

極端紫外線リソグラフィ技術の現状および課題、並びに今後の展望

The Current Status and Technical Issues, and Future Prospect for Extreme Ultraviolet Lithography

渡邊 健夫

Takeo WATANABE

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 所長
極端紫外線リソグラフィ研究開発センター長
教授 理学博士

Dean, Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, University of Hyogo,
and Director of Center for EUVL
Ph. D



極端紫外線リソグラフィ (EUVL) 技術は16 nmの回路の線幅を有する半導体量産技術として2019年に使われることになっている。この技術開発の現状、課題、今後の展望について紹介する。現在、EUVL技術の量産技術としての課題は、EUV光源開発、EUVレジスト開発、EUVマスク開発である。これらの技術について紹介するとともに、将来どのように微細加工が進展して行くのかを詳説する。

Extreme ultraviolet lithography (EUVL) technology is to be used in 2019 as semiconductor mass production technology with line width of 16 nm circuit. I will introduce the current state, issues and future prospects of this technology development. Today, EUVL technical issues as for the mass production technology are EUVL light source development, EUV resist development, EUV mask development. We will introduce these technologies and discuss in detail how nanofabrication progresses in the future.

はじめに

世界半導体市場統計によるとFigure 1に示すように、2017年は412.2億ドルであり2016年に比べて約21.6%の成長であった。2020年では4500億ドルに迫る勢いである。半導体市場は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)やメモリに超高集積回路 (ULSI)が使われている。このULSIの先端技術に半導体微細加工技術が使用されている。これまでムーアの法則により、SEMATECHが中心にまと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進展している。現在ではこの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。このロードマップでは電子デバイスやこれを用いたシステムである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の提案がなされている。

半導体微細加工技術はULSIの回路パターンが形成されたマスクの原版パターンを、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方法が主流であ

WORLD SEMICONDUCTOR TRADE STATISTICS 2017

2017 412.2 billion\$ 21.6% Growth

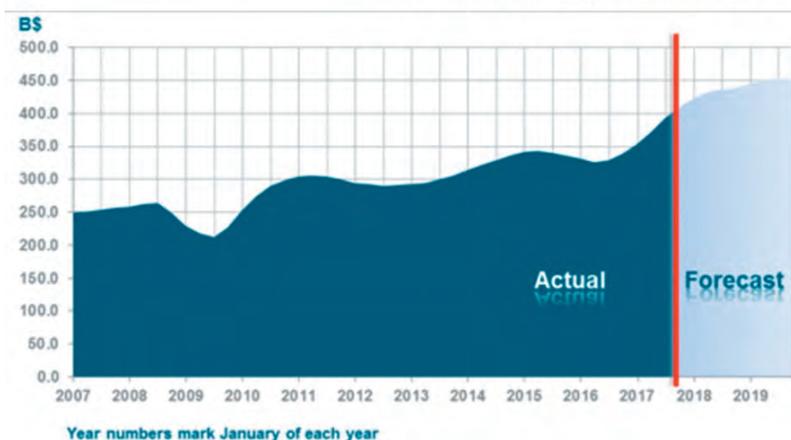


Figure 1 世界半導体市場統計 (<https://www.wsts.org/>)

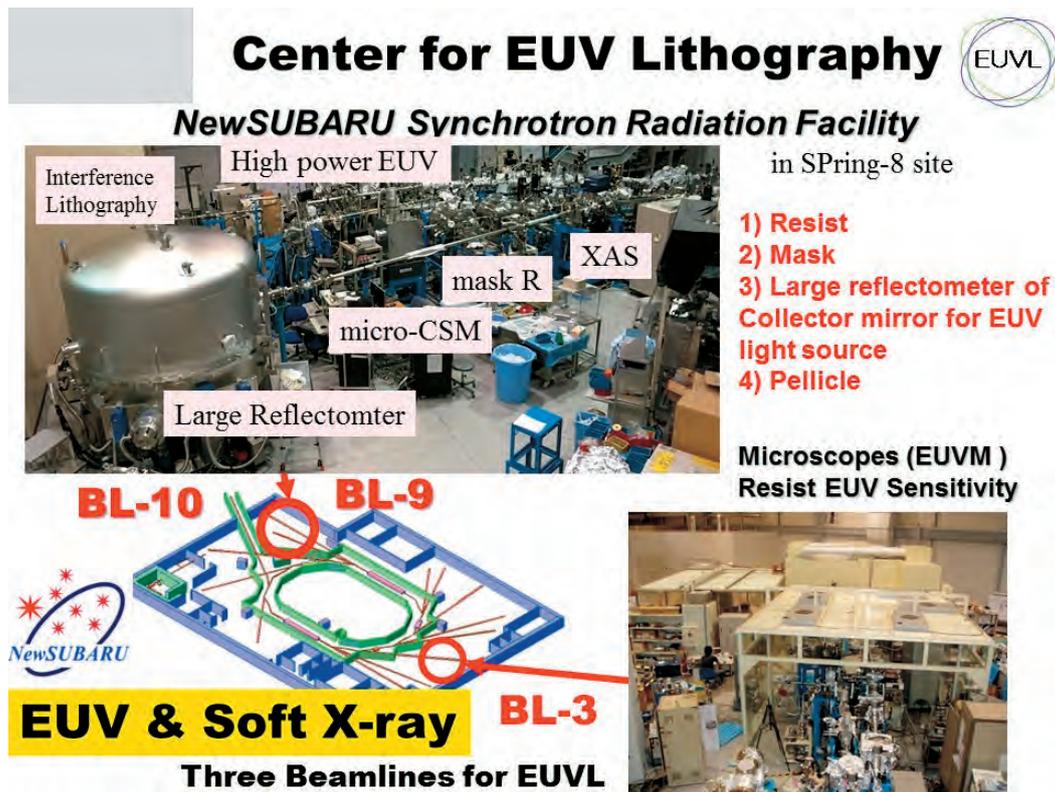


Figure 2 NewSUBARU放射光施設のEUVリソグラフィー技術開発専用ビームライン群

る。この技術が縮小投影方式のリソグラフィー技術である。この方式では一般にレジストに転写されるパター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ーン寸法 R は露光波長 λ に比例し、縮小露光学系の開口数 NA に反比例し、比例定数はプロセス定数 k_1 である。これまで、微細加工技術では波長の短波長化や縮小露光学系の開口数の増大化、並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よりプロセス定数を小さくすることで光リソグラフィーの延命を図ってきた。これまで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エキシマレーザーが用いられており、露光の短波長化によりより微細なパターン形成を実現してきた。さらに、40 nmのパターン形成では、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た。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有効径である。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1.44)で満たし、純水自体をレンズのように用いることで開口数を1よりも大きくできるため、40 nmのパターン形成が可能となった。その後、40 nm以下のパターン形成が要求され、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使われており、多重露光の回数分により微細なパター

ン形成が可能になる。しかしながら、この方式はプロセスの複雑化を招いており製造コストアップが課題となって来た。

そこで、現在は、プロセスの工程が単純で安価な単層レジストプロセスで16 nm以降のパターン形成が可能な極端紫外線リソグラフィー(Extreme Ultraviolet Lithography: EUVL)技術が次の半導体量産微細加工技術として期待されており、2019年から半導体量産技術として使用され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、国内で大学が保有する放射光施設では最大の施設であり、2000年に供用開始して以来、極端紫外線リソグラフィー^[1]の研究開発が進められてきた。Figure 2に示すようにBL03, BL09, BL10の3本のビームラインがEUVリソグラフィー技術開発専用のビームラインであり、これらにはonly oneの装置を開発・設置している。特に共同研究や受託研究を通じて産業支援を推進している。EUVレジストの研究では、大面積による解像度評価^[2, 3]、EUV干渉露光系による10 nm級のパターン形成・評価^[4]、アウトガス評価^[5-8]、新規EUVレジスト開発^[9-11]、軟X線吸収分光によるレジストの反応解析^[12, 13]、並びにレジストの透過率測定系^[14]の開発を進めてきた。また、EUVマスクの研究では、明視野EUV顕微鏡^[15]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^[16, 17]の開発を進めてきた。さらに、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^[18]を進めている。上記したようにonly one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、EUVリソグラフィの技術の発展に貢献している。

IRDSによると2019年には16 nm (7 nm node)のパターン形成が、2020年には10 nm (5 nm node)のパター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、先端プロセスの状況の報告の中で、2019年にはEUVLを量産に適用するという報告をしている。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する。

EUV露光装置

EUVリソグラフィ技術に用いられる光源の波長は13.5 nmである。この露光波長は従来のリソグラフィ用光源に比べると物質に対する吸収が大きくかつ物質の屈折率が1に近いので、従来のリソグラフィ技術の縮小露光光学系に用いられてきた屈折レンズ系を使用できない。このため、この屈折レンズに代わって多層膜ミラーが用いられている。多層膜は質量数の大きな材料と質量数の小さな材料をスパッタ法により交互に成膜することで形成される。このときEUV光が異なる材料の界面で僅かに反射するため、多層膜を形成することで高い反射率を得ることができる。光源波長を λ 、多層膜の法線に対する入射角を θ 、並びに一層対の膜厚 d の間には、 $n\lambda = 2d \sin\theta$ の関係があり、これをブラッグの関係式と呼ばれている。ここで n は回折の次数である。この式によると、回折次数 n が1の場合には波長 λ が13.5 nmで多層膜に対して垂直入射の場合($\theta = 90^\circ$)にはMo/Si多層膜の場合の一層対の膜厚 d は約6.75 nm程度になる。多層膜中の光に干渉効果を考慮すると膜厚 d は実際には約7 nm程度である。現在では多層膜の成膜技術が確立されており、理論値に近い68%程度の反射率を得ることができている。EUVLではこの多層膜成膜技術を露光光学系のミラーやマスク基板の製作に応用されている。

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枚非球面鏡からなる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の孤立パターン形成に成功した。その後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のパターン形成を実証した。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きっかけとなり、ASML社も本格的に露光機開発を進めることになった^[2, 3]。

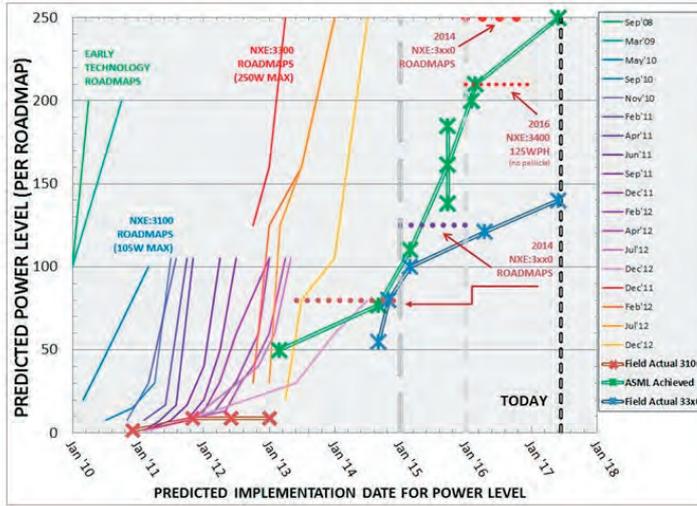
EUV光源技術

量産向けにレーザープラズマ(laser produced plasma : LPP)方式のEUV光源の開発が進められている。このLPP方式では、直径20 μ mの大きさのSn液滴にYAGレーザーを照射することでSnを初期励起し、25 kWの高強度CO₂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光源パワー達成の変遷を示す。ここ数年で急峻にEUV光源のパワーの強度の向上がみられた。これはSn液滴の大きさの最適化が図られたと同時に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る。

量産に要求されているEUV光源パワーは、光源発生源から最初の集光位置である中間集光点で250 Wである。Figure 4にASML社の露光装置のウェハスループット向上の変遷を示す。現在、ASML社の露光装置NXE : 3350Bに搭載されているEUV光源は中間集光点で125 Wの光源パワーが主流で、12インチのシリコンウェハ(ウェハ)を1時間に85枚露光が可能になっている。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Cymer社が開発した中間集光点で250 Wの光源パワーを有するLPP光源を搭載し、12インチウェハを1時間に125枚露光を可能にしたという報告がなされた。これにより、ロジックを中心に1~3層で2019年に半導体の量産技術として使用されることになっている。現在、さらに300 Wの高い光源パワーを有するLPP方式によるEUV光源の開発が進められており、Cymer社やGigaphoton社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パワーの要求は1 kWである。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いる。EUV-FELは電子線型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

Updated from 2017 EUVL Workshop

Source Power Improvements Meeting Roadmap



- Source power meets 2017 roadmap target
- Emphasis now should be ensuring sufficient power overhead for quality output

Figure 3 LPP方式のEUV光源パワー達成の変遷 (ASML社提供)

Wafer Throughput Achievement

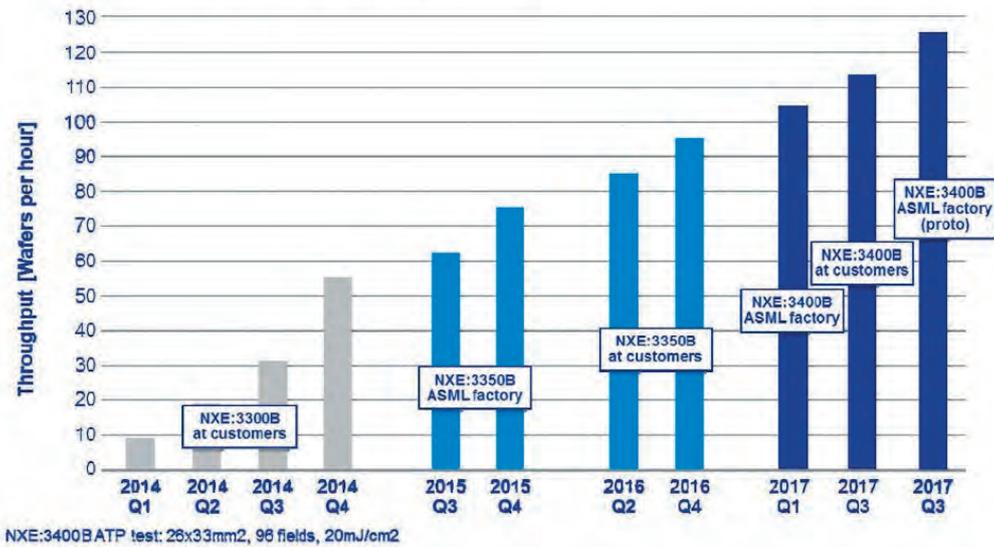


Figure 4 ASML社の露光装置のウェハスループット向上の変遷 (Britt Turkot, Intel, Presentation Template Overview of EUV Workshop 2017, Berkeley, CA, USA, 2017)

流に設置したアンジュレータによりEUV光が発生する。半導体の量産の要求される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、予めバックアップ用のEUV-FELを用意する必要がある。

EUVレジスト技術

5 nm nodeに要求されるEUVリソグラフィ技術開発ではEUVレジストプロセス技術開発が最も優先すべき課題になっている。このEUVレジストの仕様は、10 nm以下の解像性能、露光感度15 mJ/cm²以下、0.1 nmのLER (Line Edge Roughness)、低アウトガスを有することである。この中では露光感度および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。この中で低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光による反応のバラツキを極限まで抑制する必要がある。

上記したようにASML社はEUVLの量産用露光装置の開発を進めている。一方で、レジスト自身の解像性能評価用にEUV干渉露光装置の開発がスイスのPaul Scherrer Institute^[9]や兵庫県立大学^[4]で進められている。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ーン形成をするため、光学系やマスクを用いる必要がなく、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ため、レジスト自身の解像性能が評価できる特長を有する。

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。さらに、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^[11]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/cm²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、富士フィルムのNegative tone development (NTD) processでは、パターン倒れが改善されている。さらに、日産化学工業のDry development rinse process (DDRP)では、パターン倒れが低減され、高いアスペクトを有するとともに、解像性能の向上が実現できている。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2~3 nm程度であり、高分子系レジストに比べると一けた程度小さい。このため、高分子系レジストのような分子量分布は全くないため必然的に化学構造上のバラツキがないことが期待され、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ある。

また、兵庫県立大学が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を提案し^[9, 10]、世界に先駆けてEUV光での低LER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。

さらに、深紫外光(DUV)等のEUV光以外の(out of band (OoB)光がLERに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OoB光影響の定量化がなされていない。そこで、兵庫県立大学では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開発を進めている。また、この装置を用いることで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ようになる。これにより、OoB光の影響を受けないマスクおよびレジストの開発が可能になる。

以上述べたように、これまでにLERの課題解決に向けた

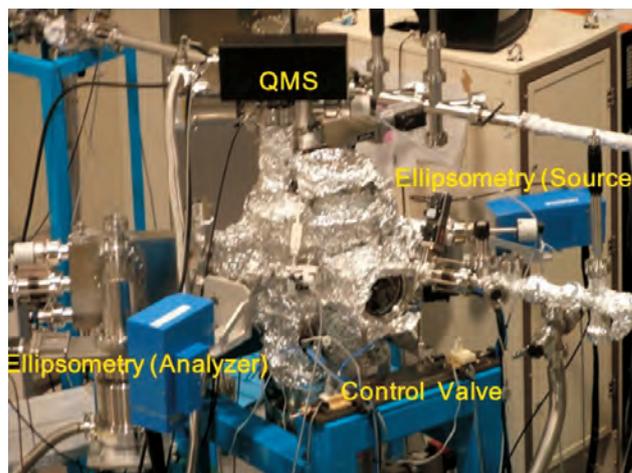


Figure 5 兵庫県立大学とEIDECの共同開発したレジストアウトガス評価系

様々な取り組みがなされているが、その他の条件も含めて要求仕様を満足するに至っていない。そこで、高感度化について軟X線吸収分光法を用いたEUVレジストの反応解析^[12, 13]を進めており、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化が実現できることが分かった。さらに、LERについて10 nm以下のパター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いる。このLER低減に向けて兵庫県立大学ではニュースバル放射光施設で軟X線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。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。Figure 5に兵庫県立大学と株式会社EUVL基盤開発センター (IHEIDEC)で開発したレジストアウトガス評価系を示す^[7, 8]。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^[5-8]。この装置では内部に設置したin-situの可視の分光エリプソメータによりカーボンの堆積をリアルタイムで評価が可能であり、この装置を用いて各種レジストの評価を進めてきた。

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、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いるため、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、EUVリソグラフィに於いても従来量産で用いられているリソグラフィと同様にペリクル

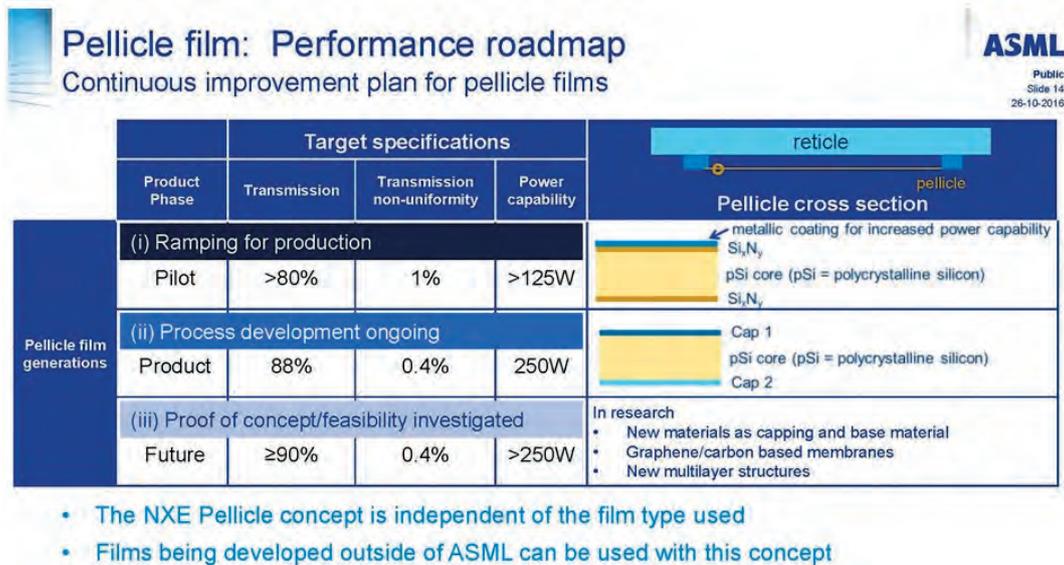


Figure 6 EUVペリクル開発ロードマップ (Paul Janssen, ASML, NXE Pellicle Program, 2016 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Hiroshima, Japan, 2016)

が必須である。Figure 6にASML社のEUVペリクル開発のロードマップを示す。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の露光耐性を有することである。現在、SiN、SiC、並びに各種有機材料をベースとしたEUVペリクル開発が全世界で勢力的に進められており、実用化に向けた今後の進展が期待されている。

一方、EUVマスクは低膨張ガラスレチクル基板表面にEUV光を反射するMo/Si多層膜で形成されており、この表面に半導体回路パターンが吸収体で形成されている。このようにEUVマスクは3次元の構造を有しており、EUV光のマスクへの入射角は6度に設定されている。

一般的にEUVマスクの欠陥は、吸収体や多層膜の欠けや多層膜表面のパーティクルに起因する「強度欠陥」、並びにガラスレチクル表面の異物や傷および多層膜中の異物に起因する「位相欠陥」がある。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、位相欠陥も検出可能な露光波長による欠陥検査装置が必須である。兵庫県立大学ではこれまで、EUV顕微鏡^[15]、コヒーレントEUV光による回折顕微鏡^[16]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^[17]の開発により、EUVマスクの自然欠陥の3次元検査を可能にした。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、さらに微細な自然欠陥観察の実証を進めている。

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^[20]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。

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、EUVリソグラフィー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。

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開発および性能確認が、日本、米国、欧州で精力的に進められている。

以上のように、EUVリソグラフィーはロジック系デバイスの量産適用検討とともに、EUVリソグラフィー技術開発課題解決に向け基礎研究を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性が要求されており、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ーンの超微細加工技術が要求される。

何れにせよ、このまま微細化が進んでいくと量子効果によりリーク電流が増大することから、電子数の多い系のデバイス設計から電子数の少ない系でのイノベーションが求められている。一方で、量子デバイス等の新規デバイスの開発も盛んに行われており、今後これらのデバイス開発を鑑み、微細加工技術は必須の技術である。

新規デバイス開発を睨んで、今後はトップダウンおよびボトムアップの両リソグラフィ技術を中心に微細なパターン形成技術が要求されると考えている。

謝辞

一部のマスク欠陥検査技術開発はCREST JSTの支援を受けて実施した。

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。

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] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, and Y. Torii, "Soft x-ray reduction lithography using multilayer mirrors," *J. Vac. Sci. Technol.*, B7(1989)1648.
- [2] 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, "Development of the large field extreme ultraviolet lithography camera," *J. Vac. Sci. Technol.*, B18(2000)2905-2910.
- [3] T. Watanabe, H. Kinoshita, K. Hamamoto, M. Hosoya, T. Shoki, H. Hada, H. Komano, and S. Okazaki, "Fine pattern replication using ETS-1 three-aspherical mirror imaging system," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41(2002)4105-4110.
- [4] T. Urayama, T. Watanabe, Y. Yamaguchi, N. Matsuda, Y. Fukushima, T. Iguchi, T. Harada, and H. Kinoshita, "EUV interference lithography for 1x nm," *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 24(2011)pp.155-157.
- [5] T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, K. Hamamoto, H. Tsunakino, H. Hada, H. Komano, and S. Irie, "Photoinduced outgassing from the resist for extreme ultraviolet lithography by the analysis of mass spectroscopy," *J. Vac. Sci. Technol.*, B19(2001)736-742.
- [6] K. R. Dean, I. Nishiyama, H. Oizumi, A. Keen, H. Cao, W. Yueh, T. Watanabe, P. Lacovig, L. Rumiz, G. Denbeaux, and J. Simon, "An analysis of EUV resist outgassing measurements," *Proc. SPIE*, 6519(2007)65191P.
- [7] T. Watanabe, Y. Kikuchi, T. Takahashi, K. Katayama, I. Takagi, N. Sugie, H. Tanaka, E. Shiobara, S. Inoue, T. Harada, and H. Kinoshita, "Development of tool for contamination layer thickness measurement using high power extreme ultraviolet light and in situ ellipsometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 52(2013)056701-1, 056701-5.
- [8] E. Shiobara, I. Takagi, Y. Kikuchi, T. Sasami, S. Minegishi, T. Fujimori, T. Watanabe, T. Harada, H. Kinoshita, and S. Inoue, "Recent progress in EUV resist outgas research at EIDEC," *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 28(2015)pp. 103-110.
- [9] T. Watanabe, Y. Fukushima, H. Shiotani, M. Hayakawa, S. Ogi, Y. Endo, T. Yamanaka, S. Yusa, and H. Kinoshita, "CA resist with side chain PAG group for EUV resist," *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 19(2006)521-524.
- [10] Y. Fukushima, T. Watanabe, R. Ohnishi, H. Kinoshita, S. Suzuki, S. Yusa, Y. Endo, M. Hayakawa, and T. Yamanaka, "PAG study of PAG bonded resist for EUV and EB lithography," *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 21(2008)pp.465-468.
- [11] H. Kudo, N. Niina, T. Sato, H. Oizumi, T. Itani, T. Miura, T. Watanabe, and H. Kinoshita, "Extreme ultraviolet (EUV)-resist material based on Noria (water wheel-like macrocycle) derivatives with pendant alkoxy and adamantyl ester groups," *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 25(2012)pp.587-592.
- [12] T. Watanabe, Y. Haruyama, D. Shiono, K. Emura, T. Urayama, T. Harada, and H. Kinoshita, "Chemical reaction analysis of EUV CA resist using SR absorption spectroscopy," *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 25(2012)569-574.
- [13] 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, "EUV resist chemical analysis by soft X-ray absorption spectroscopy for high sensitivity achievement," *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 27(2014)pp. 631-638.
- [14] Daiki Mamezaki, Masanori Watanabe, Tetsuo Harada, and Takeo Watanabe, "Development of the transmittance measurement for EUV resist by direct-resist coating on a photodiode," *J. Photopolym. Sci. Technol.*, 29(2016)749-752.
- [15] T. Watanabe, T. Haga, T. Shoki, K. Hamamoto, S. Takada, N. Kazui, S. Kakunai, H. Tsubkino, and H. Kinoshita, "Pattern inspection of EUV mask using a EUV microscope," *Proc. SPIE*, 5130(2003)1005-1013.
- [16] T. Harada, J. Kishimoto, T. Watanabe, H. Kinoshita, and D. G. Lee, "Mask observation results using coherent EUV scattering microscope at NewSUBARU," *J. Vac. Sci. Technol.*, B27(2009)3203-3207.
- [17] T. Harada, Y. Tanaka, T. Watanabe, H. Kinoshita, Y. Usui and T. I. Amano, "Phase defect characterization on an extreme-ultraviolet blank mask using micro coherent extreme-ultraviolet scatterometry microscope," *J. Vac. Sci. Technol.*, B31(2013)06F605.
- [18] Haruki Iguchi, Hiraku Hashimoto, Masaki Kuki, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, and Hiroo Kinoshita, "Development of a reflectometer for a large EUV mirror in NewSUBARU," *Proc. SPIE* 9658(2015)965819.
- [19] 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, "Extreme ultraviolet interference lithography at the Paul Scherrer Institut," *Journal of Micro-Nanolithography, Memes and Moems* 8(2009)021204.
- [20] Kenneth A. Goldberg, Iacopo Mochi, Markus P. Benk, Chihcheng Lin, Arnaud Allezy, Michael Dickinson, Carl W. Cork, James B. Macdougall, Erik H. Anderson, Weilun Chao, Farhad Salmassi, Eric. M. Gullikson, Daniel Zehm, Vamsi Vytla, William Cork, Jason DePonte, Gino Picchi, Ahmet Pekedis, Takeshi Katayanagi, Michael G. Jones, Elizabeth Martin, Patrick P. Naulleau, and Senajith B. Rekawa, "The SEMATECH high-NA actinic reticle review project (SHARP) EUV mask-imaging microscope," *Proc. SPIE* 8880(2013) 88800T.