

電子ビームリソグラフィーにおける位置精度の制御 についての研究

木村 優樹¹ 合田 一夫²

Prediction of positioning error in EB lithography

Masaki KIMURA¹ Kazuo GODA²

Photomasks are fabricated with 50keV electron beams (EB) in EB lithography. The requested position accuracy is almost $\pm 3\text{nm}$ ⁽¹⁾, however, it degrades to almost $\pm 10\text{nm}$ by charging effects in resist. This study is about the position shift caused by the charging effect with a simulation method based on the law of electromagnetism.

キーワード：電子ビームリソグラフィー，フォトマスク，帯電効果

Keywords：EB Lithography, photomask, charging effect

1. はじめに

本論文は、電子ビームリソグラフィーにおける位置精度の制御についての研究である。研究の分野としては、LSI 製造の光リソグラフィー工程に用いられるマスク製作成用の電子ビームリソグラフィーである。

LSI 製造では、光リソグラフィーを複数回行って、LSI 回路を作製する。光リソグラフィーは、マスクの光透過と光不透過のパターンをLSI に転写する。マスクは、電子データよりEBリソグラフィーで、透過・不透過のパターンを形成する。このマスク作成における位置精度をテーマとする。

電子ビームリソグラフィーでは描く面積が、多い程位置精度が悪化する。その原因としては、チャージアップが疑われる。図1に文献(2)に示された描画面積による位置精度劣化の例を示す。この例では、50keVの電子ビームが用いられている。非常に小さな位置精度測定用マークのみ描画すると、位置精度は悪化しない。露光面積比率に水準を設けたダミー描画を描画し、この後に位置精度測定用マークを描画すると位置精度は、図1の様に最大10nm程度歪む。この問題は1990年代より知られており、文献に公開されたデータが大量に存在する。

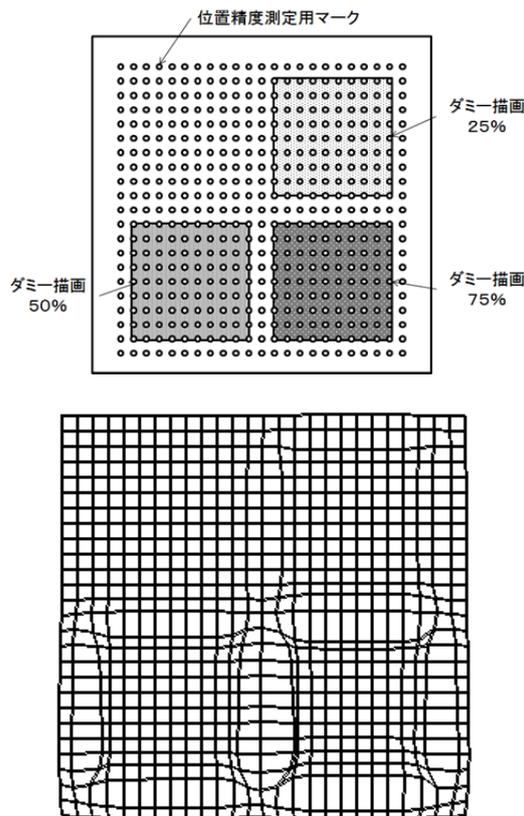


図 1. 位置変動の測定結果

電子ビームを照射する事によるチャージアップについては、従来から走査型電子顕微鏡(SEM)で頻繁に観測され

1 明星大学大学院理工学研究科 物理学専攻博士前期課程

2 明星大学理工学部 総合理工学科物理学系 教授 原子物理学, 放射線物理学

ており、その原因も対策も良く知られている。2次電子放射効率は、多くの物質に対し測定されている（照射した電子数と放出される電子(ほとんど2次電子)の比率である。)。2次電子放射効率は、照射する電子ビームの加速エネルギーが数100eV~2keVの範囲でのみ、1を超える。非導電性、資料に走査型電子顕微鏡を観察する場合は、上記近傍の加速エネルギーを用いる事で、チャージバランスをとって、チャージアップを防止している。文献(3)の例では、50keVの電子ビームを用いているので、照射部は、負にチャージアップする。厳密に言えば図1に示される正面近傍(厚さ数10mm以内)や2次電子放出により正に、数10 μ mの深さに、より強い負の帯電が生じる。しかしながら、図1の位置変動は、単純に負にチャージアップしたと想定した場合と明らかに異なる。これは、マスクへの電子ビーム照射の状況が、従来の走査型電子顕微鏡用資料が異なる事にある。

図2にあるように、マスクは電子ビームの入射側からみて、有機膜(約0.2 μ m)、金属膜(約0.1 μ m)、ガラス(数mm)からなる。電荷があつて金属が接地されていなければ、点電荷になり、ポテンシャルは、 $1/r$ になる。また、金属が接地している場合、電荷がガラス内にあると静電シールドで、無効になる。電荷が有機物内であれば電気鏡像効果で双極子が現れてポテンシャルは、 z/r^3 になる。このように、電気双極子は表面近傍に存在する。

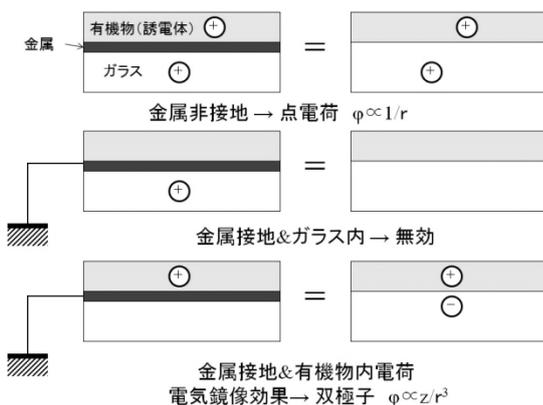


図2. 電荷の位置と働き

研究内容は、概要把握及び、電荷蓄積モデル検証用プログラムの作成及び、モデル作成と検証である。今回は、位

置精度の制御モデルにおいて基礎となる線状の双極子分布によるビームの位置変動についてのプログラムの作成と検証を報告する。

2. 現象の再構成

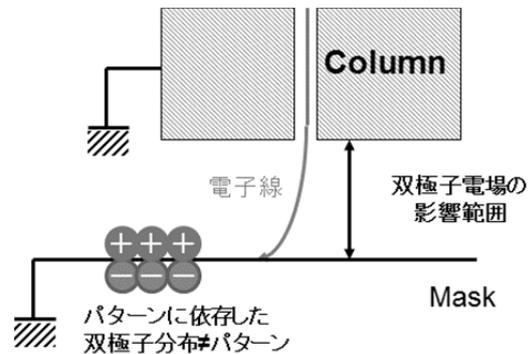


図3. 電子ビームの軌道変動

図3に示すように描画パターンに依存した電気双極子の分布が存在し、その影響で電子ビームの軌道が変動する。これまでの研究で、双極子の分布は描画パターンと相関があるが、一致していない。この事が、この問題を解く事を困難にしていた。今回の研究目的は、電子ビームの描画パターンから、残留電荷の配置と強度を求め、双極子群による電場を計算し、電子ビームの軌道変動を計算する事である。

文献のデータに見られる位置変動を起こす電場を概算する為に、電場を一様であると仮定して、10mmの区間を50KeVの電子を運動させた場合の軌道を計算した。因みに1nmの位置変動を起こす電場は、 $E = 2$ [V/m]で、非常に微弱である。次は、電子ビーム照射による有機物の状況である。描画中の有機物は、放射線誘起伝導で半導体又は金属に相当する。よって、レジスト内に残留する電荷は、描画に要した電荷のほんの一部である。最後に、描画パターンから、双極子分布を求めるモデルを作成し、文献データで検証する。双極子分布の様々な基礎的分布に対し、上記プログラムにより位置変動を計算し、モデル作成の部品とし、それらを組み合わせて文献の実描画結果を説明できる分布を求める。これらより、描画パターンから、双極子分布を求めるモデルを作成する。

次は、モデル検証用プログラムの作成順である。

軌道計算としては、基本的なオイラー法とより高精度なルンゲ・クッタ法を使っている。原点にある双極子による電場下の電子軌道計算がスタート点である。それに複数の双極子の集合による電場の計算とルンゲ・クッタ法による電子軌道計算の機能を加えて複数の双極子による電場下の電子軌道計算を作成した。

本プログラムにより、モデルで計算した双極子分布が、実測と合致するかを検証が可能となった。また、プログラム作成途中に見いだした新課題への対応を行なっている。その新課題とは、位置変動の線形性及び、電気鏡像法の合わせ鏡である。

3. 電場と軌道計算プログラム

電場と軌道計算の説明をする。言語は、C++、プラットフォームは Microsoft Visual Studio 2010、OS は Windows 7 Professional SP1 64bit 版である。ハードはパソコンで、メモリーは 32GB 搭載している。

3.1 プログラム概要

座標はマスク面の Z 座標を 0 としている。複数の双極子による電場下の電子軌道計算のプログラム概要を説明する。最初は、双極子情報とビーム初期値を読み込み、電子ビームの初期条件ごとに双極子分布の電場下の電子の軌道計算を行う。結果は、電子ビームの初期条件毎の電子軌道とマスク面での変位である。

3.2 電場計算

マスクの金属面が Z 軸に垂直に存在することから、双極子の軸は Z 方向と限定している。当然、双極子強度は、連続的分布を持つ場合もある。そこで、X 座標と Y 座標にメッシュ (0.5~1mm 程度) を設け、メッシュ中央にメッシュ内に含まれる双極子が全て集合した仮定して、離散化处理している。

電場計算の入力ファイルは、上記の離散化处理によって

求めた双極子の位置 (直交座標) と双極子の電荷量を入力ファイルとして持つ。入力ファイルに記述された、それぞれのメッシュ中央に仮想的に置かれた双極子の電場を計算し、電場の重ね合わせの法則で全双極子による電場を求めている。任意の位置 (X, Y, Z) の電場は以下の様になる。

双極子の位置を (x_j, y_j, z_j) とし、位置 (x, y, z) に置ける電場は、

$$\vec{E} = E_{x_j} \vec{i} + E_{y_j} \vec{j} + E_{z_j} \vec{k}$$

$$r_j = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_j)^2}$$

$$E_{x_j} = \frac{3P(x - x_j)(z - z_j)}{4\pi\epsilon_0 r_j^5}$$

$$E_{y_j} = \frac{3P(y - y_j)(z - z_j)}{4\pi\epsilon_0 r_j^5}$$

$$E_{z_j} = \frac{3P(z - z_j)^2}{4\pi\epsilon_0 r_j^5} - \frac{P}{4\pi\epsilon_0 r_j^3}$$

電場の重ね合わせの原理により、

$$\vec{E} = \sum_{j=1}^N E_{x_j} \vec{i} + \sum_{j=1}^N E_{y_j} \vec{j} + \sum_{j=1}^N E_{z_j} \vec{k}$$

この際、

$$p = ql$$

ここで、 l は双極子の電荷間の距離で、 q は電荷である。

3.3 軌道計算

カラムからマスクまでの間の Z 方向に十分な数のメッシュ (最低でも 50 個程度) を設ける。そのメッシュを電場が存在しない状態で、電子が横切る時間 Δt を計算の基礎とする。

カラムは、接地された金属なので、カラム内部の電子は外部の電場の影響を受けない。初期値として、マスク上の位置 (マスク上の X, Y の座標)、電子がカラムから射出される位置 (Z 座標)、電子の速度、変位をファイル化して与えている。 Δt ごとに、その位置の加速度 (a_x, a_y, a_z) を計算し、次の Δt 開始時の速度 (V_x, V_y, V_z)、位置 (X, Y, Z) そして変位 ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) を計算していく。

この計算には、ルンゲ・クッタ法を使用している。この際の式は、

$$\Delta X_n = X_n - X_0 = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(2n-2i+1)}{2} \right\} \cdot \alpha_{i-1} \cdot \Delta t^2$$

加速度が電場に比例するので、電場の重ね合わせの原理より

$$\alpha_{(i-1)} = e \cdot \left(\sum E_j \right) / m = \sum \alpha_{ij}$$

とすれば、 $\Delta X_n = \sum \Delta X_{nj}$ である。

すると、

$$\begin{aligned} \Delta X_n &= \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(2n-2i+1)}{2} \right\} \cdot \alpha_{i-1} \cdot \Delta t^2 \\ &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{(2n-2i+1)}{2} \right\} \cdot \alpha_{i-1,j} \cdot \Delta t^2 = \sum_{j=1}^m \Delta X_{nj} \end{aligned}$$

となる。よって、変位は、個々の双極子による変位を重ね合わせで、表現される。これは任意の時刻における線形性を表している。しかしながら、マスク上のつまり $Z=0$ での変位の線形性を保証しない。マスク上変位の線形性が成立する条件は、コラムとマスクの間を飛行する時間がほぼ一定と見なせる事である。

本研究では、数 mm から数 10mm のコラム・マスク間隔を電子が飛行して、最大 10nm 程度の横方向変位しか生じないので、マスク上変位の線形性が成立する条件を満足している。マスク上変位の線形性が成立するならば軌道計算が不要になり、プログラムの高速化と簡略化が可能になる。

次に電気鏡像法の合わせ鏡を説明する。電子ビームがコラムを通過して、マスクに当たる事で、マスクの上に電荷が生じる。コラムは、接地された金属なので、コラムにも電気鏡像効果が発生する。コラムが平面と仮定すれば、コラムに写った電荷が、さらにマスクに写り、図4の「合わせ鏡の無限」という現象が起こる。

一様な線状分布双極子に対し、合わせ鏡現象を計算すると、6回程度の合わせ鏡で、位置精度は収束する。合わせ鏡の影響は、図5に示すようにさほど大きなものではなかった。

プログラムの検証例として、一様な線状分布双極子の電場計算を説明する。一本の線状分布の電場をガウスの法則で計算し、それを足し合わせる。

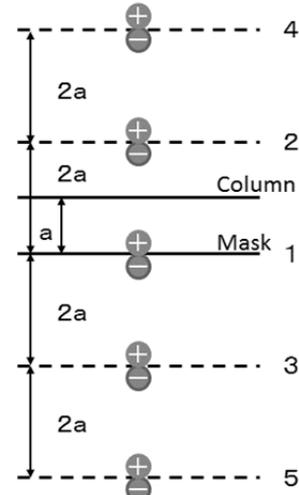


図4. 合わせ鏡の無限

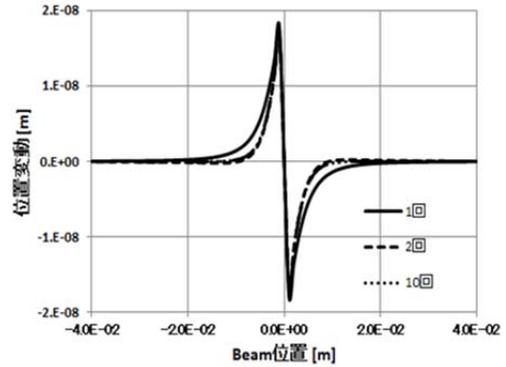


図5. 電気鏡像法の合わせ鏡による位置変動の収束

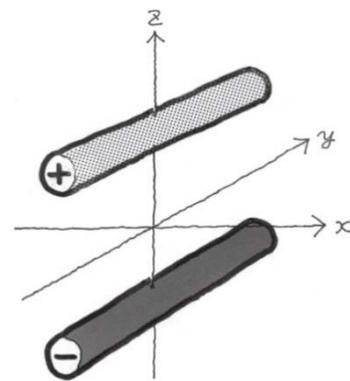


図6. y 軸に平行に2本の線状の電荷が z 方向にずれた状態

$$E_r = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{-q}{2\pi\epsilon_0 r_2}$$

それを E_x に対して解くとこのような式になる.

$$E_x = E_r \cdot \sin \theta = \frac{q dxz}{2\pi\epsilon_0 r^4}$$

図 6 より y 軸に平行に 2 本の線状の電荷が z 方向にずれた状態を考える. この際, 図 7 から Y 方向 $-\infty \sim \infty$ に存在する.

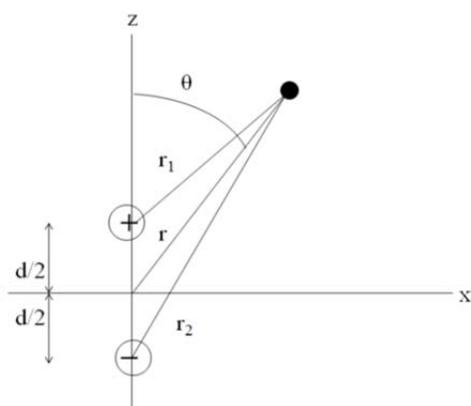


図 7. +位置と-位置から黒い点への距離の平均

次に線形という仮定を使って, z のみを変数として, この式を解く.

$$\alpha_x = \frac{-e}{m} E_x = \frac{-edqx}{m2\pi\epsilon_0 (x^2 + z^2)^2}$$

これを積分して,

$$V_x = \frac{-edqx}{m2\pi\epsilon_0} \frac{1}{2(z^2 + x^2)}$$

$$V_{xZC} = 0$$

より,

$$V_x = \frac{-edqx}{m2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{2(z^2 + x^2)} - \frac{1}{2(z_C^2 + x^2)} \right)$$

この式を更に定積分すると,

$$\Delta x = \frac{-e}{m} \frac{dq}{4\pi\epsilon_0} \left[\tan^{-1} \frac{z}{x} - \frac{xz}{2(x^2 + z^2)} \right]_{z_C}^{z_M}$$

この場合, z_C はカラムの高さで, z_M はマスク面である.

図 8 は, オイラー法, ルング・クッタ法, そして線形近似解を示した物である. 三者はほぼ一致している.

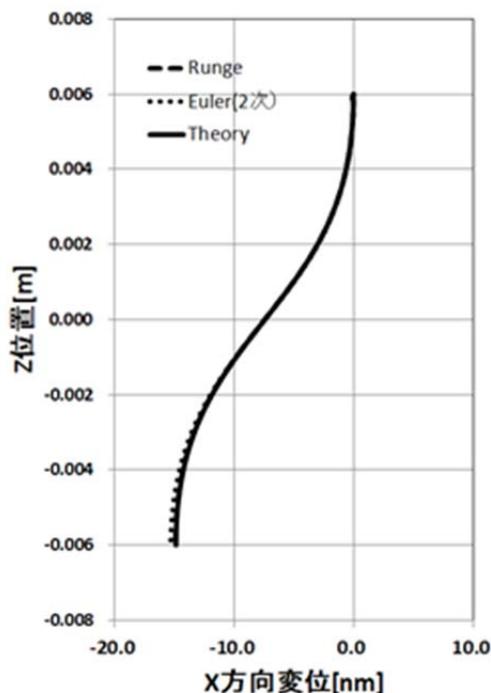


図 8. オイラー法(2次), ルング・クッタ法, 線形近似解の比較

この一致は, 変位が小さく線形性が保たれていることによる.

4. まとめ

複数の双極子の集合による電場の計算とルング・クッタ法による電子軌道計算の機能を加えて複数の双極子による電場下の電子軌道計算を作成した. 上記プログラムの検証として, 分布双極子が形成する電場下の電子軌道の線形近似とプログラムによる計算結果が一致する事を確認した.

今後は, 位置変動の測定結果に合う双極子分布モデルの構築を行っていく.

参考文献

- (1) ITRS Road Map 2012
- (2) S. Babin, et al. Proc. of SPIE Vol. 8441 (2012) 8441-55
- (3) 日本電子株式会社のホームページ
- (4) 表面科学 Vol. 24, No. 4, pp. 207-214, 2003