

半導体向けEUVリソグラフィの現状と展望

株式会社東芝 セミコンダクター&ストレージ社 半導体研究開発センター リソグラフィプロセス技術開発部 内山 貴之



1. はじめに

- ▶ デバイスのスケーリングとリソグラフィ技術
- ▶ 次世代リソグラフィ技術の現状と課題

2. EUVリソグラフィの概要

- ➤ EUVリソグラフィの課題
- ➢ 高NA-EUVリソグラフィ

3. まとめ



1. はじめに

デバイスのスケーリングとリソグラフィ技術







Leading Innovation >>>

© 2015 Toshiba Corporation 4





TOSHIBA Leading Innovation >>>

リソグラフィとは

<u>ウェハ上に回路パターンを形成するプロセス</u>

要求されること パターンの微細化 より微細に 寸法精度 より均一に パターン形状 より正確に 重ね合わせ精度 より高精度に 欠陥フリー より少なく コスト より安く スピード より速く





TOSHIBA

Leading Innovation >>>



リソグラフィ技術の変遷



TOSHIBA Leading Innovation >>>

レイリーの式から計算した解像度

レイリーの式
解像度=k1
$$\frac{\lambda}{NA}$$

露光波長 NA k1
436nm(g線) 0.6 0.75

		0 0	
次世代技術	13.5nm(EUV) 0.25	0.3	16nm
(実用化未了)	13.5nm(EUV) 0.33	0.3	12nm
	13.5nm(EUV) 0.50	0.3	8nm



解像度



露光装置の処理能力(スループット)



光源パワー/露光量 [W/(mJ/cm²)]



高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

 \odot 2015 Toshiba Corporation 10

微細化のロードマップ



Leading Innovation >>>

 \odot 2015 Toshiba Corporation 11

マルチパターニングによる微細化対応 40 55



光の延命で微細化に対応している状況

高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

ダブルパターニングとは 光露光における解像限界以下の微細なパターンを形成する技術。 ピッチスプリット(LELE) 側壁プロセス(SADP) ・光リソで露光可能な2枚のマスクに分割 芯材(マスク) ・2回露光で分割パターンを合成 mask A 側壁つけて 配線埋め込み 入力 合成 mask B 余分なパターンをトリミング



T. Higashiki (Toshiba), Lithography Workshop 2007

TOSHIBA Leading Innovation >>>

 \odot 2015 Toshiba Corporation 14





ダブルパターニングにおけるレイアウト分割



TOSHIBA Leading Innovation >>>

ダブル/マルチパターニングにおける課題

・コスト

- 露光複数回によるパターニングコスト増大
- プロセスステップ数増によるパターニングプロセスコスト増大
- サイクルタイム
 - プロセスステップ数増によるTAT悪化
- プロセス制御(重ね合わせ、寸法等)
 - 厳しい要求精度
 - 成膜、ドライエッチ含む複雑な制御が要求される
- 検査·計測

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

- 要求精度が厳しくなるに従いより高精度な検査・計測が必要

以上の課題を解決できる次世代技術の実用化に期待

次世代リソグラフィ技術の現状と課題



高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

 \odot 2015 Toshiba Corporation 18

国際ロードマップ(ITRS)におけるリソグラフィ技術候補の変遷

	ArF	F2	ArF i	ArF HI	DP	MP	PXL	EUV	IPL	EPL	NIL	ML2	DSA	6.Xnm
1992	250						250	180	180	180		130		
1994	180						250	100	130	130		130		
1997	130						130	130	130	130		130		
1999	130	100					100	70	100	100		70		
2001	110	90					65	65	65	90		65		
2003	110	65	65				Х	45	Х	65	32	45		
2005	90	Х	65	45				45		Х	32	45		
2007			65	32	45			32			32	32	22	
2009			45	Х	32	22		32			22	22	16	
2011					22	22		22			22	22	16	11
2013					30-20	19-16		14~			14~	14-11	19-16	(<8)

高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

Leading Innovation >>>

TOSHIBA

 \odot 2015 Toshiba Corporation 19

ITRSにおけるリソグラフィ候補技術(MPU Fin/NAND)

Figure LITH1B MPU Fin and Flash Memory Potential Solutions



ITRSにおけるリソグラフィ候補技術(DRAM/MPU Metal)

Figure LITHIC: DRAM and MPU Metal Level Potential Solutions



Leading Innovation >>>

© 2015 Toshiba Corporation 21

次世代リソグラフィ技術

TOSHIBA

Leading Innovation >>>



次世代リソグラフィ技術候補

- ArF液浸マルチパターニング:従来の露光技術の延長
 - 現在使用の技術。ピッチスプリット、SAxP(側壁プロセス)の方式があるが、ともにプロセスが 複雑で制御が難しい、工程数が長い、マスクが多い等課題がある。
- EUVL: 波長13.5nmと非常に短い波長で高解像度
 - 光源パワーが低い。250W(2015年)の目標に対し80~110W。
 - レジスト性能RLSトレードオフの克服。(RLS:解像度、ラインエッジラフネス、感度)
 - 露光機からマスクへのパーティクル汚染のためペリクルが必須であるが、現状量産で使用できるペリクルの開発未了。
 - 無欠陥マスクのためのインフラ開発途上。
- DSAL:新しく提案されたボトムアップの技術
 - 欠陥とパターン位置精度が課題。他のリソグラフィとComplementary(補完的)な技術。
- ML2:マスクが不要
 - スループットと精度の両立が困難な状況。
- NIL: 高価な露光装置が不要
 - 欠陥解決が最大の課題。

2. EUVリソグラフィの概要

EUVリソグラフィの課題



高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

© 2015 Toshiba Corporation 24

EUVリソグラフィ Extreme Ultra-Violet(極端紫外線)

• 露光波長: 13.5nm

- この波長領域で作成可能なミラーの波長から決定された
- 光源

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

- 現状、LPP(Laser Produced Plasma)方式が採用されている
- これまではDPP(Discharged Produced Plasma)方式もあったが撤退
- 2006年頃にFEL方式の光源の提案が行われたが、大規模すぎることから技術候補に ならなかった経緯がある。最近、LPP光源のパワーアップの進捗が思わしくないこともあり、 FEL光源が再び注目され始めた。

• 全反射光学系

- 波長13.5nmで透明な光学レンズはないため、光学系は全て反射ミラーで形成
- 反射ミラーはMo/Si(6.5~7nm)の多層膜で通常40ペア程度
- ミラーの面精度は地球の大きさの真球に例えると、±1.5mmの精度が必要
 半径64000 k m±1.5mm= 原子レベルの加工精度
- 照明光学系+反射マスク+投影光学系で全12枚程度のミラーで構成
- ミラーの反射率は約68% (例えば 0.68^12 → 0.98%)
- 現状の最新装置のNA=0.33



 \odot 2015 Toshiba Corporation 26

EUV露光装置概略



Leading Innovation >>>

© 2015 Toshiba Corporation 27

EUVリソグラフィ 国内開発プロジェクト



EUVLの課題

2012 / 22hp	2013 / 22hp	2014 / 16hp	2015 / 16hp
1.Long-term reliable source operation with a. 200 W at IF in 2014 b. 500 W-1,000 W in 2016	1.Long-term reliable source operation with a. 125 W at IF in 2014 b. 250 W in 2015	1. Reliable source operation with > 75% availability - 125 W at IF in 1H / 2015 (at customer)) - 250 W at IF in 1H / 2016 (HVM entry at customer)	 Reliable source operation with > 85% availability Expectation of 1500 average wafers per day in 2016
2. Mask yield & defect inspection/review infrastructure	2. Defect free masks through lifecycle & inspection/review infrastructure	 2. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously – Progress insufficient to meet 2015 introduction target 	 2. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously – Increased focus needed to manufacturing performance (defectivity, pattern collapse,)
3. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	 3. Keeping mask defect free Availability of pellicle mtg HVM req't Minimize defect adders during use 	 3. Mask yield & defect inspection/review infrastructure – Enable high yield defect free mask blank supply chain 	 3. Mask yield & defect inspection/review infrastructure – Sustainability of mask tool supply chain remains critical)
 EUVL manufacturing integration 	4. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	4. Keeping mask defect free – Availability of pellicle mtg HVM req't : need integrated industry strategy for solution –Minimize defect adders during use	 4. Keeping mask defect free (by EUV pellicle) – Pellicle demonstration in the field (on 3300) required in 2016

Ranked by 14th International EUVL Symposium Program Steering Committee, Maastricht, October 7, 2015

TOSHIBA Leading Innovation >>>

#1 EUV光源: LPP(Laser Produced Plasma)光源



高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

#1 EUV光源: LPP(Laser Produced Plasma)光源



IFパワー 250W仕様 プレパスルレーザ: YAGレーザ 100W 等 メインパスルレーザ: CO2レーザ 25~30kW EUV発光周波数: 100kHz





EUV光源の開発



高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

Leading Innovation >>>

TOSHIBA

 \odot 2015 Toshiba Corporation 32

#1 EUV光源:目標の250Wにまだ遠い

LPP(Laser Produced Plasma)方式

• 2015年250W@IFの目標に対し、現在の安定出力は80W
 →目標の1/3レベル

ASMLでは安定化を優先させて開発中

現状実験機で130W(1時間程度連続運転)

~183W:露光量制御スペックアウトで2分間のため到達したとは言えず

(現状:55~60%、チャンピオンデータ70%)

• 課題:安定化·高出力化

- プレパルス方式導入とCO2レーザのパワーアップ等で高出力化予定
- 高出力化による熱対策
- ドロップレット安定化
- デブリ対策
- コレクタミラー長寿命化
- ランニングコスト低減
- 稼働率改善(目標95%以上)
- 250W以上パワーアップの可能性??

#2 EUV レジスト; 開発が遅延

- RLS トレードオフ: RLSを同時達成が必要
 - 解像度(<u>R</u>): ≤16nm LS
 - 14nm LS(NA=0.33)~k1=0.34(化学増幅レジスト)~但しラフネス悪い
 13nm LS(NA=0.33)~~k1=0.32(金属錯体レジスト)~但し感度悪い

- ライン幅ラフネス(<u>L</u>WR):目標≤3nm

- 現状、16nm LSで>5nm
- 追加プロセス等で短周期ラフネスは改善
- 長周期ラフネスは低減困難

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

- 感度(<u>S</u>): 目標≤20mJ/cm²
 - 化学増幅では50mJ/cm²レベル



現状、全ての要求を満たすレジストはない



#2 EUV レジスト

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

- ・RLSトレードオフの克服は遅れるほど微細化が進み、より難しく。
 ▶ 化学増幅レジスト: ラフネスの改善困難
 - > 金属錯体レジスト: 低感度 (>60mJ/cm²)



化学増幅レジストのパターニング例パターン寸法と最適露光量(現レジスト)



#3 EUVマスクインフラ整備; ほぼ予定通り進捗

• マスクブランク検査装置 13.5nm波長による計測

- EUV波長 (EIDEC/Lasertec)
- DUV波長 (KLA-Tencor)
- マスクパターン検査
 - DUV波長(Nuflare、KLA-Tencor等)
 - EB (AMAT、KLA-Tencor、EIDEC/EBARA等)
 - 13.5nm波長 (KLA-Tencor等):ペリクル貼り付け後の検査に必要

空間像計測 13.5nm波長による計測 – EUV AIMS (Carl Zeiss)



マスク・シャドウイング効果

- 照明光は6度でマスクに入射
- →光吸収膜は高さがあるため、パターンの方向により影が発生
- →マスクで形成した吸収膜のサイズは影を考慮して形成









#4 EUVマスク欠陥対策

• 露光機内のパーティクル対策

- 現状ゼロでないことが報告されている

- EUVペリクル:開発中(フルフィールド材料透過率未達)
 - ASMLを中心に開発中 ポリSi膜、グラフェン等
 - 要求項目
 - ・EUV光の透過率: >90% (往復で>81%)
 - ・ サイズ: 110.7 x144.1 mm2:inner / 118.0 x150.7mm2:outer
 - EUV耐光性: 5W/cm2 (=250W光源の場合)
 - •寿命(EUV+H2環境) >315時間
 - •最大加速度:100 m/s2
 - EUV透過率均一性 ばらつき<0.2% (寸法への影響 < 0.1nm相当)
 - ペリクル局所角度< 300 mrad
 - •ペリクルフレーム・スタンドオフ距離 2±0.5mm

- 熱対策必要

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

波長6.8nmのEUVLについて

- リソグラフィ性能(解像力向上、焦点深度拡大等)は改善するが、
 困難な技術課題も多い。
 - 多層膜ミラー(LaN/B₄C)
 - 反射のバンド幅FWHMは 0.06nm(13.5nmの1/10)、反射角度範囲は 13.5nmの1/3以下と極端に小さくなってしまう。
 - 理論値(~75%)と比べ、実験値ではかなり低いミラー反射率(~約45%)
 しか得られていない。
 - 界面粗さや界面拡散層に対してより敏感になる。
 - EUV光源
 - 高融点金属ターゲット(Tb, Gd)?
 - FEL?
 - フレア

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

- フレアは波長の二乗に反比例して大きくなる。
- ミラーのMSFR(Mid spatial frequency roughness)とHSFR(High spatial frequency roughness)の更なる改善が必要

高NA-EUVリソグラフィ



高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

 \odot 2015 Toshiba Corporation 42

EUVリソグラフィ技術トレンド



Leading Innovation >>>

© 2015 Toshiba Corporation 43

EUVにおける限界解像度

レイリ・ 解像度(nr	ーの式 n)=k ₁ $\frac{\lambda}{NA}$	λ: 虚 NA: N k ₁ : フ	客光波長 Numerical Apert ロセス定数[物理的	:ure(レンズ開口数) 的に0.25以上])
k1	0.40	0.34	0.31	0.26	

Kl	0.40	0.34 0.31		0.26	
		EUVレジスト(LS)レベル	ArFレジスト(2D)レベル	ArFレジスト(LS)レベル	
0.25	21.6	18.4	16.7	14.0	
0.30	18.0	15.3	14.0	11.7	
0.33	16.4	<u>13.9</u>	12.7	10.6	
0.35	15.4	13.1	12.0	10.0	
0.40	13.5	11.5	10.5	8.8	
0.45	12.0	10.2	9.3	7.8	
0.50	10.8	9.2	8.4	7.0	
0.55	9.8	8.3	7.6	6.4	
0.60	9.0	7.7	7.0	5.9	
0.65	8.3	7.1	6.4	5.4	
0.70	7.7	6.6	6.0	5.0	

光学的にSub-10nmパターニングのポテンシャル

高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

 \odot 2015 Toshiba Corporation 44

高NA-EUVにおける光学系



高NA-EUVにおけるレジスト

• RLSトレードオフ

- 化学増幅レジストにおけるラフネス低減が困難。ポスト・プロセスによりラフネスの 高周波成分の改善が可能であるが、<u>低周波成分の対応困難</u>。
- 一 微細寸法ではショットノイズの影響増大のためさらにラフネスが悪化、より多くの 露光量が要求される。
- 高NA領域では特に解像度が要求されるため、レジスト感度が犠牲になる可能性あり。

• 新プラットフォーム材料

- Inpria等の無機レジストにおいては、レジスト感度が低いが、限界解像力のポ テンシャルはサブ10nmと比較的高く、期待される。
- ナノパーティクル・レジストは、非常に感度が高いものの、解像力改善が必要。
- **レジスト材料の革新**・ブレークスルーが望まれる。



高NA-EUVにおける露光装置・光源

• 露光装置

- 高NAのEUV露光装置は現状よりさらに高価になることが懸念されるが、スルー プット・高稼働への要求が非常に高くなる。
- ½ ~ ¼フィールドの可能性があるが、処理能力の低下を最低限にするために 高速ステージや高出力光源が要求される。

将来の高NA-EUV光源には500W~1kW以上必要か

- 光源の高出力化のためのミラー・マスク・ペリクル等光学系の耐久性・熱対策。
- 高稼働率が要求されるため、メンテナンス時間の短縮、部品・モジュールの高寿
 命化等の対応が必要。
- EUV光源向けXFEL(X線自由電子レーザ)の検討も開始されている。





Leading Innovation >>>

TOSHIBA

 \odot 2015 Toshiba Corporation 48

EUV光源向けX線自由電子レーザの課題

- Proof of concept; 13.5 nm波長かつ10kW以上の出力のFELに向けて
- 365D/24Hフル稼働(稼働率>95%)
- ウェハコストへの影響
- 消費電力
- 施設のサイズ
- 開発期間

● 高コヒーレンス(スペックル・ノイズ)・高ピークパワー光(ダメージ)

次世代高出力EUV光源:X線自由電子レーザ



10kW以上の高出力EUV光源の可能性(複数台のスキャナ向け) 13.5nm波長における高出力光源は前例なし。開発に長期間を要する。

高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

 \odot 2015 Toshiba Corporation 50

高パワーEUV-FEL光源を用いた光学系

高パワー光のビームスプリッター、複数のスキャナまでのつなぎ光学系
 ピークパワー低減技術(パルス・ストレッチ)
 反射光学系におけるコヒーレンス低減技術
 1kWレベルのEUV光への耐性(多層膜ミラー、マスク、ペリクル等)



高エネルギー加速器科学研究奨励会 (10/16/2015, アルカディア市ヶ谷)

TOSHIBA Leading Innovation >>>

© 2015 Toshiba Corporation 51

EUV光源向けX線自由電子レーザの課題

- Proof of concept; 13.5 nm波長かつ10kW以上の出力のFELに向けて
 → 何らかのエビデンス、試作実験装置等が欲しいところだが・・・。
- 365D/24Hフル稼働(稼働率>95%)
- → リダンダンシ・システムが必須となる。
- ウェハコストへの影響
- → スキャナ1台で比較すると、LPP光源よりも安価であることが期待される。 LPP光源のコスト削減次第であるため、詳細検討を要す。
- 消費電力
- → スキャナ1台で比較すると、ERL導入でLPP光源より少ないことが期待される。
- 施設のサイズ
- → 100mレベルの大きな施設になる。
- 開発期間

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

- → 5年レベルの長期間になる。
- 高コヒーレンス(スペックル・ノイズ)・高ピークパワー光(光学部材ダメージ)
- → 反射光学系における対応が必要。

EUV-FELの実用化のためには、長期的な視点に立った十分な議論・ 検討が必要である。

半導体向けEUVリソグラフィ・コミュニティの状況

- EUVリソグラフィにおいて、露光機メーカはASML(オランダ)の1社のみの状況。(かつてはニコン 、キヤノンも開発)一方でレジスト等の材料メーカは日本が強い。
- 最新のEUV露光機NXE:3300はINTELやTSMC等のロジックLSIを中心としたチップメーカや コンソーシアムがオーダーした模様。これまで7台がユーザに出荷済み、5台は出荷のため製作 中。ただし、光源パワーが低く、稼働率も低いため、量産への適用は困難な状況。必要な光源 パワーは応用分野(メモリ、ロジック等)によって異なる状況。
- 現状の光源であるLPPの開発はASMLの子会社サイマー(米)とギガフォトン(日)の2社で行われている。光源開発はサイマーが先行。これまで開発遅延が続いており、光源メーカの信用は地に落ちている。そのため、業界としては光源に関して非常に慎重な姿勢になっている。
- ロジックLSIメーカはペリクルが必須という認識であるが、従来のp-Si系材料では露光による発熱により異物を核に破壊することが判明。現状、100W以上の光源に対応できるペリクル材料を 探索している段階。
- これまで日本の国プロにおいてEUV光源開発を行ってきたが、未だ実用化には至っていない。そのため、今後新たに国プロを立ち上げることは簡単でないと推測される。
- 光源開発は露光機メーカの協力無しでは進まないが、2012年に6.Xnm波長でのEUV向け FEL光源の発表をした後は、ASMLは公の場でFELについてのコメントをしていない。まずはLPP 光源の量産化を優先させていると推測。
- 最近のリソグラフィ国際会議においては、チップメーカとしてロジックファンダリ会社の GlobalFounfriesがXFEL光源の発表を行っている。

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

EUVLシンポジウム2015(10/5~7)の状況

- 光源
 - ユーザー実績で平均パワー60W、1台で80W。稼働率は平均55-60%で1台 70%。
 - ASML実験機で130W・1時間
 - 2015年~2016年1Hの250W達成はかなり難しい状況
- レジスト
 - 化学増幅レジストは高感度技術開発が進み、25~30mJ/cm2レベルに。
 - 新プラットフォームは量産適用性を改善中。
- ペリクル
 - 従来p-Si系材料では80W光源で破壊発生。
 - 現在、高パワー光源向け材料探索中(グラフェン等)。
- マスク
 - ブランク欠陥数は使用可能レベルの10個以下レベルに到達
 - ペリクル付マスク検査装置の開発必要

4. まとめ



次世代リソグラフィ技術



コスト効率のよい技術を採用

TOSHIBA Leading Innovation >>>

高エネルギー加速器セミナー OHO'15 (9/3/2015,高エネルギー加速器研究機構)

まとめ

TOSHIBA

Leading Innovation >>>

- デバイススケーリングに対応するため、ArF液浸リソグラフィのダブル・パターニング、そしてマルチ・パターニングにより対応している。これらはプロセス制御が難しく、工程数が多くて工期も長いため、適切なCoOを有する次世代リソグラフィ(NGL)の実用化が切望されている。
- NGLのなかで、波長が短く高解像性が期待できるEUVリソグラフィ が最有力候補である。光源パワーアップが最大の課題であるが、レジスト開発の課題も顕在化してきた。さらに、コストについての考慮も 重要である。
- 高出力かつ低コストが期待される次世代EUV光源として、FELが再度脚光を浴びてきている。今後の実用化のためには技術的な観点のみならず、様々な環境要因を加味した上で、業界を挙げた長期的な開発ストーリー構築・合意が必要となる。

TOSHIBA Leading Innovation >>>