

論文の内容の要旨

論文題目 エバネッセント光を利用したナノ光造形法に関する研究

氏名 梶原 優介

マイクロ光造形法は、半導体プロセスでは困難な複雑 3 次元微小構造の高速創製の可能性を有していることから、次世代マイクロ生産工学における重要なキーテクノロジーの一つとして位置付けられている。そのため、日本を始めとしてアメリカ、スイス等、国内外を問わず活発な研究開発が進められている。これらの研究のうち、特に複雑 3 次元形状を創製可能なものを挙げると、(1) 多光子吸収過程を利用した点走査型造形法、(2) 縮小光学結像を利用した一括面露光型光造形法に大別することができる。(1) は、100nm 程度といった最小硬化単位（造形分解能）の実現も報告されているが、ビーム走査に起因する低スループットの問題を有しており、造形物サイズは、数 10 μm 程度に限定される。(2) は一括して一層全面（mm スケール）の微小構造造形を行うため、面内並列バッチ処理が可能である等、生産工学の観点からは非常に有用性が高いが、造形分解能は数 μm が限界となる。そのため、これらのマイクロ光造形技術では、次世代マイクロ生産工学において期待されているマイクロギヤなどの微小機械要素や、フォトリソグラフィに代表される微小光学素子等の微小構造機能素子といったサブマイクロメートルオーダーの加工分解能と生産性の両者が要求される微小構造機能素子の創製は困難となっていた。

そこで、本研究では、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本質的に高スループット加工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する。

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、

$$C_d = \frac{\lambda_0}{4\pi n_2 \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}} \cdot \ln \left(\frac{\alpha(\theta) U_0}{U_c} \right)$$

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_0 : 露光エネルギー、 U_c : 臨界露光量、 $\alpha(\theta)$ 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を、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で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した。