

近接場光を用いたナノスケール温度測定法に関する研究  
 —近接場偏光による新たな温度センシングシステムの構築  
 および原理の実験的検討—

Experimental Study on Nanoscale Temperature Measurement Technique  
 by Near-field Light  
 -Construction and Principle Assessment of Novel Temperature Sensing System  
 Using Near-field Polarization-

80715758 笠掛利彰(Toshiaki Kasakake) Supervisor : 長坂雄次(Yuji Nagasaka)

1 緒言

ナノ新材料の特異的性質を用いた機能性材料の開発や、微小デバイスの高集積・高機能化が進む現在、それらの設計には熱解析が不可欠である。しかしサイズの微小化に伴い量子効果が支配的となるため、マクロな解析だけではこれらの熱的評価は難しい。また薄膜やデバイスのインプロセス評価として非接触・その場測定などの工学的要求も高い。このような背景の下、これまで多くの熱的測定技術が開発されているが、ナノスケール空間分解能を有し、非接触その場測定可能な測定法は未だ確立されていない。

近年、近接場光の偏光状態変化を利用した表面センシング技術が多く研究されている<sup>[1]</sup>。これらの結果は近接場偏光が試料表面温度に感度を持つことを示唆しており、近接場偏光を用いることで従来にない高感度な温度センシングが期待できる。そこで本研究では近接場偏光現象の温度依存性を用いた、ナノスケール空間分解能を有する温度センシング法 (Polarized Near-field Optics Thermal Nanoscopy: Polarized-NOTN) の新規考案、構築、および実現可能性の検討を行った。

2 測定原理

Figure 1 に測定原理の概要を示す。シングルモード近接場ファイバー内を伝送された直線偏光であるレーザーは、プローブ先端の微小開口に高い消光比を有する近接場光を励起する。励起光の電場を  $E_0$ 、プローブ先端の分極率を  $\psi_P$ 、試料の分極率を  $\psi_S$ 、試料-プローブ間距離を  $r$ 、真空の誘電率  $\epsilon_0$  とすると、試料により散乱される近接場光の強度  $I$  は、

$$I \approx (\psi_P + \psi_S)^2 |E_0|^2 + \frac{2\psi_P\psi_S(\psi_P + \psi_S)}{\pi\epsilon_0 r^3} |E_0|^2 \quad (1)$$

となる<sup>[3]</sup>。ここで第1項は伝播光成分を表し、第2項が近接

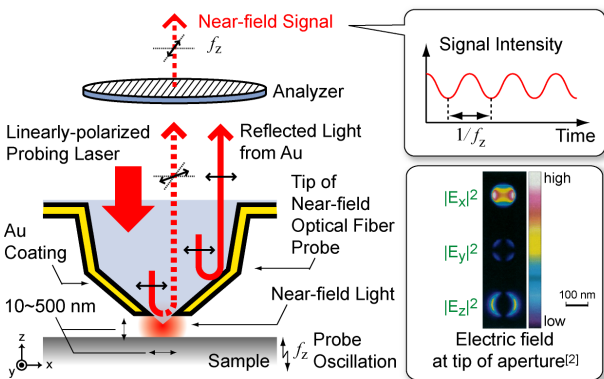


Fig. 1 Schematic image of Polarized-NOTN. The fiber probe tip is coated with Au, and has a nanoscale circular aperture.

場光の散乱光成分を表す。第2項より近接場光の強度が微小開口からの距離  $r$  の3乗に反比例し減衰することがわかる。

本測定法では、近接場光の偏光状態変化より温度測定を実現する。プローブ開口近傍にて発生する近接場相互作用による偏光状態の変化は、試料の表面情報に高い感度を持つ。中でも屈折率は試料温度に依存するため、近接場偏光の変化から試料の温度センシングを実現することができる。

近接場ファイバープローブ先端には開口形成および迷光防止のため、Auがコーティングされている。このAuコーティングによる反射は、信号光の大きなノイズとなる。ここで試料からの近接場光成分は、上述の偏光変化によりAuでの反射光と偏光面がわずかに異なる。このため、検光子を用いることでAuからの反射光を除去し、近接場信号のみを取得することができる。さらにプローブ-試料間距離を周期的に変化させる(Probe Oscillation Method: POM)ことで近接場光成分を変調し、その変調周波数でロックイン検出を行っている。これらにより大幅なノイズ除去を実現している。

3 測定装置

Figure 2 に測定装置の概略図を示す。観察光である He-Ne レーザー (波長 632.8 nm) は、近接場ファイバープローブに導入され先端で近接場光を励起する。近接場光はプローブ先端で反射 (散乱) される際、近接場相互作用により偏光状態が変化する。この試料表面温度に依存した偏光変化を検光子により光強度変化として検知することで、温度測定を実現する。偏光変化の高精度検知のため、偏光子 (消光比:  $10^{-6}$ ) を用いて He-Ne レーザーを高消光比直線偏光とした。またファイバー内では曲げ等による複屈折の影響で消光比劣化が生じるため、これを補償板により補正している。なお近接場光を検知するため、試料-プローブ間距離は音叉型水晶振動子とピエゾステージを用いた距離制御機構により数 nm の精度で一定に保たれている。水晶振動子は試料原子との相互作用により距離に依存した出力変化を示すため、PID 制御により出力を一定とし距離制御を行っている。

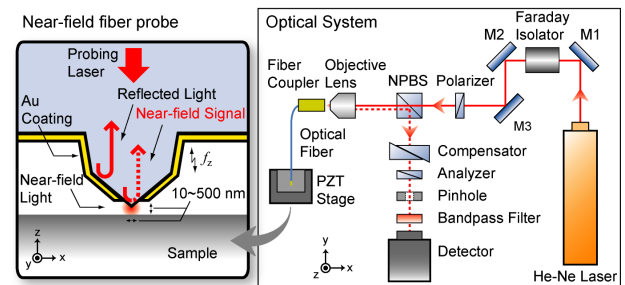


Fig. 2 Experimental apparatus. The distance between sample and near-field fiber probe is controlled by using the shear force.

#### 4 シングルモード近接場ファイバプローブの作製

従来の近接場ファイバは観察光波長においてマルチモードであり消光比劣化が著しく、偏光の高感度検知は困難である。このため偏光による高感度な温度センシングには、632.8 nm においてシングルモード性を有する近接場ファイバプローブが必要不可欠である。そこで 1  $\mu\text{m}$  コアファイバを用い、先鋭化(エッチング)、Au コーティング(スパッタ)、微小開口形成(押付け法)による近接場ファイバプローブの作製を行った。最適形状プローブ作製のため、各工程の条件出し、さらに定量的かつ再現性良く所望の開口を形成するためのシステム構築を行った。Fig. 3 に開口形成システムの概要を示す。プローブ先端をサファイア基板に衝突させることにより、Au 膜を剥離させ開口を形成した。試料-プローブ間距離制御を行った状態で、押付け量 100~200 nm に相当するパルス電圧をピエゾに印加することでプローブを衝突させた。作製される開口径の指標には先端からの透過光強度を用いている。押付けとともに開口からの透過光量を評価することで、任意の開口径を実現した。最終的にパルス電圧形状を 2 次関数的に印加することで初めてきれいな開口の形成に成功した。

完成したプローブ先端の SEM 像を Fig. 4(a)に示す。スパッタ、エッチングを最適条件下で行い、400 nm 径での開口形成に成功した。作製したプローブを用い得られた近接場信号光のビームプロファイルを Fig. 4(b)に示す。プローブ先端からの信号光がガウス状の強度分布となっていることが確認された。このファイバのシングルモード化により、消光比を数十倍向上させることに成功した。

#### 5 温度測定原理の実験的検討

温度変化による近接場偏光の変化を測定した。試料には SiO<sub>2</sub> 上に微細加工により形成された幅 500 nm, 厚み 80 nm の Mo 細線ヒーターを用いた。細線の両端より通電することで、細線上をジュール加熱する。測定では細線近傍 1  $\mu\text{m}$  を走査することで得られる光強度変化を測定した。Fig. 5 に測定結果を示す。上部に距離制御の安定性(水晶振動子出力)、下部に細線ヒーターへ 0.4, 0.8 mA (温度上昇: 0.09, 0.35 K) での通電加熱を行った時の信号変化を示した。ここで信号変化は非加熱(通電量: 0 mA) での信号光強度との差分をとった。

水晶振動子出力は細線の両端でばらつきが大きくなっているが、これは細線形状を検出し、試料-プローブ間距離が変化しているためである。この距離変化により光強度も細線両端で大きく変化していることがわかる。よって温度変化のみを評価するためには、細線中心(水平位置: 0 nm)における信号光強度変化を比較する必要がある。ここで反射率の温度依存性は  $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  程度であることが理論的に示されており<sup>[4]</sup>、加熱量の差(0.4, 0.8 mA)による偏光(Polarization)と反射率(Reflection)に依存した信号光強度変化を比較すると、偏光による信号光強度変化が約 3.5 倍大きいことがわかった。この結果は、反射率に比べ近接場偏光の温度依存性が数倍以上の感度を有することを示唆しており、偏光変化による温度測定の実現可能性を示した。

#### 6 結言

- 近接場偏光を用いた新たな温度センシング法を考案し、それを実現する装置の構築を行った。
- 632.8 nm シングルモード近接場ファイバプローブの作製プロセスの確立、作製を行い、消光比を数十倍向上させた。

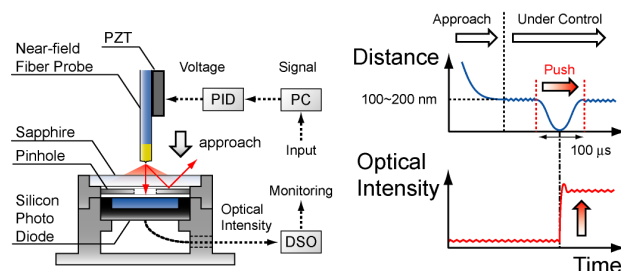


Fig. 3 The fabrication system of an aperture of near-field fiber probe. The fiber is pushed by applying offset voltage to piezoelectric actuator.

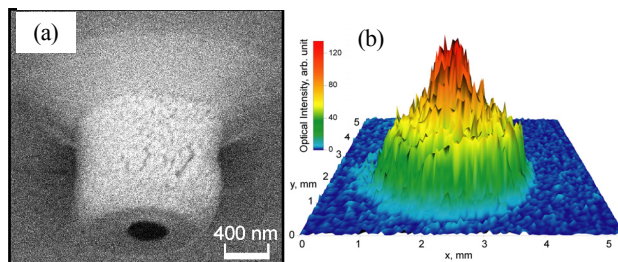


Fig. 4 Fabricated single mode near-field fiber probe. (a) SEM image of the tip of the fiber probe. A circular diameter is about 400 nm. (b) 3D Beam profile of near-field light.

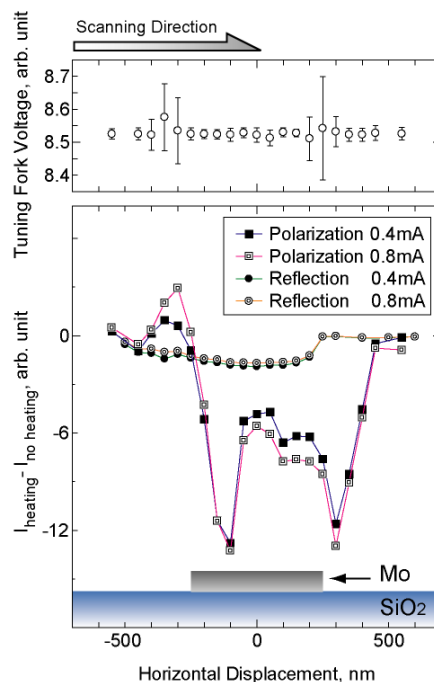


Fig. 5 Single line scan of the molybdenum wire heater. Applying current, temperature of the wire heater is increased.

- 反射率との比較により、近接場偏光の温度変化による信号光強度変化の優位性を示し、温度測定の実現可能性を示した。

#### 参考文献

[1] T. Saiki and Y. Narita, *JSAP International*, **5**, (2002), 22.  
 [2] E. Betzig and R. J. Chichester, *Science*, **262**, 5138, (1993), 1422.  
 [3] M. Ohtsu, *Near-field Nano/ Atom Optics and Technology*, Springer, (1998).  
 [4] K. Ujihara, *J. Appl. Phys.*, **43**, 5, (1972), 2376.