

極微パターン構造計測のための コヒーレント 13nm 高次高調波光源の開発

永田豊^{1, 2}、木下博雄^{1, 2}、緑川克美¹

基幹研究所 緑川レーザー物理工学研究室¹、兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所²

EUV リソグラフィ用マスクの検査装置として回折顕微鏡の一種であるコヒーレント EUV スキャトロメトリー顕微鏡(CSM)が注目されている。この方式では高精度な位相欠陥検出が可能になるものと期待されているがコヒーレントな EUV 光源と高 NA での回折画像計測が必要となる。兵庫県立大学ではこれまでに部分コヒーレント光である放射光を用いて予備的な実験を行ってきた。しかし光量不足とスペクトル帯域による分解能不足が課題となっていた。この装置を実用化するにはコンパクトで高出力かつ狭帯域で空間的に完全なコヒーレント EUV 光源が必要となる。この光源として高次高調波が適していることから共同研究を開始した。昨年度までに市販のレーザーシステム(Spitfire Pro 6W: 1kHz, 6 mJ/pulse, 32 fs)を用いた高次高調波発生により空間的にフルコヒーレントかつ狭帯域な 13 nm 高次高調波を発生させ、予備実験において線幅 2 nm の振幅欠陥からの回折信号を計測することに成功した。このときの 13 高次高調波は出力 50 nW, スペクトル幅 0.1 nm, ビーム拡がり角 0.18 mrad であった。放射光を用いた時の線欠陥の検出限界は 10 nm でありこの結果と比較してサンプル上での光強度は放射光と比較して約 100 倍程度向上していることがわかった。この数値は当初目標の 1000 倍と比較すると十分ではない。この原因としては複数考えることができる。もっとも大きな問題は CSM の入射用ピンホールの直径 $\Phi 10\ \mu\text{m}$ と高次高調波の出射点でのスポットサイズ $24\ \mu\text{m}$ のマッチングがあげられる。出射点からピンホールまでは Mo/Si 多層膜の凹面鏡を用いて 1:1 の像転送をおこなったためピンホールによって光量が 1/10 以下となった。また、像転送に用いた Mo/Si 多層膜は 5 枚であるが波長同調が十分でなく結果的に出力が半分以下になってしまったことなどがあげられる。ピンホールのサイズを大きくすれば光量は増加するが装置の構成上、周期構造からの回折光強度と位相欠陥からの回折光強度のコントラスト比はピンホールの面積に対して反比例する。微細欠陥検出のためにはコントラスト比を下げる必要があるので EUV 光の利用効率を上げるためには光学系の転送倍率を最適化するためには Mo/Si 多層膜鏡の反射帯域の同調も必要である。さらに、光源のサイズとピンホールサイズを同程度にするためには回折画像からのパターン再生アルゴリズムの変更および光源の位置安定性が必要となる。これは測定光のサンプル上での強度分布が安定している必要があるためである。再生アルゴリズムとしてはタイコグラフィが優れており、放射光を用いた予備実験でその有効性を確認した。一方ビームの位置安定性向上のため励起レーザーシステムにビームロック装置を導入して励起光の空間位置安定性の向上を計った。予備実験としてレーザーと同じ光学定盤上で高次高調波発生用システムの集光光学系を模した構成でその評価をおこなった。この実験に先立ちビーム位置の安定性を低下させる原因となりうる真空ポンプ等はすべて隣室へ移動した。この環境においてレーザーシステムおよびビームロック時のビーム位置安定性の評価をおこなった。ビームロック装置は位置検出器としての PSD 2 個と位置、角度制御用にピエゾ素子 2 個および PSD からの出力をハードウェアで信号処理しピエゾ素子駆動用にフィードバ

ックする回路から構成されている。PSD A, B はそれぞれ角度情報検出用および位置情報検出用に使用した。レーザーを含めた全体の構成を図 1 に示す。ピエゾ素子の間隔は約 1 m, ピエゾ 2 から焦点までの距離は約 5.2 m とした。集光には曲率半径 3 m の銀ミラーを使用して入射角度の最適化により非点収差を取り除いて実験を行った。焦点位置での励起レーザーのスポットサイズは約 $75\text{ }\mu\text{m}$ であった。実際の配置に近い状態を考慮して PSD A までの光路上に配置したミラーからの反射光を取り回して異なる光路上の焦点位置に設置した CMOS センサを用いてビームの角度変位を評価した。図 2 (a), (b) にそれぞれビームロック非動作時および動作時のビームの位置情報を示す。測定は 1 kHz 20 秒間および 10 Hz 取り込み 30 分間でおこなったが有為な差は確認されなかった。非動作時のビーム揺らぎはそのときどきで多少ばらつきはあるが典型値として水平方向 $\pm 32\text{ }\mu\text{m}$ ($5.9\text{ }\mu\text{m rms}$), 垂直方向 $\pm 32\text{ }\mu\text{m}$ ($6.9\text{ }\mu\text{m rms}$) であったのに対してビームロック時は水平方向 $\pm 2.6\text{ }\mu\text{m}$ ($1.0\text{ }\mu\text{m rms}$), 垂直方向 $\pm 2.7\text{ }\mu\text{m}$ ($1.0\text{ }\mu\text{m rms}$) となった。13 nm 高次高調波のスポットサイズは励起光の焦点位置において $24\text{ }\mu\text{m}$ 以上と見積もられるのでビームロック時はビーム揺らぎによる CSM 測定への影響が少ないことが予想される。条件の最適化の際にピエゾ素子の動作周波数を 200~300Hz で変化させたが特に影響はでなかった。ビームロック時の CMOS センサ上での位置変位は条件による変化は少なく水平, 垂直方向ともほとんど $0.95\sim 1.15\text{ }\mu\text{m rms}$ となった。原因はいくつか考えられるが最も大きな要因はビームのショット揺らぎである。これはレーザーシステムの励起用 Nd:YLF レーザー 2 台 (1 kHz 動作) の影響が大きい。ショット揺らぎによる変位量はそのときどきで変化することが確認されたがおおよそ $0.6\sim 0.8\text{ }\mu\text{m rms}$ 程度で正規分布となっていた。これはどうしても取りきれない成分として残る。つぎに PSD の位置分解能が 0.9 nm 程度となっていることなどがあげられる。そのため位置変位量を減少させることは難しい。位置変位を角度情報に換算すると焦点距離に反比例するため今回の条件では $0.66\text{ }\mu\text{rad rms}$ となる。したがって焦点距離の長い光学系を利用すれば角度変位量自体は小さくすることが可能である。ただ、本研究においてはそのためのスペースを確保できないためこれ以上の改善は困難である。本来この PSD は集光用チャンバーに取り付けて使用すべきであるがビームの取り回しに十分なスペースがなかったため新たに真空チャンバーを作製した。この新しいチャンバーではより長い焦点距離のミラーも使用可能となったため曲率半径 3.5 m, 4 m 等のミラーを用いて再度高次高調波発生条件の最適化を行った。予備的な実験ではあるが 13 nm における 4 倍以上の出力の増加およびビーム拡がり角のより小さな(スポットサイズの大きな) 高調波の発生に成功した。本年度後半において PSD を真空チャンバーの直近に取り付けた状態でビームロックを行いすべての条件を最適化して CSM による欠陥検出実験を行う予定である。

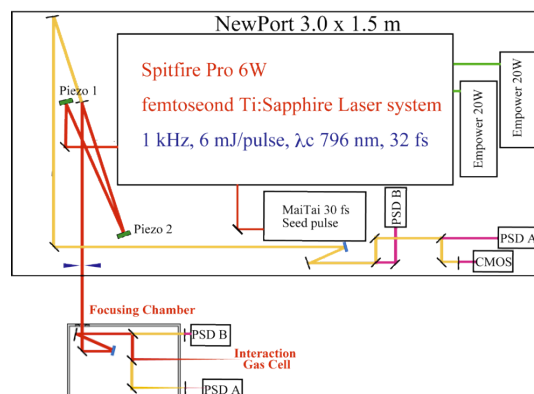


図 1 ビームロック装置全体図

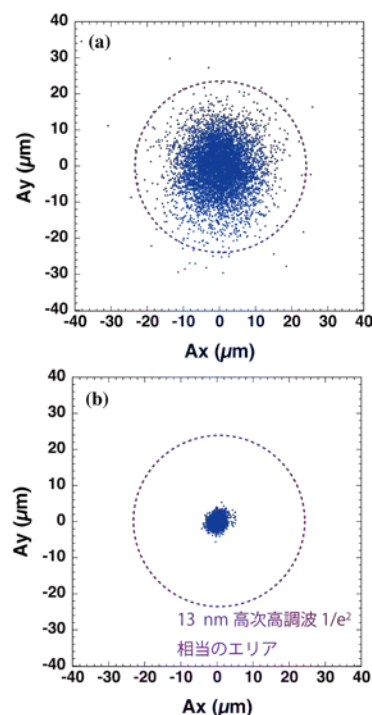


図 2 CMOS センサーで観測したビーム位置の XY プロット

