特　集　記　事

極端紫外線リソグラフィーの現状・課題・今後の展開

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所　渡邊 健夫*

Extreme ultraviolet lithography (EUVL) is expected as a next-generation mass production technology for the fabrication of semiconductor electronic devices. Challenges for mass production of this technology are development of light sources, resists, pellicles for masks, and defect-free masks. In this paper, the current status, technical issues, and future development of EUVL technology are described. In recent years, the power of the light source has been improved, and in 2017 it realized 250 W at the intermediate focus position, using this light source in the exposure equipment of NXE:3400B at the headquarters factory of AMSL, it is achieved the throughput of 125 wafers per hour for 12 inches wafers. As a result, the momentum to apply it to mass production for logic devices has increased, and it is scheduled to be used as high volume mass production technology for semiconductor chips around 2019.

Keywords: lithography, EUVL, resist, source, mask

1　はじめに

Figure 1 に示すように世界半導体市場統計[1] によると 2017 年の電子デバイス全般の市場は 4122 億ドルであり 2016 年に比べて約 21.6 % の成長をしており，2020 年には 4500 億ドルに迫る勢いとなっている．この中で国産メーカーが 1 社になっていることは寂しい限りであるが，この半導体市場の成長は IT 産業や近年の IoT（Internet of Things）の進展に支えられており，そこに用いられている中央演算素子（Micro Processing Unit: MPU）やメモリ等の超高集積回路（ULSI）製造技術が市場を牽引している．この ULSI の先端技術は半導体微細加工技術によって支えられており，半導体微細加工技術は依然重要な半導体製造の基幹技術である．SEMATECH が中心に纏めてきた半導体国際ロードマップ（International Technology Roadmap for Semiconductor: ITRS）に従い，ULSI は MPU，DRAM（Dynamic Random Access Memory），並びに NAND 型 FLASH メモリ等の技術開発を中心に技術が進展してきた．現在では微細加工が中心であった ITRS に代わり，IEEE が中心に纏めている新規半導体国際ロードマップである International Roadmap for Devices and Systems（IRDS）が提案されている[2]．このロードマップは電子デバイスやこれを用いたシステム応用の下流側から製造プロセスの上流側に向けて，半導体のロードマップが纏められている．最初のバージョンは 2016 年にリリースされており，最近 2017 年版がリリースされた．

半導体微細加工技術であるリソグラフィー技術は所謂写真焼き付け技術であり，ULSI の回路パタンが形成されたマスクの原版パタンを縮小露光光学系によりシリコンウェハの上に形成した感光剤樹脂であるレジストに縮小転写する手法を採用しており，この技術が縮小投影方式のリソグラフィー技術である．一般的にこの方式ではレジストに転写されるパタンの最小寸法は露光波長程度でありレーリーの式（$R = k_1\lambda/NA$）で表記され，形成されるレジストパタン寸法 R は露光波

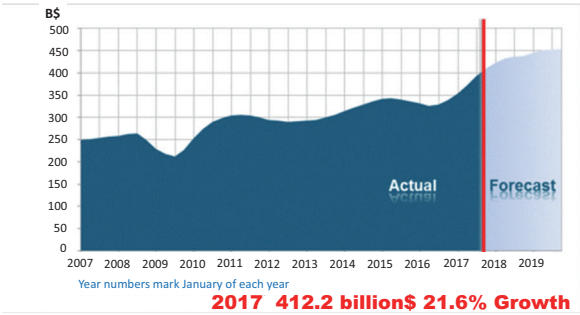

Figure 1.　World semiconductor trade statistics.

Current status, technical issues, and prospect for EUV Lithography
Takeo Watanabe* (*Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo*),
〒678–1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 3–1–2
TEL: 0791–58–2546, E-mail: takeo@lasti.u-hyogo.ac.jp

長 λ に比例し，縮小露光学系の開口数 NA に反比例する．ここで，比例定数はプロセス定数 k_1 を示す．これまで，微細加工技術は波長の短波長化や縮小露光光学系の開口数の増大化，ならびに位相シフトマスクや変形照明系を用いた超解像技術にプロセス定数 k_1 を小さくすることでリソグラフィーの解像性能を向上させて，この技術の延命を図ってきた．リソグラフィーの露光光源は，波長 438 nm の g 線，365 nm の i 線，248 nm の KrF エキシマレーザー，並びに 193 nm の ArF エキシマレーザーの順に量産に適応されており，このように露光の短波長化により微細なパタン形成を実現してきた．さらに，40 nm のパタン形成では，従来のリソグラフィーでは実現が困難であったため，ArF 液浸リソグラフィーが使われている．一般に縮小露光光学系の開口数 NA は $NA = n \sin\theta$ で表記される．ここで，n および θ はそれぞれ物質中の屈折率および光軸上の物体が入射するレンズの開口角を示している．そこで液浸露光方式は半導体露光装置のレンズとシリコンウェハとの間を，空気（屈折率 1.00）よりも屈折率の高い純水（屈折率 1.33）で満たすことで，純水自体をレンズのように作用させることで実効的に開口数を 1 よりも大きくすることができ，線幅 40 nm のパタン形成が可能になった．その後，線幅 40 nm 以下のパタン形成が要求され，ArF 液浸リソグラフィーによる多重露光技術が考案された．この方式ではリソグラフィーに加えて成膜技術とドライエッチング技術が多重露光の回数分行われており，多重露光の回数を増やすことでより微細なパタン形成が可能になった．しかしながら，リソグラフィーに加えて成膜とエッチングの各プロセスを多重露光の回数分繰り返すためにプロセスの複雑化を招き，従来の単層レジストプロセスに比べて製造コストアップが大きな課題となっている．

そこで，16 nm 以降のパタン形成ではプロセスの工程が単純で安価な単層レジストプロセスが可能な極端紫外線リソグラフィー[3]（Extreme Ultraviolet Lithography; EUVL）技術が次の半導体微細加工技術としての量産技術として最も期待されており，幾つかの半導体デバイスメーカーが 2019 年から半導体量産技術として使用することになっている．

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所はニュースバル放射光施設を有しており，この施設は国内で大学が保有する放射光施設では最大の施設である．2000 年に供用を開始して以来，EUVL の研究開発を進めてきた．Figure 2 に示すように稼働している 9 本のビームラインの内 BL03，BL09，BL10 の 3 本のビームラインが EUVL 技術開発専用のビームラインであり，これらのビームラインのエンドステーションには only one の装置を開発・設置を進めてきた．そして，これらの装置群を用いて特に共同研究や受託研究を通じて産業支援を精力的に推進している．EUV マスクの研究では，広視野 EUV 顕微鏡[4] および EUV コヒーレントスキャトロメトリ顕微鏡による欠陥検査[5,6] の開発を進めてきた．また，レーザー励起プラズマ (LPP) 方式の EUV 光源パワーの向上を目的に，新たに開発した大型反射率系による EUV 光源用大型ミラーの反射率評価[7] を進めている．EUV レジストの研究では，大面積露光による解像度評価[8,9]，EUV 干渉露光系による 10 nm 級のパタン形成・評価[10]，アウトガス評価[11–14]，新規 EUV レジスト開発[15–17]，軟 X 線吸収分光によるレジストの反応解析[18,19]，並びにレジストの透過率測定系[20] の開発を進めてきた．また，このようにニュースバルでの研究を通じて，日本の半導体技術開発分野に優位に立っているレジストおよびマスクの研究開発に貢献をしてきた．さらに，上記したように only one

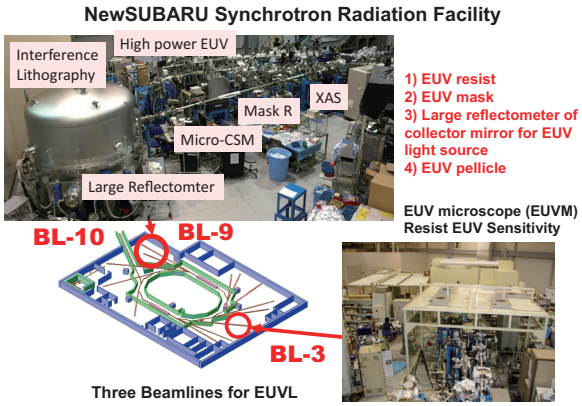

Figure 2. Beamline groups dedicated to EUV lithography technology development using BL03, BL09, and BL10 beamlines of NewSUBARU synchrotron light facility, which are for 1) EUV resist sensitivity and EUV microscope for mask defect inspection, 2) Mo/Si reflectometer for mask and large collector mirror, 3) EUV resist chemical reaction analysis using soft X-ray absorption spectroscopy, and resist chemical structure analysis using resonant soft X-ray scattering, and 4) EUV interference lithography for EUV resist resolution and LER evaluations, in-situ ellipsometry outgassing and contamination evaluation tool for EUV resists and mask materials, respectively.

の装置開発を進めており，これらの装置を外部ユーザに広く開放することで，EUVL の技術の発展に大きく貢献している．

IRDS の国際ロードマップによると 2019 年には線幅 16 nm（7 nm node）のパタン形成が，2020 年には 10 nm（5 nm node）のパタン形成が要求されている．エレクトロニクス設計の国際イベントである 55th Design Automation Conference（DAC 2018）（米サンフランシスコで 6 月 24 日–28 日に開催）では微細化競争でしのぎを削る台湾 TSMC と韓国 Samsung Electronics 社が，それぞれの先端プロセスの状況の報告で，2019 年には EUVL を量産に適用するという報告があった．本論文では EUVL 技術開発の現状・課題，並びに今後の展開について紹介および議論をする．

2　EUV 露光装置および EUV 光源技術

EUVL 技術に用いられる光源の波長は 13.5 nm であり，露光光学系やマスクには Mo/Si 多層膜が用いられている．EUV 露光装置について，EUVL 開発の黎明期では露光光学系は 2 枚の球面鏡から構成されるシュバルツシルド光学系が主流であり，ウェハ上の露光領域は数百ミクロン程度であった．このため半導体製作用に露光面積を拡大する必要があった．そこで，NTT の研究グループは 2 枚の非球面鏡から構成される露光光学系を考案した．2 枚の非球面鏡系で中心から光の光路をずらすことで，球面鏡の光学系ではこれまで低減するのが困難であった像面歪を低減することが可能になり，露光面積を拡大することが可能になった．これにより，より大きな露光領域で 150 nm の解像度が確認された．その後，兵庫県立大学のグループが 60 nm の解像度実現を目的に 3 枚非球面鏡から構成した縮小露光光学系が考案され，日立中央研究所およびニコンとの共同開発で 1999 年に非球面 3 枚系により 10 mm × 2 mm の露光領域で線幅 40 nm の孤立パタン形成に成功した．その後，超先端電子技術開発機構（ASET）を通じて NEDO の再委託の研究により，熱安定性の高い鏡筒に改良することとマスクとウェハステージに同期走査系を導入することで，10 mm × 10 mm の露光領域で線幅 60 nm のパタン形成を実証した．この研究成果を 2001 年に島根県松江市で開催した EUVL の国際会議で発表し，この研究成果が EUVL 技術開発を加速させる切っ掛けとなり，ASML 社も本格的に露光機開発を進めることになった[8,9]．

次に EUV 光源技術について，量産向けに LPP 方式の EUV 光源の開発が進められている．量産に要求されている EUV 光源パワーは中間集光点で 250 W である．最近では LPP 方式の光源は，直径 20 μm の大きさの Sn 液滴に YAG レーザーを照射することで Sn を初期励起させ，25 kW の高強度 CO_2 レーザーの照射によりプラズマを生成し，波長 13.5 nm の EUV 光が発生する．Figure 3 にこれまでの EUV 光源パワー実現の変遷を示す[21]．Sn 液滴の大きさの最適が図られたとことに加えて，より安定したドロップレットジェネレーター（液滴生成装置）の開発が進んだことにより，今年急激な光源パワーに向上がみられた．Figure 4 に示すように EUV 光源パワー向上に伴い，ASML の露光装置のウェハスループット向上が図られている[22]．現在，ASML の露光装置 NXE:3350B に搭載されてい

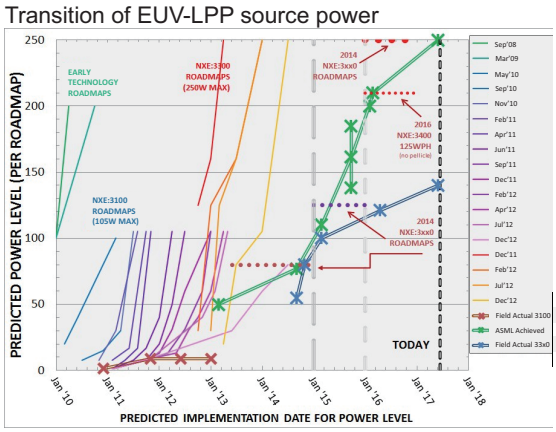

Figure 3.　Transition of EUV source power achievement by LPP light source at Cymer (provided by Intel).

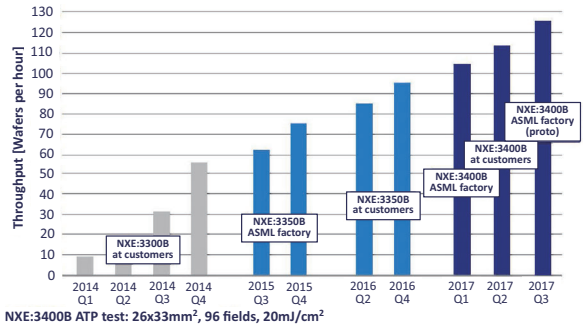

Figure 4.　Changes in wafer throughput improvement of ASML's exposure apparatus (provided by ASML).

る EUV 光源は中間集光点で 125 W の光源パワーが主流であり，12 インチのシリコンウェハ（ウェハ）を 1 時間に 85 枚露光が可能としている．このような中で 2017 年 7 月の SEMICON West 2017 で ASML 本社工場の EUVL 用露光機（NXE:3400B）に搭載した Cymer 社の LPP EUV 光源は中間集光点で 250 W を実現し，12 インチウェハを 1 時間に 125 枚露光を可能にしている[22]．これにより，ロジックを中心に 1–3 層で 2018 年から 2019 年にかけて半導体の量産技術として使用されることになった．現在，さらに 300 W の高い光源パワーを有する LPP 方式の EUV 光源の開発が進められており，Cymer や Gigaphoton によると今後はこの LPP 方式で 500 W までの光源開発が可能としている．

一方，NAND 型の Flash memory の場合に要求されるスループットが 12 インチウェハで 1 時間に 200 枚とされており，メモリメーカーの中間集光点における要求パワーは 1 kW になっている．この光源開発には EUV 用自由電子レーザー（EUV-FEL）方式が有力視されており，この EUV-FEL 光源は電子線形加速器とアンジュレータで構成され，電子銃で生成された電子は線形加速器により加速され，下流に設置したアンジュレータから EUV 光が発生する．半導体の量産に要求される EUV-FEL は大電流の線形加速器であることと 100 % の稼働率が要求される．また，リソグラフィー用の光源に用いるには，コヒーレントな光をインコヒーレントな光に変換する必要がある．さらに，1 台の FEL に十数台の露光機を設置することになるため，仮に 1 台の FEL が故障で停止をするとこれに接続されている十数台の露光装置が一斉に停止することになり，大きな生産上のリスクを招くことになるので，あらかじめバックアップ用の EUV-FEL を用意する必要があるといった課題がある．これらの課題を克服し，半導体市場の要求に間に合わせる必要がある．

3　EUV マスク用ペリクル技術とマスク欠陥検査技術

EUV 光は空気中の窒素や酸素に吸収されるため，EUVL 用の露光は真空中で行われる．EUV 露光装置は，主としてマスクステージやウェハステージ，並びに光学鏡筒から構成されており，真空中露光であっても露光機中のパーティクルの発生は否めない．そこで，EUVL に於いても従来の量産用リソグラフィー技術で用いられているペリクルが必須である．このペリクルにより露光装置の中で発生したパーティクルがマスク面上に付着するのを防ぐ役目がある．Figure 5(a) および 5(b) にそれぞれ ASML 社が開発したマウント付の EUV ペリクルフィルムの写真およびこれまでのマスク欠陥の改善の状況を示す[22]．EUV ペリクルに要求される性能は，1) 透過率が 90 % であること，2) 1G shots に対して露光耐性を有することである．現在，世界中で SiN，SiC，並びに各種有機材料をベースとした EUV ペリクルの開発が全世界で勢力的に進められており，実用化に向けて開発が勢力的に進められている．

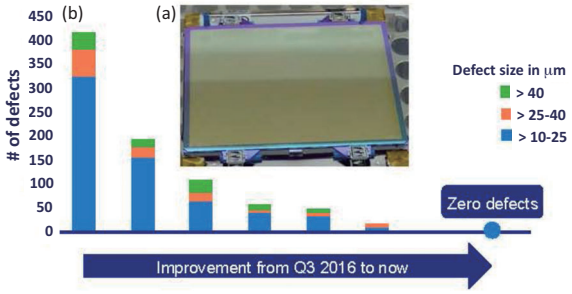

Figure 5.　Full field EUV pellicle film; (a) pellicle film with mounting, and (b) mask defect improvement (provided by ASML).

また，EUV マスクは低膨張ガラスレチクル基板の表面に EUV 光を反射する Mo/Si 多層膜を成膜し，この表面に吸収体からなる半導体回路パタンが形成されている．EUV マスクの欠陥は吸収体，多層膜の欠け，並びに多層膜表面のパーティクルに起因する「強度欠陥」，そしてガラスレチクル表面の異物，マスク基板表面の傷，並びに多層膜中の異物に起因する「位相欠陥」に大別される．この位相欠陥は上記した異物や傷等により Mo/Si の多層膜構造が乱れることで，局所的に Bragg の反射条件を満たさなくなるため，欠陥としてレジストに転写される．このため，従来のマスク検査技術では，位相欠陥の検出が不可能であり，位相欠陥も露光波長による検出可能な欠陥検査装置が必須である．これまで兵庫県立大学では EUV 顕微鏡[4]，コヒーレント EUV 光による回折顕微鏡[5] の開発を進めてきた．特に近年，マイクロビームを利用したコヒーレント EUV 光による回折顕微鏡[6] の開発に成功し，これにより EUV マスクの自然欠陥の 3 次元検査が可能となっている．また，スタンドアロンなコヒーレント EUV 光による回折顕微鏡の開発を進め，さらなる微細な自然欠陥観察が可能になっている．

先端ナノプロセス基盤開発センター（EIDEC）ではレーザーテックを中心に，EUV 光による暗視野顕微鏡の開発が進められてきた．また，ローレンスバークレ

イ国立研究所（LBNL）では，SHARP[23] というマスク欠陥検査装置を構築し，この装置を用いて EUV マスクの欠陥検査の技術開発が進められている．

4　EUV レジスト材料・プロセス・評価技術

5 nm node に要求される EUVL 技術開発では EUV レジストプロセス技術の開発が最も優先するべき課題となっている．この node での EUV レジストの仕様は，10 nm 以下の解像性能，露光感度 15 mJ/cm^2 以下，0.1 nm 以下の線端粗さ（line edge roughness; LER），低アウトガスを有することである．この中で露光感度および LER はそれぞれウェハスループットおよびデバイスの電気特性に大きく影響する．このため，EUV レジストは高感度と低 LER を同時に満足させる必要がある．この課題で低 LER の実現が最も優先度が高く，低 LER を実現するには EUV レジストの EUV 光による各種統計的なバラツキ（stochastic）を極限までに抑制する必要がある．

ASML が販売している EUVL の量産用露光装置の価格は約 160 億円と言われている．このためレジストメーカーや材料メーカーが新規レジスト開発用に購入するには高価過ぎて，この高価な装置に開発途上のレジスト材料を評価するには大きなリスクを伴う．一方で，レジスト自身の解像性能評価用にスイスの Paul Scherrer Institute[24] や兵庫県立大学[10] が開発した EUV 干渉露光系があり，解像度や LER の評価に用いられている．この露光方式では透過型回折格子を用いてレジストパタン形成をするため，光学系やマスクを用いる必要がないので，光学系の収差やフレアおよびマスクのエラーの影響を受けないことが特徴であり，このためレジスト自身の解像性能や LER の性能評価ができる．

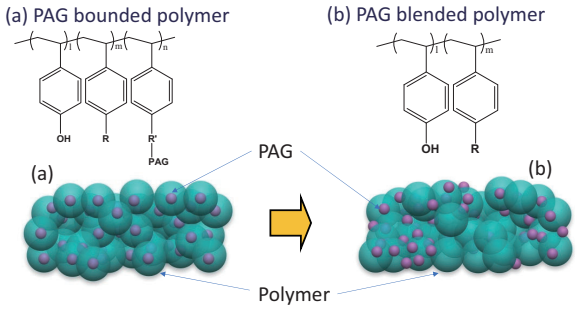

Figure 6.　The configuration of the a) PAG bounded resist and b) PAG blended resist developed at University of Hyogo.

一般的にレジストは化学増幅系レジストと非化学増幅系レジストに分類される．また，それぞれのレジストは，高分子系および低分子系レジスト[15] に分類できる．JSR の従来の高分子化学増幅系レジストでは，現在 13 nm の解像度が ASML の EUV 露光装置で実現できているが，15 mJ/cm^2 以下の高感度で 3 nm 以下の LER の両条件を満足するに至っていない．また，兵庫県立大学では 2006 年に Fig. 6 に示すような酸発生剤を直接ベースポリマーに合成する酸発生剤内包型化学増幅系レジスト（PAG bounded resist）を提案し[16,17]，世界に先駆けて EUV 光での低 LER を実現の可能性を示した．このレジストの LER は，従来のレジスト（PAG blended resist）の 1/3 程度でかつ露光感度も改善できた．さらなる進展が期待されている．

従来の水酸化テトラメチルアンモニウム（TMAH）の現像液でポジ型を示すレジストを有機現像液に代えることでネガ型に反転でき，富士フィルムの Negative tone development (NTD) process ではこの方式を利用している．このように有機系現像液を用いることで表面張力を低減でき，パタン倒れを抑制することができる．さらに，日産化学工業の Dry development rinse process（DDRP）と有機現像液によるネガ型プロセスを適用することで，パタン倒れが低減でき，最終的にポジ型の高アスペクトな微細パタンが形成できる．

低分子系レジストの中でもナノパーティクル系のレジストは，大きさが 2 nm–3 nm 程度であり，高分子系レジストに比べると一桁程度小さい．このため，高分子系レジストのような分子量分布が無いため化学構造上のバラツキがないことを期待して開発が進められている．しかしながら，材料自身およびプロセス安定性に課題が残っている．

低 LER の実現が大きな課題であるが，深紫外光（DUV）等の EUV 光以外（out of band; OoB）の光が LER に悪影響を及ぼすことが分かっているが，低 LER の低減に向けての OoB 光による影響の定量化が為されていない．そこで，ニュースバル放射光施設の BL03A ビームラインに OoB 光による影響の評価が可能な評価系の構築を進めている．この装置を用いることで OoB 光のレジストへの影響のみでなく，OoB 光による EUV マスクの反射率も測定できるので，OoB 光の影響を受けないマスクおよびレジストの開発にも貢献することができる．

以上述べたように，これまでに EUV レジスト課題解決に向けた様々な取り組みがなされているが，要求仕様を満足するに至っていない．そこで，兵庫県立

大学では原点に立ち帰り，軟 X 線吸収分光法を用いた EUV レジストの反応解析[18,19] を進めている．これまでに従来の化学増幅系レジストでは EUV 光によるイオン化反応だけでなく，励起反応を促進させることでより高感度が実現できることを見出した．さらに，LER について 10 nm 以下のパタン形成では従来の経験則に基づいた評価では実現が困難になっており，LER 低減に向けて兵庫県立大学では高輝度の軟 X 線放射光を用いた新しい分析装置の開発も進めている．

一方で，高感度 EUV レジスト開発では金属レジストが期待されているが，金属のアウトガスによるデバイスプロセスへの汚染の影響が懸念されている．レジストの透過率測定はフォトダイオードに直接レジストを塗布して，レジストの塗布前後での EUV 照射時のフォトダイオードの電流値の差とレジスト膜厚が分かれば，高精度で透過率が計算できる[20]．また，これまでの金属系レジストのアウトガスの研究結果では，金属系レジストの構造にアウトガスは依存しており，現在アウトガスの評価が継続して進められている．カーボンコンタミネーションの評価系を兵庫県立大学と EIDEC との共同で開発した[13]．一般に EUV 光をレジストに照射するとアウトガスが生成され，主にカーボンが多層膜表面に堆積する[11–14]．この装置は *in-situ* の可視の分光エリプソメータ[13] により，カーボンの堆積をリアルタイムで評価ができる装置であり，この装置を用いて各種レジストの評価を進めてきた．

5　まとめ

今後の IoT 用各種電子デバイスは低コストおよび低消費電力が要求されており，依然として半導体微細加工が必須である．この中で，7 nm node および 5 nm node では，EUVL が一部のチップメーカーの量産技術に採用されることが発表されている．この中で 7 nm node では開発課題の優先順位は光源，レジスト，ペリクル，マスクの順番であったが，5 nm node ではレジスト，光源，ペリクル，マスクの順番になっている．現在，EUV 光源開発は 250 W でウェハ露光のスループットが 125 枚/時間が実現できている．レジストについては LER の低減が最大の課題になっている．また，マスクについては，ペリクルの開発が進められており，今後の進展が期待されている．さらに，マスク欠陥検査技術開発では各種欠陥検査装置の性能確認が，日本，米国，欧州で精力的に進められている．以上のように，EUVL はロジック系デバイスへの量産適用検討とともに，EUVL 技術開発課題解決に向けて基礎研究が同時に進められているのが現状である．今後の半導体デバイスの技術展開では，これまで以上の高集積化が要求されており，ロジック系デバイスでは半導体微細加工技術は必須の技術である．IRDS によるとリソグラフィー分野では 2024 年まで従来の微細加工技術が，それ以降には 3 次元デバイスへの展開に伴い最小線幅でアスペクト比の高いホールパタンの超微細加工技術が要求される．

〈謝　辞〉

マスク欠陥検査技術開発の一部内容は CREST JST の支援を受けて実施した．また，アウトガス評価および一部のマスク欠陥検査技術開発は EIDEC を通じて NEDO から再委託を受けて実施した．さらに，EUV 干渉露光技術開発は科研費により実施した．その他，レジスト材料開発やマスク研究についても多くの企業・大学にご協力を頂いたので感謝する．

〈参 考 文 献〉

1) https://www.wsts.org/
2) IRDS roadmap URL: https://irds.ieee.org/
3) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, Y. Torii, J. Vac. Sci. Technol. B, 7 (1989) 1648.
4) T. Watanabe, T. Haga, T. Shoki, K. Hamamoto, S. Takada, N. Kazui, S. Kakunai, H. Tsubkino, H. Kinoshita, Proc. SPIE, 5130 (2003) 1005.
5) T. Harada, J. Kishimoto, T. Watanabe, H. Kinoshita, D. G. Lee, J. Vac. Sci. Technol. B, 27 (2009) 3203.
6) T. Harada, Y. Tanaka, T. Watanabe, H. Kinoshita, Y. Usui, T. Amano, J. Vac. Sci. Technol. B, 31 (2013) 06F605.
7) H. Iguchi, H. Hashimoto, M. Kuki, T. Harada, T. Watanabe, H. Kinoshita, Proc. SPIE, 9658 (2015) 965819.
8) T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, Y. Li, K. Hamamoto, T. Oshinio, K. Sugisaki, K. Murakami, S. Irie, S. Shirayone, Y. Gomei, S. Okazaki, J. Vac. Sci. Technol. B, 18 (2000) 2905.
9) T. Watanabe, H. Kinoshita, K. Hamamoto, M. Hosoya, T. Shoki, H. Hada, H. Komano, S. Okazaki, Jpn. J. Appl. Phys., 41 (2002) 4105.
10) T. Urayama, T. Watanabe, Y. Yamaguchi, N. Matsuda, Y. Fukushima, T. Iguchi, T. Harada, H. Kinoshita, J. Photopolym Sci. Technol., 24 (2011) 155.

11) T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, K. Hamamoto, H. Tsunakino, H. Hada, H. Komano, S. Irie, J. Vac. Sci. Technol. B, 19 (2001) 736.
12) K. R. Dean, I. Nishiyama, H. Oizumi, A. Keen, H. Cao, W. Yueh, T. Watanabe, P. Lacovig, L. Rumiz, G. Denbeaux, J. Simon, Proc. SPIE, 6519 (2007) 65191P.
13) T. Watanabe, Y. Kikuchi, T. Takahashi, K. Katayama, I. Takagi, N. Sugie, H. Tanaka, E. Shiobara, S. Inoue, T. Harada, H. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys., 52 (2013) 056701.
14) E. Shiobara, I. Takagi, Y. Kikuchi, T. Sasami, S. Minegishi, T. Fujimori, T. Watanabe, T. Harada, H. Kinoshita, S. Inoue, J. Photopolym Sci. Technol., 28 (2015) 103.
15) H. Kudo, N. Niina, T. Sato, H. Oizumi, T. Itani, T. Miura, T. Watanabe, H. Kinoshita, J. Photopolym Sci. Technol., 25 (2012) 587.
16) T. Watanabe, Y. Fukushima, H. Shiotani, M. Hayakawa, S. Ogi, Y. Endo, T. Yamanaka, S. Yusa, H. Kinoshita, J. Photopolym Sci. Technol., 19 (2006) 521.
17) Y. Fukushima, T. Watanabe, R. Ohnishi, H. Kinoshita, S. Suzuki, S. Yusa, Y. Endo, M. Hayakawa, T. Yamanaka, J. Photopolym Sci. Technol., 21 (2008) 465.
18) T. Watanabe, Y. Haruyama, D. Shiono, K. Emura, T. Urayama, T. Harada, H. Kinoshita, J. Photopolym Sci. Technol., 25 (2012) 569.
19) K. Emura, T. Watanabe, M. Yamaguchi, H. Tanino, T. Fukui, D. Shiono, Y. Haruyama, Y. Muramatsu, K. Ohmori, K. Sato, T. Harada, H. Kinoshita, J. Photopolym Sci. Technol., 27 (2014) 631.
20) D. Mamezaki, M. Watanabe, T. Harada, T. Watanabe, J. Photopolym Sci. Technol., 29 (2016) 749.
21) B. Turkot, “Presentation Template Overview of EUV Workshop 2017,” Berkeley, CA, USA, 2017.
22) Roderik. van Es, M. van de Kerkhof, H. Jasper, L. Levasier, R. Peeters,
EUV lithography indu strialization progress, - NXE-3400B scanner for (sub) 7 nm single patterning?,” International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithograhy 2017, Monterey, CA, USA, September 2017.
23) K. A. Goldberg, I. Mochi, M. P. Benk, C. Lin, A. Allezy, M. Dickinson, C. W. Cork, J. B. Macdougall, E. H. Anderson, W. Chao, F. Salmassi, E. M. Gullikson, D. Zehm, V. Vytla, W. Cork, J. DePonte, G. Picchi, A. Pekedis, T. Katayanagi, M. G. Jones, E. Martin, P. P. Naulleau, S. B. Rekawa, Proc. SPIE, 8880 (2013) 88800T.
24) V. Auzelyte, C. Dais, P. Farquet, D. Grutzmacher, L. J. Heyderman, F. Luo, S. Olliges, C. Padeste, P. K. Sahoo, T. Thomson, A. Turchanin, C. David, H. H. Solak, J. Micro-Nanolithogr. MEMS MOEMS, 8 (2009) 021204.

〈著 者 略 歴〉

渡邊 健夫： 1990 年 大阪市立大学大学院理学研究科後期博士課程を修了，理学博士号を取得する。1991 年シャープ株式会社中央研究所に入社，DRAM 開発および半導体微細加工技術開発に従事。1996 年より姫路工業大学（現，兵庫県立大学）高度産業科学技術研究所助手，2008 年より同研究所准教授，2015 年 同研究所極端紫外線リソグラフィー研究開発センター長，教授，2016 年より同研究所所長，センター長，教授職を兼務，現在に至る．