

Области применения платформы компании Comberry.

Оглавление

Вакумный кластер платформы Tempus.....	4
Основные области применения вакуумного кластера платформы Tempus.....	4
1. R&D и прототипирование в полупроводниковой индустрии (Combinatorial Material Science).....	4
1.1. Метод комбинаторного синтеза на одной пластине матрицы материалов (Material Libraries).....	4
1.2. Разработка High-k диэлектриков и затворов (Gate Stacks).....	5
1.2.1. Диоксид гафния (HfO ₂) и его силикаты — основа современных транзисторов.....	5
1.2.2. Оксид алюминия (Al ₂ O ₃) — управление интерфейсом и «капсуляция».....	6
1.2.3. Оксид титана (TiO ₂) — экстремальный High-k для суб-нанометровых затворов.....	6
1.3. Исследование новых материалов для межсоединений (Interconnects).....	7
1.3.1. Осаждение ультратонких слоёв TaN, TiN, WN и их комбинаций.....	7
1.3.2. Создание многослойных структур (TaN/Ta, TiN/Co, TaN/Ru) in-situ.....	8
1.3.3. Контроль микроструктуры и плотности плёнок.....	8
1.3.4. Комбинаторный поиск новых барьерных материалов.....	8
1.3.5. Исследование новых материалов: 2D-материалы, самоформирующиеся барьеры.....	8
2. Магнитная память (MRAM, Spintronics) и датчики.....	10
2.2. Синтез магнитных сплавов со-распылением (CoFeB, сплавы Гейслера).....	10
2.3. Сенсоры на гигантском (GMR) и туннельном (TMR) магнитном сопротивлении.....	10
3. Энергонезависимая память нового поколения (ReRAM, PCRAM).....	12
3.1. Резистивная память (ReRAM / Memristors).....	12
3.1.1. Управление стехиометрией оксидов (TiO _x , HfO _x , TaO _x , AlO _x).....	12
3.1.2. Комбинаторный поиск новых функциональных материалов.....	12
3.1.3. Инженерия интерфейсов «Электрод — Диэлектрик».....	12
3.1.5. Применение ионного источника для модификации слоев.....	13
3.2. Память на изменении фазового состояния (PCRAM).....	13
3.2.1. Синтез халькогенидных стекол (GeSbTe и родственные системы).....	13
3.2.2. Очистка контактов и управление интерфейсами.....	13
3.2.3. Реактивное напыление для подавления паразитных зёрен.....	14
4. Нанопотоника, метаматериалы и плоская оптика (Metalenses).....	15
4.1. Создание градиентных метаповерхностей.....	15
4.1.1. Формирование градиента химического состава и индекса рефракции.....	15
4.2. Напыление высокоиндексных бездефектных диэлектриков.....	15
5. Фотовольтаика.....	16
5.1. Перовскитные и тандемные солнечные элементы.....	16
5.1.1. Напыление слоёв переноса зарядов (ETL/HTL) на основе оксидов металлов.....	16
5.2. Высокоэффективные гетероструктурные солнечные элементы (HJT).....	17
5.2.1. Напыление прозрачных проводящих оксидов (TCO).....	17
6. Двумерные материалы (2D Materials) и нанoeлектроника.....	18
6.1. Барьеры Шоттки и контакты к 2D-материалам: формирование без разрушения моноатомного слоя.....	18
6.2. Тонкоплёночные газовые сенсоры на основе 2D-оксидов (TiO _x , WO _x).....	18
7. MEMS (Микроэлектромеханические системы).....	20
8. Биомедицинские наноустройства и лаборатории-на-чипе (Lab-on-a-Chip).....	21
8.1. Биосовместимые покрытия и имплантаты.....	21
8.1.1. Напыление ультратонких биосовместимых оксидов (TiO ₂ , Ta ₂ O ₅).....	21
8.1.2. Создание платформ для функционализации.....	21
8.2. Плазмонные биосенсоры (поверхностный плазмонный резонанс).....	22
8.2.1. Напыление ультратонких слоёв благородных металлов (Au, Ag) и их сплавов.....	22
8.2.2. Интеграция с микрофлюидными системами.....	22
9. Космическое приборостроение и радиационно-стойкая оптика.....	23
9.1. Радиационно-защитные покрытия датчиков видимого и ИК-диапазона.....	23
9.2. Отработка технологий для дальнего космоса и защита от атомарного кислорода (АО).....	23

10. Прецизионная тензометрия и датчики физических величин (MEMS-сенсоры).....	24
10.1. Ультравысоковакуумные датчики давления и деформации (тензорезисторы).....	24
10.2. Тонкоплёночные термодпары встроенного типа (in-situ thermocouples).....	25
11. Интегрированные пассивные устройства на кристалле (IPD – Integrated Passive Devices).....	25
11.1. Тонкоплёночные прецизионные резисторы (TFR).....	26
11.1.1. Реактивное напыление TaN с контролем стехиометрии.....	26
11.1.2. Со-распыление для создания силицида хрома (CrSi) и других композиций.....	26
11.2. MIM-конденсаторы (Metal-Insulator-Metal).....	26
11.2.1. Осаждение High-k диэлектриков для MIM-конденсаторов.....	27
11.2.2. Формирование MIM-стека в едином вакуумном цикле.....	27
11.2.3. Комбинаторный синтез для оптимизации диэлектриков.....	27
12. Тонкоплёночные твердотельные литий-ионные микроаккумуляторы и суперконденсаторы..	28
12.1. Напыление функционального стека батареи.....	28
12.2. Суперконденсаторы.....	28
13. Алмазная электроника и квантовые сенсоры (NV-центры в алмазе).....	29
14. Оптические нейроморфные вычисления и ИИ-чипы будущего (Integrated Photonics for AI).....	30
14.1. Напыление ультратонких плёнок GST для фотонных волноводов.....	30
14.2. Перспективные направления: свехрешётки и новые PCM-материалы.....	30
15. Высокоэнтропийные сплавы (High-Entropy Alloys, HEA).....	31
16. Электрохромные «умные» стёкла и покрытия для энергоэффективных зданий.....	32
17. Умные (smart) материалы и покрытия с памятью формы (Shape Memory Alloys).....	33
18. Молекулярная электроника и органические полевые транзисторы (OFET).....	34
19. Термоэлектрические материалы.....	35
20. Защитные и функциональные покрытия для топливных элементов и электролизёров (например, Pt, IrO ₂ , каталитические слои).....	36
21. Тонкоплёночные твердооксидные топливные элементы (TF-SOFC).....	37
Комбинаторная жидкостно-процессной установки (TEMPUS F-20).....	38
Основные области применения комбинаторная жидкостно-процессной установки.....	38
1. Технология межсоединений. Интеграция low-k и ultra-low-k диэлектриков.....	38
2. Очистка и подготовка поверхности (Surface Preparation & Cleaning).....	38
3. Модификация поверхностей и текстурирование. Формирование микротекстуры.....	38
4. Разработка новых химических материалов (R&D хим-поставщиков).....	38
5. Передовая литография и фоторезисты (Lithography & Patterning).....	39
6. Жидкостное осаждение материалов (Wet Deposition).....	39
7. Производство передовой 3D-логики и памяти (3D NAND & GAA).....	39
8. Новые типы памяти (MRAM, ReRAM, PCM).....	39
9. Дисплейные технологии и фотовольтаика (OLED / Solar Cells).....	39
10. Экологический инжиниринг («Зеленая химия»).....	39
11. Другие перспективные направления (потенциально любые жидкофазные процессы).....	39
Аналитическое оборудование.....	41
1. Спектрофотометр PerkinElmer Lambda 1050.....	41
2. Спектральный эллипсометр Woolam M-2000.....	41
3. ИК Фурье спектрометр Thermo Fisher Scientific Nicolet™ iS™50.....	41
4. Оборудование для измерений электрического сопротивления пластин и тонких плёнок RM3.AR	41
5. Потенциостат-гальваностат Elins P40X с модулем измерения электрохимического импеданса FRA-24M.....	41
6. Потенциостат-гальваностат Elins P-20X8.....	41
7. Течеискатель гелиевый масс-спектрометрический ТИ1-50.....	42
Химическая лаборатория.....	42
«Чистая комната».....	43

Вакумный кластер платформы Tempus.

1. атмосферная часть с двумя роботами и двумя столами на которых размещаются боксы на 25 пластин,
2. загрузочный модуль для перемещения пластин в вакуумную часть установки
3. трансферный модуль AP-30 - автоматический трансфер образцов без необходимости прерывания вакуума между технологическими процессами.
4. две PVD-камеры P-30, каждая из которых содержит 4 магнетронных пушки. Камеры обеспечивают создание изолированных друг от друга тонкопленочных образцов методом конденсации из газовой фазы (PVD) металлов, полупроводников и диэлектриков.

Возможности:

- мультикатодное исполнение с настраиваемым многоцелевым напылением (магнетронное распыление), магнетроны размером 2" и 3";
- выбор источников питания: DC, PDC, RF;
- чистка поверхности образцов ионно-плазменным методом (в одной из камер установлен ионный источник);
- программируемое напыление различных сочетаний слоев;
- регулируемое расстояние мишень (катод)-подложка (образец) от 155 до 345 мм;
- температура подложки до 430 °C;
- пластина расположена на столе, который вращается по двум осям - вокруг центральной и карусельное вращение, что позволяет создать до 64 напыляемых областей на одной пластине;
- гибкая настройка технологических параметров:
 - давление (от 1 до 100 мТорр), давление в каждой камере регулируется с помощью плавающей задвижки перед турбомолекулярным насосом независимо от выставленного потока газа;
 - поток газа (до 200 sccm),
 - мощность,
 - частота импульса,
 - скважность;
- три технологических газа: аргон, кислород, азот;
- напыляемый размер не более 50 мм;
- работает с образцами (подложками) диаметром до 300 мм;
- данная конфигурация позволяет работать практически с любыми материалами, будь то диэлектрики, полупроводники, металлы;
- со-распыление из нескольких источников;
- каждая камера может быть оснащена 4 различными материалами (итого 8 материалов). Комбинация этих материалов с применением различных режимов позволяет исследователю быстро создавать новые тонкопленочные покрытия.
- Автоматизация процесса исследования – напыление более сотен образцов в одном цикле с различными параметрами.

Основные области применения вакуумного кластера платформы Tempus.

1. R&D и прототипирование в полупроводниковой индустрии (Combinatorial Material Science).

1.1. Метод комбинаторного синтеза на одной пластине матрицы материалов (Material Libraries).

Современная полупроводниковая R&D сталкивается с задачей поиска оптимальных параметров напыления (состав, толщина, температура, давление) для получения материалов с заданными электрическими, оптическими или структурными свойствами. Классический подход «одна пластина – один параметр» требует десятков и сотен экспериментов, что занимает месяцы и не позволяет исследовать многомерное пространство параметров.

Платформа решает эту проблему, реализуя комбинаторный синтез in-situ на одной 300-мм пластине, за один цикл напыления на пластине формируется матрица из десятков изолированных тест-структур (материальных библиотек), каждая из которых имеет уникальные параметры осаждения:

- Градиент толщины – варьируя время экспозиции каждой точки можно создать клиновидные слои с непрерывным изменением толщины.
- Градиент состава – при со-распылении из нескольких магнетронов с одновременной модуляцией мощностей состав плёнки плавно меняется по поверхности, создавая библиотеку бинарных, тройных и более сложных систем.
- Градиент стехиометрии – для реактивных процессов (напыление в $\text{Ar}+\text{O}_2$ или $\text{Ar}+\text{N}_2$) можно менять парциальное давление газа в процессе сканирования, получая оксиды или нитриды с непрерывным изменением содержания кислорода/азота.

Такой подход позволяет за один экспериментальный цикл исследовать сотни комбинаций параметров, что ускоряет поиск оптимальных режимов в десятки раз.

Ключевые возможности платформы для комбинаторного синтеза:

- По четыре магнетрона на камеру позволяют проводить со-осаждения нескольких материалов, создавая многокомпонентные библиотеки.
- Реактивные газы (O_2 , N_2) с контролем потока дают возможность синтезировать оксиды, нитриды и оксинитриды прямо в процессе комбинаторного напыления.
- Нагрев стола до 430°C позволяет проводить термическую обработку in-situ после осаждения, что критично для кристаллизации High-k диэлектриков или активации легирующих примесей – и всё это в рамках одного вакуумного цикла.
- Ионный источник (Ar^+) обеспечивает очистку поверхности пластины перед напылением, удаляя естественный оксид и загрязнения, что особенно важно для получения чистых интерфейсов в тестовых структурах.
- Высокая точность позиционирования гарантирует воспроизводимость и изолированность зон, позволяя чётко разграничивать разные условия напыления на одной пластине.

Платформа является идеальным инструментом для ускоренного скрининга материалов и оптимизации технологических процессов в полупроводниковой индустрии, материаловедении и смежных областях.

1.2. Разработка High-k диэлектриков и затворов (Gate Stacks).

С переходом на технологические нормы 45 нм и ниже классический диоксид кремния (SiO_2 , $k=3.9$) перестал удовлетворять требованиям к токам утечки и управляемости транзистора. Туннелирование электронов через сверхтонкий (1–2 нм) слой SiO_2 вызывало недопустимые утечки и перегрев. Решением стало внедрение High-k диэлектриков – материалов с высокой диэлектрической проницаемостью, позволяющих увеличить физическую толщину изолирующего слоя при сохранении той же электрической ёмкости (эффективной оксидной толщины, EOT). Это снижает туннельный ток, сохраняя управляемость канала. Сегодня High-k стеки на основе HfO_2 являются стандартом для всех передовых транзисторов, включая FinFET и GAAFET.

Платформа предоставляет исследователям все необходимые инструменты для отработки новых составов и многослойных структур High-k затворов с точностью до долей ангстрема и контролем каждого этапа технологического процесса.

1.2.1 Диоксид гафния (HfO_2) и его силикаты — основа современных транзисторов.

Диоксид гафния ($k\approx 20-25$) по сравнению с SiO_2 ($k=3.9$)— это стандарт индустрии, который используется во всех процессорах (тех. процесс 45 нм) с 2007 года и заканчивая сегодняшними FinFET (вместо плоского кремниевого пути канал вытянули вверх, превратив в тонкий вертикальный гребень или «плавник» (от англ. *Fin*.) и GAAFET (Gate-All-Around Field-Effect Transistor) (тех процесс 3 нм, 2 нм). Чистый диоксид гафния имеет склонность к кристаллизации при термическом отжиге (что неизбежно при производстве процессоров), что создает границы зерен, по которым электроны начинают утекать, а диэлектрическая проницаемость становится неоднородной, поэтому необходимо создать технологию получения аморфного диоксида гафния. Для этого его легируют,

например, кремнием (повышает температуру кристаллизации материала, делая затвор стабильным при нагреве), также алюминием, который разрушает дальний кристаллический порядок гафния. Кроме того, легирование другими элементами (например, лантаном или иттрием) может дать прецизионное управление пороговым напряжением транзистора.

Возможности платформы для отработки HfO_2 и легированных систем:

- Со-распыление из нескольких магнетронов позволяет одновременно осаждать Hf, Si (или Al, La) и подавать кислород в качестве реактивного газа. Контролируя мощность на каждой мишени и парциальное давление O_2 , можно точно задавать стехиометрию оксида и концентрацию легирующей примеси (например, 5–15 ат.% Si) в широких пределах.
- Комбинаторный синтез с аппертурой даёт возможность создавать библиотеки с непрерывным градиентом состава $\text{Hf}_x\text{Si}_{1-x}\text{O}_2$ на одной пластине – это позволяет быстро определить оптимальную концентрацию легирующего элемента, при которой аморфность сохраняется при самых высоких температурах.
- Нагрев стола до 430°C позволяет проводить in-situ отжиг непосредственно после напыления, что критически важно для изучения начальных стадий кристаллизации и выбора оптимальной температуры осаждения.
- Ионный источник (Ar^+) применяется для очистки поверхности кремниевой подложки перед нанесением High-k слоя, удаляя естественный оксид и загрязнения, которые могут служить центрами зарождения дефектов.
- RF-режим позволяет распылять диэлектрические мишени (например, готовый HfO_2) для осаждения плотных, химически стехиометричных плёнок, если это требуется для специфических экспериментов.

1.2.2. Оксид алюминия (Al_2O_3) — управление интерфейсом и «капсуляция».

Оксид алюминия имеет чуть меньшее значение ($k \approx 9$), но обладает колоссальной запрещенной зоной (≈ 8.8 эВ) и высокой термической стабильностью. Так как при прямом контакте кремний со многими High-k материалами образует дефекты (ловушки зарядов) на границе раздел. Напыление ультратонких буферных слоев (0.5–1 нм) Al_2O_3 между кремнием и диоксидом гафния (или между High-k оксидом и металлическим затвором) блокирует диффузию атомов и фиксирует энергетические зоны.

Возможности платформы для нанесения Al_2O_3 буферных слоёв:

- Реактивное напыление Al в атмосфере $\text{Ar}+\text{O}_2$ – благодаря газовым контроллерам и независимой регулировке давления можно получать сверхгладкие и плотные плёнки Al_2O_3 с контролируемой стехиометрией.
- Последовательное осаждение in-situ – платформа позволяет без нарушения вакуума напылить буферный слой Al_2O_3 , затем слой HfO_2 , затем верхний слой Al_2O_3 (капсулирующий) в одной камере. Это исключает образование паразитных оксидов на интерфейсах и обеспечивает атомарную чистоту границ раздела.
- Ионный источник может использоваться для мягкой очистки поверхности Al_2O_3 перед осаждением металлического затвора, обеспечивая низкое контактное сопротивление.

1.2.3. Оксид титана (TiO_2) — экстремальный High-k для суб-нанометровых затворов.

Оксид титана обладает одним из самых высоких значений диэлектрической проницаемости, которая может достигать 50–80 и даже более в зависимости от кристаллической фазы — анатаз или рутил. Кроме того, у TiO_2 запрещенная зона $\approx 3\text{эВ}$, поэтому в чистом виде он пропускает ток утечки из-за чего его невозможно использовать как единственный изолятор затвора, но TiO_2 незаменим в сложных композитах. Тройные системы (например, TiHfO или AlTiO): Используя со-распыление можно найти материал, который будет обладать обоими свойствами – иметь колоссальное значение k и широкую запрещенную зону, блокируя токи утечки.

Возможности платформы для разработки тройных High-k систем:

- Со-распыление из нескольких магнетронов (например, Ti, Hf, Al) в присутствии кислорода позволяет создавать непрерывные библиотеки составов $\text{Ti}_x\text{Hf}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$ на одной пластине. Это

даёт возможность быстро найти область составов с оптимальным сочетанием k и ширины запрещённой зоны.

- Реактивное напыление с независимым контролем O_2 потока позволяет точно регулировать содержание кислорода, влияющее на кристаллическую структуру (анатаз/рутил) и, как следствие, на диэлектрические свойства.
- Нагрев до $430^\circ C$ позволяет изучать влияние термической обработки на фазовый состав и дефектность смешанных оксидов, что критично для прогнозирования поведения в реальных технологических циклах.
- Многослойные стеки – например, $Al_2O_3/TiO_2/HfO_2$ – могут быть сформированы in-situ, создавая сверхрешётки с искусственной модуляцией диэлектрической проницаемости, что открывает путь к тонкой настройке EOT и управлению токами утечки.

1.3. Исследование новых материалов для межсоединений (Interconnects).

Напыление ультратонких барьерных слоев (например, TiN, TaN, WN) толщиной 2–5 нм, предотвращающих диффузию меди в кремний. Ультратонкие барьерные слои из нитридов тугоплавких металлов толщиной **2–5 нм** — важный элемент современной микроэлектроники.

Медь (Cu) является основным материалом для межсоединений в современной микроэлектронике благодаря своей низкой электропроводности ($1.68 \text{ мОм}\cdot\text{см}$) по сравнению с алюминием. Однако у меди есть критический недостаток: она обладает высокой диффузионной подвижностью в кремнии и диэлектриках. Попадая в активные области транзисторов или в межслойные диэлектрики, медь создаёт глубокие энергетические уровни (ловушки), что приводит к:

- Резкому увеличению токов утечки.
- Деградации диэлектрических свойств изоляторов.
- Снижению надёжности и выходу годных изделий.

Кроме того, медь имеет плохую адгезию к большинству диэлектрических материалов (SiO_2 , low-k диэлектрики), что может приводить к расслоению и электромиграции.

Поэтому между медным проводником и окружающим диэлектриком необходим барьерный/подкладочный слой (diffusion barrier / liner), который выполняет две ключевые функции:

- Барьерная функция — предотвращает диффузию Cu в диэлектрик и подложку.
- Адгезионная функция — обеспечивает надёжную адгезию Cu к нижележащим слоям и служит затравкой (seed) для электрохимического осаждения (ECD) меди при заполнении дамасценных структур.

По мере перехода к техпроцессам 5 нм и ниже, полшаг межсоединений уменьшается до 20 нм и менее. В этих условиях барьерный слой должен становиться всё тоньше, чтобы оставить достаточно места для медного проводника (иначе сопротивление линии резко возрастает). Согласно современным требованиям, толщина барьерного слоя должна составлять 2–5 нм, а в перспективе — менее 1 нм.

Однако при уменьшении толщины ниже определённого предела возникают проблемы:

- Потеря сплошности — ультратонкие плёнки могут быть островковыми, с проколами и микротрещинами, через которые диффундирует медь.
- Диффузия по границам зёрен — даже в сплошной плёнке диффузия может идти по границам кристаллитов. Например, TiN толщиной менее 20 нм перестаёт быть эффективным барьером именно из-за диффузии по границам зёрен.
- Плохая адгезия — некоторые материалы (например, TaN) имеют хорошие барьерные свойства, но плохую адгезию к Cu.

Temprus предоставляет уникальные возможности для R&D в области барьерных слоёв BEOL:

1.3.1. Осаждение ультратонких слоёв TaN, TiN, WN и их комбинаций.

Платформа позволяет:

- Реактивное магнетронное распыление в атмосфере $Ar + N_2$ (азот подаётся через отдельную газовую линию, поток 1–100 sccm) позволяет синтезировать нитриды тугоплавких металлов непосредственно в камере.

- Контроль парциального давления азота для точного регулирования стехиометрии нитрида (например, TaN с содержанием азота ~50 ат.%, что даёт оптимальные барьерные свойства).
- Со-распыление Ta и Ti с регулируемым соотношением для создания твёрдых растворов (например, TaTiN) с улучшенными характеристиками.

1.3.2. Создание многослойных структур (TaN/Ta, TiN/Co, TaN/Ru) in-situ.

Одна из ключевых проблем при создании ультратонких барьерных слоёв — чистота интерфейсов. Любое окисление или загрязнение на границе раздела резко ухудшает барьерные свойства и адгезию.

Платформа позволяет:

- Последовательно напылять TaN (барьер) → Ta (адгезионный подслой) в одной камере без нарушения вакуума, что исключает образование естественного оксида на границе.
- Аналогично — создавать структуры TiN (барьер) → Co (линер) или TaN → Ru (линер), которые считаются перспективными для техпроцессов 5 нм и ниже.
- Напылять зародышевый слой Cu (Cu seed) поверх барьерного слоя для последующего электрохимического заполнения (ECD) дамасценных структур.

1.3.3. Контроль микроструктуры и плотности плёнок.

Качество барьерного слоя критически зависит от его микроструктуры:

- Плотность — чем плотнее плёнка, тем меньше путей для диффузии Cu.
- Размер зёрен — мелкозернистая структура (или аморфная) уменьшает диффузию по границам зёрен.
- Отсутствие проколов — даже микроскопические дефекты становятся каналами для диффузии.

Платформа позволяет:

- Варьируя рабочее давление управлять энергией осаждаемых частиц. Низкое давление даёт плотные, хорошо текстурированные плёнки; высокое — более пористые или островковые структуры.
- Использовать нагрев стола до 430°C для термической активации поверхностной диффузии, что способствует росту более плотных и однородных плёнок.
- Проводить ионную очистку поверхности перед напылением с помощью широколучевого ионного источника (Ar⁺), что удаляет естественный оксид и загрязнения с подложки, обеспечивая чистый интерфейс.

1.3.4. Комбинаторный поиск новых барьерных материалов.

Одна из главных R&D-задач — поиск альтернатив TaN/Ta, которые можно масштабировать до толщин < 3 нм.

Платформа позволяет:

- Создавать библиотеки составов на одной 300-мм пластине с непрерывным градиентом концентраций (например, Ta_xTi_{1-x}N или Ta_xRu_{1-x}N).
- Исследовать влияние легирования (например, добавка Si в TaN или TiN для подавления кристаллизации и улучшения барьерных свойств).
- Быстро скринить барьерные свойства (термическую стабильность, диффузию Cu, адгезию) на массиве тестовых структур.

1.3.5. Исследование новых материалов: 2D-материалы, самоформирующиеся барьеры.

В качестве альтернативы традиционным нитридам активно исследуются:

- 2D-материалы (графен, MoS₂) с потенциальной толщиной < 1 нм.
- Самоформирующиеся барьеры на основе легирования меди (например, Cu(Mn) или Cu(Al)), где легирующий элемент сегрегирует на границу раздела, образуя тонкий оксидный или силицидный слой.

Платформа позволяет:

- Напылять ультратонкие слои металлов (Mn, Al) поверх Cu и исследовать процесс самоформирования барьера при термическом отжиге (до 430°C in-situ).
- Осаждать тонкие слои дихалькогенидов переходных металлов (MoS₂, WS₂) с помощью RF-магнетронного распыления.

2. Магнитная память (MRAM, Spintronics) и датчики.

Спинтронные устройства (MRAM, датчики магнитного поля) требуют формирования многослойных сверхрешёток из чередующихся ферромагнитных металлов, немагнитных прослоек и диэлектрических туннельных барьеров с толщинами отдельных слоёв в диапазоне 0.5–5 нм. Работоспособность таких структур критически зависит от атомарной гладкости интерфейсов, отсутствия межслойной диффузии и точной стехиометрии магнитных сплавов. Платформа предоставляет возможность для R&D-отработки полного стека MTJ (магнитный туннельный переход) – от буферных слоёв до верхних контактов – в рамках единого вакуумного цикла.

2.2. Синтез магнитных сплавов со-распылением (CoFeB, сплавы Гейслера).

Классический рабочий слой для MTJ — это аморфный сплав кобальт-железо-бор (CoFeB). Бор необходим для сохранения аморфной структуры пленки при напылении, чтобы при последующем отжиге она кристаллизовалась строго эпитаксиально по решетке MgO.

Платформа позволяет:

- Получать CoFeB методом со-распыления из нескольких магнетронов с мишенями Co, Fe и B (или использовать готовые сплавные мишени, но со-распыление даёт большую гибкость).
- Контролировать мощность на каждой мишени для задания атомной доли Co, Fe и B.
- Комбинаторный метод, позволяющий создать на одной 300-мм пластине библиотеку составов $\text{Co}_x\text{Fe}_y\text{B}_{1-x-y}$ с непрерывным градиентом концентраций всех трёх элементов. Это даёт возможность быстро определить оптимальный состав.

Аналогичным образом могут быть синтезированы сплавы Гейслера (например, Co_2FeSi , Co_2MnSi) – перспективные материалы для спинтроники с высокой спиновой поляризацией. Со-распыление из трёх мишеней (Co, Fe/Mn, Si) с контролем стехиометрии позволяет создавать эти сложные межметаллические соединения прямо на подложке.

2.3. Сенсоры на гигантском (GMR) и туннельном (TMR) магнитном сопротивлении.

В дополнение к памяти, спинтронные датчики (спин-вентили) находят широкое применение в автомобильной электронике (датчики угла поворота, ABS, ESP), промышленной робототехнике, потребительской электронике (электронные компасы) и биомедицине. Структуры GMR (ферромагнетик / немагнитный металл (Cu) / ферромагнетик) и TMR (ферромагнетик / MgO / ферромагнетик) требуют аналогичного контроля толщин и чистоты интерфейсов.

Платформа позволяет решать ключевые задачи при разработке датчиков:

- Напыление ультратонкой медной прослойки (1.5–3.0 нм) для GMR-вентилей – критично, чтобы слой Cu был сплошным и бездефектным. Регулируя давление (например, 2–5 мТорр), можно добиться высокой плотности плёнки и минимального рассеяния электронов.
- Создание высокочувствительных TMR-датчиков – используется структура CoFeB / MgO / CoFeB, аналогичная MTJ, но здесь верхний слой делают «свободным» (магнитомягким), изменяющим намагниченность под действием внешнего поля. Со-распыление CoFeB с добавками Ni (пермаллой) или B позволяет точно настроить магнитомягкие свойства.
- Напыление фиксирующих антиферромагнитных слоёв (IrMn, PtMn) – для создания опорного слоя датчика. Платформа позволяет осаждать IrMn или PtMn методом со-распыления (Ir+Mn, Pt+Mn) с контролем стехиометрии и проводить in-situ отжиг при 300–350 °C для активации антиферромагнитной фазы.
- Ионный источник применяется для очистки поверхности перед напылением магнитных слоёв, что снижает шум и улучшает стабильность характеристик датчиков.
- Комбинаторный метод позволяет быстро исследовать влияние толщины каждого слоя (буферного, барьерного, магнитного) на магниторезистивный отклик, создавая библиотеки структур на одной пластине и ускоряя оптимизацию.

Платформа предоставляет мощный инструмент для R&D-скрининга материалов и толщин слоёв GMR и TMR-структур (спин-вентилей). Она позволяет в одном вакуумном цикле формировать библиотеки с градиентом состава и толщины, проводить ионную очистку и in-situ отжиг. Полученные образцы могут быть использованы для быстрой оценки магниторезистивного эффекта

с помощью специализированного измерительного оборудования, что ускоряет оптимизацию многослойных стеков для последующего масштабирования на другие установки.

3. Энергонезависимая память нового поколения (ReRAM, PCRAM).

Традиционная флэш-память приближается к своим физическим пределам масштабирования, и индустрия активно ищет альтернативные принципы хранения информации. Два наиболее перспективных направления – резистивная память (ReRAM) и память с изменением фазового состояния (PCRAM) – основаны на обратимом изменении электрического сопротивления активного слоя под действием внешних импульсов. Оба типа устройств имеют простую ячейку (металл – функциональный слой – металл), но их работа критически зависит от стехиометрии, дефектности, кристаллической структуры и чистоты интерфейсов функциональных материалов. Платформа предоставляет возможность для отработки всех технологических этапов создания таких ячеек – от синтеза многокомпонентных оксидов и халькогенидов до формирования многослойных наноламинатов и суперрешёток – в условиях сверхвысокого вакуума с контролем температуры и состава каждого слоя.

3.1. Резистивная память (ReRAM / Memristors).

Ячейка ReRAM представляет собой структуру металл – диэлектрик – металл (МДМ), где диэлектрический слой (обычно оксид переходного металла – TiO_x , HfO_x , TaO_x , AlO_x) толщиной 5–15 нм служит активной средой. Под действием электрического импульса в этом слое контролируемо образуются или разрушаются проводящие филаменты из вакансий кислорода (или ионов металла), что обратимо переключает ячейку между состояниями высокого (логический «0») и низкого (логическая «1») сопротивления. Мемристоры также имитируют синаптическую пластичность мозга, позволяя плавно менять сопротивление (аналоговое запоминание), что делает их ключевым элементом нейроморфных процессоров для ИИ.

3.1.1. Управление стехиометрией оксидов (TiO_x , HfO_x , TaO_x , AlO_x).

Для формирования филаментов оксидный слой должен быть намеренно нестехиометрическим – слегка обеднённым кислородом, чтобы содержать достаточное количество вакансий.

Платформа позволяет точно задавать степень окисления в процессе реактивного магнетронного распыления:

- Независимый контроль газовых потоков – варьируя парциальное давление кислорода можно непрерывно менять стехиометрию оксида в широких пределах – от металлического состояния до полностью окисленного.
- Регулируя давления в камере можно влиять на энергию осаждаемых частиц и плотность плёнки, что также сказывается на концентрации вакансий.
- Создавать градиентные слои по толщине – изменяя поток O_2 во время осаждения, можно сформировать плёнку с плавным градиентом стехиометрии: например, более кислородно-богатый слой у одного электрода и обеднённый у другого. Такие градиентные оксиды увеличивают стабильность циклов переключения, локализуя зону формирования филамента в области с оптимальной концентрацией вакансий.

3.1.2. Комбинаторный поиск новых функциональных материалов.

Современные исследования ReRAM направлены на поиск многокомпонентных оксидов (например, диоксида гафния, легированного алюминием или титаном), которые обладают меньшим током переключения и большим временем хранения данных.

Платформа позволяет:

- Со-распыление из нескольких магнетронов (например, Hf, Ti, Al) в реактивной атмосфере даёт возможность независимо задавать атомные доли каждого металла в оксиде.
- Комбинаторный синтез позволяет за один цикл напыления формировать библиотеку с непрерывным градиентом состава (например, $Hf_xTi_yAl_{1-x-y}O_2$). Это позволяет в одном эксперименте протестировать сотни композиций на переключающие характеристики, ускоряя поиск оптимального материала в десятки раз.
- RF-режим даёт возможность распылять диэлектрические мишени сложного состава (например, готовый легированный HfO_2) для сравнения с реактивно-напылёнными плёнками.

3.1.3. Инженерия интерфейсов «Электрод – Диэлектрик».

Работа мемристора критически зависит от материала электродов. Один электрод часто делают химически активным (например, Ti или Al), чтобы он взаимодействовал с кислородом из диэлектрика, а второй — инертным.

Платформа позволяет создавать полный МДМ-стек в едином вакуумном цикле:

- Напыление нижнего электрода (например, TiN, Pt или Ti) из соответствующих мишеней (металлических или керамических).
- Осаждение функционального оксида (реактивным или RF-методом) поверх электрода без паузы, исключая контаминацию.
- Напыление верхнего электрода (например, Pt или Au) – все слои формируются в одной камере, обеспечивая сверхчистые и воспроизводимые интерфейсы.
- Ионный источник (Ar^+) используется для очистки поверхности нижнего электрода перед нанесением оксида – удаление естественного оксида и адсорбированных загрязнений критически важно для получения качественного контакта и контролируемого формирования филаментов.

3.1.5. Применение ионного источника для модификации слоев.

Ионная бомбардировка (Ar^+) расширяет возможности управления свойствами ReRAM:

- Создание центров нуклеации – облучение поверхности нижнего электрода или уже напыленного оксида ионным пучком с контролируемой энергией и дозой позволяет искусственно внести дефекты решётки (вакансии, дислокации). Эти дефекты служат предпочтительными местами для зарождения филаментов, что уменьшает стохастический разброс параметров переключения.
- Модификация поверхностной энергии – ионное травление перед осаждением верхнего электрода может изменить его смачиваемость и адгезию, влияя на стабильность интерфейса.
- In-situ очистка – как уже упоминалось, ионный источник позволяет удалять загрязнения между этапами напыления без переноса пластины.

3.2. Память на изменении фазового состояния (PCRAM).

PCRAM использует обратимый фазовый переход халькогенидного стекла (обычно тройной сплав Ge-Sb-Te, GST) между аморфным (высокое сопротивление, логический «0») и кристаллическим (низкое сопротивление, логическая «1») состояниями под действием короткого теплового импульса. Ключевые R&D-задачи – контроль многокомпонентного состава, чистота интерфейсов с нагревательным элементом и подавление паразитной кристаллизации.

3.2.1. Синтез халькогенидных стекол (GeSbTe и родственные системы).

Платформа позволяет получать GST методом со-распыления из трёх DC-магнетронов с мишенями Ge, Sb и Te. Независимое управление мощностью на каждой мишени даёт возможность задавать атомные доли в широких пределах (например, $Ge_2Sb_2Te_5$ – классический состав, а также другие композиции с изменённым содержанием Ge для оптимизации температуры перехода).

Преимущества:

- Комбинаторный синтез с апертурой позволяет создавать библиотеку составов $Ge_xSb_yTe_{1-x-y}$ на одной пластине, быстро определяя композицию с максимальной скоростью переключения и наименьшим током сброса.
- Нагрев стола до $430^\circ C$ позволяет проводить in-situ отжиг для первичной кристаллизации (если требуется для исследования) или, наоборот, фиксировать аморфное состояние при низких температурах осаждения.

3.2.2. Очистка контактов и управление интерфейсами.

Качество интерфейса между халькогенидом и нагревательным элементом (обычно TiN или W) критично для минимизации контактного сопротивления и равномерного нагрева.

Платформа обеспечивает:

- Ионную очистку поверхности нижнего электрода перед напылением GST – обеспечивает атомарно-чистый контакт.

- In-situ осаждение всех слоёв (электрод – GST – защитный слой) без перерыва вакуума, что предотвращает повторное окисление и гарантирует низкое переходное сопротивление.
- Возможность использования реактивного напыления (в среде Ar+N₂) для осаждения барьерных слоёв из нитридов (TiN, TaN), которые одновременно служат нагревателем и диффузионным барьером.

3.2.3. Реактивное напыление для подавления паразитных зёрен.

В современных материалах PCRAM легирование малыми добавками кислорода или азота позволяет подавить рост паразитных кристаллитов, снижая токи переключения и повышая стабильность.

Платформа даёт возможность:

- Вводить реактивные газы (O₂, N₂) в процессе со-распыления GST, формируя оксинитридные или оксидные примеси, которые разупорядочивают структуру и увеличивают время сохранения аморфного состояния.
- Контролировать парциальное давление реактивного газа, что необходимо для воспроизводимого легирования на уровне 1–5 ат. %.

4. Нанопотоника, метаматериалы и плоская оптика (Metalenses).

С развитием технологий плоской оптики (метаповерхностей, металинз, градиентных фильтров) возникла потребность в создании оптических элементов с субволновым разрешением и управляемым фазовым профилем. Ключевые задачи включают формирование градиентных структур (по составу, толщине, показателю преломления), осаждение высокоиндексных диэлектриков с минимальными потерями и создание многослойных интерференционных покрытий. Платформа предлагает возможности для R&D в этой области.

4.1. Создание градиентных метаповерхностей.

Метаповерхности – это искусственные структуры с наноразмерными резонаторами, позволяющие управлять фазой, амплитудой и поляризацией света. Один из эффективных подходов – создание градиентных покрытий, где оптические свойства (показатель преломления, толщина) плавно меняются вдоль поверхности. Это используется для GRIN-линз, спектральных фильтров и миниатюрных спектрометров.

4.1.1. Формирование градиента химического состава и индекса рефракции.

GRIN-линзы, у которых показатель преломления плавно изменяется в поперечном направлении, позволяют создавать компактные оптические системы без искривлённых поверхностей. Для этого необходим непрерывный градиент состава многокомпонентных плёнок (например, смесей оксидов с разным n).

Платформа позволяет:

- Со-распыление нескольких магнетронов – используя мишени с разными материалами (например, SiO_2 ($n \approx 1.46$), TiO_2 ($n \approx 2.5$) и Ta_2O_5 ($n \approx 2.1$)), можно, модулируя мощность на каждом магнетроне создавать плёнку с непрерывным изменением соотношения компонентов по поверхности. Это приводит к плавному изменению показателя преломления вдоль заданного направления.
- Реактивное напыление с переменным парциальным давлением кислорода или азота позволяет дополнительно модулировать стехиометрию оксидов или нитридов, что также влияет на n и коэффициент экстинкции.
- Комбинаторный подход – за один цикл на одной 300-мм пластине формируется библиотека с градиентом состава и, соответственно, градиентом n . Это даёт возможность быстро определить оптимальную траекторию изменения состава для получения требуемого фазового профиля.

4.2. Напыление высокоиндексных бездефектных диэлектриков.

Для метаповерхностей видимого и ближнего ИК-диапазона критически важны материалы с высоким показателем преломления и нулевым поглощением (чтобы линза не грелась и не теряла свет). Магнетронное распыление позволяет осаждать плотные аморфные или поликристаллические пленки оксидов (TiO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5) и нитридов (Si_3N_4) с высокой однородностью и низкой шероховатостью, что обеспечивает минимальные потери на рассеяние и совместимость с плазмохимическим травлением для формирования резонансных элементов.

Платформа позволяет контролировать:

- Плотность и аморфность – благодаря возможности регулировать давление и мощность магнетронов, можно получать плотные плёнки с минимальной пористостью. Для TiO_2 , например, низкое давление (1–3 мТорр) даёт плотные аморфные или поликристаллические плёнки с низкими потерями на рассеяние. Нагрев стола до 430°C позволяет дополнительно контролировать кристаллическую фазу (анатаз или рутит), влияющую на n . А реактивное напыление – использование мишеней Ti, Hf, Ta в атмосфере $\text{Ar}+\text{O}_2$ с точным контролем парциального давления кислорода обеспечивает стехиометричный оксид без примесей. Для нитридов (Si_3N_4) применяется реактивный режим с N_2 .
- Однородность и шероховатость.

5. Фотовольтаика.

Солнечная энергетика является одним из наиболее динамично развивающихся направлений возобновляемой энергетике, и основным драйвером этого роста выступает постоянное повышение эффективности и снижение стоимости фотоэлектрических преобразователей. Наряду с классическими кремниевыми технологиями, стремительно набирают популярность перовскитные солнечные элементы (PSCs), которые за короткий срок достигли лабораторной эффективности 26.7%, а также тандемные структуры (перовскит/кремний), чей КПД уже превысил 34.6%. Однако ключевыми препятствиями на пути к коммерциализации остаются стабильность устройств (особенно перовскитных, быстро деградирующих на воздухе) и масштабируемость технологий производства. Платформа предоставляет инструмент для комбинаторного поиска новых материалов.

5.1. Перовскитные и тандемные солнечные элементы.

Эффективность перовскитных элементов критически зависит от качества транспортных слоёв заряда — электрон-транспортного (ETL) и дырочно-транспортного (HTL), которые обеспечивают экстракцию и транспорт фотогенерированных носителей, а также служат защитными барьерами от влаги и кислорода. Традиционно для HTL используются органические материалы (PEDOT:PSS, PTAA, SAM), однако они дороги, нестабильны и непригодны для массового производства. Платформа позволяет заменить их на неорганические оксиды металлов, осаждаемые методом магнетронного распыления, которые обладают высокой подвижностью носителей, превосходной стабильностью и совместимостью с крупномасштабным производством.

5.1.1. Напыление слоёв переноса зарядов (ETL/HTL) на основе оксидов металлов.

Платформа предоставляет исследователям все необходимые инструменты для синтеза высококачественных транспортных слоёв:

- **Дырочно-транспортный слой (HTL) на основе NiO_x.** Оксид никеля (NiO_x) является одним из наиболее перспективных неорганических HTL-материалов благодаря высокой подвижности дырок, превосходной химической стабильности, экономичности и совместимости с массовым производством.

Платформа позволяет осаждавать NiO_x реактивным магнетронным распылением из никелевой мишени в атмосфере Ar+O₂. Контролируя парциальное давление кислорода мощность на магнетроне, можно точно задавать стехиометрию оксида, влияющую на его оптические и электрические свойства. Ключевые параметры, такие как кристаллическая структура, морфология и размер зёрен плёнки NiO_x, могут быть оптимизированы варьированием давления в камере и температуры подложки. Особое внимание уделяется качеству интерфейса между NiO_x и перовскитным слоем; платформа позволяет проводить in-situ ионную очистку поверхности HTL перед нанесением перовскита для удаления загрязнений и улучшения согласования энергетических уровней.

- **Электрон-транспортный слой (ETL) на основе SnO₂, TiO_x, ZnO.** Для ETL в перовскитных элементах широко используются оксиды олова, титана и цинка.

Платформа позволяет синтезировать эти слои методом реактивного RF-магнетронного распыления из керамических мишеней в атмосфере Ar+O₂. Например, RF-распыление SnO₂ даёт возможность получать высококачественные, однородные и стабильные плёнки с превосходными транспортными свойствами даже при умеренных температурах осаждения. На основе таких ETL уже достигнута эффективность перовскитных элементов 17.10% и операционная стабильность свыше 200 часов.

Платформа обеспечивает высокую воспроизводимость и однородность ETL-слоёв по всей площади 300-мм пластины, что критично для масштабирования.

- **Комбинаторный синтез для поиска оптимальных составов.** Используя со-распыление из нескольких магнетронов (например, Ni, Mg, Li для легирования NiO_x или Sn, Ti, Sb для оптимизации ETL).

Платформа позволяет создавать на одной пластине библиотеки с непрерывным градиентом состава. Это даёт возможность быстро определить оптимальную концентрацию легирующей

примеси, обеспечивающую максимальную проводимость, минимальную рекомбинацию и идеальное согласование энергетических уровней с перовскитным абсорбером.

5.2. Высокоэффективные гетероструктурные солнечные элементы (НТ).

Гетероструктурные (НТ) солнечные элементы на основе кристаллического кремния с аморфными кремниевыми слоями являются одной из наиболее эффективных коммерческих технологий (КПД до 26.8%). Ключевым элементом НТ-элементов являются прозрачные проводящие оксиды (ТСО), которые выполняют две функции: служат прозрачным электродом для сбора тока и одновременно работают как антибликовое покрытие, уменьшая отражение света.

5.2.1. Напыление прозрачных проводящих оксидов (ТСО).

Наиболее распространёнными ТСО-материалами являются ITO (оксид индия-олова, $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$) и AZO (оксид алюминия-цинка, $\text{ZnO}:\text{Al}$). Эти материалы обладают уникальным сочетанием свойств: широкая запрещённая зона (> 3 эВ), обеспечивающая высокое пропускание в видимом диапазоне ($> 80\%$), и низкое удельное электрическое сопротивление (до $\sim 10^{-4}$ Ом·см).

Платформа позволяет осаждать ТСО-слои с превосходным контролем их свойств:

- Реактивное магнетронное распыление ITO и AZO. Для ITO используется мишень из сплава In/Sn (или керамическая ITO) в атмосфере Ar с контролируемой добавкой O_2 . Для AZO — мишень из Zn/Al в атмосфере $\text{Ar}+\text{O}_2$. Подача кислорода позволяет точно регулировать стехиометрию оксида, что напрямую влияет на концентрацию свободных носителей, подвижность и прозрачность.
- RF-режим используется для распыления керамических ТСО-мишеней (например, готового ITO или AZO), что даёт возможность получать плёнки с заданной стехиометрией без сложного контроля реактивных газов.
- Контроль кристаллической структуры и электрических свойств. Варьируя температуру подложки (от комнатной до 430°C) и рабочее давление, можно управлять кристаллизацией ТСО-плёнок. Для ITO повышение температуры подложки улучшает кристалличность и снижает удельное сопротивление за счёт активации донорной примеси Sn. Для AZO существует оптимальный температурный интервал ($250\text{--}400^\circ\text{C}$), в котором достигается максимальная подвижность носителей (до $46 \text{ см}^2\cdot\text{В}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$).
- Со-распыление для оптимизации состава. Используя два магнетрона (например, ZnO и Al_2O_3 или In_2O_3 и SnO_2), можно создавать ТСО-слои с различной концентрацией легирующей примеси (для AZO — Al от 0.7 до 8.7 ат.%), быстро находя оптимальный состав, обеспечивающий наилучшее сочетание прозрачности, проводимости и стабильности.
- Многослойные ТСО-структуры. Платформа позволяет осаждать многослойные стеки типа ТСО/Ag/ТСО, которые обеспечивают рекордно низкое листовое сопротивление при сохранении высокой прозрачности, что особенно важно для крупноформатных НТ-элементов.

6. Двумерные материалы (2D Materials) и наноэлектроника.

Графен, дихалькогениды переходных металлов (TMDC) — MoS_2 , WS_2 , WSe_2 , а также другие слоистые материалы с гетероструктурами, образованными слабыми ван-дер-ваальсовыми связями, стали одним из самых интенсивно развивающихся направлений в физике и материаловедении. Эти материалы демонстрируют уникальные электронные, оптические и механические свойства: от рекордной подвижности носителей в графене до прямой запрещённой зоны в монослое MoS_2 , что открывает перспективы для создания транзисторов нового поколения, гибкой электроники, сверхчувствительных датчиков и оптоэлектронных устройств.

Однако интеграция 2D-материалов в реальные приборные структуры сталкивается с серьёзными вызовами. Традиционные методы литографии и осаждения, хорошо зарекомендовавшие себя в полупроводниковой индустрии, часто оказываются слишком «грубыми» и разрушительными для моноатомных слоёв. Платформа предлагает возможности для решения ключевых задач наноэлектроники на основе 2D-материалов, обеспечивая поиск подходящих режимы осаждения.

6.1. Барьеры Шоттки и контакты к 2D-материалам: формирование без разрушения моноатомного слоя.

Формирование надёжных омических контактов к 2D-материалам — одна из главных проблем на пути к созданию электронных устройств на их основе. При напылении металлов на графен или MoS_2 в стандартном магнетроне происходит интенсивная бомбардировка поверхности высокоэнергетическими частицами (в первую очередь, отражёнными атомами аргона). В результате в моноатомном слое возникают многочисленные дефекты, что приводит к аморфизации структуры, резкому падению подвижности носителей и формированию высокого контактного сопротивления.

Платформа позволяет осуществить:

- **Оптимизацию соотношения давления и расстояния «мишень–подложка».** Наиболее критичный параметр для сохранения целостности 2D-материала при магнетронном напылении — это произведение давления на расстояние (pd-произведение). Исследования показывают, что при низком pd-произведении (например, 8.2 Па·см) напыление металла вызывает значительные дефекты в графене. Однако при увеличении pd-произведения до 82.5 Па·см дефекты практически полностью исчезают. Механизм этого эффекта заключается в том, что при высоком давлении (и, соответственно, малой длине свободного пробега) высокоэнергетические атомы аргона успевают терминализироваться в газовой фазе за счёт многократных столкновений и не достигают подложки с энергией, достаточной для создания дефектов. Платформа, имея возможность варьировать рабочее давление в широком диапазоне и регулировать расстояние до подложки (155–345 мм), позволяет точно подобрать режим, при котором напыление металла не повреждает моноатомный слой.
- **Комбинаторный поиск оптимальных контактных металлов.** Выбор металла для контакта также критически важен. Традиционно используются дорогие металлы, такие как Au или Ag, но они не всегда обеспечивают наилучшие электрические характеристики. Платформа позволяет методом со-распыления и комбинаторного синтеза создавать на одной пластине библиотеки контактов из различных металлов (Ti, Al, Mo, Ag) и их комбинаций. Например, исследования показывают, что среди простых металлов Mo обеспечивает наименьшее контактное сопротивление к MoS_2 , что делает его перспективной альтернативой благородным металлам. Таким образом, за один эксперимент можно определить оптимальный материал и режим осаждения контактов для конкретного 2D-материала.

A In-situ ионная очистка перед нанесением контактов для удаления загрязнения, не повреждая моноатомный слой, что обеспечивает чистый интерфейс и минимальное контактное сопротивление.

6.2. Тонкоплёночные газовые сенсоры на основе 2D-оксидов (TiO_x , WO_x).

Оксиды металлов с двумерной структурой (или ультратонкие плёнки оксидов, проявляющие 2D-подобные свойства) являются одним из наиболее перспективных материалов для создания

высококочувствительных газовых сенсоров. Их работа основана на изменении электрического сопротивления при адсорбции молекул газа (H_2 , CO , NO_2 , NH_3) на поверхности. Ключевое преимущество таких материалов — гигантское изменение сопротивления даже при крайне малых концентрациях целевого газа за счёт высокой удельной поверхности и развитой дефектной структуры.

Платформа предоставляет возможности для отработки технологии синтеза таких сенсорных слоёв:

- **Напыление ультратонких слоёв TiO_x и WO_x .** Платформа позволяет осаждать слои оксидов титана и вольфрама толщиной 2–5 нм методом реактивного магнетронного распыления. Используя мишени Ti и W в атмосфере $Ar+O_2$ с контролируемым парциальным давлением кислорода, можно получать плёнки с заданной стехиометрией и дефектностью. Наличие PDC и RF-источников даёт возможность осаждать как чистые оксиды, так и их смеси (например, $W-Ti-O$) с точно контролируемым составом. Плёночные сенсоры на основе WO_3 , легированного Ti, демонстрируют улучшенную чувствительность и селективность благодаря подавлению роста зёрен и увеличению пористости.
- **Контроль морфологии:** от плотных до высокопористых плёнок. Газочувствительность оксидных слоёв напрямую зависит от их морфологии. Высокопористые плёнки с развитой поверхностью и нанокристаллической структурой обеспечивают максимальную площадь для адсорбции молекул газа, что приводит к значительному изменению сопротивления. Платформа позволяет управлять морфологией осаждаемых слоёв, варьируя рабочее давление и мощность магнетрона:
- **Низкое давление** даёт плотные, гладкие плёнки с минимальной шероховатостью, что может быть полезно для создания эталонных структур или защитных покрытий.
- **Высокое давление** приводит к росту пористых, столбчатых или островковых плёнок за счёт увеличения рассеяния осаждаемых частиц в газовой фазе. Именно такие структуры оптимальны для газовых сенсоров.
- **Кроме того, нагрев стола до $430^\circ C$** позволяет проводить in-situ отжиг для контролируемой кристаллизации и оптимизации размера нанозёрен, что также влияет на чувствительность и стабильность сенсоров.
- **Создание сенсорных матриц и мультисенсорных систем.** Платформа позволяет интегрировать процесс создания сенсора: от напыления нижних контактов (например, Pt или Au) до осаждения чувствительного слоя TiO_x/WO_x и формирования верхних электродов. Возможность последовательного осаждения in-situ без нарушения вакуума обеспечивает сверхчистые интерфейсы между чувствительным слоем и контактами, что критически важно для стабильности и воспроизводимости сенсорного отклика.
- **Комбинаторный подход** с использованием аппертуры позволяет создавать матрицы сенсоров с градиентом состава или толщины на одной пластине, что ускоряет поиск оптимальных параметров чувствительности к различным газам.

7. MEMS (Микроэлектромеханические системы).

Микроэлектромеханические системы (MEMS) являются ключевыми компонентами микрозеркал в оптических коммутаторах и датчиков движения. Работоспособность и надёжность этих устройств критически зависят от качества функциональных плёнок, а также от управления внутренними механическими напряжениями в металлических и диэлектрических слоях, осаждаемых на подвижные кремниевые мембраны для MEMS-актюаторов и микрозеркал.

Микрозеркала и актюаторы.

MEMS-актюаторы (для элементов микросистемной техники, чувствительных к механическим напряжениям) содержат подвижные кремниевые мембраны или балки, на которые наносятся функциональные металлические и диэлектрические слои. Ключевое требование к этим слоям — низкий уровень внутренних механических напряжений или, наоборот, точно контролируемый градиент напряжений. Избыточное напряжение может привести к деформации мембраны, изменению её резонансной частоты, потере управляемости и, в конечном счёте, к разрушению устройства при циклических нагрузках.

Платформа предоставляет возможности исследования тонких плёнок для MEMS-приложений.

Платформа позволяет:

- Варьировать рабочее давление и мощности магнетрона для управления знаком и величиной напряжений (сжимающие / растягивающие).
- Нагревать стол до 430°C для in-situ отжига, способствующего релаксации напряжений.
- Создавать многослойные структуры с чередованием слоёв, имеющих разные уровни напряжений, что позволяет исследовать компенсацию напряжений в стеке.
- Проводить комбинаторный синтез для быстрого определения режимов осаждения, обеспечивающих минимальные остаточные напряжения.
- Проводить ионную очистку поверхности подложки перед напылением для улучшения адгезии и предотвращения отслаивания.

Полученные данные служат основой для выбора оптимальных материалов и режимов осаждения при разработке MEMS-устройств на других технологических линиях.

Также платформа позволяет осажда́ть широкий спектр материалов, используемых в MEMS для напыления функциональных слоёв на подвижные мембраны:

- Металлические слои (Al, Au, Pt, Ti, Mo) для электродов, зеркальных покрытий и контактов.
- Диэлектрические слои (SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3) для изоляции, пассивации и механической защиты.
- Пьезоэлектрические слои (AlN, AlScN) для пьезоактюаторов и пьезодатчиков.
- Все слои могут быть осажжены в едином вакуумном цикле без нарушения вакуума, что исключает загрязнение интерфейсов и обеспечивает высокую адгезию. Ионный источник позволяет перед напылением очистить поверхность кремниевой мембраны от естественного оксида, гарантируя надёжное сцепление функционального слоя с подложкой.

8. Биомедицинские наноразстройства и лаборатории-на-чипе (Lab-on-a-Chip).

Биомедицинская электроника и микросистемная диагностика стремительно развиваются, предлагая новые подходы к экспресс-анализу биологических образцов, персонализированной медицине и созданию имплантируемых устройств. Ключевым трендом является интеграция полупроводниковых технологий с биологическими интерфейсами – так называемые «лаборатории-на-чипе» (Lab-on-a-Chip), которые позволяют проводить сложные биохимические анализы непосредственно на поверхности кремниевого чипа. Успех таких систем определяется двумя факторами: способностью создавать биосовместимые, химически активные покрытия для иммобилизации биомолекул и клеток, а также возможностью формировать высокочувствительные оптические (плазмонные) или электрохимические датчики для детектирования маркеров заболеваний, вирусов и токсинов. Платформа позволяет исследовать влияние параметров напыления в обеих задачах – от осаждения ультратонких оксидных слоёв с контролируемой шероховатостью до напыления сверхгладких плёнок благородных металлов.

8.1. Биосовместимые покрытия и имплантаты.

Для биомедицинских приложений, таких как имплантируемые датчики и лаборатории-на-чипе, требуются поверхностные слои, сочетающие биосовместимость с возможностью последующей функционализации. Оксиды титана (TiO_2) и тантала (Ta_2O_5) являются перспективными материалами благодаря химической инертности, низкой токсичности и способности служить платформой для иммобилизации биомолекул.

8.1.1. Напыление ультратонких биосовместимых оксидов (TiO_2 , Ta_2O_5).

Платформа позволяет осаждать плёнки TiO_2 и Ta_2O_5 толщиной от единиц до сотен нанометров с высоким контролем их физико-химических свойств:

- Реактивное магнетронное напыление с использованием мишеней Ti и Ta в атмосфере $Ar + O_2$. Контроль парциального давления O_2 обеспечивает стехиометричный состав оксида, что критически важно для его биосовместимости и химической активности.
- RF-режим позволяет осаждать оксиды из керамических мишеней (TiO_2 , Ta_2O_5), что даёт возможность сравнивать свойства реактивно-напылённых и стехиометрических плёнок, а также получать плотные слои с минимальной дефектностью.
- Контроль шероховатости и смачиваемости. Для биологических приложений ключевыми параметрами являются средняя шероховатость поверхности (RMS) и краевой угол смачивания (гидрофильность). Платформа позволяет управлять этими характеристиками:
 - Варьируя рабочее давление – низкое давление даёт плотные, гладкие плёнки, а высокое – более шероховатые или пористые структуры, которые могут улучшать адгезию клеток.
 - Изменяя температуру подложки (до $430^\circ C$) – нагрев способствует поверхностной диффузии и уменьшает шероховатость, одновременно влияя на кристаллическую структуру (анатаз/рутил для TiO_2), что меняет поверхностную энергию и смачиваемость.
 - Ионный источник может использоваться для плазменной обработки поверхности оксида, что позволяет дополнительно регулировать гидрофильность.
- In-situ очистка перед напылением, обеспечивая надёжную адгезию оксидного покрытия на напыляемом участке.

8.1.2. Создание платформ для функционализации.

В едином вакуумном цикле могут быть осаждены ультратонкие буферные слои (Al_2O_3 , SiO_2) поверх основного оксида, обеспечивающие чистые интерфейсы и служащие основой для последующей химической пришивки биомолекул.

Со-распыление из двух магнетронов (Ti и Ta) позволяет создавать смешанные оксиды ($Ti_xTa_{1-x}O_2$) с промежуточными свойствами – например, оптимизировать диэлектрическую проницаемость или поверхностную энергию для конкретных биомолекул.

Комбинаторный синтез даёт возможность сформировать на одной пластине библиотеку оксидов с различным составом, что позволяет в одном эксперименте определить оптимальное покрытие для адгезии определённого типа клеток или иммобилизации конкретного антитела.

8.2. Плазмонные биосенсоры (поверхностный плазмонный резонанс).

Плазмонные биосенсоры, основанные на эффекте поверхностного плазмонного резонанса (SPR), являются одним из самых чувствительных методов детектирования биомолекулярных взаимодействий. Их работа основана на возбуждении плазмонов – коллективных колебаний электронов – в тонких плёнках благородных металлов (Au, Ag). При связывании целевого анализатора с иммобилизованным на поверхности металла рецептором меняется локальный показатель преломления, что вызывает сдвиг резонансного угла или длины волны. Чувствительность сенсора напрямую зависит от качества металлической плёнки: она должна быть сверхгладкой, однородной, без дефектов и с контролируемой толщиной (обычно 40–60 нм), обеспечивающей максимальный коэффициент экстинкции плазмонов.

8.2.1. Напыление ультратонких слоёв благородных металлов (Au, Ag) и их сплавов.

Платформа предоставляет возможности для осаждения высококачественных плазмонных плёнок:

- DC-магнетронное напыление Au и Ag из высокочистых мишеней.
- Управление шероховатостью – плазмонные потери сильно растут с увеличением шероховатости за счёт:
 - Выбора оптимального рабочего давления (обычно 1–3 мТорр для Au, что даёт плотные гладкие плёнки).
 - Нагрева подложки (до 430°C) – для Ag это критично, так как нагрев способствует рекристаллизации и уменьшению шероховатости, однако для Au нагрев до 200–300°C также улучшает качество.
 - Использования буферных слоёв (например, 1–2 нм Ti, Cr или Ni) для улучшения адгезии Au к кремнию или оксиду – эти слои также могут влиять на шероховатость и плазмонные свойства.
- Со-распыление и легирование – для расширения спектрального диапазона или улучшения химической стабильности можно осаждать сплавы AuAg, AuCu и другие. Платформа с несколькими магнетронами позволяет независимо контролировать состав сплава, создавая градиентные библиотеки для поиска оптимального соотношения, обеспечивающего максимальную чувствительность и минимальное затухание.
- Комбинаторный синтез – можно в одном эксперименте создать массив участков с разной толщиной Au, чтобы быстро определить оптимальную толщину для резонансной частоты детектируемого анализатора. Это особенно актуально при разработке мультиплексных сенсоров, где каждый пиксель должен быть настроен на свою длину волны.

8.2.2. Интеграция с микрофлюидными системами.

Лаборатории-на-чипе часто включают микрофлюидные каналы для доставки образцов к сенсорной области. Платформа позволяет осаждать не только сенсорные слои, но и диэлектрические барьеры (SiO_2 , Si_3N_4) для формирования каналов, а также металлические контакты для электрического считывания сигнала, обеспечивая полную интеграцию в рамках одного R&D-цикла.

9. Космическое приборостроение и радиационно-стойкая оптика.

Приборы, работающие на борту орбитальных спутников и межпланетных станций, подвергаются интенсивному облучению космическими лучами и тяжёлыми заряженными частицами, что требует специальных мер защиты.

Платформа позиционируется как исследовательский инструмент для ускоренной отработки составов, толщин и микроструктуры тонкоплёночных защитных покрытий, предназначенных для последующего применения в космической технике. Она позволяет в одном эксперименте создавать библиотеки образцов с контролируемым градиентом состава и толщины. Полученные данные служат основой для выбора оптимальных материалов и режимов.

9.1. Радиационно-защитные покрытия датчиков видимого и ИК-диапазона.

Нанесение ультратонких (несколько нанометров) плёнок тяжёлых тугоплавких металлов и их нитридов (Ta, TaN, W, WN) на входные окна кремниевых фотоматриц. Такие слои эффективно поглощают мягкое рентгеновское излучение и жёсткий ультрафиолет космического пространства, практически не снижая квантовую эффективность фотодетекторов.

Платформа позволяет осаждать защитные слои различной толщины и состава:

- Магнетронное напыление чистых металлов (Ta, W) из высокочистых мишеней.
- Реактивное напыление нитридов (TaN, WN) — контроль парциального давления позволяет синтезировать стехиометрические или субстехиометрические нитриды. Концентрация азота влияет на оптические свойства (коэффициент поглощения в УФ/рентгене) и механическую стабильность покрытия.
- Управление шероховатостью — для минимизации рассеяния света защитное покрытие должно быть сверхгладким. Низкое рабочее давление даёт плотные гладкие плёнки.
- Комбинаторный синтез для выбора оптимальной толщины и состава.
- Наносить сверхтонкий защитный слой (например, 1–2 нм SiO₂ или Al₂O₃) поверх металла в том же вакуумном цикле, предотвращая окисление без ухудшения пропускания.
- Использовать ионный источник для очистки поверхности подложки перед напылением, улучшая адгезию и исключая загрязнения, которые могли бы стать центрами поглощения.

9.2. Отработка технологий для дальнего космоса и защита от атомарного кислорода (АО).

При эксплуатации космических аппаратов на низких околоземных орбитах (высоты 200–700 км) одним из наиболее разрушительных факторов является не радиация, а атомарный кислород (АО) — высокоактивная форма кислорода, образующаяся в верхних слоях атмосферы под действием солнечного ультрафиолета.

Для защиты космических приборов и конструкций разрабатываются ультраплотные бездефектные барьерные покрытия на основе диоксида кремния (SiO₂) и оксида алюминия (Al₂O₃), которые эффективно блокируют взаимодействие АО с нижележащими материалами. Ключевые требования к таким покрытиям — высокая плотность, беспористость, отсутствие дефектов, контролируемая толщина (обычно 50–500 нм), а также устойчивость к циклическим температурным перепадам (от -150°C до +150°C), характерным для орбитальных условий.

Платформа предоставляет возможности для разработки и оптимизации защитных АО-барьерных покрытий:

- осаждение SiO₂ и Al₂O₃ методами реактивного и RF-магнетронного распыления,
- контроль стехиометрии и плотности плёнок,
- нагрев стола до 430°C для термической стабилизации покрытий и исследования их поведения в условиях циклических температурных перепадов,
- ионную очистку поверхности перед осаждением для улучшения адгезии и минимизации дефектов,
- комбинаторный метод для ускоренного поиска оптимальных составов и конфигураций многослойных защитных структур.

10. Прецизионная тензометрия и датчики физических величин (MEMS-сенсоры).

Микроэлектромеханические системы (MEMS) для измерения давления, ускорения, деформации и температуры являются ключевыми компонентами в автомобильной электронике (системы стабилизации, подушки безопасности), аэрокосмической отрасли (инерциальные навигационные системы), промышленной автоматизации и медицинских имплантатах. Основой большинства таких датчиков служат тензорезистивные слои, нанесённые на упругие кремниевые мембраны или балки: при механической деформации (растяжении или сжатии) электрическое сопротивление слоя изменяется, что позволяет с высокой точностью измерять давление, ускорение или деформацию. Для создания высокочувствительных и стабильных MEMS-сенсоров требуются ультратонкие (3–8 нм) плёнки материалов с высоким тензорезистивным эффектом (коэффициентом тензочувствительности, GF), таких как сплавы на основе хрома и никеля (NiCr, CrSi) или силициды металлов (PtSi, NiSi, CoSi₂), а также прецизионный контроль их микроструктуры, стехиометрии и уровня внутренних напряжений. Кроме того, всё более востребованным становится встраивание миниатюрных термопар непосредственно в полупроводниковые кристаллы и силовые модули для непрерывного мониторинга локального перегрева в реальном времени – задача, требующая формирования пар разнородных металлов (например, хромель–алюмель) с точно контролируемыми свойствами и чистыми интерфейсами.

Платформа предоставляет исследователям набор инструментов для решения этих задач:

- осаждение плёнок с контролем состава и микроструктуры,
- со-распыление для создания многокомпонентных сплавов и композиций,
- ионную очистку для обеспечения сверхчистых интерфейсов,
- комбинаторный метод для ускоренного поиска оптимальных материалов и режимов.

10.1. Ультравысоковакуумные датчики давления и деформации (тензорезисторы).

Напыление ультратонких (3–8 нм) слоёв металлов или полупроводников с высоким тензорезистивным эффектом (например, сплавы на основе хрома и никеля или силициды металлов). При механической деформации кремниевой мембраны MEMS-датчика (растяжении или сжатии) электрическое сопротивление слоя существенно изменяется, что позволяет измерять давление, ускорение или деформацию.

Платформа позволяет осаждать тензорезистивные слои с требуемой толщиной 3–8 нм и высоким контролем их свойств:

- Реактивное напыление для силицидов – при создании силицидных плёнок (например, CrSi) используется со-распыление Cr и Si с возможностью подачи малых количеств азота (N₂) для стабилизации аморфной структуры, что повышает тензочувствительность за счёт увеличения дефектности.
- RF-режим – для осаждения полупроводниковых материалов (например, Si) или керамических мишеней (например, готового силицида), если это необходимо для специфических экспериментов.
- Управление микроструктурой – размер зёрен, степень кристалличности и дефектность плёнки напрямую влияют на GF и стабильность. Варьируя рабочее давление и мощность магнетрона, можно контролировать энергию осаждаемых частиц и, как следствие, микроструктуру. Для тензорезисторов обычно стремятся к мелкозернистой или аморфной структуре, которая даёт более высокий GF за счёт увеличения границ зёрен, рассеивающих электроны.
- Нагрев стола до 430°C позволяет проводить in-situ отжиг после напыления, что стабилизирует микроструктуру, уменьшает концентрацию дефектов и снижает дрейф сопротивления со временем.
- Ионный источник (Ar⁺) используется для очистки поверхности кремниевой мембраны перед напылением, улучшая адгезию и предотвращая отслаивание при деформациях. Кроме того, мягкая ионная обработка может применяться для создания контролируемой шероховатости поверхности, что увеличивает адгезию и стабильность плёнки.
- Защитные покрытия – после осаждения тензорезистивного слоя платформа позволяет in-situ нанести тонкий (5–10 нм) слой диэлектрика (SiO₂, Si₃N₄, Al₂O₃) для защиты от

окисления и коррозии, что особенно важно для датчиков, работающих в агрессивных средах.

10.2. Тонкоплёночные термопары встроенного типа (in-situ thermocouples).

Термопары, основанные на эффекте Зеебека (возникновение термо-ЭДС при наличии градиента температуры между спаями двух разнородных металлов), являются основным инструментом для измерения температуры в экстремальных условиях. Миниатюризация электроники и рост удельной мощности силовых модулей (IGBT, MOSFET, SiC-транзисторы) требуют создания встроенных термопар непосредственно внутри полупроводникового кристалла или непосредственно на его поверхности вблизи горячих точек (hotspots). Это позволяет в реальном времени мониторить локальный перегрев, предотвращая тепловое разрушение и оптимизируя режимы работы устройства.

Платформа позволяет исследовать альтернативные комбинации материалов:

- Со-распыление различных металлов (Ni, Cu, Fe, Mo, W) создаёт библиотеки составов для поиска пар с более высокой термо-ЭДС и лучшей стабильностью.
- Тройные системы – использование трёх магнетронов даёт возможность создавать сплавы с оптимизированными свойствами (например, Ni-Cr-Al или Ni-Cr-Si) для термопар, работающих в экстремальных условиях (высокие температуры, радиация).

11. Интегрированные пассивные устройства на кристалле (IPD – Integrated Passive Devices).

В современных процессорах и высокочастотных модулях смартфонов дискретные резисторы, конденсаторы и индуктивности занимают значительную площадь, поэтому их всё чаще интегрируют непосредственно в слои медной металлизации чипа (BEOL, Back-End-Of-Line). Это позволяет уменьшить размеры, паразитные параметры и повысить надёжность.

Платформа позиционируется как исследовательский инструмент для ускоренного скрининга материалов, составов и режимов осаждения указанных функциональных слоёв. Она позволяет в одном эксперименте создавать библиотеки образцов с контролируемым градиентом состава, толщины и микроструктуры. Полученные данные служат основой для выбора оптимальных материалов и режимов.

11.1. Тонкоплёночные прецизионные резисторы (TFR).

Напыление слоёв нитрида тантала или силицида хрома, обладающих ультранизким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), что обеспечивает стабильность номинала в широком диапазоне температур.

11.1.1. Реактивное напыление TaN с контролем стехиометрии.

Платформа позволяет осаждать плёнки TaN методом реактивного магнетронного распыления с высоким контролем состава:

- Реактивное напыление из танталовой мишени в атмосфере Ar + N₂. Парциальное давление азота определяет стехиометрию плёнки: при низком потоке N₂ формируется субстехиометрический TaN_x (x<1), характеризующийся более низким сопротивлением и положительным ТКС; при увеличении потока образуется стехиометрический TaN (x≈1), имеющий более высокое сопротивление и близкий к нулю ТКС. При дальнейшем увеличении содержания азота образуется избыточный Ta₃N₅ с высоким сопротивлением, но с большим разбросом свойств.
- Точный контроль парциального давления. Платформа позволяет независимо регулировать поток N₂ и общее давление в камере через плавающую задвижку. Это даёт возможность точно установить рабочую точку, соответствующую минимальному ТКС. Обычно оптимальный режим находится в узком диапазоне потоков N₂, и стабильность газовых линий гарантирует воспроизводимость от пластины к пластине.
- Управление микроструктурой. Варьируя давление и мощность магнетрона, можно регулировать размер зёрен и плотность плёнки. Для получения низкого ТКС и высокой стабильности обычно стремятся к мелкозернистой структуре TaN с минимальной шероховатостью.
- RF-режим – при необходимости можно использовать RF-магнетронное распыление из керамической мишени TaN (стехиометрической) для получения плёнок с более стабильным составом без тонкой настройки реактивного режима.

11.1.2. Со-распыление для создания силицида хрома (CrSi) и других композиций.

CrSi (обычно в аморфной фазе) является альтернативой TaN, обеспечивающей ещё более низкий ТКС (до ±5 ppm/°C) при определённых составах.

Платформа позволяет создавать CrSi методом со-распыления из двух DC-магнетронов с мишенями Cr и Si:

- Независимый контроль мощностей позволяет задавать атомное соотношение Cr:Si. Оптимальный состав для минимального ТКС обычно находится вблизи эвтектической точки (~Cr₄₀Si₆₀), где плёнка является аморфной и термически стабильной.
- Реактивное напыление – добавление малых количеств азота в атмосферу Ar позволяет легировать CrSi азотом (CrSiN), что дополнительно снижает ТКС и увеличивает удельное сопротивление, давая больше свободы при проектировании резисторов.
- Комбинаторный синтез – можно создать на одной пластине библиотеку составов Cr_xSi_{1-x} с непрерывным градиентом концентрации, а также с варьированием содержания азота, что позволяет определить оптимальный состав для требуемого номинала и температурной стабильности.

11.2. MIM-конденсаторы (Metal-Insulator-Metal).

MIM-конденсаторы (металл–изолятор–металл) встраиваются в BEOL-слои для создания ёмкостей десятков пикофард на небольших площадях. Для достижения высокой удельной ёмкости (до 10–20 фФ/мкм²) используются диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (High-k) – оксиды титана (TiO₂, k≈50–80), алюминия (Al₂O₃, k≈9), гафния (HfO₂, k≈20–25), а также их наноламинаты и твёрдые растворы (например, HfTiO, AlTiO). Такие конденсаторы отличаются низким эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR) и высокой рабочей частотой, что критично для RF-приложений, а также для фильтрации питания в высокоскоростных цифровых схемах.

11.2.1. Осаждение High-k диэлектриков для MIM-конденсаторов.

Платформа позволяет синтезировать диэлектрические слои с контролем стехиометрии, толщины и кристаллической структуры:

- Реактивное напыление оксидов – для TiO_2 , HfO_2 , Al_2O_3 используются металлические мишени (Ti, Hf, Al) в атмосфере $\text{Ar}+\text{O}_2$. Точное управление парциальным давлением O_2 и мощностью магнетрона обеспечивает стехиометричный состав и высокую плотность плёнок.
- Платформа позволяет исследовать влияние температуры на свойства диэлектрика.
- RF-режим – для осаждения оксидов из керамических мишеней (например, готового HfO_2 или TiO_2) используется RF-магнетронное распыление. Это даёт возможность получать плёнки с фиксированной стехиометрией, что упрощает процесс и улучшает воспроизводимость.
- Со-распыление для создания сложных композиций – для получения твёрдых растворов (например, HfTiO , AlTiO) используются два или три DC-магнетрона с одновременным распылением соответствующих металлов в атмосфере O_2 . Это позволяет создавать библиотеки составов и оптимизировать диэлектрическую проницаемость и электрическую прочность.
- Наноламинаты – чередование ультратонких слоёв разных оксидов (например, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) позволяет создавать структуры с повышенной ёмкостью и сниженными токами утечки за счёт использования квантово-размерных эффектов и подавления кристаллизации.

11.2.2. Формирование MIM-стека в едином вакуумном цикле.

Для получения низкого ESR и высокой надёжности MIM-конденсаторов критически важна чистота интерфейсов между нижним электродом, диэлектриком и верхним электродом.

Платформа позволяет:

- In-situ осаждение всех трёх слоёв – сначала напыляется нижний электрод (например, TiN или TaN), затем диэлектрик (High-k), затем верхний электрод (например, Pt, TiN, Al) – всё в одной камере без нарушения вакуума. Это исключает окисление и загрязнение интерфейсов, обеспечивая низкое переходное сопротивление и стабильность ёмкости.
- Ионный источник для очистки поверхности электродов перед нанесением диэлектрика, что улучшает адгезию и уменьшает дефектность.
- Управление шероховатостью – гладкие поверхности электродов снижают токи утечки и улучшают пробивные напряжения.
- Нагрев стола – отжиг при $200\text{--}430^\circ\text{C}$ после осаждения всего стека позволяет стабилизировать диэлектрические свойства и уменьшить дефекты.

11.2.3. Комбинаторный синтез для оптимизации диэлектриков.

С помощью аппертуры и программируемого движения стола можно создать на одной пластине библиотеку структур с разными диэлектриками, разными толщинами и разными комбинациями электродов.

Это позволяет быстро оценить:

- Влияние состава на k и токи утечки.
- Оптимальную толщину для заданной ёмкости и рабочего напряжения.
- Совместимость материалов для минимизации паразитных эффектов.

12. Тонкопленочные твердотельные литий-ионные микроаккумуляторы и суперконденсаторы.

Для автономных медицинских имплантатов, смарт-карт, микророботов и других ультракомпактных устройств требуются микроскопические источники питания, способные интегрироваться непосредственно на кремниевый чип на этапе обратной металлизации (BEOL-техпроцесс). Такие источники должны быть полностью твёрдотельными, безопасными и совместимыми с технологией КМОП.

Платформа позиционируется как исследовательский инструмент для ускоренного скрининга материалов электродов, твёрдых электролитов и защитных покрытий, используемых в тонкоплёночных источниках питания.

12.1. Напыление функционального стека батареи.

Структура микроаккумулятора формируется из ультратонких слоёв, последовательно наносимых методами вакуумного напыления (магнетронное, термическое, атомно-слоевое осаждение): токоотвод → анод (например, LiCoO_2 или $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) → твёрдый электролит (LiPON, литиевый фосфороксинитрид) → катод (например, LiMn_2O_4). Все слои имеют толщину от сотен нанометров до нескольких микрометров, что обеспечивает ёмкость порядка десятков мкА·ч на квадратный сантиметр.

Платформа позволяет формировать все слои (нижний и верхний электроды, твёрдый электролит) в едином вакуумном цикле:

- Напыление анодных материалов (например, графит, кремний-графит кремний, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ и др.).
- Формирование твёрдого электролита (например, LiPON, LLZO, LATP).
- Напыление катодных материалов (LiMn_2O_4 , LiCoO_2 , V_2O_5).

12.2. Суперконденсаторы.

Если микроаккумуляторы накапливают значительную энергию, но отдают её относительно медленно (микроамперные токи), то суперконденсаторы обеспечивают колоссальную импульсную мощность. Они способны выдавать токи за миллисекунды, выдерживают свыше 100 000 циклов заряда-разряда и накапливают заряд за счёт обратимых электрохимических окислительно-восстановительных реакций (ОВР), протекающих непосредственно на поверхности тонкоплёночного электрода (например, из RuO_2 , MnO_2 или проводящих полимеров). Такие устройства идеально подходят для пиковых нагрузок в телеметрии и исполнительных механизмах. Платформа позволяет формировать все слои (нижний и верхний электроды, твёрдый электролит) в едином вакуумном цикле:

- Напыление псевдоконденсаторных электродов (RuO_2 , MnO_2 , TiN и др.).
- Формировать многослойных и композитных электродов.
- Проводить комбинаторный синтез для ускоренного поиска оптимальных материалов.

13. Алмазная электроника и квантовые сенсоры (NV-центры в алмазе).

Синтетические алмазы, выращиваемые методом CVD, считаются одним из самых перспективных материалов для силовой электроники высоких мощностей (благодаря рекордной теплопроводности и пробивному напряжению) и для квантовой магнитометрии на основе NV-центров (азотно-вакансионных центров в кристаллической решётке алмаза). NV-центры позволяют детектировать сверхслабые магнитные поля с нанометровым разрешением при комнатной температуре.

Инжектирующие интерфейсы и барьеры Шоттки.

Для создания эффективных диодов и транзисторов на алмазе платформа может использоваться для отработки технологии формирования инжектирующих контактов и барьеров Шоттки. Алмаз крайне инертен и плохо смачивается металлами, поэтому для получения качественного бездефектного перехода подложку необходимо проводить ионную очистку аргоном в вакууме. Затем с помощью магнетронного распыления наносится ультратонкий контактный слой тугоплавкого металла (например, титана Ti или тантала Ta). Последующая термическая обработка приводит к образованию прочного проводящего карбидного интерфейса (TiC или TaC), который обеспечивает низкое контактное сопротивление и стабильность при высоких температурах.

Платформа позиционируется как исследовательский инструмент для отработки состава, толщины и микроструктуры контактных слоёв на алмазных подложках, а также для создания защитных пассивирующих покрытий.

Платформа позволяет:

- Осаждать контактные слои с высоким контролем толщины и чистоты магнетронным распылением Ti, Ta, Mo из высокочистых мишеней в атмосфере Ar.
- Получать многослойные структуры – например, Ti/Pt или Ta/Pt.
- Проводить ионную очистку поверхности алмаза.
- Формировать карбидный интерфейс (TiC, TaC) при термической обработке – проводить термическую обработку in-situ сразу после напыления, без нарушения вакуума.
- Формировать омические контакты к легированным алмазным слоям – используя TiC/Pt или TaC/Pt контакты.
- Защищать NV-центры от поверхностных эффектов – ионная очистка и последующее осаждение ультратонких защитных слоёв (например, Al₂O₃ или SiO₂) позволяют пассивировать поверхность алмаза, сохраняя когерентные свойства приповерхностных NV-центров.
- Применить комбинаторный метод для ускоренной разработки контактов к алмазу.

14. Оптические нейроморфные вычисления и ИИ-чипы будущего (Integrated Photonics for AI).

Наряду с электронными мемристорами (ReRAM) активно разрабатываются фотонные процессоры, в которых сигналы передаются и обрабатываются не электронами, а фотонами (светом) по оптическим волноводам на кремниевой платформе. Такой подход позволяет достичь субнаносекундных задержек, терагерцовых частот и существенно снизить энергопотребление по сравнению с электронными аналогами.

14.1. Напыление ультратонких плёнок GST для фотонных волноводов.

Для создания программируемых фотонных весов применяются материалы с фазовым переходом, в частности халькогенидные стёкла (например, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ — GST), уже используемые в памяти типа PCRAM. В рамках предлагаемой платформы эти материалы могут быть нанесены в виде ультратонких островков или полосок поверх кремниевых оптических волноводов. При смене фазового состояния (аморфное \leftrightarrow кристаллическое) под действием короткого лазерного или электрического импульса GST кардинально меняет свой коэффициент поглощения и показатель преломления. Это позволяет локально модулировать пропускание или фазу света, проходящего через волновод, и тем самым реализовывать фотонные синаптические веса для нейронных сетей. Благодаря высокой скорости переключения (единицы наносекунд) и многократной циклируемости такие устройства открывают путь к созданию оптических ускорителей для задач глубокого обучения и искусственного интеллекта.

Платформа позволяет разрабатывать GST с высоким контролем ключевых параметров:

- RF-магнетронное распыление из керамической мишени стехиометрического GST ($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$). RF-режим обеспечивает стабильный разряд и позволяет получать плёнки с точно заданным составом, что критично для воспроизводимости оптического контраста между фазами.
- PDC-магнетронное распыление – альтернативный подход с использованием сплавной мишени GST в постоянном токе, обеспечивающий высокую скорость осаждения. Выбор между RF и DC зависит от требуемой плотности плёнки, шероховатости и совместимости с другими материалами стека.
- Со-распыление из трёх независимых DC-магнетронов (Ge, Sb, Te) – для исследовательских задач, где требуется варьировать состав GST (например, Ge-rich или Te-rich композиции), платформа позволяет независимо контролировать мощность на каждой мишени, создавая плёнки с точно заданным отклонением от стехиометрии. Это даёт возможность систематически исследовать влияние состава на оптический контраст, скорость переключения и циклическую стабильность.
- Контроль микроструктуры и плотности – варьируя рабочее давление и мощность магнетрона, можно управлять энергией осаждаемых частиц и, как следствие, плотностью, шероховатостью и кристалличностью плёнок.

14.2. Перспективные направления: свёрхрешётки и новые PCM-материалы.

Помимо классического GST, активно исследуются другие халькогенидные материалы (Sb_2S_3 , Sb_2Se_3) и их свёрхрешётки, которые могут обеспечить более низкие потери, более высокий оптический контраст или меньшее энергопотребление.

Платформа позволяет исследовать такие структуры через:

- Со-распыление для создания сложных композиций – например, легирование GST селеном (GSST) или создание твёрдых растворов для оптимизации свойств.
- Последовательное осаждение слоёв разных PCM-материалов для создания структур с улучшенными переключающими характеристиками.

15. Высокоэнтропийные сплавы (High-Entropy Alloys, HEA).

Высокоэнтропийные сплавы состоят из 4–5 и более металлов в близких к эквимолярным пропорциям. Они обладают исключительной прочностью, радиационной стойкостью и не разрушаются при криогенных температурах (сохраняя вязкость).

Поиск оптимального состава HEA традиционными методами «одна композиция – один эксперимент» является чрезвычайно трудоёмким и дорогостоящим процессом, занимающим годы, поскольку пространство возможных составов для 4–5-компонентных систем практически бесконечно. Платформа предлагает революционное решение этой проблемы: комбинаторный PVD-метод, позволяющий за один цикл напыления создать на одной подложке библиотеку составов с непрерывным градиентом концентраций всех компонентов. Это даёт возможность в одном эксперименте исследовать тысячи составов, идентифицировать перспективные композиции с рекордными свойствами и ускорить разработку новых HEA в десятки и сотни раз.

Преимущества платформы для разработки высокоэнтропийных сплавов:

- Комбинаторный синтез – возможность создавать библиотеки с непрерывным градиентом состава для 3–5-компонентных систем за один цикл напыления, ускоряя поиск оптимальных композиций в десятки и сотни раз.
- Гибкость материалов – возможность использовать любые металлические мишени (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Al, Ti, V, Zr, Mo, W, Ta, Nb, Cu, и др.), а также реактивные газы для синтеза оксидов и нитридов.
- Контроль микроструктуры – варьирование давления, мощности и температуры позволяет систематически исследовать влияние микроструктуры на свойства HEA-плёнок.
- In-situ нагрев – до 430°C для стабилизации микроструктуры и активации фазовых превращений непосредственно после напыления.
- Ионный источник – для очистки поверхности перед напылением и для скрининга радиационной стойкости образцов in-situ.
- Высокопроизводительный скрининг – возможность проводить коррозионные, механические и радиационные испытания на одной пластине, где каждый участок имеет уникальный состав, что резко сокращает время и стоимость разработки новых HEA.
- Масштабируемость – работа с 300-мм пластинами и высокая воспроизводимость процессов делают платформу пригодной для отработки технологий, готовых к промышленному внедрению.

16. Электрохромные «умные» стёкла и покрытия для энергоэффективных зданий.

Электрохромные материалы обратимо меняют цвет и прозрачность при подаче небольшого электрического напряжения (обычно 1–5 В). Это позволяет динамически регулировать светопропускание и теплопоступление. Эта технология является ключевой для создания «умных» окон в энергоэффективных зданиях, автомобилях и авиационной технике, позволяя снижать затраты на кондиционирование и отопление, уменьшать блики и повышать комфорт пользователей.

Платформа предоставляет инструменты для разработки и оптимизации полностью твёрдотельных электрохромных устройств:

- последовательное осаждение всех слоёв стека в одной вакуумной камере без нарушения вакуума,
- реактивное и RF-магнетронное распыление оксидов (WO_3 , NiO , Ta_2O_5) и прозрачных проводящих оксидов (ITO),
- контроль стехиометрии и толщины каждого слоя,
- нагрев стола до 430°C для кристаллизации и стабилизации свойств,
- ионную очистку интерфейсов,
- комбинаторный метод для ускоренного поиска оптимальных конфигураций,
- in-situ сборка полного электрохромного стека.

17. Умные (smart) материалы и покрытия с памятью формы (Shape Memory Alloys).

Материалы с памятью формы (Shape Memory Alloys, SMA) обладают уникальной способностью обратимо восстанавливать исходную геометрию или менять фазовое состояние под действием температуры, механического напряжения или электрического поля.

Классическим и наиболее изученным представителем SMA является нитинол (NiTi) – бинарный интерметаллид никеля и титана с эквимолярным составом (около 50 ат.% Ni и 50 ат.% Ti), который демонстрирует рекордные значения обратимой деформации (до 8–10%) и усилия восстановления формы.

Благодаря этим свойствам, тонкоплёночные SMA-актюаторы находят широкое применение в микроробототехнике (микроприводы, захваты, исполнительные механизмы), биомедицинских имплантатах (стенды, костные фиксаторы), аэрокосмической промышленности (адаптивные элементы конструкций) и MEMS-устройствах (микроклапаны, микропереключатели).

Тонкоплёночные SMA, осаждённые методами магнетронного распыления, позволяют создавать микроактюаторы с размерами от десятков микрометров до миллиметров и с точно заданной температурой срабатывания, которая определяется составом сплава и условиями его термической обработки.

Платформа предоставляет возможности для разработки тонкоплёночных SMA-покрытий и микроактюаторов:

- со-распыление чистых мишеней никеля и титана для точного контроля стехиометрии и создания сплавов с заданной температурой мартенситного перехода,
- in-situ нагрев стола до 430°C для проведения первичной кристаллизации и интерметаллического отжига непосредственно в вакуумной камере после напыления (без окисления на воздухе),
- ионную очистку поверхности перед осаждением для улучшения адгезии,
- комбинаторный метод для ускоренного поиска оптимальных составов и режимов термообработки, обеспечивающих требуемую температуру фазового перехода и механические характеристики.

18. Молекулярная электроника и органические полевые транзисторы (OFET).

Органическая электроника является одной из наиболее быстро развивающихся областей, предлагающей принципиально новые возможности для создания гибких, лёгких и недорогих устройств — от гибких дисплеев и «умной одежды» до биочипов и сенсоров. В основе этих устройств лежат органические полевые транзисторы (OFET), в которых активным полупроводниковым материалом служат органические молекулы или полимеры (например, пентацен, РЗНТ, полимеры на основе дикетопирролопиррола). В отличие от традиционных кремниевых транзисторов, OFET могут быть изготовлены при низких температурах на гибких подложках (полиимид, PET, бумага) и обладают биосовместимостью, что делает их идеальными для медицинских и биологических применений.

Однако создание надёжных OFET-устройств сталкивается с серьёзной технологической проблемой: формирование металлических контактов истока и стока поверх органического полупроводника. Органические материалы крайне чувствительны к высоким температурам, плазменному воздействию и бомбардировке высокоэнергетическими частицами, что приводит к деградации их электрофизических свойств, снижению подвижности носителей и ухудшению контакта. Традиционные методы напыления (магнетронное распыление, термическое испарение) могут повредить органический слой либо за счёт перегрева, либо за счёт инжекции быстрых атомов и ионов.

Платформа позиционируется как исследовательский инструмент для отработки щадящих методов осаждения контактов и ускоренного скрининга контактных металлов, совместимых с органическими полупроводниками и позволяет в одном эксперименте создать библиотеку тестовых контактных структур для оценки влияния металла, толщины и режима осаждения на характеристики органического транзистора.

Платформа позволяет:

- разрабатывать щадящие методы осаждения металлических контактов, совместимые с органическими материалами.

Низкотемпературное магнетронное распыление с контролем энергии осаждаемых частиц.

Варьирование рабочего давления даёт возможность управлять энергией осаждаемых частиц: повышенное давление (за счёт увеличения длины свободного пробега и термализации частиц) позволяет снизить энергию бомбардировки поверхности, что минимизирует повреждение органического материала при сохранении приемлемой скорости осаждения.

- Проводить ионную очистку поверхности для улучшения адгезии.
- in-situ осаждение многослойных контактов (например, Ti/Au).

Последовательное напыление адгезионного и барьерного слоёв (например, Ti/Au, Ti/Pt, Cr/Au) в едином вакуумном цикле без нарушения вакуума позволяет получать чистые интерфейсы между слоями. Это важно для создания надёжных контактов с низким переходным сопротивлением и хорошей адгезией к органике, а также для защиты активного металла от окисления.

- Проводить комбинаторный синтез для ускоренного поиска оптимальных металлов, толщин и режимов осаждения для конкретных органических систем (пентацен, РЗНТ, полимеры).

19. Термоэлектрические материалы.

Термоэлектрические материалы, преобразующие тепловую энергию в электрическую (и обратно), являются одним из активно развивающихся направлений материаловедения. Поиск оптимальных составов и микроструктур, особенно в многокомпонентных системах, требует систематического исследования обширного пространства параметров.

Платформа позиционируется как исследовательский инструмент для ускоренного синтеза и скрининга тонкоплёночных термоэлектрических материалов, позволяя в одном эксперименте создавать библиотеки образцов с контролируемым градиентом состава и микроструктуры и даёт возможность быстро выявлять перспективные композиции и режимы обработки для последующего масштабирования на промышленном оборудовании.

Большинство современных термоэлектриков — это многокомпонентные соединения и твёрдые растворы:

- Теллурид висмута (Bi_2Te_3) и его твёрдые растворы с сурьмой ($\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_3$) — основной материал для комнатных температур.
- Теллурид свинца (PbTe) — для средних температур (до 600–800 К).
- Скуттерудиты (CoSb_3) с различными наполнителями (Yb, Ce, Ag, In).
- Полу-Хойслеры (Half-Heusler) — например, MNiSn ($M = \text{Ti, Zr, Hf}$).
- Нитрид скандия (ScN) — перспективный материал для высокотемпературных применений

Возможности платформы:

- Три DC-магнетрона с независимым управлением мощностью позволяют проводить со-распыление из трёх мишеней одновременно.
- Реактивное напыление (с подачей $\text{Ar} + \text{O}_2$ или $\text{Ar} + \text{N}_2$) позволяет синтезировать оксидные и нитридные термоэлектрики, такие как ScN .
- Градиентный синтез (комбинаторный подход): за один цикл можно создать библиотеку составов с непрерывным градиентом концентраций по поверхности 300-мм пластины. Это ускоряет поиск оптимального состава в десятки раз по сравнению с традиционными методами.
- Подогрев стола до 430°C в атмосфере аргона (инертный газ предотвращает окисление) позволяет:
 - Проводить первичную кристаллизацию напылённых плёнок непосредственно в вакуумной камере.
 - Активировать легирующие примеси (например, Ag/In в CoSb_3).
 - Выращивать текстурированные плёнки с заданной ориентацией.
 - Контроль температуры в широком диапазоне (от комнатной до 430°C) позволяет систематически исследовать влияние температуры подложки на структуру и термоэлектрические свойства.

20. Защитные и функциональные покрытия для топливных элементов и электролизёров (например, Pt, IrO₂, каталитические слои).

Водородная энергетика требует создания высокоэффективных и долговечных каталитических слоёв на основе благородных металлов (Pt, Ir, Ru) и их оксидов для топливных элементов и электролизёров. Ключевые задачи материаловедения в этой области — снижение загрузки драгоценных металлов, повышение активности и стабильности катализаторов, а также поиск альтернатив на основе неблагородных металлов.

Платформа позиционируется как исследовательский инструмент для ускоренного синтеза и скрининга модельных каталитических систем. Она позволяет в одном вакуумном цикле создавать библиотеки тонкоплёночных катализаторов с контролируемым составом, морфологией и чистотой интерфейсов, что критически важно для понимания фундаментальных закономерностей электрохимической активности и деградации.

Основные исследовательские возможности платформы:

- Формирование ультратонких модельных слоёв (1–10 нм).

Магнетронное напыление позволяет создавать тестовые слои с высокой чистотой и контролируемой толщиной. Это даёт возможность изучать влияние толщины каталитического слоя на его электрохимические характеристики без использования сложных коллоидных или химических методов синтеза.

- Со-распыление для многокомпонентных систем.

Одновременная работа нескольких магнетронов позволяет формировать бинарные и тройные сплавы (например, PtNi, PtCo, PtRu) с непрерывным градиентом состава на одной пластине. Это идеальный подход для быстрого выявления оптимального соотношения металлов, обеспечивающего максимальную удельную активность и устойчивость к отравлению CO в реакциях окисления водорода и метанола.

- Синтез оксидных катализаторов (IrO₂, RuO₂) реактивным напылением.

Использование металлических мишеней Ir, Ru в атмосфере Ar+O₂ (или RF-распыление керамических мишеней) позволяет получать стехиометричные оксидные плёнки на тестовых подложках. Это востребовано для разработки анодных катализаторов электролизёров (кислородная реакция выделения — OER), где важны как состав, так и кристаллическая структура оксида.

- Управление морфологией и развитой поверхностью.

Широкий диапазон рабочих давлений и возможность нагрева подложки (до 430°C) позволяют систематически изменять микроструктуру плёнок — от плотных и гладких до пористых и столбчатых. Для каталитических приложений часто предпочтительны высокопористые структуры с развитой удельной поверхностью, которые могут быть получены осаждением при повышенном давлении без нагрева. Это даёт возможность в одном эксперименте сопоставить электрохимическую активность плёнок с разной морфологией.

- Многослойные структуры и защитные покрытия в едином вакуумном цикле.

Последовательное осаждение слоёв без нарушения вакуума позволяет формировать модельные стеки, имитирующие реальные каталитические системы (например, буферный слой / каталитический слой / защитное покрытие), обеспечивая чистоту интерфейсов. Это особенно важно при исследовании влияния подложки на рост и стабильность катализатора, а также при изучении механизмов деградации (например, растворения Pt или спекания частиц).

- Комбинаторный синтез как ключевой метод ускоренного скрининга.

Установка позволяет за один цикл напыления создать библиотеку образцов с непрерывным градиентом состава, толщины или пористости. Это даёт возможность за один эксперимент оценить десятки комбинаций параметров, выявить корреляции «состав — морфология — электрохимическая активность» и существенно сократить время поиска перспективных кандидатов.

21. Тонкопленочные твердооксидные топливные элементы (TF-SOFC).

Твердооксидные топливные элементы (SOFC) являются перспективным направлением энергетики, однако их коммерциализация сдерживается высокой рабочей температурой (800–1000°C). Переход к тонкопленочным конструкциям (TF-SOFC) позволяет снизить температуру до 400–600°C за счёт уменьшения толщины электролита и использования наноструктурированных электродов. Ключевые материалы — это плотный кислород-ионный проводник (электролит) на основе стабилизированного иттрием диоксида циркония (YSZ) или легированного гадолинием оксида церия (GDC), а также пористые керметные аноды (Ni-YSZ) и смешанные электронно-ионные катоды (LSM, LSCF).

Платформа позиционируется как исследовательский инструмент для ускоренной отработки составов, микроструктуры и интерфейсов указанных материалов, а не как технологическая линия для изготовления готовых ТЭ. Она позволяет в одном эксперименте создавать библиотеки образцов с контролируемым градиентом свойств, что критически важно для поиска оптимальных режимов осаждения и составов.

Основные исследовательские возможности платформы:

- Осаждение плотных электролитных плёнок (YSZ, GDC).

Использование RF-магнетронного распыления из керамических мишеней обеспечивает получение стехиометрических плёнок с фиксированным составом, что удобно для калибровочных экспериментов. Варьирование рабочего давления и мощности магнетрона позволяет систематически исследовать влияние энергии осаждаемых частиц на плотность, кристалличность и ионную проводимость электролита. Нагрев стола до 430°C даёт возможность изучать начальные стадии кристаллизации YSZ/GDC непосредственно в вакуумной камере, что важно для оценки термической стабильности плёнок.

- Формирование пористых электродных слоёв (анод Ni-YSZ, катод LSM/LSCF).

Широкий диапазон рабочих давлений и возможность со-распыления из трёх независимых DC-магнетронов позволяют создавать композитные слои с контролируемой пористостью и микроструктурой. Регулируя давление (высокое → пористая столбчатая структура), мощность (низкая → мелкозернистость) и температуру подложки (комнатная → сохранение пористости, нагрев → уплотнение), можно в одном эксперименте получить массив образцов с различной морфологией и исследовать корреляцию «структура – электрохимическая активность».

- Контроль чистоты интерфейсов.

Ионный источник (Ar^+) позволяет проводить in-situ очистку поверхности подложки или нижележащего слоя перед осаждением электролита и электродов, что минимизирует загрязнения на границах раздела и повышает воспроизводимость электрохимических характеристик тестовых структур.

- Комбинаторный синтез как ключевой метод ускоренного скрининга.

Установка позволяет за один цикл напыления сформировать на 300-мм пластине библиотеку образцов с непрерывным градиентом состава (например, Ni:YSZ, LSM:YSZ), толщины электролита или пористости электрода. Это даёт возможность за один эксперимент оценить десятки комбинаций параметров, выявить оптимальные режимы и существенно сократить время R&D-цикла.

Комбинаторная жидкостно-процессной установки (TEMPUS F-20).

Установка обеспечивает исследование параметров широкого спектра жидкофазных материалов, например, при решении задач интеграции low-k, ultralow-k диэлектриков, задач жидкофазной очистки поверхностей перед нанесением пассивирующих слоев, а также задач травления избыточных материалов (пленок), образующихся в технологических процессах.

Основные возможности:

- Быстрое создание расширенной библиотеки химических составов оптимизированных под жидкофазные задачи.
- Высокая плотность параллельных испытаний:
 - автоматизированное высокопродуктивное создание рецептур наносимых на пластины образцов покрытий;
 - параллельное исследование образцов, нанесенных на 300мм пластину (до 192 тестируемых параметров);
 - приготовление до 392 активных составов: максимум 12 активных дозирующих чашек по 32 независимые пипетки в каждой; квадратная основа дозатора.
- Проведение комплексных экспериментов на одном образце: Платформа позволяет не только создавать химические составы, но и выполнять множественные эксперименты, например, по текстурированию поверхности, на одной подложке.
- Встроенные функции очистки: Конструкция установки предусматривает возможности для очистки компонентов реактора, например, с использованием системы деионизированной воды, что критически важно для предотвращения перекрестного загрязнения химикатами.

Основные области применения комбинаторная жидкостно-процессной установки.

1. Технология межсоединений. Интеграция low-k и ultra-low-k диэлектриков.

Подбор составов для очистки пористых диэлектриков без изменения их структуры и диэлектрической проницаемости. Удаление остатков фоторезиста (Ash Residue Removal): разработка растворов для очистки дна и стенок переходных отверстий (Vias) после плазменного травления. Селективное травление металлов: оптимизация удаления избыточных слоев меди (Cu), кобальта (Co), вольфрама (W) или рутения (Ru).

2. Очистка и подготовка поверхности (Surface Preparation & Cleaning).

Преднапылительная очистка (Pre-deposition Clean): жидкостная подготовка подложки перед нанесением пассивирующих, барьерных или зародышевых (seed) слоев. Удаление побочных продуктов: очистка пластин от комплексных полимерных загрязнений после ионной имплантации или травления. Финишная очистка после CMP: разработка составов для удаления микрочастиц шлама и химикатов после химико-механической полировки.

3. Модификация поверхностей и текстурирование. Формирование микротекстуры.

Подбор травителей для создания строго заданной шероховатости или топографии поверхности. Гидрофобизация и гидрофилизация: локальное нанесение самоорганизующихся монослоев (SAM) для изменения смачиваемости. Пассивация полупроводников: химическое насыщение связей на поверхности кремния (Si) или соединений АЗВ5 для снижения скорости поверхностной рекомбинации.

4. Разработка новых химических материалов (R&D хим-поставщиков).

Скрининг ингибиторов коррозии: быстрая проверка эффективности добавок, защищающих металлы от агрессивного воздействия кислот. Оптимизация ПАВ: подбор поверхностно-активных веществ для улучшения смачиваемости ультрамалых пор и зазоров. Тестирование стабильности растворов: исследование влияния концентрации компонентов на скорость и селективность реакций.

5. Передовая литография и фоторезисты (Lithography & Patterning).

Скрининг проявителей (Developers): подбор и оптимизация водных и органических проявителей для жесткого УФ (EUV) и глубокого УФ (DUV) фоторезистов с целью снижения шероховатости края линии (LWR/LER). Смывка краев пластины (Edge Bead Removal — EBR): тестирование эффективности различных растворителей для идеального удаления наплывов фоторезиста по краям пластины без повреждения рабочей зоны. Растворы для направленной самосборки (DSA): локальное нанесение и исследование блок-сополимеров, способных самостоятельно формировать субмикроструктуры под воздействием определенных жидких активаторов.

6. Жидкостное осаждение материалов (Wet Deposition).

Электроосаждение и гальваника (Electroplating / ECD): подбор органических добавок (акселераторов, ингибиторов, выравнивателей) для бездефектного заполнения медью (Cu), кобальтом (Co) или вольфрамом (W) сверхглубоких переходных отверстий (TSV). Химическое осаждение без внешнего тока (Electroless Deposition — ELD): исследование составов для селективного нанесения тонких барьерных или кэпирующих (capping) слоев (например, CoWP, NiMoP) на металлические дорожки.

7. Производство передовой 3D-логики и памяти (3D NAND & GAA).

Высокоселективное изотропное травление: подбор жидкостных составов, способных удалять один материал, абсолютно не повреждая другой. Например, селективное травление жертвенных слоев кремний-германия (SiGe) относительно кремния (Si) при формировании каналов в транзисторах GAA (Gate-All-Around). Жидкостное удаление нитрида кремния (Si_3N_4) в 3D NAND: оптимизация горячей фосфорной кислоты (H_3PO_4) с различными добавками для однородного вытравливания глубоких горизонтальных карманов в многослойных структурах (сотни слоев) без травления оксида кремния (SiO_2).

8. Новые типы памяти (MRAM, ReRAM, PCM).

Травление и очистка сложных сплавов: разработка растворов для деликатного удаления остатков и травления функциональных слоев энергонезависимой памяти, содержащих благородные и редкие металлы (платина, рутений, кобальт, железо, бор, халькогенидные стекла). Обычное плазменное травление здесь часто не справляется из-за низкой летучести продуктов реакции.

9. Дисплейные технологии и фотовольтаика (OLED / Solar Cells).

Травление прозрачных проводящих оксидов: оптимизация процессов селективного съема слоев ITO (оксид индия-олова) или IZO в производстве матриц дисплеев. Текстурирование кремния для солнечных элементов: быстрый поиск идеальных соотношений щелочных растворов (KOH/NaOH) и ПАВ для формирования строго заданных микропирамид на поверхности кремния, снижающих отражение света.

10. Экологический инжиниринг («Зеленая химия»).

Замена токсичных растворителей: тестирование экологически безопасных альтернатив для стандартных, но вредных и регулируемых растворителей (например, замена N-метилпирролидона — NMP). Снижение расхода реагентов: разработка рецептур высококонцентрированных смесей, которые эффективно работают при меньшем потреблении деионизированной воды (DIW).

11. Другие перспективные направления (потенциально любые жидкофазные процессы).

Установки она может быть полезна везде, где требуется:

Быстрый подбор рецептуры жидких покрытий — например, для защитных, антикоррозионных, смазочных или биосовместимых плёнок.

Изучение влияния множества параметров (состав, рН, температура, время выдержки, скорость нанесения) на итоговые свойства материала.

Создание библиотек образцов для тестирования в биомедицине, катализе, производстве мембран или сенсоров.

Аналитическое оборудование.

1. Спектрофотометр PerkinElmer Lambda 1050.

Прибор, предназначенный для измерения отношений двух потоков оптического излучения,

Основные возможности:

- позволяет производить измерения для различных длин волн оптического излучения,
- позволяет производить измерения спектров пропускания или спектров отражения излучения.
- два источника излучения, дейтериевая лампа (DL) и галогеновая лампа (HL), обеспечивают рабочий диапазон длин волн спектрометра от 175 до 3300 нм.
- позволяет получать спектральные характеристики диффузного пропускания и отражения образцов (вместе со 150 мм интегрирующей сферой с WB INGAAS детектором, имеется в наличии).

2. Спектральный эллисометр Woolam M-2000.

Прибор для исследования поверхностей и границ раздела различных сред (твердых, жидких, газообразных), основанный на изучении изменения состояния поляризации света после взаимодействия его с поверхностью границ раздела этих сред. Имеет автоматизированный гониометр.

Основные возможности:

- проводить автоматизированные измерения в диапазоне от 193 до 1000 нм;
- производить сбор и анализ эллисометрических данных.

3. ИК Фурье спектрометр Thermo Fisher Scientific Nicolet™ iS™50.

Система включает в себя функции проверки производительности, мощный пакет программного обеспечения и множество других функций, которые упрощают сбор данных и получение необходимых ответов.

Основные возможности:

- позволяет выполнять химический анализ материалов образцов путем сбора данных в среднем, дальнем и ближнем ИК-диапазонах.

4. Оборудование для измерений электрического сопротивления пластин и тонких пленок RM3.AR

Предназначен для проведения измерений электрического сопротивления поверхности.

5. Потенциостат-гальваностат Elins P40X с модулем измерения электрохимического импеданса FRA-24M.

Профессиональная отечественная электрохимическая рабочая станция, которая совмещает функции импульсного потенциостата и импедансметра (частотного анализатора).

Основные возможности:

- тестирование и диагностика мощных аккумуляторов, суперконденсаторов и топливных элементов (заряд-разряд, деградация),
- коррозионные исследования: оценка скорости коррозии, питтингообразования и защитных свойств полимерных/гальванических покрытий,
- исследование кинетики быстрых электродных процессов и механизмов сложных реакций (электрокатализ и синтез),
- изучение проводимости твердотельных, жидкостных и биоэлектрохимических систем (материаловедение).

6. Потенциостат-гальваностат Elins P-20X8.

Это многоканальная электрохимическая рабочая станция, состоящая из 8 независимых измерительных каналов в одном корпусе. Прибор ориентирован на серийные испытания и одновременное тестирование группы образцов.

Основные области применения:

- Ресурсные испытания ХИТ: одновременное циклирование (заряд/разряд) восьми литий-ионных аккумуляторов, суперконденсаторов или полуэлементов (макетов, ячеек «коин-селл»).
- Скрининг материалов: параллельное тестирование нескольких видов катализаторов, ингибиторов коррозии или составов электролита в идентичных условиях.
- Коррозионный мониторинг: одновременное снятие поляризационных кривых (кривых Тафеля) для группы металлических образцов.
- Сенсорика: групповое тестирование и калибровка электрохимических датчиков.

7. Течеискатель гелиевый масс-спектрометрический ТИ1-50.

Прибор необходим для испытаний на герметичность с использованием в качестве пробного газа Гелий-4 различных систем и объектов, допускающих откачку внутренней полости, либо заполненных пробным газом, и обнаружения мест нарушения герметичности (течей).

Химическая лаборатория.

Химическая лаборатория ООО «Комберри» создавалась для разработки новых гель-полимерных и полимерных электролитов для вторичных источников тока и суперконденсаторов, а также для химической модификации поверхности (повышение адгезии, гидрофильности/гидрофобности и тп).

Лаборатория включает:

- общелабораторное помещение с приточно-вытяжной вентиляцией (64 м²), которое имеет:
- зона хранения для реактивов с вытяжной вентиляцией и холодильная камера (1м³) для хранения неустойчивых химических соединений,
- химической мебелью прочим общелабораторным оборудованием, достаточным для полноценной работы 2ух химиков-синтетиков.
- помещение для работы в стерильных условиях или для работы со светочувствительными мономерами/олигомерами (12 м²).
- Кроме того, лаборатория оснащена:
- стандартным набором стеклянной и пластиковой посуды для синтеза и исследования органических мономеров, гелей и полимеров,
- комплектом штативов, магнитных мешалок и колбонагревателей различных размеров,
- весами (аналитические и прецизионные),
- оборудованием для вакуумной перегонки,
- муфельная печь MSH Techno для отжига образцов в контролируемой атмосфере (подача до 4-рех разных газов или их смесей),
- стерилизаторами для работы с особо-чистыми образцами,
- ультразвуковыми ваннами для обработки поверхности,
- ручным прессом с подогревом (для сборки отдельных электрохимических ячеек и полуячеек),
- система ультрафильтрации воды (в малых объемах).

Лаборатория является неотъемлемой частью для PVD процессов, так как позволяет производить:

- очистку поверхностей до микроэлектронного уровня,
- модификацию поверхностей с целью получения заданных параметров,
- осуществлять разработку электролитов, адгезионных и герметизирующих материалов, а также окончательную сборку и тестирование тонкоплёночных устройств.

Кроме того, на базе существующей химической лаборатории осуществляются самостоятельные проекты по:

- создания токопроводящих гель-полимеров,
- модификации кремнезёмных поверхностей силанами для микробиологии,
- синтезу поверхностно-активных веществ и катионных полимеров для применения в некоторых отраслях малотоннажной химии,
- разработке моющих, смазывающих, противозадирных составов для смежных направлений, связанных с композитными материалами.

«Чистая комната»

Комплекс оборудования для очистки помещения в соответствии с требованиями класса чистоты ISO-7. Является обязательным условием для функционирования вакуумного кластера платформы Tempus.