

審査の結果の要旨

論文提出者指名 梶原 優介

本研究は、原理的に光エネルギー局在性を有しているエバネッセント光と高スループットが可能な一括面露光型光造形法を融合することによって、サブマイクロメートルの加工分解能を有しつつ生産性に優れたナノ光造形法の確立を目的とした論文である。

はじめに、光硬化性樹脂を等方性媒質と仮定し、Lambert-Beerの法則とMaxwell方程式から、エバネッセント露光による硬化樹脂の単位積層厚さ C_d を定式化し、

$$C_d = \frac{\lambda_0}{4\pi n_2 \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}} \cdot \ln \left(\frac{\tau(\theta) U_o}{U_c} \right)$$

と導いた。但し、 λ_0 : 入射光波長、 θ : 入射角、 n_1 : ガラス基板屈折率、 n_2 : 樹脂屈折率、 U_o : 露光エネルギー、 U_c : 臨界露光量、 $\tau(\theta)$ は入射角で決まる定数である。定式化した単位積層厚さの式から、エバネッセント光の露光エネルギーが樹脂硬化に充足すること、また入射角と露光量を適切にコントロールすることにより、サブマイクロメートルオーダーで単位積層厚さを制御できる可能性があることが示された。そして、同じ屈折率のプリズム、イメージジョンオイル、カバーガラスを1つの全反射媒体としたエバネッセント露光基礎光学系を構築し、エバネッセント露光による樹脂露光基礎実験を行った。その結果、220nm程度の厚さで硬化した極薄樹脂が確認され、理論解析同様に、エバネッセント光が光硬化性樹脂の露光エネルギーとして充足すること、またその硬化厚さは、伝搬光露光では不可能なサブマイクロメートルオーダーとなることを確認した。さらに、分解能50nmの精密位置決めステージ、ガラススケールを使用したエバネッセント露光樹脂引き上げ機構を構築・組み込み、エバネッセント露光により硬化された樹脂層の引き上げが可能であることを示した。

次に、上述の樹脂硬化厚さ理論解析結果および基礎実験結果に基づき、エバネッセント露光造形装置を設計・構築した。これは、波長488nmの半導体レーザ、高開口数(N.A.1.65)の対物レンズ、ピクセルサイズ8.3 μ mのCCD、ナノメートルオーダーの分解能を持つPZTステージ等から構成され、インプロセス硬化樹脂観察も可能な光造形装置である。構築したエバネッセント露光造形装置を用いて、エバネッセント露光造形特性を調査した結果、偏光、露光量、入射角を高精度に制御することによって、おおよそ10nm以下の精度で単位積層厚さを制御可能であること、露光量を非常に小さく設定することにより10nm以下(最小5nm)の厚さの硬化樹脂が可能であることを確認した。さらに、観察された樹脂硬化挙動は、単位露光量 U_w によってLow-watt mode と High-watt mode の二つに分類できることを見いだすとともに、両者が発現するメカニズムについて、化学的・電磁気学的側面の両面からの考察を行った。

エバネッセント露光による面内構造創製特性評価としては、マスクパターンを挿入することによってナノチャネルの創製実験を行った。適切に入射条件を設定することによって、900nmの溝幅を持ち、厚さ300nmのナノチャネル構造の創製が可能であることを確認し、サブマイクロメートルオーダーの面内構造創製が可能であることを示した。次に、高開口数対物レンズ周縁にビームを入射させることにより、単位積層厚さと定在波ピッチの独立制御が可能な定在エバネッセント露光造形装置(理論上、定在波ピッチ150nm~550nm、単位積層厚さ160nm~1.6 μ mが実現可能)を構築した。定在エバネッセント露光造形装置を利用して、S偏光入射によりピッチ530nm、単位積層厚さ290nmの微細周期構造を創製した。これより、定在エバネッセント露光において、入射角、対向角、偏光を適切に設定すれば、

樹脂硬化サイズなどの影響を殆ど受けず、サブマイクロメートルオーダーの周期構造が創製可能であることが確認された。加えて、定在エバネッセント光ピッチと単位積層厚さの独立制御性の検証実験を行い、ピッチと単位積層厚さの独立制御性を実証した。

最後に多層構造創製を実現するために、インプロセスでの規制液面高精度位置決めを実現する共焦点光学系を組み込んだクローズドループ制御積層ユニットを設計し、上述のエバネッセント露光造形装置に組み込んだ。ここでは、エバネッセント露光特有のトンネル効果や散乱などの影響を受けずに高精度積層が可能な **No-gap method** を提案し、シャッタ、**PZT** ステージなど制御する全ての要素を、**LabVIEW** を利用して PC から一括して自動化するアルゴリズムを組んだ。その結果、**500nm** の極薄積層厚を持つ **nano-steps** の創製(3層積層)に成功した。これにより、提案法においてサブマイクロメートルオーダーの縦分解能で3次元構造を創製可能であることが確認された。

以上、本論文は、エバネッセント光を利用したナノ光造形法の確立へ向けて、

- ① エバネッセント露光による樹脂硬化の理論的・実験的確認
- ② エバネッセント露光による各層創製技術の検討
- ③ エバネッセント露光による極薄硬化樹脂の剥離・積層技術の検討

という 3 つの最重要基盤要素技術を確認し、サブマイクロメートルオーダーの加工分解能を持つ高速 3次元造形法の実現可能性を示すことができた。

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。