

# 研究報告書

## 「ナノシステムの大規模集積化に向けた高速電子線露光法の開発」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 21 年 10 月～平成 25 年 3 月

研究者: 木村 建次郎

### 1. 研究のねらい

CPU の高速化には、半導体素子の微細化が不可欠である。半導体素子の作製において、その微細化の鍵となるのが半導体露光装置であり、その光源をいかに短波長化するかが、量産向けの露光装置開発の中心的技術課題である。一方、研究用途では電子顕微鏡の応用技術である電子線露光装置が用いられ、10 nm 以下の半導体素子が試験的に開発され、その高速動作が実証されてきた。しかしながら、X 線より遥かに短い波長の波動を得ることが可能な電子線は、光において行われているように、LSI の回路情報に相当する任意のパターンを持つ電子線の束を発生する方法が未だ確立されていないこと、特定の回路情報を持つ電子線束の発生が実現されたとしても、大面積の電子線を均一に集束投影するための無収差投影技術が確立されていないことなどが、技術的課題として挙げられ、最先端半導体素子の量産用途において、用いられていないのが現状である。

そこで、本研究では、量産用の電子線露光装置の実用化に向けて、「任意のパターンを持つ電子線束を発生させる方法」と「電子線の光学系における収差の低減方法」について、独自に提案した要素技術の原理実証を行う。特に後者は、すべての荷電粒子顕微鏡の性能向上に係る基礎的な研究として位置付けている。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究の成果は、回路情報を持つ大面積の電子線束を均一に縮小投影させるための要素技術「任意のパターンを持つ電子線束を発生させる方法」と「電子線の光学系における収差の低減方法」の原理実証の成功である。前者においては、半導体製造装置の分野とはかけ離れた暗視装置の分野で主に用いられるマイクロチャンネルプレート(Micro-Channel Plate: MCP)を電子線束の発生に使用する点に大きな工学的発見がある。実際に、MCP を用いた電子線露光装置は、本研究期間中に米国で基本特許が成立した。MCP は光電子倍增管を束にしたデバイスで、片側に光電変換膜を備え、光電変換膜に入射した光子は電子に変換され、管内にて数万倍に増幅された後、反対側から電子線束として出射される。暗視装置としては広く実用化され、月明かり程度で数千メートル先を視ることができる。すなわち、MCP は、光のパターンを増幅された電子線束のパターンに変換するデバイスと表現することができる。露光を高速に行うためには、電子線の投影面において、各点あたり最大 nA 程度の電流を必要とする。一括露光装置の電子光学系においては、収差低減を目的として、電子線束をエネルギーフィルタ、球面収差補正機を通過させ、総電流値が抑制されるため、レンズ入射時の電流値を十分に確保するために、光電変換時の増幅が不可欠となる。加えて、MCP を用いる利点として、MCP に照射する光にパターンを加えることで、パターンニングされた電子線束

を得ることができるため、電子線のマスクが不要となる。従来の一括電子線露光装置におけるマスク貼り合わせによる位置精度の悪化の問題が回避されるため、均一なパターン露光が実現されることも期待できる。MCP の光電変換膜に照射する光のパターンの生成は、プロジェクタにおいて実用化にされている DMD (Digital Micro-mirror array Device) を用いる。本研究にて提案した露光法を纏めると、パターン光を MCP に集束、照射し、電子線束に変換後、電子光学系にて半導体基板に集束、投影する方式となる。

## (2) 詳細

### 研究テーマ

#### 「任意のパターンを持つ電子線束を発生させる方法 - MCP 電子線露光装置の開発 -」

図 1 に示す MCP 電子線露光装置の試作機を開発し、原理実証に成功した[1, 2]。本装置の開発要素を列挙すると、「① 光パターンの生成と MCP への照射」「② 光電変換」「③ MCP 出射電子のコレリメートと集束」「④ 光軸調整」となる。4 つの開発要素の中で、最も装置開発コストの増大と直結するのが、②の光電変換である。MCP 端面の光電変換膜はアルカリ金属を主成分とし、大気解放することができない。そのため、常に高い真空度を維持した真空チャンバーを電子光学系とは別に設置しなければならない。そこで、本研究では、耐酸化性を有し、紫外光によって光電変換可能なヨウ化セシウムを光電変換膜の材料として選定し、真空に係る装置コストを削減した。そのため、励起光源としては、真空紫外光(波長 172nm)を採用し、加えて、MCP 出射電流値を向上させるため、内部に鏡面を備え、指向性を高めたヘッドオン型の紫外光源ランプモジュールを採用した。また、MCP 全面に均一に真空紫外光が照射されるように、ランプモジュールを XYZ ステージ上に設置し、光強度の分布を調整可能な仕様にした。真空紫外光が絶縁碍子に照射されると耐圧が低下するため、ランプモジュールと MCP 光電変換面に金属製のガイドチューブを設置し、絶縁破壊による MCP の損傷を防いだ。MCP からの出射電子は、ウェーネルト電極により逆バイアスを印加することで発散を防ぎ、集束レンズに入射させた。電子光学系としては、装置製作コストが安価で、入射電子線のエネルギーと

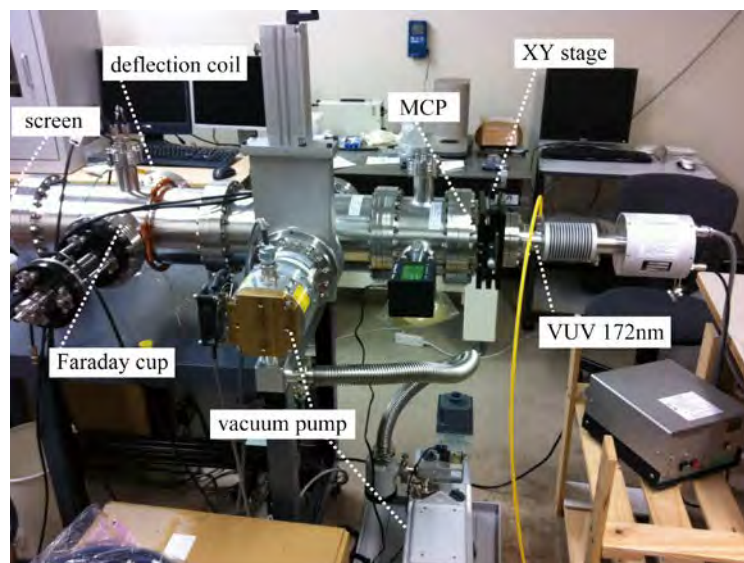


図 1: 任意のパターンを持つ電子線束を発生させる MCP 電子線露光装置

出射電子線のエネルギーが等しく、制御性の良いアインツェルレンズ 2 段構成を採用した。光路での電子線束を評価するために、ファラデーカップを挿入、2次元走査する機構を 2 箇所設け、さらに電子線束の投影位置には蛍光板を設置し、パターンの集束性を評価した。また、光軸の調整のため、2 段目のアインツェルレンズを位置調整可能にし、また MCP 背後にマスクを設置する機構を設け、光軸を Z 軸とした場合、マスク中心位置の XY 座標を調整可能とした。また、投影位置の XY 座標調整のため、光軸に磁束が直交するように、ヘルムホルツコイルを設置した。

以上のシステムを荷電粒子線装置メーカーであるオメガトロン社とともに、設計、試作し、世界で初めて、MCP 電子線露光装置でパターンの縮小投影の原理実証に実験に成功した。最大 10 分 1 の倍率で縮小が達成でき、ピクセル解像度としては、2 ミクロン径の MCP ポアを使用した場合、200 nm の解像度が実現できる。また、1000 時間の電流安定性を確認したと同時に、マスク交換のための大気開放後にも MCP の劣化は見られなかった。

### 3. 今後の展開

今後は、本研究にて原理実証した収差補正機を搭載した電子顕微鏡を実現し、卓上の電子顕微鏡にて 1nm の空間分解能を目指す。また、スーパーコンピュータ京と連携した収差補正機を実現し、世界最高性能の電子顕微鏡の実現、電子波散乱トモグラフィの実現をめざし、物質解析技術の進展に貢献する。さらに、それらの高精度電子光学技術を MCP 電子線露光装置に応用し、10 nm 以下の最先端半導体素子の量産に寄与する計画である。

### 4. 自己評価

本研究にて原理実証した MCP 電子線露光法、収差補正機ともに、世界的にも前例のない方法である。半導体露光装置は、製造費として 10 億円程度必要とする。今回は、その 20 分の 1 のファンドにおいて、原理実証に成功したことは、必要な精度を出すための無数にある開発事項の篩い分け、工夫の集積に成功しており、工学上、大変意味のある結果であると理解している。すなわち、原理実証が成功した現時点で、装置の高精度化を行うための投資、開発リスクを大幅に低減することができた。後半の収差補正機の開発は、荷電粒子線装置史上、現状では前例が見つかっていない。現時点で、電子光学レンズを同じ性能で 20 分の 1 に小型化可能であることが計算機実験により実証されている。これは超小型高分解能電子顕微鏡が実現されることを意味し、また一括電子線露光装置の高精度化、超高分解能電子顕微鏡の実現など顕微鏡分野において重要な進展であると理解している。

### 5. 研究総括の見解

本研究は、量産用電子線露光装置の実用化に向けて、①「任意のパターンを持つ電子線束を発生させる方法」②「電子線の光学系における収差の低減方法」について提案し、要素技術の原理実証を行うことを目的としている。電子線は、任意のパターンを持つ電子線束を発生する方法が確立されていないこと、大面積の電子線を均一に集束投影するための無収差投影技術が確立されていないことが背景にある。

課題①については、マイクロチャネルプレート(Micro-Channel Plate: MCP)を電子線束の発生に使用するという独自の方法を提案し、世界で初めて、MCP 電子線露光装置でパターンの縮小投影の原理実証に成功した。(米国基本特許が成立)。本研究の成果は、回路情報を持つ大面積の電子線束を均一に縮小投影させるための要素技術となる重要な成果といえる。

課題②は、荷電粒子線輸送、照射装置の性能向上にとって重要な基礎課題であり、早期実用化が要請されている重要な研究課題である。独自に「近軸光線レンズ」を発案しその原理実証に成功した。本研究にて原理実証した MCP 電子線露光法、収差補正法ともに、世界に前例のない方法であり、「さきがけ」という限られた予算と期間内にこのような世界最先端の原理が実証され、試作されたことは、特筆に値する。

今後は、本研究にて原理実証した収差補正機を搭載した世界最高性能の電子顕微鏡の実現や電子波散乱トモグラフィの実現をめざしてほしい。そのためにも本研究者(木村建次郎)に長期的研究継続が可能な措置をひきつづき考慮することが望まれる。

## 6. 主な研究成果リスト

### (1)特許出願

研究期間累積件数: 2件

1.

発 明 者: K.Kimura, K.Kobayashi, H.Yamada, K.Matsushige

発明の名称: ELECTRON BEAM IRRADIATION DEVICE

出 願 人: 京都大学

特許成立日時: 2010/11/9

特許番号: US 7,829,863 B2

2

発 明 者: 木村 建次郎, 芳賀沼 哲夫

発明の名称: 電子線照射装置,

出 願 人: 神戸大学

出 願 日: 2011/8/5

出 願 番 号: 2011-171729

### (2)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

3, Kenjiro Kimura, Ryu Haganuma, Shunsuke Haganuma, Testuo Haganuma

“Maskless Electron Beam Stepper”, 国際ナノテクノロジー総合展, 2010年2月17~19日.

4, 木村 建次郎

“次世代半導体デバイス検査技術、製造技術に関する研究”, 村田製作所, 2010年10月26日.

5, Kenjiro Kimura, Ryu Haganuma, Shunsuke Haganuma, Testuo Haganuma

“Maskless Electron Beam Stepper”, 国際ナノテクノロジー総合展, 2011年2月16日~18日.

6, Kenjiro Kimura, Ryu Haganuma, Shunsuke Haganuma, Testuo Haganuma

“Maskless Electron Beam Stepper”, セミコン・ジャパン 2011, 2011年12月7日~9日.

7, Kenjiro Kimura, Notarisation by notary public in Kobe, register No. 47 2012/3/1.

