



小特集 ドライエッチングの科学と技術の新局面

6. 中性粒子ビームによる究極のトップダウン加工

寒川 誠二

東北大学流体科学研究所

(原稿受付：2008年12月25日)

プラズマプロセスの進歩が半導体デバイスの微細化・高集積化を促進してきたといっても過言ではない。しかし、ナノ領域に突入した半導体デバイスでは、プラズマから照射される電荷や紫外線などによる欠陥生成や損傷は、表面積の小さいナノデバイスの特性を大きく劣化させるものである。そのため、プラズマプロセスにおいて電荷蓄積や紫外線照射損傷の抑制や制御を実現できる手法の開発は必要不可欠であり、著者らの開発した負イオンを用いた中性粒子ビームはエッチング特性と損傷抑制の両立が実現できる画期的な方法である。

Keywords:

plasma etching, plasma irradiation damage, charge build-up, uv photon, neutral beam etching

6.1 序論

半導体デバイス製造においては微細加工、表面改質、薄膜堆積などのキープロセスで反応性プラズマが多く用いられており、今や原子層レベルの加工精度や堆積精度が要求されている。しかしながら、今後の主流となるナノオーダーの極微細デバイスにおいては、図1(a)に示すようにプラズマから放射される電子やイオンによる電荷蓄積や真空紫外光などの放射光による欠陥生成などのデバイス特性を劣化させるダメージがより深刻な問題になってくる[1-10]。ナノデバイスではわずかな揺らぎでも大きくデバイス特性を左右するためである。これらの問題を解決する手段として、図1(b)に示すような中性粒子ビーム技術が注目を集めている[11-13]。中性粒子ビームは荷電粒子や放射光の基板への入射を抑制し、運動エネルギーを持った中性粒子のみを照射できるので、ダメージフリーの高精度表面反応プロセスが可能であるとして期待されている。現在まで、プラズマを利用したもの、熱エネルギーを利用したものなど数種類の中性粒子ビーム生成方式によるエッチング加工

結果が報告されている[11-14]。しかし、これらの中性粒子ビームではビーム密度が低く、またビームエネルギーが大きすぎる(プラズマの場合)、あるいは低すぎる(熱エネルギーの場合)という問題点があり、プロセスが限定される、あるいは実用性に乏しいという大きな問題を抱えていた。最近、これらの問題点を解決できる実用的な中性粒子ビーム源が寒川等により開発され、現実的になってきた[15]。現在すでに、デバイス製造に原子層レベルの表面反応、欠陥生成などの制御が必要になってきており、いよいよ実用的な中性粒子ビームの出番である。本章では、プラズマプロセスにおける深刻な問題、従来提案された中性粒子ビーム、そしてそれらの問題を解決するために開発されたパルス時間変調プラズマ中で発生する負イオンを用いた中性粒子ビーム生成手法を紹介し、最近精力的に行われているナノプロセスへの応用について紹介する[15-20]。

6.2 プラズマプロセスの課題

超LSIにおける配線が100 nmを切る時代になり、プラズマから放射される電荷(イオン、電子)や光(紫外線)が加工特性やデバイス特性を大きく劣化させることが問題となっている。表1にプラズマプロセスと高エネルギー粒子を用いる他の半導体プロセスとを、入射粒子種、エネルギー、照射量、発生する損傷の種類について比較してある[14]。イオン打ち込みや電子ビーム描画に比べて、プラズマプロセスは入射粒子のエネルギーは比較的小さいが、照射量は 10^{19} cm^{-2} と著しく大きいのが特徴である。このため、基板表面に多量の損傷が発生する。

基板表面の微細パターンに蓄積する電荷は、パターン内へのイオンの入射を妨げてエッチング精度を劣化させ、また、ゲート絶縁膜の破壊などデバイス特性を大幅に低下させている。図2にそのメカニズムを示す。基板表面には電

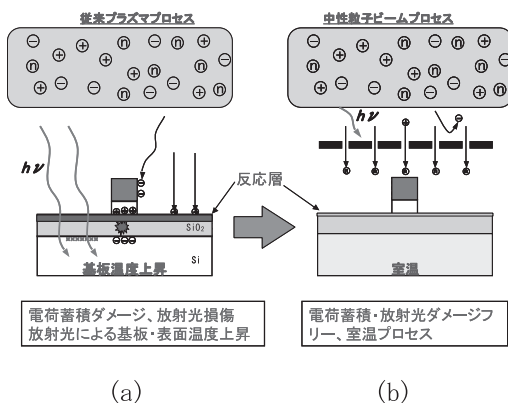


図1 プラズマプロセスの問題と中性粒子ビームプロセスの利点。

6. Ultimate Top-Down Etching Process Using Neutral Beam

SAMUKAWA Seiji

author's e-mail: samukawa@ifs.tohoku.ac.jp

表1 半導体プロセスで用いる高エネルギー粒子と発生する照射損傷の比較.

プロセス	高エネルギー粒子	エネルギー (eV)	照射量 (cm^{-2})	損傷種類
イオン打込み	イオン	数 10 k	$10^{10} \sim 10^{16}$	点欠陥, リコイル原子 積層欠陥, 転位 絶縁膜劣化
EB リソ	電子	数 10 k	10^{13}	界面準位 絶縁膜中電荷
ドライエッチ プラズマ CVD アッシャ	イオン 中性高速粒子 電子 光子 (VUV)	20~1000 20~1000 <50 <50	$10^{18} \sim 10^{19}$ $10^{18} \sim 10^{19}$ $10^{18} \sim 10^{19}$ $10^{14} \sim 10^{15}$	表面アモルファス化 汚染, 積層欠陥 界面準位 絶縁膜中電荷 絶縁膜耐圧劣化

子が先に到達することによって生成されるイオンシースがあり, このイオンシースでは正イオンは加速され異方性があり, 一方, 電子は減速されて熱運動となるため, 電子はアスペクト比の高いパターン底部に到達することは難しい. そのため, パターン内では荷電分離が生じ, 底部に多量の正電荷蓄積がおこる. その結果として, 下地ゲート絶縁膜が破壊される. また, その蓄積正電荷により入射する正イオンの起動が曲げられ, エッチングが途中で止まったり(エッチングストップ), 寸法シフトの大きなエッチングになるなどの問題が指摘されている.

プラズマから放射される紫外光も絶縁膜中や界面に欠陥を生じさせるため大きな問題になっている. 光子は電荷を持たず運動量も小さいため純粋なエネルギー供給粒子と考えられる. 紫外線光子のエネルギーが SiO_2 バンドギャップエネルギーより大きくなると SiO_2/Si 界面に正電荷が形成されることがわかる. その光子一個あたりの形成率は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ の程度である. 紫外光によって界面に正電荷が形成される機構は, 紫外光の吸収によって SiO_2 内に電子-正孔対が形成され, 再結合を免れた正孔が SiO_2/Si 界面に到達して捕獲され正電荷が形成されると考えられる. 実際に固体撮像素子 (CCD, CMOS イメージセンサ) では, 紫外光照射による界面準位上昇が画像劣化を引き起こし大きな問題となっている. また, これら紫外光は表面に欠陥を作ることによって表面反応にも大きく寄与していることが予想される. そのため, 原子層レベルの加工や表面処理を行う場合には, その抑制制御がきわめて重要である. さらに, 紫外光照射に弱い生体超分子や有機分子, カーボンナノチューブなどの新しい物質を用いたデバイスにおける加工・堆積にも放射光の制御が重要である.

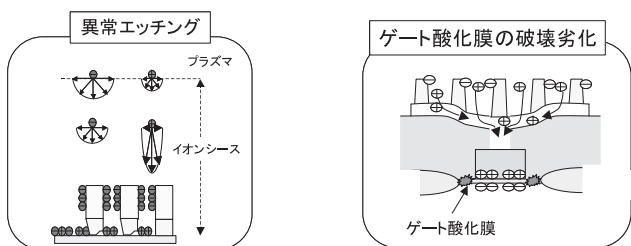


図2 微細パターン内での電荷蓄積現象による異常エッチングおよびゲート絶縁膜破壊.

このように, 今後の革新的先端デバイスで求められる原子層レベルの加工・堆積プロセスには電荷や光の影響を抑えた中性粒子ビームがきわめて重要な技術になってくると考えられる.

6.3 新しい中性粒子ビーム生成装置

従来の中性粒子ビームエッチング装置[11-14]は正イオンを加速してガス分子との電荷交換により中性化する方法が取られてきたが, この電荷交換を行うには数百 eV 以上のイオン加速エネルギーが必要であるばかりでなく, 中性化効率もそれほど大きくはない. そのため結果として, 低ビーム密度, 高ビームエネルギーという問題点があり, エッチング速度が低い, あるいはエッチング選択性が低く実用性に乏しかった.

そこで, 著者らは主に負イオンを中性化する方法を用いて中性粒子ビームを生成する方法を検討した. 負イオンから電子を離脱させるのに必要なエネルギーは正イオンが電荷交換により中性化するのに必要なエネルギーに比べると低いエネルギーであり, 低エネルギーで高効率な中性粒子ビーム生成を実現できた. 図3に著者らが開発した中性粒子ビーム生成装置の概要を示す[15]. 基本的にプラズマ生成は通常の誘導結合プラズマ源であり, その石英チューブの上下にイオン加速用のカーボン電極が設置されている.

この平行平板電極に印加する直流電圧の極性により, 正イオンあるいは負イオンを加速することができる. 具体的にはイオン加速用のカーボン電極を接地するとプラズマポテンシャルのみで正イオンが加速され, 正負イオンどちらかを加速したい場合には直流電圧を印加し, 正負イオンどちらも加速して高密度のビームを形成する場合には RF 電圧を印加する. プラズマ放電としては連続放電およびパルス変調放電を用いることができるが, 本装置では主に負イオンを用いて中性粒子ビームを生成させるために μ 秒オーダーパルス時間変調プラズマを用いた. ガスは上部電極からシャワー状に導入され, プラズマから加速されたイオンは下部電極に形成された径 1 mm で厚さ 10 mm のアパーチャーを通過する過程で中性化される. この時, 正イオンおよび負イオンを加速し, 下部電極アパーチャーを介した

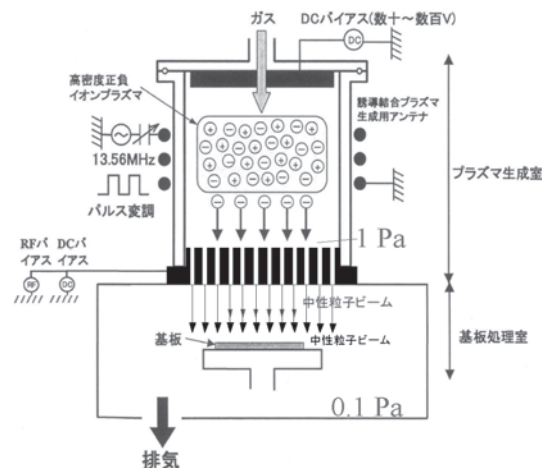


図3 新しい中性粒子ビーム源.

中性粒子ビームの中性化率をそれぞれカロリメータを使って測定した結果を図4に示した。正バイアスを上部電極に印加し下部電極は接地した場合には正イオンが加速され、中性化率は精々50~60%であるが、負バイアスを印加した場合には90%近い中性化率を示している。負イオンを用いることにより低エネルギー高効率F原子中性粒子ビーム生成が実現できた。このようにパルス変調プラズマを用いることでより効率の良い中性粒子ビームの生成が可能となり、本稿ではFおよびCl原子ビームを用いた50 nm微細ゲート電極加工、32 nm 縦型フィントランジスタチャネル形成加工、サブ 10 nm 量子カラム形成への応用に関して紹介する。

6.4 極微細ゲート電極エッチングへの応用

まず、半導体先端テクノロジー(株)と共同で行った50 nm微細ゲート電極形成に関する結果を示す。図5にSF₆/Cl₂混合ガスプラズマにより形成されたF/Cl混合原子ビームにより加工した50 nm レベルのポリシリコンゲート電極エッチング形状を示した[16]。

加工精度を高めるためにエッチング速度を300 Å/min程度に抑え、ビームエネルギーを10 eV程度に制御することにより下地ゲート酸化膜に対しては100程度の選択性が得られている。このとき注目すべきはレジストに対する選択性も高くArF単層レジストでエッチング加工を実現できることである。その結果、よりシンプルで高精度な加工が達成されている。この時にゲート酸化膜に対するダメージについてもアンテナ MOS キャパシタ (アンテナ比: 400~20000)を用いて検討を行った。図6にSF₆/Cl₂混合ガスプラズマにより形成されたF/Cl混合原子ビームによりポリシリコン電極加工後の下地ゲート酸化膜リーク電流を現在実際の量産現場で用いられている高密度HBr/Cl₂/O₂プ

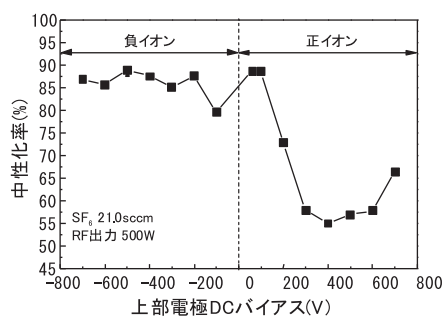


図4 SF₆ プラズマから引き出された正負イオンの中性化率の違い。

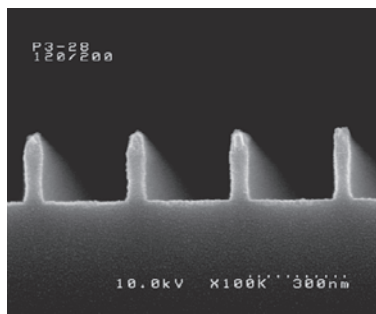


図5 F/Cl混合原子ビームにより加工した50 nm レベルのポリシリコンゲート電極エッチング形状。

ラズマによるポリシリコンエッチング後の場合との比較した結果を示す。中性粒子ビームゲート電極エッチング時間に対応させてMOSキャパシタにプラズマおよびビームを照射しゲートリーク電流を測定した。この結果より中性粒子ビームを用いたエッチングではアンテナ比依存性は若干あるものの低電界側のリーク電流がプラズマエッチングの場合に比べて一桁小さいことがわかった。電荷蓄積や紫外光放射の抑制により、よりダメージの少ないエッチングが実現されていることが実証された。この結果はSiO₂/Si界面に生成される界面準位に対応しており[17]、中性粒子ビーム照射では殆ど絶縁膜中にホールの生成がないことがわかった。このように中性粒子ビームでは従来のプラズマエッチングでは問題になるゲート電極形成過程における照射損傷を極限まで抑制することが可能であることがわかり、高誘電率ゲート絶縁膜の実用化段階におけるプロセス技術として今後、必要不可欠になると考えられる。図7にHfSiON膜上にゲート電極形成する際のオーバーエッチング時に起こる高誘電率膜HfSiON構造の変化についてプラズマエッチングおよび中性粒子ビームエッチング後に調べた結果を示す。プラズマエッチングではオーバーエッチング中に大きく絶縁膜構成が変化するが、中性粒子ビームではほとんど変化がないことがわかる。これは、プラズマプロセスでは入射する紫外線などにより表面反応が大きく促進されていることを示しており、結果としてリーク電流特性を劣化させる原因となる。このように表面反応を制御するという観点からも中性粒子ビームは効果的であることがわかった。

6.5 32 nm 世代以降の縦型FINトランジスタへの応用

2013年以降に実用化されることが期待されている32ナノメートル・ノードの集積回路に関して産業技術総合研究所と共同で中性粒子ビームを適用した結果を示す[18-20]。

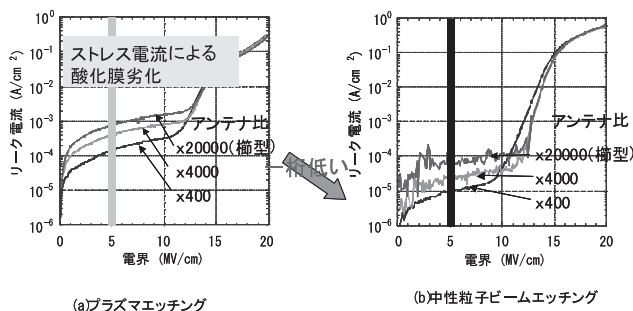
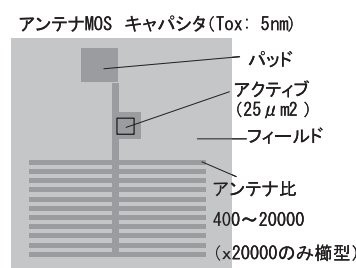


図6 アンテナ MOS キャパシタによるプラズマおよび中性粒子ビーム照射損傷の比較。

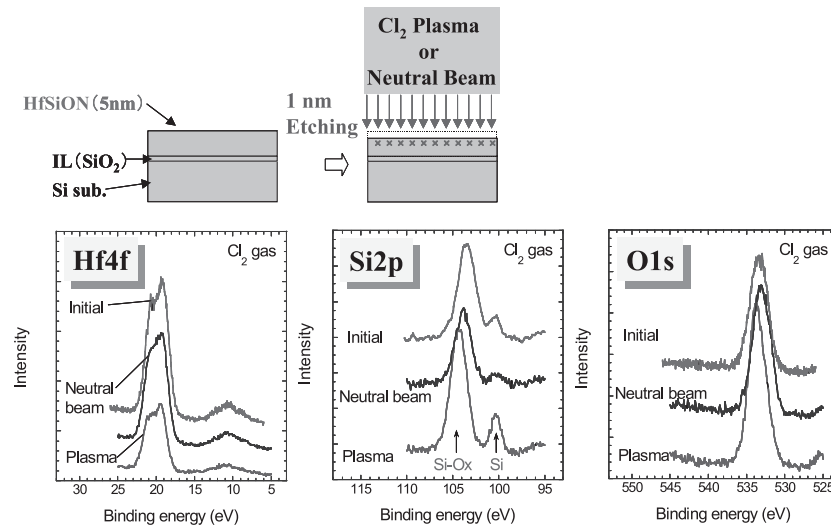


図7 塩素中性粒子ビームおよび塩素プラズマにおけるゲート電極形成におけるオーバーエッチング時の下地 HfSiO 膜構造変化。

通常のプレーナー型バルク MOS トランジスタでは、動作オフ時のリーク電流を完全に遮断することがきわめて難しくなるため、超高集積化に限界があるとされる。そこで、起立したチャンネルを持った、フィン型ダブルゲート MOS トランジスタのような 3 次元構造の素子が有望視され、世界的規模で開発が行われている。特に産業技術総合研究所では、世界に先駆けて超高集積に適した XMOS と呼ばれるダブルゲート MOS トランジスタの提案以来、3 次元構造の起立型トランジスタの開発を行ってきた。しかし、3 次元構造を有する起立チャンネルは加工時のダメージや加工形状異常を受け易く、加工面が荒れる等で、チャンネル中の電子の移動度が大幅に劣化するという課題を抱えていた。このような背景の下、極微細加工の課題を解決することが強く求められている。そこで、著者らは産業技術総合研究所と共同でダメージを完全に抑制できる中性粒子ビームを起立チャンネル加工に適用し、そのトランジスタ特性の改善について検討を行った。

今回試作した起立型（フィン型）ダブルゲート MOS トランジスタの概略図を図 8 に示す。同図に示すように、このトランジスタはチャンネルがシリコン基板に垂直にそそり立つ 3 次元構造（フィン構造）になっている。従来のプラズマエッチングでは、この極微細なフィン構造部を高エネルギーのプラズマが傷つけたり、プラズマから発生する有害な紫外光照射が傷つける等で、極微細かつ高性能なフィントランジスタを実現できなかった。今回、著者らは、電気的に中性で、しかも運動エネルギーが小さなソフトな中性粒子ビーム技術を、フィン型ダブルゲート・トランジスタの作製に世界で初めて適用し、トランジスタの動作に成功した。図 9 は、実際に試作したフィン型ダブルゲート・トランジスタの SEM 写真を示したものである。また、図 10 は試作した FIN 型トランジスタのチャンネル部分の断面の TEM 写真である。中性粒子ビームにより加工した場合には電子が通るチャンネルが原子レベル（黒い丸がシリコン原子）で平坦になっており、プラズマエッチングの場合比べて圧倒的にシリコン基板を傷つけずに加工してできている

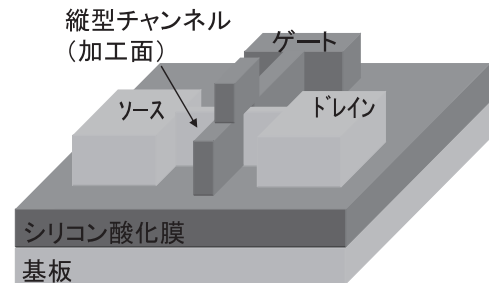


図8 FIN 型ダブルゲート MOSFET の概略図。

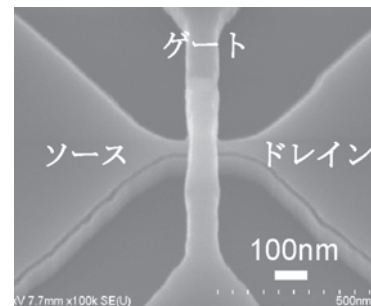


図9 作成したダブルゲートデバイスの SEM 写真。

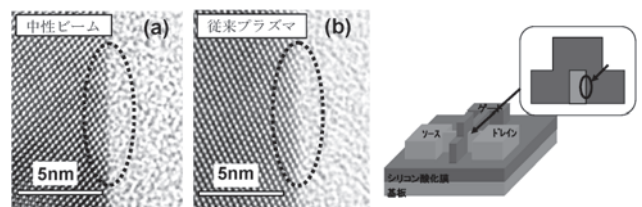


図10 エッチング後のシリコン側壁の断面。

ことがわかる。

図11は試作したトランジスタのチャンネル内電子移動度を求めたものである。チャンネル内の電子の動きやすさを表す電子移動度は、トランジスタ性能を表す大切な指標であり、この値が大きければ、性能を落とさずに低電圧でトランジスタを動作できる。したがって超高集積回路で問題

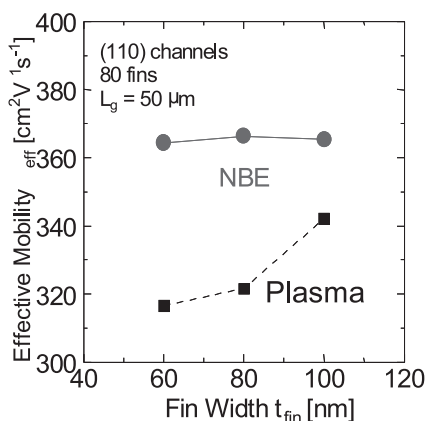


図11 起立チャネルエッチング方法による電子移動度のFIN幅との関係。

になっている素子の発熱を小さくできるため、集積回路の開発では重要な指標の一つとなっている。今回試作したトランジスタは、同図に示すように、従来のトランジスタに比べて、電子移動度が約30%（黒線と赤線の値の差）向上しており、電子移動度の理想値にほぼ近い値を達成できていることがわかる。これは、実現が難しいとされていた32ナノメートル・ノードのデバイス作製に立ちはだかる壁を打ち壊すことを意味し、超高集積化に解決の糸口が見えたことを意味している。

起立型ダブルゲート・トランジスタは、トランジスタの微細化限界を打破する究極のトランジスタとして注目され、世界的に極微細な素子開発が進められている。今回、初めて、電氣的に中性でエネルギーレベルが小さな中性粒子ビームを自在に使うことにより、ダブルゲート・トランジスタの特性を理想に近い状態まで大幅に向上させることができた。これは中性粒子ビームにより、シリコン基板表面に欠陥を作らず、表面の平坦性も1ナノメートル以下とキワめて優れている究極のダメージレス加工が実現できたためであり、今後の32 nm以下のデバイスでは原子層レベルでの平坦化が実現できるトップダウン加工が必要不可欠であることが示され、技術的に難しいとされていた32ナノメートル以降の超微細デバイスの開発に向けて大きく前進できたと言える。

6.6 サブ10 nm以降のデバイスへのチャレンジ

量子効果デバイスへの中性粒子ビームエッチングの適用をめざして、松下電器(株)・奈良先端科学技術大学院大学と共同で行った結果について示す。現在のシリコンLSIも既に100 nm以下の世代に突入し、2020年までにはムーアの法則の破綻やトランジスタ動作の物理的限界に到達すると指摘されている。そういう中で量子効果を利用した新しい原理のデバイスの開発が進められている。このデバイスにおいては如何に精度良く損傷がなくナノ構造（ドット、ワイヤ）を形成するかが大きな鍵になっている。ナノドットの形成にはプラズマエッチングを用いたトップダウン方式と自己組織化を利用したボトムアップ方式の両面で検討が行われている。しかし、プラズマを用いたトップダウン加工ではマスク材料との選択性やイオンなどの活性粒子の入

射方向性に問題があり、現在までの結果では精々10 nm程度の加工が限界であると考えられる。さらに、量子サイズのデバイスではプラズマからのイオン衝撃や紫外光照射による結晶欠陥などダメージが大きな問題となっている。一方、ボトムアップ方式では損傷などの問題は少ないものの、ナノドット配列や構造の均一性などの問題を抱えている。いずれにしても、精度の良いナノ構造の作製が今後のポイントとなる。

そこで、著者らは低エネルギーダメージフリープロセスが実現できる中性粒子ビームを用いたトップダウン加工による10 nm以下のナノドットの形成を検討した。数nmドットの加工マスクとしては、山下らが提案しているバイオナノプロセス[21]を用いた。図12に示すように生体超分子（蛋白質）であるフェリチンは直径12 nmで内部が7 nmの空洞となっている。この空洞内部は負の電荷を帯びており、鉄イオンが溶けた溶液中にフェリチンを入れると鉄イオンがフェリチン内部に吸収され鉄コアを作る。この鉄コアの直径は7 nmである。

この鉄内包のフェリチンをシリコン基板上に2次元配列した上で紫外線（UV）オゾン処理で蛋白質を除去し、鉄コアだけを基板に残してエッチングマスクとするプロセスである（図13）。ここで問題となるのは、フェリチン内部で形成された脆弱な鉄のコアがエッチングマスクとして耐性があるかということである。すでに、山下らによってフルオロカーボンプラズマによるエッチングが試みられているが、塩素プラズマに対して鉄が反応性が高くマスクとして十分な耐性がない、また、プラズマエッチング中に酸化鉄表面への電荷蓄積などで鉄同士が凝集し、パターンがくっついてしまうなどの問題があり、十分アスペクト比の高いパターンが実現できなかった。著者らも独自に塩素プラズマでも検討を行ったが、図14に示すようにやはり鉄コアの耐性がなく、エッチング形状は垂直ではなく丸まってしまっている。耐性がない理由は、プラズマから照射される紫外線により鉄コア結晶がアモルファス化し、鉄の塩素

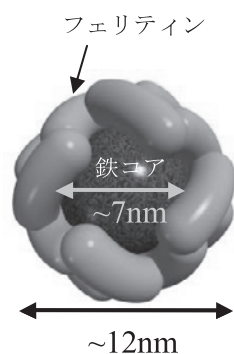


図12 鉄内包蛋白質（フェリチン）。

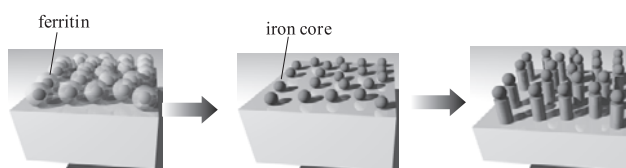


図13 蛋白質内包鉄コアをマスクにナノドット加工。

に対する反応性が増すことにあって考えられる。そこで塩素を主体とした中性粒子ビームにより鉄コアをマスクにエッチングを試みた。図15に塩素中性粒子ビームによるエッチング形状を示す。鉄コアマスクどおりに垂直な高アスペクト異方性加工が実現できており、世界で初めて7 nm径シリコンドットの形成に成功した[22, 23]。XPSを用いて塩素プラズマおよび塩素中性粒子ビームによる鉄コアのエッチング速度を求め、シリコンとの選択性を算出した。塩素プラズマでは選択比はほとんどないが、中性粒子ビームでは90近い選択比が得られていることがわかった。低エネルギーであると同時に紫外線などの放射もない塩素・中性粒子ビームで初めて鉄コアに対して高選択比が実現できたと考えられる。今後、バイオテクノロジーとナノテクノロジーの融合を考えると、生体超分子を破壊してしまう紫外光などの高エネルギー粒子を抑制して必要な活性種だけを低エネルギーで照射できる中性粒子ビームがきわめて重要な技術となることが予想される。

このように、プラズマで発生する電荷や紫外線を制御することで、従来ではありえない究極のトップダウン加工が実現できることを示した。今後はこのナノ構造を用いて量子効果デバイスなどの新デバイスへの展開を促進していきたいと思う。

6.7 まとめ

ナノオダの次世代半導体デバイスあるいは将来のナノ構造を利用した新しいデバイスに必要な不可欠なダメージフリー高精度加工技術として中性粒子ビームプロセスを紹介した。プラズマプロセスでは電荷蓄積や放射光の照射によるデバイス特性の劣化が大きな問題になっており、それらの問題解決に中性粒子ビーム(将来的にはマルチビーム)がきわめて有効であり、且つ、原子層レベルの反応制御が実現できることがわかった。今後は新材料のエッチングや新しい機能薄膜材料堆積などの応用に展開し、新しい原理の

デバイスにおいても中性粒子ビームの有効性が実証されていくことが期待される。

参考文献

- [1] T. Nozawa and T. Kinoshita, Jpn. J. Appl. Phys. **34**, 2107 (1995).
- [2] T. Kinoshita, M. Hane and J. P. McVitte, J. Vac. Sci. Technol. **B14**, 560 (1996).
- [3] H. Ootera, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 6109 (1993).
- [4] H. Ohtake and S. Samukawa, *Proc. 17 Dry Process Symp.* (Institute of Electrical Engineering of Japan, Tokyo, 1995) p.45.
- [5] K.P. Cheung and C.S. Pai, IEEE Device Lett. **16**, 220 (1995).
- [6] J-P. Carrere, J-C. Oberlin and M. Haond, *Proc. Int. Symp. on Plasma Process-Induced Damage* (AVS, Monterey, 2000) p.164.
- [7] T. Dao and W. Wu, *Proc. Int. Symp. on Plasma Process-Induced Damage* (AVS, Monterey, 1996) p.54.
- [8] M. Joshi, J.P. McVitte and K. Sarawat, *Proc. Int. Symp. on Plasma Process-Induced Damage* (AVS, Monterey, 2000) p.157.
- [9] C. Cismura, J.L. Shohet and J.P. McVitte, *Proc. Int. Symp. on Plasma Process-Induced Damage* (AVS, Monterey, 1999) p.192.
- [10] J.R. Woodworth, M.G. Blain, R.L. Jarecki, T.W. Hamilton and B.P. Aragon, J. Vac. Sci. Technol. **A 17**, 3209 (1999).
- [11] T. Mizutani and S. Nishimatsu, J. Vac. Sci. Technol. **A 6**, 1417 (1988).
- [12] 鈴木敬三：応用物理 **57**, 1721 (1988).
- [13] F. Shimokawa, J. Vac. Sci. Technol. **A10**, 1352 (1992).
- [14] 徳山 巍：半導体ドライエッチング技術(産業図書, 1992)。
- [15] S. Samukawa, K. Sakamoto and K. Ichiki, J. Vac. Sci. Technol. **A 20**, 1566 (2002).
- [16] S. Noda, H. Nishimori, T. Ida, T. Arikado, K. Ichiki and S. Samukawa, *Extended Abstracts of International Conference on Solid State Devices and Materials* (Tokyo, 2003) 472.
- [17] S. Samukawa, Y. Ishikawa, S. Kumagai and M. Okigawa, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, L1346 (2001).
- [18] K. Endo, S. Noda, T. Ozaki, S. Samukawa, M. Masahara, Y. Liu, K. Ishii, H. Takashima, E. Sugimata, T. Matsukawa, H. Yamauchi, Y. Ishikawa and E. Suzuki, *Extended Abstracts of international Conference on Micro and Nanotechnology* (Tokyo, 2005).
- [19] K. Endo, S. Noda, M. Masahara, T. Ozaki, S. Samukawa, Y. Liu, K. Ishii, H. Takashima, E. Sugimata, T. Matsukawa, H. Yamauchi, Y. Ishikawa and E. Suzuki, *IEDM Tech Digest* (Washington, 2005).
- [20] K. Endo, S. Noda, M. Masahara, T. Ozaki, S. Samukawa, Y. Liu, K. Ishii, H. Takashima, E. Sugimata, T. Matsukawa, H. Yamauchi, Y. Ishikawa and E. Suzuki, *submitted to Electron Device Letter*.
- [21] 山下一郎：応用物理 **71**, 1014 (2002).
- [22] T. Kubota, T. Baba, H. Kawashima, Y. Uraoka, T. Fuyuki, I. Yamashita and S. Samukawa, Appl. Phys. Lett. **84**, 1555 9 (2004).
- [23] T. Kubota, T. Baba, H. Kawashima, Y. Uraoka, T. Fuyuki, I. Yamashita and S. Samukawa, J. Vacuum Sci. Technol. **B 23**, 534 (2005).

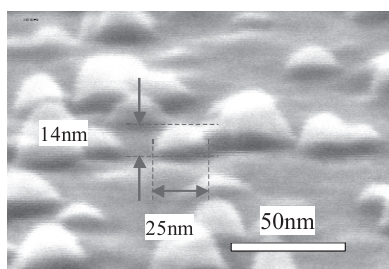


図14 塩素プラズマによる加工。

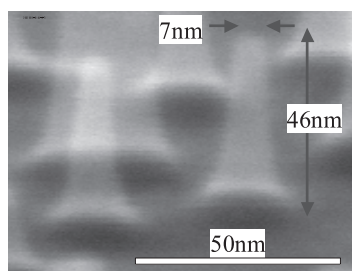


図15 塩素中性粒子ビームによる加工。