

電子線照射部分は、現像液に対して不溶となるため残るが、未照射部分は、溶解するものである。また、通常、レジストはポジ、ネガを問わず、電子線を照射するだけで膜表面から基板面まで化学的変化が完全に生じる。このようなレジストをデジタル型のレジストと呼ぶ。これに対して、電子線照射量を変えることにより、照射量に応じてレジストの化学的変化をコントロールして、レジストの残膜率を変化させることが可能なレジストも開発されつつある。このようなレジストをアナログ型のレジストと呼ぶ。

特に、光学素子作製に必要なレジスト特性とは、

(1) 感度が高いこと（電子線描画時間の短縮によるスループットの向上）、(2) 電子線照射量に応じてレジストの残膜率が変わること（アナログ型）、(3) ドライエッチング耐性があること（得られたレジスト形状をガラス基板などに転写することが可能）、などがあげられる。もちろん、プロセスに安定であり、使いやすいレジストであることも求められる。従って、適切なレジストを使用し、電子線照射量をうまく制御し描画を行えば、現像後、ブレード（三角形）のような断面形状を持ったパターンの作製も可能となる。また、マイクロレンズやホログラフィー素子などの作製も容易になる。

これまで光学素子作製用電子線レジストとして、ポリメチルメタアクリレート（PMMA）誘導体を用いているが、感度が低いことやドライエッチング耐性に優れないなどの理由で、必ずしも光学素子作製用レジストとして適しているとは言えない。市販の他の電子線レジストも半導体デバイス作製用（デジタル型）であるため、光学素子作製には不向きである。また、現在使用されているレジストは炭素を主成分としており、より耐エッチング性が高いと期待されるケイ素系の電子線レジストの開発が望まれている。そこで、本報告では、ケイ素-酸素（シロキサン）結合を有するポリシロキサン化合物に焦点をあて、その電子線に対する挙動・特性の検討を行い、さらに実際のプロセスを行う上で必要な安定性についても調査した。また、本化合物を用いて作製した簡単な光学素子についても紹介する。

2. 感度曲線の測定

実験に用いたポリジメチルシロキサンポリマー（DMS）およびビニルメチルシロキサン（1-2%）-ジメチルシロキサンコポリマー（VMDMS）の構造を図1に示す。感度曲線の測定を行うために以下の実験

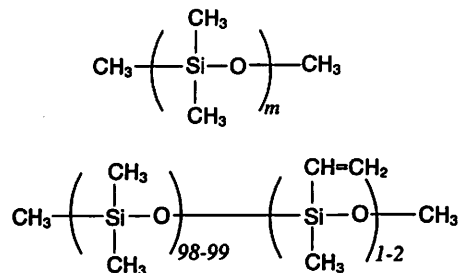


図1 ジメチルシロキサンポリマー（DMS）、ビニルメチルシロキサン（1-2%）-ジメチルシロキサンコポリマー（VMDMS）の構造

Structures of dimethylsiloxane polymer (DMS) and vinylmethylsiloxane (1-2%) - dimethylsiloxane copolymer (VMDMS)

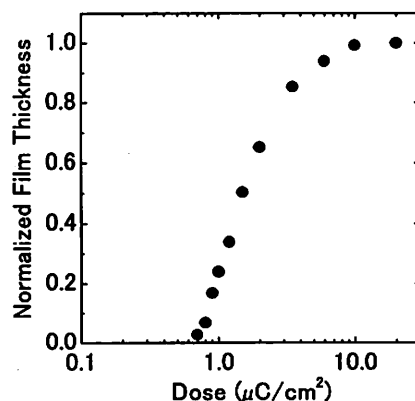


図2 DMSの感度曲線
Sensitivity curve of DMS

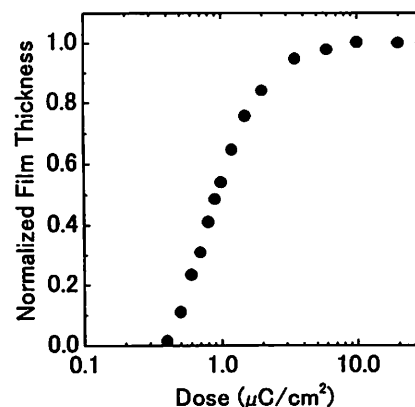


図3 VMDMSの感度曲線
Sensitivity curve of VMDMS

を行った。DMSおよびVMDMSをトルエンに3.5wt%濃度になるように溶解させた。得られた溶液を2000rpmでSi基板にスピコートを行った。その後、170°C

のホットプレートで2分間プリベークを行った。得られた膜厚はおよそ 600nm であった。この薄膜に、さまざまなドーズ量で $50\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ の矩形の描画を行った。用いた電子線描画装置は JBX-5000SI (日本電子株式会社製) である。描画は加速電圧 50KV, 電流値 50pA で行った。描画後、テトラヒドロフラン：アセトニトリル=8：2 の混合液で、2分間現像を行った。他の実験でも、ここで用いたものと同じ混合液を使用して現像を行った。現像後のパターンの残膜量は、干渉顕微鏡 New-View5020 (ZYGO 社製) で測定を行った。

図 2, 図 3 は、実験より得られた DMS および VMDMS の感度曲線である。横軸が電子線照射量, 縦軸が規格化された残膜率である。図 2, 図 3 から分かるように電子線照射量を増加させると残膜率が大きくなる。従って, DMS, VMDMS 共にネガ型の電子線レジストであることが分かる。

図 2, 図 3 から感度 (50%残膜するドーズ量) とガンマ値 (感度曲線の傾きを表す値) を求めると, DMS に対しては感度 $1.5\mu\text{C}/\text{cm}^2$, ガンマ値 1.2, VMDMS に対しては感度 $0.9\mu\text{C}/\text{cm}^2$, ガンマ値 1.3 が得られた。このことから, ビニル基を導入すると感度が向上することが分かった。得られた感度は, 代表的な電子線レジストである PMMA と比較すると2桁ほど高い値であった。一般に, ガンマ値は高すぎる (感度曲線の傾きが大きい) と, 電子線照射量を変調させて, 残膜率を制御するのが困難となる。反対にガンマ値が低すぎる (感度曲線の傾きが小さい) と, 残膜率を制御するのに必要な電子線照射量の変調量が大きくなり, 電子線描画が困難となる。得られた DMS, VMDMS のガンマ値は光学素子を作製するのに適した値であった。

3. プロセス安定性

プロセスに対する安定性が無ければ, 再現性を得るのが困難となり, たとえ性能が高くても使用しにくいレジストとなる。そこで, VMDMS を用いて光学素子を作製する際のプロセスに対する安定性を調べるために以下の実験を行った。なお, ここでは DMS の結果は示さないが, ほぼ同じような特性を示した。

図 4 はプリベーク温度が 100°C と 170°C のときの VMDMS の感度曲線である。図 4 から分かるようにプリベーク温度を変化させてもほとんど感度曲線が変化しないことが分かる。

図 5 は現像時間が 30 秒と 5 分のときの VMDMS の

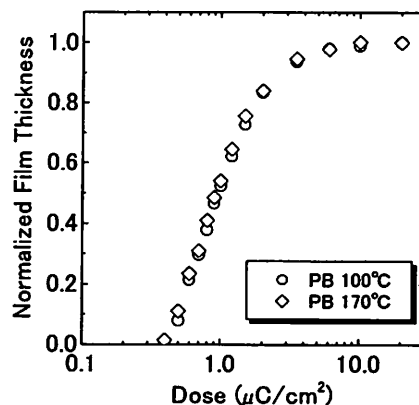


図 4 プリベーク温度が 100°C と 170°C の VMDMS の感度曲線

Electron beam exposure response curves of VMDMS at the prebake temperatures of 100°C and 170°C

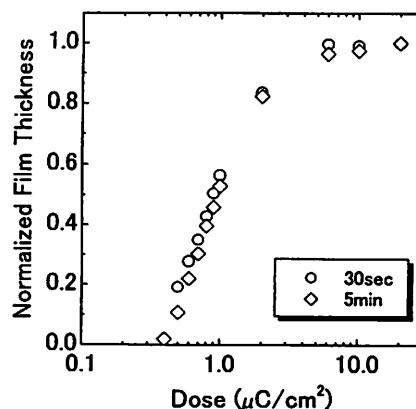


図 5 現像時間が 30 秒と 5 分の VMDMS の感度曲線
Electron beam exposure response curves of VMDMS at the developing times of 30 sec and 5 min

感度曲線である。図 5 に示されているように現像時間を変化させてもほとんど感度曲線が変化しないことが分かる。

この結果から DMS, VMDMS を用いて電子線描画により光学素子を作製する場合は, プロセス管理 (プリベーク温度や現像時間) をあまり気にしなくても, 再現良く光学素子を作製できることが分かる。また, 用いる基板の物性上高い温度のプリベークを行うことのできない場合などでも使用できるレジストであることが分かる。このように, DMS, VMDMS とともに使いやすい電子線レジストであることが分かった。

4. 計算機ホログラム (CGH) の作製

通常の写真は、画像を2次元的に記録するものである。それに対し、ホログラムを利用すれば、画像を3次元的に記録することができる⁴⁾。ここで、ホログラムについてふれておく。ホログラムは、光の干渉と回折を利用した記録方法であり、その作製には干渉性の良いレーザを使用する必要がある。レーザ光をビームスプリッターで2つに分け、一方の光を目的の物体にあてる。その物体からの反射光(物体光)と2つに分けたもう一方のレーザ光(参照光)を記録媒体(写真フィルムなど)にあてる。その結果、記録媒体中に干渉縞が記録される。この記録媒体を現像することにより、ホログラムを得ることができる。この記録された干渉縞に再度参照光を照射すると、物体光が再生される。従って、もはや物体が無くて、参照光をホログラムに照射して出てくる光を見ると、あたかもそこに物体が存在しているように見える。

このように、ホログラムは物体光と参照光に実際に干渉を生じさせ、その干渉縞を記録しているものであるが、干渉縞は計算により求めることができる。従って、計算により求めた干渉縞を何らかの方法で記録媒体に記録することができれば、参照光を照射すると物体の再生像が得られることとなる。このような計算機を用いて作製したホログラムを計算機ホログラム(CGH: Computer Generated Hologram)と呼ぶ。CGHは実際に物体が無くて、その再生像が得られるので、架空の物体の再生やビームの形の制御などに用いられる⁵⁾。

本研究では、図6のような再生像が得られるCGHを作製した。計算機により、ピクセルサイズ $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ 、512ピクセル \times 512ピクセル、4レベルのCGH用パターンを準備した。次にITO付きガラス基板にVMDMSをスピンコートし、電子線照射量を2.50, 1.07, 0.59, $0\mu\text{C}/\text{cm}^2$ と変調させ、計算機により作製されたCGHパターンの描画を行った。その結果、4つの高さ階調があるCGHを作製することができた。作製されたCGHにHe-Neレーザ光を照射すると、図7のように良好な再生像を得ることができた。

5. まとめ

本研究では、ポリシロキサン(PS)の電子線レジストとしての特性を調べた。その結果、PSは、従来使用されている電子線レジストPMMAよりも2桁



図6 ターゲットとなるパターン
Target pattern



図7 CCDカメラによりキャプチャーされた再生像
Reconstructed image captured by CCD camera

程度高感度であることが分かった。また、プリベークや現像時間などの電子線リソグラフィを行うプロセスに対しても極めて安定であることが分かった。このことは、ポリシロキサンは、実際に使用する上で使いやすい電子線レジストであると言える。しかしながら、解像度がPMMAよりも低いなどの問題点も抱えている。幸いなことに、ポリシロキサンには、多数の種類が存在する。今回、実験に用いたポリシロキサンは、DMSおよびVMDMSのみであったが、ビニル基の有無で感度が異なるという特性の違いが出た。このことから、他のポリシロキサンも電子線レジストとして、興味深い特性を持ったものが存在する可能性が十分にある。今後、多くのポリシロキサンの電子線レジストとしての特性を調べ、構造と物性との関係を系統立てて検討することが解像度不足等の問題点を解決する上で有効であると思われる。

参考文献

- 1) L. Laakkonen, J. Lautanen, V. Kettunen and J. Turunen: J. Mod. Optics, 46, 1295 (1999).
- 2) 塩野照弘: 応用物理, 68, 633 (1999).
- 3) W. H. Wong and E. Y. B. Pun: J. Vac. Sci. Technol. B 19, 732 (2001).
- 4) 久保田敏弘: ホログラフィー入門, 朝倉書店(1995).
- 5) W. Yu, K. Takahara, T. Konishi, T. Yotsuya and Y. Ichioka: Appl. Opt. 39, 3531 (2000).