

X線顕微鏡用光学素子ウォルターミラーの開発

数理物質科学研究科電子物理工学専攻
浅見 博、菊池 亮、青木 貞雄

1. はじめに

我々、数理物質科学研究科、青木・渡辺研究室ではX線顕微鏡の開発を行っている。X線顕微鏡は光源にX線を用いた顕微鏡である。X線顕微鏡は、その光源波長の短さから理論的に高分解能観察が可能であり、またその透過性により試料の内部を非破壊で観察することが可能である。そのため、生物学、医学など、様々な分野からの注目が集まってきた。

我々の研究室では、X線顕微鏡の結像素子としてウォルターミラーを開発している。ウォルターミラーは回転双曲面と回転楕円面をタンデムに組み合わせた形状で、全反射を利用してX線を結像させる光学素子である。これらふたつの非球面は互いにひとつの焦点を共有しているため光路長が一定となる。ウォルターミラーは集光効率が他のX線結像素子(フレネルゾーンプレートなど)に比べ高く、また全反射を利用しているため色収差がないことなどの利点から実験室規模でのX線顕微鏡の光学素子として有効である。

今回は光源としてレーザープラズマ軟X線源(エネルギー 400eV、波長3.2nm)を想定してウォルターミラーを製作した。なお、ここではウォルターミラーの製作においてもその精度のカギを握る「真空レプリカ法」の部分に焦点をおいて紹介する。

2. 製作方法

i) 設計

製作したいミラーの条件をもとに、倍率や斜入射角などの各種パラメーターを決定する。

ii) 金型母材の製作

超精密NC旋盤を用い、ELID研削法によるタングステンカーバイドの研削・研磨を行う。

iii) レプリカ

完成した母材の形状をパイレックスガラスに真空レプリカ法を用い転写する。

3. レプリカについて

以下にレプリカの手順を示す。

- ①母材をパイレックスガラス管に挿入して管内を真空装置により真空排気する。
- ②真空状態に達したら、電気炉内部にあるヒーターでパイレックス管を徐々に加熱していく。パイレックスガラス管の粘度(軟化点: 821°C)がある程度まで小さくなると、パイレックス管は周囲の大気圧に押されて金型母材に圧着され、管の内面に母材の形状が転写される。こうしてガラス管内にウォルターミラーの形状を得ることができる。
- ③転写が終了したら、ヒーターを止め、パイレックス管内を室温になるまで冷やしていくと、熱膨張係数(500°C~700°Cにおいて、タングステンカーバイドは $5.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、パイレックスガラスは $15.1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、0°C~400°Cにおいて、タングステンカーバイドは $4.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 、パイレックスガラス $3.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)の差から金型母材がパイレックス管から剥離する。金型母材をパイレックス管から取り出し、設計した長さでパイレックス管を切断すると、ウォルターミラーの完成となる。

下に真空レプリカ法概念図を示す(図1)。

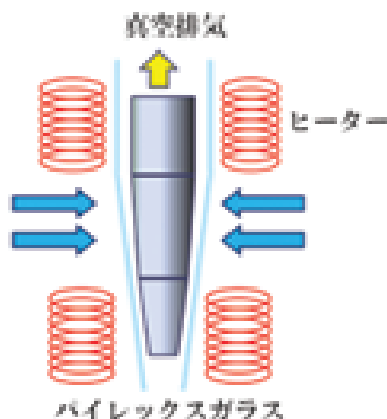


図1 レプリカ概念図

また、下の図は完成したウォルターミラー母材とレプリカ後のウォルターミラーの写真である(図2)。



図2 金型母材(A)とウォルターミラー(B)

ウォルターミラーの反射面における形状誤差はX線波長と同程度の精度が要求される。形状誤差はその周波数の大きさから表面粗さとうねりにわけることができる。反射面における反射率はその面での粗さに大きく依存する。下にAFMによる金型母材とミラー反射面の粗さの測定結果を示す。

ミラー反射面

金型母材

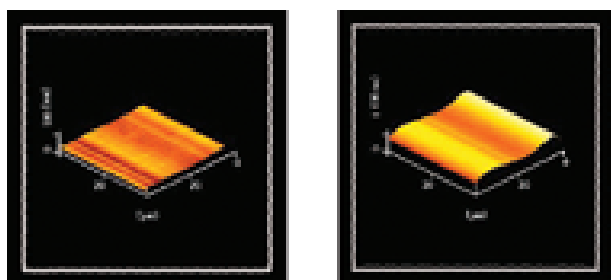


図3 AFMによる粗さ

AFMにより得られた結果から、金型母材の粗さよりレプリカ後のガラス反射面の粗さの方が良い結果となることがわかった。

4. おわりに

今回はELID研削法、真空レプリカ法を用いたウォルターミラーの製作を行った。真空レプリカ法では金型母材の形状をパイレックスガラス管にほぼ転写することができた。しかし、表面粗さに関しては完全に転写させることができなかった。このことから、今後は金型母材研削に関して、表面粗さよりうねりをなくすことが必要であるとわかった。

またレプリカの際の炉の温度と加熱時間はその実験環境により経験的に多少の変更をした。つまり最適温度、最適時間はいまだ模索中ということになる。今後はさらなる良い精度のミラーを製作するために、ガラス管の種類の変更やガラス管内の洗浄なども考えている。

5. 謝辞

私は3年間この研究に携わっているが、これまでにパイレックスガラス管の成形を含め工作センターやガラス工作室に工作や測定を依頼した回数は数え切れない程多い。というのも、工作センターの方々がみな親切で、親しみと信頼を持てるからである。特にガラス工作室の門脇さんと明都さんには幾多の工作依頼だけでなく、研究自体の相談にもなって頂きました。

文面ではありますがここに深く感謝いたします。

参考文献

V. H. Wolter, Ann. Phys.10, 94-114(1952)