

要 旨

光学的 Fourier 変換と位相回復を応用し、ナノメートルオーダの精度で微細加工形状を計測する手法を提案し、装置開発および実験による検証を行った。回折光から表面プロファイルを三次元的に一度に得ることができると、加工環境中におけるインプロセス計測への適用が期待される。

1 緒 言

著者らはこれまで、レーザによって照明された物体からの Fraunhofer 回折光に基づいて複素物体を復元し、その位相分布から物体の三次元プロファイルを得る計測手法の開発を行ってきた [1]。振動に比較的強い面計測手法として、インプロセスでの三次元微細形状計測・評価への応用が期待される。ここでは開発した装置について概説し、次に実験的検証として、二種類の試料を用いて行った測定の結果について述べる。ひとつめの試料は周期的な構造をもつ標準格子で、ふたつめのもは周期性のないより一般的な三次元形状である。

2 測定原理および装置構成

物体表面に単色平面波を垂直入射すると、物体によって反射された直後の複素振幅分布（これを以後単に物体と呼ぶ）の位相は物体の形状に応じた位相分布を持つ。物体の Fraunhofer 回折像は物体の Fourier 変換で与えられ、回折光分布には物体の位相が織り込まれている。逆に我々の手法では、測定した Fraunhofer 回折の強度分布（物体のワースペクトル）から逆問題的に物体を復元し、その位相に基づいて形状を得る。

我々が開発した装置では、回折光と共に、物体の強度像が測定できる (Fig. 1)。測定した二つの強度像を用いて収

束計算を行い、物体の位相を回復する [2]。光源には Ar⁺レーザ（波長 $\lambda = 488 \text{ nm}$ ）を用い、ステージ上に置かれた試料を köhler 照明する。物体表面からの散乱光は対物 1 (NA0.55, 50 \times) によって集められ、その後ろ側焦点面に現れる Fraunhofer 回折像を、光路 1 上にある対物 2 及び第 2 対物によって冷却 CCD 上に拡大結像する。また物体強度像は無遠点光学顕微鏡の配置によって測定される（光路 2）。対物 1 は交換可能で、その時の NA により系の横分解能が決まり、この場合は $\lambda/\text{NA} = 0.89 \mu\text{m}$ となる。

3 測定実験

二つの試料を測定することで開発した装置の検証実験を行った。ひとつめは SPM (scanning probe microscope) の校正用に設計された標準格子 (VLSI standards STR10-440P) で、深さ 44nm の矩形ポケットが 10 μm 間隔で二次元的に配列している (Fig. 2)。測定された物体の強度像を Fig. 3(a) に示す。Fresnel 回折によって物体がコントラストを持っているのが確認できる。回折像は Fig. 3(b) に示されており、Fig. 3(c) は Fig. 3(b) における直線 Y-Y' に沿ったワースペクトルのプロットである（ゼロ次スペクトルピークの強度で正規化されている）。格子が周期物体であることから規則的な回折パターンが得られており、各スペクトルピークの空間周波数位置は物体の基本周波数に正しくのっていることが確認された。

先に示した二つの強度像から位相回復によって得られた表面プロファイルを Fig. 4(a) に示す。矩形ポケットが明瞭に識別でき、また同様なポケットが照明領域内（直径 160 μm の円形領域ではほぼガウシアンビーム径に一致）で一様に回復された。プロファイルの断面を Fig. 4(b) に示した。ポケットの深さ、周期とも標準格子の公称寸法とよく一致している。また、ポケットのエッジから見積もられた横分解能に関しても、理論的に予測された値とよい一致を示した。

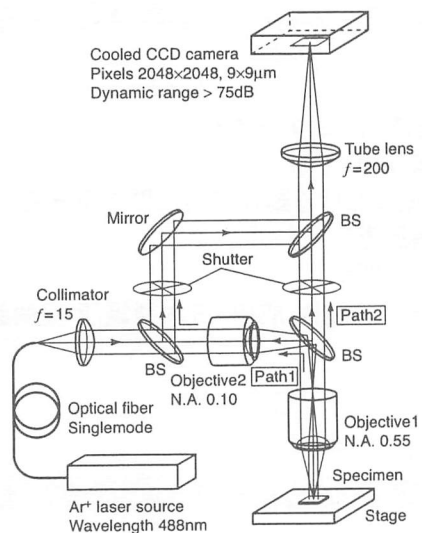


Fig. 1: Schematic illustration of the optical configuration. BS, beam splitter.

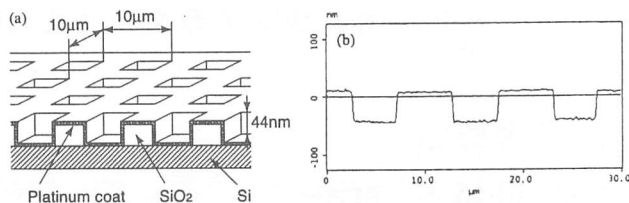


Fig. 2: (a) Sketch of the standard. (b) Section profile of the standard obtained by atomic force microscopy (AFM).

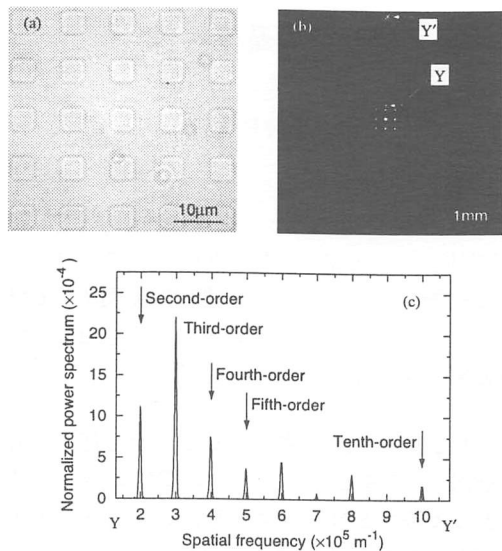


Fig. 3: (a) Measured object intensity and (b) diffraction intensity (logarithmic plot). (c) Plot of power spectrum along Y-Y' in (b).

次に、本手法が周期性をもたない、より一般的な形状にも適用できることを示す目的で、Fig. 5(a)に示すような設計寸法をもつ三次元形状を測定した。各ステップの高さは全て70 nmである。実際の試料はFIB (focused ion beam) 加工機を用いてSi基板上に作成された。加工された試料のSIM (scanning ion micrograph) 像をFig. 5(b)に示す。水平方向に周期性をなくし、形状に一般性をもたせるため、最も底に位置するポケットは中心から5 μmずらした位置に形成してある。なお形状全体の深さは270 nmで用いる半波長 (反射型である) を越えるため、回復した位相から形状を得るためには位相接続を必要とする。ここでは設計形状などに基づいて手動で位相を接続した。

測定された回折像はFig. 6(a)に示されている。周期的な標準格子の場合と異なり、回折像は複雑な分布をもつ。この回折像及び、別に測定された物体強度像から位相回復を行い、最終的に決定された物体形状をFig. 6(b)に示す。4つのステップが明瞭に識別でき、最も底に位置する

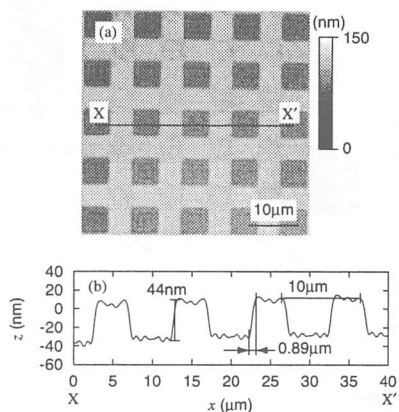


Fig. 4: (a) Surface reconstructed by phase retrieval. (b) Section profile along line X-X' in (a).

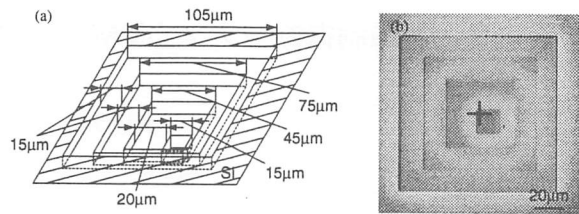


Fig. 5: Specimen configuration. (a) Designed dimensional parameters and (b) SIM (scanning ion micrograph) of the prepared specimen.

ポケットも正しい位置に定まっている。Fig. 6(b)中の領域Σの三次元表面をFig. 6(c)に示した。全体の形状の深さは300 nmと読みとられるが、白色干渉計 (Zygo, Mirau 20×) でも同様な値が得られた。

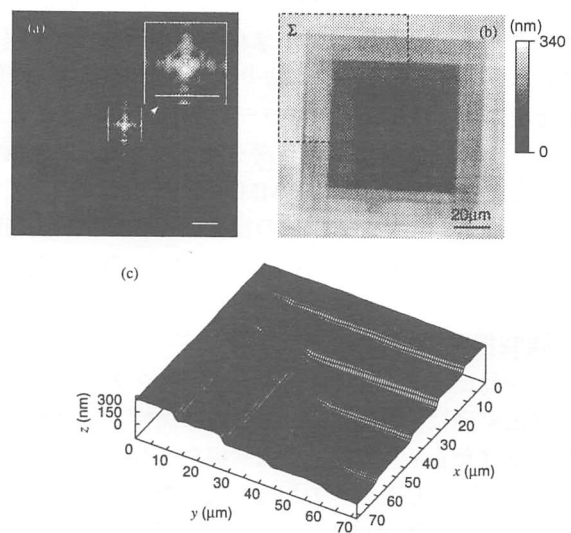


Fig. 6: (a) Measured diffraction intensity (logarithmic plot). Central portion is detailed in the inset. Scale bar corresponds to 10^5 m^{-1} in the spatial frequency coordinates. (b) Reconstructed surface. (c) Plot of the surface Σ in (b).

4 結 言

提案手法に基づき装置を開発し、標準格子および一般形状を測定することで実験的検証を行った。いずれの場合も位相回復は有効に機能し、表面プロファイルを三次元的に得ることができた。測定精度向上を目指し、強度測定におけるコヒーレントノイズの低減が今後の課題である。

参考文献

- [1] A. Taguchi, T. Miyoshi, Y. Takaya, S. Takahashi and K. Saito: "3-d micro-profile measurement using optical inverse scattering phase method", *Ann. CIRP*, **49/1**, pp. 423-426 (2000).
- [2] J. R. Fienup: "Phase retrieval algorithms: A comparison", *Appl. Opt.*, **21**, 15, pp. 2758-2769 (1982).