

NSOM の空間走査性と Illumination-collection mode 周波数干渉計測

Stable spatial scanning of NSOM and spectral interference detection

an illumination-collection mode

正木 雄太 (B4)

Yuta Masaki

Abstract

We report the experimental results of topography and intensity mapping obtained by an illumination-collection mode NSOM, where near-field light is excited and detected by the common fiber probe. However, the signal to noise ratio is not sufficient to measure spectral interference (SI) fringe in an SI-NSOM setup. Moreover, a large amount of group velocity dispersion significantly broadens signal pulses and decreases temporal resolution of NSOM.

1. はじめに

情報化社会の発展に伴って、光デバイスの大容量化・微細化が求められてきているが、従来の光学では光を回折限界以下に閉じ込めることができない。そこで、物質界面上に存在する近接場光を用いたナノフォトニクスが昨今注目されてきている。特に、金属ナノ粒子に光を照射することで生じる局在プラズモン共鳴は、光エネルギーをナノメートルスケールの空間へ閉じ込め、尚且つ共鳴現象により強い電場を誘起することができる。更に、この局在プラズモン共鳴はフェムト秒スケールの時間応答を有するために、フェムト秒レーザーを励起源とすることで、超微細な空間に超高速な電場を生成することができる。

一方で、プラズモン場はナノ粒子の半径と同程度の空間に局在し、非伝搬である。したがって、このプラズモン場の応答を知るためには、同程度の大き

さのナノ粒子を近づけプラズモン場を散乱光へ変換する必要がある。この原理を利用したものに、走査型近接場光学顕微鏡（NSOM：Near-field scanning optical microscopy）がある。NSOMは先端径がナノメートルオーダーであるファイバプローブをサンプルに数十 nm まで近づけることで物質界面上の近接場光を励起、または検出している。このために、回折限界以下の空間分解能を有する。NSOMはその目的に応じて3つのオペレーションモードがある。Fig. 1に3つのモードを示した。ファイバプローブによって近接場光を励起、検出するのが Illumination mode と Collection mode である。一方で、励起も取得も同一ファイバプローブで行うのが Illumination-collection mode である。Illumination mode と Collection mode では励起と検出のどちらか一方の空間分解能が落ちてしまうが、Illumination-collection mode を用いれば、どちらも近接場相互作用を利用しているために、空間分解能が回折限界以下となる。この Illumination-collection mode NSOM とフェムト秒レーザーを組み合わせることで、高時間分解能・高空間分解能を有した光学顕微鏡を構築することができる。

今回我々は、金ナノ粒子における超高速なプラズモン場を観測することを目的として、Illumination-collection mode NSOM の構築を試みた。

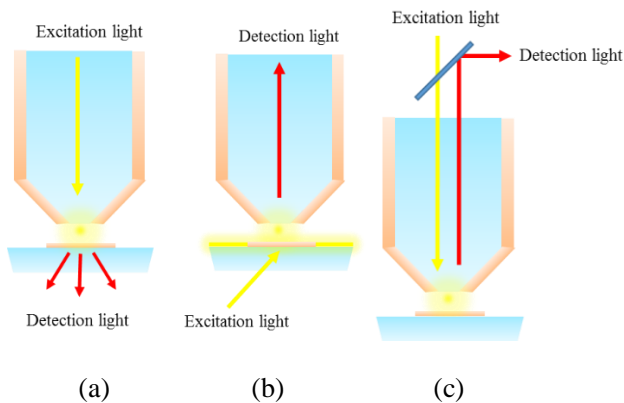


Fig. 1 (a) Illumination mode (b) Collection mode
(c) Illumination-collection mode

2. 実験セットアップ

Fig. 2 に強度マッピング取得のための実験セットアップ図を示す。励起源には、モード同期 Ti:Sapphire レーザ（波長 650~1050 nm, パルス幅 10 fs, 繰り返し周波数 150 MHz, VENTEON）を用いている。励起光は、波形整形用の 4f 系を通った後に、Illumination-collection mode NSOM に入る。NSOM では、ファイバプローブによってサンプルを励起した後、同一のファイバプローブによってプラズモン場を検出する。ファイバプローブは先端径が 500 nm 程度、開口径が 100 nm 程度の遮光コート金のファイバプローブを使用している。シグナル光は非常に微弱なので、光電子増倍管 (PMT) で計測している。また、ファイバ内の反射光がノイズとなって S/N 比を悪化するため、プラズモンの強度がチューニングフォークの振動数の変調を受けていることを利用してその振動数でロックイン検出している。図中のピンホールはファイバカップラのための対物レンズからの反射光をはじくために置いてある。

サンプルとファイバプローブの距離制御にはシェアフォースによるフィードバック制御を用いている。チューニングフォークの振幅の変化をロック

イン検出し、目標値との差に応じてピエゾステージが動くようになっている。このシェアフォースフィードバックは本研究室でこれまで用いてきたものと同じである。

更に、プラズモン場の位相を調べるための周波数干渉法 (SI) のセットアップを組んだ。そのセットアップ図が Fig. 3 となる。Fig. 2 と異なるのは、BS によってレファレンス光を準備していることであり、これはシグナル光との時間遅延差を可動ステージによって調整できるようになっている。また、SI 測定のために回折格子によって周波数ごとに角度分散し、フーリエ面の画像を冷却 CCD カメラで計測できるようになっている。ここで、シグナル光とレファレンス光の相対位相が大きすぎると SI の干渉縞が見えにくいと考えたために、同質で長さがファイバプローブの 2 倍であるファイバにレファレンス光を通すことでレファレンス光の位相を調整している。

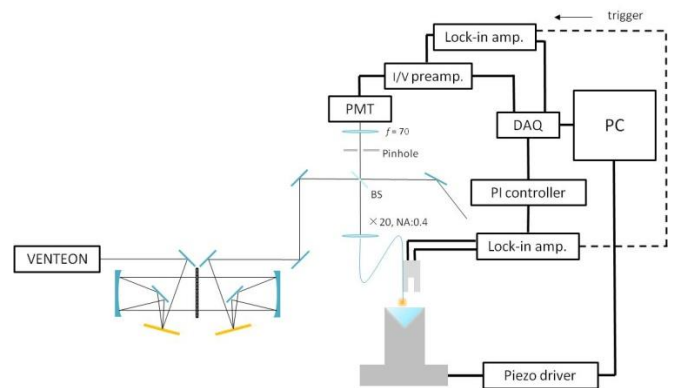


Fig. 2 Setup diagram of Intensity mapping

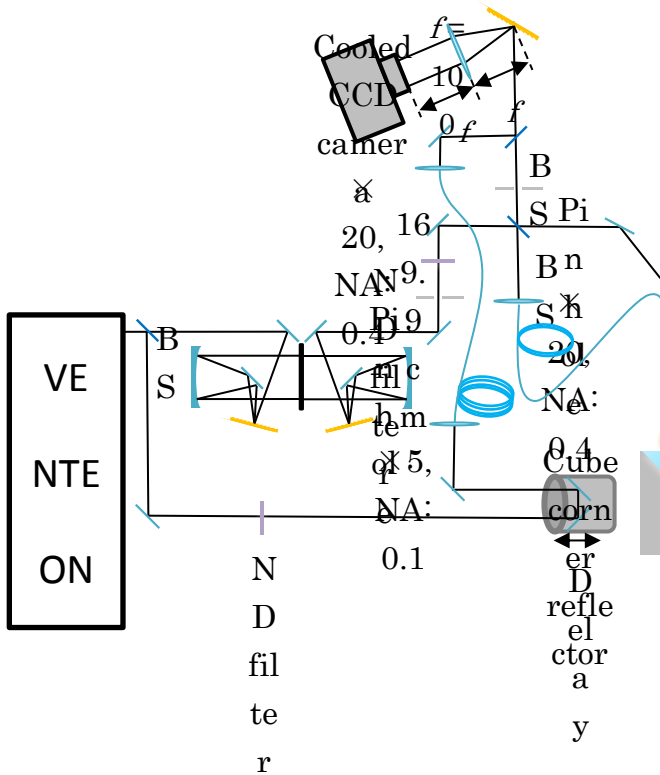
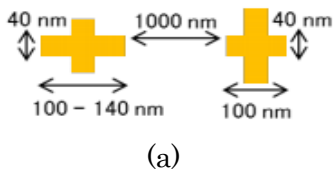
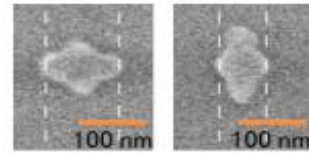


Fig. 3 Setup diagram of SI measurement

次に、サンプルとして用いた金ナノ粒子について説明する。Fig. 4に金ナノ粒子の設計図とそのSEM画像を示す。厚さ 0.65 mm のガラス基板に並んでおり電子ビームリソグラフィで作製されたものである。サンプルの高さは 30 nm、大きさは 100 nm 程度である。SEM 画像からも分かるように、金ナノ粒子のエッジは丸みを帯びており、この金ナノ粒子の光学特性を知るためには FDTD 法では不十分であり、NSOM によって評価する必要がある。



(a)



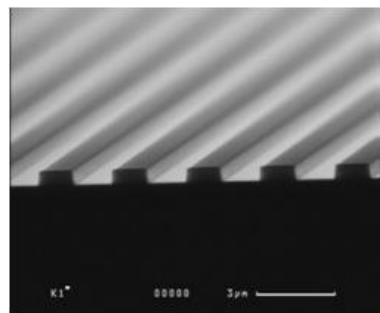
(b)

Fig. 4 (a) Schematic image and (b) SEM image of cross nanostructures

3. 実験結果

A. トポグラフィの再現性の確認

近接場光を励起、または測定するためにはファイバプローブとサンプルの距離が安定していなければならない。また、サンプルが非常に微小である一方で金ナノ粒子の任意の点において励起と検出を行いたいという目的がある。そのためにはプローブとステージの相対的な位置が安定していなければならない。以上の理由から、トポグラフィの安定度を測るために、テストグレーティングを用いて 1 軸マッピングの再現性を確認した。その中で、目標値等のパラメータの最適化を行った。Fig. 5 にテストグレーティングの SEM 画像と 1 軸マッピング結果を示す。グレーティングの高さは 112 nm、周期は 3 μm 、素材はシリコンである。1 軸マッピングではトポグラフィの安定性を確かめるために繰り返し測定を行っている。1 軸マッピングを見ると、回折格子の形状が現れており、また再現性があることが分かる。プローブによって、フィードバック制御における最適な目標値、 $P \cdot I \cdot D$ 値が変わってしまうので、プローブを交換する度にこれらのパラメータを調整する必要がある。



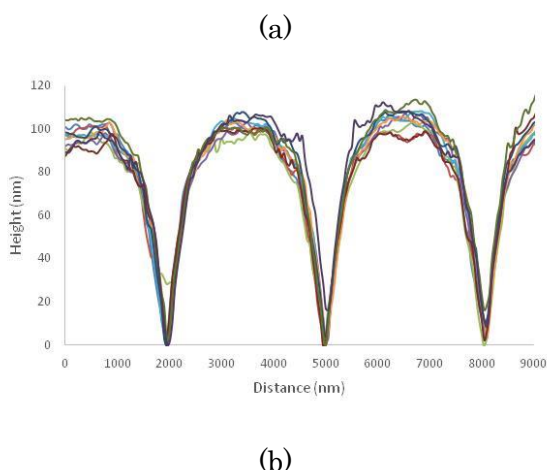


Fig. 5 (a) SEM image and (b) Single-axis mapping of grating

B. 金ナノ粒子の強度マッピング計測

Fig. 4 の金ナノ粒子のトポグラフィ画像と強度マッピング画像を取得した。取得した画像を Fig. 6 に示す。赤い円で囲ったところが金ナノ粒子のイメージである。このように、トポグラフィと強度マッピングの画像において金ナノ粒子が確認できた。このことから Illumination-collection mode NSOM が回折限界以下の分解能を持つ光学顕微鏡として有効であることが示された。しかしながら、右下に出ているゴーストイメージが何に起因しているのかはまだ不明であり、今後の課題となっている。

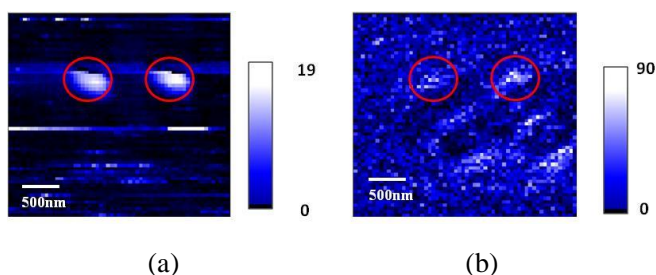


Fig. 6 (a) Topography and (b) Intensity mapping of cross nanostructures

C. 金ナノ粒子の SI 計測

金ナノ粒子のプラズモン場の位相を調べるために、Fig. 4 のセットアップ図で SI 計測を行った。

Illumination-collection mode NSOM だと、サンプルの励起と検出を同一ファイバプローブで行うためにノイズが大きい。これに対して、SI 計測では時間遅延の大きさによって干渉縞の幅が決まるために、そのフーリエ面においてノイズをカットすることができると考えた。しかしながら、シグナル光とレファレンス光の光路差を計算して、Delay 装置を動かしたが干渉縞を確認することができなかった。更に、時間遅延を合わせるために相互相関計測を行ったがこちらでも干渉縞の確認を行うことができなかった。原因としては、やはりノイズの大きさが大きいので、干渉縞がノイズの中に埋もれ我々の用いている冷却 CCD カメラのダイナミックレンジでは観測することができなかったことが挙げられる。

4. まとめ

Illumination-collection mode の NSOM を新たに構築し、金ナノ粒子のトポグラフィ画像及び強度マッピング画像を取得することができた。しかしながら、その S/N 比が悪いこと、ファイバ中に群速度分散が乗ってしまい時間分解能が落ちることは Illumination-collection mode NSOM の欠点であり、今後はこれを解消していく必要がある。S/N 比が悪く SI 計測ができないことに関しては、各ピクセルにおいてロックイン検出ができるロックインカメラを適切に用いること、群速度分散が乗ってしまうことに関しては、ファイバ長を短くし群速度分散の補償機構を設けることが改善策として挙げられる。