



Программа магистратуры «Нанодиагностика материалов и структур»

Срок обучения - 2 года

Форма обучения - очная

*Выпускающая кафедра
«Общая физика»*

*Руководитель программы
Боргардт Н.И. д. ф.-м. н., профессор*



Цели и задачи программы магистратуры

Цель программы магистратуры:

- подготовка специалистов высокой квалификации по направлению «Электроника и наноэлектроника» с формированием предметно-специализированных компетенций в области диагностики материалов, наноструктур и нанообъектов электронно-микроскопическими и зондовыми методами

Задачи программы магистратуры:

- ознакомить с основными достижениями и перспективами в области микро- и наноэлектроники, обеспечить магистранта специальными знаниями для успешной деятельности в этой области;
- обеспечить понимание основных законов, определяющих физические свойства объектов нанометрового масштаба, ознакомить с базовыми технологиями формирования наноструктур и нанообъектов, методами их диагностики и модификации с помощью современного исследовательского, диагностического и измерительного оборудования, способствовать приобретению и развитию практических навыков работы на этом оборудовании;
- сформировать личностные качества, необходимые для развития творческих способностей, умения работать в коллективе, способности к организации и проведению работ по диагностике микро- и наноструктур, нанообъектов с применением современных методов и оборудования.

Области профессиональной деятельности выпускников:

- научно-исследовательская деятельность;
- научно-педагогическая деятельность.



Основные предметы

- Проектирование и технология электронной компонентной базы
- Физика наноразмерных полупроводниковых структур
- Методы диагностики материалов и структур
- Ионная обработка и модификация полупроводниковых структур
- Оптические и рентгеновские методы диагностики
- Растровая электронно-ионная микроскопия наноструктур
- Просвечивающая электронная микроскопия материалов и наноструктур



Ведущие преподаватели



Боргардт Н.И.
д.ф.-м.н., профессор



Королев М.А.
д.т.н., профессор



Парменов Ю.А.
к.т.н., профессор



Трифонов А.Ю.
к.ф.-м.н., доцент



Кукин В.Н.
д.ф.-м.н., вед. научн. сотр.



Волков Р.Л.
к.ф.-м.н., доцент



Основная лаборатория

Лаборатория электронной микроскопии

- **Направления деятельности:** характеристика структуры и состава с разрешением вплоть до атомарного, модификация микроструктур ионным пучком
- **Методы исследования:** просвечивающая (ПЭМ) и растровая (РЭМ) электронная микроскопия, фокусированный ионный пучок (ФИП), оптическая микроскопия



Электронно-ионный
микроскоп Helios NanoLab 650

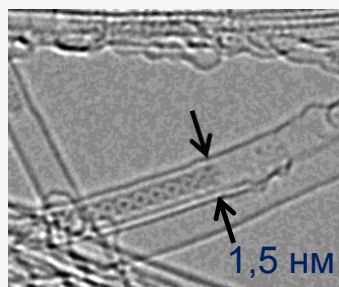
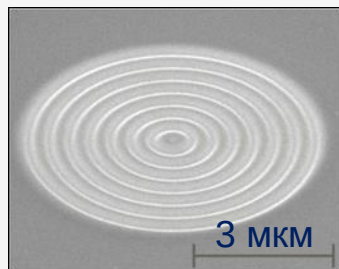
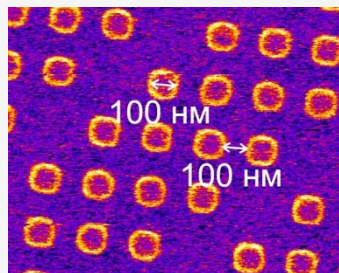


Просвечивающий электронный
микроскоп Titan Themis 200



Научно-исследовательская работа в магистратуре

Эксперимент



Визуализация
микроструктур и
нанообъектов
(РЭМ)

Создание и
модификация
микроструктур
(ФИП)

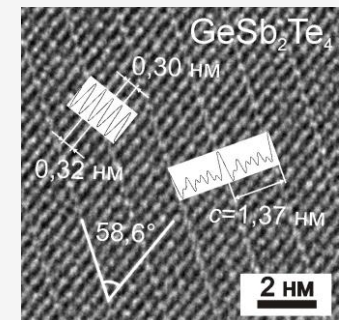
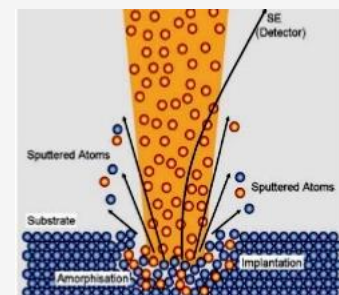
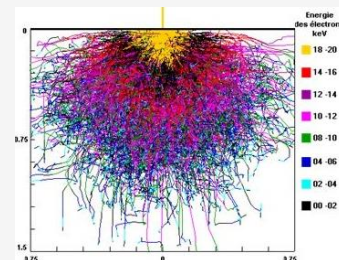
Исследование
структуры и
состава
нанообъектов
(ПЭМ)

Теория

Моделирование
рассеяния
электронов в
веществе (РЭМ)

Моделирование
взаимодействия
ионного пучка с
веществом (ФИП)

Анализ
атомарной
структуры
материалов
(ПЭМ)





Преимущества программы магистратуры

- Обучение осуществляется коллективом высококвалифицированных преподавателей, многие из которых являются ведущими специалистами в своей области, активно участвуют в выполнении научно-исследовательских работ и имеют публикации в высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах
- Научная исследовательская работа выполняется на оборудовании мирового уровня, экспериментальные данные обрабатываются и моделируются с применением современных программных пакетов
- Магистерские диссертации готовятся по актуальным темам при всесторонней поддержке научного коллектива лаборатории электронной микроскопии
- Сотрудничество – ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Физический институт РАН, Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, ОАО НИИМЭ и з-д “Микрон”, ОАО «Ангстрем», НПК “Технологический центр”, «Зеленоградский нанотехнологический центр» и др.
- Иностранные партнеры – 4-ый Физический институт Геттингенского университета (Германия)



Места прохождения практики и работы выпускников

- Места прохождения практики:
 - лаборатория электронной микроскопии МИЭТ;
 - НИИ Физических проблем им. Ф.В. Лукина.
- Места работы выпускников:
 - предприятия электронной промышленности;
 - научно-исследовательские центры, ориентированные на инновационную деятельность в области микро- и наноэлектроники;
 - центры коллективного пользования, аналитические центры и лаборатории, выполняющие характеризацию, диагностику и анализ материалов, микро- и наноструктур, нанообъектов электронно-микроскопическими и ионно-лучевыми методами;
 - дальнейшее обучение в аспирантуре.



Выпускники программы



Сазонов В.А.: «Учеба по программе позволила мне стать квалифицированным специалистом в области электронно-микроскопической диагностики, получить практические навыки работы на современном оборудовании»



Зыбина Ю.С.: «Учеба по программе помогла мне найти свое место в жизни и открыла для меня новые перспективы. У меня была возможность не только получить знания в области методов диагностики, но и работать на самом современном оборудовании»



Контакты

Кафедра общей физики:

тел. (499) 720-85-58

e-mail: gpd@mieee.ru

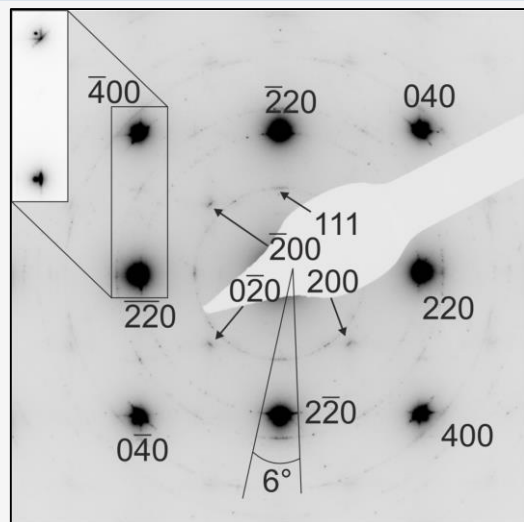
Лаборатория электронной
микроскопии

тел. (499) 720-87-65

e-mail: lemi@mieee.ru

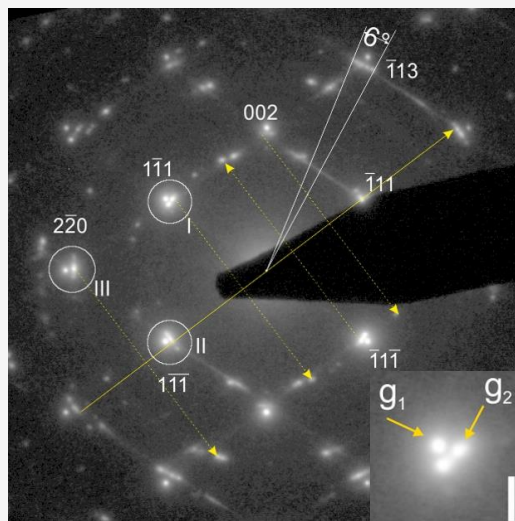


Выполненные магистерские работы



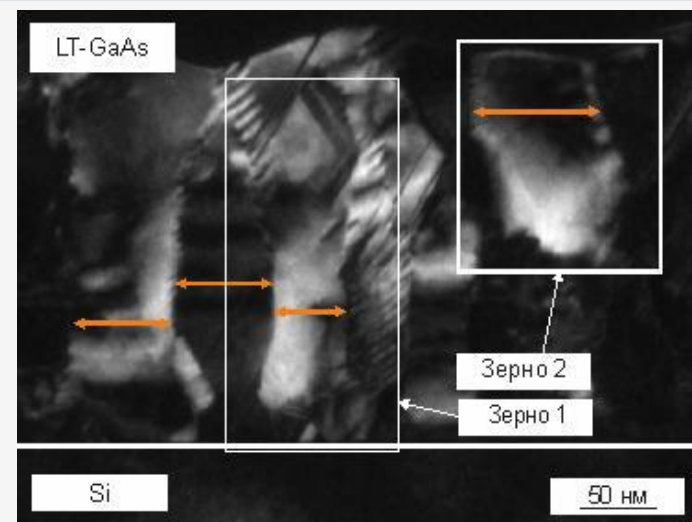
Дифракционная картина в оси зоны [001] Si подложки и слоя LT-GaAs

1. Слой имеет мозаичную структуру (дуги на кольцах $\{220\}$ и $\{400\}$), в нем также присутствуют произвольно ориентированные кристаллиты
2. Зерна мозаики наследуют ориентацию подложки



Дифракционная картина [110]
Si подложки и слоя LT-GaAs

1. Угловое расстояние составляет 6° , что подтверждает мозаичную структуру
2. Желтая линия соответствует оси двойникования -111



Темнопольное изображение в рефлексе 111

Поперечные размеры зерен мозаики
лежат в пределах 45-90 нм.

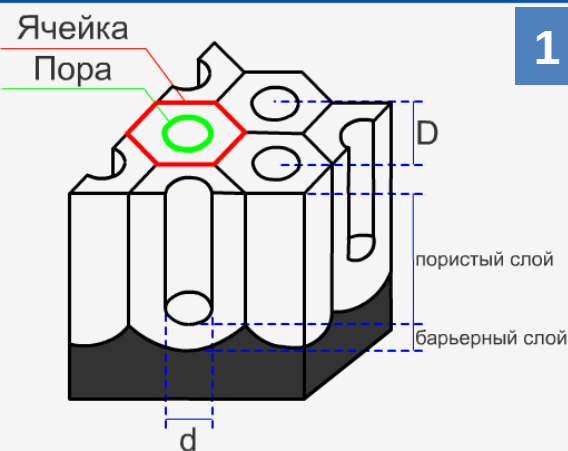
Размеры зерен в направлении роста:

1. Зерна, соразмерные толщине слоя, лежащей в пределах 220-250 нм
2. 2. Зерна меньших размеров

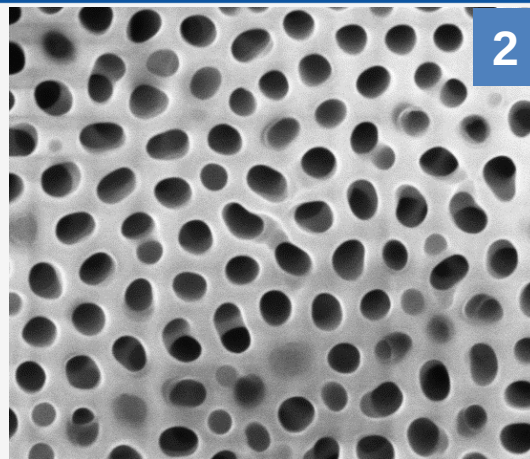
- ✓ Слой LT-GaAs имеет мозаичную структуру
- ✓ Размеры зерен перпендикулярно границе раздела лежат в пределах 45-90 нм, в направлении роста могут достигать значений 220-250 нм



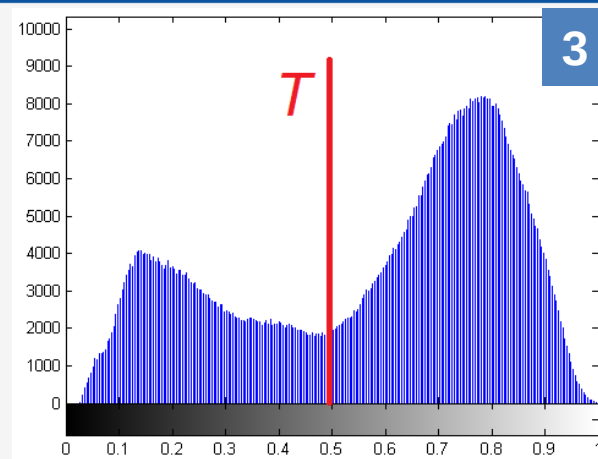
Чернышев И.В.: «Автоматизированное измерение координат и геометрических параметров пористой матрицы Al_2O_3 », 2015 г.



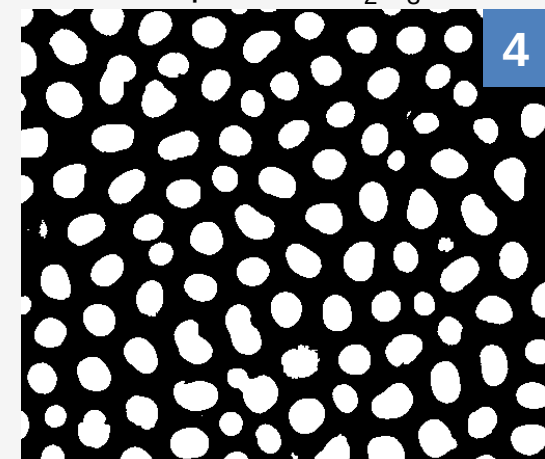
Схематическое изображения пористого Al_2O_3



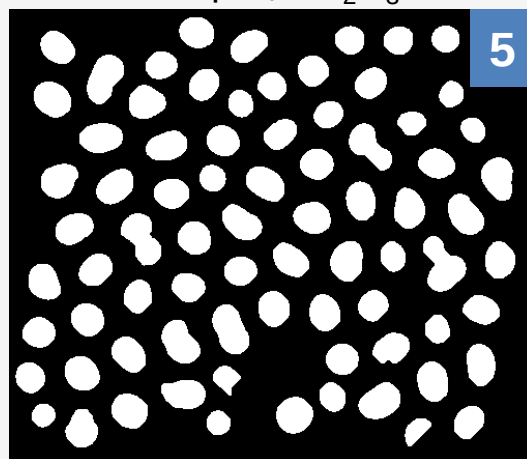
Изображение РЭМ пористой матрицы Al_2O_3



Гистограмма распределения интенсивности изображения



Сегментация пороговым преобразованием



Сегментация по морфологическим водоразделам

Название алгоритма	Средний диаметр поры, нм	СКО диаметра поры, нм
Сегментация по водоразделам	66	9
Сегментация пороговым преобразованием	61	10

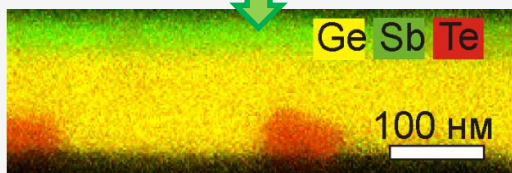
✓ Разработан эффективный алгоритм исследования морфологии пористых матриц Al_2O_3 и проведено его сравнение с пороговым преобразованием



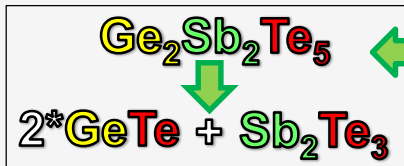
Зыбина Ю.С. «Исследование тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для устройств фазовой памяти методами электронной микроскопии», 2017 г.



Актуальность исследования

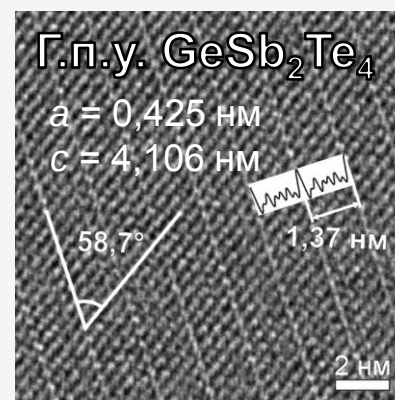
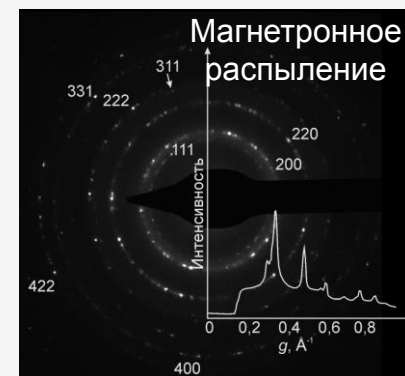
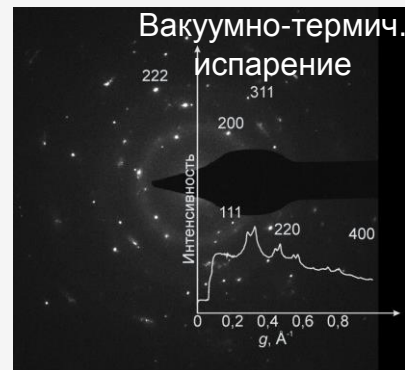
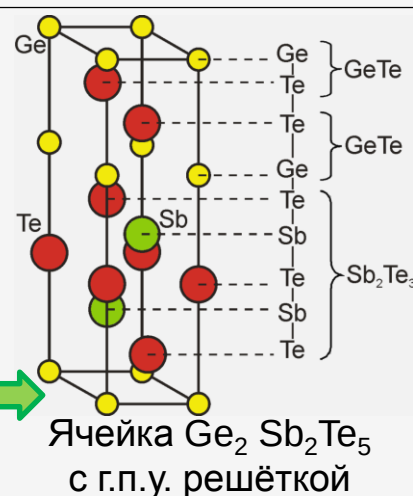


Выявление неоднородностей хим. состава плёнок в направлении роста

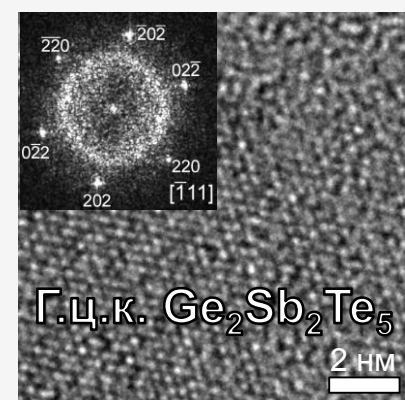


Дифракционный анализ:
отжиг плёнок приводит к формированию поликристаллич. г.ц.к. структуры $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Сравнение методов получения плёнок



Высокоразрешающая электронная микроскопия



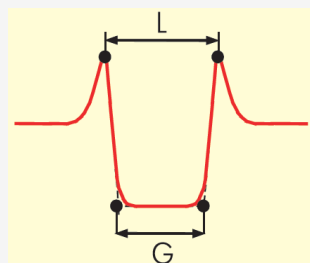
Выявление отдельных кристаллитов

✓ Установлена возможность формирования соединений GeSb_2Te_4 , $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ при среднем химическом составе плёнок, соответствующем стехиометрическому соотношению для $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$

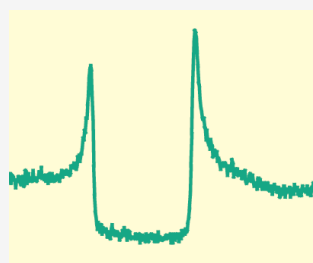
✓ Выявлено преимущество метода магнетронного распыления для приготовления плёнок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$



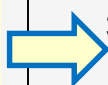
Шпакова Е.С. «Анализ геометрических параметров скрытых слоев пассивации проводников методами электронно-ионной микроскопии», 2017 г.



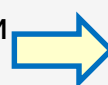
Эталонный
профиль



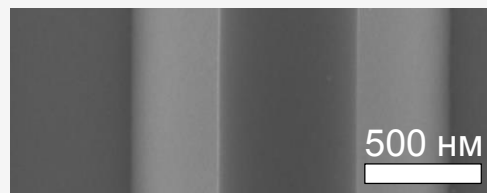
Реальный
профиль



Задача локализации
границ структур



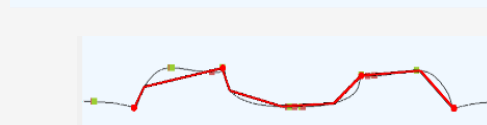
Применение компьютерного анализа
для повышения точности измерения
геом. параметров проводников на
поверхности и под слоем пассивации



Электронно-микроскопическое
изображение

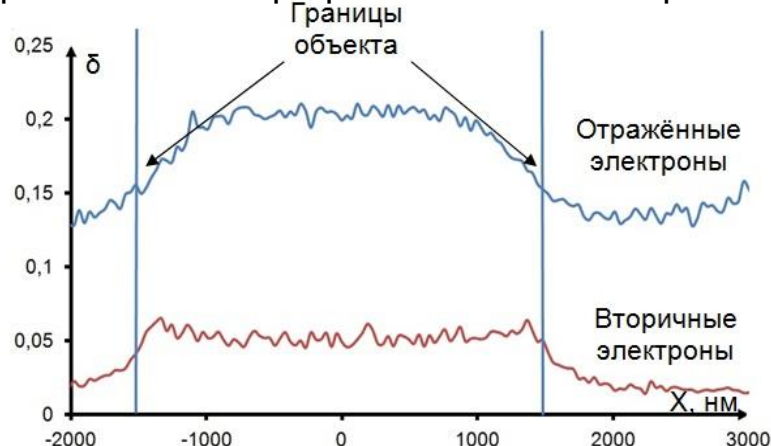


Усреднённый профиль с
локальными экстремумами



Применение генетического
алгоритма

Сравнительные графики эмиссии электронов



Изображение сечения,
сделанного с помощью
фокусированного ионного пучка

- ✓ Установлено, что генетический алгоритм позволяет повысить точность локализации границ тестовых структур
- ✓ Показано, что изображение проводников под слоем пассивации определяется сигналом обратно рассеянных электронов, имеющих малую энергии на поверхности образца из-за выхода с большой глубины