

木下 博雄

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 教授

コヒーレント EUV 光を用いた極微パターン構造計測技術の開発

1. 研究実施の概要

本研究の狙いは、将来の 32 nm 世代でのマスクパターン（およそ 128 nm）ならびに 22 nm 世代のパターン検査として、従来の真空紫外光（DUV）を用いた検査では検出不可能な 20 nm 以下の欠陥検査、ならびに 20 nm 相当のパターン線幅（CD）を精度 0.01 nm 以下にて測長し、この時の CD 検査時間を、例えば、6 インチ角ガラスマスクの 20x20 箇所での評価を 90 分以下で可能とする産業界に有用なシステムを提供することにある。そこで、本研究では従来の顕微光学系によらない新しい検査法として、光学の原理原則に立ち返り、結像レンズによらず、瞳面上に形成される回折パターンを計算機上で処理する方法により、これまでの微細化のパラダイムでは実現不可能な高精度な計測法の開発を進める。光源には産業利用の観点からスタンドアロン型とし、極短パルスレーザーの高次高調波成分から 13.5 nm の極端紫外光を発生させ、用いる。

本装置コヒーレントスキヤトロメトリ顕微鏡（CSM）は、①フェムト秒レーザーシステム、②高次高調波発生システム、③13.5 nm 近傍の波長を取り出す分光系、④コヒーレント EUV スキヤトロメトリ顕微鏡部からなる。高次高調波の励起光源にはテーブルトップのフェムト秒サブテラワットレーザーを用い、Ne ガスなどで満たしたガスセル中で高次高調波を発生させ、Mo/Si 多層膜鏡などにより 13.5 nm 近傍のコヒーレント EUV 光を取り出す。

ここで得られたコヒーレントな EUV 光はシャッタ、フィルター（Zr/Si）、ピンホールを経て、EUV マスクを 6 度の入射角度で照射し、反射回折した像を X 線 CCD カメラで検出する。回折された光は EUV マスクのパターンに応じた回折の複素振幅を示すが、CCD カメラ上では回折パターンの強度分布のみ得られ、位相は直接測定できない。このため、CCD で得られた 2 次元の回折強度データを HIO アルゴリズムを用いて計算機上で繰り返し逆フーリエ変換・フーリエ変換を施し、求められた複素振幅から位相情報を回復させることにより、高精度な像の再構成を行う。これにより、マスク上の寸法計測、パターン欠陥検査、さらには、回折情報を基にマスクパターンの 3 次元像再生を進める。

本研究では、3 年間で実用化の見通しを得るために、市販の 1 kHz、5 mJ クラスの

Ti:Sapphire レーザー（波長 800 nm, 30 fs クラス）を基に、発生点で平均出力 1 μ W、計測点で 1 nW の高次高調波システムを永田チームと木下チームが立ち上げ、計測システムと結合し、実用システムとしての特性を把握する。さらに、阪大では高繰り返し・高パワーのフェムト秒レーザー（波長 607.5 nm、5-10 fs）を開発し、理研と共同で 13.5 nm で 50 μ W クラスの世界最大出力で、高効率かつ実用的な高次高調波の発生を最終年度前までに実現し、計測システムによる評価を進める。

H20 年度、木下 G は、ニュースバルに設置したコヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡実験機により、①パターン像再生におけるノイズの低減、②高精度像再生のためのアルゴリズムの改造、③スキャトロメトリー顕微鏡による CD 評価と CD-SEM とによる CD 値の比較評価、ならびにアルゴリズムの高速化を進める。永田 G では、市販のフェムト秒レーザーシステムを選定購入し、調整の上、ガスセルを用いた高次高調波の発生、斜入射分光器による検証、変換効率などの評価を進める。藤田 G では、ファイバー短パルスレーザーを用いた白色光発生を進め、照射媒質・レーザー照射強度・パルス幅等をパラメータとし、白色光のスペクトル計測を行ない、600nm 中心で広いスペクトルが得られる条件を明らかにする。

2. 研究実施内容

(1) 木下グループ

今年度は、ニュースバルに設置したコヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡実験機を用いたマスク評価を進め、とくに、①データ処理の高速化、②パターン像再生におけるノイズの低減と高精度像再生のためのアルゴリズムの構築、③スキャトロメトリー顕微鏡による CD 評価と CD-SEM とによる CD 値の比較評価、ならびにシャドウイング効果による CD への影響の検討を行った。

① データ処理の高速化

これまで、画像再生のための HIO アルゴリズムを通常の XP (Pentium4、メモリー1GB) 上の Mathematica5.0 を用いて行っていたが、処理の高速化のため、CPUX5482Quad Core 3.2GHz X 2(8コア)、メモリー16GB 上の IntelC++Compiler 10.1 言語に移植し、画像再生速度の向上を図った。図1に処理例を示すが(a)のピサの斜塔を Mathematica で HIO アルゴリズムを処理した場合には 68 分要したが、C++では(b)に示す像再生を 16 秒の 1/257 に短縮できた。この処理は 1000 回の演算を行っているが、(c)に示すように、像再生のサポートエリア外の残差は 500 回ほどでほぼ収束することから、この例では 8 秒での像再生が可能と見込まれ、500 倍以上の高速化が図られた。

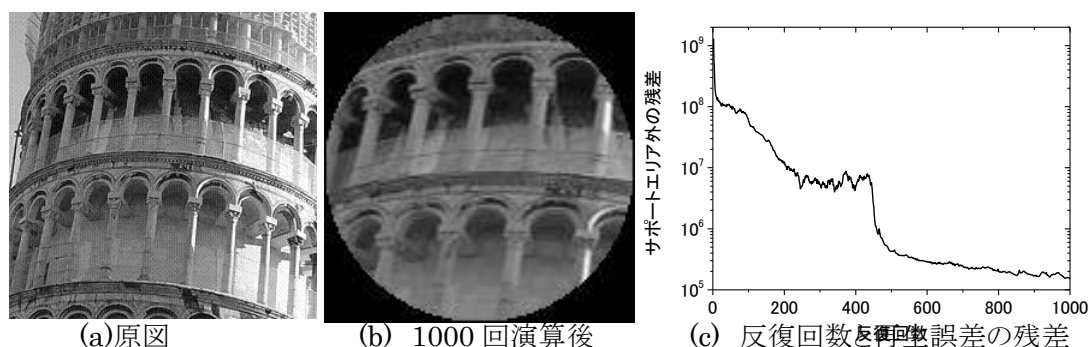


図1 C++による像再生処理と反復回数による像精度の向上

② 評価用マスクの作成と評価

評価用のマスクとしてガラスマスク上に hp50 nm から 500 nm までの L&S パタン、および Hole パタンを研究室内の電子ビーム露光機 ELS-7500、TaN 膜形成にマグネトロンスパッタ装置、エッチングに Lam Research の ICP エッチング装置 TCP9400SE を用いて作成した。このマスクをニュースバルに設置した実験機にて像再生を進めた。この結果、hp100 nm 以上 (ウェハ上で 25 nm) の L&S パタン、hp400 nm のホールパタンの像再生を実現した。図2に hp100 nm での L&S パタンの再生例を示す。(a)はマスクパタンにコヒーレント光を照射した時の回折パタン、(b)は像再生結果、(c)は(b)の拡大像を示す。このように、L&S パタンのような繰り返しパタンに対する HIO アルゴリズムに関しては、高精度な像再生が可能となった。

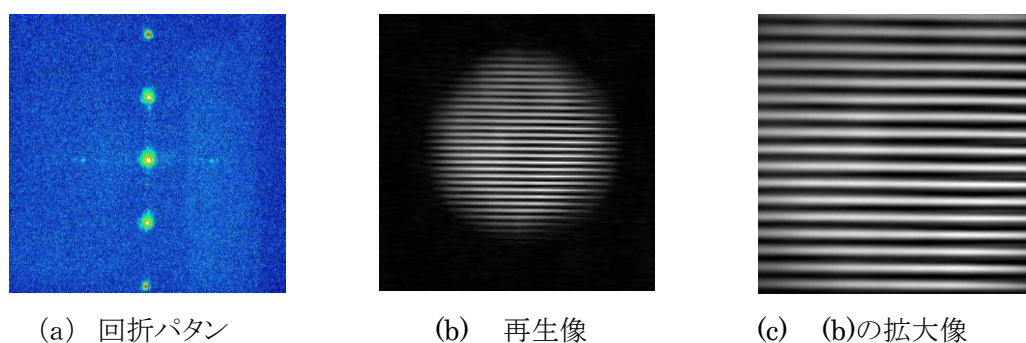


図2 マスク上hp100 nm の像再生例

③ CD 評価とシャドウイング効果の検証

試作したマスクの CSM による CD 測定と CD-SEM との比較測定を進め、CD 測定に関しては高精度に測定可能なことを明らかにした。また、応用例として同一パタンの水平と垂直とでのシャドウイング効果について解析を行った。図3に結果の一例を示すが、入射角 6 度での計算上のシャドウイング効果 16.8 nm に対し、CSM による測定値は 15.2 nm と良い一致を得た。

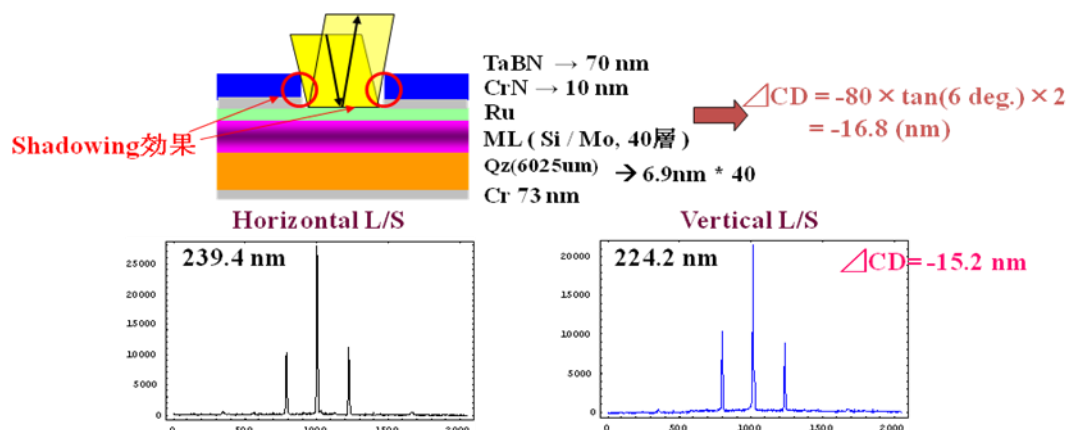


図3 シャドウイング効果の測定

(2) 永田グループ

本研究は、産業利用の観点から EUV 光スキャトロメリー用の光源としてスタンドアロン型の高次高調波を使用し、さらに高出力化によって測定時間の大幅な短縮を実現することを目的としている。そこで、平成 22 年度までの目標として、市販のレーザーシステムベースで現在利用している放射光よりも 1000 倍程度の出力(1 nW)が利用可能となるような高次高調波発生システムを構築する。

本年は、これまでの理化学研究所緑川研究室での 13 nm 高調波発生に関する報告を踏まえ、励起レーザーとしてテーブルトップサイズの 5mJ, 35fs, 1kHz の Ti:サファイアレーザーシステムを選定した。これは空間的に高精度な干渉計測を実現するために、励起レーザーのビームの空間的な安定性、および計測時間内におけるレーザー出力の高いレベルでの安定性が必要となることを考慮した上での選択である。

レーザーシステムは 11 月に入札を行い、12 月にスペクトラフィジック社に落札、3 月に当初予定のレーザーシステムを入手し、立ち上げを進めている。

また、このシステムに合わせた高次高調波発生用汎用チャンバーの設計、およびスペクトル計測用分光器の設計をおこなった。これには、これまで理研で行ってきた 13 nm 高次高調波発生のためのシステムの経験を踏まえ、利便性などに考慮した上での集光システム、高次高調波発生用相互作用セル、高次高調波切り出し用のセル、高次高調波の最適化に必要な分光器のそれぞれに機能を分け、それぞれが極力簡便なものとなるように心がけた。

今後、設計したチャンバーを製作し、1μW 程度の出力を目標として高次高調波発生条件の最適化をおこなう。これと併せて励起レーザーシステムのビームの空間的な安定性の評価および高次高調波のコヒーレンスの評価を行う。

(3) 藤田グループ

① 白色光発生用ファイバーレーザーシステム

- ・現有のファイバーレーザー発振器のパルス幅 62 fs の短縮化・安定化を図った。
- ・電气的分集器により Nd:YAG レーザーの 5 kHz の繰返しに適合させた。
- ・電子回路の高性能化により、安定した 5 kHz パルスが得られた。

- ・fs ファイバーレーザー発振器、パルス伸張器、LMA ファイバー増幅器、およびパルス圧縮器からなるファイバーレーザーシステムを構築した。

② OPCPA 励起用 Nd:YAG レーザーの安定化

- ・Duty 比を 40%に設定し、マクロパルス間の熱揺らぎの低減を行った。
- ・励起を最大値の 80%にして、熱の影響を抑制しながら平均出力 700W 以上を達成した。
- ・高効率の高調波変換を行うために、Nd:YAG レーザーのビーム品質の改善を実施した。
- ・プリアンプの開口利用率を4分の1にしプリアンプでの熱ひずみの影響を抑制した。
- ・2倍高調波発生実験を行い、変換効率 40%以上、平均パワー80W を達成した。

③ Nd:YAG レーザーとファイバーレーザーの同期運転

- ・5 kHz 動作において両者のタイミングを 50 ps の精度で調整できることを確認した。

3. 研究実施体制

(1)「兵庫県立大学木下」グループ

①研究分担グループ長:木下 博雄(兵庫県立大学、教授)

②研究項目

- ・コヒーレント EUV スキャトロメトリ顕微鏡システム全体の開発
- ・欠陥検出アルゴリズムの開発と検査
- ・CD 測定アルゴリズムの開発と検査

(2)「理化学研究所永田」グループ

①研究分担グループ長:永田 豊(独立行政法人理化学研究所、専任研究員)

②研究項目

- ・高次高調波 EUV 光の発生
- ・コヒーレント EUV 用フェムト秒レーザーシステムの高効率化・コンパクト化

(3)「大阪大学藤田」グループ

①研究分担グループ長:藤田 尚徳(大阪大学、准教授)

②研究項目 高出力コヒーレント EUV 光の発生

- ・高平均出力 fs レーザーの開発
- ・高安定・高効率高次高調波光の発生

4. 研究成果の発表等

特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数：0 件（CREST 研究期間累積件数：0 件）