

На правах рукописи

Терещенко Олег Евгеньевич

АТОМНЫЕ РЕКОНСТРУКЦИИ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВ  $A^3B^5$  С АДСОРБАТАМИ

Специальность 01.04.10  
(Физика полупроводников)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Новосибирск - 2013

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

Научный консультант:

Альперович Виталий Львович, доктор физико-математических наук, в.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Ольшанецкий Борис Зейликович, доктор физико-математических наук, в.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

Бухтияров Валерий Иванович, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор, зам. директора, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт катализа им. Г.К. Бореского Сибирского отделения РАН

Иванов Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, г.н.с. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет

Защита состоится «22» октября 2013 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д.003.037.01 в 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

Автореферат разослан «11» сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Развитие методов управления составом и атомной структурой поверхностей полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  с адсорбатами в условиях сверхвысокого вакуума представляет как научный, так и практический интерес. Научный интерес состоит в углублении понимания процессов формирования границ раздела на атомном уровне и изучении связи атомной структуры и электронных свойств поверхности. Практическая значимость связана с необходимостью совершенствования методов приготовления атомарно-чистых поверхностей полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  и поверхностей с адсорбатами с заданным составом, атомной структурой и электронными свойствами для создания приборов полупроводниковой оптоэлектроники. К моменту начала данной работы достаточно хорошо были изучены структурные и электронные свойства поверхностей  $A^3B^5$  с ориентацией (110), получаемых сколом в сверхвысоком вакууме, и поверхностей других ориентаций,готавливаемых с использованием технологии молекулярно–лучевой эпитаксии (МЛЭ). В исследовательских сверхвысоковакуумных (СВВ) установках без молекулярных источников, возможности получения различных реконструкций поверхностей  $A^3B^5$  более ограничены. Для практически важных поверхностей с ориентацией (001), единственным способом приготовления поверхности с различными реконструкциями долгое время оставался метод десорбции защитного слоя элемента V группы. Возможность получения структурно-упорядоченных поверхностей  $A^3B^5$  с помощью химической обработки *ex situ* и прогрева в вакууме в отсутствие потоков элемента пятой группы изучена существенно слабее. В частности, на таких поверхностях не удавалось наблюдать сверхструктурные перестройки, ранее обнаруженные на поверхностях  $A^3B^5$ ,готавливаемых с использованием МЛЭ. Реконструированные поверхности InAs(111)A и GaAs(001) после химического удаления оксидов и прогрева в вакууме впервые были получены в Институте физики полупроводников СО РАН [1,2]. После химической обработки арсенида галлия в безводном растворе хлористоводородной кислоты в изопропиловом спирте (HCl-ИПС) в инертной атмосфере азота и прогрева в СВВ был получен весь ряд реконструкций на поверхности GaAs(001) [2]. Тем не менее, вопросы о механизме формирования пассивирующего слоя мышьяка при химической обработке в HCl-ИПС, о влиянии этой обработки на морфологию поверхности GaAs(001), а также о возможности приготовления реконструированных поверхностей GaAs других

кристаллографических ориентаций оставались невыясненными. Для других полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  возможность приготовления структурно-упорядоченных поверхностей без использования техники МЛЭ не изучались.

Альтернативным методом приготовления атомарно-чистых поверхностей  $A^3B^5$  является обработка поверхности полупроводника *in situ* в атомарном водороде (АВ). Большинство работ по изучению взаимодействия АВ с поверхностью GaAs(001) посвящено изучению состава поверхности [3]. Структура поверхности GaAs(001) при обработке в АВ изучена в меньшей степени, а имеющиеся результаты не дают полного представления о взаимосвязи между условиями обработки, составом поверхности и её структурой.

Сложность в изучении адсорбции на полярных гранях полупроводников  $A^3B^5$  связана с тем, что в зависимости от соотношения элементов III и V групп в приповерхностном слое наблюдается большое число реконструкций [2,4]. В зависимости от ориентации и стехиометрии поверхности, при взаимодействии с щелочными металлами и молекулярными галогенами наблюдается формирование упорядоченных структур на одних поверхностях, тогда как другие поверхности разупорядочиваются [5,6]. В связи с этим, остаются актуальными вопросы о влиянии стехиометрии и атомной реконструкции исходной поверхности GaAs(001) на эволюцию структурных и электронных свойств поверхности при адсорбции электроположительных (цезия) и электроотрицательных (йода) адсорбатов, о влиянии адсорбат-индуцированной передачи заряда на ослабление связей поверхностных атомов, а также о природе перехода изолятор–металл в системе щелочной металл–поверхность полупроводника.

При создании гетероструктур для научных исследований и приборов нанoeлектроники необходимо развивать не только методы атомно-слоевого выращивания, но и атомно-слоевого травления полупроводников. Известные методы травления предельно-тонких слоёв полупроводников основаны на их контролируемом окислении и последующем растворении слоя оксида, толщина которого определяется режимом окисления. Предельное разрешение этих методов по толщине не превышает 2-3 МЛ. Методы сухого (газофазного) травления, такие как реактивное ионное и ионно-пучковое травление, широко используемые в технологии изготовления полупроводниковых структур, не позволяют контролировать травление на атомном уровне. Атомно-слоевое («цифровое») травление может быть реализовано на полярных гранях бинарных

полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  путём использования адсорбатов, селективно реагирующих с поверхностными атомами разных столбцов таблицы Менделеева и уменьшающих энергию связи определенных поверхностных атомов подложки. С другой стороны, уменьшение энергии связи поверхностных атомов должно приводить к увеличению коэффициента поверхностной диффузии. Известно, что увеличения коэффициента поверхностной диффузии можно достичь с помощью сурфактантов – поверхностно-активных веществ, которые изменяют условия роста, но сами не встраиваются в растущий кристалл, сегрегируя на поверхность. Примером эффективного сурфактанта служит атомарный водород, позволяющий значительно снизить температуру роста GaAs без потери структурного качества растущей пленки [7]. Еще более выраженные сурфактантные свойства можно ожидать у цезия: имея один валентный электрон и большой ковалентный радиус, Cs не может встроиться в решетку, а высокий коэффициент диффузии и эффект Cs-индуцированного перераспределения заряда должен приводить к уменьшению энергии связи поверхностных атомов подложки и, следовательно, к увеличению их коэффициента диффузии. Идея, лежащая в основе использования сурфактантов, может быть применена как для низкотемпературного роста полупроводников, так и низкотемпературного приготовления структурно-упорядоченных поверхностей.

Возможность управления составом и структурой поверхностей  $A^3B^5$  используется для оптимизации границы раздела (Cs-O)/ $A^3B^5$  [8]. Интерес к изучению границ раздела (Cs-O)/ $A^3B^5$  обусловлен возможностью достижения эффективного отрицательного электронного сродства и создания сверхчувствительных, малошумящих, быстродействующих фотоприемников, а также источников ультра-холодных и спин-поляризованных электронов [9]. Помимо источников спин-поляризованных электронов, востребованными являются детекторы спин-поляризованных электронов [10]. Недостатком известного детектора Мотта является громоздкость и необходимость использования высоких напряжений (до  $\sim 100$  кэВ). Компактной альтернативой детектору Мотта может стать магнитный барьер Шоттки на основе структуры Fe/GaAs [11].

Таким образом, развитие методов контролируемого изменения физико-химических свойств поверхностей полупроводников  $A^3B^5$ , заключающихся в управлении составом и структурой поверхности, как с помощью «ex situ» методов модификации поверхности («жидкой химии»), так и «in situ» (адсорбат-индуцированного изменения поверхностных

реконструкций в вакууме), актуально для решения научных задач в области физики поверхности и создания ряда полупроводниковых приборов.

**Цель данной работы** заключалась в изучении физико-химических процессов, лежащих в основе приготовления атомарно-чистых, структурно-упорядоченных (реконструированных) поверхностей  $A^3B^5$  без использования молекулярных пучков и в исследовании атомной структуры и электронных свойств поверхности GaAs(001) с различными адсорбатами. В качестве адсорбатов использовались цезий, калий, натрий, атомарный водород, йод, кислород и железо.

**Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:**

- исследовать возможность приготовления реконструированных поверхностей полупроводников  $A^3B^5$  путём химической обработки *ex situ* и последующего прогрева в вакууме без использования молекулярных пучков;
- изучить возможность *in situ* получения реконструированных поверхностей GaAs(001) низкотемпературной обработкой в атомарном водороде;
- изучить взаимодействие цезия с As- и Ga- стабилизированными поверхностями GaAs(001), переход изолятор–металл в системе щелочной металл–GaAs(001), а также исследовать возможность использования цезия в качестве сурфактанта при низкотемпературном росте арсенида галлия;
- изучить взаимодействие йода с поверхностью GaAs(001) и осуществить прецизионное («цифровое») травление поверхности GaAs(001) с точностью до 1 монослоя, используя селективность взаимодействия Cs и I с поверхностными атомами мышьяка и галлия;
- изготовить магнитный барьер Шоттки на основе гетероструктуры Pd/Fe/GaAs(001) и изучить спин-зависимый транспорт электронов в такой структуре с возможностью электрической и оптической регистрации спина электронов.

**Объекты и методы решения.** В качестве объектов исследования использовались объёмные монокристаллы и эпитаксиальные структуры на основе полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ . Структуры были выращены в Институте физики полупроводников СО РАН методами жидкофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии. Состав и стехиометрия поверхности полупроводников изучались методами Оже- и рентгеновской

фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), спектроскопии характеристических потерь энергии электронов высокого разрешения (СХПЭЭВР), фотоэмиссии с использованием синхротронного излучения. Структура поверхности изучалась методами сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), дифракции медленных (ДМЭ) и быстрых электронов (ДБЭ). Электронные свойства поверхностей  $A^3B^5$  с адсорбатами изучались методами спектроскопии фотоотражения, СХПЭЭВР, фототока, фотолюминесценции, спектроскопии анизотропного отражения, квантового выхода фотоэмиссии. Встроенные электрические поля определялись методами фото- и электроотражения.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Предложен и реализован метод создания реконструированных поверхностей полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ , альтернативный методу молекулярно лучевой эпитаксии. Обнаружены и исследованы сверхструктурные перестройки, соответствующие анионным и катионным фазам на поверхностях полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ , приготовленных путём химического удаления оксидов в безводном растворе хлористоводородной кислоты в изопропиловом спирте и прогрева вакууме в отсутствие потоков элементов V группы. Эта методика является универсальной для полупроводников  $A^3B^5$  и позволяет получать поверхности, не уступающие по качеству поверхностям, выращиваемым методом МЛЭ.
2. Обнаружены и исследованы новые Ga-стабилизированные реконструкции (4x4) и (2x4)/c(2x8), полученные путём низкотемпературной обработки в атомарном водороде поверхности GaAs(001), покрытой оксидами.
3. Обнаружен и объяснен эффект Cs-индуцированного уменьшения температуры перехода от As-стабилизированной GaAs(001)-(2x4)/c(2x8) к Ga-стабилизированной поверхности (4x2)/c(8x2). На основе селективного взаимодействия электроположительных атомов цезия и электроотрицательных атомов йода с анион- и катион-стабилизированными поверхностями GaAs(001) реализовано атомно-слоевое травление поверхности (001) арсенида галлия.
4. Обнаружено, что при адсорбции щелочных металлов (K, Na) на поверхность GaAs(001) при температуре ниже 200 К и  $\theta_{\text{алк}} \sim 0.5 \text{ ML}$  происходит динамический фазовый переход диэлектрик–металл первого рода. Показано, что спектры потерь энергии электронов в

системе Cs/GaAs не зависят от ориентации и структуры поверхности и связаны с конденсацией атомов цезия в плотноупакованные двумерные островки с металлическим спектром электронных возбуждений.

5. Обнаружены и исследованы сурфактантные свойства цезия. Предложено использовать Cs в качестве сурфактанта для низкотемпературного роста арсенида галлия.
6. Предложен и реализован новый тип спин-детектора на основе гетероструктуры Pd/Fe/GaAs/InGaAs с квантовыми ямами, позволяющий измерять поляризацию свободных электронов методом катодolumинесценции. С использованием развитой методики приготовления структурно-совершенных поверхностей  $A^3B^5$ , изготовлен магнитный барьер Шоттки для детектирования спина свободных электронов.

### **Практическая значимость работы.**

- Метод получения поверхностей  $A^3B^5$  с заданной стехиометрией, атомной структурой и контролируемыми электронными свойствами с помощью химической обработки в безводном растворе HCl-ИПС и последующего прогрева в вакууме в отсутствие потоков элементов V группы может быть использован для приготовления поверхностей с заданной стехиометрией и реконструкцией для научных исследований, а также для подложек перед эпитаксиальным ростом, изготовления полупроводниковых приборов.
- Развитый метод приготовления совершенных поверхностей GaAs позволил создать магнитные барьеры Шоттки Fe/GaAs для детектирования спиновой поляризации электронов.
- Низкотемпературный метод приготовления Ga- стабилизированной поверхности GaAs(001) в атомарном водороде позволяет минимизировать концентрацию термических дефектов.
- Показано, что цезий может быть использован в качестве сурфактанта для низкотемпературного роста GaAs и других соединений  $A^3B^5$ .
- Селективное взаимодействие щелочных металлов и галогенов с анион- и катион-стабилизированными поверхностями полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  может быть использовано для атомно-слоевого травления полярных поверхностей.

## Основные положения, выносимые на защиту:

1. Развитый в работе *ex situ* метод химической обработки в безводном растворе HCl в изопропиловом спирте и последующего прогрева в вакууме поверхностей полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  позволяет получать атомарно-чистые, структурно-упорядоченные поверхности с различными реконструкциями без использования молекулярных пучков V группы. Общим свойством для всех изученных соединений  $A^3B^5$  является удаление собственных оксидов и образование на поверхности пассивирующего слоя. Состав пассивирующего слоя зависит от химического соединения  $A^3B^5$ . Для соединений III-As (GaAs(001), (111)A,B, (110); InAs(001), (111)A; InGaAs(001)) обработка в HCl-ИПС приводит к образованию пассивирующего слоя элементного мышьяка толщиной 1-3 МС. Для соединений III-P (InP(001) GaP(110)) и III-Sb (InSb(001), GaSb(001)) происходит пассивация поверхностей этих полупроводников хлоридными соединениями элементов третьей группы. Для всех соединений  $A^3B^5$  атомарно-чистая поверхность получается прогревом в вакууме в среднем на 200° ниже температуры, необходимой для десорбции собственных оксидов. Прогрев в вакууме соединений  $A^3B^5$  приводит к последовательности анион- и катион- стабилизированных реконструкций, характерных для этих соединений.
2. Низкотемпературная обработка поверхности GaAs(001), покрытой собственными оксидами, в атомарном водороде и последующий прогрев в вакууме позволяют получить новые Ga-стабилизированные реконструкции (4x4) и (2x4)/c(2x8). Структура Ga-(2x4) объяснена расчетами из первых принципов в рамках модели элементарной ячейки (2x4) «Ga- смешанный димер». В температурном интервале 280÷420°С получен ряд реконструкций от Ga- до As- стабилизированной поверхности GaAs(001). Обработка в АВ приводит к пассивации собственных электронных состояний и откреплению уровня Ферми на поверхности p-GaAs(001).
3. Эффект снижения на ~100° температуры сверхструктурного перехода от As- к Ga-стабилизированной поверхности GaAs(001)-(4x2)/c(8x2) под влиянием адсорбированного цезия обусловлен уменьшением энергии связи атомов мышьяка на As-стабилизированной поверхности GaAs(001) вследствие перераспределения электронной плотности между поверхностными атомами As и нижележащими атомами

Ga. Cs-индуцированное уменьшение энергии связи поверхностных атомов позволяет использовать цезий в качестве сурфактанта при низкотемпературном росте арсенида галлия.

4. Адсорбция щелочных металлов (K, Na) на поверхности GaAs(001) при температуре ниже 200 К и  $\theta_{\text{alk}} \sim 0.5$  МС приводит к динамическому фазовому переходу диэлектрик–металл первого рода. При увеличении концентрации атомов цезия на поверхностях GaAs при покрытиях  $\theta \geq 0.5$  монослоя и температуре 300 К происходит переход к конденсированной двумерной металлической фазе, который сопровождается возникновением дублета узких пиков потерь энергии электронов, обусловленных возбуждением плазмонов в адсорбционном слое. Появление бездисперсионных плазменных потерь связано с динамическим фазовым переходом от газовой фазы атомов цезия к плотноупакованным двумерным островкам с металлическим спектром электронных возбуждений.
5. Селективное взаимодействие электроположительных и электроотрицательных атомов с катион- и анион-стабилизированными поверхностями GaAs(001) приводит к атомно-слоевому (цифровому) травлению поверхности GaAs(001), контролируемому реконструкционными переходами.
6. Барьеры Шоттки на основе Fe/GaAs(001) позволяют достигать эффективности в детектировании спина электронов  $F \sim 2 \cdot 10^{-5}$ , сравнимой с эффективностью детекторов Мотта. Гетероструктуры Pd/Fe/GaAs/InGaAs с квантовыми ямами могут быть использованы для измерения спиновой поляризации свободных электронов методом катодоллюминесценции.

### **Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на 2-ой Международной конференции по физике низкоразмерных структур (PLDS-2, Дубна, 1995), на 2-ой, 6-ой, 7-ой, 8-ой и 9-ой Российских конференциях по физике полупроводников (Зеленогорск, 1996, Санкт-Петербург 2003, Звенигород 2005, Екатеринбург 2007, Новосибирск 2009), на 9-ой, 10-ой Международной конференции по поляризованным мишеням и поляризованным пучкам (Urbana, IL, 1997, Новосибирск 2003), на Международной конференции по поляризованным электронам низкой энергии (Санкт-Петербург, 1998), на 9-ой

Международной конференции по физике поверхности и тонких плёнок (ICSFS-9, Copenhagen, 1998), 20-ой и 23-ей европейской конференции по физике поверхности (ECOSS) (Краков 2001 г., Берлин 2005), на 7-ой и 9-ой конференциях по арсениду галлия и полупроводниковым соединениям группы III-V (Томск 2002, 2006), на 12-ом, 15-ом, 17-ом Международном симпозиуме «Nanostructures: physics and technology» (Санкт-Петербург 2004, Новосибирск 2007, Минск 2009), на совещании по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (Новосибирск 2003), на 7-м российско-японском семинаре по физике поверхности полупроводников (Владивосток 2006 г.), на Международной конференции по ультрафиолетовому излучению и взаимодействию излучения с конденсированным веществом (Иркутск 2005), на 12-ой и 13-ой Международной конференции по формированию границ раздела полупроводников (Ваймар 2009, Прага 2011), на 14-ом Европейском семинаре по молекулярно лучевой эпитаксии (Гранада 2007), на 2-ом, 3-ем, 4-ом, 5-ом, 6-ом и 7-ом Международных семинарах по пассивации поверхности полупроводников (Устрон 2001, 2003, 2005, Закопане 2007, 2009, Краков 2011), на 1-ой Всероссийской конференции по методам исследования состава и структуры функциональных материалов (Новосибирск 2009), на Международном семинаре по наномеханике и наноинженерии (Красноярск 2009). Результаты работы докладывались на семинарах в Институте физики полупроводников СО РАН (Новосибирск), Институте физики им. Керенского СО РАН (Красноярск), Эколь Политекник (Палезо, Франция), Орсе (Франция), Триест (Италия), Университетах Тор Вергата (Рим, Италия), Фермон-Клерон (Франция), Хайдельберга (Германия), Хиросимы (Япония).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 37 работ, из них 36 в реферируемых журналах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем работы составляет 281 страницу, включая 130 рисунков и 4 таблицы. Список цитированной литературы содержит 298 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулирована цель работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены выносимые на защиту положения, дана краткая аннотация диссертационной работы.

Первая глава посвящена исследованию состава, структуры и электронных свойств поверхности полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  после химического удаления оксидов и прогревов в сверхвысоком вакууме. Показано, что для всех исследованных соединений  $A^3B^5$  можно получить структурно-упорядоченную поверхность после обработки в растворе HCl-ИПС и прогревов в вакууме [A1-A15]. Описываются результаты по исследованию стехиометрии поверхности и состава остаточных загрязнений на поверхностях бинарных, и тройных соединений  $A^3B^5$  различных кристаллографических ориентаций после удаления собственных оксидов в растворе HCl-ИПС и последующего прогрева в вакууме [A1-A11]. Объяснен механизм формирования пассивирующего слоя мышьяка при химической обработке в растворе HCl-ИПС и влияние этой обработки на морфологию поверхностей GaAs. Показано, что источником элементного мышьяка на поверхности является оксид мышьяка. Образующийся слой As на поверхности препятствует взаимодействию ионов хлора с полупроводником и, тем самым, травлению (коррозии) кристалла. В результате формируется атомно-гладкая поверхность полупроводников III-As, покрытая слоем аморфного мышьяка толщиной 1-3 монослоя (МС). При прогревах в вакууме были проведены детальные исследования стехиометрии, структуры и оптических свойств поверхностей GaAs ориентации (111)A, B, (110); InAs (001), (111)A,B, а также тройных соединений InGaAs(001) ( $x=0.2, 0.5$ ) [A4, A7]. Впервые получен весь ряд реконструкций на поверхностях InAs и GaAs ориентаций (001) и (111)A,B после удаления собственных оксидов в растворе HCl-ИПС и прогрева в СВВ (табл.1).

Методами фотоэлектронной спектроскопии с использованием синхротронного излучения и СТМ детально исследована поверхность подложки InAs(001) после обработки в HCl-ИПС и последующих прогревов в СВВ (рис.1) [A5, A9]. На поверхности InAs(001) при последовательных прогревах получены следующие сверхструктуры:  $(1 \times 1) \xrightarrow{230^\circ C} (2 \times 4)/c(2 \times 8) \xrightarrow{280^\circ C} (2 \times 4)/(4 \times 2) \xrightarrow{300^\circ C} (4 \times 2)/c(8 \times 2)$ . Интересным отличием структурных переходов поверхности InAs(001) от GaAs(001) является отсутствие переходных реконструкций между As-стабилизированной структурой  $(2 \times 4)/c(2 \times 8)$  и Ga-стабилизированной структурой  $(4 \times 2)/c(8 \times 2)$ . Вместо переходных реконструкций

наблюдалась смешанная структура (2x4)/(4x2) (рис.1 (h)), которая существовала в относительно узком температурном интервале  $\Delta T=20^\circ$ . Сосуществование двух структурных фаз в узком температурном интервале, говорит о том, что структурный переход (2x4)/c(2x8)  $\rightarrow$  (4x2)/c(8x2) является переходом первого рода.

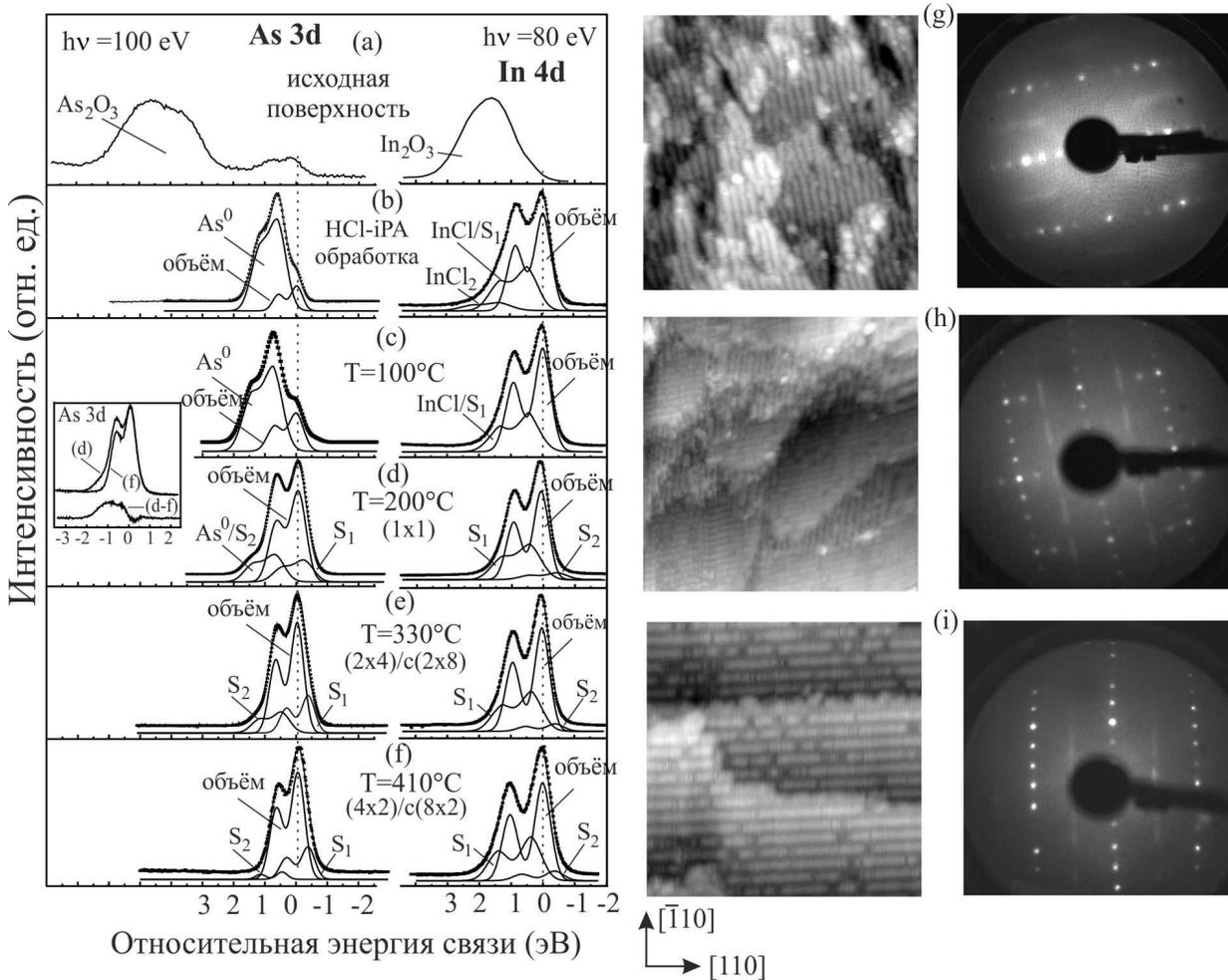


Рис.1 Фотоэмиссионные спектры (a-f) и картины СТМ и ДМЭ (g-i) поверхности InAs(001) до (a), после обработки в HCl-ИПС (b) и последующих прогревах в СВВ (c-f, g-i). Картины СТМ и ДБЭ показывают As-стабилизированную структуру (2x4)/c(2x8) (g), смешанную (2x4) и (4x2) (h) и In-стабилизированную структуру (4x2)/c(8x2) (i).

Реконструкция поверхностей InAs(001) и GaAs(001), а также тройного соединения  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  была изучена оптическим методом – спектроскопией анизотропного отражения (рис.2). На рис.2 (А) показаны спектры анизотропного отражения от поверхности GaAs(001) в процессе нагрева As-стабилизированной поверхности от 90 К до 850 К, демонстрирующие *in situ* структурный переход (2x4)  $\rightarrow$  (4x2). Прогрев поверхности GaAs(001) в температурном интервале 380-470°C приводил к появлению в спектрах

анизотропного отражения линии с энергий 3 эВ, которая показывает наличие димеров As на поверхности GaAs(001) и является характеристикой поверхности с реконструкцией (2x4)/с(2x8). Появление этой линии в спектрах анизотропного отражения совпадает с присутствием химически сдвинутой компоненты в спектрах 3d As, принадлежащей мышьяку в димерах.

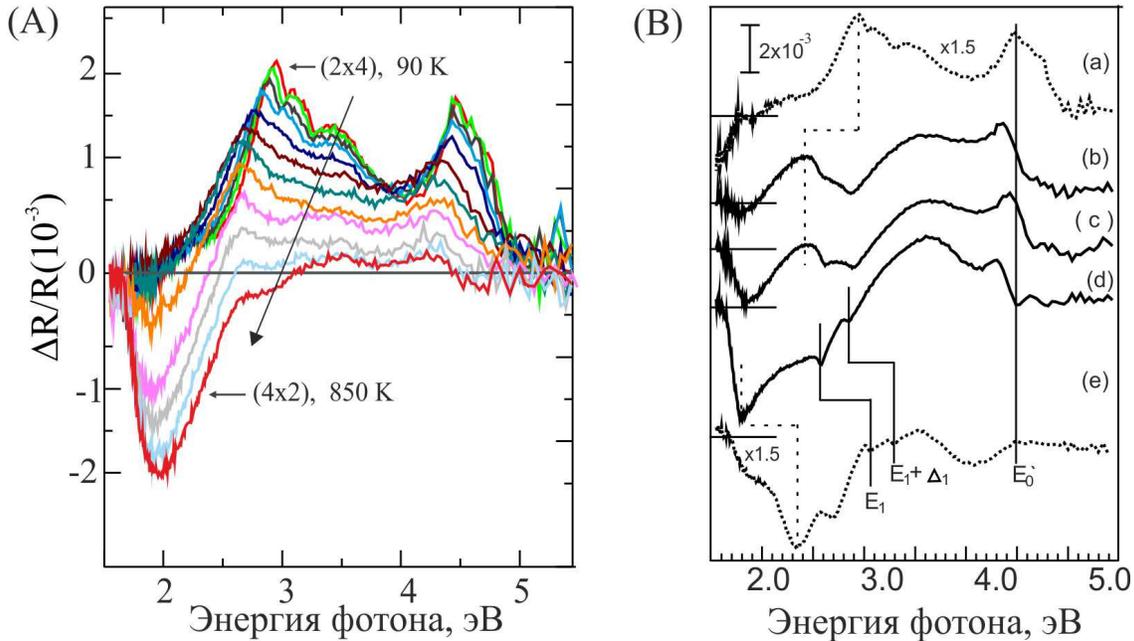


Рис.2 Спектры анизотропного отражения от поверхности GaAs(001) (A) в процессе нагрева поверхности от 90 К до 850 К, демонстрирующие *in situ* структурный переход (2x4) – (4x2). Спектры анизотропного отражения от поверхности InAs(001) (B) после прогрева при температуре 330°C (b), 370°C (c) и 430°C (d). Кривые (a) и (e) принадлежат спектрам анизотропного отражения от As- и Ga- стабилизированной поверхности GaAs (001). Температура измерений - 100 К.

Дальнейший прогрев поверхности до  $T=540^{\circ}\text{C}$  приводил к появлению в спектрах анизотропного отражения интенсивной линии с энергией 2.2 эВ, которая является индикатором наличия димеров Ga на поверхности и реконструкции (4x2)/с(8x2). Схожее поведение спектров отражения наблюдалось на поверхности InAs(001) (рис.2 (B)). Проведенное сравнение спектров анизотропного отражения и структуры поверхности, изучавшейся методом дифракции медленных электронов, показывает возможность идентификации состава и структуры поверхности по форме спектров анизотропного отражения.

В § 1.3 описываются результаты по исследованию структуры и стехиометрии поверхности, а также состава остаточных загрязнений на поверхностях соединений

In(Ga)P(001) после обработки в растворе HCl-ИПС и последующего прогрева в вакууме (табл.1) [A13]. В отличие от полупроводников III-As, для которых обработка в HCl-ИПС приводила к обогащению поверхности элементом пятой группы, поверхность соединений III-P обогащалась хлоридными соединениями третьей группы. Поверхность InP(001) после обработки в HCl-ИПС покрывалась несколькими монослоями соединений  $InCl_x$ , при этом на границе раздела между хлоридом индия и полупроводником присутствовал монослой, содержащий соединения P-P и P-Cl (рис.3 A(b)). Отличительной особенностью InP(001) является его травление в растворе HCl-ИПС, которое сохраняет атомную гладкость поверхности при использовании растворов с концентрацией HCl в изопропиловом спирте менее 4%.

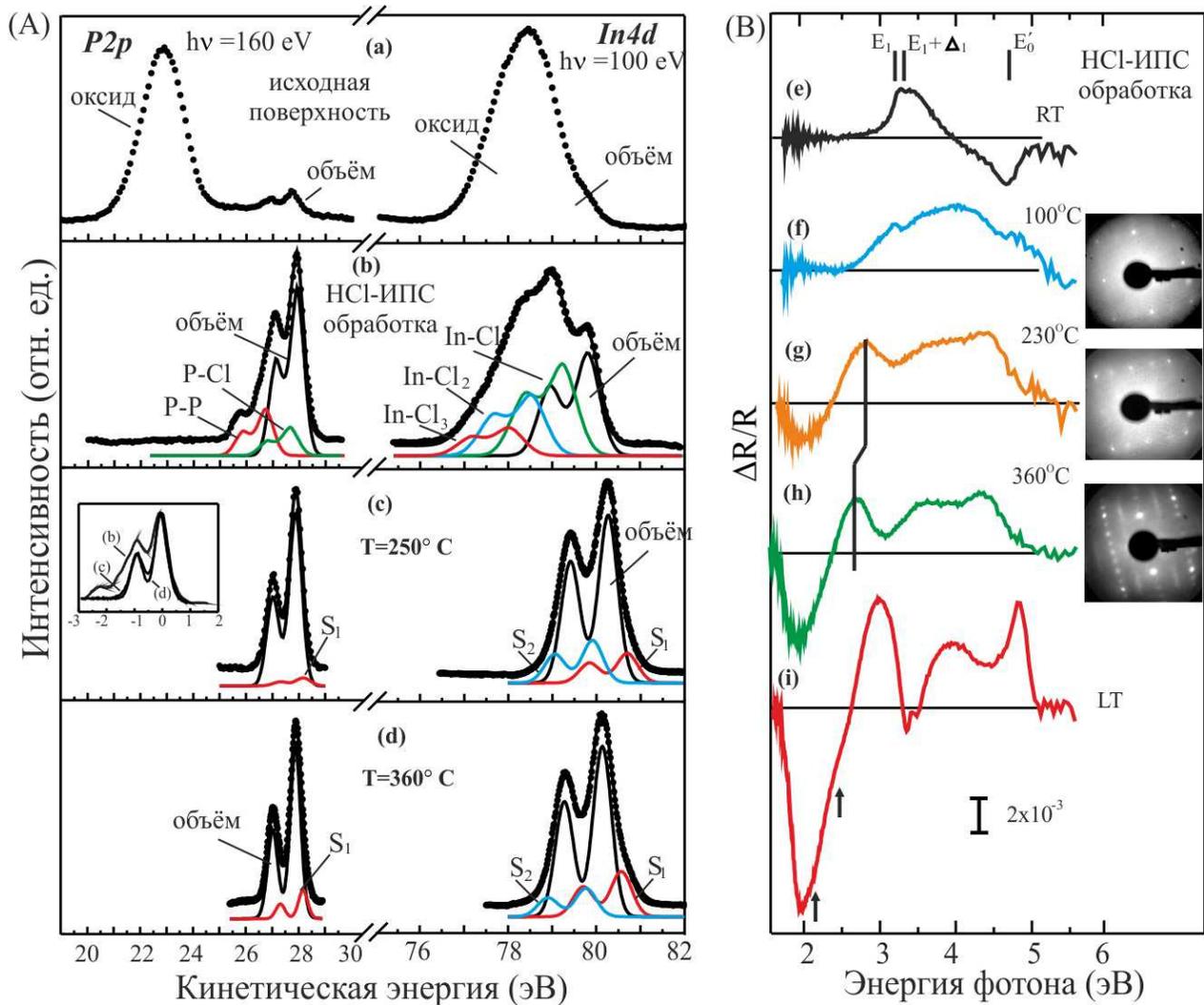


Рис.3 Фотоэмиссионные спектры (A) и спектры анизотропного отражения и соответствующие им картины ДМЭ (B) поверхности InP(001) после обработки в HCl-ИПС и последующих прогревов в СВВ. Картины ДБЭ показывают структуру  $(1 \times 1)$  (f),  $(2 \times 1)$  (g) и In- стабилизированную  $(2 \times 4)/c(2 \times 8)$  (h). Спектр (i) измерен при температуре 100 К.

При прогревах в вакууме на поверхности InP(001) наблюдалась следующая серия реконструкционных переходов:  $(1 \times 1) \xrightarrow{230^\circ C} (2 \times 1) \xrightarrow{280^\circ C} (2 \times 4)/c(2 \times 8) \xrightarrow{450^\circ C} (4 \times 4)$ . Другой отличительной чертой поверхности InP(001) является высокотемпературная In-стабилизированная поверхность с реконструкцией  $(2 \times 4)/c(2 \times 8)$ , характерной для анион-стабилизированных поверхностей полупроводников  $A^3B^5$ . Из сравнения спектров анизотропного отражения света от поверхности InP(001) (рис. 3 В (g)) и In(Ga)As(001) (рис.2) видно, что анизотропия катион-стабилизированных поверхностей одинаковая. Это означает, что кристаллографическое направление димеров атомов третьей группы одинаковое, несмотря на 90 градусный поворот элементарных ячеек.

Поверхности In(Ga)Sb(001), как и поверхности фосфидных соединений третьей группы, после обработки в HCl-ИПС покрывалась несколькими монослоями соединений  $InCl_x$  и элементной сурьмой [A14]. При прогревах в СВВ отношение  $Sb3d/In3d$  уменьшалось, и на поверхностях In(Ga)Sb(001) также наблюдались сверхструктурные переходы (табл. 1).

В §1.4 описываются результаты по исследованию структуры, стехиометрии, а также состава остаточных загрязнений на поверхностях GaN(0001) после обработки в растворе HCl-ИПС и последующего прогрева в вакууме [A15]. Показано, что обработка поверхности GaN в растворе HCl-ИПС в атмосфере азота приводит к удалению оксида галлия (рис. 4). Последующий прогрев химически приготовленной поверхности в интервале температур 400-450°C приводил к появлению ДМЭ картины нереконструированной поверхности  $(1 \times 1)$  (рис. 4 d). Остаточные загрязнения углеродом и кислородом не превышали 3–5% от монослоя. В спектрах СХПЭЭВР наблюдались потери, связанные с возбуждением поверхностных оптических фононов GaN, что говорит о структурной упорядоченности приповерхностного слоя GaN (рис. 4 а).

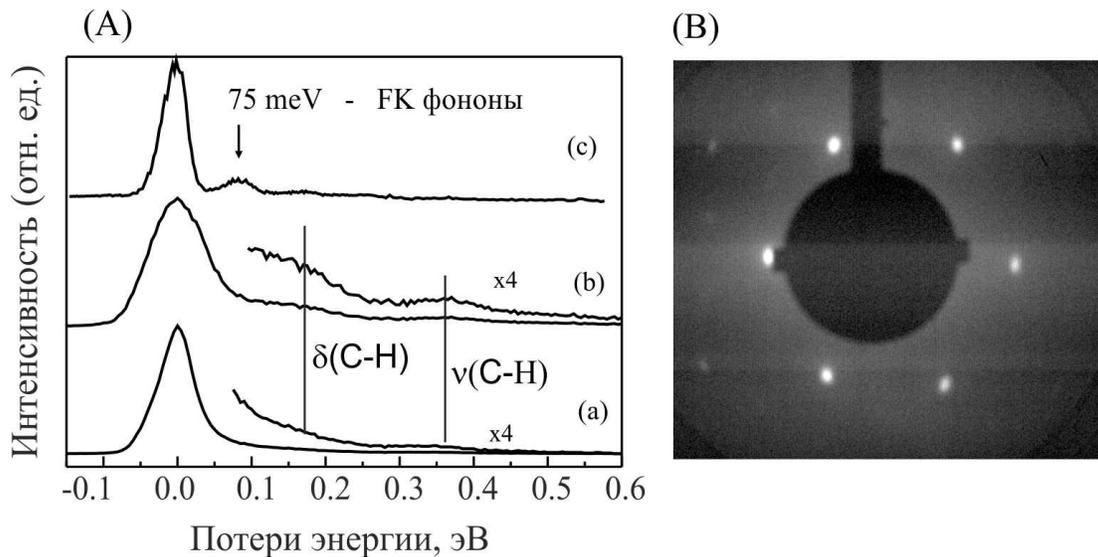


Рис.4 (А)- спектры характеристических потерь энергии электронов от исходной поверхности GaN(0001) (а), после химической обработки в HCl-ИПС (b) и последующего прогрева при  $T=450^{\circ}\text{C}$  (c). (В) - ДМЭ картина от поверхности GaN(0001)-(1x1), после HCl-ИПС и прогрева при  $T=450^{\circ}\text{C}$ .

В §1.5 представлены результаты по адсорбции цезия на поверхности GaN(0001)-(1x1) и её активированию цезием и кислородом до состояния эффективного отрицательного электронного сродства (ОЭС). Величина эффективного ОЭС на активированной поверхности GaN-(Cs,O) составила  $\sim 1.8$  eV, при этом квантовая эффективность GaN-фото катода на длине волны 250 нм достигала 26% [A15].

Таким образом, для всех изученных соединений  $A^3B^5$  атомарно-чистые, структурно-упорядоченные поверхности получены прогревом в вакууме, в среднем, на  $200^{\circ}$  ниже температуры, необходимой для десорбции собственных оксидов. Обработка поверхности в растворе HCl-ИПС удаляет оксиды с поверхности полупроводников  $A^3B^5$ , формируя на поверхности несколько монослоев адсорбата, состав которого определяется стабильностью элемента пятой группы к растворению в безводном растворе HCl. Изученные ориентации поверхностей соединений  $A^3B^5$ , состав собственных оксидов на исходных поверхностях, пассивирующий слой после обработки в HCl-ИПС, а также температуры очистки поверхностей ( $T_{\text{очист}}$ ), которые сравниваются с температурами десорбции оксидов ( $T_{\text{десорб}}$ ), и реконструкции, наблюдаемые на поверхностях при последовательных прогревах в вакууме, суммированы в таблице 1.

Таблица 1. Свойства поверхностей полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  после обработки в HCl-ИПС и последующих прогревов в вакууме.

$A^3B^5$	оксиды	HCl-ИПС обработка	$T_{\text{очистки}}$ °C	$T_{\text{десорбции}}$ °C	Реконструкции
GaAs(001) (110) (111)A (111)B	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As 1-2 ML	400	580	(1x1), (2x4); (3x1)/(2x6); (4x2) (1x1) (1x1); (2x2) (1x1); (2x2), (1x1), (3x3), ( $\sqrt{19x19}$ )
InAs(001) (111)A (111)B	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> As <sub>3</sub> O <sub>5</sub> In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As 2-3 ML	250	450	(2x4); (2x4)/(4x2); (4x2) (1x1); (2x2) (1x1)
InGaAs(001) x=0.2; 0.5		As 1-2 ML	250- 350	580	(2x3); (4x2)
GaP(110)	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl, 1 ML	350	580	(1x1)
InP(001)	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	InCl <sub>x</sub> , 2 ML	300	460	(1x1); (2x1); (2x4)/c(2x8); (4x4)
InGaAsP(001)		As, ~1 ML	300	580	(4x6); (4x2)/c(8x2)
GaN(0001) InN(0001) AlGaN(0001)	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	450	≥600	(1x1)
InSb(001)	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	InCl <sub>x</sub>	300	530	(1x1); (1x3); (4x3); (4x1)/c(8x2)
GaSb(001)	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	GaCl <sub>x</sub>	300	≥500	(1x1); (1x3)/(3x3); (2x3)

**Вторая глава** посвящена приготовлению атомарно-чистых, структурно-упорядоченных поверхностей GaAs *in situ* обработкой в атомарном водороде и исследованию взаимодействия АВ с реконструированными поверхностями [A16-A19]. В §2.3 представлены результаты по изучению взаимодействия АВ с поверхностями GaAs(001), покрытыми собственными оксидами, методами РФЭС, ДМЭ и СХПЭЭВР с целью приготовления структурно-упорядоченных поверхностей при низкой температуре. Показано, что стехиометрия поверхности GaAs(001) при обработке в АВ определяется, главным образом, температурой, при которой происходит обработка. При температурах ниже температуры десорбции Ga<sub>2</sub>O (350°C) поверхность становилась Ga-обогащенной, при температурах выше 350°C поверхность обогащалась As. С увеличением температуры обработки в АВ исходной поверхности GaAs(001), покрытой оксидами, наблюдался ряд поверхностных реконструкций, показанных на рис.5 (верхний ряд).

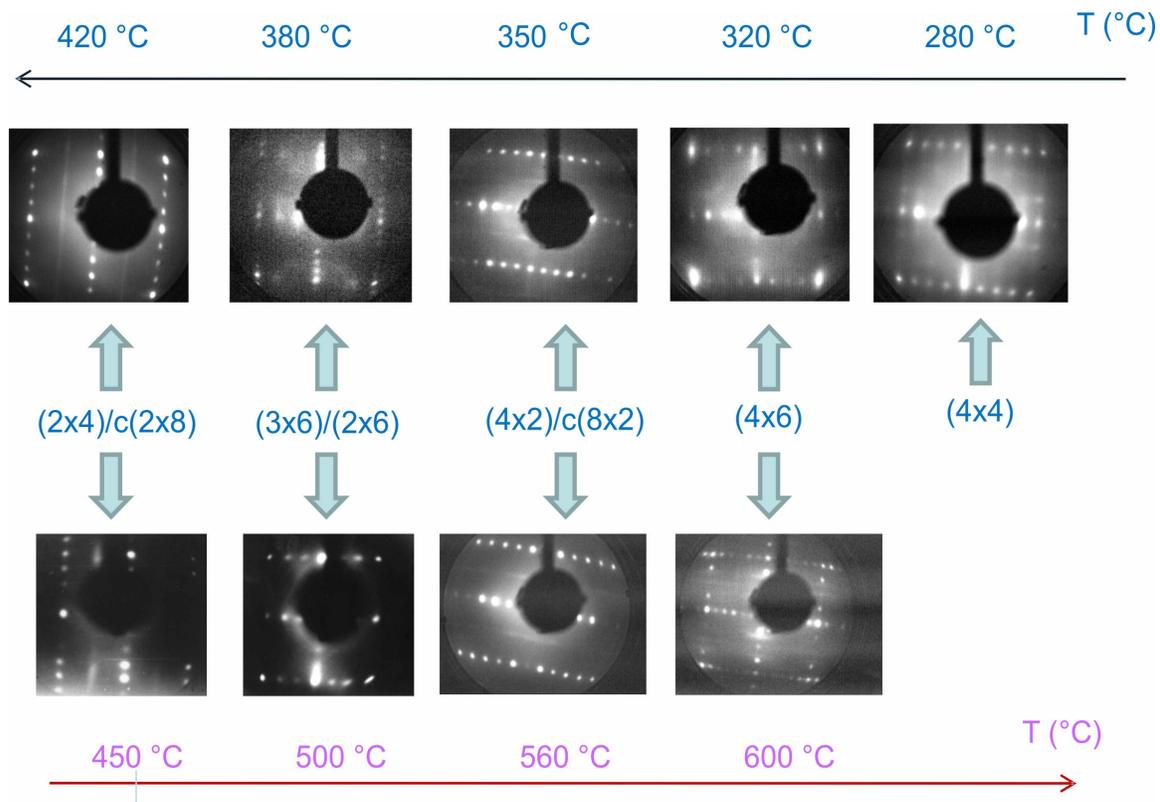


Рис.5 ДМЭ картины от поверхностей GaAs(001), полученных обработкой в АВ с фиксированной дозой 10 kL при различных температурах, указанных на шкале (верхний ряд). Для сравнения приводятся ДМЭ картины от поверхности GaAs(001), полученные десорбцией элементного мышьяка при прогреве в вакууме (нижний ряд) [1]. Отметим противоположную направленность температурных шкал для поверхностей, приготавливаемых обработкой в АВ и стандартным нагревом поверхности.

Из рис.5 видно, что изменяя температуру экспозиции поверхности оксид/GaAs(001) в АВ в пределах 280÷420°C, можно приготавливать поверхность с различными реконструкциями: от сильно Ga-обогащенной (4x4) до As-стабилизированной структуры (2x4)/c(2x8). Обработка поверхности GaAs(001) в АВ при температуре 280°C приводила к образованию Ga-обогащенной поверхности ( $\theta_{\text{Ga}} \sim 0.8 \text{ MC}$ ) с новой реконструкцией (4x4), которая переходила в Ga-обогащенную реконструкцию (2x4)/c(2x8) при прогреве в сверхвысоком вакууме (без АВ) выше 560°C. Впервые получена Ga-стабилизированная поверхность с реконструкцией (2x4)/c(2x8), равновесная структура которой рассчитана из первых принципов в модели элементарной ячейки (2x4) со смешанным As-Ga димером (рис.6) [A18, A19]. Можно заключить, что изменения температуры обработки поверхности GaAs(001), покрытой собственными оксидами, в АВ приводят к изменениям стехиометрии поверхности и, как следствие, к изменениям структуры поверхности. Таким образом,

изменяя параметры обработки в АВ, можно контролируемо приготавливать поверхности GaAs(001) различного состава и структуры.

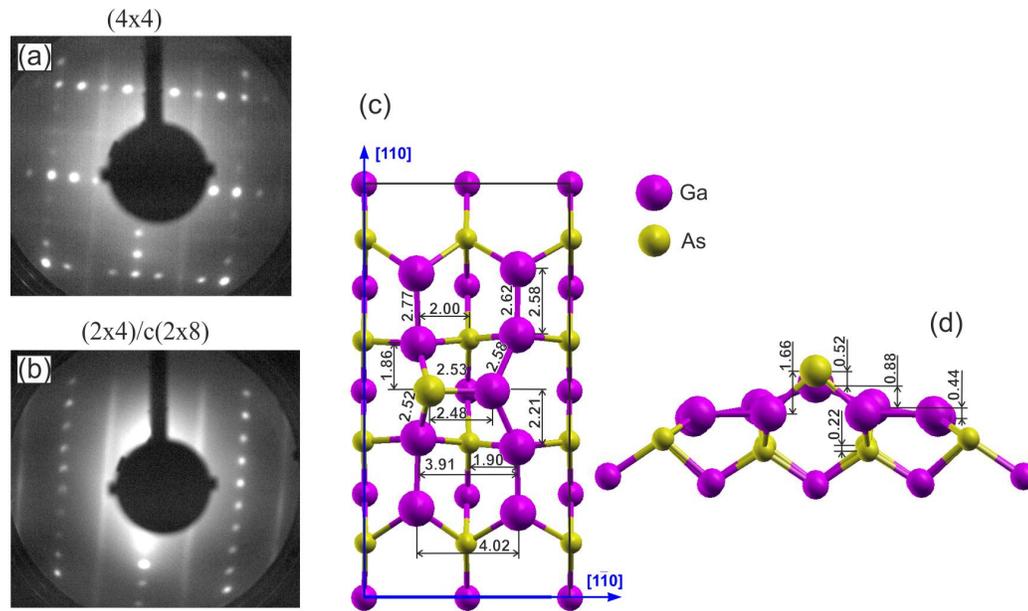


Рис.6 ДМЭ картины от поверхности GaAs(001) после экспозиции в АВ 10 kL при температуре 280°C и последующих последовательных прогревах в вакууме при температурах 450°C (а) и 560°C (б). Модель строения Ga-стабилизированной поверхности GaAs(001)-(2x4)/c(2x8) со смешанным димером.

В §2.4 приведены результаты по изучению пассивации атомарным водородом поверхностных состояний на поверхности GaAs(001) [A16]. Хорошо известно, что атомарный водород в объёме полупроводников может пассивировать как акцепторные, так и донорные состояния. Можно предположить, что атомарный водород может пассивировать и поверхностные состояния (ПС) и тем самым “откреплять” уровень Ферми на поверхности. Несмотря на большое количество исследований, посвященных изучению взаимодействия атомарного водорода с поверхностями GaAs и других  $A^3B^5$ , вопрос о возможной “электронной” пассивации ПС атомарным водородом оставался открытым. Установлено, что для GaAs р-типа экспозиция в атомарном водороде приводила к значительному сдвигу ( $\sim 0.3$  эВ) уровня Ферми на поверхности к потолку валентной зоны и уменьшению поверхностной фотоэдс на два порядка. Прогрев в вакууме при  $T \geq 400^\circ\text{C}$  приводил к восстановлению положения уровня Ферми и величины поверхностной фотоэдс до первоначальных значений. Такое “незакрепленное” поведение уровня Ферми на поверхности объясняется пассивацией донорно-подобных ПС атомарным водородом.

**В третьей главе** рассматривается взаимодействие щелочных металлов с поверхностью GaAs(001) [A20-A30]. Изучена адсорбция Cs на поверхность GaAs(001) с реконструкциями  $(2 \times 4)/c(2 \times 8)$  и  $(4 \times 2)/c(8 \times 2)$ . Установлено, что изменения атомной структуры поверхности GaAs(001) с различной стехиометрией, происходящие при адсорбции субмонослойных покрытий цезия, существенно различны: As-стабилизированная поверхность с реконструкцией  $(2 \times 4)/c(2 \times 8)$  разупорядочивается при значительно меньших покрытиях по сравнению с Ga-стабилизированной поверхностью с реконструкцией  $(4 \times 2)/c(8 \times 2)$ . Анализ фотоэмиссионных линий As 3d и Ga 3d показал, что на начальных этапах адсорбции до покрытий  $\Theta_{Cs} < 0.3$  ML передача заряда идет только на атомы галлия. Напротив, при  $\Theta_{Cs} > 0.3$  ML передача заряда идет только на атомы мышьяка, при этом происходит разупорядочение и дестабилизация поверхности. Из измерений химических сдвигов методом высокоразрешающей фотоэмиссии получена величина передачи заряда от цезия к поверхностным атомам галлия, расположенным во втором ряду в траншейных позициях, которая составила 0.7 e. Данное наблюдение показывает, что передача заряда от атомов цезия в полупроводник ослабляет химические связи атомов мышьяка. Дополнительным подтверждением этого вывода является обнаруженное уменьшение энергии связи мышьяка на As-стабилизированной поверхности GaAs(001), проявляющееся в снижении на  $\sim 100^\circ\text{C}$  температуры сверхструктурного перехода от As-стабилизированной  $(2 \times 4)/c(2 \times 8)$  к Ga-стабилизированной поверхности  $(4 \times 2)/c(8 \times 2)$  под влиянием адсорбированного цезия [A27, A28].

Расчетами из первых принципов доказано, что эффект снижения температуры сверхструктурного перехода  $(2 \times 4) \rightarrow (4 \times 2)$  обусловлен уменьшением энергии связи атомов мышьяка на As-стабилизированной поверхности GaAs(001) вследствие перераспределения электронной плотности между поверхностными атомами As и нижележащими Ga атомами из-за передачи заряда от Cs в полупроводник. Вследствие уменьшения энергии связи и увеличения коэффициента диффузии поверхностных атомов GaAs, атомы Cs могут быть использованы в качестве сурфактанта для низкотемпературного выращивания совершенного GaAs методом МЛЭ [A30].

В §3.2 представлены результаты по изучению сурфактантных свойств Cs при низкотемпературном МЛЭ росте GaAs(001). В работе [A29] было предложено использовать Cs в качестве сурфактанта для низкотемпературного роста GaAs методом

МЛЭ без потери кристаллографического совершенства эпитаксиальной плёнки. На рисунке 7 показаны ДБЭ осцилляции, измеренные во время роста GaAs без Cs и после адсорбции Cs. После выращивания первого монослоя ДБЭ осцилляции на цезированной поверхности не отличались по форме от осцилляций на чистой поверхности, за исключением амплитуды, которая возрастала в несколько раз.

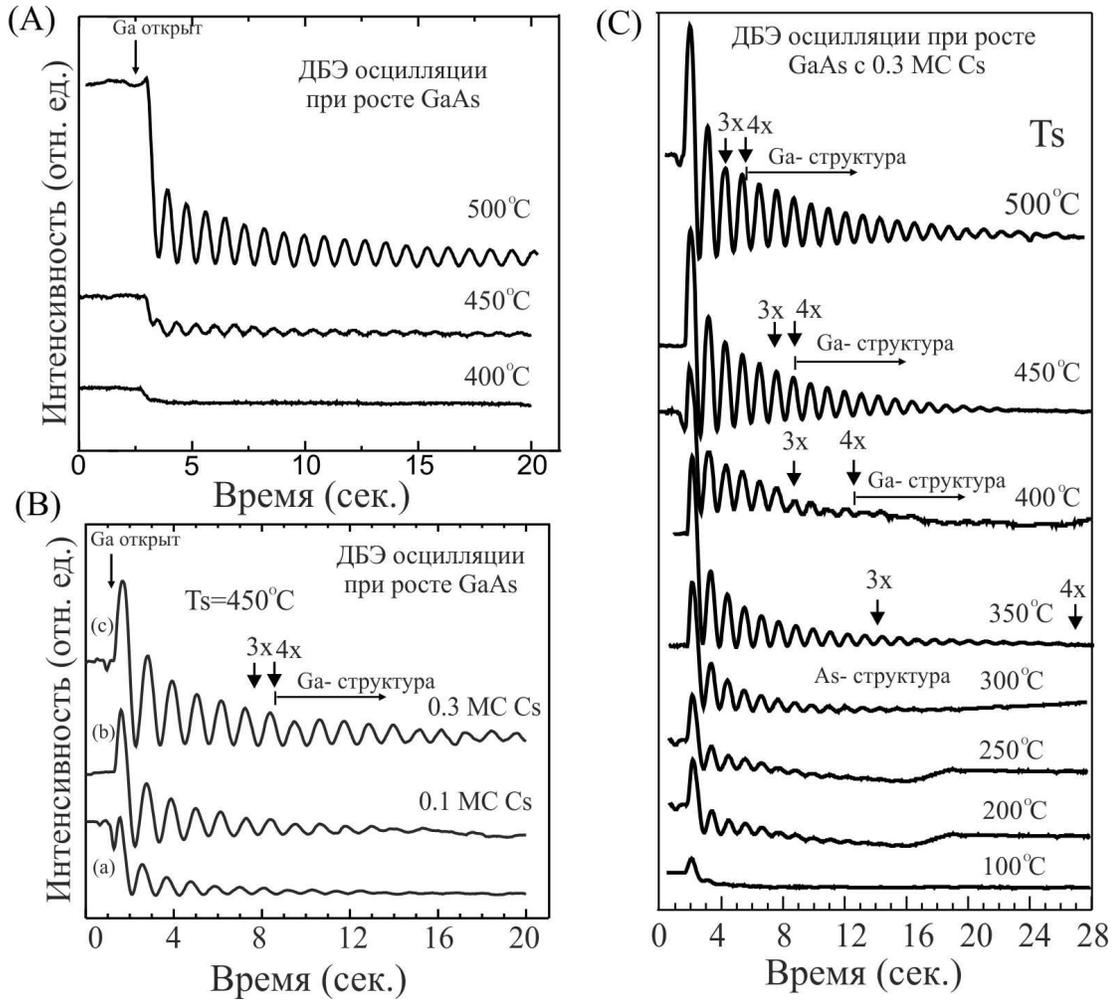


Рис.7. Осцилляции интенсивности зеркального рефлекса (ИЗР) во время роста GaAs при T подложки 500, 450 и 400°C на чистой поверхности (A, B(a)) и с адсорбированным Cs (B) с покрытием 0.1 (b) и 0.3 ML Cs (c) при T=450°C. На рисунке (C) показаны осцилляции ИЗР при росте GaAs с предварительной адсорбцией 0.3 монослоя Cs и последующим понижением температуры роста. Стрелками показаны сверхструктурные переходы структуры (2x1) в (3x1) и далее в (4x1).

Затухание осцилляций существенно снизилось, что говорит о подавлении цезием развития шероховатости поверхности из-за трёхмерного роста, обычно наблюдаемого при слоевом росте. Вероятно, Cs способствует увеличению диффузии поступающих на подложку атомов, что приводит к их более полному встраиванию в ступени растущего слоя. При

увеличении количества Cs на поверхности более 0.3 монослоя при эпитаксиальном росте GaAs наблюдался структурный переход из (2x1) в Ga-стабилизированную реконструкцию (4x2). Для исключения образования Ga-капель, температура подложки понижалась для перехода в режим обогащения поверхности As. На рис. 7с показаны ДБЭО осцилляции при росте GaAs с предварительной адсорбцией 0.3 монослоя Cs. Стрелками отмечены моменты перехода структуры (2x1) в структуру (3x2) и затем в (4x2). Видно, что ДБЭО осцилляции наблюдаются даже при температуре подложки ниже 250°C. С уменьшением температуры подложки время, необходимое для перехода в Ga-стабилизированную поверхность, увеличивается. При  $T < 300^\circ\text{C}$  рост переходил в As-обогащенный режим. Наблюдение ДБЭ осцилляций при низкой температуре может означать, что даже при  $T < 300^\circ\text{C}$  происходит двумерный рост GaAs.

В §3.3 рассмотрен переход диэлектрик-металл в системе щелочной металл/GaAs. Вопрос о переходе диэлектрик-металл в тонких слоях металлов, адсорбированных на поверхности, как полупроводников, так и металлов, остается дискуссионным даже для наиболее хорошо изученных модельных систем. Одной из основных экспериментальных проблем при изучении перехода диэлектрик-металл является определение критерия металлизации, зависящего от метода измерения. Как следствие, концентрация адатомов, при которой в слое адсорбата происходит переход диэлектрик-металл, часто оказывается различной для разных методов измерения. Представляет интерес также вопрос о связи электронных свойств адсорбата с его структурой. В диссертации приведены результаты по изучению плазменных потерь в системе Cs/GaAs (001), (111)A,B и (110) при комнатной температуре. При увеличении концентрации атомов щелочных металлов на поверхности GaAs при покрытиях  $\theta \geq 0.5$  монослоя происходит переход к конденсированной двумерной металлической фазе. Причина перехода состоит в том, что при увеличении  $\theta$  кулоновское отталкивание частично заряженных адатомов сменяется притяжением из-за образования латеральных металлических связей. На поверхности Cs/GaAs с различными кристаллографическими ориентациями и реконструкциями этот переход сопровождается возникновением дублета узких пиков потерь энергии электронов в запрещенной зоне GaAs при  $E_1 \approx 0.4$  эВ и  $E_2 \approx 1.1$  эВ (рис.8), обусловленных возбуждением плазмонов в адсорбционном слое [A19, A20]. Спектры потерь энергии электронов в системе Cs/GaAs соответствуют возбуждению плазмонов, локализованных в двумерных островках цезия, и

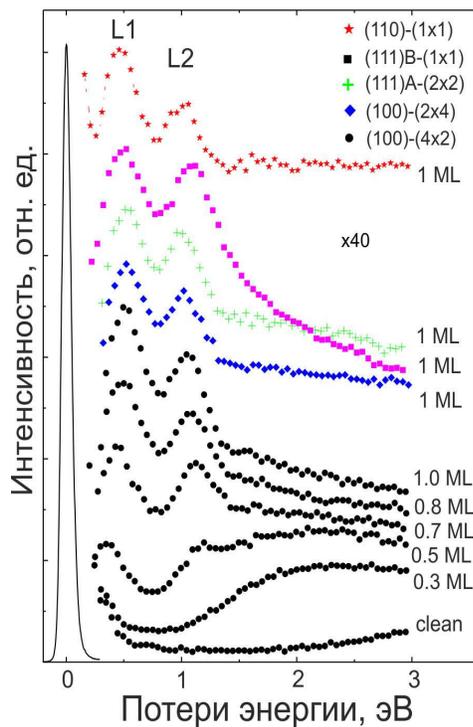


Рис. 8 Спектры энергетических потерь электронов при последовательной адсорбции цезия на Ga-стабилизированную поверхность (4x2)/c(8x2), а также в насыщении  $\theta_{Cs} \sim 1$  ML для поверхностей (110)-(1x1), (111)B-(1x1) и (111)A-(2x2).

не зависят от ориентации и структуры поверхности. Появление интенсивных пиков потерь при покрытии поверхности цезием свыше 0.5 ML связано с динамическим фазовым переходом от двумерного газа атомов цезия к плотноупакованным двумерным островкам с металлическим спектром электронных возбуждений, при этом латеральная проводимость отсутствует.

В § III.4 экспериментально изучен переход диэлектрик-металл в двумерных слоях калия и натрия на поверхности GaAs(001) в температурном интервале 85÷300 K методами фотоототражения и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов. Критериями металлизации служили появление 2D плазмонов в спектрах потерь энергии электронов и пороговое изменение поверхностной фотоэдс, зависящей от низкочастотной проводимости. Для изучения степени упорядоченности адсорбированного слоя на поверхности GaAs(001) использовался метод

спектроскопии анизотропного отражения. В работах [A21, A22] показано, что адсорбция щелочных металлов на поверхность GaAs(001) при температуре ниже 200 K приводит к пороговому появлению металлизации в адсорбированном слое при  $\theta_{alk} \sim 0.5$  ML, при этом в интервале покрытий, равном 0.2 ML от точки перехода, металлическая и диэлектрическая фазы сосуществуют. Дальнейшее нанесение щелочного металла приводит к металлизации всей поверхности. Такого рода переход диэлектрик-металл можно охарактеризовать как фазовый переход первого рода. Формирующаяся металлическая фаза является неупорядоченной и метастабильной. Прогрев поверхности до комнатной температуры приводит к разрушению металлической фазы, т.е. к переходу металл-диэлектрик при температуре, когда становится возможной поверхностная диффузия адатомов и возникает переход беспорядок-порядок. При этом диэлектрическая фаза представляет собой двумерные островки с металлическим спектром электронных возбуждений. Эти

результаты показывают, что наличие металлической фазы на поверхности GaAs(001) напрямую связано с разупорядочением в слое адсорбата. Для К и Na определены диаграммы областей существования металлической фазы в зависимости от покрытия и температуры.

**В четвертой главе** рассматривается взаимодействие йода с поверхностями арсенида галлия и атомно-слоевое травление поверхности GaAs(001) [A31-A34]. В § IV. 2 изучено взаимодействие йода с поверхностями GaAs (001), (111)A,B и (110). Впервые экспериментально и теоретически изучена сравнительная адсорбция йода на As и Ga-стабилизированные поверхности GaAs(001). Методом фотоэмиссии с использованием синхротронного излучения установлено, что на Ga-стабилизированной поверхности йод образует преимущественную химическую связь с атомами галлия и вызывает значительное перераспределение электронной плотности между поверхностными атомами мышьяка и галлия, тогда как на As-стабилизированной поверхности образуется связь только с поверхностным мышьяком. Такое селективное взаимодействие йода на реконструированных поверхностях приводит к травлению Ga-стабилизированной поверхности и пассивации As-стабилизированной поверхности, что объясняет экспериментально наблюдаемый структурный переход на поверхности GaAs(001) от реконструкции Ga-(4x2)/c(8x2) к As-(2x4)/c(2x8).

В § IV. 3 изучено адсорбат-индуцированное управление стехиометрией поверхности полупроводников при атомно-слоевом травлении поверхности GaAs(001) в СВВ последовательной адсорбцией атомов цезия и йода и низкотемпературным прогревом. Исследовано селективное взаимодействие цезия и йода с полярной поверхностью (001) GaAs с целью установления микроскопического механизма уменьшения энергии связи поверхностных атомов полупроводника. Для экспериментальной проверки возможности обратимых низкотемпературных переходов между As- и Ga-стабилизированными реконструкциями поверхности GaAs(001), была изучена эволюция картин дифракции медленных электронов при поочерёдной адсорбции цезия и йода и последующих низкотемпературных прогревах (рис. 9). Видно, что поочерёдная адсорбция цезия и йода на поверхности GaAs(001) и последующие прогревы при низких температурах позволяют осуществить обратимые переходы между основными реконструкциями поверхности GaAs(001): As-стабилизированной (2x4)/c(2x8) и Ga-стабилизированной (4x2)/c(8x2). Для дальнейшего исследования характера взаимодействия цезия и йода с поверхностью GaAs

были проведены эксперименты по адсорбции цезия на Ga-стабилизированной поверхности с реконструкцией  $(4 \times 2)/c(8 \times 2)$  и йода на As-стабилизированной поверхности с реконструкцией  $(2 \times 4)/c(2 \times 8)$ . Последующие прогревы при температуре  $T \sim 450^\circ\text{C}$  в обоих случаях привели к восстановлению исходных реконструкций. Это подтверждает селективный характер воздействия электроположительных и электроотрицательных адсорбатов на состав и структуру поверхности и других полупроводников  $\text{A}^3\text{B}^5$ .

Были проведены несколько циклов цифрового травления с измерением отношения интенсивности дифракционных рефлексов  $I_{sp}$  к суммарной интенсивности рефлексов и фона диффузно рассеянных электронов  $(I_{sp} + I_{backgr})$ . Это отношение, характеризующее степень упорядоченности атомной структуры поверхности, показано на рис. 9 кружками и треугольниками как функция номера цикла для As- и Ga-стабилизированных реконструкций, соответственно.

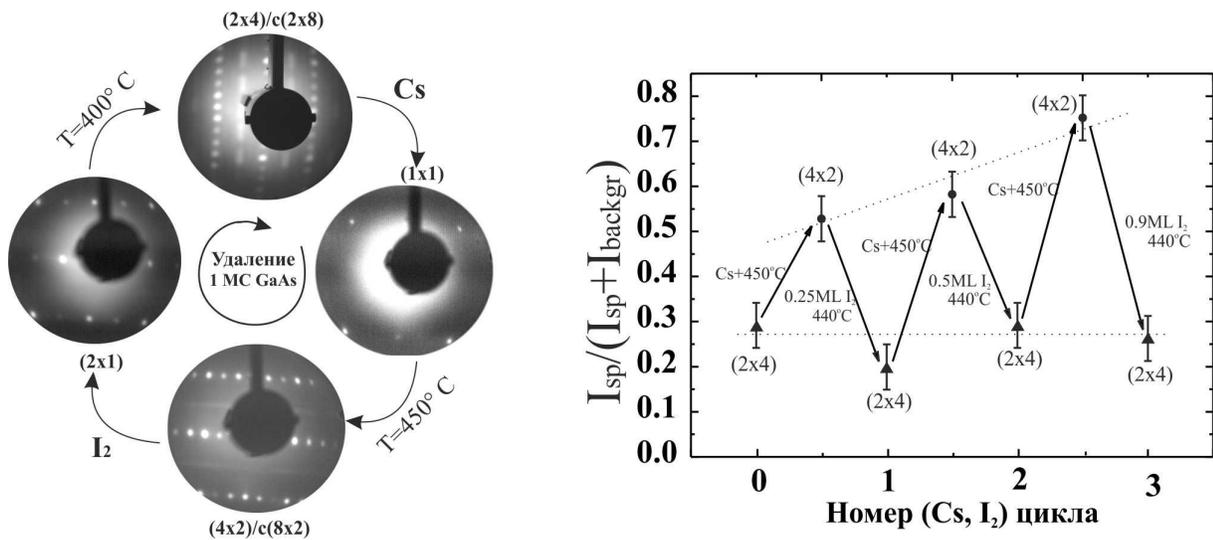


Рис.9 ДМЭ картины от поверхности GaAs(001) в одном цикле адсорбции и десорбции цезия и йода, демонстрирующие удаление одного монослоя арсенида галлия при относительно низких температурах прогрева. Отношение интенсивности дифракционных рефлексов к суммарной интенсивности рефлексов и фона диффузно рассеянных электронов  $I_{sp}/(I_{sp} + I_{backgr})$ , как функция номера цикла адсорбции и десорбции цезия и йода.

Видно, что при увеличении номера цезий-йодного цикла структурное совершенство As-стабилизированной поверхности остаётся практически неизменным, а качество Ga-стабилизированной поверхности даже улучшается.

**В пятой главе** представлены результаты по изготовлению и изучению магнитных и электрофизических свойств барьеров Шоттки на основе границы раздела Pd/Fe/GaAs, а также исследованию инжекции спин-поляризованных электронов с целью создания

эффективных спин-детекторов. Детектор спина электронов (спиновый анализатор) на основе структуры Pd/Fe/GaAs(001) является альтернативой известным детекторам Мотта и может использоваться для измерения среднего спина свободных электронов в вакууме.

В § V. 1 дается краткий обзор сравнительных характеристик различных поляриметров и обоснование выбора гетероструктур на основе Pd/Fe/GaAs(001)/InGaAs для использования в качестве спин-детектора. В § V. 2 описывается изготовление и характеристики гетероструктур Pd/Fe/GaAs(001) и Pd/Fe/oxide/GaAs(001). Для изготовления барьеров Шоттки на основе Fe/GaAs были реализованы три границы раздела между металлом и GaAs. Напыление Fe происходило на поверхность GaAs(001): (1) покрытую оксидом, который приготавливался по стандартной методике окисления арсенида галлия в потоке кислорода под действием ультрафиолетового излучения (UVOCS) [A34]; (2) на чистую поверхность с реконструкциями (2x4) и (4x2), которые приготавливались обработкой в растворе HCl-ИПС и последующим прогревом в вакууме при  $T=450$  и  $550^{\circ}\text{C}$ , соответственно [A1]; (3) на поверхность арсенида галлия пассивированную азотом в растворе гидразина [A35]. Для напыления металлов (Pd, Fe) использовались ячейки Кнудсена. После напыления железа (0.5÷5 нм), на поверхность напылялся палладий для защиты железа от окисления на воздухе. Электрофизические параметры барьера Шоттки определялись из вольтамперных (I-V) зависимостей, магнитные свойства изучались электрооптическим методом Керра и сверхпроводящим магнитометром (SQUID).

Методами просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ВРЭМ) и атомно-силовой микроскопии показано, что рост Fe на реконструированной поверхности GaAs(001) идет эпитаксиально (рис.10 а). Наименьшее значение коэрцитивного поля  $H_c$  получено при напылении железа на атомарно-чистую, реконструированную поверхность GaAs(001). Такие структуры обладали наименьшей анизотропией намагниченности. Показано, что намагниченность пленки Fe является линейной функцией её толщины и соответствует намагниченности объемного железа, что свидетельствует об отсутствии в слое Fe немагнитного слоя. Методами фото- и электроотражения измерена зависимость величины приповерхностного электрического поля от прикладываемого напряжения на барьере. Установлено, что отжиг структур Fe/GaAs(001) в вакууме приводит к пассивации поверхностных состояний на границе раздела металл/полупроводник.

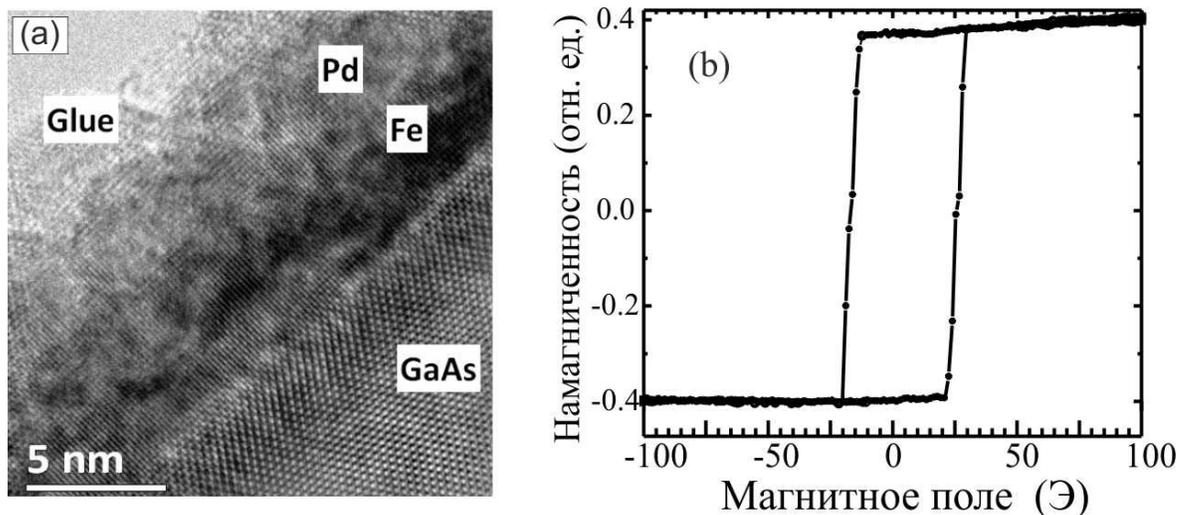


Рис. 10 ПЭМ изображение границы раздела Pd/Fe/GaAs(001) (a) и кривая намагниченности для структуры Pd/Fe/GaAs/InGaAs (b).

Изготовлены барьеры Шоттки на основе Fe/GaAs(001) с электрическими (плотность обратного тока менее  $10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> при запирающем напряжении 0.5 В) (рис.10 b) и магнитными (значение коэрцитивного поля менее 100 Гаусс) свойствами (рис.10 c), позволяющими достигать эффективности прибора, сравнимой с детекторами Мотта, при этом диапазон рабочих напряжений составляет 10÷1000 В.

В §5.3 изложены результаты по изучению инжекции и транспорта спин-поляризованных электронов в структурах Pd/Fe/оксид/GaAs и Pd/Fe/GaAs, а также предложен и реализован метод оптической регистрации спина в структурах Pd/Fe/GaAs с квантовыми ямами InGaAs. Измерена степень спиновой поляризации свободных электронов по спину, эмитированных из GaAs фотокатода с отрицательным электронным средством. В работе обсуждается модель транспорта и селекция спин-поляризованных электронов через барьер металл/полупроводник. Для практических применений в спин-поляриметрии важными характеристиками детектора являются функция Шермана  $S=A/P_0$ , где  $A$ - измеряемая функция асимметрии при известной поляризация электронного пучка  $P_0$ , отражающая селективность поляриметра к проекции спина электрона, и показатель качества  $F=S^2 \cdot T/(1+T)$ , демонстрирующий чувствительность поляриметра, где  $T=I_C/I_0$  - функция пропускания,  $I_C$  - ток проходящий через полупроводник,  $I_0$  – ток падающих электронов.

На рис. 11 а-d приведена функция пропускания  $T$ , спин-зависимая функция  $\Delta T$ , функция

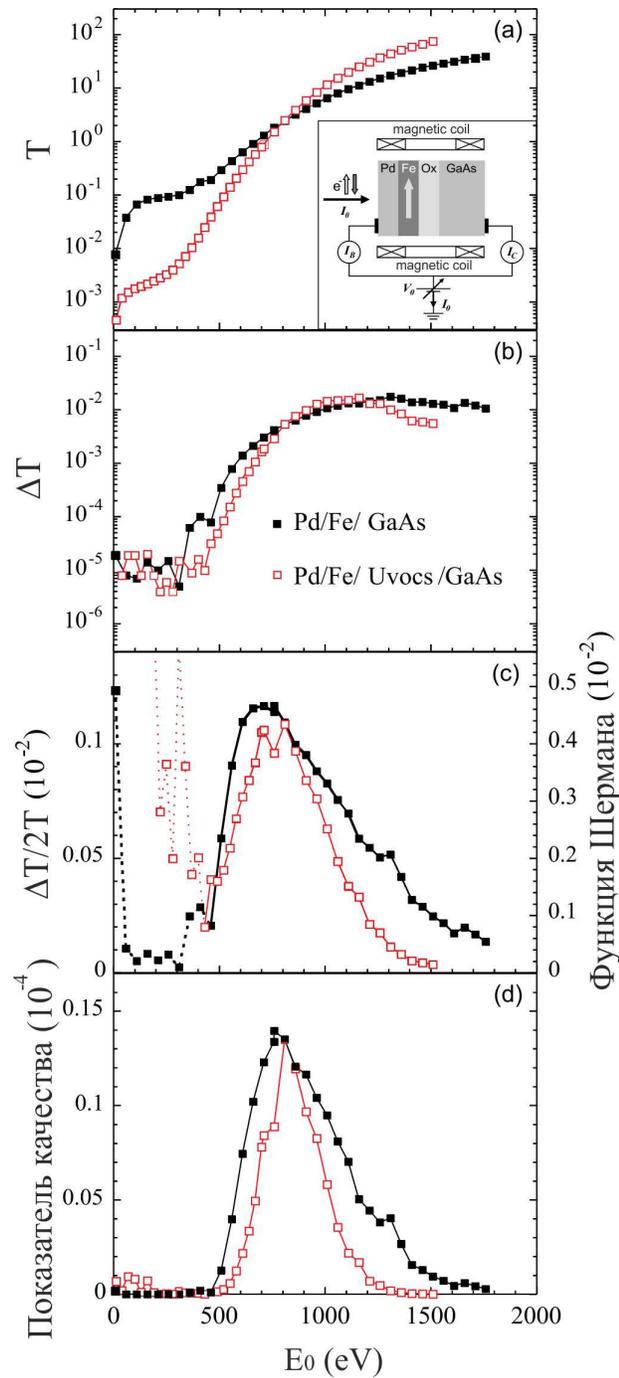


Рис.11 Функция пропускания  $T$ , спин-зависимая функция  $\Delta T$ , асимметрии  $A=\Delta T/2T$  и показатель качества для структур Pd/Fe/GaAs и Pd/Fe/ox/GaAs (a,b,c,d).

асимметрии  $\Delta T/2T$  и показатель качества ( $F$ ) для спин поляризованных электронов, инжектированных в структуру Pd/Fe/GaAs и Pd/Fe/оксид/GaAs. Максимум спин-зависимой функции асимметрии для обеих структур соответствует величине функции Шермана  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  (рис.11 c) и показателю качества  $\sim 1.5 \cdot 10^{-5}$  (рис.11 d). Эта величина сравнима с показателем качества стандартных детекторов Мотта. Следует отметить, что поскольку изменения  $T$  и  $\Delta T$  являются более плавными для интерфейса Fe/GaAs(001)-(4x2), чем для Fe/оксид/GaAs(001), инжекционная полоса энергий в пиках S и F оказывается шире. Поэтому структура Pd/Fe/GaAs(001)-(4x2) обеспечивает свойства спин-поляриметра в более широком диапазоне энергий. По сравнению с детекторами Мота, спин-поляриметры на барьере Шоттки имеют ряд преимуществ: малый размер, совместимость с другими вакуумными методами, такими как фотоэмиссия и электронная микроскопия, низкие рабочие напряжения (около 1 кВ в сравнении со 100 кВ, используемыми в калиброванных детекторах Мотта).

В работе предложен и реализован метод

измерения спина электронов по регистрации

интенсивности катодолуминесценции от поглощенных спин-поляризованных электронов

в структуре Pd/Fe/GaAs(001) с квантовыми ямами InGaAs вблизи границы Fe/GaAs [A36, A37]. Была разработана и выращена гетероструктура GaAs с двумя квантовыми ямами  $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{As}$ . Эффективность данной структуры была проверена в эксперименте по инжекции электронов из ферромагнитного металлического контакта в гетероструктуру с квантовыми ямами и измерению степени циркулярно-поляризованной электролюминесценции. Значение коэффициента эффективности спиновой инжекции составило  $\eta=16\%$  при  $T = 78 \text{ K}$ , что показало перспективность использования гетероструктуры Pd/Fe/GaAs/InGaAs в спин-детекторах с оптической регистрацией спина инжектируемых электронов. Измерена зависимость асимметрии интенсивности катодолуминесценции от энергии инжектируемых спин-поляризованных электронов. Максимальная величина асимметрии составила  $2 \cdot 10^{-3}$  и наблюдалась в диапазоне от порога появления КЛ (400 эВ) и до энергии 1000 эВ. Для баллистических электронов проведена качественная оценка величины функции асимметрии.

Таким образом, с использованием развитой технологии приготовления структурно-совершенных поверхностей  $\text{A}^3\text{B}^5$  реализован магнитный барьер Шоттки для детектирования спина свободных электронов. Предложен и реализован метод измерения спина электронов по регистрации интенсивности катодолуминесценции от поглощенных спин-поляризованных электронов в структуре Pd/Fe/GaAs(001) с квантовыми ямами InGaAs вблизи гетерограницы.

**В заключении** представлены основные выводы диссертации, а также данные о личном вкладе соискателя.

**Личный вклад автора** заключается в выборе направления исследований, постановке задач и разработке концепции проведения экспериментов. Автором сделан определяющий вклад в получение и анализ экспериментальных результатов и в их представление в печати. Автор принимал непосредственное участие в создании экспериментального оборудования. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат результаты, которые вошли в сформулированные защищаемые положения и выводы.

### **Основные результаты и выводы:**

1. Развита метод контролируемого изменения физико-химических свойств поверхностей, заключающийся в управлении составом и сверхструктурными переходами на

поверхностях полупроводников  $A^3B^5$  путём химического удаления оксидов и последующего прогрева вакууме в отсутствие потоков элементов V группы. Исследованы сверхструктурные переходы, соответствующие анионным и катионным фазам на поверхностях полупроводниковых соединений  $A^3B^5$ :

- GaAs (111)B:  $(1 \times 1) \xrightarrow{350^\circ C} (2 \times 2) \xrightarrow{400^\circ C} (1 \times 1) \xrightarrow{480^\circ C} (3 \times 3) \xrightarrow{530^\circ C} (\sqrt{19} \times \sqrt{19})$ ; GaAs(111)A:  $(1 \times 1) \xrightarrow{300^\circ C} (2 \times 2)$ ; GaAs(001):  $(1 \times 1) \xrightarrow{400^\circ C} (2 \times 4)/c(2 \times 8) \xrightarrow{480^\circ C} (2 \times 6)/(3 \times 6) \xrightarrow{530^\circ C} (4 \times 1) \xrightarrow{580^\circ C} (4 \times 2)/c(8 \times 2)$ ; GaAs(110):  $(1 \times 1)$ .
- InAs(001):  $(1 \times 1) \xrightarrow{230^\circ C} (2 \times 4)/c(2 \times 8) \xrightarrow{280^\circ C} (2 \times 4)/(4 \times 2) \xrightarrow{300^\circ C} (4 \times 2)/c(8 \times 2)$ ; (111)A:  $(1 \times 1) \xrightarrow{300^\circ C} (2 \times 2)$ .
- InP(001):  $(1 \times 1) \xrightarrow{230^\circ C} (2 \times 1) \xrightarrow{280^\circ C} (2 \times 4)/c(2 \times 8) \xrightarrow{450^\circ C} (4 \times 4)$ .
- GaP(110):  $(1 \times 1)$ .
- InSb(001)-(1x1)  $\xrightarrow{400^\circ C} (1 \times 3) \xrightarrow{480^\circ C} (4 \times 3) \xrightarrow{530^\circ C} (4 \times 2)/c(8 \times 2)$ .
- GaSb(001) -(1x1)  $\xrightarrow{400^\circ C} (1 \times 3)/(3 \times 3) \xrightarrow{450^\circ C} (2 \times 3)$ .
- GaN(0001) –  $(1 \times 1)$ .

Установлено, что методика приготовления поверхности в безводном растворе хлороводорода в изопропиловом спирте является универсальной для полупроводников  $A^3B^5$  и позволяет получать поверхности, не уступающие по качеству поверхностям, выращиваемым методом МЛЭ.

2. Экспериментально открыты и изучены новые Ga-стабилизированные сверхструктуры  $(4 \times 4)$  и  $(2 \times 4)/c(2 \times 8)$  на поверхности GaAs(001), приготовленные обработкой в атомарном водороде. Получен весь ряд реконструкций, характерных для поверхности GaAs(001), в диапазоне температур  $280 \div 420^\circ C$ . Низкотемпературное структурное упорядочение поверхности GaAs(001) связано с сурфактантными свойствами атомарного водорода на поверхности полупроводника. Экспозиция поверхности GaAs(001) р-типа в атомарном водороде приводит к пассивации поверхностных состояний и откреплению уровня Ферми на поверхности.
3. Экспериментально обнаружено уменьшение энергии связи атомов мышьяка на поверхности GaAs(001), проявляющееся в разупорядочении As-стабилизированной поверхности и в снижении на  $\sim 100^\circ C$  температуры перехода к Ga-стабилизированной поверхности GaAs(001)-(4x2)/c(8x2) под влиянием адсорбированного цезия. Расчетами из первых принципов доказано, что эффект обусловлен уменьшением энергии связи

атомов мышьяка вследствие перераспределения электронной плотности между поверхностными атомами As и нижележащими Ga атомами из-за передачи заряда от Cs в полупроводник. Cs-индуцированное уменьшение энергии связи поверхностных атомов мышьяка приводит к следующим практическим результатам:

- обнаружен эффект Cs-индуцированной десорбции элементного мышьяка с поверхности GaAs(001), что может быть использовано для низкотемпературной очистки поверхности полупроводника и приготовления низкотемпературной Ga-стабилизированной поверхности GaAs с улучшенными электронными свойствами (низкая плотность поверхностных состояний, малое значение изгиба зон, отсутствие закрепления уровня Ферми);
  - установлено, что Cs может использоваться в качестве сурфактанта при низкотемпературном росте арсенида галлия.
4. Установлено, что адсорбция щелочных металлов на поверхность GaAs(001) при температуре ниже 200 К приводит к фазовому переходу диэлектрик-металл первого рода при  $\theta_{alk} \sim 0.5$  МС, при этом металлическая фаза является неупорядоченной и метастабильной. Прогрев поверхности приводит к разрушению металлической фазы и переходу металл-диэлектрик при температуре, когда становится возможным поверхностная диффузия адатомов и возникает переход беспорядок-порядок. Таким образом, наличие металлической фазы на поверхности GaAs(001) напрямую связано с разупорядочением в слое адсорбата. Спектры потерь энергии электронов в системе Cs/GaAs соответствуют возбуждению плазмонов, локализованных в двумерных островках цезия, и не зависят от ориентации и структуры поверхности. Появление интенсивных пиков потерь при покрытии поверхности цезием свыше 0.5 МС связано с динамическим фазовым переходом от двумерного газа атомов цезия к плотноупакованным двумерным островкам с металлическим спектром электронных возбуждений.
5. Обоснован и реализован эффект селективного воздействия электроотрицательных (йод) и электроположительных (цезий) адсорбатов на поверхность GaAs(001), который приводит к уменьшению энергии связи поверхностных атомов III и V групп и, тем самым, позволяет реализовать обратимые низкотемпературные сверхструктурные переходы между катион- и анион-стабилизированными поверхностями. Эффект

селективного уменьшения энергий связи объяснён адсорбат-индуцированным перераспределением электронной плотности в приповерхностной области. Обнаруженный эффект открывает возможность реализации низкотемпературного ( $T \leq 450^\circ\text{C}$ ) атомно-слоевого ("цифрового") травления полярных граней соединений  $A^3B^5$ .

6. Предложен и реализован метод измерения спина электронов по регистрации интенсивности катодолюминесценции от поглощенных спин-поляризованных электронов в структуре Pd/Fe/GaAs(001) с квантовыми ямами InGaAs вблизи гетерограницы. С использованием технологии приготовления структурно-упорядоченных поверхностей  $A^3B^5$ , изготовлены и изучены магнитные барьеры Шоттки на основе границы раздела Pd/Fe/GaAs(001) для детектирования среднего спина в пучке свободных электронов с эффективностью, сравнимой с детекторами Мотта.

Совокупность полученных результатов и разработанных положений можно характеризовать как новое существенное достижение в развитии важного направления физики и технологии поверхности полупроводников - формировании границ раздела на атомном уровне и изучении связей атомной структуры и электронных свойств поверхностей полупроводников  $A^3B^5$  для создания приборов полупроводниковой оптоэлектроники и спинтроники.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- [A1] Tereshchenko O.E. Composition and structure of HCl-isopropanol treated and vacuum annealed GaAs(100) surface / O.E. Tereshchenko, S.I. Chikichev, A.S. Terekhov. // J. Vac. Sci. Technol. A – 1999. – Vol. 17. – p. 2655-2662.
- [A2] Tereshchenko O.E. Local structure of chemically prepared well-ordered GaAs(100) surface/ O.E. Tereshchenko A.S. Terekhov, D. Paget, P. Chiaradia, J.E. Bonnet, R. Belkhou, A. Taleb-Ibrahimi // Surf. Sci. – 2002. – Vol. 507-510. – p. 411-416.
- [A3] Paget D. Origin of the broadening of surface optical transitions of As-rich and Ga-rich GaAs(001) / D. Paget, O.E. Tereshchenko, A.B. Gordeeva, V.L. Berkovits, G. Onida. // Surf. Sci. – 2003. – Vol. 529. – p. 204-214.
- [A4] Tereshchenko O.E. Preparation of clean reconstructed InAs(100) surfaces using HCl/isopropanol wet treatments / O.E. Tereshchenko, D. Paget, P. Chiaradia, J.E. Bonnet,

- F. Wiame, and A. Taleb-Ibrahimi // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. – Vol. 82. – p. 4280-4283.
- [A5] Paget D. Surface versus bulk origin of the optical anisotropy of As-rich (001)GaAs and (001)Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As / D. Paget, C. Hogan, V.L. Berkovits, and O.E. Tereshchenko // *Phys. Rev. B* – 2003. – Vol. 67. – p. 245313-245317.
- [A6] Tereshchenko O.E. Well-ordered (100) InAs surfaces using wet chemical treatments / O.E. Tereshchenko, E. Placidi, D. Paget, P. Chiaradia, and A. Balzarotti // *Surf. Sci.* – 2004. – Vol. 570. – p. 237-244.
- [A7] Hogan C. Optical anisotropy induced by cesium adsorption on the As-rich c(2×8) reconstruction of GaAs(001) / C. Hogan, D. Paget, O.E. Tereshchenko, L. Reining, and G. Onida // *Phys. Rev. B* – 2004. – Vol. 69. – p. 125332-125339.
- [A8] Tereshchenko O.E. Composition and structure of chemically prepared GaAs(111)A and (111)B surfaces / O.E. Tereshchenko, V.L. Alperovich, A.S. Terekhov Tereshchenko O.E. // *Surf. Sci.* – 2006. – Vol. 600. – p. 577-582.
- [A9] Berkovits V.L. Bulk-like behavior of the optical anisotropy of cation-rich (001) surfaces of Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As alloys / V.L. Berkovits, D. Paget, A.V. Subashiev, O.E. Tereshchenko // *Phys. Rev. B* – 2004. – Vol. 69. – p. 033305 - 033305-4.
- [A10] Tereshchenko O.E. Clean reconstructed InAs(111)A and B surfaces using chemical treatments and annealing / O. E. Tereshchenko, D. Paget, A. C. H. Rowe, V. L. Berkovits, P. Chiaradia, B. P. Doyle, S. Nannarone // *Surface Science* – 2009. – Vol. 603. – p. 518-522.
- [A11] Alperovich V.L. Surface passivation and morphology of GaAs(100) treated in HCl-isopropyl alcohol solution / V.L. Alperovich, O.E. Tereshchenko, N.S. Rudaya, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev, A.S. Terekhov // *Appl. Surf. Sci.* – 2004. – Vol. 235. – p. 249-259.
- [A12] Tereshchenko O.E. Preparation of As-rich (2x4) – III-As (001) surfaces by wet chemical treatment and vacuum annealing / O.E. Tereshchenko // *Phys. Stat. Sol. C* – 2010. – Vol. 1-4. – p. 264-267.
- [A13] Tereshchenko O.E. Preparation of clean reconstructed InP(001) using HCl/isopropanol wet treatments / O.E. Tereshchenko, D. Paget, P. Chiaradia, J.E. Bonnet, F. Wiame, A. Taleb-Ibrahimi // *Surf. Sci.* – 2006. – Vol. 600. – p. 3160–3166.
- [A14] Tereshchenko O.E. Structure and composition of chemically prepared and vacuum annealed InSb(001) surfaces / O.E. Tereshchenko // *Appl. Surf. Sci.* – 2006. – Vol. 252. – p. 7684-7690.
- [A15] Терещенко О.Е. Низкотемпературная методика очистки поверхности GaN(0001) для фотоэмиттеров с отрицательным электронным сродством / О.Е. Терещенко, Г.Э. Шайблер, А.С. Ярошевич, С.В. Шевелев, А.С. Терехов, В.В. Лундин, Е.Е. Заварин, А.И. Бесюлькин // *ФТТ* – 2004. – т. 46. – с. 1881-1885.

- [A16] Terekhov A.S. Variations of the Fermi level, Photovoltage, and Photoemission Threshold on GaAs(100) Surface under Annealing in Hydrogen / A.S. Terekhov, O.E. Tereshchenko, A.G. Paulish, H.E. Scheibler, V.L. Alperovich // *Phys. Low-Dim. Struct.* – 1995. – Vol. 12. – p. 33-42.
- [A17] Toropetsky K.V. New reconstruction-stoichiometry correlation for GaAs(001) surface treated by atomic hydrogen / K.V. Toropetsky, O.E. Tereshchenko, D.A. Petukhov, A.S. Terekhov // *Appl. Surf. Sci.* – 2008. – Vol. 254. – p. 8041-8045.
- [A18] Терещенко О.Е. Новые Ga-обогащенные реконструкции на поверхности GaAs(001) / О.Е. Терещенко, К.В. Торопецкий, С.В. Еремеев, С.Е. Кулькова // *Письма в ЖЭТФ* – 2009. – т. 89 – с. 209-214.
- [A19] Tereshchenko O.E. Backward reconstructions on GaAs(001) surfaces induced by atomic hydrogen reactions: surfactant assisted low-temperature surface ordering / O.E. Tereshchenko, A.V. Bakulin, S.E. Kulkova S.V. Eremeev // *The Journal of Physical Chemistry C.* – 2013. – Vol. 117. – p. 9723-9733.
- [A19] Терещенко О.Е. Поверхность Cs/GaAs(100): двумерный металл или хаббардовский диэлектрик? / О.Е. Терещенко, А.Н. Литвинов, В.Л. Альперович, А.С. Терехов // *Письма в ЖЭТФ* – 1999. – т.70. – с.537-542.
- [A20] Alperovich V.L. Evolution of interface excitations under phase transition in two-dimensional layer of Cs on GaAs(100) and (111) / V.L. Alperovich, O.E. Tereshchenko, A.N. Litvinov, and A.S. Terekhov // *Appl. Surf. Sci.* – 2001. – Vol. 175-176. – p. 175-180.
- [A21] Tereshchenko O.E. Metallicity and disorder at the alkali-metal/GaAs(001) interface / O.E. Tereshchenko, D.V. Daineka, D.Paget. // *Phys. Rev. B.* – 2001. – Vol. 64. – p. 085310-085310-11.
- [A22] Daineka D.V. Modulated photovoltage changes at the nonmetal-metal transition of the Na/GaAs(001) and K/GaAs(001) interfaces / D.V. Daineka, O.E. Tereshchenko, D. Paget., *Surf. Sci.* – 2001. –Vol. 488. – p. 193-206.
- [A23] Tereshchenko O.E. Structural and electronic transformation at Cs/GaAs(100) interface / O.E. Tereshchenko, V.S. Voronin, H.E. Scheibler, V.L. Alperovich, and A.S. Terekhov // *Surf. Sci.* –2002. – Vol. 507-510. – p. 51-56.
- [A24] Hogan C. A RAS study of the adsorption of electronegative and electropositive elements on GaAs(001) / C. Hogan, D. Paget, O.E. Tereshchenko, and R. Del Sole // *Phys. Stat. Sol. C.* – 2003. – p. 1-6.
- [A25] Chiaradia P. Insulator - metal phase transitions of alkali atoms on GaAs (001) / P. Chiaradia, D. Paget, O.E. Tereshchenko, J.E. Bonnet, A. Taleb-Ibrahimi, R. Belkhou, F.Wiame // *Surf. Sci.* – 2006. – Vol. 600. – p. 287-297.
- [A26] Tereshchenko O.E. Cs-induced charge transfer on (2x4)-GaAs(001) studied by

- photoemission / O. E. Tereshchenko, D. Paget, P. Chiaradia, F. Wiame, R. Belkhou, and A. Taleb-Ibrahimi // *Phys. Rev. B.* – 2010. – Vol. 81. – p. 035304-035304-5.
- [A27] Tereshchenko O.E. Снижение энергии связи атомов мышьяка на поверхности GaAs(100)-(2x4)/c(2x8) под влиянием адсорбированного цезия / О.Е. Терещенко, В.Л. Альперович, А.С. Терехов // *Письма в ЖЭТФ* – 2004. – т.79. – с. 163-167.
- [A28] Tereshchenko O.E. Cesium-induced surface conversion: from As-rich to Ga-rich GaAs(001) at reduced temperatures / O.E. Tereshchenko, D. Paget, V.L. Alperovich, A.G. Zhuravlev, A.S. Terekhov // *Phys. Rev. B.* – 2005. – Vol. 71. – p. 155315-155315-7.
- [A29] Терещенко О.Е. Сурфактантные свойства цезия в молекулярно-лучевой эпитаксии GaAs(001) / О.Е. Терещенко, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, С.В. Еремеев, С.Е. Кулькова // *Письма в ЖЭТФ* – 2011. – т. 93. – p. 647-652.
- [A30] Терещенко О.Е. Обратимые сверхструктурные переходы на поверхности GaAs(001) при селективном воздействии йода и цезия / О.Е. Терещенко, К.В. Торопецкий, В.Л. Альперович // *Письма в ЖЭТФ* – 2008. – т.87. – p. 41-44.
- [A31] Терещенко О.Е. Реконструкционная зависимость травления и пассивации поверхности GaAs(001) / О.Е. Терещенко, С.В. Еремеев, А.В. Бакулин, С.Е. Кулькова // *Письма в ЖЭТФ* – 2010. – т.91. – с. 383-388.
- [A32] Бакулин А.В. Адсорбция хлора на поверхности  $\zeta$ - InAs(001)-(4x2) / А.В. Бакулин, О.Е. Терещенко, С.В. Еремеев, С.Е. Кулькова // *ФТП* – 2011. – т. 45. – с. 23-31.
- [A33] Tereshchenko O.E. Etching or stabilization of GaAs(001) under alkali and halogen adsorption / O.E. Tereshchenko, D. Paget, K.V. Toropetsky, V.L. Alperovich, S.V. Eremeev, A.V. Bakulin, S.E. Kulkova, B.P. Doyle, and S. Nannarone // *The Journal of Physical Chemistry C.* – 2012. – Vol. 116. – p. 8535–8540.
- [A34] Tereshchenko O.E. Magnetic and transport properties of Fe/GaAs Schottky junctions for spin polarimetry applications // O.E. Tereshchenko, D. Lamine, G. Lampel, Y. Lassailly, X. Li, D. Paget, J. Peretti // *J. of Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 109. – p. 113708 - 113708-7.
- [A35] Berkovits V.L. GaAs(111)A and B in hydrazine sulfide solutions: extreme polarity dependence of surface adsorption processes / V.L. Berkovits, V.P. Ulin, O.E. Tereshchenko, D. Paget, A.C. H. Rowe, P. Chiaradia, B.P. Doyle and S. Nannarone // *Phys. Rev. B.* – 2009. – Vol. 80. – p. 233303 - 233303-4.
- [A36] Терещенко О.Е. Оптическая регистрация спина электрона в структурах Pd/Fe/GaAs/InGaAs / О.Е. Терещенко, А.Г. Паулиш, Т.С. Шамирзаев, М.Н. Неклюдова, А.М. Гишинский, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, X. Li, G. Lampel, Y. Lassailly, D. Paget, J. Peretti // *Труды XV международного симпозиума “Нано физика и нанoeлектроника”* – 2011. 14 – 18 марта. Нижний Новгород. – с.363-364.
- [A37] Терещенко О.Е. Формирование границы раздела структуры Pd/Fe/GaAs/InGaAs для

оптической регистрации спина свободных электронов / О.Е. Терещенко, А.Г. Паулиш, М.А. Неклюдова, Т.С. Шамирзаев, А.С. Ярошевич, И.П. Просвирин, И.Э. Жаксылыкова, Д.В. Дмитриев, А.И. Торопов, С.Н. Варнаков, М.В. Рауцкий, Н.В. Волков, С.Г. Овчинников, А.В. Латышев // Письма в ЖТФ – 2012. – т. 38. – с. 27-36.

### Цитированная литература.

- [1] Галицын Ю.Г. Сверхструктурные перестройки на гранях (111)А и (001) InAs/ Ю.Г. Галицын, В.Г. Мансуров, В.И. Пошевнев // Поверхность – 1992. – № 7. – с. 59-67.
- [2] Tereshchenko O.E. Atomic structure and electronic properties of HCl-isopropanol treated and vacuum annealed GaAs(100) surface / O.E.Tereshchenko, S.I. Chikichev, A.S.Terekhov // Appl. Surf. Sci. – 1999. – Vol. 142. – p. 75-80.
- [3] Nannarone S. Hydrogen chemisorption on III–V semiconductor surfaces / S. Nannarone, M. Pedio // Surface Science Reports – 2003. – Vol. 51. p. 1-149.
- [4] Ohtake A. Surface reconstructions on GaAs(001) / A. Ohtake // Surface Science Reports – 2008. – Vol. 63. – p. 295-327.
- [5] Wang W.K. Passivation versus etching: Adsorption of I<sub>2</sub> on InAs(001) / W.K. Wang, W.C. Simpson, J.A. Yarmoff // Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 81. – p. 1465-1468.
- [6] Веденеев А.А. Атомная структура поверхности GaAs(001)-c(8x2) и места адсорбции атомов йода при малой степени покрытия / А. А. Веденеев, К. Н. Ельцов // Письма в ЖЭТФ – 2005. – том 82. – с. 46–51.
- [7] Arthur J. R. Molecular beam epitaxy / J. R. Arthur // Surface Science – 2002. – Vol. 500. – p. 189-217.
- [8] Bakin V.V. Semiconductor surfaces with negative electron affinity / V.V. Bakin, A.A. Pakhnevich, A.G. Zhuravlev, A.N. Shornikov, I.O. Akhundov, O.E. Tereshchenko, V.L. Alperovich, H.E. Scheibler and A.S. Terekhov.//. e-J. Surf. Sci. Nanotech. – 2007. – Vol. 5. – p. 80-88.
- [9] Omori T. Large enhancement of polarization observed by extracted electrons from the AlGaAs-GaAs superlattice / T. Omori, Y. Kurihara, T. Nakanishi, H. Aoyagi, T. Baba, T. Furuya, K. Itoga, M. Mizuta, S. Nakamura, Y. Takeuchi, M. Tsubata, and M. Yoshioka // Phys. Rev. Lett. – 1991. – Vol. 67. – p.3294-3297.
- [10] Miyamoto K. Topological Surface States with Persistent High Spin Polarization across the Dirac Point in Bi<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Se and Bi<sub>2</sub>Se<sub>2</sub>Te / K. Miyamoto, A. Kimura, T. Okuda, H. Miyahara, K. Kuroda, H. Namatame, M. Taniguchi, S.V. Eremeev, T.V. Menshchikova, E.V. Chulkov, K.A. Kokh, and O.E. Tereshchenko // Phys. Rev. Lett. – 2012. – Vol. 109. – p. 166802-5.
- [11] Filipe A. Spin-Dependent Transmission of Electrons through the Ferromagnetic Metal Base of a Hot-Electron Transistorlike System / A. Filipe, H.-J. Drouhin, G. Lampel, Y. Lassailly, J. Nagle, J. Peretti, V. I. Safarov, and A. Schuhl // Phys. Rev. Lett. – 1998. – Vol. 80. – p. 2425-2428.