

1 極端紫外線露光マスク基板用多層膜の開発

Development of Multilayers for EUVL Mask Blanks

関根 啓一 Kiichi Sekine 中央研究所 研究開発部 担当課長

キーワード：極端紫外線露光、マスク、欠陥、多層膜

要 旨

次世代の極端紫外線露光システムにおいて使用される反射型マスク基板用多層膜の開発を行っています。この多層膜には反射率などの光学性能の他に露光により転写されるような欠陥がないことが要求されます。極端紫外線用反射多層膜の形成実験を行い、そこに現れる欠陥について調べました。そして、欠陥低減の対策を実施することにより、光学顕微鏡で観察可能な欠陥については当初の 1 cm^2 当たり 100 個ほどから 1 個未満にまで低減することができました。また、欠陥上の多層膜形成について調べた結果、欠陥が非常に小さい場合にはその影響が多層膜の表面に及ばないことがわかりました。

SUMMARY

We are developing multilayers for reflective-type mask blanks used in a next-generation Extreme Ultra-Violet Lithography (EUVL) system. These multilayers must have no defects that will be printed during EUV exposure as well as high optical performances. In experiment multilayers were formed and the resulting defects were examined. Some measures taken to reduce defects have effect on lowering the number of defects visible by an optical microscope from 100 per square centimeter to less than one. In addition, the results of multilayer formation on a surface with very small defects indicated that such small defects do not extend to the surface of the multilayer.

1 序論

極端紫外線露光(Extreme Ultraviolet Lithography; 以下 EUVL と略します)は、デザインルールが70nm 以降の世代のLSIの製造に必要とされるシステムで、現在、日米欧がそれぞれ国家プロジェクトとして開発に取り組んでいる最先端の技術です。このシステムでは、波長13nm 付近の非常に短い波長の極端紫外線が使用されます。この波長域では、物質の屈折率が1に近い上に吸収があるためもはや屈折光学系は使用できません。そのため、すべて反射光学系で構成され、マスクも反射型となります。マスクはその表面にICパターンを書き込みそれを原盤としてウェハ上にパターンを転写するために使用されます。そのため、反射率等の光学特性がよいだけでなく欠陥が非常に少ないことが要求されます。ここでは、マスク基板用多層膜の開発においてこれまでに得られた成果について述べます。

2 マスク基板の開発課題

EUVL で使用される波長13nm 附近の光学系には、高反射率を得るためにMoとSiの交互多層膜が使用されますが、マスク基板にも同じ多層膜が用いられます。これは、EUVL システムにおいてはマスク基板もパターンが付いているひとつのミラーとしても働くので、この反射率が低いと露光面に到達する光の強度を弱める結果となるため、投影光学系のミラーと同様に高い反射率が求められるからです。それらの膜厚は使用する光の波長と入射角に対して最適となるように設計されます。また、光学特性のばらつきは露光面のコントラストに影響を及ぼすので、その均一性も重要になります。これらの課題は光学系の他のミラーも同じですが、異なるのはマスク基板では特に欠陥が大きな問題となることです。これは、マスク上に欠陥が存在すると、露光の際ウェハ上に転写されてパターンエラーとなるからです。そのため、欠陥のないマスク基板が求められるわけです。実用段階では、50nm 以上の大きさの欠陥が1cm²当たり0.01個以下であることが必要であると言われています。そのため、マスク作製のい

ずれの工程においてもそのような欠陥が付加されないようにしなければなりません。

3 欠陥の観察

(1) 多層膜の形成

実験に使用した多層膜については、波長13.5nm で垂直に近い入射角という条件で設計した結果、膜厚はそれぞれMoが2.9nm、Siが4nmとし、十分な反射率を得るために層数は80層としました。また、多層膜の形成はシリコンウェハを基板に用い、イオンビームスパッタ法により行いました。

(2) 暗視野顕微鏡による観察

実際に作製した多層膜上の欠陥を暗視野顕微鏡で観察した例を図1に示します。図中で輝点となって観察されているのが欠陥です。暗視野顕微鏡で多層膜上の一定の面積を走査して欠陥数を数えることにより欠陥密度の定量的評価としました。

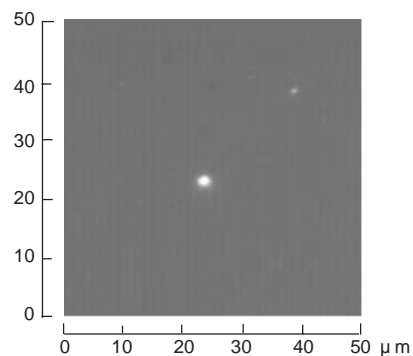
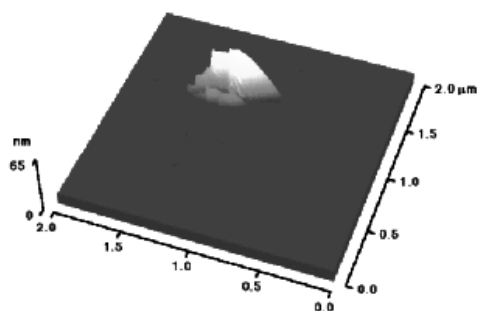


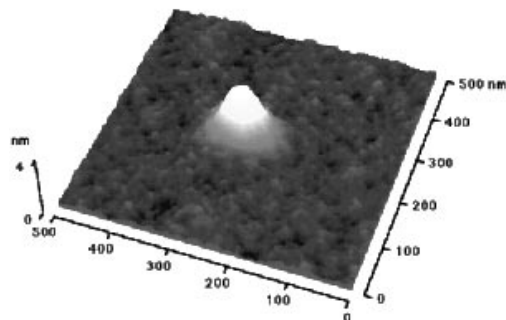
図1 多層膜上の欠陥の暗視野顕微鏡像

(3) AFM による観察

欠陥の構造については原子間力顕微鏡(Atomic Force Microscope; 以下AFMと略します)で観察しました。観察例を図2に示します。図2(1)はかなり大きな欠陥であり、その形状から考えて成膜室内で剥がれた膜の小片が付着したものと思われます。また、同図(2)はその形状



(1) 大きな欠陥(幅:500nm、高さ:60nm)



(2) 小さな欠陥(幅:100nm、高さ:3.5nm)

図2 欠陥のAFM観察像

および幅と高さの比から考えて(1)とは異なる原因の欠陥と思われますが、深い位置に存在する欠陥の上に多層膜が形成されたためにこのようになった可能性もあります。

4 欠陥の原因と対策

図3に欠陥密度の推移を示します。これからわかるように、ターゲットの使い初めには、欠陥密度が 1cm^2 当たり数十個以上と非常に多く発生し、成膜を重ねるに従って減少していくという傾向を見られました。これはターゲットの表面には内部とは異なった層があり、それをスパッタして形成した薄膜には欠陥が多く発生すると考えられます。したがって、これを回避するためには、多層膜形成を始める前にそのような表面層を除去する必要があります。

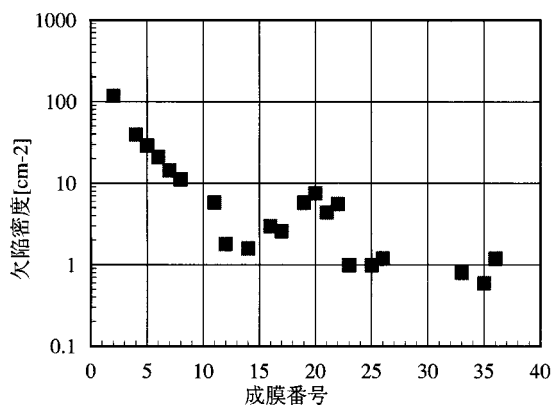


図3 欠陥密度の推移

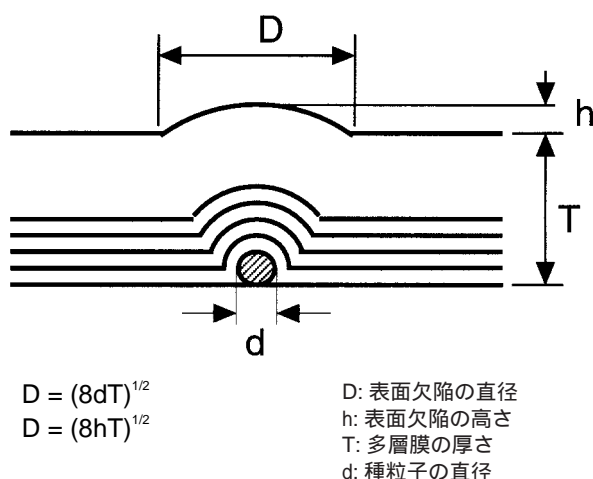


図4 ノズル型欠陥の断面図
(球状の種粒子の上に多層膜が形成されている)

成膜室内で欠陥発生の原因として考えられるのは、機械的に動く部分からの発塵、成膜室内部に付着した薄膜の剥離が考えられます。また、これらの発塵物は、成膜室からの基板の出し入れの際の排気あるいはベント等により動かされて、基板表面に到達することが考えられます。さらに、イオン源の放電によっても欠陥の原因が生成される可能性があります。したがって、これらが欠陥となるのを防ぐためには、発塵や膜の剥離をできる限り防いで原因の発生を抑えとともにそれらが基板表面に到達することを防ぐ必要があります。そこで、前者については、発塵の抑制と適時なクリーニングを実施するとともに、後者については、排気速度やガス流速の調節により緩和することを実施しました。

その結果、これらの対策は暗視野顕微鏡で観察される欠陥の低減に効果があり、その発生は 1cm^2 当たり1個未満にまで低減しました。

しかし、大きさが 70nm とより小さな欠陥まで測定すると 1cm^2 当たり1.5個以上増加しており、さらに、その大きさの分布を見ると、 100nm 以下の欠陥の顕著な増加も認められます。¹⁾したがって、欠陥低減のためのさらなる対策が必要です。

5 欠陥上の多層膜形成

基板表面に存在するあるいは成膜途中に表面に出現する欠陥がその上に多層膜が形成される際にどのように変化するかということは、重要な問題です。もし、それが成膜するに従って成長し大きくなっていくのであれば、欠陥の検査および除去する対象が小さくなり、その対策はそれだけ難しくなるからです。そこで、基板上の欠陥がその上に多層膜を形成した際にどのように変化するかを成長モデルによる計算と実験により調べました。

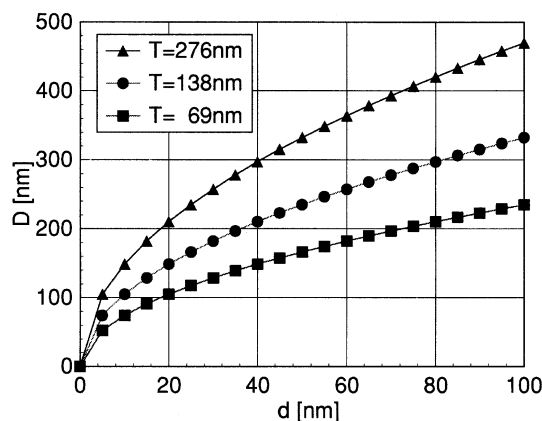


図5 多層膜形成におけるノズル型欠陥の成長

多層膜の形成中に成長する欠陥として、ノジュール型欠陥が知られています。²⁾ この欠陥は、高出力YAGレーザによる誘電体多層膜の照射ダメージに関連して研究されてきました。この欠陥は図4に示したような構造をしています。この欠陥は、蒸着源から飛び出して基板上に付着した種粒子の上に多層膜を形成した場合に発生すると考えられています。この表面欠陥の高さは種粒子のそれと変わらないが、その直径は多層膜の厚さとともに増大していきます。図中に示したそれらの関係式をEUVLマスク用多層膜に適用し、種粒子の直径に対して表面欠陥の直径を求めると、図5に示すようになります。この結果から、EUVLシステムが適用されるデザインルールに匹敵する直径の表面欠陥を問題にすれば、基板上ではそれより1桁小さい種欠陥を問題にしなければならないことがわかります。

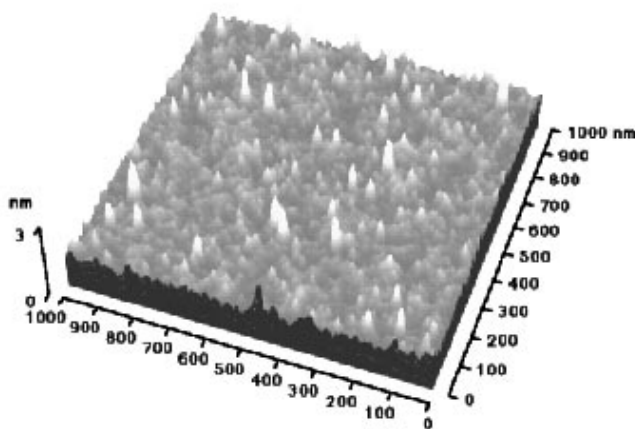
図6は微小な欠陥が存在する基板上に多層膜を形成した表面をAFMにより観察した結果です。図6(1)に示すように、成膜前には基板表面には幅が数十nmで高さが1~2nmの微小な欠陥が多数存在するのが観察されています。この上に20層対の多層膜を形成した後、AFMで観察した結果が図6(2)です。比較するとわかるように、微小な欠陥は埋もれてしまいその影響は多層膜の表面に現れていません。

このことから、少なくとも同図(1)に示したような微小な欠陥の場合は、ノジュール型欠陥のように成長することではなく、その上への多層膜形成により表面はむしろ基板よりも平滑になることがわかります。しかも、その表面粗さはこのような微小な欠陥が存在しない基板上に多層膜を形成した場合とほとんど同じでした。

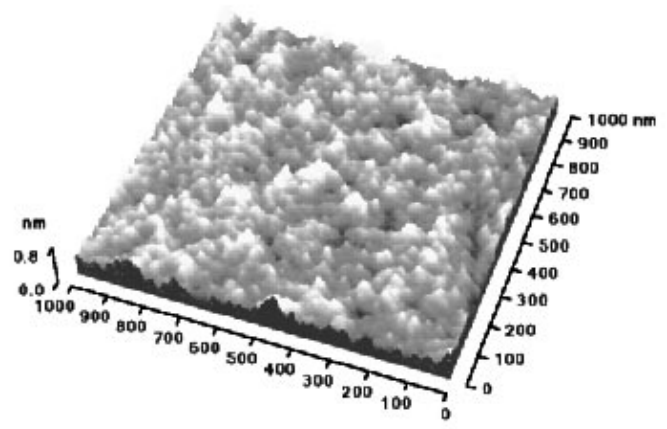
6 まとめ

EUVLマスク基板用多層膜の成膜工程において付加される欠陥のうち、暗視野顕微鏡で観察されるような比較的大きな欠陥について、その低減対策をとることにより当初1cm²当たり100個くらいあったものが1cm²当たり1個未満にまで下がりました。しかし、多層膜形成時に発生する小さな欠陥の低減が課題として残っています。

また、基板表面上に存在する微小な欠陥はその上に多層膜形成した時に成長して大きくなることはなく、むしろ多層膜形成の早い段階で埋もれて平滑になり、その影響が表面に達することはないことがわかりました。この結果は、欠陥の影響が多層膜表面に及ぶような場合に比べ、基板に対する要求条件を緩和することになります。



(1) 多層膜形成前
表面粗さ：0.210nm rms



(2) 20層対の成膜後
表面粗さ：0.098nm rms

図6 微小な欠陥が存在する基板上の多層膜形成

参考文献

- 1) T. Ogawa: "EUVL Mask Development in Japan" XEL '99 Digest of Papers, M2-2-1 (1999)
- 2) M.C. Staggs et. al.: "Correlation of Damage Threshold and Surface Geometry of Nodular Defects in HR Coatings As Determined by In-Situ Atomic Force Microscopy" SPIE Vol.1848 Laser-Induced Damage in Optical Materials p.234 (1992)