ナノインプリント技術の光学デバイスへの応用

森 川 雅 弘*

*コニカミノルタテクノロジーセンター(株) デバイス技術研究所(〒192-8505 東京都八王子市石川町 2970)

Optical Device Applications Using Nanoimprint Technologies

Masahiro MORIKAWA*

*Device Technology R & D Laboratories, KONICA MINOLTA TECHNOLOGY CENTER, INC.(2970, Ishikawa-machi, Hachioji-shi, Tokyo 192-8505)

Keywords : Nanoimprint, Form Birefringence, Wave Plates, Anti-Reflection Structure

1. はじめに

ナノインプリント法は、被成形材表面に、型(モールド)を圧着(プレス)することによりナノスケールの微細形状を転写形成する技術である。ナノインプリント法の光学デバイスへの応用は、マイクロレンズアレイなどのディスクリートデバイスのみではなく、ウェハレベル技術を駆使したマイクロカメラユニットや、いわゆるロールツーロール技術を用いた連続シート状の光学フィルムなど多岐に渡って展開されている。

本稿では、ナノインプリント法の光学デバイスへの応用例として、樹脂を用いた広帯域 1/4 波長板と、ガラスモールド法による位相差発現デバイスとを紹介する。加えて、射出成型法による無反射デバイス、およびロール状モールド作製技術についても紹介する。

2. 波長板とナノインプリント法

光学デバイスでは、構造周期が光の波長よりも短いとき、構造由来の興味深い光学的特性を得ることができる。たとえば光の波長よりも短い周期の回折格子構造(以下、「サブ波長構造」という。)は、格子に平行な方向と、直交する方向との間で光の屈折率が異なる「構造的複屈折」を示す。しかし、構造的複屈折を利用した波長板(位相差板)では、大きな位相差を得るには構造高さが必要である。このため、波長板作製法として、高アスペクト比の構造が作製可能なナノインプリント法の応用展開が試みられている。

最初に、構造的複屈折デバイスの歴史について説明する。1983年にX線リソグラフィと反応性イオンエッチングとにより、透過性基板上的屈折率 1.47 の PMMA 樹脂に 240 nm 周期の回折格子が作製されている¹⁾。そして波長 632.8 nm の光に対して、格子周期に占める空間の割合を変えることにより、入射方向による屈折率差を制御できることを実測し、計算値と一致することが報告された。次に、1986年に、誘電体基板の両面にサブ波長構造を作製した波長板が実用新案登録出願されている²⁾。そして、1997年には、構造的複屈折

により波長分散を制御することにより波長依存性の無いアクロマチック 1/4 波長板の設計方法が提案されている。波長板の設計には、有効媒質理論(EMT: Effective Medium Theory)が用いられ、厳密結合波解析(RCWA: Rigorous Coupled Wave Analysis)により数値計算、評価を行っていた。しかし、可視から近赤外の波長帯域に対応するために必要なサブ波長構造のアスペクト比の精度が、当時の微細加工技術の精度限界に近く、アクロマチックサブ波長構造の作製が容易ならざることも合わせて示唆している³⁾。

そして、インプリント法による波長板に関する重要技術として、2002年に熱ナノインプリント法により、Si 基板上の PMMA 樹脂に周期約 400 nm、高さ 1200 nm、幅 200 nm の高アスペクト比の構造の作製が報告されている⁴⁾。筆者らは 2004年に、青色光ディスク(405 nm)と、DVD(650 nm)と、CD(780 nm)との異なる記録再生波長を用いる 3 種類のディスクに対して互換性を有する光ディスク装置に用いる広帯域 1/4 波長板の製法に、熱ナノインプリント法を適用し、軽量の樹脂製で、かつ工業的生産性があることを報告した^{5)~7)}。

3. 広帯域 1/4 波長板

1/4 波長板は、直線偏光を円偏光に変換、または、逆に円偏光を直線偏光に変換する偏光制御デバイスであり、たとえば、光ディスク装置の光ピックアップにおいて、レーザの投光路と受光路を効率良く分離するために必須の光学部品である。

図 1 を用いて、サブ波長構造による複屈折性と 1/4 波長板の機能を説明する。入射光の偏波方向が構造に平行な TE 波成分と、構造に直交する TM 波成分との間に屈折率差が生じることで位相差が生じる。構造的複屈折波長板では、構造寸法の選択によって大きな複屈折を発現でき、構造寸法の最適化によって広い波長範囲の光に適合した、アクロマチック性能が発現できる³⁾。広帯域光に対して、位相差特性と透過率特性との整合を得るためのサブ波長構造の寸法設計は、位相差と透過率性能とがそれぞれに構造寸法に依存しているために両者の性能を両立させることは困難であった。しかし、

近年では光学性能の設計手法として体系化されている^{8),9)}。

たとえば、屈折率 1.5 程度の樹脂を用いて、広帯域 1/4 波長板を作製する場合に、位相差 90 度を実現するためのサブ波長構造の高さは 2000 nm 程度、アスペクト比は 10 近くと設計される。広帯域 1/4 波長板の作製方法として、転写可能なアスペクト比が 1 程度の射出成形法では非常に難度が高く、ナノインプリント法が製法として適用している。

しかし、ナノインプリント法が高アスペクト比構造の作製に対応しているとはいえ、前記の波長板の仕様を満たす構造を作製することは高難度のため、最近までは、2 枚構成の波長板が作製されていた^{10),11)}。すなわち、モールド作製および転写成形の難度を低減するために、構造周期 350 nm、幅 230 nm、高さ 1300 nm、アスペクト比 5.7 と、設計値に対して高さを約半分にした波長板を 2 枚用いることで、位相差 90 度を得ていた。

現在では、技術進展により、1 枚構成で周期 350 nm、幅 250 nm、高さ 1950 nm、アスペクト比 7.8 の 1/4 波長板が作製されている^{12),13)}。図 2 は、熱インプリント法による広帯域 1/4 波長板の作製プロセスを示している。被成形材には厚さ 0.1 mm のポリオレフィン系熱可塑性樹脂を、モールドには単結晶シリコンを使用している。熱インプリント法は、加熱したモールドを室温の被成形材表面にプレスし、モールドの形状を被成形材に転写し、その後、モールドを冷却し離型する。

モールドのサブ波長構造は、電子線描画によるレジストパターンをマスクとし、ドライエッチング加工により作製する。波長板としての光学性能を達成するには構造寸法の誤差を 10 nm 以下とする必要がある。さらに、モールド溝部内への

樹脂の充填性および離型性向上のためには、モールド溝部の側壁の表面粗さも 10 nm 以下とする必要があった。

また、離型のときに、樹脂構造部の欠陥を生じないためには離型抵抗力を 10 N 以下とする必要があり、モールド表面にフッ素系薄膜コーティング処理を行った。

図 3 に熱インプリント法によるサブ波長構造ポリオレフィン系樹脂の断面 SEM 観察像を示す。また、図 4 に熱インプリント法によるポリオレフィン系樹脂製の広帯域 1/4 波長板の評価結果を示す。図 4 に示すように、実測性能は、RCWA により導いた理論値と良く一致している。そして図 5 に、熱インプリント法による広帯域 1/4 波長板を光ディスクドライブに搭載した際の再生信号の Eye パターンを示す。図 5 に示すように、信号波形毎の間隔が開き、実用可能な再生信号が得られていることを確認した。

図 3 光学樹脂上のサブ波長構造の断面 SEM 観察像

図 1 構造複屈折と 1/4 波長板の機能

図 2 デバイス作製プロセス

図 4 広帯域 1/4 波長板の光学評価

4. ガラスモールド法による微細構造転写¹⁴⁾

従来のインプリント法では、被成形材料としては低温成形が可能な樹脂のみであったが、屈折率の高い光学ガラスを用いることで、構造高さを低くできる。しかし、ガラスでは数百度の高温が要求されるため報告例がなかったが、モールドにグラッシーカーボン(GC)を用いて、リン酸塩系光学ガラスに一次元サブ波長周期構造を転写する方法が報告されてきている。

すなわち、モールドとしてGC基板に電子ビームリソグラフィ法で一次元周期構造のレジストマスクを形成し、反応性ガスとして酸素を用いた誘導結合プラズマイオンエッチング法により周期構造を形成した。成形プロセスは、上下のモールド間にガラスプリフォームを置き、これらを加熱後、一次元周期構造を形成したモールドをガラスプリフォームの軟化温度 500°C 付近で圧力 0.4 kN/cm² でプレスし数分間保持後、モールドを冷却し離型した。成形チャンパ内は N₂ 雰囲気にし、とくに成形中は真空状態とした。

そして、構造周期 500 nm、溝深さ 350 nm、面積 6 × 6 mm のモールドを用い、表面に一次元サブ波長周期構造を形成したガラス波長板を得た。この屈折率 1.59 のガラス波長板を用いて、波長 600 nm 付近の TE 偏光と TM 偏光の透過光で約 0.1 波長分の位相差発現を確認した。

5. 無反射構造デバイス¹⁵⁾

レンズなどの表面の光反射を防止するために、誘電体多層膜による反射防止膜が広く使用されている。これに対して、表面に光の波長以下の周期を持つ微細形状を形成することにより光の反射率を低減する無反射構造は、誘電体多層膜よりも広い波長範囲および入射角度において反射率を低減できる。無反射構造に要求されるアスペクト比は、それほど高くないため、射出成形法により形成可能である。

コニカミノルタテクノロジーセンターらの研究グループは、非球面レンズ製造用金型の表面に、無反射構造を転写するための微細形状を形成し、その金型を用いて射出成型法でレンズを作製し、デジタルカメラに組み込んで無反射構造の効果を確認した。

通常工程と同様の面形状加工を行った金型に、紫外光レー

ザによる二光束干渉露光法によりサブ波長サイズのレジストパターンを作製し、これをマスクとしてドライエッチング法により微細形状を作製した。金型表面を直接加工するため、非球面形状を損ねることなく、サブ波長サイズの微細形状を形成したため、短期間での作製が可能であった。

金型作製の課題は、金型の凹面へのレジストの均一塗布方法、二光束干渉露光の際の迷光発生防止方法、および、成型時の高温・高圧に耐える微細構造をドライエッチングにより精度良く形成する方法などであった。このため、たとえば、レジストマスクのエッチング耐性改善のため、レジストマスク頂部のみに Ni コートを行った。

直径 3 mm の前記金型を用いて、携帯電話用のレンズを射出成形したところ、平坦な中央から面の傾き 35° の周辺まで無反射構造が作製できた。この無反射構造付非球面レンズをデジタルカメラに組み込んで撮像評価を行い、光源などによる不要回折光の発生が認められないこと、および画面中央の光源によるゴースト強度が低減されていることを確認した。

6. シームレスな無反射構造を持つロール状モールド

今まで説明してきたように、ナノインプリント法では、型(モールド)の作製に、電子ビームリソグラフィまたは二光束干渉露光などが用いられていたため、大面積化は非常に大きな課題だった。すなわち、ナノインプリント法では、作製可能な面積に限りがあり、継ぎ目の無い連続パターンの作製は困難であった。しかし、狭帯域の無反射構造に関しては、モールドにポーラスアルミナ膜を用いることで、その解決が試みられている。

たとえば、アルミニウム円柱の外壁表面に陽極酸化法によりナノオーダーの規則凹部構造を有する高規則性ポーラスアルミナ膜を形成したロール状モールドでは、被成形材として樹脂を用いた光ナノインプリント法により、構造周期 100 nm で規則配列させた大面積のナノピラーアレーが報告されている¹⁶⁾。

また、アルミニウム円筒の内壁に高規則性ポーラスアルミナ膜を形成し導電化処理後にニッケル電鍍し円筒を溶解除去することで、直径 73 mm、高さ 90 mm のピラー(柱)が、周期 100 nm で規則配列しているロール状ニッケル電鍍モールドを用いて、樹脂を用いた光ナノインプリント法により大面積ポリマーホールアレーが報告されている¹⁷⁾。本方法ではホールアレーが形成できるだけでなく、モールド材料を酸化アルミニウムからニッケルに置き換えたことで、モールドの耐久性も向上している。

7. おわりに

ナノインプリント法の光学デバイスへの応用として、サブ波長オーダーの高アスペクト比周期構造による構造的複屈折を利用した広帯域 1/4 波長板などを紹介した。光学デバイスの作製方法は、射出成形法とインプリント法とが構造のサイズ、アスペクト比によって、比較され、量産性に優れた方が採用される。また大面積の無反射構造のロールツーロール生産のため、シームレスなロール状モールドとして、アルミナ

図5 次世代光ディスクドライブの再生信号 Eye パターン

ナノホールアレイを用いる方法が提案されている。

ナノインプリント法による光学デバイス作製が、産業的な成功を収めるためには、既存デバイスの単なる置換えではなく、新たな付加価値の提供による適用可能性拡大、モールドの低コスト量産技術確立、インプリント工程安定化、および量産時の機能性評価技術確立、により既存デバイスとの差別化を図ることが望まれる。

(2008-7-10 受理)

文 献

- 1) D. C.Flanders ; *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 492 (1983).
- 2) 日本国実用新案出願公開 昭和61-155801 (1986).
- 3) H. Kikuta, Y. Ohira and K. Iwata ; *Appl. Opt.*, **36**, (7), 1556 (1997).
- 4) Y. Hirai, H. Okubo, S. Yoshida and Y. Tanaka ; Abstract of the 46 th EIPBN Conference, p. 247 (2002).
- 5) H. Miyakoshi, M. Morikawa, O. Masuda, M. Imae, M. Yamada and K. Furuta ; Optics Japan 2004 Ext. Abstract, p. 44 (2004).
- 6) H. Miyakoshi, M. Morikawa, O. Masuda and K. Furuta ; *Konica Minolta Technology Report*, **2**, 97 (2005).
- 7) H. Miyakoshi, M. Morikawa, O. Masuda, M. Imae, M. Yamada and K. Furuta ; Optics Japan 2005 Ext. Abstract, p. 466 (2005).
- 8) M. Imae, O. Masuda and K. Furuta ; Optics Japan 2005 Ext. Abstract, p. 464 (2005).
- 9) M. Imae, M. Miyakoshi, O. Masuda and K. Furuta ; *Konica Minolta Technology Report*, **3**, 62 (2006).
- 10) 宮越博史, 森川雅弘, 増田 修, 今榮真紀子, 山田基弘, 古田和三 ; オプトロニクス, **25**, (295), 167 (2006).
- 11) M. Morikawa, O. Masuda, H. Miyakoshi, M. Imae, M. Yamada and K. Furuta ; ODF'06, Nara, 49-50 (2006).
- 12) 増田 修, 森川雅弘, 宮越博史, 今榮真紀子, 山田基弘 ; ナノインプリント技術を用いた広帯域波長板の作製, 日本光学会微小光学研究グループ第 103 回微小光学研究会, **25**, (1), 29 (2007).
- 13) O. Masuda, H. Miyakoshi, M. Saito, M. Yamada and M. Morikawa ; *Konica Minolta Technology Report*, **5**, 101 (2008).
- 14) K. Hasegawa, T. Mori and T. Hatano ; *Konica Minolta Technology Report*, **5**, 95 (2008).
- 15) 大森滋人, 西田直樹, 山本裕子, 上田裕昭, 中塚雄三 ; 反射防止構造のためのレンズ金型微細加工とその成形技術, 日本光学会 (応用物理学会) 第 31 回光学シンポジウム (2006).
- 16) 柳下 崇, 西尾和之, 岡本英子, 小嶋克宏, 佐久間諭, 魚津吉弘, 益田秀樹 ; 第 67 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, **30 a-RC-7** (2006).
- 17) 熊谷奈緒子, 柳下 崇, 西尾和之, 原田真宏, 益田秀樹 ; 鋳型プロセスにもとづくロール状メタルモールドの作製と連続ナノインプリント, 電気化学会第 74 回大会 (2007).