

研 究 報 告 書

「ナノ光リソグラフィーによる金属ナノパターン作製技術の開発」

研究期間：平成 17 年 10 月～平成 22 年 3 月

研究者：上野 貢生

1. 研究のねらい

半導体加工技術の基礎となる光リソグラフィー技術は、光源を短波長化することにより加工分解能を向上させ、極紫外光 (EUV, 波長 13.4 nm) を用いた EUV リソグラフィー技術により分解能は現在 20 nm～30 nm の領域にまで到達している。また、エキシマーレーザー (ArF, 波長 193 nm) を光源として、光学系に液浸レンズを用いた露光装置では 40 nm 以下の加工分解能を有し、産業界において最先端の大規模集積回路 (LSI) を製造するために使用されている。しかし、すでに光の波長を短波長化することにより実現する加工分解能は、ほぼ限界に到達しており、半導体加工における集積密度・性能のさらなる向上のためには新たなブレークスルーが必要不可欠である。

近年、近接場露光技術が、光の波長よりも小さいサイズ領域の加工を簡便に実現できる光リソグラフィー技術として注目されている。近接場光は、ナノメートルサイズの構造体に局在する伝播しない光で、回折限界よりも遥かに小さい領域に光電場が局在化される。特に、金や銀などの金属ナノ微粒子に光を照射すると、局在表面プラズモン共鳴が誘起され、光電場がナノメートルの領域に局在化する。また、局在表面プラズモン共鳴は、入射光電場強度の数桁倍に及ぶ光電場増強効果を示し、金属ナノ微粒子近傍に存在する分子からのラマン散乱や発光の強度が著しく増強される光学効果を示すことで知られている。特に、2 つ以上の金属ナノ微粒子がナノメートルで近接したナノギャップ金属構造においては、その構造間 (ギャップ) において入射光電場強度の $\sim 10^5$ 倍に及ぶ高い光電場増強が誘起され、1 分子のラマン散乱計測が可能なるほど、シグナルが増強されることが知られている。つまり、金属ナノ微粒子は、光をアンテナのように捕集し、ナノメートルの空間に局在化させることが可能であり、2 光子吸収などの非線形光学効果が容易に得られるといった特徴を有する。本研究では、これらの特徴を利用して、光アンテナ機能を有するナノギャップ金属構造体をフォトマスクとして用いることにより、ナノギャップ空間に増強された光電場を局在化させ、2 光子吸収過程を介したフォトレジスト材料への空間選択的ナノ加工 (ナノギャップリソグラフィー) を施すことを研究のねらいとした。

2. 研究成果

1) ナノギャップ金 2 量体構造の光電場強度分布

ナノギャップを有する金属ナノ構造上において光重合反応を行うことにより、金属ナノ構造に局在する光電場強度の空間分布を可視化することが可能である。光重合反応による光電場強度プロファイルの可視化に関する実験では、図 1(a)の電子顕微鏡写真に示すようなナノギャップ金 2 量体構造 (1 つのブロック: 100 nm × 100 nm × 40 nm、ギャップ幅: 6 nm、プラズモン共鳴波長: 700-800 nm) 上にネガ型フォトレジスト (SU-8, Microchem Co.) をスピコートし、フェムト秒レーザービーム (波長: 800 nm、パルス幅: 100 fs、繰り返し周波数: 82 MHz) を任意の光強度・時間照射することにより反応を誘起した。本実験に使用したネガ型フォトレジストの光反応波長は 400 nm 以下に存在し、800 nm のレーザー光を照射した場合には、2 光子吸収過程を介して光重合反応が進行することになる。また、光照射後、基板を専用現像液に浸漬させて架橋反応の進行していない部分を除去することにより、光重合反応が進行した箇所を走査型電子顕微鏡により観察した。図 1(b)に、フェムト秒レーザー光 (光強度 2.1 kW/cm²) をナノギャップ金 2 量体構造上に 0.01 秒間照射した後、現像した基板の電子顕微鏡写真を示す。なお、入射光偏光条件は、金 2 量体構造に対して平行である。この写真から、ナノギャップ領域に局所的に非線形吸収過程を介して

光重合反応が進行したことがわかる。一方、入射光偏光を金 2 量体構造に対して垂直に照射した場合は(図 1(c))、構造端において数 10 nmのサイズの重合体が観察された。時間領域差分法 (FDTD法) によりナノギャップ金 2 量体構造の光電場強度分布をシミュレーションしたところ、偏光条件が金 2 量体構造に対して平行の場合は、図 1(b)に示すようにギャップにおいて 10^4 倍程度の増強が、垂直の場合は図 1(c)に示すように偏光に沿った構造の両端において 90 倍程度の増強が誘起されることが示され、増強された近接場光が、レジストに含まれている反応開始剤の 2 光子励起を誘起し、光重合反応が促進されたものと考えられる。つまり、これらの結果は、ナノギャップ金構造体における光電場強度分布に従い、選択的なナノ空間 2 光子励起を実現したことを意味しており、ナノギャプリソグラフィ技術への応用が期待される。このように、非線形光重合反応を用いることによって、ナノギャップ金 2 量体構造に局在する光電場増強分布について可視化することができ、ナノギャップにおいては著しい光電場増強が誘起されることを実験的に明らかにすることに成功した。

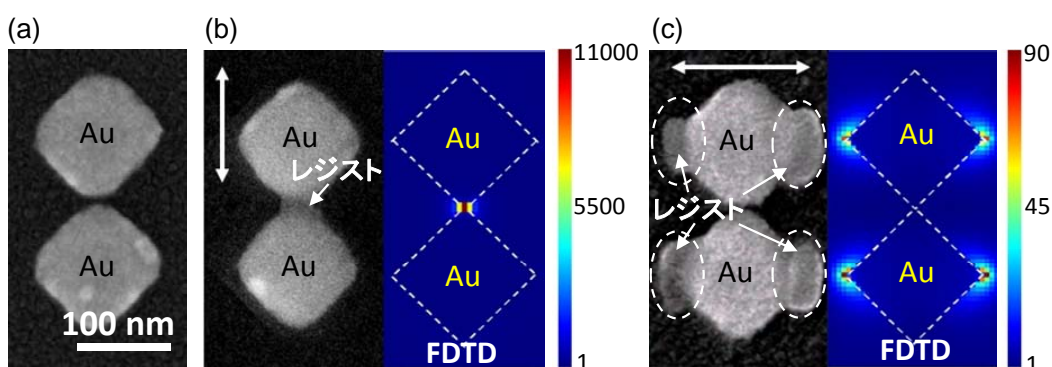


図 1 (a) 1 辺 100 nm、厚さ 40 nm の金ナノブロック構造を 6 nm 幅のナノギャップを形成して対角線上に配列した金 2 量体構造の電子顕微鏡写真、(b) ナノギャップ領域に形成したレジストのナノパターン (照射 0.01 s) および 2 量体構造に対して平行な偏光条件の FDTD による光電場強度プロファイル、(c) 金ナノブロック構造の両端に形成したレジストの空間パターン (照射 10 s) および 2 量体構造に対して垂直な偏光条件の FDTD による光電場強度プロファイル * 図中矢印: 偏光方向

2) ナノギャプリソグラフィの実証

光アンテナ機能を有するナノギャップ金 2 量体構造をフォトマスクとして、図 2(a)に示すようにポジ型フォトリソ (TSMR-V90LB, 膜厚 ~70 nm, 東京応化工業 (株)) をコートしたガラス基板 (24 mm x 24 mm) に密着させ、基板上にフェムト秒レーザービーム (波長 800 nm, パルス幅 100 fs, 繰り返し周波数 82 MHz) を任意の強度および時間照射することにより密着露光を行った。上記の方法で露光した後に、基板をアルカリ水溶液 (NMD-3, 東京応化工業 (株)) に浸漬させて現像を行い、形成されたレジストの空間パターンを走査型電子顕微鏡や原子間力顕微鏡により観察した。

図 2(b)に、作製した一対のナノギャップ金構造の設計略図を示す。一つのブロックサイズは、80 nm x 80 nm x 35 nm で互いの構造間距離 (ナノギャップ幅) は、端から端で 4 nm と設計した。図 2(c)に、ポジ型フォトリソを構造基板上に厚さ 100 nm となるようにスピンコートした時のプラズモン共鳴スペクトルを示す。二つの金ナノブロック構造に対して平行な偏光条件におけるプラズモン共鳴バンドは、垂直な偏光条件のバンドに対して、約 100 nm 長波長シフトしている。これは、構造間距離が小さいために構造間において電磁的相互作用が生じたためであり、ナノギャップが形成されたことを証明するものである。特筆すべき点は、露光用光源の波長は入射光偏光が金 2 量体構造に対して平行な条件の共鳴バンドのピークと重なっている点である。図 1(b)の FDTD シミュレーションによる解析から、ナノギャップ領域において著しい光電場増強が誘起されており、入射光電場強度の

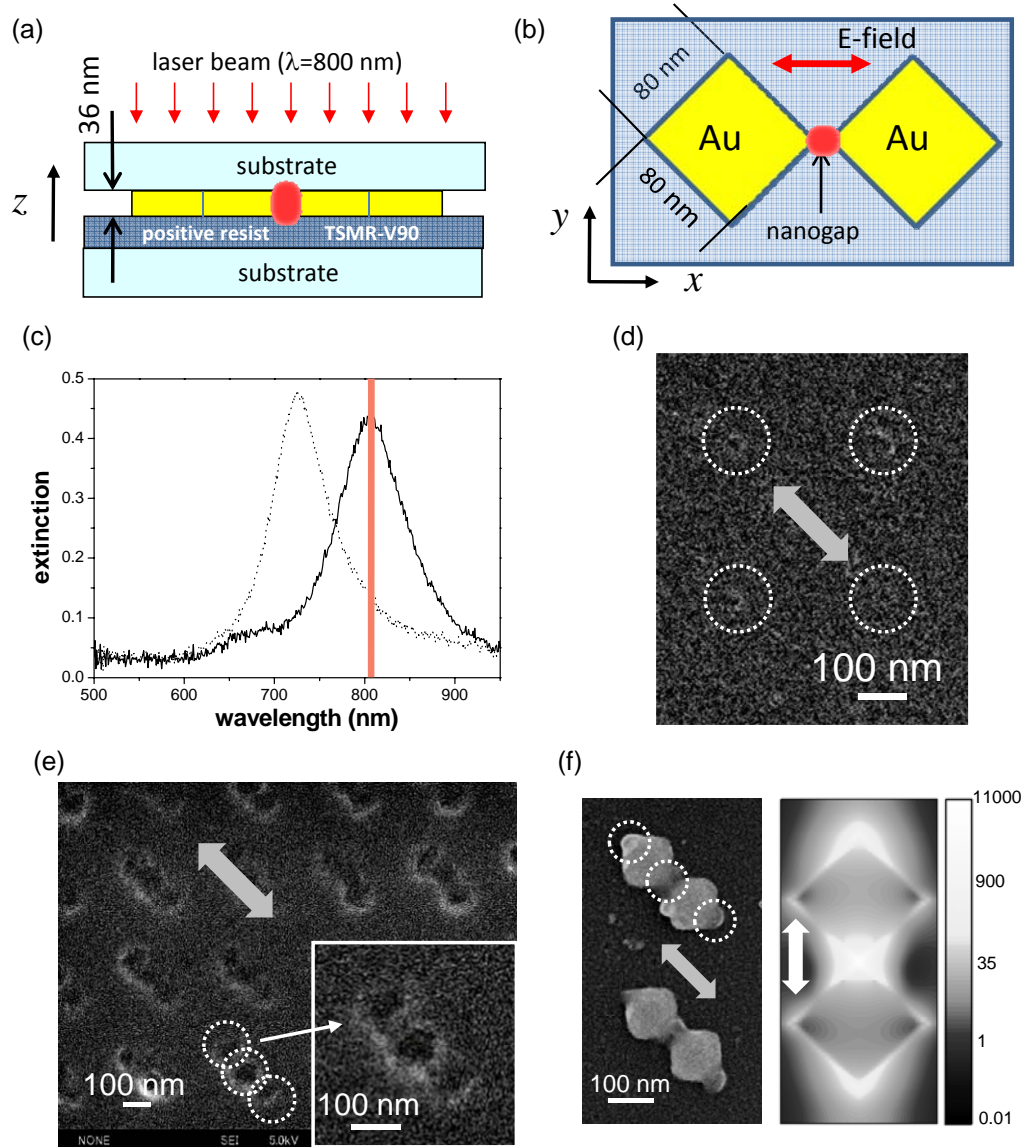


図 2 (a) 密着露光実験の略図、(b) ナノギャップ金 2 量体構造 (80 nm × 80 nm × 35 nm, ギャップ幅: 4 nm) を有するフォトマスクの設計略図 (図中矢印は偏光方向を示す)、(c) 構造上にポジ型フォトレジストをスピンコートした際の金構造のプラズモン共鳴スペクトル(実線: 金 2 量体構造に対して平行な偏光照射条件, 点線: 金 2 量体構造に対して垂直な偏光照射条件)、(d) フェムト秒レーザービーム (0.06 W/cm²) を 10 秒間照射し現像したフォトレジストパターンの電子顕微鏡写真 (図中矢印は偏光方向)、(e) フェムト秒レーザービーム (50 W/cm²) を 10 秒間照射し現像したフォトレジストパターンの電子顕微鏡写真 (図中矢印は偏光方向)、(f) ネガ型フォトレジストの光重合反応によって可視化した光電場強度分布 (2 kW/cm², 1 s照射), および図 1(b)のFDTDシミュレーション結果をログスケールで表示したナノギャップ金 2 量体構造の光電場強度プロファイル (図中矢印は偏光方向)

10⁴倍を超える近接場光がナノギャップの位置において集中していることになる。図 2(d)に、0.06 W/cm²のフェムト秒レーザービームをフォトマスクを通して 10 秒間照射し、現像後電

子顕微鏡観察を行った結果を示す。～10 nmのサイズのレジストナノパターンがナノギャップ金構造のギャップ位置に対応して縦と横方向に360 nm間隔で規則正しく形成されていることが明らかになった。また、サイズや形状はばらついているが、最小で5 nmのサイズのパターンが形成された。これらのパターンは、図 1(b)で示すナノギャップ金構造体のナノギャップ部位にのみ形成された重合パターンと良い一致を示しており、ナノギャップリソグラフィーの原理検証を実験的に明らかにすることに成功した。また、50 W/cm²のフェムト秒レーザービームを29秒間照射した条件では、図 2(e)に示すようにナノギャップの位置だけではなく、偏光に沿った構造の両端に対応する3か所の位置に反応が進行していることが明らかになった。形成されたレジストのナノパターンは、図 2(f)に示したネガ型フォトレジストの光重合反応によって可視化した光電場強度分布(2 kW/cm², 1 s照射)、および図 1(b)のFDTDシミュレーション結果をログスケールで表示したナノギャップ金2量体構造の光電場強度プロファイル(図 2(f))と良い一致を示した。これは、図 2(e)の光照射条件では照射量が大きいため偏光に沿った構造の両端で誘起される入射光電場強度の数10倍程度の光電場増強によっても光反応が進行したためであると考えられる。つまり、以上の結果からドーズ量を小さくした場合には(図 2(d))、プラズモン増強を利用した光反応によってレジストパターンをナノギャップサイズまで小さくすることが可能であることが明らかになり、シングルナノメートルサイズのフォトレジストのパターニングが可能な光リソグラフィー技術を構築することに成功した。

3) 10 nm-node リソグラフィー技術に向けて

半導体加工技術のロードマップでは現在使用されている最先端 ArF 液浸リソグラフィーで32 nm-nodeの実用化が可能となり、2016年にはEUV(極端紫外線)、インプリントリソグラフィー、または新しいリソグラフィー技術の開発で22 nm-node、2019年には16 nm-nodeが期待されているが、2013年に市場への投入が期待されているEUVリソグラフィー技術においても加工分解能の限界はすでに到達しており、22または16 nm-node以細を実現するためには新たな光リソグラフィー技術の開発が不可欠となっている。そこで、本研究では、上記に示したナノギャップリソグラフィー技術を用いて、10 nm-node リソグラフィー技術の原理検証を試みた。デザインはトランジスタのゲート電極に対応しており、ゲート長10 nm以下(線幅10 nm、長さ1 μm)の電極を高密度に基板上に配置する技術となる。

図 3(a)に、作製したライン幅32 nm、ギャップ幅8 nm、長さ1 μmの金のナノパターン(フォトマスク)の電子顕微鏡写真を示す。フォトマスクはガラス基板上にネガ型電子ビームレジストのHSQ(焼結後ガラスに変化する)をコートして電子ビーム露光/現像(TMAH)によりパターニングを行い、金を10 nmスパッタリングにより成膜した。図 3(b)に、図 3(a)で示したフォトマスクを用いて密着露光を行う際の断面模式図、および図 3(c)にFDTD(時間領域差分法)シミュレーションによる光電場強度分布を示す。800 nmの赤外光照射により光が8 nmのギャップ空間に局在していることが分かり、空間選択的にレジストのパターニングが実行されるものと見積もられる。したがって、高精細ステージによるダブルパターニング(現在 ArF 液浸リソグラフィーで用いられている2回露光の方法)を行えば、20 nmピッチ(10 nmラインアンドスペースパターン)のパターニングが期待される。

ギャップ幅5 nm、ピッチ50 nm(長さは図 3(a)と同じ1 μm)のフォトマスクを用いて、図 2(a)に示した露光方法により転写露光を試みたところ、図 3(d)のポジ型フォトレジスト基板の電子顕微鏡写真に示すように、ライン幅5 nmのナノパターンがポジ型フォトレジスト基板上に転写露光されることを確認した。線幅5 nm長さ1 μmのパターニングは、光リソグラフィーによりパターニングした最小の分解能であると言える。本研究結果から、ナノギャップリソグラフィー技術は、シングルナノメートルサイズのフォトレジストのナノパターンを作製することが可能な光リソグラフィー技術であることが実証された。

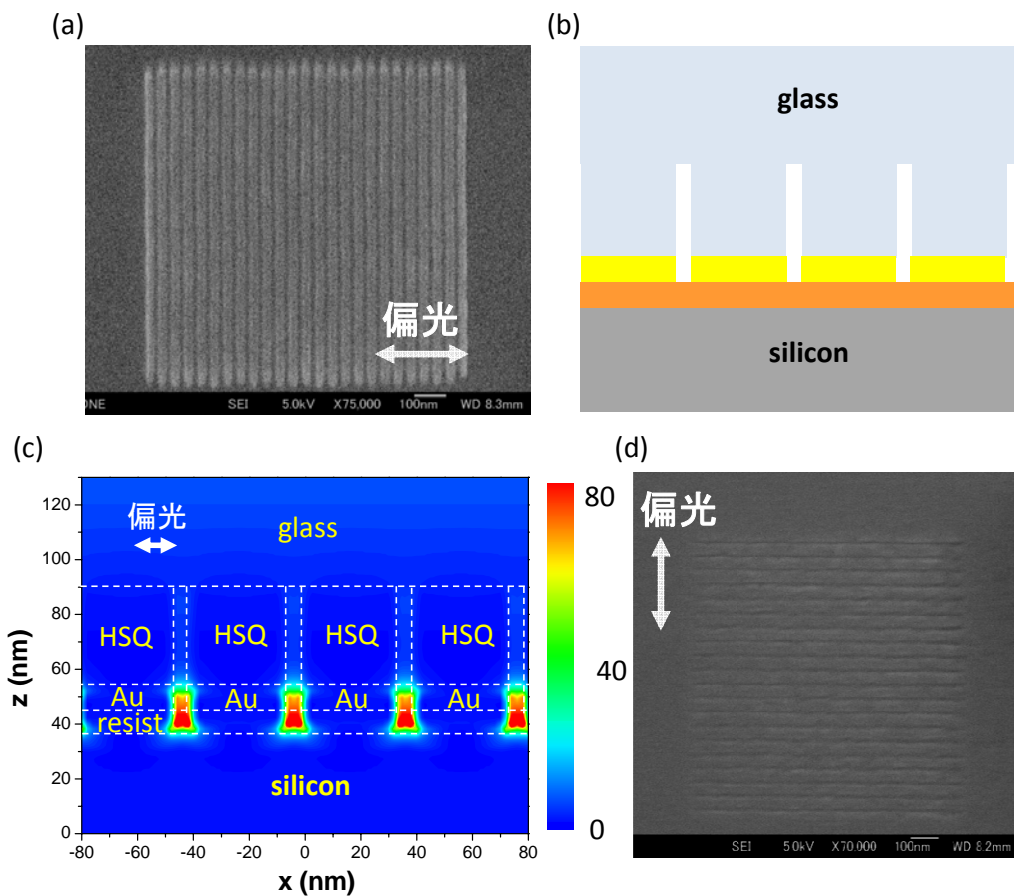


図 3 (a) ライン幅 32 nm、ギャップ幅 8 nm、長さ 1 μm の金のナノパターン（フォトマスク）の電子顕微鏡写真、(b) 図 3(a)で示したフォトマスクを用いて密着露光を行う際の断面模式図、(c) 図 3(b)に示した密着露光条件下における光電場強度分布のシミュレーション結果、(d) ギャップ幅 5 nm、ピッチ 50 nm（長さ: 1 μm ）のフォトマスクを用いて、露光・現像を行い、形成されたレジストナノパターンの電子顕微鏡写真

4) シングルナノメートルの加工分解能を有する金属ナノパターンの作製技術

プラズモン共鳴に基づいて放射モードと結合した散乱成分の光がフォトレジスト膜中を伝播する現象を利用して、シングルナノメートルの加工分解能でレジストパターンを形成する新しいプラズモンリソグラフィ技術を明らかにした。図 4(a)に、作製した構造のフォトマスクパターンを示す。フォトマスクは 3)の方法と同様の方法により作製した。作製したフォトマスクのプラズモン共鳴波長は 870 nm に存在し、波長 800 nm のフェムト秒レーザービームを照射した場合、双極子共鳴ピークの短波長側に存在する高次の共鳴モードを励起することになり、四重極子などの多重極子共鳴が誘起される。これにより、プラズモン共鳴に基づいて放射モードと結合した散乱成分の光は、フォトマスクの形状を強く反映し、フォトマスク形状に依存した光がフォトレジスト中を伝播することになる。したがって、図 4(b)の形成されたフォトレジストパターンの電子顕微鏡写真（現像後）に示すように、図 4(a)のフォトマスク形状を反映して四角い 100 nm 四方のナノパターンが厚さ 70 nm のポジ型フォトレジストに転写露光されることが明らかになった。また、形成されたレジストナノパターンの断面電子顕微鏡写真を図 4(c)に示すが、レジスト表面はプラズモン共鳴の近接場露光成分によって露光されるために、横に広がった断面プロファイルが観察されたが、レジスト表面から基板方向に向かうにしたがって、プラズモン共鳴に基づいて放射モードと結合した散乱成分の光がフォトレジスト膜中を伝播して露光される様子が観察

された。この方法論を使用すればさまざまな形状のナノパターンも形成することが可能であり、一例として三角形パターンを転写露光した結果を図 4(d)に示すが、このような三角形パターンが1回の露光で照射領域全域に形成されることを確認した(例 1 cm 四方)。なお、図 4(d)に示した三角形パターンのサイズの平均は 141.2 nm、サイズのばらつきは標準偏差で 4.4 nm であることが電子顕微鏡観察による統計(100 個計測)から明らかになり、鋭角な頂点を有する三角形パターンでもシングルナノメートルの分解能でパターンを作製することが可能であることを明らかにした。また、三角形だけでなく、ディスクやチェーンなど様々な形状のパターンを高精細に作製可能であることを明らかにしている。

さらに、プラズモンリソグラフィーにより形成したレジストパターンに金をスパッタリングにより成膜し、リフトオフプロセスを行うと金のナノ構造を基板上に作製(複製)することが可能であることが明らかになった。図 4(e)に形成された金ナノ構造の電子顕微鏡写真を示す。構造サイズのばらつきは、標準偏差で 3.8 nm であり、2006 年に K. Ueno et al. *J. Am. Chem. Soc.*, **128**, 14226 (2006).に報告した 100 kV の加速電圧を有する電子ビーム露光装置を用いて作製した金ナノ構造のサイズ分布(標準偏差: 3.2 nm)とほとんど変わらない値を示し、金属ナノ構造をシングルナノメートルの構造サイズのばらつきで作製することが可能であることを明らかにした。また、作製した金のナノ構造は、図 4(f)の Extinction スペクトルに示すようにプラズモン共鳴を示すことを確認した。また、本技術を用いて、ナノギャップ金属構造もギャップ間距離をシングルナノメートル幅で制御して作製可能であることを明らかにした。つまり、本技術は構造サイズおよび構造間距離もシングルナノメートルの分解能で制御して金属ナノパターンを作製することが可能であり、さきがけ研究(ナノ光リソグラフィーによる金属ナノパターン作製技術の開発)の研究目標を達成した。

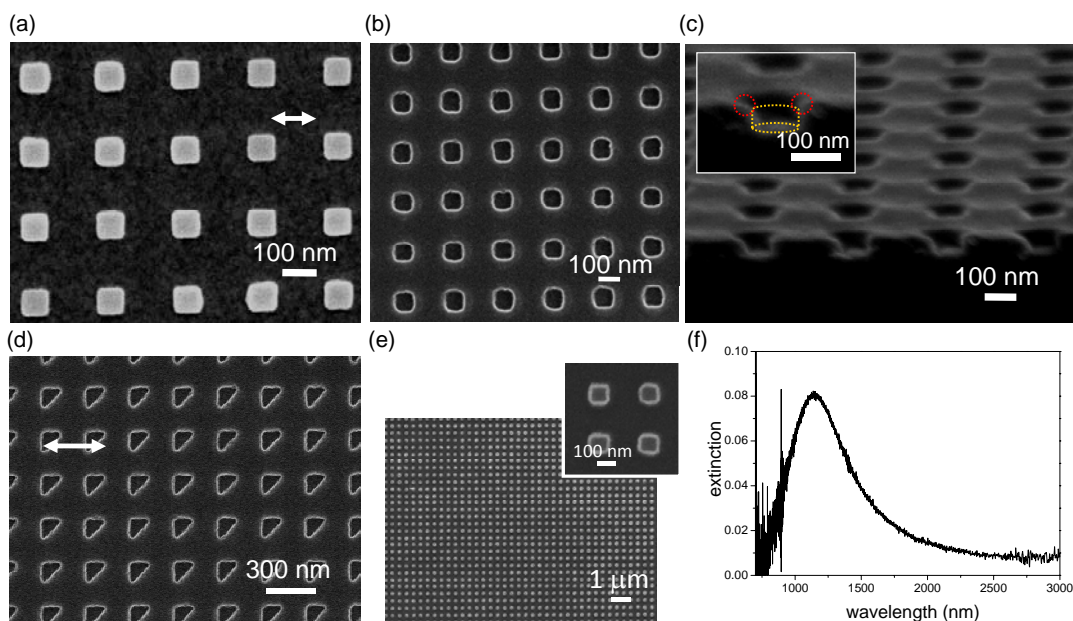


図 4 (a) プラズモンリソグラフィーに用いたフォトマスクパターンの電子顕微鏡写真、(b) 形成されたフォトレジストパターンの電子顕微鏡写真(現像後)、(c) 形成されたレジストナノパターンの断面電子顕微鏡写真、(d) 三角形のフォトマスクパターンを用いてプラズモンリソグラフィーにより形成されたレジストパターンの電子顕微鏡写真、(e) プラズモンリソグラフィー/リフトオフにより形成された金ナノパターンの電子顕微鏡写真、(f) 作製した金ナノ構造のプラズモン共鳴スペクトル

3. 今後の展開

ナノギャップリソグラフィーにより加工されたフォトレジストパターンは、光の回折限界を遥かに超えたシングルナノメートルの加工分解能を有しており、半導体リソグラフィー技術において、22 nm-node 以細の光リソグラフィーを実現するための方法論が示されていないだけに、10 nm-node の光リソグラフィーを実現する可能性を含む本技術は、半導体製造装置への応用が期待される。また、シングルナノメートルの構造サイズのばらつきでフォトレジストや金属ナノ構造をパターンニングすることが可能なプラズモンリソグラフィー技術は、フォトリソグラフィック結晶、プラズモン太陽電池（センサー）、或いはナノギャップ電極の作製など、幅広い分野におけるナノ加工技術に応用が期待される。現在、ナノインプリント技術がナノ構造の作製に期待されているが、本研究で明らかにしたプラズモンリソグラフィー技術の分解能は高く、フォトマスクの離型もナノインプリント技術に比べて容易に行える。また、非接触露光も理論的には可能である。さらに、たとえフォトマスク表面が汚れてしまったとしても、金をエッチングして、一重項酸素やアッシャーにより有機物を除去し、再度金を成膜すればフォトマスクを無限に再利用することが可能であり、金型の離型や耐久性に問題があるナノインプリント技術とは異なった利点と特徴を有している。つまり、本研究で明らかにした二つの光リソグラフィー技術として、ナノギャップリソグラフィー技術は世界最高の分解能を有する光リソグラフィー技術へ、プラズモンリソグラフィー技術はナノインプリントに代わる新たなナノパターンニング技術へ、今後の展開が期待される。

4. 自己評価

さきがけ研究では、シングルナノメートルの加工分解能を有する、あるいはシングルナノメートルのサイズを有するレジストパターンを作製可能なナノ光リソグラフィー技術を開発することを目的とした。研究成果欄に記述したように、ナノギャップリソグラフィー技術を用いて5 nm以下のフォトレジストのナノパターンを照射面積全域にパターンニングすることが可能であることを明らかにした。また、プラズモン共鳴を示す金のナノパターンをシングルナノメートルの構造サイズのばらつきで作製できることを明らかにするとともに、構造間距離をシングルナノメートルの分解能で制御したナノギャップ金構造体の作製にも成功した。これによりさきがけ研究申請時の研究目標をすべて達成した。さらに、開発した光リソグラフィー技術は、従来の光リソグラフィー技術や近接場露光技術とは異なる原理に基づいているため独創性も高く、また光リソグラフィーにおける特出した分解能を有しており、さきがけ研究として成功裏に終了したと自己評価する。また、さきがけ研究期間中において、原著論文 30 報（内さきがけ研究に関連する論文 17 報）、Accounts・総説・解説・著書など 16 報、招待講演 25 件（内国際シンポジウム 8 件）、特許出願 9 件の研究成果を上げるとともに、特任准教授を経て准教授へのプロモーション（採択時は助教）と所属している学会の賞（光化学協会奨励賞、日本化学会進歩賞）を受賞するなど、多岐にわたって活躍した。これらの業績もさきがけ研究を行ったことにより初めて得られたものであり、多くの業績を上げたという観点からも、さきがけ研究が成功裏に終了したと自己評価する。

5. 研究総括の見解

ナノギャップを有する金ナノ構造が示す空間的な光電場増強効果を利用し、局所的な非線形光反応を誘起することにより、高分解能パターンが形成できるナノ光リソグラフィー技術を開発することを目的とした。その結果、ナノギャップ金2量体構造をフォトマスクとして、フェムト秒レーザー光を照射することで、10nmレベル以下の精度をもつフォトレジストパターンの形成、ならびに線幅5nm長さ1 μ mのフォトマスクを用いた同精度のレジストパターン転写実証など、光リソグラフィーによる最小レベルの分解能を実現した‘ナノギャップリソグラフィー技術’の意義は大きく、注目されるべきさきがけ成果と言える。さらにプラズモン共鳴に基づいて放射モードと結合した散乱光が、フォトレジストを伝播する現象を利用して、様々な金属ナノパターンを数nm内の標準偏差ばらつき

で形成できる新しい‘プラズモンリソグラフィー技術’をも開発できたことで、ナノインプリントに代わる新たなナノパターニング技術への展開が今後に期待される。いずれも現行の光リソグラフィー技術より一桁高い加工分解能を有し、従来技術とは異なる原理に基づくナノ光リソグラフィー技術を実現できたことは、大きなさきがけ成果であり高く評価できる。今後の実用化への展開を期待したい。

6. 主要な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表 17 報

1. Y. Yokota, K. Ueno, H. Misawa, Essential Nanogap Effects on Surface-Enhanced Raman Scattering Signals from Closely Spaced Gold Nanoparticles, *Chem. Commun.*, published on web DOI: 10.1039/c0cc05320a.
2. K. Imura, K. Ueno, H. Misawa, H. Okamoto, Anomalous light transmission from plasmonic capped nano-aperture, *Nano Lett.*, published on web DOI: 10.1021/nl103408h.
3. K. Ueno, S. Takabatake, Y. Nishijima, V. Mizeikis, Y. Yokota, H. Misawa, Nanogap-assisted surface plasmon nanolithography, *J. Phys. Chem. Lett.*, **1**, 657-662 (2010).
4. K. Ueno, S. Juodkazis, T. Shibuya, V. Mizeikis, Y. Yokota, H. Misawa, Nanoparticle-enhanced photopolymerization, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 11720-11724 (2009).
5. K. Ueno, S. Juodkazis, T. Shibuya, Y. Yokota, V. Mizeikis, K. Sasaki, H. Misawa, Nanoparticle plasmon-assisted two-photon polymerization induced by incoherent excitation source, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 6928-6929 (2008).

(2)特許出願

研究期間累積件数: 10 件

1. 発 明 者: 奥津哲夫, 三澤弘明, 上野貢生
発明の名称: 結晶化用容器、結晶化装置、結晶の製造方法、及び結晶化用基板
出 願 人: 群馬大学、北海道大学
出 願 日: 2009/9/11
2. 発 明 者: 三澤 弘明, 西島 喜明, 上野 貢生, 村越 敬
発明の名称: 光電変換装置、光検出装置、及び光検出方法
出 願 人: 北海道大学
出 願 日: 2009/9/7
3. 発 明 者: 上野 貢生、三澤 弘明
発明の名称: フォトレジストパターンの作製方法
出 願 人: 北海道大学
出 願 日: 2009/1/22
4. 発 明 者: 上野 貢生、三澤 弘明
発明の名称: フォトレジストパターンの作製方法
出 願 人: 北海道大学
出 願 日: 2008/7/25
5. 発 明 者: 西井 準治、金高 健二、三澤 弘明、上野 貢生
発明の名称: 微量物質検出素子
出 願 人: 産業技術総合研究所、北海道大学
出 願 日: 2008/3/14

(3)その他(主要な学会発表、受賞、著作物等)

Accounts・総説・解説・著書

1. S. Gao, K. Ueno, H. Misawa, Plasmonic antenna effects on photochemical reactions *Acc. Chem. Res.* accepted for publication.

2. 上野 貢生, 三澤 弘明 (分担執筆), 第 14 章 プラズモン増強場を用いた光ナノ加工, *近接場光のセンシング・イメージング技術への応用 -最新のバイオ・化学・デバイス分野への展開* (シーエムシー出版 監修 民谷栄一、朝日 剛), 155-161 (2010).
3. 上野 貢生, 三澤 弘明, 光と分子が強く結合するナノ空間の創成 -光子を有効利用できる新概念の反応場-, *月刊化学* (化学同人), **65**, 22-27 (2010).
4. K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, H. Misawa, Enhancement of optical near-field using metallic nanostructures tailored with high accuracy, *Molecular Electronic and Related Materials- Control and Probe with Light*, T. Naito ed. Research Signpost, 261-280 (2010).
5. 上野 貢生, 三澤 弘明, プラズモン増強場の形成と光反応, *光学*, **38**, 448-455 (2009).

招待講演 25 件

1. 上野 貢生, プラズモン増強場を用いた光ナノ加工技術の開発, 平成 22 年 電気学会電子・情報・システム部門大会, 熊本大学, 9 月 (2010).
2. K. Ueno, Nanogap-assisted surface plasmon nanolithography, 3rd Taiwan-Japan Joint Symposium on Organized Nanomaterials and Nanostructure Related to Photoscience, Silks Place Taroko Hotel, Hualien, Taiwan, March (2010).
3. 上野 貢生, 三澤 弘明, 金属微細構造を用いたナノ光加工、太陽電池応用, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 東海大学, 3 月 (2010).
4. 上野 貢生, プラズモン増強電場を使った光ナノ加工技術の開発, レーザー学会学術講演会第 30 回年次大会, 千里ライフサイエンスセンター, 2 月 (2010).

学会発表(口頭発表 36 件)

5. 上野 貢生, 高島 聡章, 西島 喜明, 孫 凱, ミゼイクス ビガンタス, ヨードカジズ サウリウス, 三澤 弘明, ナノ光リソグラフィーによる金属ナノ構造の作製と評価, 2009 年春季 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 1p-H-15, 筑波大学, 4 月 (2009).

受賞 2 件

1. 上野 貢生, 光化学協会奨励賞, 制御された金属ナノ構造体による多光子反応増強場の創製, 2010 年 9 月 9 日
2. 上野 貢生, 日本化学会進歩賞, 制御された金属ナノ構造による光増強場の創製と化学反応への応用, 2011 年 3 月 27 日