

На правах рукописи



Марков Игорь Александрович

**ДИАГНОСТИКА ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В
ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ С ПОМОЩЬЮ
ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН**

Специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Фрязино – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН
Гуляев Юрий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН
Пустовойт Владислав Иванович

доктор физико-математических наук,
профессор
Томашпольский Юрий Яковлевич

Ведущая организация: ФГУП «НИИ «ИСТОК»

Защита состоится «24» сентября 2010 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 002.231.01 при ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН по адресу: 125009 г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2010г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор



С.Н.Артеменко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Тонкопленочные структуры составляют основу современной микро- и наноэлектроники. Благодаря развитию технологии получения различных материалов в виде тонких пленок и многослойных структур стала возможной миниатюризация приборов и устройств твердотельной электроники, а в ряде случаев и создание принципиально новых приборов как, например, полевых транзисторов с двумерным электронным газом. При этом выделяется значительная роль состояния поверхности структур, поскольку как в процессе создания, так и в процессе эксплуатации приборов она подвергается воздействиям монохроматического или белого света, электронных и ионных пучков, высокочастотных полей различной интенсивности и других факторов.

В структурах с ультратонкими, иногда нанометровой толщины, слоями, изменения состояния поверхности под воздействием вышеуказанных факторов оказываются существенными. Следствиями таких воздействий могут быть аморфизация кристалла, изменение вращательных, колебательных и поступательных движений атомов и молекул, а также образование одномерных, двумерных и вытянутых в линейку дислокаций.

Поверхностные акустические волны (ПАВ) являются эффективным средством контроля состояния поверхности твердых тел и можно ожидать, что даже слабые механические напряжения или пластические деформации в приповерхностном слое будут влиять на параметры распространения ПАВ, а именно на величину затухания и фазовой скорости. Адсорбция и десорбция различных веществ на поверхности звукопровода, как показали исследования, может быть замечена распространяющейся ПАВ даже при очень низком уровне содержания их в окружающей среде, что позволяет обнаруживать их и идентифицировать.

Цель диссертационной работы

Целью работы является создание высокоточной методики ПАВ-диагностики для обнаружения и идентификации процессов трансформации поверхности и приповерхностных слоев арсенида галлия при внешних воздействиях, таких как освещение немонахроматическим (белым) светом, а также в условиях вакуумного осаждения пленки металла (золото). Эти воздействия являются типичными для многих технологических процессов при создании приборов и интегральных схем с использованием GaAs. Арсенид галлия представляет интерес как один из наиболее широко используемых материалов электронной техники.

Научная новизна и значимость работы

В результате проведенных исследований впервые показана возможность регистрации с помощью ПАВ в реальном времени (*in situ*) и идентификации физико-химических процессов, происходящих в приповерхностном слое арсенида галлия при различных внешних воздействиях. В частности, зарегистрированы и исследованы окислительно-восстановительные процессы на поверхности GaAs при оптическом облучении, а также фазовые превращения в приповерхностном слое при использовании типовой технологии изготовления тонкопленочных контактов металл-полупроводник путем вакуумного напыления золота. Тем самым развит новый метод контроля в реальном времени процессов формирования тонкопленочных структур.

Практическая значимость

Разработаны методы ПАВ-диагностики, которые могут быть использованы в технологии изготовления приборов микро- и нанoeлектроники для контроля в реальном времени состояния поверхности и приповерхностных слоев твердого тела в процессе формирования тонких пленок и иных структур на основе арсенида галлия и других материалов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Измерение параметров распространения ПАВ малой мощности позволяет обнаруживать в реальном времени фазовые превращения в приповерхностных слоях твердого тела в вакууме под воздействием факторов, не связанных с термическим нагревом, таких как облучение светом (белым) и осаждение пленок металла (золота) в вакууме.
2. Под воздействием света испарителя в вакууме в приповерхностных слоях GaAs изменяются морфология, вязкость и другие свойства, что является как следствием обратимых окислительно-восстановительных реакций, так и результатом пластической деформации на поверхности. При этом может меняться также ориентация поверхности GaAs.
3. Как показано с помощью Фурье анализа временной зависимости амплитуды, скорости ПАВ и ее производной по времени, на поверхности GaAs могут происходить не только структурные превращения (медленные процессы), но и формирование шнурового канала и микропробои (быстрые процессы).
4. Фурье спектр производной скорости по времени ПАВ слабой мощности при облучении белым светом на воздухе для системы пластинка (из диэлектрика, сегнетоэлектрика, полупроводника, металла) - LiNbO_3 имеет резонансы на частотах, совпадающих со временем реакции образования – разрушения приповерхностного слоя и/или межзеренной диффузии. По значению величины производной скорости по времени на резонансной частоте определяется энергия процесса, что позволяет идентифицировать состав приповерхностного слоя исследуемого материала.
5. Как следует из сравнительного анализа состояния поверхности определяемого по изменению величины сопротивления, топографии поверхности при температурном отжиге образцов в вакууме, временных и частотных зависимостей параметров ПАВ, изменение состава окружающей среды (содержание ионов и электронов) приводит к пластической деформации в приповерхностных слоях GaAs и, как следствие, к электронной и акустической эмиссии.

Достоверность

Полученные экспериментальные результаты и разработанные методики подтверждаются известными теоретическими моделями, а также согласуются с результатами, опубликованными в отечественных и зарубежных работах.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы доложены на:

- 9th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter, Lancaster (UK), 1998,
- DIMAT 2000 Diffusion in Materials (France), 2000,
- International Conference of Mass and Charge Transport in Inorganic Materials, Italy, 2000,
- XXV Workshop On Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits Held in Europe, Cagliari, Italy, May 2001,
- *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLASTICITY 2006*, Halifax, Nova Scotia (Canada), July 17-22, 2006,
- 32nd Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits, Leuven, Belgium, May 18-21, 2008.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 научных работ (список приведен в конце автореферата), в том числе 13 статей в журналах, рекомендованных ВАК, в сборниках трудов международных научных конференций – 6.

Личный вклад соискателя

Вклад автора был определяющим в проведении измерений, в том числе автоматизации эксперимента, в проведении компьютерного анализа полученных результатов и их интерпретации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 161 странице, содержит 63 рисунка, список литературы содержит 132 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулирована цель работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, описаны структура и объем работы.

В главе 1 приведен обзор литературных данных о физико-химических реакциях взаимодействия на поверхности твердых тел при осаждении и росте тонких пленок. Рассмотрены особенности возбуждения и нелинейных взаимодействий поверхностных акустических волн с объемными акустическими волнами, с волнами немеханической природы, включая их

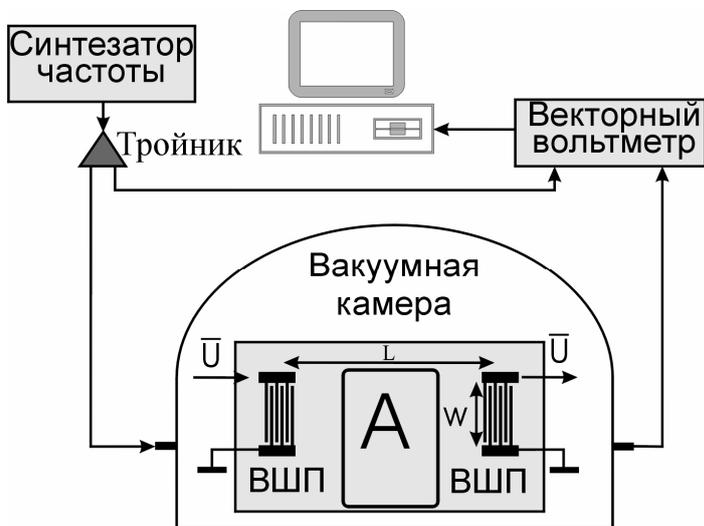


Рис.1 Схема экспериментальной установки для измерения параметров прохождения ПАВ в условиях вакуума: А – исследуемая область.

поглощение, дисперсию и возможности использования поверхностных акустических волн для исследования процессов фазовых превращений в приповерхностном слое.

В главе 2 описана методика и техника измерения параметров состояния поверхности с использованием ПАВ. Дается описание стенда для измерения частотных и временных зависимостей комплексного коэффициента прохождения ПАВ, а также конструкция образца с

электромеханическими преобразователями для возбуждения и регистрации ПАВ (рис.1). Анализируется точность измерений, обсуждаются вопросы автоматизации эксперимента и обработки данных. Приведено описание методов и аппаратуры для дополнительного контроля состояния поверхности исследуемых образцов.

В главе 3 рассматривается изменение параметров распространения ПАВ в GaAs в процессе осаждения пленок золота термическим испарением в вакууме (рис.2). После осаждения пленок Au толщиной $\sim 2000 \text{ \AA}$ (из двух испарителей последовательно) при одновременном распространении ПАВ слабой мощности методом оптической микроскопии исследовались топография и состав поверхности GaAs, покрытой слоем золота.

Показано, что структура и состав слоев меняются по толщине вплоть до $\sim 2000 \text{ \AA}$ и пленка на основе золота представляет собой слоистую структуру.

Степень кристалличности, количество и состав неоднородностей (в частности, включений островков GaAs и Au-Ga) в слоях в плоскости, перпендикулярной к поверхности арсенида галлия, отличается от неоднородностей в плоскости, параллельной поверхности.

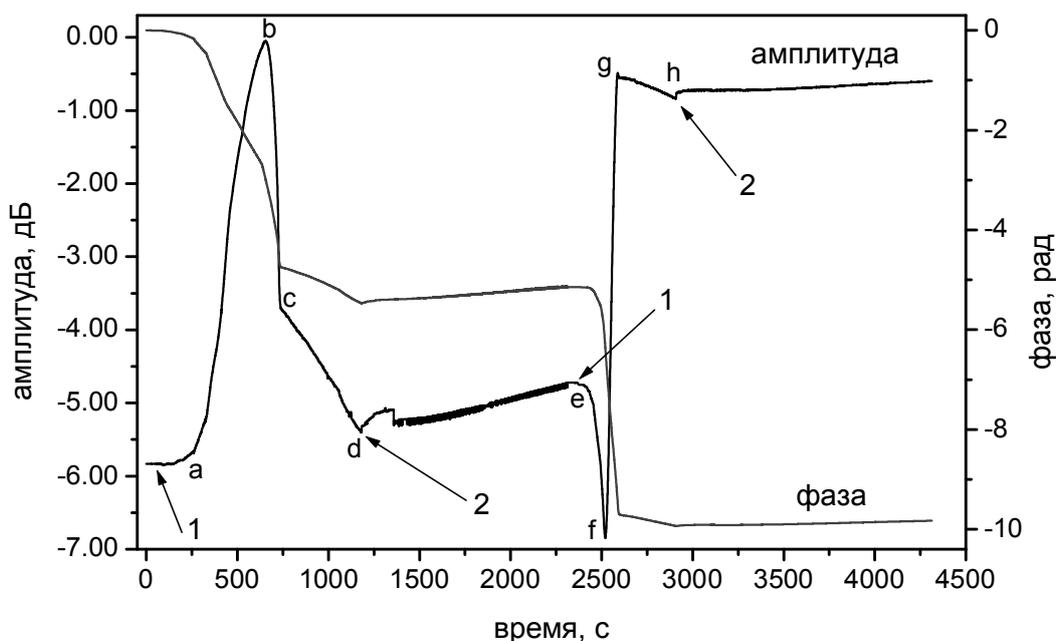


Рис.2 Зависимости параметров распространения ПАВ от времени осаждения Au (1 – испаритель включен, 2 – выключен).

Вместе с тем изменения состава и структуры на границе Au-GaAs со временем осаждения, как правило, сопровождаются изменениями величины деформации, вызванной возникновением скалывающих напряжений на границах. Силы пластической деформации вначале осаждения действуют в плоскости, перпендикулярной к поверхности (напряжения сжатия–растяжения), затем, с увеличением времени осаждения, в плоскости параллельной к поверхности (изгибные напряжения), что сопровождается движением (диффузией) структурных единиц, в частности, атомов и ионов.

Изменение характеристик распространения ПАВ является отражением физико-химических реакций взаимодействия (*in situ*), происходящих в системе Au-Ga-As.

На основании сопоставления с данными по изучению структуры и состава приповерхностных слоев Au-GaAs на различных стадиях осаждения, проведенных ранее с помощью таких традиционных методов, как Оже-спектроскопия, электронография, растровая рентгеновская спектроскопия и электронная микроскопия, сделано заключение, что данные по изменению амплитуды и фазы ПАВ при осаждении пленок Au, адекватно отражают характер происходящих процессов. Тестирование поверхности с помощью ПАВ не вносят дополнительных эффектов в реакции физико-химического взаимодействия.

Измерения амплитуды и фазы выходного сигнала во время осаждения пленки металла показало, что ПАВ отмечает, какие именно степени свободы возбуждаются в приповерхностном слое под воздействием паров осаждаемого золота, что находится в соответствии с теорией физической акустики.

Оказалось, что выделенные участки на измеряемых характеристиках поглощенной мощности $P(t)$, а также и величины скорости ПАВ от времени $v(t)$, соответствующие различным стадиям осаждения золота, отличаются не только по величине энергии активации, но и по природе сил, вызывающих эти изменения. Причинами, вызывающими изменение поглощаемой мощности, являются:

- взаимодействие с фононами, возникающими, в частности, вследствие бомбардировки поверхности GaAs частицами (атомами, ионами и электронами) из потока, испаряемого Au;
- колебательные или вращательные движения структурных единиц: молекул или атомов, ионов галлия, мышьяка и золота, а также примесей, диполей, отдельных дефектов или дислокаций;
- смена ориентации приповерхностного слоя GaAs;
- установление равновесия при химических реакциях образования соединений на базе твердого раствора Au-Ga-As;
- перестройка молекулярной структуры, например, перестройка аморфного природного слоя оксида GaAs в плотный слой Ga₂O₃, образование жидкой фазы Au-Ga-As, выпадение островков на базе соединения Au₃-Ga или островков GaAs и т.д.;
- процессы сдвиговой деформации с изменением поверхностной энергии GaAs: вдоль поверхности GaAs на начальных стадиях роста или перпендикулярно к поверхности с увеличением толщины пленки золота;
- взаимодействие с поверхностными зарядами, в том числе и с электронами, поступающими на поверхность GaAs от испарителя и вследствие изменения величины напряжения на поверхности GaAs.

Вид временной зависимости фазы и, соответственно, скорости распространения ПАВ отличается от амплитудной характеристики (рис.2), однако тоже зависит от физико-химического состояния приповерхностных слоев. Изменение производной от скорости (dv/dt) со временем указывает на изменения вязкости приповерхностного слоя арсенида галлия. При этом относительное изменение скорости $\Delta v/v$ ПАВ является следствием отклонения оптимального направления для распространения ПАВ в приповерхностном слое арсенида галлия от направления, заданного ВШП.

Энергия потерь, рассчитанная из временного изменения параметров распространения ПАВ $S \approx (E_{o.e.} + \int_0^t \frac{\Delta v}{v} dt)$ (рис.3) соответствует энергии

результатирующей деформации. Различия в поведении зависимостей $E_{o.e.}$ и $\int_0^t \frac{\Delta v}{v} dt$ с увеличением времени осаждения Au связаны с тем фактом, что структура и состав неоднородностей в пленке Au на GaAs отличаются в направлении, параллельном поверхности (направление вектора скорости ПАВ), от неоднородностей в направлении, перпендикулярном поверхности GaAs (направление вектора колебательного смещения частиц среды при распространении ПАВ), а следовательно различается и среда, тестируемая амплитудой и фазой ПАВ.

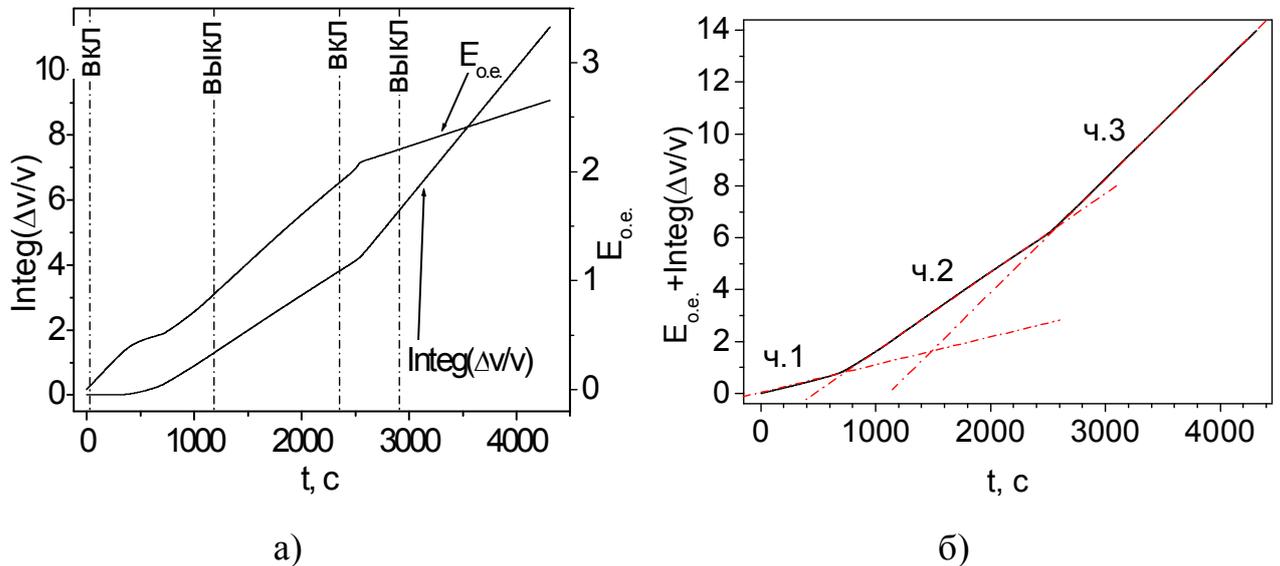


Рис.3 Зависимость от времени осаждения Au: а) $E_{o.e.}$ – безразмерной величины пропорциональной рассеянной энергии, и интегральной характеристики от $\Delta v/v$; б) их суммы.

Наблюдаемые точки перегиба на кривой аппроксимации $(E_{o.e.} + \int_0^t \frac{\Delta v}{v} dt)$, рис.3б, соответствуют точкам перехода ориентации поверхности $(111) \leftrightarrow (100) \leftrightarrow (111)$.

В главе 4 приведены результаты исследований трансформации приповерхностных слоев арсенида галлия под воздействием света испарителя. Исследования трансформации приповерхностного слоя GaAs под воздействием света от раскаленного испарителя в вакуумной камере проводились с помощью

измерения величины сопротивления при введении экрана между испарителем и подложкой, а также при наложении исследуемого образца на поверхность LiNbO_3 . В данном случае образцами являлись эпитаксиальные пленки *n*-GaAs, выращенные на полуизолирующей подложке. Исследования по измерению сопротивления приводились в сопоставление с исследованиями приповерхностных слоев GaAs с помощью химического анализа и декорирования золотом при термическом отжиге.

Показано, что, несмотря на низкий уровень энергии, исключаяющий влияние термического нагрева, воздействие светом раскаленного испарителя приводит к изменению поверхностной проводимости.

Из сравнения полученных ранее данных с данными ПАВ-диагностики можно сделать заключение, что структура поверхности GaAs под воздействием весьма слабых излучений в зависимости от концентрации электронов в исходном арсениде галлия может либо сжиматься с образованием выпуклого слоя либо расширяться – вогнутая поверхность. При этом меняется число заряженных частиц (электронов) в приповерхностном слое и их время жизни и подвижность.

В зависимости от изменения внешней среды могут образовываться либо только островки, либо только полосы дефектов, либо то и другое вместе, способные поворачиваться под воздействием потока заряженных частиц, то есть в выделенных местах изменяются температура и давление. При этом возможна акустическая и/или электронная эмиссия. Поток нейтральных и заряженных частиц в приповерхностных слоях образуется, вследствие релаксации механических и электрических напряжений.

На основании проведенных исследований следует вывод о том, что под влиянием внешних факторов, таких как изменение окружающей среды, включая состав и ионизацию остаточных газов вакуумной камеры, меняется не только состав и структура слоя природного оксида, но и величина поверхностного натяжения GaAs. Изменения структуры и состава поверхности GaAs являются результатом таких эффектов, как: пластическая деформация и

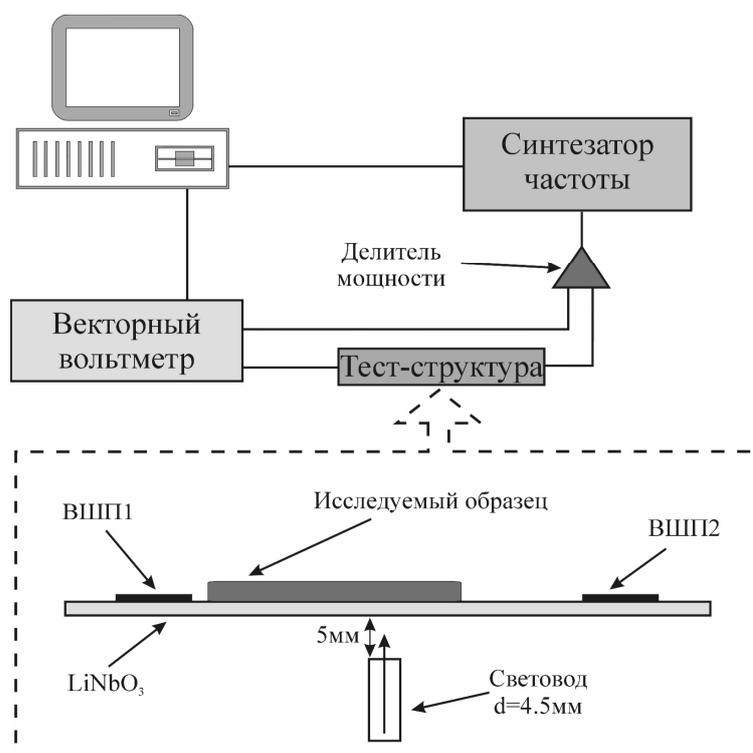


Рис.4 Схема экспериментальной установки для измерения параметров прохождения ПАВ в комнатных условиях

сэндвича: ниобат лития – воздушный зазор – исследуемый образец GaAs (рис.4).

Электрический вектор ПАВ взаимодействует с молекулами (ионами) и заряженными частицами, как в воздушной прослойке, так и на поверхности исследуемых образцов. При этом на границе между пластинками и по краям конденсаторной системы периодически реорганизуется электрический потенциал, присущий контакту двух различных сред с разными физико-химическими свойствами.

Электрическое поле (электрическая компонента ПАВ плюс-минус встроенное поле на границах контактных слоев), вытянутое вдоль границы, может привести к относительному движению заряженных слоев, которое в свою очередь вызывает передвижение фаз или дисперсных частиц относительно друг друга (электрофорез). В результате на границах между обкладками появляется разность потенциала (потенциал течения).

возбуждение электронно-дырочных пар; окислительно – восстановительные реакции в приповерхностном слое и движение структурных единиц, как в плоскости, так и перпендикулярно поверхности, вызванные перераспределением механических и электрических напряжений.

В главе 5 рассмотрены эффекты релаксации ПАВ характеристик, возникающие на воздухе под действием света в структурах типа

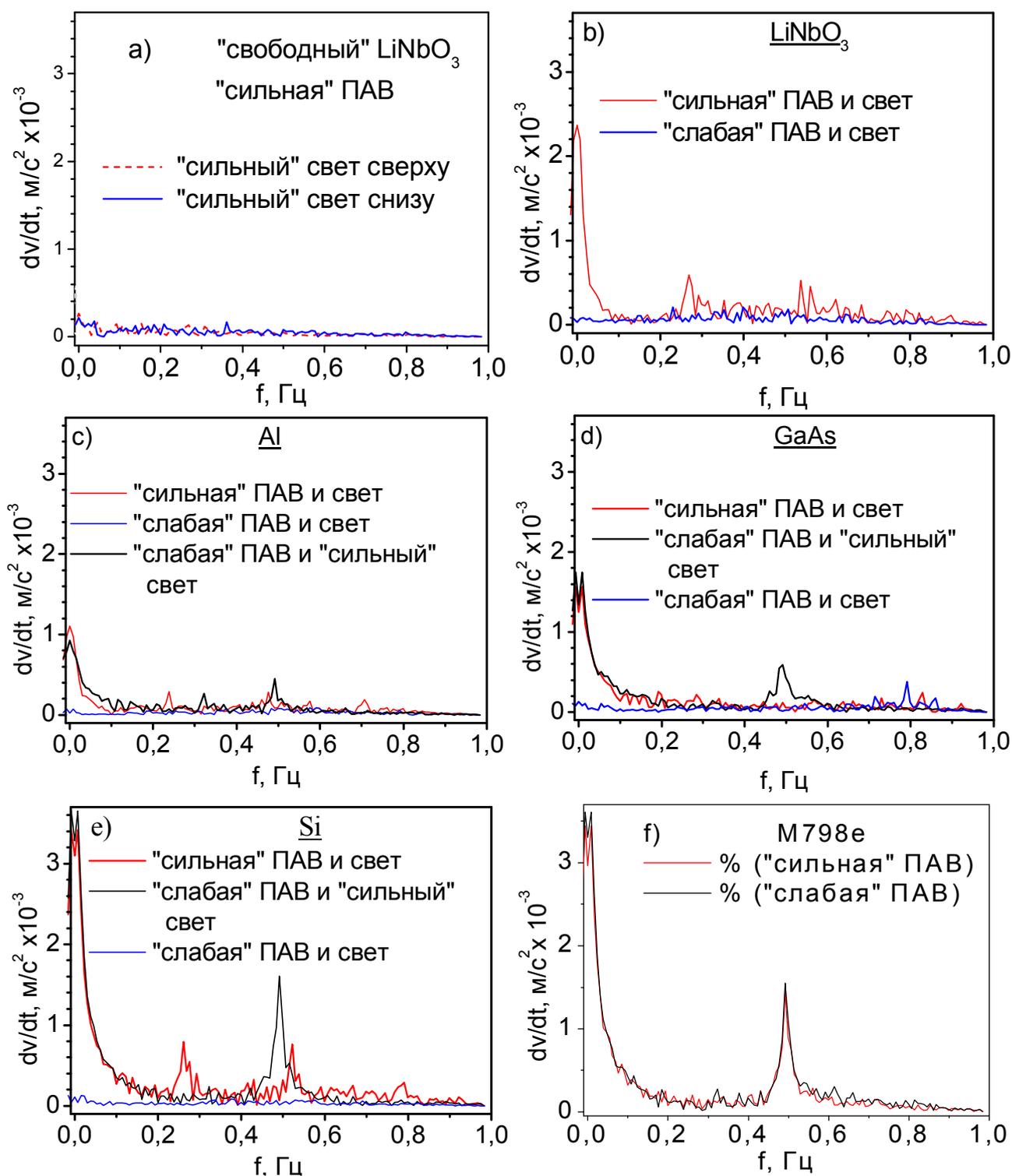


Рис.5 Спектры колебаний dv/dt для образцов: а) “свободная” поверхность; б) LiNbO_3 ; в) пленка Al на слюде; д) GaAs; е) Si ; ф) $\text{AlGa}_x\text{As}_{1-x}$.

Силы трения, которые при этом возникают, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев.

Таким образом, происходит наложение упорядоченного движения слоев с различными скоростями и хаотического движения (теплового) молекул, что и является причиной возникновения (изменения) вязкости в слоях. В момент включения света изменяются параметры системы, включая воздушный зазор, образование и движение дефектов на поверхности исследуемых образцов. Вследствие отклонения от равновесия меняется также величина и знак поверхностного заряда.

Фурье-анализ временной зависимости dv/dt , индуцированных световым воздействием, показал, что спектральная характеристика присуща состоянию поверхности конкретного материала образца (рис.5).

Резонансные пики на спектральной кривой dv/dt ПАВ отражают энергии реакций трансформации приповерхностных слоев. Временной период протекания этих реакций близок к $1/\omega = \tau$ (ω – резонансная частота), а максимальные значения dv/dt адекватны энергиям соответствующих реакций.

Так, например, показано, что первый пик на спектральной кривой dv/dt соответствует энергии ~ 21 Ккал/моль (энергия смещения Ga–As). Второй пик соответствует энергии ~ 7.5 Ккал/моль – энергии активации миграции Ga атомов (межзёренная диффузия), рис.5,d. Спектр колебаний рассеянной мощности ПАВ при этом соответствует, скорее всего, энергиям ионизационных потерь.

В заключении приводится перечень наиболее важных результатов работы.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Создана экспериментальная установка для измерения временных зависимостей параметров ПАВ слабой мощности с высокой точностью.
2. Обнаружено, что ПАВ слабой мощности сама по себе не вносит дополнительных изменений в физико-химические реакции преобразования приповерхностного слоя GaAs и может служить индикатором этих реакций в реальном масштабе времени (*in situ*).

3. Показана возможность регистрации и идентификации физико-химических процессов, происходящих на поверхности и в приповерхностном слое арсенида галлия при таких воздействиях, как излучение света разогретого испарителя и осаждение пленок металла (золота) в вакууме.
4. Результаты ПАВ-диагностики свидетельствуют о том, что при осаждении тонких пленок металла на основе Au и/или из-за наличия природного слоя оксида при облучении светом разогретого испарителя помимо изменения состава происходит как модификация, так и пластификация тонких приповерхностных слоев GaAs. При этом два соприкасающихся слоя разной модификации двигаются с разной скоростью относительно друг друга, увеличивая или уменьшая энергию кристаллической решетки.
5. Обнаружено, что на поверхности GaAs в результате внешних воздействий слабой мощности происходит двойственный процесс: с одной стороны, диссипация энергии, обусловленная преодолением молекулярных связей, с другой, формоизменение поверхностного слоя внедрившимися неровностями. Деформирование и разрушение фрикционных связей локализуется в тонком приповерхностном слое.
6. Установлено, что причиной аномально быстрых процессов зернограничной диффузии, наблюдаемых обычно на границе контактов металл – арсенид галлия или на поверхности полупроводника, является движение структурных единиц в поле механических и электрических напряжений.
7. На основании сравнительного анализа результатов измерений в вакууме величины сопротивления и как временных, так и частотных зависимостей параметров ПАВ, картин топографии поверхности, анализа структуры и состава приповерхностных слоев сделан вывод о том, что изменение состояния окружающей среды приводит к трансформации поверхности GaAs вследствие процессов диффузионной пластической деформации. При этом возможен поворот длинных дислокаций, микротрещин.
8. Анализ Фурье спектров амплитуды ПАВ, скорости и ее производной dv/dt позволяет сделать заключение о том, что на поверхности GaAs могут

происходить не только структурные фазовые превращения (медленные процессы), но и формирование шнуровых каналов и микропробой (быстрые процессы) и, как следствие, возникновение электронной и акустической эмиссии.

9. Фурье спектр временной зависимости производной от скорости ПАВ (dv/dt) при облучении белым светом (т.е без УФ и ИК) на воздухе структур GaAs-LiNbO₃ при распространении ПАВ на прилегающей поверхности ниобата лития, обнаруживает резонансы на частотах, соответствующих временам реакции образования – разрушения приповерхностного слоя и/или межзеренной диффузии. По значениям величины dv/dt на резонансных частотах определяется энергия процессов, что позволяет произвести их идентификацию. Характерно, что при наложении на ниобат лития образцов из других материалов (диэлектрик, сегнетоэлектрик, полупроводник, металл) также обнаруживаются резонансы на собственных частотах, позволяющих определить состав и структуру приповерхностного слоя исследуемого материала.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

- A1. Андреев А.С., Гуляев Ю.В., Кмита А.М., Марков И.А., Шишкин В.Г., Щукин Ю.М. Фильтры на ПАВ на основе встречно-штыревых преобразователей с субмикронными зазорами. // Радиотехника. 1987. № 11. С. 36.
- A2. Андреев А.С., Гуляев Ю.В., Кмита А.М., Марков И.А. СВЧ устройства на ПАВ на базе технологии оптической фотолитографии. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 967-971.
- A3. Андреев А.С., Гуляев Ю.В., Кмита А.М., Марков И.А. Компенсация переотражений в СВЧ преобразователях ПАВ при их изготовлении по самосовмещенной технологии фотолитографии. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 589-592.

- A4. Андреев А.С., Гуляев Ю.В., Кмита А.М., Марков И.А. Встречно-штыревые преобразователи ПАВ с субмикронными межэлектродными зазорами. // Радиотехника и электроника. 1988. № 9. С. 1812-1820.
- A5. T.A. Briantseva, Z.N. Lebedeva, I.A. Markov, T.J. Bullough and D.V. Lioubtchenko. Processes-induced modification to the surface of crystalline GaAs measured by photometry. // Applied Surface Sciences. 1999. V. 143. P. 223-228.
- A6. Briantseva T.A., Bullough T.J., Lioubtchenko D.V., Markov I.A., Tolmachev E.M. SAW diagnostics of GaAs surface structure. // Physica B: Condensed Matter. 1999. V. 263-264. P. 84-86.
- A7. Briantseva T.A., Lebedeva Z.M., Lioubtchenko D.V., Markov I.A., Nolan M., Perova T.S., Moore R.A. Precise chemical analysis development for silicon wafers after rapid thermal processing. // Applied Surface Sciences. 2000. V. 156, P. 21-25.
- A8. Lioubtchenko D.V., Markov I.A., Briantseva T.A. GaAs surface modification under light irradiation in vacuum. // Applied Surface Sciences. 2002. V. 195. P. 42-47.
- A9. Lioubtchenko D.V., Markov I.A. and Briantseva T.A. GaAs surface modifications under Au evaporating flux. // Applied Surface Science. 2003. V. 211, N 1-4. P. 335-340.
- A10. Lioubtchenko D.V., Briantseva T.A., Markov I.A., Bullough T.J. Surface composition investigation of thin film based on Al grown by CBE on the (001) GaAs surface in situ monitored by laser. // Defect and Diffusion Forum. 2007. V. 261-262. P. 25-30.
- A11. Брянцева Т.А., Любченко Д.В., Марков И.А. Измерение параметров прохождения ПАВ при трансформации поверхности GaAs под воздействием потока испаряемого золота. // Инженерная физика. 2008. № 2. С. 31-35.
- A12. Брянцева Т.А., Любченко Д.В., Марков И.А., Толмачев Е.М. Исследование взаимодействия на поверхности GaAs при осаждении Au с

помощью поверхностных акустических волн. // Неорганические материалы. 2009. Т. 45, № 8. С. 901-907.

- A13. Брянцева Т.А., Любченко В.Е., Любченко Д.В., Марков И.А., Толмачев Е.М. Исследование трансформации поверхности GaAs в процессе вакуумного осаждения пленок золота с помощью поверхностных акустических волн. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54 № 5. С. 621-624.

В других изданиях:

- A14. Briantseva T.A., Bullough T.J., Lioubtchenko D.V., Markov I.A., Tolmachev E.M. SAW diagnostics of GaAs surface structure. Abstract of the 9th International Conference on Phonon Scattering in Condensed Matter. 1998. Lancaster, UK.
- A15. Markov I.A., Briantseva T.A. and Lioubtchenko D.V. Modifications of GaAs surface under Au evaporating Flow. // Proceedings of International Conference of Mass and Charge Transport in Inorganic Materials. Italy. 2000. P. 701-708.
- A16. Briantseva T.A., Markov I.A. and Lioubtchenko D.V. Physical and chemical modifications of GaAs surface under light irradiation in vacuum. // Proceedings of International Conference of Mass and Charge Transport in Inorganic Materials. Italy. 2000. P. 477-484.
- A17. Lioubtchenko D.V., Markov I.A., Briantseva T.A., Lyubchenko V.E. Surface Acoustic Wave Investigation of the Near-Surface Layers Under Light Irradiation. // Proceedings of WOCSDICE 2001. Cagliari, Italy, May 2001. P.123-124.
- A18. Lioubtchenko D.V., Markov I.A., Briantseva T.A., Bullough T.J. and Lyubchenko V.E. Surface acoustic wave investigation of the LiNbO₃ near-surface layer under visible light illumination. Proc. of the INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLASTICITY Halifax, Nova Scotia, Canada, July 17-22 2006. P. 655-657.

- A19. Briantseva T.A., Lioubtchenko V.E., Lioubtchenko D.V., Markov I.A. GaAs Surface Transformations during Al Thin Film Growth by CBE Method. // Proc. of the WOCSDICE 2008, 32nd Workshop on Compound Semiconductor Devices and Integrated Circuits. May 18-21 2008. Leuven, Belgium.