

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
**«Ярославский государственный университет
им. П.Г. Демидова»
(ЯрГУ)**

Советская ул., д. 14, Ярославль, 150003
Телефон: (4852) 78-86-05 Факс: (4852) 25-57-87
<http://www.uniyar.ac.ru>, e-mail: rectorat@uniyar.ac.ru
ОКПО 02069409, ОГРН 1027600680249
ИНН/КПП 7604011791/760401001

28 ОКТ 2019 № 08-01/1359

на № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. ректора ФГБОУ ВО
«ЯрГУ им. П.Г. Демидова»,
д-р физ.-мат. наук, профессор

С.А. Кащенко

«28» октября 2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Ярославский государственный университет
им. П.Г. Демидова» на диссертационную работу Третьякова Сергея
Андреевича

«Влияние дефектов структуры и микрорельефа поверхностей на оптическую
однородность монокристаллов», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.07 – физика конденсированного состояния

1. Актуальность темы исследования

Разработка новых методов исследования оптической однородности монокристаллов является необходимой задачей в свете развития существующих технологий и разработки новых технологий с одной стороны, а также возрастающих требований к точности, шумоподавлению, разрешающей способности оптических устройств, с другой стороны. В особенности это касается способов бесконтактного неразрушающего контроля, позволяющих исследовать не только исходные монокристаллы, но и оптические элементы в составе приборов, то есть производить контроль работающих устройств на любом этапе эксплуатации. Так как большинство из этих методов являются косвенными, основанными на регистрации прошедшего или отраженного от материала электромагнитного излучения, то тема, цель и задачи диссертационной работы, направленные на исследование влияния дефектов и шероховатости поверхности на оптические параметры выходящего или отраженного светового пучка, в полной мере отвечают требованиям актуальности.

Монокристаллы германия, выбранные в качестве одного из объектов исследований в диссертационной работе, широко применяются в современном приборостроении в качестве элементов полупроводниковой электроники и инфракрасной оптики: транзисторы с отпирающим

напряжением 0.1V-0.3V; элементы интегральных схем, полученные напылением; линзы и призмы для тепловизионных устройств; фотопреобразователи для солнечных батарей и т.д. Монокристаллы парателлурита являются основным материалом для создания светозвукопроводов акустооптических устройств: дефлекторов, фильтров, акустооптических дисперсионных линий задержки.

Исследования процессов поглощения, рассеяния и диффузного отражения для этих материалов (что обусловлено наличием дефектов разного рода, шероховатостью оптической поверхности и температурными условиями эксплуатации) способствуют развитию технологий роста и обработки, и в свою очередь, бесспорно, будут иметь положительное влияние на такие параметры, как КПД фотопреобразователей, разрешающая способность оптических систем, лазерная прочность при использовании сверхмощных импульсных лазерных систем, чувствительность устройств на основе данных монокристаллов.

2. Научная новизна диссертационной работы, ее теоретическая и практическая значимость для дальнейшего развития науки

В плане научной новизны полученных результатов в диссертации разработаны компьютерные модели распространения света через материал с применением различных алгоритмов, которые позволили с высокой точностью предсказать параметры прошедших и отраженных световых потоков. Представлены способы обнаружения и квалификации оптических аномалий в кристаллах, основанные на методе коноскопии. Исследованы изменения шероховатости поверхности монокристаллов германия при тепловом воздействии и сделаны выводы о необратимости проходящих процессов. Проведены исследования дефектов структуры и неравномерного распределения легирующих примесей в монокристаллах германия с помощью тепловизионной аппаратуры.

Теоретическая и практическая значимость работы включает:

- моделирование процессов рассеяния, поглощения и диффузного отражения, позволяющее проводить компьютерные эксперименты, тем самым сокращая трудозатраты на однотипные технологические операции;
- разработку методов математического и компьютерного анализа коноскопических картин, позволяющих оценить результаты внешнего воздействия на искажение оптических индикатрис;
- измерение зависимости коэффициентов излучения для монокристаллов германия от температуры и условий обработки поверхности;
- разработку метода уточнения распределения электроактивной примеси в полупроводниковых материалах, как дополнения к четырехзондовому методу;

- измерение вклада процессов массопереноса на поверхности монокристалла германия на уменьшение коэффициентов пропускания.

3. Общая характеристика работы

Диссертационная работа включает введение, три главы с основными результатами, выводы, список цитируемой литературы и приложения. Текст диссертации изложен на 150 страницах, содержит 91 рисунок и 5 таблиц, список цитируемой литературы, включающий 125 ссылок. Диссертация написана хорошим научным языком и грамотно изложена.

Во **введении** диссертации отражены все необходимые положения, определяемые рекомендациями ВАК, и включают обоснование актуальности темы, степень ее разработанности, цель и задачи работы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, методологию и методы исследования, выносимые на защиту положения, степень достоверности и апробацию результатов.

В **первой главе** диссертации представлены результаты обзора литературы, посвященной вопросу механизма образования оптических аномалий в монокристаллах вследствие наличия механических напряжений, вызванных наличием дефектов структуры. Рассмотрены научные работы по теме влияния шероховатости поверхности на световые потоки. Проанализированы дефекты структуры, присущие монокристаллам парателлурифта и германия.

Во **второй главе** диссертации рассмотрены теоретические аспекты распространения света при прохождении через материал. Представлены разработанные алгоритмы компьютерных программ с обоснование применимости моделей геометрооптического приближения и фотонного представления света при симуляции процессов поглощения, рассеяния, отражения от шероховатой поверхности. Приведены результаты компьютерных экспериментов для различных концентраций центров рассеяния, соответствующих сферической, рэлеевской индикатрисам рассеяния и рассеянию Ми.

В **третьей главе** работы описан метод математического анализа искажения изохром коноскопической картины, позволяющий рассчитать отклонение коэффициентов преломления при наличии оптической аномалии, данным методом посчитаны отклонения при наличии свили в кристаллах парателлурифта. Представлен метод дифференциальной коноскопии, запатентованный диссертантом, которым были выявлены неравномерная плотность дислокаций в кристалле парателлурифта и остаточные напряжения в светозвукопроводе акустооптического устройства. Подробно описана методика регистрации и анализа тепловизионных картин нагретых монокристаллических образцов. Для монокристаллов германия измерены коэффициенты излучения и зафиксирован необратимый процесс изменения геометрии поверхности, вызванный нагревом. Проведена оценка влияния данного эффекта на диффузное отражение и пропускание ИК излучения кристаллом германия. Методами коноскопии и тепловизионного контроля

выявлена аномальная двуосность, возникающая при работе акустооптического устройства.

4. Основные замечания и вопросы по работе

1) Представленная в работе программа, моделирующая пропускание света через материал (фотонная модель), содержит только три типа рассеивающих центров, соответствующих индикатрисам рассеяния – сферической, рэлеевской и рассеянию Ми, и отсутствует привязка к кристаллографическим направлениям и к структуре моделируемого кристалла. Распределение рассеивающих центров задаётся случайным образом, что исключает возможность моделировать неравномерность данного распределения. Таким образом, потенциал данной модели реализован не полностью.

2) Третья глава включает в себя и коноскопические и тепловизионные исследования, не ясна причина такого объединения. Отсутствуют результаты тепловизионных измерений для монокристаллов парателлурита. В разделе 3.4.2 отсутствует обоснование выбора образцов германия для экспериментов.

3) В выводах отмечена возможность применимости тепловизионного метода для измерения удельного сопротивления поликристаллических полупроводниковых материалов, что действительно проблематично при использовании зондовых методов в сил размеров исследуемых областей, однако в самой диссертационной работе не представлено ни одного эксперимента, подтверждающего данный вывод.

Заключение

Высказанные замечания не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку научного исследования, представленного диссертантом. Работа Третьякова Сергея Андреевича «Влияние дефектов структуры и микрорельефа поверхностей на оптическую однородность монокристаллов» представляет собой завершённое научное исследование на актуальную тему. Сделанные в работе выводы и сформулированные защищаемые положения адекватны полученным результатам. По результатам исследования автором работы опубликовано 38 научных работ, из них 13 – в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, Scopus, WoS. Результаты диссертационной работы были доложены на международных и российских конференциях. Автореферат и опубликованные статьи в полной мере отражают содержание диссертационной работы.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК РФ, изложена грамотным научным языком, содержит иллюстрации и таблицы, текст сопровождается ссылками на публикации. Полученные результаты работы достаточно хорошо аргументированы и апробированы на российских и международных конференциях. Диссертация логично построена, ее структура и содержание соответствуют поставленным целям исследования и паспорту специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

По своей актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, а также по личному вкладу автора,

диссертационная работа отвечает требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор - **Третьяков Сергей Андреевич** - заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Отзыв заслушан и обсуждён на заседании кафедры микроэлектроники и общей физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова» 28 октября 2019 г., протокол № 2-2019.

Зав. кафедрой микроэлектроники и общей физики,
доктор физ.-мат. наук, доцент

И.А. Кузнецова

Служебный адрес и телефон:
150003, г. Ярославль, ул. Советская, д.14.
Тел: (4852) 79-77-74