



軟 X 線 光 学 素 子

青 木 貞 雄

筑波大学物理工学系 〒305 茨城県新治郡桜村天王台 1-1-1

(1983年10月12日受理)

Soft X-ray Optical Elements

Sadao AOKI

Institute of Applied Physics, Tsukuba University,
1-1-1, Tennodai, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

1. は じ め に

強力放射光の出現¹⁾, X線天文学の進展²⁾, 超 LSI 用 X線リソグラフィ実用化の研究³⁾, 高温プラズマ X線診断⁴⁾, X線顕微鏡の分解能向上⁵⁾ など, 先端技術分野での X線利用が目立つようになってきた。これらの分野では比較的波長の長い軟 X線 (2~100 Å) を利用することが多いが, 従来この領域は効率のよい光学素子がなく光学系も取扱いが面倒であった。古くからいろいろな試みはあったが, 本格的な軟 X線用光学素子の開発が始まったのは 1970 年代半ば頃からである。開発の大きな支えとなっているものとして, NC 機械による超精密加工技術や半導体工業における微細加工技術がある。X線領域における光学素子は可視域のものに比べ 2 桁以上の形状精度や面精度が要求され, これらの技術の大きな目標にもなっている。米国を中心に活発な開発研究が各国で展開されているが, わが国ではまとまった研究体制もなく大幅な遅れをとっている。しかしながら, 現在のわが国の技術水準から見て目標達成は決して不可能ではない。本文では軟 X線領域を中心にした光学素子開発の現状を述べ将来の指針にしたい。

2. X線光学素子の概要

X線および軟 X線の光学素子として現在使用されているおもなものを表 1 にまとめてみる。結晶と斜入射回折格子は X線の発見以来, 長い歴史をもち今日にいたっている。有機結晶も実用化されてから 10 年以上になり, 軽元素軟 X線スペクトルの分光結晶として利用されてい

る。これらの素子の補助的なものとして全反射鏡や薄膜フィルタが使われてきた。元来 X線領域では可視域におけるような屈折型のレンズや効率のよい反射鏡がなく, 結像光学素子を利用した顕微鏡などは半ばあきらめた状態にあった。しかしながら, 技術の進歩に刺激され, 原理的に可能ではあるが技術的に困難であった新しい光学素子の開発がこの数年精力的に進められてきた。典型的な例はゾーンプレートに見られ, つい最近, 数百 Å の分解能をもつものもできるようになり, 完全に光学顕微鏡の性能を凌駕するにいたったのである。現在開発されつつある素子の簡単な原理と現状を以下に述べる。

3. 反射型軟 X線光学素子

3.1 全反射鏡

X線領域では物質の屈折率が 1 に近いため屈折型の光学素子は有効でない。一般に X線領域では物体の屈折率 n は複素表示で

$$n = 1 - \delta - i\beta$$

と表わされる⁶⁾。ここで

$$\beta = \mu_1 \lambda / 4\pi$$

μ_1 は線吸収係数, λ は波長である。さらに

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{Ne^2\lambda^2}{2\pi mc^2} \\ &= \frac{N_0 Z \rho}{A} \frac{e^2 \lambda^2}{2\pi mc^2} \end{aligned}$$

である。ここで, N は 1 cm^3 当りの電子数, e と m は電子の電荷と質量, c は光速, N はアボガドロ数, Z は原子番号, A は原子量, ρ は密度である。スネルの法

表 1 おもなX線光学素子

素子名	おもな機能	おもな使用波長域(Å)	$\lambda/\Delta\lambda$, 分解能	市販品
全反射鏡	反射・フィルタ	1~500	短波長カット	○
多層膜反射鏡	反射・分散	2~200	<50<	×
斜入射顕微鏡	結像	5~100	1 μm <	×
ゾンプレート	結像・分散	5~100	<0.1 μm <	×
透過回折格子	分散	5~200	<100	○
結晶	分散	0.1~10	100~1,000	○
有機結晶	分散	5~100	<100	○
斜入射回折格子	分散	10~200	100~1,000	○
薄膜	フィルタ	0.1~100	吸収端利用	○

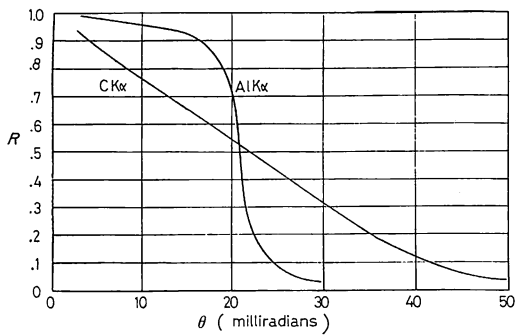


図 1 シリコン平面による軟X線反射率の計算例 (θ は斜入射角)

則より全反射の臨界斜入射角*1 θ_c は $\theta_c = \sqrt{2\delta} = 1.6 \times 10^3 \lambda \sqrt{\rho}$ で表わされる⁹⁾。ただし λ は cm 単位である。実際のX線の反射は鏡面の吸収の影響を受けるので臨界角付近の反射率は急激には変化しない。フレネルの反射式を使い、斜入射角 θ が小さいとして近似を用いると、偏光していないX線の反射率 R は次のように表わされる⁸⁾。

$$R = \frac{(\theta - a)^2 + b^2}{(\theta + a)^2 + b^2}$$

ただし

$$a^2 = \sqrt{(\theta^2 - 2\delta)^2 + 4\beta^2} + \theta^2 - 2\delta$$

$$b^2 = \sqrt{(\theta^2 - 2\delta)^2 + 4\beta^2} - \theta^2 + 2\delta$$

である。図 1 に $\text{AlK}\alpha$ ($\lambda = 8.3 \text{ \AA}$) と $\text{CK}\alpha$ ($\lambda = 44.8 \text{ \AA}$) のシリコン平面による反射率の計算例を示す。ただし、 $\text{AlK}\alpha$ に対し $\delta = 2.17 \times 10^{-4}$, $\beta = 8.62 \times 10^{-5}$, $\text{CK}\alpha$ に対し $\delta = 6.26 \times 10^{-3}$, $\beta = 3.99 \times 10^{-3}$ とした。

斜入射角を小さくすれば原理的には 1 \AA 以下のX線も十分反射を起こすわけであるが、反射光量を増そうと

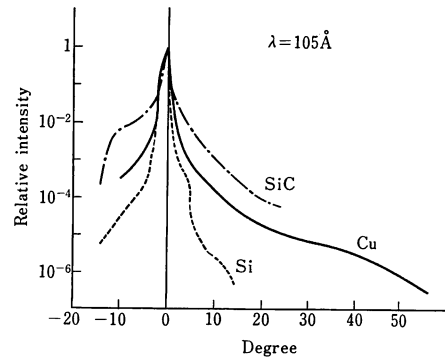


図 2 各種鏡面による軟X線散乱強度の角度分布¹³⁾ (上図では横軸は正反射方向を 0° として角度を示す)

すると鏡面が大きくなってしまふ。鏡面加工の形状精度や面精度から考えると 1 m 程度が限界であろう。鏡面加工は従来の光学研磨が主流をなしているが、新しい超精密研磨法もいくつか試みられている^{9,10)}。とくに直径数十 cm を越す大型のものは核融合用レーザーミラーとして開発が進められており、形状精度で $1,000 \text{ \AA}$ 表面粗さで 100 \AA を当面の目標にしている。X線用としては表面粗さが 10 \AA 以下の必要があり次の努力目標とならう。

表面粗さの測定法として触針式のものがよく使われるが数十 \AA 以下では誤差が大きくなる。これに代わりうるものとしてレーザー¹¹⁾や軟X線¹²⁾による散乱を求め計測する方法が考えられる。図 2 は著者らが波長 105 \AA の軟X線を用いて測定した散乱強度である¹³⁾。鏡面に斜入射角 20° で入射し正反射を 0° とし鏡面側をマイナスの角度で示してある。触針式で求めた表面の rms 粗さは Si が 6 \AA , Cu が 100 \AA , SiC が 280 \AA であり散乱法との定性的な対応がよく現われている。定量的な解析は現在検討中である。

*1 斜入射角 (glancing angle) は反射角の余角のことで視射角、照角とも呼ばれる。

反射面の素材としては反射率を大きくするために重元素が望ましい。白金や金のような安定な物質を精密研磨した溶融石英に蒸着して使うことが多い。放射光のように強力な光源では熱的負荷が大きいのでカーボン基板にSiCを化学蒸着させたものも使われている¹⁴⁾。従来鏡面の基板は研磨のしやすさから硬質のものがほとんどであったが、ダイヤモンドターニングの発達により軟質材もよく使われるようになってきた。最近ではコンピュータ制御を利用した非球面加工の研究も進み、任意の形状をもった高精度のミラーが実用化されるのも間近であろう。

3.2 多層膜反射鏡

前節で述べたように二つの異なる密度をもつ境界面ではフレネルの反射式が成り立つ。X線領域においては、斜入射角が臨界角を大幅に越えると反射率は急激に減少し $10^{-4} \sim 10^{-8}$ 程度になる。そのため単層膜反射鏡は直入射光学系には使えない。しかし、このときの振幅反射率は $10^{-2} \sim 10^{-4}$ なのでうまい具合に $10^2 \sim 10^4$ 層の layer pair 反射膜を重ねて位相を合わせれば反射率も1に近づく。基本的には可視域の多層膜ミラーと同じことが成り立つ。この原理にもとづく研究は古くからあったが^{15,16)} 実用的なものが得られるようになってきたのは最近のことである¹⁷⁾。多層膜ミラー反射率の理論的な求め方には

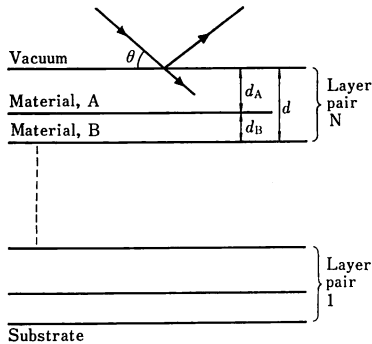


図3 多層膜反射鏡の模式図¹⁸⁾

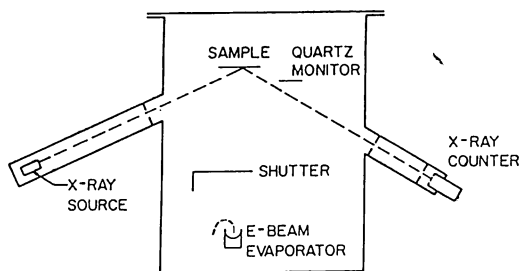


図4 多層膜蒸着法の例²⁰⁾

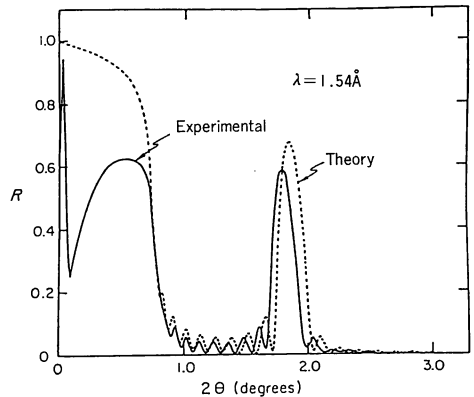


図5 多層膜反射鏡によるX線反射率の実験値と計算値の比較例²¹⁾ (散乱角 2θ は入射方向とのなす角)

フレネルの反射式を用いて漸化式を解く方法¹⁸⁾と、Darwin-Prins の結晶回折理論を用いる方法¹⁹⁾がある。両者とも実験値に比較的良好に設計の際の指針となっている。

多層膜は図3のように2種の物質を厚さ d_A, d_B と繰り返して蒸着されたものである。その1組を layer pair と呼ぶことにすればその厚さは $d = d_A + d_B$ である。入射X線の波長を λ とすると

$$m\lambda = 2d \sin \theta_m$$

を満足する斜入射角 θ_m で最大の強度を示す。ただし、 m は次数を表わす。layer pair N 層重ねた多層膜による反射スペクトル幅は位相が互いに強め合う条件から

$$\lambda / d \approx N$$

となる。このため多層膜ミラーは低分散の分光素子としても使える。蒸着物質は重元素と軽元素の組合せが一般的で、W-C, V-C, Au-C, ReW-C などがよく使われる。これらは境界面の拡散が少なく時間的にも安定である。作り方の例として Spiller による方法を図4に示す²⁰⁾。膜厚の測定は水晶振動子で行なうが熱的な影響で誤差が大きくなり精度に限界がある。そのためX線の反射率を測定しながら膜厚を決め精度を高めている。そのほかにスパッタ法²¹⁾や分子ビームエピタキシー法²²⁾などが使われているが、いずれも数原子層の膜厚を正確にコントロールして重ね合わせる必要がある。反射率を実験値と計算値と比較した例を図5に示しておく²¹⁾。多層膜はWとCで厚さはそれぞれ 17.34 \AA と 34.66 \AA である。 $N=11$ で $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) を用いて反射率を求めた。図で 0° に近いピークは全反射によるものである。多層膜の素子機能としては反射、分散、ビームスプリットがあり、ファブリペロエタロン、軟X線干渉計、直入

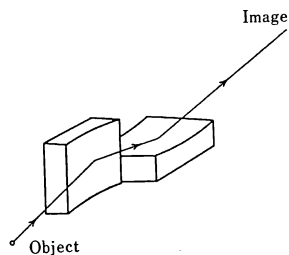


図 6 Kirkpatrick と Baez による斜入射 X 線顕微鏡

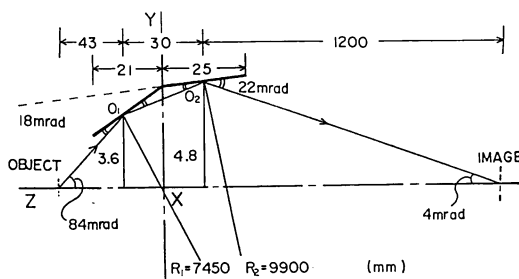


図 8 トロイダル鏡の数値例²⁹⁾

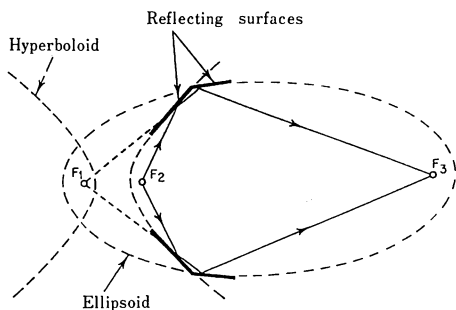


図 7 Wolter タイプ斜入射 X 線顕微鏡

射 X 線顕微鏡²³⁾など新しい応用が考えられる。

3.3 斜入射 X 線顕微鏡

X 線顕微鏡は電子顕微鏡に比べ分解能は劣るが大気や水を含む状態で試料を観察することができるので生物学・医学・化学などの方面から実用化が期待されている。しかしながら X 線領域では可視光や電子線のような効率のよいレンズがない。そのためあの手この手と工夫をして顕微鏡作りに挑戦している。ここに述べる斜入射 X 線顕微鏡もそのひとつである。

素子設計の出発点は結像可能な反射曲面を幾何光学的に求めるところにあり、曲面の作りやすさ、取り込む立体角の大きさ、分解能などが重要なポイントになる。斜入射角は 1° 前後であり通常の反射鏡とは趣きが大分異なる。Kirkpatrick と Baez²⁴⁾ は図 6 に示すような直交した二つの円柱面を組み合わせ実効的な二次曲面を構成して X 線像を得た。この方法は鏡面の製作が容易で手軽に扱えるが、取込み角が小さく ($10^{-6} \sim 10^{-7}$ ステラジアン) 像の倍率が軸方向によって多少異なり分解能も悪い。しかしながら比較的低下分解能でも十分利用価値はあり、レーザープラズマ X 線診断用として本格的に使われている²⁵⁾。より高分解能で取込み角の大きい X 線顕微鏡が 1952 年に Wolter^{26, 27)} によって考案された。彼のアイデアは図 7 に示すようなものである。一つの焦点を共有する回転楕円面と回転双曲面を考える。図の F_2 から

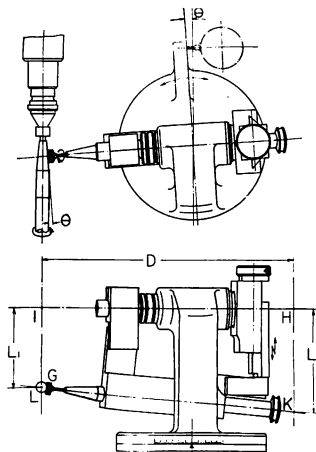


図 9 トロイダル鏡研磨装置 (左側が母材⁵⁾)

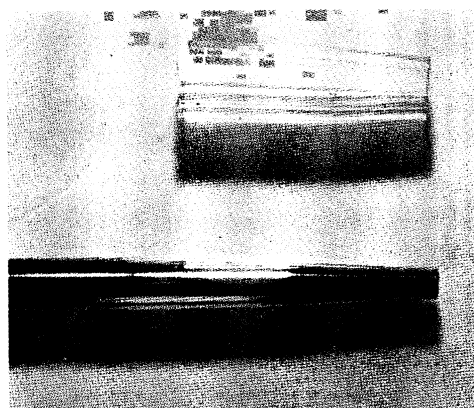


図 10 トロイダル鏡研磨母材(下)とガラスレプリカ(上)

出た X 線は双曲面と楕円面で反射して焦点 F_3 に集光する。反射面をどこにとっても光路は一定になる。二つの面を使うのは収差を小さくするためである。彼の見積りでは理論的な分解能 (波長 20 \AA , 視野 $40 \mu\text{m}$ で 250 \AA) を達成するためには形状精度 100 \AA 以下、表面粗さ 10 \AA 以下が必要であるとした。当時としては内径 1 cm 前

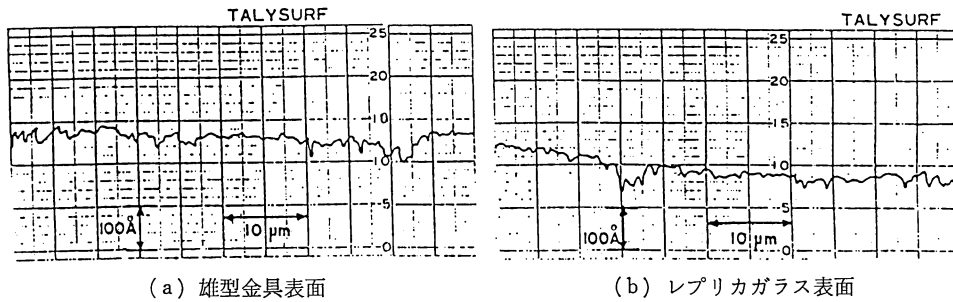


図 11 表面粗さ計による母材とレプリカの粗さ測定値

後の内面をこの精度で研磨するのは不可能であった。この原理にもとづいて最初に作られたのはX線望遠鏡であった²⁸⁾。望遠鏡の場合は楕円面の代りに放物面になる。内径は10 cm 前後と比較的大きく内面研磨も可能であった。1963年から現在まで10種類以上のX線望遠鏡が作られ、人工衛星に搭載して数万を越す太陽のX線写真や次々に発見されるX線星のX線像を撮影している²⁹⁾。

最初の軸対称をもつ斜入射X線顕微鏡は1978年にわれわれが開発したタンデム型トロイダル鏡であった²⁹⁾。これは坂柳が凹面回折格子の理論を基礎にして考案したものである³⁰⁾。基本的な構成はWolterタイプと同じであるが、製作上の簡便さと同種のものが大量に作れるメリットがある。AlK α 用倍率20倍の数値例を図8に示す。トロイダル鏡は光学研磨の利点を生かした方法で作られた。図9に示すように最初に母材を設計値に合わせて研磨し、次にガラスレプリカを真空圧着法で作る。レプリカはそのまま使うことが多いが、反射率を増すため金を蒸着することもある。1本の母材から10~20本のレプリカが製作可能である。母材としてはMo, W, WCなどの超硬材が研磨しやすく仕上がりもよい。レプリカ材はパイレックスガラスが扱いやすくガラス細工も簡単で作りやすい。母材とレプリカを図10に示しておく。母材とレプリカの表面粗さは図11に示すように数十Å以内に収まっている。分解能は1 μ m 台にとどまっているが、これは形状精度が影響しているものと思われる。

WolterタイプのX線顕微鏡も同年米国で発表されている³¹⁾。米国ではレーザプラズマX線診断用としてその後も開発が進み計測器として使われている。彼らは内面を直接研磨する方法を採用しており分解能も1 μ m にせまっている。

斜入射を応用したX線顕微鏡は色収差もなく光学調整も楽なため、今後分解能の向上とともに多くの分野で利用されるものと思われる。

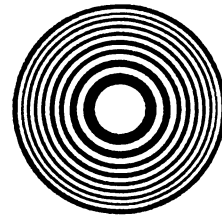


図 12 ゾーンプレート

4. 回折型軟X線光学素子

4.1 ゾーンプレート

回折を利用した結像素子や分散素子は古くからアイディアはあったが実用的な高性能のものができるようになったのは最近である。

ゾーンプレートは図12に示すような透明・不透明の同心円状の帯を繰り返した板である³²⁾。 n 番目の円の半径 r_n が

$$r_n = (nf\lambda)^{1/2} \quad n=1, 2, 3, \dots$$

を満たすとき、この板は一種のレンズ作用をする。ここで f は焦点距離で $f=r_n^2/\lambda$ と与えられる。ゾーンプレートは平面波と球面波または球面波同士の干渉によって形成されたパターンを近似したものと考えてもよく製作過程においてもこの原理が利用されることがある。レンズとしての解像力 δ はレーリーの基準を使うと

$$\delta \cong \frac{1.22 \lambda f}{2 r_n} \cong \Delta r_n$$

で与えられる³³⁾。ここで Δr_n は n 番目の線幅で

$$\Delta r_n = r_n/2n$$

である。集光効率は約10%である。ゾーンプレートは原理的に色収差を含むため結像には単色X線を用いなければならない。干渉の条件から帯の総数を N とすると

$$\lambda/\Delta\lambda \approx N$$

となる。連続X線の場合は逆に分散素子としても使え、像とスペクトルが同時に得られる。

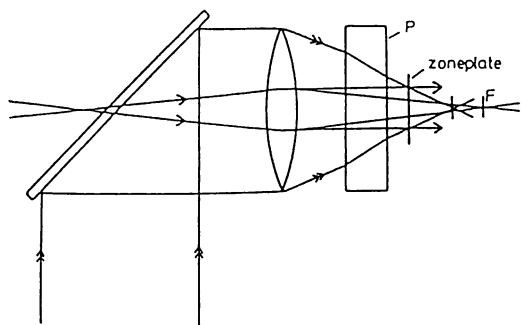


図 13 レーザ干渉によるゾーンプレート形成光学系³⁴⁾

ゾーンプレートを作る方法としてホログラフィックな方法と電子ビーム露光による直接書き込み法がある。前者³⁴⁾は図 13 に示すように平面波と球面波を重ね合わせて干渉させパターンを形成する。Pは補正用の平行平板である。使用するレーザの波長によって最小線幅も制限されるので紫外レーザを使うことが多い。ドイツのSchmahlらはアルゴンレーザの2倍高調波 2,570 Å を使い最小線幅 600 Å を得ている。放射光の 45 Å 軟 X 線を使い分解能 500 Å の顕微鏡写真を得た³⁵⁾。これは結像素子を用いて得られた X 線像では最高の分解能である。

一方、米国では電子ビームを用いた IC マスク製造技術を駆使してゾーンプレートを作っている。電子ビーム露光では最小線幅はレジスト内の電子の拡散によって決まり通常数百 Å と見積もられている。Hatzakis ら³⁶⁾は最小線幅 700 Å のゾーンプレートを 10 年も前に作っている。実用的なものとしては Shaver ら³⁷⁾のものが有り、帯の数 500 本、厚さ 1.5 μm の金製で最小線幅は 3,200 Å である。AlK_α 線を用いて 1 μm 以下の分解能を得ている。最近 IBM の電子ビームリソグラフィグループによって部分的にはあるが最小線幅 350 Å のゾーンプレートがレジスト上に描かれた³⁸⁾。全体のパターンが描かれるのも時間の問題であろう。

一般に微細パターンは線幅が小さくなるにつれて厚さも薄くなる。厚さと線幅の比を aspect ratio と呼んでいるが10倍程度が限界である。100 Å の線幅では厚さが 1,000 Å になる。金を素材にした場合、AlK_α では 64% の透過率になり集光効率が落ちる。数 Å 以下の X 線に対しては線幅を大きくして数十 μm 以上の厚さにしたゾーンプレートが作られている³⁹⁾。集光効率をあげるため位相ゾーンプレートやフレネルレンズ型ゾーンプレートも考えられているがまだ試作されていない。

ゾーンプレートは光学顕微鏡の分解能を上まわった最

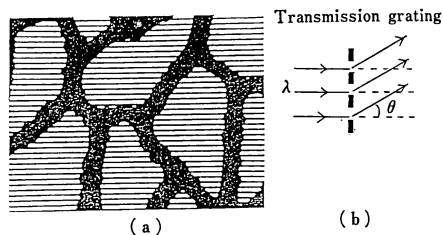


図 14 透過型回折格子拡大像⁴⁰⁾(a)と格子の周期と回折角との関係(b)
 $d \sin \theta = m\lambda$, d : period, m : diffraction order

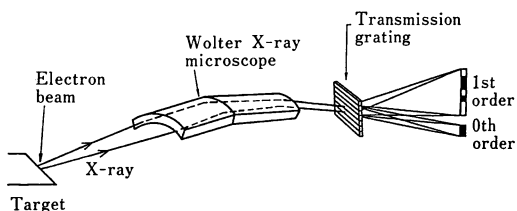


図 15 Wolter タイプ顕微鏡と透過回折格子の組合せによる分光光学系³⁹⁾

初の X 線光学素子である。集光効率の向上とともに X 線対物レンズとして重要な位置を占めていくであろう。

4.2 透過型回折格子

透過型回折格子は図 14 (a), (b) に示すような周期的に透明・不透明の帯をもつだれ状の回折格子である⁴⁰⁾。図中の太い部分は支持用の線である。一般に不透明部分は金のような重元素物質を使う。分散式は反射型回折格子と同様に

$$d \sin \theta = m\lambda \quad m=1, 2, 3, \dots$$

で表わされる。軟 X 線用としては格子間隔 1 μm のものがオプシオン社から市販されている。1 次回折光の回折効率は 6% で 10~600 Å の波長域で使用可能である。作り方はゾーンプレートと同様にホログラフィックな方法と電子ビーム露光法がある。使い方としては図 15 に示すように斜入射顕微鏡³⁹⁾や X 線望遠鏡⁴¹⁾と組み合わせることが多く、光学系の配置が簡単であること、分散方向が光軸に対して垂直であること、スペクトルと像が同時に観測できることなど便利な点が多い。スペクトルの分解能は $\lambda/\Delta\lambda \approx 100$ 程度であるが斜入射回折格子に比べて取扱いが簡単でスペクトルの大まかな分布を調べるには十分である。集光効率や結像性をよくするため非周期構造にする考えもある。線幅は現在数千 Å 程度であるが試験的には数百 Å のものも作られている。ゾーンプレートと同様に数 Å 以下の X 線用のものが開発されることが望まれる。

5. む す び

軟X線光学素子の開発は手足を縛られた者が泳ぎを覚えるのに等しい。あれこれともがいているうちに何とか泳げるようになってきたのが現状である。新しい素子が実用化され日常的に使われるまでには幾つかの技術的困難があると思われる。目標を遠くに置きながらひとつひとつ問題を解決すべきである。

文 献

- 1) H. Winick: *Synchrotron Radiation Research*, ed. H. Winick and S. Doniach (Plenum Press, New York, 1980) p. 27.
- 2) J. H. Underwood, J. E. Milligan, A. C. deLoach and R. B. Hoover: *Appl. Opt.*, **16** (1977) 858.
- 3) D. C. Flanders: *Appl. Phys. Lett.*, **36** (1980) 93.
- 4) D. T. Attwood: *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-14** (1978) 909.
- 5) S. Aoki and Y. Sakayanagi: *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **342** (1980) 158.
- 6) A. H. Compton and S. K. Allison: *X-Rays in Theory and Experiment* (D. Van Nostrand Co. Inc., New York, 1935) p. 279.
- 7) E. F. Kaelble: *Handbook of X-rays* (McGraw-Hill Book Company, New York, 1969) Chap. 48.
- 8) R. W. James: *The Optical Principle of the Diffraction of X-rays* (G. Bell and Sons, London, 1948) p. 173.
- 9) 日本学術振興会: 結晶加工と評価技術第 145 委員会第 2 回研究会資料 (1983).
- 10) 日経メカニカル, 1月号 (1981) 40.
- 11) J. M. Elson and J. M. Bennett: *J. Opt. Soc. Am.*, **69** (1979) 31.
- 12) P. A. J. de Korte and R. Lainé: *Appl. Opt.*, **18** (1979) 236.
- 13) H. Sugawara, S. Sato, T. Miyahara, A. Kakizaki, Y. Morioka, I. Nagakura, Y. Iguchi, M. Ando, T. Ohta and S. Aoki: *Activity Report of Synchrotron Radiation Laboratory 1980* (ISSP, The University of Tokyo, 1981) p. 67.
- 14) S. Sato, T. Koide, Y. Morioka, T. Ishii, H. Sugawara and I. Nagakura: *Nucl. Instrum. Methods*, **208** (1983) 31.
- 15) J. DuMond and J. P. Youtz: *J. Appl. Phys.*, **11** (1940) 357.
- 16) J. Dinklage: *J. Appl. Phys.*, **38** (1967) 3781.
- 17) E. Spiller: *Appl. Opt.*, **15** (1976) 2333.
- 18) J. H. Underwood and T. W. Barbee, Jr.: *Low Energy X-ray Diagnostics-1981 (Monterey)*, ed. D. T. Attwood and B. L. Henke (AIP, New York, 1981) p. 170.
- 19) B. L. Henke: *ibid.* (1981) p. 146.
- 20) E. Spiller: *ibid.* (1981) p. 124.
- 21) T. W. Barbee, Jr.: *ibid.* (1981) p. 131.
- 22) 榑 裕之, 横山幸嗣, 大野英雄: 昭和 55 年度文部省科学研究費補助金特定研究, 物質のミクロ構造の動的解析, 研究成果報告書 (1981) p. 20.
- 23) J. H. Underwood and T. W. Barbee: *Nature*, **294** (1981) 429.
- 24) P. Kirkpatrick and A. V. Baez: *J. Opt. Soc. Am.*, **38** (1948) 766.
- 25) F. Seward, J. Dent, M. Boyle, L. Koppel, T. Harper, P. Stoering and A. Toor: *Rev. Sci. Instrum.*, **47** (1976) 464.
- 26) H. Wolter: *Ann. Phys.*, **10** (1952) 94.
- 27) H. Wolter: *Ann. Phys.*, **10** (1952) 286.
- 28) R. Giacconi, N. F. Harmon, R. F. Lacey and Z. Szilagyi: *J. Opt. Soc. Am.*, **55** (1965) 345.
- 29) Y. Sakayanagi and S. Aoki: *Appl. Opt.*, **17** (1978) 601.
- 30) Y. Sakayanagi: *Opt. Acta*, **23** (1976) 217.
- 31) M. J. Boyle and H. G. Ahlstrom: *Rev. Sci. Instrum.*, **49** (1978) 746.
- 32) A. V. Baez: *J. Opt. Soc. Am.*, **51** (1961) 405.
- 33) C. D. Pfeifer, L. D. Ferris and W. M. Yen: *J. Opt. Soc. Am.*, **63** (1973) 91.
- 34) G. Schmahl and D. Rudolph: *Optik*, **29** (1969) 577.
- 35) B. Niemann, D. Rudolph and G. Schmahl: *Nucl. Instrum. Methods*, **208** (1983) 367.
- 36) M. Hatzakis, C. H. Ting and N. Viswanathen: VI Int. Conf. on Electr. and Ion Beam Sci. and Technol., San Francisco, May (1974).
- 37) D. C. Shaver, D. C. Flanders, N. M. Ceglio and H. I. Smith: *J. Vac. Sci. Technol.*, **16** (1980) 1626.
- 38) P. J. Coane, D. P. Kern, A. J. Speth and T. H. P. Chang: X Int. Conf. on Electr. and Ion Beam Sci. and Technol., Montreal, May (1982).
- 39) N. N. Ceglio: *Monterey Proceedings* (1981) p. 210
- 40) J. H. Dijkstra and L. J. Lantwaard: *Opt. Commun.*, **15** (1975) 300.
- 41) K. P. Benermann, R. Lenzen and H. Bräuninger: *Appl. Opt.*, **16** (1979) 1425.