

*На правах рукописи*

Волков Петр Витальевич

**РАЗВИТИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ И  
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ  
ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород  
2009

Работа выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН)

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Новиков Михаил Афанасьевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Геликонов Валентин Михайлович  
Институт прикладной физики РАН,

кандидат физико-математических наук  
Чхало Николай Иванович  
Институт Физики Микроструктур РАН.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное  
предприятие научно исследовательский  
институт «Полюс» им. М.Ф.Стельмаха,  
Москва

Защита состоится 26 февраля 2009 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики  
микроструктур РАН (603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики  
микроструктур РАН.

Автореферат разослан “ 26 ” января 2009 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Гайкович К.П.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы исследований

Оптические измерения в настоящее время играют большую роль как в физическом эксперименте, так и в измерительной технике. Дистанционные, бесконтактные, неинвазивные и высокоточные оптические методы позволяют решать задачи, недоступные другим подходам [1]. Наибольшее распространение получили интерференционные и поляризационные методы измерения.

При совмещении когерентных неполяризованных световых пучков или пучков с одинаковым состоянием поляризации в области их наложения возникают интерференционные полосы, обработка которых позволяет решать такие задачи, как прецизионный контроль качества поверхностей, контроль малых смещений поверхности и др. [2] В физическом эксперименте интерферометрия позволяет с высокой точностью и чувствительностью измерять эффекты, приводящие к изменению оптических свойств среды (колебания давления, температуры, показателя преломления и др.).

Поляризационные методы, основанные на интерференции поляризованного света, зачастую оказываются более чувствительными, удобными и информативными, чем стандартные интерференционные [2]. Контроль состояния поляризации света, взаимодействующего с объектом, позволяет измерять механические напряжения, исследовать электро- и магнитооптические эффекты. Для исследования свойств поверхности и тонких пленок широкое распространение получила эллипсометрия [3].

По мере развития поляризационных методов исследования появлялись различные способы описания состояния поляризации, а также преобразования поляризации веществом. Наиболее известными являются методы векторов и матриц Джонса и векторов Стокса и матриц Мюллера [4]. Однако для объектов со сложной анизотропией простое применение данных методов может приводить к сложным и громоздким вычислениям. Исследование таких систем требует создания теоретических и экспериментальных методов их разложения на простые элементы, преобразования их свойств, выделения отдельных составляющих [5].

В большинстве случаев стандартные интерференционные и поляризационные методы используют для измерения фазовых задержек меньше длины волны используемого света, что обусловлено периодичностью интерференционных полос. Для измерения фазовых

задержек, которые много больше длины волны, наиболее удобными оказываются методы низкокогерентной интерферометрии [6], которые также могут быть поляризационными. Особенностью низкокогерентных методов является использование источников света с длиной когерентности малой по сравнению с измеряемыми задержками (толщинами). Одним из перспективных применений низкокогерентной интерферометрии является измерение толщины удаленных объектов, находящихся в агрессивной среде [7].

Таким образом, разработка новых теоретических и экспериментальных методов описания и исследования сложных анизотропных систем и развитие методов когерентной и низкокогерентной интерферометрии являются весьма актуальными задачами.

### Цели работы

- создание теоретических методов описания сложных анизотропных систем;
- развитие экспериментальных поляризационных и интерференционных методов измерения малых эффектов вынужденной оптической анизотропии;
- развитие методов измерения толщины и температуры твердых тел на основе тандемной низкокогерентной интерферометрии и их применение в промышленных измерительных системах и системах мониторинга в технологиях формирования полупроводниковых микро- и наноструктур.

Для достижения поставленных целей решались следующие задачи:

1. Обобщение теоремы эквивалентности Пуанкаре на невзаимные фазовые анизотропные системы.
2. Теоретическая разработка метода преобразования свойств анизотропии невзаимных фазовых анизотропных элементов.
3. Экспериментальная демонстрация разработанных методов на примере измерения эффектов вынужденной оптической анизотропии и детектирования акустических волн на поверхности твердых тел.
4. Теоретическая и экспериментальная разработка методов повышения точности и надежности промышленных систем мониторинга толщины на базе тандемной низкокогерентной интерферометрии.
5. Создание системы мониторинга температуры подложки и толщины растущего слоя для технологий формирования микро- и наноструктур на основе тандемной низкокогерентной интерферометрии.
6. Проведение исследований ростовых процессов в реакторах металлоорганической газофазной эпитаксии.

## Научная новизна

1. Сформулирована и доказана обобщенная теорема эквивалентности для произвольной фазосдвигающей невзаимной анизотропной оптической системы: произвольный невзаимный фазовый анизотропный оптический элемент может быть представлен как комбинация пяти элементов: взаимной линейной фазовой пластинки, невзаимной линейной фазовой пластинки, взаимного ротатора и двух фарадеевских ротаторов.

2. Предложен оригинальный метод преобразования свойств оптической анизотропии произвольных взаимных и невзаимных фазовых анизотропных элементов. Теоретически доказано, что для преобразования произвольного типа фазовой анизотропии в другой произвольный тип достаточно четырех взаимных четвертьволновых линейных фазовых пластинок и набора фарадеевских ротаторов, количество которых может быть равным двум, четырем или шести и определяется типом исходной и требуемой анизотропии.

3. Впервые продемонстрирована возможность мониторинга толщины растущего слоя на начальных стадиях роста в условиях металлоорганической газофазной эпитаксии (рост буферного слоя GaN на подложке  $Al_2O_3$ .) непосредственно в реакторе в процессе роста.

## Научная и практическая значимость работы

1. Разработан и экспериментально продемонстрирован макет прибора для оптического детектирования звуковых волн на поверхности твердого тела на базе двухлучевого поляризационного интерферометра, в котором использованы созданные в диссертации методы преобразования анизотропных свойств оптических элементов.

2. Разработана и экспериментально продемонстрирована система мониторинга температуры подложки и толщины растущего слоя для технологий формирования полупроводниковых микро- и наноструктур. Достигнуты параметры: абсолютная точность определения оптической толщины  $\pm 10$  нм, чувствительность определения изменения толщины  $\pm 2$  нм, абсолютная точность определения температуры подложки  $\pm 1$  К (определяется точностью калибровки).

3. Проведено исследование технологических параметров реакторов металлоорганической газофазной эпитаксии. Получены профили температуры вдоль подложкодержателя, а также зависимость этих температурных профилей от различных параметров в реакторе (давление, поток газа, температура). Показано, что значения показаний

обычно применяемой термопары, закрепленной в подложкодержателе и реальной температуры подложки сильно различаются. Кроме того, показано, что изменения технологических параметров могут сильно влиять на температуру подложки, практически не сказываясь на показаниях термопары;

Результаты диссертации использованы при изготовлении нового поколения промышленных систем технологического контроля толщины ленты стекла, которые установлены на ряде предприятий России и СНГ; при изготовлении системы мониторинга толщины CVD алмазов в установке лазерного травления (установлена в ИОФ РАН), а также для оптимизации технологических процессов в реакторах металлоорганической газофазной эпитаксии, установленных в ИФМ РАН.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Произвольный невзаимный фазовый анизотропный элемент может быть представлен как комбинация пяти элементов: взаимная линейная фазовая пластинка, невзаимная линейная фазовая пластинка, взаимный ротатор и два фарадеевских ротатора.

2. Для преобразования между произвольными типами взаимной и невзаимной фазовой анизотропии достаточно четырех взаимных четвертьволновых линейных фазовых пластинок и набора фарадеевских ротаторов, количество которых может быть равным двум, четырем или шести и определяется типом исходных и требуемых анизотропных свойств.

3. Используя методы преобразования фазовой анизотропии на базе, фарадеевских ротаторов, четвертьволновых пластинок и двухлучевого поляризационного интерферометра можно создать оптическую систему для детектирования звуковых волн на поверхности твердого тела.

4. Тандемная низкокогерентная оптическая интерферометрия может быть использована для оперативного контроля температуры подложки и толщины растущего слоя на всех стадиях металлоорганической газофазной эпитаксии.

## Личный вклад автора

- Основной вклад в формулировку и доказательство теоремы эквивалентности, обобщенной на невзаимные фазовые анизотропные системы [A1] (совместно с Новиковым М.А.).

- Основной вклад в теоретическую разработку методов преобразования свойств анизотропии произвольных невзаимных фазовых анизотропных систем [A2, A14] (совместно с Новиковым М.А.).

- Равноценный вклад в разработку и экспериментальную демонстрацию методов измерения эффектов вынужденной оптической анизотропии с использованием кольцевых и двухпроходных схем [A3, A4] (совместно с Новиковым М.А., Хышовым А.А.).

- Равноценный вклад в создание экспериментального макета оптической схемы детектирования звуковых волн на поверхности твердого тела [A15, A16] (совместно с Новиковым М.А., Хышовым А.А., Захаровым Ю.Н.).

- Основной вклад в теоретическую и экспериментальную разработку методов повышения точности и надежности промышленных систем мониторинга толщины на базе тандемной низкокогерентной интерферометрии [A5-A9] (совместно с Новиковым М.А., Тертышником А.Д., Горюновым А.В.).

- Равноценный вклад в разработку и создание макетов аппаратуры контроля лазерного травления алмазов и для мониторинга температуры подложки и толщины растущего слоя для технологий формирования микро- и наноструктур [A11-A20] (совместно с Новиковым М.А., Лукьяновым А.Ю., Тертышником А.Д., Горюновым А.В.).

- Основной вклад в проведение экспериментальных исследований технологических параметров реакторов металлоорганической газофазной эпитаксии и теоретическую разработку методов независимого определения толщины и температуры образца в процессе роста полупроводниковых структур [A13-A20].

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты и положения диссертации докладывались на: III международной конференции «Оптика - 2003» (Санкт-Петербург, 20-24 октября, 2003), III международном оптическом конгрессе «Оптика - XXI век», конференции «Прикладная оптика - 2004» (Санкт-Петербург, 19-21 октября, 2004), 6-й международной молодежной конференции по оптике и высокотехнологичным материалам «SPO 2005» (Киев, 27-30 октября, 2005), 6 международной конференции по лазерам в производстве (Мюнхен, 24-26 июня, 2003), Симпозиумах «Нанопластика и наноэлектроника» (Нижегород, 13-17 марта 2006, 2007), VIII Российской конференции «Физика полупроводников» (Екатеринбург, 30 сентября – 5 октября, 2007), 14 международной конференции по металлоорганической газофазной эпитаксии «ICMOVPE – XIV» (Метц, Франция, 1-6 июня, 2008), втором международном форуме по нанотехнологиям «Роснанофорум» (Москва, 3-5 декабря, 2008). Результаты работы были представлены на школах и сессиях молодых

ученых, а также обсуждались на семинарах ИФМ РАН и ИПФ РАН.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации отражены в 20 публикациях, в том числе, 11 работ в рецензируемых журналах, 7 публикаций в сборниках тезисов докладов и трудов конференций и симпозиумов; 2 патента на изобретение.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Объём диссертации составляет 154 страницы, включая 50 рисунков. Список цитированной литературы включает 114 наименований, список работ автора по теме диссертации – 20 наименований.

### **Основное содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту и сведения об апробации основных результатов диссертации.

**Глава 1** представляет собой обзор имеющейся в литературе информации в рамках тематики вопросов и методов, развиваемых в настоящей диссертации.

В первом параграфе приведен используемый в диссертации метод матриц Джонса описания поляризационных свойств анизотропных систем. Приведены известные свойства матриц Джонса анизотропных элементов без анизотропного оптического поглощения (дихроизма).

Во втором параграфе представлена современная формулировка теоремы взаимности в оптике. Показано, что для оптических анизотропных элементов, удовлетворяющих теореме взаимности (взаимных элементов) матрицы Джонса для встречных направлений распространения света ( $\mathbf{M}^+$  и  $\mathbf{M}^-$ ) связаны соотношением  $\mathbf{M}^- = (\mathbf{M}^+)^T$ , где индекс T обозначает операцию транспонирования. Приведен обзор различных не взаимных эффектов в оптике и их роль в науке и технике.

Третий параграф посвящен обзору теорем эквивалентности и методов построения фазовых анизотропных систем с заданными параметрами. Подробно рассмотрено современная трактовка известной теоремы эквивалентности Пуанкаре, обобщение которой рассмотрено в настоящей диссертации.

В четвертом параграфе рассмотрены известные экспериментальные

методы исследования эффектов вынужденной оптической анизотропии с использованием кольцевых и двухпроходных схем.

В пятом параграфе приведен обзор современного состояния оптических методов контроля температуры и толщины твердых тел. Описаны принципы низкокогерентной интерферометрии.

**Глава 2** диссертации посвящена методам анализа и синтеза сложных взаимных и невязимных анизотропных систем.

В первом параграфе проведено обобщение теоремы эквивалентности Пуанкаре на невязимные фазовые анизотропные системы. Показано, что произвольный невязимный фазовый элемент эквивалентен комбинации из пяти элементов: взаимной линейной фазовой пластинки, невязимной линейной фазовой пластинки, взаимного ротатора и двух фарадеевских ротаторов.

Во втором параграфе рассмотрен частный случай доказанной в предыдущем параграфе обобщенной теоремы эквивалентности для двухпроходной оптической фазовой анизотропной системы. Доказано, что при двойном прохождении света через невязимный элемент, эквивалентная схема сокращается до двух определенным образом ориентированных линейных фазовых пластинок, разделенных ротатором.

В третьем параграфе рассмотрено различие свойств взаимных и невязимных элементов с точки зрения собственных поляризаций. Показано, что во взаимных элементах собственные волны и собственные числа (фазовый сдвиг) для встречных направлений распространения света совпадают, а в невязимных элементах различаются.

В четвертом параграфе рассмотрена задача преобразования свойств анизотропии взаимных фазовых элементов. Задача формулировалась следующим образом. Имеется некоторый произвольный взаимный фазовый анизотропный элемент. Необходимо найти универсальный набор вспомогательных элементов, таких, чтобы система, состоящая из исходного элемента и полученного набора вспомогательных элементов, обладала заданными анизотропными свойствами. Для решения задачи использовалось свойство унитарности матриц Джонса оптических анизотропных систем без поглощения. Было показано, что для преобразования между произвольными фазовыми анизотропными элементами (при условии сохранения фазового сдвига между собственными поляризациями) достаточно набора из четырех четверть волновых пластинок.

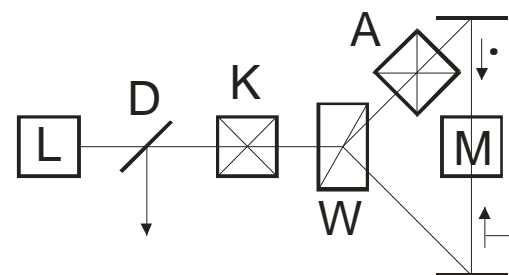
В пятом параграфе разработанная выше методика преобразования свойств анизотропии взаимных элементов обобщена на случай

невязимных фазовых элементов. Показано, что для преобразования между произвольными взаимными и невязимными фазовыми анизотропными элементами (также при условии сохранения фазового сдвига между собственными поляризациями) достаточно четырех взаимных четвертьволновых линейных фазовых пластинок и набора фарадеевских ротаторов, количество которых может быть равно двум, четырем или шести и определяется типом исходной и требуемой невязимности.

В шестом параграфе разобраны частные случаи преобразования свойств анизотропии взаимных и невязимных элементов. В частности показано, что для построения высокочастотной невязимной линейной фазовой пластинки можно использовать взаимную линейную фазовую пластинку, помещенную между двух  $45^\circ$  фарадеевских ротаторов, что важно с практической точки зрения в оптической гироскопии и в кольцевых лазерах.

**Глава 3** посвящена применению разработанных во второй главе методов анализа сложных анизотропных систем для экспериментального исследования эффектов вынужденной оптической анизотропии во внешних электрических и магнитных полях.

В первом параграфе рассмотрен кольцевой поляризационный интерферометр (рис.1). Показано, что выбор вспомогательного элемента А позволяет выделять различные компоненты матрицы Джонса исследуемого элемента М, что дает возможность измерять различные взаимные и невязимные эффекты вынужденной анизотропии, а также их комбинации.

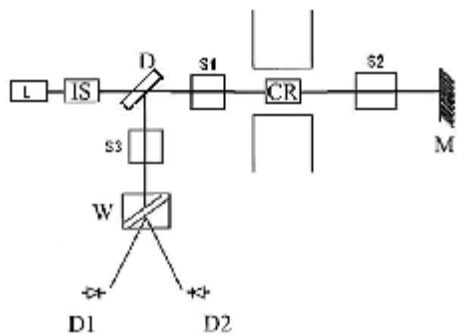


**Рис. 1.** Поляризационный кольцевой интерферометр. L – источник света, D – светоделитель, K – четвертьволновая пластинка, W – призма Волластона, А – вспомогательный анизотропный элемент, М – исследуемый анизотропный элемент

Предложенный метод экспериментально продемонстрирован на примере измерения эффекта невязимного магнитного линейного двупреломления в кристалле иодата лития. Достигнута чувствительность по невязимному сдвигу фазы линейно поляризованных волн

$2 \cdot 10^{-6}$  рад·Гц<sup>-1/2</sup>.

Во втором параграфе рассмотрено применение двухпроходных схем (рис.2) для измерения эффектов вынужденной оптической анизотропии.

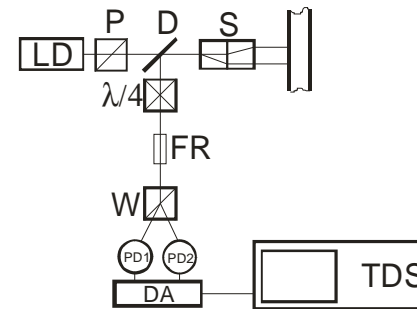


**Рис.2.** Общий вид двух-проходной схемы.  
L – источник света, IS – изолятор, D – стеклянная пластинка, CR – исследуемый кристалл, M – зеркало, W – призма Волластона, D1, D2 – фотодиоды, S1, S2, S3 – вспомогательные элементы

Показано, что постановка различных вспомогательных элементов S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub> также позволяет выделять слабые эффекты на фоне сильных маскирующих. Показано, что использование анизотропного делителя совместно с дифференциальной схемой регистрации поворота плоскости поляризации позволяет поднять чувствительность за счет подавления амплитудных шумов источника. Для экспериментальной демонстрации предложенных методов снова проведены измерения эффекта невязимного магнитного линейного двупреломления в кристалле иодата лития. В качестве анизотропного делителя использовалась стеклянная пластинка, работающая на отражение, ориентированная под углом, близким к углу Брюстера. В результате была достигнута чувствительность по невязимному сдвигу фазы  $5 \cdot 10^{-8}$  рад·Гц<sup>-1/2</sup>.

Третий параграф посвящен созданию лабораторной установки для оптического детектирования звуковых волн на поверхности твердого тела. Установка построена по схеме дифференциального поляризационного интерферометра (рис.3). В данной схеме линейно поляризованный свет расщепляется пластинкой Саварра S на два ортогонально поляризованных луча. Наличие звуковой волны на поверхности приводит к сдвигу фазы между лучами, который, за счет четвертьволновой пластинки, преобразуется в поворот плоскости поляризации. Достигнута чувствительность 0,2 А в полосе 1 МГц.

**Четвертая глава** посвящена мониторингу технологических процессов с применением тандемной низкокогерентной интерферометрии.



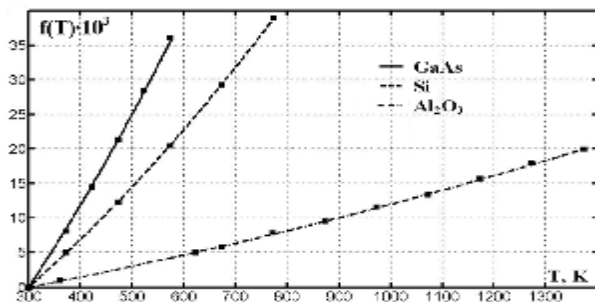
**Рис.3** Схема установки для детектирования звуковых волн на поверхности твердого тела. LD – лазерный диод, P – поляризатор, D – светоделитель, W – призма Волластона, S – поляризационный расщепитель Саварра, λ/4 – четверть волновая пластинка, FR – фарадеевский ротатор, PD1,2 – фотоприемники, DA – дифференциальный усилитель, TDS – осциллограф TDS-2024

В первом параграфе предложен новый метод определения разности длин плеч интерферометра, не требующий, в отличие от традиционных методов, долговременной стабильности длины волны источника света.

Во втором параграфе рассмотрен предложенный автором метод одновременного измерения оптической и геометрической толщины плоских прозрачных объектов, в котором, в отличие от используемых ранее методов, не требуется значительное увеличение диапазона сканирования разности длин плеч интерферометра.

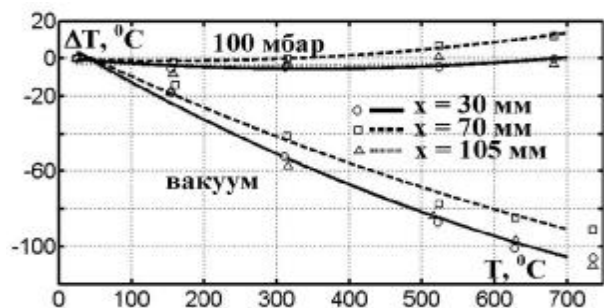
В третьем параграфе описаны созданные в ходе работы над диссертацией и внедренные в производство оптические низкокогерентные системы промышленного мониторинга толщины (система контроля толщины ленты стекла в горячей зоне производства и система контроля толщины алмазов при их лазерной обработке), основанные на разработках, описанных в предыдущих параграфах четвертой главы.

Четвертый параграф посвящен применению низкокогерентной тандемной интерферометрии для контроля температуры подложки в микро- и нанотехнологиях. Для определения температуры используется зависимость оптической толщины подложки от температуры  $D(T)$ , которая может быть записана в виде  $D(T) = n(T)d(T) = D_0(1+f(T))$ , где  $n$  – показатель преломления,  $D_0$  – толщина образца при некоторой температуре  $T_0$ ,  $f(T)$  – калибровочная функция. В работе получены калибровочные функции для трех материалов, наиболее широко используемых в современных полупроводниковых технологиях: кремния, арсенида галлия и сапфира (рис. 4).

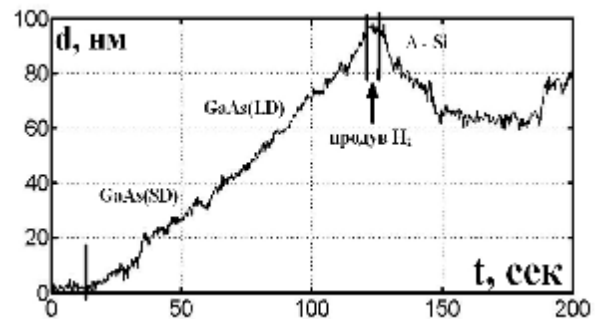


**Рис. 4.** Графики зависимостей  $f(T)$  для Si, GaAs,  $Al_2O_3$ ,

В пятом параграфе проведено исследование характеристик горизонтального реактора металлоорганической газофазной эпитаксии (МОГФЭ) EpiQuip. Используя полученные выше калибровочные кривые, исследовано влияние технологических параметров (давления газа, скорости потока газа, температуры) на расхождение показаний термопары и реальной температуры подложки. Показано, что показания термопары в большинстве случаев не соответствуют реальной температуре подложки (рис.5). Проведен мониторинг ростовых процессов гетероструктур на подложках GaAs (рис. 6).

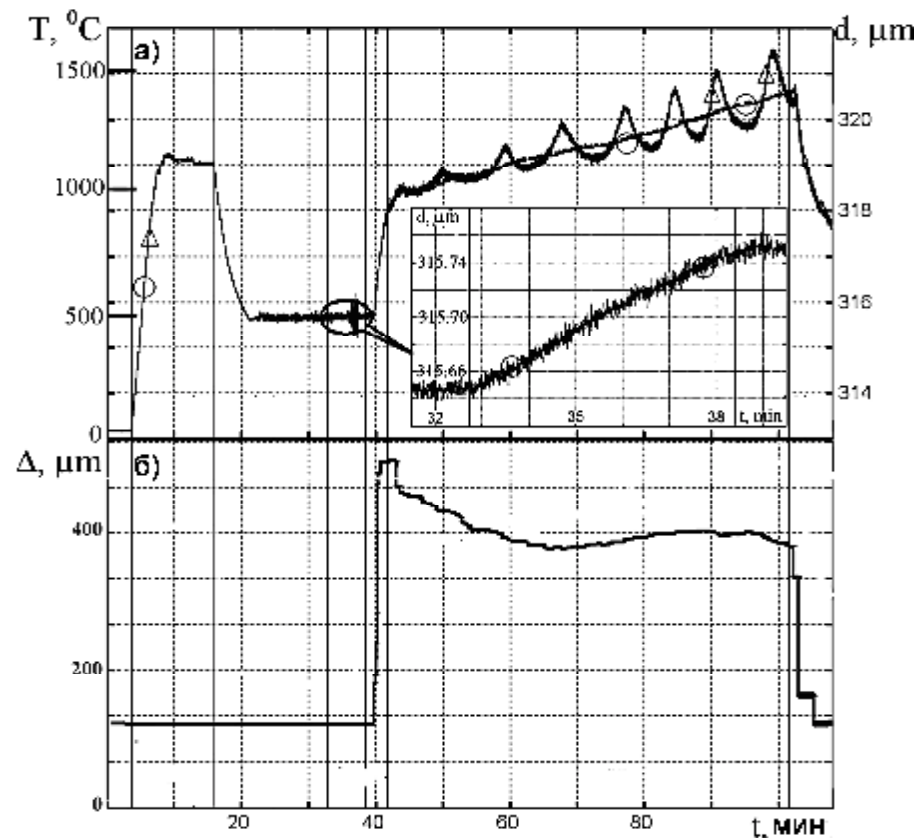


**Рис. 5.** Зависимости разности температуры подложек, расположенных в разных частях подложкодержателя, и показаний термопары от температуры подложки



**Рис. 6.** Процесс роста эпитаксиальной структуры (диод Шоттки с пониженным барьером) на подложке GaAs.

В шестом параграфе проведено исследование характеристик вертикального МОГФЭ реактора. Получены зависимости расхождения показания термопары и реальной температуры подложки от технологических параметров, таких как давление газа, скорость потока газа, температура. Осуществлена запись роста GaN на сапфировой подложке (рис.7.a). Впервые продемонстрирована возможность мониторинга роста зародышевого слоя (изображено на вставке на рис.7.a). Одновременно контролировалась толщина зазора между нижней поверхностью подложки и поверхностью подложкодержателя (рис.7.б), что позволило определить изгиб подложки.



**Рис.7.** Запись технологического процесса роста плёнки GaN на сапфире. а) зависимость оптической толщины подложки, б) изгиб подложки (толщина зазора между нижней поверхностью подложки и поверхностью подложкодержателя).



Точки на рис.7.а, обозначенные символом  $\Delta$ , соответствует измерениям оптической толщины подложки с растущим слоем, определенной по максимуму огибающей низкокогерентного интерференционного сигнала. Точки, обозначенные символом  $\circ$ , соответствует измерениям приращения оптической толщины, осуществленным по фазе заполнения низкокогерентного интерференционного сигнала.

В седьмом параграфе предложены два новых метода, позволяющих при измерении оптической толщины образца отделить изменения связанные с колебаниями температуры, от изменений, связанных с ростом или травлением. Методы основаны на дисперсии показателя преломления материала подложки. В первом варианте предложено проводить измерения оптической толщины образца одновременно на двух длинах волн. При этом отношение оптических толщин на разных длинах волн  $D_2 / D_1 = n_g(I_2, T) / n_g(I_1, T) = F(T)$  зависит только от температуры. Во втором предложенном варианте измерения проводятся на одной длине волны. При этом одновременно измеряются сдвиг максимума огибающей низкокогерентного сигнала  $DD_g$  (определяется групповым показателем преломления) и сдвиг фазы заполнения  $DD_{ph}$  (определяется фазовым показателем преломления). В этом случае, как показано в диссертации, отношение вида  $(\Delta D_g - \Delta D_{ph} n_{g0} / n_{ph0}) / D_g = \tilde{F}(T)$ , где  $n_{g0}$ ,  $n_{ph0}$  – групповой и фазовый показатели преломления при исходной температуре  $T_0$ , также зависит только от температуры и не зависит от толщины образца.

В **Заключении** приведены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Сформулирована и доказана обобщенная теорема эквивалентности для произвольной фазосдвигающей невзаимной анизотропной оптической системы: произвольный невзаимный фазовый анизотропный элемент может быть представлен как комбинация пяти элементов: взаимной линейной фазовой пластинки, невзаимной линейной фазовой пластинки, взаимного ротатора и двух фарадеевских ротаторов. Следствием теоремы является то, что двухпроходная схема с произвольным невзаимным фазовым элементом эквивалентна комбинации из двух определенным образом ориентированных линейных фазовых пластинок, разделенных ротатором.

2. Используя свойство унитарности матриц Джонса фазовых элементов, разработана методика преобразования свойств оптической анизотропии произвольных взаимных и невзаимных фазовых анизотропных элементов. Теоретически доказано, что для преобразования произвольного типа фазовой анизотропии в другой произвольный тип достаточно четырех взаимных четвертьволновых линейных фазовых пластинок и набора фарадеевских ротаторов, количество которых может быть равным двум, четырем или шести и определяется типом исходной и требуемой анизотропии.

3. Достигнута чувствительность  $5 \cdot 10^{-8}$  рад·Гц<sup>-1/2</sup> при измерении взаимных и невзаимных эффектов вынужденной оптической анизотропии в кольцевых двухпроходных схемах. Благодаря этому, на базе поляризационного интерферометра осуществлено детектирование звуковых волн на поверхности твердого тела с амплитудой 0.2 А в полосе 0-1 МГц.

4. Предложена новая схема непрерывной калибровки модулятора для тандемной низкокогерентной интерферометрии, точность которой не зависит от диапазона сканирования разности длин плеч интерферометра и долговременной стабильности длины волны опорного лазера. Предложен метод одновременного измерения оптической и геометрической толщины образца с помощью тандемной низкокогерентной интерферометрии без увеличения диапазона сканирования интерферометра. Эти разработки позволили создать и внедрить в производство системы промышленного мониторинга толщины ленты стекла.

5. Используя разработанный тандемный низкокогерентный интерферометр, осуществлен мониторинг температуры подложки и толщины растущего слоя на всех стадиях металлоорганической газофазной эпитаксии. Благодаря применению новой схемы непрерывной калибровки модулятора достигнуты: абсолютная точность



определения толщины  $\pm 10$  нм, разрешение измерения толщины  $\pm 2$  нм, абсолютная точность определения температуры подложки  $\pm 1$  К.

#### Список цитированной литературы

1. Кульчин, Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы / Ю.Н. Кульчин // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2001. – 272 с.
2. Шрёдер, Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер // М.: Техносфера. – 2006. – 424 с.
3. Азам, Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Азам, Н. Башара // М.: Мир. – 1981. – 584 с.
4. Джерард, А. Введение в матричную оптику / А. Джерард, Дж.М. Берч // М.: Мир. – 1978. – 341 с.
5. Алексеев, Э.И. О теоремах эквивалентности поляризационной оптики и оптики одномодовых световодов / Э.И. Алексеев, Е.Н. Базаров, В.Г. Израелян // Квантовая электроника. – 1984. – т.11. Вып.2. – С.397-400.
6. Sorin, W.V. Fiber optic sensing using low-coherence interferometry / W.V. Sorin // Proc. SPIE. – 1996. – V. 2872. – P.40-47.
7. Rao, Y.J. Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry // Y.J. Rao, D. Jackson // Measurement science and technology. – 1996. – V.7. – P. 981-999.

#### Список работ автора по теме диссертации

- [A1] Волков, П.В. Поляризационные трансформаторы анизотропии. I. Невзаимные оптические системы и теорема эквивалентности / П.В. Волков, М.А. Новиков // Оптика и спектроскопия. – 2006. – т.100. Вып.5. – С. 864-867.
- [A2] Волков, П.В. Поляризационные трансформаторы анизотропии. II. Преобразование свойств оптической анизотропии взаимных и невзаимных элементов / П.В. Волков, Новиков М.А. // Оптика и спектроскопия. – 2006. – т.100. Вып.5. – С.868-871.
- [A3] Хышов, А.А. Поляризационные кольцевые интерферометры и их использование для исследования невзаимных оптических эффектов / А.А. Хышов, П.В. Волков, М.А. Новиков // Изв. Вузов. Радиофизика, – 2007. – Т.50. Вып.5. – С.441-452.
- [A4] Волков, П.В. Двухпроходный метод исследования эффектов индуцированного двупреломления / П.В. Волков, А.А. Хышов, М.А. Новиков // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2008. – Т.51. Вып.6, с.536-544.
- [A5] Волков, П.В. Интерферометрическое измерительное устройство (варианты) / П.В. Волков, А.В. Горюнов, А.Д. Тертышник // Патент RU2307318C1. – 2007.

[A6] Волков, П.В. Интерферометрический способ измерения толщины и показателя преломления прозрачных объектов / П.В. Волков, А.В. Горюнов, А.Д. Тертышник // Патент RU2313066C1. – 2007.

[A7] Новиков, М.А. Оптическая интерференционная система технологического контроля толщины ленты флюат-стекла на горячих стадиях производства / М.А. Новиков, А.Д. Тертышник, В.В. Иванов, В.А. Маркелов, А.В. Горюнов, П.В. Волков, А.П. Морозов, В.Н. Чуплыгин, А.И. Гранек, С.Ю. Князев, Ю.А. Мишулин, В.П. Песков // Стекло и керамика. – 2004. – вып.2. – С.5-9.

[A8] Волков, П.В. Автоматизированная пятиканальная система технологического контроля толщины ленты флюат-стекла в режиме реального времени в горячей зоне печи отжига / П.В. Волков, А.В. Горюнов, А.Д. Тертышник // Стекло и керамика. – 2006. – Вып.5. – С.6-9.

[A9] Волков, П.В. Автоматизированная многоканальная система технологического контроля толщины ленты флюат-стекла в режиме реального времени в горячей зоне печи отжига / П.В. Волков, А.В. Горюнов, А.Ю. Лукьянов, А.Д. Тертышник // Стекло и керамика. – 2008. – Вып.5. – С.8-11.

[A10] Ivanov, V.V. Multichannel temperature sensing by differential coherence multiplexing / V.V. Ivanov, V.A. Markelov, M.A. Novikov, S.S. Ustavshikov, P.V. Volkov, I.-B. Kwon // IEEE Sensors Journal. – 2006. V.6. – P. 982 – 985.

[A11] Кононенко, В.В. Контроль лазерной обработки поликристаллических алмазных пластин методом низкокогерентной оптической интерферометрии / В.В. Кононенко, В.И. Конов, С.М. Пименов, П.В. Волков, А.В. Горюнов, В.В. Иванов, М.А. Новиков, В.А. Маркелов, А.Д. Тертышник, С.С. Уставщиков // Квантовая Электроника. – 2005. – Т.35. Вып.7. – С. 622-626.

[A12] Volkov, P.V. Novel technique for monitoring of MOVPE processes / P.V. Volkov, A.V. Goryunov, V.M. Daniltsev, A.Yu. Luk'yanov, D.A. Pryakhin, A.D. Tertyshnik, O.I. Khrykin, V.I. Shashkin // Journal of Crystal Growth. – 2008. V. 310. – P. 4724-4726.

[A13] Волков, П.В. Оптический мониторинг параметров технологических процессов в условиях металлоорганической газофазной эпитаксии / П.В. Волков, А.В. Горюнов, В.М. Данильцев, А.Ю. Лукьянов, Д.А. Пряхин, А.Д. Тертышник, О.И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Поверхность: Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2008. – Вып. 8. – С.5-10.

[A14] Volkov, P.V. The new method for optical anisotropic elements designing / P.V. Volkov, M.A. Novikov // Applied Optics-2004: Proceedings

of conference, Saint-Petersburg, Russia, October 19-21, 2004 P. 97-101.

[A15] Volkov, P.V. Polarization optical interferometers for detection of surface acoustic waves / P.V. Volkov, M.A. Novikov, A.A. Khyshov, Yu. N. Zakharov // 6-th international young scientists conference of optics and high technology material science SPO 2005: Scientific works, Kiev, Ukraine, October 27-30, 2005. - P.133.

[A16] Volkov, P.V. Short surface acoustic pulses registration with polarization interference method / P.V. Volkov, Optics 2003: Proceedings of topical meetings, Saint-Petersburg, Russia, October 20-23, 2003. - P. 16.

[A17] Волков, П.В. Оптический мониторинг параметров технологических процессов в условиях металлорганической газофазной эпитаксии / П.В. Волков, А. В. Горюнов, В. М. Данильцев, А. Ю. Лукьянов, Д. А. Пряхин, А. Д. Тертышник, О. И. Хрыкин, В. И. Шашкин // XI международный симпозиум «Нанопластика и электроника»: труды конференции, Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта, 2007. - С. 514-515.

[A18] Волков, П.В. Оптический мониторинг процессов формирования гетероструктур на основе широкозонных нитридов / П.В. Волков, А. В. Горюнов, В. М. Данильцев, А. Ю. Лукьянов, Д. А. Пряхин, А. Д. Тертышник, О. И. Хрыкин, В. И. Шашкин // XII международный симпозиум «Нанопластика и электроника»: труды конференции, Нижний Новгород, Россия, 10-14 марта, 2008. - С. 327-328.

[A19] Волков, П.В. Измерение температуры в условиях металлорганической газофазной эпитаксии с помощью низкокогерентного оптического интерферометра / П.В. Волков, А. В. Горюнов, В. М. Данильцев, А. Ю. Лукьянов, Д. А. Пряхин, А. Д. Тертышник, О. И. Хрыкин, В. И. Шашкин // VIII Российская конференция по физике полупроводников: тезисы докладов, Екатеринбург, Россия, 30 сентября – 5 октября, 2007. - С.422.

[A20] Волков, П.В. Аппаратура для прецизионного оптического мониторинга в нанотехнологиях / П.В. Волков, А.В. Горюнов, В.М. Данильцев, А.Ю. Лукьянов, Д.А. Пряхин, А.Д. Тертышник, О. И. Хрыкин, В.И. Шашкин // Второй международный форум по нанотехнологиям «Роснанофорум»: сборник тезисов докладов научно-технологических секций, Москва, Россия, 3-5 декабря, 2008. - Т.1. - С. 237-239.

ВОЛКОВ Петр Витальевич

**РАЗВИТИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ  
МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Автореферат

Подписано к печати 26.12.2008 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано в Институте физики микроструктур РАН  
603950, Нижний Новгород, ГСП-105