

論文内容要旨 (和文)

2018年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏 名 矢 作 徹



論 文 題 目

多層膜による微細多段フィン構造形成と樹脂への形状転写に関する研究

[第1章 序論]

光学部品や光学製品では反射光の波長選択性や反射防止等の機能性を付与している。一方自然界のモルフォ蝶の翅の青色発色、表面の微細構造を利用した様々な機能を参考にして、多くの分野において微細構造形成による高機能が実現されている。MEMS プロセスを用いて特定の波長領域を反射する光学素子が作製されているが、コストが高く工数も多いため、量産における課題となっている。そこで本論文では、モルフォ蝶のように構造色を発現するフィン構造の樹脂への転写を目指して、MEMS プロセスを用いて微細構造をもつ型を形成し、それを型に用いた成形により樹脂表面への微細構造の転写の研究に取り組んだ。樹脂成形用のモールドとして、モルフォ蝶の鱗粉構造に類似した μm スケールのリッジ（筋）構造から水平方向に突き出す数百 nm ピッチの水平型の多段フィン構造に加え、樹脂成型時の抜き角度を考慮した斜め多段フィン構造を新たに考案し、Si 基板上への形成手法について検討した結果と、これらを型に用いた樹脂への形状転写性について評価した結果について述べる。

[第2章 シミュレーションによる構造設計]

解析ソフトを用いて水平、および斜め多段フィン構造の樹脂表面における反射特性についてシミュレーションを行った。その結果いずれの形状においても特定の波長領域で反射強度が大きくなった。またリッジ構造のピッチを小さく、フィンの幅を大きく、多段フィンの段数を多く、フィンの厚さを薄くすることにより、反射強度が大きくなる傾向を確認した。反射強度については、実際のモルフォ蝶の翅は反射率が 60%以上であるが、本研究で作製する構造ではリッジ構造のピッチが大きくフィンの密度が低いため、解析結果では 20%程度となった。

[第3章 3次元微細構造金型の作製と転写の基礎検討]

フォトリソグラフィ、スパッタリング、ドライエッチング、ウエットエッチングを用いて、Si 基板上に水平、および斜め多段フィン構造モールドを作製した。多段フィンは、 SiO_2/Ti あるいは Mo/Ti の多層膜で形成した。斜め型の場合は予め V 溝を Si 基板上に形成し、多層膜を成膜後、反応性イオンエッチングで多層膜をリッジ状に深堀一括加工した。その後、希フッ酸でリッジ部の Ti を選択的にサイドエッチングして多段フィン形状を形成した。PDMS によるキャスト法、およびシクロオレフィン樹脂への熱インプリントによる形状転写の基礎検討を行った。PDMS によるキャスト法では、水平、および斜め多段フィン構造いずれの場合においても、フィン構造の内部まで樹脂が充填されず、形状転写しなかった。一方、熱インプリントにおいてはフィン構造の内部まで樹脂が充填された。水平構造では成形後の型からの剥離において、モールドと樹脂の双方で破損が生じたのに対し、斜め多段フィン構造の場

合は、破損や変形がなく型の多段フィン形状が転写された。光学特性においても特定の波長領域で反射強度が若干強くなることも確認した。反射強度は 1~2%程度であり、解析に比較して小さくなった。これは成形フィンの幅が小さいことや、フィン端部が変形している等、成形樹脂の形状精度が、解析に用いた構造に比べて、不十分であることに起因するものと考えられる。反射強度を大きくするためには、より形状精度のよい成形条件の検討が必要である。

[第4章 様々な樹脂への3次元構造転写]

斜め多段フィン構造基板を型に用いて、いくつかの樹脂（シクロオレフィンポリマ、ポリメタクリル酸メチル）への形状転写を検討した。はじめに動的粘弾性測定により樹脂の温度特性を評価した。評価で得られたガラス転移点付近の温度において成形を行うことにより、いずれの樹脂でも多段フィン形状が転写されることを確認した。また、シクロオレフィンポリマでは 10 回の繰り返し成型において、型の破損はなく、モールドを繰り返し使い回せることがわかった。

光学特性を評価した結果、シクロオレフィンポリマ、ポリメタクリル酸メチルの斜め多段フィン構造形成基板において、380~600 nm 領域でフィンが無い場合に比べて反射強度が強くなり、多段フィン形成による光学特性について確認した。

[第5章 可変波長選択技術への応用]

多段フィン構造形成樹脂の変形、伸縮を利用した、可変波長選択デバイスの作製について検討した。光学シミュレーションの結果、リッジ構造のピッチ $4\mu\text{m}$ 、フィンのピッチ $0.4\mu\text{m}$ で作製した多段フィン構造は、800~900 nm 領域で強い反射特性を示すが、樹脂全体をリッジ方向に 80 % 延伸して、リッジ構造のピッチを $3\mu\text{m}$ 、フィンのピッチを $0.3\mu\text{m}$ に変形させることで、反射強度の強い領域は 600 ~700 nm 変化し、さらに変形前より 300 % 延伸することにより、リッジ構造のピッチ $2\mu\text{m}$ 、フィンのピッチ $0.2\mu\text{m}$ となり、400 ~500 nm 領域で反射特性を示すことを確認した。以上より可変波長選択技術への見通しを示した。

[第6章 結論]

鱗粉構造に類似した μm スケールのリッジ構造と数百 nm ピッチの多段フィン構造を Si 基板上に形成し、種々の樹脂へ形状転写を行い以下の結果を得た。

- ・微細多段フィン形状を樹脂に転写するため、離型方向に傾斜した斜め多段フィン構造を新たに考案し、MEMSプロセスでのモールド作製手法を確立した。

- ・いくつかの樹脂について、熱インプリントを用いて適正な条件で成形することにより、モールドの多層フィンの狭ギャップ内に樹脂を充填できることを確認した。

- ・斜め多段フィン構造のモールドにすることで、成形後の離型性が大きく改善した。モールドは破損や変形もなく、10回以上繰り返し使えることを実証した。

- ・成形された樹脂はシミュレーションで示唆された波長選択的な光学反射特性を示した。

論文内容要旨 (英文)

2018年度入学 大学院博士後期課程

機械システム工学専攻

氏名 矢作 徹



論文題目

Research on micro-multi-fin structure formation by multilayer film and shape transfer to resin

This thesis describes the fabrication of casting mold with micro-multi-fin structures and discusses the experimental results of the shape transfer to resin materials. In addition to horizontal micro-multi-fin structures, a inclined type was newly proposed for well transfer properties. To optimize the design of these micro-multi-fin structures, the optical characteristics of the horizontal and inclined micro-multi-fin structures were calculated using FEM and RCWA optical simulation method. In both of the horizontal and inclined structures, the reflection intensity increases in blue wavelength range 400-600 nm with increasing the number of fin layers and fin width and decreasing the ridge pitch and fin thickness.

Using the micro-electro-mechanical system (MEMS) fabrication process such as multi-layer thin film sputtering, dry etching for micro-ridge formation and the selective side-etching of the multi-layer thin films, the micro-mold structures having a microscale ridges structure and 0.2 μm thick gapped multi-fin structures were successfully fabricated on a Si substrate. The inclined micro-multi fin structures was realized using these processes on the micro patterned Si substrate prepared by anisotropic etching method.

The shape transfer to resin materials were examined using cast molding and thermal imprinting processes. The cast molding was conducted using polydimethylsiloxane (PDMS) to fill the horizontal and inclined mold. However, PDMS was not filled into the narrow gaps of the both multi-fin structure. On the other hand, cycloolefin polymer (COP) and poly-methyl methacrylate (PMMA) were successfully injected into the narrow gaps in both of multi-fin structured horizontal and inclined mold. In the horizontal multi-fin mold, it was difficult to release the resin from the mold. Conversely, with the inclined type, the multi-fin shape was successfully released. Beside, it was confirmed that the mold can be used repeatedly at least 10 times. The optical reflection of the inclined molded COP and PMMA were evaluated and exhibited a light blue reflection.

Wavelength tunable structures were calculated using FEM optical simulation method. As the result of the simulation, the deformation of molded micro-multi fin structures showed the change of reflection in wavelength regions and the prospects for the wavelength tunable structures were shown.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和3年2月8日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 峯田 貴

副査 村澤 剛

副査 西山 宏昭

副査 成田 克

副査 伊藤 浩志



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	専攻・分野名	機械システム工学分野	氏名	矢作 徹
論文題目	多層膜による微細多段フィン構造形成と樹脂への形状転写に関する研究			
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和3年1月27日～ 令和3年2月5日	
論文公聴会	令和3年2月5日	場所	工学部5号館301教室	
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和3年2月5日	

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

光学製品へ反射光の波長選択性を付与するための量産に適した手法が求められており、本研究は、モルフォ蝶の鱗粉構造を模した数 μm ピッチの筋(リッジ)から横へ突き出す数百 nm ピッチの微細な多段フィン構造の再現を目指し、MEMS(微小電気機械システム)プロセスによる金型の形成と樹脂表面への転写に取り組んだものである。

第1章では、本研究の背景と目的を明確に述べている。

第2章では、樹脂成形後の抜き角度を考慮した傾斜型の多段フィンを考案し、光学シミュレーションにより多段フィン形状に関する各パラメータによる反射強度への効果を調べ、構造設計の指針を確立している。

第3章では、MEMSプロセスを基板として、Si基板上への傾斜溝形成、MoとTi等の多層膜形成、リッジ状への異方性エッチング、リッジ側壁からのTi層の選択的なサイドエッチングを用いた形成プロセスを構築し、傾斜した微細な多段フィン構造をもつ金型の精密な作製を実現している。

第4章では、シクロオレフィン等の複数の樹脂への形状転写性を評価し、ガラス転移点付近での熱インプリントすることで、斜め型フィン構造により良好な形状転写と離型が可能になることを示し、波長域380~600 nm での反射強度へのフィンの効果も確認した。成形を繰り返しても型は十分な耐久性であり量産に適する手法であることも実証した。

第5章では、樹脂を伸長してリッジとフィンの間隔を変えることで、反射波長域を変化できることを光学シミュレーションにより示し、ポリエチレンへの転写により波長可変デバイス実現への課題を実験的に検証している。

第6章では、本研究で得られた知見を的確にまとめ、本論文全体を総括している。

本学位論文は、研究背景および目的が的確に述べられ、論文の構成も適切で体裁も整っている。各章の研究内容について、各目的、取り組み方法、結果、考察に対する記述も論理的になされている。

上記の研究成果は、査読付き筆頭著者論文2報(英文1報、和文1報)が学術誌に掲載決定されており、本研究に対して客観的な評価が得られ、審査基準を満たしている。また、これまで国際学会においても筆頭著者として1件の発表がなされている。

以上の通り、本論文により得られた知見と成果は、学術的、工業的に価値あるものと認められ、博士(工学)の学位論文として合格と判定した。

なお、本研究は研究倫理または利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ない。

最終試験の結果の要旨

最終試験は、学位論文を中心とした約55分の口頭発表、ならびに関連ある科目も含めて約45分の口頭による質疑応答により実施した。その結果、学位論文の内容、研究手法の妥当性、関連科目に関する理解度は十分にあり、この分野における十分な知識と研究能力を持つことが確認された。この最終試験の結果、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断し、最終試験を合格とした。