



На правах рукописи

ЕВСТИГНЕЕВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

**Получение легированных мышьяком эпитаксиальных
слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0.4$) методом МOCVD и изучение их
электрофизических свойств**

Специальность 02.00.01 – Неорганическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Нижний Новгород – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН»

Научный руководитель: **Моисеев Александр Николаевич**
доктор химических наук, заведующий лабораторией летучих соединений металлов ФГБУН «Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН» (г. Н. Новгород)

Официальные оппоненты: **Зломанов Владимир Павлович**
доктор химических наук, профессор кафедры неорганической химии химического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (г. Москва)

Дворецкий Сергей Алексеевич
кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела № 006 «Инфракрасные оптоэлектронные устройства на основе КРТ» ФГБУН «Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН» (г. Новосибирск)

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Орион» (г. Москва)

Защита диссертации состоится 20 мая 2020 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.08 по химическим наукам при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 5.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <https://diss.unn.ru/1009> и в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат химических наук

 Буланов Е.Н.

Введение

Актуальность исследования

Твердый раствор $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (KPT) известен как материал, оптимально подходящий для создания ИК-детекторов с высокими рабочими параметрами и широким набором применений. Высокие востребованность и интерес к данному материалу обусловлены возможностью изменять ширину запрещенной зоны и, соответственно, длину волны регистрируемого излучения в диапазоне от 1 до 20 мкм; большим коэффициентом оптического поглощения и высокой квантовой эффективностью; большими значениями времени жизни и подвижности носителей заряда.

В настоящее время растет интерес к освоению коротковолнового ИК-диапазона (SWIR, $\lambda=1.4\text{--}3$ мкм), являющегося рабочим в ряде областей астрономии, при мониторинге поверхности Земли, идентификации и детализации труднораспознаваемых объектов (в условиях тумана, задымленности, сумерек и лунного света) и др. Большинство исследований при освоении SWIR диапазона сосредоточены на соединениях A^3B^5 , прежде всего, InGaAs. Однако детекторы из InGaAs показывают пониженные рабочие характеристики при $\lambda > 1.7$ мкм. В то же время использование $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в SWIR диапазоне ($x=0.38\text{--}0.6$, $\lambda=3\text{--}1.7$ мкм) дает возможность создавать детекторы, работающие при повышенной температуре с рабочими параметрами выше, чем у детекторов на основе InGaAs.

Для подобных применений требуются эпитаксиальные слои (ЭС) KPT большой площади с контролируемым уровнем акцепторного и донорного легирования и высокой долей электрической активности примеси. Донорное легирование KPT хорошо отработано и не представляет проблем для различных методов роста. Акцепторное легирование имеет значительные трудности, в первую очередь для методов жидкофазной (ЖФЭ) и молекулярно-лучевой (МЛЭ) эпитаксии, где для активации примеси требуются дополнительные стадии высокотемпературных и низкотемпературных обработок. Химическое осаждение из паров металлоорганических соединений (MOCVD) позволяет получать полностью легированные гетероструктуры KPT в широком диапазоне концентрации носителей заряда с высокой долей электрически активной

примеси непосредственно после роста, что наряду с другими преимуществами приводит к низким затратам и высокой производительности метода. Основной акцепторной примесью, которая используется во всех методах для легирования КРТ, является мышьяк. Выбор мышьяка, в первую очередь, обусловлен его низким значением коэффициента диффузии, что важно для получения структур с резкими гетеропереходами. Несмотря на прогресс, который произошел за последние два десятилетия в MOCVD и других методах по легированию КРТ мышьяком, большая часть исследований посвящена получению и изучению свойств узкозонного материала, поглощающего в средневолновом (MWIR, $\lambda=3-5$ мкм, $x\sim 0.3$) и длинноволновом (LWIR, $\lambda=8-14$ мкм, $x\sim 0.2$) ИК-диапазоне. При этом сведения о свойствах легированного мышьяком $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x\sim 0.4$ практически отсутствуют. Имеющиеся в литературе сведения о механизме вхождения мышьяка в КРТ, полученном MOCVD методом, неоднозначны.

Востребованность КРТ в различных приложениях ИК-фотоники (в т. ч. в SWIR диапазоне), недостаток в литературе сведений об электрофизических свойствах легированного мышьяком $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x\sim 0.4$, отсутствие единого мнения о механизме влияния легирующего соединения мышьяка на химические процессы в MOCVD методе получения КРТ, обуславливают актуальность темы исследования.

Цель работы

Целью диссертационной работы является изучение влияния условий осаждения ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x\sim 0.4$ на подложках GaAs в MOCVD методе получения на вхождение мышьяка в слои из трис-диметиламиноарсина (ТДМАА, $\text{As}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_3$) и изучение электрофизических свойств полученных слоев.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

1. Изучение закономерностей вхождения мышьяка из ТДМАА при осаждении ЭС CdTe из паров диэтилтеллура (ДЭТ) и диметилкадмия (ДМК) в зависимости от кристаллографической ориентации подложки GaAs, соотношения ДЭТ/ДМК и концентрации ТДМАА в газовой фазе;
2. Изучение влияния условий выращивания на вхождение мышьяка из ТДМАА во время осаждения ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ MOCVD-IMP (IMP -interdiffused multilayer process) методом;

3. Изучение влияния мышьяка, введенного в ЭС CdTe и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, на их электрофизические свойства;
4. Изучение влияния низкотемпературных и активационных отжигов на долю электрически активного мышьяка и электрофизические свойства легированных мышьяком ЭС CdTe и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$.

Научная новизна полученных результатов

1. МOCVD методом при пониженном давлении выращены легированные мышьяком ЭС CdTe и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (111)В, (211)В, (100), (211)А и впервые – (310). Показано, что в изученных условиях встраивание мышьяка происходит преимущественно в анионную подрешетку. Установлено, что в диапазоне потоков ТДМАА $1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-6}$ моль/мин концентрация As в CdTe описывается зависимостью $C_{\text{As}} \sim [\text{ТДМАА}]^{1.5}$, что говорит о сложном механизме процесса легирования. Предложены механизмы совместного распада ДМК, ДЭТ и ТДМАА в газовой фазе и на поверхности роста, которые могут объяснить дробную степенную зависимость концентрации As в CdTe от потока ТДМАА.
2. Подтверждено изменение макросостава (x) слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при легировании мышьяком из ТДМАА. Впервые показано, что легирование мышьяком при добавлении ТДМАА в газовую фазу в избытке ДЭТ ($\text{ДЭТ}/\text{ДМК} \geq 4$) не приводит к заметному изменению макросостава слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Предложено объяснение такому поведению легирующего прекурсора.
3. Впервые проведен широкий комплекс исследований электрофизических параметров ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}:\text{As}$ с $x \sim 0.4$ нескольких кристаллографических ориентаций и установлено, что доля электрически активного мышьяка в слоях увеличивается в ряду ориентаций (111)В < (100) < (310). В *as-grown* ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (310) с концентрацией мышьяка до $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ доля электрически активной примеси после роста в избытке ДЭТ составляла больше 80 %.

Практическая ценность выполненной работы

Разработана методика легирования ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ($x \sim 0.4$) мышьяком в процессе осаждения МOCVD-IMP методом без заметного изменения макросостава (x) при добавлении в газовую фазу легирующего прекурсора. Полученные результаты были использованы при выращивании в едином ростовом процессе P^+-n структуры на основе ЭС КРТ с параметрами,

необходимыми для изготовления фотодиодов. Данные структуры переданы заинтересованным организациям для дальнейших исследований.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты изучения зависимости вхождения мышьяка в ЭС CdTe при MOCVD осаждении от соотношения МОС, ориентации подложки и концентрации ТДМАА в газовой фазе, электрофизических свойств ЭС CdTe.
2. Результаты изучения зависимости вхождения мышьяка в ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ в MOCVD-IMP методе от соотношения МОС и ориентации подложки.
3. Результаты изучения электрофизических параметров легированных мышьяком из ТДМАА ЭС $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ до и после низкотемпературных и активационных отжигов.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена использованием современных надежных физических и физико-химических методов исследования, воспроизводимостью и сопоставлением с литературными данными.

Личный вклад автора

Личный вклад диссертанта заключается в: участии в постановке цели и задач исследования; проведении экспериментов по синтезу слоев CdTe и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$; определении толщины и макросостава слоев методом ИК Фурье-спектроскопии; обработке концентрационных профилей примеси мышьяка и макросостава, полученных методом ВИМС; определении удельного сопротивления, концентрации и подвижности основных носителей заряда слоев CdTe и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$; определении времени жизни неосновных носителей заряда в слоях $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$; проведении травления, активационного и низкотемпературного отжигов слоев; обсуждении и подготовке к публикации полученных результатов.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XXIV Международной научно-технической конференции по фотозлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2016 г.), Международной научно-технической конференции «Фундаментальные

проблемы радиоэлектронного приборостроения» [INTERMATIC 2017, 2018] (Москва, 2017 г., 2018 г.), XIX международном симпозиуме «Нанозифика и нанозлектроника» (Нижний Новгород, 2015 г.), XV Всероссийской конференции и VIII школе молодых ученых «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение» (Нижний Новгород, 2015 г.), XVI Всероссийской конференции и IX школе молодых ученых «Высокочистые вещества и материалы. Получение, анализ, применение», посвященные 100-летию академика Г. Г. Девятых (Нижний Новгород, 2018 г.), Российской конференции и школе молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых) «ФОТОНИКА 2017» (Новосибирск, 2017 г.), XIX Всероссийской конференции молодых учёных-химиков (Нижний Новгород, 2016 г.).

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ: 4 статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК при министерстве образования и науки Российской Федерации и индексируемых в международной базе данных Scopus и Web of Science; 3 статьи в научных журналах, индексируемых в базе РИНЦ; 7 тезисов докладов на всероссийских и международных конференциях.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа изложена на 128 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, выводов и списка цитируемой литературы, включающего 127 наименований. В основном тексте диссертационной работы содержится 42 рисунка и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, научная новизна и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В **Главе 1** представлен литературный обзор по теме диссертации. Приведены данные о методах получения и физико-химических свойствах твердых растворов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, рассмотрены электрическое поведение собственных дефектов и примесей, а также сведения по легированию ЭС

$\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ мышьяком в МOCVD-IMP методе. Свойства нелегированного КРТ определяются дефектами кристаллической структуры (преимущественно вакансиями ртути), а также фоновыми примесями. Подобраны акцепторные (мышьяк) и донорные (индий, йод) примеси, которые используются для получения КРТ p - и n -типа проводимости. В МOCVD методе для легирования КРТ мышьяком в настоящее время используют преимущественно ТДМАА. Это обусловлено большой вероятностью образования атомарного мышьяка в процессе легирования. Однако, литературные сведения о свойствах легированного мышьяком $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ с $x \sim 0.4$ крайне ограничены. До конца остается неясным механизм легирования мышьяком при использовании ТДМАА в условиях МOCVD-IMP процесса и его влияния на макросостав КРТ. На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

В **Главе 2** представлено описание объектов исследования, реактивов, аппаратуры и методов получения и исследования.

Объектами исследования являлись гетероэпитаксиальные структуры CdTe и твердого раствора $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ на подложках из полуизолирующего GaAs кристаллографических ориентаций (310), (100), (111)В, (211)В и (211)А. Выращивание CdTe и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ проводили в установке, схема которой представлена на **рис. 1**. Она состоит из газораспределительной системы (включает водородную Pd-очистку, электронные регуляторы расхода газа РРГ-12 с точностью поддержания расхода газа $\pm 1\%$, электромагнитные клапаны и барботеры с МОС), вертикального кварцевого реактора с внутренним источником ртути и системы откачки и утилизации. Управление температурными режимами работы установки осуществляется с помощью регуляторов МИНИТЕРМ-400.31 и МИНИТЕРМ-500.01 с точностью не хуже $\pm 0.5^\circ\text{C}$. В качестве исходных реагентов использовали высокочистые МОС (диметилкадмий – ДМК, диэтилтеллур – ДЭТ, диизопропилтеллур – ДИПТ, трис-диметиламиноарсин – ТДМАА) производства ООО “ЭЛМОС” (г. Зеленоград) с содержанием основного компонента по массе не менее 99.999%, ртуть марки Р 10-6 и водород технический марки А.

Легирование слоев CdTe проводили в процессе осаждения. В работе реализована IMP (interdiffused multilayer process) методика осаждения слоев КРТ. Выращивание ЭС КРТ проводили путем нанесения тонких чередующихся слоев CdTe и HgTe (50–150 нм) при температуре подложки 350–360 °С и общем давлении в реакторе 20 кПа, давлении МОС 5–30 Па, ртути 2–3 кПа. Легирование ЭС КРТ осуществляли во время роста подслоя CdTe. Перед осаждением КРТ на подложку наносили буферный слой CdTe, а поверхность КРТ защищали тонким пассивирующим слоем CdTe.

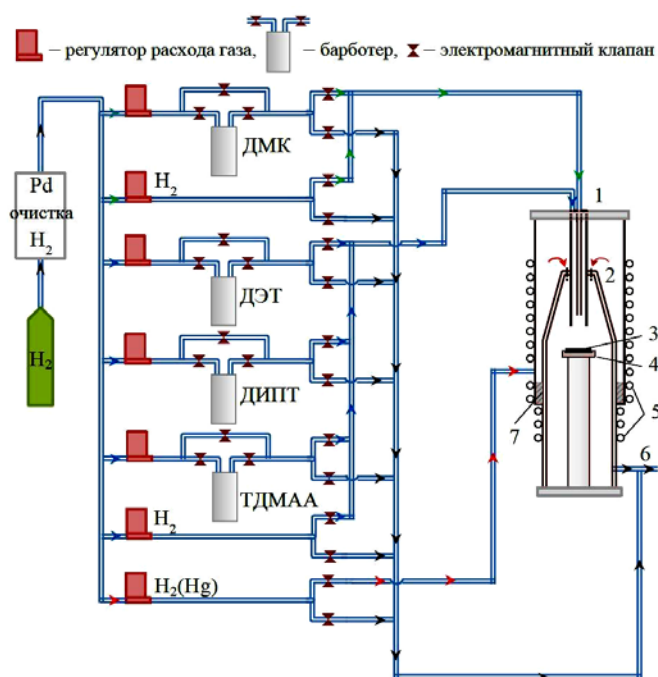


Рис. 1. Схема установки для эпитаксии КРТ и CdTe. 1 – ввод исходных реагентов, 2 – конус предраспада МОС, 3 – подложка GaAs, 4 – графитовый пьедестал, 5 – нагреватели, 6 – система откачки и утилизации, 7 – внутренний резервуар с Hg.

Определение толщины и состава слоев проводили методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры были записаны на ИК Фурье-спектрометре Nicolet 6700 в диапазонах волновых чисел 500–4000 см^{-1} (для КРТ) и 500–6000 см^{-1} (для CdTe) с разрешением 4 см^{-1} при $T=298$ К. Относительная погрешность определения толщины составляла $\pm 5\%$. Абсолютная погрешность определения состава x составляла ± 0.002 .

Для исследования профилей микро- и макросостава по толщине слоев использовали метод вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС). Масс-спектры образцов были получены на время-пролетном масс-спектрометре вторичных ионов TOF.SIMS-5 в ИФМ РАН. Анализ образцов осуществлялся в импульсном режиме путем чередования распыляющего (Cs^+ , 1 кэВ) и анализирующего (Bi_3^+ , 25 кэВ) пучков. Регистрировались отрицательные вторичные ионы. Для определения абсолютной концентрации мышьяка в слоях использовали количественный анализ спектров ВИМС с применением эталонных образцов

CdTe и КРТ. Относительная случайная погрешность определения концентрации As не превышала $\pm 10\%$.

Для определения электрофизических параметров использовали данные по измерению эффекта Холла методом Ван Дер Пау в изменяющемся магнитном поле (0–1 Тл) при $T=300$ и 77 К. Омические контакты к КРТ изготавливали из индия, а к CdTe – осаждением золота из водного раствора $\text{HAuCl}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Суммарная погрешность определения ρ , n и μ не превышала $\pm 25\%$.

Измерение времени жизни неосновных носителей заряда проводили в ИФП СО РАН бесконтактным методом по спаду фотопроводимости в диапазоне температур $77\text{--}300$ К. Возбуждение фотопроводимости осуществляли импульсным излучением с $\lambda=920$ нм и длительностью импульса 100 нс. Относительная погрешность определения времени жизни (τ) составляла $\pm 30\%$.

В Главе 3 представлены результаты легирования слоев CdTe мышьяком из ТДМАА в условиях МOCVD метода и изучения их электрофизических свойств.

Зависимость вхождения мышьяка в слои CdTe от концентрации ТДМАА в газовой фазе

При потоке ТДМАА ($V_{\text{ТДМАА}}$) $1 \cdot 10^{-8}$ моль/мин (**рис. 2**) концентрация As в ЭС CdTe находится на уровне предела обнаружения прибора TOF.SIMS-5. Поток ТДМАА $1.2 \cdot 10^{-7}$ моль/мин позволяет увеличить концентрацию As в CdTe до $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Однако при этом наблюдается некоторый спад концентрации As по толщине CdTe (от поверхности к подложке GaAs), вызванный установлением стационарного потока ТДМАА в начале процесса (насыщение поверхностей реактора прекурсором As после ввода в реактор). Дальнейшее увеличение величины потока ТДМАА $\geq 5 \cdot 10^{-7}$ моль/мин позволяет получить однородный уровень легирования мышьяком по толщине CdTe. Стоит отметить, что добавление ТДМАА в газовый поток в концентрации $(5\text{--}10) \cdot 10^{-7}$ моль/мин приводит к увеличению скорости роста CdTe на $15\text{--}25\%$. Зависимость концентрации As в CdTe от потока ТДМАА в газовой фазе в логарифмическом масштабе имеет вид прямой с наклоном $k=1.5$, что свидетельствует о сложном механизме протекающего процесса (**рис. 3**).

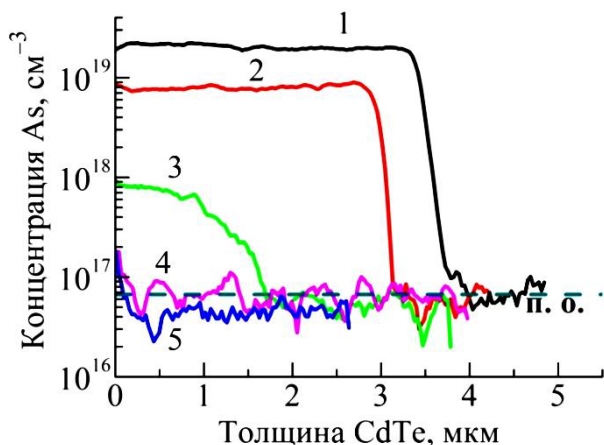


Рис. 2. Концентрационное распределение примеси As по толщине ЭС CdTe (100) в зависимости от $V_{\text{ТДМАА}}$. Соотношение ДЭТ/ДМК=1. $V_{\text{ТДМАА}}$, моль/мин: 1 – $1 \cdot 10^{-6}$; 2 – $5 \cdot 10^{-7}$; 3 – $1.2 \cdot 10^{-7}$; 4 – $1 \cdot 10^{-8}$; 5 – 0.

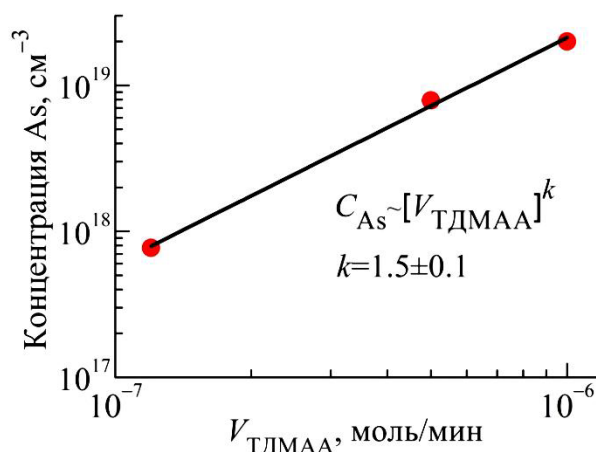
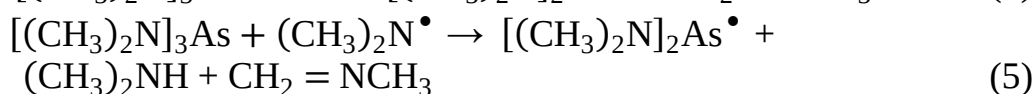
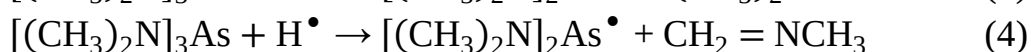
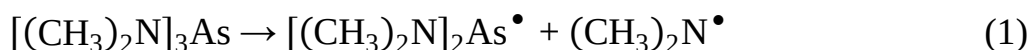


Рис. 3. Зависимость логарифма концентрации As в ЭС CdTe кристаллографической ориентации (100) от логарифма потока ТДМАА в газовой фазе.

В процессе роста слоев реакции с участием прекурсоров могут проходить как в газовой фазе, так и на поверхности. Согласно [1], лимитирующей стадией термического разложения ТДМАА является гомолитический разрыв связи As–N. Основными продуктами газофазного разложения при $T < 400$ °C являются диметиламин (ДМА), N-метилметиленимин, а также в небольшом количестве метиленимин и метан. Процесс газофазного разложения ТДМАА в атмосфере водорода можно представить следующими реакциями [1]:



Радикалы $(\text{CH}_3)_2\text{N}^\bullet$ и $\text{H}^\bullet$ взаимодействуют с исходной молекулой ТДМАА, увеличивая скорость ее разложения. Совместное разложение ТДМАА с ДМК и ДЭТ будет носить более сложный характер. Присутствие в газовой фазе ДЭТ и ДМК будет оказывать влияние на суммарную кинетику распада ТДМАА за счет образования метильных, этильных и дополнительных водородных радикалов. Помимо всего прочего, ДМК может вступать в реакцию с ТДМАА и азотсодержащими продуктами его распада. В диссертации приводятся схемы возможных реакций в газовой фазе и на поверхности

растущего слоя. Все это может приводить к сложной дробной степенной зависимости концентрации As в CdTe от потока ТДМАА.

Влияние кристаллографической ориентации подложки

Вхождение As в CdTe сильно зависит от кристаллографической ориентации слоев, что свидетельствует о существенной роли поверхностных стадий в процессе легирования (**рис. 4**). Видно, что наибольшее вхождение As наблюдается для полярной плоскости ориентации (211)А. Причем для ориентации (211)А содержание As в слое на порядок выше, чем для ориентации (211)В. Наименьшее же вхождение As наблюдается для ориентации (111)В.

Влияние соотношения МОС кадмия и теллура

Как видно из **рис. 5**, изменение соотношения ДЭТ/ДМК в газовой фазе от 2 до 0.5 при фиксированном потоке ТДМАА приводит, по данным ВИМС, к увеличению концентрации As в слое CdTe с $\sim 3 \cdot 10^{18}$ до $\sim 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Уменьшение соотношения ДЭТ/ДМК в газовой фазе приводит к обеднению поверхности роста атомами Те, возрастает вероятность появления в слое вакансий теллура. В результате термораспада и взаимодействия ДМК и ТДМАА в газовой фазе и на поверхности происходит образование атомарного As или комплексов, содержащих связь Cd–As. На растущей поверхности CdTe они диффундируют к вакансиям Те, встраиваясь в кристаллическую решетку.

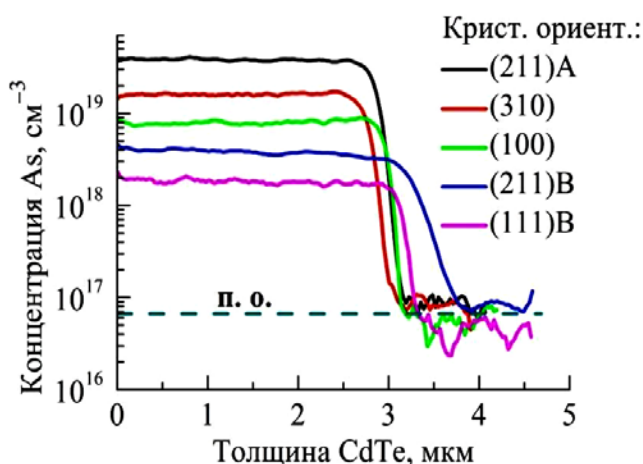


Рис. 4. Концентрационное распределение примеси As по толщине ЭС CdTe кристаллографических ориентаций (211)А, (211)В; (111)В; (100); (310). Соотношение ДЭТ/ДМК=1, поток ТДМАА – $5 \cdot 10^{-7}$ моль/мин.

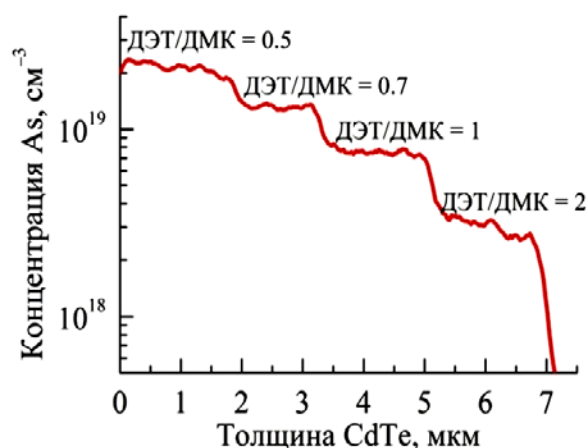


Рис. 5. Концентрационное распределение примеси As по толщине ЭС CdTe кристаллографической ориентации (100) при различном соотношении ДЭТ/ДМК в газовой фазе. Поток ТДМАА – $5 \cdot 10^{-7}$ моль/мин.

Электрофизические свойства легированных мышьяком ЭС CdTe

Нелегированные слои CdTe после осаждения проявляют изолирующие свойства ($\rho \sim 10^5 - 10^6$ Ом·см). После осаждения слои CdTe:As в основном имеют p -тип проводимости с заметно меньшим сопротивлением ($\rho \sim 10^2 - 10^3$ Ом·см) и $p_{300} = 10^{14} - 10^{16}$ см $^{-3}$. Это означает, что As преимущественно встраивается в анионную подрешетку, проявляя акцепторные свойства. Однако при этом концентрация носителей заряда на 2–4 порядка меньше концентрации, определенной методом ВИМС. Большая часть атомов As образует в CdTe комплексы с собственными точечными дефектами и АХ-центры.

Были подобраны условия отжига, которые позволили увеличить долю электрически активного мышьяка до 10–85% в зависимости от его концентрации в слоях (рис. 6, 7). По наклону зависимости концентрации дырок от обратной температуры определена энергия ионизации мышьяка, значения которой лежат в интервале 96–112 мэВ. Полученные значения энергии ионизации хорошо согласуются с литературными данными [2].

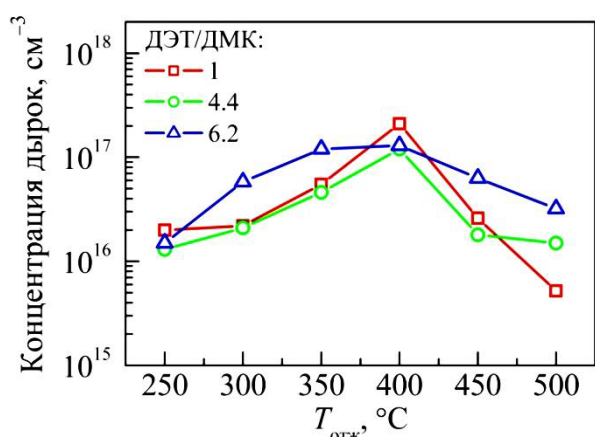


Рис. 6. Зависимость концентрации дырок при 300 К в ЭС CdTe:As (100), полученных при различном соотношении ДЭТ/ДМК и потоке ТДМАА $2 \cdot 10^{-7}$ моль/мин, от температуры отжига в атмосфере аргона. $t_{отжига} = 15$ мин.

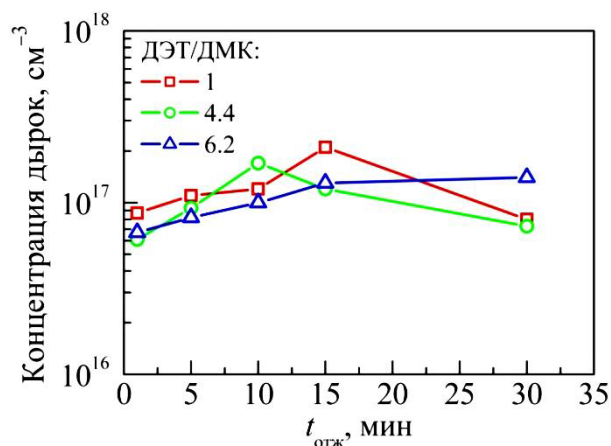


Рис. 7. Зависимость концентрации дырок при 300 К в ЭС CdTe:As (100), полученных при различном соотношении ДЭТ/ДМК и потоке ТДМАА $2 \cdot 10^{-7}$ моль/мин, от времени отжига в атмосфере аргона. $T_{отжига} = 400$ °C.

В Главе 4 представлены результаты легирования слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$ мышьяком из ТДМАА в условиях MOCVD-IMP метода и изучения их электрофизических свойств.

Влияние кристаллографической ориентации подложки и соотношения МОС кадмия и теллура на вхождение мышьяка в $Cd_xHg_{1-x}Te$

Первые эксперименты по легированию КРТ выявили изменение макросостава (x) структур при добавлении в газовую фазу ТДМАА. При потоке

ТДМАА $5 \cdot 10^{-7}$ моль/мин и неизменном отношении времен осаждения подслоев CdTe и HgTe происходит изменение состава x с 0.4 до 0.8 (рис. 8). Об изменении макросостава КРТ во время легирования мышьяком в MOCVD-IMP процессе сообщалось в работах [3–5].

Хотя нами было отмечено некоторое (15–25%) увеличение скорости роста теллурида кадмия при добавлении в газовую фазу ТДМАА, это не позволяет объяснить такое резкое изменение макросостава в структурах. Можно предположить, что наряду с увеличением скорости осаждения CdTe при добавлении ТДМАА происходит уменьшение скорости роста HgTe.

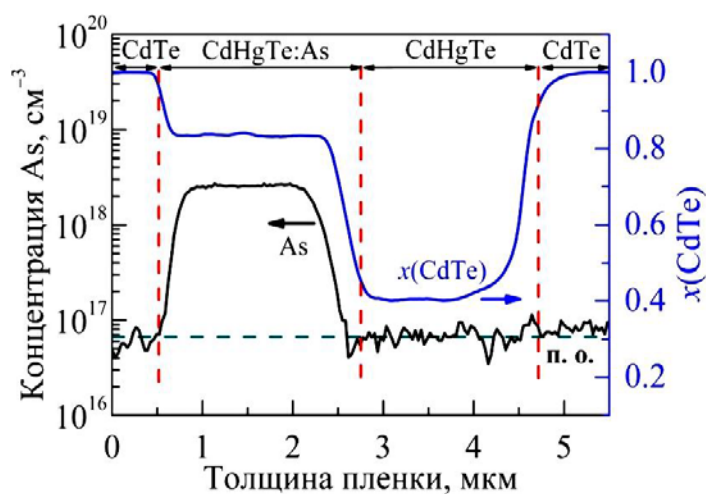


Рис. 8. Профили концентрации As и состава (x) по толщине ЭС КРТ кристаллографической ориентации (310). Поток ТДМАА – $5 \cdot 10^{-7}$ моль/мин. Соотношение ДЭТ/ДМК=1 во время роста подслоя CdTe. (п. о. – предел обнаружения As).

Прямые экспериментальные доказательства образования аддукта между ДМК и ТДМАА в литературе отсутствуют. Однако показано, что ДМЦ (цинковый аналог ДМК) может образовывать малолетучее соединение с ДМА (основным продуктом термического распада ТДМАА)– бис-диметиламино-цинк



Можно

предположить образование аналогичных соединений (комплексов) между ДМК и ТДМАА (или азотсодержащими продуктами его разложения), которые адсорбируются в реакционной зоне (на стенках реактора выше пьедестала, а также непосредственно на поверхности роста). Таким образом, уменьшение скорости осаждения на стадии роста HgTe (когда потоки ДМК и ТДМАА в реактор не идут) может быть связано с десорбцией со стенок реактора малолетучих кадмий-азотсодержащих комплексов и их конкурирующей адсорбцией с атомами ртути и теллура на поверхности растущего слоя.

Было установлено, что легирование ЭС КРТ во время роста подслоя CdTe при соотношении ДЭТ/ДМК=4.4 (рис. 9) позволяет получить однородное

распределение состава x по толщине структуры, а концентрационный профиль As имеет резкие переходы между нелегированными и легированной областями.

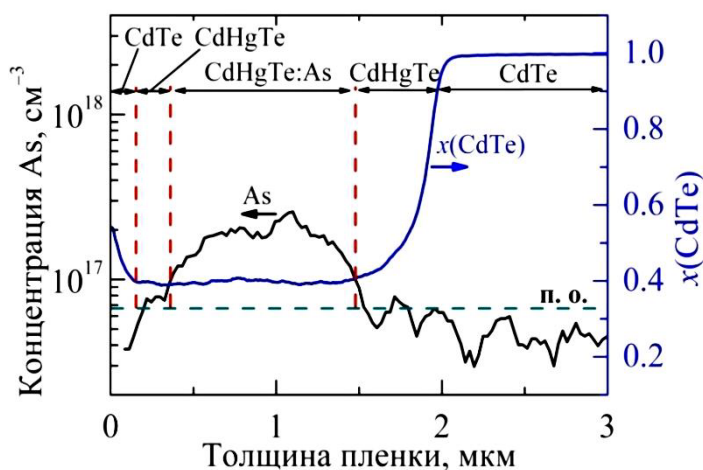


Рис. 9. Профили концентрации As и состава (x) по толщине ЭС КРТ кристаллографической ориентации (310). Поток ТДМАА — $5 \cdot 10^{-7}$ моль/мин. Соотношение ДЭТ/ДМК=4.4 во время роста подслоя CdTe. (п. о. — предел обнаружения As).1

Описание эффекта влияния добавления прекурсоров As на макросостав при росте слоев КРТ в избытке ДЭТ в литературе отсутствует. Можно

предположить, что увеличение отношения ДЭТ/ДМК>4 в газовой фазе уменьшает вероятность протекания побочных реакций между ДМК и ТДМАА (или продуктами его разложения) за счет более

вероятного взаимодействия ДМК и ДЭТ. Это приводит к снижению концентрации кадмий-азотсодержащих комплексов в газовой фазе и уменьшению влияния ТДМАА на состав КРТ.

На **рис. 10** представлены профили концентрации As и состава по толщине ЭС КРТ ориентаций (310), (100), (111)В, выращенных в одном процессе в избытке ДЭТ. Во время роста подслоя CdTe в избытке ДЭТ не наблюдается градиента состава ЭС КРТ при добавлении ТДМАА в газовую фазу. Максимальное вхождение As наблюдается в ЭС КРТ кристаллографической ориентации (310), минимальное — кристаллографической ориентации (111)В. Полученные результаты коррелируют с результатами исследования вхождения As в ЭС CdTe различных кристаллографических ориентаций.

Электрофизические свойства нелегированных слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Для правильной интерпретации электрофизических свойств легированных мышьяком ЭС КРТ вначале были изучены свойства нелегированных слоев. Известно, что тип проводимости нелегированного КРТ определяется соотношением дефектов кристаллической решетки и изменяется в зависимости от условий выращивания: температуры, кристаллографической ориентации растущего слоя, метода получения, давления Hg, режима

охлаждения (т.н. *as-grown* слои) и послеростового отжига слоев. Помимо собственных дефектов кристаллической решетки, тип проводимости может определяться также фоновыми примесями и соответственно, будет зависеть от чистоты исходных соединений. При $T > 200$ °С превалирующим дефектом в КРТ являются двухзарядные вакансии ртути V_{Hg}^{2-} , которые проявляют акцепторные свойства и определяют проводимость p -типа. Как видно из **рис. 11**, слои КРТ ориентации (310) имеют p -тип проводимости. Слои КРТ ориентаций (100), (111)В и (211)В имеют смешанный тип проводимости с преобладанием электронной. Подобное влияние ориентации роста может быть обусловлено тем, что коэффициент прилипания ртути заметно меньше для поверхности ориентации (310), что приводит к образованию бóльшего количества вакансий ртути [6]. Из-за более низкого равновесного давления паров ртути над слоями других ориентаций увеличивается вероятность образования дефектов Te_{Hg} (антиструктурный теллур), которые наравне с фоновыми донорными примесями могут быть ответственны за n -тип проводимости ЭС КРТ ориентаций (100), (111)В и (211)В.

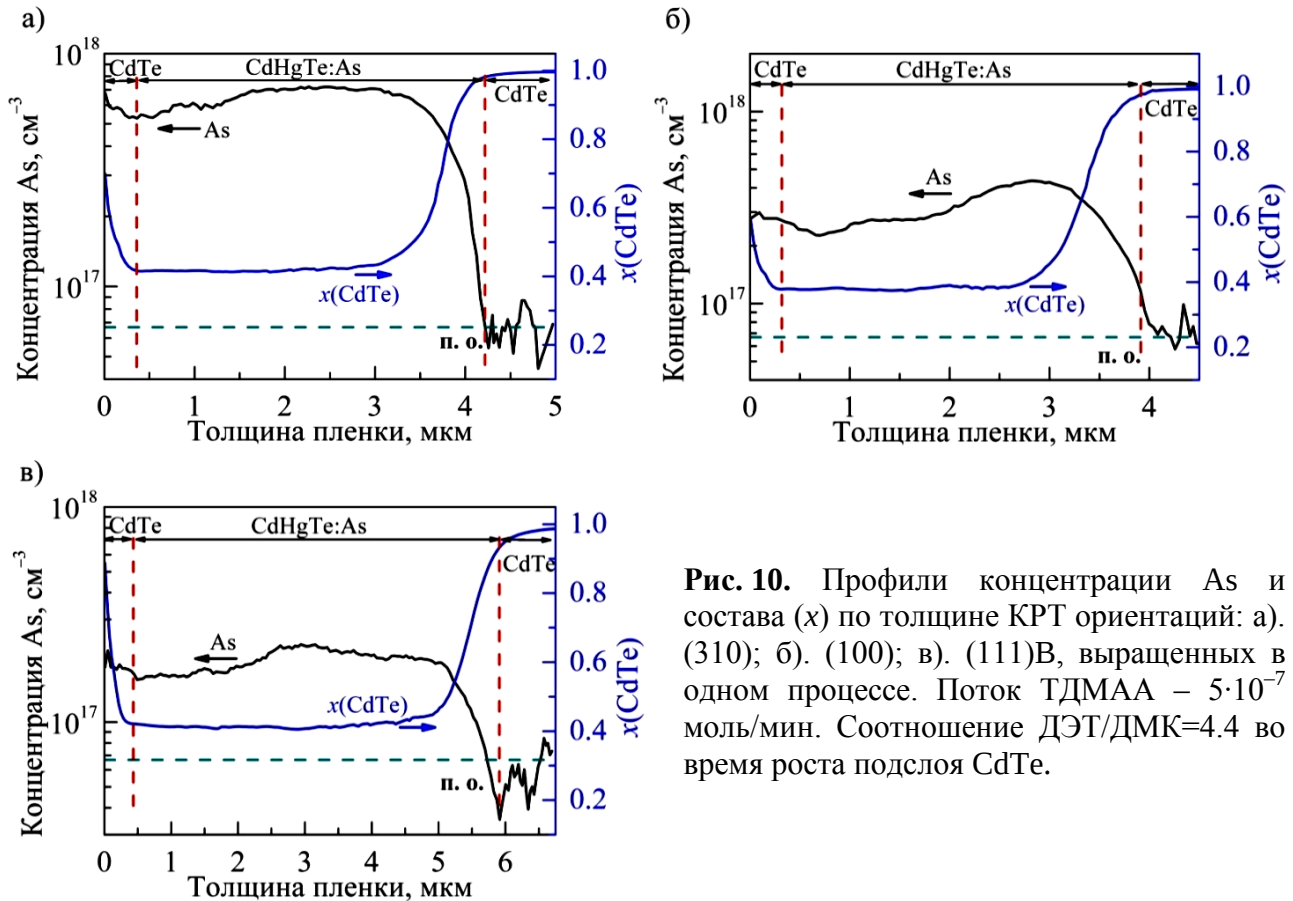


Рис. 10. Профили концентрации As и состава (x) по толщине КРТ ориентаций: а). (310); б). (100); в). (111)В, выращенных в одном процессе. Поток ТДМАА – $5 \cdot 10^{-7}$ моль/мин. Соотношение ДЭТ/ДМК=4.4 во время роста подслоя CdTe.

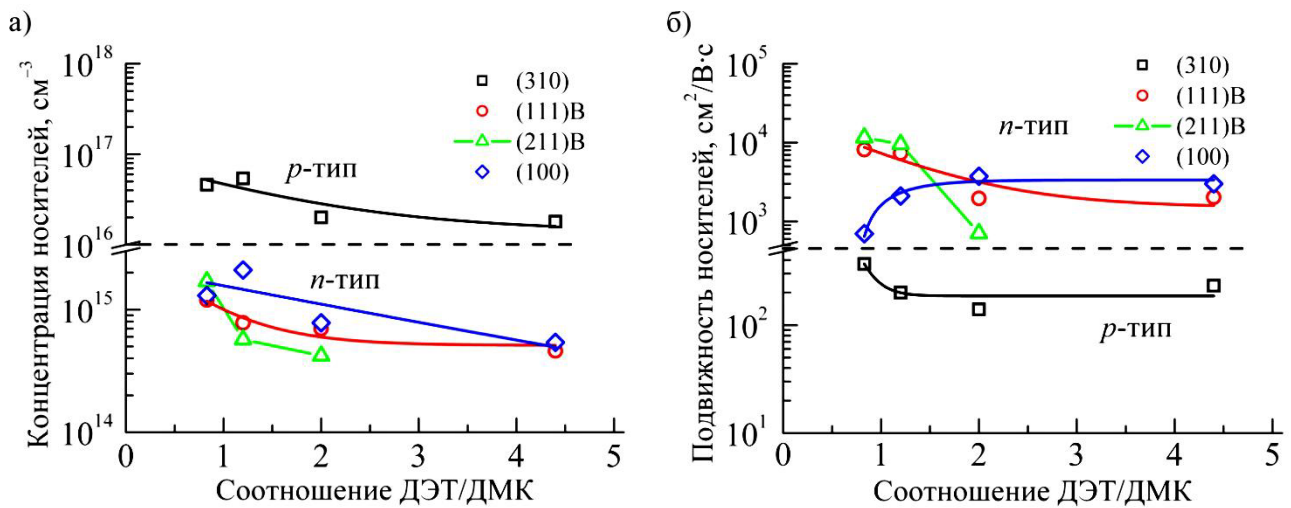


Рис. 11. Зависимость концентрации (а) и подвижности (б) носителей заряда (77 К, 1 Тл) в *as-grown* ЭС КРТ кристаллографических ориентаций (310), (100), (111)В и (211)В, полученных при различном соотношении ДЭТ/ДМК во время роста подслоя CdTe.

Сравнение электрофизических параметров нелегированных и легированных мышьяком слоев $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Легирование мышьяком приводит к получению ЭС КРТ *p*-типа проводимости на всех исследованных кристаллографических ориентациях роста. Для ЭС КРТ кристаллографических ориентаций (100), (111)В и (211)В происходит конверсия типа проводимости из *n* в *p* (таблица 1). Концентрация электрически активного As уменьшается в ряду ЭС КРТ кристаллографических ориентаций (310)>(100)>(211)В>(111)В. Доля электрически активного As увеличивается с 20 до 85% в ряду ориентаций (111)В<(100)<(310) при сопоставимых значениях концентрации As в слоях. Увеличение концентрации As в ЭС КРТ кристаллографической ориентации (310) с $2.0 \cdot 10^{17}$ до $6.4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ приводит к снижению доли электрически активного As с 85 до 36%. Низкая концентрация электрически активного As в ЭС КРТ (111)В, по-видимому, обусловлена большей степенью компенсации As дефектами кристаллической решетки (например, микродвойниками, характерными для (111)В). Из температурной зависимости величины $p/T^{1.5}$ определены энергии ионизации акцепторов в нелегированном и легированном мышьяком ЭС КРТ (310). Рассчитанное значение энергии ионизации вакансий ртути в нелегированном КРТ составило $E_a=14.0$ мэВ, а для As в легированном КРТ $E_a=3.6$ мэВ. Полученные данные находятся в хорошем согласии с данными работы [4], в которой значения энергии ионизации вакансий ртути и мышьяка составили $E_a=11.9$ мэВ и $E_a=3.2$ мэВ соответственно.

Таблица 1. Сравнение электрофизических параметров нелегированных и легированных мышьяком ЭС КРТ различной кристаллографической ориентации, выраженных при соотношении ДЭГ/ДМК=4.4 во время осаждения подслоя CdTe.

Крист. ориентация	Состав	Конц. As по ВИМС, см ⁻³	Условия проведения измерений					Доля электр. активации As, %
			300 К	77 К	77 К, 1 Тл			
			τ, нс	τ, нс	ρ, Ом·см	μ, см ² /В·с	p, см ⁻³	
(310)	0.390	2.0·10 ¹⁷	–	–	0.19	206	1.7·10 ¹⁷	85
(310)	0.360	2.5·10 ¹⁷	20	10	0.16	214	1.8·10 ¹⁷	72
(310)	0.430	6.4·10 ¹⁷	14	26	0.23	120	2.3·10 ¹⁷	36
(100)	0.392	3.5·10 ¹⁷	37	96	0.34	140	1.3·10 ¹⁷	37
(211)В	0.401	Легир.	–	–	0.41	145	1.0·10 ¹⁷	–
(111)В	0.420	2.0·10 ¹⁷	–	–	1.61	120	3.4·10 ¹⁶	17
(111)В	0.393	2.0·10 ¹⁷	440	100	0.91	180	3.8·10 ¹⁶	19
(310)	0.420	Нелегир.	160	60	2.78	110	2.0·10 ¹⁶	–
(310)	0.420	Нелегир.	90	55	0.83	152	5.0·10 ¹⁶	–
(310)	0.380	Нелегир.	31	<10	0.32	216	9.0·10 ¹⁶	–

τ – время жизни неосновных носителей заряда, ρ – концентрация дырок, μ – подвижность дырок

Время жизни неосновных носителей заряда в нелегированном КРТ ограничено рекомбинацией Шокли-Рида-Холла (ШРХ), а после отжига в парах ртути – излучательной рекомбинацией (рис. 12). В случае легированных мышьяком ЭС КРТ фундаментальное ограничение времени жизни обусловлено Оже-7 процессом вследствие более высокой концентрации дырок.

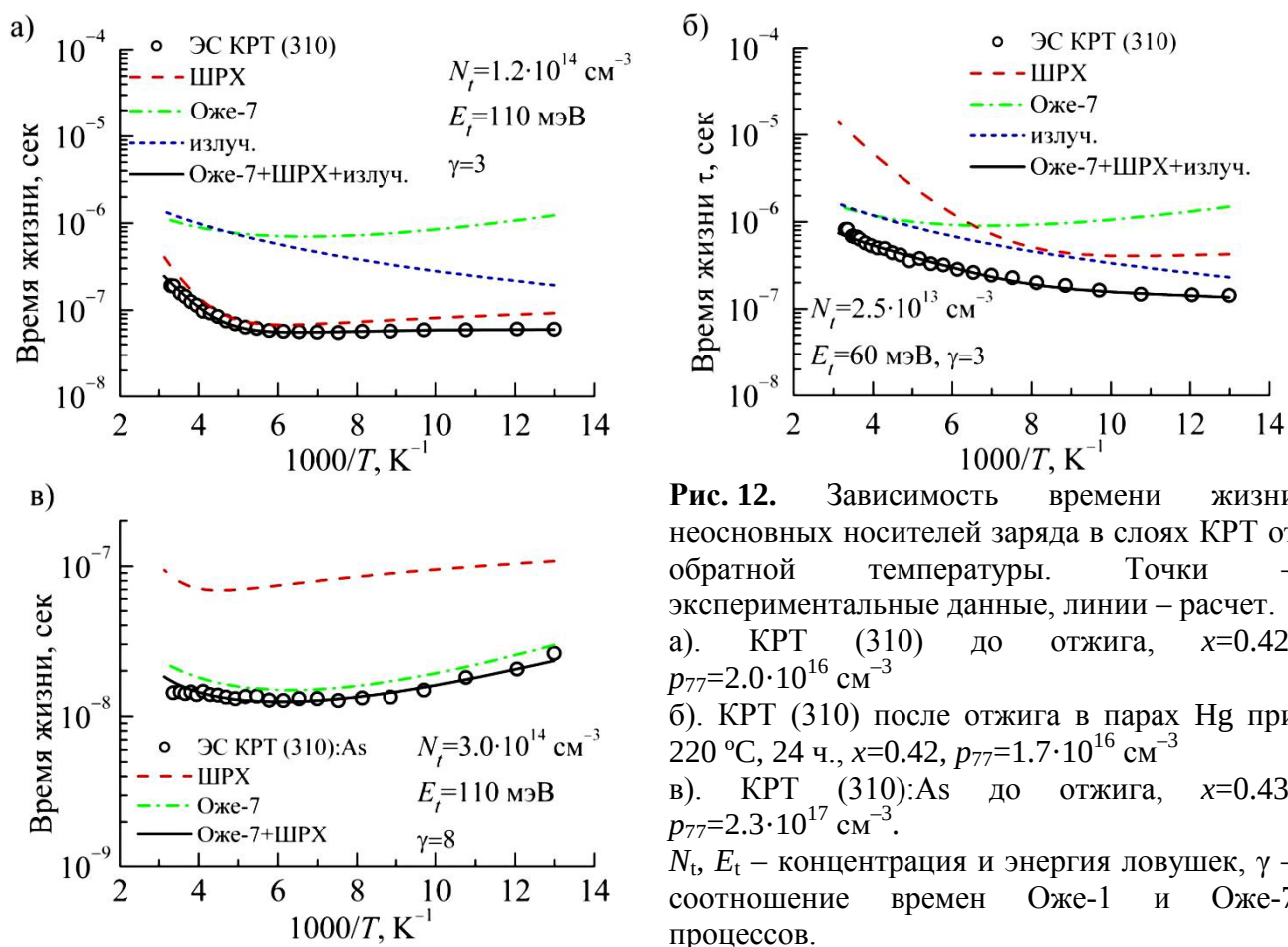


Рис. 12. Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда в слоях КРТ от обратной температуры. Точки – экспериментальные данные, линии – расчет.
а). КРТ (310) до отжига, $x=0.42$, $p_{77}=2.0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
б). КРТ (310) после отжига в парах Hg при 220°C , 24 ч., $x=0.42$, $p_{77}=1.7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$
в). КРТ (310):As до отжига, $x=0.43$, $p_{77}=2.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.
 N_t , E_t – концентрация и энергия ловушек, γ – соотношение времен Оже-1 и Оже-7 процессов.

В ЭС КРТ, легированных As из ТДМАА в наших условиях, время жизни неосновных носителей заряда при концентрации свободных носителей заряда $>1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ выше, чем для вакансионно-легированного КРТ с меньшей концентрацией дырок $(7-9) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 13) Это подтверждает тот факт, что ТДМАА является перспективным легирующим прекурсором, а легирование мышьяком более эффективно, чем вакансионное легирование ЭС КРТ.

Влияние низкотемпературного и активационного отжига на электрическую активность мышьяка в слоях $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Для определения доли электрически активного As в КРТ непосредственно после роста проводились серии низкотемпературных отжигов в парах ртути. В

качестве сравнения некоторые отжиги были проведены для нелегированных ЭС КРТ. В случае нелегированного КРТ увеличение продолжительности отжига в парах ртути при фиксированной температуре приводит к понижению концентрации носителей заряда вследствие заполнения вакансий ртути (таблица 2).

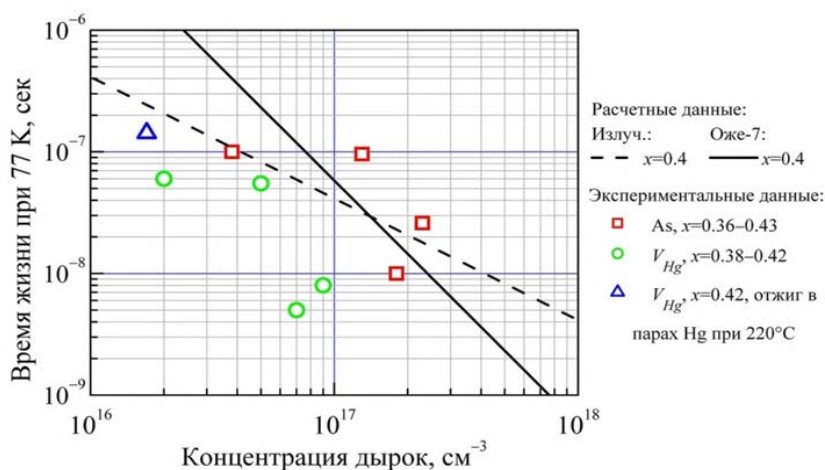


Рис. 13. Зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от концентрации дырок в ЭС КРТ с $x \sim 0.4$. Линии – предел излучательной рекомбинации и Оже-7 процесса для $x=0.4$.

Таблица 2. Зависимость электрофизических параметров нелегированных и легированных мышьяком ЭС КРТ кристаллографической ориентации (310) от времени отжига в парах ртути при $T=220^\circ\text{C}$.

Условия отжига в парах ртути	Электрофизические параметры, 77 К, 1 Тл					
	(310)			(310):As		
	ρ , Ом·см	μ , см ² /В·с	p , см ⁻³	ρ , Ом·см	μ , см ² /В·с	p , см ⁻³
Исходное состояние	1.01	197	$3.1 \cdot 10^{16}$	0.16	214	$1.8 \cdot 10^{17}$
24 ч, 220 °C	2.26	241	$1.2 \cdot 10^{16}$	0.18	205	$1.7 \cdot 10^{17}$
95 ч, 220 °C	3.46	250	$7.3 \cdot 10^{15}$	0.17	201	$1.8 \cdot 10^{17}$
170 ч, 220 °C	3.82	226	$7.2 \cdot 10^{15}$	0.17	235	$1.6 \cdot 10^{17}$

Электрофизические параметры легированного мышьяком КРТ в зависимости от условий отжига практически не изменяются и близки к исходным значениям. Это указывает на то, что уровень вакансий ртути в материале значительно ниже уровня легирования мышьяком. Таким образом, доля электрически активного мышьяка после роста в ЭС КРТ (310) близка к значению, приведенному в **таблице 1**. Для легированного мышьяком КРТ (111)В после отжига наблюдается снижение концентрации носителей заряда от начального значения практически в 2 раза (**таблица 3**). Полученная зависимость говорит о сопоставимых величинах концентрации электрически

активного мышьяка и вакансий ртути в ЭС КРТ (111)В. Доля электрически активного мышьяка после роста в ЭС КРТ кристаллографической ориентации (111)В меньше значения, приведенного в **таблице 1** (19%) и составляет ~10%.

Таблица 3. Зависимость электрофизических параметров легированных мышьяком ЭС КРТ кристаллографической ориентации (111)В от температуры отжига в парах ртути в течение 48 часов.

Условия отжига в парах ртути	Электрофизические параметры, 77 К, 1 Тл		
	(111)В:As		
	ρ , Ом·см	μ , см ² /В·с	p , см ⁻³
Исходное состояние	0.91	180	$3.8 \cdot 10^{16}$
48 ч, 220 °С	3.98	74	$2.1 \cdot 10^{16}$
48 ч, 250 °С	3.73	83	$2.0 \cdot 10^{16}$
48 ч, 280 °С	1.71	176	$2.1 \cdot 10^{16}$

Поскольку непосредственно после роста только часть мышьяка находится в состоянии акцептора, то для его активации проводились комбинированные высокотемпературные и низкотемпературные отжики. Как видно из **рис. 14**, после различных вариантов активационных и компенсационных отжигов концентрация носителей заряда находится на одном уровне с концентрацией

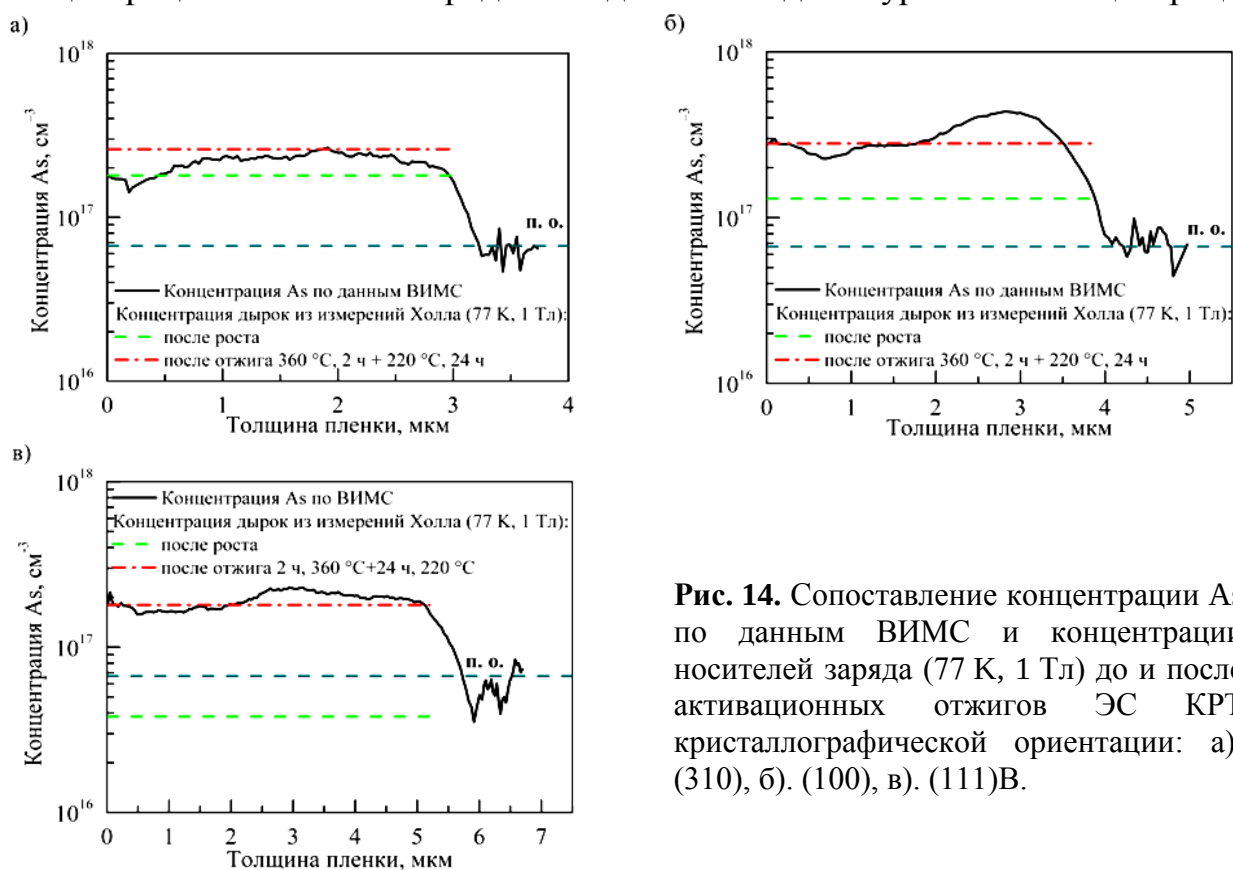


Рис. 14. Сопоставление концентрации As по данным ВИМС и концентрации носителей заряда (77 К, 1 Тл) до и после активационных отжигов ЭС КРТ кристаллографической ориентации: а). (310), б). (100), в). (111)В.

мышьяка, определенной методом ВИМС. Это свидетельствует о 100 %-ой активации после отжига примеси As в ЭС КРТ (310), (100) и (111)В.

Выводы

1. Впервые проведено сравнительное изучение легирования эпитаксиальных слоев CdTe мышьяком из ТДМАА в процессе осаждения при пониженном давлении (20 кПа) из паров ДЭТ и ДМК на подложки GaAs пяти кристаллографических ориентаций. Установлено, что вхождение As в CdTe зависит от ориентации растущего слоя и увеличивается в ряду (111)В<(211)В<(100)<(310)<(211)А. Показано, что уменьшение соотношения ДЭТ/ДМК ($P_{\text{ДМК}}=5.5$ Па, $P_{\text{ТДМАА}}=0.07$ Па) от 2 до 0.5 приводит к увеличению концентрации As в CdTe с $3 \cdot 10^{18}$ до $2 \cdot 10^{19}$ см⁻³. Полученные данные свидетельствуют о преимущественном встраивании As в анионную подрешетку CdTe. Установлено, что в диапазоне потоков ТДМАА $1 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-6}$ моль/мин концентрация As в CdTe описывается степенной зависимостью $C_{\text{As}} \sim [\text{ТДМАА}]^{1.5}$, что говорит о сложном механизме процесса легирования.
2. Показано, что легирование мышьяком при потоке ТДМАА $>1 \cdot 10^{-7}$ моль/мин приводит к получению *p*-CdTe с концентрацией дырок 10^{14} – 10^{16} см⁻³ (300 К) и долей электрически активного As 0.001–1%, которая зависит от соотношения ДЭТ/ДМК в газовой фазе, концентрации мышьяка в слоях и максимальна для потока ТДМАА $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ моль/мин. Такое поведение атомов мышьяка можно объяснить образованием нейтральных комплексов с собственными дефектами решетки CdTe. Продемонстрирована возможность увеличения доли электрически активного As до 10–85 % в зависимости от условий отжига слоев CdTe:As в потоке аргона.
3. Впервые исследовано легирование мышьяком слоев КРТ ($x \sim 0.4$) из ТДМАА в процессе выращивания МОСVD-IMP методом при пониженном давлении (20 кПа) из паров ДМК, ДЭТ, ДИПТ и Hg на подложках GaAs (310), (100), (111)В. Установлено, что вхождение As в слои КРТ увеличивается в ряду ориентаций (111)В<(100)<(310) и коррелирует с результатами ориентационной зависимости его вхождения в CdTe. Добавление ТДМАА в газовую фазу во время роста подслоя CdTe приводит к изменению макросостава слоев КРТ предположительно из-за взаимодействия ДМК с ТДМАА и/или

азотсодержащими продуктами его термического разложения (диметиламин, *N*-метилметиленимин). Впервые установлено, что избыток ДЭТ в газовой фазе при росте подслоя CdTe ($\text{ДЭТ/ДМК} \geq 4$), хотя и уменьшает вхождение As в КРТ, но предотвращает влияние ТДМАА на макросостав.

4. Исследованы основные электрофизические параметры слоев КРТ с $x \sim 0.4$, легированных мышьяком. Установлено, что легирование мышьяком ($\text{ДЭТ/ДМК} \geq 4$, поток ТДМАА – $5 \cdot 10^{-7}$ моль/мин) приводит к получению КРТ *p*-типа проводимости на всех изученных ориентациях роста с концентрацией дырок в диапазоне $4 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (77 К), что достаточно для большинства применений. Показано, что доля электрически активного As в слоях увеличивается от 20 до 85 % в ряду ориентаций (111)В<(100)<(310). Повышение содержания мышьяка $> 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ приводит к заметному снижению доли электрически активного As. Установлено, что время жизни неосновных носителей заряда в слоях легированного КРТ ($x \sim 0.4$) ограничено Оже-7 процессом, в то время как для вакансионного КРТ такого же состава время жизни ограничено рекомбинацией Шокли-Рида-Холла. Это приводит к увеличению времени жизни неосновных носителей заряда в легированном материале, что улучшает характеристики фотодиодных приемников.

5. Исследовано влияние отжига на электрофизические свойства и долю электрически активного мышьяка в слоях КРТ ($x \sim 0.4$) ориентаций (310), (100) и (111)В. Показано, что низкотемпературный отжиг в насыщенных парах ртути при $T = 220 - 280^\circ \text{C}$ оказывает наименьшее влияние на электрофизические параметры слоев КРТ (310) и наибольшее влияние – на КРТ (111)В, уменьшая в 2 раза концентрацию дырок при 77 К в КРТ (111)В. Это говорит о том, что в слоях КРТ (111)В вклад вакансий ртути и электрически активных атомов мышьяка в электропроводность сравним. Установлено, что активирующий отжиг (360°C , 2 часа) с последующим компенсационным отжигом (220°C , 24 часа) легированных слоев КРТ в насыщенных парах ртути приводит к практически 100%-ой активации As на всех исследованных ориентациях роста, что позволяет использовать их для изготовления фотодиодных приемников.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю д.х.н. А. Н. Моисееву за помощь в постановке цели и задач исследования и за ценные советы на всех этапах выполнения работы, к.х.н. А. В. Чилиасову за помощь в проведении экспериментов и обсуждении полученных результатов, к.ф.-м.н. М. Н. Дроздову (ИФМ РАН) за проведение анализов структур методом ВИМС, к.ф.-м.н. В. С. Варавину (ИФП СО РАН) за помощь в проведении измерений времени жизни носителей заряда и обсуждении результатов, к.х.н. А.М. Потапову за проведение анализов структур методом лазерной масс-спектрометрии.

Список цитируемой литературы

1. Salim, S. Gas-Phase Decomposition Reactions of Tris(dimethylamino)phosphine, -arsine, and -stibine Reagents / S. Salim, C. K. Lim, K. F. Jensen // *Chemistry of Materials*. – 1995. – V. 7. – № 3. – P. 507–516.
2. Ablekim, T. Self-Compensation in Arsenic Doping of CdTe / T. Ablekim, S. K. Swain, W. J. Yin, K. Zaunbrecher, J. Burst, T. M. Barnes, D. Kuciauskas, S. H. Wei, K. G. Lynn // *Scientific Reports*. – 2017. – V. 7. P. 4563.
3. Capper, P. Incorporation and Activation of Group V Elements in MOVPE-Grown $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ / P. Capper, C. D. Maxey, P. A. C. Whiffin, B. C. Easton // *Journal of Crystal Growth*. – 1989. – V. 97. – № 3–4. – P. 833–844.
4. Mitra, P. Improved Arsenic Doping in Metalorganic Chemical Vapor Deposition of HgCdTe and in situ Growth of High Performance Long Wavelength Infrared Photodiodes / P. Mitra, Y. L. Tyan, F. C. Case, R. Starr, M. B. Reine // *Journal of Electronic Materials*. – 1996. – V. 25. – № 8. – P. 1328–1335.
5. Piotrowski, A. Metal-Organic Chemical Vapor Deposition of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Fully Doped Heterostructures without Postgrowth Anneal for Uncooled MWIR and LWIR Detectors / A. Piotrowski, K. Kłos // *Journal of Electronic Materials*. – 2007. – V. 36. – № 8. – P. 1052–1058.
6. Arias, J. M. MBE p-type $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ Grown on the (110) Orientation / J. M. Arias, S. H. Shin, E. R. Gertner // *Journal of Crystal Growth*. – 1988. – V. 86. – № 1–4. – P. 362–366.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах

Статьи:

1. Evstigneev, V. S. Incorporation and Activation of Arsenic in Single-Crystal CdTe Layers Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition / V. S. Evstigneev, A. V. Chilyasov, A. N. Moiseev, M. V. Kostunin // *Thin Solid Films*. – 2019. – V. 689. – P. 137514.
2. Евстигнеев, В. С. Получение легированных мышьяком эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с $x \sim 0.4$ МОСVD-методом / В. С. Евстигнеев, А. В. Чилиасов, А. Н. Моисеев, М. В. Костюнин // *Неорганические материалы*. – 2019. – Т. 55. – № 10. – С. 1040–1045.

3. Евстигнеев, В. С. Электрофизические свойства нелегированных и легированных мышьяком эпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ р-типа проводимости с $x \sim 0.4$, выращенных методом МOCVD / В. С. Евстигнеев, В. С. Варавин, А. В. Чилясов, В. Г. Ремесник, А. Н. Моисеев, Б. С. Степанов // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52. – № 6. – С. 554–559.
4. Чилясов, А. В. Получение эпитаксиальных слоев легированного мышьяком теллурида кадмия МOCVD-методом / А. В. Чилясов, А. Н. Моисеев, В. С. Евстигнеев, Б. С. Степанов, М. Н. Дроздов // Неорганические материалы. – 2016. – Т. 52. – № 12. – С. 1284–1289.
5. Евстигнеев, В. С. Электрофизические свойства эпитаксиальных слоев CdTe , легированных мышьяком / В. С. Евстигнеев, А. В. Чилясов, А. Н. Моисеев, М. С. Костюнин // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 342–345.
6. Евстигнеев, В. С. Активация примеси мышьяка в эпитаксиальных слоях CdTe в процессе термической обработки / В. С. Евстигнеев, А. В. Чилясов, А. Н. Моисеев, М. С. Костюнин // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18. – № 2. – С. 338–341.
7. Евстигнеев, В. С. Механизмы рекомбинации носителей заряда в нелегированных и легированных мышьяком эпитаксиальных слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ р-типа проводимости с $x \sim 0.4$ / В. С. Евстигнеев, А. В. Чилясов, А. Н. Моисеев, Б. С. Степанов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2017. – Т. 17. – № 2. – С. 263–266.

Тезисы докладов:

8. Чилясов, А. В. Осаждение легированных мышьяком и йодом эпитаксиальных слоев твердого раствора кадмий-ртуть-теллур осаждением из паров МОС / А. В. Чилясов, А. Н. Моисеев, В. С. Евстигнеев, Б. С. Степанов // XVI Всероссийская конференция и IX школа молодых ученых «Высокочистые вещества и материалы. Получения, анализ, применение»: Тезисы докладов. – 2018. – Нижний Новгород. – С. 50.
9. Варавин, В. С. Электрофизические параметры нелегированных и легированных мышьяком МOCVD слоев $\text{Cd}_{0.4}\text{Hg}_{0.6}\text{Te}$ р-типа проводимости / В. С. Варавин, В. С. Евстигнеев, В. Г. Ремесник, А. Н. Моисеев, А. В. Чилясов, Б. С. Степанов // Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых) «Фотоника 2017»: Тезисы докладов. – 2017. – Новосибирск. – С. 103.
10. Евстигнеев, В. С. In situ легированные мышьяком эпитаксиальные слои CdTe / В. С. Евстигнеев, А. Н. Моисеев, А. В. Чилясов, Б. С. Степанов // XIX Всероссийская конференция молодых ученых-химиков: Тезисы докладов. – 2016. – Нижний Новгород. – С. 141–142.
11. Чилясов, А. В. Получение легированных примесями мышьяка и йода эпитаксиальных слоев HgCdTe МOCVD-IMP методом / А. В. Чилясов, А. Н. Моисеев, Б. С. Степанов, В. С. Евстигнеев, М. Н. Дроздов // Труды XXIV

Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – 2016. – Москва. – С. 94–97.

12. Евстигнеев, В. С. Выращивание слоев легированного мышьяком CdTe химическим осаждением из паров МОС / В. С. Евстигнеев, А. В. Чилясов, А. Н. Моисеев, Б. С. Степанов, М. Н. Дроздов // Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – 2016. – Москва. – С. 390–393.

13. Чилясов, А. В. Получение легированных мышьяком эпитаксиальных слоев твердого раствора кадмий-ртуть-теллур МОСVD-методом / А. В. Чилясов, А. Н. Моисеев, Б. С. Степанов, В. С. Евстигнеев, М. Н. Дроздов, П. А. Юнин // Труды XIX Международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». – 2015. – Нижний Новгород. – С. 707–708.

14. Евстигнеев, В. С. Осаждение легированных мышьяком эпитаксиальных слоев теллурида кадмия из паров МОС / В. С. Евстигнеев, А. Н. Моисеев, А. В. Чилясов, Б. С. Степанов, М. Н. Дроздов // XV Всероссийская конференция и VIII школа молодых ученых «Высококачественные вещества и материалы. Получения, анализ, применение»: Тезисы докладов. – 2015. – Нижний Новгород. – С. 108.