

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860003

研究課題名（和文） サブ波長屈折回折光学素子のナノ精度成形に関する研究

研究課題名（英文） Study on Nano Forming Process of Sub-Wave-Length Optical Diffraction Element

研究代表者

周 天豊 (ZHOU TIANFENG)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30582548

研究成果の概要（和文）：

カメラや分光器などの光学機器にあるレンズや回折素子の表面に周期構造を製作するため、超精密金型による高温プレスを用いて高精度・高効率にガラス微細形状を成形する方法の開発を目指し、ガラスモールドプレス（GMP）成形技術を提案した。H22年度とH23年度では下記のような研究成果が得られた。

- (1) ニッケルリン（Ni-P）金型にピッチ 500 nm の平行溝を創成した。
- (2) 有限要素法解析によるガラスプレス成形条件を最適化した。
- (3) ガラスプレスを行い、サブ波長サブ波長屈折回折光学素子に成功した。

研究成果の概要（英文）：

Glass lens and micro diffraction element are widely used in optical equipment, like digital camera, spectroscope and so on. In order to fabricate these kinds of optical elements with surface microstructures precisely and efficiently, glass molding press (GMP) is proposed to generate microstructures in this research. The following research result and achievement are obtained in these two years.

- (1) Parallel microgrooves with a minimum pitch of 500 nm are created on the Nickel Phosphorus (Ni-P) surface.
- (2) The forming condition for creating microgrooves on glass is optimized by Finite Element Method simulation.
- (3) The experiments of glass molding press were carried out, and sub-wave-length optical diffraction element is successfully generated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：生産工学・加工学

キーワード：ガラスレンズ，微細構造，超精密切削，FEM シミュレーション，微細成形，プレス成形

1. 研究開始当初の背景

高性能な家電製品、デジタルカメラ、分光器などの光学機器の発展が目覚ましく、さらなる高画質化・小型化が求められている。これらの光学機器の発展に寄与しているデバイスとして微細周期構造を有する導光板が挙げられる。また、微細部品の表面トポグラフィを光干渉原理により測定する装置において重要な屈折回折格子のニーズが急増している。さらに、インターネットの拡大による情報流通量の急速な増加に伴い高速・高信頼性の光通信ネットワーク構築の要求が高まっている。光通信においても微細レンズアレイやプリズムアレイなど微細形状を有する光ファイバコネクタの加工技術開発がますます重要となっている。現在、これらのサブ波長周期構造や3次元微細形状のほとんどは、プラスチック素材を半導体プロセス(MEMS)やナノインプリントで製作されている。しかしこれらの技術では耐候性、耐食性、透過性の優れたガラス素材に対して微細構造を加工することは困難であり、量産は不可能である。

そこで本研究では、超精密金型による高温プレスを用いて高速・高精度にガラス微細形状を成形する方法の開発を目指し、従来の球面・非球面レンズの量産技術として注目されてきたガラスモールドプレス(Glass Molding Press, GMP)成形技術を微細形状加工に適用することを提案する。

このGMP成形技術は申請者と所在研究室のワークグループが研究してきた高精度・高効率・低コスト量産技術である。これまでにガラス高温粘弾性をGeneral Maxwellモデルを用いて、非球面ガラスレンズ成形工程の加熱、プレス、アニーリング、そして冷却の四段階をシミュレーションし、成形過程を可視化している。また、数値解析と実験の両方から、非球面ガラスレンズ成形における成形条件の最適化及び金型の補正に成功し、さらに非等温成形法を提案し、成形サイクルの大幅な短縮化を達成している。このGMP成形法を応用し、微細構造を有する金型を用いてガラス素材表面に金型の微細形状を転写し成形する微細形状GMP成形法を検討する。本方法は短時間で成形金型の微細形状をそのままガラスに転写するため、従来法と比較し安価に量産が可能となる。金型の3次元ナノ微細構造は、耐高温・耐圧力の材料に対してダイヤモンド工具を用いた超精密切削により創成する。すでに周期10 μm 、高さ5 μm の溝とピラミット形状の3次元微細形状の創成を達成している。さらにサブ波長のナノ周期

構造を創成できれば、産業に大きく影響を与え、光学機器の革新になるといえる。

しかし滑らかな連続曲面である非球面レンズ成形と比較して、ガラス微細形状GMP成形法では微細形状部におけるガラス材料の流動性が悪くなり、精密な転写が困難になる。また、金型微細形状の山と谷の先端部分が変形しやすいため、特に小さな構造周期ほど転写精度が悪化する。さらに、微細形状GMP成形法で創成された微細形状の精度及び光学特性は成形条件によって大きく左右される。そのため最適な成形条件を把握することが非常に重要となってくる。

2. 研究の目的

高性能な情報家電製品、超精密光学測定装置、高速・大容量光通信など幅広い産業の発展に寄与している干渉露光用サブ波長屈折回折素子の必要性が高まっている。そこで本研究では微細周期構造を有する屈折回折格子、微細レンズアレイやプリズムアレイなどの光学部品を高精度加工することを目指して、高精度・高効率・低コスト加工技術としてガラスプレス成形加工技術を提案する。本研究ではこれまでの非球面ガラスレンズ成形の研究を引き続き、実用化を目的とし、加工した微細形状を有する金型を利用しプレス成形によりガラスに形状を転写することでナノサイズ回折素子を量産する。実験結果と有限要素法(FEM)シミュレーション結果を比較し、解析モデルの検証、ナノ微細成形メカニズムの解明を行い、GMP成形の加工性の向上を図る。

3. 研究の方法

(1) サブ波長金型の超精密切削

まず、3次元加工が容易に行うことができない切削によるサブミクロン周期構造の製作を行った。一般に金型には高度な高温安定性を有する超硬合金(WC)やシリコンカーバイド(SiC)などが用いられる。しかし、これらの材料をMEMS以外の加工技術での加工が困難であり、現状では大面積加工は不可能である。一方、近年ではアモルファスニッケルリン(a-Ni-P)の材料開発の進展により耐高温性・硬度が向上し、ガラス成形用金型材料として使用が可能となった。本研究では、比較的加工しやすい無電解a-Ni-Pメッキをダイヤモンド工具で超精密にナノ周期構造の微細形状加工し、ガラスプレス成形用金型として用いた。

切削による a-Ni-P にサブミクロン周期構造の製作で重要なパラメータの 1 つに切込み量がある。切込み量を精確に行うためには接点出しを精確に行う必要がある。ただし、従来マイクロオーダーの周期構造の製作に使用されている動力計では十分な精度のサブミクロンの切込み量を得ることはできない。そこで、動力計による接点出しを行った後に、バイトと工作物表面との距離を 2 μm 離し、その位置から 200 nm ずつ切込み量を増加させ加工を行うことによりサブミクロンの切込み量による周期構造の製作を確実に行うことを可能とした。また切削痕深さが増加すると切り屑の排出方向が変化し、平行溝の山部分にくぼみが発生するため、切りくずの排出方向を抑制する方法を提案し、ピッチ 500 nm の平行溝の製作に成功した。

また、a-Ni-P 金型の寿命向上のため、a-Ni-P を熱処理により結晶化させ、Ni-P の高温硬度を更に向上することになって金型の寿命が延長した。また結晶化による硬度の増加に対して、ダイヤモンドバイトの摩耗を抑制する加工法を新たに研究した。その結果、最初の切込み量を 200 nm として切削を 2 回繰り返して、最終に切込み量 100 nm の仕上げ切削を行うという加工法を提案し、結晶化した Ni-P に対してサブ波長周期の溝の創成に成功した。

(2) 微細形状プレス成形のシミュレーション

非球面レンズプレス成形と同じように、ガラス成形の 4 段階、加熱、プレス、アニーリング、そして冷却をモデル化して各々の FEM シミュレーションを行い、理論的な最適成形条件を得る。まず GMP 成形法によるガラス微細形状の形状精度、表面粗さ及び光学性能の向上のために、成形時の材料の微視的な流動現象と高温高圧下でのガラス・金型間の界面現象を解析する。それに加えて、応力分布とひずみ分布の解析から応力集中を回避する条件、及び最適な加熱・加圧条件を導出する。さらに、ガラス・金型間の熱膨張の差異による転写誤差を計算により導出して金型を補正し、転写精度を向上させる。

(3) ガラスプレス成形実験及び転写性の評価

金型の高温変形抑制、表面性状保持及び離形性向上のために、a-Ni-P 金型熱処理の温度、プレス成形条件、ガラス硝材の形状の検討を行い、金型の長寿命化を達成する。

実験においては、シミュレーションの結果を用いて最適化した成形条件で GMP 成形を行い、ガラスに微細形状を創成する。まずダ

イヤモンド工具を用いた超精密切削により耐高温・耐圧力材料の表面に微細溝を作成する。その後、成形した微細形状を測定し、成形精度を評価しシミュレーションにフィードバックする。またプレス後の金型を 10 ショットずつ観察し、金型の形状変化及び寿命を評価した。

4. 研究成果

ガラスモールドプレス成形技術を微細形状加工に実用するため、金型の切削、成形過程のシミュレーション及び成形実験を行い、H22 年度と H23 年度では下記のような研究成果が得られた。

まず、熱処理による Ni-P の結晶化する方法・条件を実験的に解明した。また、Ni-P を結晶化させることにより、Ni-P の高温硬度が向上した一方、切削性は悪化した。そこで切込み量を数百 nm オーダで制御し、切削回数を増加させることによって、ダイヤモンドバイトの摩耗を抑制し、結晶化した Ni-P に対するサブミクロン周期の溝の創成に成功した。

次に、GMP 成形に微視的なシミュレーションと巨視的なシミュレーションの両方を行い、微視的な分析と巨視的な分析によりサブ波長屈折回折光学素子のナノ精度成形の最適条件を導出した。成形時のガラス材料の微視的な流動現象と高温高圧下でのガラス・金型間の界面現象を可視化した。また、成形温度・プレス力の最低条件を推定し、サブ波長屈折回折光学素子のナノ精度成形に必要な不可欠なプレス成形条件を導出した。

最後に、結晶させた Ni-P 金型を用いてシミュレーションに得られた最適成形条件でガラスプレス実験を行い、サブ波長ガラス屈折回折光学素子を創成した。従来のアモルファス Ni-P がプレス力による変形を克服し、ガラス微細溝の成形精度の向上とともに、Ni-P 金型の寿命の向上が確認できた。また解析のモデルの有効性を検証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

1. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Kuriyagawa Tsunemoto. Size effects on transferability and mold change of glass molding press for microgrooves, *Advanced Materials Research*, (2012). (Accepted) (査読有)

2. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Jun Masuda, Kuriyagawa Tsunemoto. Ultraprecision mass fabrication of aspherical Fresnel lens by glass molding press, Advanced Materials Research, Vol. 325 (2011), pp.713-718. (査読有)

3. Jun Masuda, Jiwang Yan, Tianfeng Zhou, Tsunemoto Kuriyagawa, Yasushi Fukase. Thermally induced atomic diffusion at the interface between release agent coating and mould substrate in a glass moulding press, Journal of Physics D: Applied Physics, 44 (2011) 215302 (12pp). (査読有)

4. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Jun Masuda, Takashi Oowada, Tsunemoto Kuriyagawa. Investigation on shape transferability in ultraprecision glass molding press for microgrooves, Precision Engineering, Vol. 35 (2011), pp.214-220. (査読有)

5. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Nobuhito Yoshihara, Tsunemoto Kuriyagawa. Study on nonisothermal glass molding press for aspherical lens, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, Vol. 4 (2010), No. 5, Special Issue on Advanced Manufacturing Technology (LEM21), pp.806-815. (査読有)

6. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Tsunemoto Kuriyagawa. Comparing microgroove array forming with micropillar array forming in the glass molding press, Key Engineering Materials, 447-448 (2010), 361-365. (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

1. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Tsunemoto Kuriyagawa. High-efficiency and ultra-precision glass molding of aspherical lens and microstructures, International Symposium on Ultraprecision Engineering and Nanotechnology, ISUPEN2012, Tokyo, Japan, Mar. 15th, 2012.

2. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Kuriyagawa Tsunemoto. Size Effects on Transferability and Mold Change of Glass Molding Press for Microgrooves, The 8th CHINA-JAPAN International Conference on Ultra- Precision Machining (8th CJUPM, 2011), Hangzhou, China, Nov. 20-22, 2011.

3. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Sergey Bolotov, Tsunemoto Kuriyagawa. Improvement of the forming ability in microgroove molding by ultrasonic vibration, The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in

21st Century (LEM21), Saitama, Japan, Nov. 8-10, 2011.

4. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Jun Masuda, Kuriyagawa Tsunemoto. Ultraprecision mass fabrication of aspherical Fresnel lens by glass molding press, International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2011), Stuttgart, Germany, Sep. 18-21, 2011, pp. 713-719.

5. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Tsunemoto Kuriyagawa. Ultraprecision molding process of optical glass elements in mass production, International Symposium on Micro/Nano Mechanical Machining and Manufacturing, ISMNM 2010, Guilin, China, Aug. 18th -20th, 2010.

6. Tianfeng Zhou, Jiwang Yan, Nobuhito Yoshihara, Tsunemoto Kuriyagawa. Shape compensation of the molding dies in glass molding press for aspherical lens, The 9th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing, Changsha, China, Jul. 17th~19th, 2010.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

ホームページ等

<http://pm.mech.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

周 天豊 (ZHOU TIANFENG)
東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30582548

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：