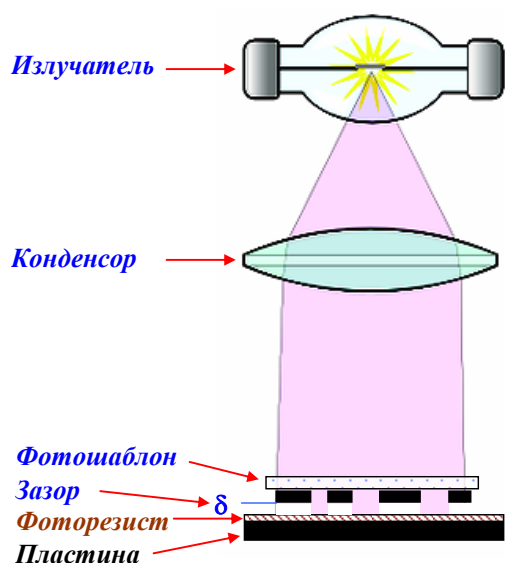


## ФОТОЛИТОГРАФИЯ С СУБМИКРОНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

**Оптическая литография** – перенос изображения с **фотошаблона** на **пластину** с помощью фоточувствительного материала (**фоторезиста**) – была разработана в начале 60-х в **Texas Instruments** и с тех пор стала неотъемлемой частью **планарной технологии**.

### Контактная(теневая) литография

1. Фотошаблон с рисунком топологии обрабатываемого слоя в масштабе 1:1 физически прижимается к пластине с зазором  $\delta$ . Из-за дифракции на краю щели предельное разрешение  $a_{\min}$  (полуширина дифракционного максимума) при длине волны  $\lambda$ :  $a_{\min} = (2\delta \cdot \lambda)^{1/2}$ .



2. Если зазора нет ( $\delta=0$ ), то нет и дифракционного лимита, однако:

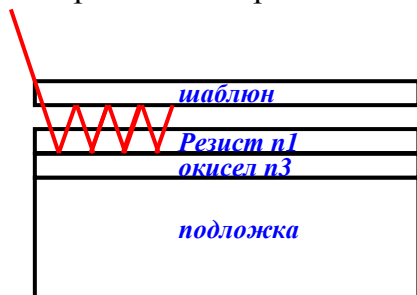
- трудно обеспечить **плотное прилегание** шаблона к пластине по всей площади из-за:
  - **прогибов** пластины из-за механических напряжений;
  - наличия пылевидных **микрочастиц** на поверхности;
  - **краевого валика** резиста при нанесении центрифугой;
- возможно **повреждение резиста** при контакте и **накопление** подобных дефектов на последующих этапах литографии;
- возможно **прилипание** кусочков резиста к **фотошаблону** и снижение срока его службы до

5-6 раз.

3. Поэтому обычно проводят **теневую литографию** с зазором  $\delta = 5 - 10$  мкм. При зазоре **5** мкм  $a_{\min}$  равно **1,4** мкм для  $\lambda = 200$  нм, а для  $\lambda < 150$  нм для линз прозрачных материалов нет.

- проблемы с автоматизацией **совмещения** положения фотошаблонов на пластине с предыдущими литографическими циклами – как правило, вручную через микроскоп по **меткам** на шаблоне и пластине;

4. Многократные **отражения** излучения между подложкой и шаблоном и образование в резисте стоячих волн; выход: **антиотражающие покрытия (АОП)**.



Идея:

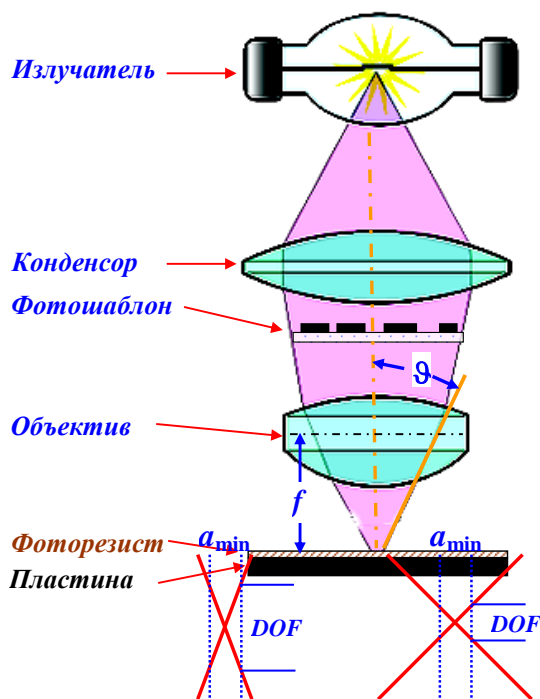
- толщина покрытия  $h_2$  должна равняться четверти длины волны  $h_2 = \frac{\lambda}{4n_2}$ , тогда отраженная волна на **нижней границе** резиста

будет в **противофазе** с падающей и погасится в результате деструктивной интерференции;

- оптимальный коэффициент преломления покрытия – **среднее геометрическое**  
 $n_2 = \sqrt{n_1 \cdot n_3}$  ;
- покрытие не должно чувствовать **освещения**;
- должно **удаляться** вместе с резистом после проявления;
- АОП дополнительно **сглаживает** рельеф поверхности перед нанесением резиста.

### Проекционная литография с преломляющей оптикой

*Погрешности совмещения* в теневой фотографии нельзя сделать меньше **1-2 мкм**, поэтому при переходе в **субмикронный** диапазон стали использовать **проекционную** преломляющую оптику с **уменьшением** изображения фотошаблона на пластине до 10 раз.



1. **Разрешение** изображения ограничено **дифракцией** на соседних щелях в шаблоне и определяется, согласно эмпирическому критерию **Рэля**, **численной апертурой** (*numerical aperture*) объектива  $NA = n_0 \sin \vartheta \leq 1$

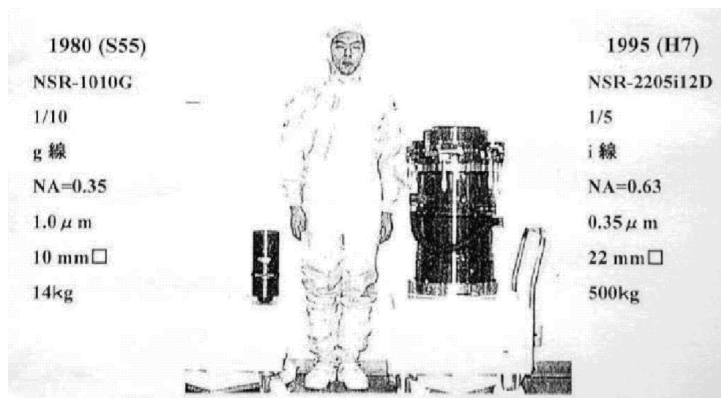
$a_{\min} = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA}$ , где  $k_1=0,61$  у Рэля, но зависит от процесса (линзы, резист, шаблон).

2. Для повышения разрешения надо уменьшать длину волны и увеличивать NA, однако **глубина резкости DOF** (*depth of focus*) также зависит от NA:  $DOF = k_2 \cdot \frac{\lambda}{NA^2}$

### Этапы развития фотолитографии

	UV		Deep UV			Extreme UV
	Ртуть		Эксимерные лазеры			
	g-line	i-line	KrF	ArF	F <sub>2</sub>	
$\lambda$ , нм	436	365	248	193	157	13,5
$h\nu$ , эВ	2.85	3.4	5	6.4	7.9	91

<i>Node</i> , HM	1250 (1987) 1000 (1989) 800 (1991)	500 (1993) 350 (1994)	250 (1997) <b>180 (1999)</b> 130 (2001)	90 (2003) 65(2005) 45 (2007) 32 (2009) 22 (2014) 14 (2016)	?	14 (2016) 10 (2020?)
NA	0.28-0.35	0.63	0.6	0.75 -0.93	0.85	0.25
$k_1$	0.8	0.7	0.7	<b>0.4 -0.35</b>	0.38-0.28	0.9
$a_{min}$ , HM			289	103 - 73	52	49
DOF, HM				172	109	108
\$, млн				12	20	25

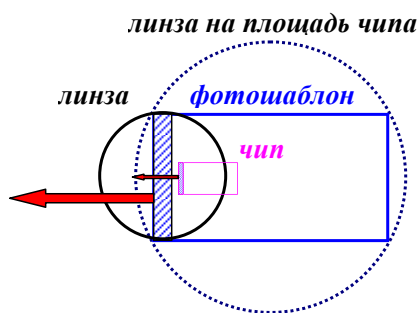


## Сканеры

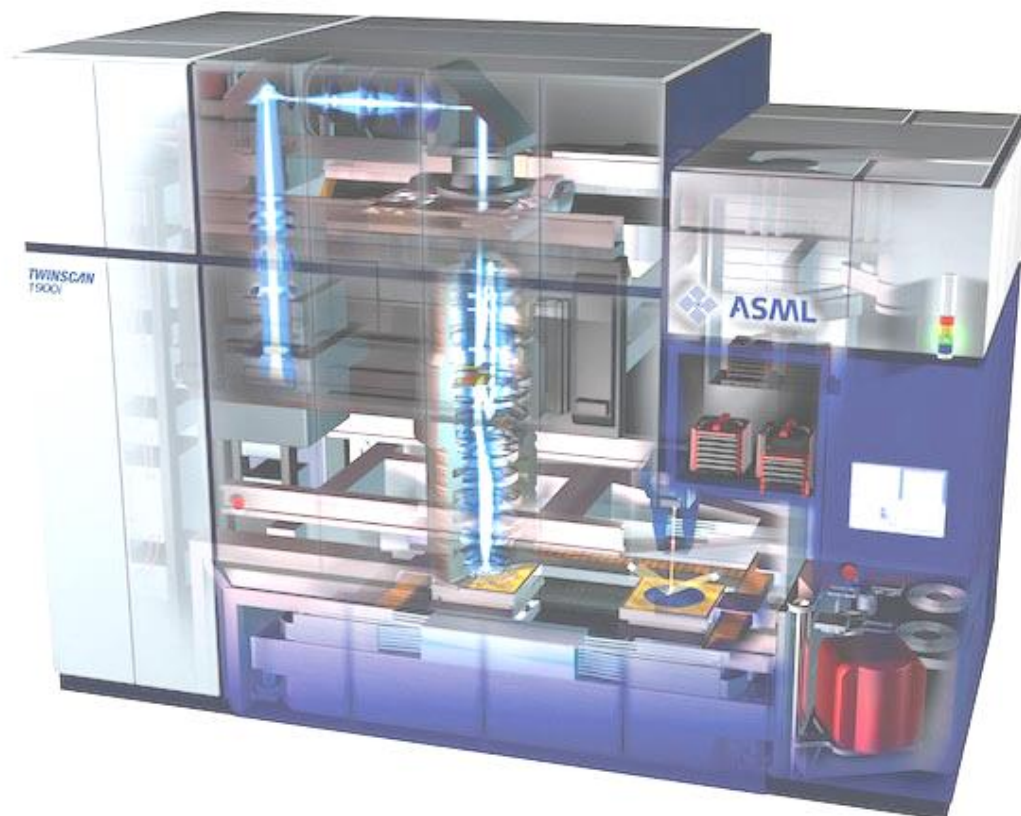
1. **Step-and-repeat** – **1977**, Scandia National Lab: **пошаговое** перемещение **подложки** (*step*) и последовательное облучение **всей площади** каждого **чипа** (*repeat*).

2. **Step-and-Scan** – **1985**, IBM + Perkin Elmer:

- линза облучает на фотошаблоне узкую **полоску по ширине** чипа;
- изображение рисунка этой полоски на чипе **уменьшено** в **4-5** раз;
- фотошаблон механически **перемещается** относительно полоски и под облучение поступают все **новые участки** рисунка;
- **синхронно подложка** движется в ту же сторону, но с **меньшей скоростью**, так что **уменьшенное** изображение рисунка все время попадает на **нужные участки** чипа;
- по **окончании** этого **скана** вся поверхность чипа экспонирована и
- **фотошаблон возвращается** в исходное состояние;
- **подложка скачком** (*step*) устанавливает в рабочее положение **очередной чип**.



## Сканер TwinScan фирмы ASML



**Луч лазера**, проходит через оптику и движущуюся **взад-вперёд маску** попадает на **каретку с экспонируемой пластиной** Ø300 мм, которая также движется, но уже **в двух координатах**. **Вторая каретка** со следующей пластиной в этот момент проходит **подготовительную стадию**, в которой оптические датчики выявляют и запоминают все неровности этой конкретной пластины. Слева от рабочей зоны видны входной и выходной порты для **контейнеров с пластинами** по **25 штук** в каждом, а сверху банк масок, подставляющий нужную для данной экспозиции и имеющий собственный небольшой порт. **«Светофор»** — это индикатор состояния, встроенный почти в каждую установку в «чистой комнате» фабы. **Выпуск 131** пластина в час. В движении всё это можно [посмотреть тут](#).

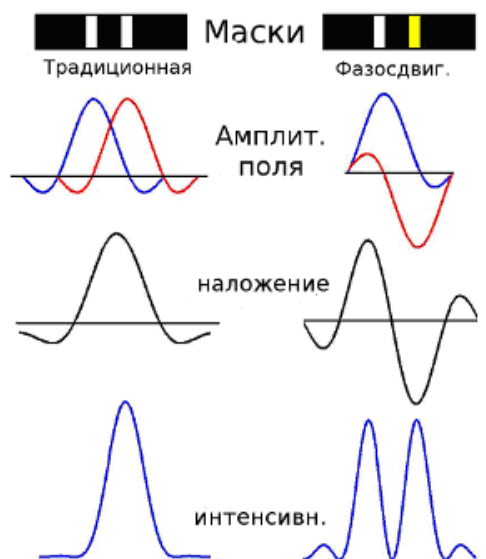
---

**ASML** (*Advanced Semiconductor Materials Lithography*) — нидерландская компания, являющаяся одним из крупнейших производителей фотолитографических систем для микроэлектронной промышленности (свыше 65% рынка). Основана в 1984 году совместно с компанией **Philips**, имеет более 60 пунктов обслуживания в 16 странах. Штаб-квартира в **Veldhoven, Нидерланды**. Сайт: <http://www.asml.com>.

## Техника повышения разрешения (RET, Resolution Enhancement Technology)

### Вычислительная или обратная литография

**Идея:** рассчитать с учетом законов волновой оптики такую структуру рисунка маски, чтобы полученное в резисте изображение максимально соответствовало заданному.



1. Фазосдвигающие маски (PSM, Phase-Shift Masks), появились с нормы 90 нм в 2006.

- В обычной маске амплитуды прошедших через соседние щели волн **в фазе** и усиливают интенсивность друг друга, пики **не разрешаются**.

- В PSM эти амплитуды **в противофазе** и между щелями частично гасят друга, в резисте сохраняются **два пика**.

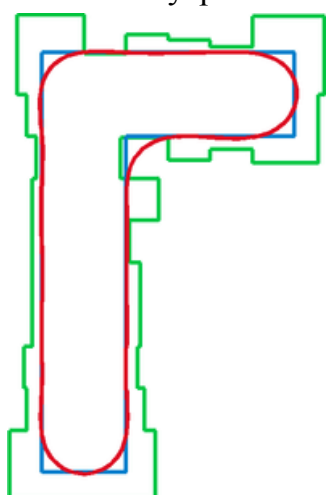
- При уменьшении топологического размера *расстояния* между щелями и их *форму* надо менять. Это требует трудоемких расчетов и **стоимость** изготовления фотошаблонов резко возрастает.

- Более простой и дешевый способ добиться противофазной интерференции – **внеосевое освещение** (*off-axis illumination*) под **таким углом**, который обеспечивает нужную разность фаз между соседними волнами.

- Однако трудно добиться этого для **всех** элементов топологии **одновременно**.

2. Коррекция эффектов оптической близости (OPC, Optical Proximity Correction)

Эффекты близости возникают из-за **различной дозы** облучения резиста в разных топологических участках – **в центре и по краям** фигуры с прямыми углами, в области внутренних и внешних **углов**. В результате **после проявления** линии будут **либо шире, либо уже** требуемых.



- OPC вычисляет такой **рисунок маски** (**зеленый контур**), который **после проявления** обеспечит контур (**красный**), максимально близкий к заданному (**синий**).

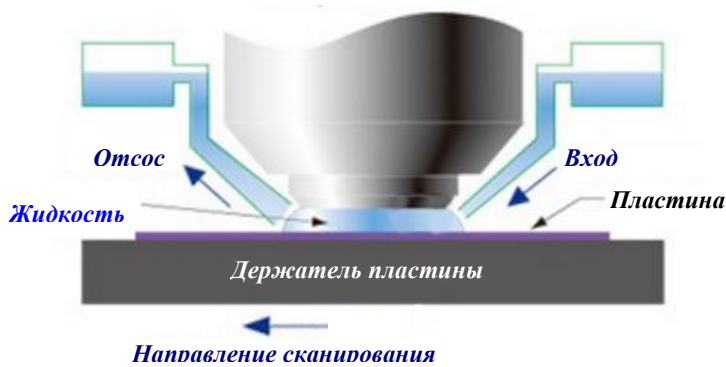
- При уменьшении размеров **трудоемкость вычислений и стоимость** изготовления масок растут **экспоненциально**.

3. Иммерсионная (*immersion*) литография

- В 2006 Intel (с 32 нм) и AMD (с 45 нм) для увеличения NA заменили **воздух** ( $n=1,0$ ) между объективом и резистом на сверхчистую **воду** ( $n=1,30 - 1,44$ ). ASML начала выпуск в 2003, Nikon и Canon в 2005.

- **Проблемы:**

- она не должна *загрязняться, поглощаться фоторезистом* и *растворять* его;
- **температура** должна быть **равномерной** по всей поверхности контакта;
- 193-нм UV **ионизирует** воду и электроны могут **облучить резист**, пришлось его



покрыть прозрачным **гидрофобным** покрытием;

- при **сканировании** со скоростью  $>0,5$  м/с недопустима **малейшая рябь**, которая не позволит **лазерным интерферометрам** проводить постоянное сверхточное позиционирование;
- поэтому **вокруг оптики**

разместили водяные **микрофорсунки**, половина из которых по ходу движения впрыскивают воду **сзади**, а противоположные им **высасывают**.

### **Двойная и многократная литографическая печать (*double and multiple patterning*)**

Эта группа технологий **снижает минимальный** экспонируемый размер за счет **увеличения числа экспозиций**.

1. **Двойная экспозиция (*Double exposure*)** – вторая маска экспонируется **на тот же резист** со **смещением** изображения относительно первой.

- Изображение с линиями, толщиной меньше нормы, **разлагается** на два, в каждом из которых норма выполнена (например, вертикальные и горизонтальные линии).
- Процесс можно повторять, каждый раз повышая разрешение вдвое.
- Замена двумерного рисунка двумя одномерными упрощает его нанесение.

2. **Самосовмещенные спейсеры (*self-aligned spacers*)** – при первой экспозиции выращиваются ребра по технорме,

- затем на их боковые стенки наносятся спейсеры;
- после проявления остаются только они;
- при второй экспозиции служат теневой маской для контактной печати без зазора.

3. Double Expose, Double Etch (lines) этот вариант двойного экспонирования (применяется начиная с 32 нм) использует два разных вида резиста

- A first exposure of photoresist is transferred to an underlying hardmask layer.
- After the photoresist is removed following the hardmask pattern transfer, a second layer of photoresist is coated onto the sample.
- This second layer undergoes a second exposure, imaging features in between the features patterned in the hardmask layer.
- The surface pattern is therefore a set of photoresist features in between hardmask features, which can be transferred into the final layer underneath. This allows a doubling of feature density.

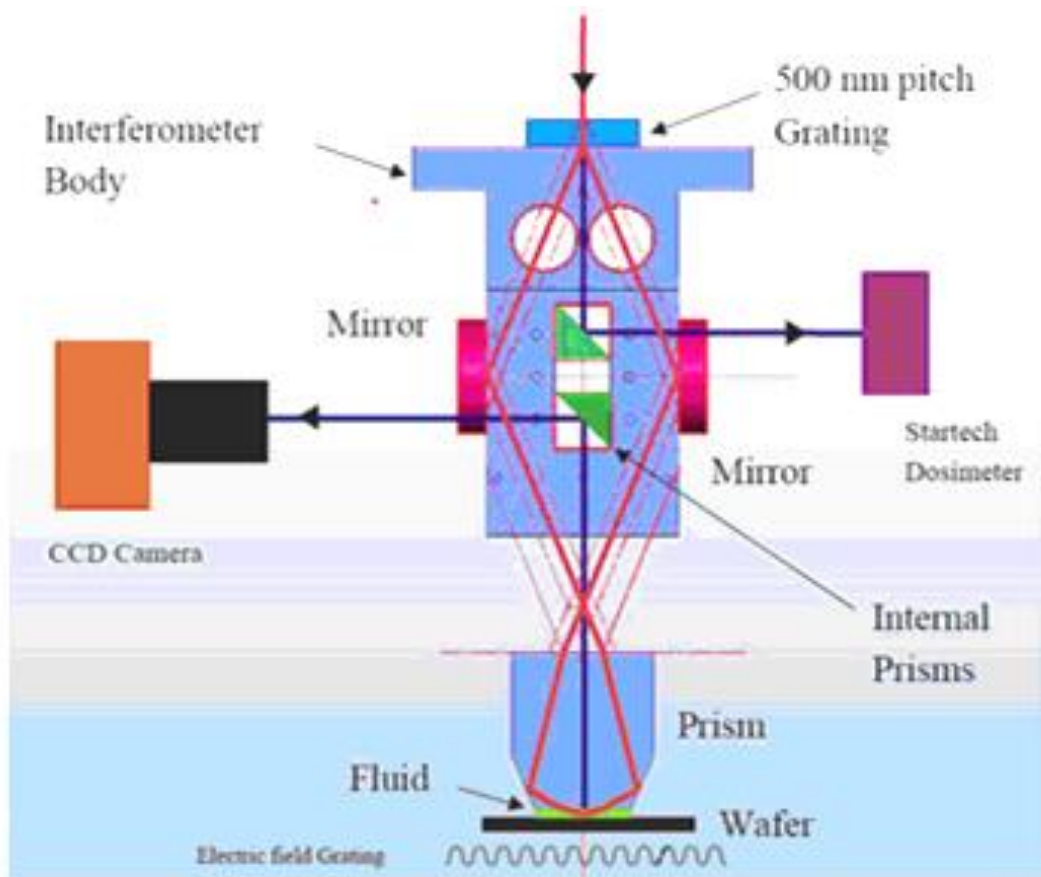
4. Double Expose, Double Etch (trenches): Photoresist coating over first pattern; etching adjacent to previous features; mask removal.

Теоретически, такая методика позволяет **формировать** сколь угодно мелкие детали за счет увеличения числа масок и производственных стадий.

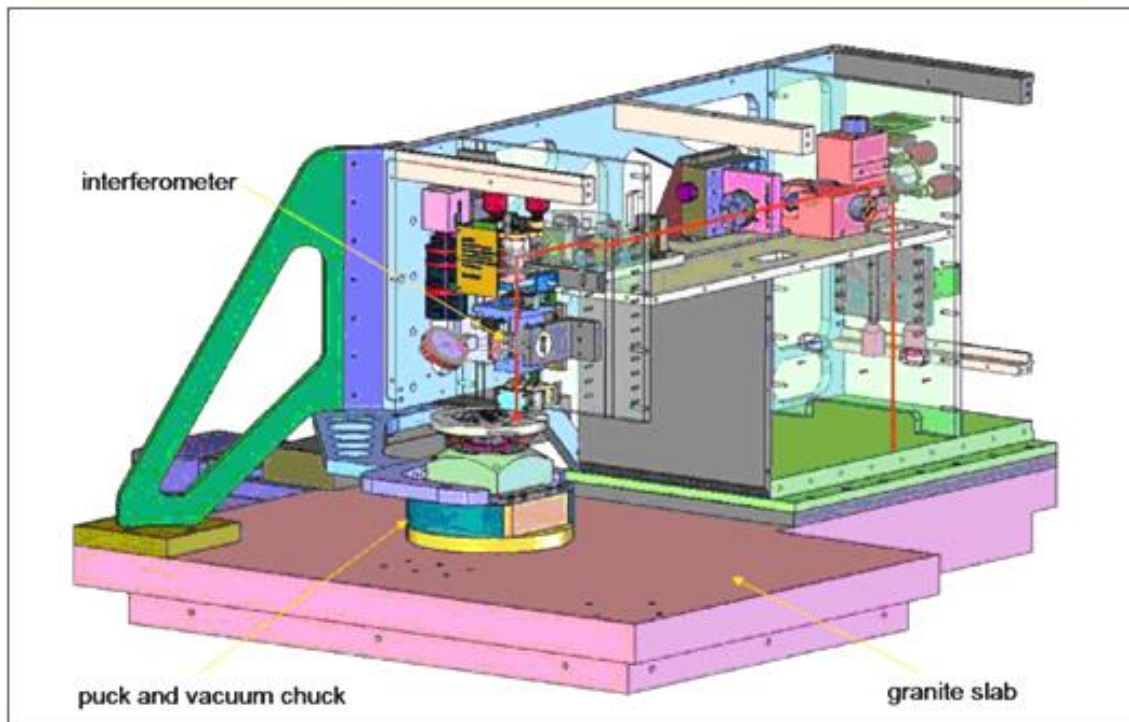
Очевидными недостатками кратного экспонирования является кратное увеличение числа масок и технологических операций для формирования каждого слоя, а также очень высокие требования по точности совмещения масок.

### **Интерференционная литография**

Применяется для безмасочной печати большого числа параллельных линий



**Schematic of the NEMO Interferometer design**



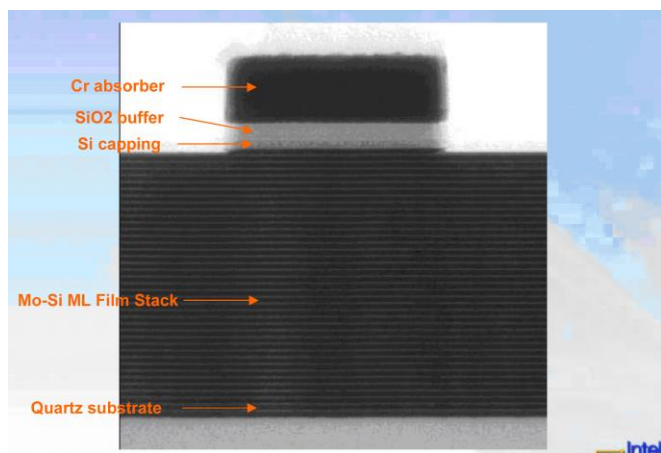
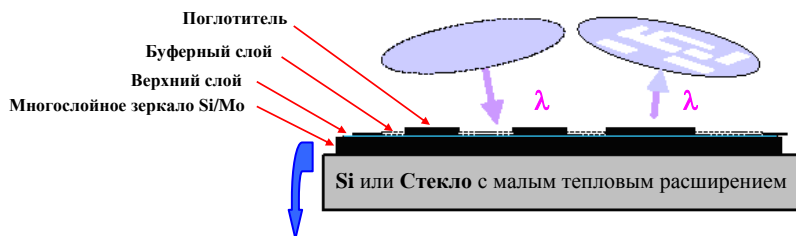


## Литография в далеком вакуумном ультрафиолете (EUV, Extreme UV)

1. С **1996 Intel**, в **1997 AMD** и **Motorolla**, а позже и **IBM (2001)** создали консорциум для перехода к  $\lambda = 13,5$  нм (EUV), чтобы резко упростить RET, т. к. уже с 22 нм необходимый **объем вычислений** был **непомерно большим и дорогим**. По этому же пути пошли и другие фирмы – **Nikon** и **SELETE** в Японии, **TSMC** на Тайване.
2. **ASML** (Голландия) ещё с **1992** запустила в **промышленное производство** серию **EUV сканеров TWINSCAN NXE** и уже выпустила несколько поколений таких систем для технормы **18 нм и ниже** ( $NA=0,33$ , **точность совмещения**  $\leq 3$  нм, выпуск **125 300 мм-пластин в час**).
3. Для этой длины волны есть **многослойные Брэгговские зеркала** с **отражением 65 – 70 %** и  $\Delta\lambda/\lambda \sim 25-30$ .

### EUV отражающие маски

1. Маска содержит **40-50 четверть-волновых** слоев **Si** и **Mo** с рисунком **топологии** на поверхности из поглощающей многослойной пленки: **Cr** + **буфер** из **SiO<sub>2</sub>** + **сглаживающий слой Si**.



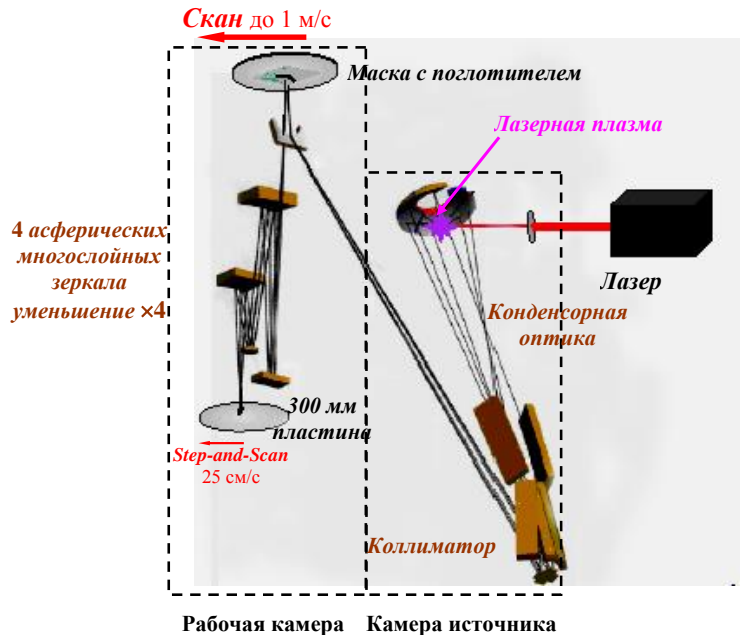
### 2. Требования:

- очень точный контроль **толщины слоёв**;
- **шероховатость**  $< 0,2$  нм, т.к. **рассеяние** и **фоновое освещение** растет  $\sim 1/\lambda^2$ ; для этого **сглаживающая пленка Si**;
- отсутствие **дефектов** на зеркале и маске.

### Оптическая EUV система

1. Две соединенных между собой вакуумных камеры

- В камере источника конденсор из 19 асферических многослойных линз убирает рассеянные лучи и направляет EUV-поток в коллиматор.



- В литографической камере коллиматор фокусирует этот поток на маске, после отражения от которой объектив из 4 линз создает уменьшенное в 4 раза изображение топологии на движущейся пластине.

## 2. Требования к системе:

- Полное устранение вибраций от моторов сканера;
- температурная стабильность;
- точность взаимного положения всех зеркал 60 мкм.

2016, ASML continues to ship its TWINSCAN NXT: 1980Di immersion lithography systems, which are capable of processing 275 wafers per hour

The 1980Di can be utilized in a combination of lithography techniques, including single exposure, lithography-etch-lithography-etch, sidewall spacers, and self-aligned double patterning, Lercel said. It offers the kind of variability control needed for self-aligned quadruple patterning.

## Источники EUV

В принципе, синхротрон и **UV лазер** («звездные войны»).

### Лазерные

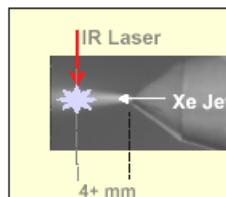
1. Лазерная абляция с помощью импульсного YAG-лазера (1,06 мкм, 0,1-1 ТВт, 100 нс, 100 Гц, проникает на 1 мкм)

#### Laser-Produced Plasma Source

##### Technology:

- Pulsed IR laser focused on Xe gas, liquid or solid target creates plasma
- Good plasma-wall separation: helps thermal erosion
- Relatively inefficient EUV generation (multiple steps)

- Collected EUV power =  $\frac{\text{Input electrical power}}{(\text{collector efficiency})(\text{laser to EUV})(\text{wall to laser})}$
- Sn being considered as alternate for Xe target



##### Commercial status:

- Leading system: CEO/TRW
- 4.5 KW LPP laser developed, 3 chains tested, 22 W EUV in 2 $\pi$  with filament jet, 9.4 W, 0.87% eff., at intermediate focus with 2.4 KW laser
- Active development for 6 systems by Japanese, European, and US companies
- Sn considered as an alternate target



CEO 4.5 KW System

##### Production Needs:

- Higher power
- Improved conversion/collection efficiencies

2. Основные параметры

- CE conversion efficiency
- DP debris production

3. Мишени:

- шарики Au, CE < 1%, DV очень большой, зеркала менять часто;
- замороженные капли Xe, DP < на 5 порядков. только эрозия сопла, за 10<sup>10</sup> импульсов отражение падает на 10%. Раз в полгода надо менять зеркала;

- капли олова, в разряде ионы  $\text{Sn}^{+7}$  и  $\text{Sn}^{+12}$  – сильнее излучают +CO<sub>2</sub> лазер (0,96 мкм, МВт, 10-ки мкс, 6 кГц, глубина 20 мкм.

#### 4. Продвижение к 2 нм, **проблемы:**

- *материалы* для зеркал и масок, уже есть прототип **6,67** мкм;
- *новые резисты*, энергия вторичных электронов  $\sim 1/\lambda^2$ ;

#### Искровые

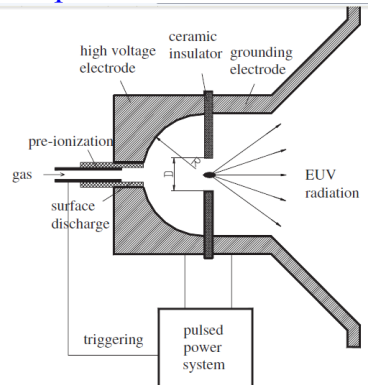


Figure 1. Schematic of a DPP source with enlarged electrode surfaces.

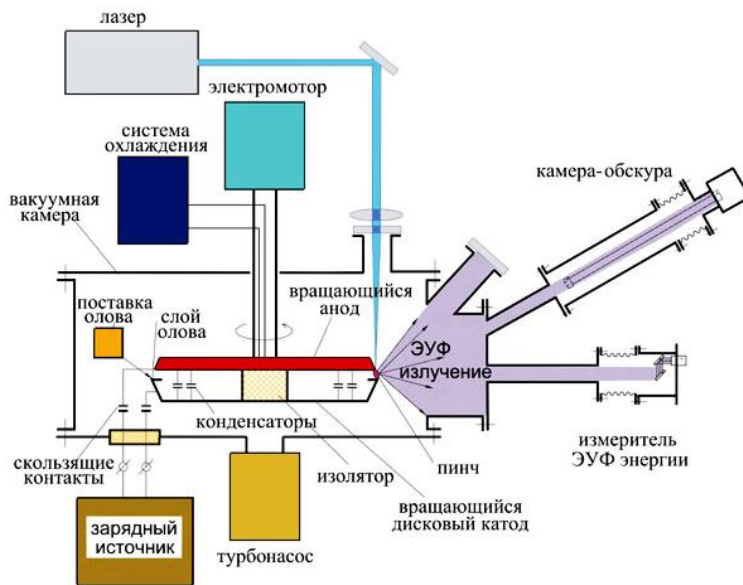
ASML, 2016, company has been able to operate a power source for its EUV systems at 200 watts “for one hour, with full dose control. company has been able to operate a power source for its EUV systems at 200 watts “for one hour, with full dose control.

That’s approaching its high-volume manufacturing target of 250W, according to Lercel. ASML continues to predict its EUV scanners will move into volume production applications in the 2018-19 timeframe, he said.

Intel and Samsung Electronics this week reported running their EUV power sources at 80W over extended periods.

ASML has “multiple EUV systems at multiple customers,” Lercel said. In addition to Intel and Samsung, the company’s EUV scanners are also being used at GlobalFoundries, SK Hynix, and Taiwan Semiconductor Manufacturing, among others not yet identified by the equipment vendor.

ASML this week reported reaching a deal with Nippon Control System on integrating optical proximity correction to mask data preparation on a common platform.



## Extreme Ultraviolet and Optical Lithography

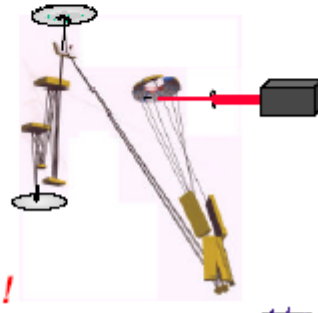
### Similarities

- Resolution and Depth of focus scale with NA and wavelength
- Uses reduction optics (4x)
- Builds on optical lithography experience base
- Supports optical extension tricks – off axis illumination, phase shift masks, OPC
- Employs step and scan printing



### Differences – Disruptive Technologies

- Uses very short 13.4 nm light
- 13.4 nm radiation absorbed by all materials
- Requires reflective optics coated with quarter-wave Bragg reflectors
- Uses reflective reticles with patterned absorbers
- Vacuum operation
- Unique source for EUV light



**Requires New Development Approach !**