

45nm-hp以降のリソグラフィ技術 — ArF液浸はどこまで使えるか？ —

WG5リーダー

(株)富士通研究所 羽入勇

2005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 5名
岡崎 信次(ASET-EUV)、山部 正樹/事務局(ASET-D2I)、
寺澤 恒男(MIRAI-ASET)、有本 宏(SELETE)、中瀬 真(JEITA)
- 特別委員 (大学・独立行政法人) 2名
堀池 靖浩(物材研)、古室 昌徳(産総研)、
- 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)、
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)、河合 義夫(信越化学)、栗原 啓志郎(TAO)、
井上 弘基(機振協)、遠藤 章宏(リープル)

内容

- ITRS 2005 リソグラフィ章
 - 主な改訂内容
 - リソグラフィ候補とその変遷

- 絞りこまれたリソグラフィ候補
 - ◆ ArF液浸リソグラフィ
 - ◆ 液浸露光のメリット
 - ◆ 液浸露光の限界と課題
 - ◆ EUVリソグラフィ
 - ◆ EUVのメリット
 - ◆ 開発状況と課題

2005 リソグラフィ章の主な改訂内容

- 線幅コントロールとラインエッジラフネス(LER)
 - 線幅コントロール許容値を10%から12%に緩和
 - MPUゲートに対しては依然達成できない(<4 nm 3 σ は赤)
 - レジスト線幅とエッチ後線幅のバイアスを拡大
 - レジスト線幅は1.6818 \times 物理ゲート長
 - リソ/エッチのバラツキ取分は75%/25%
 - 計測, トランジスタ, 配線を考慮した新しいLWR と LERの提案
 - コンタクトに対し10%のエッチバイアスを導入
- 重ね合せ許容値をDRAM-hpの35%から20%へと大幅に縮小
- リソグラフィツールの露光領域の幅と長さを追加
- リソグラフィ候補の改訂
- マスクとレジストテーブルの値とカラーを改訂
- インプリント・リソのテンプレートに対するテーブルを追加
- LWRの定義と低周波領域のLWR値の改訂

2005 ITRS リソグラフィへの要求

<i>Year of Production</i>	2005	2007	2010	2013	2016	2019
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	80	65	45	32	22	16
Flash ½ Pitch (nm) (Un-contacted Poly)	76	57	40	28	20	14
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm)(contacted)	90	68	45	32	23	16
MPU gate length in resist (nm)	54	42	30	21	15	11
MPU Physical Gate Length (nm)	32	25	18	13	9	7
Contact diameter in resist (nm)	111	84	56	39	28	20
Contact diameter after etch (nm)	101	77	51	36	25	18
Gate CD control (3 sigma) (nm)	3.3	2.6	1.9	1.3	0.9	0.7
Overlay [A]	15	11	8.0	5.7	4.0	2.8
Mask CD uniformity (nm, 3 sigma) isolated lines (MPU gates), binary mask [H]	3.8	2.6	1.3	1.0	0.7	0.5
Low Frequency Line Width Roughness: (nm, 3 sigma) <8% of CD *****	4.2	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

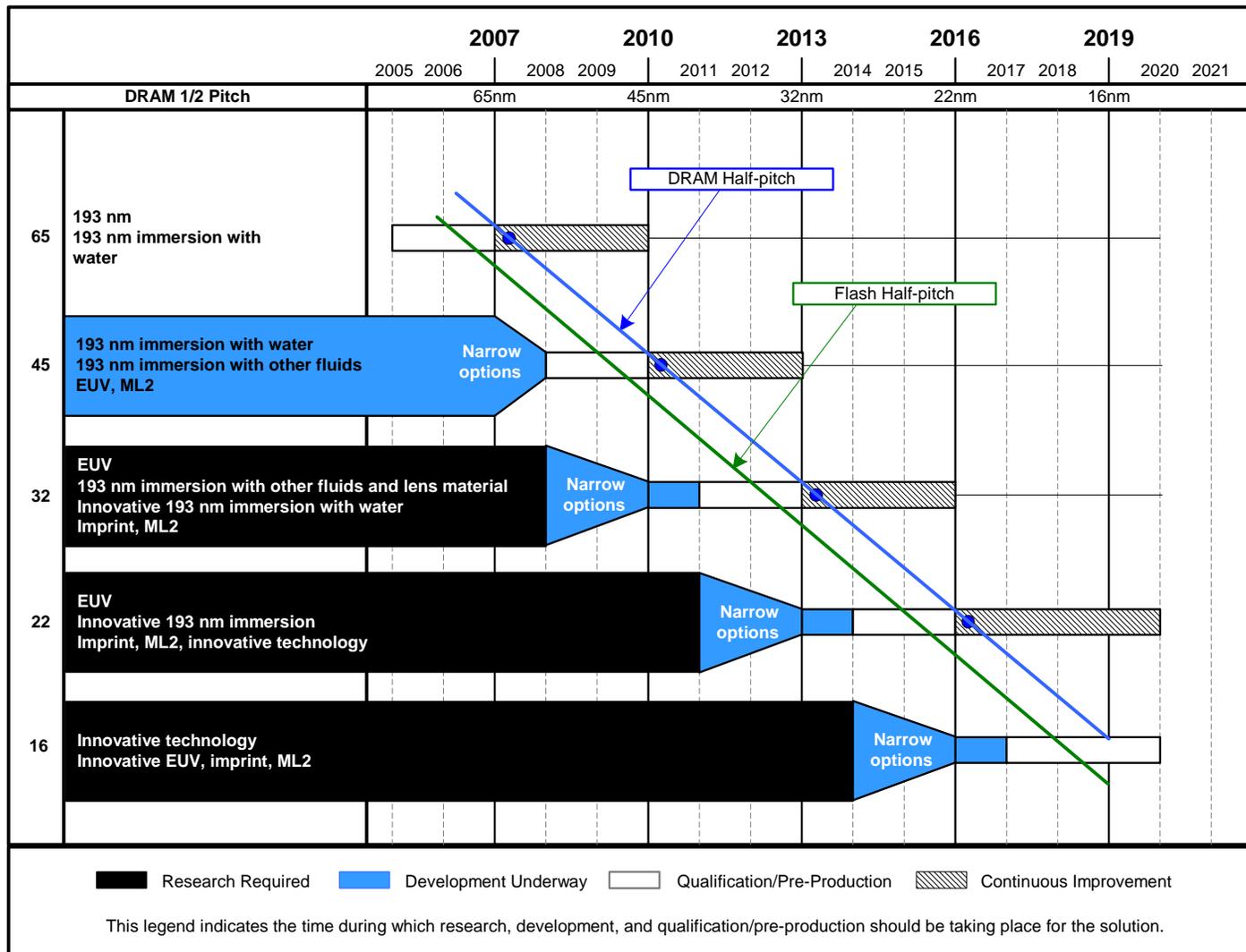


困難な課題

- ≥ 32 nm $\frac{1}{2}$ pitch
 - RETの形状を有する光学マスクとポスト光マスク
 - コスト抑制とROI
 - プロセス制御
 - 液浸リソグラフィ
 - EUVリソグラフィ

- < 32 nm $\frac{1}{2}$ pitch
 - マスク作製
 - メトロロジィと欠陥検査
 - コスト抑制とROI
 - ゲートCD制御の改善とプロセス制御
 - レジスト材料

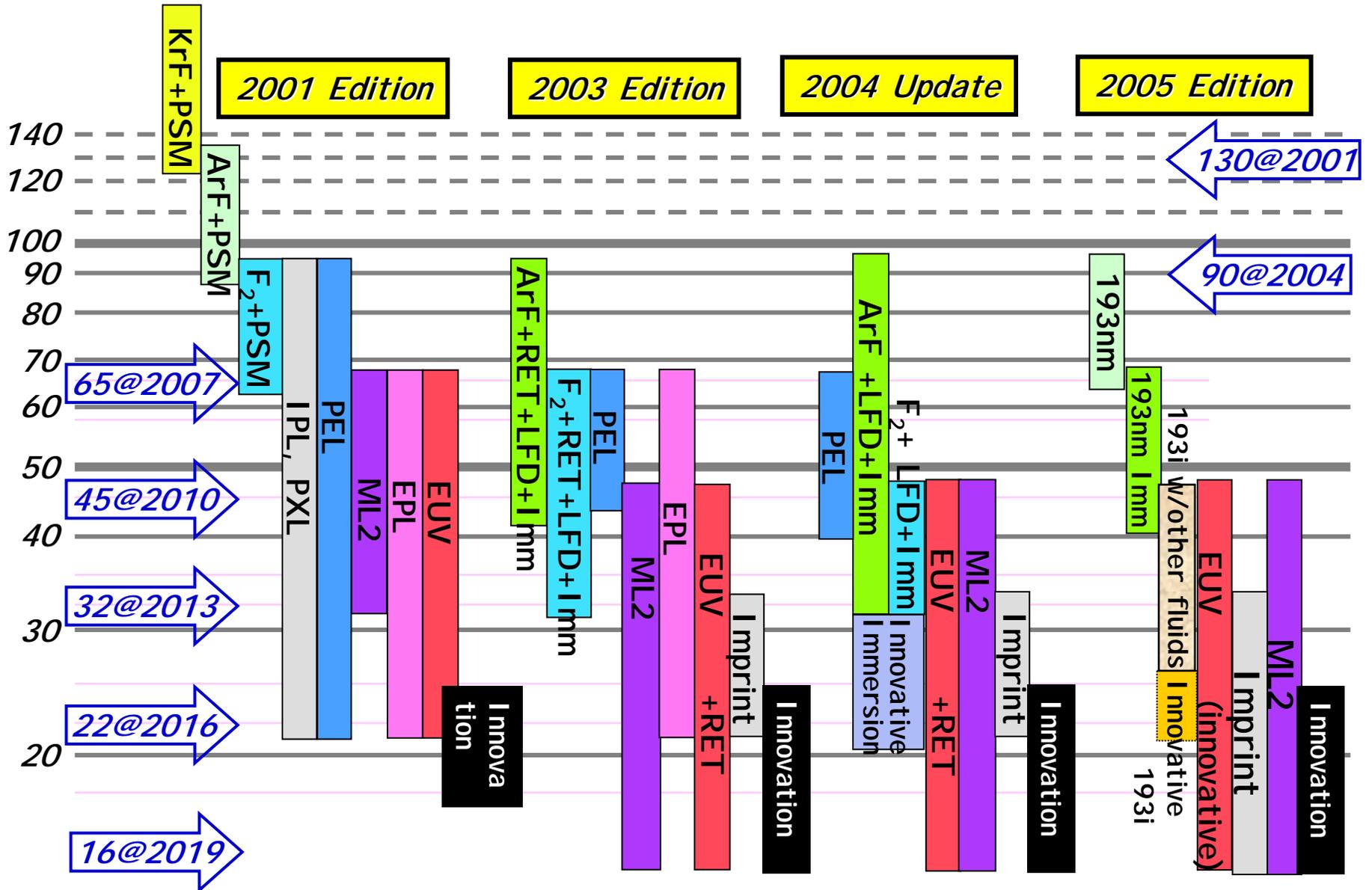
ITRS 2005 リソグラフィ候補



リソグラフィ候補のまとめ

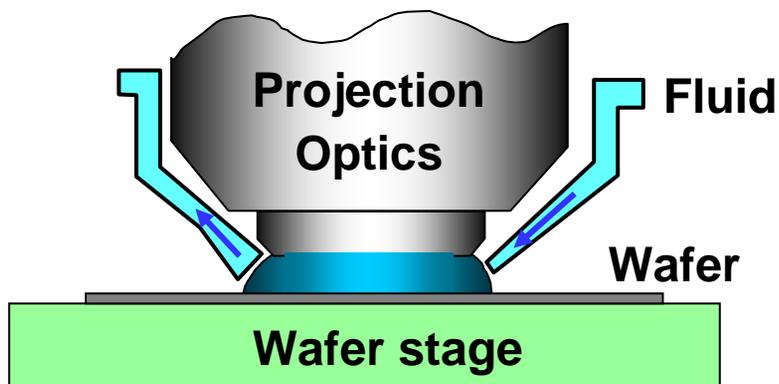
- ArF (193nm) 液浸露光は純水または他の液体で45nm-hp, 新しいレンズ材料を用いて32nm-hpまでの可能性がある.
- F2(157nm)露光は候補から削除された.
- EUV露光は45nm-hpから使われ始め, 32nm と 22nm-hpの第一候補である.
- EPLとPELは候補から削除された.
- マスクレス露光は45nm-hp以降の候補として残った.
- インプリントは32nmから16nm-hp領域まで拡張された.

リソグラフィ候補の変遷



ArF(193nm)液浸露光技術

液浸露光のメリット

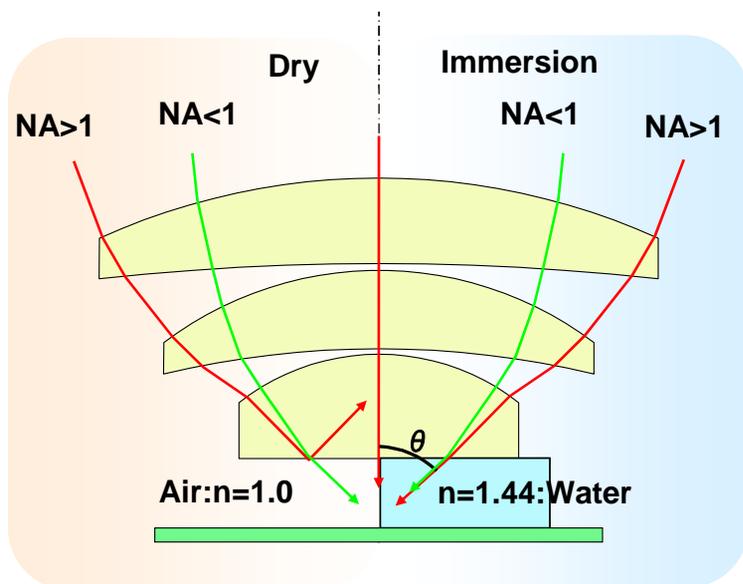


$$NA = n \sin \theta$$

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

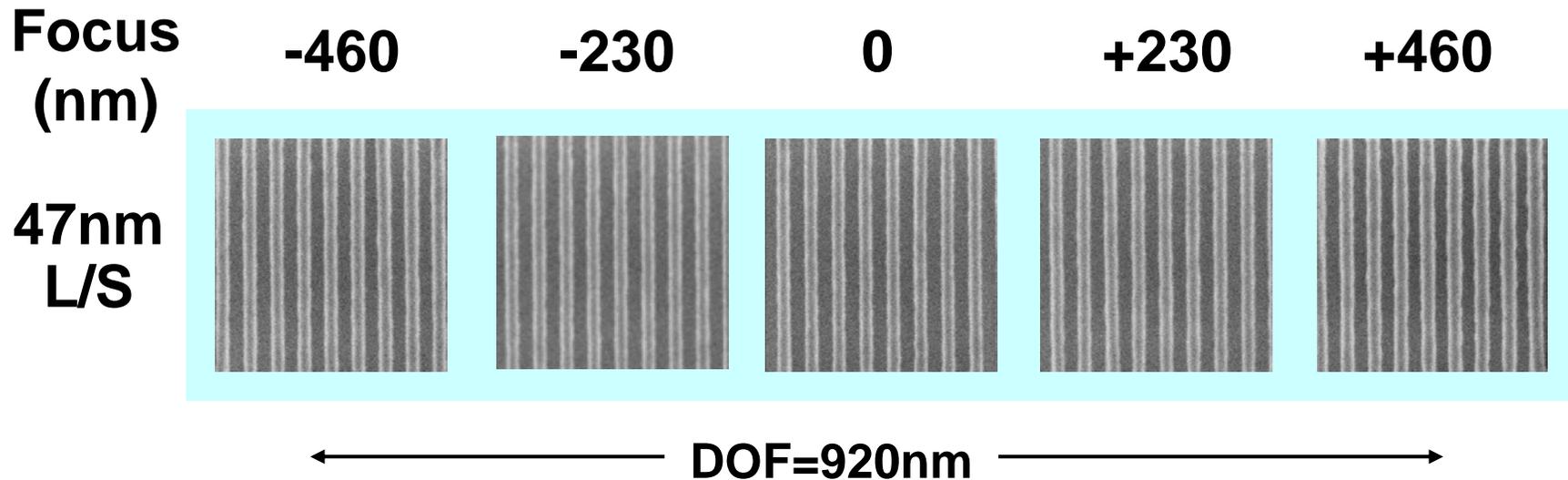


$$\begin{aligned} \text{DOF} &= k_2 (\lambda/n) / 2 (1 - \cos \theta) \\ &\sim k_2 (\lambda/n) / \sin^2 \theta \\ &= k_2 \underline{n} \lambda / NA^2 \end{aligned}$$

焦点深度の向上

液浸露光によるサブ50nmパターン

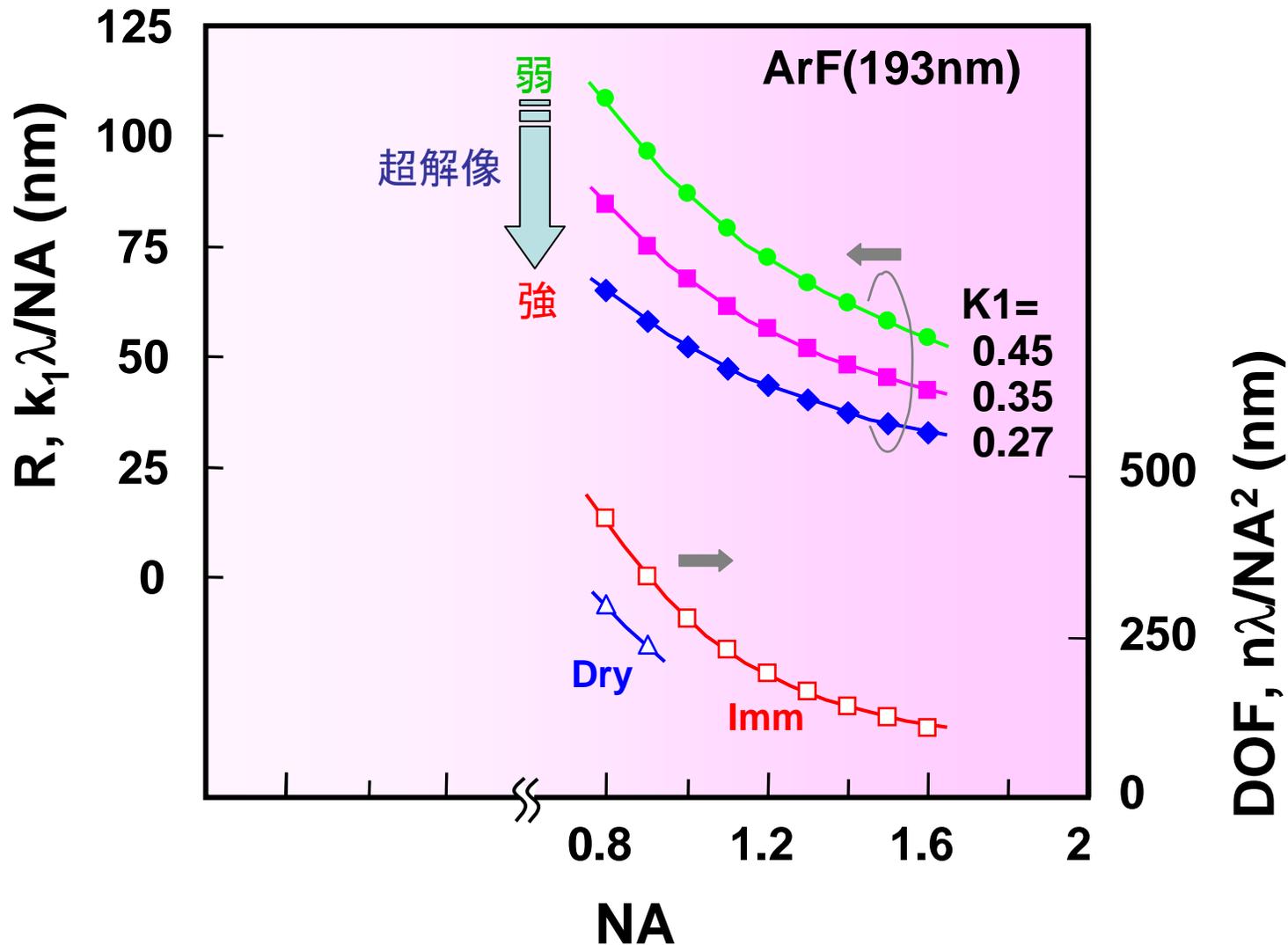
Immersion, NA=1.07 $\sigma=0.98$ Dipole with POLANO
Resist (130nmt) + Top Coat (Developer Soluble)



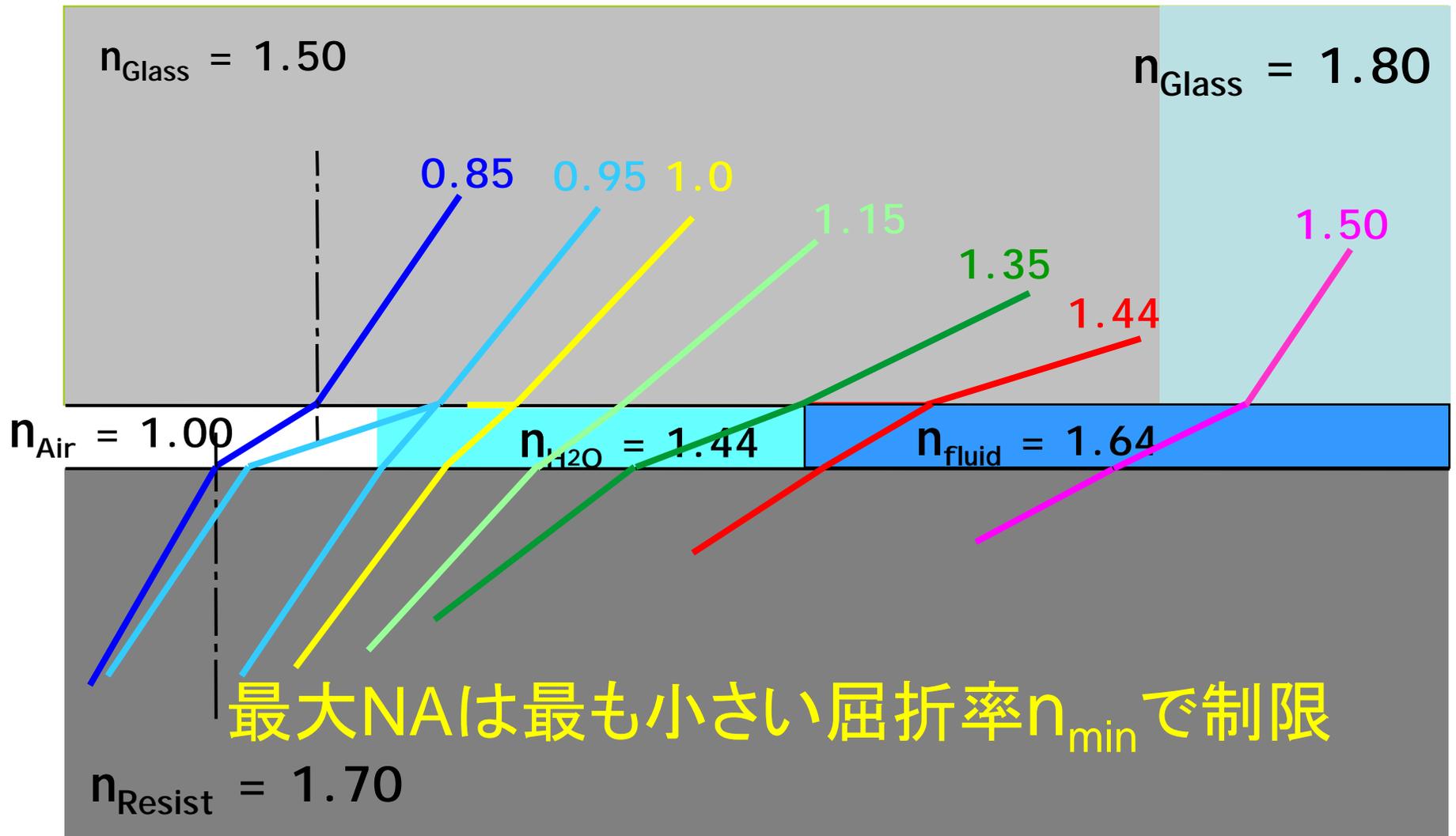
ニコン(株)提供

Processed by TEL LITHIUSi+

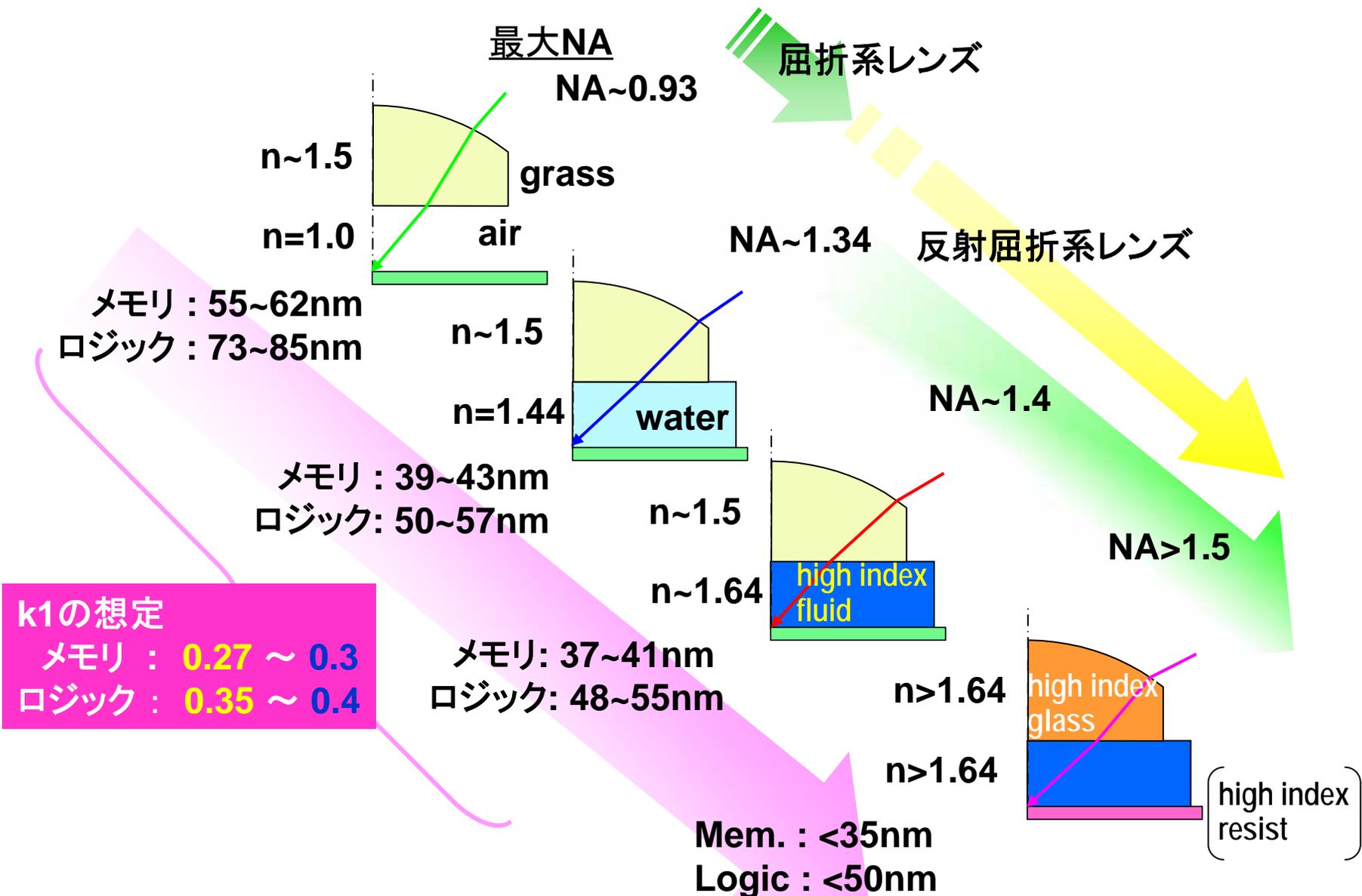
解像力と焦点深度のNA依存性



高屈折材料の必要性



期待されるNAとデバイスのハーフピッチ



45nm/32nmデバイスに必要なNA

n_{min} として1.65, 1.8, 2
程度が必要

デバイス	k1	NA				
		1.2	1.35	1.5	1.65	1.8
メモリ	0.3	48	43	39	35	32
	0.27	43	39	35	32	29
ロジック	0.45	72	64	58	53	48
	0.4	64	57	51	47	43
	0.35	56	50	45	41	38

45nmロジック
(hp-65nm)

32nmロジック
(hp-45nm)

(1/2 pitch: nm)

高屈折率材料の現状

液体

- $n \approx 1.65$ の液体が公表されてるが、32nmには力不足.
- 32nmには $n \approx 1.8$ が必要だが、まだ存在が見えていない.
- 透過率・安定性・コスト・安全性等検討項目は多い.

レンズ材料

- 材料として **Spinel**($MgAl_2O_4$)や **Garnet**($Lu_3Al_2(SiO_4)_3$)が知られている. **ゲルマネートGarnet**も新たに提案(SPIE2006)
- 193nmでの透過率が要求値に対してまだ低い.
- 複屈折が F_2 の蛍石で問題になった値の約10倍.
- レンズ材料として必要な大きさの結晶の実現性が不明.

レジスト材料

- $n \approx 1.85$ の材料提案(SPIE 2006)もあるが性能面の検証が必要

困難な課題 $\geq 32\text{-nm}$ $\frac{1}{2}$ pitch (一部)

大きく改善との報告
(SPIE2006)

困難な課題 $\geq 32\text{ nm}$	課題の内訳
液浸リソグラフィ	液浸による欠陥の低減(泡やステインを含む)
	レジストケミストリの互換性とトップコート材料の開発
	1.8以上の屈折率のレジスト材料
	粘性, 光吸収, 液リサイクルの要求を満たす屈折率1.65以上の液浸 高透過率かつ低複屈の屈折率1.65以上のレンズ材料
EUVリソグラフィ	低欠陥マスク基板, 30nm以下の感度を持つ検査装置及びマスク基板の修整技術
	現実的な用力を伴った115 W以上の中間集光点パワーの光源, 集光ミラーと光源の長寿命化
	LWR: $< 3\text{ nm}$ (3s), 感度: $< 10\text{ mJ/cm}^2$, 解像力 $< 40\text{ nm}$ のレジスト
	0.10 nm rms以下の形状誤差と10%以下のフレアの光学系の製造
	5年以上の寿命を達成する光学系の汚染制御技術
	ペリクルレスマスクのパーティクルから保護
光リソとのMixed & Match	

液浸露光の限界を引延ばすために

- ハイパーNAへの対応

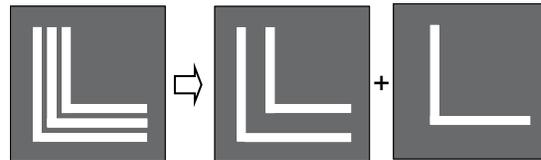
- ウェハ平坦度/トポグラフィのコントロール
- フォーカス/レベリングのコントロール

- 超解像技術等の工夫

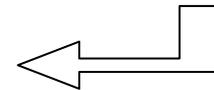
- アグレッシブOPC, アシストパターン
- いろいろな位相シフトマスク技術
- リソフレンドリデザイン(LFD)
- 偏光を用いた2重極/4重極照明

- 二重露光または二度パターンニング

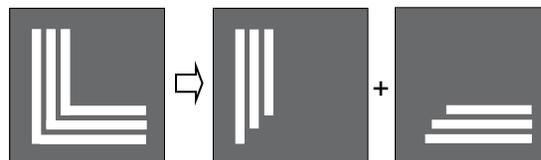
- ピッチ分割



実効的な $k_1 < 0.25$ が可能

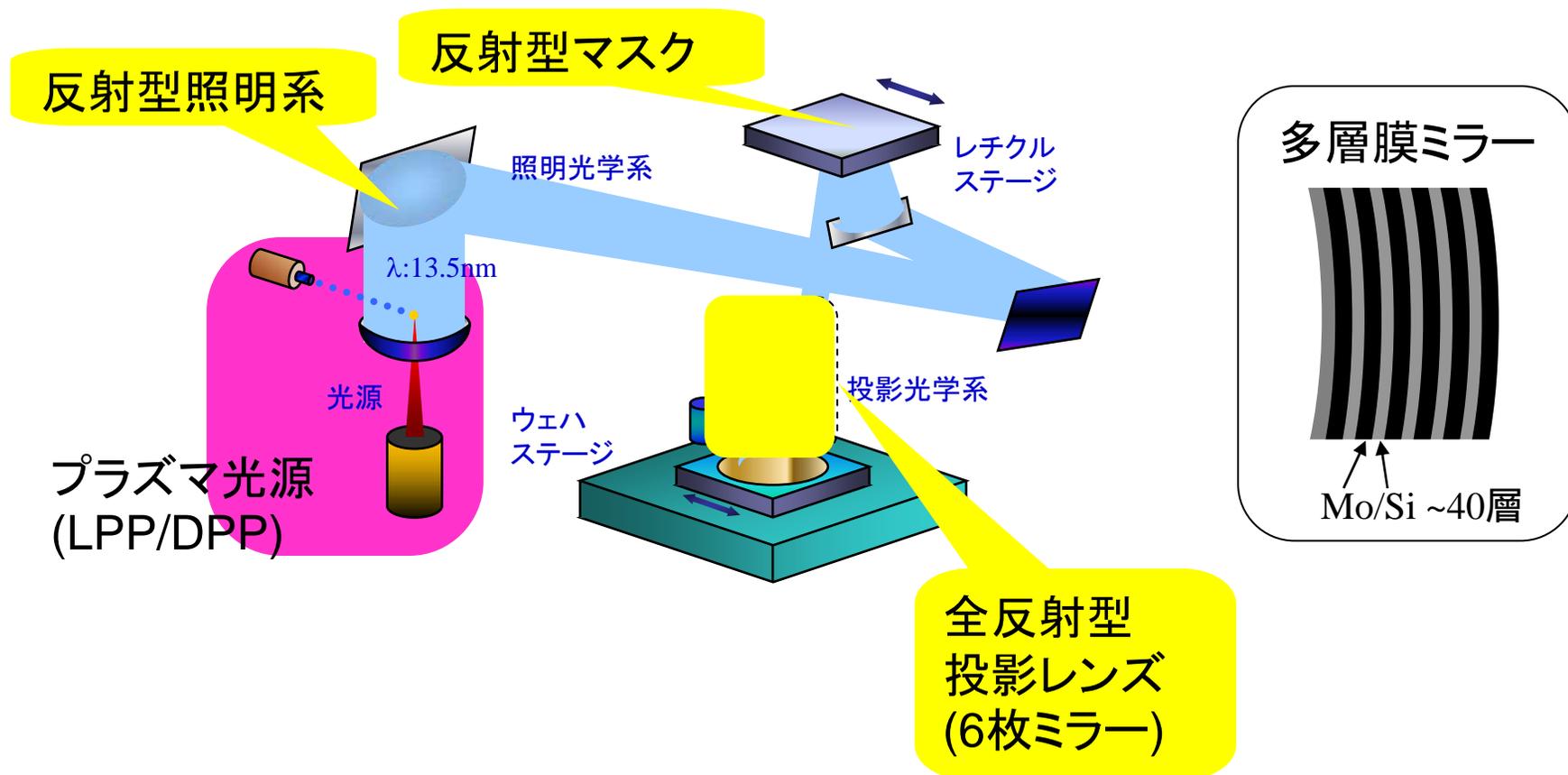


- 方向分割

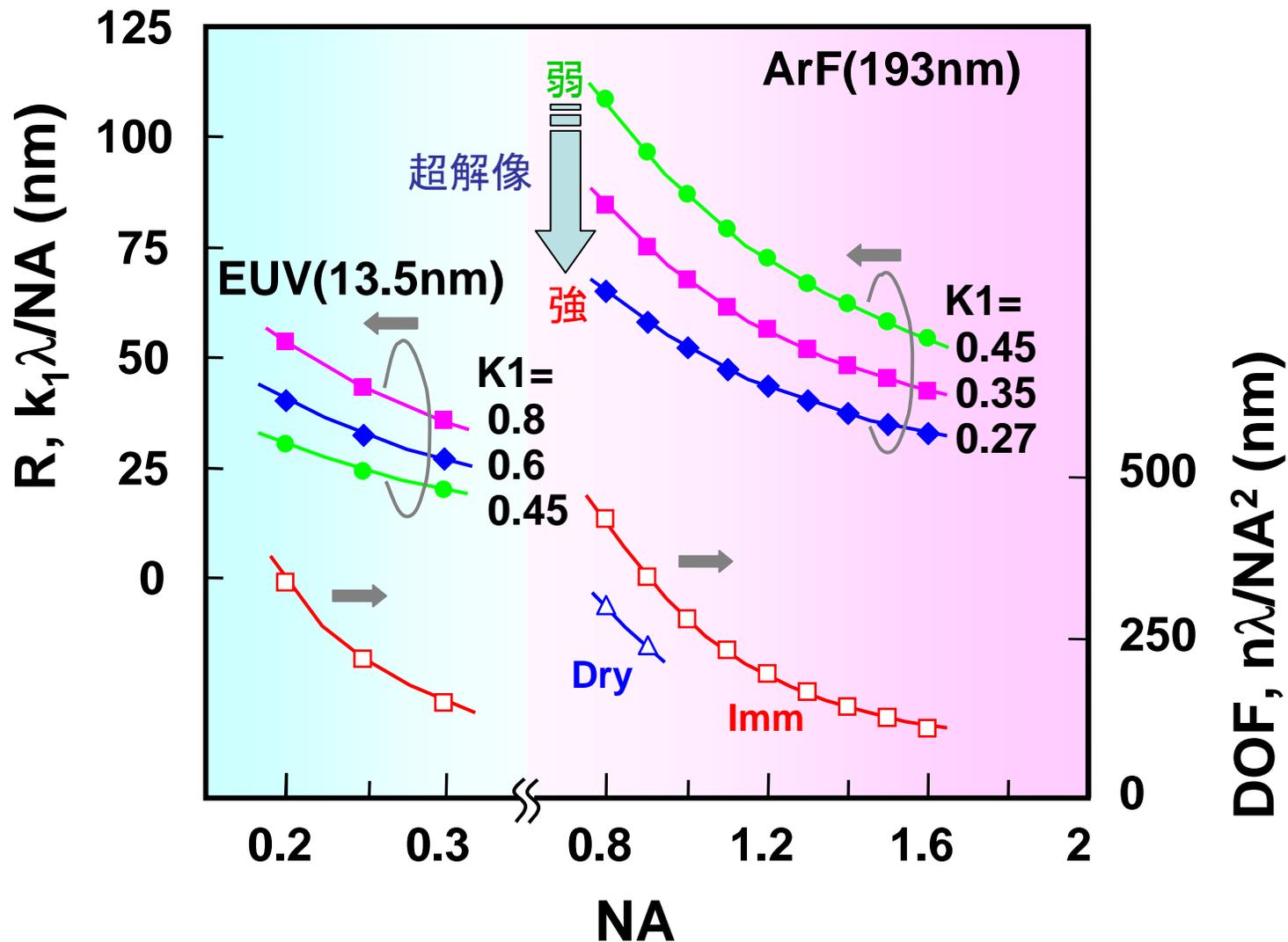


EUV露光技術

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

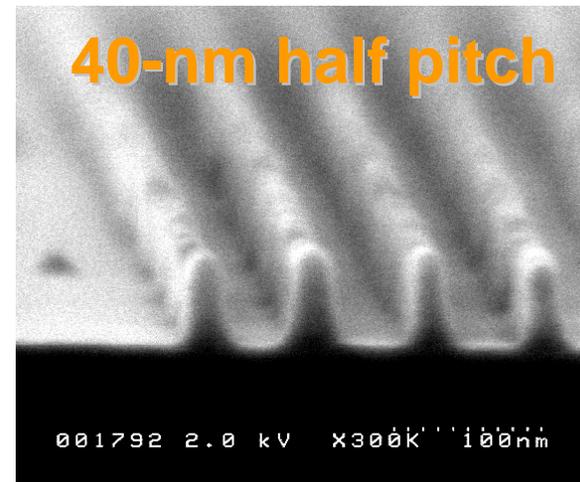
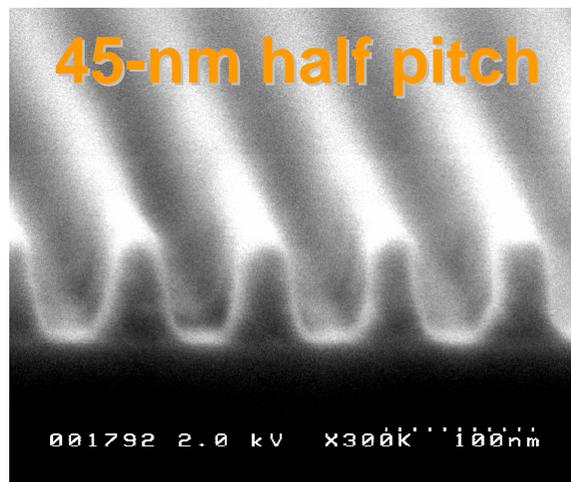
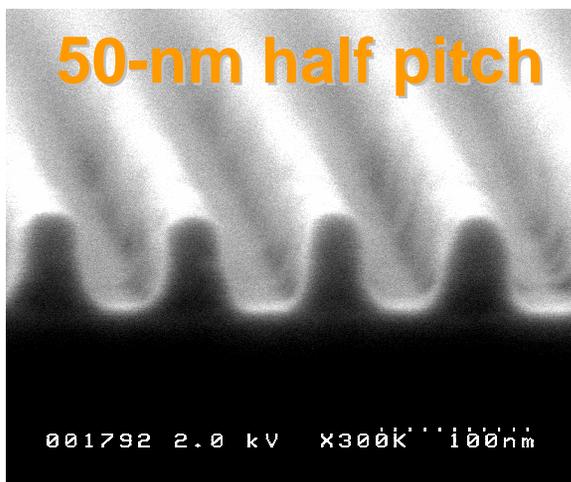
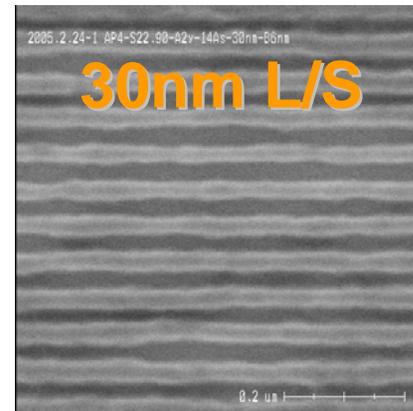
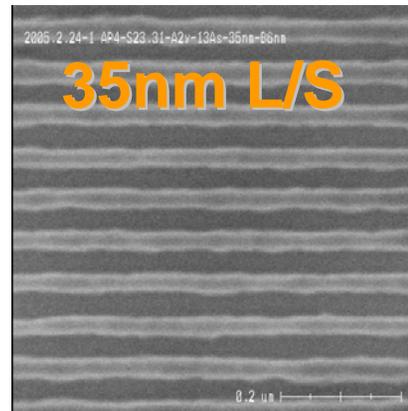
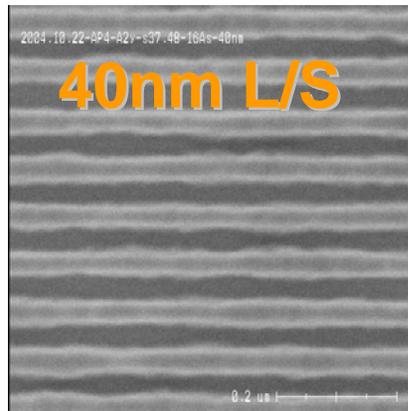
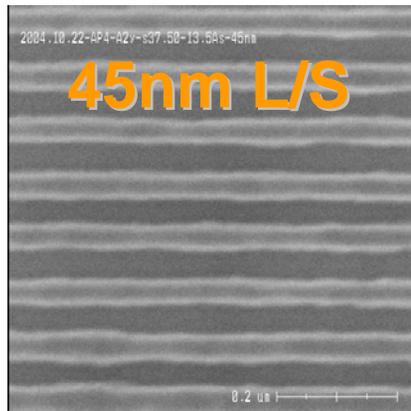


EUV露光のメリット



EUV露光のパターニング結果

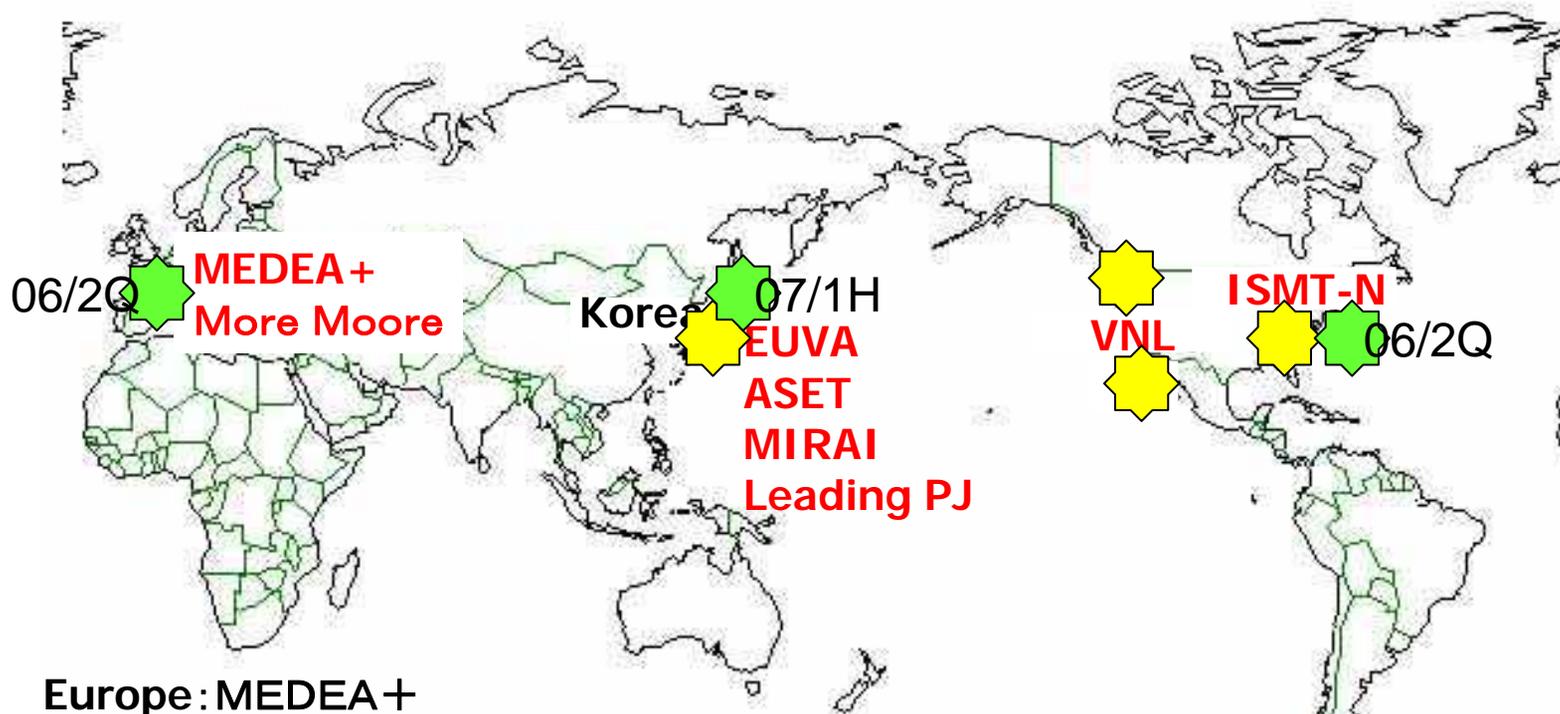
Chemically amplified resist (CAR): 92 nm^t



From Symp. on EUVL 2005 (ASET)

世界におけるEUVリソグラフィ技術の開発体制

 Small-Field Tool
  α -Tool



Europe: MEDEA+
 (EXTUMASK,
 EUV Source
 EXTATIC
 EUV Imaging Tech)
 IMEC

Japan: EUVA, Leading PJ
 ASET, MIRAI
Korea: Hanyan Univ.
 Samsung

USA: ISMT-N
 VNL
 NIST
 ANL
 Intel

ASML, Zeiss, Philips, Xtreme, PLEX, SAGEM, Exitech

Nikon, Canon, Gigaphoton
Komatsu, Ushio

Cymer, Powerlase

EUVリソグラフィ技術の概要と課題

照明光学系

ミラー枚数の少ない設計
ケーラー照明ミラーの開発

多層膜鏡の反射率は<70%

投影光学系

高精度非球面ミラー光学系
・研磨製造技術 ・鏡筒技術
・計測技術(可視・露光波長)

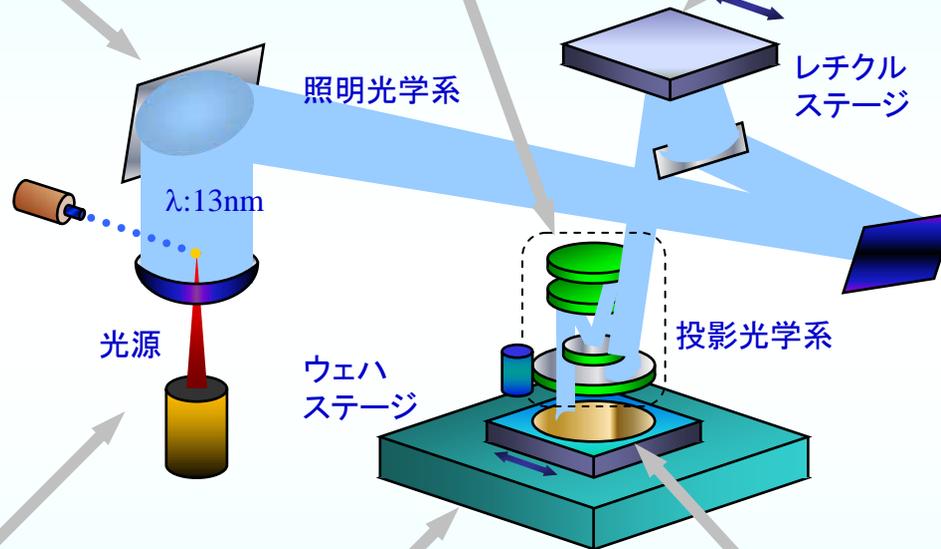
レンズ光学系が使えない

マスク

・超低欠陥反射マスク
・欠陥検査修正
・新ペリクル技術

透過型マスクが使えない

EUV光
(波長 13.5nm)



新光源の開発が必要

EUV光源

・高パワー ・低デブリ
・低Etendue
・高繰り返し ・高安定性

真空中での露光が必要

露光システム

・真空ステージ ・アライメント
・チャック ・温度制御
・コンタミ制御

45 nm hp以下への適用

レジスト

・解像度 ・感度
・ラインエッジラフネス制御
・アウトガス制御

EUVリソグラフィのCritical Issues

(11/10/2005)

(1年前)

- | | |
|----------------------|------|
| 1. レジストの解像力, 感度, LER | 3. ↗ |
| 2. 光源部品と集光ミラーの寿命 | 2. → |
| 3. 無欠陥マスクの実用化 | 1. ↘ |
| 4. 光源パワー | R. ↗ |

Remaining Critical Issues

- 保管/搬送/使用時のレチクル保護 →
- 投影光学系と照明系の品質と寿命 →

Significant concern: タイミングとコスト/ EUVL開発の投資対効果

Source: 4th International EUV Symposium Steering Committee, November 2005

まとめ

- ITRS 2005では線幅ばらつき, 重ね合せ等の精度の見直しが行われたが, これらの精度を満足することは困難である.
- 32nm-hpまでのリソグラフィ候補はArF液浸とEUVに絞られた.
- 45nm-hp@メモリは水を用いた液浸技術で視野に入るが, 32nm-hp@メモリ, 45nm-hp@ロジックには高屈折率材料, 特にレンズ材料の開発が不可欠である.
- EUVは32nm-hp以降の本命であるが, 解決すべき課題が多く, 今後の開発が期待される.