

EUV 顕微鏡を用いた EUV マスクの多層膜欠陥観察

天野剛¹、寺澤恒男¹、高瀬啓²、木下博雄² ¹(株)半導体先端テクノロジーズ、²兵庫県立大学

1. はじめに

EUV リソグラフィは、22nm ハーフピッチ世代の半導体デバイス量産におけるパターンニング技術の最有力候補と位置づけられる。しかし、露光に用いる照明光の波長は現状の光リソグラフィに用いる光の波長と比べて1桁小さい13.5 nmであり、その短波長に起因して、マスクも投影光学系も多層膜反射面を用いなければならないという技術的な困難さを有する。このEUV リソグラフィの課題として、無欠陥 EUV マスクの作製、特に欠陥検査評価インフラの不足が大きく挙げられている。表1は2009年10月に開催されたThe international symposium on EUVLでSematech(半導体製造に関する技術研究開発のためのコンソーシアム)から発表された、EUV リソグラフィ実用化に向けて解決すべき課題をリストアップしてランク付けしたものである。これは2013年に予定されている22nm ハーフピッチ世代の量産化に向けた課題であり、ランクの高いものほど課題解決の難しさを意味する。表1が示すとおり、年々実用レベルに合致する無欠陥マスクを製造することの難しさが注目されるようになり、ついには最大の課題であるとの認識が持たれるようになった。

表1 EUV リソグラフィ実用化に向けて解決すべき課題とランク

ランク	2007年	2008年	2009年
1	高信頼性、高出力 EUV光源	高信頼性、高出力 EUV光源	無欠陥マスク収率と欠陥検査インフラ
2	解像力、感度、ラフネスを満足するレジスト材料	無欠陥マスク製造と欠陥検査インフラ	高信頼性、高出力 EUV光源
3	無欠陥マスク製造	解像力、感度、ラフネスを満足するレジスト材料	解像力、感度、ラフネスを満足するレジスト材料

無欠陥 EUV マスク製造の難しさは、欠陥修正技術開発をサポートする欠陥検査技術の開発遅れが原因のひとつである。従来の光マスクの場合は、AIMS (Aerial Image Measurement System ウェハ転写装置の光学系と同等の光学系を持つ装置。マスク上の微小領域を観察して欠陥転写性評価を行うことができる。)の開発がタイムリに行われ、量産に対応する高精細マスク製造に向けた欠陥転写性評価や、欠陥修正条件の開発を行うことが事前に可能であった。一方 EUV マスクの場合、技術の困難さからAIMSの開発が遅れており、量産に向けたマスクの欠陥種類や許容サイズ、欠陥修正方法の技術蓄積が困難な状況にある。

以上の状況から、EUV 光を用いた EUV マスク観察手段は、欠陥検査および修正技術の開発に必要不可欠である。本講演では EUV マスク固有かつ EUV 光のみで観察可能な、2種類の反射多層膜構造欠陥を、EUV 顕微鏡¹⁻³⁾を用いて観察した結果を報告する。

2. EUV 光を用いたマスクおよびブランクス観察の重要性

EUV リソグラフィでは、Mo/Si 多層膜を成膜したマスクブランク上に吸収体パターンを形成した反射型マスクを使用する。EUV 光の短波長性に加え、この反射型マスク構造に起因して、光リソグラフィでは従来無視できた誤差が無視できなくなる。このうち、基板表面にわずかな凹凸があるブランク欠陥を考えると、例えば ArF マスク基板で深さ 2 nm の欠陥は、ガラスと空気の屈折率の差から約 1 nm の光路差発生要因となり約 1.9 度の位相差を与える。これは無視できる量である。しかし、EUV マスクにおいて同様の欠陥があると反射光に 4 nm の光路差を与え、波長 13.5 nm の EUV 光に対して 107 度もの位相差を与える。これは致命的な欠陥となる。

このように多層膜マスクブランクを作製するにあたり、基板の上に小さな微粒子やピットが存在すると、多層膜を成膜するときに生じる膜の凹凸形状が表面にまで伝播されて位相欠陥になる。また、多層膜の成膜途中で微粒子を巻き込んでも、同様に位相欠陥となる。この位相欠陥は、多層膜の表面形状のみならず内部の構造に依存し、露光装置によるマスクパターン転写に影響を与える (図 2-1)。そのため、位相欠陥の存在を EUV 光で直接観察し、欠陥の特性を理解することが重要である。

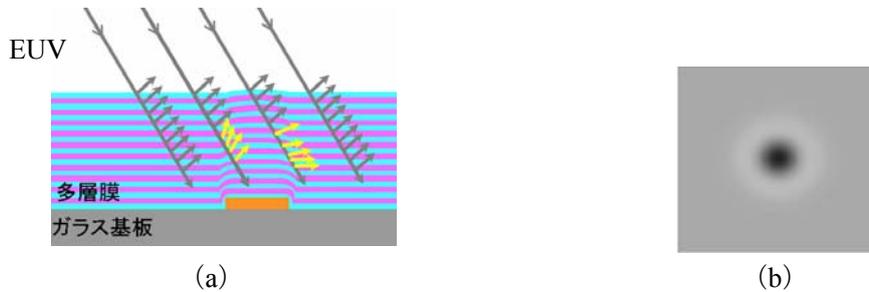


図 2-1 位相欠陥が存在する EUV マスク断面と位相欠陥を転写装置で転写した際の光強度モデル
(a) EUV マスク断面形状、(b) 位相欠陥により EUV 光強度低下部

このような位相欠陥を UV 光 (波長 488nm~193 nm) で観察した場合と、EUV 光で観察した場合の検査光の反射の違いを図 2-2 に示す。既に、UV 光を使用したレーザ光の散乱光検出でマスクブランク表面の窪みや突起を高感度に検出する技術が提案されているが、この技術は多層膜表面の凹凸を検知する。多層膜底部や内部に欠陥があって表面が平滑化されている場合、露光装置によるパターン転写では明らかに欠陥となるものが、前記の UV 光の検査方法では検知できない。更に、検出しようとする欠陥の高さあるいは深さは 1~3 nm レベルで、レーザ波長より 2 桁小さい値なので検査限界の問題がある。一方 EUV 光で観察した場合、EUV 反射多層膜に発生した構造変化を高感度に観察することが可能である¹⁻¹⁰⁾。

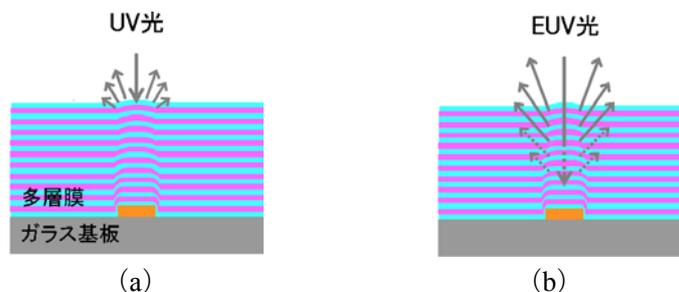


図 2-2 位相欠陥を異なる波長の観察光学系を使って観察した際のモデル
(a) UV 光で観察した反射光モデル、(b) EUV 光で観察した反射光モデル

3. 実験方法

3-1. 反射多層膜に存在する位相欠陥の観察

EUV 顕微鏡を用いて位相欠陥を観察・評価することを目的に、位相欠陥を作り込んだテストマスクブランクを作製した。このプログラム位相欠陥は、マスク基板上に 7 nm の高さを有するドットパターンを 10 μ m の間隔において多数形成した後、Mo/Si 多層膜を成膜することにより作製することができる。位相欠陥の幅 (FWHM) は、70 nm~450 nm である。プログラム位相欠陥部分で発生する EUV 反射光の位相の擾乱を EUV 顕微鏡で観察し、観察像の光強度の変化を評価した。

3-2. 反射多層膜にダメージを与えた構造欠陥の観察

反射多層膜上の吸収層を 480nm L/S パターン状に形成した EUV マスクを準備した。この反射多層膜に対し加速電圧 15kV の Ga イオン FIB を照射量 1, 5, 10, 20, 50 x10¹⁵ ions cm⁻² 照射をすることで反射多層膜にダメージを与え、局所的な構造欠陥を作製した。これを EUV 顕微鏡にて観察した。EUV 顕微鏡像から FIB 照射部と未照射部の反射強度を算出することで、反射多層膜への FIB 照射が EUV 光反射強度へ及ぼす影響を評価した。

4. 実験結果

4-1. 反射多層膜に存在する位相欠陥の観察結果

プログラム位相欠陥の一例として、幅 160 nm、高さ 7 nm のプログラム位相欠陥の構造を図 4-1-1 に、その EUV 顕微鏡による観察像を図 4-1-2 に示す。マスクブランクは吸収体材料を形成する前の段階であり、EUV 顕微鏡で得られる観察像の光強度は多層膜の反射率で定まる一定の値を有するはずである。しかし、プログラム位相欠陥部では、吸収体材料が存在しないにもかかわらず、EUV 反射光の位相擾乱に起因して光強度の著しい低下が見られた。この光強度の低下量はプログラム位相欠陥のサイズに依存して変化した。このような位相欠陥をマスクブランクに残したまま吸収体パターンを形成して EUV マスクを製作すると、吸収体パターンをウェハ上に転写したときにパターン欠陥が発生することになる。したがって、マスクブランクの段階で位相欠陥の存在を把握することが、EUV マスクの歩留り確保には必須である。

尚、図 4-1-2 の観察像では、位相欠陥部以外の部分にノイズが存在すると共に、検査像全体にわたって強度分布の傾斜が見られる。これらは、撮像系のノイズや照明光強度分布の不均一性に起因するものであり、CCD を含めた顕微鏡光学系の細かな調整や検査画像のノイズ低減信号処理などにより低減することができる。

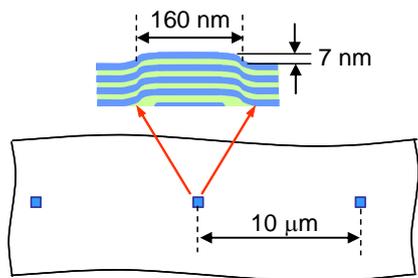


図4-1-1 幅 160nm、高さ 7nm のプログラム位相欠陥

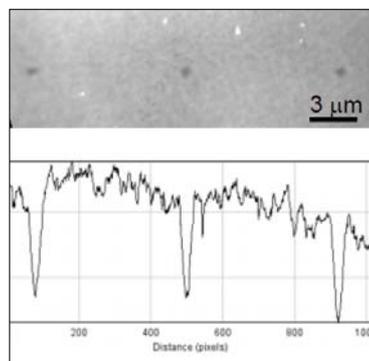


図4-1-2 位相欠陥観察例
(観察画像とその欠陥部の光強度分布)

4-2. 反射多層膜にダメージを与えた構造欠陥の観察結果

反射多層膜に 1, 5, 10, 20, 50 $\times 10^{15}$ ions cm^{-2} の FIB 照射した箇所の EUV 顕微鏡による観察像を図 4-2-1 に示す。FIB 照射により反射多層膜の周期長が変動したり、構造そのものが変化したりした場合、観察像の EUV 光反射強度は低下する。観察画像の画像解析により、FIB 照射箇所と未照射箇所の EUV 光反射強度を比較したところ、図 4-2-2 で示すとおり FIB 照射量に応じて反射強度の低下を観察することに成功した。反射多層膜にこのような構造欠陥が存在した EUV マスクの吸収体パターンをウェハ上に転写した場合、吸収体の存在しない箇所でもウェハ上に照射される EUV 光が弱まり、パターン欠陥となりうる。したがって、反射多層膜の構造欠陥を発生させる原因を特定することは、無欠陥 EUV マスクの製造技術開発には重要であり、EUV 顕微鏡を使用した観察評価は有効であることが確認できた。

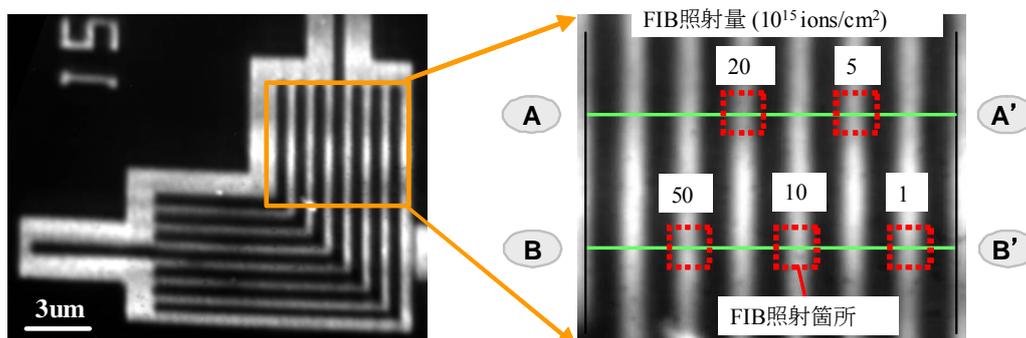


図 4-2-1 EUV マスクに FIB を照射することで反射多層膜の構造欠陥を作製した箇所の EUV 顕微鏡観察画像

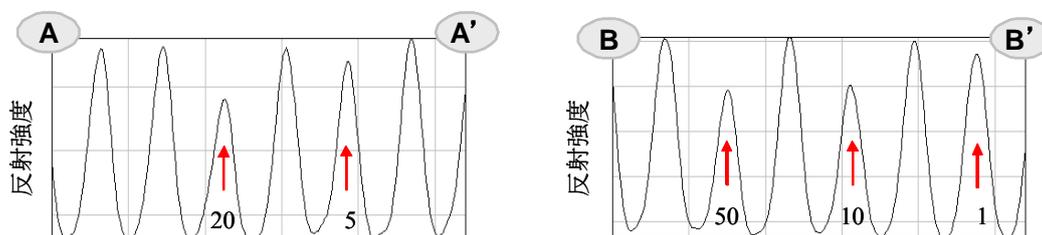


図 4-2-2 反射多層膜の EUV 反射強度解析結果

5. まとめ

EUV 光を反射させる多層膜を有する EUV マスクに固有であり、かつ EUV 光のみで観察可能な、2 種類の反射多層膜構造欠陥を、EUV 顕微鏡を用いて観察した。まず、プログラム位相欠陥を形成した多層膜マスクブランクの観察実験を行ない、位相欠陥部分を観察像の光強度低下部分として明瞭に識別することに成功した。また、吸収体パターンが形成されマスクが構成された段階で、局所的な多層膜ダメージの様相を反射率の変化として捉えることにも成功した。EUV 顕微鏡の観察像は、投影露光装置を介してウェハ上に転写される EUV マスクパターン投影像光強度分布とほぼ同等なので、EUV マスク固有の様々な欠陥を直接的に検知できる有力な手段であることを確認した。

本研究の一部は、NEDO の支援のもとにおこなわれた。

参考文献

- [1] H. Kinoshita, T. Haga, K. Hamamoto, S. Takada, N. Kazui, S. Kakunai, H. Tsubakino, T. Shoki, M. Endo, and T. Watanabe: *J. Vac. Sci. Technol.* **B 22**(2004) 264.
- [2] K. Hamamoto, Y. Tanaka, H. Kawashima, S. Y. Lee, N. Hosokawa, N. Sakaya, M. Hosoya, T. Shoki, T. Watanabe, and H. Kinoshita, *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**(2005) 5474.
- [3] Yoshito Kamaji, Kei Takase, Takahiro Yoshizumi, Takashi Sugiyama, Toshiyuki Uno, Takeo Watanabe, and Hiroo Kinoshita, *Jpn. J. Appl. Phys.* **48** (2009) 06FA07.
- [4] T. Tomie, T. Terasawa, Y. Tezuka, and M. Ito, *Proc. SPIE* 5038, 41 (2003).
- [5] E. M. Gullikson, E. Tejnil, T. Liang, and A. Stivers, *Proc. SPIE* 5374, 791 (2004).
- [6] Y. Tezuka, M. Itoh, T. Terasawa, and T. Tomie, *Proc. SPIE* 5567, 791 (2004).
- [7] T. Tomie, "Method and apparatus for inspecting multilayer masks for defects," United States Patent 6,954,266 (2005).
- [8] K. A. Goldberg, A. Barty, Y. Liu, P. Kearny, Y. Tezuka, T. Terasawa, J. S. Taylor, H. S. Han, and, O. R. Wood, *J. Vac. Sci. Technol. B* 24(6), 2824 (2006).
- [9] T. Yamane, T. Iwasaki, T. Tanaka, T. Terasawa, O. Suga, and T. Tomie, *Proc. SPIE* 7271-127 (2009).
- [10] K. Takase, Y. Kamaji, T. Iguchi, T. Sugiyama, T. Uno, T. Harada, T. Watanabe and H. Kinoshita, *Proc. SPIE* 7379-73792J (2009).