

回折光学素子作製のための電子ビーム近接効果補正法の有効性と限界

岡野 正登*・山本 和也**・四谷 任*・平井 義彦***・菊田 久雄***

*(財) 大阪科学技術センター先端光ファクトリー 〒594-1157 和泉市あゆみ野 2-7-1

**ナルックス(株) 開発部 〒618-0001 三島郡島本町山崎 2-1-7

***大阪府立大学工学部機械システム工学科 〒599-8531 堺市学園町 1-1

Validity and Limitation of a Proximity-Compensation Method for Fabricating Diffractive Optical Elements Using the Direct-Writing Electron-Beam Lithography

Masato OKANO*, Kazuya YAMAMOTO**, Tsutom YOTSUYA*, Yoshihiko HIRAI*** and Hisao KIKUTA***

*Factory for Advanced Optical Technology, Osaka Science and Technology Center, 2-7-1, Ayumino, Izumi, Osaka, 594-1157

**R & D Division, NALUX Co., Ltd., 2-1-7, Yamazaki, Shimamoto-cho, Mishima, Osaka, 618-0001

***Department of Mechanical Systems Engineering, Osaka Prefecture University, 1-1, Gakuen-cho, Sakai, Osaka, 599-8531

A proximity correction is performed to fabricate diffractive optical elements with the direct-writing electron-beam lithography. A popular method of the proximity correction is based on a contrast curve of electron-beam resist. A resist profile after developing is estimated from the contrast curve, and the electron dosage is corrected so that the estimated profile corresponds to the desired profile. In this paper, validity and limitation of the proximity correction method have been investigated for blazed gratings by using the time-evolution process simulator based on the Monte Carlo method and the cell removal model. When the resist layer is $\sim 1.5 \mu\text{m}$ in thickness, the proximity correction is useful to fabricate the blazed gratings of which the period is longer than $10 \mu\text{m}$. For gratings of $0.3 \mu\text{m}$ in height, the correction method is valid for short periods ($> 2 \mu\text{m}$).

1. はじめに

連続な断面形状をもつ回折格子の作製技術として電子ビームの直接描画法がある。レジストに照射する電子線ドーズ量を変調しながら描画を行うと、現像後のレジスト形状はドーズ量を反映した形状となる。この手法で、基板上に任意のレジスト凹凸形状を作り出すことができ、ブレース形状をもつ高効率な回折格子が製作されている¹⁻⁴⁾。

目的のレジスト形状を得るには、近接効果と呼ばれる電子線散乱の影響やレジスト感度の非線形特性を考慮して、適切なドーズ分布を与えるなくてはならない。近接効果やレジストの非線形特性を考慮して現像後のレジスト形状を予測する方法がいくつか提案されており、これらを使って適切なドーズ分布を効率よく設定することも行われてい

る⁵⁻⁷⁾。

レジスト形状の予測方法として最も一般的なのは文献5)で取り扱われている手法である。レジスト面上の1点に電子線が入射した場合の吸収エネルギー分布(露光量分布)を実験によって求め、これをもとに変調露光した場合の吸収エネルギー分布を算出する。現像後のレジスト形状は吸収エネルギーに対する現像残膜特性から求められる。この方法は、形状予測のための手続きが単純で計算時間も短いため、回折光学素子の作製を含めて広い範囲で利用されている。

上記の形状予測の手法では、計算を簡単にするために、(1) 電子線の吸収エネルギーがレジストの厚さ方向に一様であり、(2) 現像の進展はレジストの厚さ方向にだけ進む、という仮定を用いている。そこで、本論文ではこの形状予測の手法を「残膜特性法(contrast curve method,

CCM)」と呼び、これを用いてドーズ分布の最適化を行う方法を「残膜特性法によるドーズ分布補正法」と呼ぶことにする。

ところで、実際の回折素子の作製では $1\text{ }\mu\text{m}$ より厚いレジストを使う場合が多く、レジスト上面と基板近くでは吸収エネルギーに大きな差がある。また、周期の短いレジスト格子の作製では、現像は厚さ方向だけでなく横方向にも進行する。このような場合、残膜特性法では正確な形状予測が行えない。最近では作製される回折光学素子の構造がますます微細になっており、残膜特性法によるドーズ分布補正法の適用限界を把握することは重要である。

本研究では、プレース格子の作製を例に、残膜特性法によるドーズ分布補正法について、その有効な適用範囲と限界を明らかにする。具体的には、残膜特性法を用いてプレース格子作製のためのドーズ量最適化を行い、そのドーズ分布から得られるレジスト形状をより正確な形状予測法である時間発展現像シミュレーション法 (time-evolution process simulation method, TPS) を使って求める。そして残膜特性法から見積もられた形状との比較を行う。

実験の代わりに時間発展現像シミュレーターを用いる理由は、シミュレーターの形状予測精度が高いこと、および実験条件の曖昧さを除去するためである。時間発展現像シミュレーターでは、レジストの厚さ方向への吸収エネルギー分布を考慮し、横や斜め方向への現像の進展を扱っている。残膜特性法に比べて計算時間が長いものの、レジストが厚く微細な構造については予測精度がはるかに高い。本研究では、このシミュレーターの性能を確かめるための簡単な実験も行った。

2. 残膜特性法によるドーズ分布補正法

ここでは残膜特性法とこれを用いたドーズ分布の補正法について述べる。

レジスト上の1点に照射された電子線は、照射点からレジストへ散乱する前方散乱と基板内から再びレジストへ散乱する後方散乱の2種類がある。残膜特性法では、レジストの厚さ方向についての吸収エネルギーは一様であると仮定されており、通常、点ドーズにおける吸収エネルギー分布はFig. 1(a) のような2つのガウス分布の和として表現される。この単位照射量に対する吸収エネルギー分布は簡単な実験で求められる⁸⁾。任意のドーズ分布を与えた場合の吸収エネルギー分布は、点ドーズによる吸収エネルギー分布と与えたドーズ分布の畳み込み積分として算出できる。

一方、ドーズ量に対するレジストの現像残膜特性を実験

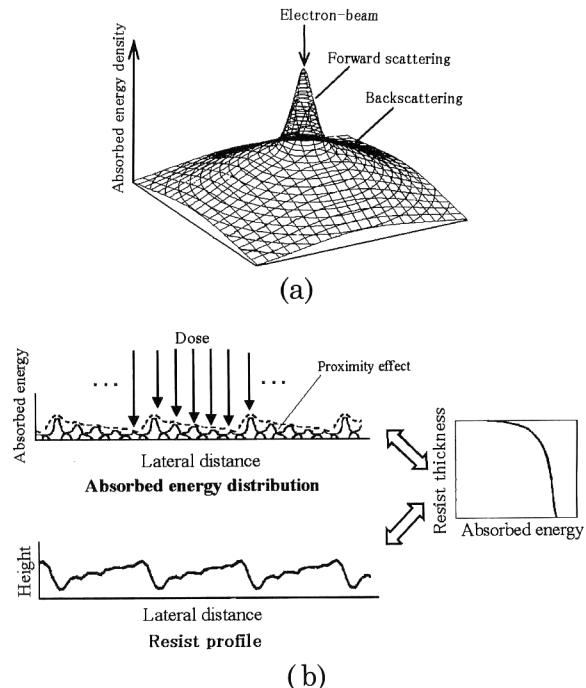


Fig. 1. Proximity effect and an estimation method of resist profiles from a dose distribution. (a) Absorbed energy distribution of the point dosage (the point spread function), which is assumed by the sum of two Gaussian distributions. (b) Absorbed energy distribution is expressed by a convolution of the dose distribution and the point spread function. Resist profile is determined from a resist characteristics which is a relation between absorbed energy and resultant thickness after development.

的に求める。このとき、レジスト厚さや現像時間は、実際の素子を作製する条件で行う。この実験におけるレジストの吸収エネルギーは、上述の畳み込み積分で算出できるので、ドーズ量を吸収エネルギーで置き換えた「吸収エネルギーに対する現像残膜特性」が求められる。

Fig. 1(b) は、点ドーズにおける吸収エネルギー分布とこれに対する残膜特性から、現像後のレジスト形状を予測する方法の手順を示している。畳み込み積分によって算出された吸収エネルギー分布と、吸収エネルギー分布に対する現像残膜特性の関係から、簡単に形状を求めることができる。最適なドーズ分布は、初期ドーズを仮定した後、上記の要領で形状予測の計算を行い、目的の形状になるまでドーズ分布に修正を加える方法で決定される。

3. 時間発展現像シミュレーション法

3.1 時間発展現像シミュレーター

電子線散乱をモンテカルロ法で推定し、現像の進展の様子を時間を追って計算する「時間発展現像シミュレーション法」は、残膜特性法に比べて、より正確な形状を算出する。レジストの厚さを考慮した吸収エネルギー分布は、レ

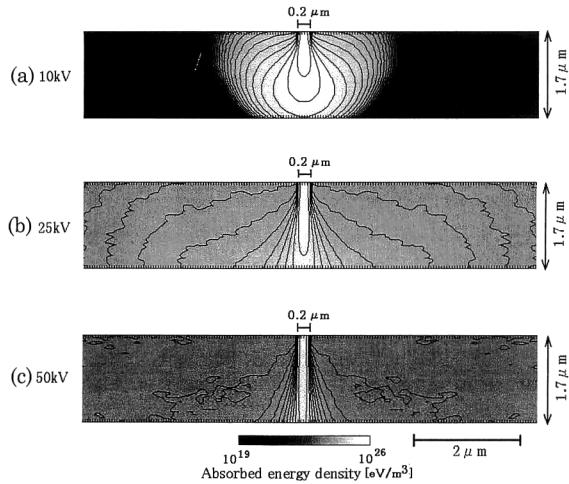


Fig. 2. Absorbed energy density in cross sections of PMMA (polymethyl methacrylate) resist layer with 1.7 μm in thickness for different acceleration voltages. Line of 0.2 μm width are written by electron beams of (a) 10 kV, (b) 25 kV, and (c) 50 kV.

ジストや基板の組成や分子量をもとに、モンテカルロ法による電子線散乱のシミュレーションによって精度よく知ることができる⁹⁾。また、レジストの溶解速度はその吸収エネルギーに依存するので、吸収エネルギー分布がわかれば、レジストの溶解の様子を時間を追って計算で求めることができる。

時間発展現像シミュレーターは半導体素子の研究開発分野ではすでに汎用ツールとして利用されている¹⁰⁻¹²⁾。ただし、市販のシミュレーターはバイナリー形状を主とする半導体素子の分野のために開発されたものであり、ドーズ量に連続的な分布を与える光学素子作製のためのツールとしては使い難いものがある。そこで本研究では、ドーズ量の連続的な分布に対応した時間発展現像シミュレーターを新たに製作した。

レジスト層での吸収エネルギー分布を計算するためには、点ドーズに対する厚さを考慮した吸収エネルギー分布を知る必要がある。これはモンテカルロ法を使った散乱シミュレーションで求められる。任意のドーズ分布に対する吸収エネルギー分布は、残膜特性法の場合と同様、点ドーズに対する分布との畳み込み積分で求められる。Fig. 2 は幅 0.2 μm の細線を描画した場合のレジスト断面での吸収エネルギー分布を計算した例である。加速電圧が 10 kV の場合、入射電子はレジスト内で吸収され、ほとんど基板に達しない。加速電圧が高くなると (25 kV, 50 kV)，前方散乱による吸収エネルギー領域の広がりは小さくなるが、基板からの後方散乱の影響が大きくなり、より遠い領域にまで近接効果の影響が現れる。

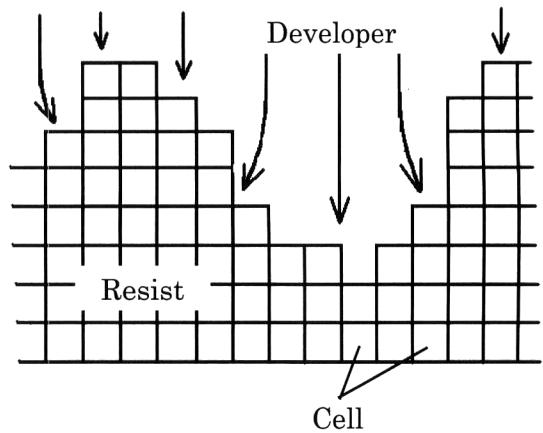


Fig. 3. Schematic diagram of the cell removal model.

レジストの溶解速度を使った現像のシミュレーションには、セル・リムーバルモデル¹³⁾、ストリングモデル¹⁴⁾、レイ・トレーシングモデル¹⁴⁾などの手法があるが、本研究ではセル・リムーバルモデルを採用した。セル・リムーバルモデルでは、Fig. 3 のようにレジスト層は立方体の微小要素（セル）に細分され、先に計算された吸収エネルギーがそれぞれのセルに割り振られる。一方、吸収エネルギーに対するレジストの溶解速度の関係をあらかじめ実験によって求めておく。これにより、各セルに溶解速度を与えることができる。現像液にさらされたセルの溶解時間は、溶解速度と現像液にさらされる面の数から求められる。レジスト表面にあるセルが溶解すると、その内側の新たなセルが現像液にさらされる。この様子を時間を追いかけてシミュレートすることで、レジストの厚さ方向に対して横や斜めに進展する現像の様子を考慮しながら、任意の現像時間におけるレジスト形状を求めることができる。

3.2 実験

この節では、時間発展現像シミュレーション法が残膜特性法よりすぐれていることを簡単な実験によって示す。また、シミュレーションに必要な実験データについても述べておく。レジストには、非線形特性の少ない東京応化製のポジ型レジスト OEBR-1000 を使用した。また、基板にはシリコンウェハーを用いた。電子ビーム描画装置には日本電子製の JBX-5000 SI を使用し、加速電圧は 50 kV とした。

Fig. 4(a) は、レジストの厚さを 1.7 μm にした場合のドーズ量に対する現像残膜率を実験的に求めた結果である。現像時間は 60, 90, 120 秒の 3 種類で行っている。現像シミュレーションを行うには、このデータから吸収エネルギーに対する現像速度を求める必要がある。吸収エネルギーはレジストの上層部と下層部で異なるので、電子線散

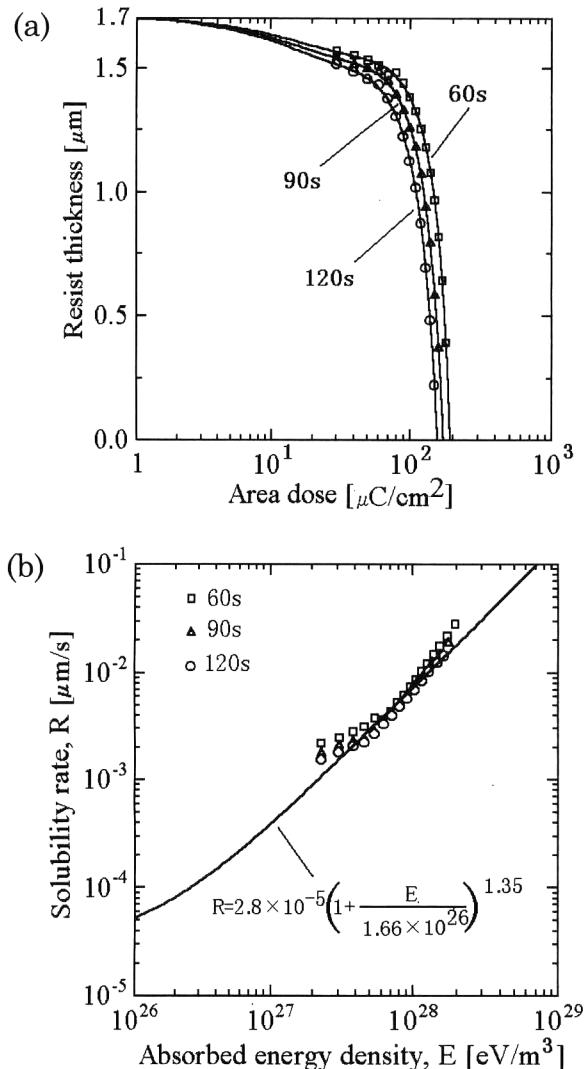


Fig. 4. Resist characteristics of OEBR-1000 (Tokyo Ohka Kogyo Co., Ltd.). (a) Resist thickness as a function of area electron dose for different development time. (b) Resist solubility rate as a function of absorbed energy density.

乱のシミュレーションによってレジストの厚さ方向に対する吸収エネルギー分布を計算し、Fig. 4(a) の現象に合うように現像速度を決定する。結果を Fig. 4(b) に示す。現像時間の変化に関わらず、一定の関係が成り立っていることがわかる。Fig. 4(b) に示される現像速度 R と吸収エネルギー E の関係は、通常、近似的に

$$R = R_0 \left(R_1 + \frac{E}{E_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

の形で表現される¹⁰⁾。 R_0 , R_1 , E_0 , α は定数である。Fig. 4 からこれらの定数を求めた結果は、 $R_0 = 2.8 \times 10^{-5} \mu\text{m/s}$, $R_1 = 1.0$, $E_0 = 1.66 \times 10^{26} \text{ eV/m}^3$, $\alpha = 1.35$ であった。以降は、この値をもとにして、すべての計算を行う。

厚さ 1.7 μm のレジストに 4 μm 周期でドーザ量を変え

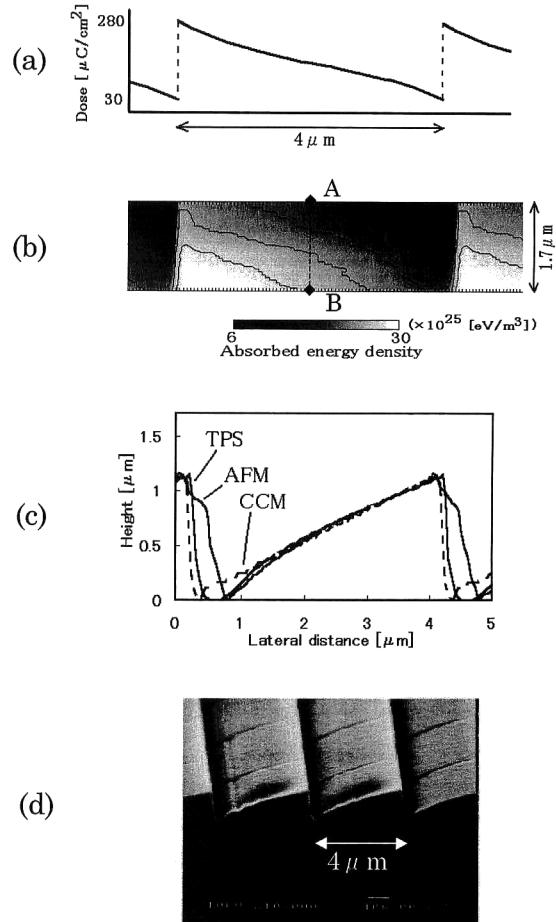


Fig. 5. Resist relief profiles estimated by time-evolution process simulator and an experimental result. (a) Dose distribution with a period of 4 μm, and (b) absorbed energy density of the resist layer. (c) Measured profile (AFM) with an atomic force microscope and estimated profile (TPS) from time-evolution process simulation method. Contrast curve method is an estimated profile (CCM) in the optimizing method. (d) SEM (Scanning Electron Microscope) picture of the fabricated resist grating.

た場合の現像結果を Fig. 5 に示す。ドーザ量は 0.2 μm 幅で 30 μC/cm² から 280 μC/cm² まで 20 段階に Fig. 5(a) のように変調した。散乱シミュレーションで求めた吸収エネルギー分布は Fig. 5(b) のようになっており、A-B 上ではレジスト層の上部と下部で吸収エネルギーに 70% の差がある。60 秒の現像を行った後の断面形状の SEM (scanning electron microscope) 写真を Fig. 5(d) に、AFM (atomic force microscope) で測定した形状と時間発展現像シミュレーション法で求めた結果を Fig. 5(c) に示す。TPS の形状において、ブレーブ段差の大きさは AFM で測定した結果とよく一致している。段差付近のところで形状が一致しないのは、AFM 探針が側面で接触しているためである。AFM で観察できない段差部および斜

面最深部付近について SEM 写真を用いて比較を行うと TPS では最深部付近の丸みを帯びた形状がよく表現できており、残膜特性法で求めた結果に比べてより実験結果に近いことがわかる。

4. レジスト形状の予測法の比較

4.1 比較の方法

ここでは、残膜特性法によるドーズ分布補正法によって期待されるレジスト形状を、時間発展現像シミュレーターで得られた結果と比較する。残膜特性法によるドーズ量の補正には、文献 5) の方法を用いた。

残膜特性法で必要になる吸収エネルギーに対する残膜特性は、Fig. 4(b) の現像速度曲線をもとに時間発展現像シミュレーターを使って計算で求めた。これにより、残膜特性法と時間発展現像シミュレーション法で必要なレジストの基礎特性を共通化することができ、実験条件の曖昧さを除去できる。

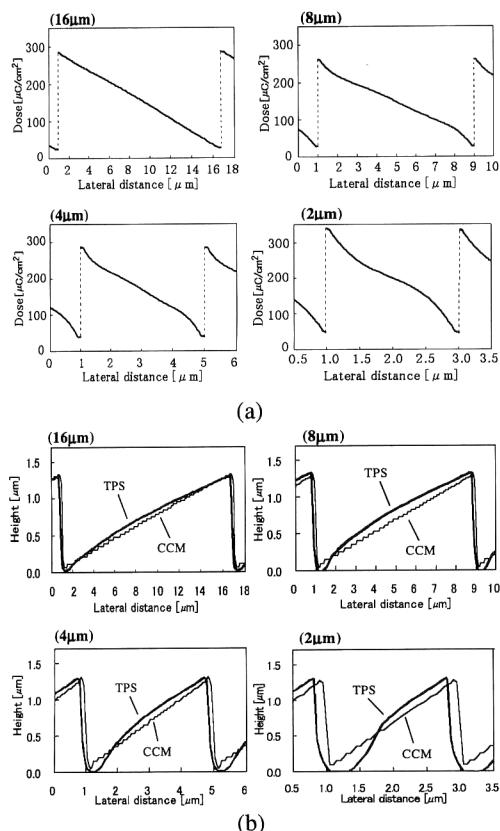


Fig. 6. Optimized dose distributions for thick blazed gratings with different periods (a), and calculated profiles (TPS) by the time-evolution process simulator and estimated profiles (CCM) in the optimization (b). Each resist layer has an initial thickness of 1.7 μm. Desired blazed gratings are 1.3 μm in height.

4.2 透過型ブレーツ格子

Si 基板上に 1.3 μm の高さをもつブレーツ型レジスト格子の作製を考える。このレジスト格子を原型として、屈折率 1.5 の転写材料で同じ形状を再現したとき、ブレーツ段差での透過光の位相差は波長 0.65 μm の光に対してちょうど 2π になる。ブレーツ格子の作製には、電子線の加速電圧を 50 kV とし、描画前のレジスト厚さを 1.7 μm とした。作製する格子の段差は 1.3 μm であるが、近接効果を考慮して、あらかじめ厚めに設定している。残膜特性法を使って、60 秒の現像時間で目標となる形が得られるようドーズ量を補正した。ここでは周期 16 μm, 8 μm, 4 μm, 2 μm の格子を想定し、周期 16 μm, 8 μm の格子については 40 段階のドーズ変調を、周期 4 μm, 2 μm の格子については 20 段階の変調を設定した。

残膜特性法によるドーズ分布補正法によって決定されたドーズ分布を Fig. 6(a) に示し、それから求められるレジスト形状を Fig. 6(b) に示す。残膜特性法で推定されたレジスト形状はいずれも良好なブレーツ形状が得られているが、時間発展現像シミュレーション法による計算結果は、これらと異なる形状を示している。格子の周期が長い場合はその差は小さいものの、短い周期に対しては著しく形状が異なる。ブレーツの段差部分では横方向への現像が進み、当初の位置からずれたところに段差が現れる。また、ドーズ量の大きい箇所では、後方散乱による影響で基板に近い層で吸収エネルギーが大きく、現像が速く進んで基板層が露出している。これらの結果から、残膜特性法によるドーズ分布補正法の適用範囲として 10 μm 以上の周期がひとつの目安であることがわかる。

時間発展現像シミュレーション法では時間的な現像進行による形状変化を求めることができる。そこで、現像時間に対する形状の移り変わりを計算で求め、各形状における回折効率の変化を調べた。回折効率の計算は Differential 法¹⁵⁾ を用いた。転写での使用を想定しているので、屈折率 1.5 の媒質の格子に対して波長 0.65 μm の光を垂直に入射した場合を考えている。周期 16 μm と 4 μm の格子に対して TE 波で入射したときの 0 次光と 1 次光の回折効率を Fig. 7 に示す。周期 16 μm の格子では、設計での現像時間 60 秒で最も 1 回折光の効率が高くなっている。また、現像時間が数秒ずれた程度では、回折効率には大きな影響を与えないことがわかる。一方、4 μm 周期の格子において、1 回折光が最も強くなるのは、設計値より 10 秒短い現像時間の場合である。ちなみに理想的な回折効率は周期 16 μm と 4 μm においてそれぞれ 93% と 81% である。

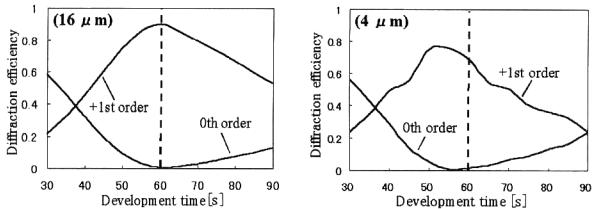


Fig. 7. Diffraction efficiencies as a function of development time. Efficiencies of ideal blazed gratings are 93% for 16 μm period and 81% for 4 μm period.

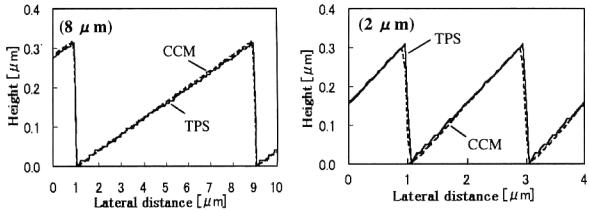


Fig. 8. Simulation results for thin blazed gratings with 0.3 μm in height. Each resist layer is an initial thickness of 0.4 μm .

4.3 反射型プレーベス格子

反射型の格子ではプレーベスの段差が波長の 1/2 になるので、レジスト厚さは透過型の格子に比べて薄い。波長 0.65 μm としたときプレーベスの段差は 0.33 μm になる。このような薄いレジストでは、レジスト上部と下部での吸収エネルギーの差は少ないため、残膜特性法によるドーズ分布補正法はより短い周期の格子にまで適用できると思われる。そこで、レジストの膜厚を 0.4 μm として、段差 0.33 μm のプレーベス格子を作製する場合のシミュレーションを行った。結果を Fig. 8 に示す。格子周期が 2 μm のものについても、残膜特性法で見積もられた形状と時間発展現像シミュレーション法による結果がよく一致している。このことからレジスト膜厚の薄い場合は残膜特性法によるドーズ分布補正法はきわめて利用価値が高いことがわかる。

4.4 加速電圧

透過型の格子の作製では、レジストの上層と下層で吸収エネルギーに差があった。レジストの厚さ方向についての吸収エネルギー差は、照射する電子線の加速電圧にも依存する。第3章でも示したように、加速電圧が高い場合は後方散乱の影響が大きく、上層と下層での吸収エネルギーに差が生じやすい。また、低加速電圧で電子線は基板まで到達しないこともある。ここでは、加速電圧の違いによるドーズ分布補正法の有効性を調べる。

4章2節と同様に、1.7 μm 厚のレジスト層に 16 μm と 4 μm 周期の透過型の格子を作製することを想定した。加

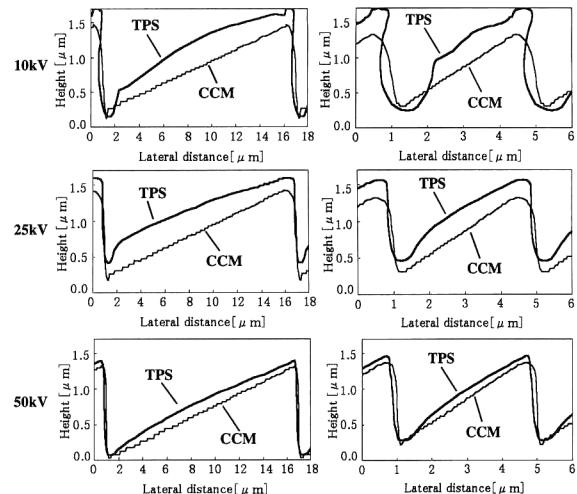


Fig. 9. Dependence of acceleration voltages of the electron beams. Desired blazed gratings are 1.3 μm in height. The initial thickness of resist layer is 1.7 μm .

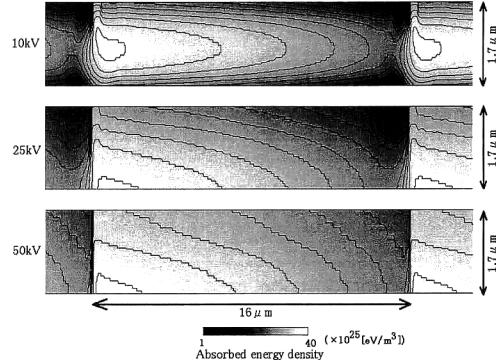


Fig. 10. Absorbed energy density for different acceleration voltages, which are calculated from optimized dose distributions for 16 μm period grating with the Monte Carlo method.

速電圧が 10 kV, 25 kV, 50 kV の場合について、残膜特性法によってドーズ分布を決定した。現像時間は 60 秒に設定した。求められたドーズ分布から計算されたレジスト形状を Fig. 9 に示す。加速電圧が低くなるにつれて、残膜特性法の結果でも段差部分が斜めになっている。また時間発展現像シミュレーション法の結果は、さらに形状に丸みを帯びており、加速電圧 10 kV、周期 4 μm の格子では、アンダーカットの傾向が現れている。

加速電圧が高くなるほど、残膜特性法の結果と時間発展現像シミュレーション法の結果がよく一致し、残膜特性法によるドーズ分布補正法の効果が現れる。この理由を考えるために、周期 16 μm の格子における各加速電圧についての吸収エネルギー分布を計算した。結果を Fig. 10 に示す。加速電圧が高いほど、レジストの上層と下層での吸収エネルギーの差が小さいことがわかる。10 kV の加速電圧

では電子線のエネルギーはレジスト内で吸収され、格子下面にはほとんど届かず、レジストの中層が最も高い吸収エネルギーをもつ。残膜特性法ではレジストの厚さ方向に対する吸収エネルギーの差を考慮していないため、この差が大きい低加速露光の場合は当初の予測形状とは大きく異なる形状を得る。このように、厚いレジスト層に対して低加速で電子線を露光する場合、残膜特性法によるドーズ分布補正法はほとんど利用価値がないことがわかる。

5. ま と め

電子線の近接効果とレジストの非線形特性を考慮したドーズ量の補正法として「残膜特性法によるドーズ分布補正法」を取り上げ、その手法が適用できる範囲と限界を明らかにするために、時間発展現像シミュレーターを使って検討を行った。レジスト厚が $1\text{ }\mu\text{m}$ を超えるブレーブス格子の作製では、周期 $10\text{ }\mu\text{m}$ がひとつの限界になることがわかった。また、反射型の格子のようにレジスト厚が薄い場合は、より短い周期についても、適切なドーズ量の補正が行えた。一方、電子線の加速電圧が高いほど補正の効果が大きいことが明らかになった。より細かな格子構造の作製におけるドーズ量の補正では、ここで用いた時間発展現像シミュレーション法を取り入れることも必要であろう。

本研究は科学技術振興事業団、大阪府地域結集型共同研究事業「テラ光情報基盤技術開発」の一環として行った。

文 献

- 1) T. Fujita, H. Nishihara and J. Koyama: "Fabrication of microlenses using electron-beam lithography," Opt. Lett., **6** (1981) 613-615.
- 2) T. Shiono and H. Ogawa: "Diffraction-limited blazed reflection diffractive microlenses for oblique incidence fabricated by electron-beam lithography," Appl. Opt., **30** (1991) 3643-3649.
- 3) E. Di Fabrizio, L. Grella, M. Baciocchi, M. Gentili, D. Peschiaroli, L. Mastrogiacomo and R. Maggiora: "One step electron-beam lithography for multipurpose diffractive optical elements with 200 nm resolution," J. Vac. Sci. Technol. B, **14** (1996) 3855-3859.
- 4) E.-B. Kley: "Continuous profile writing by electron and optical lithography," Microelectron. Eng., **34** (1997) 261-298.
- 5) W. Daschner, M. Larsson and S. H. Lee: "Fabrication of monolithic diffractive optical elements by the use of e-beam direct write on an analog resist and a single chemically assisted ion-beam-etching step," Appl. Opt., **34** (1995) 2534-2539.
- 6) P. D. Maker and R. E. Muller: "Phase holograms in polymethyl methacrylate," J. Vac. Sci. Technol. B, **10** (1992) 2516-2519.
- 7) F. Nikolajeff, J. Bengtsson, M. Larsson, M. Ekberg and S. Hard: "Measuring and modeling the proximity effect in direct-write electron-beam lithography kinoforms," Appl. Opt., **34** (1995) 897-903.
- 8) W. Patrick and P. Vettiger: "Optimization of the proximity parameters for the electron beam exposure of nanometer gate-length GaAs metal-semiconductor field effect transistors," J. Vac. Sci. Technol. B, **6** (1988) 2037-2041.
- 9) D. F. Kyser and K. Murata: "Quantitive electron microprobe analysis of thin films on substrate," IBM J. Res. Dev., **18** (1974) 352-363.
- 10) A. R. Neureuther, D. F. Kyser and C. H. Ting: "Electron-beam resist edge profile simulation," IEEE Trans. Electron Devices, ED-**26** (1979) 686-693.
- 11) Y. Hirai, S. Tomida, K. Ikeda, M. Sasago, M. Endo, S. Hayama and N. Nomura: "Three-dimensional resist process simulator PEACE (photo and electron beam lithography analyzing computer engineering system)," IEEE Trans. CAD, **10** (1991) 802-807.
- 12) I. Raptis, B. Nowotny, N. Glezos, M. Gentini and G. Meneghini: "Electron beam lithography simulation on homogeneous and multilayer substrates," Jpn. J. Appl. Phys., **39** (2000) 635-644.
- 13) F. H. Dill, A. R. Neureuther, J. A. Tuttle and E. J. Walker: "Modeling projection printing of positive photoresists," IEEE Trans. Electron Devices, ED-**22** (1975) 456-464.
- 14) R. E. Jewett, P. I. Hagouel, A. R. Neureuther and T. V. Duzar: "Line profile resist development simulation techniques," Polym. Eng. Sci. **17** (1977) 381-384.
- 15) P. Vincent: "Differential methods," *Electromagnetic Theory of Gratings*, ed. R. Petit (Springer-Verlag, Berlin, 1980) pp. 101-121.