

## 近接場光学と微細加工への応用

井上 康志<sup>\*,\*\*\*\*</sup>・河田 聡<sup>\*\*,\*\*\*,\*\*\*\*\*</sup>

### Near Field Optics and Its Application to Nano-Photofabrication

Yasushi INOUE<sup>\*,\*\*\*\*</sup> and Satoshi KAWATA<sup>\*\*,\*\*\*,\*\*\*\*\*</sup>

Near field optics breaks the limitation of diffraction for imaging, spectroscopic measurement, data storage and fabrication. In this article, we present near field fabrication by employing a metallic tip which generates local enhancement of electric field. With this technique, we patterned 100 nm lines which are smaller than the far-field diffraction spot on photoresist film. Other techniques of near field fabrication are also shown and compared with our proposed method. Furthermore, features and usage of near field probes which are the most important device in near field optics are discussed.

**Key words:** near field optics, nano-fabrication, metallic tip, local field enhancement, nanotechnology

ナノテクノロジーは、原子・分子を見て、触って、刺激し、動かす、ナノ世界の技術である。そのナノワールドでの主役のひとつが走査プローブ顕微鏡ファミリーであり、走査トンネル顕微鏡 (STM)、原子間力顕微鏡 (AFM)、そして近接場顕微鏡 (NSOM あるいは SNOM) である。この中でも、近接場顕微鏡では光子を利用して対象の観察をナノメートルスケールで行うことから、光子は自分自身よりも 1/10~1/100 以上小さな空間に閉じ込められる必要がある。この光を閉じ込める方法には 2 つある。1 つは微小な開口を用いる方法で、もう 1 つは金属プローブでの電子と光子との共鳴、すなわち表面プラズモンポラリトンを用いる方法である<sup>1-3)</sup>。特に、金属プローブの特徴は、閉じ込め領域が金属プローブ先端のみであることから高空間分解能化が可能であること、共鳴効果による電場の増強が局所的に生じることにある。実際に、金属プローブを用いて 1 nm の空間分解能が達成され<sup>4,5)</sup>、また電場増強効果を利用して分子からのラマン散乱光を高感度に測

定することができる<sup>6-11)</sup>。近接場顕微鏡で原子・分子を 1 つずつ見るまでの空間分解能はまだ達成されていないものの、分光学的なデータを与えてくれることから、STM や AFM にはない機能を有する走査プローブ顕微鏡として位置づけられる。

さて、金属プローブ先端で生成される局所的な増強電場は、光加工や光記録へも応用することが可能である。これまでも、金属薄膜表面の光加工<sup>12)</sup>、光重合反応を利用した微細構造体の作製<sup>13)</sup>、電子線リソグラフィーにより作製した 50 nm×50 nm の記録ピット列の読み出しなどが報告されている<sup>14)</sup>。筆者らのグループでも、最近、金属プローブを用いてフォトリソグラフィの近接場光加工を試み、100 nm 幅のトレンチ構造を作製することに成功した<sup>15)</sup>。そこで、本稿では、まず近接場光学で重要な構成素子である近接場プローブ—金属プローブと微小開口プローブ—について述べ、続いてフォトリソグラフィー等の光微細加工への電場増強効果の応用の実際を示す。さらに、密着露光技術

\*大阪大学大学院生命機能研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

\*\*大阪大学大学院情報科学研究科 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*理化学研究所 (〒351-0198 和光市広沢 2-1)

\*\*\*\*CREST

\*E-mail: ya-inoue@ap.eng.osaka-u.ac.jp

や微小開口プローブを用いた近接場微細加工の現状についても紹介し、最後に、総括として近接場を利用した光加工技術の今後の展望について述べてみたい。なお、近接場光学の分光学や光記録への具体的な応用は、本号の他の解説や自著をご参照いただきたい<sup>16)</sup>。

## 1. 近接場プローブ

近接場顕微鏡では、光をナノメートル空間に閉じ込める近接場プローブが光学的な性能を決める。特に、光学的な空間分解能と光学的なスループット（検出限界を決めるフォトン数）は、どのタイプの近接場プローブを使うかで大きく異なる。これまでに提案されているプローブは、大別すると、微小開口型と金属プローブのような開口のない散乱型に分けられるが、それでは具体的にはどのように違うのであろうか。以下に、おのおののプローブの特徴について詳述し、それぞれが適した観察手法について示す。

### 1.1 金属プローブ

金属プローブには、先端径や直径がナノメートルサイズの金属探針<sup>3)</sup>、微小金属球<sup>17)</sup>等が用いられる。先端径（あるいは直径）が波長に比べて十分小さい場合、プローブ先端と試料間の電磁場は静電的に考えることができる。電磁場である光が金属プローブと試料に照射されると、金属プローブと試料間には電位差が生じ、金属プローブと試料間の等電位面は定性的に図1(a)に示すように表される<sup>18)</sup>。電場は静電ポテンシャルの空間的な微分により与えられることから、等電位面が集中する金属プローブと試料間のギャップに強い電場が形成されることになる。いわゆる、lightning rod（避雷針）効果であり、試料に接して置かれた金属プローブに光が照射されることで、探針先端に光が閉じ込められる。さらに、金属表面で自由電子の集団的な振動

が光と共鳴することで、表面プラズモンポラリトンが誘起される。空間を伝搬する光の波数の大きさでは表面プラズモンポラリトンが励起されないが、金属探針先端のように構造がナノスケールであれば、そこでエバネセント場が形成され、このエバネセント場により表面プラズモンポラリトンが探針先端で誘起され、より強い光の閉じ込めが生じる(図1(b))<sup>19)</sup>。したがって、金属プローブでは、プローブのナノ形状とプラズモンポラリトンの共鳴現象を巧みに利用することで局所増強場を形成し、試料をナノスケールで観察することを可能とする。1994年に筆者らのグループが提案した後<sup>3)</sup>、1999年前後からラマン分光<sup>6-11)</sup>、赤外吸収分光<sup>20)</sup>、二光子励起蛍光<sup>21)</sup>等、ナノ分光計測への応用が活発化してきている。

金属プローブでは、電気双極子が探針先端で直接励起されているとみなせる。また、照明光は対物レンズ等外部光学系により探針先端に直接導入し、散乱光も同様に検出できることから、高開口数の対物レンズを用いれば0.4という高い光学的スループットが得られる。ただし、散乱型である金属プローブでは、外部光学系を用いて試料を照明することから、バックグラウンド光が生じ、S/N比が低下する恐れがある。このバックグラウンド光を取り除くには、暗視野照明法<sup>22)</sup>や、プローブを垂直方向に微小振動させることで散乱光を変調しそれをロックイン検出する方法<sup>3)</sup>が用いられている。

図2に示すように、高開口数対物レンズ( $NA=1.4$ )の瞳面で開口数が1.0以下の成分を遮断して照明光を集束することで、集束スポットをエバネセント場だけで構成する暗視野照明が実現できる<sup>22)</sup>。これにより、試料側への伝搬光を除去でき、金属プローブ先端以外のシャフト部での反射による迷光を取り除くことができる。この集束スポットの中心に先端径30 nmの金属プローブが置かれ、金属探針先端での増強度を80倍とすると、探針先端での局所場の強度に対するバックグラウンド光の強度比(S/N比)はおよ

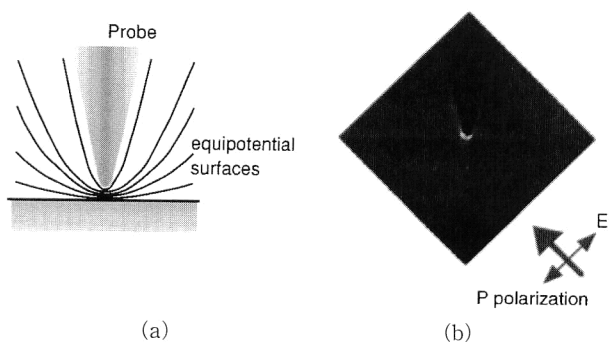


図1 金属プローブによる電場増強効果。(a) 金属プローブと基板間の静電ポテンシャル、(b) 有限差分時間領域(FDTD)法により求めた金属プローブ先端での散乱強度分布。プローブの材質は銀、照明光の波長は488 nm、偏光はP偏光を仮定している。入射光強度に対する増強度は約80倍である。

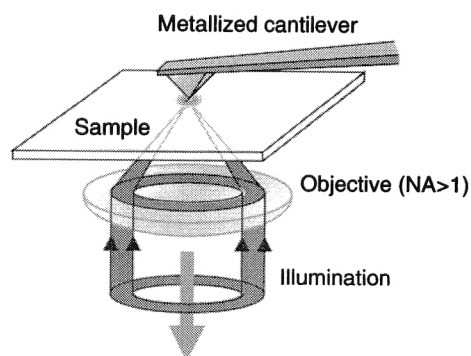


図2 集束エバネセント場照明法。

そ 13 を達成できる。すなわち、光学系を最適化することで、S/N 比の問題は解決できる(ただし、この光学系は不透明試料には適さない)。一方、ロックイン検出法では、エバネセント場の強度が試料からの距離に指数関数的に比例しているため、ロックイン検出する際に振動周波数の高調波成分により復調を行うと、局在性の高いエバネセント場、すなわちより微細な構造により生じたエバネセント場を検出できる<sup>23)</sup>。

最近では、金属プローブ先端での電場の増強度を高めるために、最適なプローブ形状の設計が試みられている。FDTD (有限差分時間領域) 法等の電磁気学的な解析法が用いられているが、増強度を上げるには、先端を先鋭化すること、プローブの金属部を有限長 (< 波長) にすること、が結論のようである<sup>24-26)</sup>。設計された形状は、集束イオンビーム等を用いることで作製することが可能である。

## 1.2 微小開口プローブ

微小開口プローブは、金属薄膜中に設けた微小開口により光をその開口内に閉じ込める。開口部以外は金属薄膜による吸収で光を遮断することから、金属薄膜の膜厚は使用する金属の表皮厚さ (skin depth) の数倍程度にする必要がある。可視光域で最も光を吸収するアルミニウムの場合で最低 50 nm の膜厚が必要であるが、200 nm 程度の膜厚にすることが一般的である。一方、光は開口部を通過するわけではなく、開口内を金属に吸収されながら前方散乱して、その一部が開口外へ漏れ出し、エバネセント光として開口近傍に局在する。このエバネセント光が試料構造とカップリングすることで、伝搬光に変換されて、検出器へと向かう。開口部だけに光が局在することから、迷光成分を十分に抑圧でき、光学像のコントラストを高くすることができる。1928 年の Syngé による近接場顕微法の提案<sup>27)</sup> 以来、マイクロ波帯<sup>28)</sup> および可視光域<sup>29)</sup> での近接場観察の実証実験など、黎明期では、そのほとんどで微小開口プローブが用いられてきた。

微小開口プローブの光学的なスループットはどうか。Bethe によると、開口径が波長に比べて小さい場合、その開口の射出側では仮想的に磁気双極子があるとみなせ、この仮想的な磁気双極子の励振により電場が形成される<sup>30)</sup>。実際の微小開口プローブの薄膜では厚みがあり、射出側の磁気双極子の大きさはその厚みに対し指数関数的に減少する<sup>31)</sup>。50 nm の膜厚の金属薄膜に直径 50 nm の開口がある場合、その強度は  $6.3 \times 10^{-4}$  に減少し、30 nm の開口の場合には  $6.3 \times 10^{-6}$  に減少する。一般的に用いられる先鋭化した光ファイバーの先端に微小開口を作製した

プローブでは、開口部に光を伝達する際にも金属薄膜による吸収や散乱による光の損失があるので<sup>3)</sup>、光学的スループットはさらに低いものとなる。したがって、最近ではファイバープローブの先鋭角を広げたり、AFM 用のカンチレバー先端に微小開口を設けることで、光学的スループットを向上させる手法が用いられている。開口径やプローブ形状に依存するが、光学的なスループットは  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  が一般的である。一方、開口射出側の近接場光も開口内だけに存在するのではなく、開口から表皮厚さの数倍程度の領域の金属薄膜中にも存在する。したがって、空間分解能は開口径と金属の表皮厚さの数倍程度 (アルミニウムの場合で 50 nm) を足し合わせた数値が目安となる。Novotny らによる計算でも、微小開口射出側の近接場光が存在する領域は開口径の 2 倍程度になることが示されている<sup>32)</sup>。

## 1.3 プローブの特徴と選択

近接場プローブでは、散乱型の金属プローブも微小開口プローブも金属を用いているが、その用途は異なる。金属プローブでは、金属が有する光の高散乱性、特に局所的な表面プラズモンの励振を利用する。一方、微小開口プローブでは、光に対する金属の高い吸収性を利用して、開口部以外では光を完全に遮断するために用いる。金属プローブではシグナルの強度を強めて検出し、微小開口型ではノイズすなわちバックグラウンドを極力排除して、シグナル光を検出する。したがって、その特徴も必然的に異なる。金属プローブの特徴は高分解能、電場増強であり、微小開口型の特徴は高コントラストである。観察対象によって、近接場プローブを使い分けることが重要である。

一光子励起の蛍光・フォトルミネセンスや吸収測定には微小開口プローブが適している。たとえば、半導体からのフォトルミネセンスは励起子の再結合により生じるが、励起子は半導体内で拡散するため、励起だけではなく、検出側でも近接場観察が必要となる。したがって、微小開口プローブを用いて、近接場励起/近接場検出を可能とするイルミネーション・コレクションモードが適している<sup>33)</sup>。また、一光子励起の蛍光分光観察では、観察領域以外の光褪色を抑えるために、微小開口プローブによるイルミネーションモードが望ましい。さらに、吸収分光測定では、試料による光の吸収を強度変化として測定するが、近接場測定の場合試料の厚みも薄いため吸収量が小さく、コントラストの高い測定が必要である。したがって、微小開口プローブが適している。また、Kramers-Kronig の関係より吸収スペクトルが変化するところでは屈折率も変化することから、散乱型プローブで吸収測定を試みると、光散乱として近接場信号を検出するため、近接場光の変化が吸収による

ものなのか、散乱によるものなのかを区別することができない。筆者らのグループでも、近接場赤外吸収分光測定には、微小開口をチップ先端に有するカンチレバーを用いている<sup>16)</sup>。

金属プローブは、局所電場増強効果を生かせるラマン散乱分光や多光子励起蛍光、非線形分光法に適している。1つの分子によるラマン散乱の散乱断面積は $10^{-30} \text{ cm}^2$ 程度で、蛍光 ( $10^{-16} \text{ cm}^2$ ) や赤外吸収 ( $10^{-20} \text{ cm}^2$ ) の散乱・吸収断面積と比べると小さい。したがって、高スループットでかつ局所的に照明光、ラマン散乱光を増強できる金属プローブが適している。さらに、電場増強効果は非線形光学現象と組み合わせることで、増強効果を2乗、3乗と高めることができる。たとえば、二光子励起蛍光は強度の2乗特性を有するため、近接場光に対するバックグラウンド光を効果的に抑圧できる。

## 2. チップ増強場による近接場光ナノ加工

近接場光学は、ナノスケールの観察、分光分析だけではなく、光加工へも応用することができる。近接場光を利用した加工を実用化できれば、現状の光源、フォトリソがそのまま使用することができる。特に、国産の半導体ブルーレーザーを利用することができ、光学素子の制限が大幅に緩和され、紫外・深紫外光源より高い精度を得ることが期待される。また、電子ビーム加工と比べると、大気中で大面積加工を行うことができる。そこで、筆者らのグループでは、高い空間分解能を有する金属プローブを用いた近接場光ナノ加工の開発を進めている<sup>15)</sup>。フォトリソは閾値特性をもつ非線形な光応答を示すので、金属プローブによる局所電場増強効果によりプローブ先端直下だけを

光加工することができる。

金属プローブを用いた近接場光ナノ加工法の一例を図3に示す。半導体ブルーレーザーからの波長403nmの光を、顕微光学系により、基板に塗布したフォトリソ上に集光する。このときの入射光強度は、フォトリソが感光されない程度のパワーとしている。次に、この集光スポット上に、金属プローブを挿入する。プローブ先端での電場増強効果により、プローブ先端直下の光強度だけがフォトリソを感光できる閾値を超え、局所的にレジストを感光させる。この状態で、プローブ操作をAFM制御で行いながら、基板をピエゾステージにより走査することで、任意のパターンをフォトリソ上に転写する。このとき、1章1節で述べた照明光学系を用いることで、電場増強に関与するP偏光成分が多く含まれるようにし、さらに迷光成分による不要な露光を除去した。

ところで、近接場光は局所場であるためプローブ近傍にしか存在せず、空間中を伝搬しないので、感光できるフォトリソの深さ方向は制限される。したがって、近接場

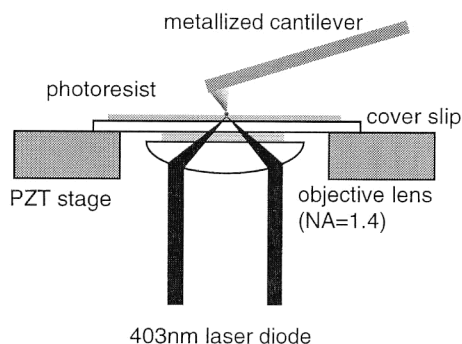


図3 金属プローブを用いた近接場光ナノ加工法。

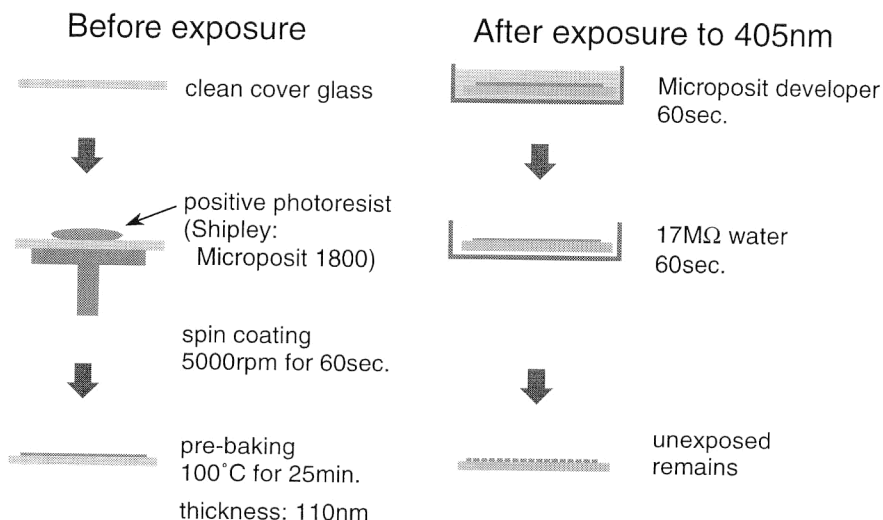


図4 フォトリソの処理法。

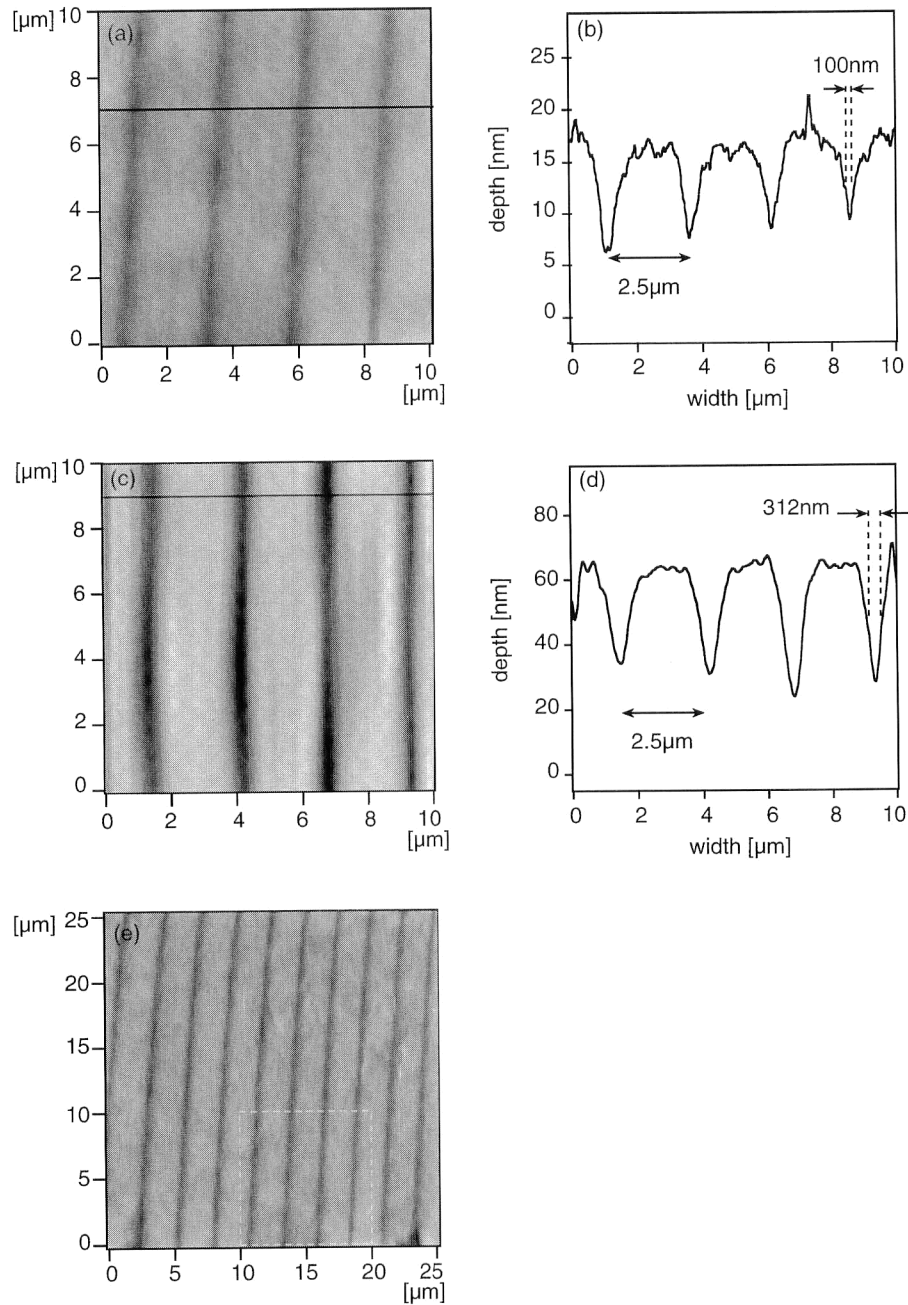


図5 加工したフォトレジストフィルムのAFM像 ( $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ ) (a) 近接場露光, (c) ファーフィールド露光)とその断面図 (b) 近接場露光, (d) ファーフィールド露光). (e) 近接場露光で加工したフォトレジストフィルムのAFM像 ( $25\ \mu\text{m}\times 25\ \mu\text{m}$ ). 図内の破線の領域は (a) と同一である.

光による描画を行う場合には、通常のフォトレジストフィルムよりも膜厚を薄くする必要がある。そこで、以下のプロセスにより近接場露光用のフォトレジストを作製した。図4にそのプロセスを示す。1) カバーガラスを洗浄後、2) その上にg線用ポジ型フォトレジスト (Microposit 1800 : Shipley 社) をスピコートし (5000 rpm, 60 秒), 3)  $100^{\circ}\text{C}$  で25分間プリバークする。プリバーク終了時点でフォトレジストの膜厚は110 nm、表面粗さは $\pm 1$  nm程度であっ

た。金属プローブによる近接場露光後、フォトレジストを以下のプロセスで後処理した。1) 基板を現像液に60秒間浸し、2) 蒸留水により近接場露光されたフォトレジストを取り除くことで、3) フォトレジストフィルムに微細構造を作製した。

近接場加工した構造は、AFMによりコンタクトモードで観察した。図5に、加工したフォトレジストフィルムのAFM像とその断面図を示す。(a), (b), (e)は近接場露光

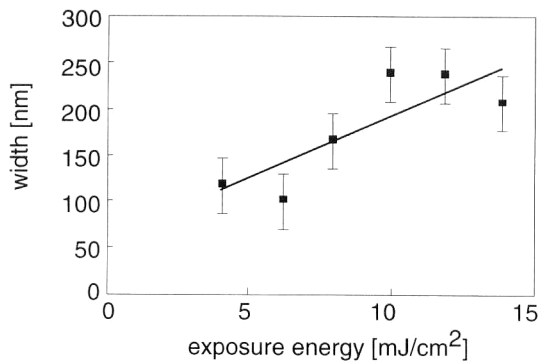


図6 近接場光によるポジ型フォトリソの露光特性.

によるもので、 $6.3 \text{ mJ/cm}^2$  の露光エネルギーでフォトリソフィルムを加工した。レジストフィルムを載せたステージを  $114 \mu\text{m/s}$  の速度で、 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  の領域上を  $2.5 \mu\text{m}$  間隔で次元走査した。(e)は近接場描画を施した領域全体を示し、溝構造が一様に作製されている。(a)は、(e)の破線と同一の箇所である。また、(b)は(a)内の直線で図示したところの断面図である。 $100 \text{ nm}$  の溝構造が作製されていることがわかる。一方、(c)、(d)は半導体レーザーからの光をレンズで集光して、フォトリソをファーフールド露光した結果である。露光エネルギーは  $28.5 \text{ mJ/cm}^2$  である。(c)はファーフールド加工したうちの  $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  の領域を観察した結果である。(d)は(c)内の直線で図示したところの断面図である。

近接場露光下での、露光エネルギーに対する作製した構造体のサイズ依存性を図6に示す。作製した構造体のサイズは露光エネルギーに比例することがわかる。また、得られた最小の構造は、露光エネルギーが  $6.3 \text{ mJ/cm}^2$  のときで  $100 \text{ nm}$  であった。一方、フォトリソをファーフールド露光したときの加工特性を図7に示す。露光エネルギーが  $28.5 \text{ mJ/cm}^2$  のとき最小の構造体を作製することができ、そのサイズは  $312 \text{ nm}$  (全値半幅)であった。また、 $28.5 \text{ mJ/cm}^2$  以下の露光エネルギーでは、フォトリソは感光せず、構造は形成されなかった。すなわち、近接場光を用いなければ、 $312 \text{ nm}$  よりも微細な構造体は作製することができないことを意味している。

図6、7の結果から、近接場露光することで、およそ3倍加工分解能が向上したことがわかる。さらに、近接場露光ではポジ型フォトリソが感光される閾値  $28.5 \text{ mJ/cm}^2$  よりも低い露光エネルギーを用いたが、金属プローブ先端での電場の増強により、局所的に露光エネルギーが閾値を超えることで、レジストフィルムを感光することができた。いいかえれば、この結果から、金属プローブ先端では局所的に電場が増強されていることが、実験的に示されている。

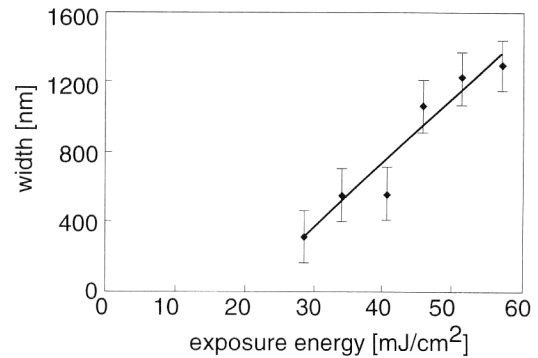


図7 ファーフールド光によるポジ型フォトリソの露光特性.

### 3. 密着露光等を利用した近接場光ナノ加工

フォトマスクをフォトリソに密着して露光する密着露光法も、一種の近接場光ナノ加工技術である。光の回折限界以下のパターンを有するマスクに光を照射すると、パターン直下にはエバネセント場が形成され、このエバネセント場でフォトリソを感光することで、回折限界を超える光加工が行える。この方法の特徴は、一括露光できることから時間的なスループットが高いことである。実際、多くの研究グループにより試みられていて、マスクにはクロムフィルム上にパターンを形成したタイプ<sup>34,35)</sup>と、ポリマー製のレリーフタイプ<sup>36,37)</sup>が主に用いられている。クロムマスクによる加工では、先の微小開口プローブと同じように、パターン加工するところだけにマスクの開口部を通して光を照射し、それ以外はクロムにより遮光を行うことから、不要なパターンが形成されることはない。ラインスペース等の次元構造体であれば、表皮厚さの数倍程度のサイズ( $\sim 50 \text{ nm}$ )の加工が可能であり、またライン構造に対して直交した直線偏光を用いることで、光学的なスループットを稼ぐことができる(ワイヤグリッド偏光子を考慮していただければ、ご理解いただければ)。

この場合、エッジ部に電場が強く局在するため、フォトリソ表面ではエッジ部直下だけが光化学反応して加工される可能性があるが、フォトリソ内部ではその影響は軽減されるので、膜厚の選択も重要な要素といえる<sup>35)</sup>。円形あるいは矩形のパターンについては、先に述べた微小開口プローブと同様の特性をもつと考えてよく、加工分解能は表皮厚さの数倍程度を達成できるが、光学的なスループットは低い。マスク直後の電場分布は照明光の偏光方向に強く依存するので、照明には円偏光あるいは無偏光な光を用いる必要がある。一方、レリーフタイプのマスクでは、光を遮光せず、パターンの幾何学的構造に局在した光によりパターン転写を行うため、光学的なスループットが高い。

また、マスクのレプリカの複製が容易である。ただし、周期的な構造を有するマスクでは周期構造による高次の回折光がマスク上に生じ、この回折光パターンがフォトレジストに転写され、不要なパターンが形成されることがある<sup>37)</sup>。

微小開口プローブを用いた近接場光ナノ加工は、先駆的な研究を数多く行った Betzig がすでに 1992 年に報告している<sup>38)</sup>。当時彼らのグループが提案し、現在一般的に用いられている光ファイバプローブを用いて、ポジ型フォトレジスト上に 100 nm のトレンチ構造を形成した。イスラエルの Lieberman らのグループでは、フォトマスクのリペアに微小開口プローブを利用することを提案している<sup>39)</sup>。チタンサファイアレーザーの第三高調波 (~100 fs,  $\lambda = 260$  nm) を光源とし、マイクロピペットを先鋭化し、金属をコーティングした微小開口プローブを用いて、厚さ 100 nm のクロムマスクの不要部 (直径 2.4  $\mu$ m の半円筒形状) をアブレーションにより除去している。マイクロピペットの中空部を紫外光が伝搬するため、プローブによる吸収やパルス広がりは無視することができ、微小開口直後で ~100 mJ/cm<sup>2</sup> のエネルギーを供給できる。微小開口の直径は 400 nm と大きいですが、紫外光を微小開口内に閉じ込めていることから、50 nm 以下の精度で加工を実現している。微小開口プローブはシェアフォースを用いてプローブの位置制御を行うため、走査速度に問題があるが、フォトマスク・リペアのような特定部位の加工には近接場光ナノ加工の加工精度の高さ、大気中での加工などの長所を最大限利用することができる。

近接場顕微鏡の心臓部であるプローブについて、金属プローブと微小開口プローブを詳述し、その特徴、その使用方法について示した。さらに、金属プローブを用いた近接場光ナノ加工について実験データを示した。近接場光ナノ加工の課題として、時間的な加工スループットがあげられる。これについては、AFM のカンチレバーアレイを用いることで、ある程度対処できると考えている。最近、IBM Zürich 研究所で開発されたデータストレージ用のカンチレバーアレイはそのまま流用できるであろう<sup>40)</sup>。また、基板側から照明光を導入しているが、シリコン基板等ではこの照明系は利用できない。したがって、カンチレバーの側方からその先端部を照明し、かつプローブ先端以外からの迷光による不要な露光を避けるために多光子吸収過程を用いることで、高加工分解能、高加工精度を達成できると考えている。これまでのところ加工分解能は 100 nm 程度であるが、先に述べたプローブ形状の最適化や多光子吸収等

非線形光学効果を用いてバックグラウンド光の影響を可能な限り抑制することで、1 桁程度は向上させることが可能である。

密着露光による近接場光ナノ加工は、時間的な加工スループットが高く、また加工精度も 50 nm 程度であれば実現性は高いと考えられる。マスクの位置精度をどのように確保するかが今後の課題といえよう。また、微小開口プローブについては時間的な加工スループットの向上は困難であるが、本文で述べたマスクリペアは有望な利用法で、実用性も高いと思われる。いずれにしても、近接場光ナノ加工法はまだ実用化の段階には達していないが、紫外レーザーを用いたリソグラフィや電子線リソグラフィにはない利点—光学素子の制限の緩和、大気中での使用、高い位置精度—を有することから、第 3 のナノ加工技術として今後の発展が期待される。

## 文 献

- 1) S. Kawata ed.: *Near-field Optics and Surface Plasmon Polaritons* (Springer, Heidelberg, 2001).
- 2) S. Kawata, M. Ohtsu and M. Irie eds.: *Nano-optics* (Springer, Heidelberg, 2002).
- 3) Y. Inouye and S. Kawata: *Opt. Lett.*, **19** (1994) 159-161.
- 4) F. Zenhausern, Y. Martin and H. K. Wickramasinghe: *Science*, **269** (1995) 1083-1085.
- 5) J. Koglin, U. C. Fischer and H. Fuchs: *Phys. Rev. B*, **55** (1997) 7977-7984.
- 6) Y. Inouye, N. Hayazawa, K. Hayashi, Z. Sekkat and S. Kawata: *Proc. SPIE*, **3791** (1999) 40-48.
- 7) N. Hayazawa, Y. Inouye, Z. Sekkat and S. Kawata: *Opt. Commun.*, **183** (2000) 333-336.
- 8) N. Hayazawa, Y. Inouye, Z. Sekkat and S. Kawata: *Chem. Phys. Lett.*, **335** (2001) 369-374.
- 9) N. Hayazawa, Y. Inouye, Z. Sekkat and S. Kawata: *J. Chem. Phys.*, **117** (2002) 1296-1301.
- 10) R. M. Stockle, Y. D. Suh, V. Deckert and R. Zenobi: *Chem. Phys. Lett.*, **318** (2000) 131-136.
- 11) M. S. Anderson: *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000) 3130-3132.
- 12) J. Jersch and K. Dickmann: *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 868-870.
- 13) G. Wurtz, R. Bachelot, F. H'Dhill, P. Royer, C. Triger, C. Ecoffet and D. -J. Lougnot: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) L98-L100.
- 14) Y. Martin, S. Rishton and H. K. Wickramasinghe: *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 1-3.
- 15) A. Tarun, M. R. H. Daza, N. Hayazawa, Y. Inouye and S. Kawata: *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 3400-3402.
- 16) 河田 聡, 井上康志: *応用物理*, **71** (2002) 653-663.
- 17) T. Sugiura, T. Okada, Y. Inouye, O. Nakamura and S. Kawata: *Opt. Lett.*, **22**, (1997) 1663-1665.
- 18) Y. Kawata, C. Xu and W. Denk: *J. Appl. Phys.*, **85** (1999) 1294-1301.
- 19) H. Furukawa and S. Kawata: *Opt. Commun.*, **148** (1998) 221-224.

- 20) B. Knoll and F. Keilmann: *Nature*, **399** (1999) 134-137.
- 21) E. J. Sanchez, L. Novotny and X. S. Xie: *Phys. Rev. Lett.*, **82** (1999) 4014-4017.
- 22) N. Hayazawa, Y. Inouye and S. Kawata: *J. Microsc.*, **194** (1999) 472-476.
- 23) R. Hillenbrand, B. Knoll and F. Keilmann: *J. Microsc.*, **202** (2001) 77-83.
- 24) J. P. Kottmann, O. J. F. Martin, D. R. Smith and S. Schultz: *J. Microsc.*, **202** (2001) 60-65.
- 25) Y. C. Martin, H. F. Hamann and H. K. Wickramasinghe: *J. Appl. Phys.*, **89** (2001) 5774-5778.
- 26) J. T. Krug, II, E. J. Sanchez and X. S. Xie: *J. Chem. Phys.*, **116** (2002) 10895-10901.
- 27) E. H. Synge: *Philos. Mag.*, **6** (1928) 356-362.
- 28) E. A. Ash and G. Nicholls: *Nature*, **237** (1972) 510-512.
- 29) D. W. Pohl, W. Denk and M. Lanz: *Appl. Phys. Lett.*, **44** (1984) 651-653.
- 30) H. A. Bethe: *Phys. Rev.*, **66** (1944) 163-182.
- 31) N. A. McDonald: *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **MTT-20** (1972) 689-695.
- 32) L. Novotny, D. W. Pohl and P. Regli: *J. Opt. Soc. Am. A*, **11** (1994) 1768-1779.
- 33) K. Matsuda, K. Ikeda, T. Saiki, H. Tsuchiya, H. Saito and K. Nishi: *Phys. Rev. B*, **63** (2001) article no. 121304 (R).
- 34) T. Ono and M. Esashi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 6745-6749.
- 35) S. J. McNab and R. J. Blaikie: *Appl. Opt.*, **39** (2000) 20-25.
- 36) J. A. Rogers, K. E. Paul, R. J. Jackman and G. M. Whitesides: *Appl. Phys. Lett.*, **70** (1997) 2658-2660.
- 37) J. Aizenberg, J. A. Rogers, K. E. Paul and G. M. Whitesides: *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 3773-3775.
- 38) E. Betzig and J. K. Trautman: *Science*, **257** (1992) 189-195.
- 39) K. Lieberman, Y. Shani, I. Melnik, S. Yoffe and Y. Sharon: *J. Microsc.*, **194** (1999) 537-541.
- 40) M. Despont, J. Brugger, U. Drechsler, U. Durig, W. Haberle, M. Lutwyche, H. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, G. Binnig, H. Rohrer and P. Vettiger: *Sens. Actuators*, **80** (2000) 100-107.

(2002年7月4日受理)