

На правах рукописи

Ахундов Игорь Олегович



ФОРМИРОВАНИЕ ТЕРРАСИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В РАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ

Специальность 01.04.10 –
«Физика полупроводников»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата 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 руководитель:

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

Официальные оппоненты:

Шкляев Александр Андреевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, ведущий научный сотрудник;

Драгунов Валерий Павлович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Защита состоится «18» июня 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, пр-т академика Лаврентьева, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан «16» мая 2013 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Артур Григорьевич Погосов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Атомно-гладкие поверхности полупроводников $A^{III}B^V$ необходимы как для научных исследований в области физики поверхности, так и для практических применений. Только на атомно-гладкой поверхности можно воспроизводимо создавать наноразмерные структуры благодаря явлениям самоорганизации при росте кристаллов или с помощью современных атомных зондовых методов. Такие наноструктуры в настоящее время являются объектом интенсивных научных исследований, а в будущем могут стать основой приборов нанoeлектроники и нанофотоники. Прикладное значение атомно-гладких поверхностей полупроводников $A^{III}B^V$ обусловлено также возможностью их использования для совершенствования оптоэлектронных приборов. Атомно-гладкие поверхности применяются в качестве подложек для выращивания эпитаксиальных структур, используемых в дальнейшем для создания различных приборов оптоэлектроники, в том числе полупроводниковых фотокатодов с эффективным отрицательным сродством.

Стандартным методом получения гладких поверхностей является метод химико-механического полирования (ХМП). Методом ХМП можно получить поверхности с очень малой величиной среднеквадратичной шероховатости R_q , сравнимой с межатомным расстоянием. Однако механическое воздействие при полировании приводит к формированию разупорядоченного поверхностного слоя с нарушенной координацией поверхностных атомов и, как следствие, с большой концентрацией структурных дефектов и оборванных связей. Таким образом, несмотря на малую величину R_q , поверхность, приготовленная методом ХМП, является разупорядоченной на атомном уровне. Диффузия атомов при повышенных температурах позволяет "залечить" дефекты нарушенного поверхностного слоя и получить поверхности, состоящие из регулярных атомно-гладких террас, разделённых прямолинейными ступенями моноатомной высоты. Ширина террас на такой поверхности определяется углом отклонения от сингулярной грани. Атомарно-чистые поверхности кремния с близкой к идеальной "террасированной" морфологией могут быть получены отжигом в вакууме [1,2]. Применение этого метода к полупроводниковым соединениям $A^{III}B^V$ затруднено [3], поскольку, из-за высокой и различной летучести элементов III и V групп, для выглаживания в вакууме трудно подобрать диапазон температур, в котором поверхностная диффузия уже достаточно эффективна, а сублимация всё

ещё незначительна. Считается, что получить атомно-гладкие поверхности полупроводников можно с помощью эпитаксиальных методов. Однако эпитаксиальный рост проводится, как правило, в неравновесных условиях, поэтому поверхности эпитаксиальных слоёв далеко не всегда оказываются атомно-гладкими вследствие кинетических нестабильностей.

Для того, чтобы избежать ухудшения рельефа вследствие кинетических нестабильностей, термическое "выглаживание" поверхности кристаллов следует проводить в условиях, близких к термодинамически равновесным, когда нет ни роста, ни сублимации [4]. В работе [5] показано, что отжиг эпитаксиальных плёнок GaAs(001) *in situ*, в установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в условиях достаточно больших давлений паров As₄ и относительно низких температур приводит к формированию атомно-гладких террас, разделённых моноатомными ступенями, в то время как уменьшение давления As₄ и повышение температуры ведёт к огрублению рельефа поверхности. Отжиг в ростовых камерах установок эпитаксии из металлоорганических соединений может также приводить к формированию террасированной поверхности GaAs [6].

Существенным недостатком методов выглаживания в ростовых камерах сверхвысоковакуумных установок является их трудоёмкость и дороговизна. В работе [7] был предложен более эффективный и экономичный метод термического выглаживания поверхности GaAs в условиях, близких к равновесным, с помощью отжигов в кварцевом реакторе установки жидкофазной эпитаксии в потоке молекулярного водорода. Равновесие поверхности с парами галлия и мышьяка достигалось в узком зазоре («капилляре») между двумя подложками GaAs. Хотя возможность получения террасированной поверхности GaAs(001) этим методом была показана экспериментально [7], многие вопросы, касающиеся термического выглаживания GaAs, оставались открытыми. Не был выяснен вопрос о степени близости условий выглаживания к равновесным. Отклонение условий от равновесных в сторону роста или сублимации может привести к кинетическим нестабильностям, которые затрудняют получение упорядоченной террасированной поверхности. Недостаточно развиты адекватные методы описания эволюции рельефа в процессе формирования террасированной поверхности. Развитие таких методов откроет возможности для сопоставления результатов с теорией, установления микроскопических механизмов выглаживания и определения соответствующих параметров. Для приборных применений актуальна задача поиска сурфактантов, которые позволили бы снизить темпе-

ратуру выглаживания за счет увеличения эффективности поверхностной диффузии компонент полупроводника. Представляет интерес вопрос о влиянии стехиометрии и кристаллографической ориентации поверхности GaAs на процесс выглаживания. Известно, что при высоких температурах выглаживание сменяется разупорядочением ("огрублением") рельефа поверхности, однако вопросы об условиях и механизмах высокотемпературного "огрубляющего перехода" ("roughening transition") на поверхности кристаллов изучены недостаточно. Помимо научного интереса, эти вопросы имеют важное практическое значения для оптимизации методов термического выглаживания, поскольку для ускорения поверхностной диффузии и, следовательно, повышения эффективности выглаживания температура отжига должна быть по возможности высокой, однако заведомо ниже температуры огрубляющего перехода. Наконец, ранее не был выяснен вопрос о возможности термического выглаживания поверхности "полупрозрачных" GaAs/AlGaAs фотокатодных структур, приваренных на стеклянные подложки и о возможном влиянии дислокаций, возникающих при релаксации термомеханических напряжений в таких структурах, на морфологию поверхности GaAs.

Цель данной работы заключалась в развитии метода получения атомно-гладких поверхностей арсенида галлия путём отжига в равновесных условиях и выяснении механизмов выглаживания и разупорядочения поверхности. Для достижения поставленной цели в данной работе решались следующие **задачи**:

1. Экспериментально определить степень близости условий выглаживания поверхности GaAs к равновесным.
2. Разработать методы описания формирования террасированной поверхности кристалла при термическом выглаживании.
3. Изучить влияние потенциального сурфактанта – сурьмы, на выглаживание поверхности GaAs.
4. Изучить особенности выглаживания GaAs подложек с различными кристаллографическими ориентациями, в частности, (111)А и (111)В.
5. Выяснить роль термодинамических и кинетических факторов в разупорядочении поверхности GaAs(001) при высоких температурах и определить механизмы разупорядочения.
6. Изучить влияние дислокаций, возникающих при релаксации термомеханических напряжений в GaAs/AlGaAs фотокатодных структурах, приваренных на стекло, на морфологию поверхности GaAs.

Научная новизна работы

1. Экспериментально показано, что условия выглаживания поверхности GaAs(001) в присутствии раствора-расплава Ga-As близки к равновесным. При температурах $T \leq 650^\circ\text{C}$ скорость роста (или сублимации) не превышает 3×10^{-5} монослоя в секунду.

2. Изучена кинетика формирования террасированной поверхности GaAs(001); установлено, что зависимости среднеквадратичной шероховатости, корреляционной длины, ширины гало Фурье образа и избыточной длины ступеней от длительности отжига могут быть описаны степенными функциями. Избыточная длина ступеней оказалась наилучшим параметром для описания процесса выглаживания, поскольку наиболее сильно (обратно пропорционально) зависит от длительности отжига.

3. Обнаружено, что на Ga-терминированной поверхности GaAs(111)A формирование системы террас происходит при температуре на $\sim 100^\circ\text{C}$ ниже, чем на As-терминированной поверхности GaAs(111)B.

4. Установлено, что разупорядочение поверхности GaAs(001) при высоких температурах связано с кинетической нестабильностью при отклонении условий отжига от равновесных. Предложен механизм разупорядочения, основанный на ступенчато-слоевой сублимации (росте) и образовании устойчивых островков (озёр) многоатомной высоты (глубины).

5. На поверхности полупроводника впервые наблюдались прямолинейные моноатомные ступени, обусловленные введением дислокаций при релаксации термомеханических напряжений в полупроводниковой структуре.

Научная и практическая ценность работы состоит в следующем:

1. На примере термического выглаживания epi-ready подложек GaAs(001) показана эффективность использования длины моноатомных ступеней, а также Фурье и автокорреляционного анализа, для описания кинетики формирования террасированной поверхности кристалла.

2. Показано, что окисление гладких террасированных поверхностей GaAs на воздухе и химическое удаление оксидов в растворе HCl в изопропиловом спирте не влияют на форму моноатомных ступеней, но увеличивают шероховатость террас.

3. Показана возможность изучения процесса релаксации механических напряжений в приваренных на стекло фотокатодных гетероструктурах GaAs/AlGaAs по дислокационным ступеням на поверхности.

Личный вклад соискателя в диссертационную работу. Соискатель внёс важный вклад в развитие методики выглаживания поверхности GaAs в равновесии с парами галлия и мышьяка, лично выполнил большую часть экспериментов по выглаживанию, провёл обработку экспериментальных данных и внёс существенный вклад в их интерпретацию. Обсуждение результатов и написание статей проводились совместно с соавторами опубликованных работ.

Апробация работы. Полученные результаты работы были представлены на международных симпозиумах "Наноструктуры: физика и технология" (Новосибирск, 2007, Санкт-Петербург, 2010, Нижний Новгород, 2012), XV симпозиуме "Нанофизика и нанoeлектроника" (Нижний Новгород, 2011), X Российской конференции по физике полупроводников (Нижний Новгород, 2011), Российской конференции «Фотоника-2011» (Новосибирск, 2011), Международной конференции «Surfint-SRENT III» (Флоренция, 2012), научных семинарах ИФП СО РАН. По результатам диссертации опубликовано 10 работ [A1–A10]. Из работы [A2] в диссертацию вошли результаты по приготовлению атомно-гладких поверхностей GaAs в равновесных условиях.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Условия термического выглаживания GaAs(001) в присутствии раствора-расплава Ga-As близки к равновесным при температурах $T \leq 650^\circ\text{C}$. Террасированные поверхности GaAs формируются при отжигах в равновесных условиях в диапазонах температур 520–650°C и времен отжига от 10 минут до 10 часов.

2. Длина атомных ступеней является более эффективной характеристикой, описывающей формирование террасированной поверхности кристалла, по сравнению со среднеквадратичной шероховатостью.

3. Разупорядочение (огрубление) рельефа поверхности GaAs при высоких температурах обусловлено кинетическими нестабильностями при отклонении условий отжига от равновесных в сторону роста или сублимации.

4. На поверхности GaAs/AlGaAs гетероструктур, приваренных на стекло, в процессе отжига в равновесных условиях формируется ортогональная сетка прямолинейных моноатомных ступеней, обусловленных введением дислокаций при релаксации термомеханических напряжений.

Объём и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 122 страницы и включает 40 рисунков и список литературы из 93 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и выносимые на защиту положения; даётся краткий обзор диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературы. В п.1.1 даны определения атомно-гладких и шероховатых поверхностей и приводятся известные методы описания рельефа поверхности. В п.1.2 описаны термодинамические и кинетические факторы, определяющие морфологию поверхности. Обсуждается термодинамическая возможность достижения равновесия в двухкомпонентной трехфазной системе Ga-As в широком температурном диапазоне $T = 30^{\circ}\text{C} - 1240^{\circ}\text{C}$. Эта возможность является предпосылкой использования методики выглаживания поверхности арсенида галлия в присутствии раствора Ga-As. В п.1.3 рассмотрена кинетика выглаживания поверхности кристаллов. В п.1.4 описаны экспериментальные методы приготовления гладких поверхностей полупроводников, в том числе, полупроводников $A^{III}B^V$: химико-механическое полирование, отжиг в вакууме, эпитаксиальный рост, отжиг в условиях равновесия с парами компонент полупроводника. В п.1.5 дан обзор экспериментальных данных по использованию сурфактантов, включая сурьму, при росте GaAs.

В п.1.6 дан обзор теоретических и экспериментальных работ по проблеме разупорядочивающего перехода на поверхности кристаллов при высоких температурах. Рассмотрен термодинамический разупорядочивающий переход, при котором, благодаря энтропийному вкладу в свободную энергию, становится выгодной спонтанная генерация ступеней [8]. Вопрос о достоверности экспериментальных наблюдений термодинамического огрубляющего перехода всё ещё остаётся открытым, поскольку наблюдавшееся ранее огрубление поверхности могло быть обусловлено кинетическими нестабильностями, возникающими вследствие отклонения условий от равновесия. В п.1.7 дан обзор литературы по влиянию дислокаций, возникающих при пластической релаксации механических напряжений, на морфологию поверхности полупроводниковых плёнок. В заключение первой главы, в п.1.8 сформулированы задачи исследования.

Вторая глава посвящена методике эксперимента. Образцы вырезались из «epi-ready» GaAs подложек, приготовленных методом ХМП. Отжиги проводились в кварцевом реакторе установки жидкофазной эпитаксии в потоке молекулярного водорода в диапазоне температур 400–800°C. Непосредственно перед отжигом с поверхности образцов удалялись оксиды путём обработки в растворе HCl в изопропиловом спирте. Равновесие между подложкой и парами галлия и мышьяка достигалось двумя методами. В первом методе равновесие достигалось в узком зазоре ("капилляре") между двумя GaAs подложками. Во втором методе равновесие обеспечивалось присутствием насыщенного раствора-расплава мышьяка в галлии Ga-As, который помещался в графитовую кассету вместе с образцом GaAs, предназначенным для выглаживания. Рельеф поверхностей измерялся *ex situ* методом атомно-силовой микроскопии [9].

В пп.2.4 и 2.5 приводятся результаты опытов по влиянию окисления поверхности на воздухе и химического удаления оксидов на морфологию террасированной поверхности, а также по определению степени близости условий выглаживания к равновесию. В качестве метки, позволявшей находить одно и то же место на по-

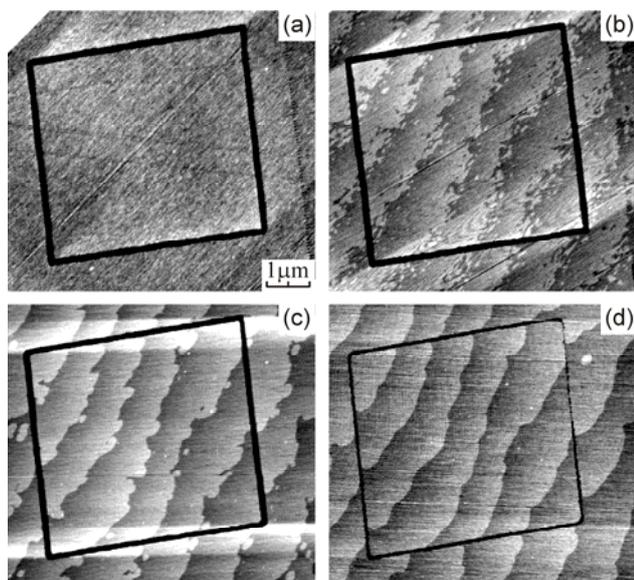


Рис.1. Рельеф поверхности GaAs(001) с канавкой до (а) и после (b,c,d) последовательных отжигов при $T=625^{\circ}\text{C}$ в течение 10 мин (b), 40 мин (c) и 100 (d) минут.

верхности образца после химической обработки и отжигов, использовалась канавка глубиной ~ 10 нм и шириной ~ 100 нм, изготовленная в виде квадрата размером 5×5 мкм² путём анодного окисления поверхности GaAs, индуцированного иглой атомно-силового микроскопа [10], и последующего химического удаления оксида [11] (рис.1). Показано, что цикл окисления и удаления оксидов сохраняет форму и положение ступеней с экспериментальной точностью (около 30 нм в направлении вдоль поверхности), но увеличивает среднеквадратичную шероховатость террас с 0.05 нм до 0.1 нм.

Отклонение условий отжига от равновесия в сторону роста или сублимации можно определить по движению ступеней в направлении нижних или верхних тер-

рас, соответственно. Анализ АСМ изображений, полученных в результате последовательных отжигов образца GaAs(001) с меткой при температуре $T=625^{\circ}\text{C}$ (рис.1b,c,d) не выявил значимого сдвига среднего положения ступеней. Следовательно, условия отжига поверхности близки к равновесным; скорость роста (или сублимации) не превышает 3×10^{-5} МС/сек.

Третья глава посвящена экспериментальному изучению выглаживания поверхности GaAs и развитию способов описания формирования террасированных поверхностей. В п.3.1 изложены результаты экспериментов по изохронным отжигам поверхности GaAs(001) в равновесных условиях. На рис.2(a-c) представлены АСМ изображения исходной поверхности GaAs(001) и после двухчасовых отжигов при

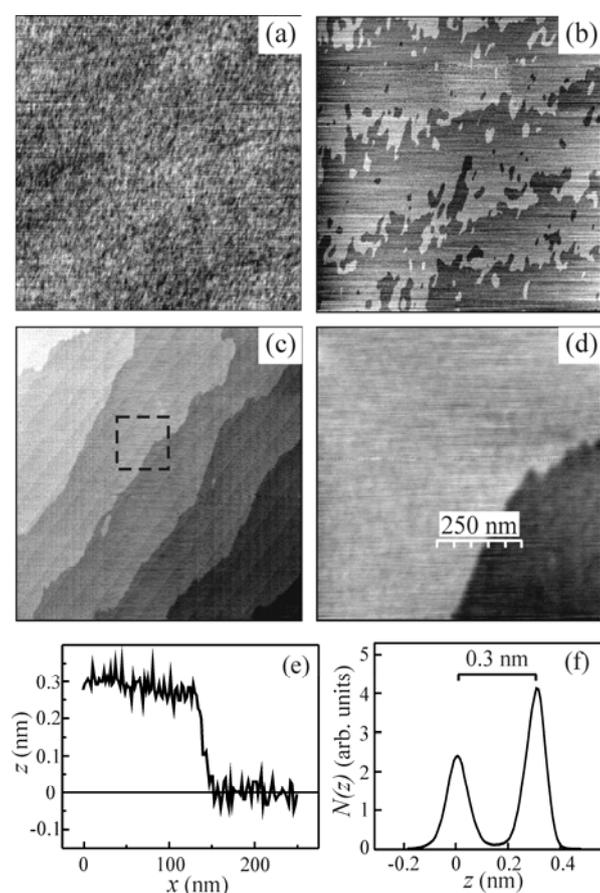


Рис.2. АСМ изображения 5×5 мкм² исходной поверхности GaAs(001) (a) и после двух часовых отжигов при $T=575^{\circ}\text{C}$ (b) и 650°C (c). (d) – участок 900×900 нм², обозначенный штриховой линией на (c). (e) – профиль сечения моноатомной ступени, обозначенный на (d). (f) – распределение рельефа по высоте посчитанный по (d).

различных температурах. На исходной поверхности epi-ready подложки (рис. 2a) не видно ни террас, ни атомных ступеней. Начиная с температуры 520°C , на поверхности формируются террасы, ограниченные изрезанными ступенями. При этом на террасах наблюдается значительная концентрация двумерных островков и "озёр" моноатомной высоты и глубины, соответственно. Увеличение температуры отжига ведёт к сглаживанию формы ступеней, увеличению среднего латерального размера островков и озёр и уменьшению их концентрации (рис.2b). Дальнейшее увеличение температуры до 650°C приводит к выпрямлению ступеней и уменьшению концентрации островков (рис.2c). На рис.2d представлен увеличенный участок 900×900 нм² выглаженной поверхности с одной ступенью разделяющей две плоские террасы. Рис.2e,f показывают профиль сечения ступени и распределение высоты рельефа, посчитанное по изображению 2d. Видно, что высота ступени равна 0.3 нм, что соответ-

вует толщине монослоя GaAs. Таким образом, морфология поверхности приближается к идеальной вицинальной с регулярной системой атомно-гладких террас шириной ~ 1 мкм, разделённых прямолинейными эквидистантными ступенями монокристаллической высоты. Ширина террас соответствует углу разориентации подложки $\sim 0.02^\circ$. Микроскопические механизмы формирования террасированной поверхности обусловлены диффузией поверхностных атомов и состоят в рекомбинации адатомов и адвакансий, островков и озёр, а также в уменьшении концентрации изломов ступеней и, соответственно, в выпрямлении ступеней.

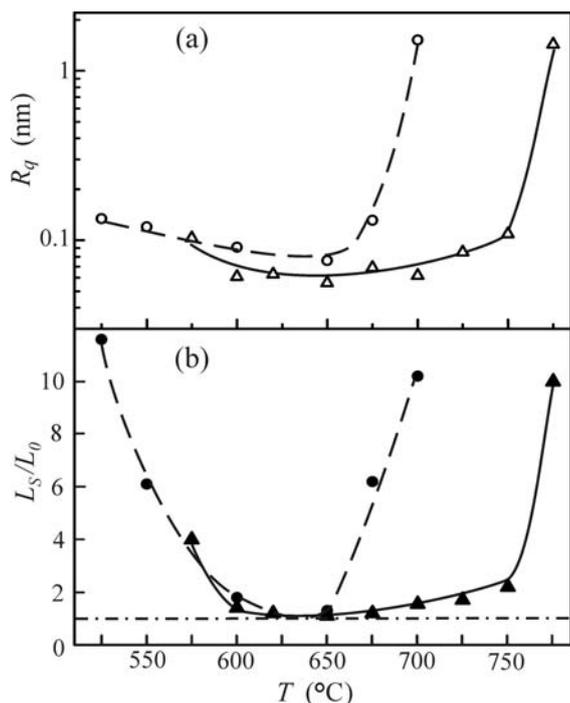


Рис.3 Зависимости среднеквадратичной шероховатости R_q (a) и нормированной длины ступеней L_s/L_0 (b) поверхностей подложек GaAs(001) от температуры отжига в капилляре (кружки, штриховая линия) и в присутствии раствора-расплава Ga-As (треугольники, сплошная линия).

На рис.3 представлены зависимости среднеквадратичной шероховатости на террасах R_q и полной длины монокристаллических ступеней L_s , нормированной на длину ступеней на идеальной вицинальной поверхности L_0 , от температуры отжига GaAs(001) в капилляре и в присутствии раствора-расплава Ga-As. При температурах $T < 650^\circ\text{C}$ R_q слабо зависит от температуры, в то время как длина ступеней уменьшается в несколько раз до значений, близких к предельному $L_s/L_0=1$, которое соответствует идеальной вицинальной поверхности и обозначено штрихпунктирной линией на рис.3б.

В п.3.2 экспериментально изучена кинетика выглаживания поверхности GaAs(001). Наряду со среднеквадратичной шероховатостью и длиной ступеней, для количественного описания кинетики формирования

террасированных поверхностей использовался Фурье и автокорреляционный анализ АСМ изображений. При увеличении длительности отжига, в процессе формирования террасированной поверхности (рис.1), происходит сужение спектра пространственных частот, которое проявляется как уменьшение ширины гало в Фурье-образе, и увеличение корреляционной длины. Установлено, что зависимости среднеквадратичной шероховатости, корреляционной длины, ширины гало Фурье образа и избыточной длины ступеней $\Delta l_s = L_s/L_0 - 1$ над значением, характерным для

идеальной вицинальной поверхности, от длительности отжига могут быть описаны степенными функциями. Избыточная длина ступеней оказалась наиболее адекватным параметром для описания процесса выглаживания, поскольку наиболее сильно (обратно пропорционально) зависит от длительности отжига.

Для выяснения возможностей снижения температуры выглаживания, в п.3.3 изучено влияние сурьмы, как потенциального сурфактанта, на выглаживание поверхности GaAs(001). Установлено, что увеличение концентрации сурьмы на поверхности GaAs(001) приводит к ухудшению рельефа поверхности, то есть не способствует, а препятствует выглаживанию. Причина состоит, по-видимому, в формировании на поверхности GaAs(001):Sb устойчивой Sb-стабилизированной реконструкции (2×4) в диапазоне температур 460–560°C [12].

С целью выяснения вопроса о возможности выглаживания поверхностей GaAs с различной кристаллографической ориентацией, проведены опыты по выглаживанию поверхностей GaAs(111)A и GaAs(111)B (п.3.4). Поскольку эти поверхности являются "предельно полярными", то есть оканчиваются атомами галлия и мышьяка, соответственно, эти опыты позволяют ответить на вопрос о влиянии стехиометрии поверхности на процесс выглаживания. Установлено, что выглаживание поверхности GaAs(111)A, оканчивающейся преимущественно атомами галлия, начинается при температурах на ~100°C ниже, чем для мышьяк-терминированной поверхности GaAs(111)B. Это различие свидетельствует о том, что обогащение поверхности галлием способствует термическому выглаживанию поверхности GaAs.

В четвёртой главе изложены результаты по разупорядочению (огрублению) поверхности GaAs(001) при высоких температурах. Основной вопрос состоит в том, чем обусловлено разупорядочение: термодинамическими причинами или кинетическими факторами, связанными с отклонением условий отжига от равновесия. Из рис.3 видно, что при отжиге в капилляре разупорядочение обусловлено отклонением условий от равновесия, поскольку наступает при более низких температурах по сравнению с отжигом в присутствии расплава Ga-As, видимо, из-за потоков Ga и As через зазор по периметру образцов.

Для того чтобы выяснить причину разупорядочения в присутствии раствора Ga-As, проведён отжиг при $T=775^\circ\text{C}$ двух одинаковых террасированных образцов, один из которых дополнительно накрывался подложкой GaAs (п.4.1). Результаты показаны на рис.4. Видно, что после отжига морфология образцов качественно раз-

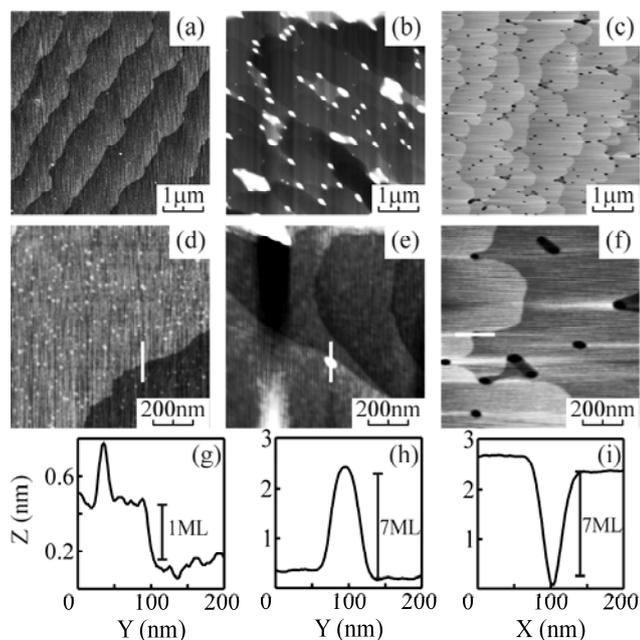


Рис. 4 АСМ изображения исходной (a,d), и отожженных в присутствии раствора Ga-As открытой (b,e) и накрытой по капиллярному методу (c,f) поверхностей GaAs(001). (g-h) – профили сечений рельефов, обозначенных на соответствующих изображениях (d-f).

приводящие к формированию островков и озёр многоатомной высоты и глубины, соответственно.

Пятая глава посвящена изучению возможности атомного выглаживания поверхности "полупрозрачных" фотокатодных GaAs/AlGaAs гетероструктур, приваренных методом диффузионной сварки на стеклянную подложку. Особенностью фотокатодов на стекле являются термомеханические напряжения, возникающие во время диффузионной сварки и при последующих прогревах фотокатодного узла. При достаточно высоких температурах термоочистки в вакууме эти напряжения могут вызывать введение дислокаций в гетероструктуру. Дислокации, в свою очередь, приводят к увеличению темпа безизлучательной рекомбинации фотоэлектронов, падению квантового выхода фотоэмиссии, образованию "дефектов темных линий" и ухудшению морфологии поверхности. В данной главе экспериментально изучено влияние генерации дислокаций в напряженных фотокатодных структурах на морфологию поверхности GaAs фотокатодов на стекле.

На рис.5 показаны АСМ изображения поверхности GaAs(001) структур GaAs/AlGaAs, приваренных на стекло, измеренные до и после отжига при различ-

ная: на открытом образце образовались островки, а на закрытом – озёра высотой и глубиной в несколько монослоёв. Можно заключить, что в наших экспериментальных условиях разупорядочение обусловлено кинетическими факторами, поскольку в случае термодинамического разупорядочивающего перехода морфология поверхности должна быть универсальной. Качественное различие морфологии поверхностей двух образцов можно объяснить отклонением условий отжига в сторону сублимации и роста. В п.4.2 изучены особенности разупорядочения поверхностей с разными средними ширинами террас. В п.4.3 рассмотрены возможные механизмы разупорядочения поверхности, состоящие в ступенчато-слоевой сублимации или росте,

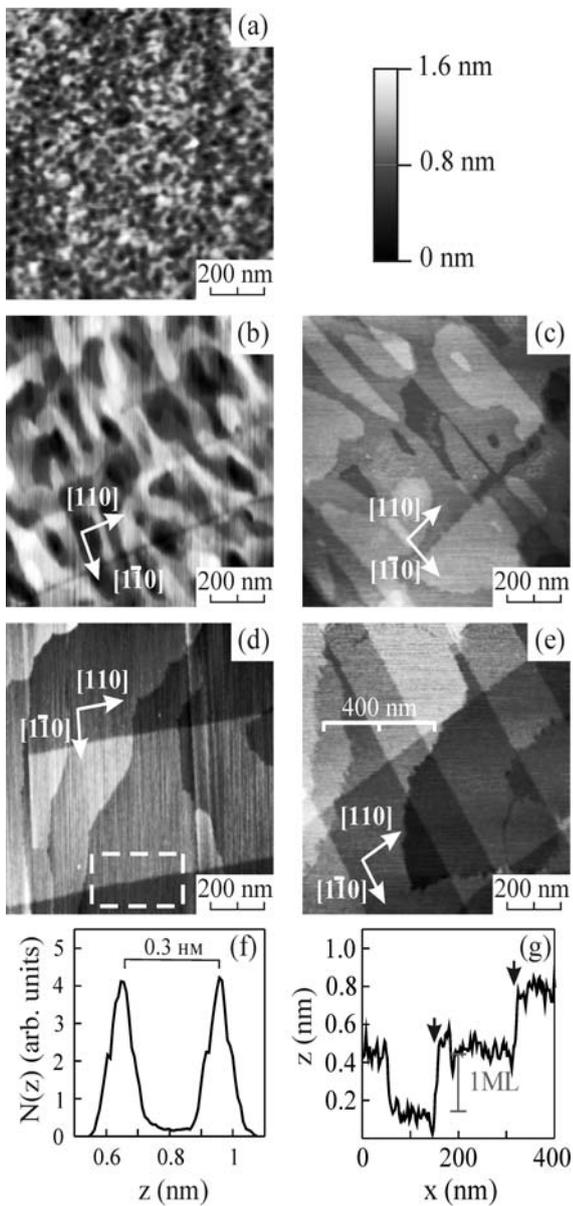


Рис. 5 АСМ изображения поверхности GaAs(001), измеренные до (a) и после отжига при температурах 525°C, 575°C, 600°C (b-e) структур GaAs/AlGaAs, приваренных на стекло. (f) распределение по высоте, посчитанное по прямоугольнику, ограниченному штриховой линией на рис.5d. (g) z-x сечение вдоль 400-нм отрезка, показанного на рис.5e.

ных температурах. Видно, что в результате отжигов на исходно разупорядоченной поверхности формируются две системы ступеней. Криволинейные "вицинальные" ступени моноатомной высоты (~0.3 нм), наблюдавшиеся ранее при отжиге "epi-ready" GaAs(001) подложек, разделяют террасы, ширина которых определяется локальным углом отклонения участка поверхности от сингулярной грани. Наряду с вицинальными ступенями, на поверхности фотокатодов формируется сетка моноатомных ступеней, образующих систему взаимно-перпендикулярных прямых линий. Такая "cross-hatch" картина типична для гетероэпитаксиальных систем, в которых происходит релаксация механических напряжений путём введения дислокаций несоответствия. Показано, что в нашем случае прямолинейные ступени также обусловлены дислокациями, которые рождаются в гетероструктуре при релаксации напряжений во время отжигов. Характерная плотность дислокационной сетки, оцененная по плотности ступеней на поверхности, составляет $\sim 3 \times 10^4 \text{ см}^{-1}$. Следует отметить, что при гетероэпитаксиальном росте на подложках с несогласованными постоянными решетки, наблюдается, как правило, грубый "cross-hatch" рельеф с характерной высотой,

много большей постоянной решетки. В данной работе, благодаря гладкости поверхности фотокатодных структур, впервые наблюдалась сетка дислокационных ступеней моноатомной высоты. Наблюдение таких ступеней может служить основой

неразрушающего метода контроля релаксации термомеханических напряжений в полупрозрачных GaAs/AlGaAs фотокатодах, приваренных на стекло.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально показано, что условия получения атомно-гладких поверхностей GaAs(001) с помощью отжига в присутствии раствора-расплава Ga-As близки к равновесным. При температурах $T \leq 650$ °C скорость роста (или сублимации) не превышает 3×10^{-5} монослоя в секунду.

2. Установлено, что при отжигах в равновесных условиях формирование поверхностей GaAs(001) с атомно-гладкими террасами, разделенными моноатомными ступенями, происходит в диапазонах температур 520–650 °C и времен отжига от 10 минут до 10 часов.

3. С использованием избыточной длины моноатомных ступеней, а также Фурье и автокорреляционного анализа, описана кинетика формирования ступенчато-террасированной поверхности при термическом выглаживании epi-ready подложек GaAs(001).

4. Установлено, что добавление сурьмы в раствор-расплав Ga-As не способствует, а препятствует получению атомно-гладкой поверхности GaAs(001). Возможной причиной является формирование устойчивой Sb-стабилизированной поверхностной реконструкции Sb/GaAs(001)-(2×4).

5. Показано, что на Ga-терминированной поверхности GaAs(111)A формирование системы террас, разделенных атомными ступенями, происходит при температуре на ~100 °C ниже, чем на As-терминированной поверхности GaAs(111)B.

6. Установлено, что разупорядочение (огрубление) рельефа поверхности GaAs(001) при высоких температурах обусловлено кинетической нестабильностью при отклонении условий отжига от равновесных. Предложен механизм разупорядочения, основанный на ступенчато-слоевой сублимации (росте) и образовании устойчивых островков (озёр) многоатомной высоты (глубины).

7. Установлено, что в результате отжига в равновесных условиях на поверхности гетероструктур GaAs/AlGaAs, приваренных на стекло, формируется ортогональная сетка прямолинейных моноатомных ступеней, обусловленных образованием дислокаций при релаксации термомеханических напряжений.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- [A1] Alperovich V.L. *Electronic states induced by cesium on atomically rough and flat GaAs(001) surface* / V.L. Alperovich, A.G. Zhuravlev, I.O. Akhundov, N.S. Rudaya, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev, A.S. Terekhov // Proceedings 15th Int. Symp. Nanostructure: Physics and Technology. Novosibirsk. 2007. P.166-167.
- [A2] Bakin V.V. *Semiconductor surfaces with negative electron affinity* / A.A. Pakhnevich, A.G. Zhuravlev, A.N. Shornikov, I.O. Akhundov, O.E. Tereshechenko, V.L. Alperovich, H.E. Scheibler, A.S. Terekhov // e-J. Surf. Sci. Nanotech. 2007. Vol. 5. P.80-88.
- [A3] Alperovich V.L. *Step-terraced morphology of GaAs(001) substrates prepared at quasi-equilibrium conditions* / V.L. Alperovich, I.O. Akhundov, N.S. Rudaya, D.V. Sheglov, E.E. Rodyakina, A.V. Latyshev, A.S. Terekhov // Appl. Phys. Lett. 2009. Vol. 94. P. 101908(3).
- [A4] Akhundov I.O. *Step-terraced morphology formation on patterned GaAs(001) substrates* / I.O. Akhundov, D.V. Sheglov, A.S. Kozhukhov, N.S. Rudaya, V.L. Alperovich, A.V. Latyshev, and A.S. Terekhov // Proceedings 18th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology. St. Petersburg. 2010. P. 327-328.
- [A5] Альперович В.Л. *Атомное выглаживание поверхностей GaAs в равновесных условиях* / В.Л. Альперович, И.О. Ахундов, Н.С. Рудая, А.С. Кожухов, Д.В. Щеглов, А.В. Латышев, А.С. Терехов // Тезисы докладов XV международного симпозиума «Нанопизика и наноэлектроника». Нижний Новгород. 2011. С. 190-191.
- [A6] Ахундов И.О. *Формирование упорядоченных террасированных поверхностей арсенида галлия в равновесных условиях* / И.О. Ахундов, В.Л. Альперович, А.С. Кожухов, Д.В. Щеглов, А. В. Латышев, А. С. Терехов // Тезисы докладов X российской конференции по физике полупроводников, Нижний Новгород. 2011. С. 17.
- [A7] Ахундов И.О. *Формирование сетки дислокаций в напряженных фотокатодных GaAs/AlGaAs гетероструктурах на стеклянных подложках* / И.О. Ахундов, С. Н. Косолюбов, Н. С. Рудая, Д.В. Щеглов, В. Л. Альперович, А. В. Латышев, А. С. Терехов // Тезисы докладов российской конференции «Фотоника-2011». Новосибирск. 2011.С. 96.

- [A8] Akhundov I.O. *Step-terraced morphology of GaAs(001) surface with straight monatomic steps induced by misfit dislocations* / I.O. Akhundov, N.S. Rudaya, V.L. Alperovich, S.N. Kosolobov, A.V. Latyshev, A.S. Terekhov // Proceedings 20th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology. Nizhny Novgorod. 2012. P. 122-123.
- [A9] I.O. Akhundov, A.S. Kozhukhov, V.L. Alperovich. *Characterization of GaAs(001) step-terraced morphology formation*. Proceedings 13th Int. Conf. and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. Erlagol-Altai. 2012 P. 9-12.
- [A10] I.O. Akhundov. *Kinetics of atomic smoothing GaAs(001) surface in equilibrium conditions* / I.O. Akhundov, V.L. Alperovich, A.V. Latyshev, and A.S. Terekhov // Appl. Surf. Sci. 2013. Vol. 269. P. 2-6.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Latyshev A.V. *Transformations on clean Si(111) stepped surface during sublimation* / A.V. Latyshev, A.L. Aseev, A.B. Krasilnikov, S.I. Stenin // Surf. Sci. 1989. Vol. 213. P. 157-169.
- [2] Jeong H.-C. *Steps on surfaces: Experiment and theory* / H.-C. Jeong, E. D. Williams // Surface Sci. Reports. 1999. Vol. 34. P.171-294.
- [3] Fan Y. *Atomic scale roughness of GaAs(100)2×4 surfaces* / Y. Fan, I. Karpov, G. Bratina, L. Sorba, W. Gladfelter, A. Franciosi // J. Vac. Sci. Technol. B. 1996. Vol. 14. P. 623-631.
- [4] A. Pimpinelli, J. Villain. *Physics of crystal growth* // Cambridge university press. 1998. P. 373.
- [5] Ding Z. *Atomic-scale observation of temperature and pressure driven preroughening and roughening* / Z. Ding, D.W. Bullock, P.M. Thibado, V.P. LaBella, K. Mullen // Phys. Rev. Lett. 2003. Vol. 90. P. 216109(4).
- [6] Epler J.E. *Evolution of monolayer terrace topography on (100) GaAs annealed under an arsine/Hydrogen ambient* / J.E. Epler, T.A. Jung, H.P. Schweizer // Appl. Phys. Lett. 1993. Vol. 62. P. 143-145.
- [7] Alperovich V.L. *Atomically flat GaAs(001) surfaces with regular arrays of monatomic steps for nanotechnology* / V.L. Alperovich, O.E. Tereshchenko, N.S. Rudaya,

- D.V. Sheglov, A.V. Latyshev, A.S. Terekhov // Proceedings 12th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology, St. Petersburg. 2004. P. 203-204.
- [8] Зенгуил Э. Физика поверхности // Перевод под редакцией Киселева В.Ф. М.: Мир. 1990. С. 536.
- [9] Nasimov D.A. *AFM and STM studies of quenched Si(111) surface* / D.A. Nasimov, D.V. Sheglov, E.E. Rodyakina, S.S. Kosolobov, L.I. Fedina, S.A. Teys, A.V. Latyshev // Phys. Low-Dimens. Semicond. Struct. 2003. Vol. 3. P.157-166.
- [10] Sheglov D.V. *Peculiarities of nanooxidation on flat surface* / D.V. Sheglov, A.V. Prozorov, D.A. Nasimov, A.V. Latyshev, A.L. Aseev // Phys. Low-Dim. Struct. 2002. P. 239-247.
- [11] Alperovich V.L. *Surface passivation and morphology of GaAs(100) treated in HCl-isopropanol 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.
- [12] Maeda F. *Sb-induced surface reconstruction on GaAs(001)* / Y. Watanabe, M. Oshima // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 48. P. 14733-14736.

*Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью,
просьба высылать по адресу:*

ИФП СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т академика Лаврентьева, д. 13

Учёному секретарю диссертационного совета Д 003.037.01, д.ф.-м.н.

Артуру Григорьевичу Погосову

e-mail: dissovet@isp.nsc.ru