

光学超薄膜

— 軟X線用多層膜 —

東北大学科学計測研究所附属光学超薄膜研究施設

山本 正樹

Soft-X-Ray Multilayer

Masaki Yamamoto

*Laboratory of Soft-X-Ray Multilayers,
Research Institute for
Scientific Measurements, Tohoku University*

Abstract

Current status of development of soft-x-ray multilayers is reviewed with emphasis on similarity to optical multilayers of visible region. Layer-by-layer graphical representation of amplitude reflectance of the multilayer mirrors explains optimum design principle and material selection criteria. Maximum reflectance *vs.* wavelength summarizing world contributions shows high 60% reflectance region around 13nm rising above a round hill of 20 to 30% reflectance. Lack of optical constant data and interface roughness limit the reflectances in the regions further long and short wavelengths, respectively. *In situ* ellipsometry clearly detects a 0.15nm compound layer forming at every interface that should play an important role in the roughness suppression of a multilayer. Novel multilayer optical components, such as a wavelength adjustable bandpass filter, a power filter, a reflection polarizer, a transmission quarter wave plate, and a beam-splitting polarizer open up new applications in the soft x-ray region. Super mirrors further widen the applicable region to neutron and hard x-rays.

1. はじめに

波長が50nmから1nm程度の軟X線領域は、物質の吸収端があることからわかるように、電磁波と物質の相互作用が大きいので、物質研究に適した波長域である。しかし、この波長域では、全ての物質に吸収があり、しかも、光学定数はほとんど1に等しい。したがって、レンズがつかれないし、フレネル反射係数も極端に小さい。このため、従来の軟X線の光学系は、反射率を稼ぐために、鏡の表面スレスレで反射率が高くなる現象を利用したいわゆる斜入射光学

系にたよらざるをえなかった。

この制約を打破する新しい素子として、Barbee, Jr. 等の反射率65%の鏡の開発成功¹⁾を機に、光学超薄膜—軟X線用の多層膜—の干渉効果を利用した光学素子の開発が世界的に競われている。現在では、波長13nmで60%の垂直入射の反射率が簡単にえられるため、軟X線領域で、直入射の望遠鏡²⁾、顕微鏡³⁾、などの基本的な光学系に加え、次世代超LSI製作用の縮小投影露光光学系^{4, 5)}などが光学超薄膜を利用して実現されている。さらに、軟X線領域での新しい光学素子として、分光フィルター、偏光子、位相子などが実現できるため、シンクロトロン

放射光を利用した各種の研究や軟X線ポリメ
トリなどの新しい研究が可能になり、軟X線
計測の分野に新しい道が拓かれつつある⁶⁾。

この光学超薄膜は、原理的には、可視域の多
層膜と同等ととらえることができる。もちろん、
波長は2桁短いので各層の厚さは数nmであり、
数原子層程度となって、散乱損失が顕著となる。
したがって、平滑な界面を得るために、極薄膜
の形成過程や界面形成の精密な制御が必要であ
る。使用する物質も異なるし、層数も、各界面
の反射率が小さいことから数十から数百と格段
に多いなど、可視域とは異なる点もおおい。し
かし、高反射率をえるための要件は、

1. 適当な屈折率の物質を対として
2. 所定の厚さで
3. 平滑で急峻な界面の超薄膜を
4. 超研磨基板上に成膜する

ことであり、可視域の要請と本質的に変わって
はいない。また、最も成功している成膜法も、

市販のマグネトロンスパッタ装置をベースに、
成膜速度を安定化し、成膜時間で膜厚を制御す
る方法で、特殊なものではない。理論的にも、
可視域の多層膜光学素子の設計に用いられる多
重反射干渉の式を、吸収体に拡張し、界面の粗
さによる損失を新たに考慮した式が有効である。
したがって、軟X線多層膜は原理的には、光学
多層膜の範ちゅうにある。これが、光学超薄膜
の呼び名の由縁である。

2. 光学超薄膜の基本特性

表1に、いくつかの物質についての軟X線領
域の屈折率と消衰係数が、光子エネルギーでど
のように変化するかを示す⁷⁾。軟X線領域では
屈折率は1よりわずかに小さいので、便宜上、
1との差をとった $\delta = 1 - n$ も屈折率と呼ぶ。
軟X線領域では、 δ 、 $k \ll 1$ の近似のもとに、
垂直入射の反射率は、 $(\delta^2 + k^2)/4$ となるか
ら、たとえば、光子エネルギー 100eVで比較的

表1 Optical constants (refractive index δ , extinction coefficient k) of thin film samples measured at various wavelength λ . The samples were prepared by ion-beam sputtering. (after ref. 7)

Photon Energy(eV) λ (nm)	Au 27.0nm thick		C 5.95nm thick		Mo 12.5nm thick	
	δ	k	δ	k	δ	k
60	20.7	2.14E-2	2.46E-1	9.12E-2	3.78E-2	2.05E-1
80	15.5	9.93E-2	1.00E-1	5.55E-2	1.08E-2	9.12E-2
100	12.4	7.85E-2	3.64E-2	3.50E-2	4.57E-3	4.96E-2
150	8.3	2.56E-2	7.92E-2	1.37E-2	9.86E-4	1.88E-2
300	4.1	5.83E-3	1.07E-2	3.76E-3	7.77E-3	2.80E-3
600	2.1	3.94E-3	3.55E-3	1.43E-3	4.01E-4	2.91E-3
900	1.4	2.53E-3	1.49E-4	7.57E-4	1.57E-4	1.77E-3
900	1.4	2.53E-3	1.49E-4	7.57E-4	1.57E-4	1.77E-3
Photon Energy(eV) λ (nm)	Rh 18.1nm thick		W 10.9nm thick		Fused Quartz	
	δ	k	δ	k	δ	k
60	20.7	1.47E-1	2.44E-1	1.35E-1	2.05E-1	5.62E-2
80	15.5	1.62E-1	6.42E-2	7.67E-2	2.83E-2	3.30E-2
100	12.4	8.93E-2	9.19E-3	4.25E-2	1.91E-2	1.87E-2
150	8.3	2.80E-2	3.66E-3	1.77E-2	3.25E-2	1.21E-2
300	4.1	2.15E-3	4.13E-3	8.83E-3	9.81E-3	3.95E-3
600	2.1	3.34E-3	2.64E-3	3.82E-3	2.54E-3	1.06E-3
900	1.4	2.32E-3	1.12E-3	2.11E-3	1.07E-3	5.45E-4
900	1.4	2.32E-3	1.12E-3	2.11E-3	1.07E-3	5.45E-4

反射率の高いAuでも、0.2%にすぎない。光子エネルギーが高くなると δ も k も共に減少するので、垂直入射の反射率もさらに減少する。

図1は、厚さ3.09nmのMo膜と5.93nmのSi膜を交互に161層積んだ光学超薄膜について、いくつかの入射角で、シンクロトロン放射光を光源にして測定した分光反射率の実測値である。垂直入射に近い入射角25°で、60%の反射率が得られている。干渉ピークの半値幅は5.2eVで、分解能 $\lambda/\Delta\lambda$ は15程度である。一般的に、分解能は層数を増せば上げられるが、膜に吸収があるために反射率増加は飽和するし、膜厚誤差の累積で半値幅が広がるために、実質的には10から50の程度である。

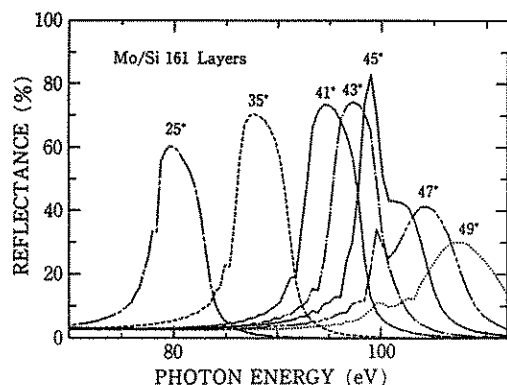


図1 Soft x-ray reflectance spectra of a Mo-Si 161 multilayer mirror measured at PF-KBK with s-polarized SR.

干渉ピーク波長 λ_p は、屈折率がほぼ1であるため、光学超薄膜の周期膜厚 D （図の例では9.02nm）と入射角 ϕ だけで決まり、 ϕ を増すと、ブラッグ回折の式と同等の $2D \cos \phi = \lambda_p$ に従って短い波長に移動する。反射率は、MoとSiの屈折率分散で変化する。光子エネルギー98eVには、Siの $L_{2,3}$ 吸収端があるために、この高エネルギー側では反射率が急激に減少する。

反射率増加の原理と、高反射率を得るための物質対選択則は、次のように、複素振幅反射率の変化をガウス平面に表示すると分かりやすい。

3. 反射増加とLayer-by-layer設計⁸⁾

基板と、膜物質 A と B を与えると、共に吸収をもつ A と B の交互層で反射率を最も効率よく上げる最適膜厚構造が計算できる。図2は、吸収の影響を明らかにするためにAuとCをガラス基板上に成膜してゆく場合を例に、最適膜厚構造では、成膜とともにどの様に反射率が増加するかを示している。反射率は、中心からの距離の2乗で表せるから、反射率を上げるには、複素振幅反射率を表す点を中心から遠ざける。このためには、物質を切り替えるとき、膜成長曲線がなめらかに接続されればよいことが導かれる。最適切り替え点は、層数が増すほど、吸収の多い物質 A の膜厚が相対的に減少することを示しており、最適膜厚構造は非周期となる。

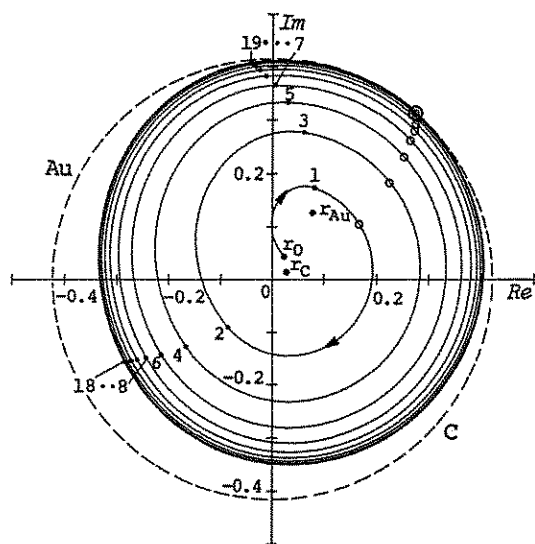


図2 Optimum thickness design of an Au-C multilayer shown by the layer-by-layer loci of the amplitude reflectance. (after ref.8)

吸収のため、層数が増えてゆくと膜成長曲線の広がりには飽和する。この飽和曲線の形状は、基板の光学定数に無関係で、 A と B のフレネル係数 r_A と r_B の関数となり、最大到達反射率は、

飽和閉曲線が中心から最も遠ざかる点◎で与えられる。高反射率を得るための物質対の選択則は、 r_A と r_B の組み合わせに帰着し、 r_A と r_B が共に実軸に近く、互いに離れている物質が良いことが導かれる。これを、物質の複素屈折率で表現すれば、消衰係数 k が共にできるだけ小さく、屈折率 n の差が大きい物質が良いことになる。さらに、軟X線領域の異常分散の性質を考慮すると、実務的には、着目している波長域の短波長側に吸収端を持つ物質を A に選び、その波長域で吸収が小さく、屈折率 n も小さい(δ が大きい)物質を B に選んで組み合わせれば良いと読み直せる。図1の波長域では、SiまたはBeを A にえらび、それに、Mo、Rhなどを B として組み合わせると良いことになる。

図2で用いたLayer-by-Layer設計の原理は、可視域の多層膜に対しても有効である。たとえば、大強度レーザーミラーなどで、膜の弱い吸収を考慮すべき場合の最適値問題が良い例で、CarnigliaとApfelによって提案された設計法による最適解は、Layer-by-Layer設計ではより容易に、高精度で求まる⁸⁾。彼らの方法は、2層1対を単位に最適化をすすめる。われわれの方法は、各層ごとの最適化だから三元系や多元系にも適用可能な一般化された解法である。

このような設計には、薄膜物質の軟X線光学定数が不可欠である。われわれも光学定数の測定収集を進めている⁷⁾が、現状ではデータベースはまだまだ不備な状況にあり、今後の軟X線多層膜光学の発展には、重要な課題である。

4. 反射鏡の性能

光学的な選択則を満たす物質対について、実際に成膜を行い、成膜方法と得られる界面急峻性、膜厚の制御性などの検討が次に必要となる。波長が異なれば、物質対が異なり、周期膜厚も異なるので、現在は、種々の方法で多層膜が形成されて性能の向上が競われている。昨年3月には、米国でOSAのトピカルミーティング「X線多層膜の物理」が開かれたが、この際に、

米国、フランス、オランダ、ドイツなどの世界各地からの参加者にアンケートをとり、期間中に結果を集計して公表した。図3は、その一部で、現在の世界的な研究の状況をよく表している。図中の各点は、垂直入射の反射率ピーク値とピーク波長を示したもので、各マークは、物質 A の種類を、付記された物質名は B の種類を示す。波長13nm付近では、Mo-Si、Mo-Ruによって60%のピーク反射率が得られているが、長波長側と短波長側では、反射率は共に落ちている。長波長側では、物質の消衰係数が大きくなり、現状では、まだ物質の光学定数がほとんど測られていないために、適当な物質対がまだ見つかっていないためである。一方、短波長側の減少は、周期膜厚 D が小さくなり、界面粗さによる散乱損失が波長の減少と共に顕著になるためで、現在の成膜技術では、界面のrms粗さを0.3nm以下にできないことが原因である。

多層膜の表面粗さによる散乱損失は、Debye-Waller型の振幅減衰係数 $\exp(-2(2\pi\sigma\cos\phi/\lambda)^2)$ で良く説明できる。 $\phi=0$ の垂直入射では、rms粗さ $\sigma=0.3\text{nm}$ で計算すると、波長 $\lambda=10\text{nm}$ では87%だが、 $\lambda=4.5\text{nm}$ では50%、 3.0nm では21%となり、散乱損失は波長が減ると急激に増加する。

C_K 吸収端の4.4nmから O_K 吸収端の2.3nmまでの領域は、water window領域と呼ばれ、X線顕微鏡の応用で注目されている。この領域では、水による吸収が小さいため、細胞水を含む生きた状態で、生物試料を観察できると期待されている。しかし、図に示されるように、 $\lambda=4.4\text{nm}$ 以下はまだ空白で垂直入射の鏡はまだ実現されていない。必要な周期膜厚は2nm程度で、W/B₄Cなどでは周期構造が実現できるものの、WやCはこの領域で吸収が大きくて光学的な選択則を満たさず、うまく積んでも反射率があがらない。

この程度の小さい周期膜厚になると、物質によって膜質が大きく違うために、現在までの研究はむしろ緻密な膜質を得やすい高融点材料が優先されている。光学的な選択則からは、 A

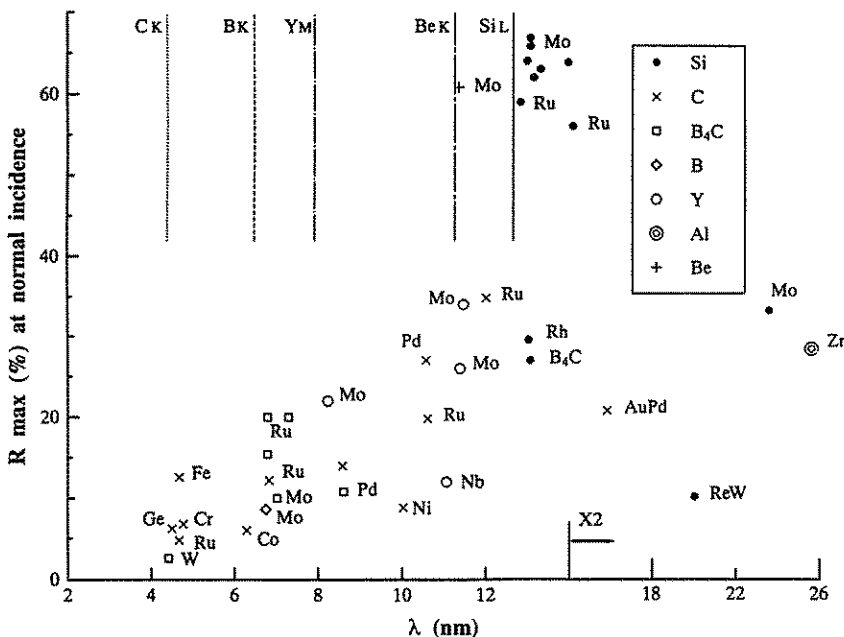


図3 Current trend of the best reflectances vs. wavelength with various material pairs.

としてCa, Sc, Ti, V, Cs, Baなどが、*B*としてBe, B, V, Cr, Mnなどがあげられる。化合物の利用も含めて、今後、これらの物質をどのような成膜法でいかに取り込んで行くかが重要であろう。

5. 製作法

光学超薄膜では、膜厚の制御とともに、急峻な界面を形成することが重要である。このためには、成膜方法として、いわゆる超格子と同様に、単結晶成長をねらうか、粗さの単位となる結晶粒の大きさを小さくする非晶質成長をねらうかの2方向が考えられる。しかし、適当な光学定数の物質を、鏡の全面にわたってステップ密度をおさえてエピタキシャル成長させる技術は確立されていない。このため、光学超薄膜の成膜法としては、スパッタ法と電子ビーム蒸着法が現在の主流である。

波長13nm付近の高い反射率の光学超薄膜は、Barbee, Jr. らの成功以来、マグネトロンスパッタ成膜で達成されたものが多い。この

方法では、まず、Arの流速をフローコントローラーで一定値に保ち、真空度とプラズマ放電の電力値を安定化することでスパッタ速度を安定化する。そして、基板を固定しているパレットを一定速度で回転し、所定の時間だけスパッタターゲット物質のビームに基板を曝すことで、膜厚を制御する。光学超薄膜の強め合いの干渉を実現するには、膜厚の累積誤差は、最上層で1/2層程度以下（1層の厚さは平均すれば $\lambda/4$ に等しい）に抑えられていなければならないから、この方式では、膜の付着率に影響するパラメーターの変動は、層数を m とすると、 $0.5/m$ 以下でなければならない。スパッタ中のAr圧力は、膜質への影響が大きい。Mo/Siの場合、圧力は低い方が膜質が良いため、多くの場合、安定したプラズマが得られる下限の2mTorrで成膜する。現在のところ、うまく積める最大層数は200層程度だから、この方式での装置の変動は、数時間の成膜時間中に0.3%以下が達成されている。

反射率60%の光学超薄膜は、最近、電子ビーム蒸着とイオンポリッシュの技術を組み合わせた方法でも達成された。電子ビーム蒸着は、超高真空中の蒸着で、付着粒子のエネルギーも小さいから、適当な活性化エネルギーを付加することで成膜プロセスを精密に制御できる可能性がある。しかし、電子ビームが揺らいで成膜速度の変動が大きいことから、高精度の膜厚のモニターが不可欠である。Spillerらは、特性X線の反射率計と水晶振動子膜厚計を併用する方法で成膜中のモニターを実現した。しかし、電子ビーム蒸着法では、膜の形成初期の粒状性がスパッタ法に比べると大きい。この欠点に対し、彼らは、粒状性の高い膜に対して、各層の成膜後に低エネルギーのイオンを照射し、表面をわずかに削り取るプロセスで表面を平滑にするイオンポリッシュ法を開発した⁹⁾。オランダのFOMのグループは、Mo/Si 多層膜にこの方法を用いて、反射率60%を実現したことを上述の会議で報告した。界面の粗さ0.3nmの限界を越える可能性がある方法として注目されている。

6. 多層膜形成のin-situエリプソメトリー

光学超薄膜の性能を上げるには、平滑で急峻な界面を形成するための成膜方法の開発や成膜条件の最適化が不可欠である。エリプソメーターは、原理的に偏光面分割のコモンパス干渉計だから、振動などの外乱に強く、スパッタ装置にも超高真空装置にもつかえて、sub-monolayerの感度があるのでこの目的に合っている。

図4は、He-Neレーザーを光源に用いて、厚さ6.0nmのMoと3.0nmのSiの多層膜をイオンビームスパッタ成膜してゆく過程をin-situ モニターした例を示す。測定変数はp偏光とs偏光にたいする試料面の振幅反射率の比 ρ なので複素数であり、複素平面に図示できる。レーザーの赤い光は、金属膜に対しても50nm程度の侵入深さがあり、十数層分の界面からの反射光を観測できる。図は、6層から23層までの成膜過程のモニター例で、19層以上では、基板からの反射

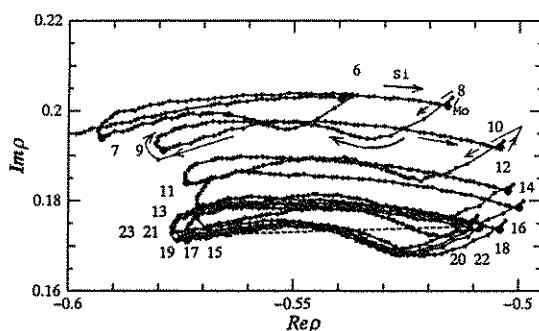


図4 Relative amplitude attenuation ρ measured by a He-Ne laser *in situ* ellipsometer during growth of a Mo (6.0nm)-Si(3.0nm) multilayer. A silicide layer formation at every interface and island growth of Mo are evident.

はもはや見えないため、測定値は閉曲線を描く。膜厚が小さいときは、理想的な成膜を仮定した理論曲線は黒丸で示す物質切り替え点を結ぶ単純な折れ線となるので、実測された閉曲線は光学超薄膜の成長モードの詳細を示していると考えられる。

図の例では、Mo膜は、偶数点から出発し、成膜中にシリサイドが表面で形成されて、斜め右上に進むが、Moの蒸着量にして0.15nm分の時に反応が止まり、急激に向きを左下へ変えて、純粋なMoの単層膜の島状成長が始まると考えられる。成長曲線のなだらかな下向きの膨らみは島状成長の特徴的な形で¹⁰⁾、厚さ約2.8nmで連続膜に移行し、理想値の線分によって奇数点まですすむ。Si膜は、奇数点から出発し、左斜め上に向かうが、蒸着量にして0.9nm分はやはりシリサイド形成反応のために徐々に右に向きを変え、その後、純粋なSi膜の成長が進み偶数点に向かうと解釈できる。

7. 斜め入射での応用

光学超薄膜は現在のところ垂直入射の反射増加多層膜としての開発・応用が最も盛んだが、斜め入射の領域でも、各種の応用が始まっている。

図1に示したように、光学超薄膜は $\lambda/\Delta\lambda$ が数十程度のバンドパスの反射フィルター特性を持っており、入射角 ϕ で中心波長を変えられる波長可変反射フィルターとなる。この特性は、光CVDの研究のように、中程度に分光された強い光を使いたい場合に最適で、放射光施設のビームラインに設置され¹¹⁾ シランの光分解実験などに使われている。

光学超薄膜は、ベンディングマグネットからの放射光にたいしては十分な耐性があり¹²⁾、挿入型光源に対しても使用できる可能性が開かれつつある¹³⁾ので、2結晶分光器の前段やデリケートな分光器のまえにおいて、パワーフィルターとして使う応用も試みられている。

軟X線領域では物質の疑ブリュースター角は 45° 付近となる。この特性は多層膜を構成した場合にも各界面で基本特性として有効だから反射増加の効率がp偏光とs偏光で同等であると、入射角 45° 付近ではs偏光の反射率がp偏光に比べてずっと大きい。このため光学超薄膜は入射角 45° 付近ではs偏光だけを反射する偏光子として作用する。図1の例では、波長12.8nmで、p偏光とs偏光の反射率の比は1/200~1/600と、十分に実用になる反射型偏光子となる¹⁴⁾。

さらに、多層膜を基板からはがし、フリースタANDINGの状態に枠に固定した透過型多層膜は、疑ブリュースター角付近で、p偏光を透過し、s偏光を反射する偏光ビームスプリッターとなる。また、透過光では、干渉による位相変化のため、p-s成分の位相差が 90° 以上になる入射角領域がある。この性質を利用すると、1/4波長板が実現できる。この1/4波長板と反射型偏光子を用いて回転検光子エリプソメトリーが軟X線で実現できるようになり、部分偏光の偏光度の測定などを含めた本格的な偏光測定が軟X線領域でも実現できるようになった¹⁵⁾。

光学超薄膜は、膜の厚さを緩やかに変化させた非周期構造にすることによって反射率をさほど落とさずに帯域幅を広げてスループットをあげることができる¹⁶⁾。広帯域反射鏡としての

応用は、斜入射領域で特に有効で、軟X線領域以外に応用が広がっている。

Ni/Tiの多層膜は、光と同様の原理によって、中性子の反射鏡として有効で、スーパーミラーと呼ばれて開発が進んでいる。この応用では、従来のNi単層の全反射の臨界角 θ を2~3倍にあげられる¹⁷⁾。同様の構造が、8から130KeVの硬X線にたいして有効で、Ni/C、Mo/Si、W/Siなどの光学超薄膜がX線望遠鏡やビームライン光学系で実用化されつつある¹⁸⁾。

このほか、半導体のリソグラフィーの技術を応用し、楕円形や不等間隔の直線形に多層膜の反射パターンを基板表面に形成して、分光と結像を行うブラッグフレネルゾーンプレートはフランスを中心に開発が進められている¹⁹⁾し、ラメラ回折格子やブレースしたエッセル回折格子の回折効率を光学超薄膜で向上する試みなども米国を中心に進んでいる²⁰⁾。

これらの例で明らかのように、光学超薄膜は、軟X線のみならず硬X線や中性子にまで応用が広がっており、多層膜構造による干渉を利用した新しい光学素子として、可視域と同様な発展が期待できる。現在は、まだ、光学定数の測定や成膜法に関する基礎的な研究の積み上げが必要ではあるが、可視域の多層膜研究・開発にたずさわる方々も参画され、軟X線多層膜光学の分野が早期に確立してゆくことを願っている。

参考文献

- 1) T. W. Barbee, Jr., S. Mrowka, and M. C. Hettrick: Molybdenum-Silicon Multilayer Mirrors for the Extreme Ultraviolet, Appl. Opt., 24 (1985) 883.
- 2) 山下廣順: 多層膜X線光学系の開発、日本物理学会誌、47, 4 (1992) 293.
- 3) 青木貞雄: 結像系を用いたX線顕微鏡、光学、23, 9(1994)544
- 4) 木下博雄: X線縮小リソグラフィー、光学、23, 10(1994)614
- 5) 永田浩: X線露光技術、光学、23, 9 (1994)

550.

- 6) 山本正樹：軟X線多層膜の形成とその利用、
応用物理、62, 7 (1993) 676.
- 7) 柳原美廣、曹健林、山本正樹、荒井彰、古館
三七二、波岡武：超薄膜の軟X線光学定数、
東北大学科学計測研究所報告、41, 1 (1992)
1.
- 8) M. Yamamoto and T. Namioka: Layer-by-
layer design of multilayer mirrors for
soft x-rays, Appl. Opt., 31, 10 (1992)
1622.
- 9) E. Spiller: Enhancement of the reflec-
tivity of multilayer x-ray mirrors by
ion polishing, Opt. Eng., 29, 6 (1990)
609.
- 10) M. Yamamoto and T. Namioka: In situ
ellipsometric study of optical proper-
ties of ultrathin films, Appl. Opt., 31,
10 (1992) 1612.
- 11) M. Yamamoto, M. Yanagihara, A. Arai,
J. Cao, S. Nakayama, T. Mizuide and T.
Namioka: Multilayer mirrors for use as a
wavelength-selective filter around 100eV,
Rev. Sci. Instrum. 60, 7 (1989) 2010.
- 12) M. Yanagihara, T. Maehara, S. Gunadi,
M. Asano and T. Namioka: In situ perfor-
mance tests of soft-x-ray multilayer
mirrors exposed to synchrotron radiation
from a bending magnet, Appl. Opt. 31, 7
(1992) 972.
- 13) M. Yanagihara, K. Mayama, S. Asaoka
and H. Maezawa: Stability tests of soft
x-ray multilayers under exposure to
multipole-wiggler radiation, Proc. Soc.
Photo-Opt. Instrum. Eng., 1739(1993) 621.
- 14) H. Kimura, M. Yamamoto, T. Maehara and
T. Namioka: Full polarization measure-
ment of synchrotron radiation with use of
soft x-ray multilayers, Rev. Sci. Instru-
rum. 63, 1 (1992) 1379.
- 15) M. Yamamoto: Polarimetry with use of
soft-x-ray multilayers, Proc. Soc. Photo-
Opt. Indust. Eng., 2010 (1993) 152.
- 16) S. P. Vernon, D. G. Stearns and R. S.
Rosen: Chirped multilayer coatings for
increased x-ray throughput, Opt. Lett.
18, 9 (1993) 672.
- 17) I. S. Anderson: Neutron beam focusing
using supermirrors, Proc. Soc. Photo-Opt.
Ind. Eng., 983 (1988) 84.
- 18) K. D. Joensen, P. Hoghoj, F. Christen-
sen, P. Gorenstein, J. Susini, E. Ziegler,
A. Freund and J. Wood: Multilayered
super-mirror structures for hard x-ray
synchrotron and astrophysics instrumenta-
tion, Proc. Soc. Photo-Opt. Ind. Eng.,
2011(1993) 360.
- 19) P. Chevallier, P. Dhez, A. Erko, M.
Idir, F. Legrand, A. Mirone and G.
Soullie: Multilayered diffractive optics
for x-ray focusing -Experimental results
(1-10KeV) and theoretical predictions
using dynamical theory, in "Physics of
X-ray Multilayer Structures" Opt. Soc.
Amer. Technical Digest Vol. 6 (1994)
p. 146
- 20) C. Khan Malek, J. H. Underwood and E.
G. Gullickson: Multilayer coated echelle
gratings for soft x-rays, ditto p. 125