

# Рентгеновская литография на длине волны 11,2 нм: состояние дел и перспективы

Чхало Н.И., Паульс В.В.

*Институт физики микроструктур РАН, [chkhalo@ipmras.ru](mailto:chkhalo@ipmras.ru),*

16-я Валиевская Международная конференция  
«Микро- и нанoeлектроника - 2025»  
ЯрГУ им. П.Г.Демидова, 6 — 10 октября 2025 г.

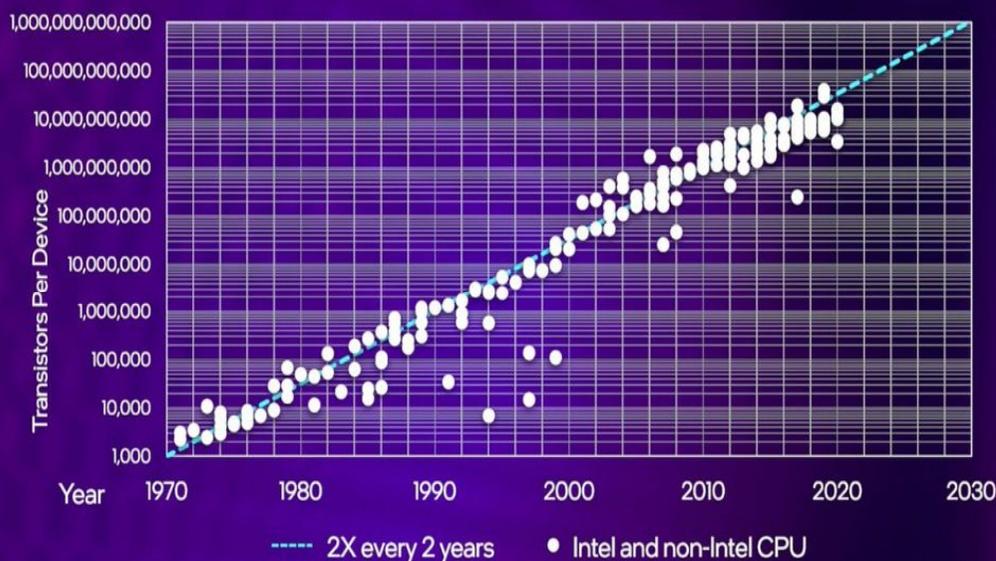


# СОДЕРЖАНИЕ

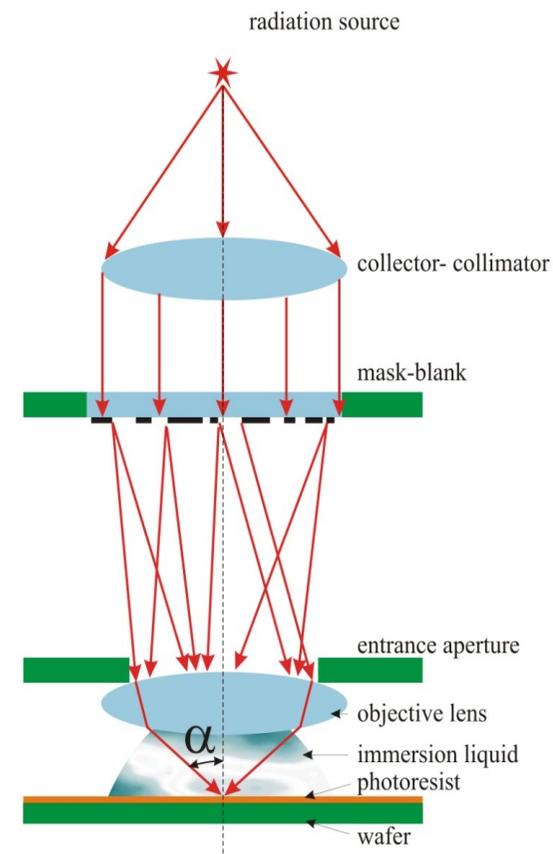
- EUV литография на длине волны 13.5 нм, ее роль при производстве современных чипов и проблемы.
- Обоснование новой длины волны 11.2 нм и концепция литографии на этой длине волны.
- Заделы в области критических технологий рентгеновской литографии в РФ.
- Дорожная карта развития литографии в РФ.
- Заключение.

# EUV литография на длине волны 13.5 нм и ее роль при производстве современных чипов.

## Moore's Law is alive and well



- Прогресс микроэлектроники характеризуется числом транзисторов на чипе.
- Самое дорогое оборудование



Пространственное разрешение объектива

$$\delta x = k_1 \cdot \lambda / (n \cdot \sin \alpha) \approx \lambda / 2$$

$$\lambda = 193 \text{ нм}, \delta x \approx 100 \text{ нм}$$

## Методы повышения разрешения

- ~~Коррекция оптических эффектов близости~~
- ~~Иммерсия (вода, NA=1,32)~~
- ~~Внеосевое освещение маски~~
- ~~Программируемое пучки-пучковое освещение маски~~
- ~~Многократное экспонирование~~
- Особые требования к контрасту резиста (пониженная чувствительность)
- Производительность падает до 4 раз
- Резко повышается брак

[1] K. Kim et al. Proc. SPIE V.8326, 832605 (2012).

[2] O. Wood et al., Proc. SPIE 8322, 832203 (2012).

[3] N. Chkhalo et al., Optics Letters 42 (24) 5070 (2017).

- Укорочение длины волны до  $\lambda=13,5$  нм
- Выбор обусловлен наличием Mo/Si МИЗ с  $R\approx 68\%$  и ЛПИ на основе ионов Sn
- Мощный CO2 лазер,  $\lambda=10,6$  мкм



Разрешение **hp=13 нм** (период **26 нм**)

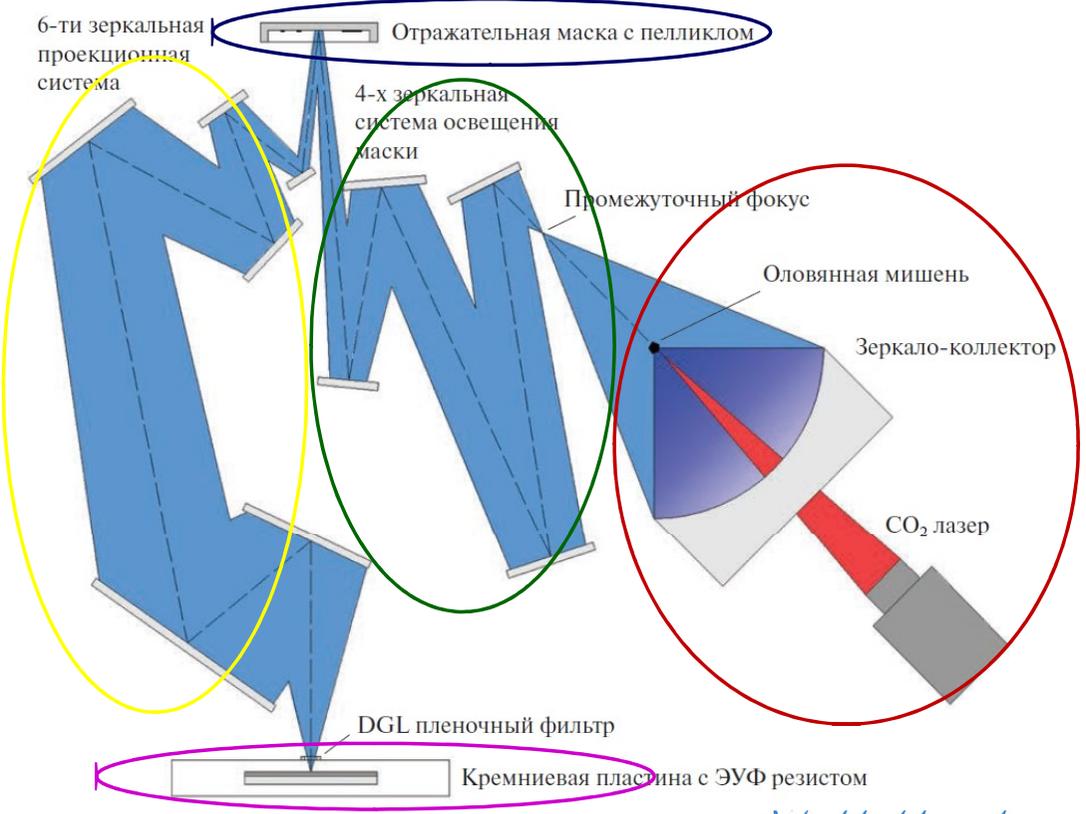
Числовая апертура **NA=0,33**

Уменьшение **M=4x**

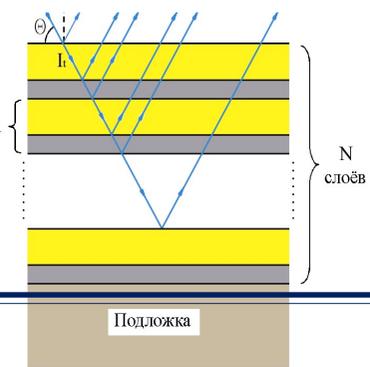
Производительность  **$\geq 190$  пластин/час (30 мДж/см<sup>2</sup>)**

Точность совмещения **1,4-1,5 нм**

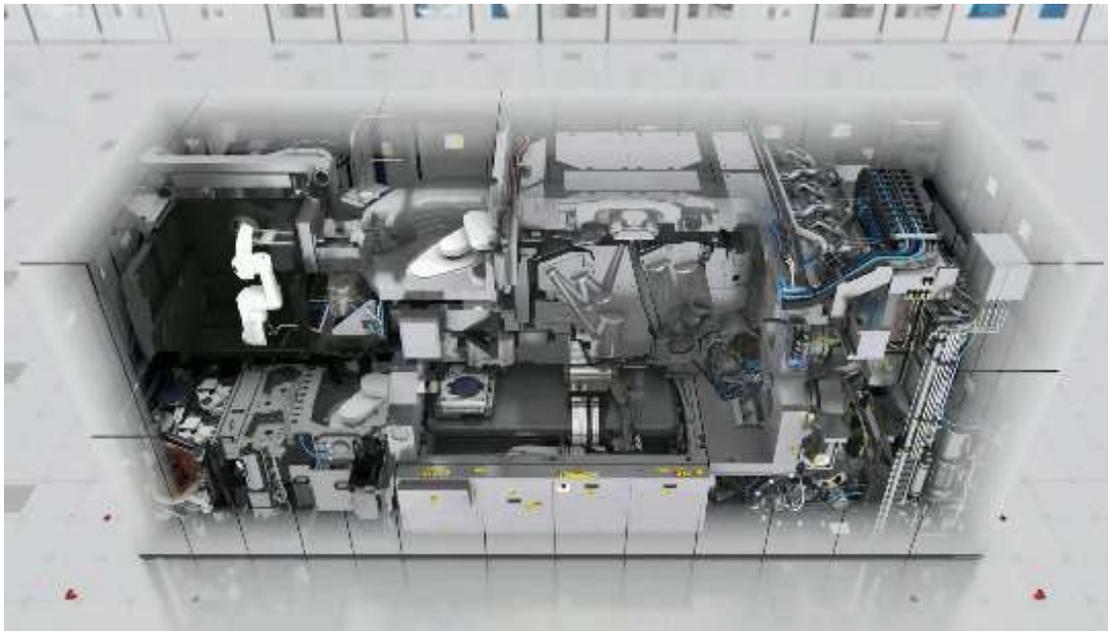
# Состав литографа серии TWINSCAN NXE (ASML)



Показатель преломления  $n \approx 1$ ,  $R_1 \approx 0$   
 $2d \sin \theta = \lambda$  - условие Брэгга для МИЗ  
 $d \approx \lambda / 2 \approx 3-7 \text{ нм}$   
 $N \approx 100 - 300$



5 Для  $\lambda = 13.5 \text{ нм}$  - Mo/Si



## Основные проблемы литографии на длине волны 13,5 нм

### Ключевые проблемы EUV литографа ASML



### Следствия проблем

- распыление в литографе около 1 кг олова в сутки;
- использование  $H_2$  для вывода олова из установки;
- защита коллектора от продуктов эрозии Sn-мишени;
- огромные тепловые нагрузки на коллектор из-за рассеяния  $\sim 2$  кВт излучения на 10.6 мкм;
- наличие в схеме дифракционного коллектора с коэффициентом отражения 41%, пропускающего EUV, DUV и видимый свет (нагрев оптических элементов, включая pellicle и маску).
- низкая реальная эффективность источника в IF  $\sim 1.2$  % и пропускание оптической системы  $\sim 1.0$  %
- короткое время жизни коллектора и пелликов  $\sim 2,5$  недели;
- огромное потребление энергии  $\sim 1.5$  МВт;
- гигантские размеры установки (вес около 200 тонн) и стоимость  $> \$300\,000\,000$ .

Топ-5 потребителей EUV-L от ASML: Intel, TSMC, Samsung, Micron Technology, SK Hynix Korea.  
**Такая технология окупаема только на глобальном рынке!**

# КОНЦЕПЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ЛИТОГРАФ от ИФМ РАН

## Цель

- Разработка литографа, обеспечивающего **производительность и технологические нормы** на уровне ASML при **порядок снижении размеров, энергопотребления, цены и эксплуатационных расходов** литографа (*доступность этой технологии для большинства мировых и отечественных производителей СБИС*).

## Способ достижения цели:

Длина волны, зеркала

- **$\lambda=11,2$  нм**

Лазерно-плазменный источник

- Хе источник, **CE=2..4%**; Yb:YAG лазер с дисковым усилителем на 1.03 мкм; **до 4 кВт**.

Достигаемые преимущества

- Гигантский и проблемный газовый лазер заменяется на малогабаритный твердотельный
- заметное упрощение, повышение эффективности и удешевление рентгеновской оптики;
- увеличение реального **CE**;
- упрощение конструкции, снижение энергопотребления (**до ~0.2 МВт**) и размеров литографа;
- повышение жизненного цикла лазера, коллектора и пелликов, генератора вещества и других элементов литографа;
- повышение чувствительности резиста (**кремний органика**);
- снижение тепловой нагрузки на рентгенооптические элементы.

N.I. Chkhalo, et al. AIP Advances. **3** (8), 082130 (2013).

N. I. Chkhalo, et al. AIP Advances **8**, 105003 (2018).

S. G. Kalmykov, et al. JAP **126** (10), 103301 (2019).

R. M. Smertin, et al. Opt. Express **30** (26), 46749 (2022).

М. Р. Волков и др. Квантовая электроника **49** (4), 354 (2019)

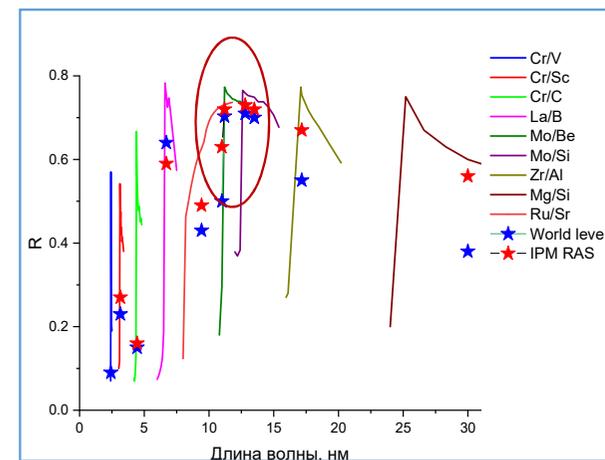
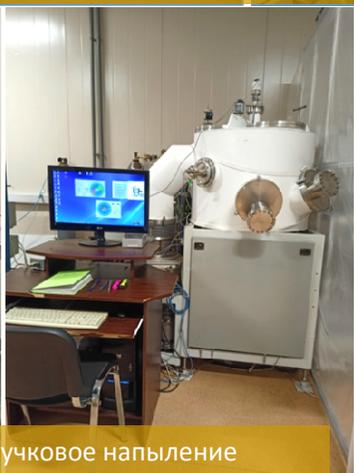
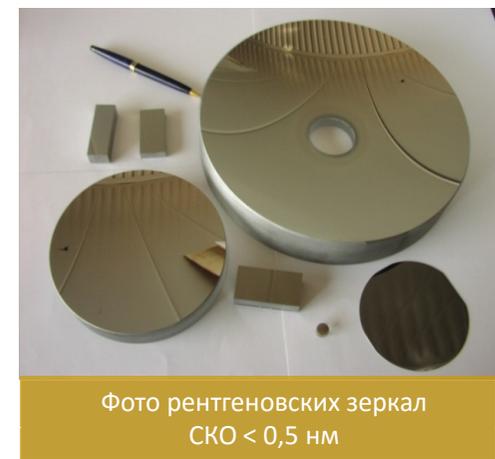
I. S. Abramov, et al. Phys. Rev. Applied **23**, 024004 (2025).

## Сравнение эффективности литографов на длинах волн 13.5 и 11.2 нм после реализации ДК

Параметр	ASML	ИФМ РАН
Длина волны, нм	13.5	11.2
Числовая апертура объектива, NA	0.33	0.27
Пространственное разрешение, нм	13	13
Количество зеркал в объективе, шт.	6	6
Количество зеркал в осветителе, шт.	4	4
Коэффициент отражения зеркала, %	66	72
Коэффициент отражения маски, %	65	72
Коэффициент отражения коллектора, %	41	65
Телесный угол сбора ЭУФ, ср	5.2	5.2
Пропускание газодинамической защиты, %	57	90
Конверсионная эффективность, %	6	4
Поглощение в резисте, относительные единицы	1	1.2
Мощность лазера, кВт	21.5	3.6 (4.6)
Фильтр спектральной очистки	1	0,7
Производительность, пластин Ø300 мм в час	250	197 (250)
Цена литографа	>300 M\$	~30-40 M\$
Ежегодная стоимость эксплуатации	20-50% цены	<< 10%

# Реализуемость предлагаемой концепции и основные заделы ИФМ РАН

## Создан полный цикл изготовления высокоточных рентгеновских зеркал

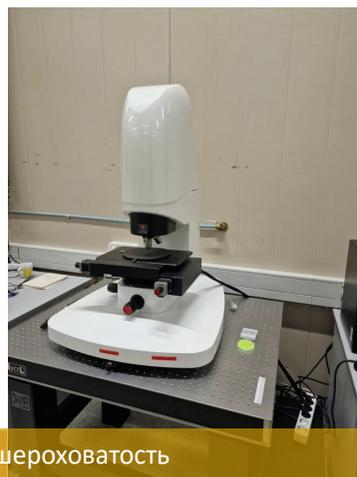
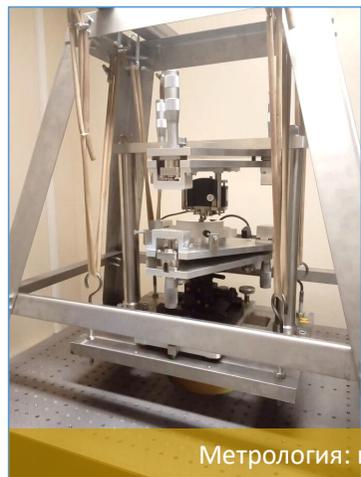


# Ключевое оборудование, для метрологии формы поверхности и aberrаций оптических систем, и коэффициентов отражения зеркал



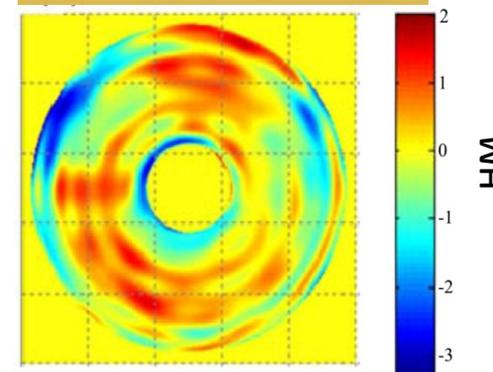
Метрология: форма поверхности и aberrации оптических систем

Зеркало объектива литографа  
СКО < 0,8 нм



Метрология: шероховатость

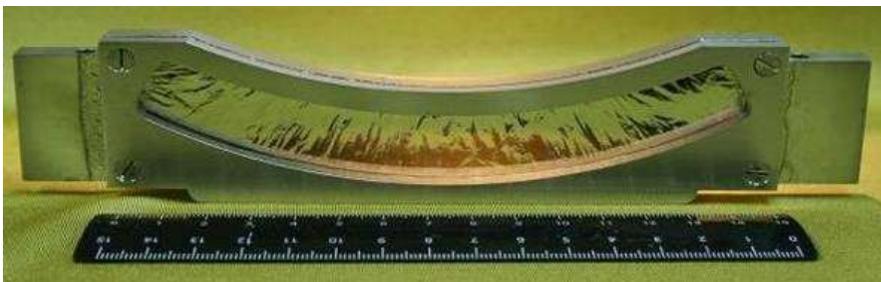
Рефлектометрия



М.М. Барышева и др. УФН **182** (7), 727 (2012).  
 N. I. Chkhalo, et al. Optics Express, **22** (17) 20094 (2014).  
 N. I. Chkhalo, et al. Rev. Sci. Instrum. **86**, 016102 (2015).  
 Garakhin S.A. et al. Rev. Sci. Instrum. **91** (6), 063103 (2020).  
 A.A. Akhsakhalyan, et al. Precision Engineering **72**, 330 (2021).  
 M. Toropov, et al. Optics Letters **47** (14) 3459 (2022).

# Реализуемость предлагаемой концепции и основные заделы ИФМ РАН

Разработаны технологии изготовления фильтров и пелликов для ASML и др.



Фильтр для  $\alpha$ -литографа ASML (2006)



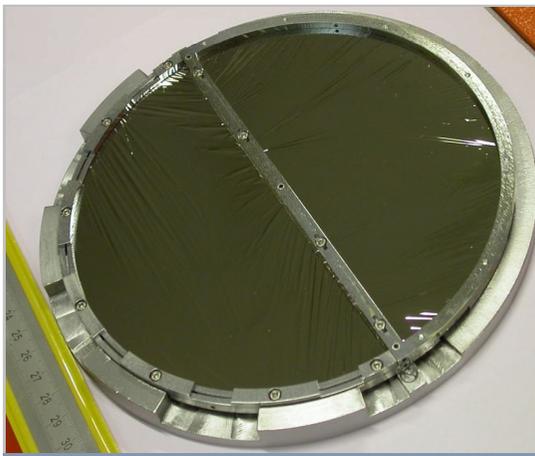
Пелликл для EUV литографа



Газодинамический затвор для промышленного EUV литографа NXE:3300 (2013)



Высокоточный рефлектометр для изучения загрязнений зеркал и фильтров



Фильтр для Бета-литографа EUV литографа NXE:3100 (2011)

Зеркала, фильтры, рентгенооптические системы для контроля деградации зеркал и фильтров.

Поставляются в Юго-Восточную Азию.

M. S. Bibishkin, et al. Proc. SPIE **7025**, 702502 (2008).

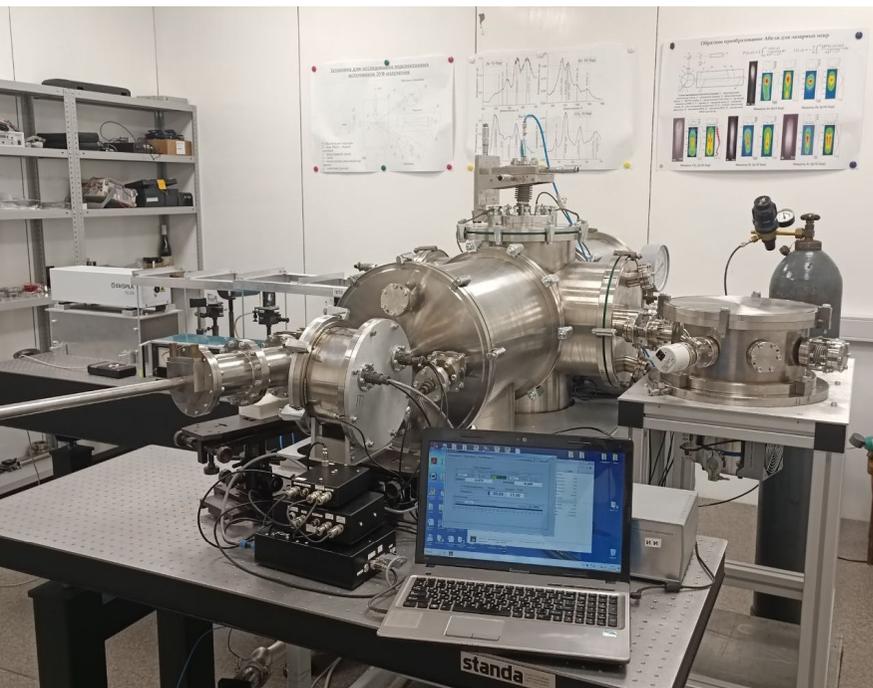
N.I. Chkhalo, et al. J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS **11**, 021115 (2012).

N. I. Chkhalo, et al. Proc. SPIE **7521**, 752105 (2010).

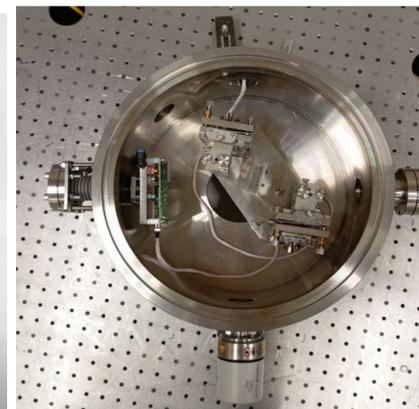
Banine, V. et al. Patent (2012 P00024 US); (2012 P00024 WO).

V.E. Banine, et al. Patent P-2221.000-US (2005).

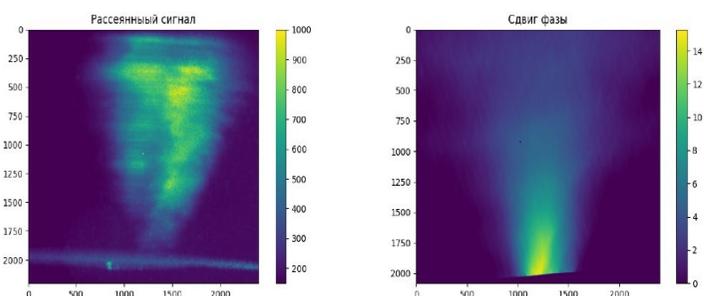
## Стенд ЛПИ и метрологическое сопровождение



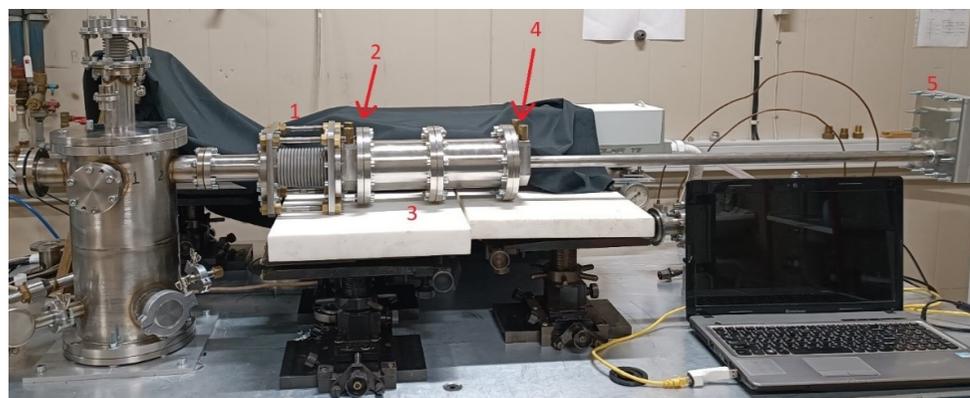
Измеритель  $\text{CE}$



Высокоразрешающий XEUV спектрограф и абсолютно калиброванный Брэгговский спектрометр



Лазерная интерферометрия струй



Микроскоп на длину волны  $\lambda=11.2$  нм и изображение источника



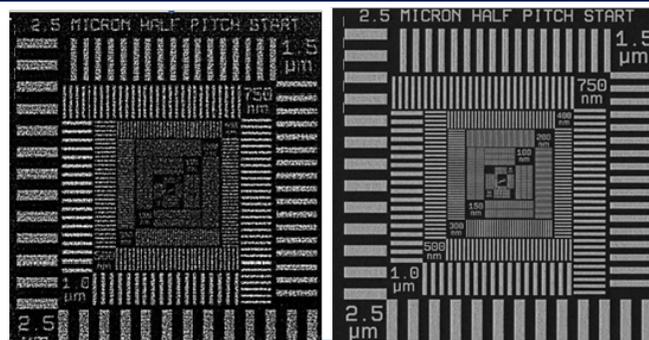
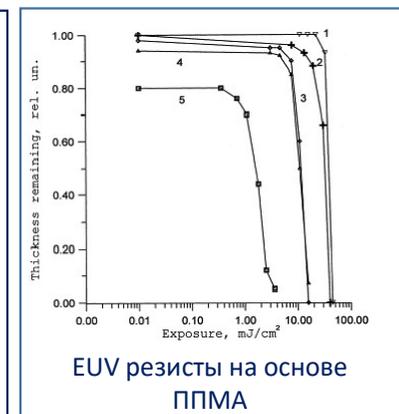
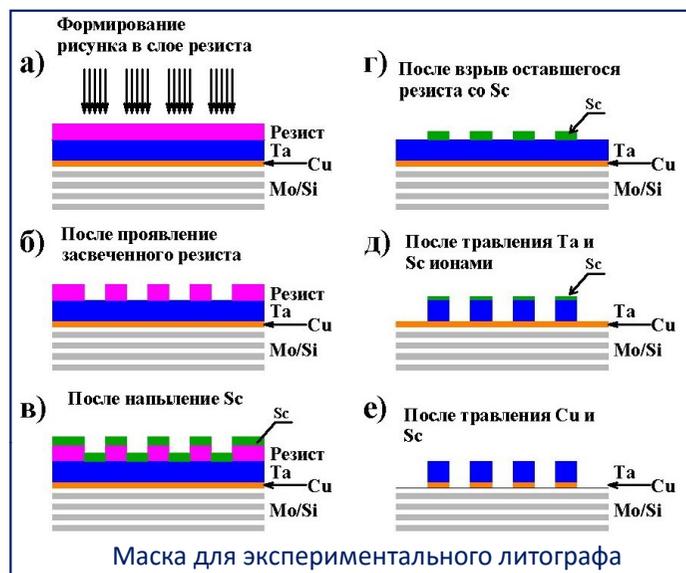
N. I. Chkhalo, et al. AIP Advances **8**, 105003 (2018); N. I. Chkhalo, et al. Appl. Phys. Lett. **112**, 221101 (2018); A.N. Nechay, et al. Optics & Laser Technology **142**, 107250 (2021); Nechay A. N. et al. Applied Physics B **129** (3), 49 (2023); V. E. Guseva, et al. Applied Physics B **129**, 155 (2023).

# Реализуемость предлагаемой концепции и основные заделы ИФМ РАН

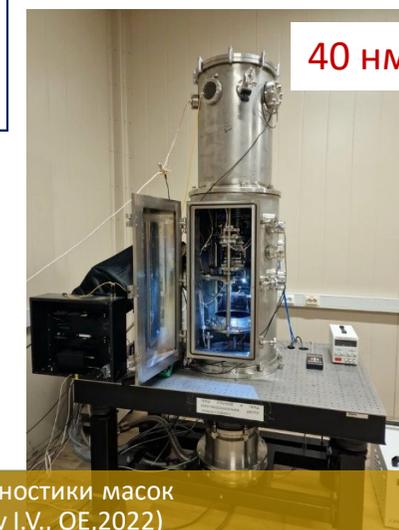
Экспериментальные образцы литографа на 13,5 нм (2010 г.) и микроскопа на 13.8 нм (2022)



Прототип EUV литографа



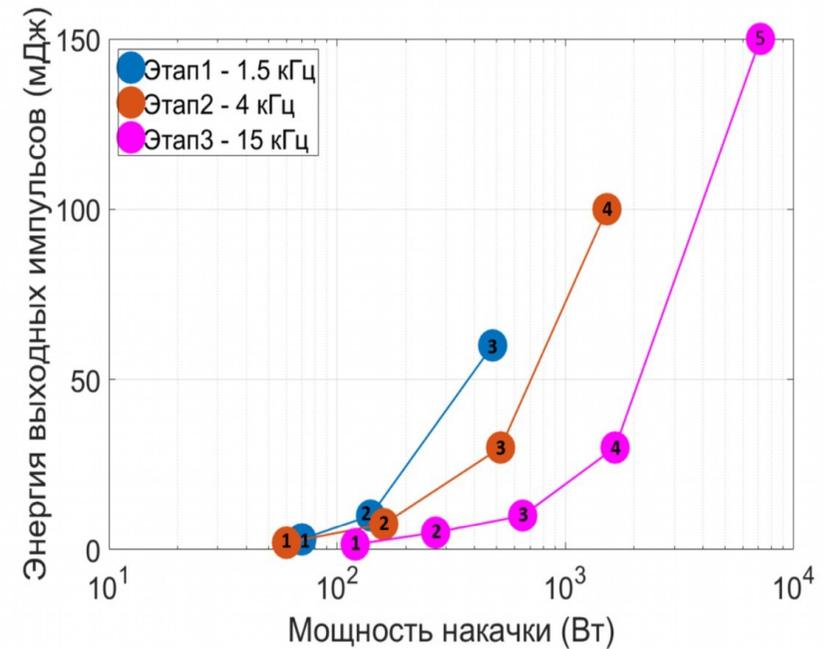
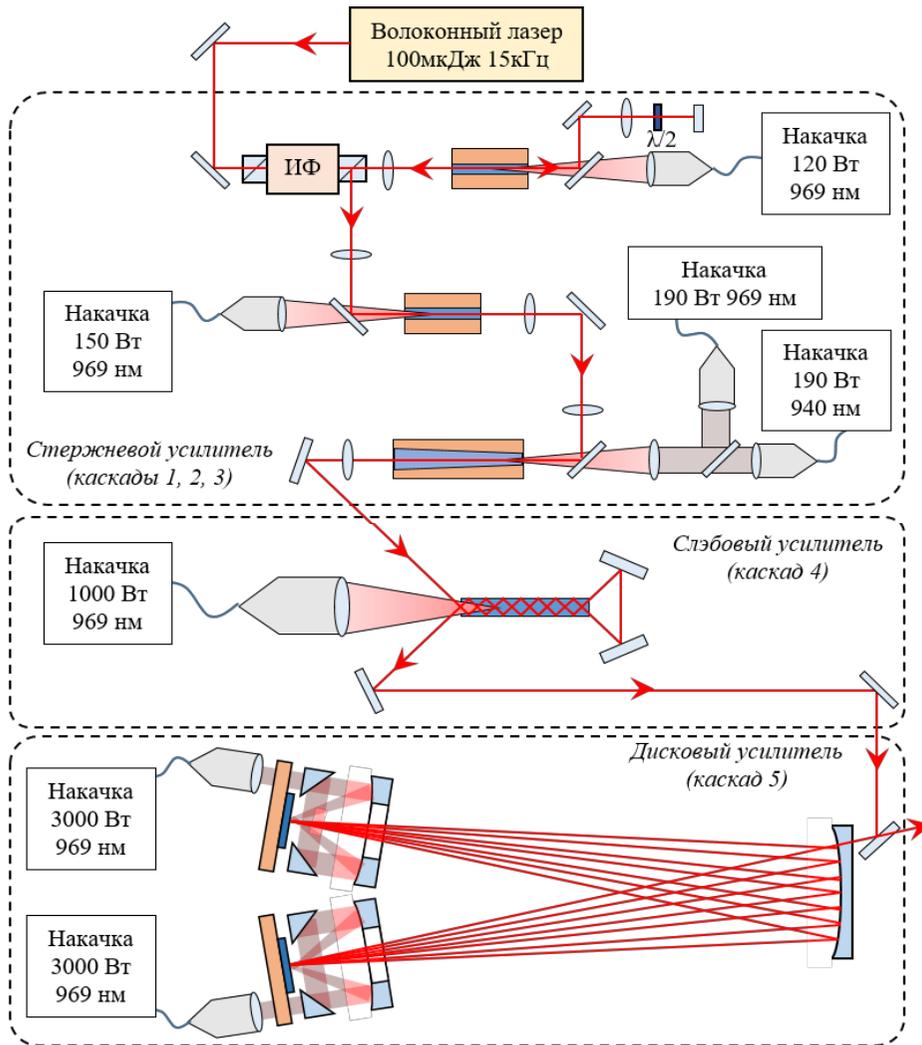
Прототип EUV микроскопа для диагностики масок на рабочей длине волны (Malyshev I.V., ОЕ, 2022)



40 нм

С.Ю. Зуев и др. Известия РАН. Серия физическая **75** (1), 61(2011).  
 Д.Г. Волгунов, и др. Известия РАН. Серия физическая. Том **75** (1), 54 (2011).  
 М.М. Барышева и др. УФН **182** (7), 727 (2012).

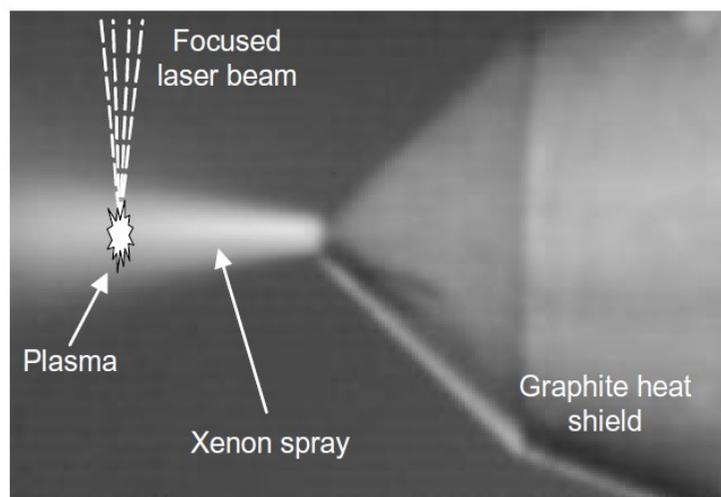
## Облик гибридного твердотельного лазера мультикиловаттного класса для ЛПИ РИ



Зависимость выходной энергии от мощности накачки для 3-х лазеров, соответствующих трем этапам реализации проекта с частотой 1.5 кГц, 4 кГц и 15 кГц. Цифры в кружках – номер усилительного каскада.

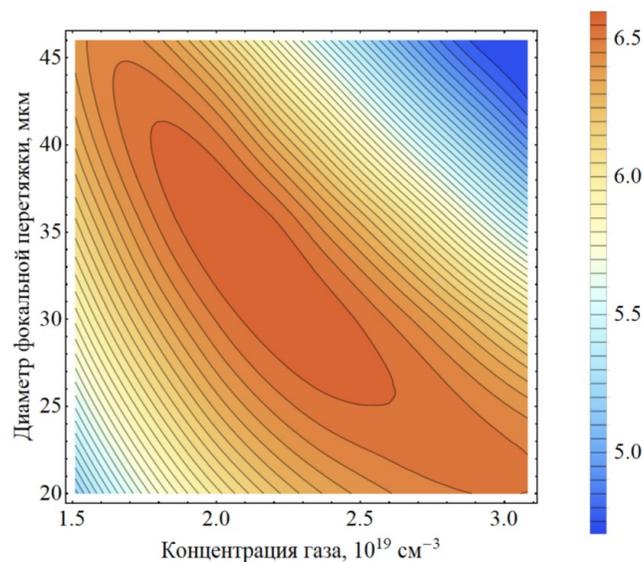
- В ИФ РАН разработан генератор лазера с  $P=100$  Вт
- В ИФ РАН разработан прототип лазера с дисковым усилителем с  $P > 1$  кВт
- Расчет указывает на возможность достижения 6-7 кВт

## Облик источника рентгеновского излучения

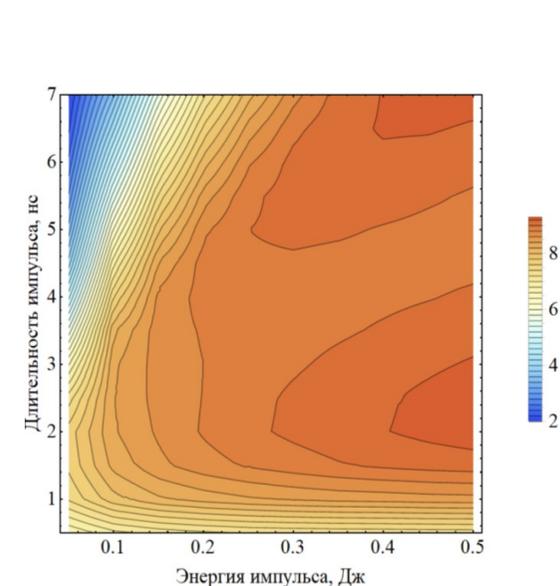


Кластеризованная струя Xe,  $T = -70^\circ\text{C}$ .

Shields H. et al. Xenon target performance characteristics for laser-produced plasma EUV sources // Emerging Lithographic Technologies VI. – SPIE, 2002. – Т. 4688. – С. 94-101



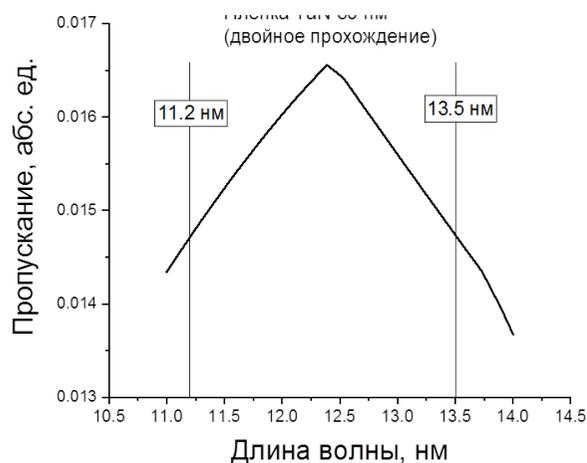
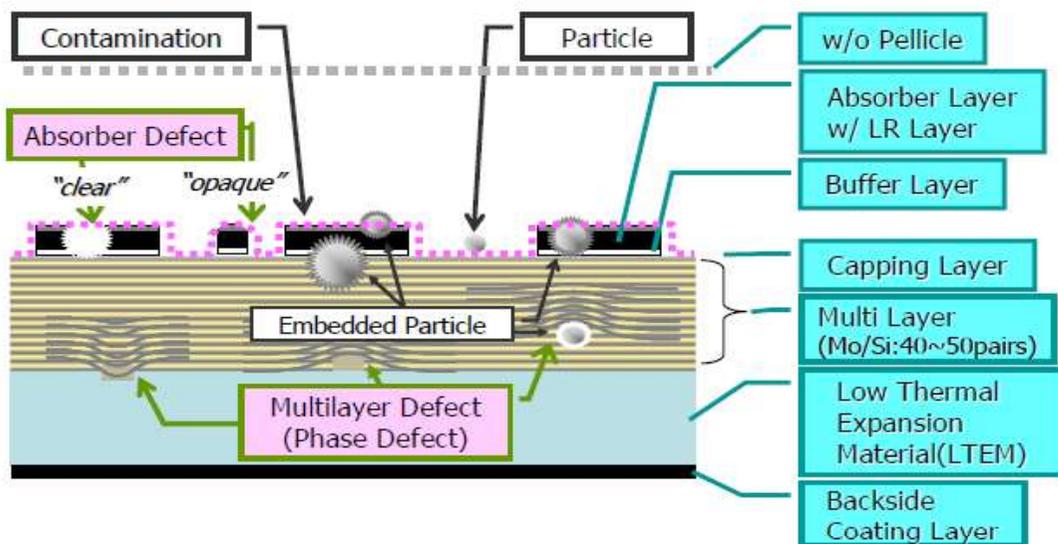
Зависимость **CE** от концентрации **Xe** и диаметра фокальной перетяжки. Энергия импульса **50 мДж**, длительность **3 нс**, диаметр струи **1100 мкм**.



Зависимость **CE** от энергии и длительности лазерного импульса. Длина волны лазерного излучения **1 мкм**, диаметр струи **1100 мкм**.

- Расчетная конверсионная эффективность **Xe** источника даже превосходит **Sn**
- Экспериментально доказана **CE=4%**
- Имеется прототип источника (США), работавший с лазером **> 1 кВт**

## Облик литографических шаблонов



Спектральные зависимости коэффициента пропускания слоя абсорбера TaBN, толщина 65 нм.

Node	Resolution		2013 ITRS
N10	22nm	Budgeted Overlay (nm)	4.4
		Image Placement (nm)	2.6
		Flatness (nm)	25.0
		Slope (urad)	0.8
N7	16nm	Budgeted Overlay (nm)	3.4
		Image Placement (nm)	3.0
		Flatness (nm)	28.9
		Slope (urad)	1.0
N5	13nm	Budgeted Overlay (nm)	2.6
		Image Placement (nm)	2.3
		Flatness (nm)	22.3
		Slope (urad)	0.7
N5	10nm	Budgeted Overlay (nm)	2.0
		Image Placement (nm)	1.8
		Flatness (nm)	17.2
		Slope (urad)	0.6
N3	7nm	Budgeted Overlay (nm)	1.4
		Image Placement (nm)	1.3
		Flatness (nm)	12.1
		Slope (urad)	0.4

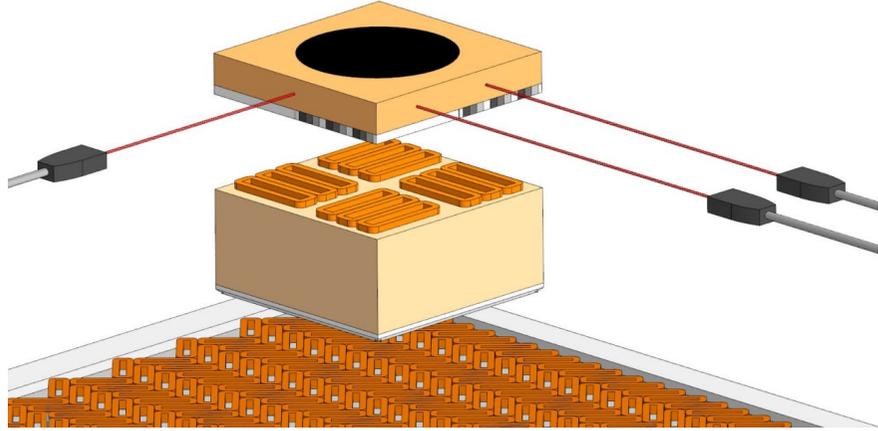
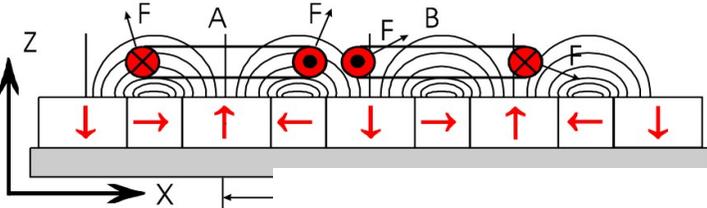
Требования к плоскости подложек для масок и суммарным ошибкам наложения по данным Международной технологической дорожной карты для полупроводникового производства 2013 года (International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)).

# Облик столика для перемещения пластин

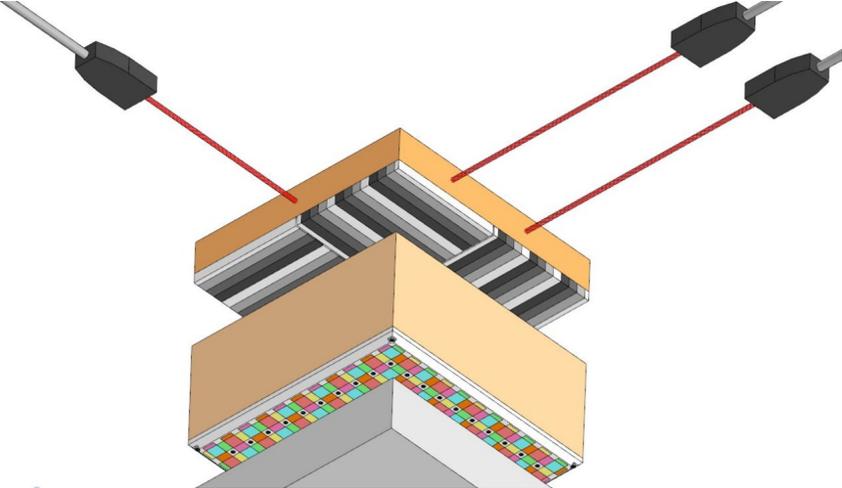
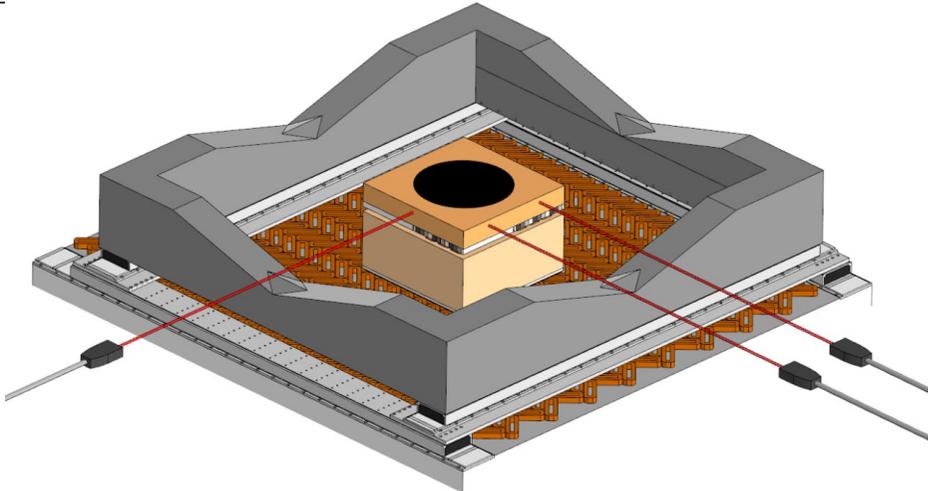
## Система сканирования

- ✓ Скорость / ускорение > 3 м/с / 30 м/с<sup>2</sup>
- ✓ длина/точность перемещений ≈ 1 м / 1 нм
- ✓ тип - магнитная левитация
- ✓ контроль - интерферометрический

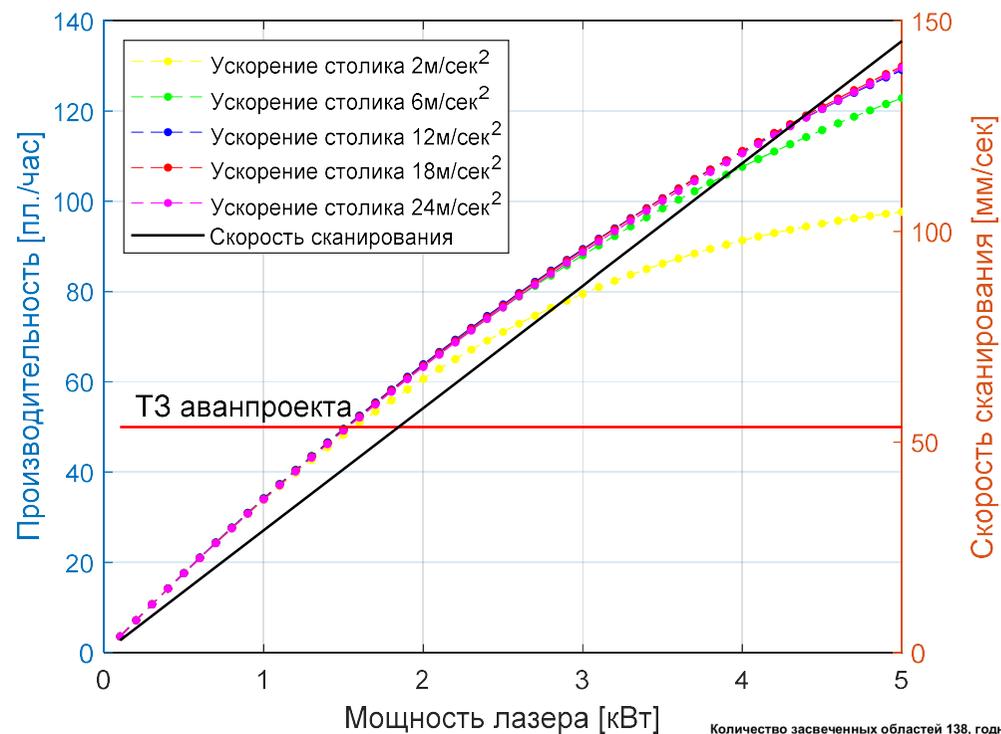
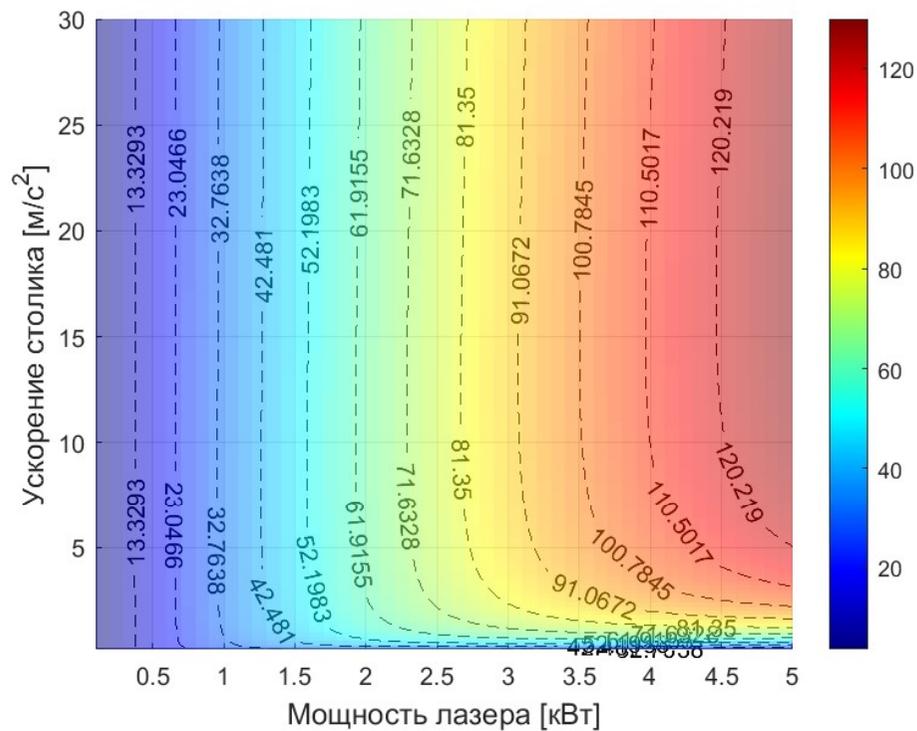
### Сборка Хальбаха



### Баланс масс

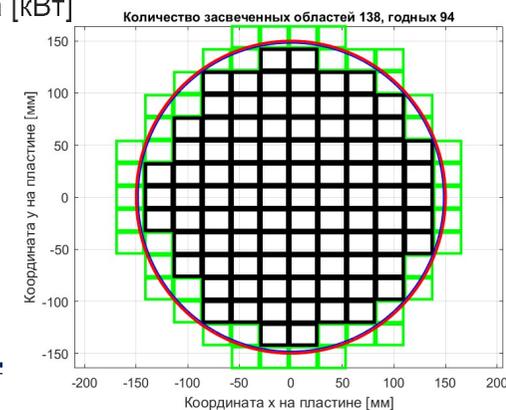


## Функциональная модель рентгеновского литографа для оценки ключевых процессных параметров

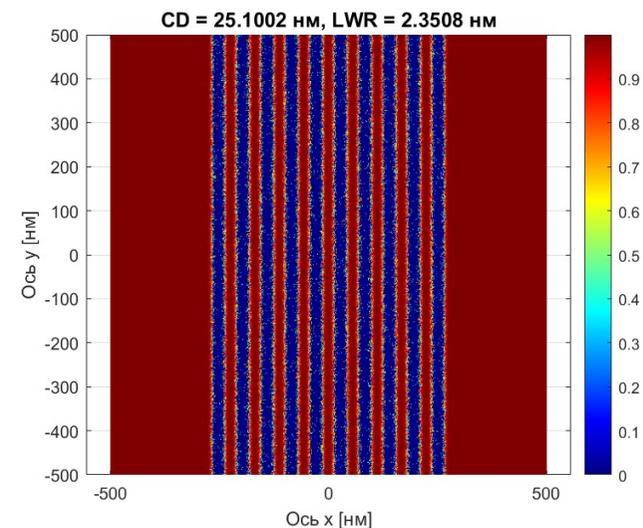
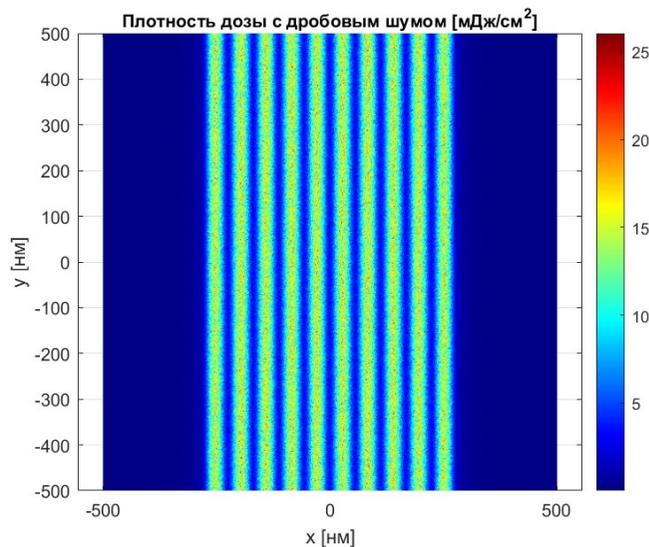
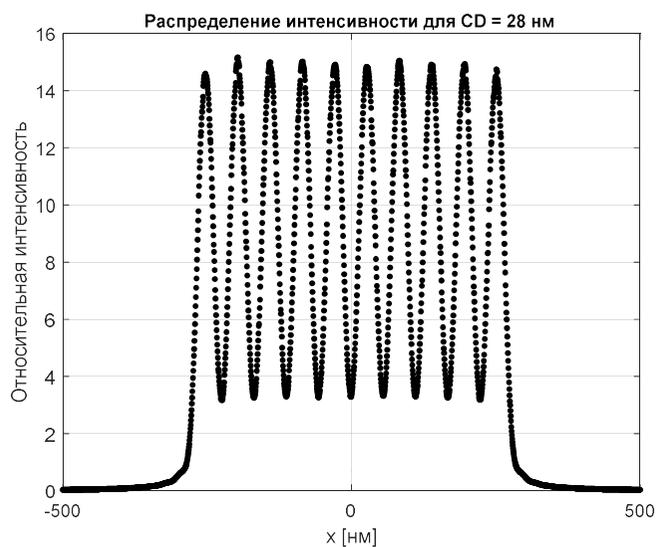


- Моделируются:

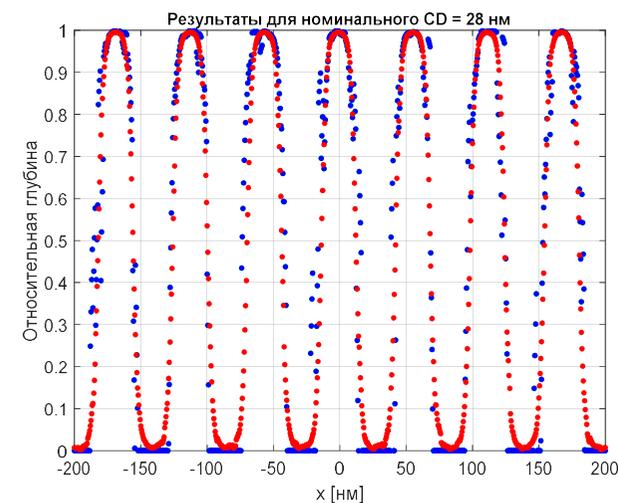
- ✓ Плотность мощности рабочего излучения на пластине с резистом
- ✓ Распределение областей с ИС на пластине
- ✓ Траектории координатных столов



## Функциональная модель рентгеновского литографа для оценки ключевых процессных параметров

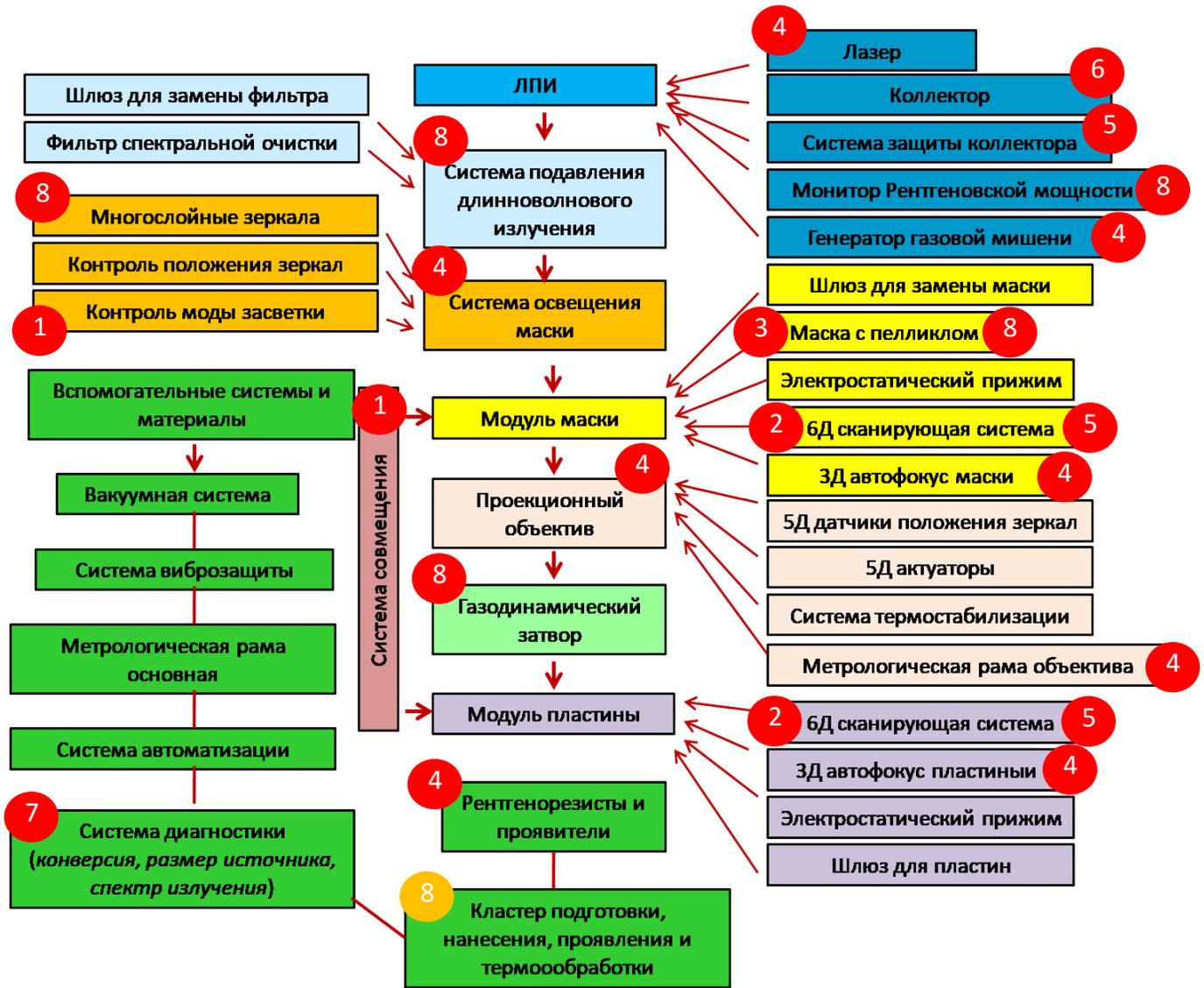


- Расчет интенсивности линий осуществляется в программе Zemax
- Вычисляется плотность дозы на резисте
- Добавляется дробовой шум
- Моделируется глубина проявленного резиста
- Вычисляются контрольные параметры – характеристическая размерность и шероховатость края

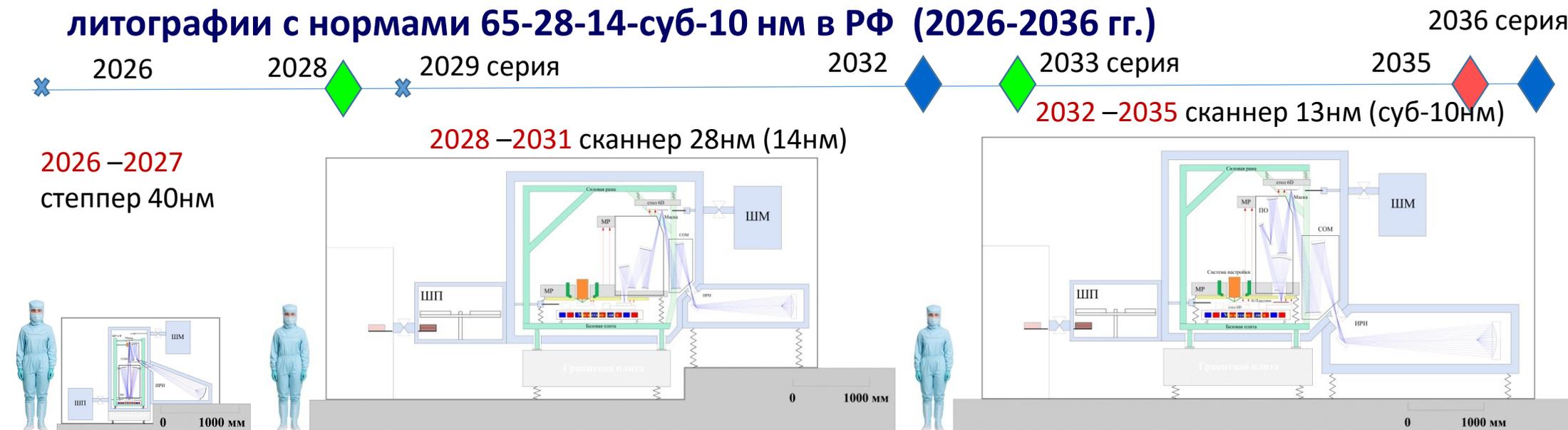


# Состав литографа и УГТ критических технологий создания рентгеновского литографа

- ИФМ РАН
- ИПФ РАН
- ИС РАН
- ИПМ им. М.В. Келдыша РАН
- УФИЦ УрО РАН
- МГТУ им. Н.Э. Баумана
- НИИМЭ
- НИИИС им. Ю.Е. Седакова
- Нанотроника (Элемент)
- Планар
- Скоростные системы связи
- НИИПМ
- Поликетон
- Криогенная техника
- ФГУП ЭЗАН



# Дорожная карта развития высокопроизводительной рентгеновской литографии с нормами 65-28-14-суб-10 нм в РФ (2026-2036 гг.)



- Двухзеркальный объектив
- Система совмещения: 10 нм
- Разрешение: 40 нм
- Поле засветки: до 3×3 мм

- Четырехзеркальный объектив
- Система совмещения: 5 нм
- Разрешение: 65-28 (14) нм
- Поле засветки: до 26×0,5 мм
- Производительность: > 50 W/h

- Шестизеркальный объектив
- Система совмещения: 2 нм
- Разрешение: 28-13 (8) нм
- Поле засветки: до 26×2 мм
- Производительность: > 100 W/h

Благодаря упрощению литографического процесса литография на **11,2 нм** является **РЕАЛЬНОЙ АЛЬТЕРНАТИВОЙ** иммерсионной литографии 193i нм!

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- EUV/рентгеновская литография стала ключевой технологией при производстве СБИС последнего поколения начиная с топологических размеров от **16 нм** и ниже.
- Проблемы низкого жизненного цикла элементов источника, большие размеры, мегаваттное энергопотребление и сложность литографа от ASML привели к «заоблачным» цене и стоимости эксплуатации литографа. Технология окупается только на глобальном рынке и доступна только для 5-топ компаний-производителей СБИС.
- Повторение этой разработки в России труднореализуемо с технологической точки зрения и бессмысленно в экономическом.
- Предложенная ИФМ РАН концепция рентгеновского литографа и дорожная карта, базирующиеся на достижениях последних лет в области **твердотельных гибридных лазеров**, **ксенонового** лазерно-плазменного источника на длине волны **11,2 нм**, более эффективных **Ru/Be** многослойных рентгеновских зеркал указывает на перспективы разработки отечественного литографа, конкурентоспособного, в том числе и на мировом рынке. При сопоставимой производительности ожидается уменьшение почти на порядок размеров, энергопотребления, цены и стоимости эксплуатации.
- Потенциально предложенный литограф является альтернативой иммерсионной литографии начиная с топологических размеров **65 нм**.

Спасибо за внимание