



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620062, тел.: +7 (343) 375-45-07
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/667001001

03.06.2026 № 01.01-07/604
На № _____ от _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»



Кортов С.В.
«03» 06 2026г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Комаровского Никиты Юрьевича

**«Развитие процедур измерения неоднородности структур, оценки сопротивления
разрушению и приемов когнитивной графики для контроля и управления
качеством монокристаллов GaAs», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая
обработка металлов и сплавов**

Актуальность темы диссертации

Для производства интегральных микросхем, как и для металлургии, характерен разброс значений параметров материала, а так называемые вспышки брака и низкий уровень качества могут наблюдаться даже в случае, когда на всех этапах производственной траектории параметры технологии находятся в пределах нормы. При этом активное развитие твердотельной электроники, помимо закономерного роста спроса на монокристаллы группы $A^{III}B^V$, обуславливает рост требований к их качеству. В частности, распространение требований к конструкционным материалам на монокристаллы полупроводников, обоснованное нелинейным ростом экономических потерь при разрушении интегральной схемы на протяжении всей технологической цепочки. Не менее актуальной задачей является достижение необходимой степени структурной однородности материала, которая, на данный момент не имеет общепринятых и нормативно регламентируемых методов оценки.

Массовый характер производства однотипной продукции, в совокупности с современными средствами аттестации ее качества и мониторинга параметров процесса приводят к накоплению представительного объема экспериментальной статистики – баз данных производственного контроля. Поиск взаимосвязи параметров процесса и параметров материала – путь к стабилизации качества монокристаллов и повышению их конкурентоспособности на рынке. В этой связи развитие новых подходов к анализу баз данных производственного контроля и выявление метрологических факторов цифрового количественного анализа структур и разрушения представляется весьма актуальной.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы из 209 наименования и 2 приложений. Работа изложена на 159 страницах, включает в себя 112 рисунков и 7 таблиц.

Оценка содержания диссертации

В первой главе представлен аналитический обзор литературы по теме исследования, в котором оценена роль структурных дефектов в формировании качества монокристаллов группы $A^{III}B^V$ и изучены методы их исследованию. Описаны подходы к исследованию механических свойств материалов электроники, а также приведены описания механизмов распространения трещин в монокристаллах. Приведены теоретические основы и существующие методы цифровой обработки изображений и анализа баз данных производственного контроля.

Вторая глава посвящена описанию материалов и методов исследования. Объектом исследования были монокристаллы GaAs и InSb, выращенные методом Чохральского в различных кристаллографических направлениях. Приведена основная информации о методиках и оборудовании, которые применялись в работе.

В третьей главе приведены результаты анализа поля яркости панорамных изображений структуры монокристаллов. На основе полученных результатов был предложен алгоритм цифровой обработки изображений, включающий в себя выбор порога бинаризации и фильтрации. Показано, что группам темных объектов, выделяемых «статистической» (на основе гистограмм распределения значений площадей) и «физической» (по прямым наблюдениям морфологии ямок травления в сканирующем электронном микроскопе) фильтрацией, в координатах «площадь объекта S – его периметр P », отвечали различные значения тангенсов углов наклона аппроксимирующих прямых на сводной зависимости (линейность отдельных участков зависимости « S - P » отражает самоподобие наблюдаемых физических явлений, а различие их параметров – отличие в природе объектов). Для оценки масштабов структурной неоднородности монокристаллов полупроводников исследуемая в работе панорама была разбита на полиэдры Вороного, с последующей оценкой статистики

распределения (по величинам коэффициентов асимметрии и эксцесса) расстояний между темными объектами (центрами полиэдров Вороного) и числа ближайших соседей.

В четвертой главе исследованы метрологические факторы, определяющие корректность оценки сопротивления монокристаллов арсенида галлия разрушению. Показано, что при воздействии индентора на поверхность монокристалла GaAs, в первую очередь образуются трещины по грани летучего компонента. Показано, что при повороте главных диагоналей индентора относительно плоскостей скола {110} происходит активное развитие трещин в направлениях $\langle 100 \rangle$, а их слияние сопряжено с риском образования сколов;

В пятой главе оптическим методом (по спектрам отражения в средней и дальней инфракрасной области спектра) рассчитывалась концентрация свободных носителей заряда (КСНЗ) в монокристаллах GaAs и InSb. В монокристаллах InSb [111], легированных Te, оценен разброс КСНЗ в масштабах пластины.

В шестой главе приведены результаты исследования влияния параметров процесса на развитие эффекта канальной неоднородности в монокристаллах, выращенных в кристаллографическом направлении [111]. Проведен ретроспективный анализ базы данных производственного контроля процесса выращивания монокристаллов GaAs, методом Чохральского. Установлено, что гипотеза о нормальном распределении значений параметров противоречит наблюдениям. Между фактическими и прогнозируемыми результатами в рамках регрессионной модели наблюдается высокое расхождение – коэффициент корреляции варьировался в диапазоне 0,23...0,47.

В заключении приведены выводы по диссертации.

Научная новизна результатов исследования

– Для сшитых в панораму изображений дислокационной структуры монокристаллов в 256 оттенках серого, полученных в световом микроскопе, предложен алгоритм цифровой обработки изображений, включающий в себя процедуру выбора порога бинаризации (на основе анализа поля яркости) и фильтрации (на основе статистики распределения площадей темных объектов (фигур травления));

– Апробирована оценка неоднородности размещения ямок травления на поверхности пластины GaAs на основе применения статистики полиэдров Вороного;

– Прямыми наблюдениями процесса выращивания монокристаллов группы $A^{III}B^V$ (GaAs и InSb) выявлены закономерности влияния параметров процесса выращивания на эффект канальной неоднородности, предложен критерий ранжирования критических параметров процесса выращивания монокристаллов группы $A^{III}B^V$, основанный на исследовании их влияния на рост канала;

– Подтверждена эффективность приемов когнитивной графики для выявления областей с доминирующим типом зависимости критических параметров процесса

выращивания монокристаллов GaAs, методом Чохральского в кристаллографическом направлении $[100]$ (и зон их риска в пределах поля допуска), обеспечивающих получение материала, с высокой подвижностью свободных носителей заряда и низкой плотностью структурных дефектов;

– Показано, что поворот главных диагоналей индентора относительно плоскостей скола $\{110\}$ в процессе микроиндентирования приводит к активному развитию трещин в кристаллографических направлениях $\langle 100 \rangle$, а их слияние сопряжено с риском образования сколов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается при помощи обоснованных статистических процедур, современной исследовательской техники и программного обеспечения, массовых цифровых измерений структур и разрушения, учетом закономерностей протекания технологической наследственности в рамках исследуемой технологии, согласием полученных результатов с данными, имеющимися в научно-технической литературе.

Практическая значимость и реализация результатов диссертации

Разработанные цифровые процедуры измерения структуры материала и методика оценки вязкости разрушения были использованы в Физическом институте имени П.Н. Лебедева РАН, что позволило сопоставить статистику распределения дефектов в монокристаллах с параметрами технологии и уточнить характеристики их трещиностойкости, повысив тем самым выход годной продукции. Применение предложенного в работе алгоритма ретроспективного анализа баз данных в производственных условиях АО «Гиредмет» привело к повышению качества выпускаемой продукции - обеспечило плотность структурных дефектов (дислокаций) на нижнем пределе поля допуска и улучшило однородность их распределения по сечению пластины

Результаты работы представляют несомненный интерес для предприятий и научно-исследовательских организаций в области материаловедения, например, АО "НПО "ОРИОН" (г. Москва), АО «Московский завод Сапфир» и АО «НИИПП» (г. Томск).

Материалы диссертации нашли свое отражения в четырнадцати публикациях (журналы, входящие в базы данных Scopus и WoS). Основные результаты диссертации были представлены на 10 конференциях: XI-я Евразийской научно-практической конференции Прочность неоднородных структур (ПРОСТ-2023), г. Москва 2023г., II и III Международной научно-практической конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение» (РедМет-2022 и РедМет-2024), г. Москва, 2022 и 2024 гг., Национальной научно-технической конференция с международным участием «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ-2024»), г. Москва 2024 г., XIV и XV Научно-практической конференции молодых учёных и специалистов НПО «Орион», г. Москва 2025 и 2026 гг., 14 и 15-ом Международной Научно-практической конференция по

физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «Мокеровские чтения», г. Москва 2023 и 2024 гг., Научно-техническая конференция АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино 2023г., XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения НПО «Орион», г. Москва 2024г. и 10-ом Российском форуме «Микроэлектроника 2024», г. Сочи 2024г.

Автореферат диссертации достаточно полно отражает её содержание.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов по следующим пунктам:

1. Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм, в том числе диаграммами состояния) с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов.

3. Теоретические и экспериментальные исследования влияния разнородных структур, в том числе кооперативного, на физические, химические, механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование.

5. Теоретические и экспериментальные исследования механизмов деформации, влияния фазового состава и структуры на зарождение и распространение трещин при различных видах внешних воздействий, их моделирование и прогнозирование.

6. Разработка новых и совершенствование существующих технологических процессов объемной и поверхностной термической, химикотермической, термомеханической и других видов обработок, связанных с термическим или термомеханическим воздействием, цифровизация и автоматизация процессов, а также разработка информационных технологий систем сквозного управления технологическим циклом, специализированного оборудования.

10. Разработка новых и совершенствование существующих методов фазового, структурного и физико-химического анализов сплавов с учетом возможности цифровизации измерений.

Замечания по работе:

1. Разработанные в работе цифровые процедуры измерения дислокационной структуры получили развитие применимо к монокристаллам группы $A^{III}B^V$, выращенных методом Чохральского, что позволило определить минимальный объем экспериментальных измерений, обеспечивающий получение воспроизводимых и сопоставимых результатов, а также ввести меру неоднородности размещения дислокационных ямок травления на основе применения статистики полиэдров Вороного. Однако из текста диссертации непонятно, можно ли распространить применение данных подходов на эпитаксиальные структуры и монокристаллы, выращенные другими методами, или необходимы иные подходы.

2. Известно, что дислокационную структуру монокристаллов группы $A^{III}B^V$ можно исследовать, используя разные методы, например, просвечивающую электронную

микроскопию и рентгеновскую топографию. Было бы целесообразно провести в работе подобные сравнения

3. В качестве замечания следует отметить, что до конца не ясно, как некоторые из полученных результатов использовать на практике для получения достоверных данных о стойкости монокристаллов к хрупкому разрушению, поскольку в работе в основном показано лишь влияние рассматриваемых факторов на результаты измерения, но не всегда говорится об оптимальных значениях этих факторов.

4. Процедура измерения структур, предложенная в работе, как и ее полезность для практики не вызывают сомнений. Однако с учетом известных трудностей, сопровождающих внедрение таких методов на производстве, в работе было бы полезно обсудить возможные варианты процедур внедрения.

Заключение

Отмеченные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают ценности диссертационной работы Комаровского Н.Ю., имеющей научную новизну и практическую значимость в актуальной области современного металловедения. Цель работы достигнута, задачи решены, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основе выполненных автором исследований изложены развитые и обоснованные методы цифровизации в материаловедении для повышения качества монокристаллов группы $A^{III}B^V$. Предложены новые научно обоснованные алгоритмы применения классической статистики и приемы применения когнитивной графики, для выявления критических факторов качества монокристаллов GaAs. Диссертационная работа «Развитие процедур измерения неоднородности структур, оценки сопротивления разрушению и приемов когнитивной графики для контроля и управления качеством монокристаллов GaAs» соответствуют всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС», а автор работы Комаровский Никита Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Отзыв утвержден на заседании кафедры термообработки и физики металлов, протокол № 5 от 21 мая 2026 г.

Заведующий кафедрой Термообработки и
Физики металлов УрФУ им. Первого Президента
России Б.Н. Ельцина доктор техн. наук,
профессор

Попов Артемий Александрович