

光か? EUVか?

k1:0.25の壁を乗り越えられるか -

WG5: Lithography

(株)富士通研究所
羽入 勇

略語説明

- 193i : ArFエキシマレーザー(:193nm)を光源とする液浸露光
液浸液の世代毎に193i+, 193i++と表記することをiTWGで検討中
- BARC : Bottom Anti-Reflection Coating, 反射防止膜
- DE : Double Exposure
- DOF : Depth of Focus
- DP : Double Patterning
- EUV : Extreme Ultra Violet, 極端紫外線
- LuAG : Lutetium Aluminum Garnet, $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
- ML2 : Maskless Lithography
- NA : Numerical Aperture, レンズ開口数
- OPC : Optical Proximity Correction, 光近接効果補正
- SE : Single Exposure

2006年度 WG5メンバー

- JEITA半導体部会/関連会社 10名
内山 貴之(NECEL)、須向 一行(ルネサス)、笹子 勝/国際担当(松下)、
守屋 茂(ソニー)、東川 巖/サブリーダー(東芝)、田口 隆(沖電気)、
和田 恵治(ローム)、山口敦子/(日立)、田中 秀仁(シャープ)、
羽入 勇/リーダー(富士通)
- コンソーシアム 3名
岡崎 信次(ASET-EUV)、山部 正樹/事務局(ASET-D2I)、
寺澤 恒男(Selete)
- 特別委員 (大学・独立行政法人) 2名
堀池 靖浩(物材研)、戸所義博 (奈良先端大)
- 特別委員(SEAJ、他) 11名
森 晋(SEAJ:ニコン)、山田 雄一(SEAJ:キヤノン)、山口 忠之(SEAJ:TEL)、
山口哲男(SEAJ:ニュー・フレアテクノロジー)、龜山 雅臣/国際担当(ニコン)、
竹花 洋一(MET)、林 直也(大日本印刷)、奥田 能充(凸版)、佐藤充(TOK)、
小野寺純一(TOK)、栗原 啓志郎(アライアンスコア)、

内容

1. ITRS 2006 Updateにおけるリソグラフィ章の改訂
2. ArF液浸露光とその限界
 - 液浸露光はどこまで使えるか
 - ダブルパターニングとその課題
3. EUV露光技術
4. まとめ

2006 Update リソグラフィ章の主な改訂

- リソグラフィ候補の改訂
 - 液浸リソのオプションの明確化
 - ArF露光でのダブルパターニング
- 困難な課題
 - ダブルパターニングの項目を追加
- マスクテーブルの改訂
 - ダブルパターニングに関する項目の追加
 - 技術の進歩によるカラーリングの変更
- マスクレスリソ(ML2)テーブルの追加
 - データー量とグリッドサイズへの要求

2006 ITRS リソグラフィへの要求

Year of Production	2006	2007	2010	2013	2016	2019
DRAM 1/2 pitch (nm) (contacted)	70	65	45	32	22	16
DRAM 1/2 pitch (nm)	70	65	45	32	22	16
Flash 1/2 pitch (nm) (un-contacted poly)	64	57	40	28	20	14
Contact in resist (nm)	79	70	50	35	25	18
Contact after etch (nm)	72	64	45	32	23	16
Overlay [A] (3 sigma) (nm)	13	11	8	5.7	4	2.8
CD control (3 sigma) (nm) [B]	7.4	6.6	4.7	3.3	2.3	1.7
MPU gate in resist (nm)	48	42	30	21	15	11
Contact in resist (nm)	97	84	56	39	28	20
Contact after etch (nm)	88	77	51	36	25	18
Gate CD control (3 sigma) (nm) [B] **	2.9	2.6	1.9	1.3	0.9	0.7
Mask CD uniformity (nm, 3 sigma) isolated lines (MPU gates), binary or attenuated phase shift mask [H] *	3.4	2.6	1.3	1	0.7	0.5
Mask Image placement (nm, multipoint) [F]	8	7	4.8	3.4	2.2	1.5
Mask Image placement (nm, multipoint) for double patterning	5.7	4.9	3.4	2.4	1.6	1.1
Low frequency line width roughness: (nm, 3 sigma) <8% of CD *****	3.8	3.4	2.4	1.7	1.2	0.8

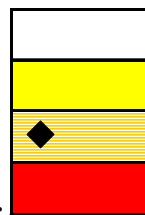
Manufacturable solutions exist, and are being optimized

Manufacturable solutions are known

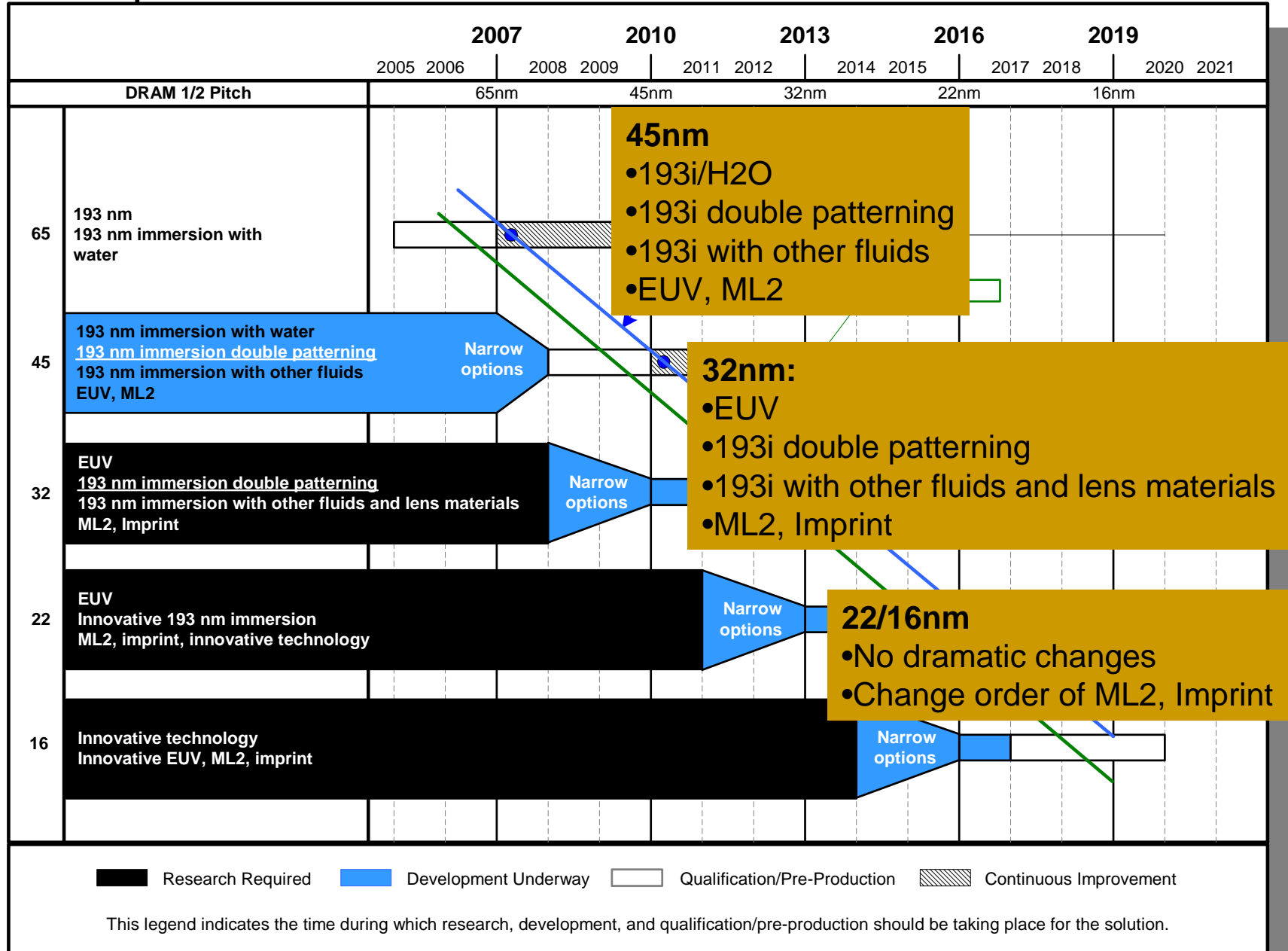
Interim solutions are known

Manufacturable solutions are NOT known

STRJ WS: March 9, 2007, WG5 Litro



2006 Update リソグラフィ候補の改訂

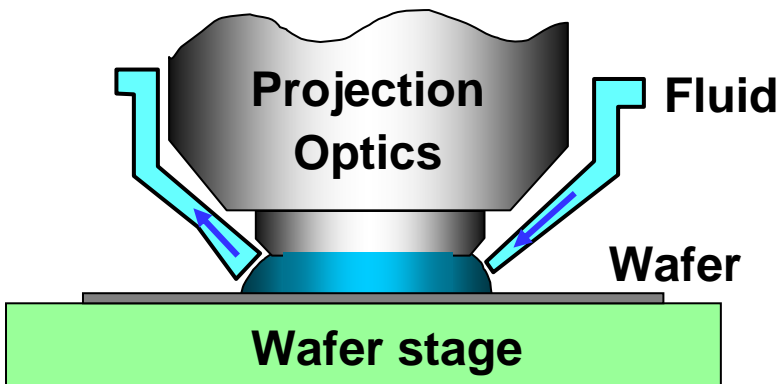


ダブルパターニングの項目追加

Optical Mask Requirements	2006	2007	2010	2013
DRAM HP (nm)	70	65	45	32
Image placement for double patterning	5.7	4.9	3.4	2.4
Difference in CD Mean-to-target for two masks as a double patterning set	2.8	2.6	1.8	1.3

Resist Requirements	2006	2007	2010	2013
DRAM HP (nm)	70	65	45	32
Defects in spin-coated resist films for double patterning (#/cm ²)	0.005	0.005	0.005	0.005
Backside particle density for double patterning (#/cm ²)	0.285	0.14	0.14	0.14

液浸露光とは

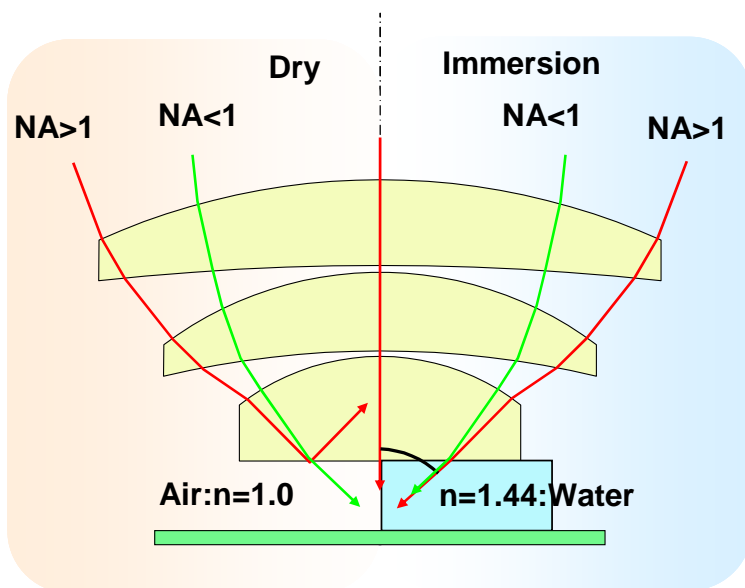


$$NA = n \sin \theta$$

n : 液体の屈折率

$$\begin{aligned} \text{Resolution} &= k_1 \lambda / NA \\ &= k_1 \lambda / (n \sin \theta) \\ &= k_1 \underline{(\lambda/n)} / \sin \theta \end{aligned}$$

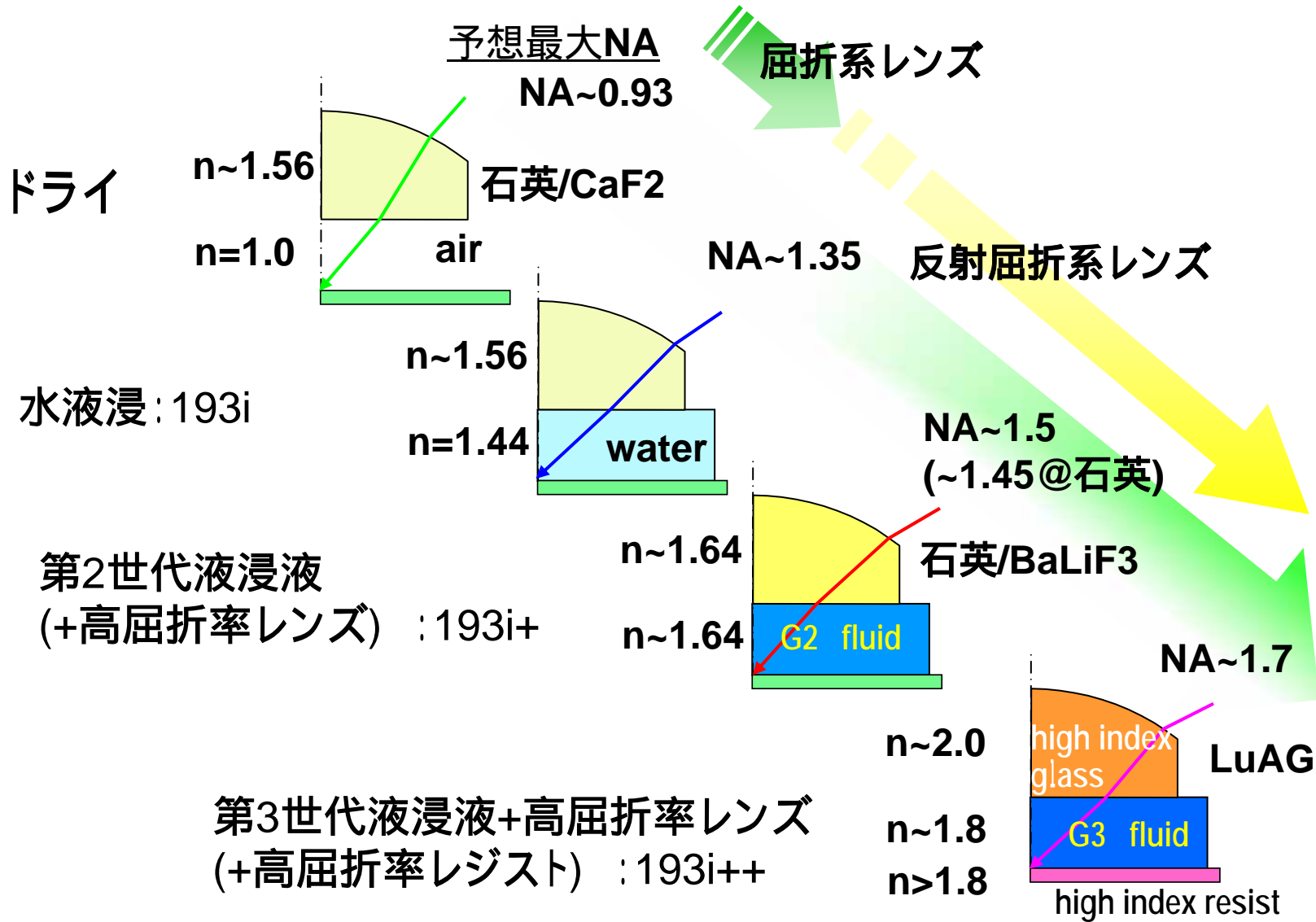
解像力の向上



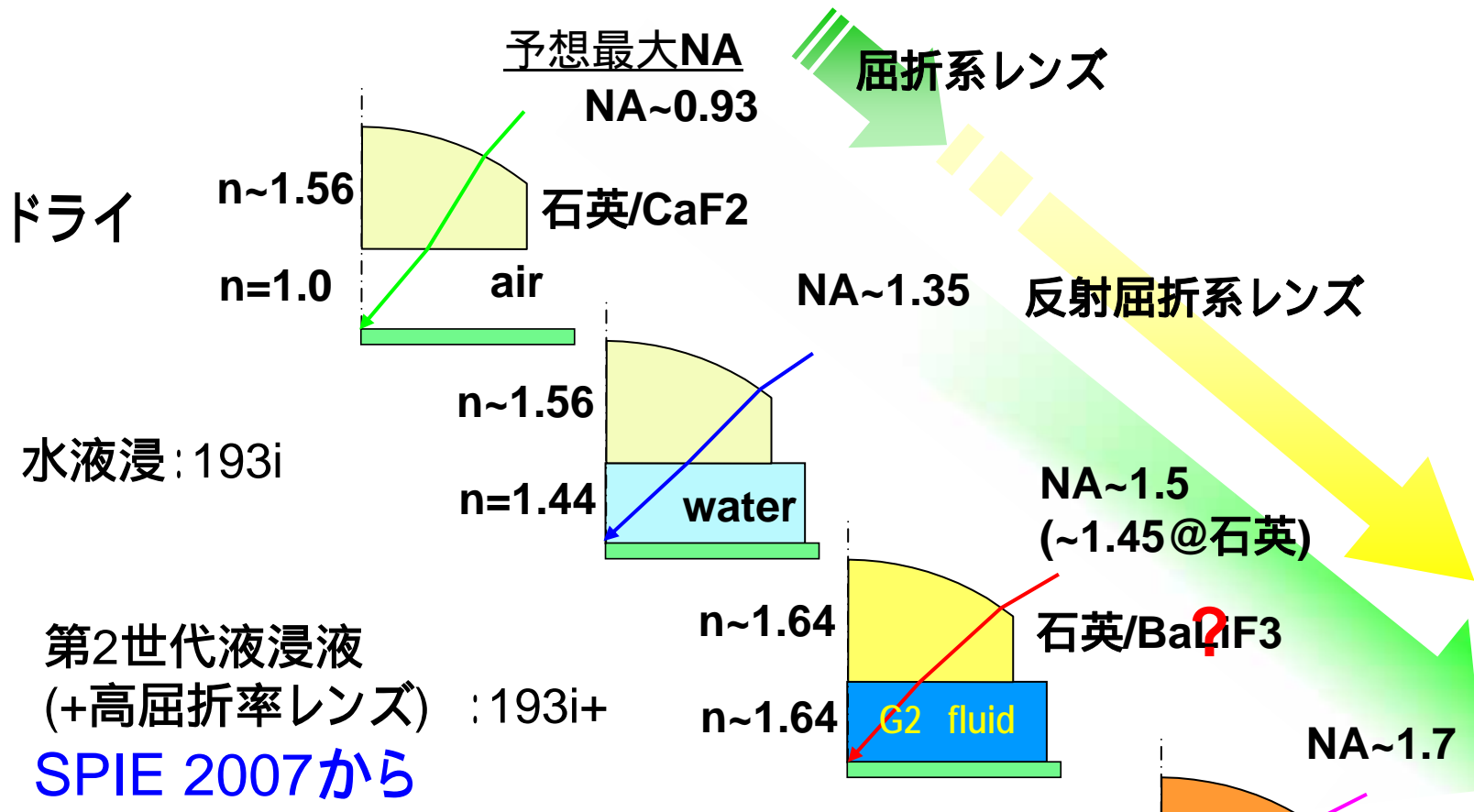
$$\begin{aligned} \text{DOF} &= k_2 (\lambda/n) / 2 (1 - \cos \theta) \\ &\sim k_2 (\lambda/n) / \sin^2 \theta \\ &= k_2 \underline{n} \lambda / NA^2 \end{aligned}$$

焦点深度の向上

期待される液浸露光システム



期待される液浸露光システム



BaLiF₃はnが低く、期待はLuAGへ

課題: 透過率、大口径化、複屈折、屈折率の温度依存、etc

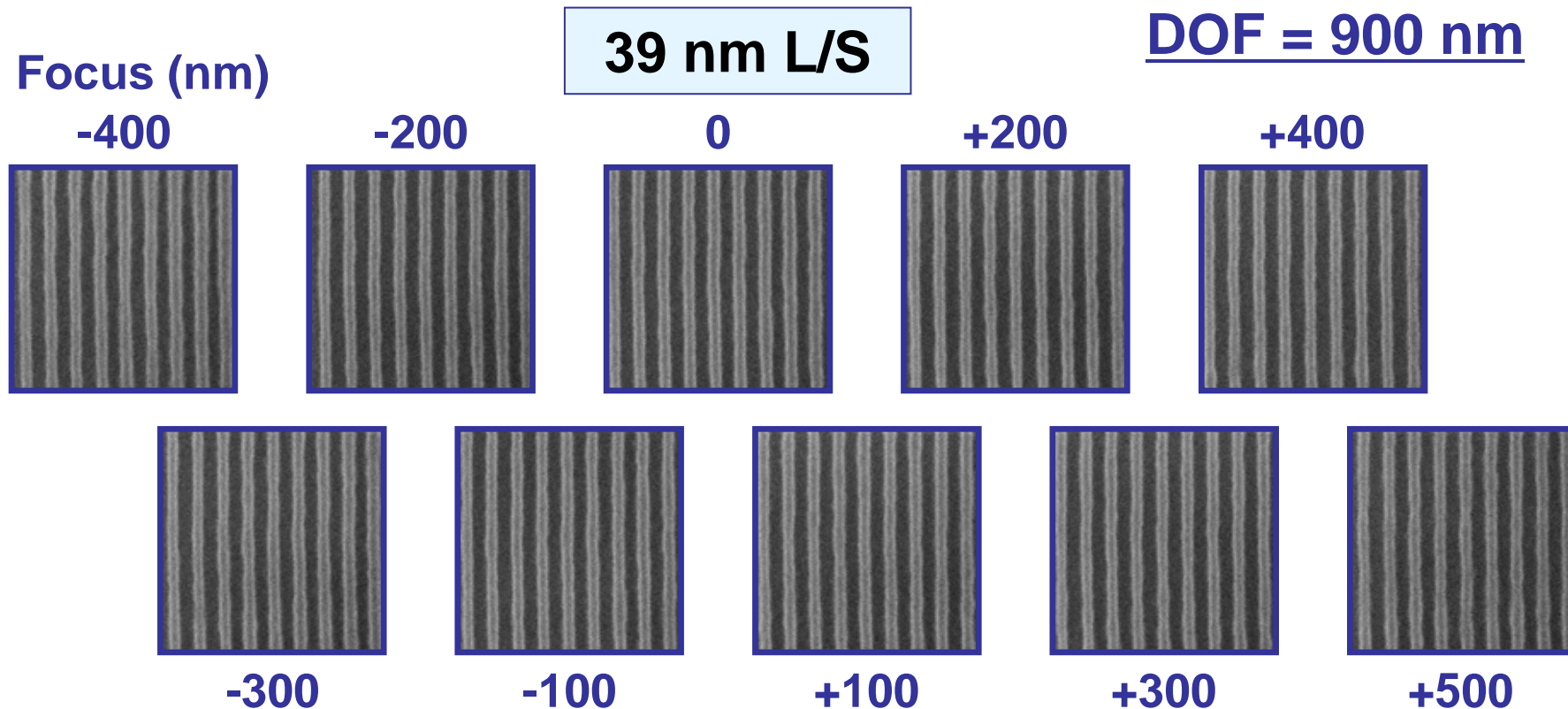
(+高屈折率レンズ) : 193i++

$n > 1.8$

high index resist

S610C NA1.30 Imaging 39nm L/S

NA=1.30 projection optics + POLANO (polarized illumination)
($\sigma=0.98$ dipole illumination)



Top Coat A (Developer Soluble) + Resist A (110 nmt) + Dual BARC
Processed by TEL LITHIUS *i+*

(株)ニコンのご好意による

ArF液浸露光の限界

ハーフピッチとk1値-

$$k1 = \text{HP} * \text{NA} / \lambda$$

方式	NA	DRAM Half-Pitch				
		2007	2010	2013	2016	2019
		65nm	45nm	32nm	22nm	16nm
ArF液浸	0.92	0.31	0.21	0.15	0.10	0.08
	1	0.34	0.23	0.17	0.11	0.08
	1.07	0.36	0.25	0.18	0.12	0.09
	1.2	0.40	0.28	0.20	0.14	0.10
	1.3	0.44	0.30	0.22	0.15	0.11
	1.35	0.45	0.31	0.22	0.15	0.11
	1.45	0.49	0.34	0.24	0.17	0.12
	1.5	0.51	0.35	0.25	0.17	0.12
	1.6	0.54	0.37	0.27	0.18	0.13
1.7	0.57	0.40	0.28	0.19	0.14	

ロジック

メモリ

45nm-hp(ロジック)にはNA>1.5、32nm-hp(メモリ)にはNA>1.6が必要

高屈折率液浸は本当に実現できるか？ タイミングは？

ダブルパターンニング / ダブル露光の方式

- ピッチ分割 - 大きな k_1 で露光 -



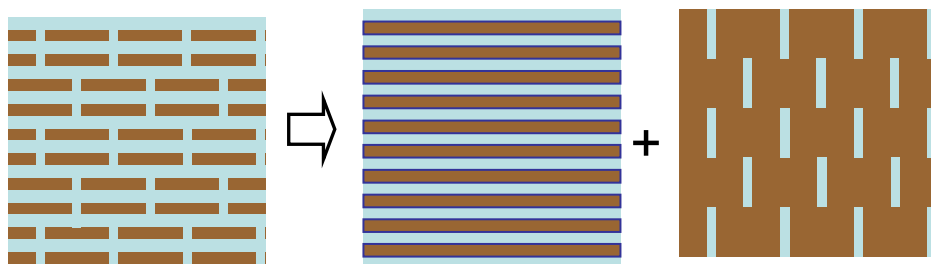
⇒ 実効的に $k_1 < 0.25$ が可能

- X-Y分割 + ダイポール照明 - 方向限定でより強い超解像 -



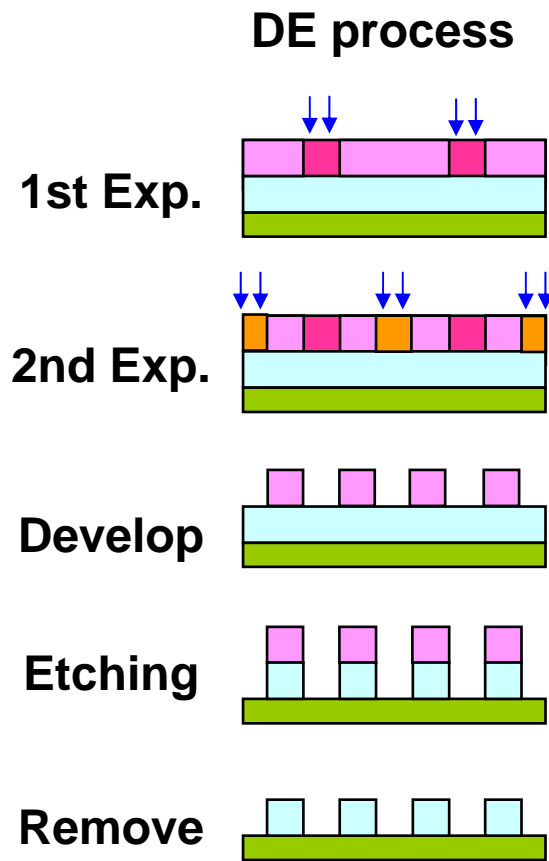
⇒ 限界は $k_1 = 0.25$

- 対向部分の縮小 - SRAM Poly -

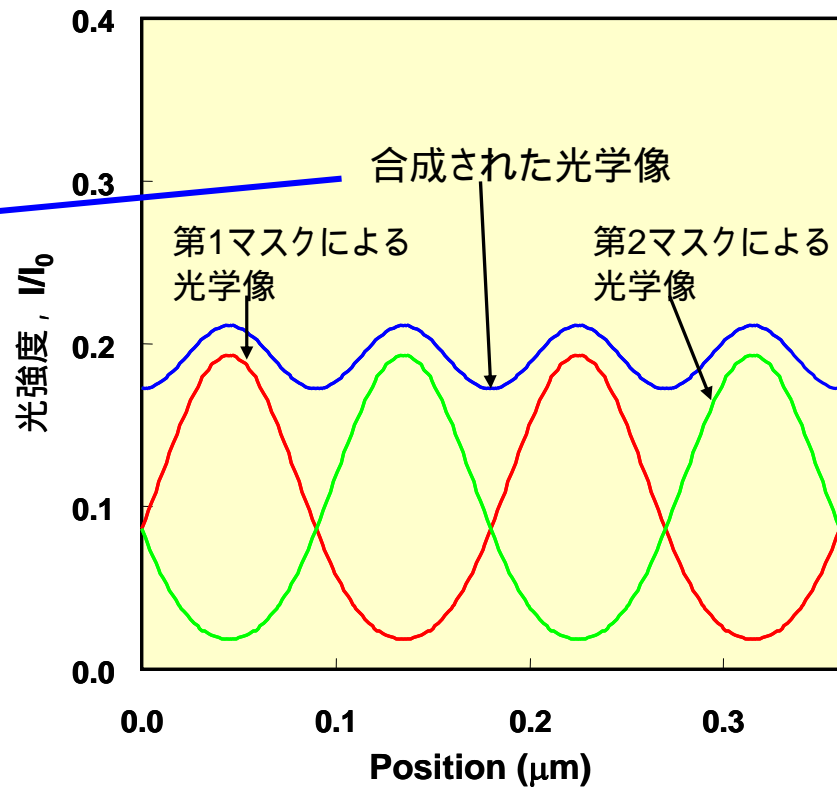


上記2方式と組み合わせることも可能

ダブル露光の限界

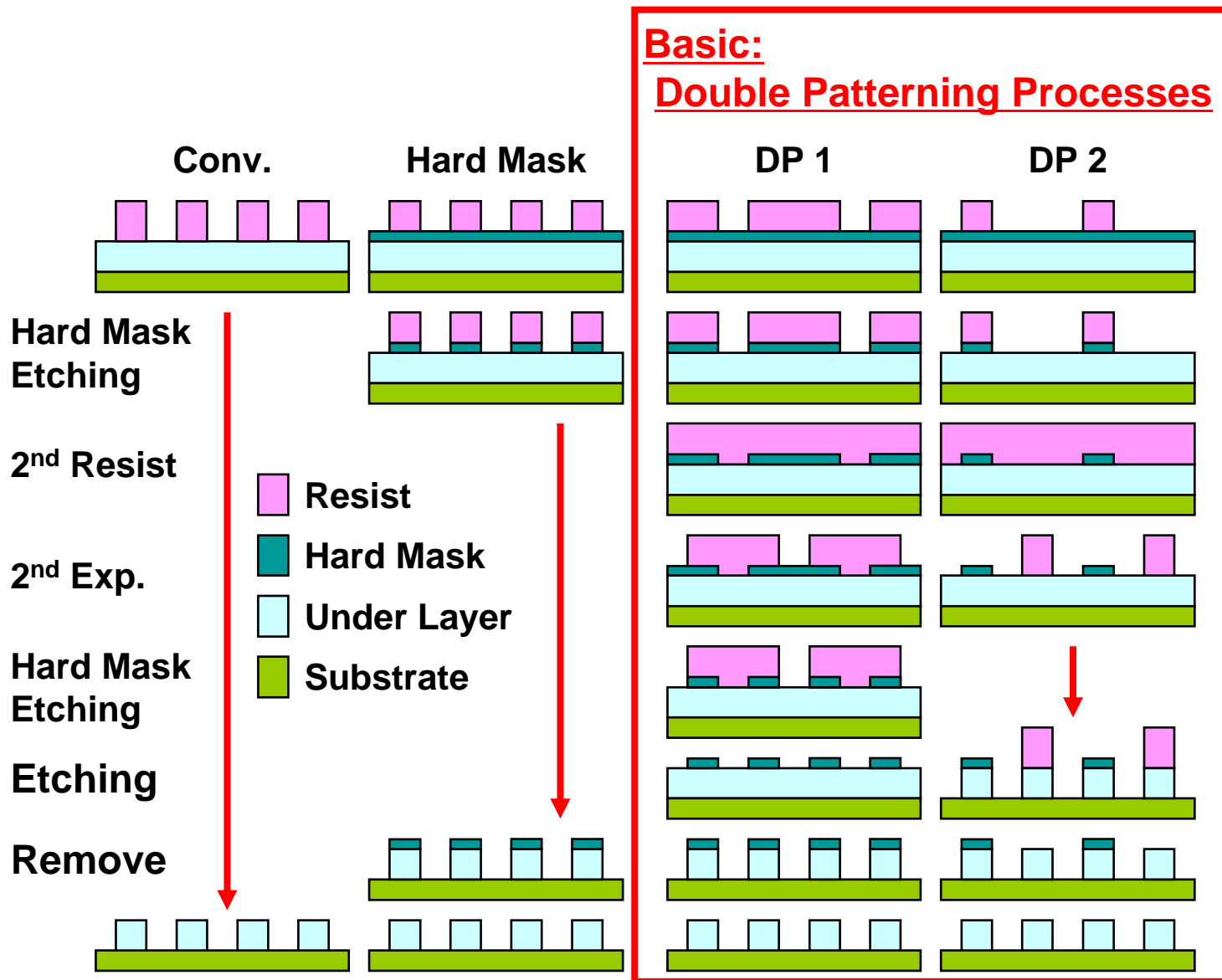


DEシミュレーション結果



合成コントラストが低くパターンを分離できない
(極度な非線形特性を持つレジスト材料が必要)

ダブルパターニングとは？



ダブルパターンニング 適用例

Double Line for Poly
DP k1=0.28 - 1.2NA - LOGIC

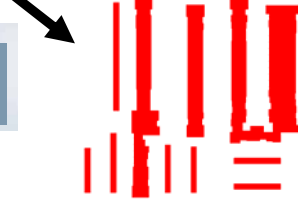
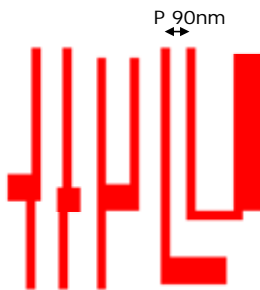
XT:1700Fi
ArF immersion
1.2NA - Annular

TARGET
Min Pitch 90nm
k1 = 0.28

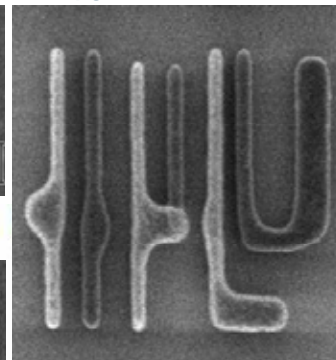
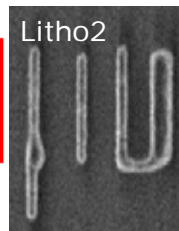
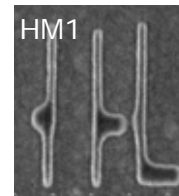
SPLIT + OPC

MASK A

MASK B



POLY PATTERNING
Annular 0.8/0.5
X-Y polarized
193i - 1.2NA



- split rules for sub-resolution pitch
- small spaces

FLASH

Double Line for Poly
DP k1=0.20 - 1.2NA - FLASH

XT:1700Fi
ArF immersion
1.2NA - Annular

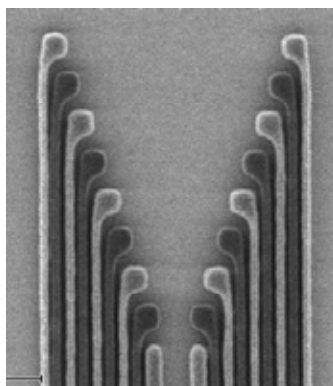
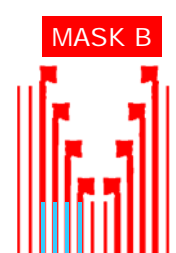
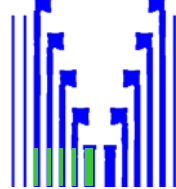
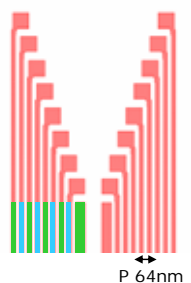
TARGET
Min Pitch 64nm
k1 = 0.20

SPLIT + OPC

MASK A

MASK B

POLY PATTERNING
Annular 0.8/0.5
X-Y polarized
193i - 1.2NA



feature-based split

SYNOPTSYS and MENTOR GRAPHICS

Logic P oly gate

IMECのご好意による

K1 < 0.2 のパターン形成

Double Line for Poly
DP resolution at 1.2NA

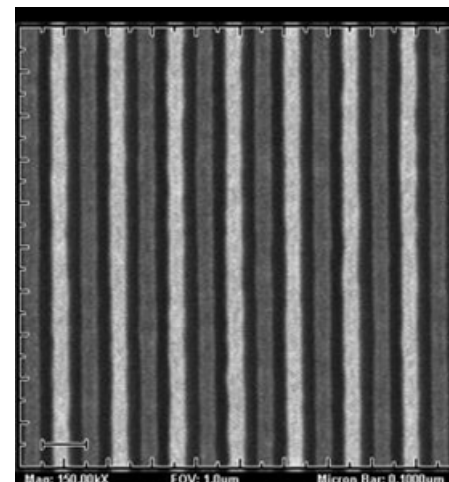
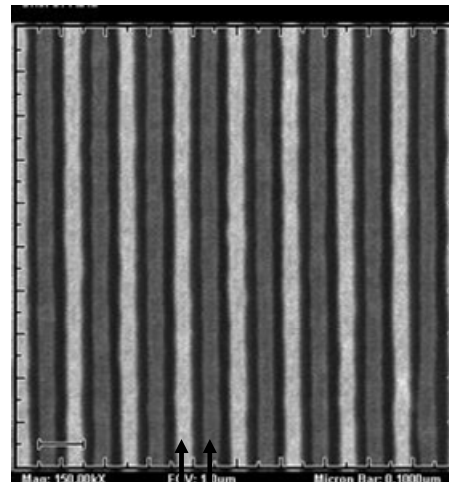
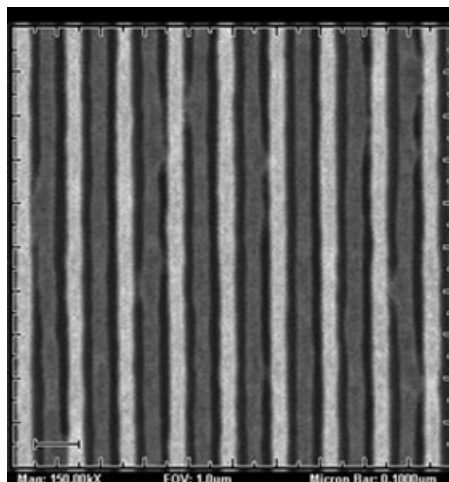
XT:1700Fi
ArF immersion
1.2NA – Annular

1.2NA – Annular
2D compliant

pitch 56nm
k1=0.174

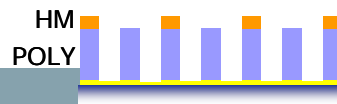
pitch 60nm
k1=0.187

pitch 64nm
k1=0.199



light grey
patterning 1

dark grey
patterning 2



ダブルパターンニングの限界

$$k1 = HP * NA / \lambda$$

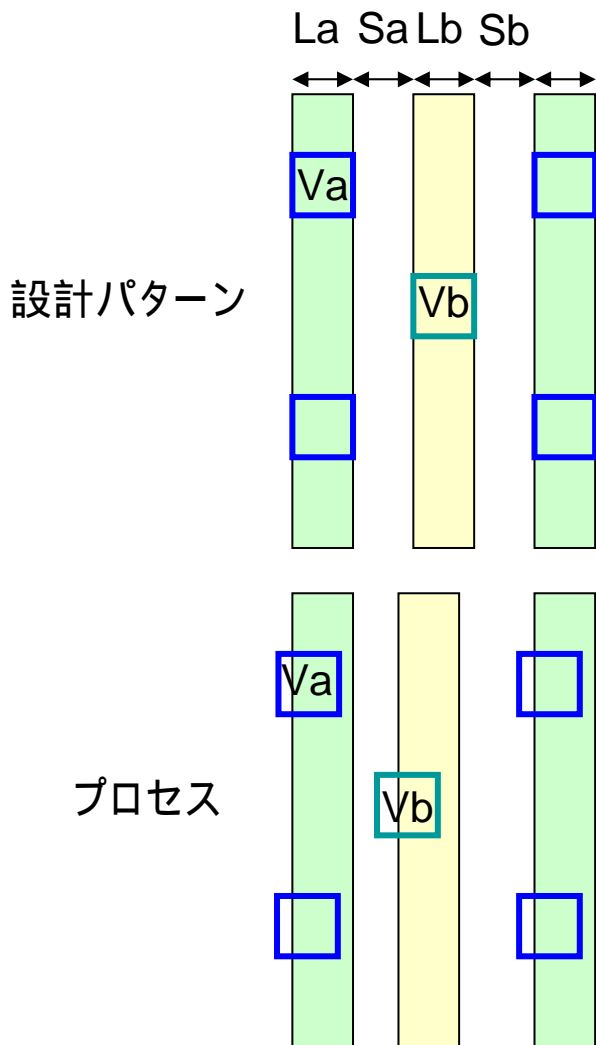
方式	NA	DRAM Half-Pitch							
		2007	2010	2013		2016		2019	
		65nm	45nm	32 / SE	32 / DP	22 / SE	22 / DP	16 / SE	16 / DP
ArF液浸	0.92	0.31	0.21	0.15	0.31	0.10	0.21	0.08	0.15
	1	0.34	0.23	0.17	0.33	0.11	0.23	0.08	0.17
	1.07	0.36	0.25	0.18	0.35	0.12	0.24	0.09	0.18
	1.2	0.40	0.28	0.20	0.40	0.14	0.27	0.10	0.20
	1.3	0.44	0.30	0.22	0.43	0.15	0.30	0.11	0.22
	1.35	0.45	0.31	0.22	0.45	0.15	0.31	0.11	0.22
	1.45	0.49	0.34	0.24	0.48	0.17	0.33	0.12	0.24
	1.5	0.51	0.35	0.25	0.50	0.17	0.34	0.12	0.25
	1.6	0.54	0.37	0.27	0.53	0.18	0.36	0.13	0.27
1.7	0.57	0.40	0.28	0.56	0.19	0.39	0.14	0.28	

22nm-hp以降もArF液浸(光)適用の可能性あり

ダブルパターンニングの課題(1)

- アライメント誤差の影響 -

■ LaとLb, VaとVbをそれぞれDPで形成した場合



Saの幅 W_{sa} は

$$W_{sa} = W_{sa} - CD_{La,b} - \frac{AE_L}{2}$$

DPによる悪化分

(AE_L : La,Lbのアライメント誤差)

Vb-La間隔 W_{VM} は

$$W_{VM} = W_{sa} - CD_{Lb}/2 - CD_{Vb}/2 - AE_{L-V} - \frac{AE_L - AE_V}{2}$$

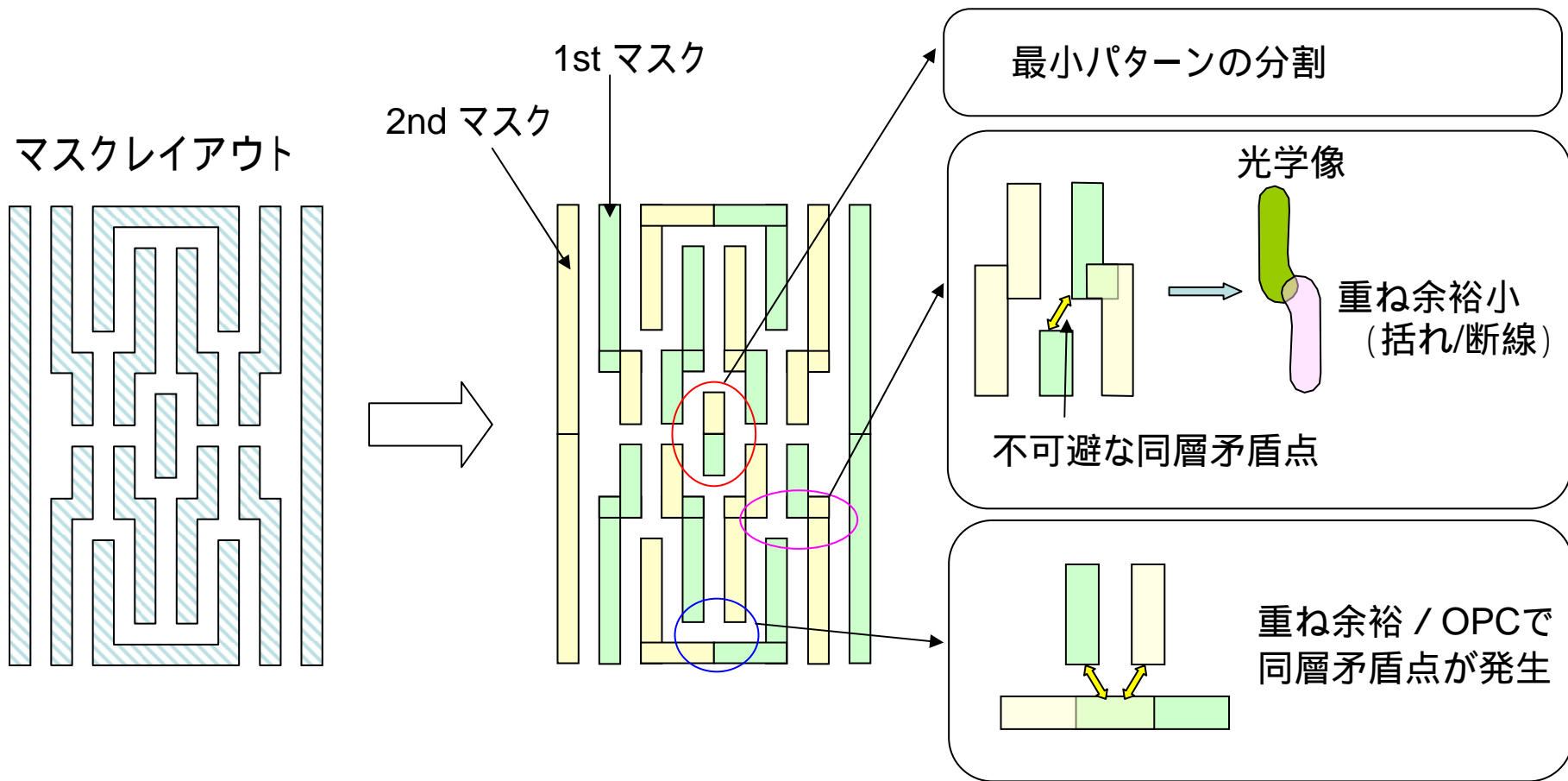
DPによる悪化分

(AE_{L-V} : La Vaのアライメント誤差)

ピッチの緩和,またはパターンの縮小が必要

ダブルパターンニングの課題(2)

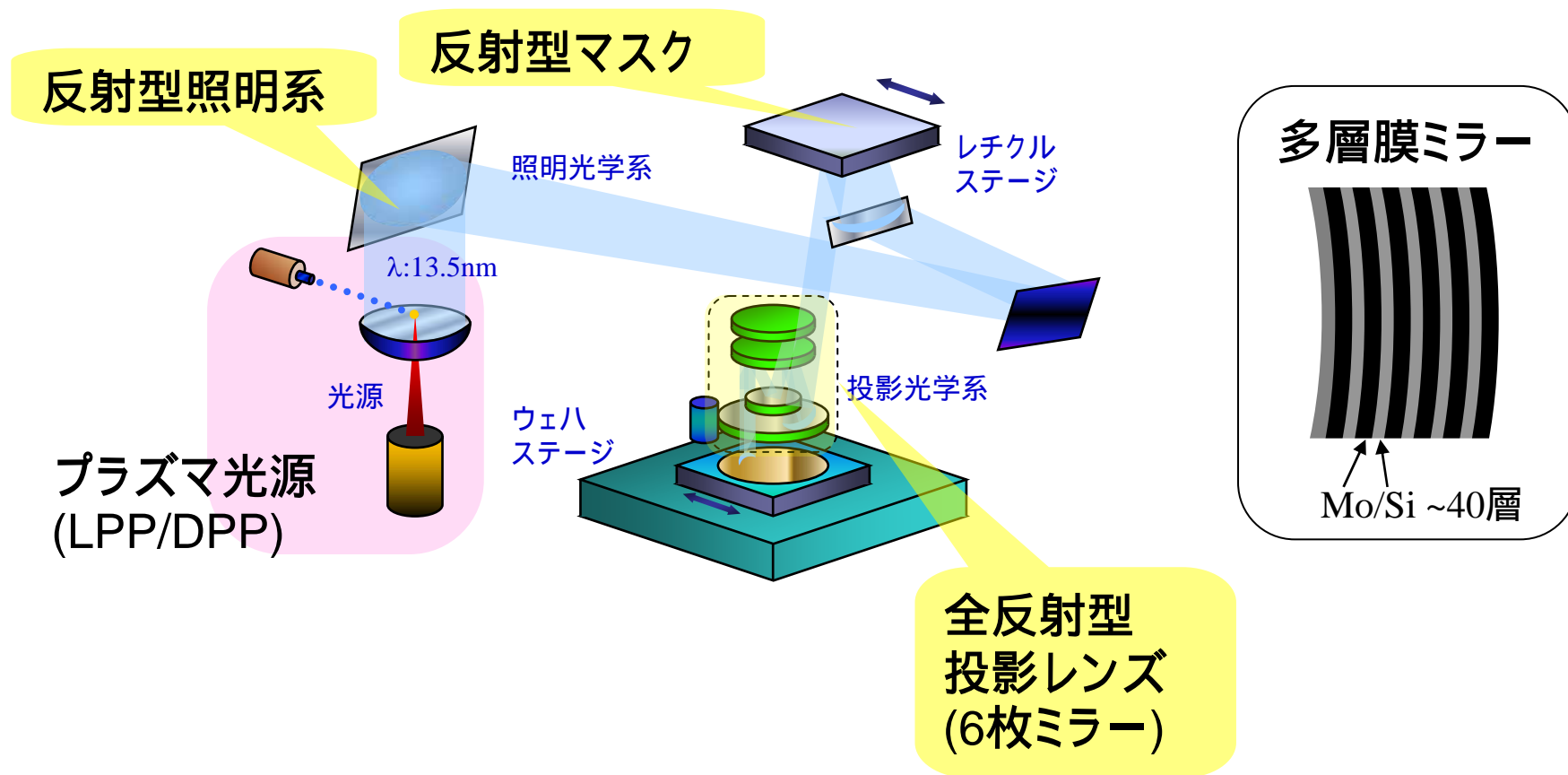
- パターン分割 -



設計制限、ピッチの緩和等が必要

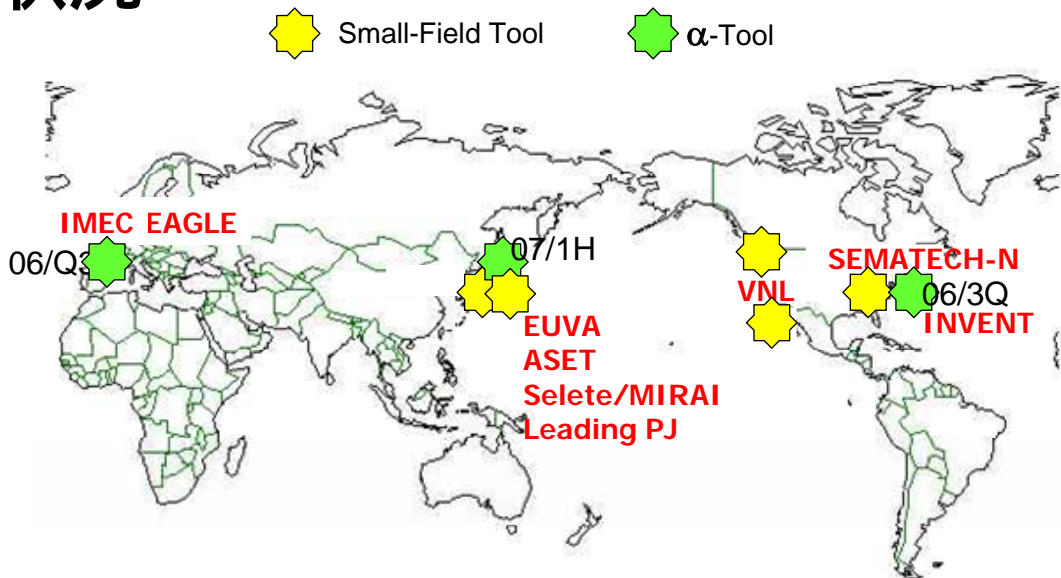
EUV露光技術

ArFより一桁以上短い波長(13.5nm)を用い解像力を大幅に向上



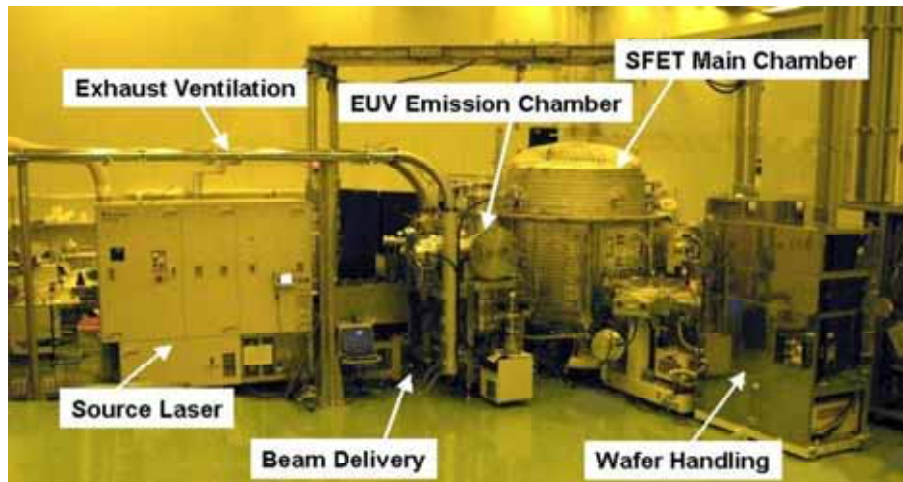
EUV露光技術の開発状況

- tool(フルスキャナ)が出荷され立上中(IMEC, INVENT)
- 日本ではSelete/MIRAI, EUVAを中心とした体制で開発強化
- 高出力のEUV光源の実現が実用化の第一課題



Seleteに導入されたSFET

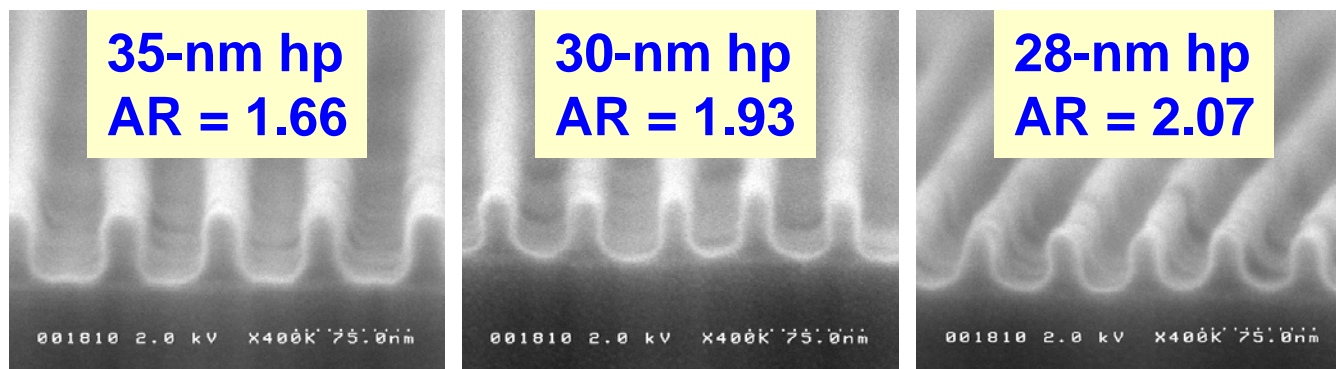
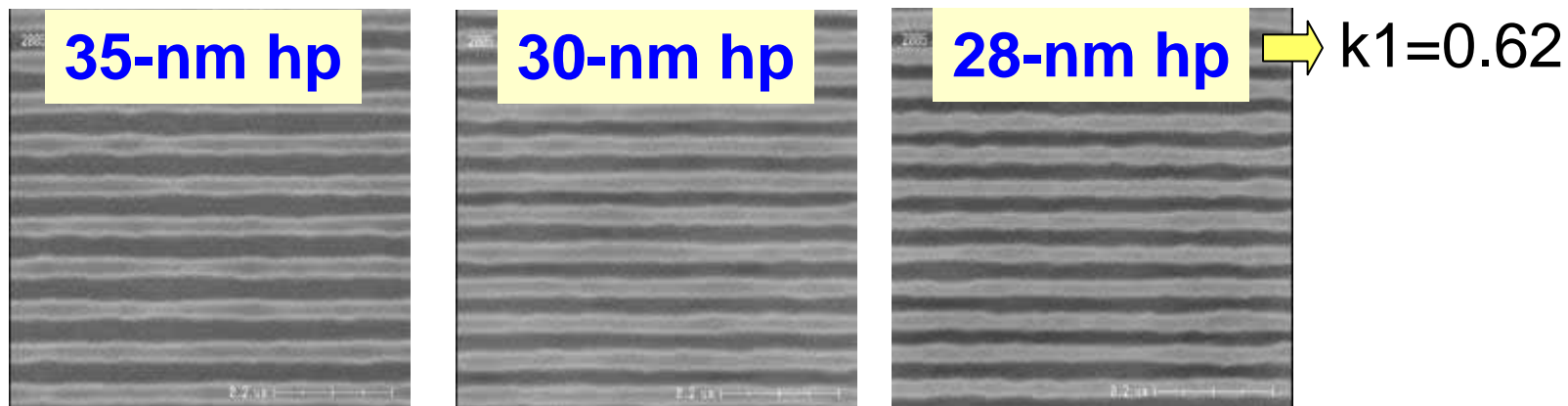
(Small Field Exposure Tool)



開発中のEUV1(フルスキャナ)



HiNA 3 @ ASETによるレジストパターン



**New resist
(25X-MBSA-M)**

ASETのご好意による

**Resist film thickness: 58 nm^t
Exposure Dose : 12.2 mJ/cm²**

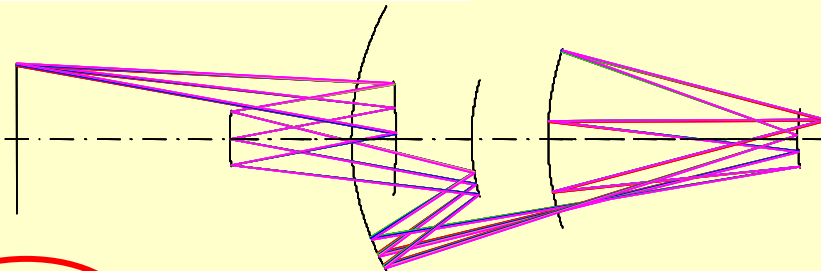
高NAレンズ設計

キヤノン(株)のご好意による

Projection Optics Preparation

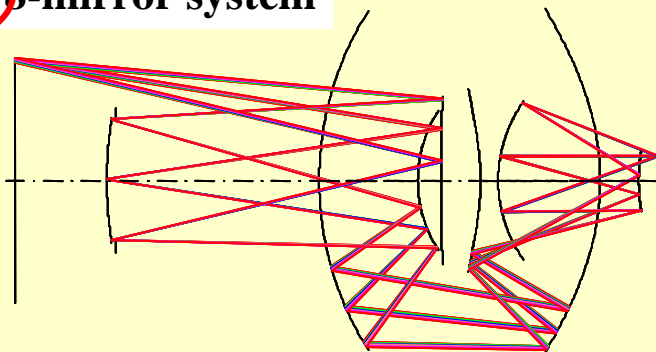
For Full-Field System, PO has been designed .
2 samples in many candidates are indicated here.

NA0.25 6-mirror system



NA = 0.25
Ring field width = 2 [mm]
Etendue (PO) = 10 [mm²sr]

NA0.4 8-mirror system



NA = 0.4
Ring field width = 2 [mm]
Etendue (PO) = 27 [mm²sr]

$$\text{Etendue (PO)} = w \times h \times 2\pi(1 - \cos(\text{asin NA}))$$

$w = 2\text{mm}, h = 26\text{mm}$

EUV露光の可能性

$$k1 = HP * NA / \lambda$$

方式	NA	DRAM Half-Pitch							
		2007	2010	2013		2016		2019	
		65nm	45nm	32 / SE	32 / DP	22 / SE	22 / DP	16 / SE	16 / DP
193i 193i+ 193i+	0.92	0.31	0.21	0.15	0.31	0.10	0.21	0.08	0.15
	1	0.34	0.23	0.17	0.33	0.11	0.23	0.08	0.17
	1.07	0.36	0.25	0.18	0.35	0.12	0.24	0.09	0.18
	1.2	0.40	0.28	0.20	0.40	0.14	0.27	0.10	0.20
	1.3	0.44	0.30	0.22	0.43	0.15	0.30	0.11	0.22
	1.35	0.45	0.31	0.22	0.45	0.15	0.31	0.11	0.22
	1.45	0.49	0.34	0.24	0.48	0.17	0.33	0.12	0.24
	1.5	0.51	0.35	0.25	0.50	0.17	0.34	0.12	0.25
	1.6	0.54	0.37	0.27	0.53	0.18	0.36	0.13	0.27
1.7	0.57	0.40	0.28	0.56	0.19	0.39	0.14	0.28	
EUV	0.25	1.20	0.83	0.59		0.41		0.30	
	0.3	1.44	1.00	0.71		0.49		0.36	
	0.35	1.69	1.17	0.83		0.57		0.41	
	0.4	1.93	1.33	0.95		0.65		0.47	

高NA-EUVにより16nm-hpも視野に！

まとめ

■ 光

ArF液浸の高屈折率化とダブルパターンニングの組合せで
22nm-hp以降への適用可能性あり.

課題 NA~1.7 : レンズ材料, 液浸液, レジスト材料の開発
DP : 重ね合せ(装置/マスク)/パターン分割(ソフト)

■ EUV

高NA化により16nm-hpも視野.

課題 高出力光源, 集光ミラー寿命, レジスト感度&LER...

■ 共通の課題

- 45nm-hp@2010 (β 機@2008)
ロジックには193i+ or DPが不可欠 - 装置のタイミングは?
- 32nm-hp@2013 (β 機@2011)
193i++&DP, EUV の β 機のリリース時期は?