



# 先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業 フォトンファクトリーの産業利用促進 利用報告書

課題番号： 2014I008  
研究責任者： 市丸 智、NTT アドバンステクノロジー株式会社  
利用施設： 高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 BL-11D  
利用期間： 2014年10月～2014年12月

## 新規 EUV 光学素子の特性評価 Characterization of new EUV optical elements

市丸 智、大知 渉之、畑山 雅俊、奥 哲  
Satoshi Ichimaru, Tadayuki Ohchi, Masatoshi Hatayama and Satoshi Oku

NTT アドバンステクノロジー株式会社  
NTT Advanced Technology Co.,

### アブストラクト：

トライユース事業を利用し、新規 EUV 多層膜反射鏡の反射率特性評価を実施した。新規 EUV 多層膜反射鏡を開発するに際し、その高反射率化は最も重要な要因である。反射率評価には BL-11D を使用した。BL-11D には可搬式反射率測定器が備わっている。この測定器を用いて (1) 反射率評価の妥当性について検討し、さらに新規 EUV 光学素子として (2) 高積層数多層膜の反射率評価と (3) 高次高調波分光用多層膜の反射率評価を実施した。その結果、反射率評価が実施可能であり、新規 EUV 光学素子の反射率を測定することが出来ることを示した反面、反射率の絶対値を測定するには装置システムのアップグレードが必要であると考えられる。

We characterize reflectivity profiles of new EUV mirrors with the industrial application program of Photon Factory. The high reflectance EUV mirror is most important for developing high performance EUV mirror. This characterization is executed on BL-11D, PF. There is a portable chamber for measuring a reflectivity profile. In this program, we characterize three contents; (1) the validity of EUV measurements, (2) the reflectivity of high layer number multilayer and (3) the reflectivity profile of multilayer mirror for high harmonic generations. In this result, we are able to measure the reflectivity profile at-wavelength, though it is necessary to improve the machine for measuring the absolute of reflectivity.

キーワード： EUV、多層膜反射鏡、反射率評価

1. はじめに： X線・EUV光を利用した様々な分析手法・加工技術・評価技術が実用化されている。これらの応用のさらなる高性能化や新規手法の開発においては、それらを構成する光学素子の高性能化が不可欠である。

X線・EUV領域で用いられる光学素子の一つに反射鏡がある。X線領域においては、物質の光学定数が1よりわずかに小さいため、X線の集光角・屈折角は非常に小さい。そのため、鏡面の表面に人工格子を形成したX線・EUV多層膜反射鏡が開発され、実用的に用いられている。

現在実用的に用いられている多層膜反射鏡では、その利用用途に応じて高効率・高耐久性・高安定性といった様々な要求があり、それに合わせた多層膜反射鏡の必要性がある。その中でも共通して重要となる点は高反射率なX線多層膜である点であり、そのため使用波長で反射率を測定することはより高反射率なX線多層膜を開発するために必要不可欠である。

多層膜反射鏡の開発にあたっては、要求仕様に基づき多層膜の設計・作製を実施し、その多層膜反射鏡の特性評価を行う。評価の一つに実験室におけるXRD装置を用いたXRR法がある。この手法により多層膜の構造評価を行うことが出来る。その結果を設計・作製にフィードバックをかけながら設計値、作製条件の最適化を行い、このルーチンにおいて要求仕様を満たす多層膜を開発する。しかしながら、XRR測定では実波長での反射特性を正確に見積もることは難しい。そこで要求仕様に既定された波長での評価実験(放射光での反射率評価)を行う。放射光はこの目的にもっとも適した光源であり、世界中の放射光でEUV光学素子の特性評価が実施されている。

これまで本問題の実施にあたっては、主に米国放射光施設「Advanced Light Source」(以下ALSと略す)を利用して反射率評価実験を実施してきた。しかしながら、手続・渡航経費・労力等

の課題からその開発が遅々としていた経緯がある。今回トライアルユースを利用することにより反射率評価の妥当性を確認し、今後PFでの継続的な評価を検討したいと考える。

本課題申請では、(1) 反射率評価の妥当性について検討し、さらに新規EUV光学素子として (2) 高積層数多層膜の反射率評価と (3) 高次高調波分光用多層膜の反射率評価を実施した。その結果について、以下に述べる。

## 2. 実験：

実験は、BL-11Dにて実施した。[1] 本BLには、可搬式反射率測定器が備わっており、その装置を用いて反射率測定を実施した。

EUV反射率測定は一般に $\theta - 2\theta$ 法と呼ばれる方法である。試料に対し設計した(光軸に対して)入射角 $\theta$ にてEUV光を入射させる。そのときその反射光は $2\theta$ であるから、その角度に検出器を配置する。その入射光と反射光の強度比を取ることによって反射率を決定する。今回は、入射角・反射角を固定し、BL備付の分光器にて波長を選択することにより多層膜の反射プロファイルを測定することを実施した。

今回の実験では、波長13.5nm用多層膜を中心に評価した。波長13.5nmの光は次世代ステップ作製手法として開発が進められているEUVリソグラフィに用いられており、現在多くの光学素子が作製されているためである。当初目的では、より短波長側の反射鏡の評価も実施する予定であったがマシントイムのスケジュール、また反射率評価のセットアップの不手際等によりうまく反射率プロファイルを測定できなかつたため、今回の報告書からは除外している。

サンプルの作製にはマグネトロンスパッタ法を用いた。本作製法は、これまで様々な多層膜を開発してきた実績のある手法であり、多層膜反射鏡は市販のシリコンウエハの上に作製した。今回作製したサンプル等の詳細については、次章にて目的・測定条件・結果共々述べるものとする。

## 3. 結果および考察：

### 3.1 反射率評価の妥当性

反射率計の校正としての反射率の絶対値評価は一般的に難しく、そのため同じ試料を異なるサイトで測定するラウンドロビンが実際されてきた。[2] 今回我々は、ALSにて評価された多層膜ミラーを使用し反射率測定を実施した。その結果を図1に示す。試料は波長13.5nm用Mo/Si多層膜である。図中実線がALSで測定した結果である。図中に示す点がBL-11Dで測定した結果である。BL-11Dでの測定では、試料へ

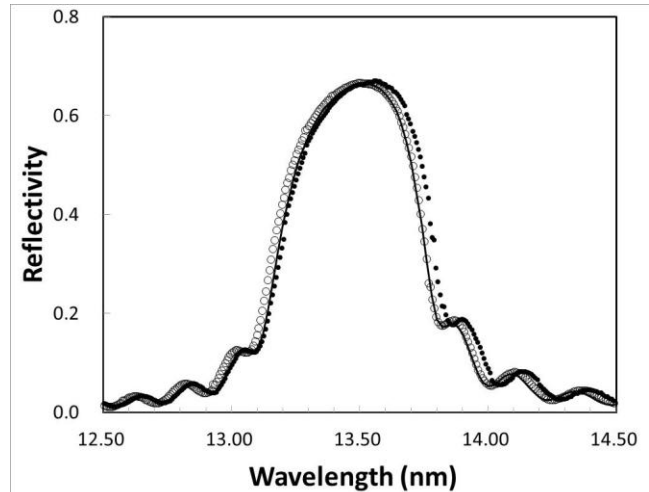


図1. 反射率測定結果の比較。○: BL-11Dにおいて長波長から短波長へ向かって測定した結果、●: BL-11Dにおいて短波長から長波長へ向かって測定した結果、実線: ALSでの測定結果。

の斜入射角を $70^\circ$ で固定し、分光器の設定をエネルギー範囲85eVから100eVの範囲をピッチ0.05eVにて変化させながら反射率の波長依存性測定を実施した。図中測定結果に2つのデータがあるが、この差異は分光器を長波長から短波長へ向かって測定した結果(○)と短波長から長波長へ向かって測定した結果(●)である。なお、この2測定間で試料の角度、位置等は変化させていない。また、BL-11Dの測定条件は、先に述べたとおりエネルギー指定であるが、ALSでの測定結果は波長である。比較するために、PFでの測定結果を波長に変換し表示している。

図から明らかであるが、ALSの結果と比較すると、BL-11Dでの測定結果の半値幅が若干広がっている。またBL-11Dで2つの測定ピークを比較すると、ピークがそれぞれ測定開始側(長[もしくは短]波長側から測定し始めた場合での低[高]波長側)とは反対側にシフトしている。また一回の測定で得られた反射プロファイルにおいて、測定開始直後側の反射率プロファイルはALSでの測定結果と比較的一致している一方、測定後半の反射率プロファイルに大きな不一致が生じており、かつ、この現象は波長スキャンの方向に依存していないことから、初期設定の分光器の角度は設定の角度に問題なく設定されているが系統的に分光器がずれているのではないかと考えられる。この現象を解消するために測定条件を変化させて測定してみたが、改善に

はいたらなかった。

また、そのためかピークの反射率も測定毎にばらつきが発生し、反射率の絶対値測定には分光器の改善が必要ではないかと考える。

### 3.2 高積層数多層膜の反射率評価

LPP 光源、高次高調波光源、X 線レーザー、X 線自由電子レーザーなどの EUV 光源の高出力化技術が進展する一方で、EUV 多層膜ミラーの高強度光照射に対する長寿命化についての検討が進み始めている。その解決策の一つとして、高積層多層膜による長寿命化が挙げられる。

ただし高積層化した場合、多層膜の界面粗さが成長し反射率を低下させてしまう恐れがある。そのための評価としては実際積層数を変化させた多層膜を作製し、実波長での反射率を測定する以外の方法はないと考える。そこで我々は、積層数の異なる多層膜を作製し、その反射率測定を実施した。

作製した試料は、波長 13.5nm、入射角 45° 用 Mo/Si 多層膜である。試料は、積層数 80 ペア、120 ペア、160 ペアの 3 種類を準備した。その測定結果を図 2 に示す。この結果から 160 ペアまで顕著な反射率の差は見られないことが確認できた。

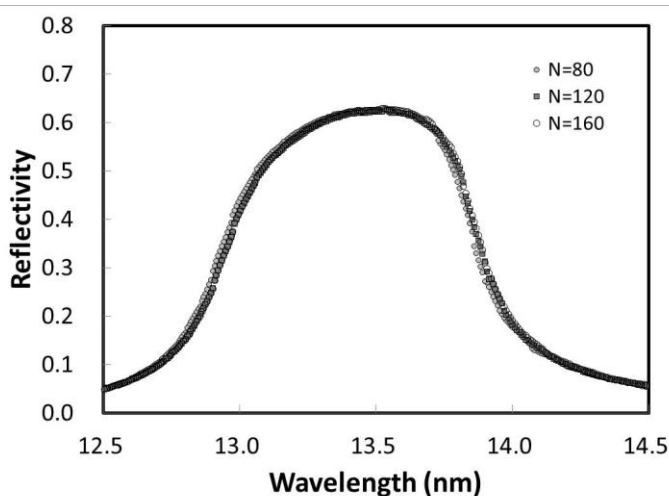


図 2、高積層対数 Mo/Si 多層膜の反射率測定結果。

### 3.3 高次高調波分光用多層膜の反射率評価

EUV・X 線領域での光源としては放射光が大きな主流の一つであることは違いないが、近年それ以外の光源として LPP 光源、高次高調波光源等の実験室利用を目的とした光源開発が進んでいる。これらの光源の一つの課題として、その単色化がある。これらの光源は、その原理から連続光ではなく各々の光源を特徴とした非連

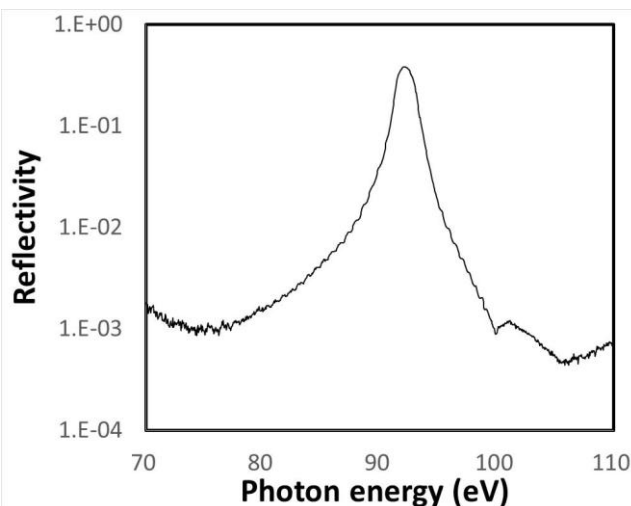


図 3、HHG 用 Mo/Si 多層膜の反射率評価結果。

続的輝線の集合体である。

その単色化については従来フィルターが用いられていたが、フィルターの特性上単色性や効率の問題、また光源からの高強度光やプラズマに曝されることによる酸化や破損が避けられない、等の問題がある。

そこで我々は、光源が非連続的輝線の集合体であるという特性を生かし、半値幅がその輝線の幅より十分小さいが、反射率が高い多層膜ミラーを開発する。本目的の多層膜の構造は、極端に重元素と軽元素の差があるため、重元素層が拡散層の影響を受けやすく、反射特性が十分に得られないことが懸念される。そこで実際に当該構造のミラーを作製し、反射率測定を実施した。

図 3 に反射率測定結果を示す。入射角 45 度で、波長依存性を測定した。その結果、FWHM で 2eV の多層膜ピークを得られることが分かった。但し、3.1 で示した通り半値幅は若干大きくなっていると想定される。そのため本評価では、FWHM 2eV 以下である、とするのが良いと考える。また、その消光比は約二桁半であり、想定される値に近いことが分かった。

## 4. まとめ：

本課題では、反射率測定評価の継続的利用判断を目的としてトライアルユースでの多層膜反射率評価実験を実施した。その結果、反射率特性の絶対値保証という観点では十分な結果が得られたとは考え難い。ただ、新規多層膜の評価という観点では、反射プロファイル等得られており、測定は出来るのではないだろうかと考えている。

今後ビームライン装置のアップグレード等設備面、人員面でのご尽力を頂ければ、より一般

のユーザーが使い易く利用も大きく広がるのではないかと考える。

### **謝辞**

本課題遂行にあたり、東北大学 羽田野忠博士には BL-11D の使用方法から測定方法まで詳細にご教授・ご助言頂きました。ここに感謝申し上げます。

また、本課題にあたり御尽力頂きました KEK の古室昌徳博士、間瀬一彦博士、高木秀彰博士、菊池貴司博士に感謝申し上げます。

なお、本研究は、文部科学省の先端研究基盤共用・プラットフォーム形成事業の補助をいただき、実施致しました。

### **参考文献**

- [1] T. Hatano and S. Aihara, “Monochromator operation in the carbon window region at the reflectometry beamline BL-11D of the Photon Factory”, Journal of Physics: Conference Series 425, 152018, 2013
- [2] F. Scholze, J. Tümmler, E. Gullikson, A. Aquila, “Comparison of extreme ultraviolet reflectance measurements”, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS. 2(3), 233-235, 2003

### **成果発表状況：**

- (1) S. Ichimaru, M. Hatayama, T. Ohchi, S. Oku, “Mo/Si multilayer mirrors with 300-bilayers for EUV lithography”, The 22nd Symposium on Photomask and Next Generation Lithography, 2015
- (2) 畑山雅俊、市丸智、大知渉之、奥哲、「300 積層ペア級 Mo/Si 多層膜 EUV ミラーの反射率評価」、第 32 回 PF シンポジウム、2015