

堀 勝

名古屋大学大学院工学研究科・教授

プラズマナノ科学創成によるプロセスナビゲーション構築とソフト材料加工

§ 1. 研究実施の概要

本研究は、「プラズマナノ科学創成によるプロセスナビゲーション構築とソフト材料加工」の研究課題のもと、これまでに各大学グループに分かれ以下の研究を実施した。

名古屋大学グループは、大阪大学グループが開発した低インダクタンス誘導結合型プラズマ源および名古屋大学グループが開発したプラズマ内部パラメータ空間分布計測(ユビキタスマonitor)システムを応用したコンビナトリアルプラズマ解析装置を用いて、有機 Low-k 材料のエッチングプロセスにおける、ラジカル、イオン、電子密度・温度、光など数多く存在する内部パラメータに基づいたナノプロセスマップの作成に着手した。また、プラズマナノ科学の創成およびそれを基盤とするプロセスナビゲーションシステムの設計・構築を開始するとともに、革新的プラズマナノエッチング基盤技術の確立のための基礎実験を行い、以下の成果を得た。

1. ユビキタスマonitorシステムを搭載したコンビナトリアルプラズマ解析装置を用いたナノプロセスマップの構築、プラズマナノ科学の構築
 - 1) H_2/N_2 プラズマ有機 Low-k 材料エッチングプロセスにおいて、内部パラメータに基づいたエッチング速度・形状などの加工特性に関するナノプロセスマップを構築。
 - 2) 有機膜エッチングにおける高エネルギーフォトン(紫外光)とラジカルの相互反応、イオン照射による影響など粒子反応を詳細に評価し、プラズマナノ科学の構築を開始した。
2. プロセスナビゲーションシステムの構築
 - 1) 有機膜エッチングプロセスにおいて内部パラメータを基にしたプロセスナビゲーションシステムを容量結合型プラズマプロセス装置に搭載し、そのシステムの最適化を開始した。
3. 革新的プラズマナノエッチング基盤技術の確立
 - 1) 数 nm サイズの Pt 微粒子をエッチング用マスクとして、有機 Low-k 膜のエッチングを行い、サブナノメートルサイズの直径を有する有機ナノピラーの作成に成功し、革新的有機膜プラズマナノエッチング技術の可能性を示した。
 - 2) 九州大学グループと共同で研究を進めている自己組織化カーボン膜をマスクとした Low-k 膜エッチングの基礎実験を開始した。

次世代のナノデバイス製造には、無機材料にソフトマテリアル(有機材料)を複合した材料系が必須であり、有機材料の分子構造の損傷を伴うことなく有機・無機界面の化学結合状態をナノレベルで制御することが可能な低温でのプロセス技術が必要不可欠である。大阪大学グループでは、独自の低イオンダメージ(5eV 未満)プラズマの発生・制御技術とコンビナトリアルプラズマ解析装置を駆使し、プラズマとポリマー表面との相互作用の解明を通じて、有機基板上での機能性薄膜形成技術(界面制御技術)を開発することにより、次世代のフレキシブルデバイスや有機材料上での機能性電子デバイス形成技術の開発に資することを目指している。本年度はこれまでに、蓄積してきたプラズマプロセス解析手法、有機層・無機層の分析評価手法ならびに分析データをもとに、以下の成果を得ている。

1. プラズマとポリマー表面との相互作用の解明

- 1) ポリマーへのプラズマ照射におけるイオン衝撃に伴う物理的な損傷形成過程について詳細に調べ、シースエッジでの Ar イオンエネルギーを制御することにより、結合解離を制御可能であることが明らかとなった。
- 2) イオンエネルギーを閾値以下に制御したプラズマを用いることにより、プロセスダメージを顕著に抑制可能であることを示した。
- 3) 機能性有機分子において電子機能の発現に寄与する π 共役結合(フェニル基)に着目した実験では、シースエッジのイオンエネルギーを概ね 6 eV 以下に制御したプラズマにより、プロセスダメージを顕著に抑制可能であることを示した。

2. 有機材料上での機能性無機薄膜形成技術の開発(無機/有機ナノ界面制御)

- 1) 有機材料上での酸化物機能性材料膜の積層を念頭において、膜成長初期過程における無機/有機界面の化学結合状態を硬 X 線光電子分光法(HXPES)を用いて調べた。
- 2) 本研究で開発したコンビナトリアルプラズマプロセス解析装置を用い、ナノスケールの Zn 膜の酸化挙動に関する系統的なデータが得られた。
- 3) 上記の実験において、無機/有機界面の化学結合状態を分析し、照射する酸素イオンの等価的なドーズにより、有機分子の酸素官能基の制御が可能であることを示した。

九州大学グループでは、有機基板上へのカーボン自己組織化パターン形成の実現のため、有機基板上への選択的カーボン膜形成の基礎検討と、有機・無機ハイブリッド製膜の実現のための有機基板上への高品質シリコン結晶膜成長の基礎検討を行い、以下の成果を得た。

1. カーボン自己組織化パターン形成の実現について

- 1) 水素・アルゴンガス流量比とイオンエネルギーについての、微細トレンチのアスペクト比毎のプロセスマップを昨年に引き続き作成し、データを充実させた。
- 2) 堆積膜のエッチング特性評価を行った。
- 3) プラズマ密度を増加させてラジカル生成レートを増加し、異方性製膜の製膜速度を増加できることを明らかにした。またプラズマ密度と異方性製膜制御の相関を調べた。

2. 有機・無機ハイブリッド製膜の実現について

- 1) ナノ微粒子配置制御実現のため、基板温度をパラメータとしてナノ微粒子をパターン基板へ堆積した。ナノ微粒子の配置には熱泳動力が重要であることを明らかにした。
- 2) 結晶シリコンナノ粒子分散アモルファスシリコン薄膜のレーザーアニーリングによる結晶化を示唆する結果を得た。

§ 2. 研究実施体制

(1) 名古屋大学グループ

① 研究分担グループ長:堀 勝 (名古屋大学大学院工学研究科、教授)

② 研究項目

1. ラジカル・イオン粒子時空間分布計測系の構築
2. デスクトップ型コンビナトリアルプラズマ解析装置用粒子計測技術の構築
3. プラズマプロセスデータベースおよびプラズマ科学ネットの構築
4. プロセスナビゲーションシステムの構築
5. 有機膜の超高選択比・超精密 10nm±5%ナノ加工プロセス技術の構築

(2) 大阪大学グループ

① 研究分担グループ長:節原 裕一 (大阪大学接合科学研究所、教授)

② 研究項目

1. プラズマとポリマー表面との相互作用の解明
2. 有機材料上での機能性無機薄膜形成技術の開発(無機/有機ナノ界面制御)

(3) 九州大学グループ

① 研究分担グループ長:白谷正治 (九州大学大学院システム情報科学研究院、教授)

② 研究項目

1. カーボン自己組織化パターン形成の実現
2. 有機・無機ハイブリッド製膜の実現について

§3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

①名古屋大学グループ

1)ラジカル・イオン粒子時空間計測系およびデスクトップ型コンビナトリアルプラズマ解析装置用粒子計測技術の構築

本研究課題の中核をなす「コンビナトリアルプラズマ解析装置」を構築するうえで、内部パラメータの空間分布計測を可能とする技術は極めて重要である。本研究では、名古屋大学で開発に成功しているマイクロホローカソード光源を用いた真空紫外吸収分光法を用いたラジカル絶対密度計測システムにおいて、光源の高輝度化による高 S/N 比の実現、空間分布計測の簡便化・高分解能化などを実施するとともに、従来のプローブ法による荷電粒子計測と組合せ、デスクトップ型コンビナトリアルプラズマ解析用ラジカル・イオン粒子時空間計測技術を構築した。

図 1-1 に、大阪大学グループを主体として開発したコンビナトリアルプラズマ解析装置初号機をベースに、有機膜エッチングプロセスに適用させたコンビナトリアルプラズマエッチング解析装置の簡略図を示す。本装置は、2 台の低インダクタンス内部アンテナと、側壁の間隔を変化できる機構を有しており、アンテナに供給する電力および側壁間隔をコントロールすることで、基板直上に傾斜プラズマを形成できる。また、マイクロホローカソード光源を用いた真空紫外吸収分光システムを備えており、長尺 MgF_2 窓を用いたポートを使用した機構により、プロセスチャンバー内を大気暴露することなく、計測ポイントを移動でき、簡便・迅速な空間分布計測が可能である。本システムに使用するマイクロホローカソード光源は、その内部構造を最適化により高輝度化の実現に成功しており、原子状ラジカル密度の空間分布計測の精度を高めている。さらに、円形のサンプルステージの径方向をシングルプローブにより荷電粒子を計測できるシステムを備えており、ラジカル密度計測と同ポイントで荷電粒子計測が可能である。

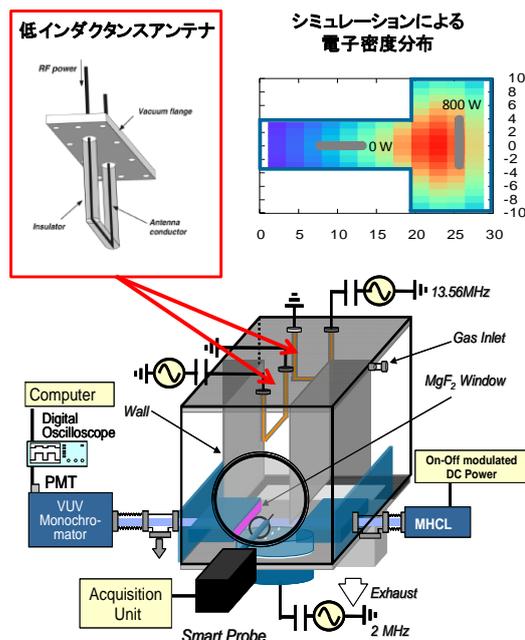


図 1-1 コンビナトリアルプラズマエッチング解析装置

本装置を用いて、 H_2/N_2 混合ガスを用いた傾斜プラズマ内の内部パラメータを評価した結果を図 1-2 に示す。図 1-2(a)は、電子密度の空間分布であり、図 1-2(b)は、水素、窒素ラジカルの密度分布である。 $H_2/(N_2+H_2)=0.25$ および 0.75 でのそれぞれの計測結果を比較すると、電子密度分布は、Pure H_2 および N_2 プラズマ以外では分布形状の変化は観られないが、 H および N ラジカルの密度分布は大きく変化し、 H_2 流量比を増加させることで、25mm のポイント(メインアンテナ直下)において、 N ラジカルで 1.5 倍、 H ラジカルで 3 倍程度変化することがわかる。また、単一条

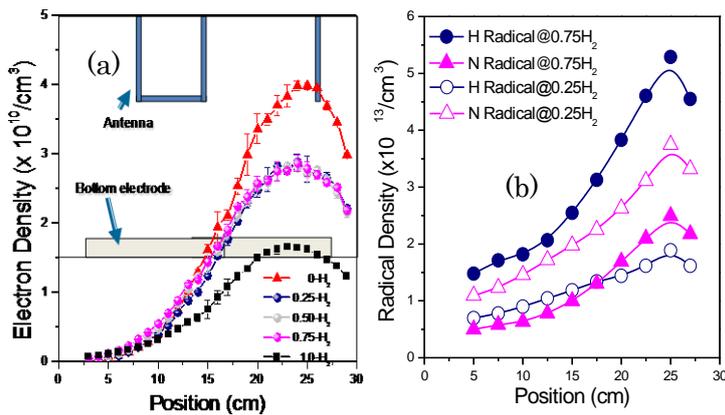


図 1-2 コンビナトリアルプラズマ解析装置における傾斜プラズマ内部パラメータ空間分布計測 (a)電子密度分布、(b)ラジカル密度分布

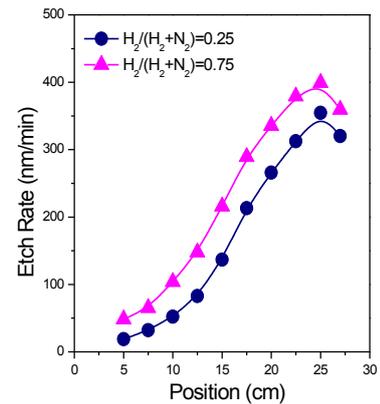


図 1-3 コンビナトリアルプラズマ解析装置による有機 Low-k 膜エッチングレート空間分布特性

件下での電子および各ラジカル密度の分布形状はそれぞれ異なっており、それぞれの影響度が各ポジションにおいて変化することが予想される。図 1-3 に各ポジションにおける有機 Low-k 膜のエッチングレートを示す。H₂/(N₂+H₂)=0.25 および 0.75 でのそれぞれの条件下において、空間的なエッチング速度の分布は大きな差が生じている結果となった。これは、図 1-2 に示す内部パラメータの割合の変化が大きく影響していると考えられ、本装置により、有機膜エッチングプロセスのコンビナトリアル的な解析が可能であることが示唆された。また、以上の結果より、構築した空間分布計測システムを用いることにより、コンビナトリアルプラズマ解析装置内の傾斜プラズマの内部パラメータの明確なマッピングに成功した。

当該 CREST 研究課題の重要なテーマの一つである内部パラメータを基盤としたコンビナトリアルプラズマ解析装置を実現するうえで、今回構築した計測システムは、十分に適用可能であることが確認された。本コンビナトリアルプラズマ解析装置を用いて、プラズマナノ科学データベースの構築を現在遂行中ではあるが、今後、一プロセスにおける取得データ数の更なる増大を目指し、空間分解能の微細化を進める。

2) プラズマプロセスデータベースおよびプラズマ科学ネットの構築³⁾

本研究課題では、当該プロジェクトの最終目的であるプラズマプロセスデータベースの構築とプラズマナノ科学の創成を目指し、図 1-1 に示すコンビナトリアルプラズマエッチング解析装置を用いた有機 Low-k 材料のエッチングプロセスの内部パラメータを基盤としたプロセスデータの取得を目的とする。今回、本装置を用いて H₂/N₂ プラズマを用いた有機 low-k 膜のエッチングプロ

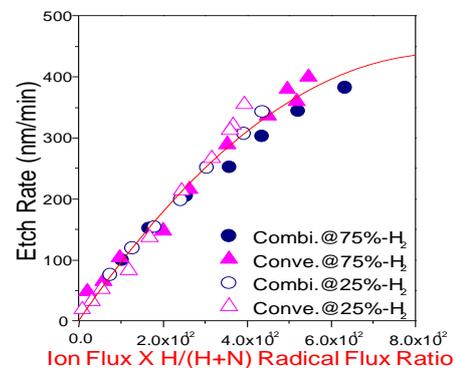


図 1-4 内部パラメータに基づいた有機 Low-k エッチング速度 (●、○コンビナトリアル解析装置、▲、△従来プラズマ装置)

セスにおける加工速度およびトレンチ基板のエッチング形状などの特性をラジカル密度、プラズマパラメータなど内部パラメータをもとに評価を行い、ナノプロセスマップの作成に着手した。

図1-4に実験で定量的に計測された内部パラメータを関数として、2条件の $H_2/(H_2+N_2)$ 流量比で評価されたエッチング速度の特性をひとつのグラフで纏めた結果を示す。丸(●: H_2 流量比 75%、○: 25%)でプロットされた点は、コンビ

ナトリアルプラズマ解析装置を用いて得られたデータ(各流量比条件一回のプロセスで得られた結果)であり、三角(▲: H_2 流量比 75%、△: 25%)

で示されるプロットは従来プラズマ装置を用いて得られたデータ(10回のプロセスで得られた結果)である。この結果からわかるように H_2/N_2 プラズマにおけるエッチング特性は横軸に示す内部パラメータに対し、従来法およびコンビナトリアル法での結果は同一の非線形的な特性を示すことが確認できる。この実験においては、従来法では計10回のプロセス実験を行ったのに対し、コンビナトリアル法ではプロットされる7点は一回のプロセス

で得られた結果であり、コンビナトリアル法を用いることにより、極めて迅速にプロセス条件の探索および科学的に反応メカニズムの解明が可能であることがわかる。また上記エッチング速度の内部パラメータ評価と同時にトレンチ基板のエッチング形状を評価した結果を図1-5に示す。この結果においても、従来法とコンビナトリアル法と内部パラメータに基づいて比較すると、同じ傾向を示したことから、エッチング速度のみならず形状においても十分に評価可能であることを確認した。このことから本コンビナトリアルプラズマ解析装置の構築により、有機 Low-k 材料エッチングプロセスのナノプロセスマップの作成に大きく前進したといえる。

②大阪大学グループ

1) プラズマとポリマー表面との相互作用の解明

有機・無機複合機能材(有機材料を基材あるいは機能層として無機材料と複合化)の形成により実現するフレキシブルデバイスは、高機能ディスプレイ、高効率の太陽電池、さらには医療用デバイスとしての発展も期待される。特に、可視領域での光透過性に優れた有機半導体は、複数の機能膜の積層構造化により、太陽電池の高効率化(紫外～赤外の広い波長領域の利用)や発光素子の多波長化により、これまででない高機能・多機能デバイスの創成が期待される。

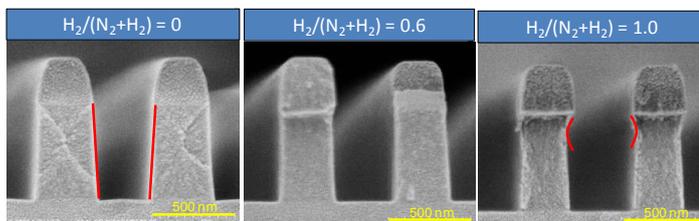


図1-5(a) 1プロセス1データを取得する従来法によるエッチング形状の $H_2/(H_2+N_2)$ ガス流量比依存性調査結果

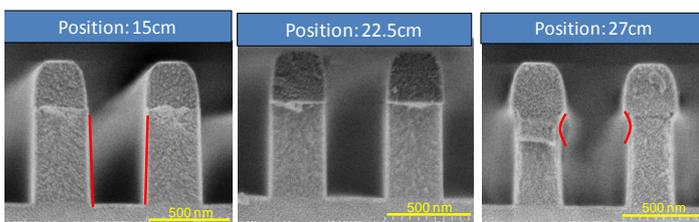


図1-5(b) 1プロセス複数データを取得するコンビナトリアル法によるエッチング形状の空間分布(内部パラメータ)依存性調査結果

有機材料上での無機材料薄膜の形成では、1) 有機材料の表面ナノ領域における低ダメージでの改質(官能基付与)に加えて、2) 有機材料上に形成した無機材料薄膜との界面ナノ領域におけるプロセスダメージに関する知見を蓄積し、3) ナノ構造制御を念頭に置いて低ダメージかつ低温でのプロセスを構築していくことが極めて重要である。特に、本課題が研究対象としている有機無機複合構造でのナノ界面現象は、フレキシブルデバイスの開発のみならず、次世代の Si-ULSI の創製に必須のデバイス技術である極短紫外光 (EUV) 露光用レジストならびに有機系 Low-k 層間絶縁膜での、プラズマプロセスに伴うイオン照射ダメージならびに紫外線による有機系基材の表面ナノ領域における深さ方向の損傷や最表面における官能基付与の問題という点では共通の研究課題である。

有機・無機複合構造を用いた積層デバイスでは、無機材料を有機材料上に形成するプロセスが必須である。しかしながら、有機材料(基板材料あるいは有機半導体等の機能層)の上に無機材料を積層するプロセスでは、膜の緻密性や付随する電気的な特性の点では、スパッタ製膜をはじめとするプラズマプロセスが有利であるにも関わらず、蒸着プロセスが専ら用いられてきた。これは従来のプラズマプロセスでは、有機材料表面にプロセス損傷を生じることが避けられなかった(あるいはそのように考えられてきた)ことが本質的な要因といえる。このため、上記の技術的な課題をブレイクスルーし、従来にない画期的な次世代デバイスを創成するには、『有機半導体の上に無機材料を積層するプロセスに、プラズマプロセスを適用することは不可能であるのか?』ということを一義的な問題として、科学的な解決策を構築することが求められる。

一方、有機分子の化学結合に対する損傷(結合の切断あるいは解離)を生じるのに必要なエネルギーは、結合解離エネルギーで与えられ、概ね 10eV 以下の領域にある。このため、有機材料に入射するイオンの運動エネルギー(材料表面に形成される

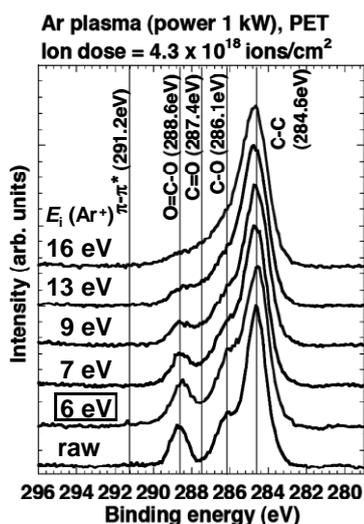


図 2-1 Ar プラズマ[高周波電力: 1 kW]を照射した PET 表面の C1s XPS スペクトル[照射イオンドーズ: 4.3×10^{18} ions/cm²]

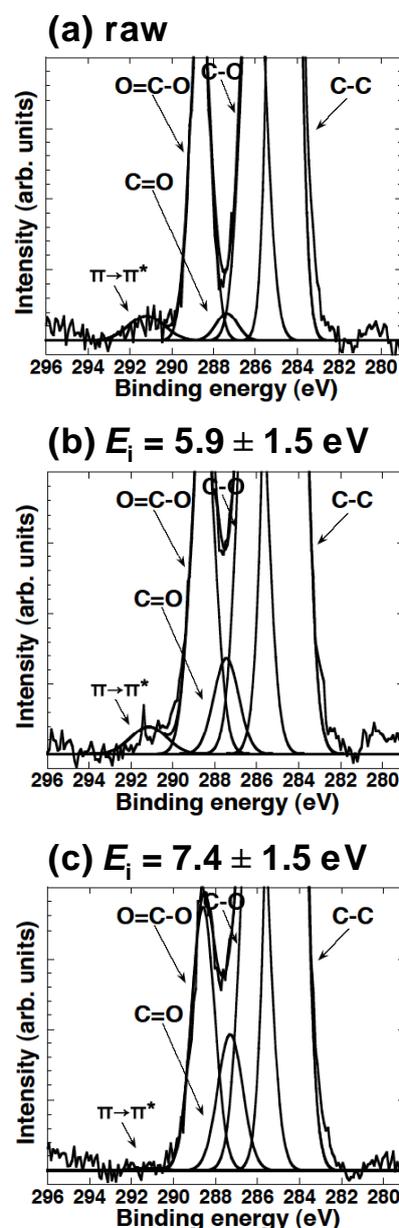


図 2-2 Ar プラズマ[高周波電力: 1 kW]を照射した PET 表面で計測した C1s XPS スペクトル

シースで加速される)を ~ 10 eVよりも十分低く抑制することにより、上記の問題となっているプラズマプロセスでの損傷を回避できる可能性があるといえる。

そこで、本研究では、プラズマプロセスにおけるイオン衝撃効果(物理的なプロセスダメージ)に着目し、低インダクタンス内部アンテナを用いて生成した Ar プラズマをポリエチレンテレフタレート(PET)基板に照射し、表面の化学結合状態をX線光電子分光法(XPS)により分析した^{8,10,12-15})。シース端でのイオンエネルギーを変化させた状態で、PET基板にプラズマを照射した際の化学結合状態(XPS スペクトル C1s スペクトル)の変化を図 2-1 に示す。PET を構成する C=C-O 結合ならびに C-O 結合の Ar イオンエネルギーに対する変化に着目すると、イオンエネルギーを 6 eV 程度よりも低く抑制することによりプロセスダメージを抑制することが可能であることを示している。

次いで、フェニル基の存在を示す 291eV 付近の $\pi \rightarrow \pi^*$ シェイクアップサテライトの変化をみるため、図 2-1 の縦軸を、C-C 結合の光電子収量で規格化して拡大したものを図 2-2 に示す。また、このシェイクアップサテライトの C-C 結合に対する光電子収量(積分強度)の比を図 2-3 に示す。図 2-2 の XPS スペクトルが示すように、 5.9 ± 1.5 eV のイオンエネルギーではシェイクアップサテライトが確認出来るのに対し、 7.4 ± 1.5 eV では消失している。多くの有機半導体はフェニル基を含む構造をしており、 π 共役分子での電子状態が電氣的な機能性を与えていることを考慮すると、この実験結果はプラズマプロセスにおける照射イオンエネルギーを 6eV 以下に低減することにより、有機半導体と無機機能材料を複合化した積層構造の形成にも道が拓かれる可能性があることを示唆している。さらに図 2-3 のイオンエネルギー依存性は、フェニル基の分解の閾値が数 eV という極めて狭いイオンエネルギーの範囲にあることを示唆している。これは、本研究でのプラズマ源におけるイオンエネルギー幅が 3eV 程度と極めて狭いが故に、このように急峻な変化を捉えることが出来ているものと考えられる。逆に、高精度な結合制御(ボンドエンジニアリング)に応用できる可能性を示唆している。

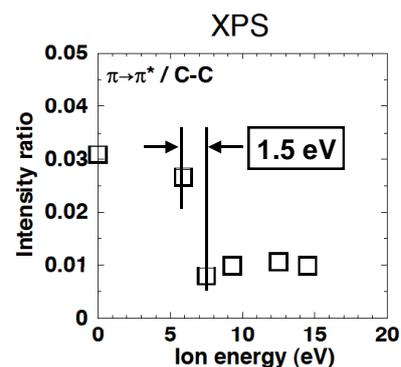


図 2-3 $\pi \rightarrow \pi^*$ シェイクアップ・サテライトピークの光電子収量の C-C 結合光電子収量に対する比の、シースエッジでの Ar イオンエネルギー依存性

③九州大学グループ

1) 自己組織化パターン形成の実現:カーボン自己組織化マスクを用いたナノ加工技術の開発 「製膜形状制御プロセスマップ構築」

自己組織化パターン形成の実現を目的として、トレンチ基板上へのカーボン薄膜の成膜形状のためのプロセスマップの構築を行っている。成膜形状を決定する内部パラメータは、堆積前駆体であるカーボン系ラジカル、およびエッチング種である H の基板上へのフラックスと膜質を改質する入射イオンの運動エネルギーである。H フラックスを制御する外部パラメータである水素・アルゴン流量比とイオンエネルギーについてのプロセスマップを図 3-1 に示す。トレンチの側壁に堆積するコンフォーマルおよびサブコンフォーマル成膜形状、側壁には堆積せず上面とトレンチ底面にのみ

堆積が生じる異方性成膜形状、さらには上面のみに堆積が生じる成膜形状を実現できている。特に、低イオンエネルギーかつ低水素濃度の領域で上面のみの製膜が実現できる。

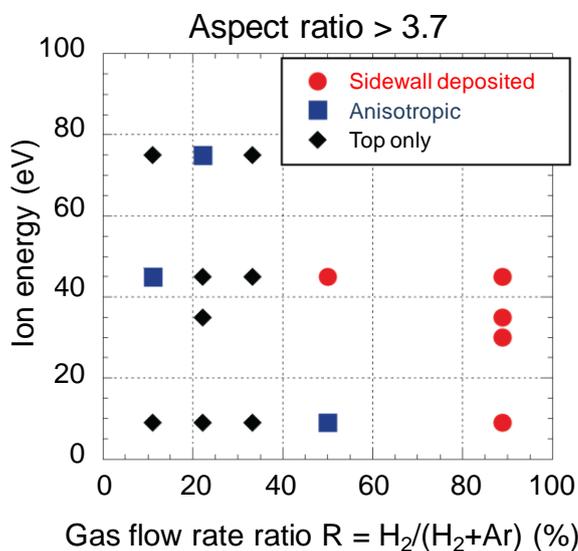


図 3-1 トレンチ基板上へのカーボン薄膜の成膜形状のためのプロセスマップ。

2)有機・無機ハイブリッド製膜の実現:有機基板上への高品質シリコン結晶薄膜の成長

「ナノ微粒子配置制御のためのナノ微粒子のパターン基板への堆積」

有機基板上への高品質シリコン結晶薄膜の成長への応用を目指したナノ微粒子配置制御のために、ナノ微粒子のトレンチ基板への堆積を行った。図 3-2 にナノ粒子を堆積したトレンチ基板の断面 SEM 写真と、トレンチの上面と底面のナノ粒子堆積速度のアスペクト比依存性を示す。上面でのナノ粒子堆積速度が最大であり、側面と底面の堆積速度はアスペクト比の増加とともに減少する。この結果は、ナノ微粒子の付着確率が高いことを示している。ナノ微粒子に作用する熱泳動力の効果により、付着確率は基板温度とともに増加することが分かった。

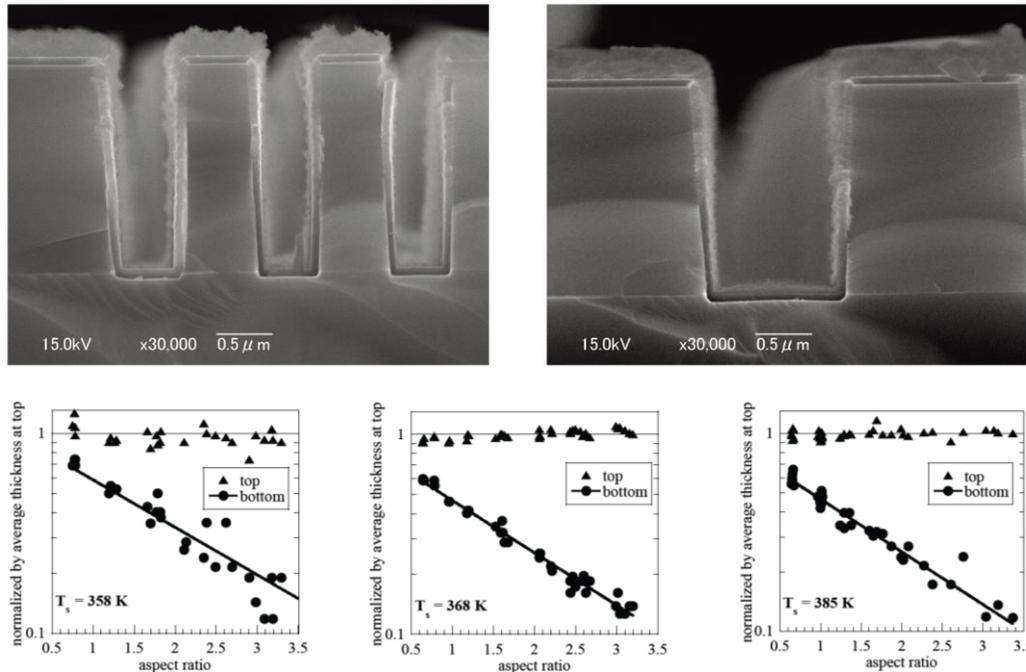


図 3-2 トレンチ基板へのナノ微粒子堆積。断面 SEM 写真と基板温度をパラメータとした上面・底面の堆積速度のアスペクト比依存性

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. S. Iseki, T. Ohta, A. Aomatsu, M. Ito, H. Kano, Y. Higashijima, and M. Hori, "Rapid inactivation of *Penicillium digitatum* spores using high-density nonequilibrium atmospheric pressure plasma", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 96, 153704 (2010). doi:10.1063/1.3399265
2. C. S. Moon, K. Takeda, S. Takashima, M. Sekine, Y. Setsuhara, M. Shiratani, and M. Hori, "Surface loss probabilities of H and N radicals on different materials in afterglow plasmas employing H₂ and N₂ mixture gases", *J. Appl. Phys.*, Vol.107, Issue 10, 103310 (2010). doi:10.1063/1.3372750
3. C. S. Moon; K. Takeda, M. Sekine, Y. Setsuhara, M. Shiratani. M. Hori, "Etching characteristics of organic low-k films interpreted by internal parameters employing a combinatorial plasma process in an inductively coupled H₂/N₂ plasma", *J. Appl. Phys.*, Vol.107, pp.113310 1-8 (2010). doi:10.1063/1.3415535
4. S. Takashima, K. Takeda, S. Kato, M. Hiramatsu, and M. Hori, "Surface Loss

- Probability of Nitrogen Atom on Stainless-Steel in N₂ Plasma Afterglow”, *Jpn J. Appl. Phys.*, Vol.49, pp.076101-1 - 4 (2010). doi: 10.1143/JJAP.49.076101
5. Y. Abe, S. Kawashima, K. Takeda, M. Sekine, M. Hori, “Dependence of Surface-Loss Probability of Hydrogen Atom on Pressures in Very High Frequency Parallel-Plate Capacitively Coupled Plasma”, *Applied Physics Express*, Vol.3, No.10, Article No.106001(2010). doi: 10.1143/APEX.3.106001
 6. A. Malinowski, M. Hori, M. Sekine, W. Takeuchi, L. Lukasiak, A. Jakubowski, D. Tomaszewski, “Modeling considerations and performance estimation of Single Carbon Nano Wall based Field Effect Transistor by 3D TCAD simulation study”, *Journal Transactions of the Materials Research Society of Japan*, Vol. 35, No. 3, pp.669-674 (2010).
 7. H. Inui, K. Takeda, H. Kondo, K. Ishikawa, S. Makoto, H. Kano, N. Yoshida, M. Hori, “Measurement of Hydrogen Radical Density and its Impact on Reduction of Copper Oxide in Atmospheric-Pressure Remote Plasma Using H₂ and Ar Mixture Gases”, *Appl. Phys. Express*, Vol.3, 126101 (2010). doi: 10.1143/APEX.3.126101
 8. Y. Setsuhara, K. Cho, M. Shiratani, M. Sekine, M. Hori, “X-ray photoelectron spectroscopy for analysis of plasma-polymer interactions in Ar plasmas sustained via RF inductive coupling with low-inductance antenna units”, *Thin Solid Films*, Vol. 518, pp. 3555-3560 (2010). doi:10.1016/j.tsf.2009.11.038
 9. Y. Setsuhara, K. Cho, K. Takenaka, M. Shiratani, M. Sekine, M. Hori, E. Ikenaga, S. Zaima, “Low-damage surface modification of polymethylmethacrylate with argon-oxygen mixture plasmas driven by multiple low-inductance antenna units”, *Thin Solid Films*, Vol. 518 pp. 3561-3565 (2010). doi:10.1016/j.tsf.2009.11.045
 10. K. Cho, K. Takenaka, Y. Setsuhara, M. Shiratani, M. Sekine, M. Hori, E. Ikenaga, H. Kondo, O. Nakatsuka and S. Zaima, “Hard X-ray Photoelectron Spectroscopy Analysis for Organic-Inorganic Hybrid Materials Formation”, *Ceramic Transactions*, Vol. 219, pp. 183-188, (2010).
 11. K. Takenaka, K. Cho, Y. Setsuhara, M. Shiratani, M. Sekine, M. Hori “Development Of a Combinatorial Plasma Process Analyzer for Advanced R&D of Next Generation Nanodevice Fabrications”, *Ceramic Transactions*, Vol. 219, pp. 279-284 (2010).
 12. K. Takenaka, Y. Setsuhara, K. Cho, M. Shiratani, M. Sekine and M. Hori, “Combinatorial Analysis of Plasma-Surface Interactions of Polyethylene-terephthalate with X-ray Photoelectron Spectroscopy”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 49, pp. 08JA02-1-4 (2010). doi: 10.1143/JJAP.49.08JA02
 13. Y. Setsuhara, K. Cho, K. Takenaka, M. Shiratani, M. Sekine and M. Hori, “Advanced Research and Development for Plasma Processing of Polymers with

- Combinatorial Plasma-Process Analyzer”, *Thin Solid Films*, Vol. 518, pp. 6320-6324 (2010). doi:10.1016/j.tsf.2010.03.055
14. Y. Setsuhara, K. Cho, M. Shiratani, M. Sekine and M. Hori, “X-Ray photoelectron spectroscopy analysis of plasma–polymer interactions for development of low-damage plasma processing of soft materials”, *Thin Solid Films*, Vol. 518, pp. 6492-6495 (2010). doi:10.1016/j.tsf.2010.01.057
 15. Y. Setsuhara, K. Cho, K. Takenaka, M. Shiratani, M. Sekine, and M. Hori, “Low-Damage Plasma Processing of Polymers for Development of Organic-Inorganic Flexible Devices”, *Surface and Coating Technology*, Vol. 205, pp. S355-S359 (2010). doi:10.1016/j.surfcoat.2010.08.031
 16. K. S. Shin, Y. S. Choi, I. S. Choi, Y. Setsuhara, J. G. Han, “Nano-crystalline silicon thin films grown by the inductively coupled plasma assisted CFUBM at low temperature”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, pp S227-S230 (2010). doi:10.1016/j.surfcoat.2010.07.086
 17. T. Nomura, T. Urakawa, Y. Korenaga, D. Yamashita, H. Matsuzaki, K. Koga, M. Shiratani, Y. Setsuhara, M. Sekine, M. Hori, “Plasma parameter measurements of Ar+H₂+C₇H₈ plasmas in H-assisted plasma CVD reactor”, *Proceedings of ICRP-7/SPP-28* (2010) DTP-173.
 18. T. Nomura, T. Urakawa, Y. Korenaga, D. Yamashita, H. Matsuzaki, K. Koga, M. Shiratani, Y. Setsuhara, M. Sekine, M. Hori, “Substrate temperature dependence of feature profile of carbon films on substrate with submicron trenches”, *Proc. of IEEE TENCON 2010* p. 2213 (2010).
 19. K. Koga, T. Matsunaga, W. M. Nakamura, K. Nakahara, Y. Kawashima, G. Uchida, K. Kamataki, N. Itagaki, M. Shiratani, “Comparison between silicon thin films with and without incorporating crystalline silicon nanoparticles into the film”, *Thin Solid Films* (in press).
 20. 白谷正治、節原裕一、関根誠、堀勝, “研究開発の効率を飛躍的に高めるコンビナトリアルプラズマ解析装置”, *化学工業*, VOL.60 NO.5, pp.43-47, 2010年5月1日
 21. 伊藤昌文、堀勝, “プラズマ技術とバイオアプリケーション –非均衡大気圧プラズマのミドリカビ殺菌への応用–”, *化学工業*, VOL.61, NO.6, pp.44-48, 2010年6月1日
 22. 節原裕一, “低インダクタンス内部アンテナを用いたプラズマ源の開発と反応性プラズマプロセスへの展開”, *プラズマ・核融合学会誌*, Vol.87, No.1, pp. 24-33, 2011. B-9
 23. H. Inui, K. Takeda, K. Ishikawa, T. Yara, T. Uehara, M. Sekine, M. Hori, “Hydrophobic treatment of organics against glass employing nonequilibrium atmospheric pressure pulsed plasmas with a mixture of CF₄ and N₂ gases”, *Journal of Applied Physics*, Vol.109, Issue 1, 013310 (2011). doi:10.1063/1.3525246

24. S. Chen, H. Kondo, K. Ishikawa, K. Takeda, M. Sekine, H. Kano, S. Den, M. Hori, “Behaviors of Absolute Densities of N, H, and NH₃ at Remote Region of High-Density Radical Source Employing N₂/H₂ Mixture Plasmas”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 50, 01AE03 (2011). doi: 10.1143/JJAP.50.01AE03
25. F. Jia, N. Sumi, K. Ishikawa, H. Kano, H. Inui, J. Kularatne, K. Takeda, H. Kondo, M. Sekine, A. Kono, M. Hori, “Laser Scattering Diagnosis of a 60-Hz Non-Equilibrium Atmospheric Pressure Plasma Jet”, *Applied Physics, Express* 4, 026101 (2011). doi: 10.1143/APEX.4.026101
26. K. Takeda, Y. Miyawaki, S. Takashima, M. Fukasawa, K. Oshima, K. Nagahata, T. Tatsumi, M. Hori, “Mechanism of plasma-induced damage to low-k SiOCH films during plasma ashing of organic resists”, *J. Appl. Phys.* 109, 033303 (2011). doi:10.1063/1.3544304

(4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 5件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 6件)