総 説

イオン注入による表面層の改質

岩 木 正 哉*

Surface Layer Modification by Ion Implantation

Masaya IWAKI*

Ion implantation, which has made great progress as a method of impurity doping in semiconductors, has lately attracted considerable attention as a surface modification process for metals, ceramics, polymers and other materials. This report reconsiders ion implantation processing from the standpoint of surface layer treatments (i.e. by comparing it with physical or chemical vapour deposition), and a related technique known as ion beam enhanced deposition is introduced. The ability of high fluence implantation to form new metastable surface alloys and compounds is described and as an example the reasons for improvement in the wear resistance of steels by nitrogen implantation are explained.

Key Words : Ion, Ion Implantation, Thin Film, Mixing, PVD, CVD

1. は じ め に

半導体, 特にシリコンへの不純物添加法として研究・開発されてきたイオン注入法は, 今日 LSI 製造工程における不純物添加などで重要な役割を果たしている。この技術がなかったら現在の LSI は存在しなかったといっても過言ではない。

半導体へのイオン注入で利用されてきたエネルギーは通常 200keV 以下であった。この技術を更に発展させ 1MeV 以上のエネルギーを利用すると, 新しい素子の開発や素子の微細化に伴って発生した種々の問題を解決できる可能性があることと指摘されている¹⁾。この高エネルギーイオン注入の応用は堆積薄膜層を通して不純物を添加したり, 基板内に埋め込みシリサイドなどの金属層や酸化層などの絶縁層を形成することなどが挙げられている。これらの手法の開発は金属などの表面改質に新たな道を拓くものと期待されている。

金属を対象としたイオン注入技術は, 表層合金化やセラミックス化などを行い, 金属表面層の耐食性や耐摩耗性を改善することが目標とされた²⁾。セラミックスへのイオン注入では, 表層を異種セラミックスにすることや金属化などが目標であった³⁾。これはセラミックス/セラミックス接合部の強化やセラミックスの脆性を表層金

属化で補うためである。

最近ポリマーへのイオン注入が注目され始めた。ポリマーは無機材料よりも遥かに多く存在する材料である。この材料は放射線損傷に弱いといわれ, したがってイオンビーム照射では破壊効果が大きく, 粒子添加効果は得難いと考えられていた。しかし, これまでの幾つかの研究結果では炭化現象が認められるものの, 明らかな不純物ドーピング効果が得られることや新しいラジカルができることなどが示された⁴⁾。

純粋炭素材へのイオン注入も活発に研究が進められてきた。単結晶炭素であるダイヤモンドは装飾品としても工具材としても魅力的な材料である。これまで工具としての寿命の改善や *p-n* 接合の形成などが試みられてきた⁵⁾。また, 炭素材は他の無機材料に較べ軽量であり, 化学反応しにくい材料であるため人工臓器材料としての利用も検討されている。

このようにイオン注入法は半導体の分野から徐々に裾野を広げ, 広大な材料科学の領域に浸透しつつある。ここではイオン注入法と現在利用されている PVD, CVD 技術の比較を装置の上から捉え直し, イオン注入法の利点を利用したイオンビーム増速蒸着などの関連技術を表層処理と表面被覆の観点から述べる。また, 高濃度イオン注入において形成される新しい物質やイオン注入に伴う付随効果, また具体的改質例については耐摩耗性の改善機構について述べる。

* 理化学研究所 (〒351-01 埼玉県和光市広沢2-1)
RIKEN [The Institute of Physical and Chemical Research]
(2-1, Hirose, Wako-shi, Saitama 351-01)

Fig. 1 Outline of an ion implanter.

2. イオン注入装置にみる PVD, CVD

イオン注入法とは真空中 (10^{-4} Pa) で添加したい粒子をイオン化し、静電界などで加速し、固体基板に照射することによる粒子添加法である。図 1 にイオン注入装置の概要を示す⁶⁾。本装置は、添加したい粒子をイオン化するイオン源、イオン源よりイオンを取り出し加速する加速器、必要なイオンを選別する質量分離器、照射基板上でイオンビームの均一性を保つためのイオンビーム走査器、イオンビームを照射する注入室および全系を真空にする排気装置から構成されている。現在利用されているエネルギーは数 10keV から数 100keV であるが、イオンビーム技術の進展と共に keV から MeV へと利用できるエネルギー範囲を広げている。

このイオン注入装置とプラズマ CVD 装置および PVD 装置などを比較する。結論として言えばイオン注

入装置のイオン源は一種のプラズマ CVD 装置である。すなわち、イオン源内に導入された気体は電子と衝突しイオン化するが、イオン化室内は電子とイオンが共存するプラズマの世界である。イオン注入の場合はこのプラズマからイオンを取り出し加速する。一方、プラズマからイオンを取り出さず、イオン化室内にプラズマをとじ込み、内壁に薄膜をコーティングすることはプラズマ CVD の一種である。したがって、アセチレンガスを導入し炭素イオンビームを得ようとする場合、放電条件によっては炭素ビームが得られずイオン化室内壁への炭素薄膜コーティングがおこる。

イオン化室内へのガスのフロー量が多く、イオンの取り出し口からイオンと多量の中性粒子が出る場合は、一種の PVD、すなわち、イオン化プレーティングと等価になる。また、取り出したイオンビームが発散し、引き出し電極に照射されると電極材料がスパッタリングされイオン源外壁にコーティングされる。これがイオンビームスパッタ蒸着である。イオンビームが取り出されたとして、質量分離器の前までを一つのシステムとして利用する方法が簡易型イオン注入器である。すなわち、窒素専用イオン注入装置はこのシステムで市販されている。

近年盛んに研究され始めたイオンビーム照射と真空蒸着を併用したダイナミカルミキシング (イオンビームアシスト蒸着、イオンビーム増速蒸着などと言われる) はイオン注入装置、もしくは簡易型イオン注入装置の注入室に蒸着装置を有したものである。この蒸着法には電子ビーム蒸着やスパッタ蒸着などがあり、使用法によって選択されている⁷⁾。

ともかくイオン注入法は道具としてのイオンの発生、イオンをビームとして高性能化させる加速器や質量分離器、注入室という処理室の距離が離れ、それらが独立に制御される。したがって、材料創成において制御性は優れているが処理能力は他の PVD や CVD に比べて劣る。逆に言えば PVD や CVD は処理能力は比較的高いが制

Table 1 Comparison between ion implantation, IBED (ion beam enhanced deposition), PVD (physical vapour deposition) and CVD (chemical vapour deposition).

Treatments	Ion Implantation	IBED	PVD	CVD
Features	Particle doping with non thermal equilibrium	Coating at room temp.	Coating at low temp.	Coating at high temp.
Treating Temperature	Free & possible at room temperature	Free & possible at room temp.	a few 100°C	~1000°C
Thickness	0.1~1 μ m	0.1~a few μ m	a few μ m	a few μ m
Treating Speed	Low	Low~Midde	Middle	High
Control of crystalline	Free	Free	Limited by Temp.	Limited by Temp.
Pressure	0.0001Pa	0.01~0.001Pa	0.1Pa	100Pa

御性に劣ると言えるだろう。この従来法とイオン注入法の谷間の技術、すなわちイオン注入の利点と PVD の利点を合せ持った方法がイオンビーム増速蒸着であると考えられる。これらの技術を比較した概要を表 1 に示す。

3. イオン注入

イオンビームと固体の相互作用を改質という観点から捉えると、三種の効果がある。第一の効果はイオンが数 10keV で加速されたときの付着効果、第二の効果は数 keV のイオン照射によるスパッタリング効果、第三の効果は数 10keV 以上で照射されたときの注入効果である。しかし、これらの効果をエネルギーによって厳密には区別できず、多くの場合これらの効果は混合して認められる。したがって、イオン注入法は第三の効果を利用した粒子添加法であり、イオンビーム照射による表面層の改質において注入効果が大きい場合はエネルギーに関係なくイオン注入もしくはイオン注入関連技術として位置付けたい。

イオンが固体に照射され侵入すると、侵入したイオンは基板原子と弾性および非弾性衝突を繰り返し、エネルギーを失い固体内に止まる。図 2 に示すように、侵入したイオンの飛跡の回りには衝突で弾き出された基板原子が更に衝突を繰り返し、その結果として多量の照射損傷が発生する。この非熱平衡下での粒子の侵入により固体基板表層には新しい物質や構造が形成され、表面層は母材と異なった性質を示すようになる。

注入したイオンの飛跡は侵入イオン毎によって異なるため、イオンは分布をする。この注入イオンの分布形状は図中に示すように、ある深さを最大濃度としたガウス分布で近似できる⁹⁾。また、照射損傷の分布は注入イオンの最大濃度の深さより浅い位置で最大になり、イオン

Fig. 2 Ion bombardment effects and depth distributions of implanted ions and damage.

Fig. 3 Average projected range ($\bar{R}_p$) of B, Al and Sb implanted in Fe, Al and diamond.

1; B→Al, 2; Al→Al, 3; Sb→Al
4; B→Fe, 5; Al→Fe, 6; Sb→Fe,
7; B→Dia., 8; Al→Dia., 9; Sb→Dia.

一個あたり数100個の原子を变移させる。

イオン注入により処理できる深さは注入イオンの分布の最大濃度の深さが一つの目安になる。注入イオンの侵入深さは、基板、イオン種、また利用するイオンの加速エネルギーにより決まる。図 3 に鉄、アルミニウム、ダイヤモンドへ B, Al, Sb をイオン注入したときの最大濃度の飛程をエネルギーの関数として示す。これまで利用されてきた 100keV 前後のエネルギーでは最大濃度の深さは 0.1 μm 前後であるから処理深さも非常に浅い。今後、MeV イオン注入が可能になれば μm オーダーに到達し、PVD などの従来法と同程度の処理深さが実現される。そのため MeV イオン注入装置の開発への期待は大きい。

イオン注入法もイオンビーム照射法の一つであるからスパッタリングが起こり、必ず表面が削り取られる。すなわち、イオン注入法は表面を削り取りながら粒子を添加する方法である。したがって、注入イオン分布へもスパッタリングの影響を考慮しなければならない。図 4 に Fe への Ti イオン注入、Al への N イオン注入の場合における注入イオン分布を注入量の関数として示す。Fe への Ti イオン注入におけるスパッタリング率を 3 atoms/ion, Al への N イオン注入のものを 0.3 atoms/ion とした。スパッタリング率が高いと注入イオン分布

Fig. 4 Depth distributions of Ti implanted in Fe (a) and N implanted in Al (b) calculated by the modified range theory.

は注入量の増加と共にガウス分布から変形し、最終的には最大濃度が最表面に表れる。このような分布は10~100 keVでのイオン注入においてすでに実験的に認められている。また、MeV イオン注入ではスパッタリング率は小さくなり、分布への影響は少ないだろう。

一方、スパッタリング率が小さいと注入イオンの最大濃度は母材原子濃度を越えることが予測される。しかし、実験結果は注入イオン濃度が母材濃度を越えず、内部から結晶成長することを示した⁹⁾。この内部からの化合物結晶成長がイオン注入法ならではの特徴であり、MeV イオン注入では新しい合金や化合物が埋め込める可能性がある。

高濃度イオン注入に伴う多量のスパッタリングは表面をクリーニングし、表面への残留ガスの吸着を促進させる。吸着層内の原子はイオンビームにより基板内に添加されることがある。これまでもFeへのTiイオン注入におけるCの混入、AlへのNイオン注入におけるOの混入などが認められている。これらの混入は注入室内の高真空化や残留ガス成分制御で防ぐことができる。

ともかく、イオン注入装置の構成、およびこれらの照射効果からイオン注入法は次のような特徴を有す。

- ①非熱平衡下での粒子添加プロセスであるから、添加したいイオンと添加する基板の組み合わせを自由に選択できる。

- ②添加するイオンの深さを加速エネルギーで制御できる。

- ③添加するイオンの量をイオンビーム電流密度と処理時間で制御できる。

- ④質量分離をするため添加粒子の純度が良く、イオンビーム走査により添加粒子の面上均一性が良い。

ただし、②、③についてはスパッタリング効果を考慮する必要がある、④の質量分離による添加粒子の高純度化は表面層改質には重要にならない場合もある。ともかく、イオン注入の最大の特徴は①である。

4. イオン注入と膜形成

イオン注入技術の重要な課題の一つがイオン種の多様化である。理化学研究所で表面層改質に利用したイオン種は47種であり、周期律表にある元素の約半分である。イオンにはイオン自身の特徴があるようにイオンビームにも特徴がある。この種々の特徴があるゆえにイオンビームを作る上にも難易度がある。したがって、イオンビームにより粒子の直接添加が困難なものは、薄膜形成とイオンビーム照射を併用したイオンビームミキシングによる表面層改質法が開発された。

イオンビームミキシング法は照射したイオンのカスケード衝突を主に利用する方法で、薄膜原子と基板原子を熱を用いずに混合する方法である。この方法によればイオン注入で作成した表層と同様の表層を作成できる可能性がある。ただしこの方法での改質する深さはイオンビームの到達距離に依存する。

イオンビームを利用して改質深さを厚くする方法がイオンビームアシスト蒸着および増速蒸着法である。この方法は蒸着しながらイオン注入を行うため原理的には膜厚に制限はない。作成される薄膜の組成はイオンビーム電流と蒸着速度に依存する。

これらの手法の概要を図5に示す⁶⁾。図中の①が直接イオン注入であり、金属への金属イオン注入で準安定表層合金の形成やセラミックスへの金属イオン注入で金属埋込層の形成などである。②がイオンビームミキシング法で薄膜を通してイオン注入することにより基板原子と薄膜原子の混合層を形成する手法である。③が界面ミキシング法で、薄膜と基板の界面付近のみを混合させる方法である。④の手法がイオンビームアシスト蒸着やイオンビーム増速蒸着法であり、真空蒸着とイオンビーム照射(イオン注入)を同時に行う方法である。

イオンビームアシスト蒸着とイオンビーム増速蒸着法はあまり区別されずに使われている。したがって、今後のためにこれらの用語を区別しておきたい。アシスト蒸着で利用するイオンビーム照射は利用したイオンの化合物を形成しない場合のこととし、増速蒸着で利用するイオンビームは添加イオンの化合物が形成される場合とし

Fig. 5 Ion implantation and other processes related to it.

て定義しておきたい。したがって、前者は薄膜と基板の密着性を向上させたり、膜の結晶性を制御するためのもので、後者ではそれと同時に添加イオンの化合物も形成される。ともかく、電子ビームによる真空蒸着とイオン注入を併用した技術は電動シェイパーの刃の処理において実用化されている。

以上のイオン注入プロセスと従来法の PVD を組み合わせると図 6 に示すような種々の表面層処理プロセスが考えられる。第一の方法がイオン注入法を前処理法として利用する方法である。すなわち、PVD などて形成する薄膜の密着性を向上させるために単なるイオンビームスパッタリングを利用せず、スパッタリングと新物質合成とを同時に利用し膜質を向上させる方法である。すでに鉄鋼材料への TiN コーティングにおいて前処理として N や Ti イオン注入が、またアルミニウムへの AlN コーティングにおいて N イオン注入が有用であることが証明されている⁶⁾。

第二の手法が薄膜を通してイオン注入するイオンビームミキシングである。これを連続して行う方法がイオンビームアシスト蒸着もしくは増速蒸着である。また、イオンビームミキシング層はイオン注入層と同様の性質を持つため、第一の手法と同様にミキシング層の上に PVD などにより高密着性の薄膜形成も可能であろう。

第三の手法が厚膜へのイオン注入である。ここで言う厚膜は $1\mu\text{m}$ 程度の膜厚で、薄膜は $0.1\mu\text{m}$ 程度である。厚膜形成法は PVD, CVD や電気めっきなど数多くの手法がある。厚膜へ通常のエネルギーでのイオン注入を行

Fig. 6 Combination of ion implantation with other surface treatments.

うと、厚膜の表層のみが改質されると考えられる。ただし、イオン注入により発生した照射損傷の拡散距離が数 μm であるならば厚膜と基板の界面にイオンビーム照射が影響を及ぼしているかもしれない。更に、粒界拡散が起こりうる可能性も十分にある。また、高エネルギーイオン注入では厚膜と基板の界面がイオンビームミキシングによって混合でき、厚膜の構造制御の可能性もある。ともかく、硬質クロミウムめっきへの N イオン注入では耐食性、耐摩耗性の改善が認められている⁶⁾。

5. イオン注入による耐摩耗性改善例

イオン注入により表面層の各種特性を改変した例は数多い。なかでも、超硬合金、鉄鋼、チタン合金などの耐摩耗性改善に関する研究は数多く試みられ、ベアリング鋼やチタニウム合金製人工股関節などでは実用化されている¹⁰⁾。また、射出成形金型や各種工具においても実用化試験が続けられており、一部においてはすでに実用化されていると思われる。

耐摩耗性改善のために最も多く利用される注入イオン種は窒素イオンである。特に鋼材への窒素イオン注入は基礎研究から応用研究まで広範囲に渡っている。この理由は窒素イオンビームが容易に多量に得られること、イオン窒化とイメージが重なることなどが挙げられる。しかし、窒素イオン注入とイオン窒化は本質的に異なり、

前者が非熱平衡処理であるのに対し、後者は熱平衡過程を利用することである。また、イオン注入では窒化層が内部から形成され、基板温度や添加量が自由に制御できるが、イオン窒化では窒化層は表面から形成され、処理温度も高い。

イオン注入による処理深さを注入イオンの最大濃度が存在する深さとみなすと、 $0.1\ \mu\text{m}$ 前後が窒素イオン注入による処理深さであろう。このような浅い改質層で耐摩耗性が改善される理由を探るために、数多くの研究が行われた。これまで得られた共通した結果は、以下の三点に集約される。

- ①窒素イオン注入により表層硬化が起こる。
- ②摩耗試験中にイオン注入した窒素が内部深くに侵入する。
- ③摩耗トラック上の組成分析結果は、未注入材では認められない酸素の混入がイオン注入材では認められる。

①の表層硬化は窒化物の形成により説明できる。また②は摩耗試験中に発生する転位網を介して窒素が移動した結果であると解釈されている。さらに③の酸素の混入結果は窒素イオン注入材の中で摩耗率が未注入材に比べ低下しているものについて認められているが、この理由は明確ではない。

以上の結果と摩耗粉の解析結果などを総合すると窒素イオン注入による耐摩耗性改善のメカニズムは次のようにまとめられる。すなわち鉄鋼表層には窒素イオン注入により「埋め込み窒化層」が形成される。この窒化層形成により表層硬化が起こり、初期摩耗率が低下する。この初期摩耗中に酸素が混入し、工学的には摩擦係数の低下、物理的には凝着が低下する。また、低摩耗率中の摩擦において発生する転位を介して注入した窒素の一部が内部へ移動する。転位を介した窒素の内部移動は埋め込み窒化硬化層の厚化を進行させる。これらの現象は未注入材の摩耗試験で認められた凝着摩耗が窒素イオン注入により酸化摩耗に移行することを示している。したがって、凝着（シビア）摩耗から酸化（マイルド）摩耗への摩耗機構の移行が摩耗率の低下を導き、耐摩耗性を向上させていると考えられる。このような結果は窒素イオン注入したチタン合金においても認められている。

これらの結果から窒素イオン注入で耐摩耗性向上が得られる一つの条件は表面から酸化がおこること、すなわち空気などに触れることである。この一つの証拠がチャックと棒材を利用した摩耗試験で認められた。これらの材料と滑り接触条件は、チャック材は連続接触、棒材は接触と非接触（空気に触れている）の繰り返しである。窒素イオン注入による耐摩耗性の改善は棒に対しては認められるが、チャックに対しては認められていない。すなわち、これは空気に触れる条件ならば耐摩耗性が改善

Fig. 7 Outline of ion beam processing for carbon thin films.

されることを示している。

ともかく、窒素イオン注入による耐摩耗性の改善の第一条件は表層硬化であり、この鉄鋼の表層硬化度はイオン注入中の基板温度が関係している。また、耐摩耗性を向上させる酸素の混入には注入した窒素の分布が関与していると考えられ、更なる基礎研究が重要である。したがって、窒素イオン注入鉄鋼の実用化にあたっては、MeV まで含めた注入エネルギー、注入量や注入基板温度などの注入条件の最適化を使用条件を含めて詳細な検討を行う必要がある。

最近、イオン注入による炭素材の耐摩耗性改善に関する研究が生体材料への応用の上で注目されている。炭素材が生体適合性に優れていることや小型軽量、また低 Z 数であるために注入したイオンの侵入深さが深いことなどがその理由に挙げられている。

イオン注入を含めたイオンビーム技術と炭素材の関係を図 7 に示す⁵⁾。現在最も盛んに研究されている関係はガス状炭素から炭素薄膜の形成であり、ダイヤモンド薄膜形成は最も注目されている課題である。形成された薄膜の結晶性変換制御も重要な課題であるが、研究例は少ない。また、炭素材への異種元素の添加は熱平衡過程では限定されるため、粒子添加へのイオン注入の役割は大きいと思われる。ともかく、ここには広大な研究領域が残されている。

イオン注入したグラッシーカーボン表層は比較的低注入量で非晶質を示す。これは Si, Ge など IV 属元素で構成された材料に共通する現象である。また、注入したイオンの分布は通常ガウス分布を形成するが、稀に再分布する場合がある。ともかく窒素イオン注入したグラッシーカーボンは耐摩耗性の向上を示し、その改善度は注入エネルギーと関係し、高いエネルギーほど良い。すでに MeV 注入においても良好な結果が得られ、この領域では MeV イオン注入は有用であろう。

6. お わ り に

本稿ではイオン注入法による表面層改質の特色とその周辺技術について概説した。詳細な解説は本特集号の他の解説を参照していただきたい。イオン注入の特徴と社会的認識の歴史と現状を振り返ると、“当面”イオン注入技術は基礎研究が重要であり、実用化にはイオンビーム増速蒸着が有望であろう。直接イオン注入が多くの分野で実用化されることを期待している。

(1988-5-2 受理)

文 献

- 1) 田村誠男; *Semiconductor World*, **6**, (14), 67 (1987)

- 2) 斎藤一男; *金属表面技術*, **39**, 563 (1988)
- 3) 日置辰視; *金属表面技術*, **39**, 586 (1988)
- 4) 岩木正哉; *静電気学界誌*, **12**, (3), 196 (1988)
- 5) 岩木正哉; *ニューダイヤモンド*, **4**, (1), 13 (1988)
- 6) 岩木正哉; *実務表面技術*, **34**, 402 (1987)
- 7) S.M. Rossnagel and J.J. Cuomo; *MRS BULLETIN*, **12**, (2), 40 (1987)
- 8) 岡部芳雄; *アイオニクス*, (90), 3 (1983)
- 9) 岩木正哉; *表面*, **25**, 676 (1987)
- 10) P. Shiohanshi; *Thin Solid Film*, **118**, 61 (1984)

参考資料

吉田清太, 難波 進, 岩木正哉監修; イオン注入表層改質技術 (サイエンスフォーラム, 1987)
 岩木正哉; イオン注入, 材料のプロセス技術 [1] 第6章, 材料テクノロジーシリーズ9 (東京大学出版会, 1987)

用 語 解 説

平均投射飛程 (Average Projected Range)

ターゲット材料に照射されたイオンは、ターゲット構成原子等との衝突により、エネルギーを失い静止する。その様子の概略図を図1に示す。イオンは n 回の衝突によりそれぞれ散乱され、それぞれの衝突において $r_1 \sim r_n$ の軌跡をとる。注入イオンは静止するまでの全飛程 R_t は、 $R_t = \sum_{n=1}^n r_n$ となり、この距離をイオンは実際に移動することになる。いま、イオンの入射点と静止点とを結ぶと、そのベクトルの深さ方向(図中Y軸方向)への投影長さ R_p が存在する。入射イオンは一定のエネルギーをもって照射されるが、表層の原子とはランダムな衝突パラメーターで衝突するので、 R_p の値は一つの値ではなくある広がりをもった値となる。この場合、 R_p の統計的平均値を平均投射飛程 $\bar{R}_p$ といい、その広がりを平均投射飛程の標準偏差 $\Delta \bar{R}_p$ といい、ピーク値の $1/\sqrt{e}$ での広がりを示す。

平均投射飛程はイオンのエネルギー、原子番号、質量数、ターゲットの原子番号、質量数などによりその値が決まる。実際の平均投射飛程の値はデータブック^{1), 2)}により簡単に求めることができる。一般的に、平均投射飛程の値は、最大1 μm 程度である。

図1 ターゲット中に注入されたイオンの軌跡と注入分布における $\bar{R}_p$ と $\Delta \bar{R}_p$ の定義。

文 献

- 1) J.F. Gibbons, W.S. Johnson and S.W. Mylroie; *PROJECTED RANGE STATISTICS-Semiconductors and Related Materials*-, 2nd. (Dowden, Hutchinson and Ross, Inc., 1975)
- 2) G. Dearnaley, J.H. Freeman, R.S. Nelson and J. Stephen; *ION IMPLANTATION*, p. 766 (North-Holland Pub. Co., Amsterdam, 1973)

(埼玉工業大学 岡部芳雄)