

---

# 高精度マイクロレンズ作製技術とそのビーム整形素子への応用

## High Accuracy Microlens Fabrication Fethod and it's Application to LD Beam Profile Converter

佐藤 康弘\*      清澤 良行\*      石井 稔浩\*      三船 博庸\*  
Yasuhiro SATOH      Yoshiyuki KIYOSAWA      Toshihiro ISHII      Hironobu MIFUNE

---

### 要 旨

微細パターンの開口面積比で透過率を制御したグレイスケールマスクを使いレジストパターンを形成し、ガラス基板にドライエッチングにより形状を転写するマイクロレンズ作製技術を開発しているが、本稿ではエッチング時に発生する形状変化を補正するシンプルなエッチングモデルを提案する。このエッチングモデルにより、アルミナを含む結晶化ガラス基板にマイクロレンズを作製する際の形状変化を $0.05\ \mu\text{m}$ 程度の誤差で推定出来た。この作製技術を、両面に凹凸シリンドリカル面が隣接直交配置（間隔 $110\ \mu\text{m}$ ）した放射角の異なる2ビーム対応ビーム整形素子に応用した。プロセスモデルを利用した形状補正により、ビーム整形素子の4種類のレンズ面の形状公差を同時に満たすことが出来た。この結果より、エッチングプロセスモデルによる形状補正がマイクロレンズ作製の高精度化に有効であることが示された。

### Abstract

We have been developing a microlens fabrication method which contains grayscale mask lithography process and dry etching process. In this paper, we propose a simple dry etching process model to estimate profile distortion in dry etching process. With the process model, microlens profile distortion in dry etching process was estimated under  $0.05\ \mu\text{m}$  error for glass ceramic substrate which contains  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . We also tried to fabricate a LD beam profile converter which has convex cylindrical lens and concave cylindrical lens on each side of substrate. With our microlens fabrication method, beam profile converter which has small profile error was fabricated. By the fabrication result, the etching model was shown effective for high accuracy microlens fabrication process.

---

\* 研究開発本部 中央研究所  
Research and Development Center, Research and Development Group

# 1. 背景と目的

マイクロレンズとは、一般に直径数mm以下の微小なレンズのことを示している。CCD撮像素子やLCDプロジェクターでは光利用効率向上のため直径数10 $\mu$ m程度のマイクロレンズを多数配置したマイクロレンズアレイ<sup>1)</sup>、光通信のコネクタなどでは直径250 $\mu$ m程度のマイクロレンズが利用されている。現在、電子機器の動作周波数の高速化に伴ないボード間、ボード内の配線を光に置き換える検討や面発光レーザーアレイと近接場を利用した高密度光記録の検討<sup>2)</sup>などが行われており、マイクロレンズ等の微小光学部品はますます重要になると考えられている。

マイクロレンズは形状が微小であることから、通常のレンズ作製に用いられる研磨やモールドとは異なる様々な作製方法が利用、検討されている。Fig.1にマイクロレンズ作製プロセスの例を示した<sup>3-7)</sup>。

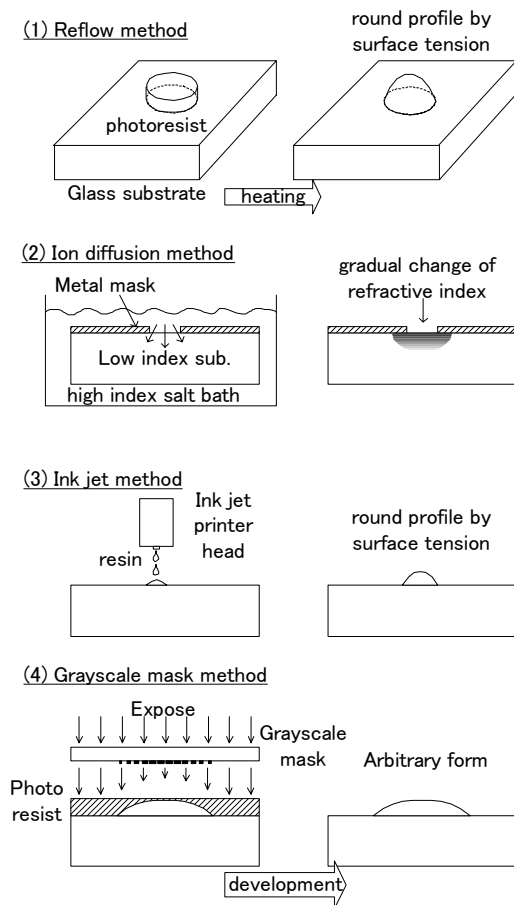


Fig.1 Fabrication methods of microlens.

(1)のリフロー法は、フォトリソグラフィーにより円柱状のフォトレジストパターンを作製した後、基板を加熱してレジストを流動させ、表面張力によりレンズ形状を作製する方法である。(2)のイオン拡散法はレンズ形状に合わせたマスクを形成したガラス基板にTi<sup>+</sup>などのイオンを拡散させて段階的な屈折率変化をもたせる方法である。LCDプロジェクター向けのマイクロレンズアレイ作製には主にイオン拡散法、リフロー法が用いられている。最近では、インクジェットプリンタヘッドを利用して微量の樹脂材料を所定の位置に滴下し、表面張力によりレンズ形状を作製するインクジェット法(3)も検討されている。これらの方法は、表面張力やイオンの拡散により自然に生じる形状や屈折率分布をレンズとして利用している。(4)は我々の行っているグレースケールマスクを利用した方法である<sup>8,9)</sup>。この方法ではマスクに与えた透過率分布によってレジストの形状をコントロールできるため他の方法に比べて様々な形状を作製できる可能性があり、今後のマイクロレンズ作製技術においてますます重要になっていくと考えている。

Fig.1のリフロー法、グレースケールマスク法では、フォトレジストでレンズ形状を作製するところまでを示しているが、通常フォトレジストで作製したレンズはそのままでは透過率不足や湿度や光照射に対する耐性が弱い等の問題があるため、異方性ドライエッチングによりレジストパターンを基板材料に転写してから利用される。しかしながら、異方性ドライエッチングプロセスではレジスト形状とエッチング後の形状で大きな形状変化が生じる場合があり、目的の形状に対して誤差の少ないマイクロレンズを作製するのは困難であった。また、この形状変化はエッチング装置の種類、エッチング条件、基板材料の種類によって変化する。特に、マイクロレンズを評価する上で重要なパラメータである透過率と波長範囲、屈折率は基板の種類によって制限されるため、様々な基板材料に対して高い形状精度を持つマイクロレンズを作製できるようにすることは重要である。

ドライエッチング時の形状変化への対策としては、リフロー法で作製したレジストパターンに対して、エッチング中にレジストと基板の選択比を変化させることで形状を補正する方法が検討されている。この方法に対し、我々はエッチングのプロセスモデルを利用してエッチング時の形状変化を推定し、推定結果に基づいてあらかじめレジスト形状を補正し

ておく方法を検討した。

本稿では、ドライエッチング時の形状変化を推定するため、等方的なエッチング成分を考慮したシンプルなプロセスモデルを提案し、実際のエッチング結果と推定結果の比較を行った結果を報告する。また、このエッチングモデルを利用して、基板の片面に2種類、両面に4種類の形状の異なるシリンドリカルマイクロレンズが組み合わされたビーム整形素子を作製した結果についても紹介する。

## 2. 技術

### 2-1 マイクロレンズ作製プロセス

Fig.2に我々が行っているマイクロレンズ作製プロセスフローを示した。このプロセスは、主にグレイスケールマスクを利用したフォトリソグラフィによるレジストパターン形成と、異方性ドライエッチングによる、レジストパターンの基板への転写の2つのプロセスで構成されている。

このプロセスでは、まずレンズ設計データをフォトレジストパターンに変換する。この工程では、作製するレンズの形状に対してエッチング時の形状変化を考慮した補正を行ない、エッチング後に目的の形状が得られるようにレジスト形状を設定している。エッチング時の形状変化はエッチング装置の種類、エッチングガス、基板の材質などに依存しており、ここではエッチング時の形状変化を推定するエッチングモデルを設定して利用している。以前のエッチングモデルではフォトレジストと基板材料のエッチング速度差による高さ方向の形状変化のみを考慮していた。今回は形状変化が大きいエッチング条件に対応するため、等方的なエッチング成分を考慮したエッチングモデルを検討した。エッチング時の形状変化については2-2章、エッチングモデルについては2-3章で説明する。

次に、レジストパターンの設計データに応じて、グレイスケールマスクの透過率分布を決定し、マスクを作製する。このグレイスケールマスクは、微小な開口パターンが多数配置され、開口部分と遮光部分の面積比によって透過率を調整する面積階調タイプのマスクである。フォトリソグラフィ工程においては、露光装置に依存してマスク上の透過率分布とレジストに照射される光の強度分布にずれが生じるため、露

光装置による影響を見積もるためのフォトリソグラフィモデルを設定し、マスクの透過分布決定のために利用している。なお、本稿ではフォトリソグラフィモデルについての詳細な説明は省略するが、マスクパターンに照射された光が露光装置の光学系を通してレジスト上に露光される際の応答関数に基づいたモデルを用いている。

最後に、作製したフォトマスクを利用してレジストパターンを露光し、異方性ドライエッチングによってレジスト形状を基板に転写すれば、マイクロレンズが完成する。

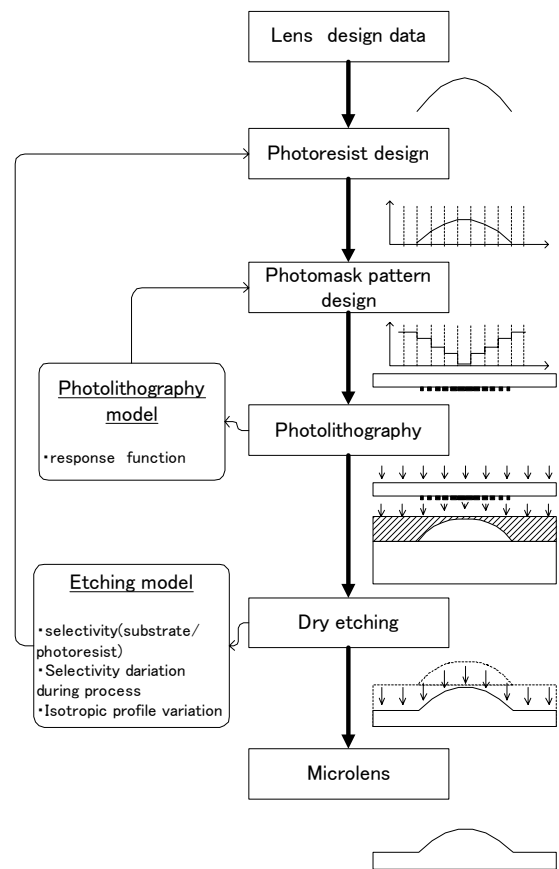


Fig.2 Process flow of microlens fabrication.

### 2-2 ドライエッチングによるレンズの変形

Fig.3にシリンドリカルマイクロ凸レンズのエッチング前後の断面形状を示した。図中の細線がエッチング前のフォトレジスト形状、太線がエッチング後の形状を示している。この実験で利用したフォトレジストはノボラック型のポジレジスト、基板はアルミナ $Al_2O_3$ を含有した結晶化ガラスである。エッチングには高密度プラズマが利用できるドライエッ

チャーを利用し、エッチングガスは $C_4F_8$ とArを利用して選択比がほぼ1になるように流量比を調整した。

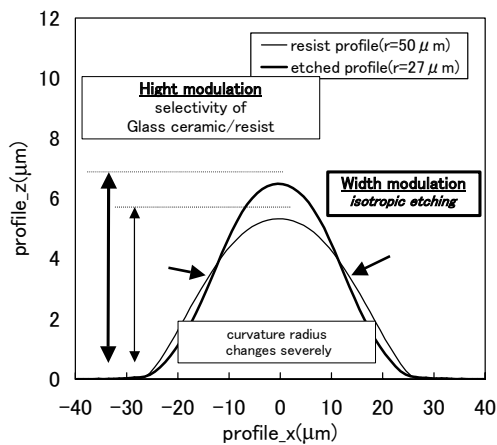


Fig.3 Profile distortion after anisotropic dry etching.

エッチング前後の形状を比較すると、エッチング後はレンズ高さが高くなり、幅が狭くなっている。その結果、レンズ頂点付近の曲率半径は大幅に小さくなっている。Fig.3には凸レンズの場合を示したが、凹レンズの場合は逆に幅が広がるため、曲率半径が大きくなっていた。この形状変化は異方性ドライエッチング中に基板表面で起こる様々な反応が複合して引き起こされると考えられる。

ここで、異方性ドライエッチングについて簡単に考察する。異方性ドライエッチングは、プラズマ中で発生するラジカル、イオンと基板との反応により進行する。Fig.4にドライエッチャーの一般的な構造を示した。エッチングに用いるプラズマは、チャンバー内に導入されたエッチングガスに対してチャンバー外部に取り付けられたアンテナコイル等から高周波電力を加えることで発生させている。発生したプラズマ中のラジカルやイオンは拡散、または基板に印加されたバイアス電界によって被エッチング基板表面に到達する。基板表面では主に次のような反応でエッチングが進行する<sup>10)</sup>。

- (a) 化学エッチング (等方性)
- (b) イオンアシストエッチング (異方性)
- (c) スパッタリング (表面角度依存あり)

レジストの形状をそのまま基板へ転写しているのは (b) の反応で、形状変化は (a) , (c) により引き起こされると考えられる。これらの反応の組合せは用いるガス、基板の材質、エッチング条件などによって変化する。

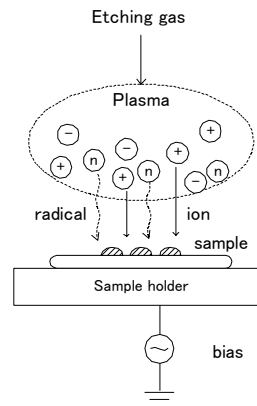


Fig.4 Schematic view of anisotropic dry etching process.

Fig.3で示したエッチングにおける、基板表面での反応をFig.5に示した。 $C_4F_8$ ガスのプラズマには様々な種類のラジカル、イオンが含まれているが、主にエッチングに関与しているのは $CF_2$ ラジカルと $CF_3^+$ イオンと考えられている<sup>11,12)</sup>。 $CF_2$ ラジカルは基板表面に堆積するポリマーの前駆体と考えられており、基板表面に堆積する。 $CF_3^+$ は基板に加えられたバイアス電界によって加速され基板表面に衝突し、基板表面の原子をはじき出す。このとき、はじき出された原子や表面に露出した原子と $CF_3^+$ が反応して、 $SiF_4$ や $CO_2$ などの揮発性の反応性生成物を発生させながら化学的なエッチングが進行する (b) 。このとき、発生した酸素の一部が表面に堆積した $CF_2$ と反応するため、 $CF_2$ が除去され、同時に発生したFは基板をエッチングしていると考えられる (a, b) 。

フォトレジストの場合、構成する元素が主にC,O,H等であるため、 $CF_3^+$ との反応で発生する主な反応生成物は $CO_2$ 、HFである。これらの生成物は蒸気圧が高いため生成とともに蒸発し、外部へ排気される。したがって、フォトレジストのエッチングでは、(a) , (b) が支配的であるとされる。

アルミナを含む結晶化ガラスの場合、構成する元素の中にAlが多く含まれているためエッチング生成物として $AlF_3$ が発生する。 $AlF_3$ は蒸気圧が低く、生成直後は蒸発せずに基板表面に残ってしまう。この $AlF_3$ は $Ar^+$ イオンなどによるスパッタリング作用 (c) によって、基板表面から除去されていると考えられる。スパッタリングによるエッチングは、基板表面の傾斜角に依存してエッチング量が変化するため、アルミナを含む結晶化ガラスのエッチングでは大きく形状が変化していると考えられる。

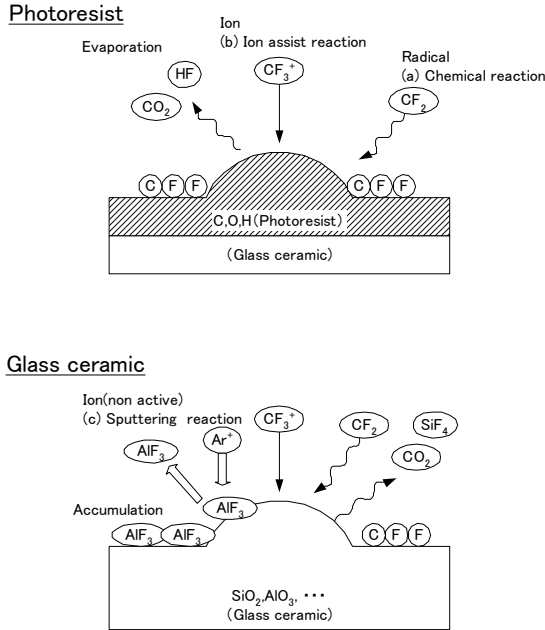


Fig.5 Dry etching reactions on wafer surface.

### 2-3 エッチングプロセスモデル

2-2章では、異方性ドライエッチング時の形状変化の原因として、等方的な化学エッチングやスパッタリングの影響が考えられることを示した。レジストパターン形状を設計する際はこれらの等方的なエッチングによる形状変化を見積もって、レジスト形状を補正しておく必要がある。そこで、等方的なエッチング成分による形状変化を取り入れた簡単なプロセスモデルを設定した。

Fig.6は今回用いたプロセスモデルである。形状の変化は等方的なエッチング成分を示すベクトル  $Iso(x)$  をレジスト上の各点で計算することにより求めている。  $Iso(x)$  の方向は被エッチング部分の法線方向とし、大きさは式(1)で表すものとした。

$$Iso(x) = Iso\_gla + Iso\_res \quad \dots(1)$$

$Iso(x)$  はレジストに対する等方成分  $Iso\_res$  と結晶化ガラスに対する等方成分  $Iso\_gla$  の2つの成分を含んでいる。  $Iso\_res$  と  $Iso\_gla$  は、位置  $x$  におけるレジスト厚  $Eres$  と垂直方向への基板のエッチング量  $Esub$  に比例するように定義した。

$$\text{Glass ceramic: } Iso\_gla = (In + Ina(\theta)) \times Esub \quad \dots(2)$$

$$\text{Photoresist: } Iso\_res = Ir \times Eres \quad \dots(3)$$

ただし、  $Esub$  はエッチング時の形状変化に依存して変化するため、

$$Esub = Eall - Eres \quad \dots(4)$$

$Eall$  : レジストのない位置での全エッチング量として計算を行っている。

#### Etching model

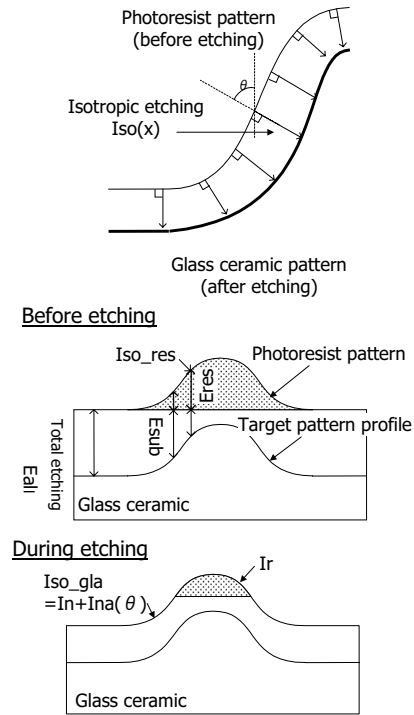


Fig.6 Etching model.

$Iso\_res$  と  $Iso\_gla$  に含まれる定数項  $Ir, In$  は基板表面の形状によらない等方的なエッチング成分を示している。また、  $Iso\_gla$  に含まれる角度依存成分  $Ina(\theta)$  はスパッタリングによる影響を示している。ここで、  $\theta$  は基板に対する垂線と位置  $x$  における等方成分の方向が成す角度である。

このモデルが様々な形状のマイクロレンズのエッチングに対して形状変化予測できることを確認するため、実際にアルミナを含む結晶化ガラス基板上的レジストパターンをエッチングした際の形状変化と、このモデルをもちいた計算結果との比較を行った。エッチングを行ったサンプルの形状は曲率半径  $30 \sim 500 \mu\text{m}$  の凹凸シリンドリカルレンズパターンである。モデルの各パラメータは、これら複数のエッチング結果に対して誤差が最も少なくなるようにフィッティングを行ない決定した。Fig.7に凸面と凹面のシリンドリカルレンズに対するエッチング結果と、プロセスモデルを用いて計算した結果の比較を示した。

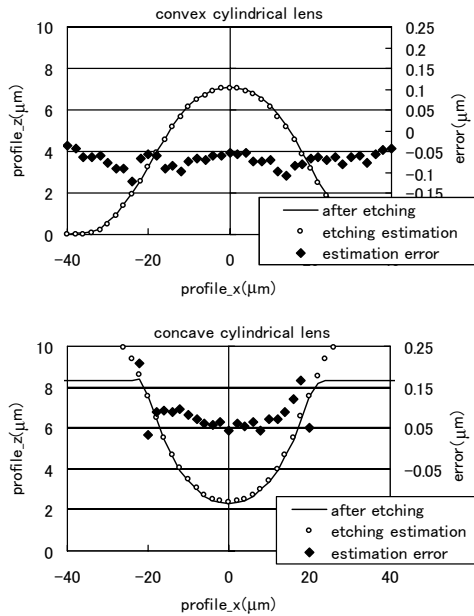


Fig.7 Comparison of etching result and calculation result.

図中の細線はエッチング結果、白点はモデルを用いて計算により求めたエッチング後形状、黒点はエッチング結果と計算結果の誤差を示している。凸面のレジスト時の形状はこの図に示していないが、ほぼFig.3のパターンと同じ形状である。また、凹面は横軸の±22μmまでの範囲をエッチングしているため、その外側でずれが大きくなっている。このプロセスモデルを用いてエッチング後の形状を計算した結果と実際のエッチング結果との誤差は、曲率半径の違いや凹面、凸面にかかわらず±0.05μm程度であった。この計算において、 $E_{all}=8.25\mu\text{m}$ 、 $I_n=0.25$ 、 $I_r=0.26$ 、( $I_n, I_r$ はともに垂直方向のエッチング量1μmに対する等方成分の比率)としている。単純なモデルではあるが、凸面、凹面に関わらずよい精度でエッチング時の形状変化が予測できているといえる。

## 2-4 ビーム整形素子の試作

2-4, 2-5章では、2-3章で示したモデルを利用して実際にビーム整形素子の試作を行った結果を紹介する。このビーム整形素子は、近接して配置された2つのレーザーダイオード(LD)から出射された楕円形のビームプロファイルを円形に変換する目的で設計されている。

Fig.8に試作したビーム整形素子を示した。このビーム整形素子は、凹凸2枚1組のシリンドリカルマイクロレンズでLDのビームプロファイルを楕円形から円形に変換するビー

ム整形素子が2つ並べて配置された構造になっている。基板の厚さは203μm、マイクロレンズの断面形状はすべて球面で曲率半径公差は5%、2つのビーム変換素子の光軸間隔は110μm、出射側での有効径端の間隔は34.5μm、基板はアルミナを含む結晶化ガラスである。

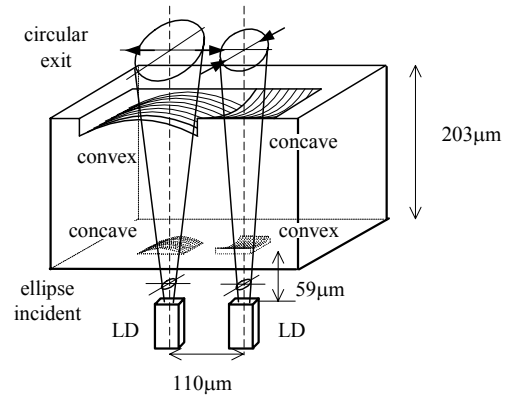


Fig.8 Profiles of beam profile converter.

このビーム整形素子を作製するためには、同一面にある凹面と凸面のシリンドリカルマイクロレンズが同時に公差を満たすようにする必要がある。このビーム整形素子の試作を始めた当初は、エッチング時に生じるマイクロレンズの曲率半径変化のみに着目し、曲率半径の変化分を補うようにレジストパターンの曲率半径を補正していた。しかしながら、曲率半径の変化量は4つのマイクロレンズでそれぞれ異なり調整が困難であった。また、レンズの断面形状はすべて球面で設計されていたが、レジストパターンの形状を球面にしていたため、エッチング時の変形によってレンズが球面からずれてしまう問題があった。このようなことから、曲率半径に注目した補正だけでは不十分であった。

今回用いたエッチングモデルによる補正では、それぞれのマイクロレンズ形状に対してあらかじめエッチングによる形状変化を見込んでレジスト形状を設計しているため、曲率半径を合わせるだけでなく、エッチング時の形状変化によって生じる表面形状のずれも同時に補正することができる。

## 2-5 試作結果

Fig.3のプロセスフローに従い、Fig.8のマイクロレンズ作製を行った。レジスト形状の設計には2-3章のエッチングモデルを利用し、凹面、凸面のシリンドリカルマイクロレンズ

がそれぞれ同一のエッチング条件で曲率半径公差を満たせるように補正している。また、フォトマスクの透過率分布は有効径の範囲内で設計値との誤差が少なくなるようにしている。

Fig.9, Fig.10に作製したマイクロレンズの測定結果を示す。

Fig.9はビーム整形素子表面形状の3次元測定結果である。

測定は非接触レーザー3次元測定装置を用いて行った。図の上側が出射側、下側が入射側である。Fig.8との対応を図中に示してある。各レンズは稜線方向の変形を避けるため、Fig.8に示した形状と比べて稜線方向を長くしてある。

Fig.10はシリンダリカルマイクロレンズの断面形状である。この測定も非接触レーザー3次元測定装置を利用している。

図中の太線は測定値、細線は測定値の曲率半径を求めるためフィッティングを行った球面、三角形のドットは測定値とフィッティングした球面の誤差を示している。図の中心付近にある点線の四角形は、幅が有効径、高さが誤差範囲±0.05 $\mu\text{m}$ を示している。どちらのレンズも曲率半径は公差を満たしており、表面形状のずれは±0.02 $\mu\text{m}$ 以内に抑えられている。ここでは入射側の結果を示したが、出射側でも同様の結果が得られている。

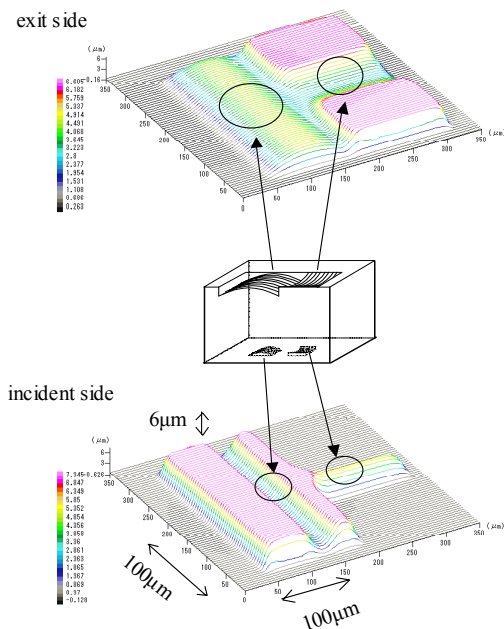


Fig.9 Surface profile of beam profile converter.

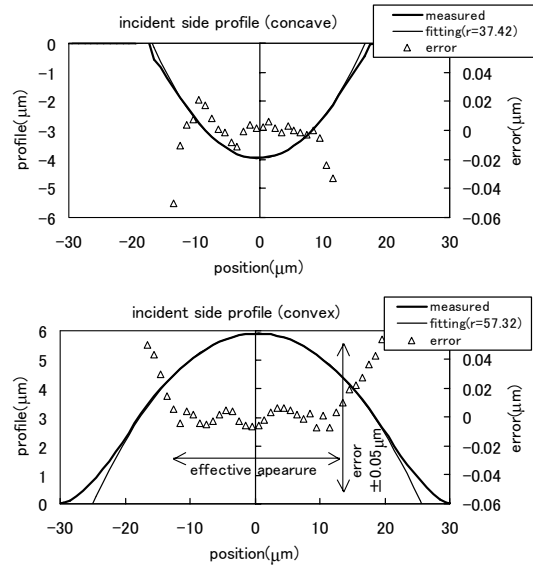


Fig.10 Cross section profile and profile error of incident side microlenses.

## 2-6 考察

まず、ビーム整形素子の試作結果について考察する。

2-5章で示したように、今回提案したエッチングモデルを用いてレジスト形状の補正を行ったことにより、同一面にある凹凸2つのシリンダリカルマイクロレンズは同時に曲率半径の公差をみたくものが得られた。また、有効径の範囲内では表面形状のずれが±0.02 $\mu\text{m}$ 程度に抑えられている。以上より、今回用いたエッチングモデルによる補正は、ビーム整形素子に含まれる4つのシリンダリカルレンズに対しては十分な効果が得られたと考えている。

次に、エッチングモデルについて考察する。

今回のエッチングモデルでは、アルミナを含む結晶化ガラス基板を $\text{C}_4\text{F}_8$ ガスでエッチングした際に生じる形状変化を見積もるため、異方性ドライエッチング中における基本的な反応である化学エッチング、イオンアシスト化学エッチング、スパッタリングの3つを考慮した。また、簡単な計算で形状の変化が求められるように、形状の変化をパターン表面の法線方向への移動で定義した。このような単純なモデルではあるが、試作結果では十分な精度のマイクロレンズが作製されている。

この理由としては、ビーム整形素子に含まれていたレンズの形状は比較的傾斜がゆるく、簡単なモデルでも大きな誤差が生じにくかったためと考えられる。特に等方成分に角度

依存が考えられる場合は、エッチングの進行に伴い、エッチング前の表面から引いた法線に対して、エッチングされた表面の傾斜が変化していく。したがって今回のように1回の計算でエッチング前の形状からエッチング後の形状を計算する方法では誤差が生じてしまう。しかしながら、ビーム整形素子に含まれていたレンズ表面の傾斜自体が15°程度であるため、法線方向に対する表面角度の変化による誤差が小さく、マイクロレンズ形状へ与える影響が少なかったと考えられる。レンズ面の傾斜が大きく、今回のような計算では誤差が大きいような場合は、逐次計算などの方法を用いる必要がある。また、傾斜の大きい部分やレンズアレイなどで狭い隙間を含む場合は、部分的にエッチング生成物の堆積やチャージアップが起こりやすくなり周囲の形状を変化させる場合が考えられる。これらのパラメータはアルミナを含む結晶化ガラス以外の基板をエッチングする際や傾斜の大きいマイクロレンズパターンを作製する場合は必要になる可能性がある。

以上より、今回のエッチングモデルは比較的傾斜の小さいマイクロレンズに対しては凹凸型を問わず、高い精度でエッチング時の形状変化を予測可能であるといえる。さらに適用範囲を広げてアルミナを含む結晶化ガラス以外の材料や傾斜角の大きいマイクロレンズパターンに対応する場合は、エッチング中の表面角度の変化に対応した逐次計算、チャージアップやエッチング生成物の堆積の影響を考慮するためのパラメータの設定等を考えていく必要がある。

### 3. まとめ

マイクロレンズ作製プロセスにおける異方性ドライエッチング時の形状変化を補正するため、エッチングプロセスモデルを検討した。等方的なエッチング成分を考慮したエッチングモデルを利用することで、レジストパターンをアルミナを含む結晶化ガラス基板に転写する際の形状変化を±0.05μm程度の誤差で見積もることができた。

4種類のシリンドリカルマイクロレンズを含むビーム整形素子の試作を行なった。エッチングモデルによる計算結果に基づいた形状補正によりすべてのレンズ形状が公差を満たすものが作製できた。

## 4. 今後の展開

様々な基板材料や複雑なマイクロレンズ形状に対応できるようにするため、エッチング形状計算モデルの高精度化を行う。

- 1) 浜中 賢二郎：“ライトバルブ用マイクロレンズアレイ” Oplus E, Vol.22, No.3 (2000), pp.313-318.
- 2) A. Kouchiyama, et al.: "Plasma Etched Lens (PEL) for DVR-Blue" Optical Data Storage Topical Meeting 2001, (2001), pp.100-102.
- 3) Z. D. Popovic, R. A. Sprague and G. A. N. Connell: "Technique for monolithic fabrication of microlens arrays," Appl. Opt., 27 (1988), pp.1281-1284.
- 4) D. Daly, R. F. Stevens, M. C. Hutley and N. Davies: "The manufacture of microlenses by melting photoresist," J. Meas. Sci. Technol., 1 (1990), pp.759-766.
- 5) D. Daly: "Microlens Arrays" Taylor & Francis Inc (NEW YORK), (2001).
- 6) M. Oikawa, K. Iga, T. Sanada, N. Yamamoto and K. Nishizawa: "Array of Distributed-Index Planar Microlenses Prepared from Ion Exchange Technique," Jpn. J. Appl. Phys., 20 (1981), pp. L296-L302.
- 7) Y. Ishii, S. Koike, Y. Arai and Y. Ando: "Ink-Jetted Microlens for Optical Interconnection," MOC'99, (1999), pp.98-101
- 8) 三船 博庸, 佐藤 康弘, 清澤 良行, 佐藤 史朗: "2枚構成高NAマイクロレンズの実装技術" MICROOPTICS NEWS, Vol.19, No.1 (2001), pp.49-52.
- 9) Y. Satoh, H. Mifune, Y. Kiyosawa and S. Satoh: "Improvement of Fabrication errors for a High NA Microlens with Two Substrates" MOC'01 Technical Digest (2001), p162-165.
- 10) 菅野 卓雄：“半導体プラズマプロセス技術” 産業図書 (東京), (1980), pp.355-357.
- 11) 寒川 誠二：“Focus Report④ エッチング技術の最新動向” EDリサーチ社 (東京), (2002), pp.27-35.
- 12) M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg: "プラズマ/プロセスの原理" EDリサーチ社 (東京), (2001).