

40 nm 波長帯域における高反射率多層膜ミラーの開発

Development of multilayer mirrors

with high reflectivity for the 40 nm wavelength region.

澤田和寛 (M2)

Kazuhiro Sawada

Abstract

Multilayer mirrors with high reflectivities at 40 nm are developed. Seven-different types of multilayers as Mo/Mg, Cr/Mg, B4C/Mg, SiC/Mg, W/Mg, Mo/Si, Sc/Si are designed by a layer-by-layer calculation method. Those mirrors are fabricated by magnetron-sputtering and their reflectivities were measured by high-order harmonics laser pulses at 40 nm. The reflectivities at 40 nm obtained for SiC/Mg and Cr/Mg are ~40 and ~30%, respectively.

1. はじめに

近年、波長 40 nm 帯域においてマイクロジュールを超える孤立アト秒パルスがフェムト秒レーザーパルスの高次高調波により開発されている[1]. そのような高強度光源を回折限界程度まで集光できれば、XUV 領域において 10^{16} W/cm^2 を超える著しく強い光電場を実現でき、未踏の非線形光学現象の励起が可能になると期待される.

強い光電場の実現の為、高調波の波長を選択し低収差に集光が可能である多層膜コートのシュワルツシルト対物鏡を回折限界集光システムとして選択した場合、高い反射率の多層膜ミラーの開発が不可欠である.

しかしながら、長波長側(40-50 nm)の多層膜ミラーは、EUV 露光装置用(波長 13.5 nm)、He-II 輝線観測用(30.4 nm)のそれと比べ成果報告は非常に少ない現状にある. 唯一の候補とされる Sc/Si 多層膜ミラー[2]は、M 殻吸収端(43.6 nm)の長波長側で 50%を超える反射率を得たという報告があるものの、さらに短波長側である波長 40 nm では吸収により反射率は理論計算値でも 30%程度と低

く、実測値においては 20%程度の成果報告に留まっている. そこで、中心波長 40 nm に設計した様々な多層膜ミラーの製作、及び高次高調波による直入射反射率の計測を行った.

2. Layer-by-Layer 法による物質対選択則及び光学反射率計算

透明な物質が存在できない X 線領域では、吸収ができるだけ小さく、かつ両者の複素屈折率の距離が大きい物質対が求められる(山本等による選択則[3]). 図 1 の物質の複素屈折率から、中心波長 40 nm に設計した様々な物質対の理論反射率を計算した. 結果、60%に迫る反射率を有する物質対を見出すことに成功した. 高反射率を得られるものから順に、Mg、Si をスペーサーとした表 1 に示す 7 つの多層膜ミラーを製作することに決めた.

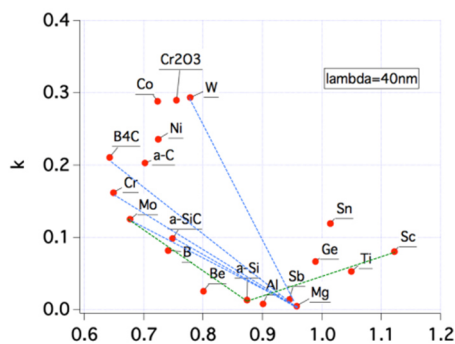


図 1 波長 40 nm における物質の複素屈折率

表 1 多層膜ミラーの設計パラメータ

物質対	周期長(Å)	Γ	最大反射率
Mo/Mg	212	0.25	0.59
Cr/Mg	212	0.23	0.57
B4C/Mg	212	0.25	0.54
SiC/Mg	212	0.25	0.52

W/Mg	209	0.19	0.42
Mo/Si	238	0.36	0.37
Sc/Si	210	0.33	0.31

3. 実験方法

3.1. マグネトロンスパッタ装置による成膜

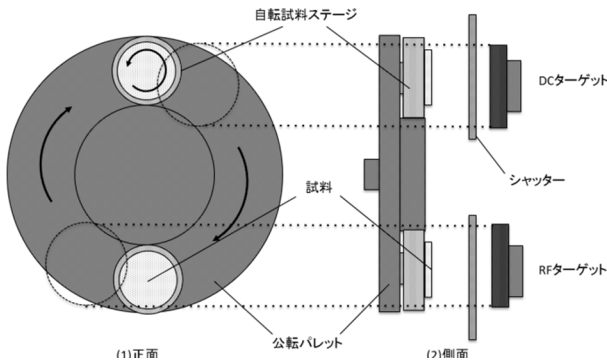


図 2: マグネトロンスパッタ装置

図 34: 高次高調波による多層膜ミラーの反射率測定実験セットアップ

マグネトロンスパッタ装置を用いて成膜を行った。図 2 のように DC 電圧と RF 電圧をターゲットに駆動することができる。Mg のような金属のターゲットは DC 電圧を、SiC のような非金属のターゲットは RF 電圧をかけた。Ar ガスの放電によりスパッタされたターゲット粒子は、自転公転を行う試料に成膜される。成膜レートを決定後、シャッターの開け閉めする時間を調節することで多層膜をコートした。基板は 4 inch の単結晶 Si を使用した。

3.2. XRD による成膜評価及び周期長測定

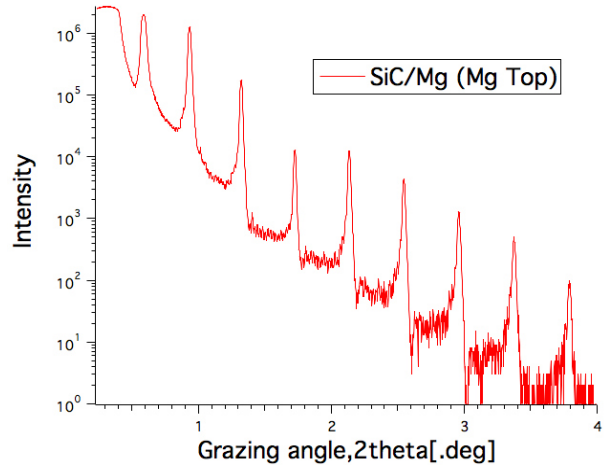


図 53: XRD スペクトル

周期長及び周期構造の評価の為に Cu-K α 線 (1.54 Å) による XRD を使用した。例として図 3 に SiC/Mg の XRD スペクトルを示す。多層膜構造ができると、波の干渉の強め合いにより図 3 のよう

な鋭いピークを得られる。Mo/Mg, B4C/Mg, W/Mg については、斜入射角が高角側になるにつれて鋭いピークが得られなかった。物質対の拡散により周期構造が得られなかったと考えられる。

4. 高次高調波による多層膜ミラー反射率測定

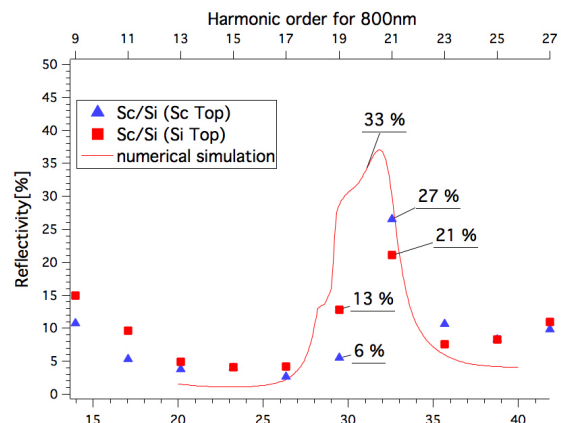
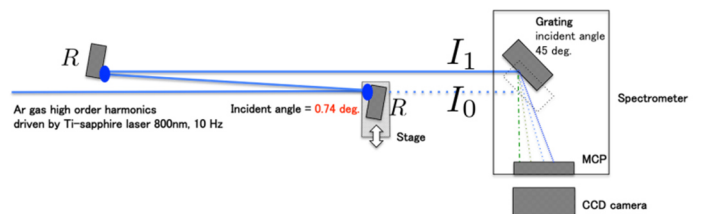


図 45: Sc/Si 多層膜ミラーの反射率測定結果

$$R = \sqrt{I_1/I_0} \quad (1)$$

図4に反射率測定のための実験セットアップを示す。チタンサファイアレーザー励起による高次高調波(媒質 Ar)を図4のように入射させ、分光された光の強度を取得した。この際、図4のようにミラーを介した時と介さなかった時の強度をそれぞれ I_1 、 I_0 とすると、式(1)のような関係式が成り立つことから、一枚あたりの反射率 R を割り出した。

5. 実験結果

図5のように、理論計算において光子エネルギー31 eV(波長 40 nm)で反射率 33%であった Sc/Si 多層膜ミラーが、21 次高調波(≈38nm)における計測では反射率理論値 30%に対して 27%、19 次高調波(≈42nm)で理論値~25%に対し~13%の反射率を得た。理論曲線から波長 40 nm においては、~30%の反射率が得られていると予想できる。

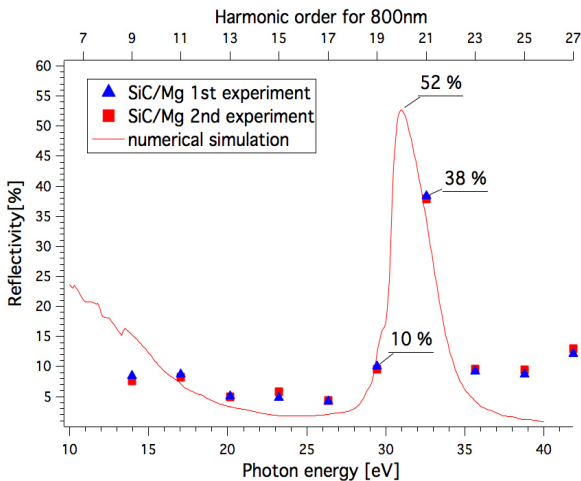
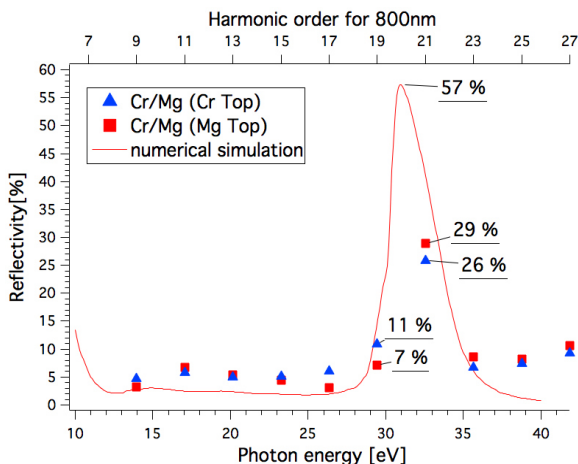


図 6 : SiC/Mg 多層膜ミラー反射率測定実験結果

SiC/Mg は理論計算において光子エネルギー31 eV(波長 40 nm)で反射率 52%であった。再現実験



を含む2回の計測ともに、21次高調波(≈38nm)において理論値 38%に対して実測値 38%、19次高調波(≈42nm)において理論値~10%で計測値 10%であり、理論計算値と極めて近い実測データが得られた。波長 40 nm では40%以上を超える反射率が得られていると予想できる。

図 7 : Cr/Mg 多層膜ミラーの反射率測定実験結果

Cr/Mg は光子エネルギー31eV(波長 40 nm)において反射率理論値 57%であった。表面層が Cr のものは、21 次高調波(≈38nm)において理論値 40%に対して実測値 26%、19 次高調波(≈42nm)において理論値 15%に対して実測値 11%であった。波長 40 nm では 30%以上を超える反射率が得られていると予想される。

6. 結論

波長 40 nm において SiC/Mg が 40%以上、Cr/Mg は 30%以上得られていると見積もられた。Sc/Si に代わる高反射率な物質対を見つけたと共に、波長 40 nm で報告されている Sc/Si の反射率 20%程度を上回る成果を得ることに成功した。XUV 領域で 10^{16} W/cm² の集光強度の達成に有効なシュワルツシルト対物鏡用の多層膜ミラーを開発することができた。

参考文献

- [1] E.J. Takahashi *et al.*, Nat. Commun. **4**, 2691 (2013)
- [2] Yu.A. Uspenskii *et al.*, Opt. Lett. **23**, 771 (1998).
- [3] M. Yamamoto *et al.*, Appl. Opt. **31**, 10, 1662 (1992)

謝辞

本研究は、理化学研究所光量子工学研究領域アト秒科学研究チーム高橋栄治博士、東北大学物質科学研究所豊田光紀博士との共同研究プロジェクトの一環として行なわれました。研究環境をご提供頂きました、緑川克美博士、柳原美廣教授に心から御礼申し上げます。