# 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*	森	登史晴*	波多野	卓	史*
Hasegawa, H	Kento	Mori, T	oshiharu	Hatano,	Tał	kuji

# 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.

\*コニカミノルタオプト(株) 生産技術センター 加工・成形部

## 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<sup>1)</sup>,波長分離<sup>2)</sup>,無反射<sup>3,4)</sup>,位相制御<sup>5)</sup>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 ることにより、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<sup>4,6)</sup>。 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 構造性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 造性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 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性複屈折と呼ぶ。一次元周 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 身で構造性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。

構造性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 を駆使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 factor0.5,高さ500nmの 構造を形成した場合,発現する位相差は0.25 λ (=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レジストをスピンコート法によ 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レジストに一次元周期構造をパターニングし た。そのEBレジストをマスクとして用い,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,一次元周期構 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した。 ここで,ガラス成形は圧力0.4kN/cm<sup>2</sup>,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№雰囲気 にし,特に成形中は真空状態にして行った。



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℃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, φ150mmまでのモールドを搭載 可能である。





# 5 ガラス成形結果

本研究では、サブ波長一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0.6×0.9mm<sup>2</sup>の範囲に実際にパターニング 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℃,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 くなるほど,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、6×6mm<sup>2</sup>である。Fig.8(a)は実際にパターニン 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性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 TEand 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0.1 λ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 ルド法により酸化物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

- J. Nishii, K. Kintaka, and T. Nakazawa, "High-efficiency transmission gratings buried in a fused-SiO2 glass plate," Appl. Opt., 43, 1327-1330 (2004).
- 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).
- 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).