小型EUVシステムによるナノ構造の作製

セルヒー・ダニリュク、サッシャ・ブローゼ、アンドレアス・ソス

小さなEUV光源と比較的シンプルなプロセス技術によって、最小で28nmまでの周期的な構造を作製することができる。

2020年11月に発売された新型iPhoneには、極端紫外線（extreme ultraviolet：EUV）という波長13.5nmの光を用いて製造された、特殊なプロセッサが搭載されている（**図1**）。EUVリソグラフィの研究は数十年前から続けられており、現在は装置を1億ユーロ超の価格で、蘭ASML社から購入することができる。売上高が数十億ユーロにものぼるスマートフォンであれば、その投資は回収できる可能性が高い。

しかし、EUV部品の評価を行う人や、表面にナノ構造を作製したいだけの人は、それよりも小型のソリューションを求める可能性がある。フラウンホーファーレーザー技術研究所（Fraunhofer Institute for Laser Technology：Fraunhofer ILT）とアーヘン工科大（RWTH Aachen University）の科学者らは（どちらの施設もドイツのアーヘンに所在）、独自のEUV光源と比較的シンプルなプロセス技術を使用して、周期的なナノ構造を作製する技術を開発した。

このチームは、包括的な開発アプローチを採用した。「私たちにとって重要なのは、プロセスチェーン全体を提供できるようにすることだ。シミュレーションからマスク製作、作製した層やナノ構造の品質管理に至るまでのすべてのプロセスを、独自に構築したのはそのためである」と、フラウンホーファーILTのプロジェクトマネージャーを務めるセルヒー・ダニリュク氏（Serhiy Danylyuk）は述べた。そうすることで、このハイエンドな技術を、これに関心を持つ中規模企業や新興企業にも、理にかなった投資費用で提供することができる。

図1　フラウンホーファーILTのパルスEUV光源は、波長13.5nm、帯域幅±1%で、40Wの出力を備える。（提供：フラウンホーファーILT）

近接場干渉

この手法の技術的背景は、アクロマティックなタルボット（Talbot）効果など、コヒーレント照射の干渉効果に基づいている。近接場（マスクの裏から500μm以内）では、強度分布が生成され、それによって微細リソグラフィ構造が作製できる。この原理は、比較的広帯域の放射にも適用できる。

シミュレーションとラボテストにおいて、フラウンホーファーILTは、このプロセスを波長13.5nmのEUV照射に合わせて最適化した。50μmの距離における焦点深度は約15μmで、これは、数百nmの層の処理に十分な値である。このプロセスは、周期的なラインと穴の両方の構造に適用できる。穴は円でも三角形でもよく、原理上は、構造の形状に制約はほぼ存在しない。イメージング処理において、透過マスクは2度拡大されて、ウエハに投影される。

100nm未満の構造を対象としたEUV光源

信頼性の高いEUV照射源を追求する取り組みは、30年前から続いている。それは、このプロセス全体を左右する重要な要素だった。最終的に、産業用製造プロセスには、レーザ生成のプラ

ズマが選択されている。ミラーやレジストの試験には特に、そうした装置はあまりにも大きすぎる。

EUVを生成するためのもう1つの技術は、製造プロセスに必要なレベルにまで出力を拡大することはできないが、小規模な処理に適している。フラウンホーファーILTの専門家らは、±1%の帯域幅で最大40Wの出力を備えるパルスを生成する、ガス放電に基づくビーム源を開発した。出力とスペクトルは光源において連続的にモニタリングされ、マスク面で利用可能な強度は0.1mW/cm^{2}以上である。

1mm^{2}の処理にかかる時間は約30秒で、処理領域の縫合が可能である。最大で直径100mmのウエハが、フラウンホーファーILTの施設で処理されている。テストでは、アクロマティックなタルボット効果を利用して、サイズ28nm（ハーフピッチ）の構造を作製することができた。このような小規模なシステムとしては、世界記録である。このプロセスの構造サイズの物理的な限界は、7.5nm（ハーフピッチ）である。干渉構造が本質的に均一なので、誤り率は低い。

深紫外レーザによる出力の拡大

フラウンホーファーILTは施設内で、波長248nmのKrFエキシマレーザを用いた手法のテストも行った。米コヒレント社（Coherent）の「LEAP 150K」レーザシステムは、150Hzでパルスあたり1Jを供給する。この装置により、シリコンをガラスにアブレーションすることができる。構造サイズは数百nm程度である。例えば、幅180nm、周期600nmのラインをフォトレジストに生成した。また、この技術は、300nm程度のPETプラスチック表面のアブレーションに非常に適している。

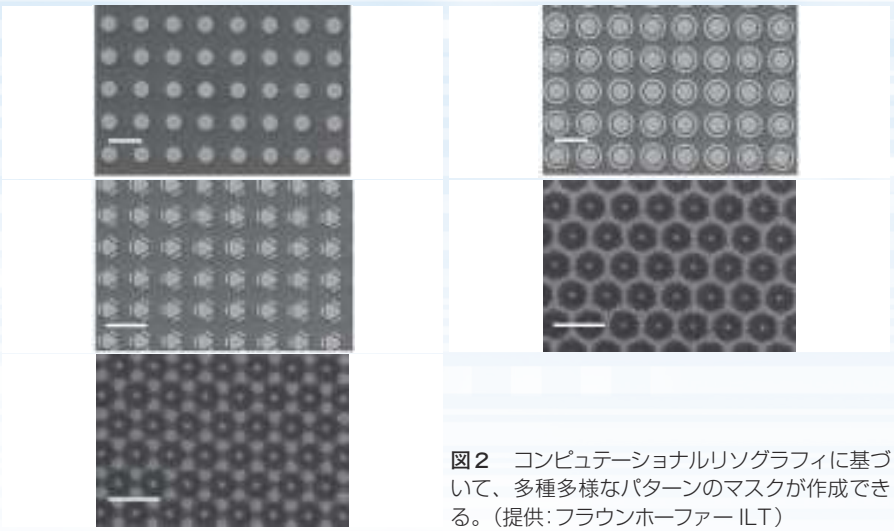

図2　コンピュテーショナルリソグラフィに基づいて、多種多様なパターンのマスクが作成できる。（提供：フラウンホーファーILT）

中規模企業を想定した取り組み

周期的なナノ構造には、さまざまな用途がある。光学分野では、広帯域の反射防止コーティングや偏光板、医療やバイオテクノロジーの分野では、ナノスケールの粒子フィルタに利用することができる。エレクトロニクスや計測の分野では、新しいセンサ素子の開発に活用することができる。

この新しい技術は、必要な形状や構造の作製を可能にする。コンピュテーショナルリソグラフィが、この目的に利用されている（**図2**）。ミラーやフォトレジストなど、産業用EUVシステムの部品の試験にももちろん、このシステムを利用することが可能である。

EUVリソグラフィは、これまでに開発された中でも最も複雑な技術の1つである。ウォールストリートジャーナル（Wall Street Journal：WSJ）は最近、EUVについて「インテル社（Intel）が数年遅れているとすれば、中国は10年近く遅れている可能性がある」とコメントした。

EUV技術に関する研究が欧州で始まったのは20年以上前のことである。フラウンホーファーILTは、早期からこれに参加している。他のフラウンホーファー研究機関と共同で、パルスビーム源に加えて、最高水準の反射率を備えるコーティングが開発されている。この開発は、2012年度のヨゼフ・フォン・フラウンホーファー賞を受賞した。2020年11月には、独ツァイス社（Zeiss）、独トルンプ社（TRUMPF）、フラウンホーファー応用光学精密工学研究所（Fraunhofer Institute for Applied Optics and Precision Engineering：Fraunhofer IOF）によるEUVリソグラフィの共同研究に、名誉あるドイツ未来賞がドイツ連邦大統領から授与された。その後、この技術は業界に提供され、現在では、大小両方の規模のソリューションとして提供されている。

著者紹介
セルヒー・ダニリュク（Serhiy Danylyuk）は、独フラウンホーファーレーザー技術研究所（Fraunhofer Institute for Laser Technology：Fraunhofer ILT）のEUV及びDUV技術担当チームリーダー。サッシャ・ブローゼ（Sascha Brose）は、独アーヘン工科大（RWTH Aachen University）の光学システム技術（Technology of Optical Systems：TOS）チェア。アンドレアス・ソス（Andreas Thoss）は、独ソスメディア社（THOSS Media）社長で、Laser Focus World誌寄稿編集者兼Industrial Laser Solutions誌編集顧問。e-mail: th@thoss-media.de

ILSJ