

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

極端紫外光分光撮像用の Mo/Si多層膜回折格子の開発

村地 哲徳・金尾 美穂・亀田 真吾

山崎 敦・吉川 一朗・中村 正人

2004 年 3 月

宇宙航空研究開発機構

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY

極端紫外光分光撮像用の Mo/Si 多層膜回折格子の開発

村 地 哲 徳*・金 尾 美 穂*・亀 田 真 吾*
山 崎 敦**・吉 川 一 朗*・中 村 正 人*

Development of Mo/Si Multi-Layer Grating for Extreme Ultra-Violet Spectrograph

By

Tetsunori Murachi*, Miho Kanao*, Shingo Kameda*,
Atsushi Yamazaki**, Ichiro Yoshikawa* and Masato Nakamura*

Abstract: One of the methods to research the escaping atmosphere is to observe the resonance-scattered light from the escaping particles. Especially, the escaping H, He and O particles resonantly scatter extreme ultraviolet (EUV) lights (H I: 121.6 nm, He I: 58.4 nm, He II: 30.4 nm, O II: 83.4 nm). Therefore, it is important to develop the optics for EUV. In addition, imaging observation is necessary to observe the temporal variation of the escaping atmosphere.

In this method, the optics consist of the bandpass filters and the multilayer-coated mirror for EUV. And the optics were loaded onto the satellites and rockets, and observed EUV. With these optics the demerit is non spectrum observation, in other words, single optics can detect single wavelength of EUV. Therefore plural optics using filters and mirror or the spectroscope are necessary to observe the plural particles simultaneously. But the demerit of spectroscope is much more loss of light than that with filters and mirror.

This time we produce the Mo/Si multilayer-coated gratings for EUV light : 30.4nm, and evaluate their performance. We evaporate on the gratings with top layer of Si: 5.0 nm and 20 pairs of Mo: 4.4nm and Si: 13.3 nm. By Atomic Force Microscope, we verify that the grooves of the multilayer gratings are not buried. In addition, maximum reflective efficiency of multilayer blazed grating is 2.2 %, that of multilayer laminar grating is 2.9 %. By multilayer technology, reflective efficiency of multilayer grating exceeded approximately 5 times higher than that of Pt monolayer grating.

概 要

惑星大気圏から宇宙空間への原子の散逸量を測定する方法として、中性粒子・イオンの共鳴散乱光を観測して散逸量を求める方法がある。特に、H・He・Oなどの共鳴散乱光は極端紫外光領域にあり、極端紫外光を観測可能な光学系の開発が重要である。また、大気の空間分布やその時間変動を観測するためには撮像観測も必要である。

この方法では従来、バンドパスフィルターと、その波長を強く反射するよう製作された多層

*宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

**電気通信大学菅平宇宙電波観測所

膜反射鏡を組み合わせ、観測対象の散逸原子の共鳴散乱光のみを観測可能な光学系を作成し、衛星・ロケットに搭載して観測を行った。しかし、分光観測ではないので、1つの光学系で観測可能な共鳴散乱光は1波長に限られる。複数の原子の共鳴散乱光を同時に観測する場合は複数の光学系が必要となる。1つの光学系で複数の共鳴散乱光を観測するには、通常、光学系に分光器を組み込んで観測を行う。だが、反射鏡と分光器を用いた場合を比較すると、一般的に分光器は光量の損失が多い。

今回はヘリウムイオンの共鳴散乱光（30.4 nm）を強く反射するように、最上層に Si : 5.0 nm, その下に Mo : 4.4 nm と Si : 13.3 nm のペア 20 層を回折格子に蒸着し、極端紫外光用の Mo/Si 多層膜回折格子を製作し、性能評価を行った。多層膜を蒸着しても回折格子の溝が埋まらないことを原子間力顕微鏡で確認した。また、多層膜回折格子の反射効率は、ブレーズ型が最大 2.2 %, ラミナー型が最大 2.9 % であった。多層膜技術を用いることで、単層膜で得られる反射効率の限界を超え、Pt 単層膜の場合と比較して、Mo/Si 多層膜では約 5 倍の反射効率を実現できた。

第1章 序 論

地球の大気はわずかがだが宇宙空間に散逸していることが知られている。宇宙空間への大気の散逸量やその分布や時間変化の測定は、プラズマ圏や磁気圏の活動をモニタリングする上で非常に重要である。また、大気の散逸メカニズムや惑星大気進化の解明に役立つ非常に重要なデータを得ることができる。

プラズマ圏・磁気圏では、中性粒子は自由に動くことができるが、荷電粒子には磁力線凍結定理が成り立つのでイオンは磁力線に束縛される。つまり、イオンの分布が磁力線の構造（プラズマ圏・磁気圏の構造）を反映している。従って、プラズマ圏・磁気圏の観測にはイオンの共鳴散乱光を観測し^{[1], [2], [3]}、宇宙空間への大気の散逸量や分布や時間変化を求める方法^[4]が適する。過去の衛星によるその場観測から惑星周辺に大量に存在し、プラズマ圏・磁気圏を構成する主要な原子であることが知られている He・O イオンの共鳴散乱光などは極端紫外光領域にある。従って、極端紫外光を観測可能な光学系の開発が重要である。また、原子の空間分布やその時間変動を観測するためには撮像観測も必要である。最も存在量が多い H⁺ は電子を持たず共鳴散乱を起こさないで、He⁺ や O⁺ の共鳴散乱光が光学観測に適する。

地球周辺の He⁺ を観測する場合について予測される光量を挙げると以下のような値になる。He⁺ の 30.4 nm の光は、プラズマ圏で 1 ~ 10 R (1 R = 10⁶ photons/cm²/sec) (He⁺ の密度は ~ 10 ions/cm³)、磁気圏で ~ 10⁻⁴ R (密度は ~ 0.005 ions/cm³) と見積もられている^{[5], [6], [7]}。また、プラズマ圏から磁気圏へのイオンの流出経路として、(1) 昼側極域からの流出 (0.03 ~ 0.1 R (密度は ~ 0.1 ions/cm³)), (2) プラズマ圏からの剥ぎ取り (0.1 ~ 1 R (密度は ~ 1 ions/cm³)), (3) 夜側オーロラオーバルからの上昇 (2 × 10⁻⁶ ~ 2 × 10⁻⁴ R (密度は 0.01 ~ 1 ions/cm³)) が考えられている^{[6], [7], [8]}。これらの現象をとらえるためには、それぞれの現象に対応した光量を観測できる光学系が必要になる。月に望遠鏡を設置して地球磁気圏を観測する場合について、補遺に光学系の感度の見積もりを示してある。

過去の衛星やロケットによるプラズマ圏・磁気圏観測では、目的の波長付近の光のみを通す金属やカーボンの薄膜フィルターと、Bragg 条件を満たすように薄膜を積み重ねて目的の波長を強く反射するように製作された多層膜反射鏡を組み合わせ、観測対象の散逸原子の共鳴散乱光を映像にする光学系を組み、衛星・ロケットに搭載して観測を行った。しかし、観測可能な共鳴散乱光は1つの波長に限られ、He⁺ や O⁺ のような重さが異なるイオンからの複数の共鳴散乱光を同時に観測して挙動の違いを研究する場合は複数の光学系が必要となる。1つの光学系で複数の共鳴散乱光を観測するには、光学系に分光器を組み込む方法が一般的である。反射鏡と分光器を用いた場合を比較すると、一般的に分光器は光量の損失が多い。そこで我々は、光路差が光の波長の整数倍

(n 倍) になる方向で回折光 (n 次光と呼ばれる．今回は 0 次光よりも入射光寄りに現れる回折光を便宜的に $-n$ 次光と呼ぶ) が強め合う性質を用いて分光する回折格子に，反射を高めるために多層膜を蒸着すれば反射効率を向上させることが出来ると考えた．

今回は， He^+ の共鳴散乱光 (30.4 nm) を強く反射する Mo/Si 多層膜回折格子を製作した．この回折格子の性能について報告する．

第 2 章 多層膜の蒸着と評価

2.1. 多層膜の蒸着

イオンビームスパッタ法で多層膜の蒸着を行った．多層膜の材質には Mo と Si を用いた．入射角 20° で波長 30.4 nm の光を入射したときに，各層からの反射が干渉し合って反射率を高めるように，Mo : 4.4 nm, Si : 13.3 nm のペアを 20 層積層するように設計し，蒸着を行った．また，最上層には Si を 5.0 nm 蒸着した．この理由は，Mo が最上層だと酸化による反射率低下を引き起こすからと，最上層の Si がない場合よりも反射率の向上 (5.0 nm が反射率向上の最適値で，1 割程度向上する) が見込めるからである．

今回は，(1) 多層膜の効果を測定するための反射鏡 (Si の基板)，(2) 刻線数：1200 本/mm，大きさ：15 × 15 × 3 mm，ブレード角： 7.9° ，ブレード波長：229 nm の Richardson 社製のブレード型ホログラフィック平面回折格子，(3) 刻線数：1000 本/mm，大きさ：20 × 20 × 3 mm，溝の深さ：50 nm の (株) 島津製作所製のラミナー型ホログラフィック平面回折格子に同時に蒸着を施した．

2.2. AFM による回折格子の溝形状の測定

(2) のブレード型回折格子と (3) のラミナー型回折格子の溝形状を AFM (原子間力顕微鏡) で測定した結果が図 1～4 である．図 1 は蒸着前のブレード型回折格子の測定結果で，図 2 は蒸着後のブレード型回折格子の測定結果で，図 3 は蒸着前のラミナー型回折格子の測定結果で，図 4 は蒸着後のラミナー型回折格子の測定結果である．それぞれの図のうち，上の図が 3 次元の像で，鉛直方向の軸 (Z) が溝の高さで，水平方向の 2 軸 (X・Y) が幅と奥行きである．下の図が溝と平行方向に $\sim 0.4 \mu\text{m}$ の領域で高さの平均値をとった断面図で，縦軸 (Z) が溝の高さで，横軸 (X) が水平方向の長さである．

蒸着によって溝が埋まることもなく，溝形状の大きな変化がないことが解る．ただし，図 3 と図 4 との比較から，数 10 nm 程度の大きさの構造はならされて滑らかになったことが解る．これらの図の X 方向に 0.3 nm ごとの所での Z の値でヒストグラムを作ると，山と谷の部分に対応した 2 つのピークになる．それぞれのピークの半値幅 (山と谷の部分の表面粗さに対応) を取って平均すると，蒸着前は半値幅の平均が 14.9 nm であったのが，蒸着後は 6.3 nm であった．蒸着によって回折格子表面の表面粗さが小さくなった．

2.3. 多層膜反射鏡の反射率測定

多層膜反射鏡が設計値通りの性能を示すかを反射率を測定して確かめる．反射率測定は，宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 宇宙科学研究本部 (ISAS) の極端紫外光 (EUV) 実験施設にて行った．入射光の波長は 30.4 nm に固定し，入射角依存性を調査した．入射角はミラーの法線と入射光間の角度で，反射角は入射光と反射光間の角度とする．

反射率の測定結果は図 5 のようになった．横軸は入射角 (Deg.) で，縦軸は反射率 (%) である．青い点線が実験による測定値で，赤い実線が，Mo と Si の光学定数^[9] を用いて，Modified integral method^{[10], [11]} で多層膜反射鏡の反射率を計算した結果である．

計算値は，実験値に対して反射率のピーク角度が最も良く合う計算結果のみを載せた．実験値には光子数のゆらぎに起因する統計誤差の範囲も横棒で示してあるが，誤差範囲より青点の方が大きいために隠れている．

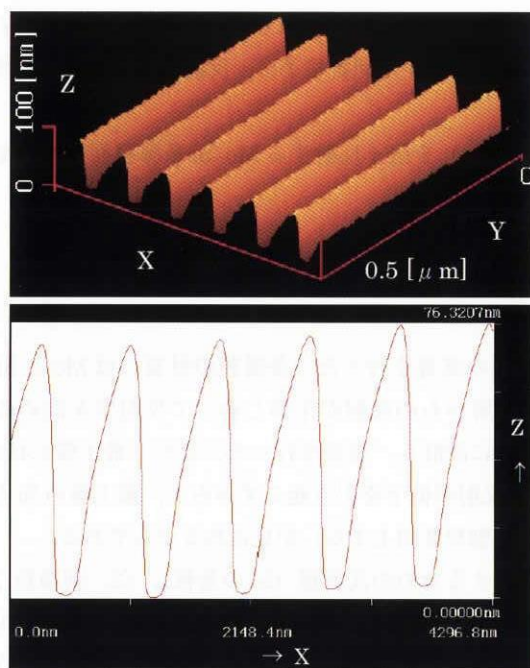


図 1 蒸着前のブレード型回折格子の形状(上)と断面図(下). 上の図が, 3次元の像で, 鉛直方向の軸(Z)が溝の高さで, 水平方向の2軸が幅(X)と奥行き(Y)である. 下の図が, 溝と平行方向に $\sim 0.4\mu\text{m}$ の領域で高さの平均値をとった断面図で, 縦軸(Z)が溝の高さで, 横軸(X)が水平方向の長さである.

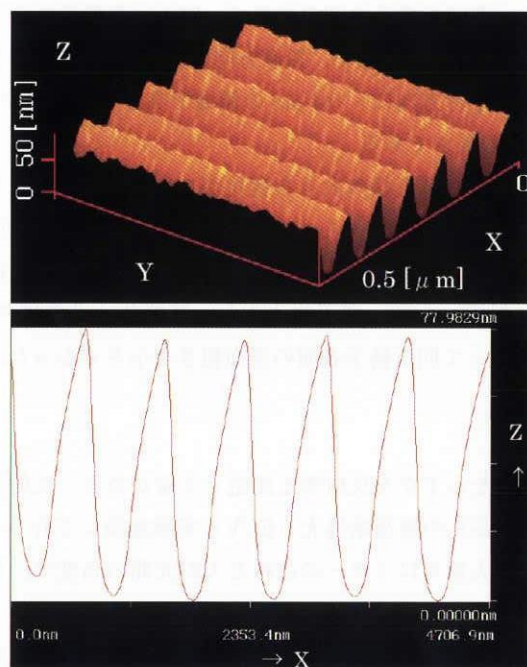


図 2 蒸着後のブレード型回折格子の形状(上)と断面図(下). 上の図と下の図の軸は図1と同じ.

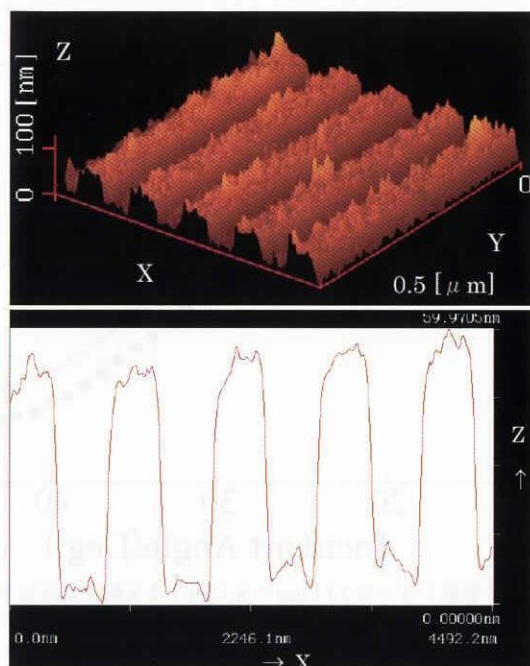


図3 蒸着前のラミナー型回折格子の形状(上)と断面図(下).
上の図と下の図の軸は図1と同じ.

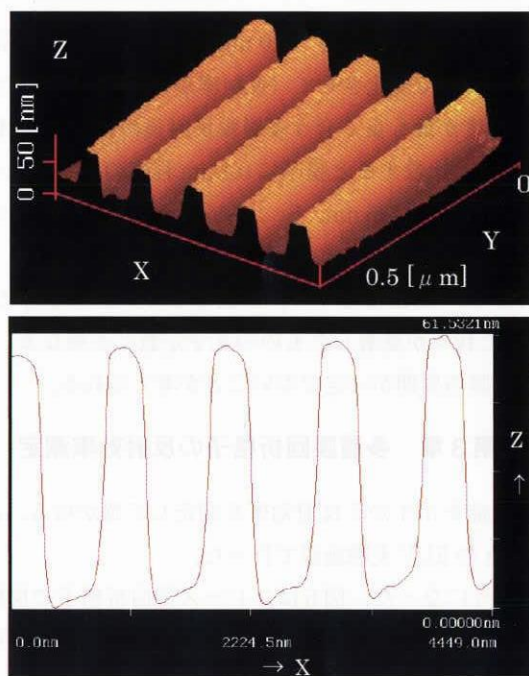


図4 蒸着後のラミナー型回折格子の形状(上)と断面図(下).
上の図と下の図の軸は図1と同じ.

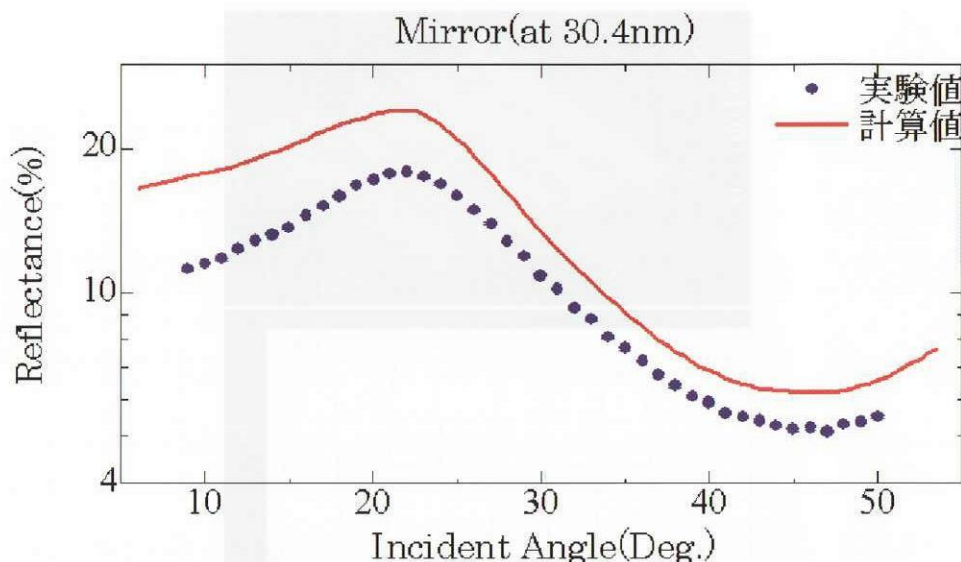


図5 多層膜ミラーの30.4 nmの光に対する反射率測定結果。
横軸が入射角 (Deg.)で、縦軸が反射率 (%), 青い点が実験による測定値で、赤い線が計算値

実験値での反射率の最大値は入射角：22°で18%であった。入射角の精度は0.1°程度である。設計値：20°とズレがあるが、この原因は、蒸着した膜厚が設計値と異なるか、計算に用いた光学定数が実際に蒸着したものと異なるからと考えられる。

Modified integral methodで、最上層のSiの厚さ（5.0 nmで固定）とMoとSiの厚さの比を1：3で固定し、MoとSiの層の厚さの合計を0.1 nm単位で変化させて（反射率が最大となる入射角は～0.5°変化する）計算を行った。その結果、反射率のピーク角度が最も良く合う多層膜反射鏡の膜厚は、Mo：4.5 nm、Si：13.5 nmのペアが20層であった。多層膜の設計値と比較すると膜厚に0.1 nm程度の違いがあるが、設計値との違いは2%程度であるし、MoやSiの原子半径（Mo：0.136 nm、Si：0.117 nm）と同程度なので、膜厚の制御は良くできたと言える。

計算値に対して実験値の反射率が低い原因としては、原因として大きいと考えられるものから挙げると、(1) Palik^[9]が調査したものの光学定数と我々が蒸着したものの光学定数とが異なる、(2) 反射鏡の表面粗さ（凸凹）によって光が散乱される、(3) 多層膜の周期が一定でないことが考えられる。

第3章 多層膜回折格子の反射効率測定

多層膜回折格子が設計値通りの性能を示すかを反射効率を測定して確かめる。反射効率測定は、多層膜反射鏡の反射率測定と同じく、ISAS/JAXAのEUV実験施設で行った。

反射効率の測定結果は図6,7のようになった。図6はブレード型回折格子の反射効率測定結果（反射効率が他よりも高い－4次光～－8次光の測定結果）で、図7はラミナー型回折格子の反射効率測定結果（反射効率が他よりも高い－2次光～＋2次光の測定結果）である。横軸は入射角 (Deg.)で、縦軸は反射効率 (%)である。点線が実験による測定値で、実線がMoとSiの光学定数^[9]を用いて、Modified integral method^{[10], [11]}で多層膜回折格子の反射効率を計算した結果である。Modified integral methodでは計算を行う回折格子の形状を任意に決められる。この計算ではAFMで測定した多層膜回折格子の溝形状の測定結果を入力した。また、計算に用いた多層膜の膜厚は、2.3章で得られた結果（Mo：4.5 nm、Si：13.5 nmのペアが20層で、最上層にSiが5.0 nm）を用いた。実験値には光子数のゆらぎに起因する統計誤差の範囲も横棒として示してあるが、誤差範囲より点の方が大きいために隠れている。

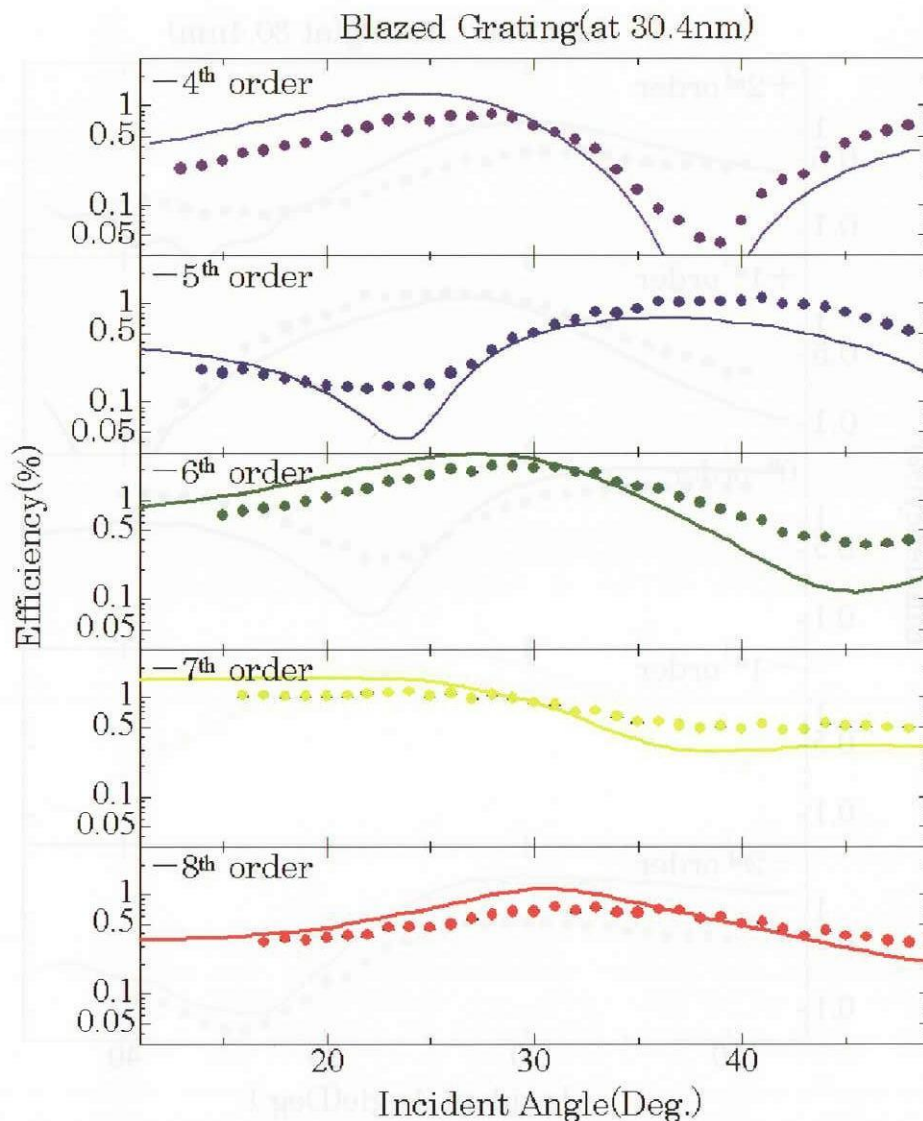


図6 多層膜回折格子（ブレイズ型）の30.4 nmの光に対する反射効率測定結果．横軸が入射角 (Deg.)で、縦軸が反射効率 (%)，点が実験による測定値で、線が計算値．上から－4次光，－5次光，－6次光，－7次光，－8次光の結果

図8, 9は、今回製作したMo/Si多層膜回折格子の反射効率（青点が実験値、赤線が計算値）と、極端紫外光領域で最も反射率が高い物質と言われているPtの単層膜（膜厚：200 nm）を蒸着した回折格子の反射効率の計算結果（緑線）を比較したグラフである．図8, 9は、それぞれブレイズ型・ラミナー型回折格子の結果で、反射効率が最も高い－6次・－1次光の場合である．横軸と縦軸は図6, 7と同じである．Pt単層膜の計算値の場合も、入射角：20～30°の範囲では、それぞれ－6次・－1次光が最大であった．

多層膜回折格子の反射効率は、ブレイズ型が入射角：28°（反射角は43°）で－6次光が最大2.2%，ラミナー型が入射角：25°（反射角は48°）で－1次光が最大2.9%であった．図8, 9から、Mo/Si多層膜回折格子の実験値の方が、Pt単層膜回折格子の計算値よりも約5倍も反射効率が高いことが解る．多層膜技術によって、単層膜で得られる反射効率の限界を超えることができた．

一般的に、ラミナー型回折格子よりもブレイズ型回折格子の方が反射効率の最大値は高くなると言われているが、今回は逆の結果になった．この理由は、ブレイズ型回折格子のブレイズ波長が229 nmと、入射光：30.4 nm

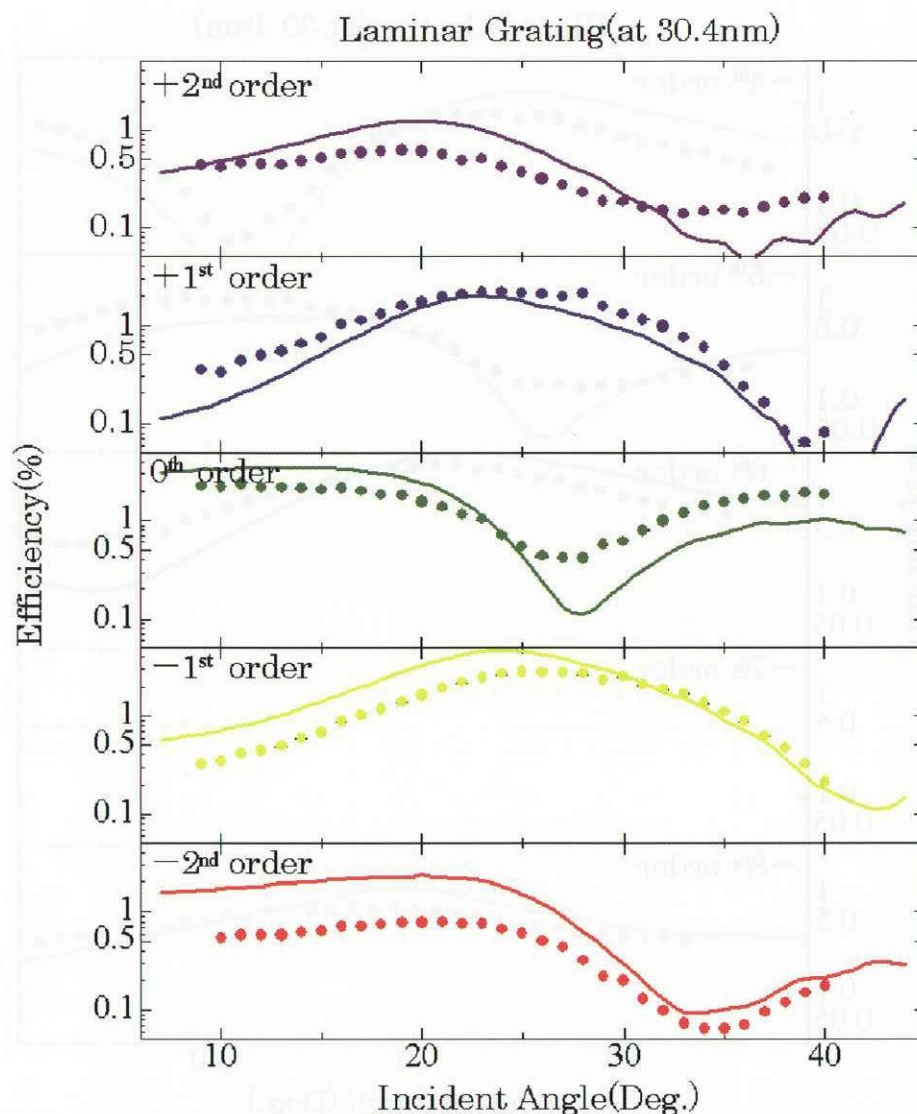


図7 多層膜回折格子（ラミナー型）の30.4 nmの光に対する反射効率測定結果．横軸が入射角（Deg.）で、縦軸が反射効率（%），点が実験による測定値で、線が計算値．上から+2次光，+1次光，0次光，-1次光，-2次光の結果

の7倍以上も長かったため、30.4 nmの光を効率良く高められなかったためと推察される．ブレード型回折格子の反射効率の波長依存性を計算すると、入射角：25°の条件では波長：32.5 nm付近で-6次光の反射効率が極大となり（もちろん他の次数よりも大きい）、30.4 nmの-6次光の反射効率よりも2倍程度大きい．30.4 nmで反射効率が極大となるブレード型回折格子を用意できれば、反射効率がより高い多層膜回折格子が製作できる．今回の実験によって、反射効率を更に高めるためには回折格子の溝形状の選択が重要な鍵を握ることが解った．

両者の反射効率が最大を取る反射角とも、多層膜ミラーの反射率が最大を取った反射角：44°（入射角：22°の2倍）に近い値を取った．また、Pt単層膜の反射効率が最大となる入射角が、Mo/Si多層膜の反射効率が最大となる入射角と異なることから、多層膜の効果で反射効率が向上した事が解る．

計算値と実験値の反射効率が完全に一致しない原因としては、ミラーの場合と同じ事項と、(4) Modified integral methodの計算では、多層膜の各境界の形は最上層（AFMの像）と同じとしてあるが、各境界ごとに形が異なることが考えられる．(1)の影響では、反射効率の最大値や最小値の角度が変化したり、反射効率の大きさが

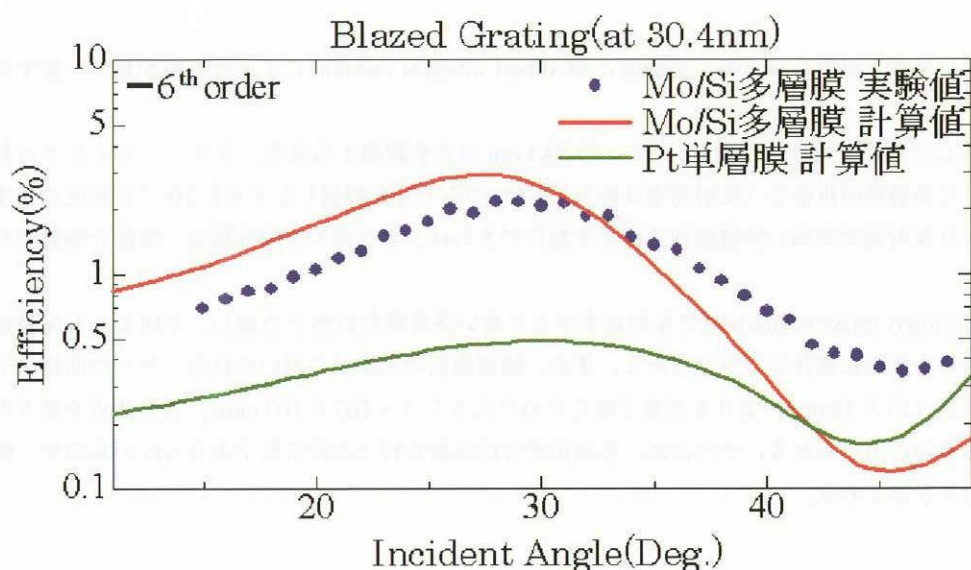


図8 多層膜回折格子（ブレイズ型）の30.4 nmの光に対する－6次光の反射効率測定結果．横軸が入射角（Deg.）で，縦軸が反射効率（％），青点がMo/Si多層膜の実験値で，赤線がMo/Si多層膜の計算値で，緑線がPt単層膜の計算値．

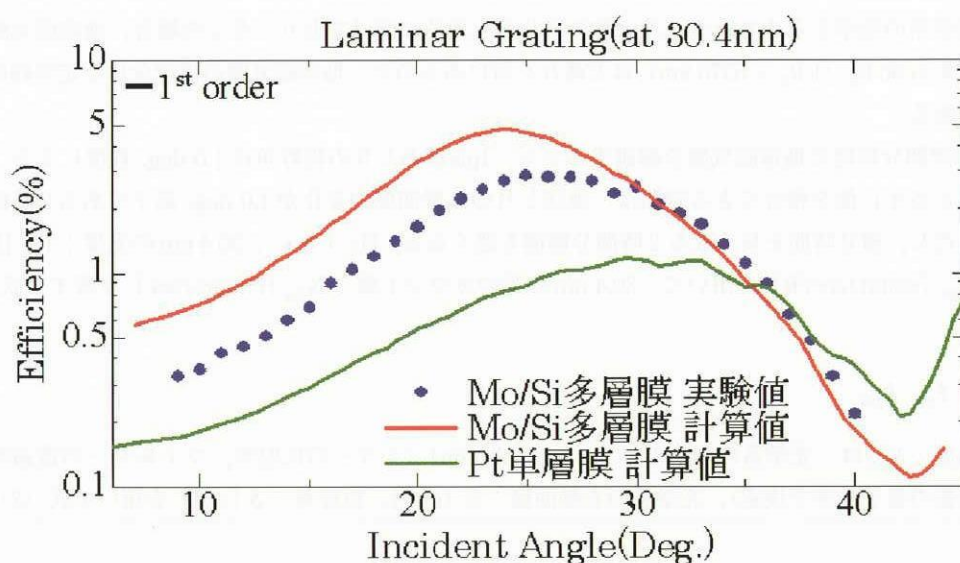


図9 多層膜回折格子（ラミナー型）の30.4 nmの光に対する－1次光の反射効率測定結果．横軸が入射角（Deg.）で，縦軸が反射効率（％），青点がMo/Si多層膜の実験値で，赤線がMo/Si多層膜の計算値で，緑線がPt単層膜の計算値．

変化する事が考えられる．(2)～(4)の影響では，反射効率の変化がならされて起伏が小さくなる事が考えられる．

第4章 ま と め

多層膜技術を用いることで，単層膜で得られる反射効率の限界を超え，Pt単層膜の場合と比較して，Mo/Si多層膜では約5倍の反射効率を実現できた．

今回の実験や計算によって，反射効率を更に高めるためには回折格子の溝形状の選択が重要な鍵を握ることが

解った。

また、今回の実験と計算によって、実験値と Modified integral method による計算値が良く一致することが確認できた。

補遺で試算した条件で地球近傍の He イオンの 30.4 nm の光を観測する場合、ミラー・フィルターを使用せずに今回製作した多層膜回折格子（反射効率は最大 2.9 %）のみで分光観測したすると 10^{-6} R 程度の光まで検出可能である。より反射効率が高い多層膜回折格子を製作できれば、より高い空間分解能・時間分解能での観測ができる。

今後は、Modified integral method で反射効率がより高い多層膜回折格子を探し、今回よりも反射効率が高い多層膜回折格子を実際に製作する予定である。また、観測機器の光学系に用いられるミラーや回折格子は、今回蒸着した大きさ（ 15×15 mm）よりも光量を稼ぐために大きく（ $\sim 100 \times 100$ mm）、また焦点を結ぶため平面ではなく曲面のものが用いられる。そのため、蒸着面が今回蒸着を行った回折格子よりも広いものや、曲面のものにも蒸着を行う予定である。

補 遺

一例として月に 30.4 nm 用の望遠鏡を設置して、磁気圏の現象を観測してイオンの分布や散逸量を研究するために必要な光学系の効率を求めてみる。月は常に同じ面を地球に向けており、多くの場合、地球磁気圏より外側にあり、地球から $60 R_E$ （ $1 R_E = 6378$ km）ほど離れた所にあるので、地球磁気圏のほぼ全体を定常観測するのに適した天体である。

$1 R_E$ 程度の空間分解能で地球磁気圏を観測するなら、1pixel あたりの視野角は 1.0 deg. 程度になる。また、空間分解能を落とさずに像を積分できる時間は、地球と月の位置関係の変化が 1.0 deg. 以下である 2 時間程度が上限となる。ただし、積分時間を長く取ると時間分解能も悪くなる。He イオン：30.4 nm の光量： I_{304} [R] と光学系の感度： k_{304} [count/sec/R] を用いて、30.4 nm の光のカウント数： N_{304} [counts/sec] を表すと式 (1) のようになる。

$$N_{304} = I_{304} \cdot k_{304} \quad (1)$$

光学系の感度： k_{304} は、光学系の効率： η [counts/photon]（ミラーの反射率、フィルターの透過率、分光器の効率、検出器の量子効率で決定）、光学系の有効面積： S [cm²]、視野角： δ [rad] を用いて式 (2) のようになる。

$$k_{304} = \frac{10^6}{16} \cdot \eta_{304} \cdot S \cdot \delta^2 \quad (2)$$

積分時間中に観測されるカウント数： N_{total} [count] は、ノイズカウント： N_{noise} [counts/sec] と積分時間： T [sec] を用いて式 (3) のようになる。

$$N_{total} = (N_{304} + N_{noise}) \cdot T \quad (3)$$

30.4 nm の光を十分な S/N（ 2σ 以上）で観測する場合、式 (4) が成り立つ。

$$N_{total} - N_{noise} \cdot T > 2\sqrt{(N_{304} + N_{noise}) \cdot T} \quad (4)$$

式 (4) に式 (1)～(3) と、光学系の有効面積として $S : \sim 10^2$ cm²（半径 6.0 cm のミラーか分光器を仮定）と、視野角 $\delta : \sim 10^{-2}$ rad と、積分時間の上限： $\sim 10^4$ sec を代入すると、光学系の効率： η_{304} は式 (5) のように表

される.

$$\eta_{304} > \frac{4 \cdot N_{noise}}{10^7 \cdot I_{304}} \quad (5)$$

検出器に MCP (MicroChannel Plate) を用いる場合, ノイズ源は MCP の暗電流と放射線が考えられる. 検出面上で 1 pixel の大きさを $\sim 0.001 \text{ cm}^2$ ($0.3 \times 0.3 \text{ mm}$) とすると, ノイズカウントは過去の研究^[7]で示された値から大きく見積もっても 0.01 count/pixel/sec 以下である. 従って, (5) 式から 10^{-6} R の光を観測する場合, ミラー・フィルター・分光器・検出器の量子効率を合わせた効率は 0.1 % 程度が必要であることが解る. 30.4 nm の光に対する MCP の量子効率は 10 % 程度なので, 10^{-6} R の光を観測する場合, ミラー・フィルター・分光器を合わせた効率は 1 % 程度が必要である.

謝 辞

回折格子の溝形状を AFM で測定する際に, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部の廣瀬和之助教授から AFM をお借り致しました. ここに感謝致します.

参考文献

- [1] Nakamura, M., Yamashita, K., Yoshikawa, I., Shiomi, K., Yamazaki, A., Sasaki, S., Takizawa, Y., Hirahara, M., Miyake, W., Saito, Y. and Chakrabarti, S., Helium observation in the Martian ionosphere by an X-ray ultraviolet scanner on Mars orbiter NOZOMI, Earth, Planets and Space, Vol. 51, p. 61-70, 1999
- [2] Nakamura, M., Yoshikawa, I., Yamazaki, A., Shiomi, K., Takizawa, Y., Hirahara, M., Yamashita, K., Saito, Y. and Miyake, W., Terrestrial Plasmaspheric Imaging by an Extreme Ultraviolet Scanner on Planet-B, Geophysical Research Letters, Vol. 27, Issue 2, p.141, 2000.
- [3] Sandel, B. R., Broadfoot, A. L., Curtis, C. C., King, R. A., Stone, T. C., Hill, R. H., Chen, J., Siegmund, O. H. W., Raffanti, R., Allred, DAVID D., Turley, R. STEVEN and Gallagher, D. L., The Extreme Ultraviolet Imager Investigation for the IMAGE Mission, Space Science Reviews, Vol. 91, Issue 1/2, p. 197-242, 2000.
- [4] Yoshikawa, I., Yamazaki, A., Shiomi, K., Yamashita, K., Takizawa, Y. and Nakamura, M., Loss of plasmaspheric ions during a storm observed by the EUV scanner onboard Planet-B, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, Issue A9, p. 18911-18918, 2001.
- [5] Ogawa, T., and Tohmatsu, T., Sounding rocket observation of helium 304 and 584-Å glow, Journal of Geophysical Research, Vol. 76, p. 6136, 1971.
- [6] Roelof, E. C., Mauk, B. H., and Meier, R. R., Instrument requirements for imaging the magnetosphere in extreme-ultraviolet and energetic neutral atoms derived from computer-simulated images, Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., Vol. 1744, p. 19, 1992.
- [7] Yoshikawa, I., Yamazaki, A., Shiomi, Nakamura, M., K., Yamashita, Saito, Y., Hirahara, M., K., Takizawa, Y., Miyake, W., and Matsuura, S., Development of a compact EUV photometer for imaging the planetary magnetosphere, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, Issue A11, p. 26057-26074, 2001.
- [8] Seki, K., Hirahara, M., Terasawa, T., Mukai, T., Saito, Y., Machida, S., Yamamoto, T., and Kokubun, S., Statistical properties and possible supply mechanisms of tailward cold O⁺ beams in the lobe/mantle region, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, p. 4477, 1998.
- [9] Palik, E. Edited, Handbook of optical constant of solids II, Acad. Press Handbook Series, New York, 1991.
- [10] Goray, L. I., "Modified integral method for weak convergence problems of light scattering on relief grating," in Diffractive and Holographic Technologies for Integrated Photonic Systems, Sutherland R. I., Prather, D. W. and Cindrich, I., eds., Proc. SPIE 4291, p. 1-12 2001.
- [11] Internet site, <http://www.pcgrate.com>.

1. The first part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

2. The second part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

3. The third part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

4. The fourth part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

5. The fifth part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

6. The sixth part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

7. The seventh part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

8. The eighth part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

9. The ninth part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.

10. The tenth part of the document is a list of the names of the members of the committee who have been appointed to study the problem of the development of the country's economy.



宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency