# 5 nm逻辑工艺流程中的光刻工艺设计

# （A Photolithography Process Design for 5 nm Logic Process Flow）

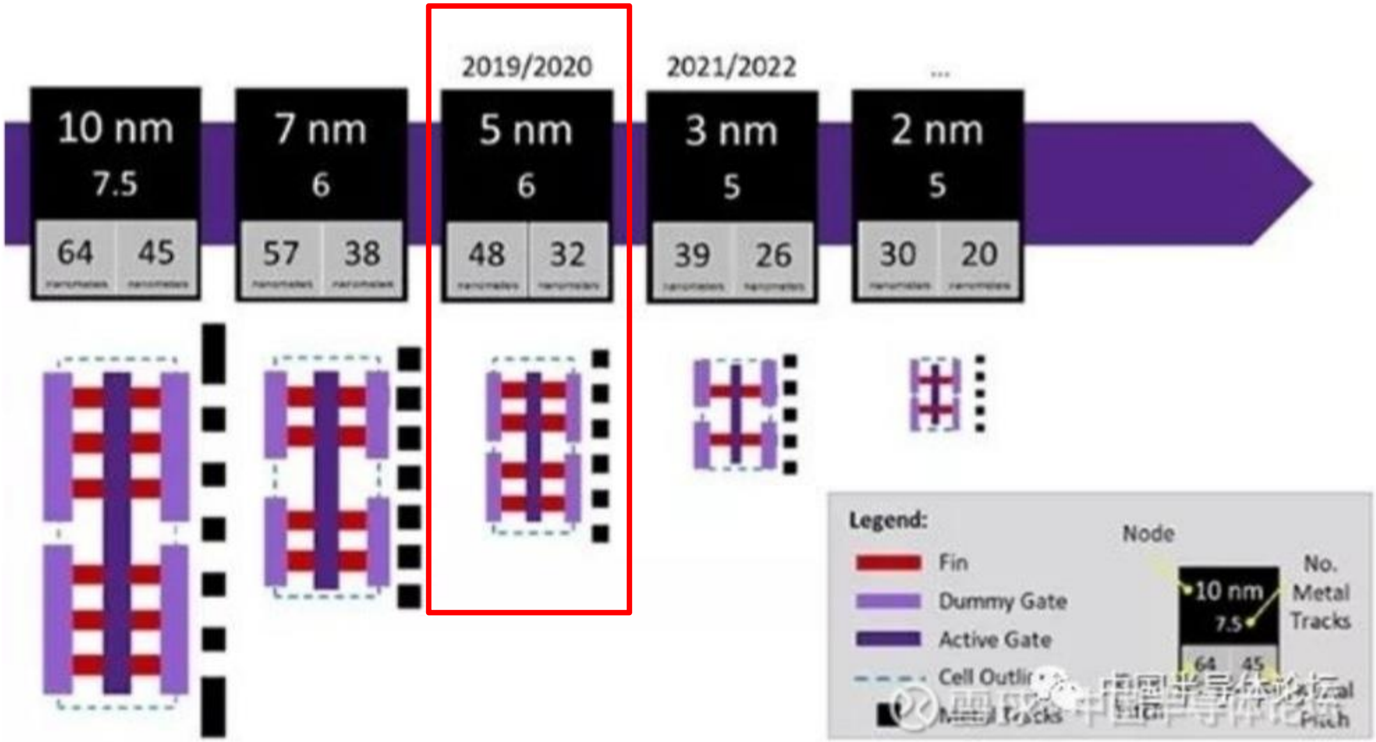
**伍强，李艳丽，杨渝书，赵宇航**
上海集成电路研发中心
Ken Wu, Yanli Li, Yushu Yang, Yuhang Zhao
Shanghai ICRD

IWAPS 2019年10月18日 南京

# 内容提要（Outline）

- 简介 （**Introduction**）
- **5 nm 逻辑工艺的设计规则范围（Design Rule Ranges for the 5 nm Logic Process）**
- **5 nm 光刻工艺的选择方案（A Strategy for the 5 nm Photolithographic Process Design）**
- **极紫外光刻工艺与深紫外光刻的区别（Difference between EUV Lithography and DUV Lithography）**
  - $k_1$值的差异（Difference in $k_1$ Value）
  - 阴影效应（Shadowing Effect）
  - 横向–纵向线宽的差异（HV Linewidth Difference）
  - 掩模版三维散射效应（Mask 3D Scattering Effect）
  - 光刻胶的吸收和显影随机涨落效应（Absorption of EUV in the Photoresist and Stochastics）
  - 线宽粗糙度的极限（Limit in the Line Width Roughness—LWR）
  - 增强的像差影响（Increased Impact of Aberration）
- **当今极紫外光刻工艺的性能极限和在 5 nm 工艺流程中的应用（Current Capability of EUV Lithography and Its Application to the 5 nm Process Flow）**
  - *X*和*Y*方向剪切层和孔洞层（*X* & *Y* Direction Cut and Hole Layers）
  - 典型光刻层显影后线宽和EL/对比度标准的选择（Determination of Typical ADI Linewidth and EL/Contrast Target）
- 结论 （**Summary**）

# 简介（Introduction）




中国半导体论坛（China Semiconductor Forum)

# 5 nm 逻辑工艺的设计规则范围（Design Rule Ranges for the 5 nm Logic Process）

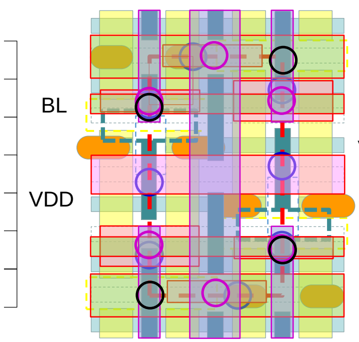
| 技术节点Technology Node | 10 nm | 7 nm | 5 nm |
|---|---|---|---|
| | | | |
| 鳍周期<br>Fin Pitch (nm) | 33~42 | 27~30 | 22.5~25 |
| 接触孔-栅周期<br>Contact to Poly Pitch (nm) | 66~68 | 54~56 | 44~50 |
| 金属周期<br>Metal Pitch (nm) | 44~48 | 36~40 | 30~32 |

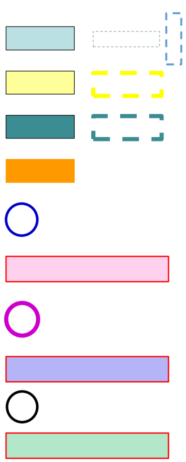
Sources: Wikichip.org and other open sources

# 5 nm 逻辑工艺的设计规则范围（Design Rule Ranges for the 5 nm Logic Process）

## 静态随机存储器构造（SRAM Layout）（PD-PG-PU: 1-1-1）

FP: 22.5 nm, CPP: 50 nm，
MMP: 30 nm（6T），SRAM单元
高度（height）：180 nm，
宽度（width）：100 nm
面积（area）：0.0180 μm²



鳍：193 nm浸没SAQP
+ EUV/193 nm 浸没剪切

栅：193 nm浸没SADP + EUV剪切

接触孔—源漏：EUV LE+193 nm
浸没阻挡

接触孔—栅：EUV

通孔 0：EUV

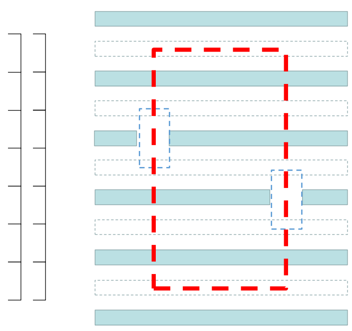
金属 1：EUV SALELE

通孔 1：EUV

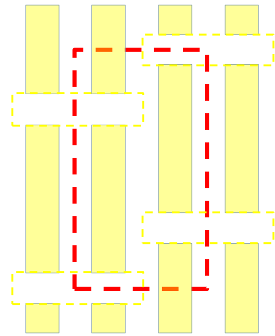
金属 2：EUV SALELE

通孔 2：EUV

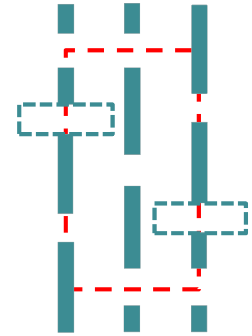
金属 3：EUV SALELE



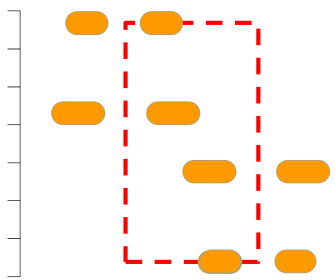
Fin (193i SAQP)+Cut (EUV)



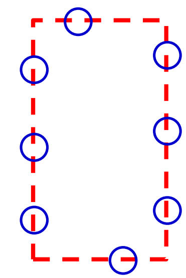
Gate (193i SADP)+Cut (EUV)



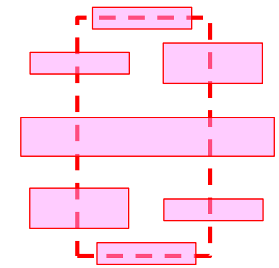
S/D Contact (EUV)+Block (193i)



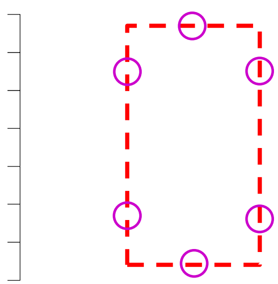
Gate Contact (EUV)



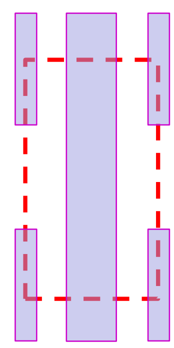
Via 0 (EUV)



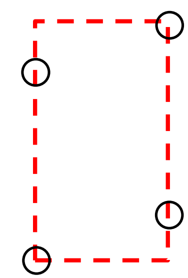
M1 (EUV SALELE)



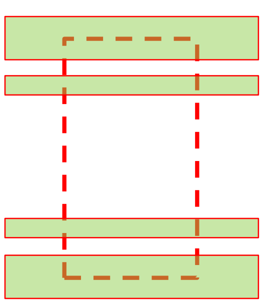
Via 1 (EUV)



M2 (EUV SALELE)



Via 2 (EUV)

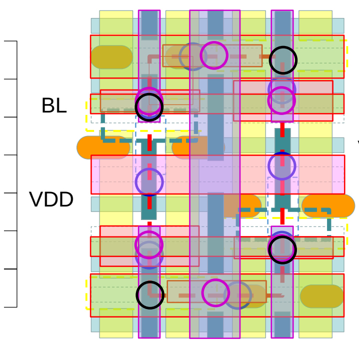


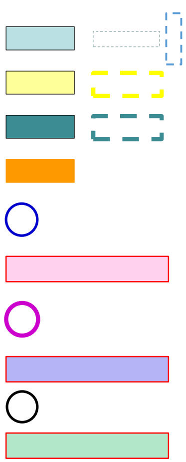
M3 (EUV SALELE)

# 5 nm 逻辑工艺的设计规则范围（Design Rule Ranges for the 5 nm Logic Process）

## 静态随机存储器构造（SRAM Layout）（PD-PG-PU: 1-1-1）

FP: 22.5 nm, CPP: 50 nm，
MMP: 30 nm（6T），SRAM单元
高度（height）：180 nm，
宽度（width）：100 nm
面积（area）：0.0180 μm²



鳍：193 nm浸没SAQP
+ EUV/193 nm 浸没剪切

栅：193 nm浸没SADP + EUV剪切

接触孔—源漏： EUV LE+193 nm
浸没阻挡

接触孔—栅：EUV

通孔 0：EUV

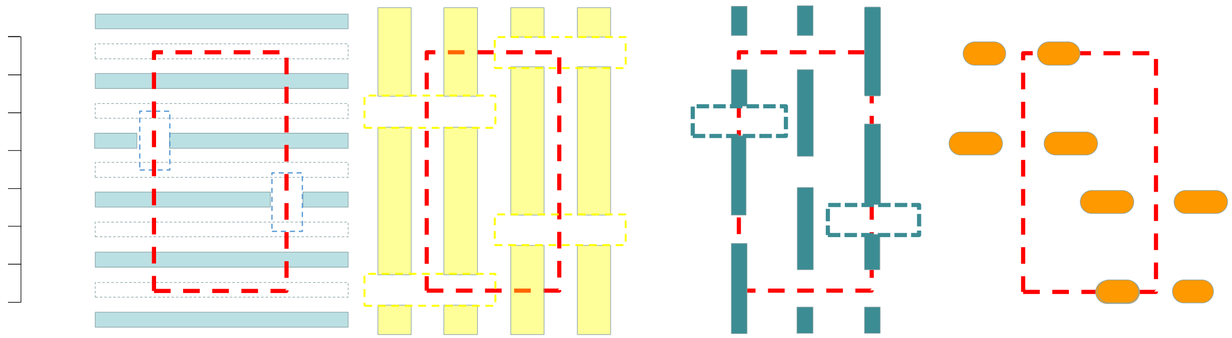
金属 1：EUV SALELE

通孔 1：EUV

金属 2：EUV SALELE

通孔 2：EUV

金属 3：EUV SALELE

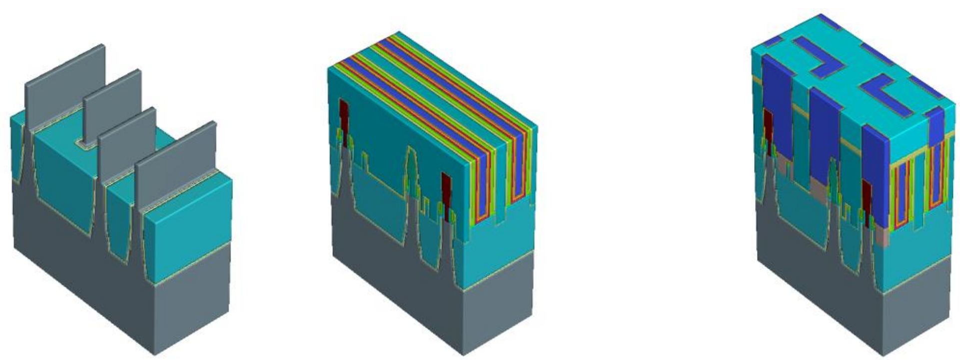


Fin (193i SAQP)+Cut (EUV)

Gate (193i SADP)+Cut (EUV)

S/D Contact (EUV)+Block (193i)

Gate Contact (EUV)



# 5 nm 光刻工艺的选择方案（A Strategy for the 5 nm Photolithographic Process Design）

ICRD

| 技术节点 Technology Node | 10 nm | | 7 nm | | 5 nm | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 图形方法 Patterning Process | | 图形方法 Patterning Process | | 图形方法 Patterning Process |
| 鳍周期 Fin Pitch (nm) | 33~42 | 193 nm浸没 SAQP，SADP | 27~30 | 193 nm浸没 SAQP | 22.5~25 | 193 nm浸没 SAQP |
| 接触孔-栅周期 Contact to Poly Pitch (nm) | 66~68 | 193 nm浸没 SADP | 54~56 | 193 nm浸没 SADP | 44~50 | 193 nm浸没 SADP |
| 金属周期 Metal Pitch (nm) | 44~48 | 193 nm浸没 自对准的多重图形，多重图形SALELE，LELELE | 36~40 | EUV/193 nm浸没自对准的多重图形 SALELE | 30~32 | EUV自对准的多重图形 SALELE |

- **193 nm 浸没式光刻工艺的分辨率周期极限**（193 nm immersion lithography min pitches）：
  线条/沟槽（Line/space）： **≥ 90 nm** （双向设计规则，2D D.R.）， **≥ 80 nm** （单向设计规则，1D D.R.）
  通孔（Holes）： **≥ 106~110 nm** （任意方向，Any direction）

- **13.5 nm极紫外光刻工艺的分辨率周期极限***（13.5 nm EUV lithography min pitches）：
  线条/沟槽（Line/space）： **≥ 36~40 nm** （双向设计规则，2D D.R.）
  通孔（Holes）： **≥ 50 nm** （任意方向，Any direction）

*考虑了随机效应，缺陷率根据已有数据外延至~1 ppb （Stochastics caused defect density extrapolated to ~1 ppb from available data）

## $k_1$值的差异（Difference in $k_1$ Value）

对于193 nm浸没式光刻，最为常用的周期为90 nm （For 193 nm, frequently used min pitch is 90 nm)

$$k_1 = \frac{P_{\min}\,\mathrm{NA}}{2\lambda} = \frac{45\ \mathrm{nm} \times 1.35}{193\ \mathrm{nm}} = 0.31$$

对于极紫外，13.5 nm的波长，0.33 的数值孔径，而常用的周期为 36-40 nm ( For 13.5 nm EUV wavelength and 0.33 NA, frequently used min pitch is 36~40 nm

$$k_1 = \frac{P_{\min}\,\mathrm{NA}}{2\lambda} = \frac{18-20\ \mathrm{nm} \times 0.33}{13.5\ \mathrm{nm}} = 0.44-0.48$$

- 极紫外的$k_1$因子比193 nm浸没式光刻要大不少。一般来说， $k_1$因子等于0.4或者以上，光学邻近效应并不明显。（The $k_1$ factor for EUV is larger than that for 193 nm immersion and, according to experience, optical proximity effect is not significant if $k_1$ is 0.4 or greater. ）

## 极紫外光刻工艺仿真算法（Simulation Method for EUV Lithography Process）

- 一维线宽随周期变化，采用时域有限元方法。（We use FDTD for 1D linewidth through pitch simulation）
- 二维图形，采用严格的耦合波方法（We use RCWA for 2D pattern simulation）
- 掩模版采用以下结构 （We use the following structure for mask simulation）

| | | |
|---|---|---|
| TaN | 氮化钽：60 nm | 0.926 + j0.044 |
| Ru | 钌：2.5 nm | 0.883 + j0.018 |
| Si | 硅：4.2 nm | 0.999 + j0.002 |
| Mo | 钼：2.8 nm<br>共40 周期 | 0.919 + j0.007 |
| LTEM | 低热膨胀玻璃 | 0.977 + j0.009 |

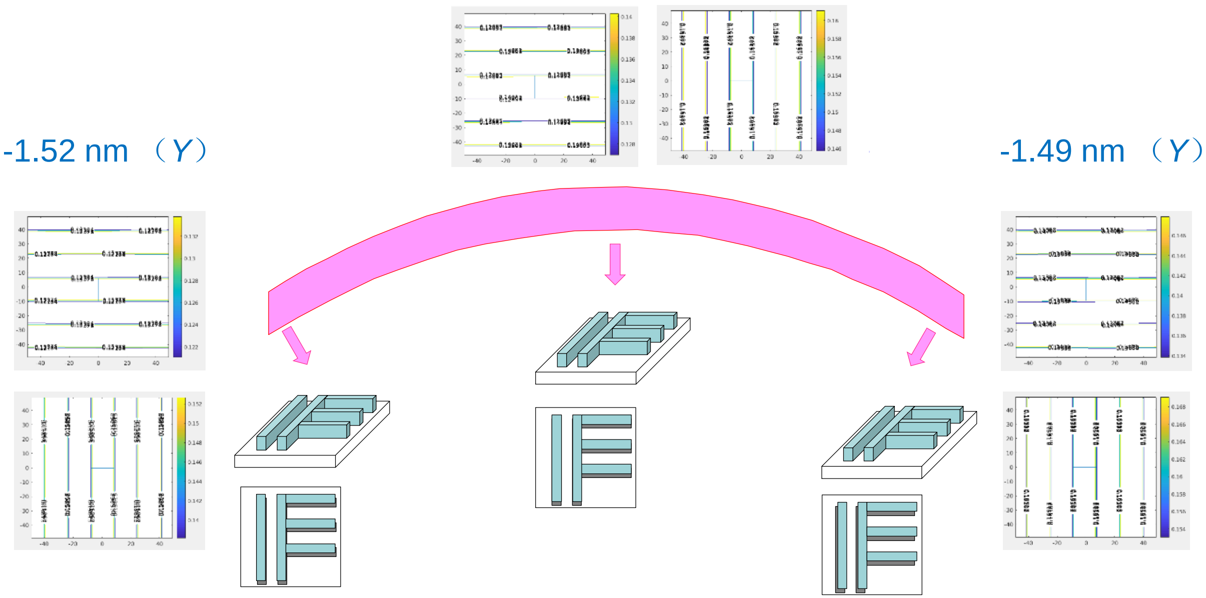
# 极紫外光刻工艺与深紫外光刻的区别（Difference between EUV Lithography and DUV Lithography）

## 阴影效应（Shadowing Effect）

-1.70 nm （*Y*）　0 nm （*X*）

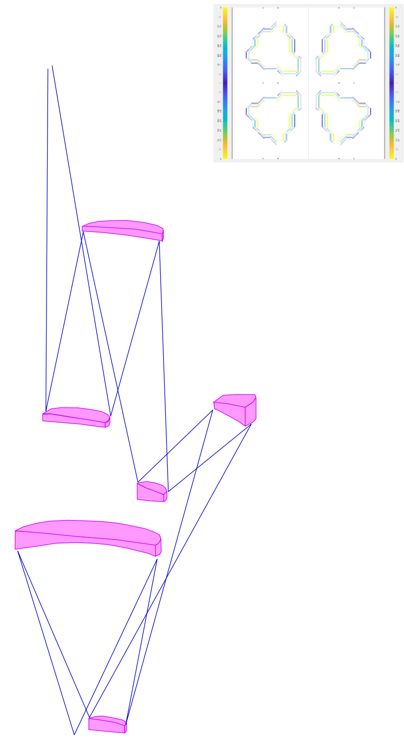
-1.52 nm （*Y*）

-1.49 nm （*Y*）



0.62 nm （*X*）

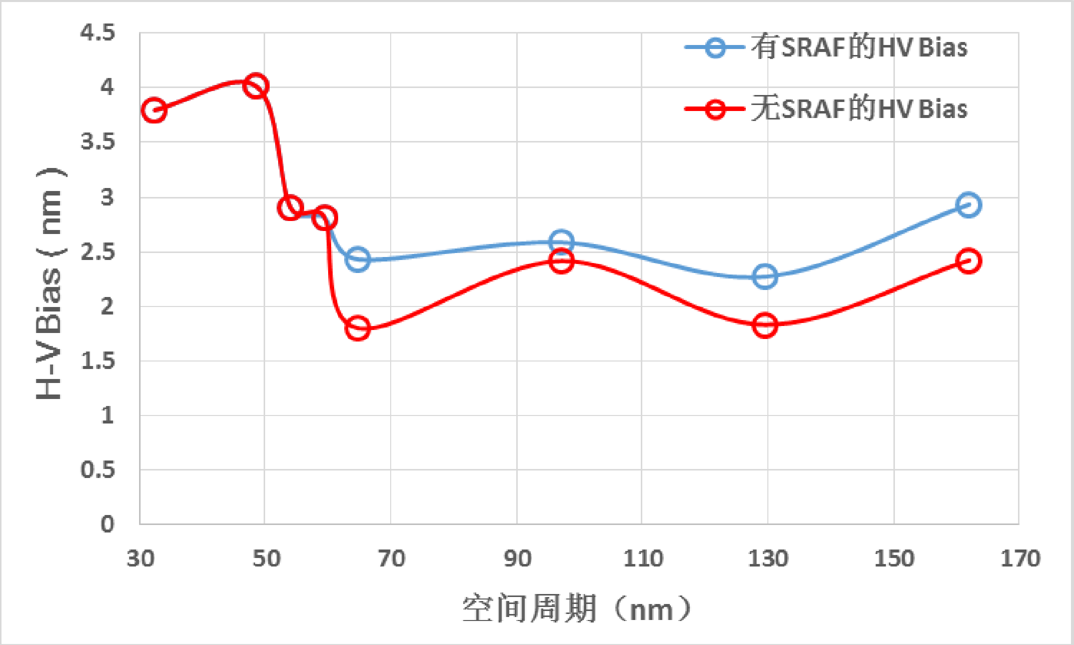
-0.61 nm （*X*）



- 阴影效应造成的图形偏移（**Pattern shift due to shadowing effect**）：~±0.6 nm （*X*），-1.7 nm （*Y*）

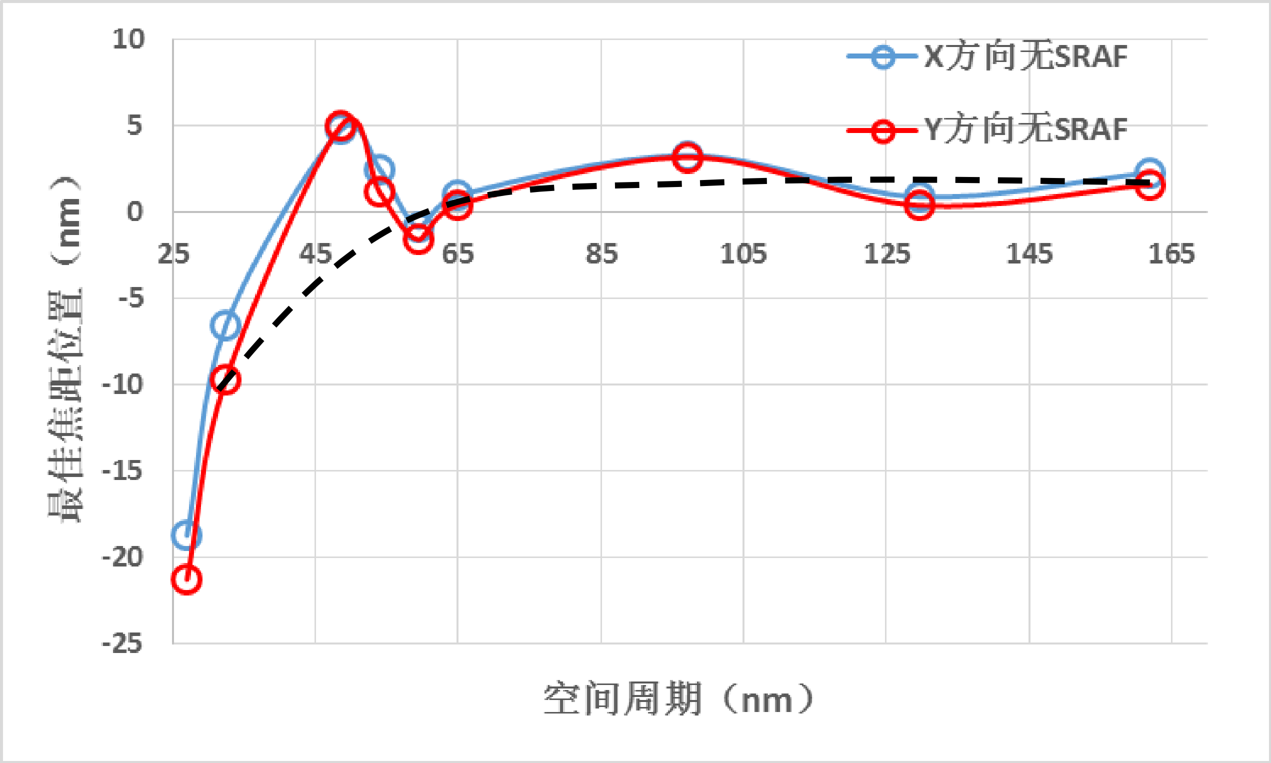
| | |
|---|---|
| 氮化钽：60 nm | 0.926 + j0.044 |
| 钌：2.5 nm | 0.883 + j0.018 |
| 硅：4.2 nm | 0.999 + j0.002 |
| 钼：2.8 nm | 0.919 + j0.007 |
| 共40 周期 | |
| 低热膨胀玻璃 | 0.977 + j0.009 |

## 横向-纵向线宽的差异（HV Linewidth Difference）




- *Y方向和X方向的线宽差异*（HV linewidth bias）：2.5~4 nm

## 掩模版三维散射效应（Mask 3D Scattering Effect）




- 焦距随周期变化幅度（Focus variation range）：~11 nm

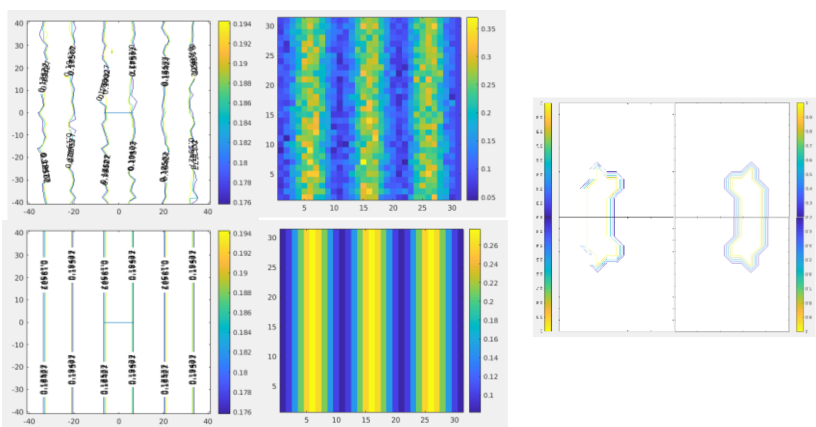
# 极紫外光刻工艺与深紫外光刻的区别（Difference between EUV Lithography and DUV Lithography）

## 光刻胶的吸收和显影随机涨落效应（Absorption of EUV in the Photoresist and Stochastics）

### 化学放大型（Chemically Amplified）：

厚度 = 30 nm，n = 1.0，
周期 = 27 nm，能量 = 54.0 mj/cm$^2$
EL = 15.5%，LWR = 4.0 nm

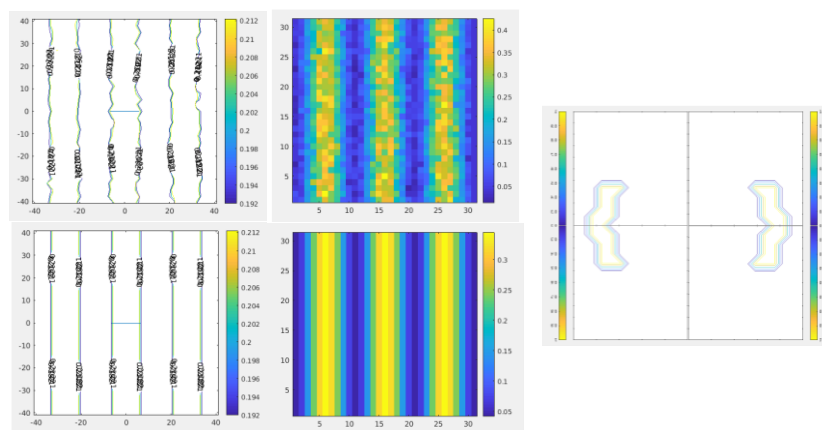
（Thickness=30 nm, n=1.0, Pitch=27 nm, Exposure energy= 54.0 mj/cm$^2$, EL=15.5%，LWR=4.0 nm）



### 含金属非化学放大型（Non-CAR）：

厚度 = 30 nm，n = 1.0，
周期 = 27 nm，能量 = 33.0 mj/cm$^2$
EL = 22.4%，LWR = 3.4 nm

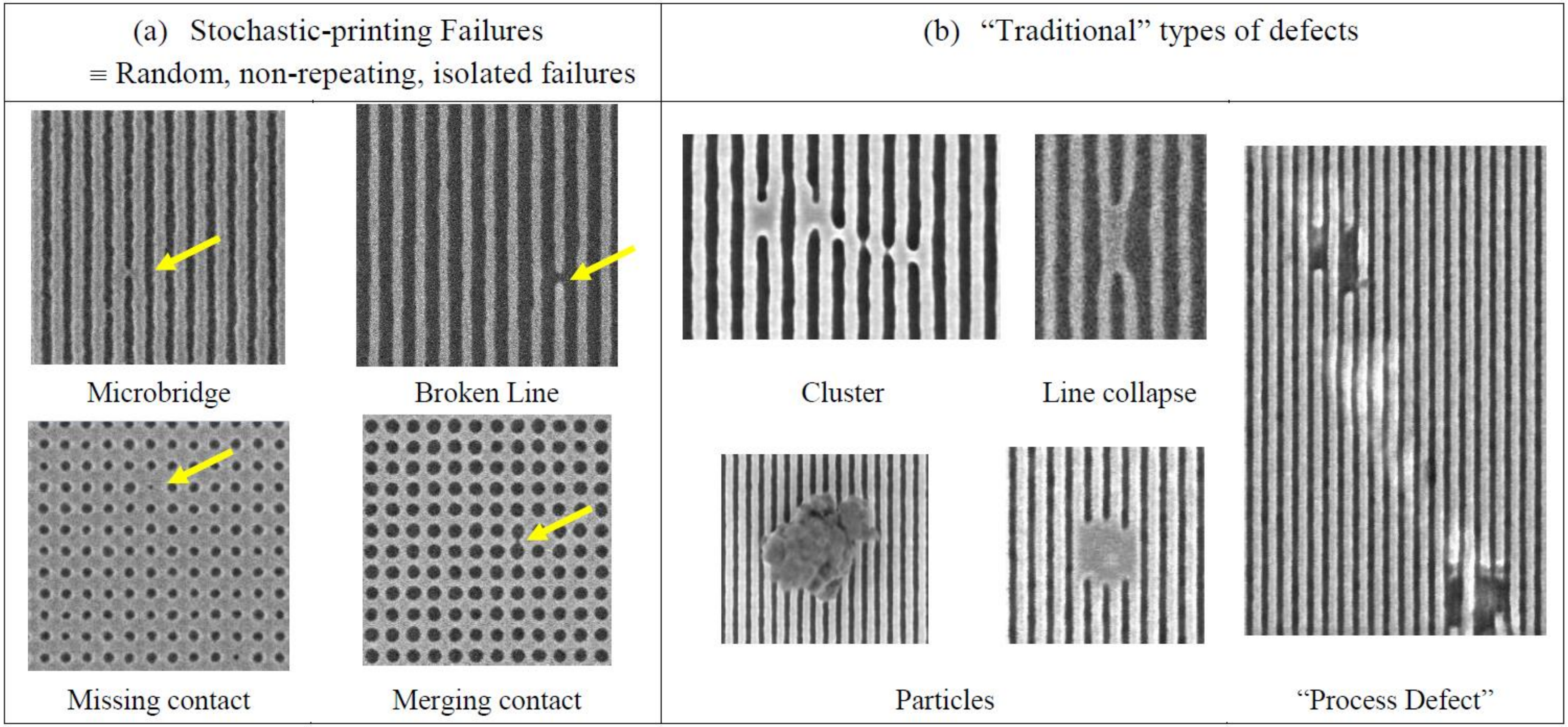
（Thickness=30 nm, n=1.0, Pitch=27 nm, Exposure energy= 33.0 mj/cm$^2$, EL=22.4%，LWR=3.4 nm）



- **非化学放大型含金属的光刻胶能够多吸收约3~4倍的极紫外光，EL和LWR均有显著改善**（Non-chemically amplified metal containing photoresists can absorb 3~4 times more light which improve EL and LWR）

# 极紫外光刻工艺与深紫外光刻的区别（Difference between EUV Lithography and DUV Lithography）

## 线宽粗糙度的极限（Limit in the Line Width Roughness—LWR）



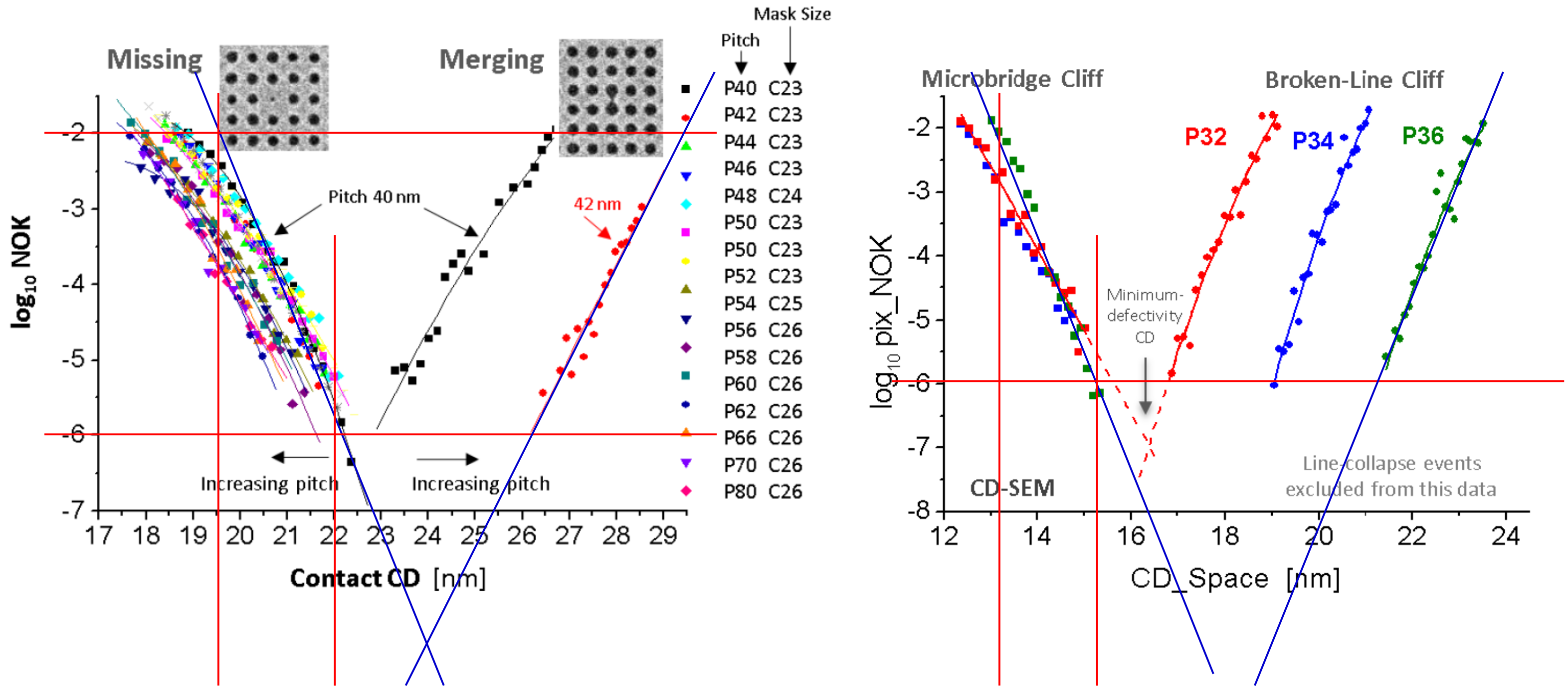

- **极紫外光子数量比193 nm少导致随机涨落缺陷**（Defect caused by EUV photon absorption stochastics）

---

*P. De Bisschop, E. Hendrickx, "Stochastic printing failures in EUV lithography", Proc. SPIE 10957, 109570E, 2019

# 极紫外光刻工艺与深紫外光刻的区别（Difference between EUV Lithography and DUV Lithography）

## 线宽粗糙度的极限（Limit in the Line Width Roughness—LWR）




- **接触孔：**缺陷率下降4个数量级/2.5 nm线宽，对应$10^{-12}$级别的缺陷率，接触孔的线宽需要增大到26 nm，如果需要+/-2.5 nm的线宽窗口，最小周期约为**48~50 nm**

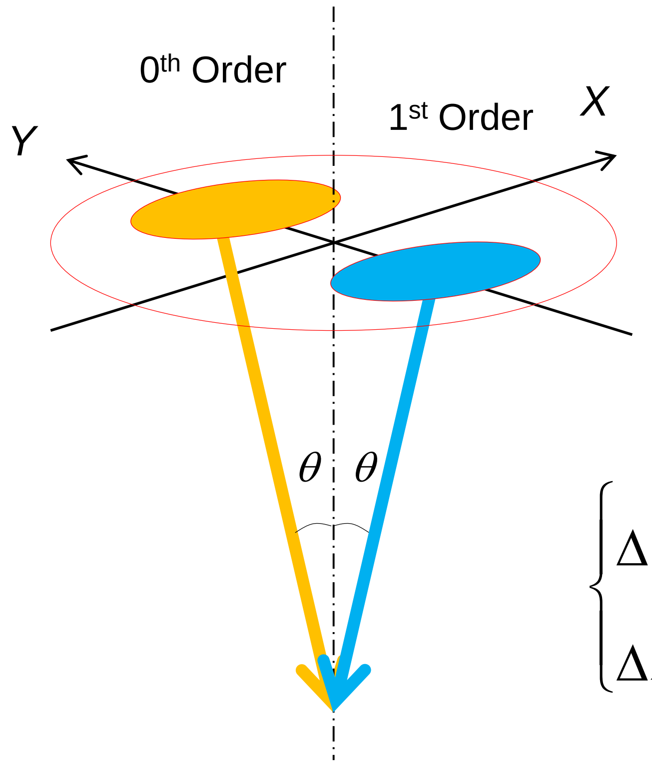
  （Contact：Defect density drops $10^4$/2.5 nm linewidth change. For $10^{-12}$ level defect density and ±2.5 nm linewidth window, CD needs to be ≥26 nm, and pitch ≥48~50 nm

- **线条/沟槽：**缺陷率下降4个数量级/2.5 nm线宽，对应$10^{-12}$级别的缺陷率，线条/沟槽的线宽需要增大到19 nm，如果需要+/-2 nm的线宽窗口，最小周期约为**36~40 nm**

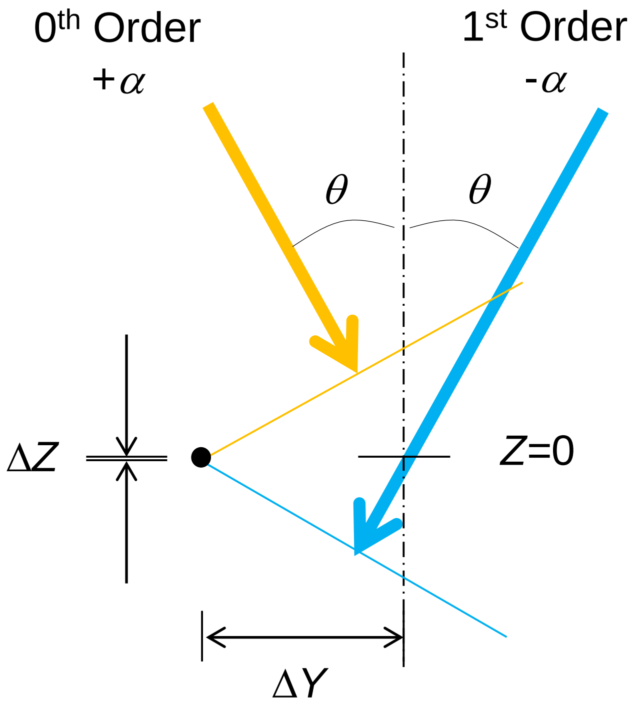
  （Line/Space：Defect density drops $10^4$/2.5 nm linewidth change. For $10^{-12}$ level defect density and ±2 nm linewidth window, CD needs to be ≥19 nm, and pitch ≥36~40 nm

*P. De Bisschop, E. Hendrickx, “Stochastic printing failures in EUV lithography”, Proc. SPIE 10957, 109570E, 2019

## 增强的像差影响（Increased Impact of Aberration）




$$\begin{cases} \Delta Y = \dfrac{\alpha}{\sin\theta} \\ \Delta Z = 0 \end{cases}$$




- 光刻机像差导致的图像平移与其数值孔径NA成反比：NA越小，平移越大！（Patten shift caused by aberration is inversely proportional to NA）
- EUV的NA比193 nm浸没式的小很多，其图像水平位置对像差要敏感得多。（NA for EUV is much smaller than that for 193 nm immersion, its horizontal position is more sensitive to aberration）
- 一般来说，0.33NA的极紫外光刻机需要将 rms 像差控制在0.2 nm之内。而193 nm浸没式光刻机的像差控制要求为rms =1 nm之内。（Generally speaking, rms aberration for 0.33NA needs to be kept under 0.2 nm while rms =1 nm for 193 nm immersion）

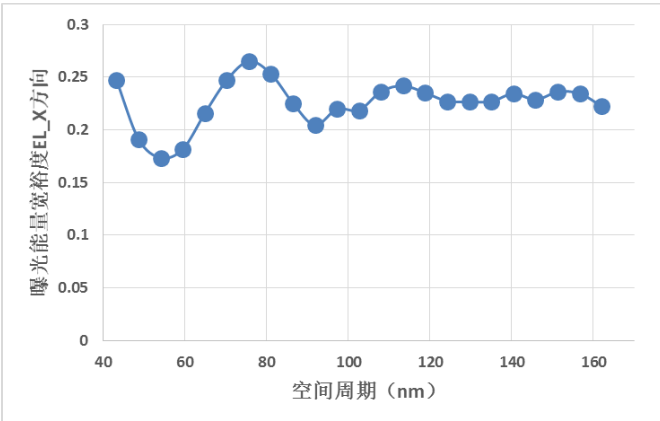
# 当今极紫外光刻工艺的性能极限和在 5 nm 工艺流程中的应用（Current Capability of EUV Lithography and Its Application to the 5 nm Process Flow）

## *X* 方向剪切层 *X* Direction Cut Layers

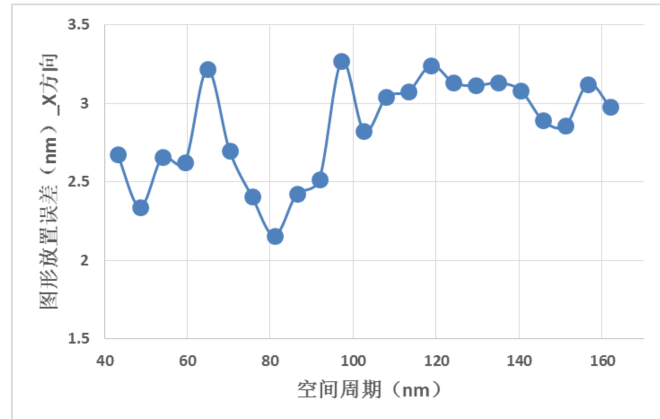
## *X* 和 *Y* 方向剪切层和孔洞层（X & Y Direction Cut and Hole Layers）

0.33NA，
0.9-0.3
Quasar 45°

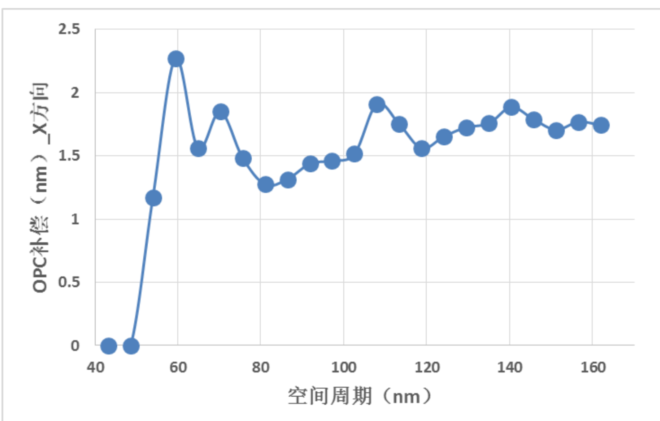
**EL vs. Pitch (nm)**



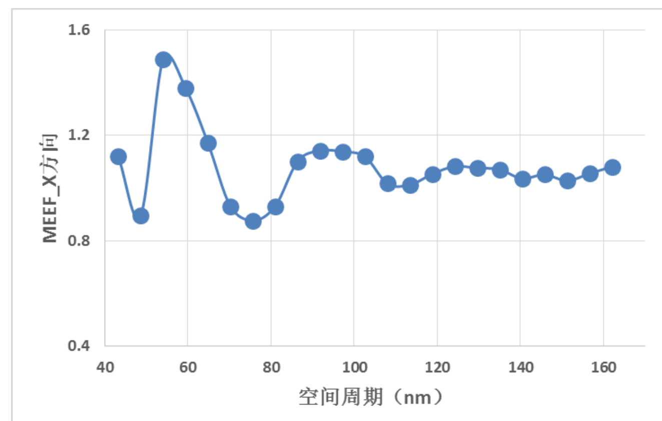

**Pattern Shift （nm） vs. Pitch (nm)**




**OPC (nm) vs. Pitch (nm)**




**MEEF vs. Pitch (nm)**



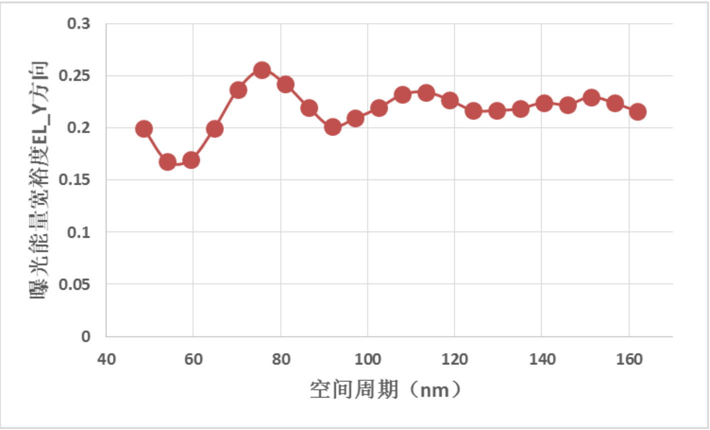

***X* 方向剪切层沟槽线宽随周期变化：最小周期 = 43 nm，**环形像场中央点，对ACH/P2 层次的一维沟槽，掩模版的线宽 = 22.5nm。
（*X* direction trench cut layer CD through pitch）：min pitch = 43 nm, slit center, CD on mask = 22.5 nm）

## *Y* 方向剪切层 *Y* Direction Cut Layers

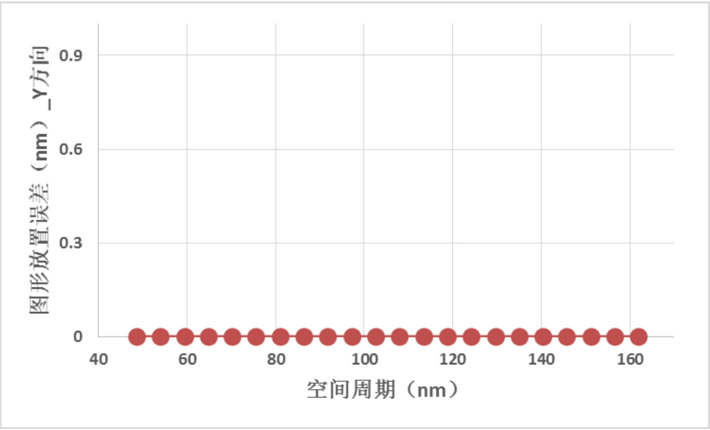
## *X* 和 *Y* 方向剪切层和孔洞层（X & Y Direction Cut and Hole Layers）

0.33NA，
0.9-0.3
Quasar 45°

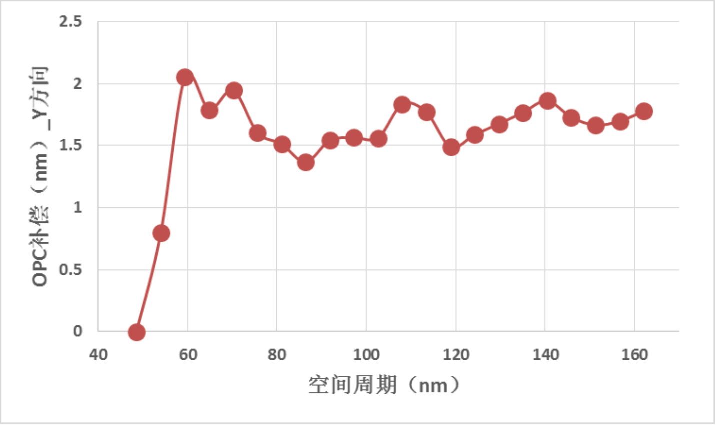
**EL vs. Pitch (nm)**



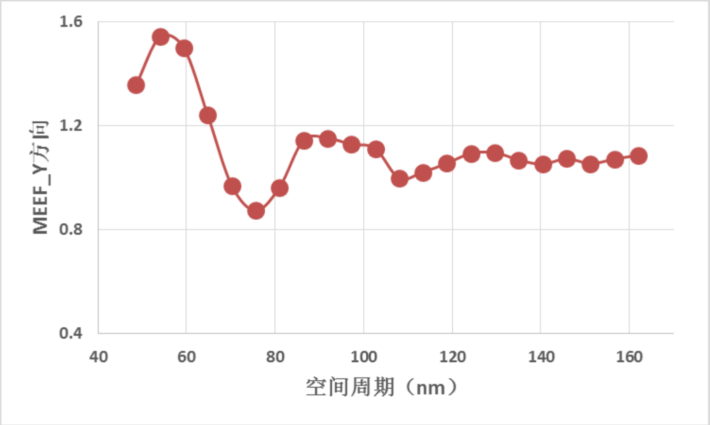

**Pattern Shift （nm） vs. Pitch (nm)**




**OPC (nm) vs. Pitch (nm)**




**MEEF vs. Pitch (nm)**




***Y* 方向剪切层沟槽线宽随周期变化： 最小周期=48 nm，**环形像场中央点，对SDB 层次的一维沟槽，掩模版的线宽 = 22.5nm

（***Y* direction** trench cut layer CD through pitch)：min pitch = 48 nm, slit center, CD on mask = 22.5 nm）

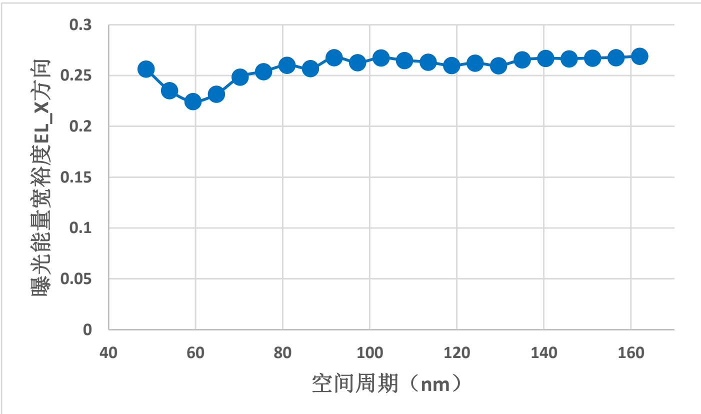
# 当今极紫外光刻工艺的性能极限和在 5 nm 工艺流程中的应用（Current Capability of EUV Lithography and Its Application to the 5 nm Process Flow）

## 孔洞层
## Hole Layers

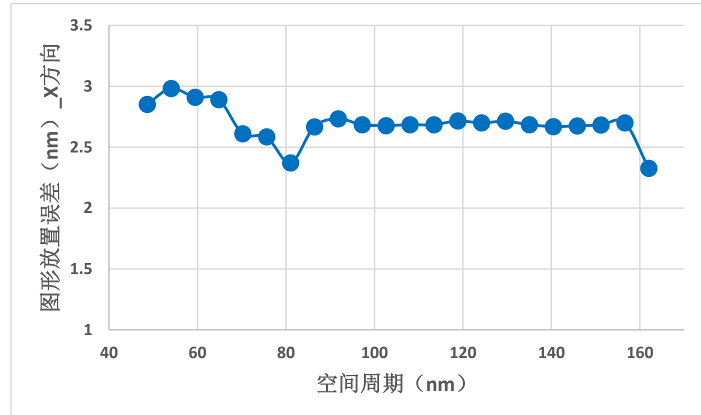
## *X* 和 *Y* 方向剪切层和孔洞层（X & Y Direction Cut and Hole Layers）

0.33NA，
0.8-0.4
Annular

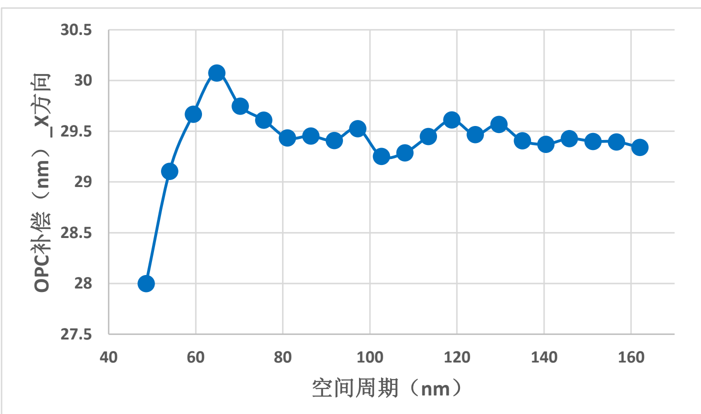
### EL vs. Pitch (nm)



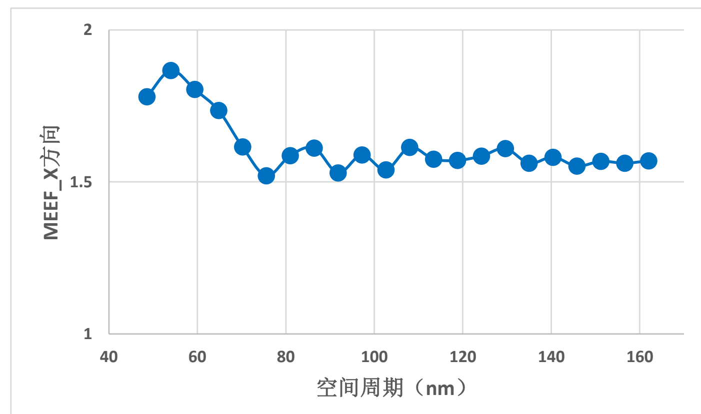

### Pattern Shift （nm） vs. Pitch (nm)




### OPC (nm) vs. Pitch (nm)




### MEEF vs. Pitch (nm)



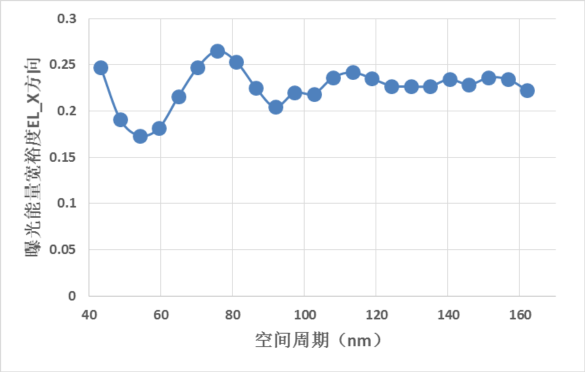

**孔洞层线宽随周期变化：最小周期= 48 nm，**环形像场中央一点，对MOG 层次2D hole，掩模版的线宽 = 28 nm
(Hole layer CD through pitch)：min pitch = 48 nm, slit center, CD on mask = 28 nm)

# 当今极紫外光刻工艺的性能极限和在 5 nm 工艺流程中的应用（Current Capability of EUV Lithography and Its Application to the 5 nm Process Flow）

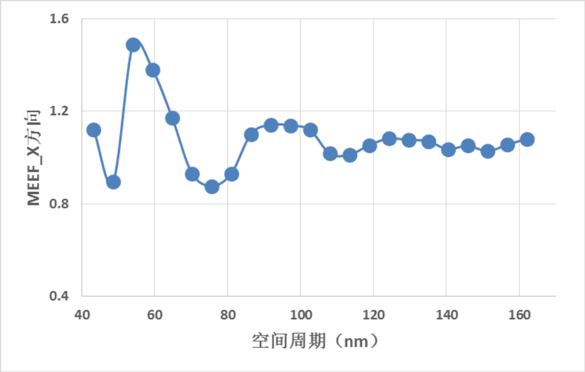
## 典型光刻层显影后线宽和EL/对比度标准的选择（Determination of Typical ADI Linewidth and EL/Contrast Target）

***X* 方向剪切层**
***X* Direction**
**Cut Layers**

**EL vs. Pitch (nm)**




**MEEF vs. Pitch (nm)**




*X* 方向剪切层沟槽线宽随周期变化：最小周期=43 nm，环形像场中央点，对ACH/P2 层次的一维沟槽，掩模版的线宽 = 22.5nm。(*X* direction trench cut layer CD through pitch): min pitch = 43 nm, slit center, CD on mask = 22.5 nm)

### ADI线宽目标设定 （ADI target determination）

- 对于剪切层，如果是193 nm浸没式光刻，我们一般会要求ADI线宽为45-65 nm（正显影），37-50 nm（负显影）
  (For cut layers using 193 nm immersion, ADI CD = 45-65 nm (PTD) and 37-50 nm （NTD））
- 而对于 0.33NA 的极紫外，由于随机效应的存在，**最小周期需要≥36-40 nm，ADI线宽需要≥20 nm。**
  (For cut layers using 0.33 NA EUV, due to stochastics, ADI CD ≥ 20 nm with min pitch ≥ 36-40 nm)

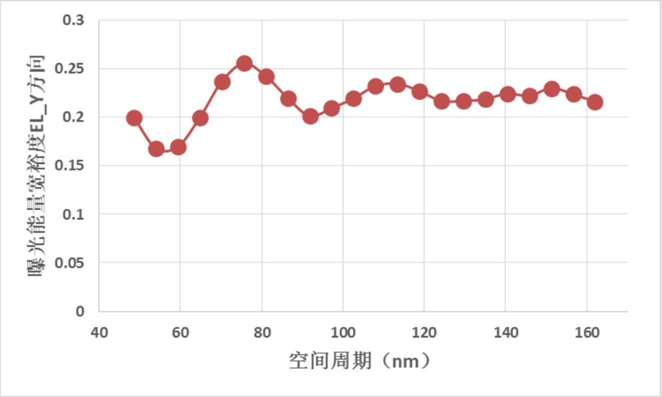
### EL/MEF目标设定（EL/MEF target determination）

- 对于剪切层，如果是193 nm浸没式光刻，我们一般会要求EL≥13%，MEF ≤ **3.5** （正显影），4.5（负显影）
  (For cut layers using 193 nm immersion, EL≥13%, MEF ≤ 3.5（PTD），4.5（NTD））
- 而对于 0.33NA 的极紫外，由于随机效应的存在，我们需要尽量提高EL，而对于一个均衡的线宽随周期变化，**EL至少需要 ≥ 18%，这样通常会导致 MEF ≤ 1.5。**
  (For cut layers using 0.33 NA EUV, due to stochastics, EL ≥ 18 nm which will bring a MEF ≤ 1.5)

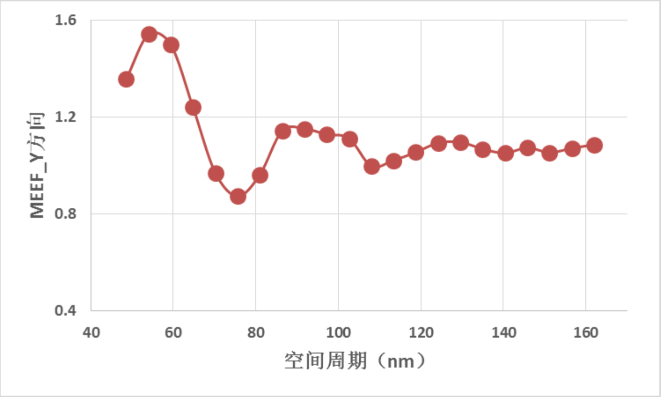
# 典型光刻层显影后线宽和EL/对比度标准的选择（Determination of Typical ADI Linewidth and EL/Contrast Target）

***Y* 方向剪切层**
***Y* Direction Cut Layers**

**EL vs. Pitch (nm)**




**MEEF vs. Pitch (nm)**




*Y* 方向剪切层沟槽线宽随周期变化： 最小周期=48 nm，环形像场中央点，对SDB 层次的一维沟槽，掩模版的线宽 = 22.5nm。（*Y* direction trench cut layer CD through pitch）: min pitch = 48 nm, slit center, CD on mask = 22.5 nm）

**ADI线宽目标设定（ADI target determination）**

- 对于剪切层，如果是193 nm浸没式光刻，我们一般会要求ADI线宽为45-65 nm（正显影），37-50 nm（负显影）
  （For cut layers using 193 nm immersion, ADI CD = 45-65 nm（PTD）and 37-50 nm （NTD））
- 而对于 0.33NA 的极紫外，由于随机效应的存在，**最小周期需要≥36-40 nm，ADI线宽需要≥20 nm。**
  （For cut layers using 0.33 NA EUV, due to stochastics, ADI CD ≥ 20 nm with min pitch ≥ 36-40 nm）

**EL/MEF目标设定（EL/MEF target determination）**

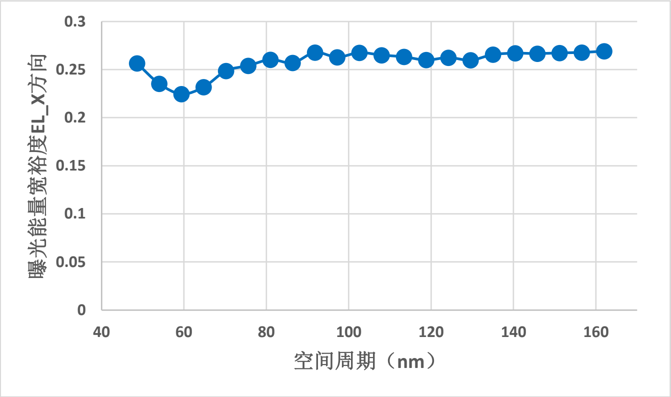
- 对于剪切层，如果是193 nm浸没式光刻，我们一般会要求EL≥13%，MEF ≤ 3.5 （正显影），4.5（负显影）
  （For cut layers using 193 nm immersion, EL≥13%, MEF ≤ 3.5（PTD），4.5（NTD））
- 而对于 0.33NA 的极紫外，由于随机效应的存在，我们需要尽量提高EL，而对于一个均衡的线宽随周期变化，**EL至少需要 ≥ 18%，这样通常会导致 MEF ≤ 1.5。**
  （For cut layers using 0.33 NA EUV, due to stochastics, EL ≥ 18 nm which will bring a MEF ≤ 1.5）

# 当今极紫外光刻工艺的性能极限和在 5 nm 工艺流程中的应用（Current Capability of EUV Lithography and Its Application to the 5 nm Process Flow）

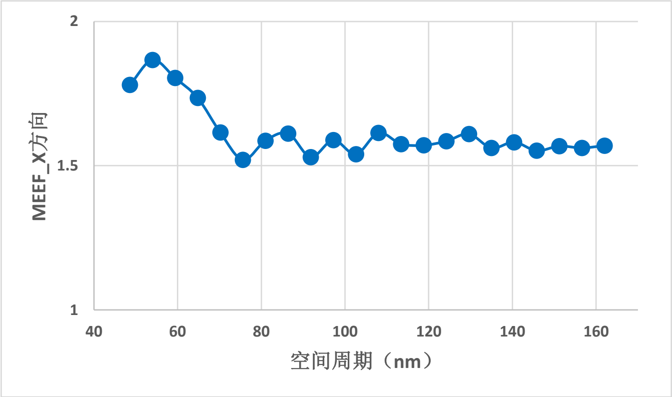
## 典型光刻层显影后线宽和EL/对比度标准的选择（Determination of Typical ADI Linewidth and EL/Contrast Target）

### 孔洞层 Hole Layers

**EL vs. Pitch (nm)**




**MEEF vs. Pitch (nm)**




孔洞层线宽随周期变化：最小周期= 48 nm，环形像场中央一点，对MOG 层次2D hole，掩模版的线宽 = 28 nm。(Hole layer CD through pitch)：min pitch = 48 nm, slit center, CD on mask = 28 nm)

**ADI线宽目标设定（ADI target determination）**

- 对于孔洞层，如果是193 nm浸没式光刻，我们一般会要求ADI线宽为65-70 nm（正显影），53-58 nm（负显影）
  (For hole layers using 193 nm immersion, ADI CD = 65-70 nm (PTD) and 53-58 nm （NTD））
- 而对于0.33NA的极紫外，由于随机效应的存在，**最小周期需要≥48-50 nm，ADI线宽需要≥26 nm。**
  (For hole layers using 0.33 NA EUV, due to stochastics, **ADI CD ≥ 26 nm with min pitch ≥ 48-50 nm**)

**EL/MEF目标设定（EL/MEF target determination）**

- 对于孔洞层，如果是193 nm浸没式光刻，我们一般会要求EL≥13%，MEF ≤ 5-6（PTD），6-8（NTD）
  (For hole layers using 193 nm immersion, EL≥13%, MEF ≤ 5-6（PTD），6-8（NTD））
- 而对于0.33NA的极紫外，由于随机效应的存在，我们需要尽量提高EL，而对于一个均衡的线宽随周期变化，**EL至少需要 ≥ 18%，这样通常会导致 MEF ≤ 3.0。**
  (For hole layers using 0.33 NA EUV, due to stochastics, EL ≥ 18 nm which will bring a MEF ≤ 3.0)

# 结论（Summary）

- 我们对**5 nm**逻辑器型晶体管工艺技术按照典型的设计规则进行了预研
- **5 nm**工艺技术是第一代大量采用极紫外（**EUV**）光刻工艺的逻辑工艺。
- 我们对极紫外光刻工艺进行了研究，采用时域有限元和严格的耦合波方法，包括建立光刻胶吸收光随机效应模型对极紫外光刻工艺进行了仿真，确立了光刻工艺建立的边界条件。
- 由于随机效应导致的缺陷，现在的极紫外光刻的工艺极限为：线条/沟槽：周期**36-40 nm**，孔洞周期**48-50 nm**。

- We have done a path finding study on the 5 nm logic process according to typical design rules.
- 5 nm logic process is the first process that adopts EUV technology in a large scale.
- We have studied the EUV lithography technology with self-developed FDTD and RCWA programs, including the setup of a photoresist model with stochastics, and explored the process setup boundary conditions.
- Due to the existence of the stochastics induced defectivity, the current minimum pitch for line/space is 36~40 nm, and 48~50 nm for the contact holes.