

2 探針走査型近接場光学顕微鏡の構築

Construction of dual-probe scanning near-field optical microscopy (DSNOM)

正木 雄太 (M1), 小島 康裕(B4)

Yuta Masaki, Yasuhiro Kojima

Abstract

We construct dual-probe scanning near-field optical microscopy (DSNOM), where near-field light is excited and detected at different position by different fiber probes. DSNOM provides a powerful tool to visualize propagating SPP or scattering electrons under diffraction limit of light, which conventional optical microscopy cannot do. Moreover, combination with femtosecond laser pulses and DSNOM will make it possible to measure ultrafast physical phenomena in nanometer scale. However, approaching two fiber probes within several tens of nanometer is challenges till now. We report here that we can scan the detection fiber probe around the excitation fiber probe without physical contacts between them, using dual-band modulation (DBM) techniques. We confirm that these two fiber probes approaches by the distance of from 50 to 100 nm

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、フェムト秒レーザを励起源とすることで、超微小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 (SNOM : Scanning Near-field Optical Microscopy) がある。SNOM は先端径が約 100 nm 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。SNOM 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又は検出するのが **Illumination mode** と **Collection mode** である。一方で、励起も検出も同一のファイバプローブで行うのが **Illumination-collection mode** である。しかし、前者 2 つのモードでは、励起と検出のどちらか一方の空間分解能を犠牲にしている。後者のモードでは励起と検出の双方の空間分解能が高いが、ファイバプローブの開口外へ伝播していく表面プラズモンやキャリアの観測を行うことができない。これらの問題を解決し、回折限界以下の空間領域における物理的現象の観測を行うためには、励起用と検出用に 2 本のファイバプローブを用いた新たな SNOM モードの確立が欠かせない。更に、フェムト秒レーザと組み合わせることによって時間分解測定も可能となる。こ

のような背景から、今回我々は2探針走査型近接場光学顕微鏡、即ち Dual-probe SNOM (DSNOM)の作製を行った。具体的には、2つ目の原子間力顕微鏡 (AFM)システムを構築し、検出用プローブが励起用プローブの周りを物理的接触なしにラスタースキャンできるようなシステムの実証を行った。

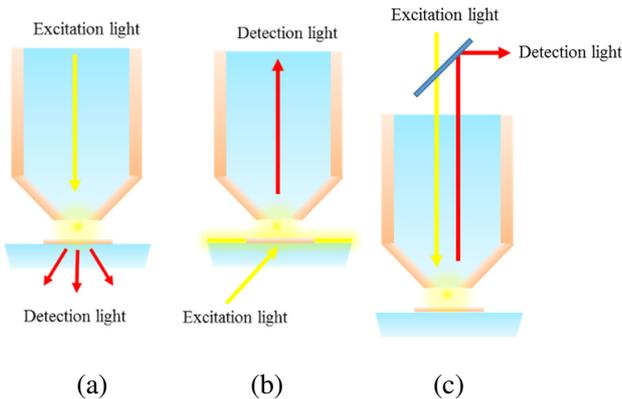


Fig. 1 Operation mode of SNOM, (a) Illumination mode (b) Collection mode (c) Illumination-collection mode.

2. 原子間力顕微鏡(AFM)の構築

A. AFM システム

我々は既にシアフォースモード AFM システムを1台構築しているために[1]、基本的にそれと同じシステムを構築した。大きく異なるのは、ピエゾステージがプローブ側に備え付けられており、プローブ先端位置の微動制御を行っている点である。Fig. 2 にシステムのダイアグラムを示す。ロックインアンプで内部発振した電圧信号をチューニングフォーク(TF)に与えることで、ピエゾ効果により TF が電圧信号と同じ周波数で機械的振動をする。ここで、電圧信号の周波数は TF の共鳴周波数(= 32 kHz)に合わせている。そうすると、TF の機械的振動の振幅に比例した大きさの電流が流れるので、それを電圧変換かつアンプした信号をロックイン検出する。TF に接着したファイバプローブがサンプルに近接すると、シアフォースによって TF の振動振幅値、すなわちロックイン検出

値が小さくなるので、ロックイン検出信号を用いてフィードバック制御システムを構築すれば、ファイバプローブ・サンプル表面間の距離を一定に保つことができる。我々は、PID コントローラにロックイン検出信号を入力し、その出力値をピエゾステージのドライバに入力することで、PID 制御システムを構築した。ここで、PID コントローラ目標値入力には DAQ からの出力電圧を用いているために、LabVIEW を操作することで目標値を変動できる。また、ピエゾステージの x, y 軸方向の位置制御も LabVIEW によって直接制御できるようにした。

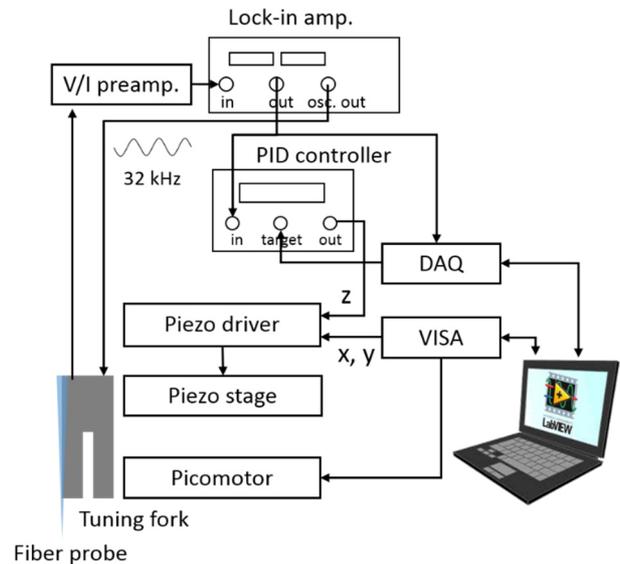


Fig. 2 Diagram of AFM system.

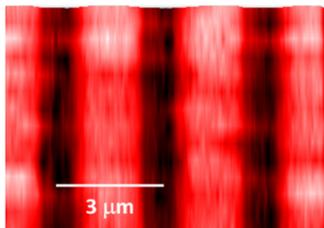
B. Tip Approach

今回我々が用いているピエゾステージの3軸方向のストロークは 36 μm である。これは SNOM に備え付けられた CCD カメラの空間分解能よりも十分に大きいので、ピエゾステージをこのストローク分動かすことで CCD カメラのイメージ上の絶対的な距離が分かる。したがって、それを基に同じ CCD カメラの暗視野イメージからファイバプローブ先端とサンプル表面の距離が大まかに分かる。ピコモ

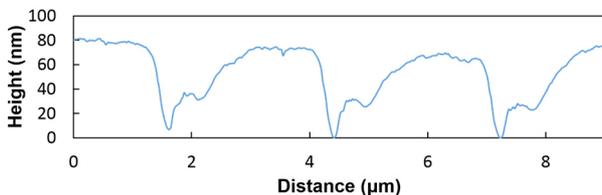
ータによってファイバプローブ先端とサンプル表面の距離をピエゾステージのストローク内まで近づけた後に、目標値を下げて Tip Approach を行うことで、短時間でフィードバックを掛けることができる。

C. Topography 測定

AFM システムの機能性を検証するために、Si 製グレーティングをサンプルとしてトポグラフィ測定を行った。このグレーティングの周期は $3 \mu\text{m}$ 、高さは 112 nm である。測定条件は、スキャン方向をグレーティングの周期方向、分解能を 25 nm 、スキャン速度を 1 s/plot とした。測定結果を Fig. 3 に示す。(a)はトポグラフィ、(b)は 1 軸マッピングを示す。このように、グレーティングの周期に沿った形状を測定することができ、またグレーティングの形状を表す縞が縦方向に綺麗に並んでおり、AFM の機能を実証することができた。ただし、1 軸マッピング結果を見ると高さが 80 nm 程度となっており足りていない。この原因が AFM システムにあるのかどうかは現在検討中である。



(a)



(b)

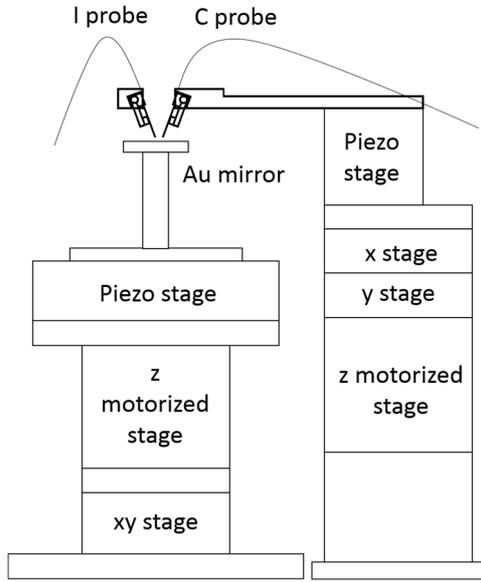
Fig. 3 Measurement results of (a) topography and (b) 1 axis mapping.

3. Dual-Band Modulation(DBM)システムの構築

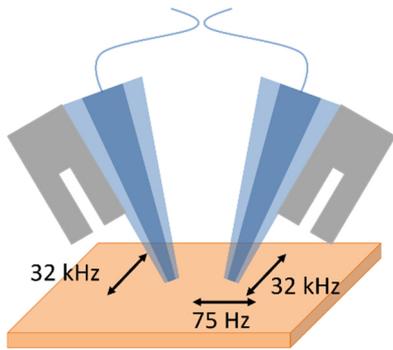
A. DBM システムの構築

Fig. 4(a)に今回構築した DSNOM の正面図を示す。ここで、I probe を励起用プローブ、C probe を検出用プローブとする。I probe を AFM 探針として用いる時にはサンプル下のピエゾステージが微小動作し、一方で C probe を AFM 探針として用いる時には C probe に備え付けられたピエゾステージが微小動作するようになっている。ここで、I probe と C probe がそれぞれ異なる距離制御システムによってサンプル表面と一定の距離を保っている。I probe の位置は常に固定された状態であり、C probe は I probe の周りをラスタースキャンする。この時、プローブ間の距離が最大数十 nm になるまで近接させる一方で、プローブ先端は壊れやすいので物理的接触してはならない。つまり、I probe、C probe、サンプルの 3 者が同時に近接しながら、どれもが物理的接触しないようなシステムの構築が必要である。このようなシステムとして DBM テクニックがある[2]。Fig. 4(b)に示したように、DBM テクニックでは 32 kHz と直交した方向 (=2 つのプローブが並んでいる方向) に 75 Hz の振動をピエゾステージによって与える。このことによって、2 つのプローブ間にシアフォースが働くほど 2 つのプローブが近づいた時にのみ 32 kHz のロックイン検出信号に 75 Hz の変調信号が載る。なので、この信号を更に 75 Hz でロックイン検出し、その信号変化を測定することで 2 つのプローブが近接したことを検出することができる。実際に構築したシステムでは、I probe と C probe の両方で 75 Hz ロックイン検出を行っており、それらを DAQ で PC に取り込んだ後に LabVIEW プログラム上で掛け合わせることで、S/N 比を改善している。ピエゾステージを 75 Hz

振動させるための電圧信号や 75Hz ロックイン検出に用いる参照信号は全て DAQ から出力したものをを用いている。



(a)



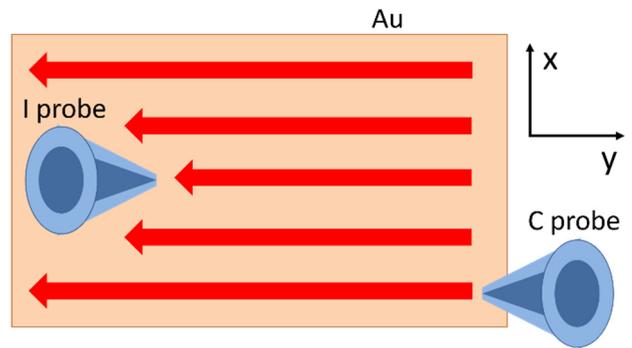
(b)

Fig. 4 Schematic image of (a) DSNOM and (b) I probe and C probe.

B. DBM システムの実証

DBM システムを用いることで物理的接触なしに C probe が I probe の周りをラスタースキャンすることができるのか実証実験した。Fig. 5 にその概念図を示す。C probe を -y 方向にスキャンさせると、ある地点において I probe と近接する。近接した時

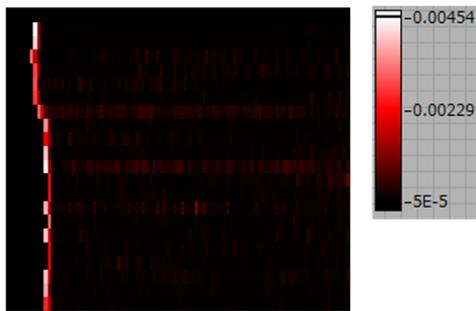
にのみ DBM システムで取り込んだ信号値が大きくなるので、その信号値が事前に設定した閾値を超えた地点で C probe のスキャンを停止し、開始地点に戻す。これを +x 方向に位置をずらして反復して行うことで、トポグラフィ測定を行うことができる。測定したトポグラフィ結果とそれに対応した信号値変化を Fig. 5(b)と(c)に示す。これらの測定結果から 2つのプローブが近接した地点でのみ信号値が大きくなり、C probe のスキャンが停止していることが分かる。この信号値が大きく変化している地点における TF の振動振幅値を測定することで、I probe と C probe が物理的に接触していないことも確認できた。このことから DBM システムを構築できたといえる。ただし、トポグラフィ画像における I probe の像が予期していたものよりも大きく、2つのプローブの先端で近接しているのかどうか今後確認する必要がある。



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 (a) Schematic image of how to scan C probe around I probe and measurement results of (b) topography and (c) signal mapping.

4. まとめ

2台目の AFM を構築し、DBM システムを用いることで、2 探針走査型近接場光学顕微鏡を構築することができた。DBM システムの構築にあたっては、LabVIEW を用いたソフトウェア処理とハードウェア処理を併用した。今後の課題としては、2つのプローブの先端が近接できているか確認すること、DBM システムにおける信号変化をより大きくすることでシステムの安定性を向上すること等が挙げられる。

References

- [1] 松石圭一郎: 近接場光学顕微鏡を用いた金属ナノ構造局在プラズモン場の超高速応答関数計測 慶應義塾大学修士論文(2011).
- [2] A. Kaneta, R. Fujimoto, T. Hashimoto, K. Nishimura and M. Funato, "Instrumentation for dual-probe scanning near-field optical microscopy," Rev. Sci. Instrum. **83**, 083709 (2012).