精密機器部品のための

イオン加工技術

松 永 正 久*

Processing Techniques by Ion for Precision Machine Parts

Masahisa MATSUNAGA*

今年の3月、千葉大学で行われたシンポジウムの内容を紹介し、イオンによる各種の加工について解説した。

1. 緒 言

イオン加工技術（広い意味の加工で、イオン注入、イオンエッチング、イオンプレイティングなどを含む）は、LSIを代表とするエレクトロニクス分野においては定着しているが、機器部品に対してはまだあまり普及しておらず、試作の域を脱しないものが多い。

本稿は1983年3月29日、千葉大学工学部において行われた標記題目のシンポジウム¹⁾の概観であり、将来の加工及び表面処理の展望として、本協会の会員の方々の参考となる点も多いので、多少の補足を加えてここに紹介することとする。

従来、このような技術の解説はきわめて多く、本協会会誌にもたとえば直江²⁾による解説が掲載されており、特集号³⁾も出されているが、多くは電子工業への応用を主眼としたものであり、標記のように機器部品を対象としたものはあまり見当たらないので、この点を強調して解説を試みたい。したがって装置などについては前記の文献に詳細に記載されているので、ここでは省略した。

2. 講演題目及び講師

シンポジウムの講演題目及び講師は下記のとおりであった。

イオン加工法の概要

東京理科大学工学部 谷口 紀男

各種パタン加工技術

日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所

中山 了, 松尾 誠太郎

平面, 先端形状加工への応用

東京理科大学工学部 宮本 岩男

球面, 非球面加工への応用

理化学研究所 金釜 憲夫

精密機器部品のためのイオン加工技術

—トライボロジへの応用—

大阪大学 大前 伸夫

コーテッドチップへの応用

広島大学工学部 桑原 改造

イオン注入による材質制御

理化学研究所 岩木 正哉

イオン加工の将来展望

千葉工業大学 松永 正久

3. イオンによる加工の種類

イオンを用いる加工としては、次のように多種類のものが行われており、さらに新しいものが開発されるであろう。

(1) イオンエッチング, イオンミリング, イオ

* 千葉工業大学 精密機械工学科 教授
〒275 習志野市津田沼2-17-1
☎0474-75-2111

* Chiba Institute of Technology
17-1, Tsudanuma 2-chome, Narashino-shi, Chiba 275

ン加工、スパッタエッチング（いずれもイオンによる微細加工法である。）

(2) イオンプレーティング、スパッタ蒸着（イオンを用いる薄膜作製を意味する。）

(3) イオン打込み（高エネルギーのイオンを材料の表面下に打込んで、表層を改質する技術）

(4) イオンビームミキシング（蒸着した蒸着膜の上から、または蒸着中にイオンビームを打込み、蒸着膜と母材化の合金化・化合物化を促進する技術。）

以下、これらの技術について説明する。

4. イオンによる微細加工

イオンによる微細加工には次のような種類がある。

(1) イオンビーム加工

数KeVに加速された不活性ガス（Arが普通である）を用い、それを加工物に打ちつけて、加工物原子を表層よりたたき出すものである。

このようにイオンによって表面の原子のたたき出される現象（たたき出された原子核はあるものは電荷をもってイオンに、あるものは中性原子となる）をスパッタリングと称する。この方法は物理的な表面研究の手段としては定着している。

たとえば、スパッタされた2次イオンの質量分析を行うことにより、表面に存在する原子の種類を知るSIMSまたはIMA、表面研究の場合において清浄面を作製する技術、さらに（たとえばオージェ電子分析）表面よりエッチングを行い次第に内部構造を調べる技術、などこれである。

この場合注意しなければならないことは、原子核の種類によってスパッタされやすさが違うことである。したがって、スパッタリングによって生成した表面の原子組成は必ずしも下地と同一ではない。

イオンビーム加工の平面及び先端形状加工への応用例として、次のような対象があげられている。

(i) 圧電変換素子や発振子の作成（薄膜化）や調整（ LiNbO_3 と水晶を $2\mu\text{m}$ くらいに薄片化し、 100MHz オーダの発振子などを作るのに用いる。）

(ii) 電子顕微鏡試料の作製（透過型電子顕微鏡では試料を μm オーダまで薄くする必要があり、そのためにイオンビームを使用する。）

(iii) 非球面レンズの作製（非球面レンズ加工のためにガラスの加工特性と非球面創成の手法について研究が進められている。）

(iv) ブロックゲージの作製（ブロックゲージ作製のための加工面特性など検討されている。）

(v) ダイヤモンドの加工（ダイヤモンドの孔あけ、インデンタのポイント出しなど検討されている。）

(vi) 加工ひずみの除去（アルミナ $0.3\mu\text{m}$ の研磨材によるポリッシングにおいて、ガラスに生じたスクラッチの除去加工が検討されている。）

(vii) 生体埋め込み用材料の表面ライニング方法として使用することが検討されている。

(viii) 太陽電池（太陽光線の吸収効率を高めるため、銅又はニッケル上にWを核としてArイオンで円錐を成長させてゆく技術が開発されている。）

(x) フィルター（フィルタ用として $50\mu\text{m}$ くらいの薄膜に $4\mu\text{m}$ の単一孔を明けたり、 $0.7\mu\text{m}$ 径のマイクロフィルタを作るのに用いられる。）

電子工業においては、微細なイオンビームリソグラフィまたはエッチング技術として、Gaなどの液体金属イオンを用い、数 10 kV 程度の加速電圧で約 $0.1\mu\text{m}$ のビーム径と数 10 ないし 100pA のビーム電流を使用する技術が開発されている。この技術がマイクロリソグラフィ技術として定着するかどうかは将来の問題である。

(2) イオンシャワ加工

イオンシャワ加工はイオン化室においてArなどの不活性ガスをイオン化し、 $500\sim 5\text{ kV}$ 程度で加速し、比較的広い面積で材料表面を衝撃して平面加工を行う装置であり、マスクを使用すればパターンによる加工ができる。

しかし、この方法は後に述べる化学作用併用のエッチングに比べてエッチング速度が遅く、 $50\sim 300\text{ \AA/分}$ であり、ほかにアンダーカット、スパッタされた分子の再付着などの問題があり、マスク方式としてはあまり使われていない。

(3) 反応性エッチング

イオンによるエッチングの際、工作物と反応性

のあるガスを導入してエッチング効果を高める方法であり、プラズマエッチング、反応性スパッタエッチング、反応性イオンビームエッチングなどいろいろの方法があり、LSI製造における主流技術として広く使用されている。

5. イオンプレーティング

イオンプレーティングには種々の方式があり、表面皮膜作製法として定着したように思われる。しかし、最初宣伝されたほどその効果が認められず、普及は遅々としているが、その用途は確実に増大している。

日本でもアメリカ（例．Hohman Plating Co. Inc.）でも、イオンプレーティング又はスパッタ蒸着装置を設置して加工を行う会社も出来、装置の市販品も数多く現われてきたので次第に普及するものと思われる。

イオンプレーティングの応用例としては次のようなものがあげられる。

(1) 装飾品

たとえばTiNの皮膜は美しい黄金色を呈し、耐摩耗性も良いので時計の外装などの金めっきの代用として使用される。

(2) 切削工具

切削工具へのTiN, TiC, Al_2O_3 などの被覆、いわゆるコーティットチップの効果は広く認識され、使いすて（スローアウェイ）チップの大部分はコーティングが施されるようになった。

コーティットチップの主流はCVD法であるが、イオンプレーティングでもCVDと同様な効果があることが報告されている。

その他の機械部品の耐摩耗性の向上に対しても期待できよう。

(3) ダイヤモンド状炭素及び立方晶窒化ボロン

ダイヤモンドはあらゆる物質の中で最も硬く、ビッカース硬さは結晶面方位によって違っているが8,000ないし10,000と報告されており、立方晶窒化ボロン（CBNと略記する）もそれに匹敵する硬さを有することで知られており、前者は古来より工具及び砥石材料として広く使われており、後者は最近に砥石材料として使用され、その効果が

確認されるようになった。

これらの材料は人工によって作ることもできるが、皮膜としての作製が最近脚光を浴びてきた。炭素をイオンプレーティングすることにより、ダイヤモンド状炭素（ダイヤモンドとは確認されていない）を生成したり⁵⁾、イオンプレーティングによってCBNを作るという報告⁶⁾は数多くあり、将来の研究問題として興味深い。

(4) トライボロジにおける応用

イオンプレーティングのトライボロジ方面への応用はNASAによって始められ、金のイオンプレーティング薄膜が超高真空中で優れた摩擦特性と耐摩耗性を有していることが報告されている。我国においては、宮川ら⁴⁾は金及び銀のイオンプレーティング膜の真空中の摩擦特性を研究し、銀のほうが優れているという結果を見出している。

イオンプレーティング膜は真空中だけでなく、空気中においても効果があり、大前らはAu, B_4C , Cd, Crのイオンプレーティング膜による耐フレッティングの向上を報告し、金と銀の膜も空気中でも低摩擦特性と良好な耐荷重特性とを示す。

6. スパッタ蒸着膜

スパッタリングによってターゲットより離脱した原子を、対向する基板上に沈着させて薄膜を作る技術はスパッタリング又はスパッタ蒸着と称し、次のような特徴があるので広い用途を有している。

(1) ターゲットとして作製しうる物質であれば、多くの材料（PTFEのような有機物も含む）の膜を作製することが可能である。

(2) 基板にバイアス電圧をかけることによって、再スパッタをおこさせ、その際のスパッタ率の違いにより膜成分の規正が可能である。

(3) 基板の温度がそれほど上昇しないので、基板の熱変形や組織の変化をおこすことが少ない。

(4) 造膜速度が遅いので薄膜作製に適し、精密部品に適する。

(3)(4)はそれぞれ欠点ともなり、基板の温度が上昇しないことは、基板と皮膜との界面の拡散が無く、したがって密着性に問題があることがある。速度の遅いことは当然生産性が悪い欠陥となる。

生産性向上の方策の一つとしては、電子工業ではカセット方式による全自動化の装置が作られている。

エレクトロニクス方面への用途は別として、スパッタ蒸着の用途は、

(1) 自動車の内外装⁷⁾

主としてプラスチックへめっきすることによって、量産化・経済性・軽量化などの目的に適合するので広く用いられるようになった。

(2) トライボロジへの応用

トライボロジカルな応用として宇宙用・真空用の皮膜としてはイオンプレーティングと対比することができる。スパッタ蒸着はイオンプレーティングでは作ることのできない MoS_2 , WS_2 , PT-FE などの膜を作ることができるので、この方面の応用は極めて盛んである。スパッタリングによって作製した MoS_2 膜の特性に関しては筆者の総説⁸⁾がある。

このほかにもさらに高性能な膜作りをめざして、 CrB_2 , Mo_2C , Mo_2B_5 , MoSi_2 , Mo_2C , Mo_2B_5 , TiB , TiC , Cr_3C_2 , Cr_3Si_2 , TiN などのスパッタ蒸着膜の潤滑特性が研究されている。それらのうちから、どの皮膜（ほかの皮膜作製法も含めて）が最適であるかを考察するのは将来の課題である。

スパッタ蒸着膜は空気中におけるトライボロジ性の向上にも用いられ、たとえば動圧気体軸受への応用に関して川田⁹⁾の研究がある。

(3) 耐熱皮膜¹⁰⁾

高温腐食・高温酸化・拡散・疲れなどの防止のための皮膜としてスパッタ蒸着が利用されている。たとえば、ガスタービン翼や弁の耐熱処理として MCrAlY (MはNi, Co, NiCo, Ta, Hfなど) のスパッタ膜が利用されている。

(4) 薄膜センサ¹⁰⁾

表面温度センサや薄膜ひずみゲージなどを直接機械要素上にスパッタして作る方法が開発されている。

7. イオン打込み

イオン打込みは半導体のドーピング技術としては不可欠の技術となったが、そのほかの工業にお

いては研究は別として、実際に利用されている例は少ない。

半導体においては、0.00001原子%以下という極めて微量の不純物でも顕著な物性の変化を示すのに対し、金属工業や機械工業ではこの程度の不純物変化では有用な特性を示さないことが大部分である。

また、装置への投資と付加価値の問題も金属においては致命的である。イオン打込みが表面処理に適用される要件は、安価な打込み装置の開発、大量のイオンの打込み、生産性の向上などが急務であろう。

最近、工業的なイオン打込み装置の市販開始¹¹⁾や、イオン打込みを引受ける広告¹²⁾などが現われているので、実用は近いと思われる。イオン窒化のような形で簡単な装置でイオン打込みができるようになれば、用途も開けてゆくことであろう。

北田・鴨下¹³⁾は金属へのイオン打込みの応用例として、表面硬化・摩擦の減少・摩耗の減少・耐食性の向上・相変化の促進・化合物及び非平衡相の形成・磁性材料への応用・宝石の着色・透明体の屈折率の変化・放射線暴露のモニタ、などをあげている。このうち前4者についてはイギリスAERE (Harwell), 理研などにおいて精力的に研究が進められている。

8. イオンビームミキシング

イオンビームミキシングは河野¹⁴⁾の記述によれば次の通りである。「あらかじめ母材に蒸着した蒸着膜の上から、あるいは蒸着中にイオンビームを打込み、蒸着膜の合金化や化合物化をはかるとともに、蒸着膜と母材との合金化・化合物化を促進し、蒸着膜の密着性を飛躍的に向上させようとする方法である。」とし、その例として、Cu単結晶上へのAu, Agイオンの注入に際し、直接Au, Agを注入する場合と、あらかじめAu, Agを蒸着した後にXeイオンを打込んだ場合の境界層を比較し、2桁少ないXeイオンの照射で、金属の直接イオン打込みと同等の効果が得られることを示している。

以上の点より河野¹⁴⁾も述べているように、イオ

ンビームミキシングがイオン打込みに比して優れているのは次のような点である。

(i) 希ガス用イオン源は重金属イオン源に比して製作が容易である。

(ii) 少量のイオン打込みで、大量(2桁大)打込みと同等の効果が得られる。

(iii) 蒸着膜と母材との境界層の改善, したがって低温での密着性の改善が得られること。

(iv) 作製条件によっては密着性の良い Si_3N_4 , TiN , SiO_2 などの窒化物や酸化物の皮膜作製が期待できること。

9. 結 言

以上, イオンを使用する加工技術について, 精密機器部品への応用を主眼として概要を述べた。このような技術はまだ始まったばかりであり, 将来の発展が期待される。

現状において設備費・付加価値・量産性の問題から使用不可能であっても, このような点は日進月歩の勢いで改善されており, 用途もますます拡大している。このことは現在, このような装置のメーカーが注文に応じきれないほど活況を呈していることから推察できる。常に注視を怠ってはならない。

参 考 文 献

- 1) 昭和58年精機学会春季大会シンポジウム資料 (1983) 1~53, 精機学会
- 2) 直江正彦; 金属表面技術, **30**, 216 (1979)
- 3) 金属表面技術特集号「ドライな表面処理」, **30**, 215~268 (1979)
- 4) 宮川行雄, 西村允, 野坂正隆, 西脇雄三; 潤滑, **22**, 803 (1977), **23**, 51, 59, 136, 144, 152 (1978)
- 5) T. J. Moravec and T. W. Orent; J. Vac. Sci. Technol. **18**, 226 (1981)
- 6) S. Schanfield and R. Wolfson; J. Vac. Sci. Technol. **20**, 323 (1983)
- 7) 宮城一陽; 本誌, **29**, 61 (1982)
- 8) 松永正久; 潤滑, **26**, 517 587 (1981)
- 9) 川田正国; 精密機械, **46**, 946 (1980)
- 10) T. Spalvins; NASA Tech. Memo. 81727 (1981)
- 11) Verdict Ion Technology Ltd.: Metal Finishing Plant and Processes, **18**, 115 (1982)
- 12) Spire, Surface Modification by Ion Implantation (1980)
- 13) 北田正弘, 鴨下源一; 日本金属学会々報, **15**, 489 (1976)
- 14) 河野昌; 機械技術, **30**, 7 (1982)

統計処理プリンター機能付 電解式メッキ膜厚計 モデルGP-08、G-07 新登場

新型GP-08は、従来の器械に全自動統計処理プリンターを内蔵し、増々、便利になりました。G-07は計算器が付いており、校正計算、統計処理等の計算(プリント)が簡単に出来ます。

モデル GP-08

膜厚計の総合メーカー販売輸出/英国エルコメーター社総輸入元
電 測 工 業 株 式 会 社
ELEC FINE INSTRUMENTS CO., LTD.
東京都中野区中央2-47-1 電話(03)365-0861(代表)
テレックス 232-3131

モデル G-07