

◇ 特集 先端エネルギービーム加工技術 ◇

多価イオンビームによる露光技術

Highly charged ion beams applied to exposure process

百田佐多生*
Sadao MOMOTA

Key words : highly charged ion, ion beam lithography, micro-nano fabrication

1. 緒言

半導体の分野を中心に発展してきた露光技術は、被加工素材に光を照射することによって微細なパターンを形成する技術である。この技術の一つの進展は、パターンをさらに精密化するために、より短波長の光源やその照射システムの開発に向かっている。その一方で、MEMS の分野などでは、材料により高度な機能を付与するため表面方向のみでなく深さ方向にも複雑な形状を形成することが求められている。このように微細な 3 次元構造を形成する技術として、物質中での直進性がよく深さ制御性が高いイオンビーム照射技術は有望な候補の一つである。

通常露光技術に用いられるイオンビームは、生成するのが容易な一価の正イオンである。近年のイオン生成技術、とくに ECR イオン源や電子ビームイオン源など多価イオン源の発展によって、多価イオンビームを露光技術に応用できる環境が整ってきた。この多価イオンビームは 1 価のイオンビームに比べて特異な現象を引き起こすことがわかってきており、この特徴が露光技術をより進展させることが期待できる。

ここでは、多価イオンビームの生成、物質との相互作用、装置構成、特徴を述べた後に、露光技術への応用に向けた取り組みについて紹介する。

2. 多価イオンの生成

現在、工業的に広く使用されているイオンビームは、通常は 1 価の正イオンである。1 価の正イオンは、中性原子から軌道電子をひとつ取り去った状態であり、電場の加速効果を利用することによってビーム化される。これに対して、多価イオンとは中性原子から複数個の電子を取り去った状態で、従来のイオン源で生成することは困難であった。

2.1 多価イオンの生成条件

原子内部の軌道電子は、正の電荷をもつ原子核の周囲で固有の軌道を回っている。正イオンを生成するためには、この軌道電子にエネルギーを与えて原子の内部から遠方へ取り去らねばならない。このときよく使われる手法は、高速電子を軌道電子に衝突させてはじき飛ばす、電子衝撃法である。たとえば、ヘリウム原子は図 1 のようにイオン化される。電子衝撃法ではじき飛ばされる軌道電子は最も外側の軌道にある外殻電子で、一度の衝突ではじき飛ばされる軌道電子は 1 つずつである。したがって、多価イオンを生成するためには、1 つの

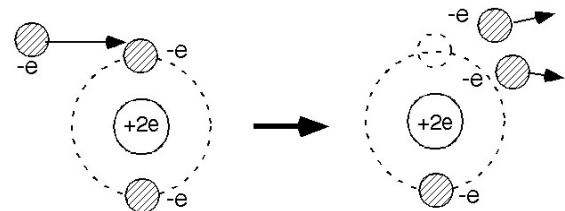


図 1 電子衝撃法によるイオン化

原子(正イオン)に対して連続して高速電子を衝突させる必要がある。また、軌道電子をはじき飛ばすのに必要な高速電子の運動エネルギーは、はじき飛ばされた電子が増加するに従って、つまりイオンの価数とともに増加する。以上より、多価イオンを生成するためには、高速電子が高密度に存在する空間を生成し、原子を多価イオン化に必要な時間その中に閉じこめることが必要条件となる。多価イオン源の一例として、高知工科大学で筆者が使用している ECR イオン源について次に概観する。

2.2 ECR イオン源による多価イオンの生成

多価イオンは、ECR イオン源内に形成されたプラズマ中で生成される。プラズマ中に存在する電子は、電子サイクロトロン共鳴(ECR)によって加熱されて高エネルギー状態(>1 keV)にあるため、内殻軌道の電子まではじき飛ばすことができる。ECR の共鳴条件は、マイクロ波の周波数(10 GHz)と永久磁石が発生する磁場強度によって決まる。この磁場は数 kG 以上の強い磁場で、図 2 のような強度分布をもつ。この磁場はミラー磁場と呼ばれ、高エネルギーの電子をプラズマ容器内に閉じこめる役割ももつ。プラズマ中に導入されたイオン化ガスは、この高エネルギー電子と何度も衝突を繰り返し、外殻から内殻に向けて順に軌道電子がはじき飛ばされていく。

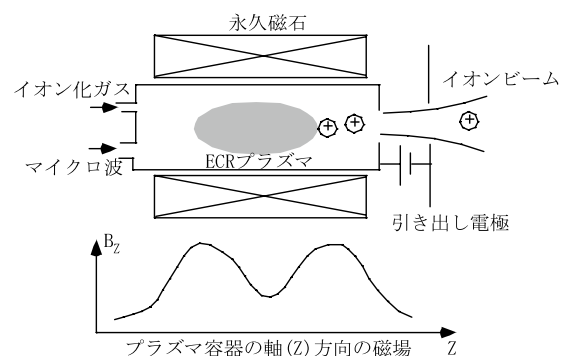


図 2 ECR イオン源の原理図

* 高知工科大学工学部: 〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口

〈学会受付日:2009年2月9日〉

このようにして生成された多価イオンビームを物質に照射すると、どのような露光効果を引き起こすのであろうか。

3. 多価イオンビームと物質との相互作用

物質に照射されたイオンビームは、物質中の原子と衝突を繰り返し、そのエネルギーを減少させていく。イオンの持つ運動エネルギーが0になるとその位置で静止し、その表面からの深さを飛程と呼ぶ。この飛程はイオンビームが当初もっていた運動エネルギーにほぼ比例し、イオンビームの加速電圧によって容易に制御できる。

イオンビームが物質に与える露光効果は、イオンと物質原子との衝突過程によって決まる。このイオンと原子の衝突過程は、多価イオンと1価イオンでは主に2つの点で異なる。1つはポテンシャルエネルギーの効果で、もう1つは衝突時の運動量移行の効果である。

3.1 ポテンシャルエネルギーの効果

多価イオンは、イオン化の際に大きなイオン化エネルギーを与えられており、静電的に高いエネルギー状態にあると言える。このイオンが持つ静電的エネルギーを、ポテンシャルエネルギーと呼ぶ。このポテンシャルエネルギーは、価数の約2.8乗に比例し、Arイオンの場合は図3のように価数とともに急激に増加する。

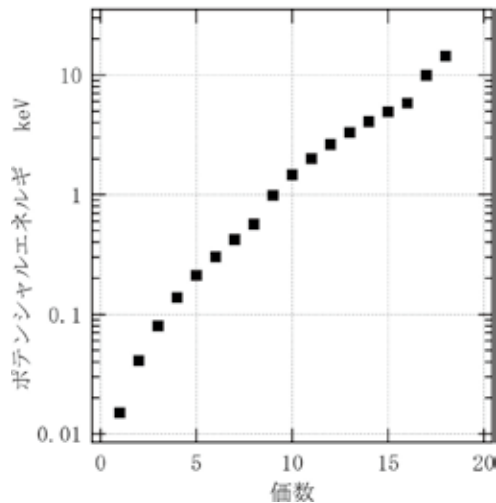


図3 Arイオンが持つポテンシャルエネルギーの価数依存性

この大きなポテンシャルエネルギーは、多価イオンが物質表面付近で物質原子との間の電子の移動を通じて物質に付与される。たとえば、低速の多価イオンを物質に照射するとき、表面のスパッタリング加工がその価数とともに促進される。この効果はポテンシャルスパッタリングと呼ばれ、図4¹⁾のような結果が得られている。多価イオンのポテンシャルエネルギーが物質に与える影響は非常に大きいですが、表面のごく薄い領域に限定される。また、物質表面から吸い上げた電子を外殻のみにまとい、内部に中空状態を残したままの中空原子も観測されている。この中空原子は、原子物理学における興味の対象となっている。

3.2 運動量移行の効果

多価イオンが物質原子に接近するとき、原子の中心にある

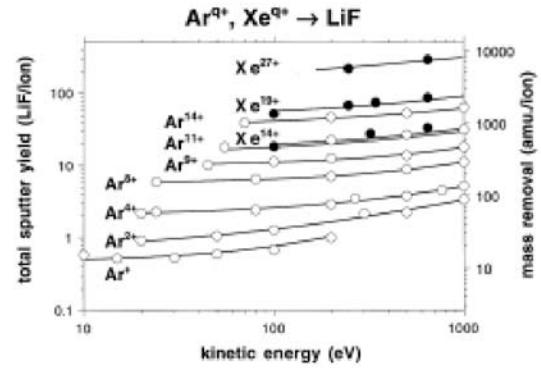


図4 多価イオンによるLiFのスパッタリング率の促進¹⁾

原子核との間にクーロン反発力がはたらく。この力によってイオンから物質原子へ運動量が移行し、物質原子を空間的に移動させる原因となる。通常、この力は軌道電子によって遮蔽されているが、多価イオンの場合は遮蔽効果が弱まり、物質原子への大きな運動量移行が起こる。物質中でのイオンのエネルギー減少率が価数とともに増加することが図5²⁾のように観測されており、この現象は先の運動量移行の効果によるものと理解されている。

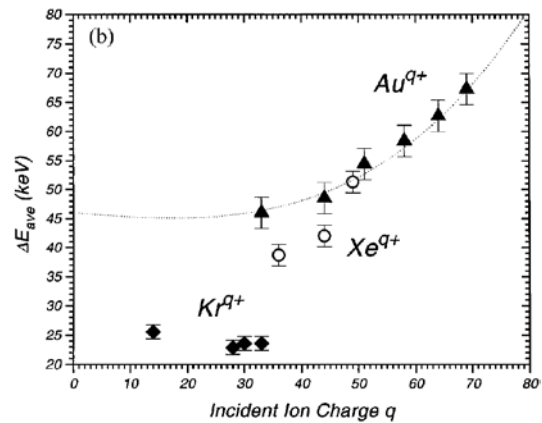


図5 炭素薄膜中における多価イオンのエネルギー損失²⁾

物質中に進入した多価イオンは、物質中の電子を捕獲することによって中性化が進む。したがって、ポテンシャルエネルギーほどではないが、多価イオンの運動量移行の影響範囲は表面付近に限定される。

4. 多価イオンビーム照射装置

多価イオンビームを露光技術に応用するため、多価イオンビーム照射装置が使用される。多価イオンビームの使用目的は基礎研究の広い領域にまたがっているため、研究目的に合わせて研究機関で独自に設計・製作しているのが実情である。たとえば、筆者の研究室で使用している照射装置(図6)は、多価イオンの生成(A)、加速(B)、分析(C)、照射(D)の4つの部分から構成されている。すでに第2章で述べた多価イオンの生成(多価イオン源)を除く3つの部分に関して以下に述べる。

4.1 多価イオンの加速

イオンは、電極が発生する電場によって加速される。この加

速によって得られるイオンビームの運動エネルギーは、加速電圧 V とイオンの価数 q に比例する。したがって、多価イオンは同じ加速電圧で 1 価イオンより高い運動エネルギーを獲得することができ、物質中での飛程も長くなる。この高い加速効率も、多価イオンビームの特徴である。

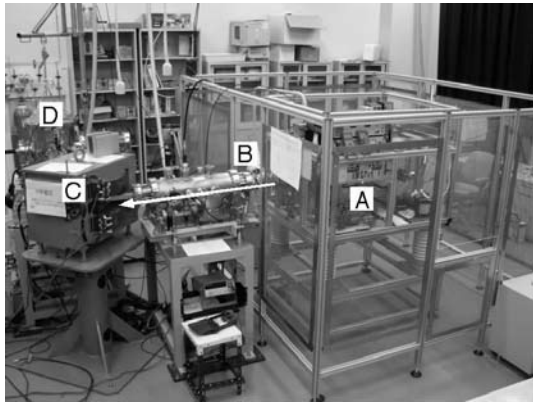


図6 多価イオンビーム照射装置

4.2 多価イオンの分析

ECR イオン源から引き出されるイオンビームには、価数・元素ともに複数の種類が混入している。特定のイオンのみを照射するためには、イオンビームを分析し目的の価数イオンのみを分離する必要がある。このために分析磁石(図6C)を用いる。磁場中を運動する荷電粒子(イオン)の軌道が、イオンの質量、速度、価数に依存することを利用している。

4.3 多価イオンの照射

加速・分析した多価イオンビームを静電レンズで収束し、露光したい材料に照射する。イオンの照射量は、被照射材料に流入する電荷量として計数できる。

5. 多価イオンビームの露光技術への応用

3章で述べたように、多価イオンビームはとくに物質表面で強い反応性を示す。この強い反応性を利用して、図7のように幅広い分野への応用が期待されている。この章では、多価イオンビームの応用にむけた最新の研究を紹介する。

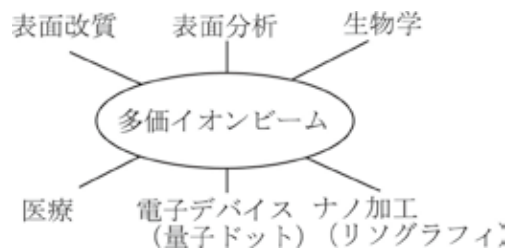


図7 多価イオンビームの応用

5.1 量子ドットの生成

Meguro³⁾らは、8 価で低速の Ar ビームをグラファイトに照射し、その表面にナノメートルサイズのダイヤモンドを形成した(図8中の黒い部分)。これは、8 価の Ar イオンがもつ大きなポテンシャルエネルギーによって、 sp^2 結合(グラファイト)から sp^3 結合(ダイヤモンド)への炭素結合の組み替えが起こったと解

釈された。I-V 特性の測定によって、このナノダイヤモンドが半導体としての機能を有することが確認された。このナノダイヤモンドのサイズや配置を制御できるようになれば、量子ドットとして従来のトランジスタの性能をはるかに越える半導体デバイスを実現できる。

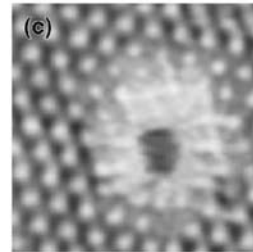


図8 グラファイト中に生成されたナノダイヤモンド³⁾

5.2 イオンビームリソグラフィ

Gillasp⁴⁾らは、電子ビームイオン源で生成した多価 Xe イオンを使って PMMA を露光し、多価イオンを用いた初めてのイオンビームリソグラフィによる加工を行った。その結果、多価イオンがリソグラフィにおける露光感度を向上させることがわかった。この時の加工深さは数十 nm 程度であった。

筆者ら⁵⁾はより深い加工を目指し、Ar の多価イオンビームで SOG を露光し、マスクを使ったイオンビームリソグラフィ加工を行った。加工後の SOG 表面にはマスクパターンが転写され、その加工は図9のように 100nm 以上の深さとなった。1 価と 9 価の Ar イオンで照射量(Dose)を変えながらこの加工深さ(D_{max})を測定した。すると、最適な照射量での加工深さが、9 価のほうがより深くなることがわかった(図10)。

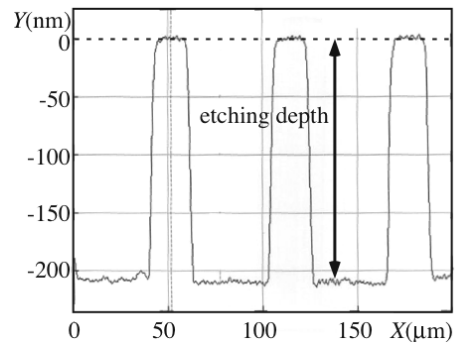


図9 リソグラフィ法によって加工された SOG の段差構造⁵⁾

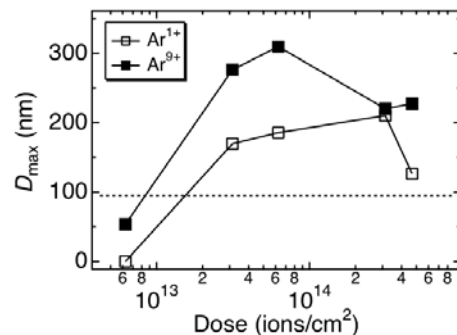


図10 Ar イオンの照射量と加工深さの関係⁵⁾

図 10 中の点線は、SOG 中における Ar ビームの飛程を表しており、9 価の場合は飛程の 3 倍程度まで加工が進んでいる。この現象は、多価イオンの照射効果が表面付近に限定されると述べた 3 章と矛盾するように見える。照射された多価イオンは SOG 中の電子を次々と捕獲し、100nm の深さに到達する頃にはその大部分が 1 価あるいは中性状態になっているものと予想される。したがって、図 10 に見られる効果は、多価イオンが SOG 表面付近で起こした現象の二次的効果によって説明されないとはいけない。たとえば、表面付近で発生した衝撃波や二次電子の生成が多価イオンの場合促進され、この影響が深い領域にまで達している可能性がある。Deshkovskaya⁶⁾は、イオンビームを照射したときに表面付近で発生する衝撃波は、SOG のようなガラス材料では深部にまで伝わりやすいと述べている。

多価イオン効果は、電子捕獲やクーロン力の遮蔽効果が小さい絶縁体で、より顕著になると予想されている。筆者らは同様な実験をシリコン露光に関しても行った。その結果、SOG (図 10) のような多価イオン効果は観測されなかった。しかし、同じ加速電圧でも価数によって獲得する運動エネルギーが異なる。このことが図 11 のように加工深さの増加として観測され、9 価の場合は約 800nm の深さまで加工できた。

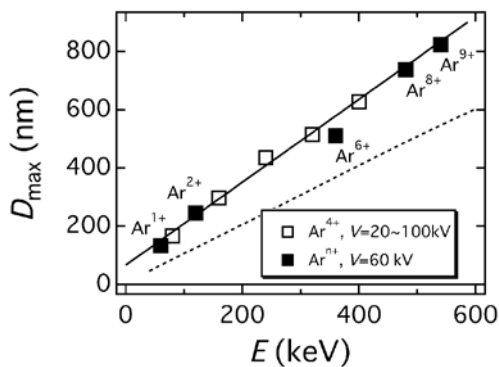


図 11 Ar イオンの価数による加工深さの変化⁵⁾

6. 応用に向けた課題

以上述べてきたように、多価イオンビームは物質表面や内部で高い反応性をもち、幅広い分野への応用を目指して研究が進められている。この研究を効果的に進めるためには、以下の 2 つの課題を解決しないとはいけない。

1 つは、多価イオンビームが物質内部に及ぼす効果である。多価イオンビームが物質表面で引き起こす現象は、実験・理

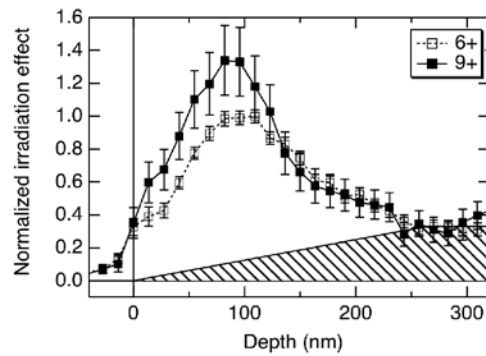


図 12 シリコン結晶中に生成された格子欠陥の深さ分布⁷⁾

論の両面で進められている。しかし、物質内部に引き起こす現象の解明はあまり進んでいない。筆者らは Ar イオンビームをシリコン結晶に照射し、結晶中に生成された格子欠陥の深さ分布を測定した⁷⁾。その結果(図 12)、欠陥生成が多価イオンの照射によって促進され、この効果が表面付近で顕著であることが示唆された。このような基礎データが、さらに必要である。

もう 1 つは、多価イオンビーム生成技術である。より多価の、あるいはより高強度の多価イオンビームを生成できるイオン源の開発が必要である。商品化されたものとして、pantechnik 社の ECR イオン源(NANOGAN⁸⁾)や dreEBIT 社の電子ビームイオン源(Dresden EBIS⁹⁾)などがあり、さらなる性能の向上が期待される。

7. 参考文献

- 1) F. Aumayr, P. Varga:HP. Winter, Potential sputtering: desorption from insulator surfaces by impact of slow multicharged ions, International Journal of Mass Spectrometry, 192 (1999) 415.
- 2) T. Schenkel et al.: Charge State Dependent Energy Loss of Slow Heavy Ions in Solids, Physical Review Letters, 79 (1997) 2030.
- 3) T. Meguro et al.: Nanoscale modification of electronic states of HOPG by the single impact of HCl, Nucl. Instr. and Meth. B 235 (2005), 431.
- 4) J.D. Gillaspay, D. C. Parks, L.P. Ratliff: Masked ion beam lithography with highly charged ions, J. Vac. Sci. Technol., B 16 (1998) 3294.
- 5) S. Momota et al.: Highly charged ion beam applied to lithography technique (invited), Rev. Sci. Instrum., 79 (2008) 02C302.
- 6) A. Deshkovskaya: Ion beam-stimulated processes in glasses, Nucl. Instr. and Meth. B 166-167 (2000) 511.
- 7) S. Momota et al.: Analysis of Si crystal irradiated by highly-charged Ar ions using RBS-channeling technique, to be published in Nucl. Instr. and Meth. B.
- 8) C. Bieth et al.: Proceedings of the 14th International Workshop on ECR Sources, Geneva, (1999) 147.
- 9) G. Zschornack et al.: Compact electron beam ion sources/traps; Review and prospects, Rev. Sci. Instrum., 79 (2008) 02A703.