

走査プローブ顕微鏡を用いたレジストパターン評価

永瀬 雅夫

Metrology of Resist Pattern Using Scanning Probe Microscopy

Masao NAGASE

A metrological method using scanning probe microscopy (SPM) for sub-100-nm resist pattern is discussed. The modeling equation, which includes the critical dimensions of both the sample and the probe, is derived from a mathematical relationship between the sample, probe, and image. The dimensions, which are the fitting parameters of the modeling equation, can be calculated from the height dependence of apparent width in SPM images. A quantitative evaluation method of the resist pattern roughness is also discussed. The morphology of the resist pattern sidewall and the development process of the resist film are directly observed by SPM.

Key words: scanning probe microscopy, metrology, resist pattern, atomic force microscopy, critical dimension measurement

LSIのパターンの微細化が進むにつれて、作製したパターンの評価技術 (metrology) の重要性が増してきている。国際半導体技術ロードマップ (ITRS) 2003 版¹⁾によれば、90 nm ノードを迎えると、ゲート長制御 (critical dimension control) が困難な状況になることが予測されている。これを解決するには、パターン評価、特にレジストレベルでのパターン評価を正確に行う必要があるが、従来の評価手法では評価法自体の精度が十分ではなくなることも懸念されている。従来、レジストパターンの高精度評価の主力は走査電子顕微鏡 (SEM) であるが、パターンの微細化とともに像コントラストが低下する傾向があり、ナノオーダーのレジストパターンの要求評価精度を満たすことがしだいに困難になりつつある。さらに、リソグラフィー技術の進展に従って、それを支える新しいレジスト材料系の開発も課題となっている。

走査プローブ顕微鏡 (SPM) は、微細な先端部をもつプローブを用いて試料表面を走査することにより像を得る顕微鏡である。プローブを通して得ることのできる物性量に応じて名称が異なり、多くの種類がある。その中でも、

原子間力顕微鏡 (AFM)²⁾ は、プローブを試料表面に接触させて試料-プローブ間の力を一定に制御することにより、その凹凸を像にすることができ、各種の走査プローブ顕微鏡の中でも最も一般的な顕微法である。AFMの特徴は、そのもととなった走査トンネル顕微鏡 (STM)³⁾とは異なり、試料の導電性によることなく、ほとんどの試料を観察することが可能な点である。また、大気中で安定に動作する点も、一般に普及した大きな理由である。大気中でも 1 nm 程度の分解能が比較的容易に得られ、ノイズレベルも非常に低いため、ナノオーダーの高精度な計測が可能である。原理的に走査速度が遅いため、量産用の高スループットの検査用途には不向きであるが、故障解析やオフラインでのプロセス管理には適用されている。

筆者の属する NTT 研究所では、長年にわたり電子線露光技術の開発を行っており、いち早くナノオーダーのパターン創製を行い、これを利用した各種のナノデバイスの技術開発を行ってきた。1995 年ころから、10 nm 級のリソグラフィー技術^{4,5)}を用いて、単電子デバイス⁶⁻⁹⁾といった最先端電子デバイスの研究を進めている。このような微細

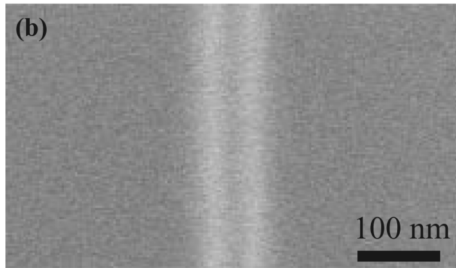
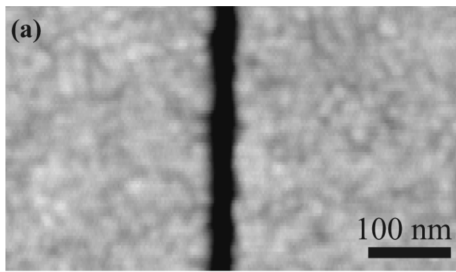


図1 ZEPレジストパターン。(a) AFM像, (b) SEM像。

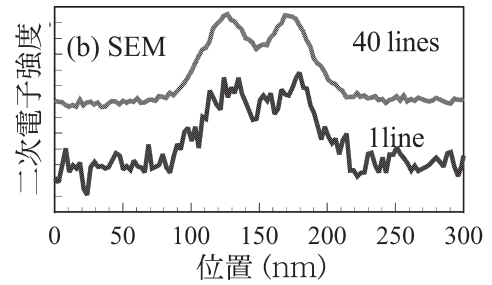
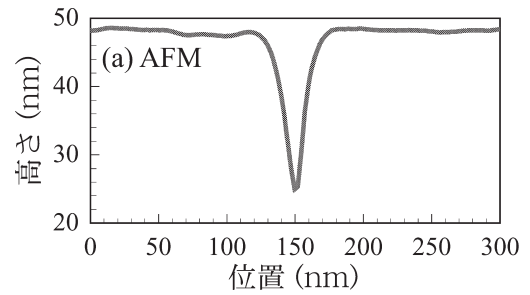


図2 パターン断面プロファイル。(a) AFM, (b) SEM。

なパターン創製を行うにはその評価技術が重要であるが、ITRSのロードマップでも予測されている通り、この領域のパターン評価技術はないため、リソグラフィー技術とともに確立する必要があった。これまでに、走査プローブ顕微鏡を含む各種の顕微鏡法を用いたナノ構造評価技術を開発してきたが、本稿では、SPMを用いたナノ構造評価技術を紹介する。おもに、AFMを用いた、sub-100 nm領域のレジストパターンの評価に関連する技術を紹介する。

1. レジストパターンの走査プローブ顕微鏡像

図1 (a)は、電子線露光技術により作製した幅30 nmのレジストパターンのAFM像である。レジストとしては、電子線露光用の高解像度ポジレジストとして広く用いられているZEPを使用している。図からわかるように、パターンエッジのモホロジーまで明瞭に観察されている。さらに、レジスト表面のモホロジーまで知ることができる。このレジストパターンを低加速SEMで観察した結果が図1 (b)である。レジスト膜厚が50 nmと薄いため、コントラストが低く、AFM像にみられるようなパターンエッジのモホロジーはまったく観察されない。平均的な線幅の計測は可能であるが、詳細なパターン形状の情報は得られない。このような像質の大幅な差は、AFMとSEMのノイズレベルの違いによる。図2 (a), (b)は、図1のレジスト像中央部の1ラインプロファイルである。AFMのノイズレベルは0.1 nm (rms値)以下なので、高さプロファイル上はノイズ影響はみられない。これに対して、SEMの二次電子プロファイルには大きなノイズがみられ、エッジ

ピークの判別も困難な状態である。プロファイルを平均化してノイズを除去すれば明瞭なエッジピークが得られるが、これは、詳細なモホロジーは観察できないことを意味する。また、二次電子像は原理的に実際の構造とは完全に対応する保証はないうえに、材料や膜構成により加速電圧などの観察条件を最適化する必要がある、絶対的な構造幅を求めることは困難である。これに対して、AFMでは、材料や膜構成によらず低ノイズレベルの明瞭な像を得ることができる。プローブの形状に由来する像歪みの問題があるが、次章で述べるように、一定の手順を踏むことによりその影響を除去することが可能であり、絶対的な構造パラメーターを計測することが可能である。

2. 走査プローブ顕微鏡による構造長評価

走査プローブ顕微鏡用のプローブで最も一般的なのは、シリコン製のプローブで、先端の曲率半径は数~10数nmである¹⁰。このプローブで、平坦な試料に対しては原子オーダーの分解能を得ることができるが、凹凸のある試料を観察すると、プローブ先端の形状を反映して分解能が劣化したように見える像が得られる。特に、リソグラフィー工程のレジストパターンのように一定以上の高さのある構造を観察した場合、著しく分解能が悪い印象を受ける像が得られる。これは、構造の周辺部の構造高さと同程度の領域に、プローブ形状に由来する水平方向の像歪みが入るためである。図2 (a)で、パターン部のプロファイルがV字形になり、底部までプローブが達することができないのも、このプローブサイズの影響である。通常の装置構成と試料

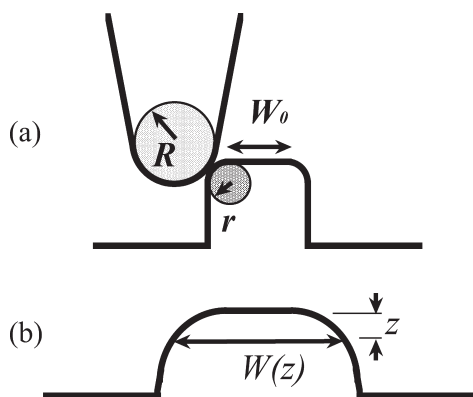


図3 (a) パターンとプローブのモデル構造, (b) AFM プロファイル.

配置ではこれは不可避な問題であり, 一般的なレジストパターンの AFM 像では, 実質的な情報を含む部分は構造上部のみである. そこで, 構造長評価 (critical dimension measurement; CD measurement) に AFM 像を用いる場合, 構造情報を含む部分からいかに正確で有用な情報を得るかが課題となる¹⁰⁻¹²⁾.

図3 (a) は, 一般的なパターンとプローブの形状をモデル化した図である. パターンエッジの丸みおよびプローブ先端部の丸みはそれぞれ, 円筒形, 球形でモデル化してある. プローブと試料は1点で接触しており, 平坦な試料でプローブの最先端部が接触している限りは像歪みはない. 図のような構造の場合, パターンエッジ部で局所的な傾斜に対応してプローブの最先端部以外で接触することになり, 像が歪むことになる. 幸い, この像歪みは数学的に表記することが可能であり, 図のように構造をモデル化した場合には, 解析的な表現式を求めることもでき, 図3 (b) のように AFM 像を推定することも可能である. 逆に, 得られた AFM 像から, 図3 (a) 中にあるパターン幅 (W_0), パターンエッジ丸み (r), プローブ曲率半径 (R) といった構造パラメータを知ることも可能である. 図3 (a) のようなモデル構造の場合, 図3 (b) の AFM 像プロファイルの構造幅 ($W(z)$) は, パターン上面からの距離 z の関数として, 以下のように表記することができる^{11,12)}.

$$W(z) = W_0 + 2\sqrt{(R+r)^2 - (R+r-z)^2} \quad (1)$$

実際のレジストパターンの AFM 像から構造幅の高さ依存性を計測したデータに式 (1) をフィッティングさせることにより, パターン幅 (W_0) とパターンエッジの丸みとプローブ曲率半径の和 ($R+r$) をフィッティングパラメータとして求めることが可能である. 式 (1) は残しパターンの場合の式であるが, 抜きパターンの場合 (例えば図1

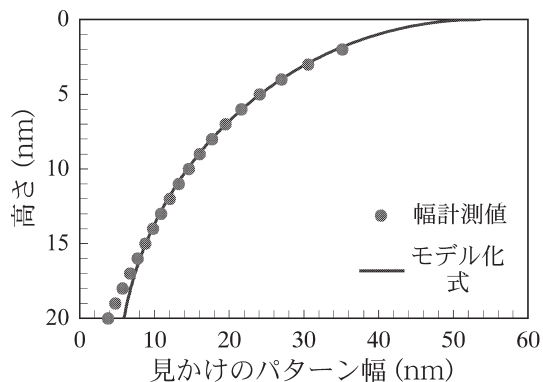


図4 見かけのパターン幅の高さ依存性.

の例) は, 以下のような式になる.

$$W(z) = W_0 - 2\sqrt{(R+r)^2 - (R+r-z)^2} \quad (2)$$

これらの式は, 構造をモデル化して導出しているので, モデル化式と呼ぶ.

見かけの幅の高さ依存性を, 図1 (a) のレジストパターンから計測した結果を図4に示す. この計測値 (●) に対して, 式 (2) のモデル化式をパラメーターフィッティングした結果が実線で示されている. モデル化式と計測値がよく一致しており, モデル構造がレジストの構造をよく表していることがわかる. また, ここからフィッティングパラメーターとして導出された W_0 は 57 nm, $R+r$ は 26 nm である. プローブ曲率半径 R は別途 11 nm であることがわかっているので, パターンエッジ丸みは 15 nm であることがわかる. この例 (抜きパターン) の場合, パターンエッジ部の丸みまで考慮に入れたパターン実効幅 W_{eff} は, 以下のような式になる.

$$W_{eff} = W_0 - 2r \quad (3)$$

したがって, 図1のパターンの実効幅は 27 nm と求めることができる.

上記の構造長評価手法を, レジストパターンの設計幅を 10 nm から 200 nm まで変化させた試料に対して適用した例を図5 (a) に示す. この例では, パターン幅 (W_0) と設計幅はよい直線関係にある. 注目すべきはエッジの丸みであり, ほぼ一定値 (15 nm) でばらつきは小さい. そこで, このレジストパターンのモデル構造は図5 (b) のように表現することができる.

このエッジの丸みという構造長 (critical dimension) は, 他の顕微鏡法では得ることができない. 高さ情報を画像化している AFM に特徴的な量である. 上記の例では, エッジの丸みは設計長に対して一定の値をとったが, この値は

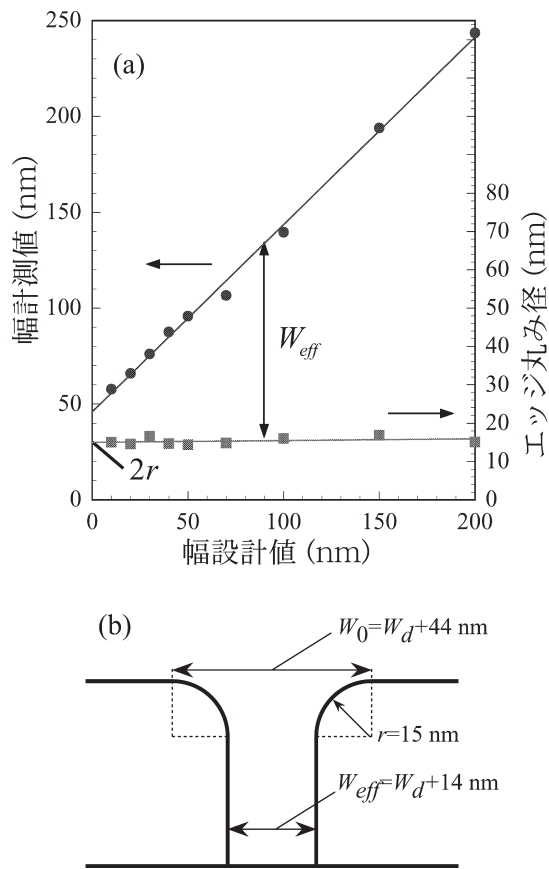


図5 レジストパターンの構造長計測結果。(a) 計測幅とエッジ丸みの設計幅依存性、(b) ZEPパターン断面モデル化構造。

現象条件、例えば現像液を変えると変化する¹¹⁾。また、フォーカス、露光量を変化させることによっても変化するため、プロセスモニター用のパラメーターとしても利用することができる。エッジの丸みが小さいほうがパターンの解像度が高いと考えることができるため、パターン解像度の指標として用いることもできる。

3. 走査プローブ顕微鏡による各種のレジストパターン評価

3.1 レジストパターン幅ゆらぎの定量評価

パターンの微細化が進むと、従来のように平均的な線幅を構造長として管理しているだけでは不十分で、パターン幅のゆらぎも計測して管理していく必要がある。図1 (a)のレジストパターンのAFM像からわかるように、AFMは高さコントラストは高くノイズレベルは低いいため、明瞭なパターンエッジのモロロジーが観察できる。また、これを数値化するのも容易であり、図6に示すように、パターン幅ゆらぎを抽出することができる。この幅ゆらぎのデータから、ラフネスの特徴を定量化することが可能であ

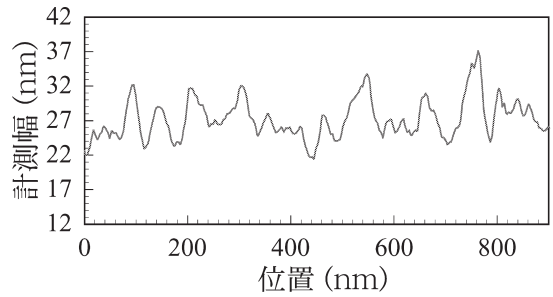


図6 レジストパターン幅の位置依存性。

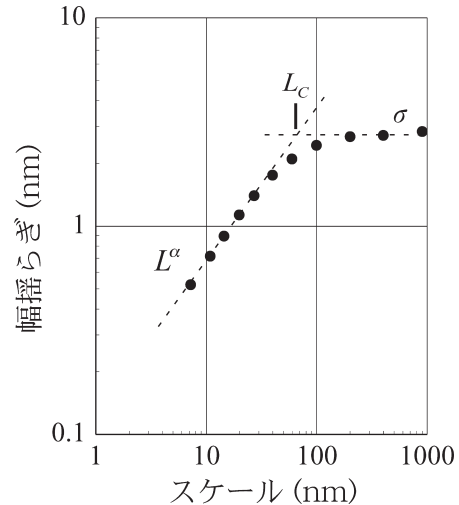


図7 レジストパターン幅ゆらぎのスケール依存性。

る¹²⁻¹⁴⁾。図7は、図6の幅ゆらぎのデータをフラクタル理論に基づくスケール解析した結果である。幅ゆらぎ(ラフネス)の解析長さ(スケール)依存性をグラフにしてあり、スケールが小さい領域でスケールのべき乗(α 乗)の依存性を示し、ある長さ(L_c)を境に、スケールの大きい領域では一定の値(σ)を示す。この解析手法は通常、ラフネスの時間発展の定量化に適用され、上記のような3つの定量パラメーターが得られる。ここで、 σ は通常二乗平均ラフネスと同じ量であり、 L_c は相関長と呼ばれる量、 α はフラクタル次元に関連した量である。このレジスト(ZEP)パターンの場合、このスケール依存性の特徴が、軽露光量(感度の30%程度)のレジスト表面の特徴と一致した。このことは、レジストパターン側壁には、軽露光のレジスト表面が露出していることを示唆している。図8に、側壁のスケール依存性と対応する軽露光レジスト表面のAFM像を示す。20~30 nm径の粒状構造がみられるが、これがレジストパターンの幅ゆらぎの支配的要因であることが、スケール依存性の特徴から特定できる。

以上のように、AFMによりレジストパターンを観察して、その幅ゆらぎを定量的に解析することができる。

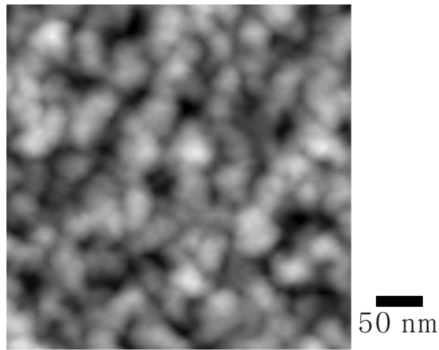


図8 軽露光レジスト表面のAFM像.

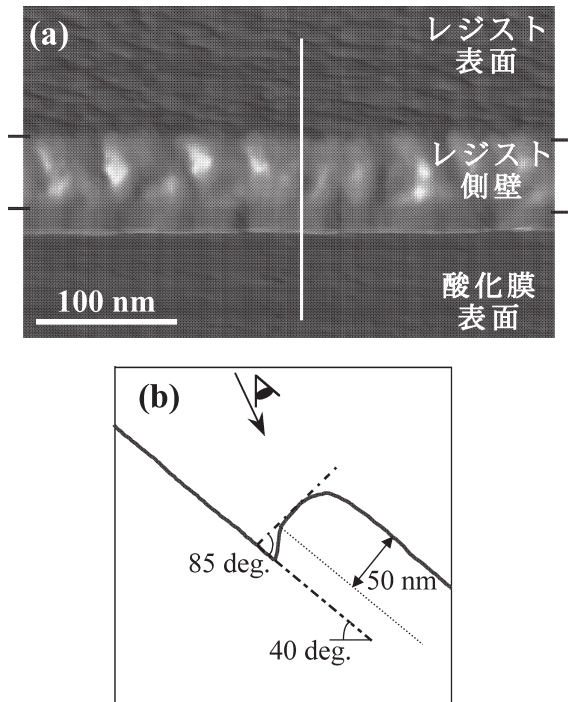


図9 レジストパターン側壁のAFM像. (a) 側壁モロロジー, (b) 断面プロファイル.

SEM像に比べてノイズレベルが低いため、スケール解析のようなレジスト材料の詳細構造にまで関連づけられる検討が可能である。

3.2 レジストパターン側壁観察

前述のようなレジストパターンエッジの微細なゆらぎが問題になりはじめており、一般的にはLER (line edge roughness) として議論されている。パターンエッジのラフネスは通常はパターンを直上から観察して評価することになるが、AFMでは、パターンの側壁を直接観察して有用な情報を得ることが可能である。図9は、酸化膜上に形成した50 nm厚のZEPレジストパターンの側壁の観察例である。試料を40°傾斜させることにより、側壁を観察している¹³⁾。この例では、酸化膜を希フッ酸で15 nm程度

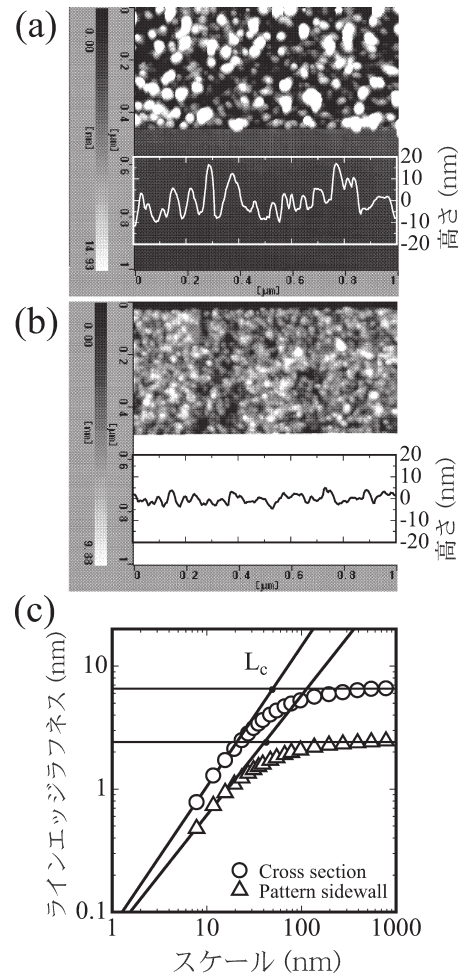


図10 ZEPレジスト表面モロロジー. (a) 薄膜破断面, (b) パターン側壁, (c) スケール解析結果.

除去することにより、パターン下端まで観察している。パターン側壁のレジスト表面モロロジー、およびパターンエッジ部の立体的な構造がわかる。この例では、側壁のラフネスが上部と下部で変化がないこと、側壁の角度が85°とほぼ垂直であることなどがわかる。

レジスト膜厚がより厚い場合には、試料の破断面(抜きパターンの中央で破断する)を観察することにより、パターン側壁を直接観察することが可能である¹⁵⁾。図10は、レジスト薄膜の(a)破断面と、(b)レジストパターンの側壁表面をAFMで観察した結果である。図中のプロファイルは、表面プロファイルを表している。レジストはZEPである。(a)と(b)では、凹凸の絶対値は異なるものの、よく似た特徴をもつ表面が観察されている。これを、それぞれスケール解析をすると、図10(c)のようになる。相関長が一致しており、ラフネスの主要因が(a)と(b)とで同じことを示唆している。このZEPレジストの場合は、図10(a)で明瞭に観察される薄膜内部の粒状構造がラフネス

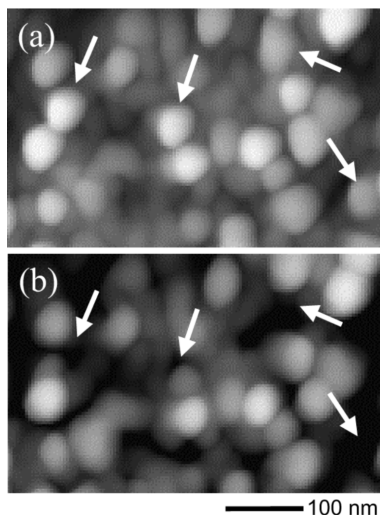


図11 軽露光 ZEP レジスト表面。(a) 追加現像前、(b) 追加現像後。

の主要因である。

3.3 レジスト現像プロセスの解明

レジストパターンのラフネスを決める要因は、マスクパターンゆらぎ、露光量ゆらぎ等々多くの要因が考えられるが、前述の ZEP に関しては、材料の内部構造がパターンゆらぎの主要因である。今後、パターンが微細化するに従い、このようなレジスト内部構造のラフネスへの寄与が大きくなる。AFM 像の一種である位相像を用いれば、膜内部の弾性率の違いを像にすることができるため、ポリマー内部の微細構造を直接観察することも可能である。また、次に示すように現像表面を観察することにより、現像プロセスを推定することも可能である^{15,16)}。

図 11 (a) は、レジストパターンの側壁表面と同程度の軽露光を行った ZEP レジスト薄膜を現像後、AFM で観察した結果である。表面に数十 nm の粒状構造が観察される。この試料に対して、追加の現像を行った後、まったく同じ場所を観察したのが図 11 (b) である。図 11 (a) 内で矢印で示された粒状構造が、図 11 (b) では消失していることがわかる。これは、このレジスト系では、粒状の構造体が膜から脱離する過程が現像時に起こっていることを示している。図 12 (a) に、この様子のイメージ図を示す。このような現像過程をとるため、脱離前の粒状構造がパターン側壁部に露出して、ラフネスの原因になっている (図 12 (b))。このように、AFM 観察により、現像過程の具体的なイメージを構築することができる。

走査プローブ顕微鏡 (SPM) を用いたレジストパターン、およびレジスト材料に関する評価法について述べた。

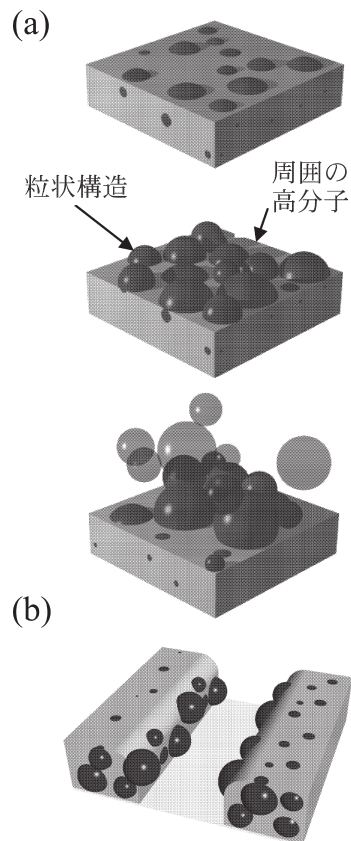


図12 (a) 現像プロセスイメージ、(b) レジストパターン構造モデル。

ここでは、おもに原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた形状観察結果を中心にして、従来の SEM 像からは得ることのできない各種の構造パラメーターが得られることを述べた。例えば、パターンエッジの丸みはパターンの質の指標となりうるし、スケーリング解析から得られる各種のパラメーターは、ラフネスの性質を表現している。AFM 像から得られるこれらの構造パラメーターは再現性、精度が高いことが特徴であり、今後、微細化がさらに進むリソグラフィ技術開発の評価手法としてふさわしい。SPM 技術には、走査速度が SEM に比べて遅い、プローブ形状が像に影響するなどの課題があるが、今後の技術開発により、これらの点はしだいに解決していくものと思われる。

文 献

- 1) *International Technology Roadmap for Semiconductors* (Semiconductor Industry Association, Santa Clara, CA, 2003).
- 2) G. Binnig, C. F. Quate and Ch. Gerber: "Atomic force microscope," *Phys. Rev. Lett.*, **56** (1986) 930-933.
- 3) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel: "Surface studies by scanning tunneling microscopy," *Phys. Rev. Lett.*, **49** (1982) 57-61.
- 4) K. Kurihara, K. Iwadate, H. Namatsu, M. Nagase, H.

- Takenaka and K. Murase: "An electron beam nanolithography system and its application to Si nanofabrication," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 6940-6946.
- 5) H. Namatsu, Y. Takahashi, K. Yamazaki, T. Yamaguchi, M. Nagase and K. Kurihara: "Three-dimensional siloxane resist for the formation of nanopatterns with minimum linewidth fluctuations," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16** (1998) 69-76.
 - 6) Y. Takahashi, M. Nagase, H. Namatsu, K. Kurihara, K. Iwadate, K. Nakajima, S. Horiguchi, K. Murase and M. Tabe: "Fabrication technique for Si single-electron transistor operating at room-temperature," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 136-137.
 - 7) K. Kurihara, H. Namatsu, M. Nagase and T. Makino: "Room temperature operated single electron transistor fabricated by electron beam nanolithography," *Microelectron. Eng.*, **35** (1997) 261-264.
 - 8) A. Fujiwara and Y. Takahashi: "Manipulation of elementary charge in a silicon charge-coupled device," *Nature*, **410** (2001) 560-562.
 - 9) H. Namatsu, Y. Watanabe, K. Yamazaki, T. Yamaguchi, M. Nagase, Y. Ono, A. Fujiwara and S. Horiguchi: "Fabrication of Si single-electron transistors with precise dimensions by electron-beam nanolithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **21** (2003) 1-5.
 - 10) M. Nagase, H. Namatsu, K. Kurihara, K. Iwadate and K. Murase: "Metrology of atomic-force microscopy for Si nanostructures," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 3382-3387.
 - 11) M. Nagase, H. Namatsu, K. Kurihara and T. Makino: "Critical dimension measurement in nanometer scale by using scanning probe microscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 4166-4174.
 - 12) M. Nagase: "Metrology for nanostructures using atomic force microscopy," *Trans. IEICE*, **J83-C** (2000) 804-811.
 - 13) M. Nagase, H. Namatsu, K. Kurihara, K. Iwadate, K. Murase and T. Makino: "Nano-scale fluctuations in electron beam resist pattern evaluated by atomic force microscopy," *Microelectron. Eng.*, **30** (1996) 419-422.
 - 14) M. Nagase, K. Kurihara, H. Namatsu and T. Makino: "Nanometrology using scanning probe microscopy and its application to resist patterns," *AIP Conf. Proc.*, **449** (1998) 562-566.
 - 15) T. Yamaguchi, K. Yamazaki, M. Nagase and H. Namatsu: "Line-edge roughness: Characterization and material origin," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 3755-3762.
 - 16) T. Yamaguchi, H. Namatsu, M. Nagase, K. Yamazaki and K. Kurihara: "Nanometer-scale linewidth fluctuations caused by polymer aggregates in resist films," *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 2388-2390.

(2004年10月12日受理)