

## 論文の内容の要旨

論文題目 レーザー干渉リソグラフィーによる次世代光学機能構造加工法の開発  
Development of fabrication method for next-generation optically functional  
structures by laser interference lithography

氏名 増井 周造

近年、メタサーフェス、サブ波長構造、多重周期回折格子などに代表される次世代光学機能構造に関する研究が盛んに行われている。特に、光の波長よりも微細な構造による人工的な物性・光学応答の実現と構造の多重周期・多層化による多機能化の2点が、多くの次世代光学機能構造に共通する特徴である。そのため、これらの微細性と多重周期性を両立しつつ、大規模造形が可能な微細加工技術が求められている。そこで、本研究では、微細性を損なうことなく、大面積での一括加工が可能な干渉リソグラフィーに着目し、次世代光学機能構造の加工における研究課題の解決を目指した。本論文は、全7章から構成される。

第1章では、本研究の背景を整理し、研究目的を示している。まず、次世代光学素子の必要性並びに、加工実現に向けた問題点が整理した。そして、干渉リソグラフィーに着目し、加工微細性、多重周期性に関する研究課題を解決することで、次世代光学機能構造加工法の開発を目指している。最後に論文全体の構造を示している。

第2章「干渉リソグラフィーの基礎」では、本研究で着目した干渉リソグラフィーの基本的な理論や特性、関連研究を紹介した。特に、次世代光学素子の加工に求められる加工微細性、多重周期性を達成するための理論・実験的な方法を議論している。

第3章「サブ波長格子偏光フィルタの理論モデル構築と加工検討」では、サブ波長格子偏光フィルタによる偏光分離メカニズムの解明、理論モデルの構築を行った。さらに、構築したモデルに基づいて、新しく効率の良い設計方法の提案と干渉リソグラフィによる加工実現性を検討した。まず、偏光分離機能のメカニズムとして、導波モード共振と薄膜多重干渉を組み合わせた物理モデルを提案した。有効媒質理論を用いて、サブ波長格子を薄膜に近似することで、薄膜多重干渉による無反射条件を適用した。そして、導波モード共振の共振条件と薄膜多重干渉による無反射条件を連立させることで、サブ波長偏光フィルタの理論的な設計解を取得することが可能となった。さらに、有効媒質理論の近似において生じる有効屈折率の誤差を修正する為に、理論設計値を初期値として厳密な電磁場解析を用いた最適化によって最終設計値を取得することで、効率の良い設計方法を実証している。さらに、実際の加工時に想定される格子部の形状誤差により、共振波長のシフトや薄膜多重干渉による反射率の上昇によって偏光分離機能を示す消光比が大きく低下することが明らかになった。これらの結果は、第5章で議論するインプロセス計測を用いた加工形状の精密制御の必要性を示している。

第4章では、「二重周期回折格子のスカラー回折理論モデルの構築」では、多重露光干渉リソグラフィによる加工が期待される二重周期回折格子の回折特性に着目した。特に、加工形状の持つ回折特性を理論モデルにより明らかにすることで、新しい回折素子の開発だけでなく、5章で述べる干渉リソグラフィの加工プロセス制御が可能になる。特に、これまで異なるモデルとして扱われていた①うなりを伴う二重周期回折格子と②整数倍周期を重ね合わせた二重周期回折格子を統一的に扱えるスカラー回折理論モデルの構築を行った。さらに、回転ロイドミラー光学系を用いた多重露光干渉リソグラフィで造形した二重周期回折格子の回折特性を計測し、理論モデルの妥当性を実験的に検証した。スカラー回折理論から予想される、回折角が大きな回折光に生じる誤差が確認されたが、定性的な回折効率は一致し構築したスカラー回折理論モデルの妥当性が確認できた。

第5章「多重露光干渉リソグラフィの加工プロセス計測」では、うなりを伴う二重周期回折格子に対して、回折光のインプロセス計測を行うことで、回折効率を高精度に制御するための加工プロセス制御方法を提案・実証している。まず、現像前後のレジストを二重周期位相回折格子として、4章で構築したモデルを適用することでインプロセスと現像後のポストプロセス計測結果との対応をはじめて明らかにした。スカラー理論モデルにおいても、二重周期回折格子の1次回折効率を予想可能であり、加工プロセス制御への応用が可能なことを示した。

第6章「多光束エバネッセント光干渉リソグラフィーの開発」では、3-5章で得た知見を元に、次世代光学素子の加工に求められている多重周期性と微牛性を兼ね備えた加工法として、エバネッセント光干渉リソグラフィーを提案・実証した。エバネッセント光干渉によって得られる強度分布を、理論的に解析するとともに、多光束エバネッセント光干渉リソグラフィー露光装置を開発した。4光束エバネッセント光干渉露光実験では、従来の空気中での加工限界である $\lambda/2$ 周期を大きく超えた $\lambda/3.5$ , NA=1.76に相当する超微細加工を実証した。さらに、4光束エバネッセント光干渉によってナノ・マイクログレーティング構造, ナノグレーティングとマイクロドットパターン複合構造の一括造形に成功している。

最後に、第7章では本論文の結論を述べる。本研究で得られた成果について総括を行い、さらに今後の展望について述べた。