

光ピンセット金微粒子による屈折率グレーティングの近接場観測

上ミ 弘高・浮田 宏生*

立命館大学理工学部 〒525-8577 草津市野路東 1-1-1

Near Field Observation of a Refractive Index Grating by an Optically-Trapped Gold Particle

Hiroataka UEMI and Hiroo UKITA*

Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan University, 1-1-1, Nojihigashi, Kusatsu 525-8577

We succeed in observing the near field of a refractive index grating fabricated on a planar light waveguide circuit (PLC) by scanning an optically-trapped 100 nm diameter gold particle. We demonstrate that stable trapping and scanning occur with an aberration-free beam profile, appropriate scan velocity and trapping laser power. The scattered light from the gold particle is strong at high refractive index of the grating with the period of 1.06 μm and 0.53 μm both by s and p polarized illumination.

Key words: near field, refractive index grating, optical trapping, gold particle, artifacts, scanning near field optical microscope (SNOM)

1. はじめに

走査型近接場光学顕微鏡“scanning near field optical microscope (SNOM)”は、サンプル表面に局在するエバネセント光を利用することにより、回折限界を超える分解能を実現している。このため、SNOMは医学・生物学・表面科学をはじめ、幅広い分野で利用されるようになってきた^{1,2)}。

観測用のプローブとしてはフォトカンチレバー³⁾、光ファイバー⁴⁾、金属探針^{5,6)}、金属球^{7,8)}などが試みられている。水中で光トラップした金微粒子によるプローブは、(1)寸法や形状が一定なので実験の再現性が高い、(2)サンプルとの衝突で試料やプローブを破損しないなどの特徴があり、将来のSNOM装置として期待されている。

この金属球プローブに対しては、実験的には、カバーガラス上のくぼみ⁷⁾、カバーガラスに吸着した微粒子⁷⁾、光ディスクのトラック案内溝⁹⁾を観察した報告がある。しかし、プローブの上下動に伴う問題 (artifact)⁹⁾のため、形状が正確に測定されているかどうかは定かではない。一

方、理論的には、誘電体基板上の金属球により電磁界が増強され、基板中の屈折率分布をマッピングできることが提案されている¹⁰⁾。

本稿では、凹凸のない表面に作製された屈折率格子を、光ピンセットプローブでマッピングできることを実験検証する。測定の分解能は、金微粒子直径、熱ゆらぎ、散乱光強度 (信号 SN 比) などに影響されるが、本実験では直径を 100 nm とし安定な光トラップ走査により、散乱光を再現性よく検出することを第一目標とした。以下では、まず試作 SNOM 装置の概要を述べ、次に金粒子の安定な光トラップ条件、走査条件を実験解析する。最後に、本光ピンセットプローブを光導波路上に作製された屈折率格子の観測に適用し、表面物性の微細変化を観測可能なことを明らかにする。

2. 試作装置の構成

試作した SNOM 装置の概略を Fig. 1(a) に示す。まず光トラップ用の Nd:YAG レーザー (波長 $\lambda=1064$ nm)

*E-mail: ukita@se.ritsumei.ac.jp

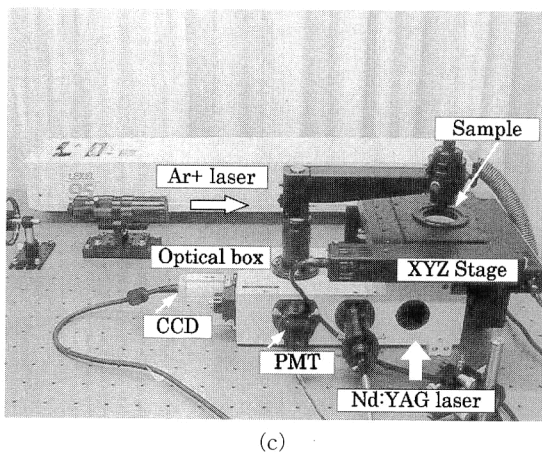
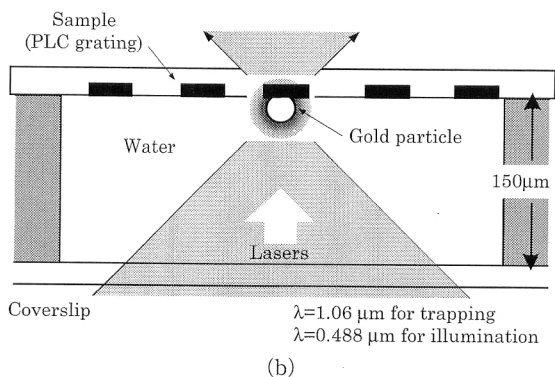
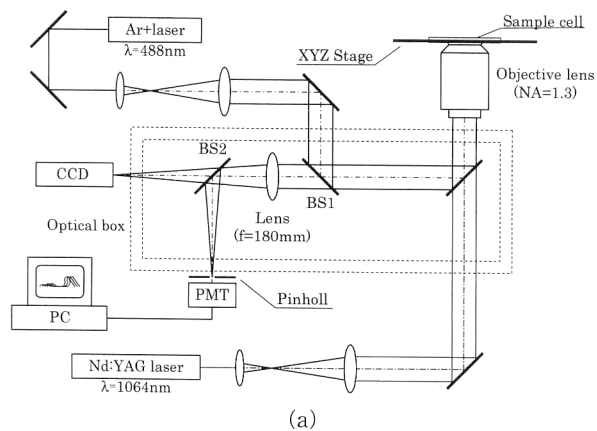


Fig. 1 (a) Experimental setup of the SNOM using an optically-trapped gold particle. A Nd:YAG laser is used to trap and an Ar⁺ laser is used to illuminate the gold particle. (b) Enlarged view of the sample chamber. (c) Photograph of the experimental setup.

をビームエキスパンダーで拡大し (直径 8.2 mm), 油浸対物レンズ ($NA=1.3$) で集光する. トラップ効率の高い下方¹¹⁾ から金微粒子 (直径 100 nm) に照射し, 焦点位置に捕捉する. また, 照明用 Ar⁺ レーザー ($\lambda=488$ nm) を同じ対物レンズを用いて集光・照射する. このとき熱による金微粒子のブラウン運動を抑圧するため, 照射パワーを光トラップのために必要な最小限度に弱める必要が

ある.

金微粒子からの散乱光は, レンズ ($f=180$ mm) でピンホール (直径 $5 \mu\text{m}$) の位置に結像され, 迷光成分が除去されフォトマルチプライヤー (PMT) で検出される. 同時に走査状態を CCD カメラで観察する. PMT からの出力電圧を 10 bit A/D コンバーターでデジタル化し, 信号を PC に取り込み, 画像化処理 (8 bit 化) およびフィルタリングを行って近接場を可視化する.

Fig. 1(b) はステージ部の拡大図である. サンプルは後述する屈折率格子で表面は平坦である. 直径 100 nm の金微粒子プローブが純水の層を介して屈折率格子表面に押しつけられるように二次元走査される.

Fig. 1(c) は SNOM 試作装置の全体写真である. Nd:YAG レーザー (図下方), Ar⁺ レーザー (図上方) を導くためのミラーなどの光学部品以外はすべて XYZ ステージ下の光学系ボックスに納められている.

3. 金微粒子の光トラップ特性

3.1 光トラップ方法

波長に比べて十分小さい微粒子を光トラップするには, 焦点付近のレーザー強度分布に基づく勾配力を利用する¹²⁾. このため, 光トラップ特性は光ビームのエネルギー分布のプロファイルに強く依存する. ビームプロファイルは, 対物レンズの色収差 (可視域は補正済み), 金微粒子を分散している媒質 (水) による球面収差 (油浸対物レンズのマッチングオイルとの屈折率差に起因), 光学系の不均一性などに影響されるので以下の工夫をした.

Nd:YAG レーザー ($\lambda=1064$ nm) による近赤外の色収差に対しては, ビームエキスパンダーにより収束ぎみの光束を対物レンズに入射させ, 可視域の Ar⁺ レーザーの焦点位置と一致させた. また, 両レーザーを対物レンズ中心に垂直入射した. 厚み $150 \mu\text{m}$ の媒質による球面収差に起因する光トラップ力の低下に対しては, 金微粒子を散乱力で下からサンプルに押しつけ (横方向は勾配力で光トラップされる) 走査した.

3.2 トラップ位置依存性

Fig. 2 は光軸方向の最小光トラップパワーのトラップ位置依存性である (○印は 5 回測定の平均値). 縦軸が最小光トラップパワー (粒子を光トラップしておいて徐々にレーザー光を弱くした場合に粒子がトラップから外れる光強度), 横軸がレーザー焦点と対物レンズ側カバーガラス表面の間隔 T である (実際は対物レンズの移動距離). 粒径が小さい (100 nm) のでブラウン運動が顕著で測定値に大きな変動がみられる. また, T が増加するにしたがっ

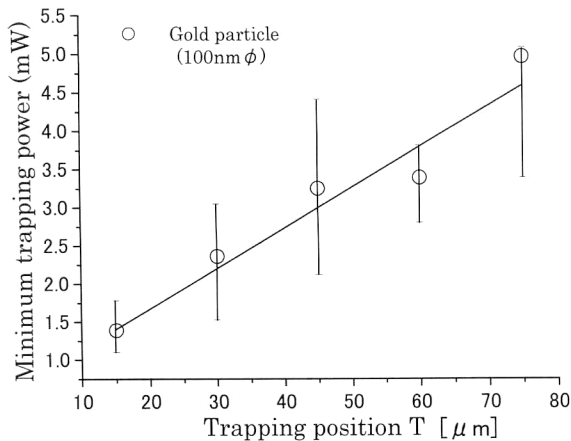


Fig. 2 Dependence of the minimum axial trapping power for a gold particle of 100 nm diameter on the trapping position from a coverslip.

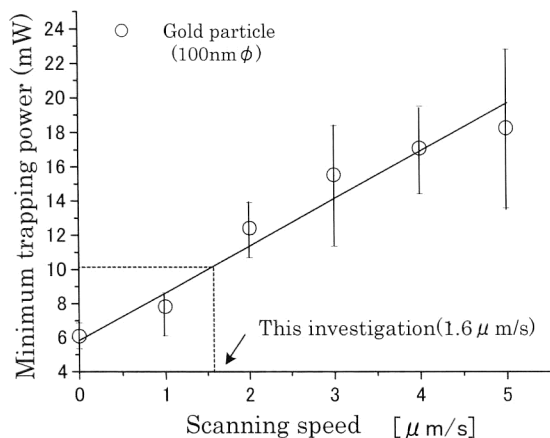


Fig. 3 Dependence of the minimum axial trapping power on the scanning speed of an optically-trapped gold particle.

で最小光トラップパワーが増加し、捕捉しにくくなっている。これは、マッチングオイルと屈折率が異なる水の層が T とともに増加し、球面収差により集光特性が劣化するためである。

3.3 走査速度依存性

Fig. 3 は最小光トラップパワーの走査速度依存性測定結果である。Fig. 3 から走査速度に比例して光トラップパワーが増加していることがわかる。一方、より安定にトラップしようとして光パワーを増加すると、光吸収による熱で逆にブラウン運動が激しくなるので、光パワーを増加しすぎるとトラップが不安定になる。

また、金微粒子の光トラップ特性は測定（走査）時間にも依存する。低速で走査時間が長くなると、トラップ脱落や分散された微粒子との衝突確率が増加する。

これらの条件を考慮し、本近接場観測では、光パワー 25 mW で金微粒子を捕捉し、速度 1.6 $\mu\text{m/s}$ で走査した。

Table 1 Conditions to fabricate refractive index gratings in PLC.

Core ($\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$) index	1.46
Clad (SiO_2) index	1.45
Refractive index difference	0.001~0.002 (Estimated)
Phase mask method	
Source: ArF laser ($\lambda = 193 \text{ nm}$)	
Phase mask pitch: 1.06 μm	
Energy density per pulse: 1.0 J/ cm^2/pulse	
Pulse repetition rate: 50 Hz	
Grating pitch (Zero order): 1.06 μm	

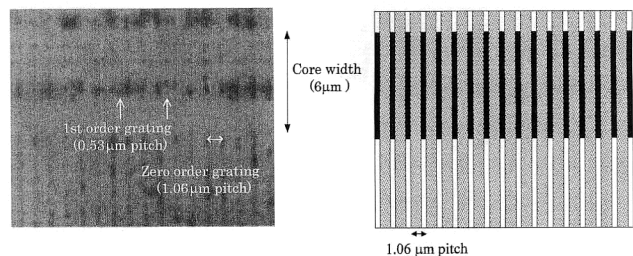


Fig. 4 Photograph of a refractive index grating fabricated on a planar light waveguide circuit (PLC).

このとき 1 画面分の観測時間は約 5 分である。

なお、グリセリンなどを添加して媒質の粘度を増して熱運動を抑えることにより、より小さい光パワーでトラップが可能になる¹³⁾。

4. 屈折率グレーティングの近接場観測

グレーティングは石英系導波路 (PLC: planar light waveguide circuit) のコア (幅 6 μm , 厚さ 6 μm) の上のクラッド (厚さ 30 μm) に、フェーズマスク法¹⁴⁾により Table 1 の条件で作製されている。光学顕微鏡写真を Fig. 4 に示す。0 次光によるグレーティングはピッチ 1.06 μm , 屈折率差 $1.0 \sim 2.0 \times 10^{-3}$ (推定) である。また、その間にとぎれとぎれではあるが一次光によるグレーティングが認められる (ピッチ 0.53 μm)。なお、これらのグレーティングはクラッド表面から深さ 30 μm のコア表面まで形成されている。

SNOM 装置の観測条件を Table 2 に示す。水に分散された直径 100 nm の金微粒子を Nd:YAG レーザーで光トラップし、 Ar^+ レーザーを集光照射しながらサンプル表面を走査し、表面物性に応じて変化する金微粒子からの散乱光を PMT で検出した。走査速度 1.6 $\mu\text{m/s}$, ピッチ 50 nm で、 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$ の範囲を二次元走査した場合の測定時間は約 5 分である。

Fig. 5(a) は照明用 Ar^+ レーザーが p 偏光 (格子に垂

Table 2 Conditions to observe a refractive index grating by an optically-trapped gold particle.

Gold particle diameter	100 nm
Medium	Water
Nd: YAG laser intensity	25 mW ($\lambda = 1064$ nm)
Ar ⁺ laser intensity	130 μ W ($\lambda = 488$ nm)
Scan velocity	1.6 μ m/s
Scan pitch	50 nm
Scan area	5 \times 5 μ m ²
Measurement time	5 min

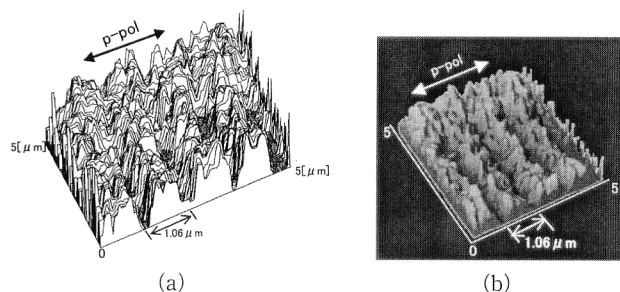


Fig. 5 SNOM images of the refractive index grating by a gold particle probe with p-pol illumination. (a) Scattered light intensity. (b) Shaded image.

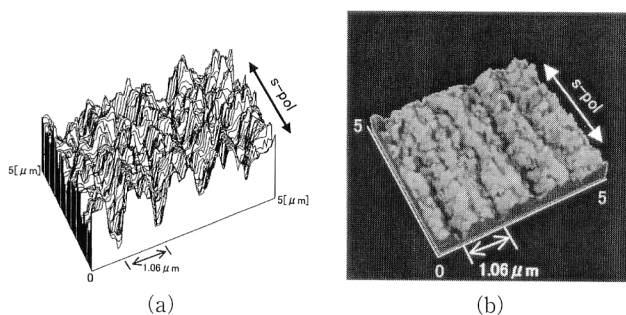


Fig. 6 SNOM images of the refractive index grating by a gold particle probe with s-pol illumination. (a) Scattered light intensity. (b) Shaded image.

直)の場合の散乱光観測結果である。Fig. 5(b)は、散乱光強度を濃淡画像化したもので、いずれの観測画像にも、金微粒子のゆらぎによる散乱光の変動が認められる。しかし、グレーティング周期 (1.06 μ m) に対応した散乱光量の変化が明らかである。

Fig. 6(a), (b)は、s偏光(格子に平行)の場合の観測結果である。p偏光, s偏光ともに高次の縞が鮮明に観測されている。

これら10ライン分の散乱光データを平均し、サンプル表面の屈折率変化と比較した結果をFig. 7に示す。p偏光, s偏光ともグレーティングの屈折率周期 (1.06 μ m) に対応した散乱光強度が観測されている。また、グレーティングの高次の縞に対応する微小変化がディップとなって

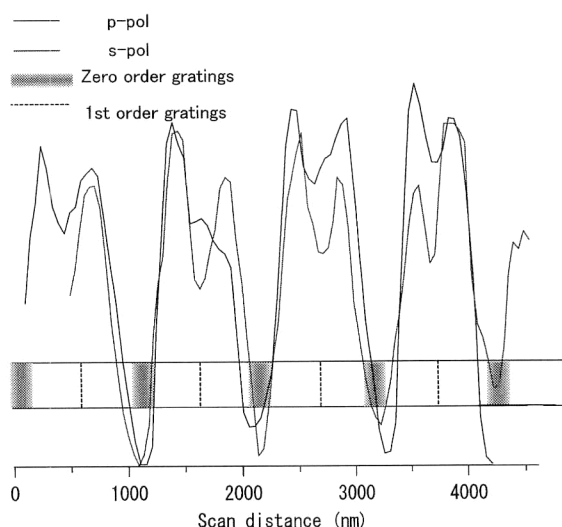


Fig. 7 Relationship between scattered light intensity and a refractive index grating profile.

観測され(周期 0.53 μ m)、高分解能の観測が可能となる。この結果は文献¹⁰⁾の理論解析から予測される結果と傾向が一致している。つまり、Ar⁺レーザーの照射で金微粒子に誘起された表面プラズモンが、サンプル表面の屈折率変化に応じて散乱された結果と考えられる。

5. まとめ

本稿では、光ピンセット金微粒子をプローブとしたSNOM装置を試作し、サンプルの表面物性(屈折率)に対応した近接場光を観測した。

まず、金微粒子を安定に光トラップする条件として、光ビームプロファイル、各種収差、熱運動の影響を検討した。その結果、

- (1) 光学系の不均一を除去し、トラップ用光ビームを対物レンズの中心に垂直入射し、光ビームのプロファイルを良好に保つ
- (2) 金微粒子を下からサンプル表面に押しつけ横方向の勾配力で二次元トラップする
- (3) トラップ用YAGレーザーの近赤外収差に対し、光ビームを収束気味に対物レンズに入射して照明用Ar⁺レーザーの焦点位置と一致させる

などが有効であった。

次に、石英系導波路に形成されたグレーティングの屈折率変化の観測では、直径100nmの金微粒子をサンプル表面に押しつけて二次元走査し、散乱光を検出した。このとき、金微粒子の脱落や凝集を排除するため、走査速度1.6 μ m/s、光パワー25 mWとし、走査ピッチ50 nmでサンプル表面(5 \times 5 μ m²)を約5分間で測定した。その結果、

金微粒子からの散乱光強度は照明用 Ar⁺ レーザーの偏光状態にかかわらず、試料表面の屈折率に対応して変化することがわかった。

今後、金微粒子とサンプル表面の相互作用を検討するとともに段差のあるサンプルへの適用性を検討する予定である。

サンプルの PLC グレーティングを提供いただいた NTT フォトニクス研究所の丸野透部長、日比野義典グループリーダーに深謝します。

文 献

- 1) 大津元一：光の小さな粒：新世紀を照らす近接場光，ポピュラーサイエンス（裳華房，2001）。
- 2) S. Kawata ed.: *Near-Field Optics and Surface Plasmon Polaritons* (Springer, Tokyo, 2001).
- 3) K. Fukuzawa, Y. Tanaka, S. Akamine, H. Kuwano and H. Yamada: "Imaging of optical and topographical distributions by simultaneous near field scanning optical/atomic force microscopy with a microfabricated photocantilever," *J. Appl. Phys.*, **78** (1995) 7376-7381.
- 4) D. W. Pohl, W. Denk and M. Lanz: "Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$," *Appl. Phys. Lett.*, **44** (1984) 651-653.
- 5) Y. Inoue and S. Kawata: "Near-field scanning optical microscope with a metallic probe tip," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 159-161.
- 6) H. Furukawa and S. Kawata: "Local field enhancement with an apertureless near-field-microscope probe," *Opt. Commun.*, **148** (1998) 221-224.
- 7) T. Sugiura, T. Okada, Y. Inoue, O. Nakamura and S. Kawata: "Gold-bead scanning near-field optical microscope with laser-force position control," *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1663-1665.
- 8) 上ミ弘高, 井高 護, 浮田宏生: "光ピンセット球プローブによる SNOM 信号の画像化", 第 61 回応用物理学会学術講演会講演予稿集, 3p-D-9 (2000) p. 901.
- 9) B. Hecht, H. Bielefeldt, Y. Inoue and D. W. Pohl: "Facts and artifacts in near-field optical microscopy," *J. Appl. Phys.*, **81** (1997) 2492-2498.
- 10) T. Okamoto and I. Yamaguchi: "Field enhancement by a metallic sphere on dielectric substrates," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 211-214.
- 11) 橘 彰一, 浮田宏生: "上下入射光による微粒子の操作—光トラップ力の解析と応用—", *光学*, **27** (1998) 524-529.
- 12) H. Furukawa and I. Yamaguchi: "Optical trapping of metallic particle by a fixed Gaussian beam," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 216-218.
- 13) 上ミ弘高, 浮田宏生: "グリセリン媒質中の金微粒子による近接場観測", 平成 13 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, エレクトロニクス 1, SC-2-7 (2001) p. 375.
- 14) K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson and J. Albert: "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," *Appl. Phys. Lett.*, **62** (1993) 1035-1037.