

ガラス成形による反射防止構造の作製

パナソニック株式会社 AVC デバイス開発センター

田中 康弘

Fabrication of Anti-reflective Structures using Glass Molding

Yasuhiro Tanaka

AVC Devices Development Center

Panasonic Corporation

1. はじめに

この 20 年ほどの間にレンズの製造技術には大きな変革が起こった。1つはガラス成形レンズであり、もう一つはプラスチックによる射出成形レンズである。いずれも 1980 年頃より盛んに研究され、今では各種光学関連製品になくてはならない存在になっている。例えば、銀塩カメラ時代のレンズはほとんどが研磨による球面レンズであった。しかし今ではデジタルスチルカメラ (DSC) にガラス成形レンズが多用されており、非球面化が容易なことも含めて小型化、高性能化に大きな役割を果たしている。また青色レーザを使った高密度光ディスクを読み出すための光ピックアップ用対物レンズにもガラス成形レンズが使われている。

一方プラスチックレンズは撮像レンズの一部のほか、年間数億台を超える DVD ピックアップに搭載されている。またプラスチックレンズの場合は、その金型への微細加工が比較的容易であることから、表面に輪帯を刻んだ回折レンズが量産化されている。回折機能を付加するこ

とで、異種光ディスクの互換記録・再生や色収差補正などの多様な機能を 1 枚のレンズに集約することが出来るようになった。

このようにこの 20 年間で大きなレンズ変革があり、それが DSC や光ディスクの大量普及をもたらす原動力の一つになってきたと言える。しかし、非球面、回折素子以降の大きなテクノロジーの流れがなかなか出てきていないのも事実である。

そうした中でより微細な構造を素子表面に形成することで新たな光学機能の発現を目指す開発が盛んに行われるようになってきた¹⁾。本報告では波長以下の構造をガラス表面に形成して反射防止の機能を付加した光学素子とその製法について紹介する。

2. 光学機器におけるガラスの優位性

DSC や光ディスクのレンズに使用する場合、ガラスとプラスチックの物性で最も注意する必要があるのは、屈折率が温度によって変動する点である。プラスチックにおける屈折率の温度依存性は材料によって若干の差はあるものの -1×10^{-4} (1/K) 程度である。ガラスの場合は材料にもよるが通常プラスチックよりも 2 桁程度小さくほとんど影響はない。

レンズの屈折率が変化すると焦点距離変動が

〒571-8501 大阪府門真市 1006
TEL 06-6900-9746
FAX 06-6900-9658
E-mail: tanaka.yasuhiro@jp.panasonic.com

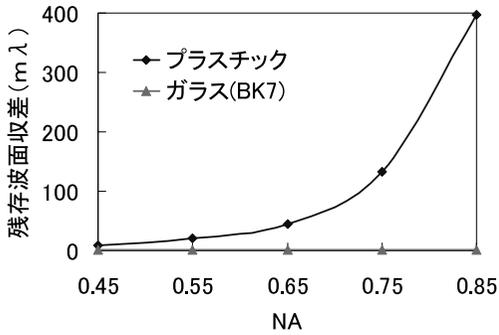


図1 40度温度上昇により発生する残存波面収差

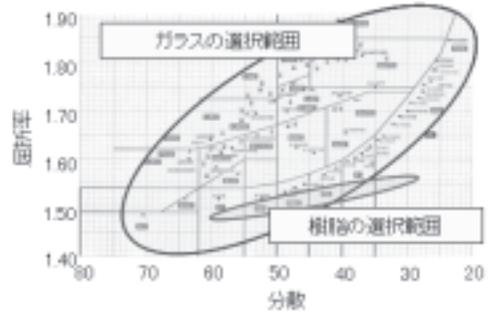
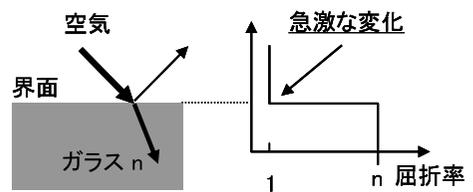


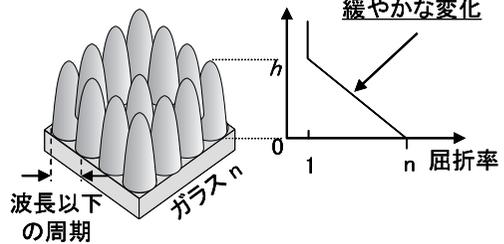
図2 ガラスマップ (屈折率 vs 分散)

生じる。しかし先に上げたDSCや光ディスクなどの光学機器ではいずれもオートフォーカス機能がついており影響がないのではとも考えられる。図1に屈折率の温度による変化が光学性能に与える影響について一例として光ディスクの対物レンズにおける性能変化を示す。光ディスクでは対物レンズはディスクに対して常にオートフォーカス制御がかかっており、レンズの焦点距離変動は補正されている。しかし対物レンズのNAが高くなるにつれてプラスチックレンズにおける残収差が大きくなることが分かる。記録密度はNAに比例し、NA 0.45のCDの場合ではほとんど影響がないが、NA 0.85のBlu-rayの規格では大きな残収差が発生する。一方ガラスレンズの場合はまったく影響を受けない。この現象はDSCでも同じで、一般的に高画質対応になればなるほどプラスチックレンズの屈折率変化が画質へ影響する。

もう一つのガラス材料の大きな優位性は材料の選択の幅が広いことである。図2にガラスとプラスチックの選択範囲を示す。樹脂材料も種々開発されているが、量産性のある射出成形が可能な材料はやはり低屈折率側に偏っているのが現状である。逆にDSCなどでは高性能化のために高屈折率材料が使われる傾向がある。以上のようにガラスはプラスチックに対して大きなアドバンテージを持っている。



(a)光学平面



(b)反射防止構造

図3 反射防止構造の原理

3. 反射防止構造

光学素子の表面に波長よりも短い周期で錘形を配列させることにより、反射防止効果を持たせられることは、1980年頃から知られており、モスアイの目 (Moth Eye) 構造とも呼ばれている²⁾。図3に反射防止構造の原理を示す。

通常ガラスと空気の界面では屈折率の急激な変化が生じるため、そこで一部の光が反射する。一方ガラスの表面に波長以下の周期で錘構造を形成すると空気から内部のバルクのガラスに向かって屈折率が緩やかに変化するように光には感じられる。したがって屈折率の急激な界面

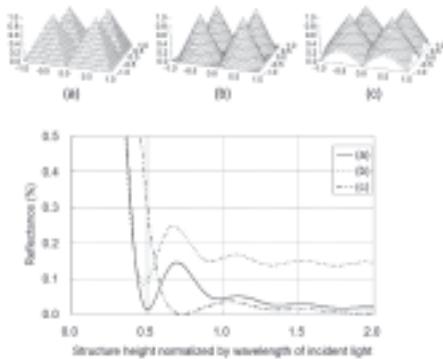


図4 3種の反射防止構造とその反射率

がないため光は反射しないということになる。

もしこのような構造がレンズ成形時に同時に形成できたとしたら、後工程のコーティングが不要になるとともに、広い波長範囲や斜め入射光に対しても低反射率を達成できる可能性がある。

4. 反射防止構造の設計

より反射率の低い構造体を作製するため、まず形状の異なる3種類の単位構造の反射率を厳密結合波解析(RCWA)法により計算して比較した³⁾。図4にそれぞれの構造の反射率の計算結果を示す。(a)の構造は四角錐を隙間無く並べたもの、(b)の構造は円錐をその底面の円が隣接するように並べたもの、(c)は円錐が重なり合った構造である。計算結果の横軸は波長で規格化した微細構造の高さである。

(a)の構造では波長の半分の高さで非常に低い反射率を示すが、それよりも高くなっても低くなっても反射率は急激に上昇してしまう。したがって高さ公差が厳しくなってしまう恐れがある。また機械加工などでは実現しやすい形ではあるが、現状ではそこまで技術が追いついておらず、半導体プロセスなどを流用する場合、完全な四角錐面を作るのはかえって困難となる。

(b)の構造は円錐を並べたものであり、類似の構造がエッチングにより作製されている。し

かし反射率の計算結果から分かるように、構造高さをいくら高くしても反射率は低くならない。定性的には円錐構造とバルクとの境界に平面部が存在し、そこでの反射が残存するためと考えられる。

そこで(b)の構造の平面部をなくして、より低反射率となる(c)の構造を考案した。円錐が重なり合った構造にすることで、界面の平面部をなくした結果、構造高さ0.6以上で四角錐より優れた低反射性能を実現している。

5. 微細構造モールドの作製

今までガラスの表面を直接エッチングすることで反射防止構造を形成した例はあるが⁴⁾、量産性に優れているとは言い難い。そのため、ガラス成形により反射防止構造を一発で形成するためのモールドを開発した。

先に述べた(c)の構造を転写するために、その反転構造をモールド表面に形成する必要がある。さらに、ガラス成形はプラスチック成形に比べてはるかに成形温度が高いため、金型には高耐熱性、高耐久性が必須となる。ここでは耐熱性に優れるSiCモールドに微細構造を形成す

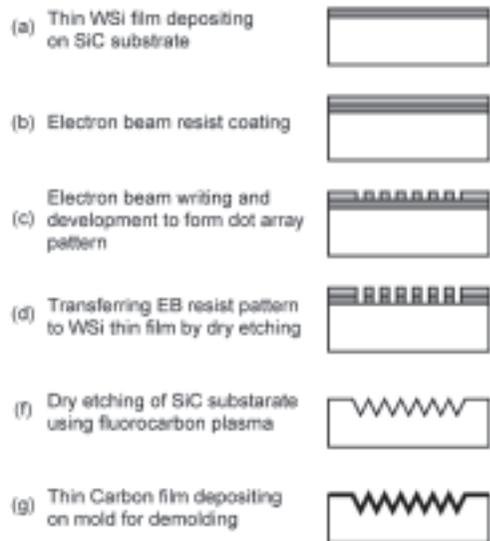


図5 平面モールドの作製プロセス

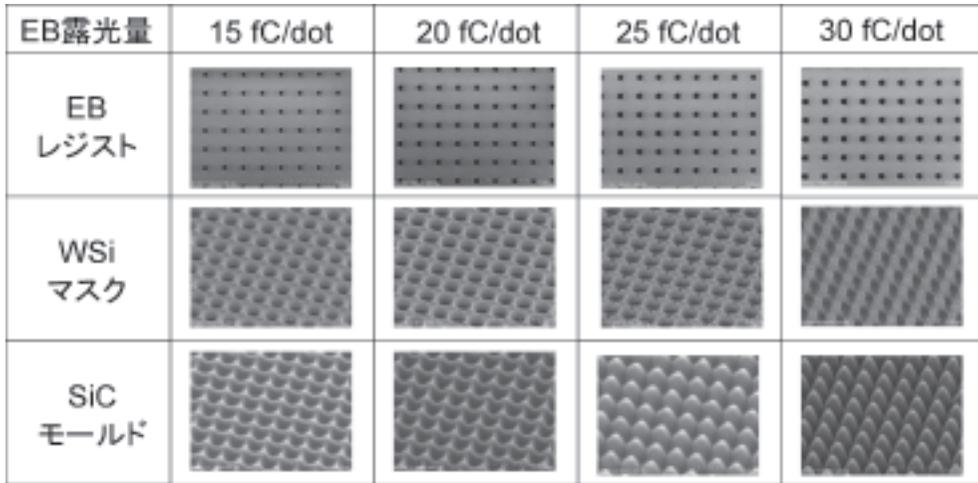


図6 電子ビーム露光量とレジスト，マスク，モールドに形成された構造のSEM写真

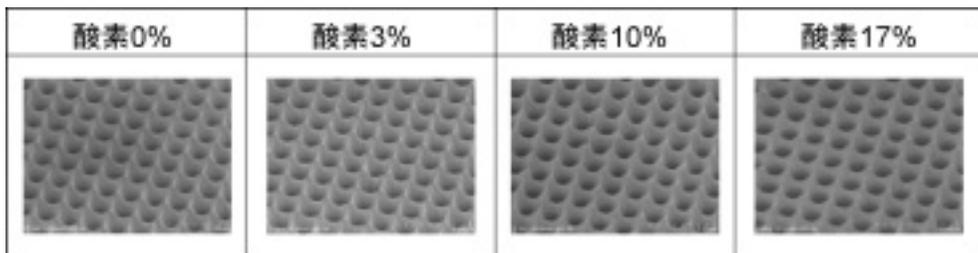


図7 酸素添加量とモールド形状

ることとした。

図5にその加工プロセスを示す。まずスパッタ法によりSiC基板にWSi膜を成膜する。その上にレジストをスピコートして、電子線描画により、アレイパターンを描画する。現像後エッチングによりパターンをWSi層に転写する。続いて、反応性ガスを CHF_3 ガスに切り替え、SiCをドライエッチングする。最後にカーボン膜をスパッタリングで形成し離型膜とした。構造の周期は300 nmとした。

形状の制御は、主に電子ビームの露光量とSiCドライエッチング時の酸素の添加量で調整した。図6に現像後の電子ビームレジスト，WSiマスクおよびドライエッチング後のSiCモールドのSEM写真を示す。ドライエッチング条件を同じにした場合、最終的に得られる周

期構造の形状は、電子ビームの露光量によって決まるレジストの穴径に大きく依存することがわかる。露光量が20 fC/dtの場合、穴径が約70 nmとなり、エッチング後のSiCモールドは周囲が隣り合った逆円錐に近い形状が得られた。一方電子ビームの露光量をさらに増加させると、モールドの形状は正円錐状になることが分かる。

図7にSiCドライエッチング時の酸素濃度とモールド形状の関係を示す。電子ビームの露光量は20 fC/dotで一定とした。酸素を添加していくとWSiとSiCのエッチング速度が変化し、特にSiCのエッチング速度がより早くなる。結果としてSiCに対するWSiの選択比が低下するため、円錐の傾斜角度をある程度制御することが可能となる。

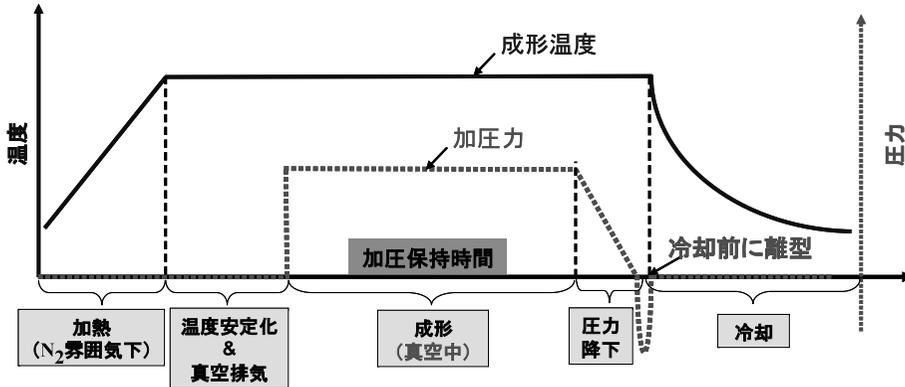


図9 成形プロセスにおける温度と圧力

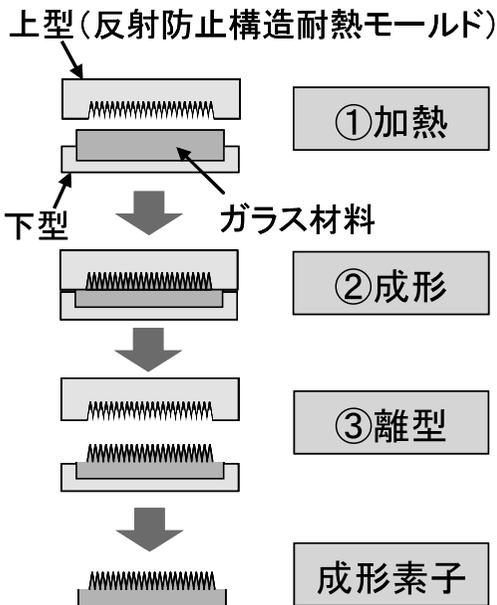


図8 ガラス成形プロセス

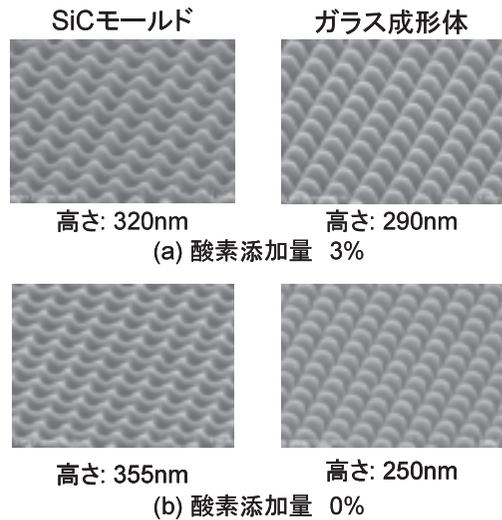


図10 ガラスモールドと成形素子の高さ

6. ガラス成形

図8にガラス成形のプロセスを示す。また図9に成形プロセスにおける温度と圧力のプロフィールを示す。ガラス素材を下型に固定し、上型に微細構造を形成したモールドを用いた。モールド表面の酸化を防止するために、成形室内を窒素置換した後、ガラスとモールドを所定の温度に加熱する。さらに成形中にモールドと

ガラスの間にガスが残留しないように真空引きを行う。成形時には下型を上昇させて圧力を加え一定時間保持する。保持時間や印加圧力によって微細構造の転写率が変化するため、その最適化を行った。また離型は温度を低下させる前に行うことで、熱収縮による成形素子の割れを防いだ。

図10にモールドとそれによって成形されたガラス素子のSEM写真を示す。酸素濃度が0%

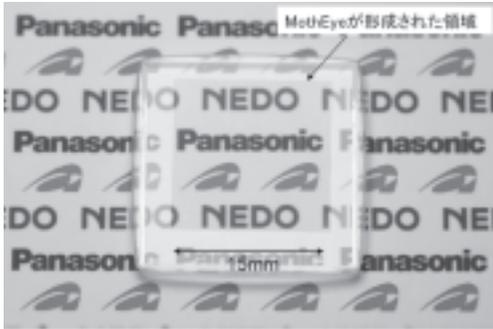


図11 成形されたガラス素子の外観写真

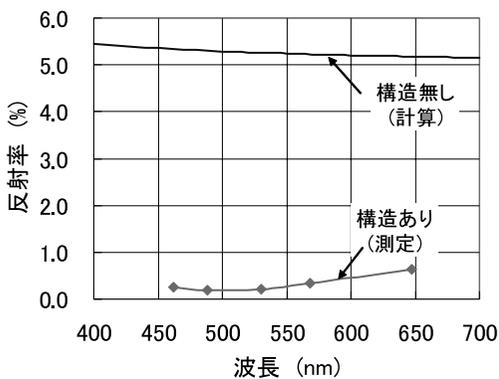


図12 反射率の測定結果

の方がモールドの円錐構造の高さは高いが、実際に成形されたものは、3%濃度の方が高くなっている。これは円錐の傾斜角度が緩やかになってガラスの充填率が上がったためと考えられる。

本手法を用いて、モールドおよびガラス成形体を破損することなく、最大15mm角の領域に反射防止構造を転写することに成功した。図11に成形したガラス素子の外観写真を示す。反射防止構造が形成された部分は照明に用いた蛍光灯の反射がほとんど無く、下の文字がくっきりと見えている。周辺の形成されていない部分は、照明光の反射により文字が見えにくくなっているのが観察できる。

図12にレーザー光を用いて測定した垂直入射での反射率を示す。構造がない場合は計算で示した。構造がない場合は可視光全域にわたって

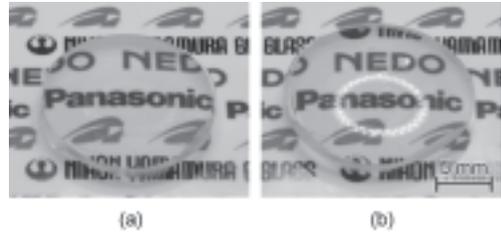


図13 成形されたガラスレンズの外観写真。(a)反射防止構造あり、(b)反射防止構造なし

5%以上の反射率があるのに対して、反射防止構造を形成することで、可視光領域に対してほぼ0.5%以下の反射率を達成した。

7. レンズへの反射防止構造

これまで平面でのプロセスについて述べてきた。しかし平面だけではその用途が限られるため、最終的にはレンズ素子への反射防止構造をその曲面の成形と同時に達成することが求められる。レンズなどの曲面に形成する場合、最大のネックとなるのが電子ビームによる描画である。今回は電子ビームのかわりに、2光束干渉露光法によってパターンニングした。2つのレーザービームを干渉させることによって干渉縞が出来ることはよく知られているが、これを90度回転して2回露光することにより、同じくドットのアレイパターンを得るものである。

レンズ用のモールドの作製には、曲率半径23mm、直径16mmの凹面球加工されたSiC基板を用いた。2光束干渉のために、波長325nmのHe-Cdレーザーを光源として使い、2光束のなす角を68°とすることで周期290nmの干渉縞を生成した。その他のプロセスは平面とほぼ同様である。

図13に(a)反射防止構造を形成したレンズと(b)反射防止構造を形成していないレンズの外観写真の比較を示す。図13(b)では撮影のために使用したリング状照明の反射光が見えるが、図13(a)では反射光がほとんど見えない。レンズ表面の反射率は波長530nmにおいて、反射防止構造を形成したレンズは0.2%と、形成し

ていない場合の理論値5.2%に比べて1/20以下であった。

8. まとめ

ガラス成形による反射防止構造の作成技術について報告した。ガラスはプラスチックに対して大きな優位性を持っているが、一方でプロセス温度の高さから、モールド材料に対する制約が大きく、微細構造の加工が難しかった。また実際に微細構造をガラス成形で転写することもほとんど例がなかった。

反射防止構造の加工のため、まずより低反射の構造を設計し、その設計形状を高耐久のSiCモールド表面に形成する微細構造の形状制御技術を確立した。また平面およびレンズにおいて設計と同様の微細構造素子をガラス成形により得ることができた。反射率は可視光全域にわたってほぼ0.5%以下を達成することが出来た。

実用化への課題としては、繰り返し成形性の確認や曲率半径の小さなレンズへの対応が挙げられる。今後これらの課題を克服し、DSCや

対物レンズにおける非球面、回折素子の次につながる技術の一つとして実用化を目指したい。

謝辞

本研究の成果は、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行われた。

プロジェクトリーダーである産総研の西井準治氏に深く感謝するとともに、研究遂行にご尽力いただいた笠 晴也氏(産総研)、梅谷 誠氏、山田和宏氏、田村隆正氏(以上パナソニック株式会社)に感謝する。

参考文献

- 1) 菊田久雄, 精密工学会誌, 74 (2008) 781.
- 2) S. J. Wilson, and M. C. Hutley, Opt. Acta, 29 (1982) 993.
- 3) 山田和宏, 梅谷 誠, 田村隆正, 田中康弘, 笠 晴也, 西井準治, 第55回応用物理学関係連合講演会, 28 a-ZB-11 (東京).
- 4) H. Toyota, K. Takahara, M. Okano, T. Yotsuya, and H. Kikuta, Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) L 747.