

X線と光学技術

株式会社ニコン 生産本部 技術統括部 技術戦略部
押野哲也 Oshino, Tetsuya
(当協会 光部品生産技術部会 副部会長/
技術広報委員会 委員)

私が X 線光学の研究開発に取り組んだきっかけは学生時代に遡る。透過型電子顕微鏡 (TEM) による分析技術の研究室に配属となり、担当の先生から希望する研究テーマを問われた。研究室の文献を眺めて目に付いたものが、半導体超格子薄膜の断面 TEM 写真であった(図 1)¹⁾。この薄膜は、ガリウムヒ素の単結晶とアルミニウムガリウムヒ素の単結晶を交互に積層した多層膜であるが、両者の格子定数を制御して、薄膜全体を単結晶構造とした点が大きな特徴であった。このような高度な結晶材料が作製できると知り、感動したのを今でも覚えている。この構造分析を研究テーマにしたいと先生に申し出たところ、類似材料として X 線多層膜を勧められた。

X 線多層膜とは、X 線用ミラーの表面に積層した光学薄膜である。X 線は物質の屈折率が 1 に近いため、通常の金属ミラーは斜入射条件でしか反射することができない。一方、重元素と軽元素の薄膜を交互に積層した多層膜を用いると垂直入射でも実用的な反射率を得ることができる。X 線多層膜の反射原理は可視光領域の多層膜と同じであるが、X 線の波長が可視光に比べて 1~2 桁小さいために、ナノメートルオーダーの極めて薄い膜が必要になる。X 線は多層膜の界面で反射されるが、X 線の散乱損失を抑制するためには、界面粗さを原子サイズレベルで平滑にしなければならない。一般的な光学薄膜は多結晶材料で構成されるが、膜厚が結晶粒サイズよりも薄くなると、界面の平坦度が大きく損なわれる。蒸着法に代わり非晶質薄膜が形成しやすいスパッタ法を用いることによって、X 線多層膜が製作できるようになった(図 2)²⁾。

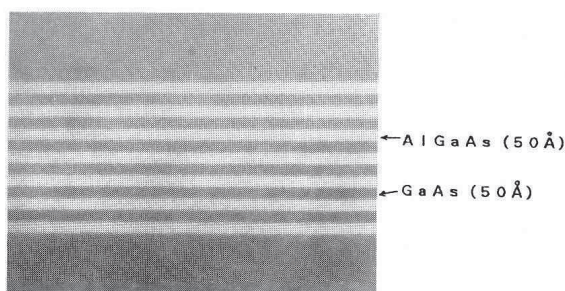


図 1 半導体超格子の断面 TEM 写真

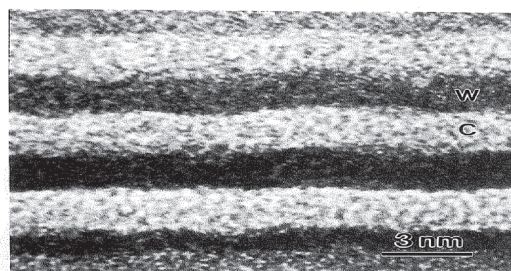


図 2 X 線多層膜の断面 TEM 写真

X 線光学の主な産業用途は、X 線天体望遠鏡、X 線生物顕微鏡、半導体用露光装置などがある。これらの中で最も注目されたものは、市場規模が大きい半導体用露光装置であった。X 線を用いた露光技術には当初 2 つの方式が存在した。一つは等倍露光方式、もう一つは縮小露光方式である。開発が先行した等倍露光方式が「X 線露光技術」と称したため、縮小露光方式は「EUVL (Extreme ultraviolet lithography, 極短紫外線露光)」と称するようになった。等倍露光方式が回路パターンの原版であるフォトマスクと回路を転写するシリコンウエハを近接して露光するのに対し、縮小露光方式は、投影

光学系を用いて原版の回路を縮小転写する。縮小露光方式の実現には、高度な光学技術が必要であった。縮小露光装置の最も重要な性能である露光解像度 w は下記式で決まる。

$$w = k \lambda / NA$$

w : 露光解像度, k : 照明条件などから決まる係数, λ : 露光波長
 NA : 投影光学系の開口数

EUVL の露光波長は 13.5nm である。これは、紫外線露光装置に用いられる ArF の波長 193nm の 1/10 以下のため、高い解像度が得られる。この波長における X 線多層膜の反射率は高々 60~70% であるため、十分な透過率を確保するために、投影光学系の反射回数は極力少なくしなければならない。EUVL の投影光学系はわずか 6~8 枚の非球面ミラーで構成される。

投影光学系の最も重要な性能は波面収差である。要求される波面収差は、少なくとも波長の 1/14 以下であり、EUVL の場合 1nm RMS 以下が必要とされた。6 枚のミラーの形状精度に換算すると約 0.2nm RMS になる。これは紫外線露光装置の投影レンズの精度よりも小さかったため、最初の壁は、その計測手段が存在しないことであった。そのため「測れないものは作れない」をキーワードに形状計測技術の開発が行われた。ミラーの形状計測技術には 2 つの課題がある。形状の絶対精度保証と、計測再現性である。前者の手段の一つとしてピンホール干渉計がある。波長より十分小さいピンホールを透過した光束の波面は、理想的な球面波になるという性質を利用したものである。計測再現性の向上は、レーザー干渉計の誤差要因である空気揺らぎおよび振動との戦いである。温調技術、振動制御技術を駆使して、0.1nm RMS 以下の測定再現性が実現された。

投影光学系の鏡筒にミラーを装着する際の保持方法も課題である。この難しさは、ミラーを「こんにやく」に例えるとイメージしやすい。こんにやくは容易に変形するが、鏡筒装着時にミラーの形状精度を維持することを考えると、分厚いガラスのミラーもこんにやく同然なのである。ミラーの変形を抑制する手段の一つは、保持機構にバネを用いることである。バネが変形することによって、ミラー自体の変形を抑制する。一方で、バネが柔らかすぎると露光時にミラーが振動して、投影露光像がぼけてしまう。ミラーに力が加わらず、かつ剛性も確保できるバネ構造が求められる。このようなバネ機構の開発には、シミュレーション技術が不可欠である。保持機構の CAD モデルを作成し、有限要素法計算により変形量を予測する。サイバー空間ではバネの構造を容易に修正することができるため、試行錯誤の速度が飛躍的に高まる。ナノメートルオーダーの精度で計算するためには、モデルの要素数など配慮すべき点があるが、半導体の進歩による計算能力の向上は目を見張るものがあり、保持機構の開発に大きく貢献した。

投影光学系を露光装置に搭載した後も、ミラーの熱変形という課題が待ち受けている。すでに述べたように、ミラーの反射率は高々 70% であるが、反射しなかった X 線の大半はミラーに吸収されてしまう。さらに、波長 13.5nm の X 線は空気による吸収が無視できないため、露光環境は真空にする必要が生じる。その結果、ミラーは断熱状態となる。ミラーの基板材料は低熱膨張ガラスであるが、それだけではミラー熱変形を十分に抑えることは困難である。さらにミラーを水冷しようとする、冷却機構を取付ける際にミラーが変形してしまう。このようなジレンマを解消する手段が、輻射を利用した温調技術である。ミラー周辺の鏡筒部材を冷却し、輻射によるエネルギー伝達を利用して、ミラーの熱を外部に排出する。この開発にもシミュレーション技術が大いに力を発揮する。CAD モデルの幾何学的位置関係から形態係数を求めて、温度分布を計算する。さらに温度分布からミラーの変形量を推測する。サイバー空間で試行錯誤し、投影光学系の温度制御条件を最適化することによって、熱の影響を極力抑えることが可能となる。

この場を借りて、X 線と光学技術と題して、その一例である EUVL 投影光学系の要素技術を紹介した。EUVL 投影光学系は世界で最も高精度なシステムの一つといえるが、その開発には薄膜技術、計測技術をはじめ、オプトメカ技術、ミラー温調技術など様々な光学要素技術が寄与した。さらに、半導体技術とともに高度化したシミュレーション技術も大きく貢献した。光学技術は露光装置を通して半導体の発展に寄与してきたが、その半導体を用いたコンピュータがシミュレーション技術とタッグを組んで光学技術を発展させるという好循環を生んだとも感じる。今後も、X 線光学をはじめとする

最先端の光学技術が様々な分野で好循環を生み、世の中の発展に貢献していくことを期待している。

参考文献

- 1) 小野佑一：素材物性学雑誌 5(1992)107.
- 2) Tetsuya Oshino, Daisuke Shindo, Makoto Hirabayashi, Eiji Aoyagi, Hideo Nikaido: Jpn. J. Appl. Phys. 28(1989)1909.