

Научная конференция НИИЯФ МГУ по итогам 2024 года



Разработка процессов атомнослоевого травления

Д.Г. Волошин, в.н.с., к.ф.-м.н.

Лаборатория физики плазмы и физических основ микро-технологии

Отдел микроэлектроники НИИЯФ МГУ

Введение

Результаты первого года гранта РФФ 23-91-06004

“Разработка процессов ALE” 2024 – 2026

Руководитель НИР: Рахимов А.Т.

Ответственные исполнители: Волошин Д.Г., Лопаев Д.В., Рахимова Т.В., Скурихин А.В., Шибанов Д.Р.

Участники НИР: Богданова М.А., Воронина Е.Н., Кропоткин А.Н., Манкелевич Ю.А., Палов А.П., Прошина О.В., Чукаловский А.А.

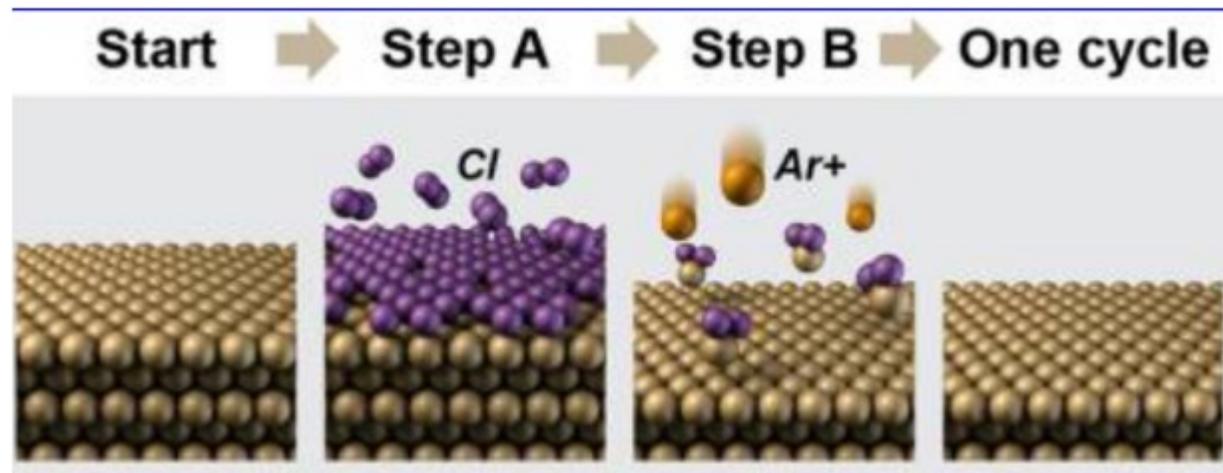
Подразделение: Лаборатория физики плазмы и физических основ микро-технологии

Объектом исследования являются технологии плазменного атомно слоевого травления оксида и нитрида кремния, а также нитрида галлия

Целью работы является разработка технологии и рецептов атомно слоевого травления SiO_2 , Si_3N_4 и GaN

Атомнослоеое травление

- необходимость прецизионной плазменной обработки материалов
- востребованы уже сейчас в России при создании энергонезависимой памяти FeRAM и ReRAM высокой плотности; в случае прецизионной подгонки параметров структур с точностью до отдельных атомных слоев; для получения «идеально» ровных поверхностей при создании GaN транзисторов



- Многостадийный цикл – модификация и удаление поверхностного слоя, а также дополнительные стадии

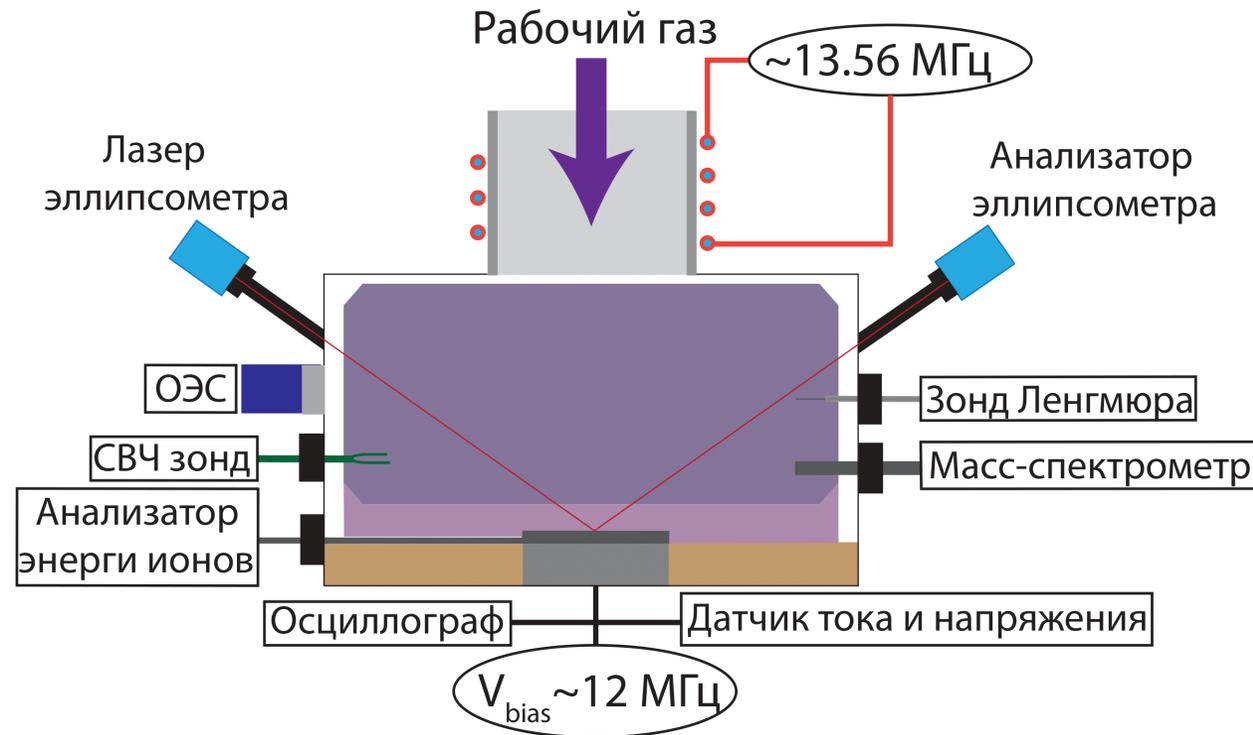
Первый год выполнения проекта

- оснащение лабораторного реактора комплексом диагностик
- измерение скоростей распыления исследуемых материалов

SiO₂, Si₃N₄, GaN

- разработка и создание прототипов экспериментальных ССР реакторов
- разработка модели плазмы
- разработка модели взаимодействия ионов и радикалов с поверхностью исследуемых материалов

Оснащение лабораторного реактора комплексом диагностик

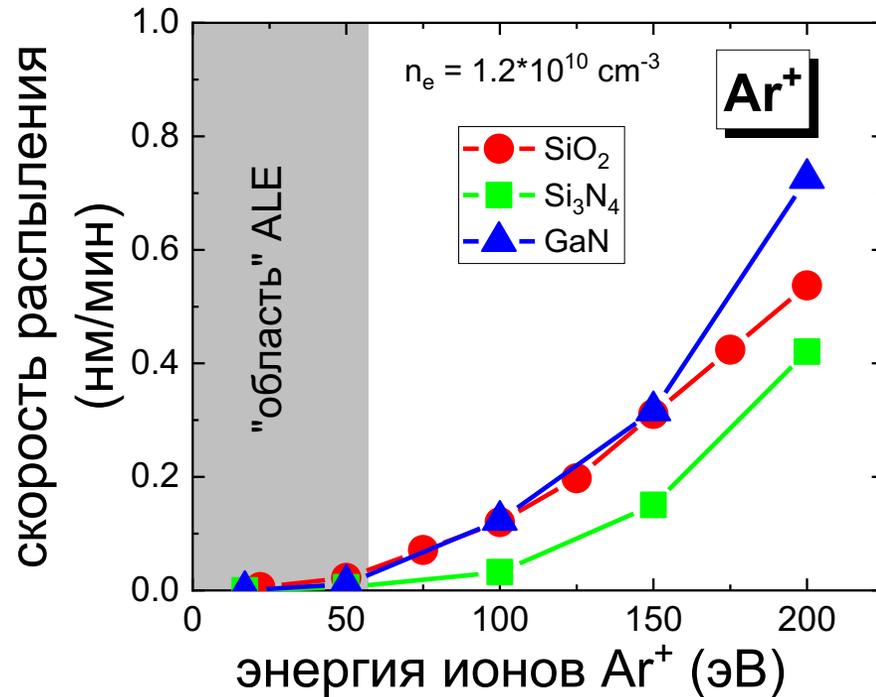


Проведено оснащение лабораторного ICP реактора атомно слоевого травления комплексом диагностик, позволяющих проводить in-situ измерения параметров плазмы и поверхности в ходе процесса ALE:

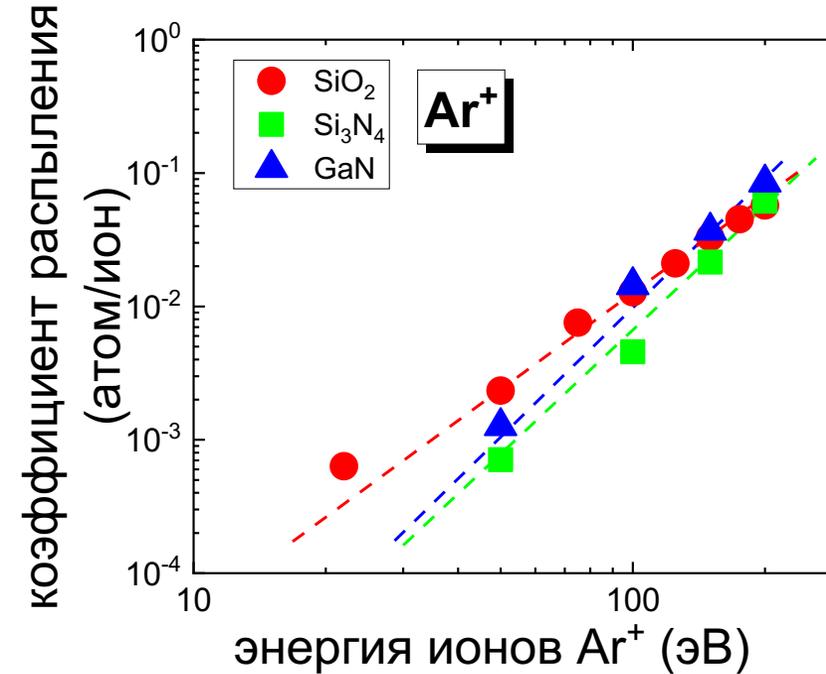
- оптическая эмиссионная спектроскопия,
- зонд Ленгмюра, СВЧ hairpin зонд
- in-situ эллипсометр

Измерение скоростей распыления исследуемых материалов (SiO_2 , Si_3N_4 , GaN)

С помощью in-situ лазерного эллипсометра проведены измерения скорости уменьшения толщины пленок SiO_2 , Si_3N_4 , GaN при их распылении



Скорости распыления SiO_2 , Si_3N_4 , GaN в зависимости от энергии бомбардирующих ионов. Серая область при малых энергиях отображает примерные границы энергий ионов для осуществления процессов ALE



Коэффициенты распыления SiO_2 , Si_3N_4 и GaN в плазме в зависимости от энергии ионов аргона, приходящих на поверхность материала при нормальном падении

Измерение скоростей распыления исследуемых материалов

Получены пороговые значения энергии распыления материалов:

SiO_2 : ~ 15 эВ; Si_3N_4 ~ 27 эВ; GaN ~ 25 эВ

Для избегания образования дефектов и влияния распыления на процесс ALE скорость распыления должна быть малой, чтобы не удалять даже доли монослоя за характерное время цикла ALE.

При характерной плотности плазмы $\sim 10^{10}$ см⁻³ это соответствует очень низким коэффициентам распыления, $< (1\div 3) \cdot 10^{-3}$.

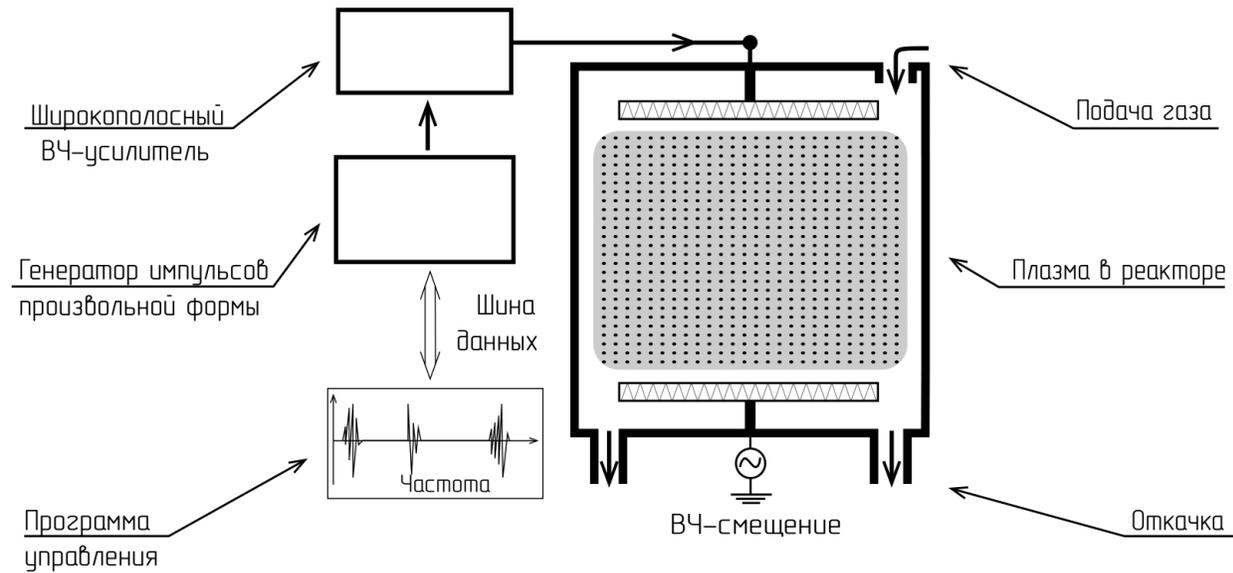
Возможное «окно работы» ALE:

$E_i < \sim 50$ эВ для SiO_2 ,

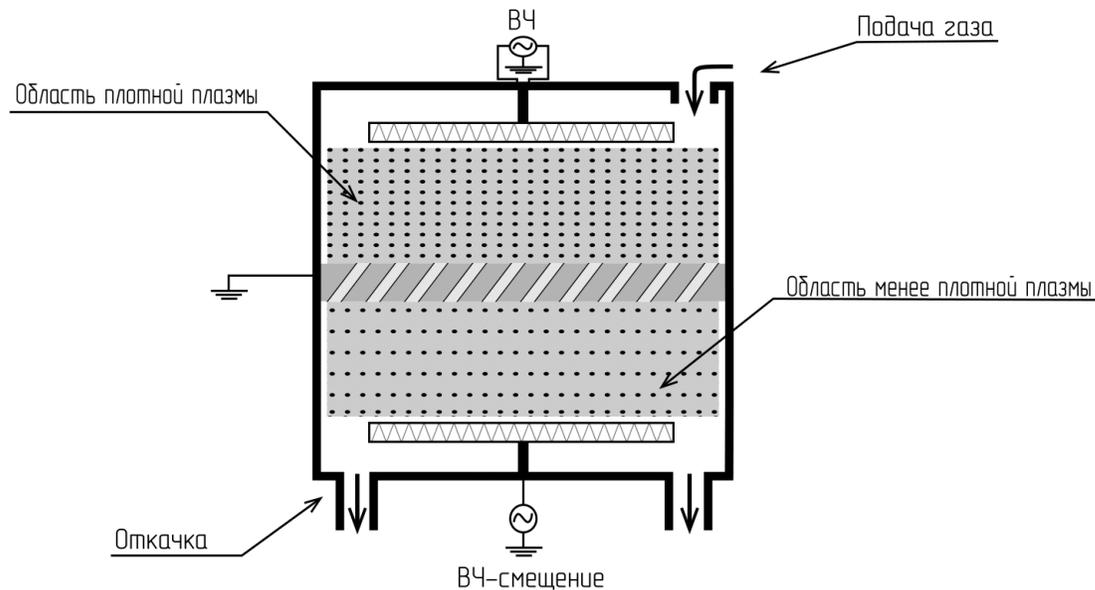
$E_i < \sim 70$ эВ для Si_3N_4

$E_i < \sim 60$ эВ для GaN.

Разработка и создание прототипов экспериментальных ССР реакторов



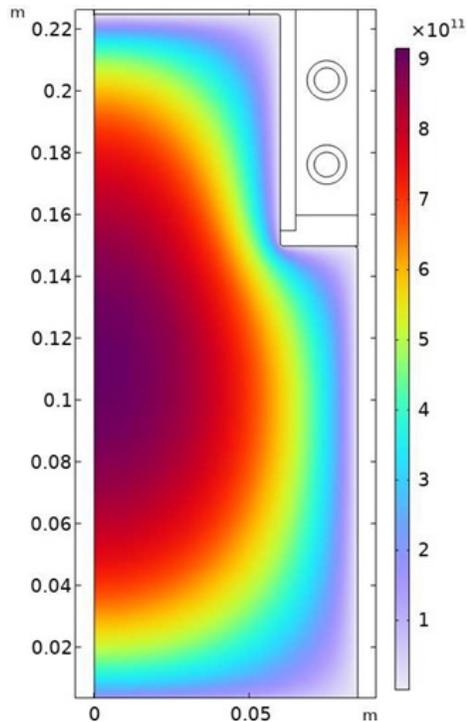
Лабораторный ССР реактор с импульсно-периодической плазмой, генерируемой субмикросекундными импульсами с частотой более 5 кГц, в том числе импульсами высокочастотного напряжения, для пластин 100 мм



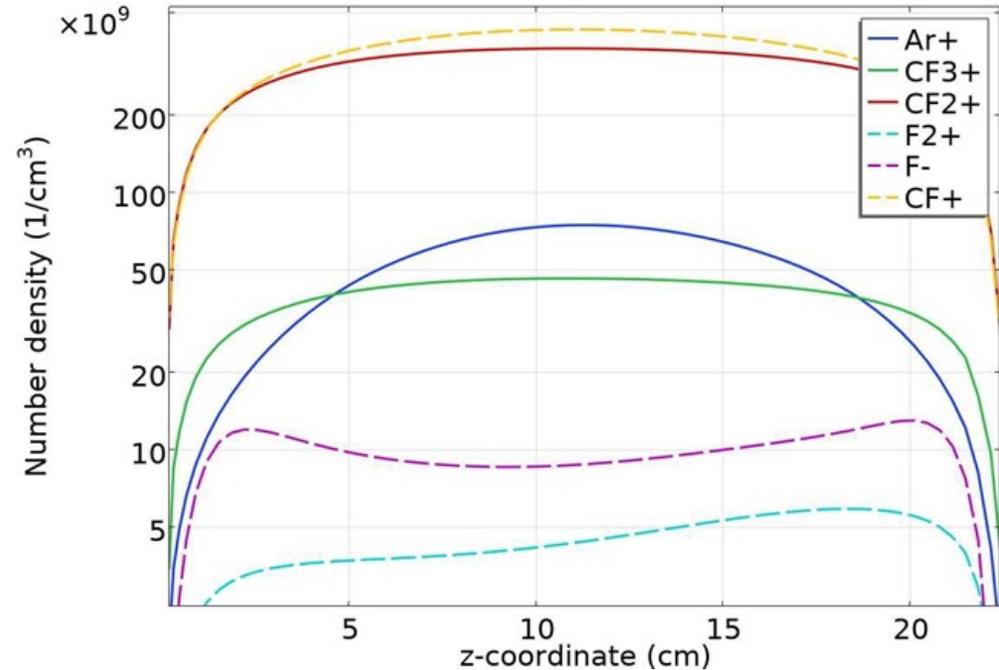
Лабораторный ССР реактор со второй down-stream камерой для пластин 100 мм

Разработка модели плазмы

гибридная модель ВЧ индукционного разряда в газах, которые предполагается использовать в циклах для ALE
Ar, C₄F₈, CHF₃, CF₄, NF₃, O₂, Cl₂ для описания потоков радикалов, ионов и их энергии



Распределение плотности электронов
в разряде Ar/C₄F₈

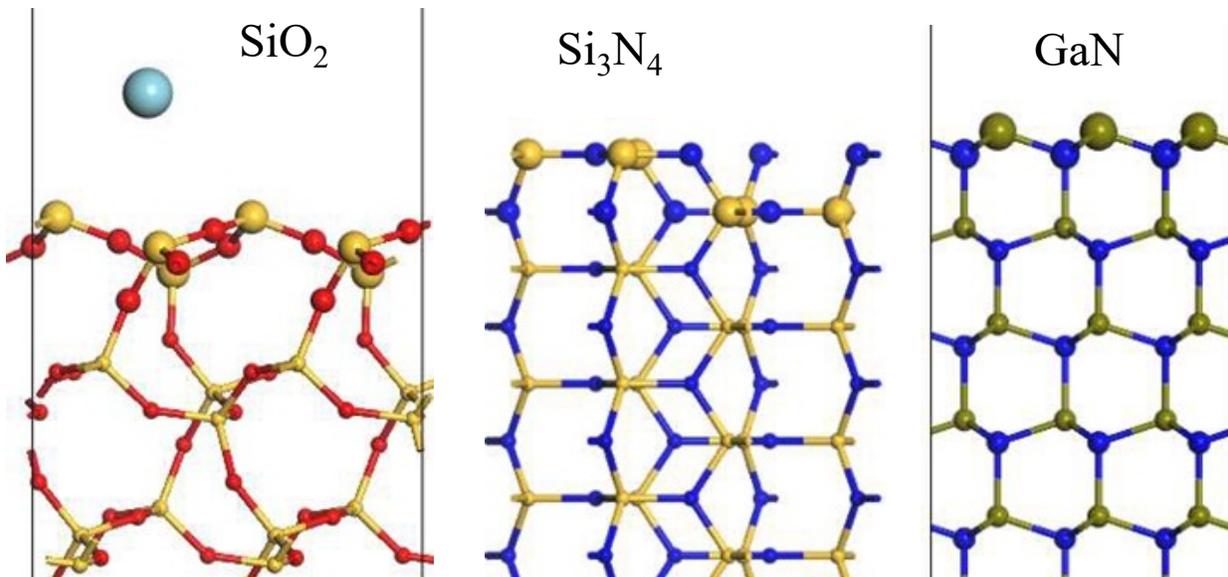


Аксиальные профили ионных компонент
на оси разряда

тестовые расчеты при следующих параметрах разряда: давление газа 10 мТорр,
вложенная в разряд мощность 800 Вт, смесь реакционного газа с 96% Ar

Разработка модели взаимодействия ионов и радикалов с поверхностью материалов

- воздействие ионов Ar низкой энергии (10–50 эВ) на поверхность материала - коэффициент физического распыления и пороговая энергия такого процесса
- воздействие ионов Ar и радикалов на пленку CF_x - механизмы образования дефектов и продуктов реакций
- воздействие продуктов реакций, инициируемых в пленке CF_x , на поверхность материала - изменение структуры приповерхностного слоя и механизмы его модификации;
- воздействие ионов Ar на модифицированный слой материала - механизмы его удаления



Использован квантовомеханический метод теории функционала плотности (DFT) и метод молекулярной динамики (МД) с использованием существующих эмпирических потенциалов (силовых полей) для исследуемых материалов.

Заключение

- Работы, проведенные на первом этапе Проекта, являются хорошей платформой для применения разработанного комплексного экспериментально-теоретического подхода для оптимизации ALE на следующих этапах проекта.
- На втором этапе Проекта предполагается тестирование разработанных моделей на экспериментальные данные и оптимизация **ALE SiO₂** и **Si₃N₄** по энергии ионов, составу используемых газов, скорости прокачки газа, температурного режима стенок камеры и подложки, дополнительных циклов, импульсной подачи реагентов и ВЧ смещения.