. Климов, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова, В.Н. Шумский // Материалы XX международного симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника». – 2016. – Т. 2. – С. 596 – 597.

A24 Planar Barrier Structures Based on Thin Films of $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ for the Far IR Photodetector: Preparation and Properties / Alekey N. Akimov, Denis V. Ishchenko, Alexander E. Klimov, Nikolay S. Paschin, Andrey S. Tarasov, Valentina N. Sherstyakova // 18th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2017, June 29 – July 3. – Russia, Altai, 2017. – Pp. 30 – 33.

A25 Features of Photoconductivity of PbSnTe:In Films Under the Variable Illumination / Alekey N. Akimov, Denis V. Ishchenko, Alexander E. Klimov, Nikolay S. Paschin, Artem N. Papantonopulo, Valentina N. Sherstyakova // 18th international conference on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2017, June 29 – July 3. – Russia, Altai, 2017. – Pp. 18 – 21.

A26 Фотопроводимость в *p-i-p* структурах на основе плёнок $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ при межзонном возбуждении / А.Э. Климов, Д.В. Ищенко, Н.С. Пашин, В.Н. Шерстякова // XIII Российская конференция по физике полупроводников, РКФП-2017, 2–6 октября. – Россия, Екатеринбург, 2017. – С. 304.

A27 Климов А.Э. Исследование электрофизических свойств эпитаксиальных слоёв твёрдого раствора PbSnTe при введении индия / А.Э. Климов, Д.В. Ищенко, С.П. Супрун // XIII Российская конференция по физике полупроводников, РКФП-2017, 2–6 октября. – Россия, Екатеринбург, 2017. – С. 415.

A28 The effect of surface on conductivity of PbSnTe:In/BaF₂ topological crystalline insulator in space charge limited regime / A.E. Klimov, A.N. Akimov, V.S. Eпов, E.V. Fedosenko, D.V. Ishchenko, N.S. Paschin, V.N. Sherstyakova, O.E. Tereshchenko // Proceeding of The fourth Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials ASCONANOMAT 2018, September 23 – 28. – Russia, Vladivostok, 2018. – Pp. 82–83.

A29 The effect of chemical treatment on properties of thin films of PbSnTe:In topological crystalline insulator / A.N. Akimov, V.S. Eпов, E.V. Fedosenko, D.V. Ishchenko, A.E. Klimov, N.S. Paschin, V.N. Sherstyakova, S.P. Suprun, O.E. Tereshchenko // Book of abstracts of 9th International

conference on materials science and condensed matter physics MSCMP 2018, September 25 – 28. – Moldova, Chisinau, 2018. – Pp. 108.

Список цитируемой литературы:

1. Bis R.F. Applicability of Vegard's law to the $Pb_xSn_{1-x}Te$ alloy system / R.F. Bis, J.R. Dixon // *Journal of Applied Physics*. – 1969. – Vol. 40. – No. 4. – Pp. 1918–1921.
2. Anderson W.W. Gain-frequency-current relation for $Pb_{1-x}Sn_xTe$ double heterostructure lasers / W.W. Anderson // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1977. – Vol. QE-13. – No. 7. – Pp. 532–543.
3. Климов А. Э. Многоэлементные фотоприёмные устройства дальнего ИК диапазона на основе гетероэпитаксиальных плёнок $PbSnTe$, легированных In , на BaF_2 / А.Э. Климов, В.Н. Шумский // *Матричные фотоприёмные устройства инфракрасного диапазона* / под ред. С.П. Сеницы. – Новосибирск: Наука, 2001. – С. 308–372.
4. Рябова Л.И. Терагерцовая фотопроводимость и нетривиальные локальные электронные состояния в легированных полупроводниках на основе теллурида свинца / Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов // *Успехи физических наук*. – 2014. – № 184. – С. 1033–1044.
5. Драбкин И.А. Спонтанная диссоциация нейтральных состояний примесей на положительно и отрицательно заряженные состояния / И.А. Драбкин, Б.Я. Мойжес // *Физика и техника полупроводников*. – 1981. – Т. 15, вып. 4. – С. 625–647.
6. Накопление и время релаксации электронов при фотоэффекте в $Pb_{0.78}Sn_{0.22}Te$ / Б.М. Вул, И.Д. Воронова, С.П. Гришечкина, Т.Ш. Рагимова // *Письма в ЖЭТФ*. – 1981. – Т. 33, вып. 6. – С. 346–350.
7. Модель флуктуационного примесного потенциала. Описание фотоэлектрических и гальваномагнитных явлений в $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с примесью In / В.С. Виноградов [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 1981. – Т. 15, вып. 2. – С. 361–368.
8. Klimov A.E. Terahertz sensitivity of $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ / A.E. Klimov, V.V. Kubarev, V.N. Shumsky // *Ferroelectrics*. – 2007. – Vol. 347. – Pp. 111–119.
9. Klimov A. Localized states in narrow-gap ferroelectric-semiconductor $PbSnTe:In$ injection currents, IR and TGz photosensitivity, magnetic field effects / A. Klimov, V. Shumsky // *Ferroelectrics* / ed. by Mickael Lallart. – Rijeka. Croatia, 2011. – Pp. 527–552.
10. Мотт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах: в 2 т. / Н. Мотт, Э. Дэвис. – М.: Мир. – Т. 1. – 1982. – 368 с.
11. Электрические свойства $Pb_{1-x}Sn_xTe$ с примесью индия / Ю.В. Андреев [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. – 1975. – Т. 9, вып. 10. – С. 1873–1878.

12. Андроник К.И. Влияние примеси индия на электрофизические свойства $Pb_{1-x}Sn_xTe$ при $x > 0,3$ / К.И. Андроник, М.П. Бойко, А.В. Никорич // Физика и техника полупроводников. – 1992. – Т. 26, вып. 5. – С. 839–844.

13. Калюжная Г.А. Проблема стехиометрии в полупроводниках переменного состава типа A^2B^6 и A^4B^6 / Г.А. Калюжная, К.В. Киселева // Труды физического института имени П.Н. Лебедева. – 1987. – Т. 177. – С. 5–84.

14. W. van Roosbroeck. Photon-radiative recombination of electrons and holes in germanium / W. van Roosbroeck, W. Shockley // Physical Review. – 1954. – V.94. – No. 6. – Pp. 1558–1560.