はじめに：プラズマイオンプロセス最前線

行 村 建^{*1}

Forefront of Advanced Plasma-ion Processing

Ken YUKIMURA

Department of Electrical Engineering Doshisha University 1-3 Tatara Miyakodani, Kyotanabe, Kyoto 610-0321, Japan

1. 三次元形状物のプラズマ・イオンプロセス

三次元形状物の表面処理により高摩擦・磨耗、腐食、高温などの悪環境中での使用に耐えうる素材が皮膜される。多くの場合、セラミックス膜である。ここでは、プラズマにより活性化された粒子およびプラズマから引き出されたイオンが表面処理に用いられる。三次元基材の表面改質の最近の技術動向は金属種、ガス種の両者をプラズマ中にて活性化し、反応を促進させる堆積（蒸着）法が多く用いられる。異なるプラズマ源が複数用いられ、それぞれの種が活性化される。金属プラズマ源をプロセス用真空容器内にセットし、酸素、窒素、あるいは炭化水素系ガス中にて発生させる。あわせて、ガスプラズマ源がセットされる。それぞれのプラズマ源を独立して運転すると装置台数が増え、全体として複雑な構成となる。この場合、互いのプラズマ源が補完しあう構成が理想的である。さらに蒸着膜と基材との界面の密着性の向上のために、基材を加熱し、熱拡散を促進させることも成膜の特質を生かせる。

均一な蒸着膜を高い生産効率にて、低コストで三次元形状物へ皮膜するプロセスが科学的あるいは技術的な視点の両面からの研究されている。

表面処理の歴史を振り返ると、最初は窒化などガスフェーズでの処理が行われ多くの産業の現場で用いられてきた。本プロセスはシンプルであり、技術的にも効率よく行われ、便利な手法であった。しかし、現在は、多くの素材に対し、過酷な環境下でも有用に働く改質技術が要求され、厚膜、かつ基材中の深い範囲にまで処理できる表面処理技術が期待され、パルスイオン注入技術と熱拡散を併用した技術が提案され、産業用部材へ適用されるようになった。高エネルギーイオンが用いられ、効率のよい表面処理技術として確立された。イオンの基材への深部注入が行われ、深い領域にいたる改質と新しい素材が創製された。注入により、基材の微細構造の変化ももたらされ、単なるガス種による表面改質に勝る性能が得られるようになった。

一方、イオンビームによる表面改質には従来の一次元イオン流による改質から三次元基材の一括処理が望まれるようになった。すなわち、視線入力においては複雑な形状を持つ基材の表面処理では1回の処理で一部のイオン照射箇所のみが処理されるに過ぎず、影効果（shadowing effect）が現れ

ることや局所的な電界の集中による不均一な表面処理となるなどの課題がある。イオンビームの操作機構や基材の回転機構など均一注入のための制御機構をあわせて用いる必要があり、装置構造が複雑となった。代替技術が要請されるようになり、基材をプラズマ中に置き、負極性のパルス高電圧を基材に直接印加するプラズマイオン注入技術（Plasma Immersion Ion Implantation, PIII）が開発され、ビーム状のイオンによる注入の問題点の解決が図られるようになった。1980年代中ごろである。さらに、硬膜蒸着のために金属イオン種が用いられるようになり、蒸着と注入の両者の処理が可能となるプラズマイオン注入・堆積技術（Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition, PIII & D）となった。最近では技術の総称としてプラズマイオンプロセスとも呼ばれ、英語による表記としては Plasma-Based Ion Implantation and Deposition (PBII & D) として呼ばれている¹⁾。

プラズマイオンプロセスでは表面処理のために用いられるのは電子ではなく、主にイオンであるが、イオンの生成方法やプラズマからの引き出しのためには、いろいろな方法や方式が提案されている。従来のイオンビーム方式では、処理室とは別の場所でプラズマを作り、イオンはプラズマ生成室の近くに置かれた電極に負極性電圧を印加して外部に引き出され、処理室まで輸送される方式が採用されてきた。半導体製造の現場では重宝された。しかし、このようなイオンの引き出し方式を三次元の形状を持つ基材の表面処理に用いるには上述のように影効果などの問題が発生し、満足する結果が得られなかった。

プラズマイオンプロセスではプラズマは処理室であるプロセスのための容器内で発生させ、基材の表面に沿うイオンシースを形成して、イオンをシース内にて加速させる。すなわち、負極性のパルス電圧を基材に直接印加して基材の表面形状に従うイオンシースを形成し、イオンは基材に向かって加速され、等角的に注入（Conformal ion implantation）される。このようなイオンの発生方式は、従来のビーム方式とは異なる方式であり、プラズマイオンプロセスにおける特徴のひとつとしてあげられる。この特徴の下に、大量の複雑形状物の一括処理が行われるようになった。また、金属プラズマを用いることにより、堆積と注入が同時に行われる点も特徴のひとつに上げられる。また、イオンシース形成のための電圧を制御する、すなわち、可変とすることにより、イオンのエネルギーが制御される。高電圧の印加によりイオンエネルギーを大きくして基材の深部への注入を堆積層を通して行うとともに、低電圧として動作させることにより堆積を行う

^{*1} 同志社大学工学部電気工学科（〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3 TEL 0774-65-6266, FAX 0774-65-6816
E-mail: kyukimur@mail.doshisha.ac.jp

ことができる。後者の場合、金属種を適当に選択することにより多層膜などの成膜も行うことができる。このように堆積プロセスは一種のプラズマ励起化学蒸着法（Plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD）と考えることができる。実際のところ、最近の表面改質プロセスでは1回の処理の中で、低エネルギーによる反応性蒸着と高エネルギーイオンによる注入の組み合わせにより、成膜と基材との間の密着性を改善したハイブリッド型のプロセスが多く用いられている。

プラズマイオンプロセスにおける重要な装置は、イオンシース形成のための電源とプロセス容器である。現在までに製造された電源としてはイオン電流2000 A、パルス幅10マイクロ秒、印加電圧-10 kV、繰り返し周波数1000 Hz：電源容量200 kWがある。イオンシースは過渡的に作られ、時間発展する。その大きさはプラズマ密度と印加するパルス幅に依存するが、条件によっては半径500 mmくらいに達する。この場合、プラズマの維持のためには直径1000 mmの容器が必要である。

プラズマ源としては、カーボンを含む炭化水素系ガスや金属を含む気体プラズマによるイオン化、固体の金属電極のプラズマ化による金属種の直接的な電離、あるいはスパッタ金属種の高周波プラズマによるイオン化などいろいろな種類のプラズマ源を利用して、いわゆる物理蒸着（Physical Vapor Deposition, PVD）のみならず化学蒸着（CVD）法による成膜（窒化物、酸化物、炭化物）が行われる。

プラズマイオンプロセスは、産業用部材あるいは民生品の表面処理のみでなく、半導体製造における極浅接合（Shallow junction）のためのイオンドーピング（Doping）やキャパシタ生成のために高アスペクト比をもつトレンチ内の表面処理、生体融和性を目的として医療用部材のための表面処理など多方面への応用が期待されている技術である。

2. プラズマイオンプロセスの長所と短所

総括として、プラズマイオンプロセスの長所と短所を列举すると、以下のようになる。

長所：

- (1) 基材の駆動方式が不要である
- (2) 基材の形状に依存しない方式である
- (3) スルーボットが大きい
- (4) 基材の質量や大きさに関係なく一様な処理が可能である
- (5) 関連して、大小の基材が混在する場合も一様な処理が可能である
- (6) 装置構成が簡単である
- (7) 均一な表面処理ができる
- (8) 処理時間が基材の形状に依存しない
- (9) 熱拡散による深部処理も可能である
- (10) 視線入力処理でなく、複雑形状物への処理が容易である。
- (11) 表面処理に対する融通性が大きい
- (12) 作業環境がよい

- (13) 高いドーズ量にて処理が可能である。
 - (14) 極浅接合などにおいてイオン電流値を大きくできる
 - (15) 広い範囲においてイオンエネルギーを得ることができる
 - (16) 高い圧力における処理も可能であり、反応性蒸着の最適圧力の選択が容易である
 - (17) プロセスの組み合わせが容易である
- 一方、短所としては
- (1) イオン種の選択（価数など）ができない
 - (2) イオンのエネルギーが単一ではない
 - (3) 高電圧の印加の際にはX線の発生がある
 - (4) 2次電子の生成に基づく電流成分が存在し、電源容量が大きくなる

などがあげられる。

3. 三次元形状物処理に関する検討項目

4つの課題に分類してそれぞれの項目を列举すると以下のとおりとなる。

- (1) プラズマの発生方法とパルス電圧の印加
 1. ガスプラズマの発生方法
 2. 金属プラズマの発生方法
 3. 定常プラズマあるいはパルスプラズマ
 4. 最適なプラズマ源の組み合わせ
 5. プラズマパラメータ（プラズマ密度、電子温度）の制御
- (2) 理論の構築とシミュレーション技術
 1. 基材と皮膜との間の界面の物理
 2. 過渡イオンシースの挙動
 3. 電界と磁界の相互作用とイオンの振る舞い
 4. イオン注入ドーズ量の *in-situ* 算定および2次電子の見積もり
- (3) 表面改質の評価
 1. パルスイオン注入による注入深さの算定
 2. 高速エネルギーによる注入と拡散深さの見積もり
 3. プラズマパラメータの評価および計測
 4. プラズマイオン注入法と従来法の得失の見極めと表面改質法の選択
 5. 皮膜のトライボロジー特性の的確な判断
- (4) システムの構築と計測方法
 1. 安定なプラズマの生成と高電圧パルス発生の的確な運転
 2. プロセス容器、フィードスルー、漂遊容量の低減にかかわる最適設計
 3. 高電圧および基材電流の測定とイオン注入ドーズ量の算定

文 献

- 1) 電気学会・プラズマイオン高度利用プロセス調査専門委員会編：「プラズマイオンプロセスとその応用」、オーム社、平成17年10月。