

審査の結果の要旨

氏名 孔 徳卿

本研究は、マイクロ／ナノ光造形におけるインプロセス計測手法を提案するものである。光造形法は、光エネルギーをトリガーとした複雑な重合反応による樹脂硬化を利用するが、露光条件、樹脂特性のゆらぎ、熱化学環境の変化によって所望形状を高い再現性で加工することは容易ではない。このため、樹脂の硬化状態をインプロセスで測定することは加工精度の向上に対して極めて有効である。本論文では、臨界角照明に対する光学応答から屈折率変化を測定することによる硬化樹脂形状の計測原理を提案した。特に、伝搬光露光型マイクロ光造形およびエバネッセント露光型ナノ光造形において、基板近傍の樹脂硬化プロセスを評価可能な光学応答測定システムを開発し、提案手法の有効性を実証した。本論文は、全8章で構成される。

第1章「マイクロ／ナノ光造形法におけるインプロセス計測法の必要性」では、既存のマイクロ／ナノ光造形法を、それらの加工原理、プロセスにより分類、整理するとともに、加工時のわずかな環境擾乱の影響をうけず、高い信頼性をもった高精度加工の実現のために、加工中に加工条件へ反映可能なインプロセス計測が果たす役割の重要性が挙げられている。以上の背景整理を通して、本研究の目的と意義を明確にしている。

第2章は「インプロセス計測法の提案」であり、まず、樹脂硬化プロセスを評価可能な既存手法を整理している。本論文で対象とする、伝搬光露光型マイクロ光造形における連続的な樹脂硬化度合いのインプロセス計測、およびエバネッセント露光型ナノ光造形におけるインプロセス積層厚さ計測においては、既存手法のインプロセス計測法としての適用は困難であり、複雑な光学系からなる加工システムと融合したインプロセス計測手法の開発が必要となることが述べられている。

第3章は「マイクロ／ナノ光造形法における樹脂光硬化反応の理論背景」であり、光エネルギーに対する光硬化反応の基本理論が整理される。樹脂硬化過

程の連続的な変化と屈折率の微小変化との定量的な相関関係を示し、硬化中樹脂の光学応答に着目することで、樹脂硬化過程をインプロセス計測する提案手法の理論背景を、光硬化性樹脂の化学的見地から整理している。

第4章は「臨界角入射全反射における界面近接領域からの光学応答解析」であり、伝搬光露光型マイクロ光造形法およびエバネッセント露光型ナノ光造形法の加工用光学システムと親和性の高い樹脂光学応答取得形態として、樹脂露光界面を全反射界面とする共通計測光学系が提案され、その光学応答の基本特性が述べられている。

第5章は「マイクロ光造形における樹脂硬化過程のインプロセス計測」であり、伝搬光露光型マイクロ光造形法を対象として、加工中の光硬化性樹脂の重合度の計測を試みている。まず、樹脂硬化に影響を及ぼさない波長帯のレーザーを光源として、樹脂露光面を、全反射結像観察する光学システムを設計、開発し、加工レーザーの面内走査による樹脂硬化を実時間観察可能であることを示している。次に光学理論に基づき、全反射結像観察像の輝度値と全反射界面近傍樹脂の屈折率変化の関係について示すとともに、ラマン分光装置と屈折率計を複合した樹脂特性解析装置を開発し、実際にマイクロ／ナノ光造形で使用される光硬化性樹脂に対して、樹脂の重合度と屈折率変化の関係を実験的に明らかにしている。これらの知見は、上述開発装置により、樹脂の重合度を、インプロセスで計測可能であることを意味する。最後に、実証実験により、これまで困難だった露光面近傍樹脂の面内重合度分布を1%の分解能でインプロセス計測可能であることを示している。

第6章は「エバネッセント露光型ナノ光造形法における積層厚さのインプロセス計測」である。まず、エバネッセント光として樹脂露光する特殊な露光条件において、サブマイクロメートル積層厚さ内部の屈折率分布を、光化学反応理論からモデル化している。そして、そのモデル化された屈折率分布に対する光学応答取得メカニズムを提案している。これは、計測レーザーの入射角度を臨界角度に設定した場合、樹脂重合の開始により、樹脂と光入射界面（樹脂露光面）で設定した全反射条件は満足しなくなるが、樹脂内部に全反射界面が生成されることを明らかにしたものであり、これにより、光学応答は、当初全反射界面である樹脂露光面界面からの部分反射光と、樹脂硬化中に生成される樹脂内部の全反射界面からの反射光の両者の位相を考慮した重ね合わせにより生成されることを明らかにしている。これらの考察により、全反射結像観察像の輝度値から、エバネッセント露光層の厚さ計測が可能であることを述べている。

最後に、実証実験により、提案インプロセス計測法を適用することで、加工中の環境擾乱によらず、10 nm 程度のばらつきでの積層厚さ制御が実現できることを明らかにしている。

第7章「多層表面プラズモン共鳴基板を利用したインプロセス計測の検討」では、露光面に PLZT (ランタンチタン酸ジルコン酸鉛) からなる多層膜を施しておくことで、樹脂硬化時の屈折率変化を、表面プラズモン共鳴現象を利用して高精度計測可能な手法を新たに提案し、その特性を理論的に解析している。特に光学応答の位相変化に着目すると、 1×10^{-5} の分解能で屈折率変化を検知可能であることを明らかにし、さらなる高精度での樹脂硬化過程のインプロセス計測の可能性について示唆をしている。

第8章は「結論」では、本研究のまとめと貢献について記載されている。

本研究は、マイクロ／ナノ光造形におけるインプロセス形状計測手法を新しく提案し、理論・実験の両面からその有効性について実証をしたものである。樹脂露光面近傍の重合度と光学応答の関係を明らかにした学術的貢献に加え、環境擾乱の大きい生産現場においても、高い信頼性をもったマイクロ／ナノデバイス製造プロセス実現へ大きな貢献を果たすことが期待されるものである。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。