

ガラスモールド法による位相制御可能な微細構造の形成

Sub-wavelength Periodic Structures with Phase Control Fabricated by Precision Glass Molding

長谷川 研 人*

Hasegawa, Kento

森 登史晴*

Mori, Toshiharu

波多野 卓 史*

Hatano, Takuji

要旨

光ピックアップや液晶プロジェクターなどでは光の利用効率を高めるために光の振動方向（偏光）を変化させる波長板と呼ばれる光学部材が必須となっている。波長板には高精度に加工した水晶や複屈折ポリマーが多用されているが、前者は低コスト化、後者は耐熱性向上が課題として残されている。我々は、これらの課題を解決すべく、ガラスモールド法を用いて、高アスペクト比のサブ波長周期構造をガラス表面に形成し、偏光を制御する素子の開発を試みている。

そして、今回ガラスモールド法で初めて酸化物ガラス表面に一次元サブ波長周期構造を形成することに成功した。また、可視光域において、TE偏光とTM偏光透過光の位相差を確認した。

Abstract

To improve light use efficiency, optical pickups and liquid-crystal projectors must have a wave plate, an optical element which controls polarization. The wave plate is usually formed from either a high-precision fabricated quartz or from a birefringent polymer. However, the former is costly, and the latter suffers from low resistance to heat. In response, we aimed to develop a polarization controlling element by fabricating sub-wavelength periodic structures with high aspect ratios on the surface of glass during the glass molding process. As a result, it has been demonstrated for the first time that the glass molding process allows precise fabrication of one-dimensional sub-wavelength periodic structures upon oxide glasses. Further, phase retardation between TE- and TM-polarized transmission beams was recognized in the visible wavelength region.

1 はじめに

現在、光ピックアップ装置、液晶プロジェクターなどの光学系において、波長板は光の利用効率を上げるために必須の光学部材となっている。一般的に波長板には水晶の研磨品、複屈折ポリマーなどが用いられている。しかしながら、水晶の波長板は波長オーダーの加工精度が必要なため高価で、複屈折ポリマーの波長板は熱に弱いという問題があった。一方、光の波長レベル以下の微細な周期を有する構造（サブ波長周期構造）は偏光無依存の回折¹⁾、波長分離²⁾、無反射^{3,4)}、位相制御⁵⁾が可能であることが古くから知られており、光学素子への応用が期待されていた。しかし、サブ波長周期構造の形成方法としては電子ビーム（EB）描画とドライエッチングの組み合わせが一般的であるが、生産コストが高く、実用化まで至らなかった。

このような中、サブ波長周期構造の形成方法の一つとして、レンズの製造に用いられているモールド法が注目されている。モールド法が適用できれば、金型を一つ作ることで、サブ波長周期構造を持つ光学素子を大量に生産することができるようになり、大幅なコスト削減が期待できる。最近では、紫外線を用いたインプリント法や熱インプリント法により、様々な微細構造が樹脂基板やフィルムへ形成できることが報告されている^{4,6)}。しかしながら、樹脂基板やフィルムでは光学素子に求められる高温、高湿環境下などでの信頼性を満たすことは難しい。そこで、我々は広い屈折率・分散の選択範囲を持ち、耐久性・耐熱性・耐光性あるいは優れた温度特性を有するガラスに着目し、モールド法による微細構造の形成を試みた。

ガラスモールド法により、高屈折率の酸化物ガラス表面上に高いアスペクト比を持つ一次元サブ波長周期構造を形成したことを報告する。また、形成した一次元周期構造の位相差特性についても報告する。

2 構造的複屈折による位相差の発現

本研究ではサブ波長周期構造素子として、ガラスの構造的複屈折素子をガラスモールド法を用いて作製した。

サブ波長周期構造は、光波に対して平均的な屈折率(有

* コニカミノルタオプト(株) 生産技術センター 加工・成形部

効屈折率)をもつ媒質として作用し、その構造の方向性に起因する光学異方性を構造的複屈折と呼ぶ。次元周期のサブ波長周期構造の場合、周期を持つ方向と持たない方向で異なる有効屈折率を持ち、TE偏光とTM偏光の伝播速度に差が生じることで位相差が発現し、それ自身で構造的複屈折波長板として機能する。また、サブ波長構造を有効屈折率の媒質で置き換える考え方は有効媒質理論 (Effective Medium Theory; EMT) と呼ばれる。

構造的複屈折により位相差を発現させるパラメーターとして、周期, filling factor, 高さ, 屈折率などがある (Fig. 1 参照)。これらのパラメーターにより位相差特性は大きく変わり、EMTによる計算やシミュレーションなどを駆逐することによって位相差特性を制御することが可能である。例えば、より高い位相差を発現させるためには、Fig. 1 の高さがより高い構造を形成し、かつ屈折率の高いガラスを用いればよい。また、例えばガラスの屈折率が1.8, 周期300nm, filling factor 0.5, 高さ500nmの構造を形成した場合、発現する位相差は 0.25λ (=90deg)程度となる。これに光を透過させた場合、光の振動方向を直線から円に変換することが可能であり、1/4波長板として機能する。これにより、光利用効率の高い光ピックアップユニットの達成が可能となる。

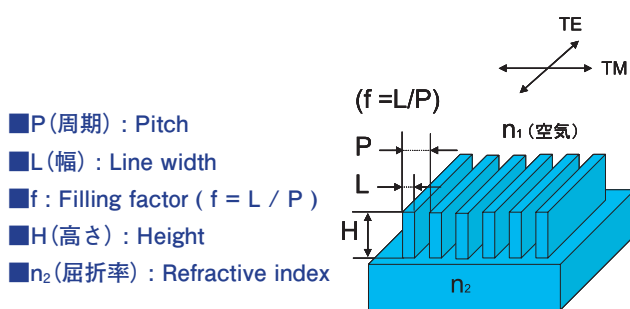


Fig.1 Wave plates with form birefringence

3 モールドの作製プロセス

モールドの作製プロセスをFig. 2に示す。本研究では、モールド材料としてGC (グラッシーカーボン) 基板を

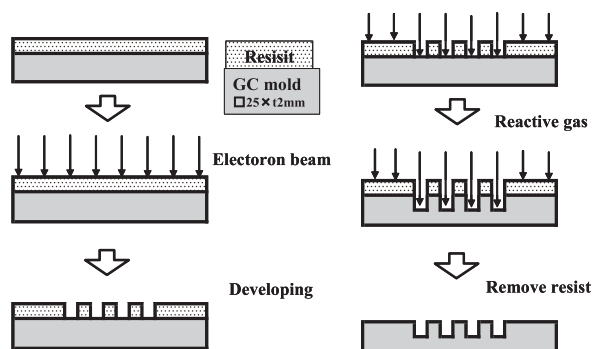


Fig.2 Fabrication of glassy carbon molds

用いた。GC基板上にEBレジストをスピコート法により塗布した。上記の基板をEBで直接描画し、現像することでEBレジストに次元周期構造をパターンニングした。そのEBレジストをマスクとして使い、反応性ガスとして酸素を用いた誘導結合プラズマ反応性イオンエッチング (ICP-RIE) によりGC基板上へ周期パターンを形成した。また、残余のEBレジストは有機溶剤により除去した。

4 ガラス成形プロセス

Fig. 3にガラスモールド法による成形プロセスを示す。ガラスプリフォームを上下のモールドの間に置き、ガラスプリフォームとモールドを加熱後、次元周期構造を持ったモールドでガラスプリフォームをプレスした。その後、数分間保持し、モールドを冷却し離れた。ここで、ガラス成形は圧力 0.4kN/cm^2 、ガラスの軟化温度付近で行った。また、成形チャンバー内は N_2 雰囲気にし、特に成形中は真空状態にして行った。

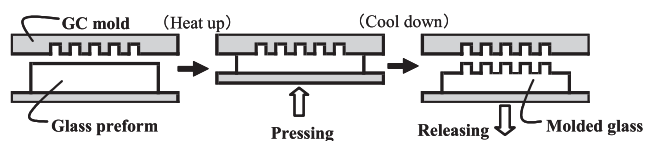


Fig.3 Glass molding

Fig. 4(a)は実験で使用した成形装置内部、Fig. 4(b)は昇温加熱時の成形装置の写真である。加熱には赤外線ランプヒーターを用い、最大加熱温度は 800°C である。また、成形の加圧時は下軸が上昇する。最大プレス圧は 40kN まで設定可能であり、 $\phi 150\text{mm}$ までのモールドを搭載可能である。

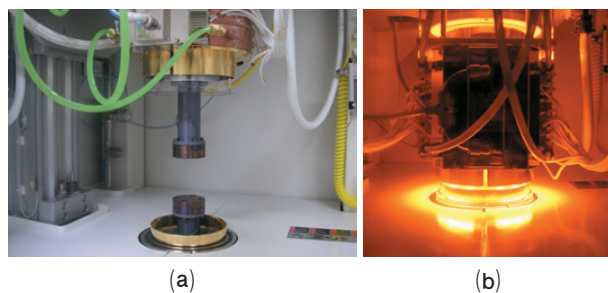


Fig.4 Molding machine: (a) interior exposed, (b) during heating

5 ガラス成形結果

本研究では、サブ波長次元周期構造素子の作製として、高アスペクト比の成形と実際に可視域で機能する波長板の作製についての検討を行った。

5. 1 高アスペクト比の成形検討

溝幅が広いほど、ガラスの充填率が向上するという仮定の下にモールドのパターンを設計した。Fig. 5に(a)溝幅が狭い場合と(b)溝幅が広い場合の成形ガラスの流れについての概念図を示す。

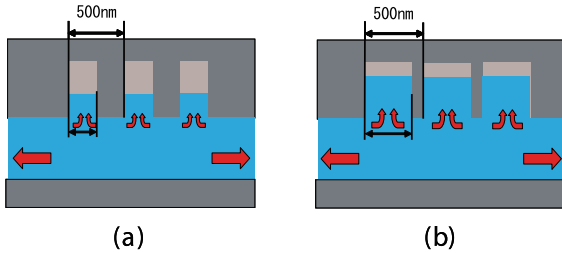


Fig.5 Flow of molded glass through glassy-carbon mold (a) with narrow groove width and (b) with broad groove width

Fig. 6 (a)に $0.6 \times 0.9 \text{mm}^2$ の範囲に実際にパターンニングしたモールドの表面の走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。周期と溝深さはそれぞれ500nm, 750nmである。溝幅を150nm, 220nm, 290nm, 及び330nmとした4つのパターンをモールド表面に作製した。ガラスを成形した結果、一次元サブ波長周期構造をGCモールドからガラス表面へ転写することに成功した。ここで、本実験において使用したガラスは軟化温度 500°C 、波長588nmに

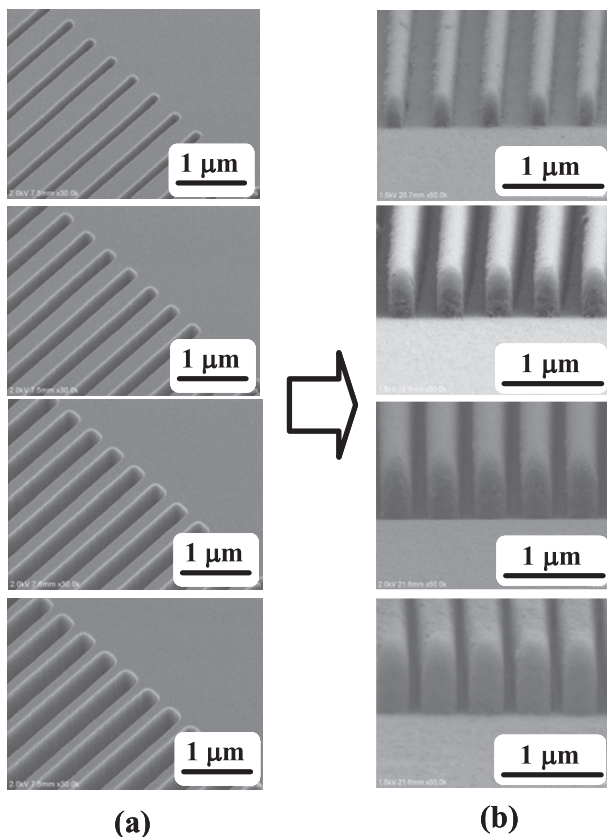


Fig.6 SEM images of four (a) glassy-carbon molds and (b) corresponding molded glass

おける屈折率が1.59のリン酸塩系ガラスである。

Fig. 6 (b)に成形したガラスのSEM写真を示す。溝幅150nm, 220nm, 290nm, 及び330nmのモールドを用い、それぞれ380nm, 510nm, 610nm, 及び730nmの構造の高さを形成することができた。

形成したガラス表面の一次元周期構造のfilling factorと高さの関係をFig. 7に示す。GCモールドの溝幅が広がるほど、成形されたガラスの構造の高さが直線的に増加していることがわかる。

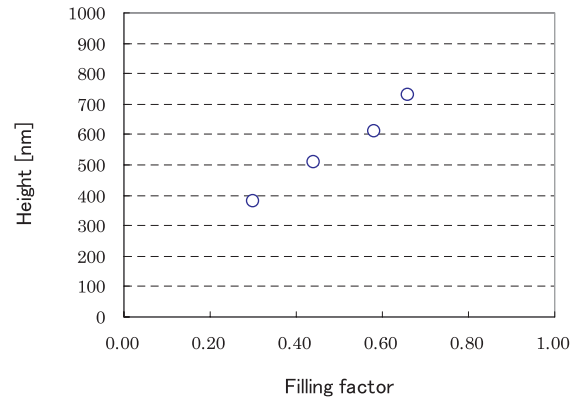


Fig.7 Dependence of height on filling factor

5. 2 可視域で機能する波長板の作製検討

光ピックアップに搭載する波長板を想定し、より広い範囲へパターンニングを施したGCモールドも作製した。パターンの周期、溝深さ、面積はそれぞれ500nm, 350nm, $6 \times 6 \text{mm}^2$ である。Fig. 8 (a)は実際にパターンニングしたモールドの表面SEM写真である。このパターンのfilling factorは約0.5である。Fig. 8 (b)に上記モールドによって成形されたガラスのSEM表面写真を示す。溝深さ350nmの一次元周期構造を全面に形成することができた。

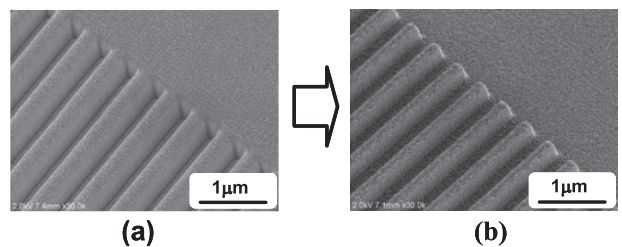


Fig.8 SEM images of (a) glassy-carbon mold and (b) corresponding molded glass

6 周期構造を持つ成形ガラスの光学特性

得られた周期構造体に構造的複屈折が発生していることを確認するため、形成された一次元周期構造を透過するTE偏光とTM偏光の位相差を回転検光子法により測定した。

6. 1 測定原理

測定原理をFig. 9に示す。平行ニコルと直交ニコルの状態で、それぞれ透過スペクトルを測定し、その強度比を元に各波長の位相差を算出することができる。

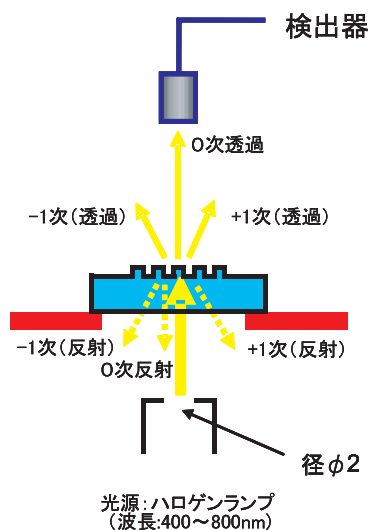


Fig.9 Measurement principle of phase retardation between TE- and TM-polarized beams transmitted through a fabricated 1-D periodic structure

6. 2 測定結果

Fig.10に測定結果を示す。波長600nm付近で約0.1λの位相差発現を確認した。ここで、530nm付近でのピークは入射光の回折によるものである。またFig.10に厳密結合波解析(RCWA)により計算した理論波長特性を示す。Fig.10に示されるように、測定結果は理論予測値とよく一致している。

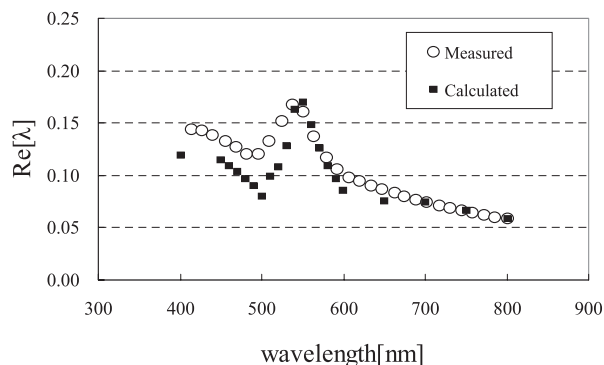


Fig.10 Dependence of phase retardation on wavelength

7 考察

今回、実験に用いたGCモールドは、ドライエッチングによる加工が比較的容易に行え、また、ガラスとの反応性も低く離型性がよいという点が特長である。しかしながら、モールドとしては機械的強度が脆く、連続成形

には向かないという問題点もあり、より高い耐久性のあるモールドの開発に取り組んでいく必要がある。

また、位相差測定において、回折の影響によりピークが発生しているが、よりフラットな位相差特性を得るためには、使用する光の波長よりも短い周期で一次元周期構造を形成することが必要となる。このため、より微細の構造を持つ金型の作製技術を確立していく必要がある。

8 まとめ

ガラスモールド技術を応用すれば、光の波長レベル以下の周期構造をガラス表面に短時間で形成できるため、高精度な素子を大量・安価に生産することが可能となる。そのため、本研究では、サブ波長周期構造をガラスモールド法により酸化ガラス上の広範囲へ形成できることを確認した。また、TE偏光とTM偏光の位相差発現を可視光域において確認した。今後は、周期構造の更なる最適化と成形に用いるガラスの高屈折率化により大きな位相差発現の達成を目指していく。

9 謝辞

本研究は、革新的部材産業創出プログラム「次世代光波制御材料・素子化技術」の一環として新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託を受けて実施したものである。(独)産業技術総合研究所の西井準治様、金高健二様、笠晴也様らの御指導ならびに御協力に感謝致します。

●参考文献

- 1) J. Nishii, K. Kintaka, and T. Nakazawa, "High-efficiency transmission gratings buried in a fused-SiO₂ glass plate," *Appl. Opt.*, 43, 1327-1330 (2004).
- 2) T. Glaser, S. Schröter, H. Bartelt, H. Fuchs, and E. Kley, "Diffractive optical isolator made of high-efficiency dielectric gratings only," *Appl. Opt.*, 41, 3558-3566 (2002).
- 3) S. J. Wilson, and M. C. Hutley, "The optical properties of 'moth eye' antireflection surfaces," *Opt. Acta*, 29, 993-1009 (1982).
- 4) H. Toyota, K. Takahara, M. Okano, T. Yotsuya, and H. Kikuta, "Fabrication of Microcone Array for Antireflection Structured Surface Using Metal Dotted Pattern," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40, L747-L749 (2001).
- 5) H. Kikuta, Y. Ohira, and K. Iwata, "Achromatic quarter-wave plates using the dispersion of form birefringence," *Appl. Opt.*, 36, 1566-1572 (1997).
- 6) T. Yoshikawa, T. Konichi, M. Nakajima, H. Kikuta, H. Kawata, and Y. Hirai, "Fabrication of 1/4 wave plate by nanocasting lithography," *J. Vac. Sci. Technol. B*, 23, 2939-2943 (2005).