

電子ビームを用いた造形システムの検討

小幡 睦憲
機械電子部

Study of Stereolithography System with Electron Beam

Mutsunori OBATA
Mechanics & Electronics Division

要旨

電子ビームを用いて、モノマー樹脂を硬化させて、微細な立体形状を作成するための造形システムについて検討を行った。電子ビームは電荷をもっているため、絶縁物であるモノマー樹脂に照射すると、樹脂表面上に電荷が帯電するチャージアップが発生する。このチャージアップを避けるためには、照射電流と樹脂から発生する2次電子量を等しくして、樹脂上に帯電が発生しないようにする必要がある。加速電圧を変化させて、モノマー樹脂に電子ビームを照射し、モノマー樹脂から発生する2次電子の電流量を測定した。その結果、加速電圧が1.4kVの時に、照射電流量と樹脂から発生する2次電子量が等しくなることがわかった。モノマー樹脂DF-162N（日本化薬製）を使用して露光実験を行った結果、最適露光量は $0.03\sim 0.5\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ であった。 $1\ \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 以上では硬化樹脂の収縮が発生した。

今回の検討で、最適な加速電圧を選択すれば、チャージアップの発生なしに、電子ビームを照射できることがわかった。今後は、詳しい露光特性や積層方法について検討を進めていく予定である。

1. はじめに

現在、光による造形システムは、3次元光プロッターとして、複雑な立体形状の作成に使用されている。一方、電子ビームは半導体などの微細パターン形成に既に幅広く使用されており、電子ビームが優れた微細加工のツールであることは言うまでもない。このため、微細な立体形状の作成ツールとして、電子ビームの検討を行うことは、重要であると考えられる。このようなシステムが完成すれば、光造形システムでは形成できない微細な立体形状作成用に、幅広く使用されることが期待できる。

このような観点から、微細加工のための造形システムについて検討したので、それについて述べる。

2. 電子ビームを用いた造形システム

2.1 造形システム

Fig.1は光造形システムの概略図を示している。自由液面方式と呼ばれる方式で、1層硬化するごとに、液層のなかにステージを降下させて、徐々に積層していく方式を取っている。ここで、Fig.1のレーザー光を電子ビームに置き換えるわけである。この際、硬化性樹脂が絶縁物であるために、電子ビームによる電荷が絶縁物である硬化性樹脂の上にたまることによって、チャージアップが発生する。これは、電子顕微鏡で絶縁物を観察したときに発生するチャージアップ現象と同じである。チャージアップが発生する

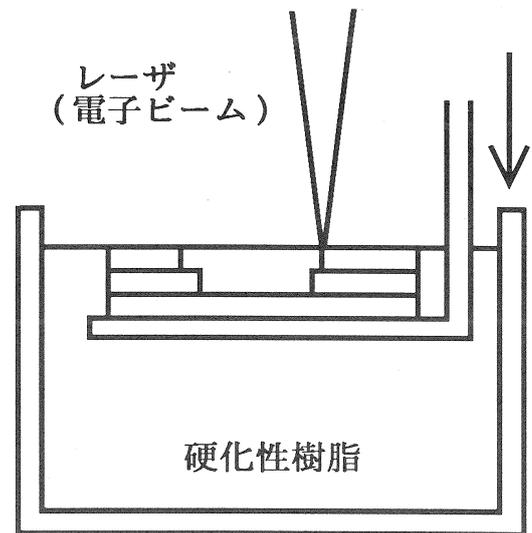


Fig.1 造形システム

と試料付近で電場が発生し、その電場によって電子ビームが偏向されるために、正確な電子ビームの位置制御ができなくなる。

一般に電子ビームを試料に照射すると2次電子が発生する。入射電子量と発生する2次電子量が等しければ、原理的には試料上で、チャージアップは発生しない。ここで、2次電子発生効率 δ ¹⁾として

$$\delta = \frac{\text{2次電子量}}{\text{入射電子量}}$$

を用いることにする。2次電子発生効率 δ が1より小さければ、入射電子量より2次電子量が少ないので、負に帯電する。また、 $\delta = 1$ の時は、入射電子量と2次電子量が同じとなり、試料は原理的に帯電しない。試料によって2次電子発生効率は異なるが、一般的には加速電圧1000eV付近に $\delta = 1$ となる場所が存在する。このため、チャージアップを避けるためには、加速電圧を1000eV付近にする必要がある。

2.2 適正な加速電圧の検討

電子ビームは質量($9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$)、電荷 e ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)をもつ粒子であると同時に、波動性をもっている。ドブロイによる物質波と相対論的補正を考慮すると、加速電圧 V (volts) に対する電子の波長 (λ) の関係式²⁾は

$$\lambda = \sqrt{\frac{1.5}{V}} \left[1 + 0.9778 \times 10^{-6} V \right]^{-1/2} \quad (\text{nm})$$

で表される。

2次電子発生効率を考慮した加速電圧1000eVを関係式に代入すると、波長 λ は0.038nmとなる。現在使用されている3次元光プロッタの光の波長 λ は約300~600nmなので、加速電圧1000eVの電子ビームは、エネルギー的に十分使用できる光源であることがわかる。

2.3 実験装置

Fig. 2は今回使用した実験装置を示している。真空系はオイル拡散ポンプ(DP)とロータリーポンプ(RP)の2段排気である。電子ビームはタンングステンフィラメント

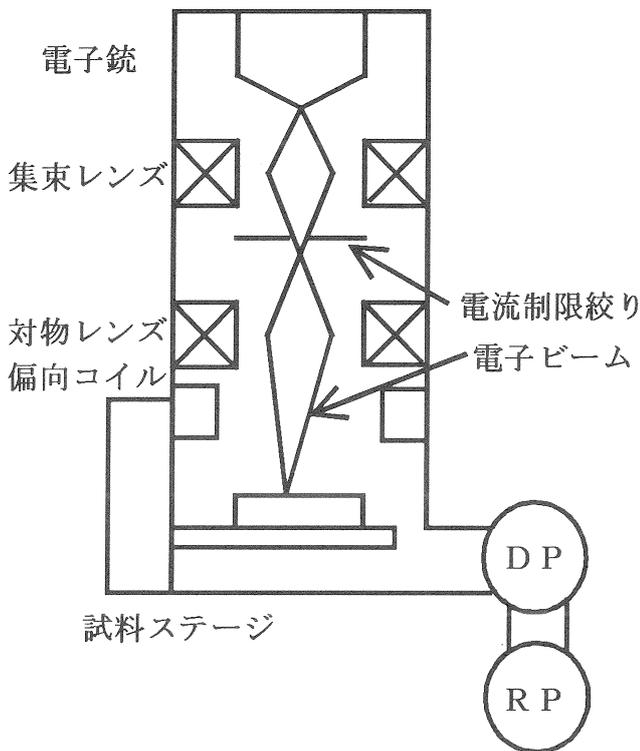


Fig. 2 実験装置

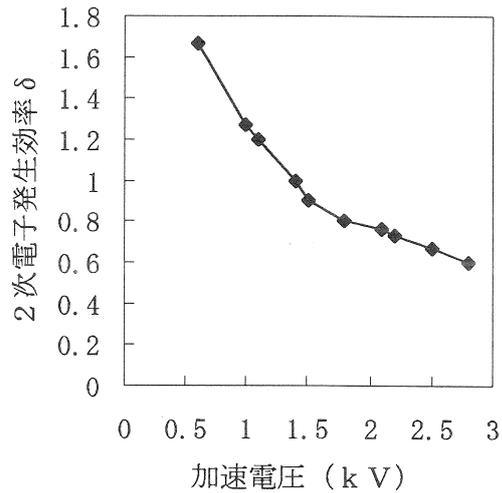


Fig. 3 樹脂の2次電子発生効率

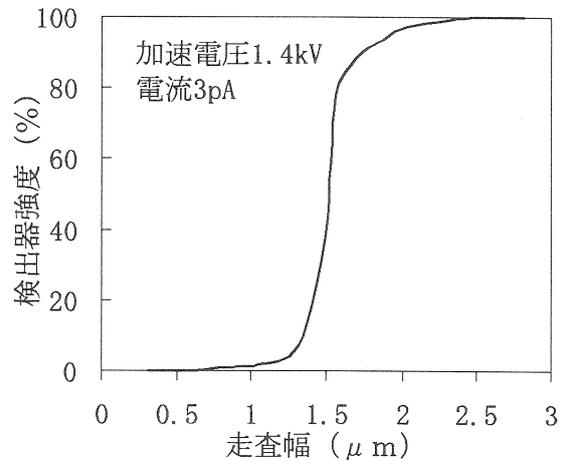


Fig. 4 ビーム径測定結果

より発生し、集束レンズ、対物レンズを経て偏向コイルによって試料ステージ上に照射している。照射電流の調整は、集束レンズを使用して、制限絞りへの電子ビームの入射角を変化させることで行っている。加速電圧は0.5kVから30kVの範囲で変化できる。

2.4 2次電子発生効率の測定

Fig. 3は加速電圧を変化させながら、2次電子発生効率を測定した実験結果である。横軸は照射した電子ビームの加速電圧を、縦軸は2次電子発生効率を示している。硬化樹脂は日本化薬(株)製のDF-162Nを使用した。

実験は各測定電圧において、ファラデーカップを用いて試料電流を15pAに設定した後、ステージを移動して、硬化樹脂に電子ビームを照射した。そして、試料電流を測定することで、樹脂から発生する2次電子量を測定した。

加速電圧が1.4kV時に、2次電子発生効率が1となり、

入射した電子量と樹脂から発生する2次電子量が等しくなっていることがわかる。

2.5 ビーム径の測定

Fig. 4は加速電圧1.4kV、電流3pAでビーム径を測定した結果を示している。横軸は電子ビームの走査幅、縦軸は2次電子検出器の信号強度を表している。信号強度の80%をビーム径として評価すると、0.5 μmのビーム径が得られた。同じ加速電圧1.4kV、ビーム電流15pAの時、ビーム径は1.1 μmであった。加速電圧が1.4kVでも、10ミクロンサイズの造形を行うのに十分なビーム径が得られている。

3. 露光特性評価

モノマー樹脂として、日本化薬(株)製DF-162Nを用いて、露光特性評価を行った。樹脂材料をSiウエハ上に2000回転/minで塗布し、加速電圧1.4kV、ビーム電流15pA、露光量0.004~1 μC/cm²で露光特性の評価を行った。

Fig. 5はその結果を示している。最適露光量は0.03~0.5 μC/cm²であった。1 μC/cm²以上では硬化樹脂の収縮が発生した。

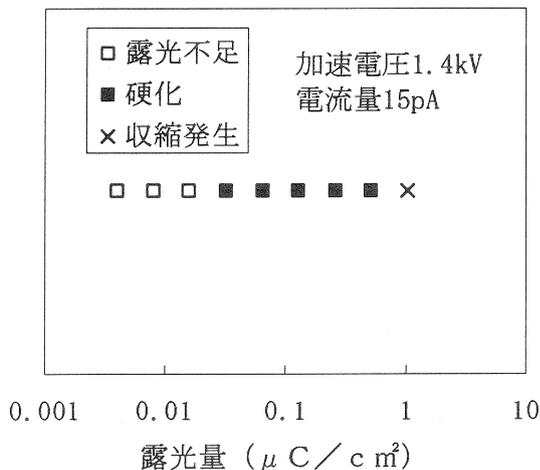


Fig. 5 露光特性評価結果

4. まとめ

微細な立体形状を作成するための造形システムについて検討を行った。電子ビームを硬化樹脂に照射することによって、硬化樹脂が帯電し、チャージアップが発生する。加速電圧を変化させて、樹脂から発生する2次電子量を測定した結果、加速電圧を1.4kVにすれば、チャージアップが発生しないことがわかった。また、加速電圧1.4kV、ビーム電流3pAの時、0.5 μmのビーム径が得られた。

露光特性の評価を行った結果、最適露光量は0.03~0.5

μC/cm²であった。1 μC/cm²以上では硬化樹脂の収縮が発生した。

今後は、硬化時の電流依存性、分解能、硬化深さなど硬化に関する基本的な特性についての実験や積層方法の検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 難波 進 編者：“マイクロプロセスハンドブック”，工業調査会，pp98-104
- 2) 日本学術振興会薄膜第131委員会編：“薄膜ハンドブック”，pp368