

**СЕТЕВОЙ ИНСТИТУТ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
ЦЕНТР НАНОЭЛЕКТРОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
СБОРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ,
ПРОИЗВОДСТВО И ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ СЛЕДУЮЩЕГО
ПОКОЛЕНИЯ С ПРЕДЕЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ.**

***Предложения по организации опытного производства и внедрения
технологического оборудования и инновационных полупроводниковых
приборов, в том числе с применением произвольно упорядоченных
наноструктур, для использования в критически важных сегментах
специализированной микроэлектроники***

13.07.2023

ИННОВАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР НАНОЭЛЕКТРОНИКИ (ИТЦН)

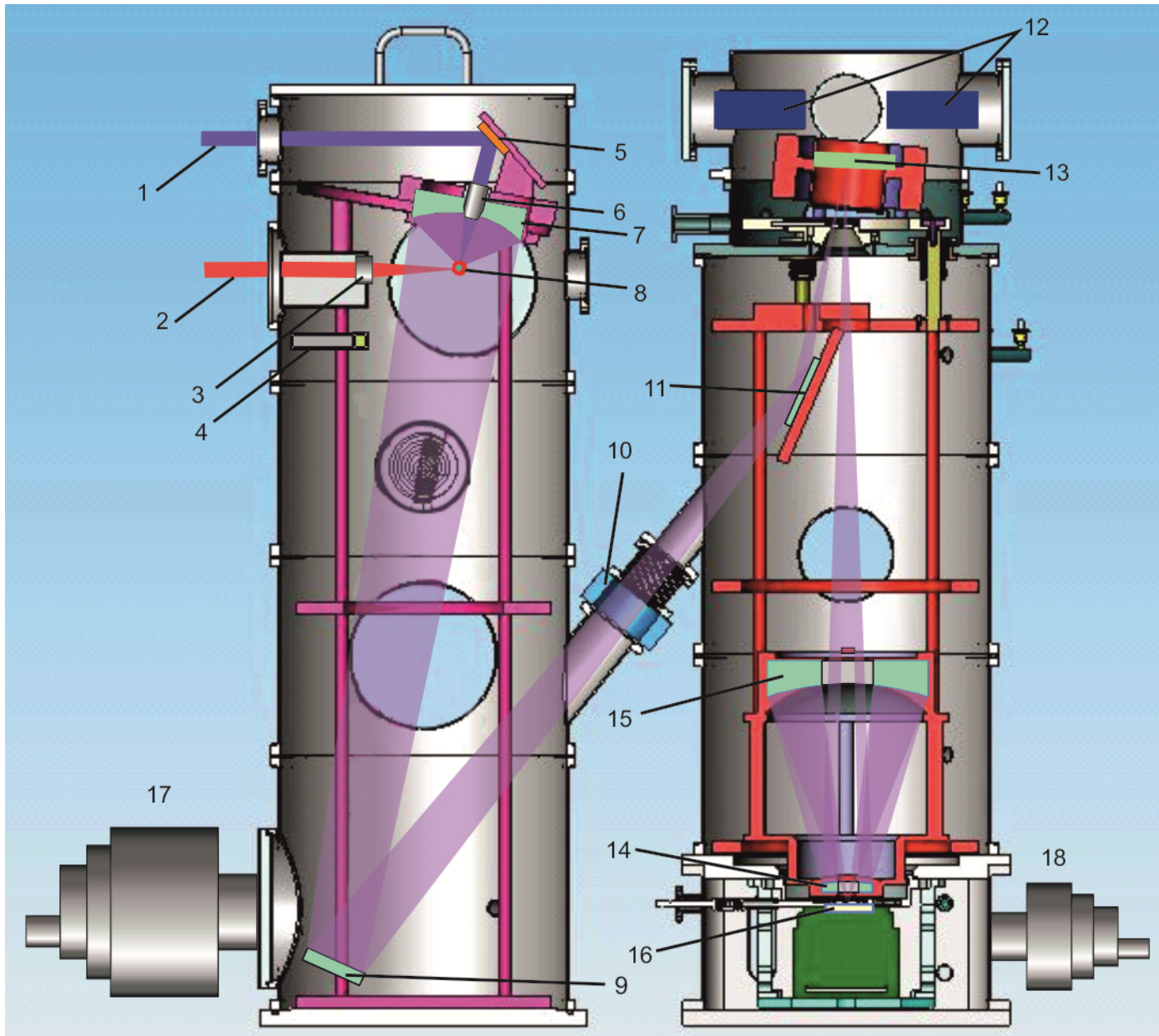
Для решения задачи по созданию собственного производства ИС с нанометровым разрешением предлагается организация ИТЦН, как центра компетенции по вопросам проведения НИОКР, как по созданию технологического оборудования по производству материалов и соответствующих микросхем, так и реализации опытного производства ИС с применением нанолитографа обеспечивающего разрешение до 5 нм. При этом ИТЦН на начальном этапе опирается на структуры, реализованные вокруг ОПМК. Предлагаем сконцентрировать работу вокруг разработки нанолитогафа опытно-промышленного назначения с производительностью не более 10 пластин в час, и соответственно комплексную отработку технологий производства наноструктур для применения в составе опытно-промышленного наноэлектронного комплекса (ОПНК). В настоящий момент имеется три известных аналога EUV-нанолитографов, предназначенных для научно-технического поиска и разработок. Это установки компаний ASML, Canon и Exitech. Параметры установок по разрешению и полю изображения уступают проектным. Стоимость установок Exitech 40-60 млн Евро, ASML – 65 млн USD. Предполагаемая стоимость разрабатываемого промышленного нанолитографа ASML – 150 млн USD. Необходимо также отметить наличие сильных конкурентных преимуществ разработок проекта по параметру цена-качество не только по нанолитографам, но и по применяемым и разрабатываемым мощным EUV- и DUV-источникам по сравнению с предложениями монополистов компаний CYMER и COHERENT стоимостью соответственно 10 и 2 млн USD

КОНКУРЕНТНОЕ ПРЕИМУЩЕСТВО

1. В настоящее время на российском рынке нанолитографические установки, и вообще технологическое оборудование обеспечивающее производство ИС мирового уровня, отсутствуют.
2. Существует целый ряд политических и экономических ограничений на импорт подобного оборудования.
3. Нанолитограф является результатом совместной деятельности российских ученых и производителей.
4. Затраты на создание литографа почти на порядок меньше западных аналогов.
5. Прогнозируемое сверхразрешение превышает возможности конкурирующих моделей
6. Научные идеи и технологические наработки по созданию нанолитографического оборудования и наноструктур сверхвысокого разрешения конкурентоспособны на мировом уровне и востребованы растущими экономиками Юго-Восточной Азии и Южной Америки
7. Совпадение геоэкономических интересов с потенциальными заказчиками.

При этом, по техническим параметрам проектируемый ЭУФ нанолитограф не уступает, а превосходит западные аналоги: Нанолитограф ASML по предельной разрешающей способности, а Exitech и Canon – по предельной разрешающей способности и в несколько раз по полю изображения.

**Общая схема экспериментального стенда МР/ЭУФ оптики.
Слева – осветительный модуль, справа – изображающий.**



Общая схема нанолитографа.

Слева – осветительный модуль, справа – изображающий.

Обозначения: 1 – пучок УФ возбуждающего лазерного импульса, 2 – пучок разогревающего ИК импульса, 3 – ИК фокусирующий объектив, 4 – интегральный датчик излучения, 5 – поворотное зеркало для УФ импульса, 6 – фокусирующий объектив для УФ излучения, 7 – коллекторное брэгговское зеркало, 8 – облачко излучающей микроплазмы, 9 – поворотное брэгговское зеркало, 10 – шиберный затвор и сильфон на переходе к наклонному патрубку, 11 – корректирующее зеркало скользящего падения, 12 – элементы системы фокусировки и сопряжения топологических слоёв, 13 – ретикл, 14 – малое (выпуклое) зеркало брэгговского изображающего объектива, 15 – большое (вогнутое) брэгговское зеркало брэгговского изображающего объектива, 16 – шиберный мини-затвор между образцом и брэгговским изображающим объективом, 17 – большой ТМН блока источника излучения, 18 – малый ТМН блока формирования изображения.

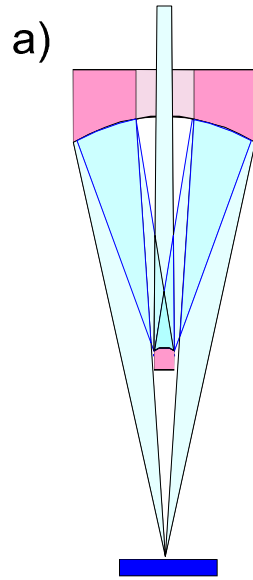
НАНОЛИТОГРАФ С 4М ОБЪЕКТИВОМ

- Разработан также 4М (четырёх-зеркальный) объектив, размещаемый в корпусе частично изготовленного нанолитографа с 2М объективом. Его конструкция защищена патентом *Репродукционный зеркальный объектив для фотолитографии.*
- Объектив в настоящее время изготовлен, но ещё не снабжён «брэгговскими» покрытиями.

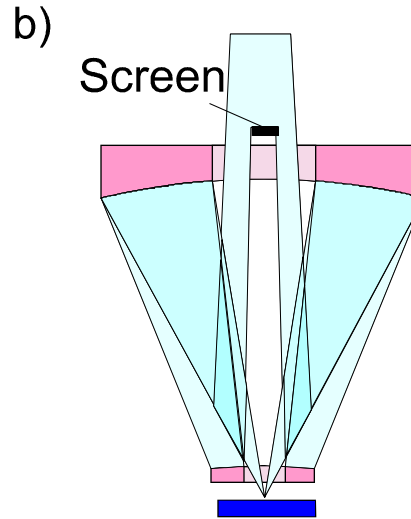
Математическое моделирование экспозиции нелинейных фоторезистов дает уменьшение результирующего оптического разрешения системы в 2 раза.

Числовая апертура оптических систем на зеркалах с брэгговскими покрытиями

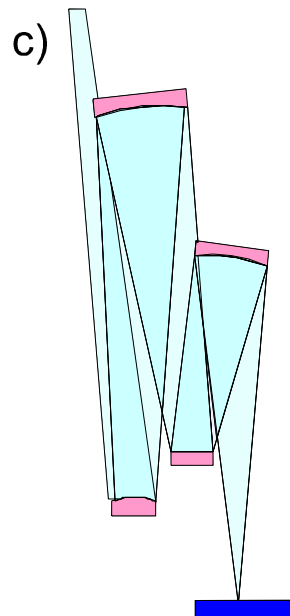
NA=0,06 – 0,09



NA=0,36



NA=0,1 – 0,14



NA=0,485

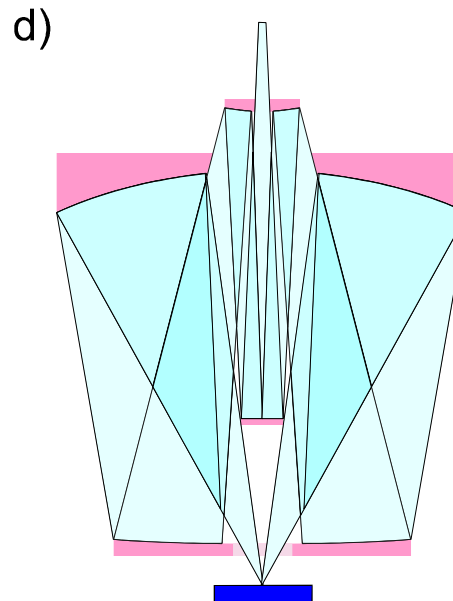


Схема экспериментального стенда МР/ЭУФ-оптики с 2М объективом
Проектная разрешающая способность 15нм

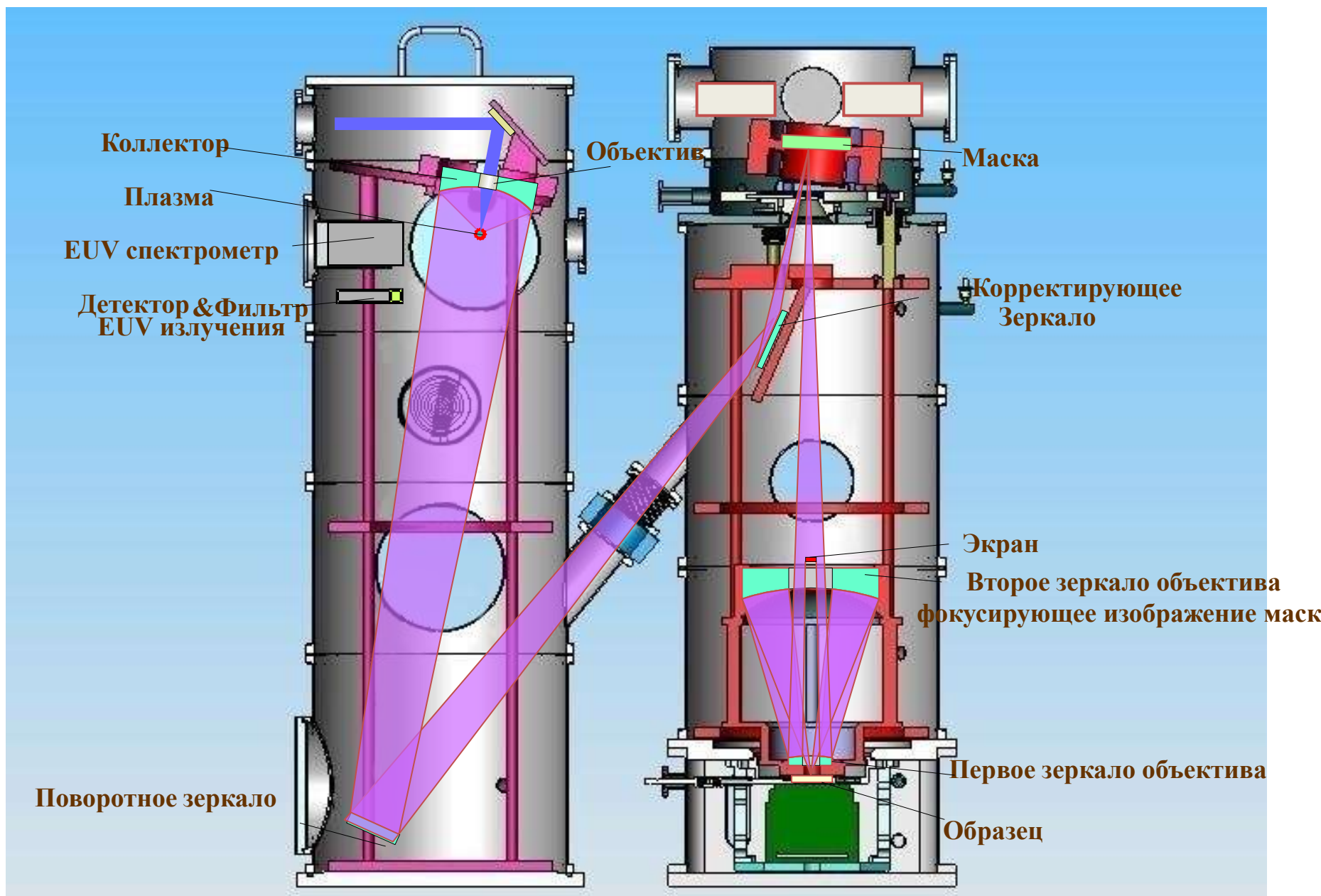
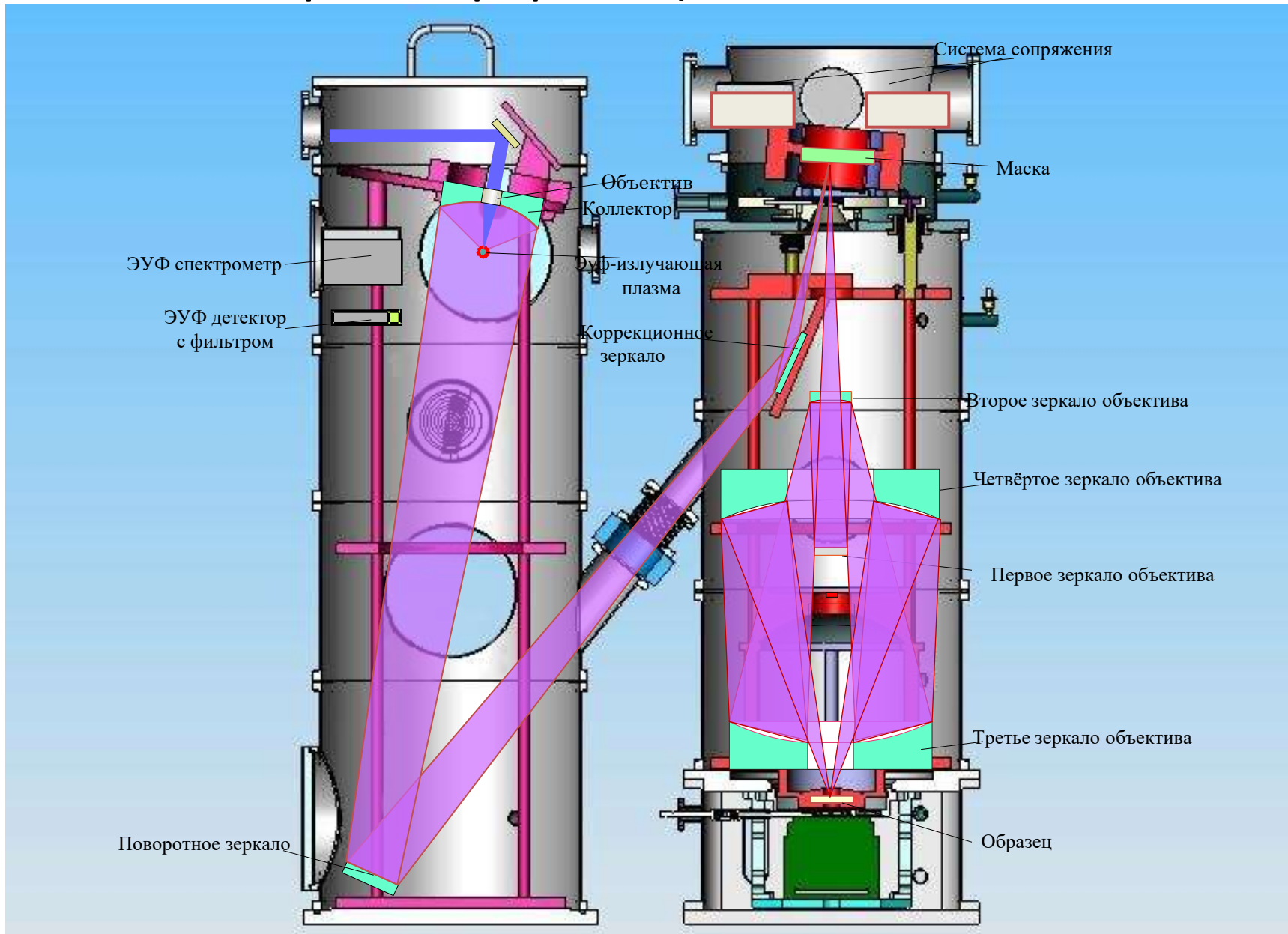
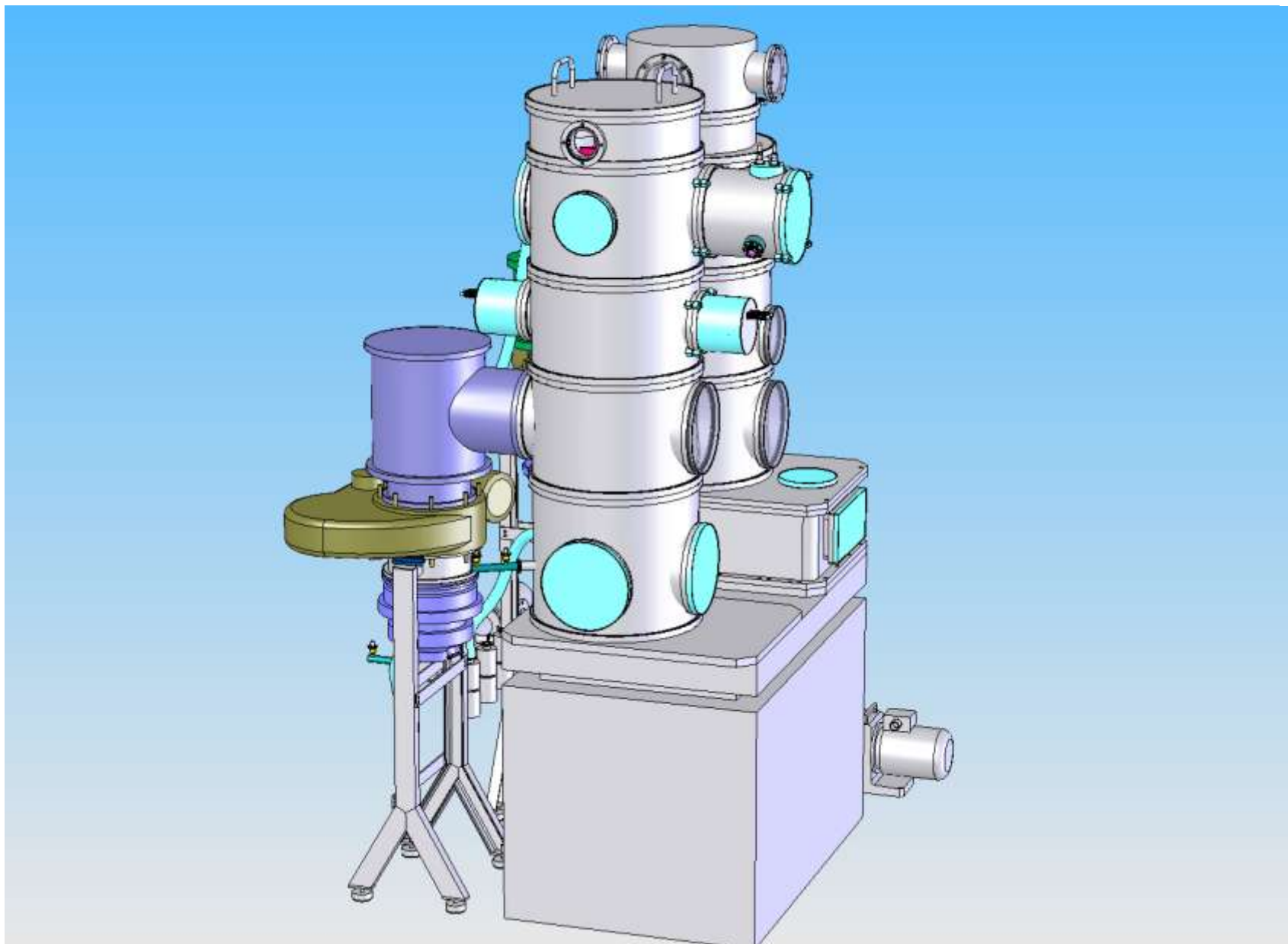


Схема экспериментального стенда МР/ЭУФ-оптики с 4М объективом

Проектная разрешающая способность **5 нм**



Экспериментальный нанолитограф

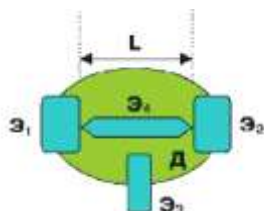
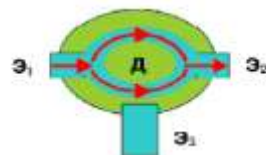


ВОЗМОЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ РАЗРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ

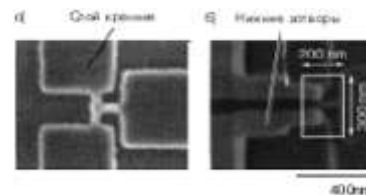
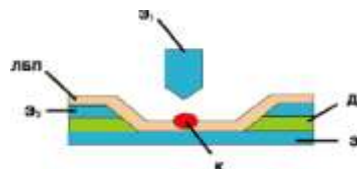
Искусственный квантовый кристалл



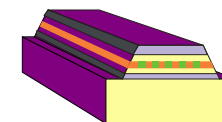
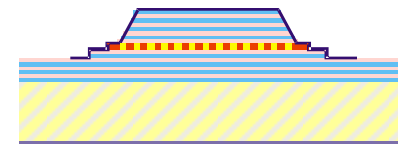
Интерференционный транзистор



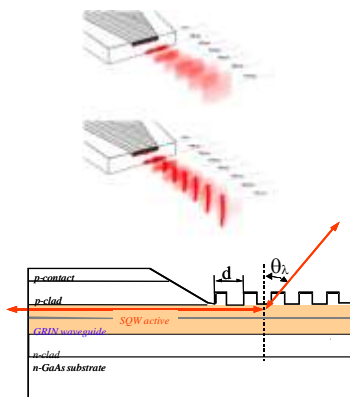
«Одноэлектронный» транзистор



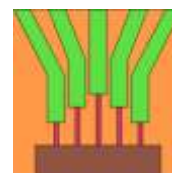
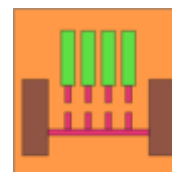
Гетеролазер на системе квантовых точек



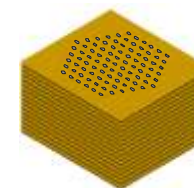
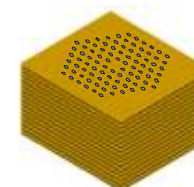
Гетеролазер с распределённой обратной связью



Мезоскопические элементы



Фотонные кристаллы



ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ОБЪЕКТОВ, СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОТОРЫХ ВОЗМОЖНО ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

- а) искусственный кристалл с квантовыми точками вместо атомов, кубический, типа NaCl, или объёмно-центрированный;
- б) интерференционные транзисторы - интерферирует волновая функция электрона;
- в) «одноэлектронный» транзистор;
- г) гетеролазер с упорядоченной системой квантовых точек;
- д) гетеролазер с распределённой обратной связью, в котором изгиб дифракционной решётки по заданному закону позволяет реализовать функции организации (фокусировки) выводимого излучения;
- е) мезоскопические элементы электронных цепей,
- ж) фотонные кристаллы различной степени сложности.

А также большое многообразие сенсоров и различных физико-химических устройств, в которых сквозное отверстие, например, 3-8 нм диаметром снабжается ещё и системой электродов, создающих мощные электрические поля вдоль отверстия. Как бы «клистроны» для избранных одиночных молекул или ионов.

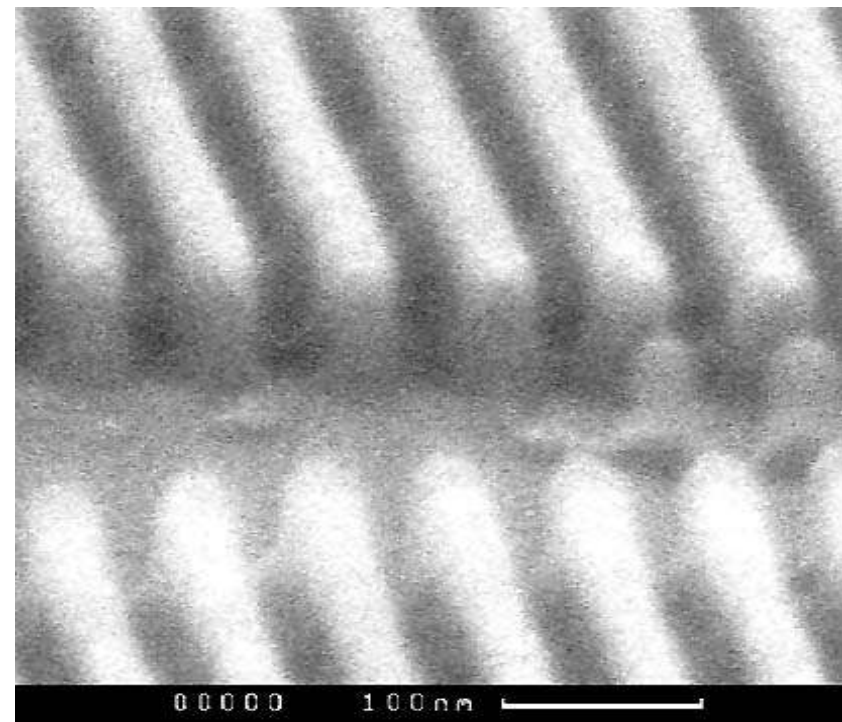
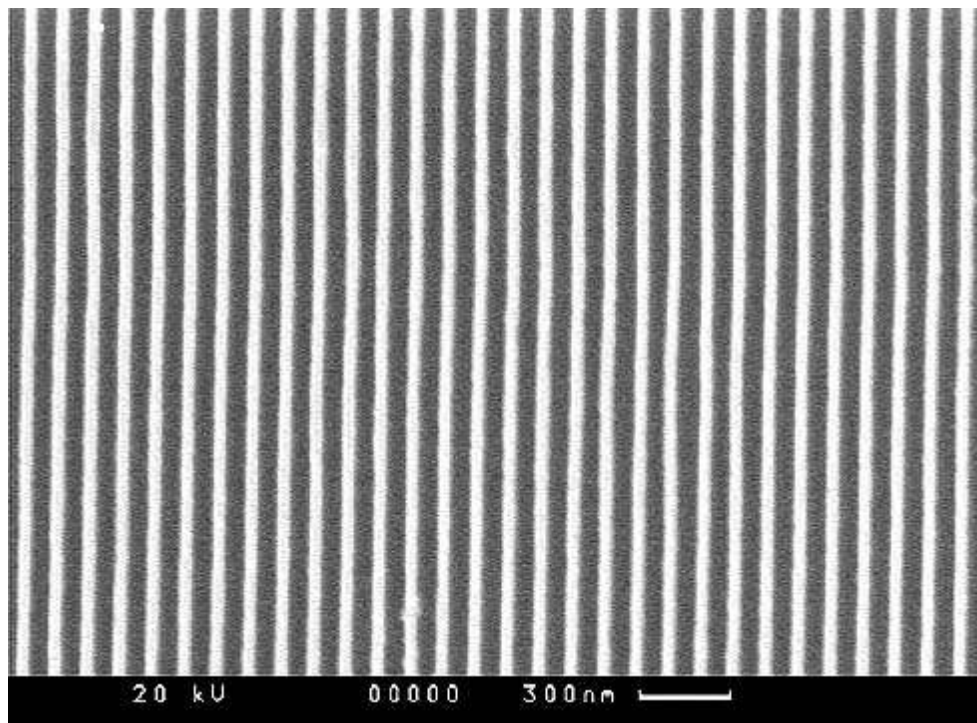
ЭУФ-наноитограф выходя на реализацию первых десятков и даже единиц нанометров, обеспечивает возможность реализации произвольно упорядоченных наноструктур, тогда как существующие на сегодняшний день технологии основаны на природной самоорганизации, с хаотическим распределением наночастиц. Наиболее эффективным путём использования может оказаться гибридный путь, когда на нем изготавливается коммутационная «наноплата» с межсоединениями, объединяющими в единую схему площадки, подготовленные в качестве затравок для последующих процессов наращивания, использующих самоорганизацию.

Следует также отметить, что ЭУФ-наноитограф – это, в некотором смысле, перевёрнутый микроскоп работающий в рентгене и позволяющий визуализировать *in situ* процессы, происходящие с одиночными молекулярными объектами. При этом изучаемый объект занимает место образца, а маска заменяется визуализатором. Далее используется обычный оптический микроскоп. Преимущества ЭУФ-рентгеновской микроскопии в «водном» (K($\lambda L=4.2$ нм), Ca($\lambda L=3.5$ нм), N ($\lambda K=3.1$ нм) , O ($\lambda K=2.3$ нм)) и «углеродном» (P ($\lambda L=9.4$ нм), S ($\lambda L=8$ нм), Mo ($\lambda M=5.5$ нм), C ($\lambda K=4.4$ нм)) окнах прозрачности для изучения биологических образцов:

- 3D-кино «живых» образцов во влажной атмосфере при нормальном давлении
- Достижение нанометрового разрешения в «толстых» образцах и 3D-томография
- Изображение распределения выбранных химических элементов в образце с нанометровым разрешением.
- Достигаемые параметры по разрешению для микроскопии, дефектоскопии, 3D-кино и 3D-томографии превосходят в несколько раз результаты с применением ОМ (~ 100 нм)

ПРИМЕРЫ СТРУКТУР ИЗ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ФОТОРЕЗИСТОВ

В качестве фоторезиста в ЭУФ-литографии оптимальны неорганические фотополимеры с нелинейными свойствами обеспечивающих эффект накапливаемого скачкообразного экспонирования, такие как пленки халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) и гидрированных оксидов переходных металлов.

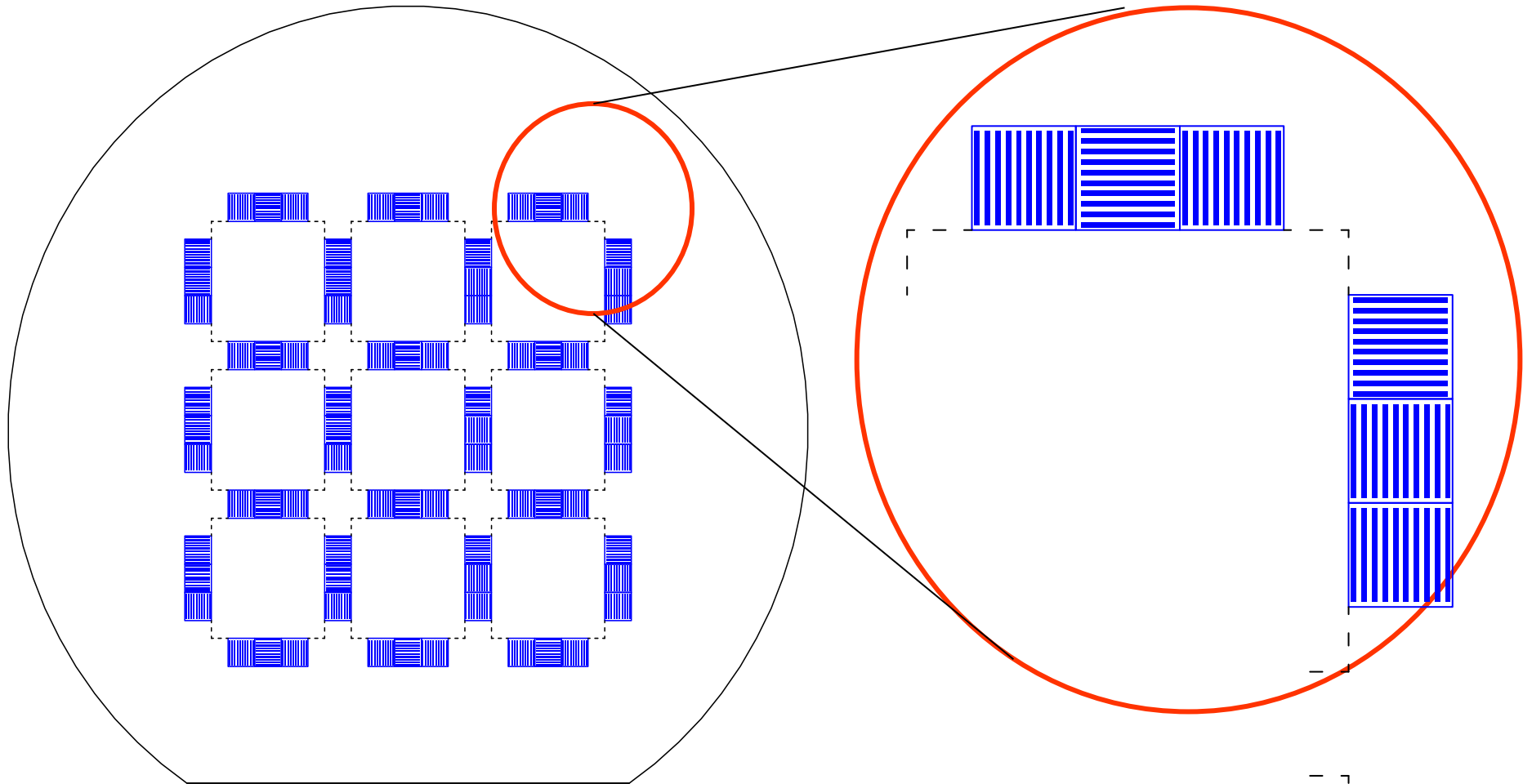


Интерференционные структуры на пленках трехсернистого мышьяка As_2S_3 , полученные при экспонировании синхротронным излучением на длине волны $\lambda=13.4$ нм.

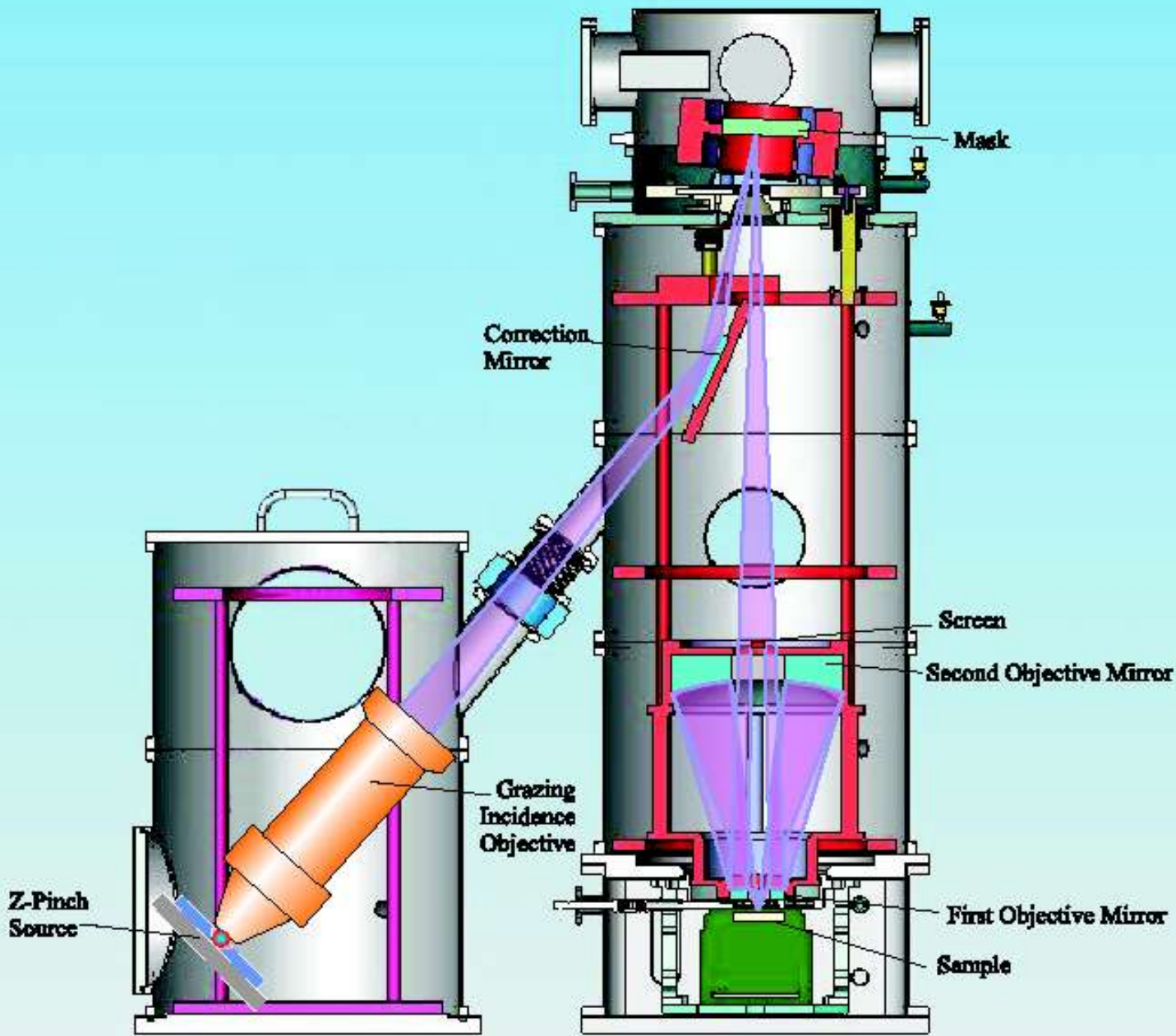
Наиболее типичными бинарными ХСП, пригодными для применения в ЭУФ-нанолитографии, являются пленки трехсернистого мышьяка As_2S_3 и трехселенистого мышьяка As_2Se_3 . Пригодность к трехмерной прямой лазерной записи (3-D DLW) и к тонкому химическому травлению, позволяют использовать эти материалы в качестве фоторезистов для изготовления трехмерных наноструктур.

Конструкция маски

Дифракционные элементы вокруг информационного слоя на маске-ретикуле и маска (ретикул) с 9-ью топологическими слоями (9 белых квадратов) формируются одновременно с 10-ти кратным увеличением ($8,2 \times 8,2 \text{ мм}^2$). Система дифракционных решёток с горизонтальными и вертикальными штрихами обеспечивают точное совмещение маски и образца. Информационные поля-квадраты заполняются последовательностями рисунков, формирующих активные (пассивные) элементы интегральных схем и наноструктур.



Эскиз опытно-промышленного ЭУФ-нанолитографа с лазерным источником , с максимальной производительностью до 10 пластин в час



Создание отечественных микроэлектронных производств обеспечивающих реализацию пп приборов и систем, в том числе с произвольно распределенными частицами.

Структура и решаемые ИТЦН задачи















- Создание международного комплексного сетевого центра компетенций микроэлектронных лазерных технологий в электронике.
- Базовое использование научных и инженерных заделов отечественных разработчиков микроэлектронных и лазерных технологий с применением коротковолновой оптики в экстремально ультрафиолетовом диапазоне. В частности, разработан и реализован экспериментальный стенд проекционной ЭУФ-наноитографии обеспечивающий CD в диапазоне 35 – 3 нм, разработаны соответствующие источники ЭУФ- и ВУФ- излучения и фоторезисты обеспечивающие гигантский контраст экспонируемого изображения.
- Развитие параллельно основных направлений позволит заместить существующее оборудование и создать новый класс оборудования, которое существенно опережает мировые образцы.
- НИОКР проводится параллельно по нескольким направлениям, что позволит на регулярной основе адаптируя планы разработок выбирать наиболее передовые решения.
- Построение распределенной сетевой экосистемы электроники, построенной на основе международной технологической кооперации с опорой на отечественные технологии.

Производство ИС / МС	Максимальное разрешение, нм	Максимальное пр-во в год, ед.	Количество специалистов	Чистые пр-ые площади, кв.м.	Объем рынка, ед.
Микрофаб-Л*	300/1000	1 200 / 480	12-15	120-150	150-200
Микрофаб-П**	300/1000	120 000 / 48 000	120-150	1 500-2 500	150-200
Минифаб***	3	1 200 000	240-300	3 500-4 500	30-40
ФАБ-С****	3	12 000 000	1 500-3 000	20 000-40 000	3-4
ФАБ-П*****	14	120 000 000	5 000-6 000	75 000-95 000	1-2

**СТАТЬИ ЗАТРАТ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ИННОВАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА
НАНОЭЛЕКТРОНИКИ (ИТЦН) И СОЗДАНИЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО
НАНОЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА (ОПНК)**

№	НАИМЕНОВАНИЕ ЭТАПОВ,НИР/ОКР ПО СОЗДАНИЮ ИТЦН-ОПНК	Срок выполнения	Затраты млн. руб.
1	Предпроектные подготовка и исследования, разработка детализированного БП и ТЭО проекта инновационно-технологического центра нанoeлектроники (ИТЦН) и опытно-промышленного нанoeлектронного комплекса (ОПНК), проведение НИР «Разработка ТЗ ОПНК на основе EUV-литографии»	6-12 мес.	
2	Создание инфраструктурного комплекса ИТЦН	6-12 мес.	
	ВСЕГО:		
3	Создание НИЦ в составе отделов НИОКР нанoeлектронных технологий и, технологического оборудования, головных центров дизайна, и тестирования ИС/НС, обучения специалистов	24-36 мес.	
4	НИОКР «Комплексный проект полного цикла многоуровневого импортозамещения полупроводниковых материалов, химических веществ и соединений в нанoeлектронике»	18-24 мес.	
5	НИОКР по созданию опытно-промышленных нанолитографов с разрешением 28, 14 и 3 нм	18-36 мес.	
6	НИОКР по созданию опытно-промышленных интерференционных нанолитографов для производства пространственных пп структур с периодом <100 нм и размером элементов <50 нм	18-24 мес.	
7	Закупка технологического оборудования и измерительной аппаратуры	12-18 мес.	
8	Изготовление и поставка экспериментальной линии нанолитографии	12-18 мес.	
9	Создание технической и социальной инфраструктуры комплекса	12-18 мес.	
10	Обучение специалистов производственно-экспериментального участка, пуско-наладочные работы, расходные материалы	18-24 мес.	
11	Оборудование и технологическое сопровождение ОПНК	18-24 мес.	
	ВСЕГО:		
12	Создание и финансирование головного комплекса по производству и гарантийному обслуживанию технологического оборудования, а также учебного центра по обучению и повышению квалификации отраслевых специалистов	6-12 мес.	
13	Создание и финансирование сетевой системы региональных организаций по продажам, лизингу, внедрению и обслуживанию технологических комплексов	18-36 мес.	
14	Создание и финансирование сетевой системы региональных дизайн центров по разработке ЭКБ и специализированной электроники на базе микрофабов и минифабов	18-36 мес.	
	ВСЕГО:		
	ИТОГО:		

Дорожная карта создания и внедрения продуктовой линейки ИТЦН

Год начала освоения	2024	2025	2026	2028
ФАБ CD 14 нм Промышленный нанозлектронный комплекс с разрешением 14 нм для выпуска массовой продукции с комплексным обеспечением разработки и производства, определяющим развитие глобальной электронной экосистемы в целом.				 x 1-2
Спецфаб CD 3 нм Специализированный промышленный нанозлектронный комплекс с разрешением 3 нм с возможностью крупносерийного производства пластин со сформированными по единой технологии первыми слоями ИС для дальнейшей специализации на микрофабах и микрофабах.	 Существующее производство CD 60-90 нм	 Существующее производство CD 60-90 нм	 x 1	 x 3-4
Минифаб CD 3 нм Нанозлектронный комплекс на базе литографов с максимальным разрешением 3 нм обеспечивает серийный выпуск ИС и пластин со сформированными по единой технологии активными элементами и нижними слоями межсоединений ИС для дальнейшей финишной специализации на микрофабах.		 x 1	 x 3-4	 x 30-40
Микрофаб CD 300/1000 нм Микроэлектронный роботизированный комплекс лазерографии и высокоплотного монтажа ЭКБ с инвариантным применением подложек и материалов, в том числе и пластин со сформированными активными элементами и нижними слоями межсоединений ИС с разрешением 300 нм, а также МС с разрешением 1000 нм.	 x 1	 x 3-4	 x 30-40	 x 300-400
Целевые показатели: выпуск ИС/МС, шт. высокотехнологичных рабочих мест, ед.	Импортозамещение 40% 120 000/48 000 160	Импортозамещение 60% 1 200 000/96 000 450	Импортозамещение 80% 12 000 000/960 000 7 200	Импортозамещение 90% 72 000 000/9 600 000 45 000