

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 (第2報) *

一定在エバネッセント光を利用した微細周期構造創製一

梶原優介** 稲月友一*** 高橋 哲† 高増 潔†

Study of Nano-Stereolithography Using Evanescent Light (2nd report)
- Photofabrication of Fine Lattice Structures Using Standing Evanescent Light -

Yusuke KAJIHARA, Yuichi INAZUKI, Satoru TAKAHASHI and Kiyoshi TAKAMASU

Micro-fabrication technologies have recently developed dramatically and fabrication methods have become much-needed with which devices on the order of micrometer can be fabricated precisely. In particular, methods of fabricating MEMS and microscopic optical devices as typified by a photonic crystal are in huge demand. In this study, we propose a novel stereolithography method using evanescent light instead of propagating light to realize a 100-nanometer resolution. With this method, we intend to establish the nano-stereolithography with higher accuracy and flexibility. In the second report, we performed the fabrication of in-plane lattice structures, which is strongly required as diffraction grating, diffractive optics, photonic crystals, etc. Theoretical and experimental analyses suggest that the proposed stereolithography method using evanescent light has a potential to fabricate micro three-dimensional objects with a resolution of sub-micrometer.

Key words: nano-stereolithography, photosensitive resin, evanescent light, standing evanescent light, lattice structure

1. 緒 言

三次元マイクロ加工の分野で注目を集めるマイクロ光造形法は、ビームスポット走査やマスク変調による面露光により液状の光硬化性樹脂に対してレーザを照射し、樹脂を硬化させることによって所望の三次元構造を創製する方法である¹⁾⁻⁸⁾。その中でも生産性の高い一括面露光型マイクロ光造形法^{7,8)}は、ミリメートルスケールの領域に対して分解能数マイクロメートルが達成され、様々なアプリケーションが実現している。しかし、従来の一括面露光型マイクロ光造形法では、露光時の透過伝搬光などの影響によって、サブマイクロメートルオーダーの分解能実現が困難であった。そこで前報では、高分解能で光強度分布制御が可能なエバネッセント光を露光エネルギーとして適用することを提案した⁹⁾。

高屈折率媒質から低屈折率媒質へ光が入射する場合、入射角が臨界角を超えると全反射状態となり、低屈折率媒質側に透過伝搬光は存在しない。しかし微視的には図1のように、低屈折率媒質側にも光の波長領域程度に局在した光エネルギー(エバネッセント光)が存在する。エバネッセント光のエネルギーは界面から離れるに従って指数関数的に減少する。

著者らが提案する、エバネッセント光を露光エネルギーとして適用したナノ光造形法の場合、微小領域に局在するエネルギーのみで造形を行うので、単位積層厚さをサブマイクロメートルオーダーで設定できる。加えて、エバネッセント光の実効波長は高屈折率媒質の伝搬波長に準ずるため、従来の伝搬光露光と比較して、横分解能の向上が期待される。

前報では、エバネッセント光露光時における樹脂硬化モデルを

構築して単位積層厚さを定式化し、エバネッセント光のエネルギーが樹脂硬化に充足すること、及び単位積層厚さがサブマイクロメートルオーダーになることを理論的に示し、実験的に検証した。また積層プロセスの検討として露光樹脂引き上げ実験装置を試作し、エバネッセント光によって硬化した樹脂の引き上げを確認した。

各層の造形技術に着目すると、サブマイクロメートルオーダーの微細周期構造創製技術の確立は、リソグラフィ技術への応用のほか、積層技術と合わせることで可視域フォトニック結晶のラピッドプロトタイプングへの応用が期待できる。本報では、高開口数対物レンズを用いて2本のビームを全反射入射し、積層厚さと定在エバネッセント光ピッチを独立制御可能な手法により、サブマイクロメートルの微細周期構造創製を行ったので報告する。

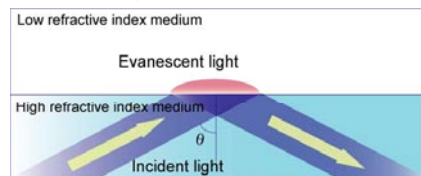


Fig.1 Characteristic of evanescent light

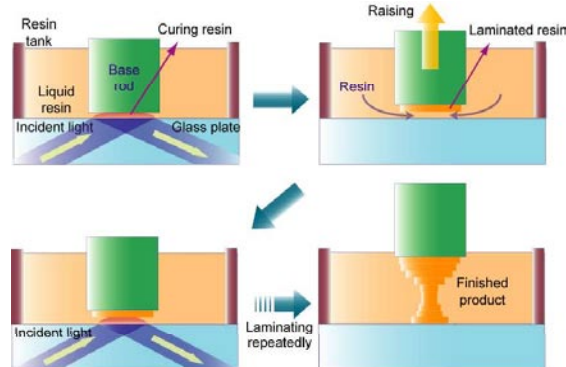


Fig.2 Schematic diagram of nano-stereolithography using evanescent light

* 原稿受付 平成19年1月4日
** 学生会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷 7-3-1)
*** 学生会員 東京大学大学院(現, 大日本印刷(株)電子デバイス研究所; 埼玉県上福岡市福岡 2-2-1)
† 正会員 東京大学大学院

2. 定在エバネッセント光を利用した微細周期構造創製

2.1 定在エバネッセント光とそのコントラスト

定在エバネッセント光発生の様式図を図3に示す。臨界角以上の角度で入射した対向ビームが全反射した場合、両ビームの重複領域の界面において定在エバネッセント光が発生する。定在エバネッセント光は、走査型近接場光学顕微鏡(SNOM)用プローブの分解能評価¹⁰⁾や、超解像技術への応用¹¹⁾などに利用されているが、本報では定在エバネッセント光を微細周期構造創製に適用することを提案する。定在エバネッセント光の周期状強度分布に対応して樹脂が硬化されれば、微細周期構造の創製の実現が期待できる¹²⁾。近接場光学的エネルギーを利用した微細周期構造創製法としては他に近接場リソグラフィなども提案されている¹³⁾が、定在エバネッセント光を利用する方法はマスクが不要であり、光造形法における積層技術と組み合わせることによって三次元造形への拡張も可能である。

座標軸を図3のように設定し、入射光波長を λ_0 、入射角を θ 、角振動数を ω 、時間を t 、高屈折率媒質、低屈折率媒質の屈折率を n_1, n_2 、低屈折率媒質内の光の波数を k_2 、S偏光、P偏光における入射光の振幅成分を A_s, A_p とおくと、エバネッセント光の電場成分 E_x, E_y, E_z は、Maxwell方程式を展開することにより以下のように与えられる¹⁴⁾。

S偏光；

$$E_y = 2A_s \cos \frac{\delta_s}{2} \exp i(\omega t + \frac{\delta_s}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) \cdot \exp(-ik_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \quad (1)$$

$$\text{(但し, } Z_{ev} = \frac{\lambda_0}{4m_2 \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}}, \cos \frac{\delta_s}{2} = \frac{(n_1/n_2) \cos \theta}{\sqrt{(n_1/n_2)^2 - 1}})$$

$$E_x = E_z = 0$$

P偏光；

$$E_x = -2A_p \cos \theta \sin \frac{\delta_p}{2} \exp i(\omega t + \frac{\delta_p}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) \cdot \exp(-ik_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \quad (2)$$

$$\text{(但し, } \sin \frac{\delta_p}{2} = \frac{(n_1/n_2) \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}}{\sqrt{(n_1/n_2)^2 - 1} \sqrt{(n_1/n_2)^2 + 1} \sin^2 \theta - 1})$$

$$E_y = 0$$

$$E_z = -2A_p \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin \theta \cos \frac{\delta_p}{2} \exp i(\omega t + \frac{\delta_p}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) \cdot \exp(-ik_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \quad (3)$$

$$\text{(但し, } \cos \frac{\delta_p}{2} = \frac{\cos \theta}{\sqrt{(n_1/n_2)^2 - 1} \sqrt{(n_1/n_2)^2 + 1} \sin^2 \theta - 1})$$

ここで x, y, z 方向の単位ベクトルを i, j, k とし、平面上で対向するビームの電場成分をそれぞれ $f(x), g(x)$ とおき、式(1)~(3)を利用して媒質界面上の合成波の電場成分を求めると、S偏光の場合、

$$f(x, t) + g(x, t) = 4j \cdot A_s \cos \frac{\delta_s}{2} \cdot \cos(k_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \exp i(\omega t + \frac{\delta_s}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) \quad (4)$$

と導かれる。上式は空間的には移動せずに時間的に振動する定在波の式となっており、S偏光による対向ビームによって定在エバネッセント光が生成されることが分かる。

同様にP偏光に対しても合成波の電場成分を求めると、

$$f(x, t) + g(x, t) = -4i \cdot A_p \cos \theta \cdot \sin \frac{\delta_p}{2} \cdot \cos(k_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \exp i(\omega t + \frac{\delta_p}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) - 4k \cdot A_p \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin \theta \cdot \cos \frac{\delta_p}{2} \cdot \sin(k_2 x \frac{n_1}{n_2} \sin \theta) \exp i(\omega t + \frac{\delta_p}{2} + \frac{\pi}{2}) \cdot \exp(-\frac{z}{2Z_{ev}}) \quad (5)$$

と導かれる。 x, z 成分共に定在波の式となっているが、両者の位相は $\pi/2$ ずれており、P偏光入射においては定在エバネッセント光によるコントラストが小さくなるが見てとれる。

図4に、FDTD法(時間領域差分法)¹⁵⁾により定在エバネッセント光をシミュレートした例を示す。一辺5nmの正方形セルを縦に600、横に1000個配置し、高屈折率媒質、低屈折率媒質の屈折率は各々1.78, 1.51とした。図は下側から入射角 60° で波長488nm、S偏光の対向ビームを入射した結果であり、定在エバネッセント波強度分布の時間平均による定在性がシミュレーションからも確認できた。

2.2 定在エバネッセント光とピッチ、積層厚さの独立制御

全反射角以上の角度でビームが対向入射する場合、定在エバネッセント強度分布のピッチ d は、両ビームが互いになす角度を 2ϕ として、

$$d = \frac{\lambda_0}{2n_1 \sin \phi} \quad (6)$$

と求められる。ここで ϕ を対向角と定義する。式(6)から、対向角 ϕ によりピッチ d が決まり、可視光入射の場合、ピッチをサブマイクロメートルオーダーに設定できることが分かる。

また前報より、入射光のエネルギーを U_0 、 U_0 に対する低屈折率媒質側($z=0$)のエネルギー強度比を $\tau(\theta)$ 、臨界露光量を U_c とおけば、樹脂露光時のエバネッセント露光における単位積層厚さ C_d は、

$$C_d = \frac{\lambda_0}{4m_2 \sqrt{(n_1/n_2)^2 \sin^2 \theta - 1}} \cdot \ln \left(\frac{\tau(\theta) U_0}{U_c} \right) \quad (7)$$

と表現できた。式(7)は、単位積層厚さが入射角 θ によって定められることを示す。

式(6), (7)より、対向角 ϕ と入射角 θ を独立に制御できる装置を構築すれば、定在エバネッセント光ピッチと単位積層厚さを任意に設定できると考えられる。すなわち、図5のような3次元の入射を行い、 ϕ と θ を独立して制御可能な装置を構築すれば、任意な微細周期構造創製が可能になると考えられる。

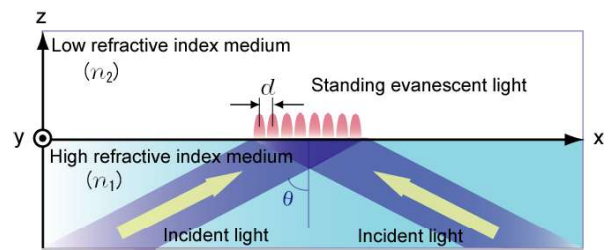


Fig.3 Standing evanescent light

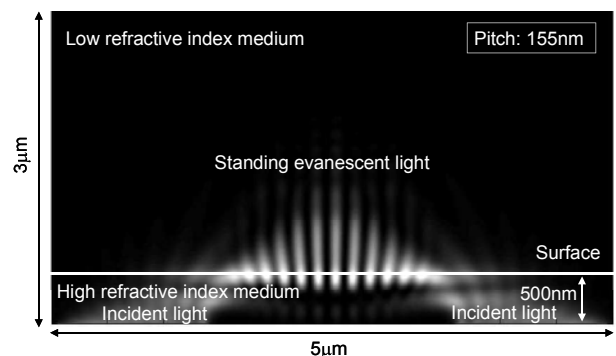


Fig.4 Standing evanescent light on the FDTD simulation

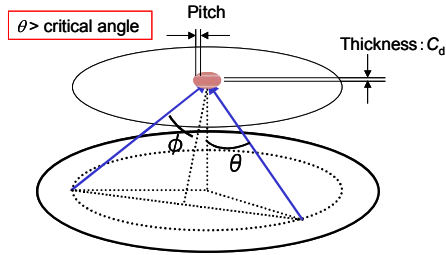


Fig.5 Independent control of pitches and thicknesses

3. 定在エバネッセント光制御装置

3.1 高NA対物レンズを用いた定在エバネッセント光制御

定在エバネッセント光制御装置に要求される基本的な機能は、主に以下の2つである。

- 1) 露光領域が変化せずに、単位積層厚さと定在波ピッチ、すなわち θ と ϕ を独立に変化させることが可能である
- 2) 露光強度分布や樹脂硬化過程などのインプロセス観察が可能な、顕微鏡としての機能を有する

これらの基本機能を実現するため、全反射媒体として、一般的なプリズムの代わりに高開口数対物レンズを適用する。

高開口数対物レンズを適用した、3次元的入射の概念図を図6に示す¹⁶⁾。対物レンズ、イメージンオイル、カバーガラスは同屈折率のものを利用して1つの全反射媒体として扱う。対物レンズ入射瞳において2つのビームを周縁部に入射させた場合、 f_0 を対物レンズの焦点距離、 n_1 をカバーガラスの屈折率とおくと、

$$n_1 f_0 \sin \theta = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (8)$$

の関係が成り立つので、 θ 、 ϕ 、 x 、 y の幾何学的条件から

$$\sin \phi = \frac{x}{n_1 f_0} \quad (9)$$

となる。ゆえに、入射瞳面における入射ビーム位置 x と y を適切に設定することによって、入射角 θ と対向角 ϕ 、すなわち単位積層厚さとピッチを独立して制御することができる。また x 、 y を変化させても、 θ と ϕ が変化するだけで、前側焦平面の露光領域および露光位置は動かない。

さらに、露光面が対物レンズの焦平面になっていることから、エバネッセント光生成用対物レンズを、無限遠補正型顕微鏡の観察用対物レンズとして利用でき、高分解能でのインプロセス観察が可能となる。

3.2 定在エバネッセント光制御装置の構築

高開口数対物レンズを導入した定在エバネッセント光制御装置の模式図を図7に、開発装置の露光部周辺の写真を図8に示す。各光学素子の焦点距離などの仕様は図中に示す通りである。

光源(半導体レーザ、波長: 488nm)から導かれたビームはパワー、偏光を整えられたのちビームスプリッタ1により分割され、レンズ1~3にて径を拡げられたのち、交差しつつ絞りを通過してレンズ4に入射する。レンズ4を通過したのちは互いにコヒーレントかつ平行な関係を保ちつつ、対物レンズに入射する。

対物レンズ入射瞳面においては、ビームを周縁部にオフセットさせて入射させる。適切な距離だけオフセットさせれば、対物レンズの前側焦平面(樹脂露光面)において全反射状態が形成され、

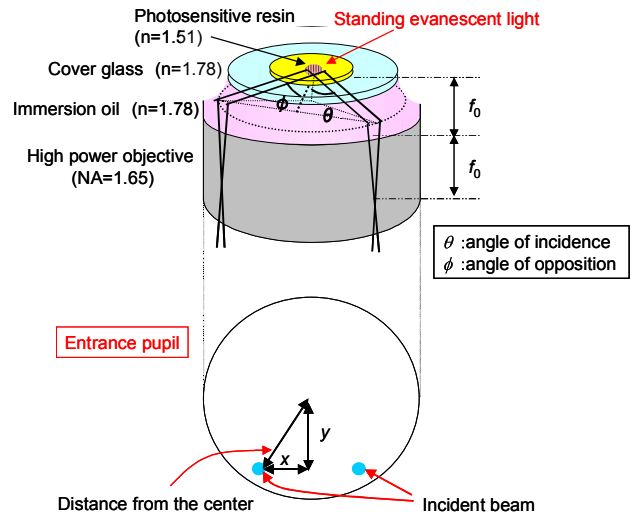


Fig.6 Generation of standing evanescent light using a high power objective

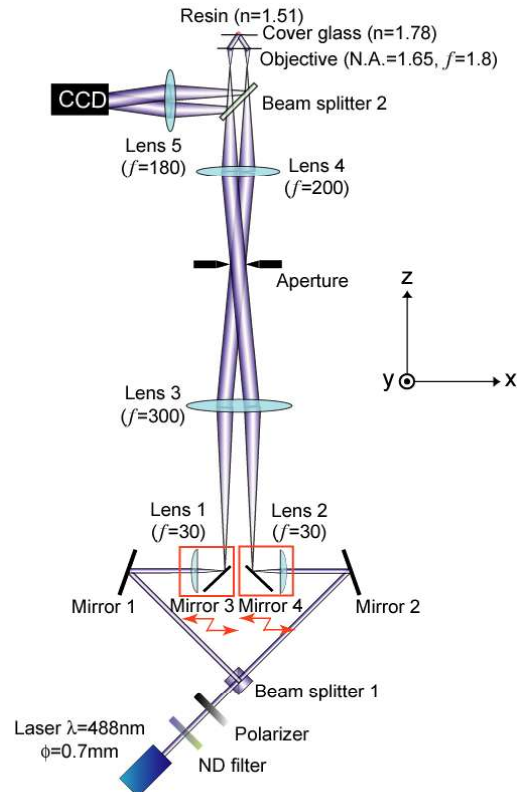


Fig.7 Schematic diagram of the nano-stereolithography system using standing evanescent light

定在エバネッセント光が生成される。そのエバネッセント成分により、カバーガラス上部の光硬化性樹脂が露光される。入射角は、レンズ4におけるビーム間距離によって定まる。

通常、平行ビームを対物レンズに入射した場合、対物レンズ焦平面において焦点を結ぶ。本装置では平行ビームではなく、集束光が対物レンズに入射される。すなわち、対物レンズの後ろ側焦平面にビームウェストを有する集束光を配置することで、露光面において平行ビーム径に相当する露光領域を確保することができる。露光ビーム径は、絞り径の1.8/200倍の直径を持つ円形となる。

また、本装置における対物レンズ(Olympus社:Apo100)の開口数が1.65、使用樹脂(JSR社:KC1162)の屈折率が1.51であるため、カバーガラス上面における臨界面角は58.0°である。また、対物レン

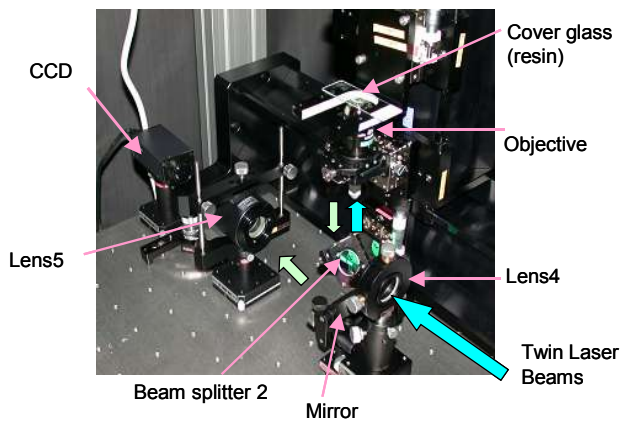


Fig.8 Photograph of the developed nano-stereolithography system

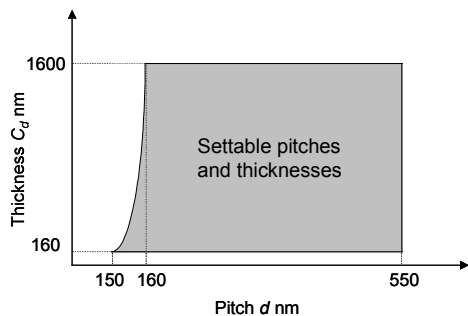


Fig.9 Settable pitches and thicknesses with the developed system

ズ入射瞳の端に入射させることにより入射角は最大 68°まで調節することができるので、露光面において容易に全反射状態を作り、エバネッセント光を生成することができる。露光面での光の強度分布は、ビームスプリッター 2、及び結像レンズ(レンズ 5)を通して CCD に導かれ、CCD 上でモニタできる。CCD のピクセルサイズが 8.3μm、対物レンズの N.A.が 1.65、結像レンズの倍率が 100 倍であるので、CCD 上においては約 200nm 程度まで解像可能となっている。

3.3 単位積層厚さ、定在波ピッチの独立制御

本装置では、図 7 において対物レンズを紙面と垂直方向に変位させることによって y を制御し、図 7 の囲み部分を左右に変位させることによって x を制御する。本装置では設計上、x は 0.80mm~2.97mm、y は 0mm~2.97mm(但し $\sqrt{x^2+y^2} \leq 2.97$) で変位可能なので、式(8)、(9)より対向角 ϕ は 14.5°~68.0°、入射角 θ は 30.0°~68.0° で制御できる。また臨界角が 58.0° ($\sqrt{x^2+y^2} \geq 2.72$) であることを考慮すると、本装置における設定可能な定在エバネッセント光のピッチと単位積層厚さ(式(7)における U_0 を U_c の e 倍で計算)は、式(6)、(7)から図 9 の斜線部のように表現することができる。

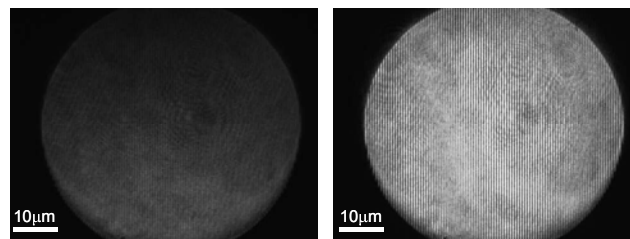
図 9 からも見てとれるように、構築装置においては理論上、定在波ピッチ 150nm~550nm、単位積層厚さ 160nm~1.6μm が実現可能である。

4. 微細周期構造創製実験

4.1 検証内容

設計した定在エバネッセント光制御装置を用いて、以下の点の検証を軸に、微細周期構造創製実験を行った。

- 1) 設計した装置が定在エバネッセント光を生成できること
- 2) 定在エバネッセント光によりサブマイクロメートルオ



(a) P-polarized (b) S-polarized

Fig.10 CCD image of standing evanescent light

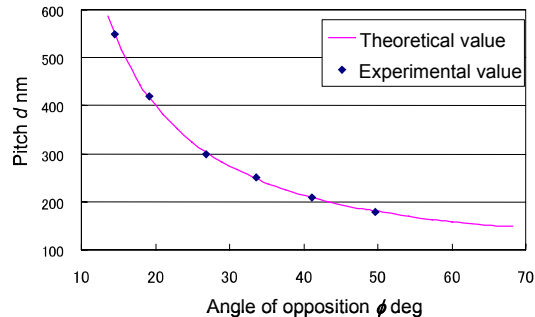


Fig.11 Pitch of standing evanescent light

ーダのピッチで微細周期構造が創製可能であること

- 3) 入射角 θ 、対向角 ϕ の独立制御が可能で、それにより単位積層厚さ、ピッチが任意に制御可能であること

4.2 定在エバネッセント光生成検証実験

図 7 のアパチャー径を 6mm に設定すると、露光部であるカバーガラス上において 54μm 径の領域が露光される。このように露光領域を設定し、図 6 における x を 0.83mm、y を 2.78mm に設定すると、式(8)、(9)より入射角 θ は 65°、対向角 ϕ は 15° となる。この場合、式(6)より定在波ピッチは 530nm になると想定される。

以上の条件で、対向ビームを入射させて露光部の様子を CCD 上で観察した。P、S 偏光入射に関してそれぞれ観察した写真が図 10 である。露光エネルギーは、P、S 偏光共に 400mW/cm² とした。S 偏光入射の場合、54μm の幅に対して定在波が 102 本存在しており、計算すると理論値と同様 530nm の定在波ピッチがコントラスト良く観察できた。しかし P 偏光入射の場合、定在エバネッセント光は微かに観察できるものの、S 偏光入射に比べてコントラストが低かった。これは 2.1 の解析同様の結果である。

次に図 6 の x、y を制御し、理論値と同様に定在波ピッチを制御可能であるか確認した。結果を図 11 に示す。グラフから見てとれるように、理論値と測定値はほぼ一致しており、設計光学系により、ピッチを制御しつつ、定在エバネッセント光を発生可能であることが確認できた。

4.3 サブマイクロメートルオーダーの周期構造創製実験

カバーガラス上に光硬化性樹脂を載せて露光し、定在エバネッセント光のパターン通り樹脂が露光・硬化可能であるかどうか、確認実験を行った。アパチャー径、入射角、対向角は前項と同様とし、露光エネルギーは、P、S 偏光共に 400mW/cm²、露光時間は 6 秒とした。定在エバネッセント光で樹脂を露光したのち、硬化樹脂を光学顕微鏡で観察した。

図 12 に、光学顕微鏡による観察像を示す。S 偏光による硬化樹脂は、530nm 程度のピッチの周期構造が存在するが、P 偏光による硬化樹脂においては、周期構造が確認できなかった。すなわち、2.1 における解析同様の結果となり、解析の妥当性が確認された。S 偏光露光による硬化樹脂の AFM 像を図 13 に示す。AFM 計測

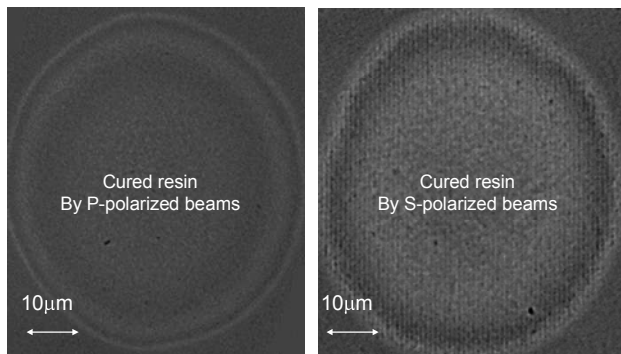


Fig.12 Cured resin by standing evanescent light

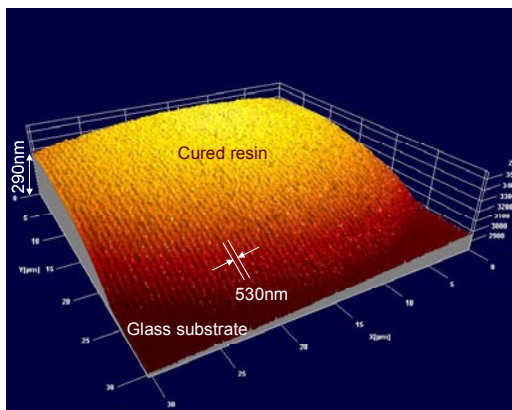


Fig.13 AFM image of cured resin by standing evanescent light

Table.1 Pitches and cured resin thicknesses of lattice structures

Sample	Pitch	θ	Thickness
A	530nm	68°	450nm
B		64°	580nm
C	410nm	68°	310nm
D		64°	460nm

の結果、硬化樹脂の厚さは290nm程度であり、周期構造のピッチは光学顕微鏡による観察同様530nm程度であった。以上の結果から、定在エバネッセント光を露光エネルギーとして適用し、露光量、対向角、偏光を適切に制御すれば、サブマイクロメートルオーダーの周期構造が創製できることが確認できた。

本技術を適用することにより、リソグラフィへの応用のほか、積層技術と合わせることによってフォトニック結晶¹⁷⁾など微小光学素子のラピッドプロトタイプングの実現が期待できる。

4.4 単位積層厚さ、定在波ピッチの独立制御実験

最後に、構築装置による定在波ピッチと単位積層厚さの独立制御性の検証実験を行った。特に定性的傾向の検証に焦点を絞り、同一ピッチにおいて、単位積層厚さを変化させることが可能であるか、検証実験を行った。

具体的には、ピッチを530nmに固定し、入射角 θ を変化させることで2つの異なる単位積層厚さの硬化樹脂を創製し、次にピッチを410nmに固定し、入射角 θ を変化させることで2つの異なる単位積層厚さを創製した。

4つのサンプルにおいて θ と ϕ は以下のように設定した。

- ・設定定在波ピッチ 530nm
サンプル A : $\theta=68^\circ, 15^\circ$, サンプル B : $\theta=64^\circ, 15^\circ$
- ・設定定在波ピッチ 410nm
サンプル C : $\theta=68^\circ, 20^\circ$, サンプル D : $\theta=64^\circ, 20^\circ$

前項同様、AFM計測からピッチと単位積層厚さの評価を行った。ピッチと単位積層厚さの計測結果を、表1に示す。この結果から、本装置により、理論通り同一ピッチにおいて単位積層厚さを変化可能であることが確認できた。

本実験の結果から、構築装置における、定在波ピッチと単位積層厚さの独立制御性が確認された。

5. 結 言

本報では、エバネッセント光を利用したナノ光造形法における各層の造形技術に着目し、自由度の高い微細周期構造創製法の検討を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 定在エバネッセント光に関して理論的に解析し、対向角を制御することにより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、またP偏光入射に対してS偏光入射の方が定在波コントラストが高いことを示した。
- 2) 定在エバネッセント光のFDTDシミュレーション解析を行い、定在エバネッセント光のエネルギー強度分布を可視化することにより、光エネルギー周期分布の定在性を確認した。
- 3) 高開口数対物レンズ周縁に光束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、かつインプロセス観察機能を持つ定在エバネッセント光制御装置(理論上、定在波ピッチ150nm~550nm, 単位積層厚さ160nm~1.6µmが実現可能)を構築した。
- 4) 露光面における定在エバネッセント光強度分布を顕微鏡観察により確認することで、定在エバネッセント光制御装置のピッチに対する制御性(180nm~530nm)を実験的に確認した。
- 5) 定在エバネッセント光制御装置により樹脂を硬化させ、ピッチ530nm, 単位積層厚さ290nmの微細周期構造を創製した。
- 6) 定在エバネッセント光制御装置における定在波ピッチと単位積層厚さの独立制御性の検証として、2種類のピッチに対して、ピッチ一定で単位積層厚さを変化させた微細周期構造の創製を行った。それらの測定結果から、ピッチと単位積層厚さの独立制御性を確認した。

今後は機能的な三次元構造創製を目的として、本報で構築した装置に積層ユニットを導入し、多層積層技術の確立を目指す。

謝 辞

本研究の一部は、財団法人「三豊科学技術振興協会」助成、財団法人「旭硝子財団」助成、財団法人「光科学技術研究振興財団」助成、及び平成16年度~平成17年度科学研究費補助金萌芽研究(課題番号16656049)により、行われたことを記して御礼申し上げます。また、実験用光硬化性樹脂を提供下さった大阪大学・三好高谷研究室、JSR株式会社に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、丸山洋二, 早野誠治, 今中暎: 積層造形技術資料集, オプトロニクス社 (2002).
- 2) 山口勝美, 中本剛: 光造形による形状創成, 精密工学会誌, 61, 10 (1995) 1385.
- 3) 浮田宏生, 富村明彦: DVD光ヘッドによる卓上型光造形装置と高分解硬化特性, 精密工学会誌, (1999) 1360.
- 4) 神村明哉, 村上存, 中島尚正: 冷却固化式光造形法に関する研究, 機械学会論文集 (C編), 66, 649 (2000) 303.
- 5) S.Kawata, H.B.Sun, T.Tanaka, and K.Takada: Finer features for functional microdevices, Nature, 412 (2001) 697.
- 6) V.Mizekicis, H.B.Sun, A.Marcinkevicius, J.Nishii, S.Matsuo, S.Joudkazis, and H.Misawa: Femtosecond laser micro-fabrication for tailoring photonic crystals in resins and silica, Journal of Photochemistry and Photobiology A, 145, (2001) 41.

- 7) 林照剛, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋哲: 液晶マスクを用いた非積層光造形法に関する研究(第1報) —濃淡画像による非積層造形—, 精密工学会誌, **67**, 4(2001) 628.
- 8) C.Sun, N.Fang, D.M.Wu, and X.Zhang: Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask, *Sensors and Actuators A*, **121**, (2005) 113.
- 9) 梶原優介, 稲月友一, 高橋哲, 高増潔: 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(第1報) —造形基本特性の理論的・実験的検討—, 精密工学会誌, **72**, 11(2006) 1391.
- 10) J.Schofer, M.J.Gregor, P.G.Blome, and R.G.Ulbrich: Influence of aperture diameter on image contrast and resolution in scanning near-field optical microscopy, *Journal of Applied Physics*, **81**(9), 1(1997) 5871.
- 11) G.E.Cragg, and P.T.C.So: Lateral resolution enhancement with standing evanescent waves, *Optics Letters*, **25**, 1(2000) 46.
- 12) S.Takahashi, Y.Inazuki, Y. Kajihara, and K.Takamasu: Photofabrication of periodic submicron structures using standing evanescent light for nano-stereolithography, *Proc. of ASPE Annual Meeting*, (2005) 1729.
- 13) T.Yatui, Y.Nakajima, W.Nomura, M.Ohtsu: High-resolution capability of optical near-field imprint lithography, *Applied Physics B*, **84** (2006) 265.
- 14) 鶴田匡夫: 応用光学 I, 培風館 (1990) 39.
- 15) 宇野亨: FDTD 法による電磁界及びアンテナ解析, コロナ社 (1998) 22.
- 16) 稲月友一, 梶原優介, 高橋哲, 高増潔: 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(第3報) —一定エバネッセント強度分布制御法の確立—, 2004 年度精密工学会春季大会講演論文集, (2004) 943.
- 17) J.D.Joannopoulos, P.R.Villeneuve and S. Fan: Photonic Crystals, *Solid State Communications*, **102**, 2-3(1997) 165.