

# 微細化は終わり？

## — リソグラフィ技術の最新動向 —

WG5 (リソグラフィ Working Group)

富士通セミコンダクター(株) 千々松 達夫

### — 内容 —

- ◆WG5の活動体制
- ◆デバイスメーカー微細化の状況
- ◆リソ微細化技術の状況
- ◆まとめ

# WG5(リソグラフィWG)の活動体制

## －JEITA半導体部会/関連会社－

- 千々松達夫/リーダー(富士通セミコンダクター)
- 上澤史且/サブリーダー(ソニー)
- 小林幸子(東芝)
- 和田恵治(ローム)
- 山本次朗(日立製作所)

## －コンソーシアム－

- 須賀治(EIDEC)

## －SEAJ 他－

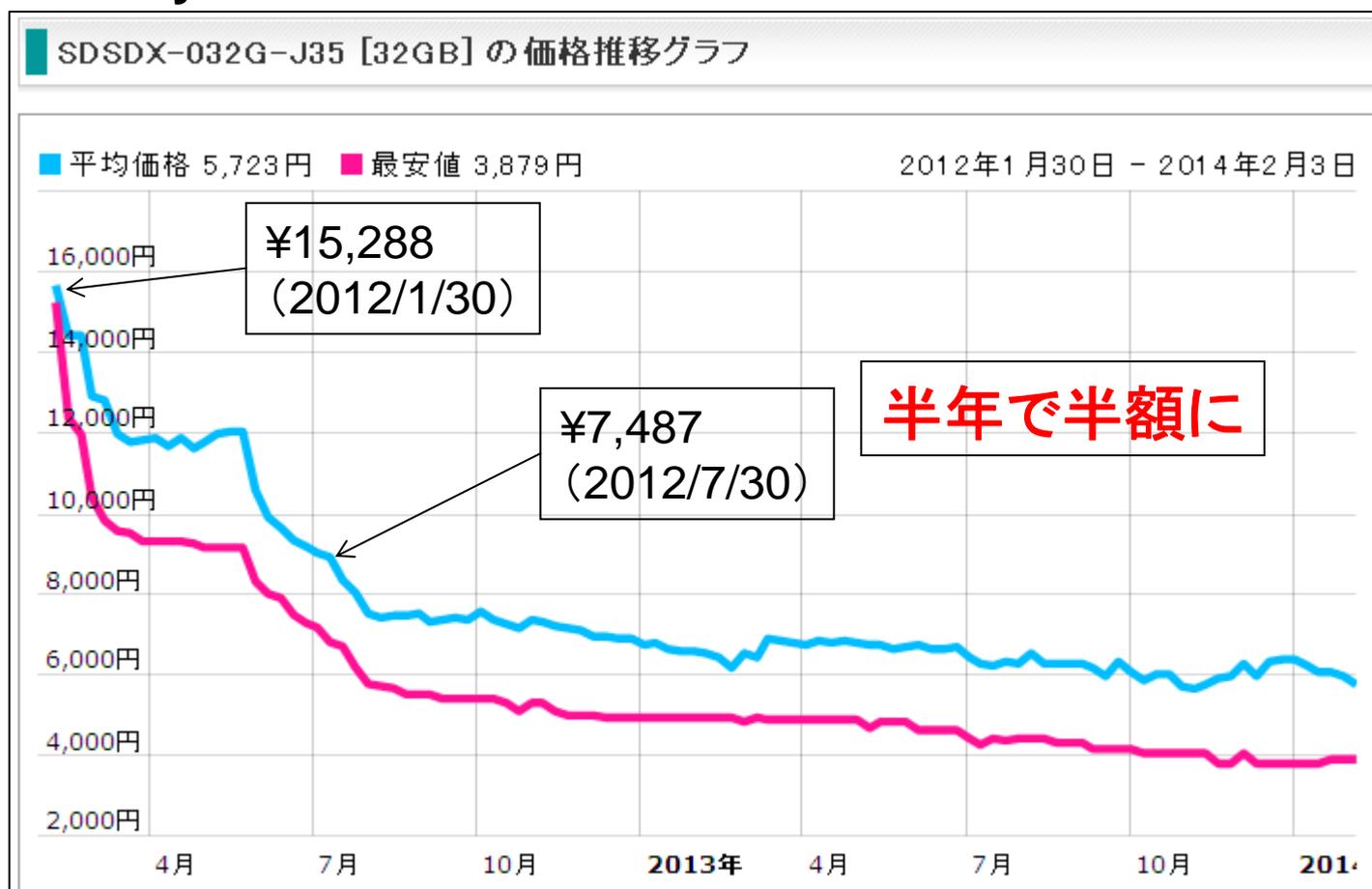
- 奥村正彦/国際委員(SEAJ:ニコン)
- 高橋和弘(SEAJ:キヤノン)
- 中島英男(SEAJ:TEL)
- 山口哲男(SEAJ:ニューフレアテクノロジー)
- 笠間邦彦(SEAJ:ウシオ電機)
- 大久保靖(HOYA)
- 林直也 (大日本印刷)
- 森本博明(凸版印刷)
- 大森克実(東京応化工業)
- 栗原啓志郎(アライアンスコア)
- 遠藤政孝(大阪大学)

計17名

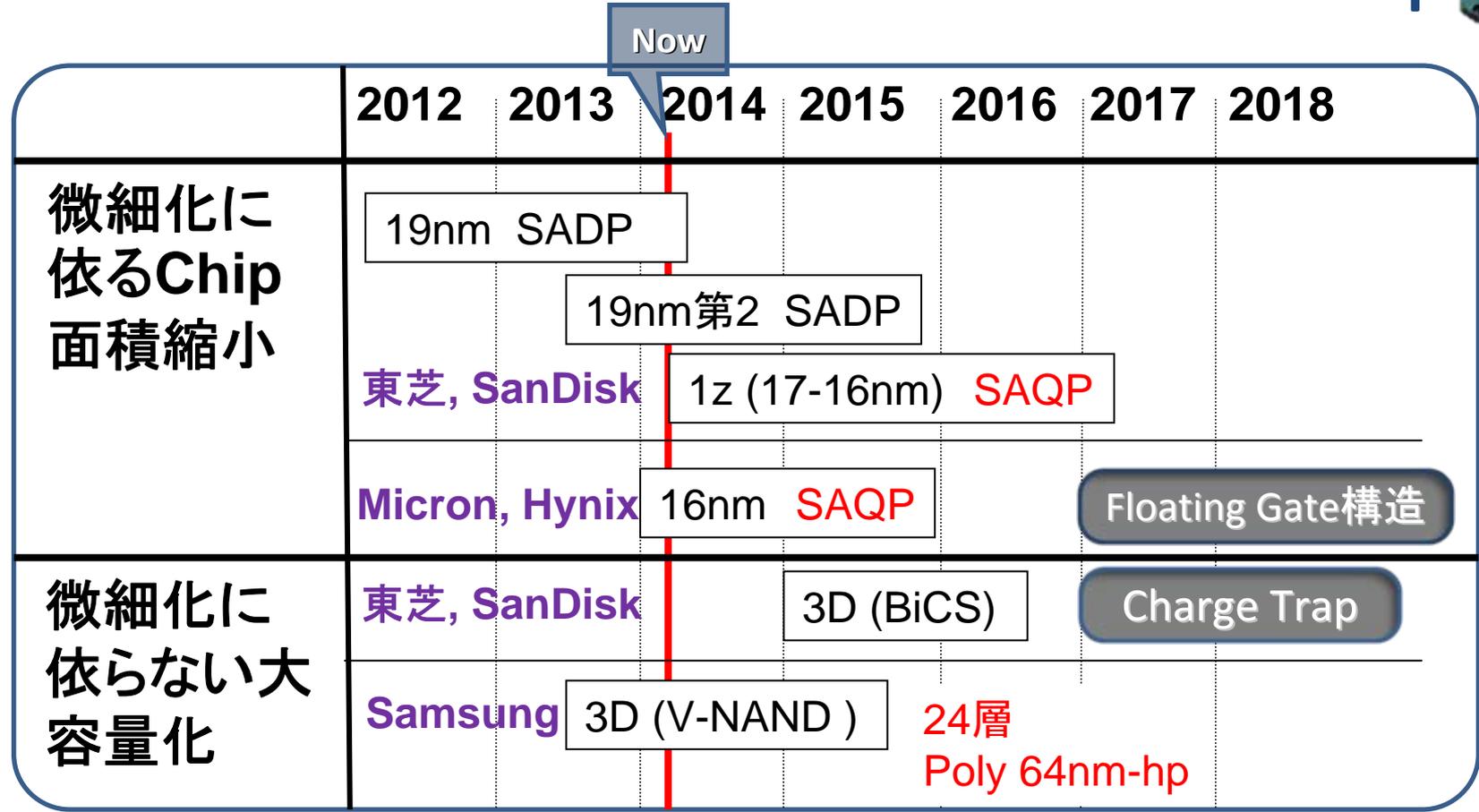
# 微細化の目的の1つはチップコスト削減

プロセスコストや開発コストが上がると、微細化の魅力がなくなってしまう。

## 32G Byte SDカードの価格推移例



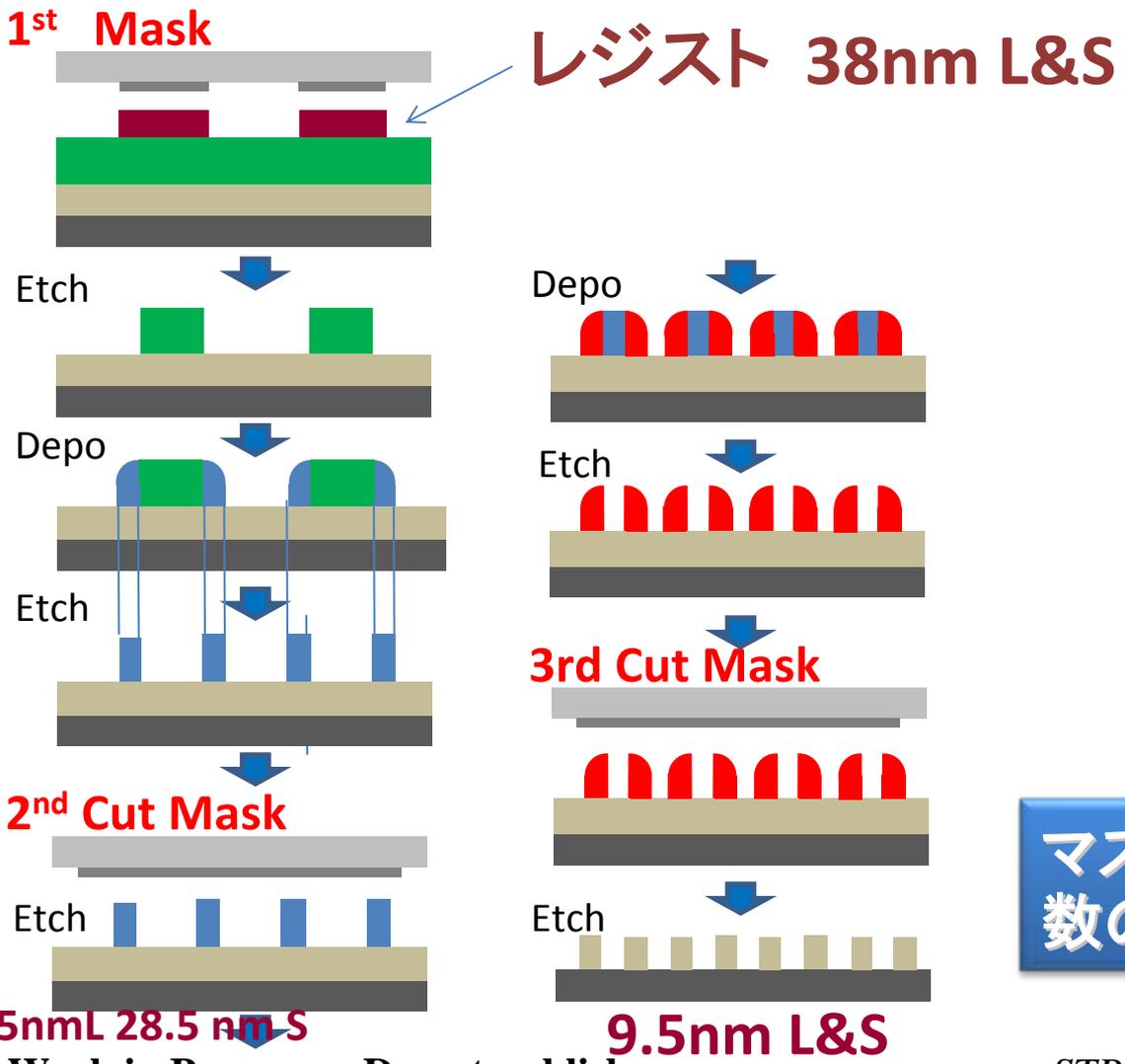
# NAND Flashメーカーのroad map



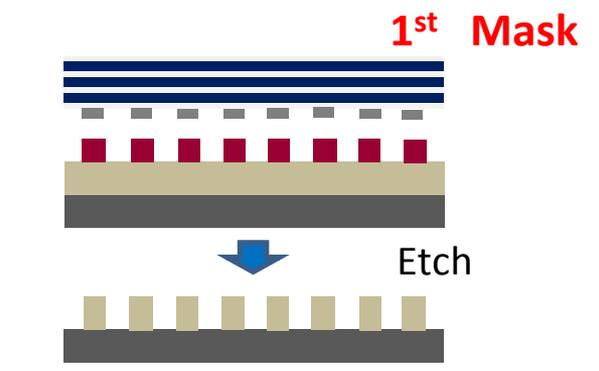
- SAQP技術の量産適用が始まった。
- 3D-NAND技術が確立された。
- ITRSは、12nm('18)まで微細化が進み、その後は3D-NANDに移行すると予想

# プロセスコスト面からEUVLが望ましい

## SAQP Flow (Self Aligned Quadruple Patterning)

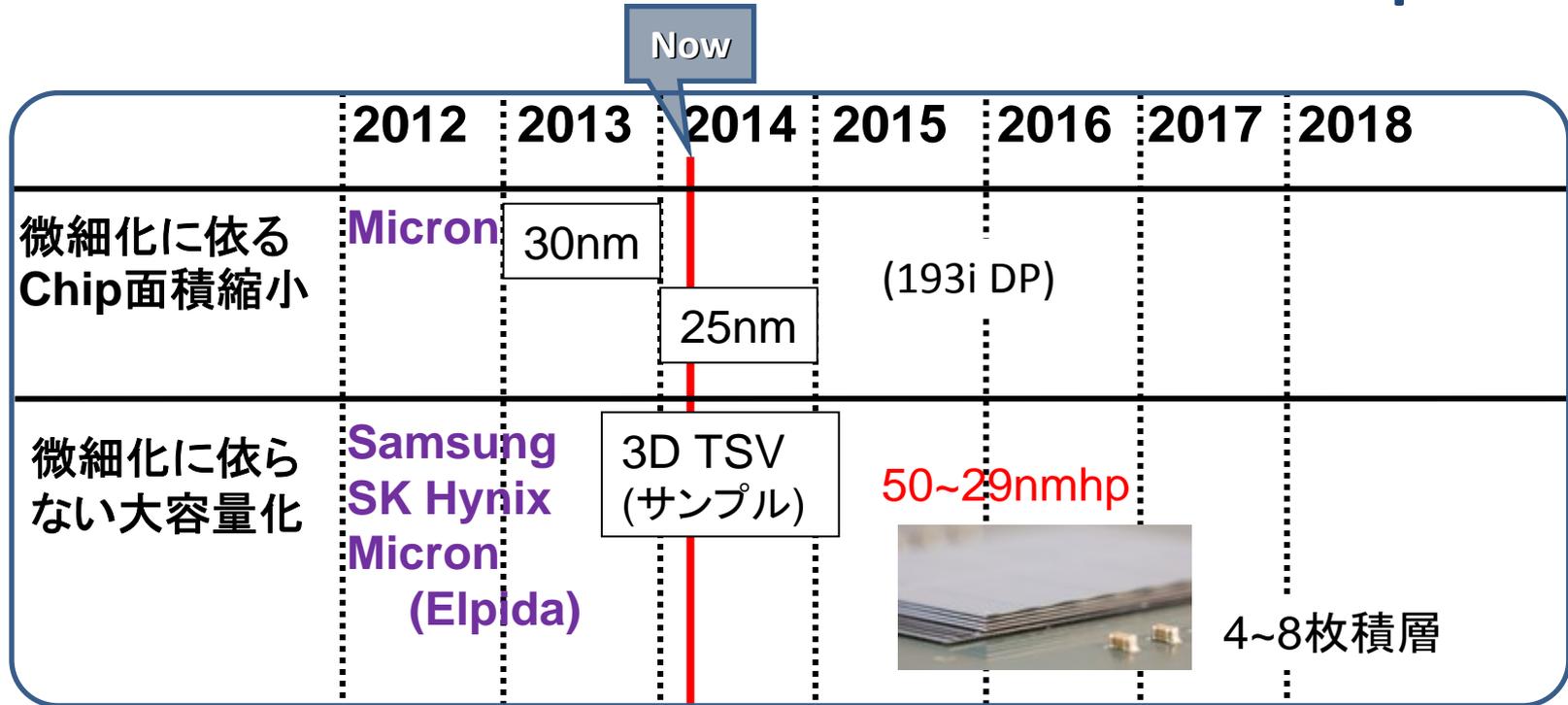


## EUVL Flow $\lambda = 13.5\text{nm}$ NA = 0.5



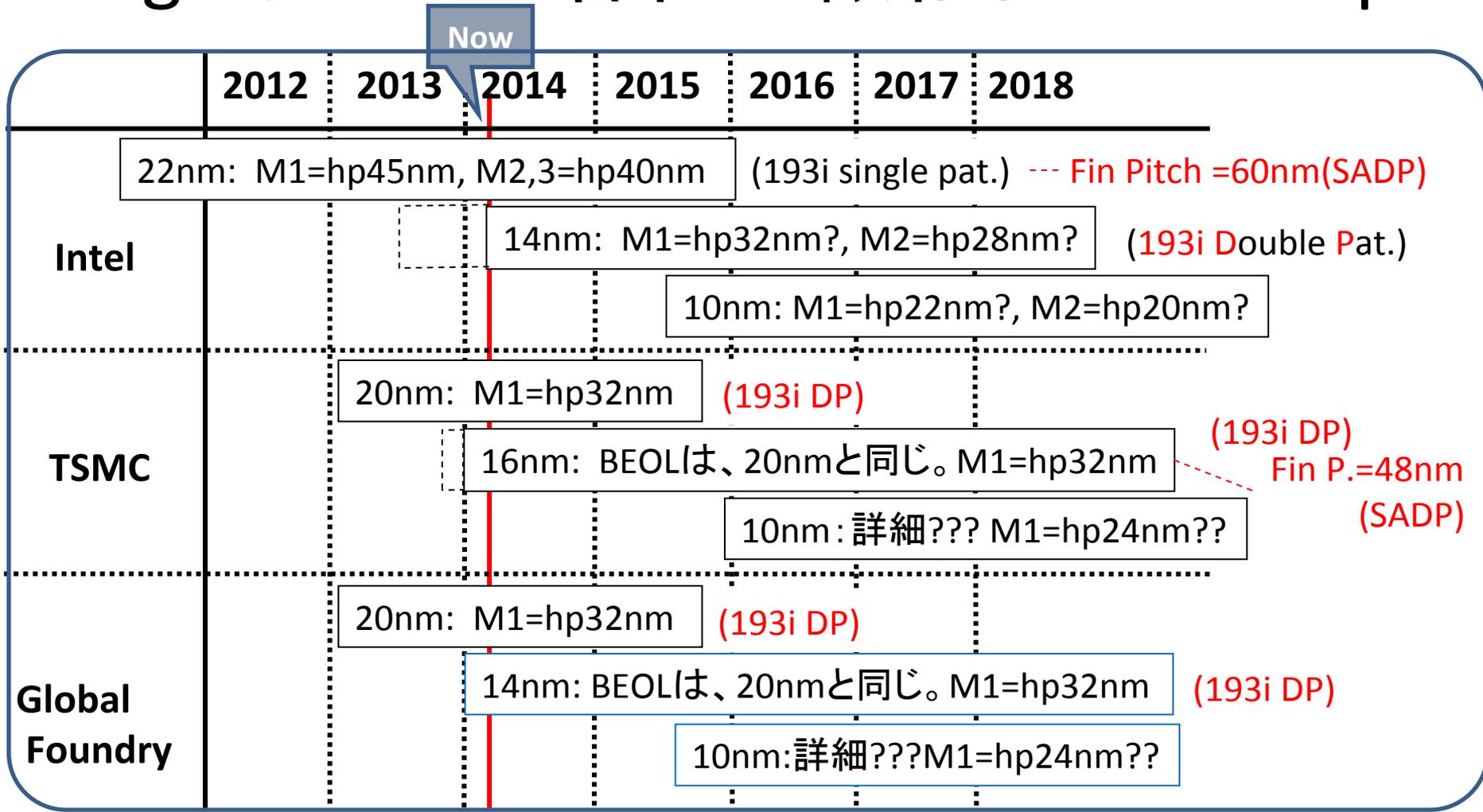
マスク枚数、プロセス工程数の点で、EUVLが有利

# DRAMメーカーのroad map



- TSVを用いた積層品のサンプルが出始めた。
- まだ、コスト面で汎用品向けではない。
- DPの限界(20nm)が要求されるのは、2017年。  
ここまでEUVLが間に合うか？  
トリプルパターニングあるいは積層？

# Logicデバイス各社の微細化road map



- ダブルパターニング(LELE)の量産適用が開始された。
- Fin(SADP)が、最も厳しいピッチを要求するレイヤーとなった。

# デバイスメーカーの動向

- NAND Flash
  - SAQPの適用が開始された。
  - 3D NANDの量産が見えてきた。
- DRAM
  - TSVを用いた積層品のサンプル品が出始めた。
- Logic
  - LELEが本格的に用いられるようになった。
  - FINが、最も微細なピッチを必要とする。
- 193i マルチパターンニングは、コストUp要因。

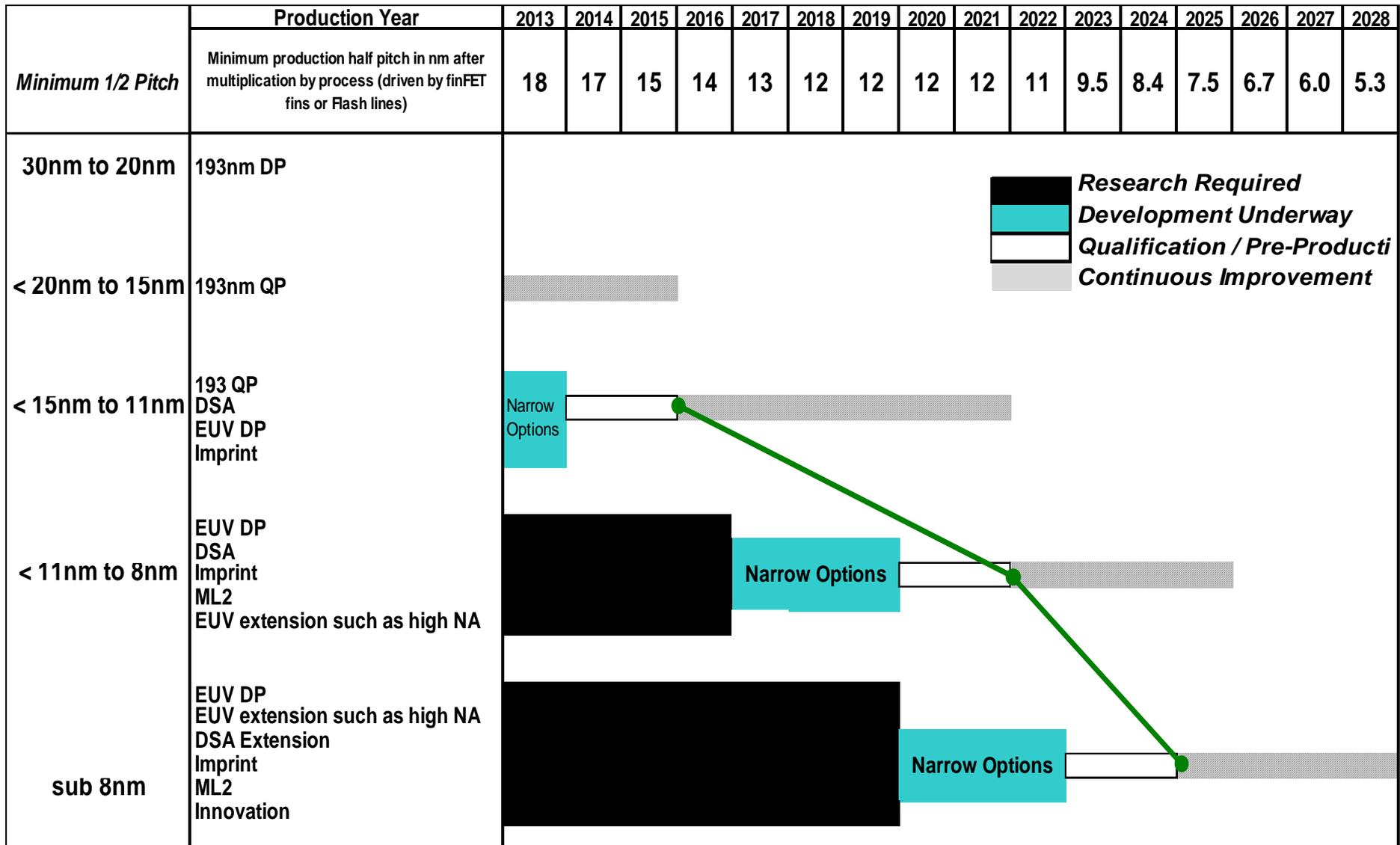
# 2013年版Litho Possible Optionsの区切り



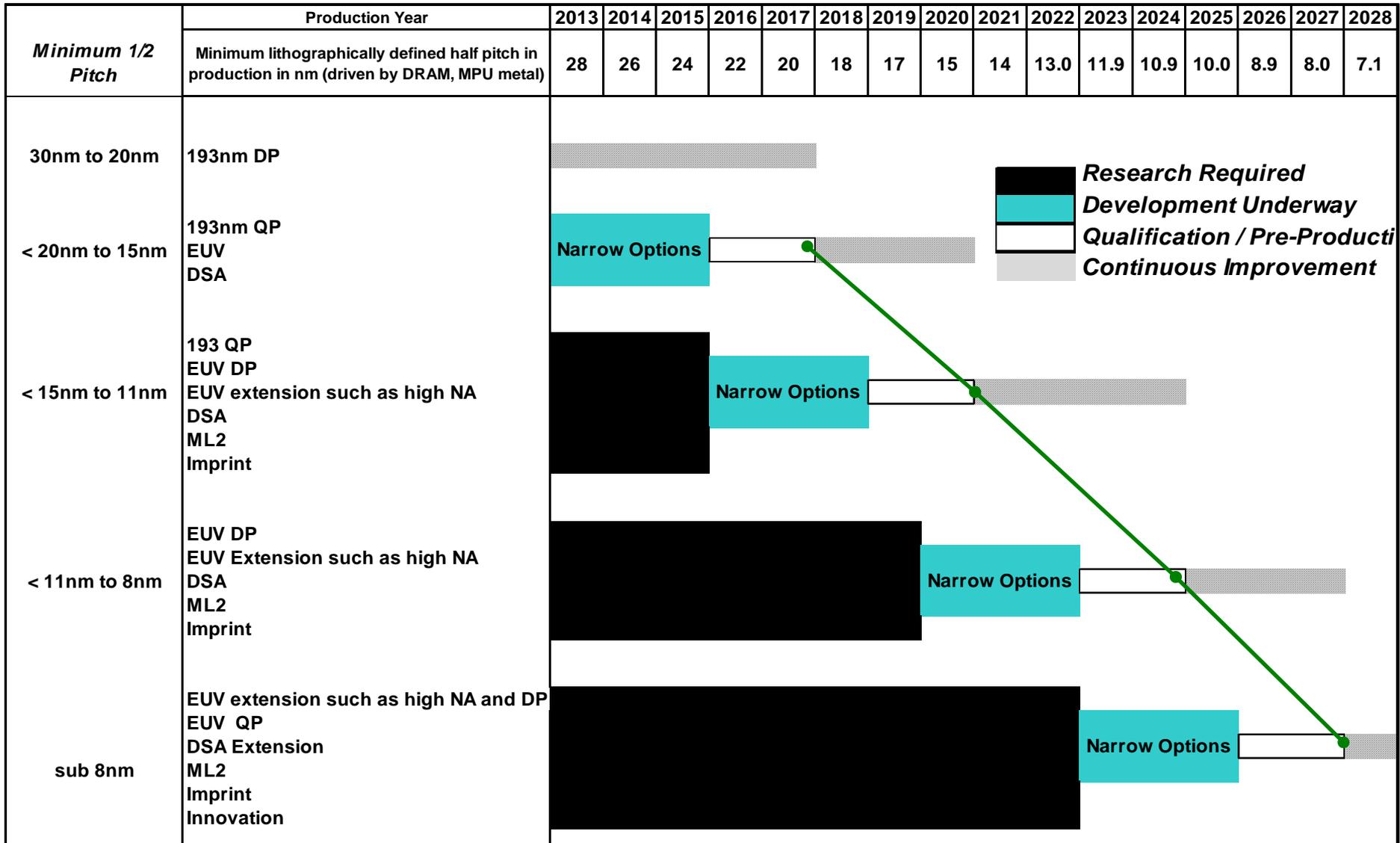
これまで、テクノロジーノードを意識して区切っていたが、露光装置レンズのNAで決まる193i(NA=1.35)とEUV(NA=0.33)の実用解像限界のHalf Pitchで区切る様にした。

| Half pitch (nm) | Possible Options |
|-----------------|------------------|
| to 40           | 193i SP          |
| < 40 to 20      | 193i DP          |
| < 20 to 15      | EUV SP           |
| < 15 to 11      | 193i QP          |
| < 11 to 8       | EUV DP(NA=0.33)  |

# Updated Flash & Fin Options



# Updated MPU/DRAM Metal Options



# ダブルパターンニングでの懸念点

～ LE-LE間の重ね合わせは、大丈夫？

## 193i 露光装置の重ね合わせ精度

|           |                    | 2011 | 2012 | 2013 |
|-----------|--------------------|------|------|------|
| NXE-1950i | SMO                | 2.5  | 2.5  |      |
|           | MMO                | 5.5  | 4.5  | 3.5  |
|           | On Product Overlay | 9    | 6    | 4    |
| NSR-S622D | SMO                |      |      | 2    |
|           | MMO                |      |      | 3.5  |

[nm]

※SMO: Single Machine Overlay  
MMO: Mix and Match Overlay

# 重ね合わせ精度

Manufacturable solutions exist, and are being optimized  
 Manufacturable solutions are known  
 Interim solutions are known  
 Manufacturable solutions are NOT known

## ITRS2011

|  | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>DRAM</b>                            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| DRAM minimum ½ pitch (nm)              | 36   | 32   | 28   | 25   | 23   | 20   | 18   | 16   | 14   | 13   | 11   | 10.0 |
| Overlay (3 sigma) (nm)                 | 7.1  | 6.4  | 5.7  | 5.1  | 4.5  | 4.0  | 3.6  | 3.2  | 2.8  | 2.5  | 2.3  | 2.0  |
| <b>Flash</b>                           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Flash ½ pitch (nm) (un-contacted poly) | 22   | 20   | 18   | 17   | 15   | 14.2 | 13.0 | 11.9 | 10.9 | 10.0 | 8.9  | 8.0  |
| Overlay (3 sigma) (nm)                 | 7.2  | 6.6  | 6.1  | 5.6  | 5.1  | 4.7  | 4.3  | 3.9  | 3.6  | 3.3  | 2.9  | 2.6  |
| <b>MPU / Logic</b>                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| MPU/ASIC Min Metal ½ pitch (nm)        | 38   | 32   | 27   | 24   | 21   | 19   | 17   | 15   | 13   | 12   | 11   | 9.5  |
| Overlay (3 sigma) (nm)                 | 7.6  | 6.4  | 5.4  | 4.8  | 4.2  | 3.8  | 3.4  | 3.0  | 2.7  | 2.4  | 2.1  | 1.9  |



## ITRS2013(仮)

|  | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>DRAM</b>                            |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| DRAM minimum ½ pitch (nm)              | 28   | 26   | 24   | 22   | 20   | 18   | 17   | 15   | 14   | 13   |
| Overlay (3 sigma) (nm)                 | 5.7  | 5.2  | 4.8  | 4.4  | 4.0  | 3.7  | 3.4  | 3.1  | 2.8  | 2.6  |
| <b>Flash</b>                           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Flash ½ pitch (nm) (un-contacted poly) | 18   | 17   | 15   | 14   | 13   | 12   | 12   | 12   | 12   | 12   |
| Overlay (3 sigma) (nm)                 | 6.1  | 5.6  | 5.1  | 4.7  | 4.3  | 3.9  | 3.9  | 3.9  | 3.9  | 3.9  |
| <b>MPU / Logic</b>                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| MPU/ASIC Min Metal ½ pitch (nm)        | 40   | 32   | 32   | 28   | 25   | 23   | 20   | 18   | 16   | 14.2 |
| Overlay (3 sigma) (nm)                 | 8.0  | 6.4  | 6.4  | 5.7  | 5.1  | 4.5  | 4.0  | 3.6  | 3.2  | 2.8  |

最終版では変わる可能性あり

微細化/ダブルパターニングに対応して、精度が向上している

# EUVLの状況

- 最大の課題は、光源パワーの不足。
- プレ量産機(NXE3100): 2011年～6台出荷  
→ *ペリクルの必要性が認識された*
- 量産機(NXE3300B)の出荷が始まっている。  
*出荷済み:3台, 残り8台が予定。*

## NXE3300Bによる微細パターン形成例

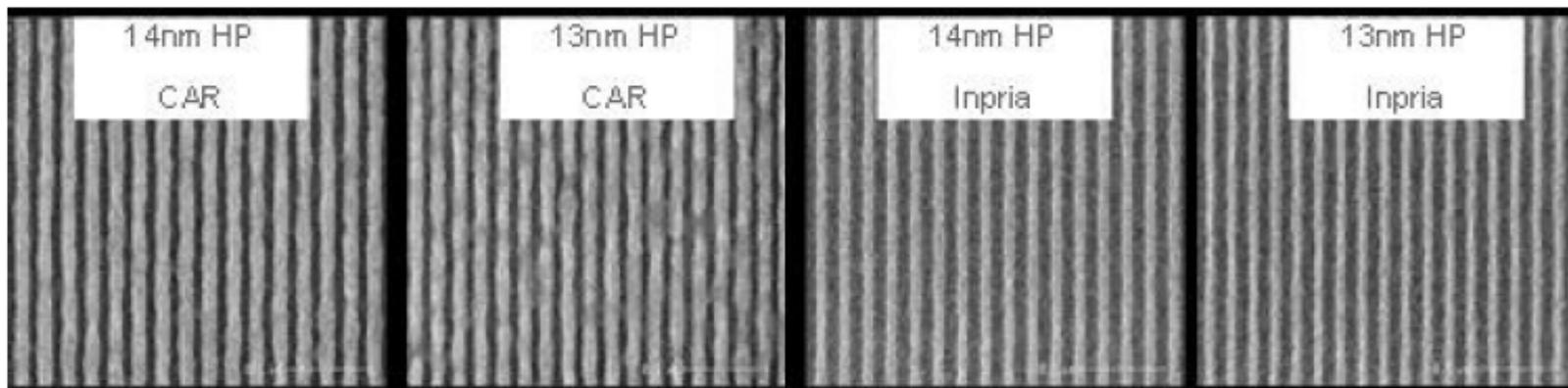


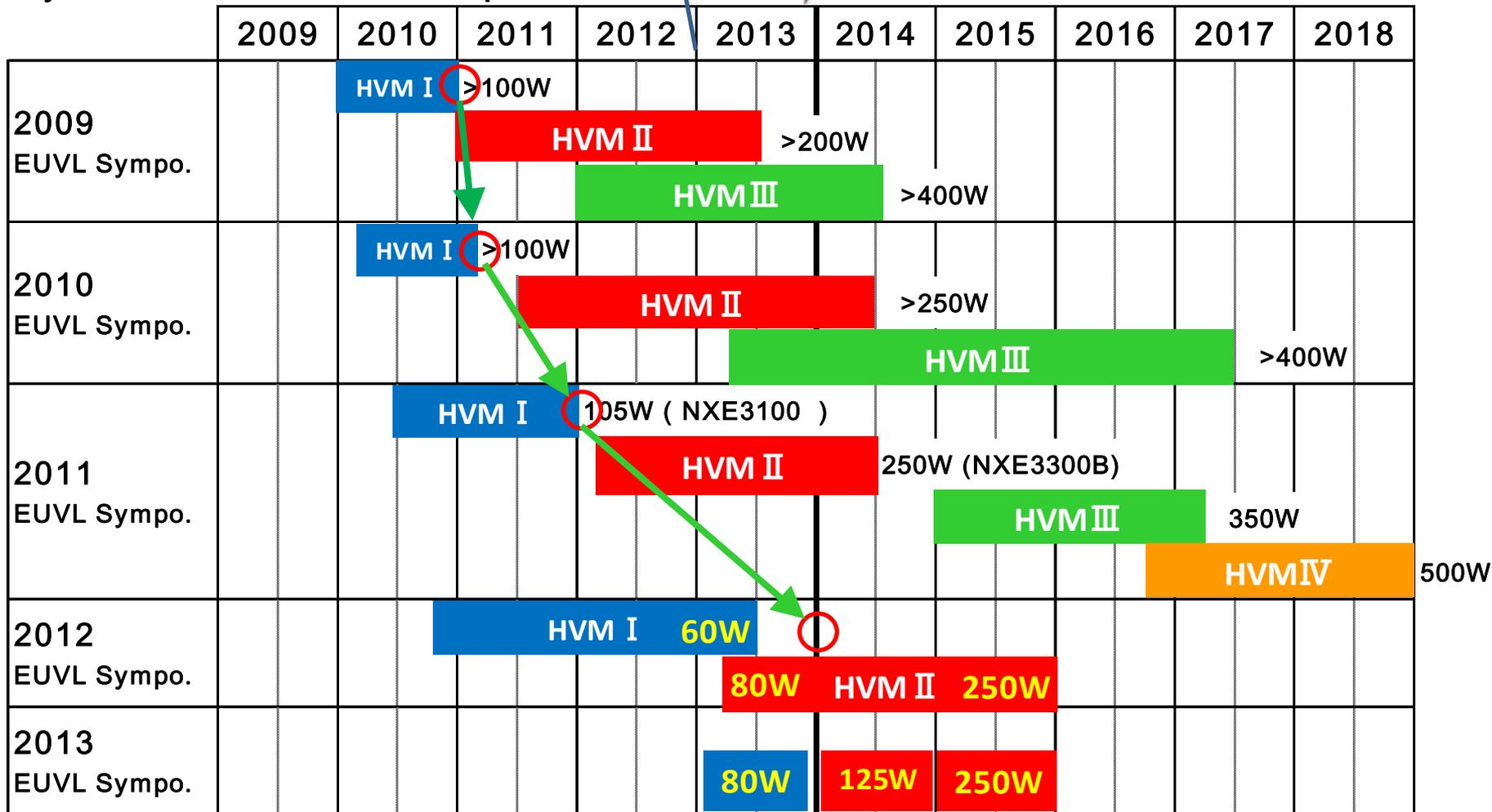
Figure 8: L/S resolution with chemically amplified resist (CAR; two plots on the left) and with Inpria resist are shown (two plots on the right) doi: 10.1117/12.2010932

# EUV光源の状況

Cymer社EUV光源Road mapの~~変更~~

Now  
10~30W  
50W

Cymer 50W  
ギガフォトン 43W



※100Wが出てくるはずのタイミングを○で示した。 15

# EUVL高NA(>0.5)号機はいつ?

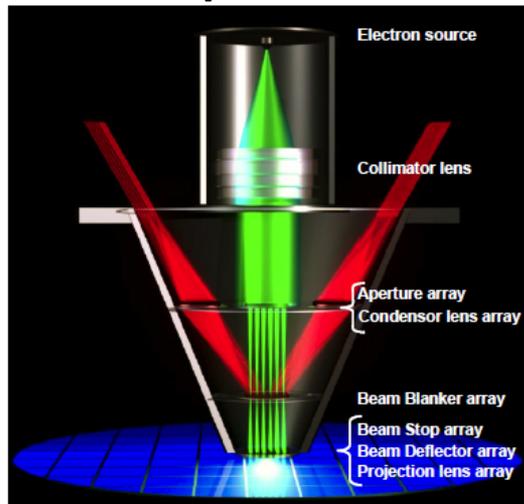


| $\lambda$ | 13.5nm  |          |      |      |      |  |
|-----------|---------|----------|------|------|------|--|
| NA        | 0.25    | 0.33     | 0.5  | 0.7  | 0.85 |  |
| hp(nm)    | NXE3100 | NXE3300B |      |      |      |  |
| 32        | 0.59    | 0.78     | 1.19 | 1.66 | 2.01 |  |
| 20        | 0.37    | 0.49     | 0.74 | 1.04 | 1.26 |  |
| 15        | 0.28    | 0.37     | 0.56 | 0.78 | 0.94 |  |
| 11        | 0.20    | 0.27     | 0.41 | 0.57 | 0.69 |  |
| 8         | 0.15    | 0.20     | 0.30 | 0.41 | 0.50 |  |
| 6         | 0.11    | 0.15     | 0.22 | 0.31 | 0.38 |  |

- ITRSでは、高NA号機が**2021年に必要**だと予測している。
- 高NA露光機のリリース計画は、明確になっていない。
- 高NAの実現にはマスク倍率を変える必要があり、  
**マスクサイズを大きくするか、**  
**フィールドサイズ(ショットサイズ)を小さくするか、**  
の選択をデバイスメーカー、マスクメーカー、装置/材料メーカー間で合意する必要がある。現状、アンドが取れていない。

# マスクレスリソ(ML2)の状況

## MAPPER社 Matrix



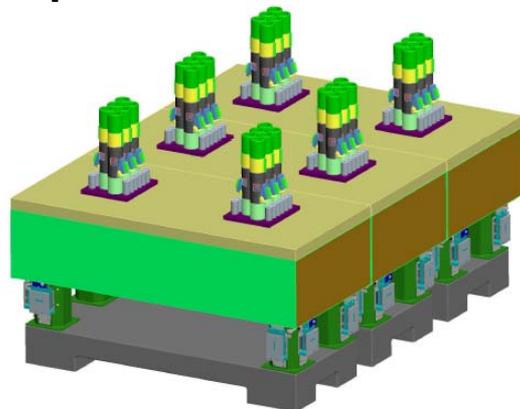
計画(処理能力)

2014 1wph

2015 10wph

doi: 10.1117/12.2011486

## KLA社REBL



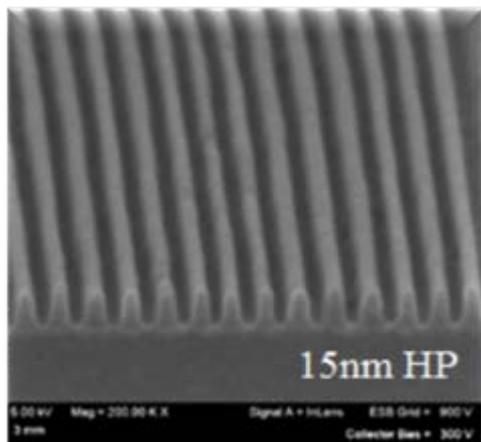
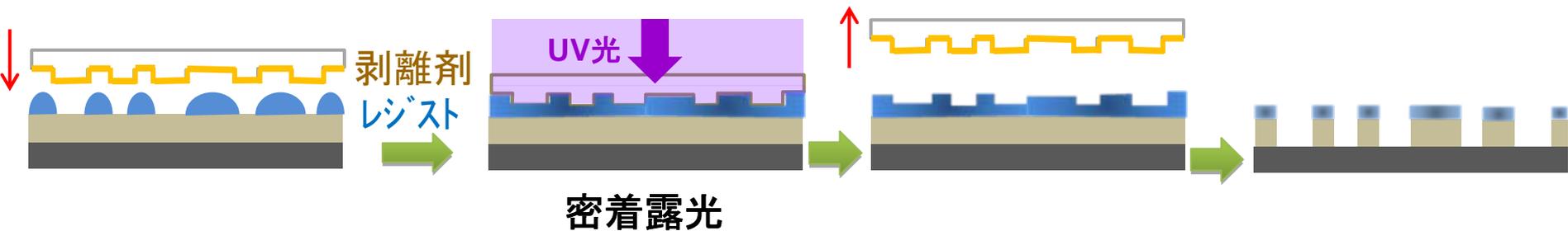
|                     |  |  |
|---------------------|--|--|
|                     | Linear, <sup>2</sup><br>30 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$<br>resist | Linear, <sup>2</sup><br>60 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$<br>resist |
| All Critical Layers | 43 wph   | 24 wph   |
| Line Cutting        | 90 wph   | 53 wph   |

doi: 10.1117/12.964978

doi: 10.1117/12.2010722

マルチビーム/マルチコラム/クラスター化で、100wphの実現を目指す。

# Nano Imprintの状況



## 現状

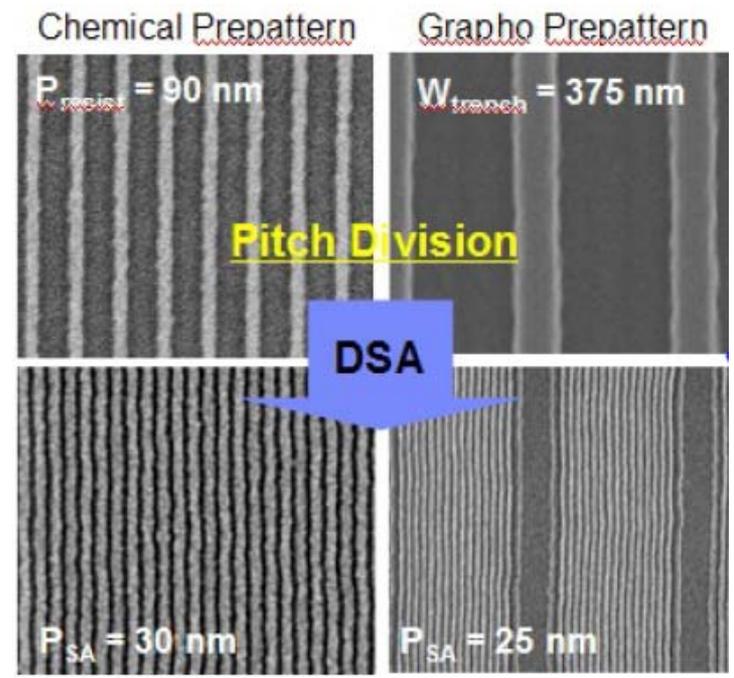
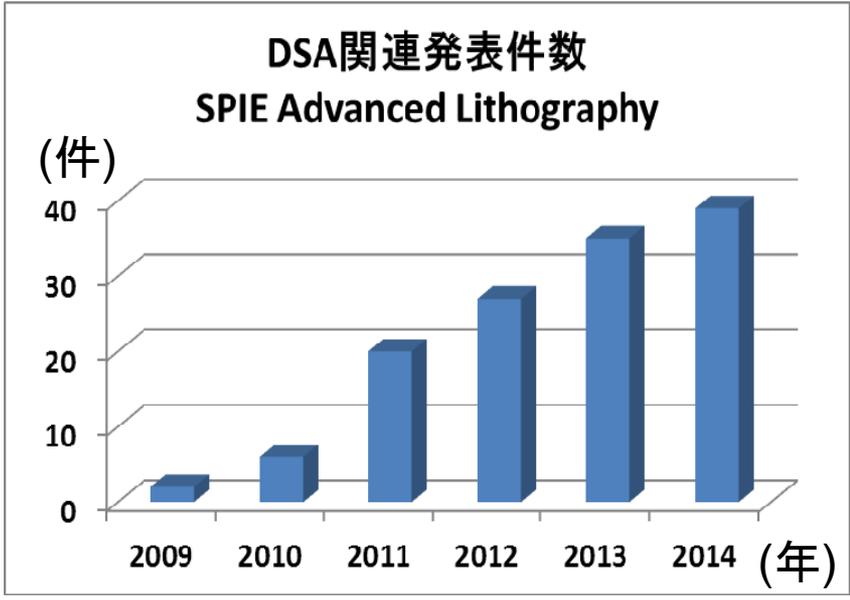
|        |                        |
|--------|------------------------|
| 欠陥密度   | 数個/cm <sup>2</sup> レベル |
| 重ね合わせ  | 8nm                    |
| スループット | 目標20枚/h・台              |

doi: 10.1117/12.2029275

欠陥密度への要求が比較的緩いNANDフラッシュデバイスへの適用が見込まれる。

# DSA(Directed Self Assembly)の状況

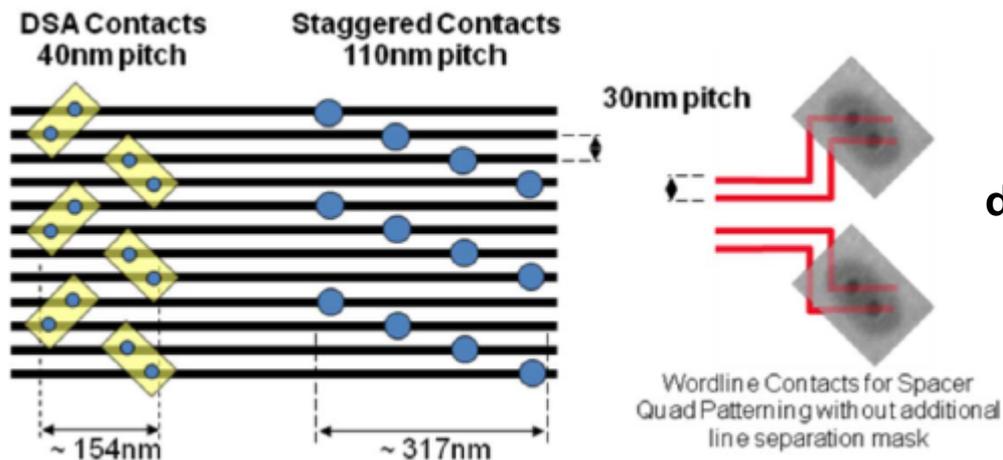
- 今は、欠陥レベルの低減を目指している段階
- DSAパターンの位置精度の制御性が未知。
- 単純な繰り返しパターン以外への適用には、DSA固有のデザインルールや設計ツールが必要。(長期的な課題)



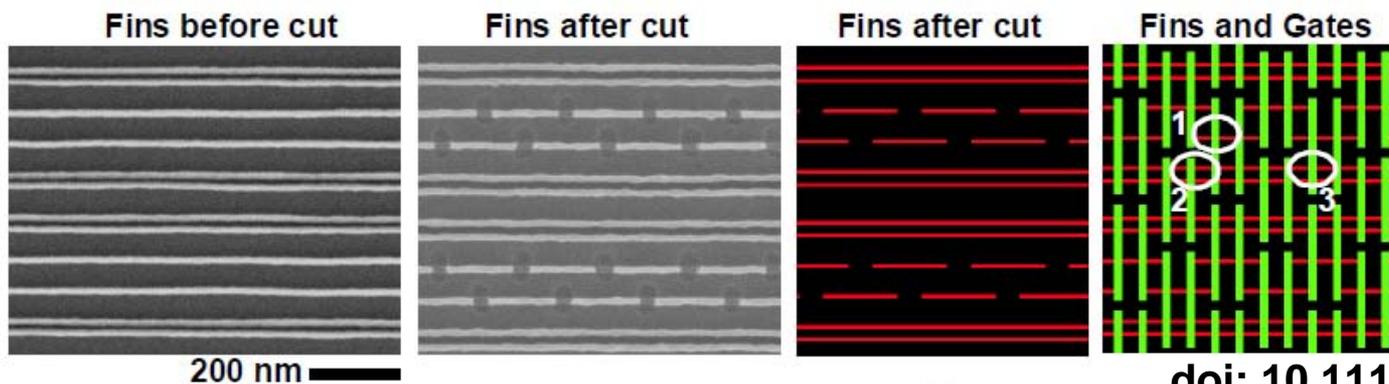
doi: 10.1117/12.2012440

# DSA(Directed Self Assembly)の状況

- 微小ホールパターン形成、Fin形成が最初の適用事例か。



doi:10.1109/IEDM.2011.6131510



doi: 10.1117/12.2014259

Figure 8: An example of DSA-based fin customization process featuring a self-aligned customization process for removing fins with a horizontal orientation and an additional lithographically defined cut to produce breaks transverse

# 450mm化の状況

|             | 2013 |  | 2014 |  | 2015  |  | 2016 |  | 2017 |  | 2018 |  |
|-------------|------|--|------|--|-------|--|------|--|------|--|------|--|
| 193i<br>EUV |      |  |      |  | G450C |  |      |  | 量産機  |  |      |  |
|             |      |  |      |  |       |  | IMEC |  |      |  | 量産機  |  |

- Pilot Lineは、G450C(@Albany)と IMECで構築中。  
※G450C: Intel, TSMC, GLOBALFOUNDRIES, IBM, Samsung
- 現状では、Nano imprintとDSA技術を用いて、パターン形成評価が進められている。

# まとめ

- 193i Quadrupleパターニングの適用が開始された。
- 3D-NAND, 積層DRAMが出始めている。
- 193i マルチパターニングによる微細化はコストupを伴う。
- EUVL露光機(量産対応)の出荷が始まった。  
EUV光源のパワーupが望まれる。
- ML2, NIL, DSAも着実に進歩している。スループット、欠陥、Overlayの実証が必要。

# 略語

|       |   |
|-------|---|
| AIMS  | Aerial Image Measurement System                           |
| AMC   | Airborne Molecular Contamination                          |
| ARC   | Anti-Reflection Coating                                   |
| BARC  | Bottom ARC  |
| TARC  | Top ARC   |
| CAR   | Chemical Amplified Resist                                 |
| CD    | Critical Dimension  |
| CDU   | CD Uniformity   |
| DE    | Double Exposure   |
| DFM   | Design for Manufacturing/<br>Design for Manufacturability |
| DP/MP | Double Patterning / Multiple Patterning                   |
| DPP   | Discharged Produces Plasma                                |
| DSA   | Directed-Self-Assembly                                    |
| DOF   | Depth of Focus  |
| EBDW  | Electron Beam Direct Writer                               |
| EDA   | Electronic Design Automation                              |
| EPL   | Electron Projection Lithography                           |
| ESD   | Electro Static Discharge                                  |
| EUVL  | Extreme Ultraviolet Lithography                           |
| IPL   | Ion Projection Lithography                                |
| LDP   | Laser assisted Discharge Plasma                           |
| LELE  | Litho-Etch-Litho-Etch (1kind of DP)                       |
| LER   | Line Edge Roughness                                       |
| LPP   | Laser Produced Plasma                                     |
| LTEM  | Low Thermal Expansion Material                            |

|          |                                       |
|----------|---------------------------------------|
| LWR      | Line Width Roughness                  |
| MEEF     | Mask Error Enhancement Factor (=MEF)  |
| ML2      | Maskless Lithography                  |
| NA       | Numerical Aperture                    |
| NGL      | Next Generation Lithography           |
| NIL      | NanoImprint Lithography               |
| NTD      | Negative Tone Development             |
| OAI      | Off-Axis Illumination                 |
| OPC      | Optical Proximity Corrections         |
| RBOPC    | Rule Base OPC                         |
| MBOPC    | Model Base OPC                        |
| PSM      | Phase Shifting Mask                   |
| cPSM     | complementary PSM                     |
| APSM     | Alternating PSM                       |
| EPSM     | Embedded PSM                          |
| Att. PSM | Attenuated PSM                        |
| PXL      | Proximity X-ray Lithography           |
| RET      | Resolution Enhancement Techniques     |
| SADP     | Self Aligned DP                       |
| SAQP     | Self Aligned Quadruple Patterning     |
| SB       | Scattering Bar (same meaning as SRAF) |
| SRAF     | Sub Resolution Assist Feature™        |
| SFIL     | Step & Flash Imprint Lithography      |
| SMO      | Source Mask co-Optimization           |
| UV-NIL   | Ultraviolet NIL                       |