

放射光を用いた EUV リソグラフィーの基盤技術研究開発

渡邊健夫

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 極端紫外線リソグラフィー研究開発センター
〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都3丁目1番2号

要旨

極端紫外線リソグラフィー (extreme ultraviolet lithography: EUVL) 技術は2019年および2020年より、それぞれ7 nm 世代および5 nm 世代のロジックデバイス用量産技術として実用化された。EUVL は従来のリソグラフィーに比べると大きく異なる内容がある。EUV 光のエネルギーは ArF 光に比べて約14倍高いことから、EUV 光のフォトレジストとの光反応は従来とは異なる。このため、EUV 用レジスト特有の技術課題がある。また、この極端紫外線は物質の屈折率がほぼ1であるため、従来のリソグラフィー用の屈折レンズ系および透過型マスクが使用できない。このため、Mo/Si の多層膜を反射面とした反射型光学系や反射型マスクが用いられており、それ故、光学系および EUV マスクに特有の課題がある。

本記事では、EUVL の概要とその必要性、さらなる微細加工技術実現に向けての研究開発の取組について概説する。また、将来の半導体微細加工技術として提案している EUV 光の短波長化 (beyond EUV lithography: BEUVL) についても紹介する。

1. はじめに

半導体の進展はその電子回路の線幅を微細にすることでなされてきた。従来、半導体の用途は大型コンピューター、パーソナルコンピューターであったが、近年はタブレットやスマートフォンに、そしてメタバースやブレイン・イン・インターフェース等の用途に拡がりをみせている。今後は、特にデータセンター用サーバーや車載コンピューターに多くの需要が見込まれている。

リソグラフィー技術は半導体に微細加工技術の中心的な技術であり、リソグラフィーとはギリシャ語の「リトグラフィー」が語源であり、石版に絵や字を描くことを指している。半導体用リソグラフィー技術は半導体回路原版が形成されたマスク原版の像は露光光学系を介し、高純度シリコンウエハ上に塗布した感光性機能性材料であるフォトレジスト (以降、「レジスト」と呼ぶ) に写真焼き付けする技術である。このリソグラフィー技術とエッチング技術によりシリコンウエハ基板上に積層で微細線幅を有する回路を形成することができる。

リソグラフィー技術による微細化はレーリーの式(1)にしたがい、解像度 R の向上を露光波長 λ の短波長化および露光光学系の開口数 NA を大きくすることで実現してきた。ここで、 k_1 はプロセス係数および媒質の屈折率であり、光学系の性能やフォトレジストのプロセス性能で決定される値である。また、 n は媒質の屈折率である。

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} = k_1 \frac{\lambda}{n \sin \theta} \quad (1)$$

半導体の回路の線幅を微細にすることにより、1) 半導体デバイスの集積度の向上、2) 動作速度の向上、3) 消費電力の低減、4) 生産価格の低減を実現できることが最大のメリットである。リソグラフィー技術では式(1)の線幅はウエハ上に形成されるレジストパタンの線幅であり、これを解像度としている。また、この解像度 R はライン・アンド・スペース (L/S) パタンのピッチの半分の値を示す。

線幅と露光波長の変遷を Fig. 1 示す。これまで、縮小投影露光技術は露光波長438 nm の g 線、365 nm の i 線、248 nm の KrF エキシマレーザー、193 nm の ArF エキシマレーザーを経て、13.5 nm の EUV 光を露光光源とするリソグラフィーへと変遷してきている。また、i 線から ArF リソグラフィーは、露光波長の短波長化のみでなく、露光光学系の NA の拡大も行われた。さらに、ArF

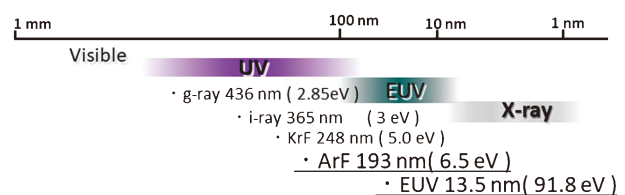


Fig. 1 (Color online) Lithography trend.

リソグラフィーでは、乾式露光から、投影レンズとウエハの空間を水で満たす液浸露光を採用することで、水の屈折率が $n=1.33$ であるため、従来の乾式露光に比べて $NA=1$ を超える開口数を実現して微細加工が進められた。さらに、30 nm 程度の解像性能を実現するため、ArF 液浸リソグラフィーによる多重露光が実用化された。しかしながら、20 nm 以下の解像性能をコストおよび性能面の観点から単層レジストプロセスが適用可能なリソグラフィー技術として、極端紫外線リソグラフィー (Extreme Ultraviolet Lithography: EUVL) 技術の実用化が期待された。この中で、2019年よりスマホ向けの 7 nm 世代 (回路線幅 16 nm) のロジック半導体の製造技術に EUVL が採用され、さらに2020年には 5 nm (回路線幅 10 nm) 世代の製造技術として実用化された。具体的には iPad や iPhone 用の中央演算素子等の半導体微細加工技術に用いられている。ここで半導体の世代を示す数値と実際のパターン線幅が一致していないことに注意しておきたい。これは回路線幅が微細になっても CMOS トランジスタが動作可能にするため、トランジスタ構造の改良がなされ、微細化がその改良後に適用されたため、トランジスタと世代の数値は実際の回路の微細パターン線幅より小さくなっている。

1986年に NTT の研究グループが W/C 多層膜で 11 nm の露光波長により、ステンシル型マスクの金属の薄い板に穴が開いた回路パターンを、シリコンウエハ上のレジスト膜の微小領域に線幅 0.2 μm のパターンを転写した¹⁾。一方、米国では AT&T の研究グループが波長 37.2 nm を用いた Offer 型の露光系を提案した³⁾。その後、Mo/Si 多層膜が成膜された反射型ミラー²⁾を用いた露光光学系および反射型マスクが開発され、NTT のグループ⁴⁾および AT&T の研究グループ⁵⁾はそれぞれ露光波長 14.5 nm で 0.5 μm のパターン形成および露光波長 14 nm で 50 nm のパターン形成を確認した。その後、NTT の研究グループでは半導体用に大面積露光が可能な非球面 2 枚系からなる露光光学系を開発し⁶⁾、これを用いて 0.15 μm の線幅を有するレジストパターン形成を確認した⁷⁾。当時、これらの軟 X 線の波長領

域で反射型縮小露光光学系を用いた露光手法は「X 線縮小露光法」と呼ばれていた。

姫路工業大学 (現、兵庫県立大学) 高度産業科学技術研究所では、1996年より極端紫外線リソグラフィー (extreme ultraviolet lithography: EUVL) の半導体量産適用を目的に本格的な基盤研究開発を開始した⁸⁾。兵庫県立大学高度産業科学技術研究所は国内大学最大の放射光施設「ニュースバル」^{9),10)} (以降、「ニュースバル」と呼ぶ) を保有している。現在、ニュースバルでは 9 本のビームラインが稼働しており、その内 3 本が EUVL 研究開発専用のビームラインとして運営している。

1997年から2000年にかけて、当大学は日立中央研究所およびニコンとの共同研究、並びに ASET の国家プロジェクトにより、EUV 用マスクの回路原版パターンをシリコンウエハ上に 1/5 の縮小倍率で露光波長 13.5 nm で転写可能な、3 枚非球面の反射型露光光学系から構成される EUV 露光装置 ETS-1 (Engineering Test Stand-1) を開発した。この内容を Fig. 2 に示す。この装置を用いて、世界で初めてそれぞれ Fig. 3 (a) に示すように 40 nm の線幅を有する孤立ラインおよびライン・アンド・スペース (line and space: L/S) を有するレジストパターン形成に成功した。その後、1998年より EUVL の国家プロジェクトである ASET から NEDO の再委託を受けて、各学系の鏡筒を低膨張の金属を用いて改良した。この装置を用いて Fig. 3 (b) に示すようにシリコンウエハ上 10 mm \times 10 mm の露光領域で、Fig. 3 (c) および Fig. 3 (d) に示すように、それぞれ 100 nm および 60 nm の線幅を有する L/S のレジストパターン形成を確認した^{11),12)}。これこそ、当初 ASET の目標であった EUVL の半導体製造量産への見通しがたった瞬間であった。2001年にこの研究成果を第 2 回の EUVL 国際ワークショップに口頭発表をしたところ、オランダの ASML 社の開発担当の副社長が興味を持たれ、それが現在の ASML の量産用 EUVL 露光機である NXE シリーズの開発へと繋がっていった。

露光光学系について、斜入射ミラー、フレネルゾーン

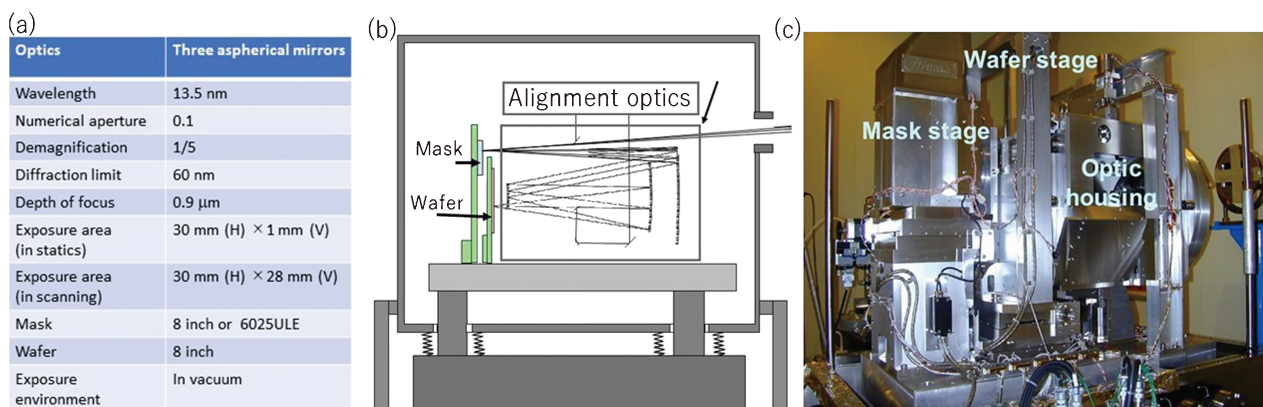


Fig. 2 (Color online) ETS-1 EUV exposure tool (a) specificationL (b) configuration, and (c) photograph.

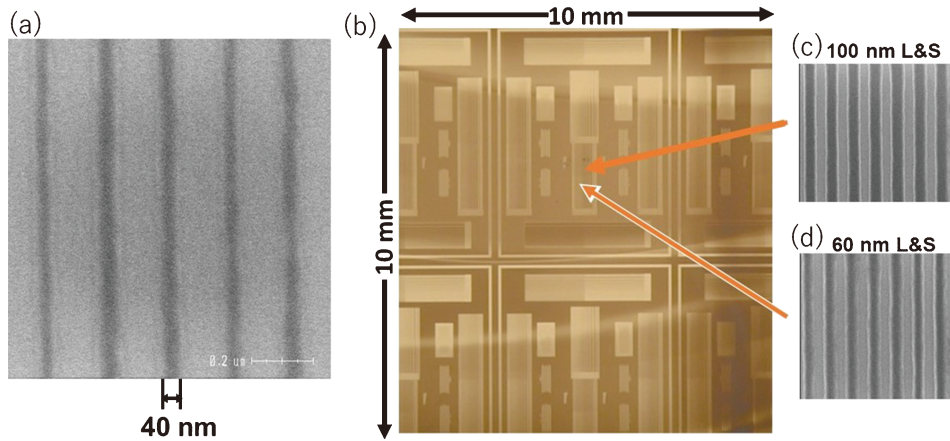


Fig. 3 (Color online) Replicated resist pattern results; (a) 40 nm isolated line, (b) achievement of the large exposure field of 10 mm×10 mm, and (b) 100 nm and (c) 60 nm replicated L&S resist patterns.

2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
EUV light source	EUV light source	Resist	Resist	Resist	Resist	Resist
Resist	Resist	EUV light source	EUV light source	Mask & Pellicle	Mask & Pellicle	Mask & Pellicle
Mask & Pellicle	Mask & Pellicle	Mask & Pellicle	Mask & Pellicle	EUV light source	EUV light source	EUV light source

Fig. 4 (Color online) Trends of technical issues on EUVL.

レート等が検討されたが、収差の低減や大きな露光領域が実現できない等の理由で、多層膜を有する光学系が選択された。また、反射率の高い Mo/Si 多層膜の製造が可能になったことで露光波長が13.5 nm になった経緯がある。

兵庫県立大学では1998年から EUVL の国家プロジェクトである ASET, SELETE, EUVA, EIDEC と約20年間参画および先導し、国内外の企業を含んでのべ300社以上の共同研究を進めてきた。

多くの方々のご理解とご支援の結果、2019年よりスマートフォン用のロジックデバイスである中央演算素子の量産技術として実用化された。私は1993年より EUVL の基盤研究に携わり、漸く量産技術に至るまで開発を進めてきた。リソグラフィー技術は半導体の前工程の技術である。半導体の IRDS 国際ロードマップでは、今後も微細加工技術が必要とされており、これに加えて後工程の3次元実装も開発が進められている。このロードマップでは0.7 nm 世代（回路線幅 8 nm）まで EUV リソグラフィーが適用される。

EUVL 技術課題の優先順位の変遷を Fig. 4 に示す。2019年より半導体製造ラインで実用化されたが、今後の微細加工技術に向けた技術課題の優先順位の高い順に、1) レジスト材料・プロセス開発、2) 欠陥検査技術およびマスクの保護膜であるペリクルを含むマスク技術開発、3) 光源技術開発である。長らく EUV 光源開発の中で高

パワーおよびその高い安定性が実現できなかったが、2018年に米国の Cymer 社が中間集光点において高い安定性で250 Wを実現した。現在は、Cymer 社と日本の Gigaphoton 社で開発競争が繰り広げられている。

2章では上記した技術開発に向けたニュースバルでの取組を、3章では今後の半導体微細加工技術の進展について紹介する。また、第4章では日本の半導体復興について言及する。

2. ニュースバルでの研究内容

2.1 レジスト

EUVL の技術課題の中で最も高い優先順位である EUV レジストの要求仕様は1) 10 nm 以下の解像性能、2) 目標解像度の1/10以下の LWR (line edge roughness)、3) 15 mJ/cm² 以下の露光感度である。これらは相反関係にあるので、これらの関係は“RLS trade off”と呼ばれている。

半導体リソグラフィーは製造コストを低減するためには、一時間あたりのウエハ処理枚数の向上が必須となっており、高感度なフォトレジスト（以降、レジストと呼ぶ）の開発が要求されている。ニュースバルでレジストの感度測定は、BL03ビームラインで現在の露光装置と同じ7回反射系を用いることで、実露光波長スペクトルで感度評価

が可能な照射系を用いて進めている¹³⁾。一方、高感度レジストの開発は軟X線吸収分光の全電子収量法を用いたEUV光照射による反応解析を材料開発にフィードバックすることで進められている¹⁴⁻¹⁸⁾。

RLS trade offの中では、LWRが最も優先順位が高い。LWRが大きいと回路の寄生抵抗のバラツキが大きくなるため、動作速度のバラツキも大きくなる。そこで、例えばメモリの場合にはメモリセルの読み出し回路や書き込み回路のクロック周波数を遅くする必要があり、微細化のメリットがなくなる。LWRはEUV光露光での反応がばらつくことで起こる。このため、統計的バラツキを即ち“stochastic”を抑える必要があり、この要因はとして、1) レジスト中の基材の空間分布のバラツキ、2) レジストプロセス条件の制御が十分でない、3) 露光時のショットノイズ、4) 残留溶媒、現像、リンスによる影響、並びに5) out of band (OoB) 光による影響が挙げられる。この中で基本的かつ十分に考慮されていないのが1) レジスト中の化学構成物の空間分布および5) のOoB (out of band) である。この内、ショットノイズによる影響は約0.7 nm程度であり、現状のLWRが3-4 nm程度であることから、レジスト材料・プロセスおよびOoB光による影響が支配的である。

LWRと解像度評価を目的にEUV光による2光束干渉露光系¹⁹⁾の構築を進め^{20,21)}、マスクおよび光学系のエラーが無い状況でレジスト評価を可能にし、評価を進めている。

1) の内容について、これまで感光性材料内包型レジストを開発し、レジスト薄膜フィルム内の感光剤の濃度均一

性を図り、LWRの低減が可能なことを実証した²²⁾。このことから、レジスト構成物質の濃度分布評価を目的に、透過による軟X線共鳴散乱(RSoXS: resonant soft X-ray scattering)法を用いて評価を進め、ニュースパルのBL10の偏向電磁石を光源とするビームラインに測定系を構築した²³⁾。この測定の実原理はFig. 5に示す。軟X線吸収分光を用いるとレジストの構成物の元素のK殻の電子が有する吸収エネルギースペクトルが測定でき(Fig. 5(a))、吸収ピークから原子の結合状態が分かる。これらの吸収ピークはレジストを構成する材料の結合を表している。この吸収ピークを与えるエネルギーを有するX線を照射して散乱測定を行うと(Fig. 5(b))、その結合の散乱画像を真空対応CCDカメラで取得でき(Fig. 5(c))、式(2)を用いて散乱ベクトルが計算できる。大きな構成粒子からの散乱角は小さく散乱ベクトルは小さくなり、その散乱強度が強い。一方、小さな構成粒子の散乱角は大きく散乱ベクトルは大きくなり、その散乱強度が弱くなる。その結果、レジストの構成物質の結合の散乱ベクトルのプロファイルと比較することで、レジスト構成物の濃度均一性を評価できる(Fig. 5(d))。この評価系により、分布の大きいレジストと小さいレジストの探索を進めている^{23,24)}。

EUVLの光源として採用されているのがレーザープラズマX線源である。この光源ではEUV光以外に深紫外線も発光するため、この光をOoB光と呼ばれており、OoB光はレジストに感光する。マスクパターンを忠実に転写したレジスト領域EUV光の照射領域と未照射領域の全てにOoB光が照射されると、この2つの領域の境目でレ

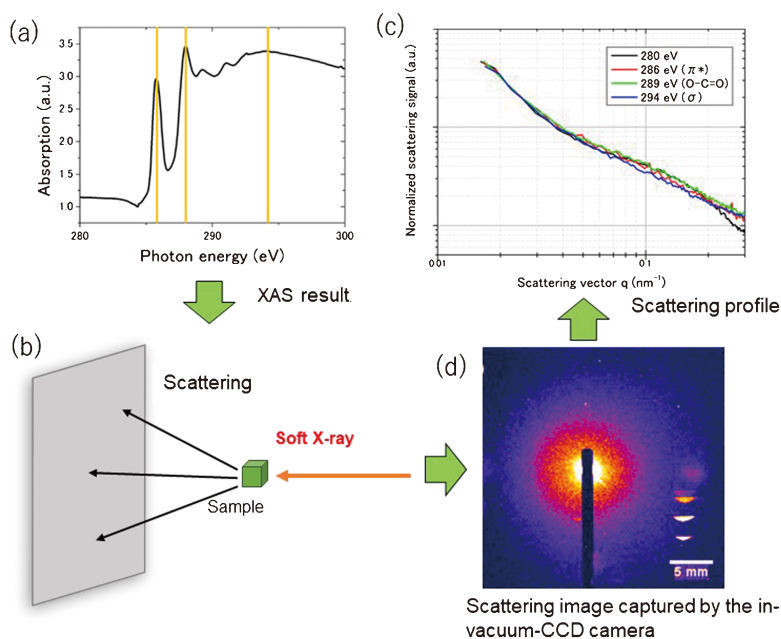


Fig. 5 (Color online) Configuration of the resonant soft X-ray Scattering (RSoXS) method; (a) selection of the X-ray photon energy by the soft X-ray absorption spectrum, (b) scattering experiment, (c) scattering-image observation by CCD camera in-vacuum CCD camera; (d) observation of RSoXS profile.

ジストパタンのボケが発生をし、LWRが悪化する。このため、マスクを構成する材料である Mo/Si 多層膜、TaN 吸収体等の OoB 光の反射率の評価をする必要があった。そこで、ニュースパルの BL03B ビームラインで EUV および OoB 光による反射率評価が可能な装置を構築し、反射率評価を進めてきた²⁵⁾。Fig. 6 および Fig. 7 にそれぞれ装置の概要および反射率スペクトルを示す。OoB 光の Mo/Si 多層マスク反射率および TaN 吸収体の反射率は約 30%であった。また、EUV 光の Mo/Si 多層膜反射率スペクトルのバンド幅に比べて OoB 光のバンド幅が極めて大きい。このため、OoB 光強度およびその影響を低減する必要のあることを示している。

2.2 マスクおよびペリクル

EUV マスクの断面構造は 3 次元構造を有しており、超低膨張な合成石英基板 (ULE6025) レチクル上に Mo/Si 多層膜、その上に TaN 吸収体で半導体回路パターンが形成されている。この回路パターンは電子線リソグラフィおよびドライエッチングの工程により形成されている。

マスクに欠陥があると、レジストパターンを転写した際に、回路が繋がったり、回路が途切れたりしたようなパターンが形成され、金属配線がショートや断線するという結果をもたらすことになる。このため、無欠陥マスクが要求されている。

EUV マスクの欠陥は強度欠陥および位相欠陥に大別され、それぞれ Fig. 8 (a) および (b) に示す。強度欠陥は吸収体や多層膜の欠けに起因する。一方、位相欠陥は ULE6025 の傷や多層膜中の異物に起因するものであり、多層膜構造の層構造の乱れにより局部的に反射率が低下したことによる欠陥である。特に、位相欠陥の検出には実露光波長 13.5 nm を用いることが必須となる。そこで、ニュースパル BL03A ビームラインに EUV 明視野顕微鏡を構築した²⁶⁾。この装置の概要、写真、仕様をそれぞれ Fig. 9 (a), (b), (c) に示す。この装置では、マスク像を NA0.3 のシュバルツシルド光学系による 30 倍に拡大し、その光

の像を CSI 光电変換面で電子の情報に変換後、電磁レンズで 200 倍まで拡大、マクロチャネルプレートで光学像に変換して、CCD カメラに最大倍率 6,000 倍で記録する装置である。この装置を用いることで、世界ではじめて Mo/Si 多層膜中の位相欠陥の検出に成功した。EUV マスクの 150 nm L/S の吸収体パターン像と断面構造の概要、並びに強度欠陥と位相欠陥像の断面構造の概要を、それぞれ Fig. 10 (a) と (b)、並びに (c) と (d) に示す。EUV マスクの 150 nm L/S の吸収体パターンは EUV 露光機によりウエハ上に

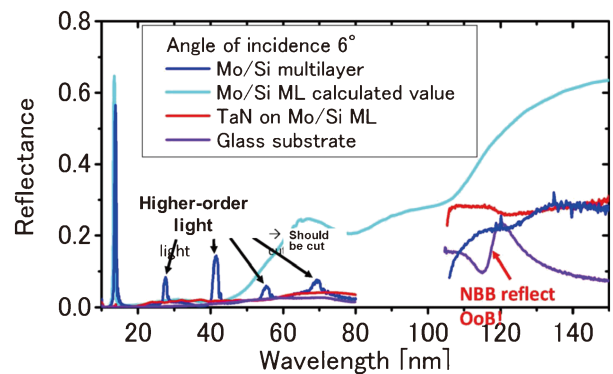


Fig. 7 (Color online) Measurement results of the reflectance spectra of EUV and OoB lights region.

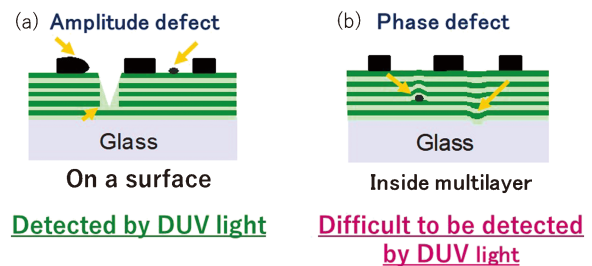


Fig. 8 (Color online) Crosssectional structure of EUV mask with defects such as (a) amplitude and (b) phase defects.

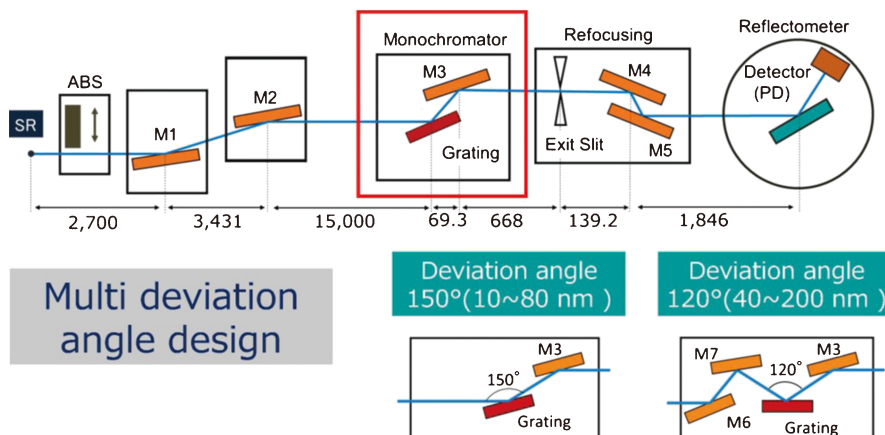


Fig. 6 (Color online) Configuration of the reflectance spectra measurement of EUV and OoB lights region.

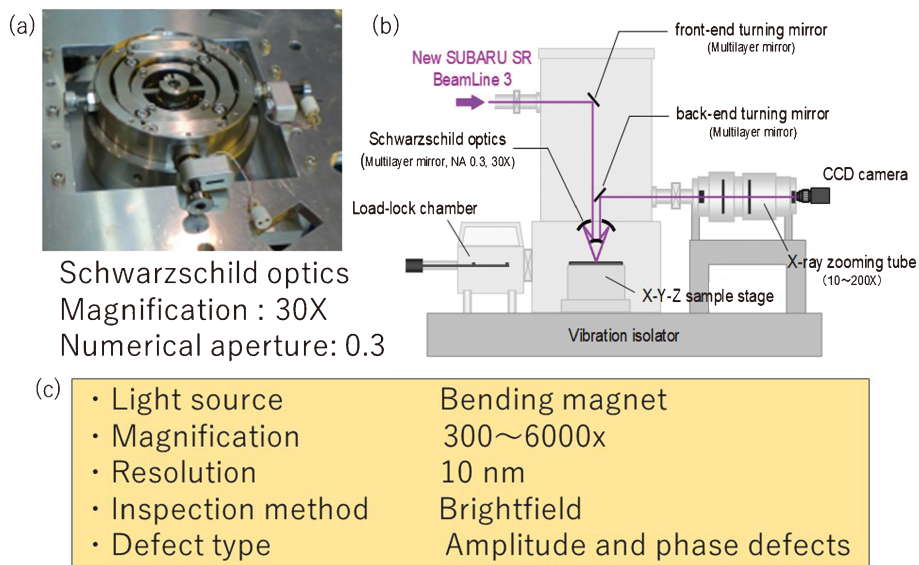


Fig. 9 (Color online) Bright-field-EUV microscope for the defect inspection; (a) photograph of the magnification optical barrel for the Schwarzschild optics, and (c) specification of the EUV microscope.

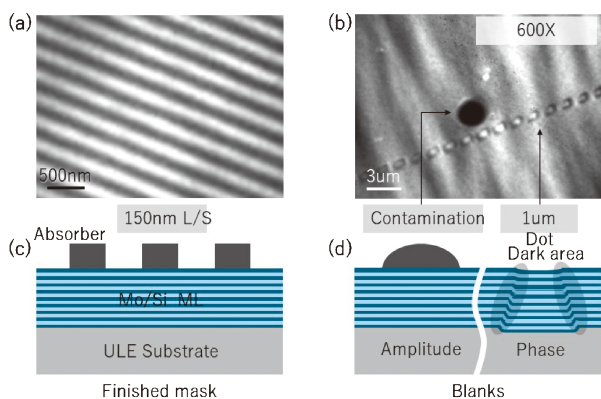


Fig. 10 Observation results of the bright-field-EUV microscope; (a) photograph of the 150-nm-L/S-absorber pattern, and (b) configuration of its cross-sectional structure, and (c) photograph of amplitude and phase defects and (d) configuration of its cross-sectional structure.

1/4に縮小投影される。このため、ウエハ上に約38 nmのL/Sを有するレジストパターンとして転写される。Fig. 10 (b)のマスク上に3 µmの異物が強度欠陥として観測される。また、Fig. 10 (b)に示すプログラム位相欠陥は、マスク基板 ULE6025 ガラスレチクルの表面に形成された1 µm角の大きさの凹のプログラム欠陥上に、Mo/Si 多層膜がスパッタ法により成膜されると欠陥周囲で多層膜が乱れるため、ブラッグの反射条件を満足できないため、欠陥として観測される²⁷⁾。

さらに、この装置を用いて、欠陥の大きさと高さでマスク欠陥がウエハ上に転写される領域とされない領域が存在することを明らかにした²⁸⁾。この欠陥の高さおよび大きさの関係とその閾値を Fig. 11に示す。

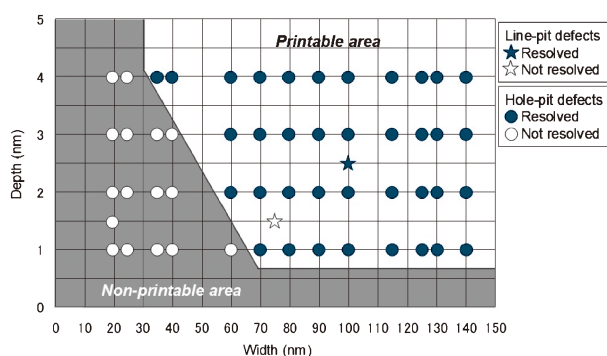


Fig. 11 Threshold of programmed-defect thickness and height between the defect printable and non-printable region.

マスク欠陥の全面検査は4時間以下で行うことが要求されている。EUV 明視野顕微鏡を用いた場合には100 W以上の EUV 光源パワーが要求される。

マスク欠陥の大きさのみでなく高さの評価を目的に、コヒーレント EUV スキャトロメトリ顕微鏡の開発を進めてきた²⁹⁾。この顕微鏡の概要を Fig. 12 (a)に示す。EUV 光をピンホールでコヒーレントな光に再構成をし、これを折り返しミラーでマスク上に照射する。当初はこのピンホールを用いないでマスクに照射していたが、フレネルゾーンプレートを用いることで EUV 光がφ140 nmの大きさにマスク面上に集光し、微小な領域でのマスク欠陥の観測可能になった³⁰⁾。この意味で、この装置は「µ コヒーレント EUV スキャトロメトリ顕微鏡」と呼んでいる。この装置を用いて観測したマスクの自然欠陥の観測結果を Fig. 12 (b)に示す³¹⁾。この欠陥は大きさが33 nm×28 nmで高さが1.7 nmの凸欠陥の観察結果である。この装置の理論上

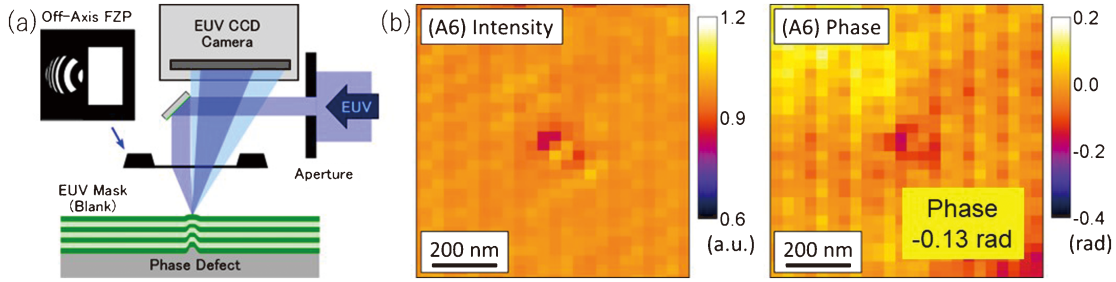


Fig. 12 (Color online) (a) Optical setup of the EUV-coherent-scatterometry microscope, observation results of (b) intensity and (c) phase mapping for the natural bump-type-defect of $33 \times 28 \text{ nm}^2$ in size and 1.7 nm in height.

の空間分解能は10 nm 以下である。

ASMLの量産用露光装置であるNXEシリーズは真空装置内に炭素系ガスによるカーボンコンタミネーションを防ぐ目的で水素を導入している。EUV光の強度および水素導入圧力によるカーボンコンタミネーション除去条件を調べるため、高強度EUV光による評価系の開発をニュースパルの10.8 m長の長尺アンジュレータビームラインBL09で進めてきた³²⁻³⁴。ここでは特にペリクル膜の水素脆性の評価を進めている。

3. 今後の微細加工の展開

IEDM (International electron device meeting) では半導体メーカーを中心に暫くは微細加工技術が継続するとしている。現在はNA=0.33のEUVLの単層レジストプロセスが主流であるが、多重露光については将来導入されるまたは既に導入済みかの何れかである。2025年にはNA 0.55のHigh NAによるEUVLが導入されることになっており、0.7 nm世代(回路線幅8 nm)を有するパターン形成を目指している。

IRDS(International Roadmap for Devices and Systems) 2021国際ロードマップによると、2034年から最小線幅の

形成に加えて、最小線幅による高アスペクトなパターン形成が要求され、非常に難易度の高いパターン形成技術開発が迫られている。

一方で、さらなる微細加工を展開するために、単層レジストプロセスが適用できる波長6.7 nmの短波長EUV光を用いたBEUV (beyond EUV) リソグラフィーの可能性についても検討を進めている^{35,36}。Fig. 13およびFig. 14にそれぞれレジスト材料の構成材料に用いられる元素の原子吸断面積およびLaB多層膜の反射率スペクトルを示す。Fig. 13は有機材料よりも金属を含有するレジストの方がEUV光照射による2次電子の発生効率が高いためより高感度が実現できる可能性を示唆している。また、Fig. 14からLa系の多層膜を基本とする多層膜であれば、Mo/Si多層膜よりも高い反射率得られることから、バンド幅が1%程度でありEUVLにそれに比べると約1/4程度になることから、EUV光源に比べて高強度なBEUV光源の開発が必須となる。BEUV光源として有力な光源の自由電子レーザー (BEUV-FEL) は、最先端の加速器技術により実現できると考えている。

兵庫県立大学では3年前からBEUVLの基盤技術開発を進めている。BEUVLの基盤技術開発はEUVLで培った基盤技術を提供できる範囲が広く、EUVLの実用化に

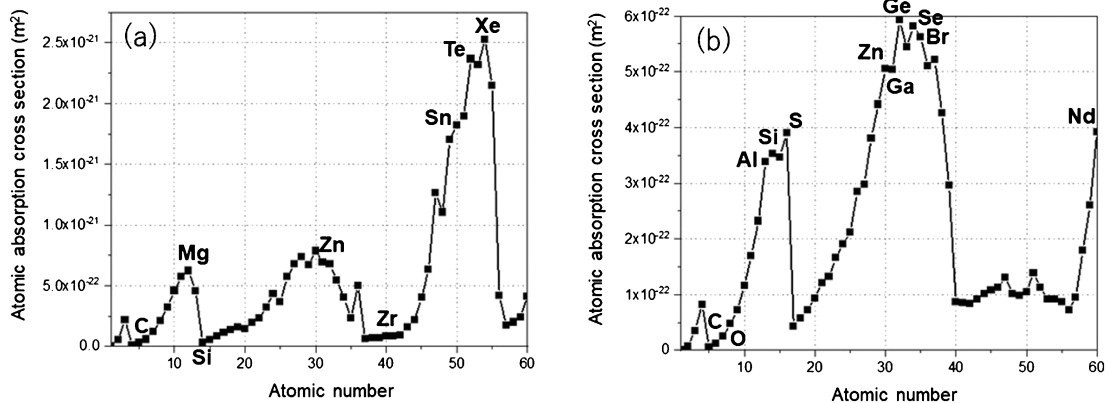


Fig. 13 Atomic absorption cross section of the element for photo resists (a) at the EUV wavelength of 13.5 nm and (b) the BEUV wavelength of 6.7 nm.

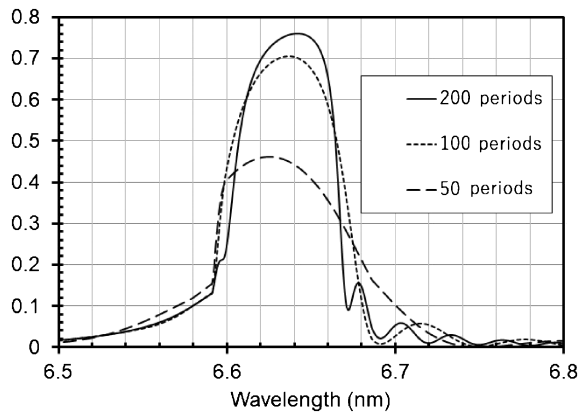


Fig. 14 Computation reflectance spectrum of LaB multilayer

は約30年かかったが、2030年以降の3 nm 線幅形成に向けてBEUVLの実用化を目指し開発を進めている。

4. 日本の半導体復興について

Fig. 15に半導体市場の変遷を示す。世界半導体市場統計³⁷⁾によると2021年には50兆円市場に拡大しており、2030年には100兆円に迫る勢いで市場の拡大が予想されている。日本の通常国家予算規模が約109兆円であり、これに匹敵する市場規模にまで成長することになる。このような状況の中で、韓国・台湾が20%、日本および中国が15%で、70%が東南アジアに集中している。この半導体市場を支えているのが日本企業であり、半導体装置および半導体材料では大きな市場シェアを確保している。

日本の半導体市場では、1980年代後半は世界の約50%以上のシェアを取っていたのが、2021年で10%足らずになっており、このままでは2030年には1%程度になると予測されている。日本の半導体市場規模はほぼ横ばいで、世

界の半導体市場が拡大しているため、市場の占有率が低くなっている。これには種々の要因が重なった結果であると分析されているが、世界の半導体市場の伸びの予測を誤ったことが大きな要因である。

今後は半導体製造装置および半導体材料分野のさらなる進展を図るとともに、日本経済のさらなる浮揚を目的に日本の半導体市場の拡大が必要である。このため、半導体・コンピューター・通信が三位一体ではあるが、日本国内の半導体ニーズを掘り起こすことができるビジネスモデルを構築する必要がある。併せて、日本の経済安全保障を考えると半導体技術のさらなる躍進をする必要があり、半導体経済政策および半導体技術開発が同期しなければならない。以上の内容を鑑み、日本の半導体復興を実現するには、1) 日本の半導体の需要を高めるためのビジネスモデルの構築、2) 1)に基づく先端半導体生産拠点および環境の整備に5兆円規模の投資、3) 詰め込み教育から、個性・個々の考え重んじた考えさせる教育への転換が必要である。この中でビジネスモデルの構築で最も有用なのは、半導体業界のみでなく、自動車業界、医療・薬品業界、各種サービス業界等の業界全体で儲けが出せるような施策の実行が必要である。そのため、経済産業省、企業、大学がタッグを組んで業界全体で儲ける具体的な施策を実行することで、長期的に個々の利益を確保することができ、その結果として日本経済の揺るぎない復興を可能にする。

5. まとめ

2019年よりスマホ向けの7 nm 世代のロジック半導体の製造技術にEUVLが採用され、さらに2020年には5 nm 世代の製造技術として実用化された。具体的にはiPadやiPhone用の中央演算素子等の半導体微細加工技術に用いられている。

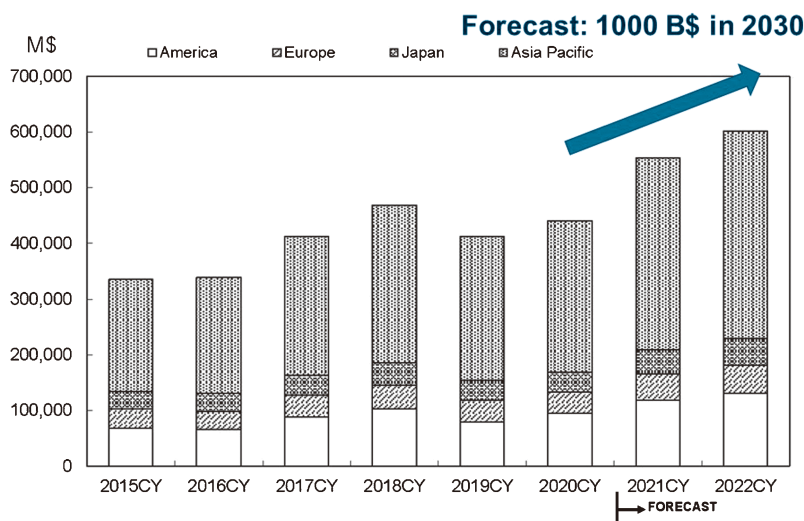


Fig. 15 World semiconductor market statistics.

IRDS 国際ロードマップでは0.7 nm 世代（回路線幅 8 nm）のデバイスの制作にも EUVL が用いられることになっているが、レジスト、マスク、ペリクルに関する技術課題が数多く残っており、現在、国内外の多くの企業との共同研究でそれらの開発を進めている。

また、3 nm の回路線幅形成実現に向けて、13.5 nm の EUV 波長の約 1/2 の 6.7 nm 波長を有する BEUVL の基盤技術開発を進めている。

日本の半導体装置分野や半導体用材料は世界の中でも高い技術を持っており、これらの日本企業は世界の半導体製造に大きく貢献している。今後はこれらの分野の発展に貢献するとともに、日本経済のさらなる浮揚を目的に日本の半導体市場の拡大が必要である。

日本の半導体復興は日本経済の発展に大きく関係しているのは勿論であるが、今後のさらなる日本経済の発展を担保するために、半導体業界のみでなく、自動車業界、医療・薬品業界、各種サービス業界等の全体の業界で儲けが出せるような施策の実行が必要である。このため、日本国内において半導体需要を確保し、業界全体で儲ける具体的な施策を、経済産業省、企業、大学とタッグを組んで実行することで、長期的に個々の利益を確保することができ、その結果、日本経済の確実な発展を可能にする。

参考文献

- H. Kinoshita, T. Kaneko, H. Takei, N. Takeuchi and S. Ishihara: Presented at the 47th Autumn Meeting of the Japan Society of Applied Physics, Paper No. 28-ZF-15, 322 (1986).
- W. T. Silfvast and O. R. Wood II: *Microelectron. Eng.* **8**, 3 (1988).
- T. W. Barbee, S. Mrowka and M. C. Hettrick: *Applied Optics* **24**, 883 (1985).
- H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii: *J. Vac. Sci. Technol.* **B7**, 1648 (1989).
- J. E. Bjorkholm, J. Boker, L. Eichner, R.R. Freeman, J. Gregus, T. E. Jewell, W. M. Mansfield, A. A. MacDowell, E. L. Raab, W. T. Silfvast, J. H. Szeto, D. M. Tennant, W. K. Waskiewicz, D. L. White, D. L. Windt, O. R. Wood II and J. H. Bruning: *J. Vac. Sci. Technol.* **B8**, 1509 (1990).
- K. Kurihara, H. Kinoshita, T. Mizota, T. Haga and Y. Torii: *J. Vac. Sci. Technol.* **B9**, 3189 (1991).
- T. Haga, M. C. K. Tinone, H. Takenaka and H. Kinoshita: *Microelectronic Engineering* **30**, 179 (1996).
- T. Watanabe, K. Mashima, M. Niibe and H. Kinoshita: *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 7597 (1997).
- A. Ando, S. Amano, S. Hashimoto, H. Kinoshita, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, M. Terasawa and T. Watanabe: *Proc. of the 1997 Particle Accelerator Conference*, 757 (1998).
- S. Hashimoto, A. Ando, S. Amano, Y. Haruyama, T. Hattori, J. Kanda, H. Kinoshita, S. Matsui, H. Mekar, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, Y. Utsumi, T. Watanabe and H. Tsubakino: *Trans. Materials Research Soc. Japan* **26**, 783 (2001).
- T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, Y. Li, K. Hamamoto, T. Oshino, K. Sugisaki, K. Murakami, S. Irie, S. Shirayone, Y. Gomei and S. Okazaki: *J. Vac. Sci. Technol.* **B18**, 2905 (2000).
- T. Watanabe, H. Kinoshita, K. Hamamoto, M. Hosoya, T. Shoki, H. Hada, H. Komano and S. Okazaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **41**, 4105 (2002).
- T. Watanabe, H. Kinoshita, N. Sakaya, T. Shoki and S. Y. Lee: *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, 5556 (2005).
- T. Watanabe, Y. Haruyama, D. Shiono, K. Emura, T. Urayama, T. Harada and H. Kinoshita: *J. Photopolymer Sci. Technol.* **25**, 569 (2012).
- T. Watanabe, K. Emura, Y. Haruyama, T. Harada, Y. Muramatsu, H. Kinoshita, D. Shiono, K. Ohmori and K. Sato: *Micro/Nano Lithography*, SPIE Newsroom, 2 (2013).
- T. Watanabe, K. Emura, D. Shiono, Y. Haruyama, Y. Muramatsu, K. Ohmori, K. Sato, T. Harada and H. Kinoshita: *J. Photopolym. Sci. Technol.* **26**, 635 (2013).
- K. Emura, T. Watanabe, M. Yamaguchi, H. Tanino, T. Fukui, D. Shiono, Y. Haruyama, Y. Muramatsu, K. Ohmori, K. Sato, T. Harada and H. Kinoshita: *J. Photopolym. Sci. Technol.* **27**, 631 (2014).
- M. Kuki, T. Uemura, M. Yamaguchi, T. Harada, T. Watanabe, Y. Muramatsu and H. Kinoshita: *J. Photopolym. Sci. Technol.* **28**, 531 (2015).
- H. H. Solak: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, R171 (2006).
- T. Urayama, T. Watanabe, Y. Yamaguchi, N. Matsuda, Y. Fukushima, T. Iguchi, T. Harada and H. Kinoshita: *J. Photopolymer Sci. Technol.* **24**, 155 (2011).
- M. Yoshifuji, S. Niihara, T. Harada and T. Watanabe: *J. Photopolym. Sci. Technol.* **31**, 215 (2018).
- T. Watanabe, Y. Fukushima, H. Shiotani, M. Hayakawa, S. Ogi, Y. Endo, T. Yamanaka, S. Yusa and H. Kinoshita: *J. Photopolym. Sci. Technol.* **19**, 521 (2006).
- J. Tanaka, T. Ishiguro, T. Harada and T. Watanabe: *J. Photopolym. Sci. Technol.* **32**, 327 (2019).
- J. Tanaka, T. Ishiguro, T. Harada and T. Watanabe: *J. Photopolym. Sci. Technol.* **33**, 491 (2020).
- K. Tsuda, T. Harada and T. Watanabe: *Proc. SPIE* **11148**, 111481N (2019).
- T. Watanabe, T. Haga, T. Shoki, K. Hamamoto, S. Takada, N. Kazui, S. Kakunai, H. Tsubkino and H. Kinoshita: *Proc. SPIE* **5130**, 1005 (2003).
- K. Hamamoto, Y. Tanaka, T. Yoshizumi, N. Hosokawa, N. Sakaya, M. Hosoya, T. Shoki, T. Watanabe and H. Kinoshita: *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 5378 (2006).
- H. Kinoshita, T. Yoshizumi, M. Osugi, J. Kishimoto, T. Sugiyama, T. Uno and T. Watanabe: *Microelectronic Engineering* **86**, 505 (2009).
- T. Harada, J. Kishimoto, T. Watanabe, H. Kinoshita and D. G. Lee: *J. Vac. Sci. Technol.* **B27**, 3203 (2009).
- T. Harada, Y. Tanaka, T. Watanabe, H. Kinoshita, Y. Usui and T. Amano: *J. Vac. Sci. Technol.* **B31**, 06F605 (2013).
- H. Hashimoto, T. Harada and T. Watanabe: *Proc. SPIE* **9985**, 99850K (2016).
- T. Watanabe and T. Harada: *Proceedings of EUVL International Workshop 2020*.
- T. Harada, S. Yamakawa, M. Toyoda and T. Watanabe: *Jpn. J. Appl. Phys.* **60**, 087005 (2021).
- T. Harada, A. Ohgata, S. Yamakawa and T. Watanabe: *Proc. SPIE* **11908**, 119080U (2021).
- T. Watanabe, T. Harada and S. Yamakawa: *J. Photopolym. Sci. Technol.* **34**, 49 (2020).
- T. Fujii, S. Yamakawa, T. Harada and T. Watanabe: *Proc. SPIE* **11908**, 119080T (2021).
- <https://www.jeita.or.jp/japanese/stat/wsts/docs/20211130WSTS.pdf>

著者紹介



渡邊健夫

兵庫県立大学 学長特別補佐（先端科学技術・異分野融合研究推進）、高度産業科学技術研究所長特別補佐、極端紫外線リソグラフィ研究開発センター長、教授

E-mail: takeo@lasti.u-hyogo.ac.jp

専門：半導体微細加工、放射光科学

【略歴】

1990年大阪市立大学大学院理学研究科物理学専攻博士後期課程修了，理学博士。

1990年シャープ株式会社中央研究所入社。

1996年姫路工業大学（現 兵庫県立大学）

高度産業科学技術研究所助手。2015年兵

庫県立大学高度産業科学技術研究所教授。

2016年同大学同研究所長。2022年より現

職。

Research and development of basic technologies for EUV lithography using synchrotron radiation

Takeo WATANABE Center for EUVL, Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, Special Assistant to Dean, University of Hyogo, 3-1-2, Kouto, Kamigori, Akou-gun, Hyogo 678-1205, Japan

Abstract Extreme ultraviolet lithography (EUVL) technology has been used for mass productions of 7-nm generation and 5-nm generation logic devices from 2019 and 2020, respectively. EUVL has significantly different contents compared to the conventional lithography. Since the energy of EUV light is approximately 14 times higher than that of ArF light, the photoreaction of EUV light with the photoresist is different from the conventional one. Therefore, there is a technical issues peculiar on the material and processing of EUV resists. Furthermore, since the refractive index of the substance of this extreme ultraviolet light is almost 1, the conventional refraction lens system for lithography and the transmissive mask cannot be used. For this reason, a reflective optical system or a reflective mask having a Mo / Si multilayer film as a reflective surface is used, and therefore, there are problems peculiar to the optical system and the EUV mask.

This article outlines EUVL, its necessity, and research and development efforts toward the realization of further microfabrication technology. We will also introduce the shortened wavelength of EUV light (beyond EUV lithography: BEUVL), which is being proposed as a future semiconductor microfabrication technology.