

Prolith を用いたリソグラフィプロセスの最適化

はじめに

リソグラフィプロセスの最適化は、これまで、プロセスエンジニアの勘や経験にたよったプロセス技術が主流であった。しかし、パターンングの寸法が、光学系の解像限界に近づくにつれ、プロセスの最適化には、より多くの時間とコストがかかるようになった。最適化すべきプロセスパラメータの数が飛躍的に増えたからである。そこで、従来の勘や経験に頼るのではなく、リソグラフィシミュレータを用いる技法が登場した。リソグラフィシミュレータは瞬時に、より多くのプロセスパラメータの最適化が可能である。本節ではリソグラフィシミュレータを用いたリソグラフィプロセスの最適化について述べる。

3.1 シングルシミュレーション

リソグラフィシミュレーション技術は、露光・露光後ベーク (Post Exposure Bake : PEB) 現像の工程を実際のプロセスを行うがごとく、PC 上で再現する技術である。古くは 1970 年代初頭に、F.H.Dill らによって提唱された[1-2]。その後、PC の進化に伴い、高精度化され、現在は、市販のシミュレータとして数社から販売されている。リソグラフィシミュレーションの計算の流れを図 1 に示す。

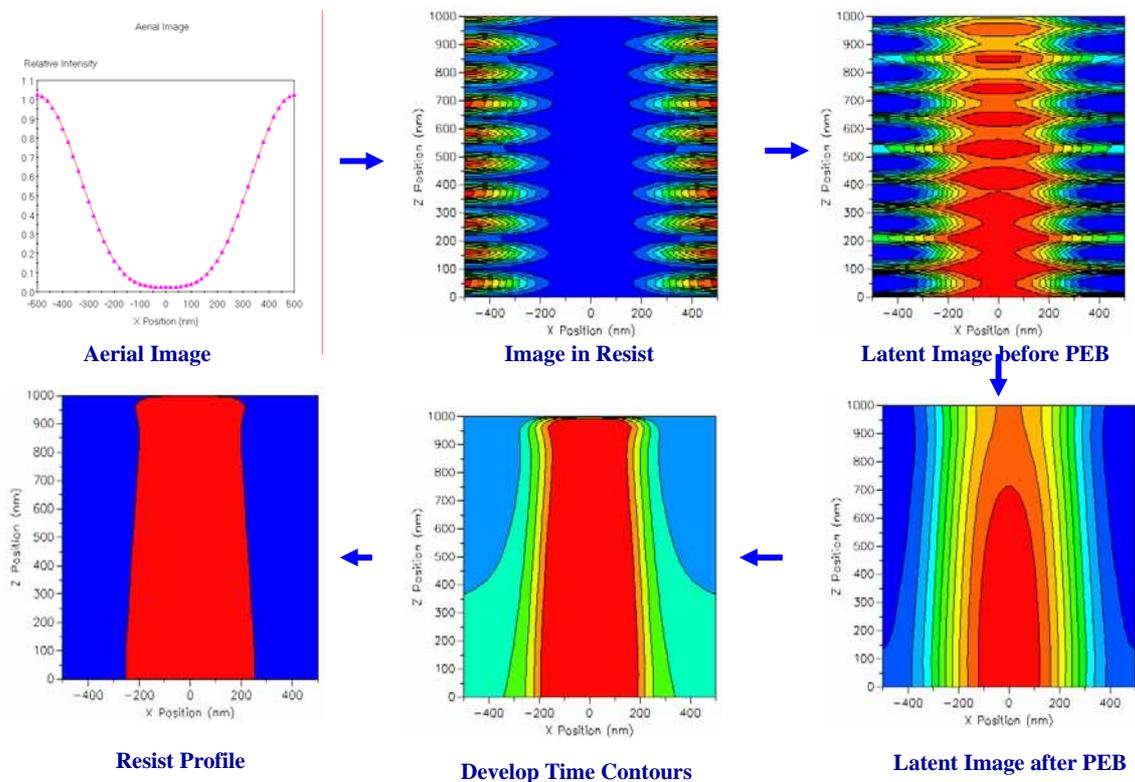


図 1 リソグラフィシミュレーションの計算の流れ

まず、投影光学系におけるレンズの NA や、照明系のコヒーレントファクタ ()、波長、パターンの寸法の条件などを入力し、投影レンズを通過した後の、パターンの空間像を計算する。ついで、レジスト膜中での露光エネルギーの分布を計算する。その際、基板からの反射などの定在波効果も計算に取り入れる。ついで、化学増幅レジストの場合、露光エネルギーに対応した酸の濃度を計算する。PEB を行い、保護基の脱離の計算を行う。最後に、現像におけるレジストの溶解を計算する。ある現像時間で現像されるレジストパターンの輪郭を抽出すると、その現像時間におけるレジストプロファイルが得られることになる[3-4]。

光強度の計算では、投影光学系におけるレンズの NA や、照明系のコヒーレントファクタ ()、波長、パターンの寸法の条件などを入力する。図 2 に光強度空間像の計算例を示す。

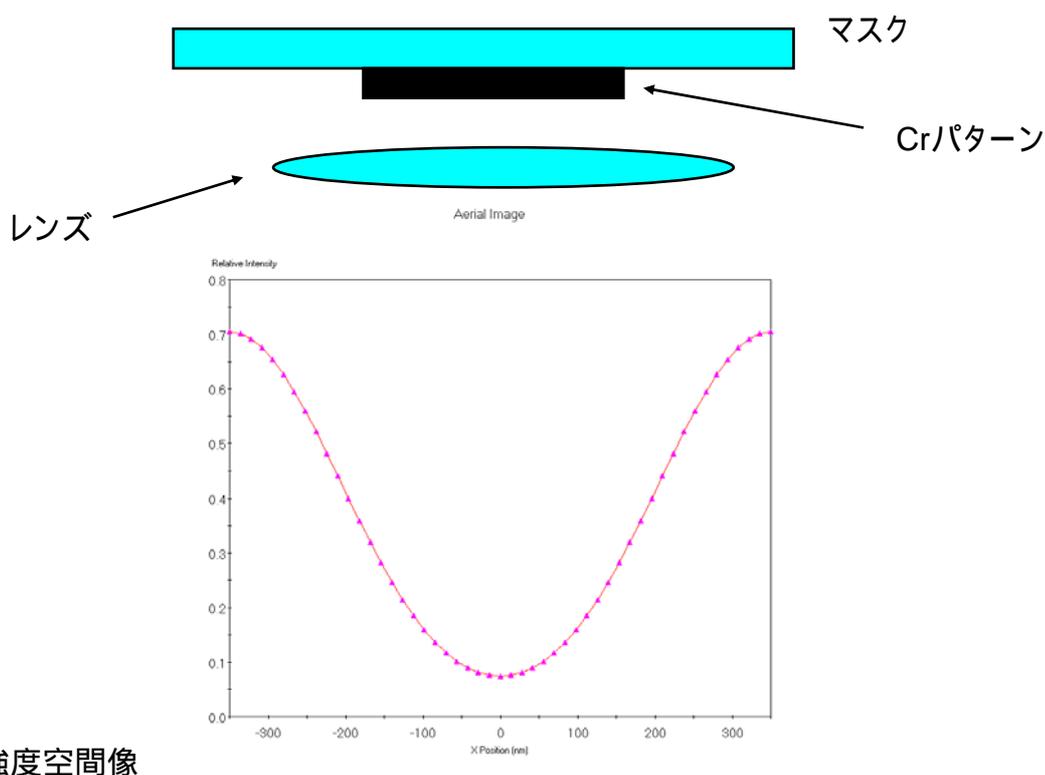


図 2 光強度空間像の計算例

リソグラフィシミュレーションでは 2 次元のマスクパターンに対して、3 次元のパターン形状を計算することも可能である。たとえば、図 3 に示すようなライン・スペースパターンと孤立ラインが混在するマスクパターンにおいて、ライン・スペース部分と孤立ライン部分でのリソグラフィ特性の違いを計算し、比較することが出来る。図 3 (b)はレジ

ストトップビューとマスクデザインの比較例である。レジストパターンのショートニング効果（パターンが長手方向に縮む効果）の検討などが出来る。図 3(c)はレジストパターンの 3 次元計算例である。

3次元 レジスト・シミュレーション

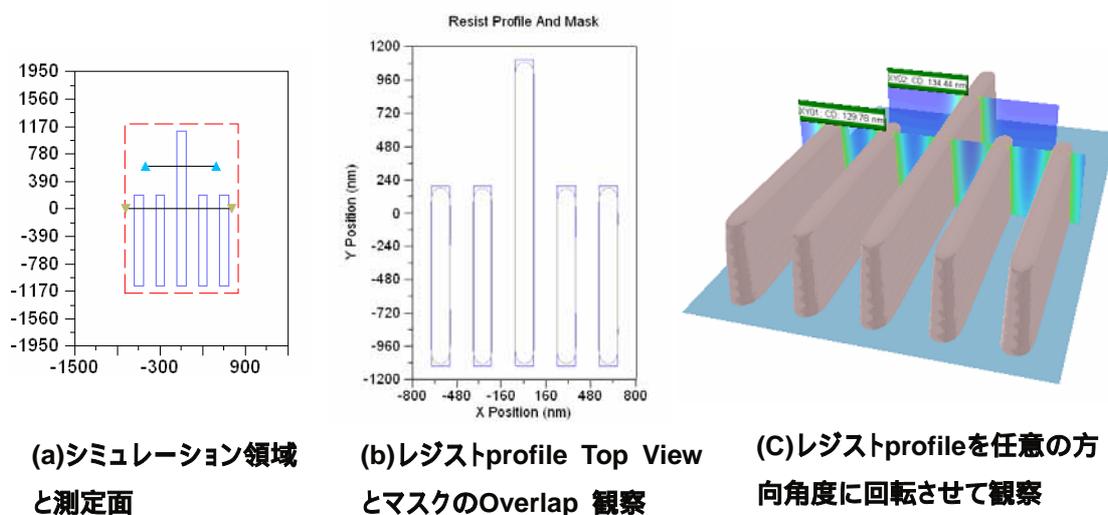
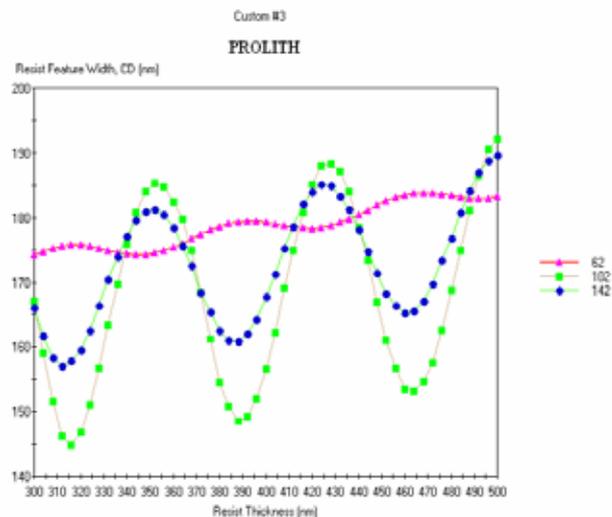


図 3 2次元マスクと3次元レジストパターンの計算例

3.2 CD Swing Curve

レジストのパターン形状はレジスト膜厚によって、大きく変化する。これは、単色光で露光することによる定在波効果の影響をうけるためである。従って、レジスト膜厚の設定と管理はフォトリソグラフィにおける最重要管理項目である。CD Swing Curve は、レジストの膜厚変化に対する、パターンの仕上がり寸法を計算することで得られる。

図 4 に CD Swing Curve の計算例を示す。露光波長は 248nm(KrF エキシマレーザ)、パターン寸法は 180nm ライン・スペースパターン。照明光学系の条件は $NA=0.60$ 、 $\sigma=0.85$ ・ 0.50 の輪帯照明 (Annular) を仮定した。Input パラメータはレジスト膜厚、計算条件は BARC 膜厚を 62,102,142nm とした。



180nm L/S
KrF
0.85/0.5 Annular

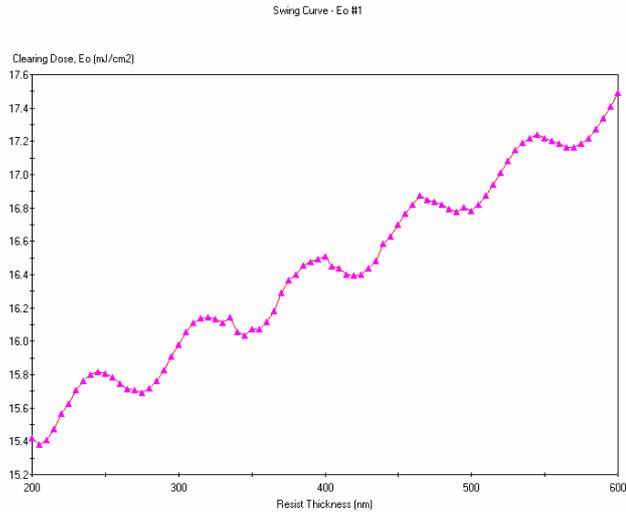
Input: Resist Thickness
(BARC Thickness)
Output: Resist CD

図4 異なる BARC 膜厚におけるレジスト膜厚とパターンの仕上がり寸法の関係

レジスト膜厚が変化すると、パターンの寸法値はサインカーブ状に変化することがわかる。また、BARC 膜厚を 62nm とすることで、スイングレシオを最小にすることが出来る。このようにシミュレータを用いることで、BARC 膜厚の最適化が可能である。

また、レジスト評価において、 E_0 (E_{th}) Swing Curve という考え方もある。ある現像時間において露光したレジスト膜が抜ける最小の露光時間を E_0 または E_{th} と呼ぶ。レジスト膜厚の変化が E_0 に影響を与える。この影響はレジストにより異なっている。したがって、どのようなレジストがレジスト膜厚の変化に対して、どの程度、感度が敏感なのかといった評価も可能である。図5に E_0 とレジスト膜厚の関係(例)を示す。

この例では、KrF 露光において、Swing Ratio=1.82% という値が得られている。



KrF
0.8/0.5 Annular

Input: レジスト膜厚
Output: 最小露光量

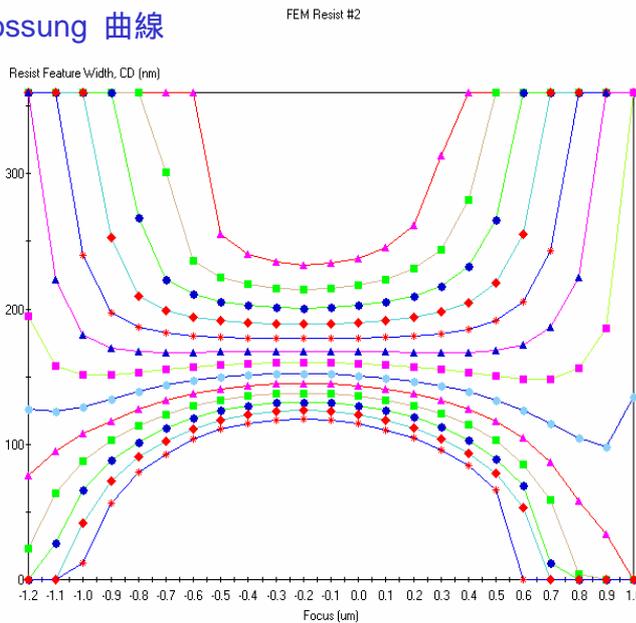
Swing Ratio: 1.82%

図5 E₀とレジスト膜厚の関係

3.3 Focus-Exposure Matrix

リソグラフィ特性の評価の基本項目として、Focus-Exposure Matrix という考え方がある。これは横軸にデフォーカス量、縦軸にパターンの仕上がり寸法をとり、露光量を変えて計算するものである。計算例を図6に示す。露光波長は248nm、NA=0.6、 $\sigma=0.8/0.5$ の輪帯照明を仮定した。パターンの寸法は180nmライン・スペースパターンである。

Bossing 曲線



180nm L/S
KrF 0.8/0.5 Annular

Input: Focus
Exposure
Output: Resist CD

図6 Bossing 曲線の計算例

デフォーカス値がマイナスからベストフォーカスへ経て、プラス側へ移動すると、露光エネルギーが低い場合、パターン寸法は細って行き、ベストフォーカスを境として再び太くなる。露光量が高い場合は、この逆の傾向を示す。そして、デフォーカス値を変化させてもあまり寸法が変化しない露光量が存在する。この露光量をピボタルポイントと呼ぶ。ピボタルポイントが最もベストな露光条件である。図6の例では50mJ/cm²の露光量がピボタルポイントである。図7に横軸にデフォーカス値、縦軸に露光量をとったマトリクスにおけるレジストパターンの形状を示す。四角い枠線で囲まれたエリアはパターン形状がスペックに入った領域を示す。ここでのスペックとは、パターンの寸法が設計寸法の±10%以内、パターンプロファイル角度が80度以上、未露光領域のレジストの膜ベリが10%以下を満たした条件である。

Focus-Exposure Matrix

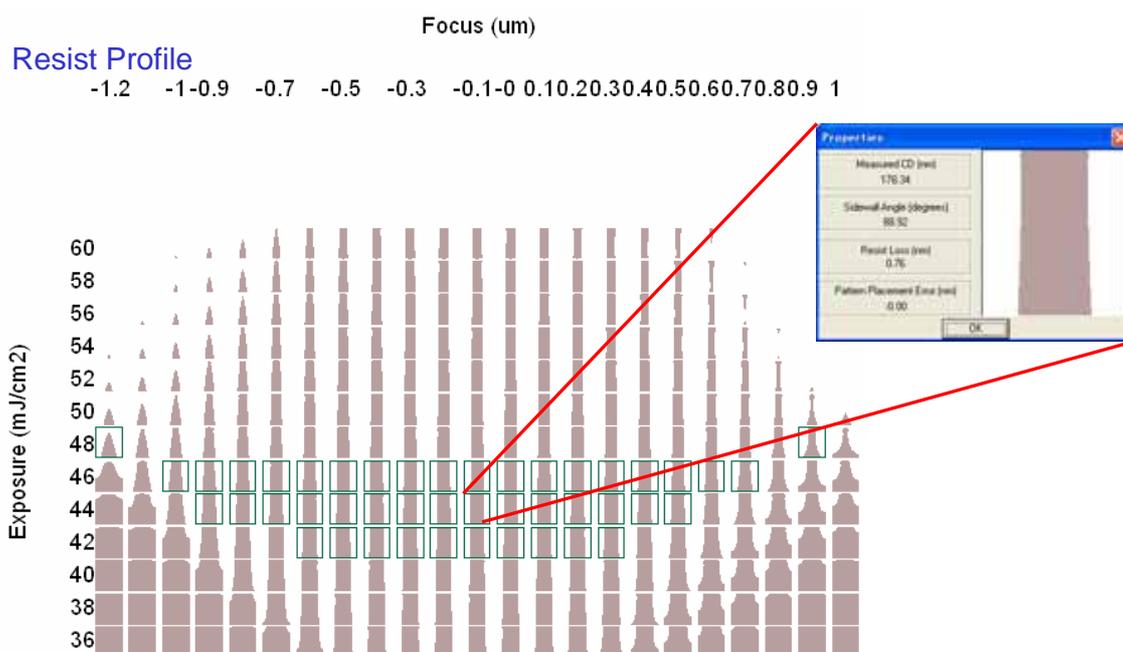
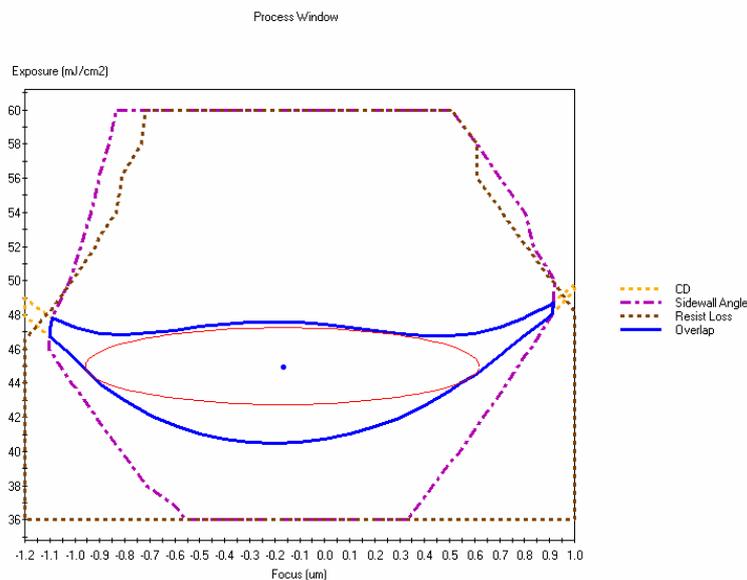


図7 露光量とデフォーカス値におけるパターンプロファイルの計算結果

図7のデータをもとに、横軸にデフォーカス量、縦軸に露光量をとって、パターン寸法が設計寸法値の+10%のライン、-10%のラインを示した図が図8である。また、破線は未露光領域での膜ベリが10%となるライン、一点斜線がパターンプロファイルの側壁角度が80度以内を示すラインである。これらすべてのスペックを満たすエリアが図の中心にある楕円のエリアである。楕円の中心の[・]が最適化プロセス中心条件である。

Process Window



規格範囲

CD < ± 10%
 Angle > 80 deg.
 Loss < 10%

EL: 10%
 DOF: 1.57 μm

Best Expo: 45.00 mJ/cm²
 Best Focus: -0.17 μm

プロセス・ウィンドウには楕円形と長方形を当てはめることができます。

図 8 プロセスウィンド

このような図をプロセスの最適領域を示す、プロセスウィンドと呼ぶ。また、人の顔が笑っているように見えることから、スマイルカーブと呼ばれることもある。本例では、ベストフォーカスは $-0.17 \mu\text{m}$ 、ベスト露光量は 45mJ/cm^2 であることがわかった。また、プロセスラチチュード（余裕度）は露光量で 10%、DOF で $1.57 \mu\text{m}$ であることがわかる。

図 9 に図 8 からもとめた、露光裕度とフォーカス裕度の関係を示す。横軸は DOF、縦軸が露光裕度である。この図から、露光裕度と DOF はトレードオフの関係にあることがわかる。たとえば 10% の露光裕度を確保する場合、許容できる DOF は $1.57 \mu\text{m}$ であることがわかる。一方、露光裕度を 15% 確保する場合、許容できる DOF は $1.35 \mu\text{m}$ 、逆に露光裕度 5% であれば、許容できる DOF は $1.75 \mu\text{m}$ であることがわかる。

EL vs. DOF

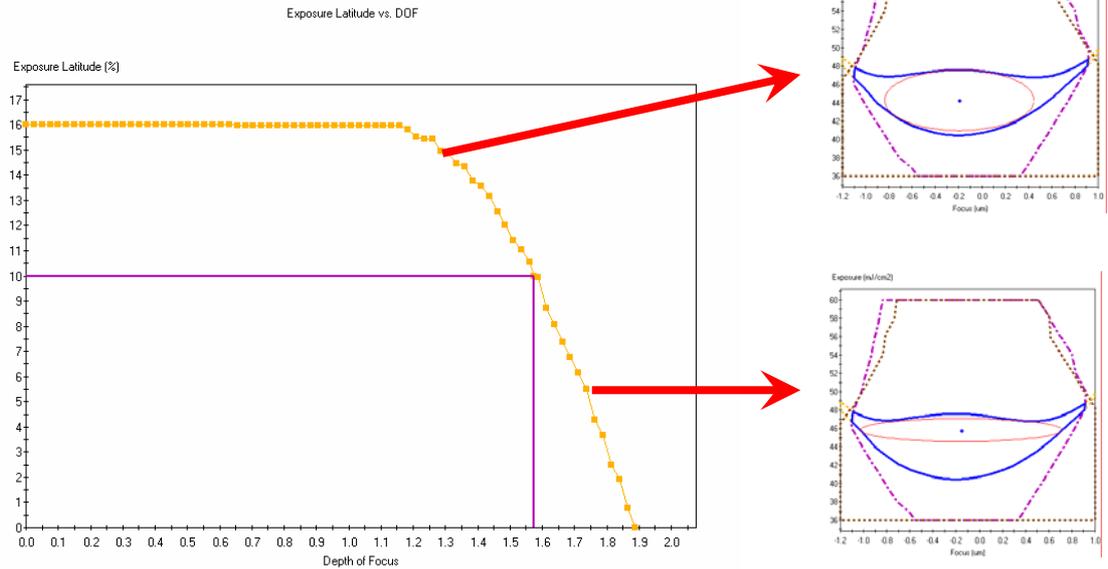


図9 露光裕度とDOFのトレードオフの関係

本機能を用いることで、多点CDに対応したプロセス解析が可能となる。たとえば、ラインスペースパターンや孤立ラインが混在するマスクデザインにおいて、プロセスウインドを求め、すべての条件でオーバーラップする条件を見出すことも可能である。図10に多点CDの解析結果を示す。ライン・スペースパターンや孤立ラインが混在するマスクデザインにおいて、数箇所のプロセス抽出ポイントを決め、プロセスウインドを求める。それらすべての条件でオーバーラップする範囲を求めることが出来る。

・疎密パターン等の同時シミュレーション

・共通プロセスウインドウ解析対応

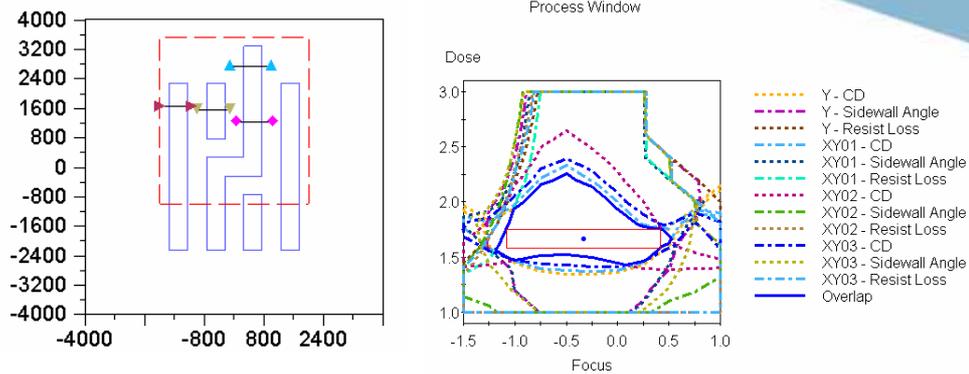
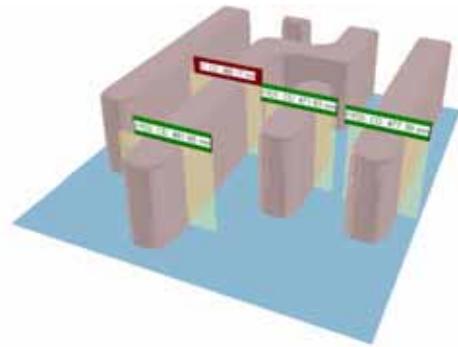


図 10 多点 CD 解析の計算例

3.3 ウェハ積層膜の最適化

レジストと基板界面における反射が、露光の際に定在波干渉パターンをレジスト膜中に生じさせることがある。この定在波干渉効果は、レジスト断面における定在波の側壁のがたつきや、CD スイングカーブの効果など、多くの問題を引き起こす。反射防止膜 (BARC) を使って、基板反射率を低減させることが有効であるが、BARC の膜厚を最適化しなければ、

かえって定在波効果を大きくしてしまう恐れもある。

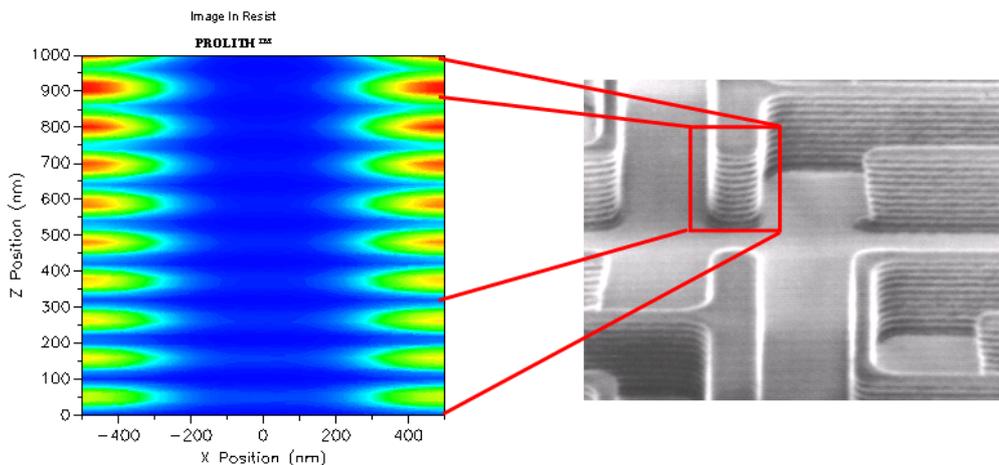
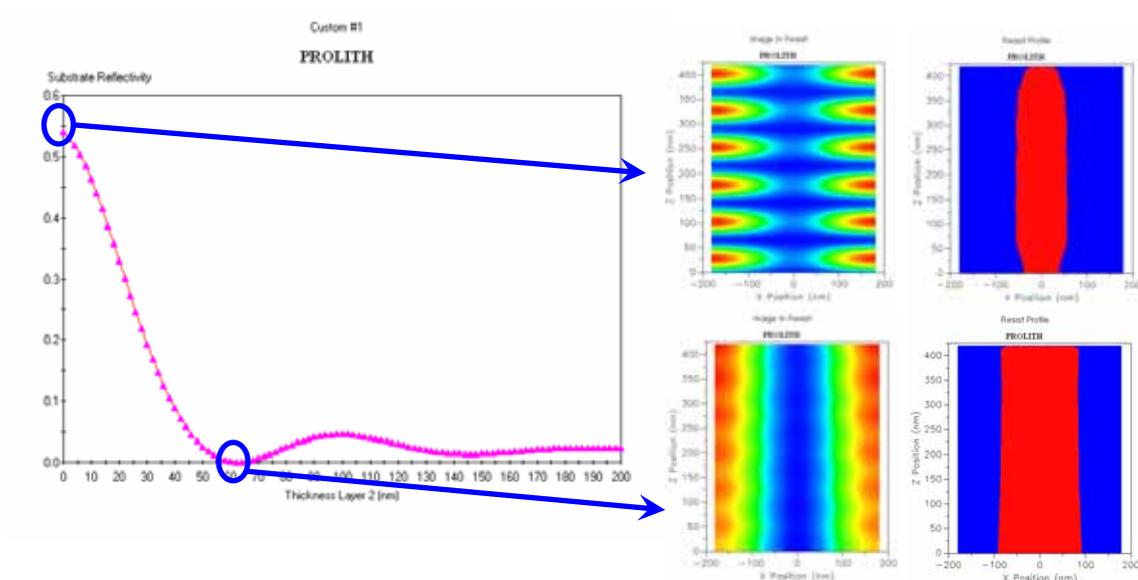


図 11 パターン側壁における定在波効果

図 12 に BARC 膜厚と基板反射率および、BARC 膜が無い場合と、BARC 膜 62nm におけるレジストの形状の比較を示す。Si 基板に BACR 膜を付けると基板の反射率は低下する。BARC 膜厚 62nm で最小となり、その後、BARC 膜厚が増加するに従い、増加、減少を繰り返す。BARC 膜が無い場合、基板からの強い反射により、レジストパターンは細ってしまう。一方、BARC 膜を 62nm 付けた場合、膜内定在波効果は減少し、パターンの形状は矩形に近いパターンが得られている。



Input: BARC膜厚、Output: 基板反射率
 BARCの最適な膜厚は、基板反射率を最小にする値

図 12 BARC 膜厚と基板反射率の関係

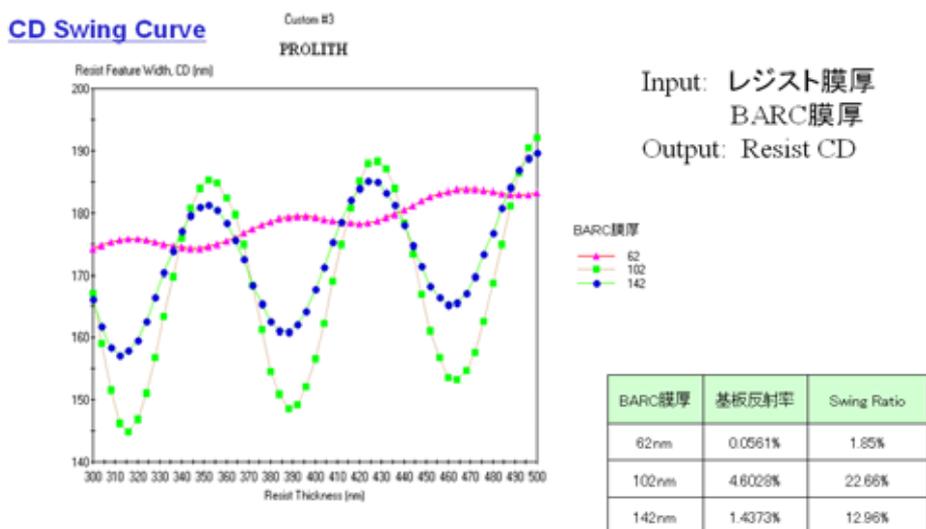


図 13 CD スイングカーブ

図 13 に異なる BARC 膜厚におけるパターン寸法値とレジスト膜厚の関係を示す。BARC 膜厚 102nm では Swing Ratio が 22.7%、62nm では 1.85%と BARC 膜厚を最適化することで、定在波効果を 1/10 に低減することが可能である。

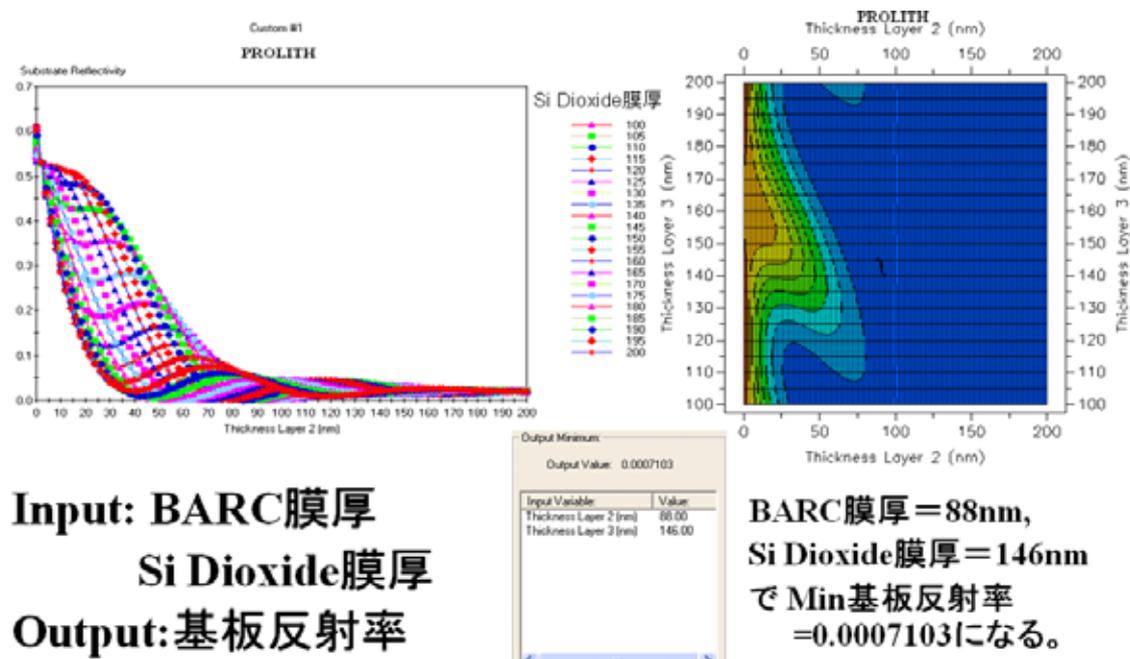
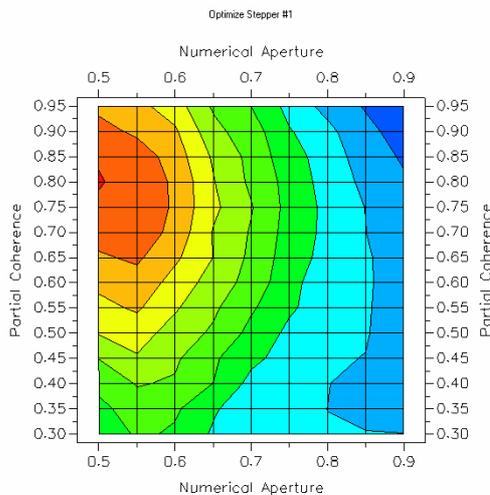


図 14 酸化膜厚の最適化結果

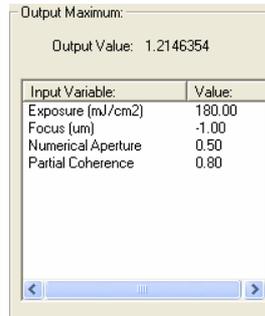
図 14 に BARC 膜厚、酸化膜厚の複合的な最適化の結果を示す。Si 基板上に酸化膜があり、その上に BARC を載せて、レジストをパターンニング場合、先に示した Si 基板上の場合とは、最適な BARC 膜厚は異なる。そこで、BARC 膜厚と酸化膜厚を同時に振って、基板の反射率を計算した。その結果、酸化膜厚 146nm、BARC 膜厚 88nm において基板反射率が 0.071%となることがわかった。このような評価を実際に基板を作成して実装評価することは不可能である。シミュレータを用いれば、瞬時にこのような評価が可能となるのである。

3.4 光学結像系の影響の評価

最近の縮小投影露光装置（ステッパ）は NA や、照明系のコヒーレントファクタを可変できる装置が登場している。そこで、もっとも、DOF を広くとることの出来る NA と の関係を求めることが出来る。図 15 にその計算例を示す。インプットは NA、露光量、アウトプットは DOF である。NA、 を振りながら DOF を算出する。その結果 NA=0.5、 = 0.8 において最大 DOF=1.215 μm (@露光量=180mJ/cm²) が得られることがわかる。



Input: NA, σ , Exposure dose
Output: Depth of Focus

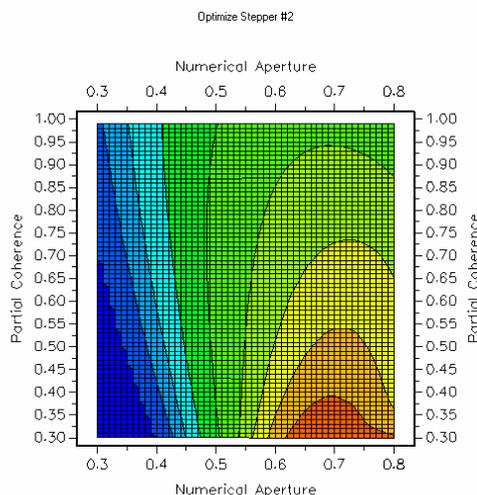


NA=0.5, σ =0.8
 の時、
 最大のDOFが得られる。

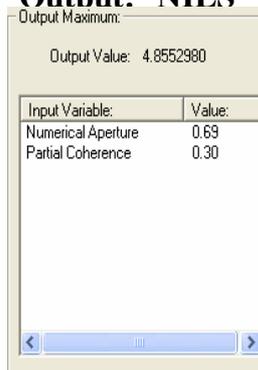
図 15 NA と σ の最適化

また、出力値を DOF ではなく、空中像強度対数勾配 (NILS) として求めることも出来る。NILS はいわば光強度のコントラストである。したがって、最大解像度を得るための NA と σ の条件は NILS が最大となる条件と言える。

図 16 にインプットを NA と σ 、アウトプットを NILS とした時の NA、 σ 最適化計算結果を示す。



Input: NA, σ
Output: NILS

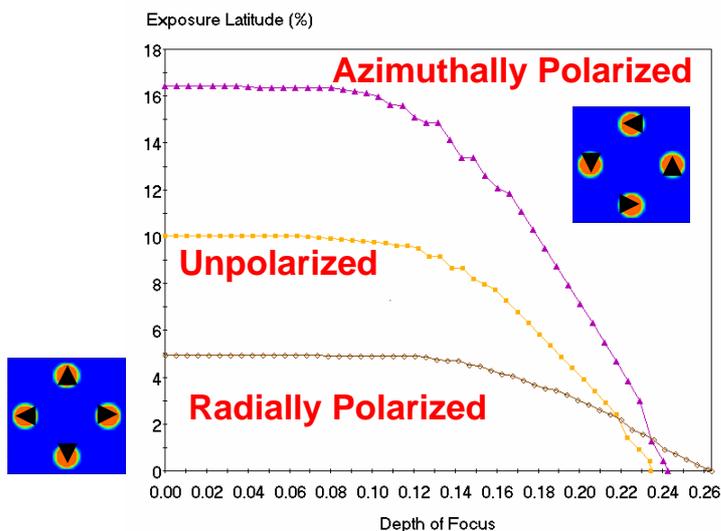


NA=0.69, σ =0.30の時、
 最大のNILSが得られる。

図 16 最大 NILS を与える NA と σ の最適化計算の結果

また、液浸露光などでは高 NA 化による偏光の影響を考慮しなければならない。図 17 に NA=1.35 ArF 液浸露光における偏光の影響を計算した結果を示す。照明は 4 重極照明。パターンは 35nm ライン・65nm スペース (100nm ピッチ) で、6%のハーフトーンマスク

を用い、10nm のマスクバイアスを設けた。Unpolarized は偏光を行わない場合である。Azimuthally Polarized は偏光の方向が回転方向に向かった場合である。DOF は変わらないものの、露光裕度が大きく増加している。一方、Radially Polarized は偏光の方向が放射方向に向いている場合である。DOF は無偏光の場合と比べて少し増加しているものの、露光裕度が半減することがわかる。この様に、特に NA の高い液浸露光では、偏光の影響を十分考慮する必要がある。



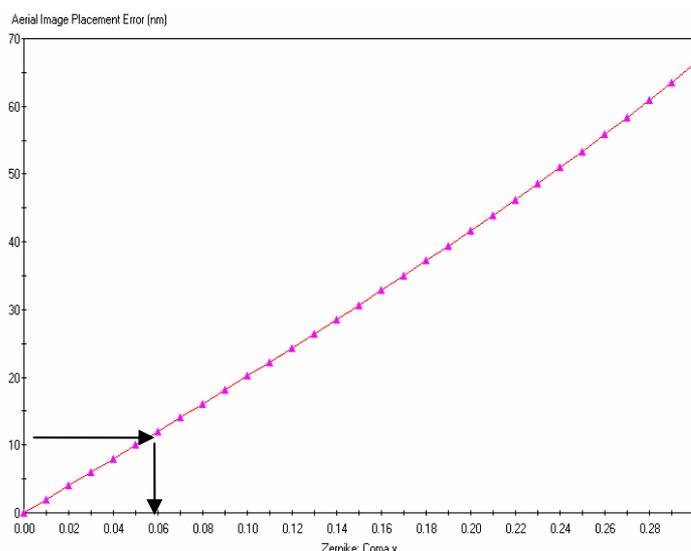
各偏光において、
Focus-Exposure

35nm Lines on
100nm Pitch

NA = 1.35, Immersion
Cross-Quad Source
6% Attn. PSM
10nm Bias on Mask

図 17 高 NA 液浸露光における偏光の影響

図 18 にレンズの収差の影響を示す。



Input: Zernike
収差 (Coma)
Output: Placement Error

図 18 レンズ収差 (Coma) の影響

レンズに Coma 収差があると、転写パターンは位置ずれを起こす。図 18 に Coma 収差量とパターンの位置ずれ量 (Placement error) を示す。たとえば位置ずれ量 11nm が許容範囲とすると、レンズに許容される Coma 収差量は 0.06 以下であることがわかる。

3.4 OPC の最適化

従来、光強度計算は Kirchhoff の境界近似を用いていた。しかし、Kirchhoff 近似では以下のことを無視して計算している。

- 入射光の偏光
- マスクへの入射角度
- マスク材料の光学特性
- マスクの段差

しかし、この近似では図 19 に示す $\lambda > d, l$ の条件で当てはまらない。PSM や、OPC のようなマスク段差を有する場合、または、解像度以下の補助パターンなどを考慮する場合は、Maxwell の厳密解が必要となる。

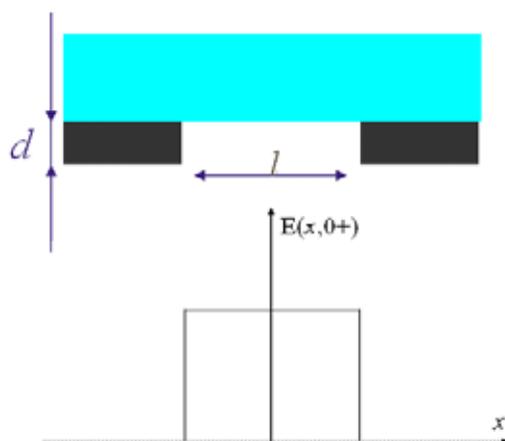
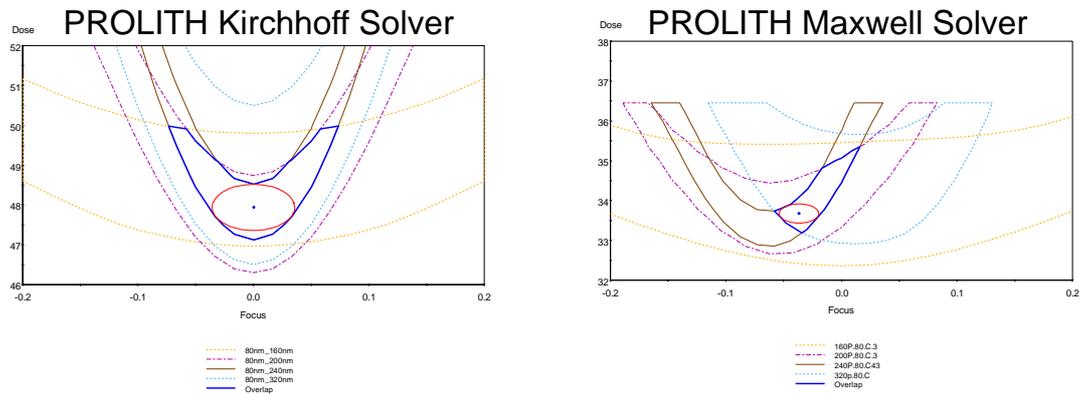


図 19 マスクの構造

図 20 に Kirchhoff 近似と Maxwell 計算法での計算結果の比較を示す。Maxwell 計算法では従来示されなかった光学特性が見えてくる。

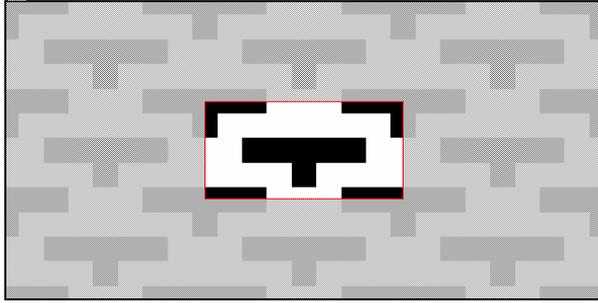


- Results show that Kirchoff approximation does not comprehend the effect mask structures and pitch imaged with extreme off-axis illumination have on the center of focus, exposure dose and overall process window for these deep-sub-wavelength imaging conditions.
- In terms of optical-proximity-correction (OPC) the error in the Kirchoff approximation could be 20% or larger from experimental results and that Maxwell is in good agreement.

図 20 Kirchoff 近似と Maxwell 計算法での計算結果の比較

そこで、Maxwell 計算法を用いた、セリフ寸法の最適化について述べる。

パターンサイズが、光の波長に近づくと、近接効果により、元にマスクデザインのままでは、望ましいレジスト形状が得られない(図 21)。



元のデザインのままでは望ましいレジスト形状を得られない

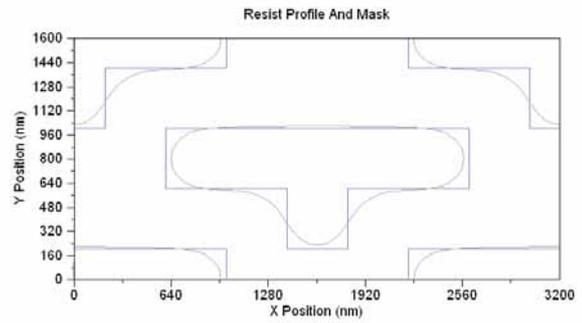
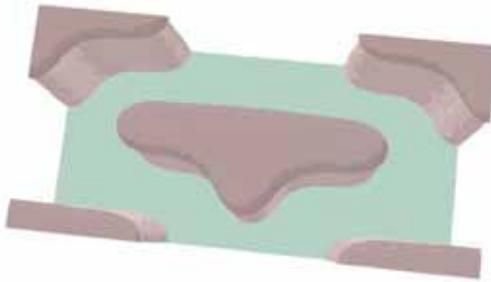


図 21 OPC が無い場合のマスク形状と現像後のレジスト形状

シミュレーションでは、与えられたマスクサイズに従い、露光、酸の発生、PEB による脱保護反応、現像の計算過程を経て、レジスト形状が得られる。

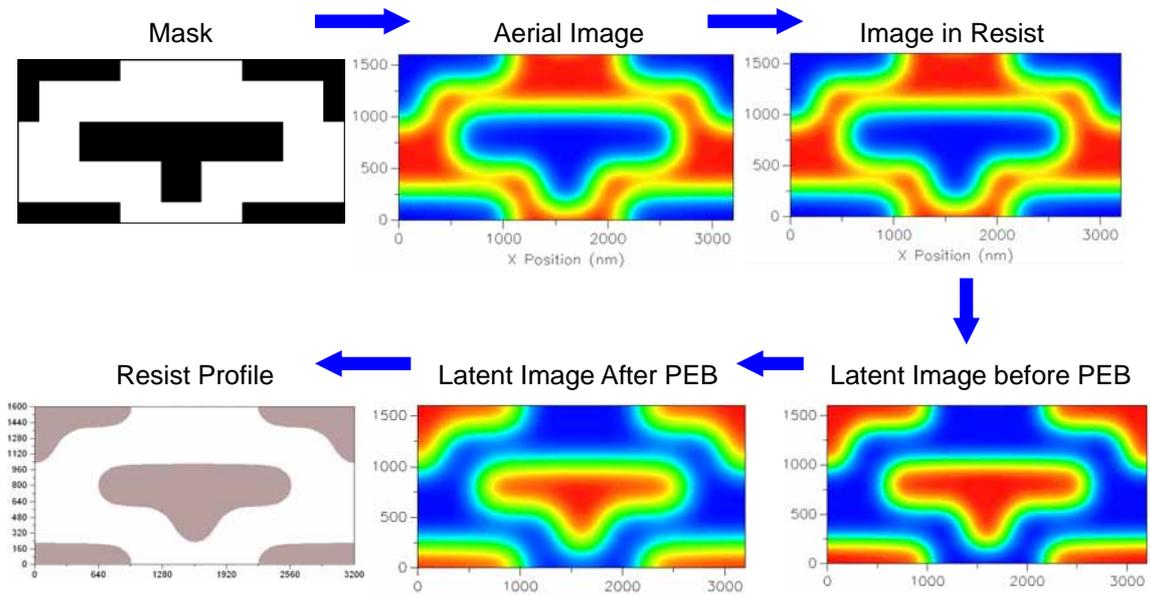


図 22 シミュレーションの流れ

そこで、マスクデザインにセリフを付加して、現像後のレジスト形状を元にデザインに近づける。この技術を光近接補正 (OPC) と呼ぶ。シミュレーションでは CSE という技術を用いて計算により、マスクデザインの最適化を行う。まず、最終的に得たい、元のマスクの形状 (しいてはレジストの形状) を定義する (Critical Shape Metrology)。ついで、シミュレーションの計算を駆使して、目標とするレジストパターンになるように、元にデザインに、OPC パターン(セリフ)を付けていくのである。

マスクの角にセリフを付加

Critical Shape Metrologyを定義

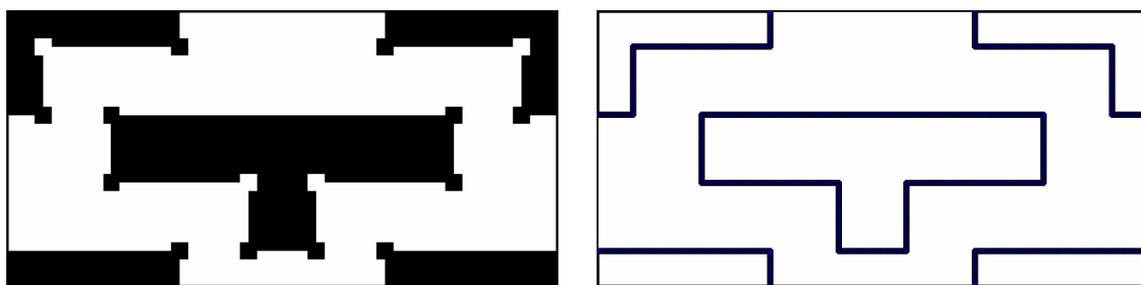
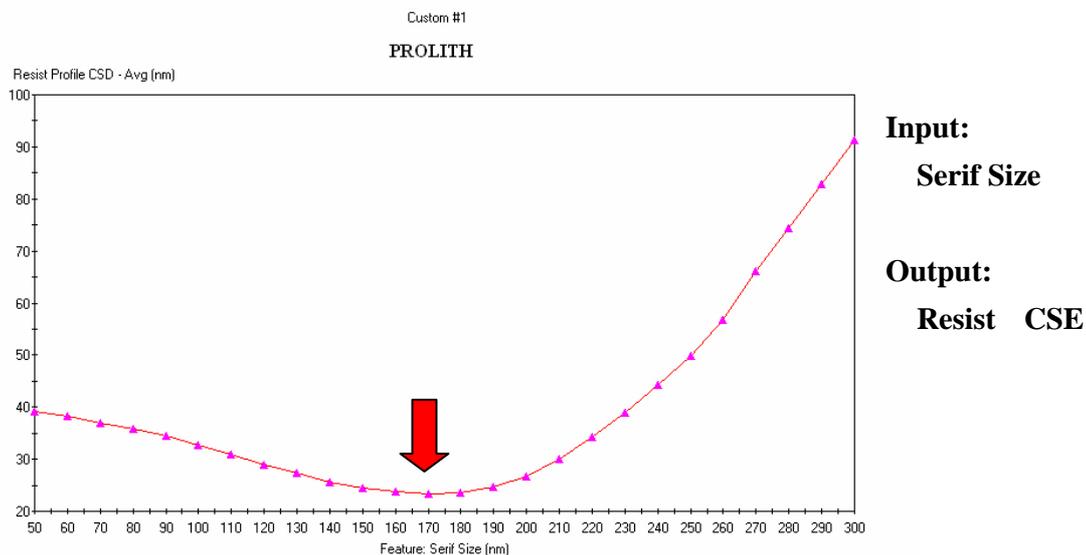


図 23 OPC マスクと最終目標となるレジスト形状

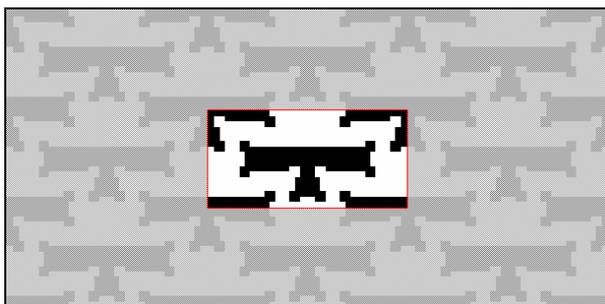
目標となる CSM となるように元にデザインのマスクにセリフを付加してゆく。そして、最終目標の形状と、計算結果のずれ量を、セリフパターンのサイズでプロットする。CSD 値が最小となるセリフサイズが最適化されたセリフのサイズである。



Serif Size の最適な寸法は、CSD を最小にする値

図 24 レジストプロファイル CSD とセリフサイズの関係

CSE を用いて最適化されたセリフによるシミュレーション結果を図 25 に示す。レジスト形状がより矩形に近づいていることがわかる。



CSE が最小となる点から最適なセリフ寸法が決まる

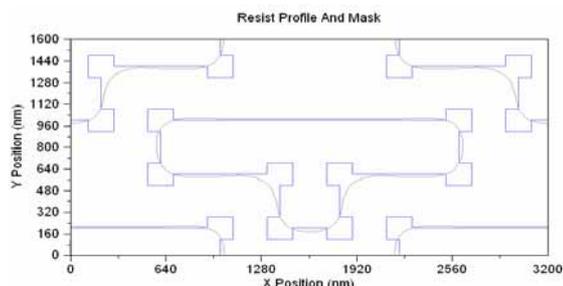
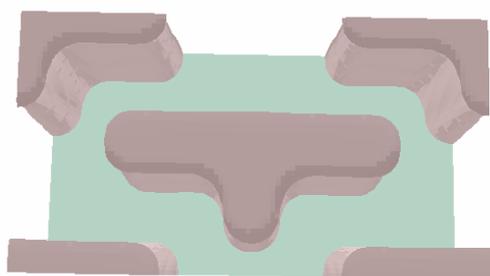


図 25 セリフサイズの最適化結果

また、OPC パターンは照明光学系の形状により最適な形状が異なってくる。

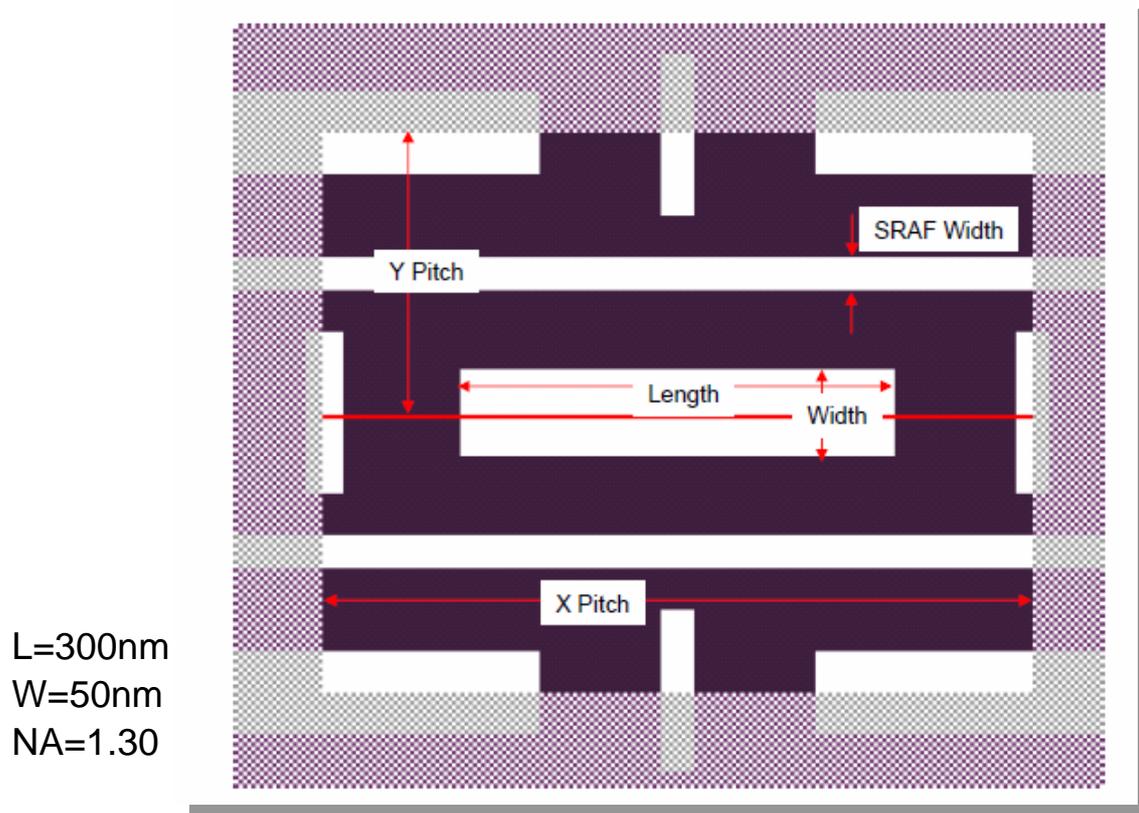
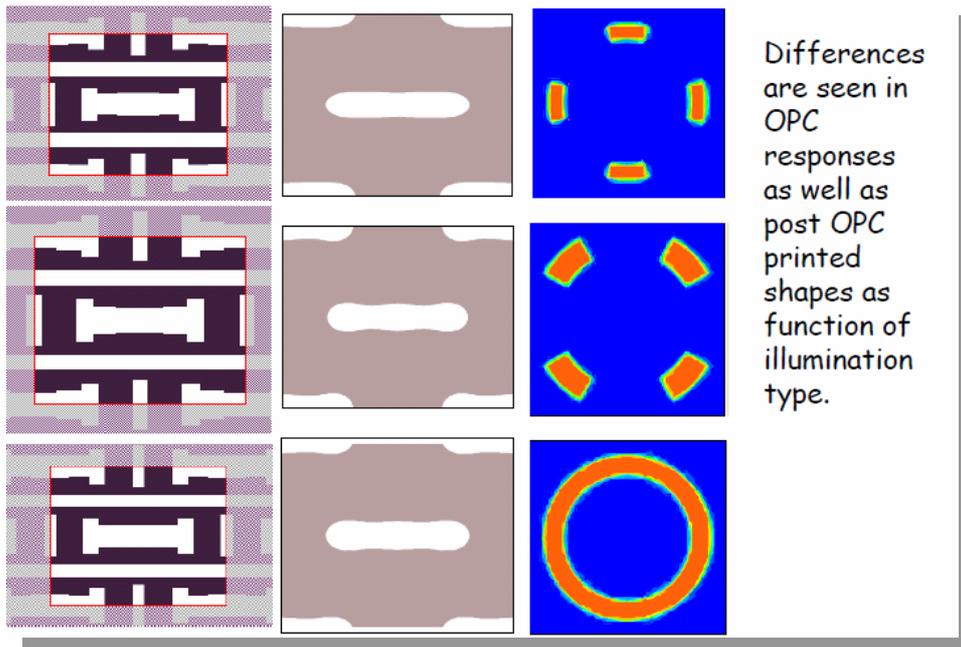


図 26 ArF 液浸露光を想定した OPC パターンの検討

図 26 のようなパターンの最適化を異なる照明形状で検討した。



OPC パターン レジスト形状 照明光学系の形状

図 27 異なる照明光学系の形状と OPC パターン形状

照明の形状により最適な OPC パターンが異なることがわかる。照明光学系の形状の最適化も必要となるだろう。

3.5 プロセス誤差の影響予測と LER の検討

プロセス評価、歩留まりの予測を行う上で、CD 分布を解析することは重要である。しかし、実験で CD 分布を解析することは、大変手間がかかる。また、コストの面でも難しい。そこで、シミュレータを用いた Yield 解析が有効な手段である。プロセスエラーに起因する CD 分布を統計的に予測することが可能である。

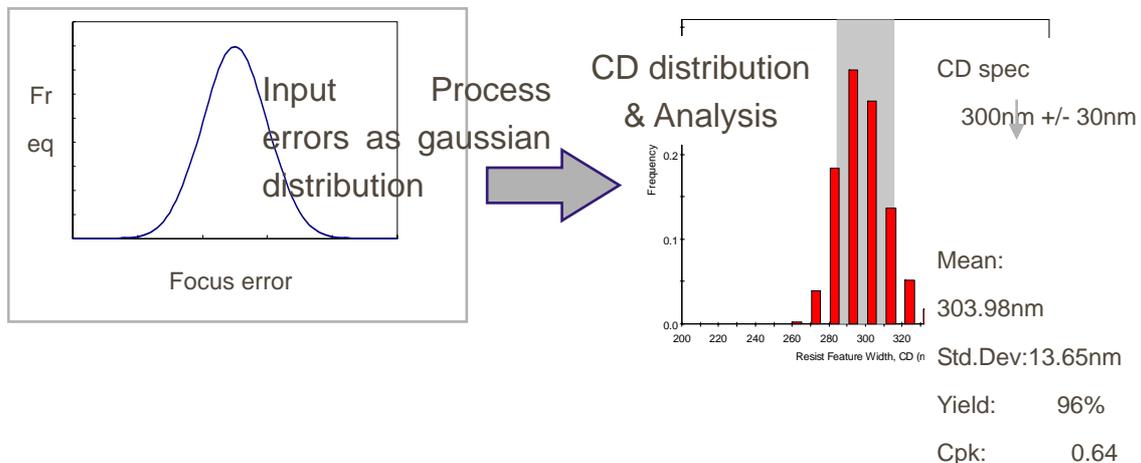
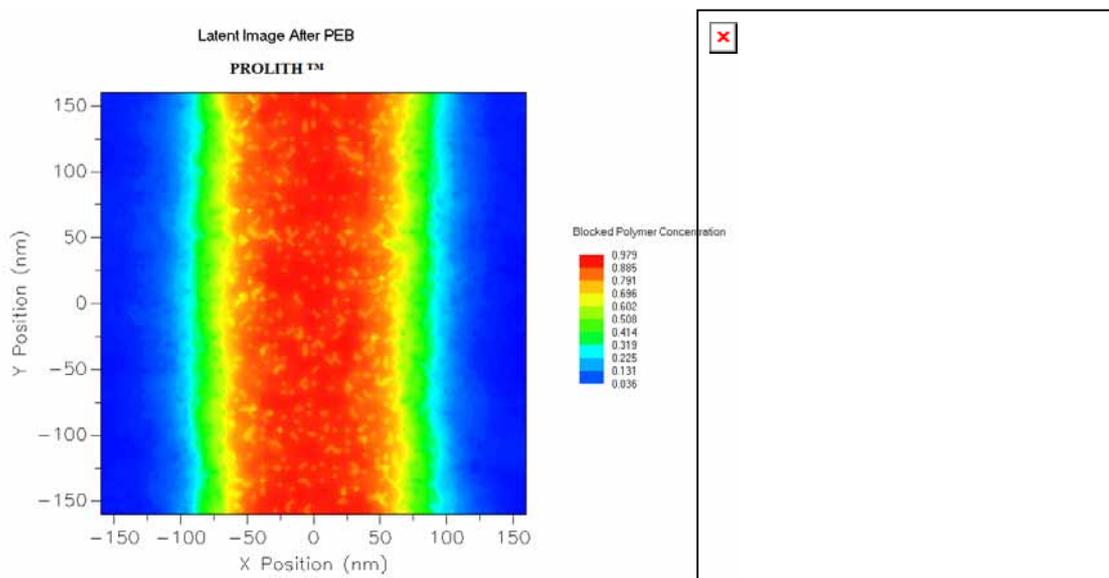


図 28 歩留まり解析の例

入力値としてフォーカスエラー、露光量エラー、膜厚エラーなど、歩留まりに影響を与えるパラメータを入力する。出力値はパターン寸法である。どのエラー成分がどの程度、歩留まりに影響を与えているかを検討することが可能である。



- Example latent image after PEB (left) and resist profile (right) for

図 29 LER の予測計算

また、LER も歩留まりに影響を与える。どの程度 LER があると、どの程度、パターン寸法に影響を与え、しいては歩留まりに影響を与えるかなどの予測計算も可能である。

3.6 まとめ

リソグラフィーシミュレータを用いることで、多彩なプロセスの最適化の検討を行うことが可能である[6]-[9]。現在は、リソグラフィシミュレータは一般に市販されており、KLA-Tencor 社から Prolith というリソグラフィシミュレータも発売されている。日本国内では、リソテックジャパン社から購入可能である。

参考文献

- [1] F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge and J. M. Shaw, IEEE Trans. Electron Devices, ED22, 445 (1975).
- [2] F. H. Dill, W. P. Hornberger, P. S. Hauge and J. M. Shaw, IEEE Trans. Electron Devices, ED-22, 445 (1975).
- [3] C. A. Mack, J. Electrochem. Soc., 134, 148 (1987).

- [4] C. A. Mack, J. Electrochem. Soc., 139, L35 (1992).
- [5] C. A. Mack and Brian Martin, OLIN MICROLITHOGRAPHY SEMINAR INTERFACE '97S (1997).
- [6] A. Sekiguchi, C. A. Mack, M. Kadoi, Y. Miyake and T. Matsuzawa, Proc. SPIE, 3999 (2000).
- [7] A. Sekiguchi, M. Kadoi, T. Matsuzawa and Y. Minami, Electronics and Communications in Japan, Part 2, 82, 2, 30 (1999).
- [8] A. Sekiguchi, Y. Miyake and M. Isono, Jpn. J. Appl. Phys., 39, 1392 (2000).
- [9] A. Sekiguchi, C. A. Mack, M. Isono and T. Matsuzawa, Proc. SPIE, 3678, 985 (1999).