

氏名	さいとうけんいち 齋藤賢一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年 7月 8日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和57年3月 東北大学大学院工学研究科電子工学専攻前期課程 修了
学位論文題名	可変成形型電子ビーム描画装置の高性能化に関する研究
論文審査委員 主査	東北大学教授 横尾 邦義 東北大学教授 山之内 和彦 東北大学教授 水野 皓司

## 論文内容要旨

### 1. はじめに

将来のリソグラフィ技術として有望なX線リソグラフィ技術においては、パタン寸法 $0.1\mu\text{m}$ 以下の高精度なX線マスクの作製が不可欠であり、高解像度で、かつ高精度なX線マスク用電子ビーム描画装置の開発が急務となっている。電子ビーム描画装置の加速電圧を高くすると、色収差やクーロン効果によるビームぼけが減少するため、ビーム解像度が向上する。また近接効果が小さくなるため、描画精度も向上する。このため加速電圧100 kVの電子ビーム描画装置が開発されてきたが、従来の描画装置はポイントビーム用の電子光学系を用いているため、スループットが著しく低いという問題があった。

本研究では、この問題を解決するため、加速電圧100 kV、ビームエッジ解像度20 nmの可変成形電子ビーム描画装置EB-X2の電子光学系を開発した。また上記電子光学系を設計する上で必要な電子銃設計手法を開発した。

### 2. 高精度電子軌道追跡法の開発

加速電圧100 kVの電子銃を設計するためには、電子銃の収差、およびクロスオーバー直径を高精度に計算する必要があるが、これまで、上記を高精度に計算できる手法は確立されていなかった。本研究では、電子銃設計への適用を目的として、高次収差を含む全収差を高精度に計算できる電子軌道追跡法を開発

した。電子軌道の計算には、数値計算における桁落ち誤差を防ぐため、収差量のみを取り扱える軌道方程式（収差方程式）を初めて導入した。電磁界の算出には、3次アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法を用いた。また電子銃の取り扱いを可能とするため、要素副分割法を有限要素法に導入した。

以上の方法を用いた電子軌道追跡プログラムを作成し、アインツェルレンズを対象に計算精度を検証した。その結果、①電位の位置に関する2階微分の大きい領域まで細かく分割するメッシュ分割方法が、計算精度の向上に有効であること、②ルンゲ・クッタ法で軌道方程式を解く際の計算ステップの大きさを適切に選ぶことにより、高い計算精度が実現できること、を実証した。

最も計算精度が出しにくいとされている磁界重畳型電子銃について、実験と計算によりクロスオーバー直径を求めた。その結果、本プログラムで計算したクロスオーバー直径は、実験で求めたクロスオーバー直径と良く一致し（図1）、本電子軌道追跡法が電子銃の設計に適用できることを確認した。

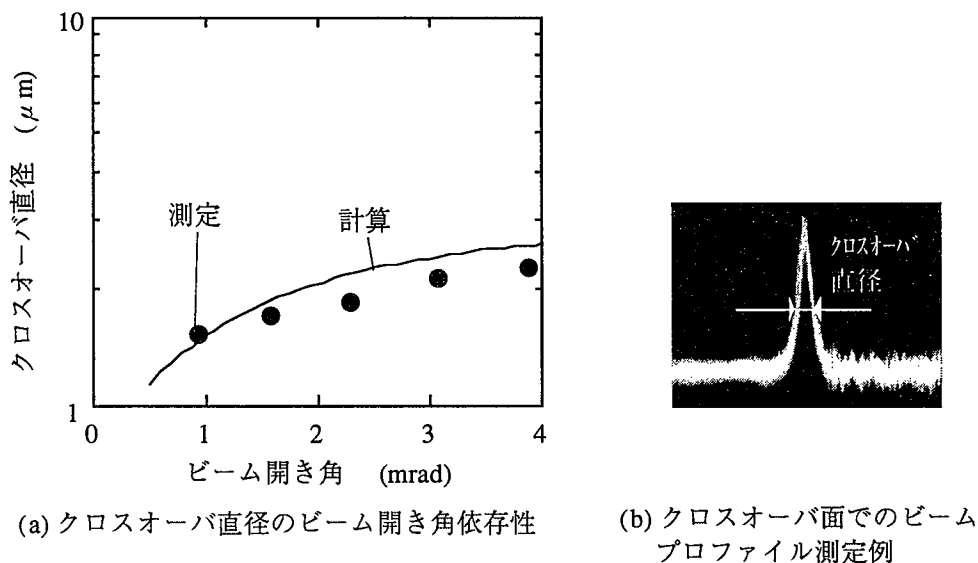


図1. 計算と実験で求めたクロスオーバー直径  
 (磁界重畳型ZrW/O電子銃、加速電圧5 kV)

### 3. 100 kV熱電子放出電子銃の開発

ビームエッジ解像度20 nmの可変成形電子ビーム描画装置EB-X2に搭載する、100kV熱電子放出電子銃を開発した。本電子銃には、高解像度の実現と鏡筒長短縮の要請から、クロスオーバー直径50 μm、電子銃部の高さ100 mm以下の性能が要求された。そこで、先に述べた電子軌道追跡プログラムを用いて電子銃のクロスオーバーを高精度に計算し（図2）、所望のクロスオーバー直径、及び高さを実現する電子銃構造を定めた。

高加速電圧化に伴いビーム電力が増大し、電子銃部に設置するクロスオーバー制限アパーチャが熱溶解することが懸念される。そこで有限要素法を用いた熱伝導計算プログラムを用いて、電子銃構造とアパーチャ温度との関係を調べ、アパーチャが熱溶解を起こさない電子銃構造を設計した。

以上の設計に基づき電子銃を製作し、クロスオーバー直径とアパーチャ熱溶解の有無を観察した。その結果、クロスオーバー直径の測定値は計算とよく一致し、アパーチャの熱溶解も生じないことを確認した。以上により、本電子銃がEB-X2の電子光学系の実現に十分な性能をもつことを示した。

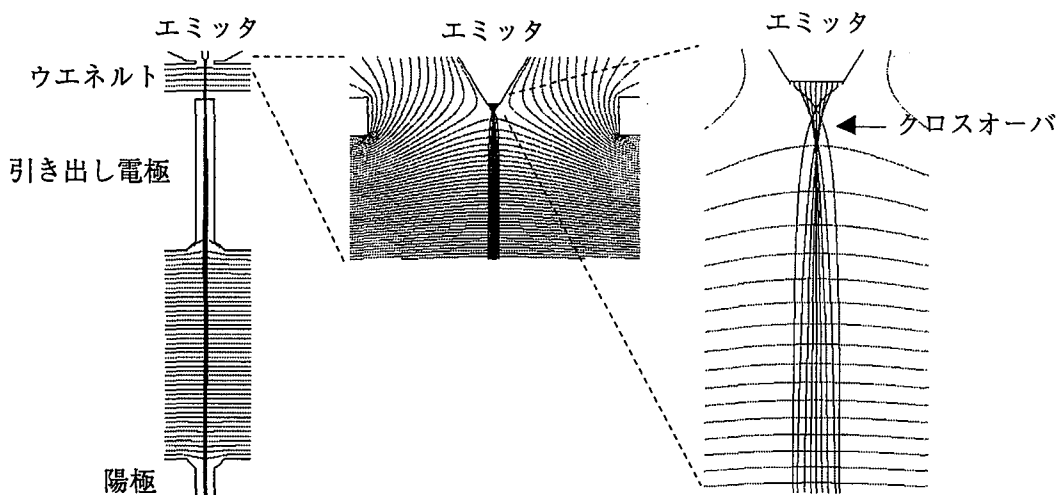


図2. 電子軌道追跡法による電子軌道計算例  
(エミッタ先端面の直径 $100\mu\text{m}$ 、電子の放出エネルギー $1\text{eV}$ )

#### 4. EB-X2電子光学系の設計

加速電圧 $100\text{kV}$ 、ビームエッジ解像度 $20\text{nm}$ を目標に、電子ビーム描画装置EB-X2用の可変成形ビーム光学系を設計した。

ビームエッジ解像度を向上させるため、一様偏向集束場理論に基づき対物偏向系を設計した(図3)。3次収差計算の結果、本対物偏向系においては、試料面でのビーム開き角を $4\text{mrad}$ にすることによりビームエッジ解像度が最小になることがわかった。そこでビーム開き角を $4\text{mrad}$ とするよう、電子銃、および第2照射レンズの構造を定め、ビームエッジ解像度 $20\text{nm}$ を満足する電子光学系を実現した。

加速電圧 $100\text{kV}$ 化により電子光学鏡筒は通常長くなるが、EB-X2のクリーンルーム内での使用を前提に鏡筒の短縮が必要となった。そこでレンズ配置と鏡筒長との関係を詳細に検討した。その結果、第2照射レンズの主面位置と第1成形アパーチャ位置とを一致させることにより鏡筒長が最小になることを見出し、従来装置の $1/2$ に相当する高さ $880\text{mm}$ の電子ビーム描画装置を実現した。

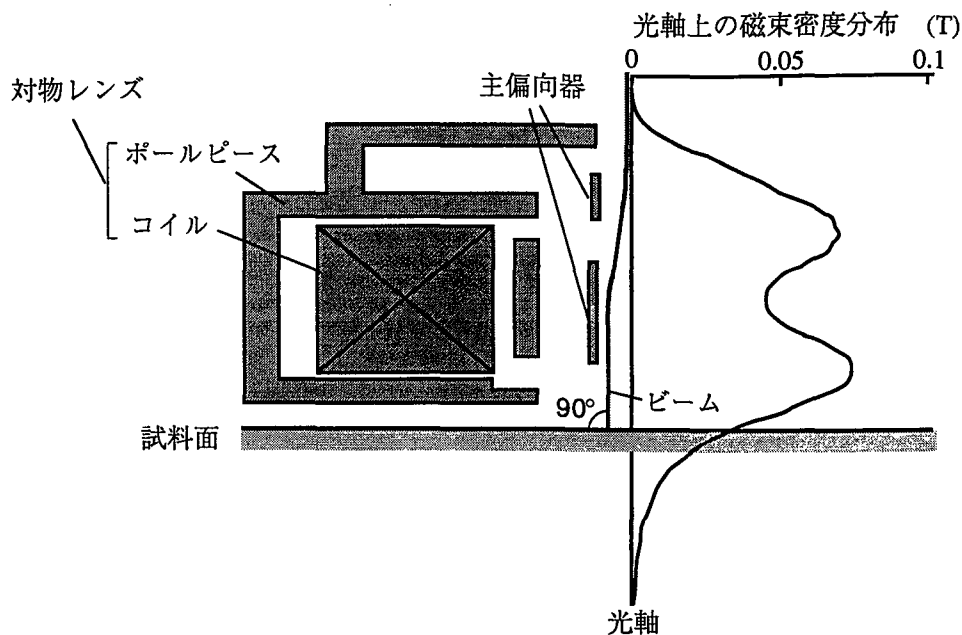


図3. 対物偏向系の構造

(一様偏向集束場理論とは、一様な集束磁界と一様な偏向電界を重畳させると、低収差で、かつ試料面に垂直入射するビームが得られるというもので、対物偏向系を設計する指導原理のひとつである。本設計では、光軸上の集束磁界がほぼ一様になるように対物レンズのポールピース形状を定め、この中に一様な偏向電界を発生する主偏向器を配置した。)

## 5. EB-X2電子光学鏡筒の立ち上げ、評価

先に述べた設計に基づき、加速電圧100 kV、ビームエッジ解像度20 nmのEB-X2用電子光学鏡筒を製作し(図4)、立ち上げ、評価を行った。

鏡筒の製作においては、アライナ系、ビーム計測系を本体に組み込み、高精度なビーム調整を可能とした。立ち上げにおいては、膨大な測定・調整項目を3段階に分類し、効率的に作業を進めることにより、電子光学鏡筒の立ち上げを4カ月間で完了した。ビーム特性を測定した結果、ビームエッジ解像度の測定値はビーム電流200 nAで20 nmとなり(図5)、本電子光学鏡筒が目標性能を満足することを確認した。

## 6. まとめ

加速電圧100 kV、ビームエッジ解像度20 nmを実現する可変成形電子ビーム描画装置EB-X2の電子光学系を開発した。収差方程式を初めて導入した高精度電子軌道追跡法を開発し、これを用いて100 kV電子銃の高性能化を図った。またレンズ構成を最適化することにより、鏡筒長が短く、かつ低収差の電子光

学系を設計した。これらに基づき電子光学鏡筒を製作し、ビーム特性を測定した。その結果、ビーム電流 $200\mu\text{A}$ 以下でビームエッジ解像度が $20\text{nm}$ 以下となり、本鏡筒が目標性能を満足することを確認した。以上により、パタン寸法 $0.1\mu\text{m}$ 以下のX線マスクを高速・高精度に描画できるEB-X2の電子光学系の開発を完了した。

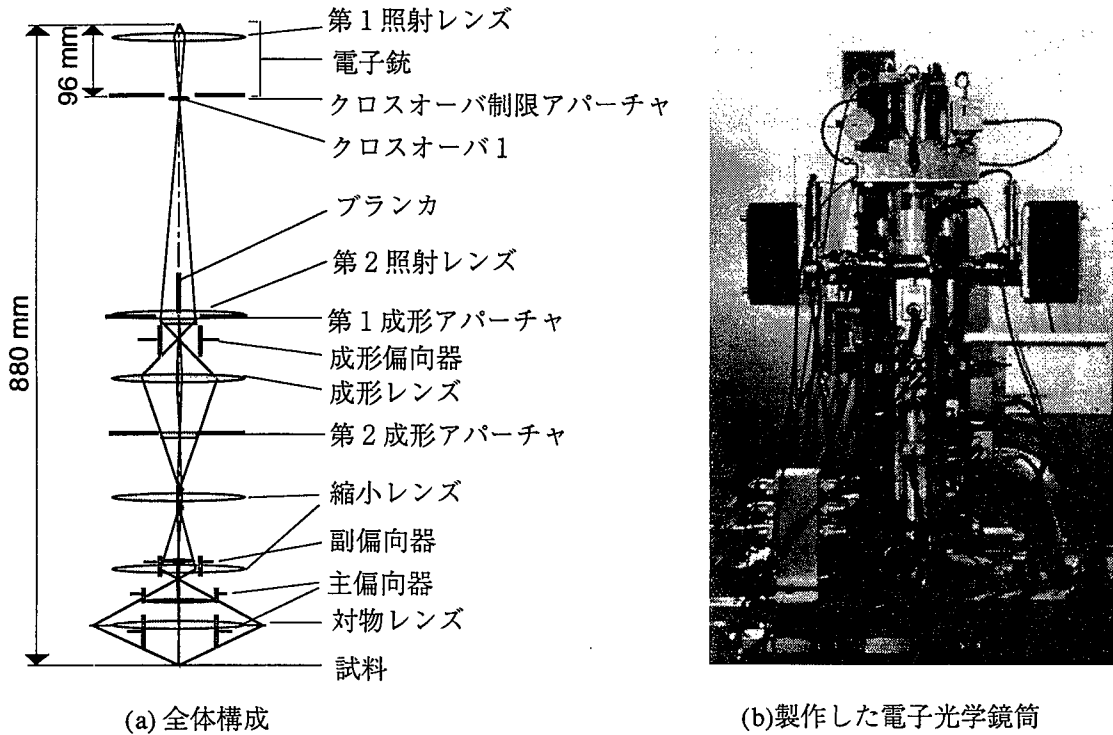


図4. EB-X2電子光学系

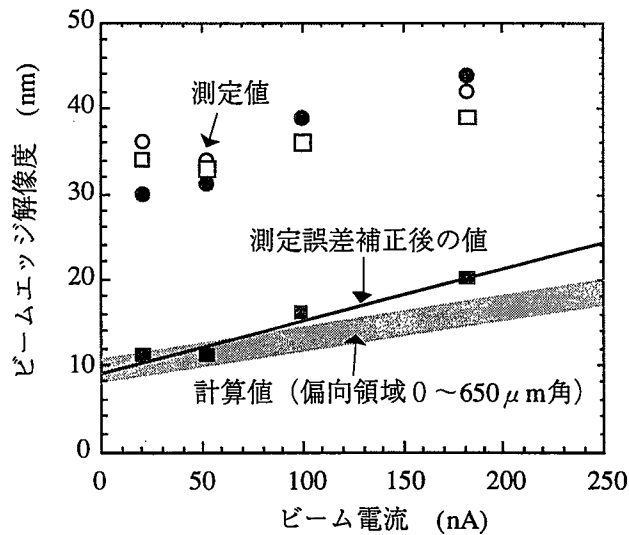


図5. 測定と計算で求めたビームエッジ解像度のビーム電流依存性 (偏向領域:  $\circ=0\mu\text{m}$ 角、 $\square=300\mu\text{m}$ 角、 $\bullet=600\mu\text{m}$ 角。測定誤差補正後の値は、上記偏向領域に対する測定値の平均から測定誤差を引いた値。)

## 審査結果の要旨

LSIの回路寸法の微細化に伴い、X線リソグラフィ技術はますます重要性を増しており、高解像度、高精度のX線マスク用電子ビーム描画装置の開発が急務となっている。このため、加速電圧100kVの電子ビーム描画装置が開発されているが、従来の装置ではポイントビームを使用しているため、描画速度が著しく遅く、実際のLSIへの適用は困難であった。

著者は、高解像度で高速描画のための加速電圧100kVの変形成型電子ビーム描画装置の電子光学系を開発し、ビームエッジ解像度20nmを実現した。本論文はその成果を取りまとめたもので全文6章よりなる。

第1章は序論である。第2章では、電子銃の収差、およびクロスオーバー直径を高精度に計算するための収差方程式の概念を導入した電子軌道追跡法を開発して、これを磁界重畳型電子銃に適用し、ビーム特性の評価からこの電子軌道追跡法が高精度な電子銃設計に適用できることを実証した。これは、広範な電子光学系の高精度な設計に適用できるもので評価できる。

第3章では、前章で開発した電子軌道追跡法を用いて高解像度の可変形成型電子ビーム描画装置に使用するための100kV熱電子放出電子銃を設計し、ビームエッジ解像度20nmを確保するためのクロスオーバー直径50 $\mu\text{m}$ を実現した。

第4章では、高解像度を実現するための可変形成型電子ビーム描画装置用の電子ビーム光学系の設計について述べている。集束磁界と偏向電界とを重畳する対物偏向系において、3次収差計算の結果より、試料面でのビーム開き角を4mrad とすることによりビームエッジ解像度が最小となることを明らかにしている。また、加速電圧の高電圧化に伴い電子光学鏡筒は通常長くなるが、第2照射レンズの主面位置と第1成形アパーチャ位置とを一致させることにより鏡筒長の最小化に成功し、従来の電子ビーム描画装置の半分の鏡筒長を実現した。これらは高解像度電子ビーム描画装置の実用化にとって、重要な成果である。

第5章では、第4章までに設計した加速電圧100kV、可変形成型電子ビーム描画装置の電子光学鏡筒を製作し、その立ち上げとビーム特性の評価を行った結果について述べている。ナイフエッジ法によりビーム特性を測定した結果、ビーム電流 200 nAでビームエッジ解像度20nmを実現した。また、本可変形成型電子ビーム描画装置を用いて、ライン・アンド・スペースパターンを描画した結果、60nmのパターンの描画を確認し、パターン寸法0.1 $\mu\text{m}$ 以下のX線マスクの製作に適用できることを実証した。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、高解像度可変形成型電子ビーム描画装置を開発し、パターン寸法0.1 $\mu\text{m}$ 以下のX線リソグラフィに用いるためのX線マスクの高速描画を可能としたもので、電子工学、半導体工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。