

■テクニカルノート■

中電流型イオン注入装置の導入

中田穰治^{1,4} 斎藤保直¹ 川崎克則² 服部俊幸³

Establishment of Medium Current Ion Implanter at Kanagawa University

Jyoji Nakata^{1,4}, Yasunao Saito¹, Katsunori Kawasaki² and Toshiyuki Hattori³

¹ Department of Information Science, Faculty of Science, Kanagawa University, Hiratsuka-shi, Kanagawa-ken, 259-1293, Japan

² Graduate School of Science and Engineering

³ Research Laboratory of Nuclear Reactor, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo-to, 152-8550, Japan

⁴ To whom correspondence should be addressed. E-mail: jyojin@info.kanagawa-u.ac.jp

Abstract: A medium-current-type ion implanter was introduced into Kanagawa University. This machine can be used for various purposes, for example, characteristic changes of various materials such as metals, semiconductors, or insulators. Doping various impurities to many kinds of semiconductors is one of the principal roles of semiconductor industries, to acquire controlled electrical conductivity. These features can be accomplished by irradiating various ion species at various energies for various doses. This implanter can implant ion species from hydrogen to atoms with a mass number around gold. The accelerated ion energy ranges from 5 keV to 200 keV. The most peculiar feature of this machine is the structure of the target holder, that is, endstation construction. Targets can be kept during ion implantation at temperatures from -200 °C using a liquid nitrogen cooling system to 1000 °C by heaters. The specification of these features cannot be achieved by any other ion implanter in the world. We sincerely hope that this machine will be widely used in Kanagawa University.

Keywords: ion implantation, semiconductor, doping, material modification

はじめに

イオン注入とは、イオンを固体に注入し、固体の特性を変化させる技術である。金属の表面処理や半導体工学など、さまざまな材料科学の研究などに用いられている。具体的には、電気的にイオン化した中性の原子を keV~MeV に加速し、固体や薄膜の表層（深さ数 nm~数 μ m 程度）に注入して、物質に物理的、化学的変化を与えることができる。¹⁻⁵⁾

目的

昨年、中電流型イオン注入装置が私学助成により導入された。これにより、物質を添加する際に大きな役割を果たすイオン注入が理学部においてできるようになった。従来は外注しなければできなかった技術である。しかし、装置を操作するのは非常に難しく、厚さ 10 数センチある説明書を全て読んでいては時間がかかる。そこで、本装置の原理や使い方をマスターし、初めての人にも使いこなせる使用マ

ニュアルを作成した。以下にこのイオン注入装置の構成や原理等を分かりやすく説明する。理学部、工学部の各研究室は是非この装置を利用して頂きたい。

中電流型イオン注入装置の構成

中電流型イオン注入装置の基本構成は、イオン源、質量分析部、加速部、スキャン走査部、およびエンドステーション（試料室）から成り、3つの独立した排気系によって常時真空に保たれている。加速部は質量分析部の前後にあるため、細かく分けると前段加速部、後段加速部といい、通常は加速部というのと後段加速部のことを表し、加速管とも呼ばれる。本装置は基本的には 200 kV まで出すことができ、前段加速電圧として 30 kV、後段加速電圧として 170 kV を用い、合計 200 kV となる。イオン源から後段加速部まで高電圧がかかるため、2 重の部屋の形状をしており、ハウジングと呼ばれる。この部屋

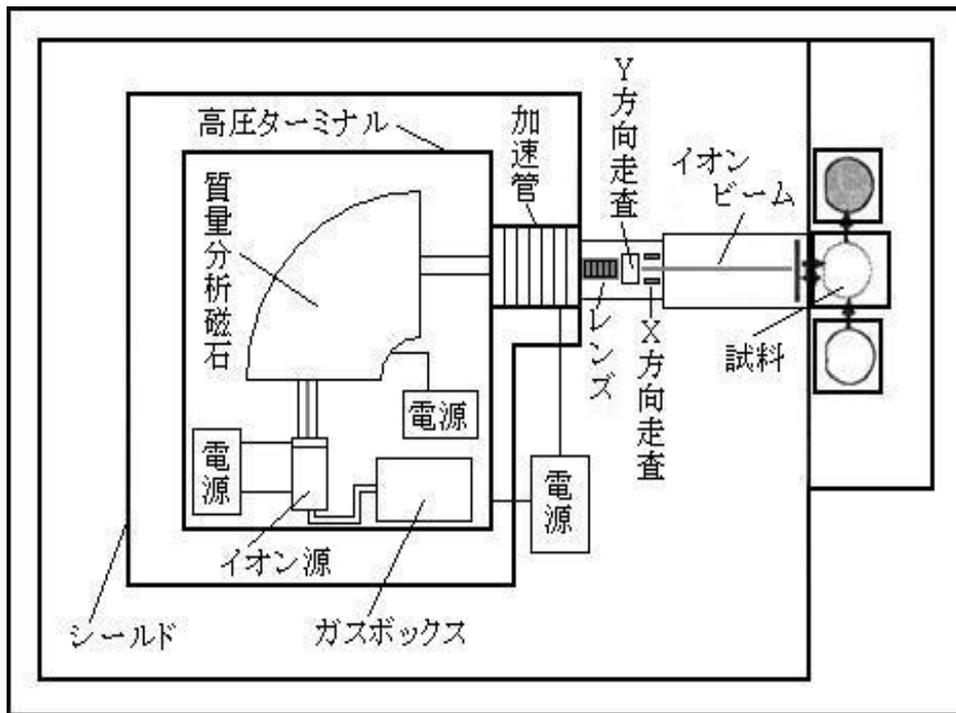


図1. 中電流型イオン注入装置の全体図.



図2. 中電流型イオン注入装置の全体写真.

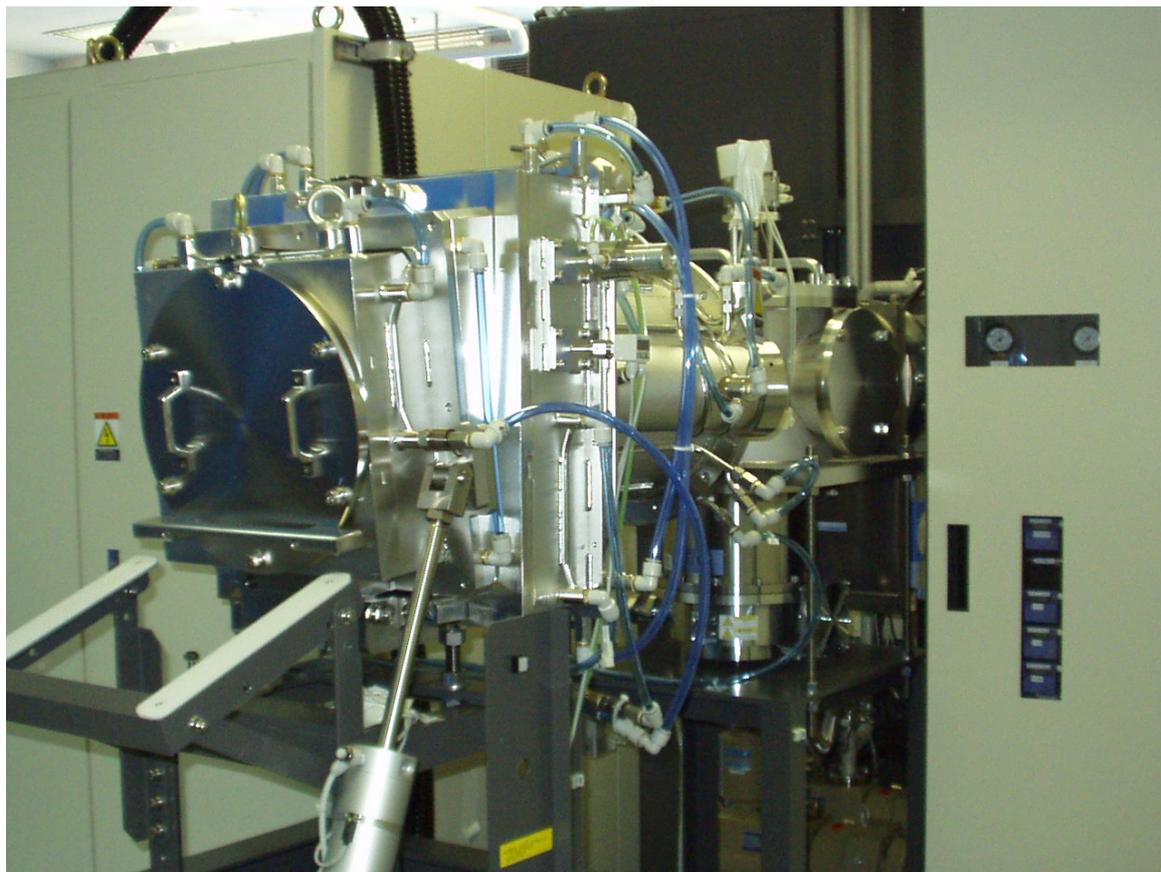


図 3. ターゲット部分 (エンドステーション部分).



図 4. 制御系の写真.

の内部の壁には鉛板が張られている。これは加速管またはその後方で、加速されたイオンと残留ガス分子あるいは装置構成部品との衝突で発生した電子が、イオン源側へ逆加速され、加速管を構成する金属部に衝突するときに放出される制動X線を遮断するためである。加速管の高圧電源の印加部、および質量分析部からイオン源までの部分に 170 kV の高電圧がかかっており、高圧ターミナルという。イオン源部はさらにこれより 30 kV 高くなっている。高圧

ターミナルの各機器への電力供給のため高耐圧の絶縁トランスなどが利用されている。イオン源部は、高圧ターミナル内でさらに絶縁碍子で絶縁されており、電力はやはり高耐圧絶縁トランスを介し供給される。ハウジングのドアには高圧インターロック機構があり、ドアが開いている場合、安全のため高圧が印加できない状態になる。高圧部で作業をするときは、必ずアース棒で高圧部に触れ、残留チャージを取り除くことが必要である。

イオン工学技術の基礎事項

プラズマの定義

プラズマとは、「プラスの電荷をもつイオンとマイナスの電荷をもつ電子がほぼ同じ密度で存在し、全体として電氣的にほぼ中性状態である粒子集団」として広く定義されている。プラズマには、大部分が中性粒子で、その一部が電離している「弱電離プラズマ」と、全ての粒子がプラスイオンと電子に分かれている「完全電離プラズマ」があるが、イオン工学技術では、弱電離プラズマを利用することが圧倒的に多く、「プラズマ」といえば「弱電離プラズマ」を意味する。

プラズマは、アークチャンバ内に設けた電極間に

印加した直流電圧による電界によって加速された電子とガス分子との衝突電離を利用して生成される。プラズマ中には、イオンや電子のほか、励起状態の原子、分子、あるいは分子の解離によって生じた中性活性種などが存在している。さらに、イオンと電子の再結合がプラズマ中チャンバ内において生じるプラズマは、電離と再結合が平衡状態にある粒子集団である。

アーク放電

電極の電圧を徐々に上げていくと、そこには電子の数に相当するだけの電流しか流れない。しかし、ある値まで上げると突然大きな電流が流れるようになる。これが放電の開始である。この放電電流を増加させていくと、コロナ放電、グロー放電が起き、その状態からさらに放電電流を増加させると、ある電流値で放電電圧が急激に低下する。この状態の放電をアーク放電という。アーク放電は陰極からの熱電子放出が基本となる。これは、電流・電圧といった電力が大きくなることにより陰極が加熱され、陰極面から熱電子が放出されるようになるためである。

ドーズ量（注入量）の定義

ドーズ量（注入量）とは、その名のとおり試料に注入されるイオンの数であり、試料の単位面積当たりのイオン注入量を表す。ビーム電流、注入時間などから算出できる。

ドーズ量 (ions/cm²) = ビーム電流 (A) × 時間 (秒) / 照射面積 (cm²) / 素電荷 (1.603E-19 C) / イオンの価数

「これだけのイオンを打ち込みたい」というときに、注入時間を算出するために用いられることが多く、ビーム電流を2倍にすれば、注入時間は半分になる。

イオン注入装置の構造と機構

イオン源部

イオン注入に用いるイオンを発生させる部位をイオン源と言い、イオン注入装置のビームラインの最上流に設置されている。イオン化物質としてガス、固体のいずれも利用可能であり、熱陰極の使用および低アーク電圧のため、イオンエネルギーのゆらぎが少なくビームの安定性に優れているという特長がある。イオン源では、真空中に導入した原子やガスに対して、プラズマ放電を起こしたり、電子ビームを照射したりすることにより、導入した原子の電子を離奪（電離）させて、イオン化する。プラズマ放電を起こすための方式としては、その電離のためのエネルギー供給方法の違いによって、直流型、高周波

型、マイクロ波型に分類され、さらに半導体生産用のイオン注入装置では直流放電型が用いられることが多く、さらにその形態によっても言い方が変わる。本装置は直流型のうちで熱電子発生用のフィラメントが螺旋または U 字型になっているバーナス型である。イオン源の主要部位としてアークチャンバがある。この中に蒸気・ガス化された原子を導入しつつ、アーク放電を起こすことで、イオンを得ることができる。アークチャンバの中では、フィラメントからの熱電子を、アーク電圧で加速し、これを蒸気・ガス化された原子に衝突させることで、原子から電子が奪われ、イオンが生成される。図5の箱状のと

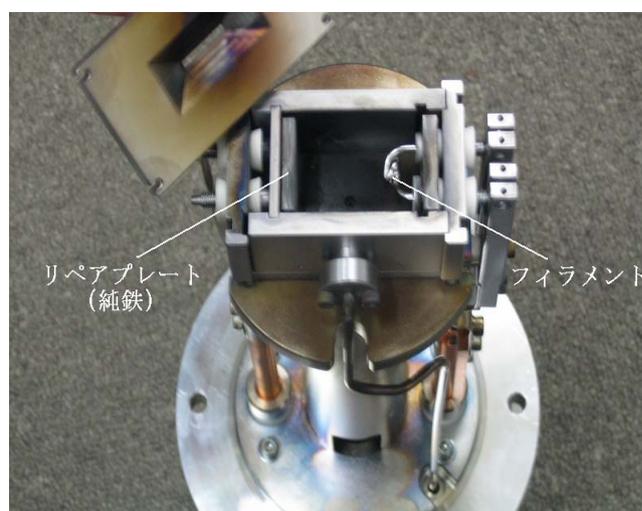


図5. イオン源のアークチャンバ内部の写真。

ころがアークチャンバで、ここにふたをする形でスリットを取り付ける。イオンは30 kVの引出電圧による電界によってこのスリットから引き出される。

また、Fe⁺イオンを効率よく生成するためにフィラメントの対面に板状の純鉄（リペアプレート）を取り付けてある。これは、アークチャンバ内でプラズマにより鉄原子をスパッタさせイオン化させ、Fe⁺イオンビームを効率よく取り出すためである。チャンバ内の真空度をよくすることにより、10 μA程度のFe⁺イオンビーム電流を取り出すことができた。

また、本装置は多品種少量生産に対応できるという特徴がある。扱うことのできるイオンの種類と、用いるガス等をまとめたものが下の表1である。

A型イオン源は安全な物質を扱うときに併用して使うことができる。リペアプレートは金属イオンをそれぞれ効率よく生成するために取り付ける。B型イオン源は危険な物質を扱うときに用いる。B型イオン源の下部にはベーパーライザーを取り付ける部分があり、粉末のものからイオン化する場合にそれぞ

表 1. イオンの種類と用いるガス等.

イオン種	形態	ガスおよび材料	ガス用イオン源	ベーパーライザー
Ar ⁺	ガス	Ar ガス	A 型	
C ⁺		CO ₂ ガス		
O ⁺		CO ₂ ガス		
Ge ⁺		GeF ₄ ガス	B 型	なし
Fe ⁺	金属	リペアプレート+Ar ガス	A 型	
Cr ⁺		リペアプレート+Ar ガス		
Ni ⁺		リペアプレート+Ar ガス		
B ⁺	粉末	LiBF ₄ +Ar ガス	B 型	低温ベーパーライザー (210 °C)
P ⁺		P+Ar ガス		高温ベーパーライザー (340 °C)
As ⁺		As+Ar ガス		高温ベーパーライザー (500 °C)

れ使い分ける。GeF₄ ガスから Ge⁺ イオンを生成する場合は B 型を用いるが、ベーパーライザーを取り付ける必要は無い。

このように、本装置ではイオン源を使い分けたりベーパーライザーを用いたりすることで、各種イオンを扱うことができる。質量分析部の電磁石の能力から、最大 Pt 程度の質量数 (195) まで加速できる。また、CO⁺ イオンや Ar²⁺ イオンなど、複合分子や価数の異なるイオンも生成されるので、加速できる原子 (分子) の種類はさらに多い。

質量分析部

イオン源から飛び出して前段加速部で最大 30 keV まで加速された各イオンには、例えば CO₂ ガスを用いて C⁺ イオンを発生させたいときに他に現れる O⁺ イオンや CO⁺ イオンなど、目的とするイオン以外のイオンが存在することが多い。そこで、必要なイオンだけを取り出すために、引出電圧分のエネルギーを持ったイオンを、直径約 40 cm、厚さ約 15 cm の質量分析磁石 (アナライザーマグネット) で発生させた磁場の中を通す。これによって同一エネルギーを持ったイオンであっても、イオンそれぞれの質量・電荷量の違いから運動量 (速度) が異なるために、各イオンが磁場内で描く円軌道の半径も異なる。この軌道の違いを利用すれば、磁場を通した後イオンが到達する位置がそれぞれ異なるため、質量分析磁石の焦点部分にスリットを設ければ、特定のイオンだけを取り出すことができる。スリット幅を大きくすれば質量分析の分解能が悪くなる。この原理を以下に式で表す。例として、Ar ガスを用いて Fe⁺ イオンを発生させるときの説明をする。ローレンツ力は $\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$ と表される。電荷 e [C]、速度 v [m/s]、質量 m [kg] とし、遠心力を表す式と合わせて、

$$evB = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{eB} \quad \dots \textcircled{1}$$

①式より、 B (磁束密度) を大きくすると r が小さくなる、つまり小回りになることがわかる。イオン 1 個の持つ運動エネルギーは $eV = \frac{1}{2}mv^2$ であるから、Ar、Fe は其々

$$\frac{1}{2} m_{Ar} v_{Ar}^2 = eV, \quad \frac{1}{2} m_{Fe} v_{Fe}^2 = eV$$

$$\Rightarrow v_{Ar} = \sqrt{\frac{2eV}{m_{Ar}}}, \quad v_{Fe} = \sqrt{\frac{2eV}{m_{Fe}}}$$

と書ける。

スリットに目的のイオンを通らせるために、各イオンが質量分析部で描く円軌道の半径は一定値であることは明白なので、半径 r はどのイオンにおいても一定である。

よって、①式より $\frac{m_{Ar} v_{Ar}}{B_{Ar}} = \frac{m_{Fe} v_{Fe}}{B_{Fe}}$ これに、
 $v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$ を代入、変形して $\frac{B_{Fe}}{B_{Ar}} = \sqrt{\frac{m_{Fe}}{m_{Ar}}}$

以上から、Ar と Fe が同じ半径を描くときの磁場の大きさの比が、それぞれの質量比の平方根と等しいことがわかる。

質量分析磁石の磁場の大きさを調整するツマミが、A-MAG である。マススペクトルを取りながら A-MAG を回して 0 から徐々に上げていく。ツマミを回すほど、つまり磁束密度を大きくするほど、質量の小さいイオンから順に電流が計測される。マススペクトルとは、その反応を波形として表したものである。この波形を、物質の質量比などと照らし合わせ、目的のイオンを取り出す。

例として、Ar ガスによって Fe⁺ イオンを発生させたいとき、Fe⁺ イオンがどれくらいの磁束密度で取り出せるかについて説明する。

ビームエネルギーを 5 keV、AMP RANGE を 5.0 μ A とし、マススペクトルを取る。その結果が図

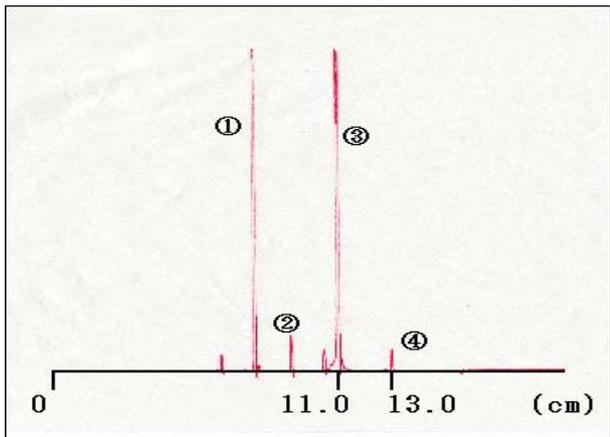


図 6. 各種イオンの見つけ方 (5 keV) .

2 である。横軸は磁束密度の大きさ、縦軸はビーム電流値を示す。スペクトルの始点を 0 cm とし、ピークが現れる位置までの長さを定規で測る。この場合、11.0 cm のところで現れる大きなピークは Ar^+ イオンであることがわかっている。

現物の長さで 11.0 cm と出しているが、これは磁束密度 B の値と置き換えて考えられるので、 B_{Ar} は 11.0 となる。 m_{Ar} 、 m_{Fe} はそれぞれ 39.948、55.845

であるから、②式より、
$$\frac{B_{Fe}}{11.0} = \sqrt{\frac{55.845}{39.948}} \doteq 1.182$$

$\therefore B_{Fe} \doteq 13.0$ となる。従って、図 2 で、13.0 cm 付近に現れるピークを探してみると、ちょうど 13.0 cm で最大のピークを迎えるスペクトルがある。これが Fe^+ イオンである。

これは、 Fe^+ を探す場合に限らず、すべてのイオンについて当てはまる。図 6 のマススペクトルで、各ピークが現れる位置までの長さを測り、磁場の大きさ (横軸の長さ) の比がそれぞれの質量比の平方根と等しいことを利用すると、どのピークが何イオンなのか分かる。

しかし、同じイオンでも価数によってピークの現れる位置が違ってくる。例えば、 Ar^+ イオンと Ar^{2+} イオンではピークの現れる位置が異なる。これは前

1 価イオンのピークが現れる位置の $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍の述の比を用いた計算方法を応用して求めることができる。①式と、 $r = \frac{mv}{eB}$ 運動エネルギー $eV = \frac{1}{2}mv^2$ をもとにして考える。2 価の場合は e が 2 倍になるので、この 2 つの式は、 $r = \frac{m'v'}{2eB'}$ 、 $2eV = \frac{1}{2}m'v'^2$ と書ける (m', v', B' は 2 価のときの値)。 Fe^+ の位置を求める場合と同様に計算すると、 $\frac{B'}{B} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{m'}{m}}$ とな

る。1 価と 2 価は電子 1 個分の違いなので、 $m \doteq m'$ と考えてよい。従って、 $B' = \frac{1}{\sqrt{2}}B$ となることから、ところに 2 価イオンのピークが現れる。また、3 価の場合は $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 倍となる。

以上を踏まえて、図 6 のマススペクトルの各ピークがどんなイオンなのか求めると、以下の表 2 になる。

表 2. 各種イオンのピークが現れる位置

番号	①	②	③	④
イオン	Ar^{2+}	Fe^{2+}	Ar^+	Fe^+

今回は分りやすくするためにマススペクトルをとったので、これだけのイオンしか現れなかったが、AMP RANGE をもっと小さくしてマススペクトルをとると、残留ガス中に含まれる分子がイオン化したものなどが検出される場合もあり、さらに多くの多原子分子が存在し、加速される。

加速部

イオン源のアークチャンバで発生したイオンは、正の電場 (電界) によって、アークチャンバの外に引き出される。この電場 (電界) を発生させるための電圧を引出電圧と呼び、前段加速部と言う。大地側では、アークチャンバに開けられたイオン引き出し用のスリットと対向する形で引き出し電極と呼ばれるスリットのある電極が配置され、引き出されたイオンは、引出電圧分のエネルギーを持ったまま、引出電極のスリットを通過して取り出される。

イオン源から引出電圧によって引き出されたイオンは、引出電圧分だけのエネルギーを持っている。このイオンに対して、注入に必要なエネルギーにまでイオンを加速するために、イオンを加速電圧のかかった加速管 (後段加速部) の中を通すことになる。注入されるイオンのエネルギーは、加速電圧と引出電圧の和と、さらにイオンの価数によって決定される。例えば、引出電圧 30 kV、加速電圧 170 kV の場合、1 価イオンのエネルギーは 200 keV になるが、2 価イオンのエネルギーは倍の 400 keV になる。

スキャン走査部

加速されて一定のエネルギーになったイオンを試料に照射する。注入イオンの試料面内での均一性を得るため、三角波電圧 (図 4) でイオンビームを X-Y 方向に走査する。この時試料に近い電極板を 5~7° 程度曲げ、DC (直流) 成分を有する三角波電圧を加える。これはビームライン中で残留ガス分子との衝

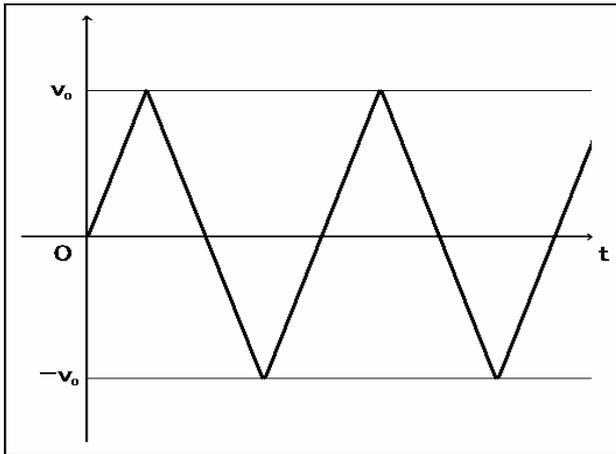


図 7. 三角波電圧.

突の結果電荷を失った、走査できない中性ビームを除去し、試料上の注入均一性を向上させるためである。

ビーム電流量の計測には、ファラデーカップ (図 8) が用いられる。ファラデーカップは、ビーム電流量の絶対値を測定するだけでなく、スキャンされたビーム電流の分布を確認したり、イオンビームの形状を測定するためにも用いられる。

ここで、この三角波電圧と走査の幅が比例していることを示す。

各要素を図 9 のように記号しておく。質量 m [kg]、電荷 e [C] の電子が初速度 v_0 で飛び出すとき、

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = eV_0, \quad v_0 = \sqrt{\frac{2eV_0}{m}}$$

$N = J/m$ 、 $C = J/V$ より、 $N = CV/m$ という式が得られ、 C に e [C]、 m に d [m] を代入すると、力 $= eV/d$ …①となる。そして、運動方程式 $f = ma$ へ、式①を代入すると、

$$\frac{eV}{d} = ma. \quad \text{これにより、加速度 } a \text{ は、} a = \frac{eV}{md}$$

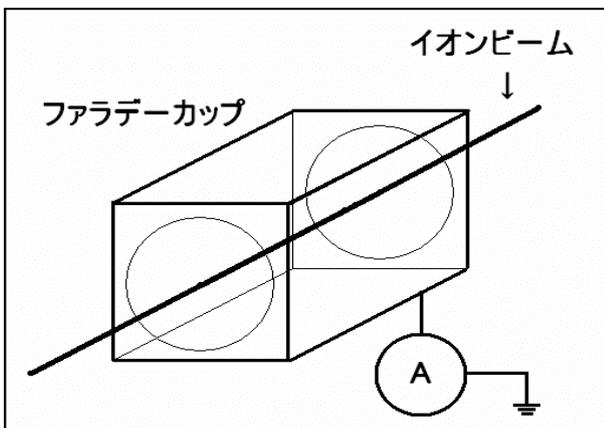


図 8. ファラデーカップ.

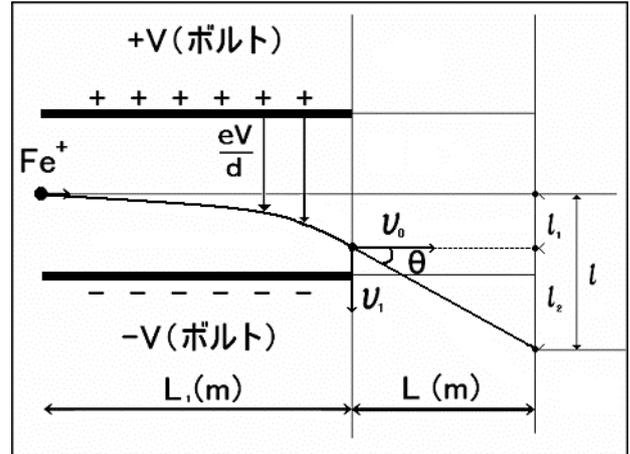


図 9. スキャン走査部.

と求まる。 L_1 を進む時間は、時間 $= \frac{\text{道のり}}{\text{速度}}$ より、 $t = \frac{L_1}{v_0}$ 。 l_1 の長さは、加速度 a 、時間 t での自由落下なので、 $l_1 = \frac{1}{2} \frac{eV}{md} \dots ②$ 。放物線の下方向への速さ v_1

は、加速度 \times 時間より、 $v_1 = \frac{eV}{md} \cdot \frac{L_1}{v_0}$ となる。放物線の l_2 部分の角度を θ としたら $\tan \theta = \frac{v_1}{v_0}$ となり、

$$l_2 = L \cdot \tan \theta \dots ③$$

l は、 $l_1 + l_2$ で求められるので、

$$l = \frac{1}{2} \cdot \frac{eV}{md} \cdot \left(\frac{L_1}{v_0}\right)^2 + L \cdot \frac{eVL_1}{mdv_0^2} = \frac{eV}{md} \cdot \frac{L_1}{v_0^2} \left(\frac{1}{2}L_1 + L\right) \dots ④$$

式④の e, m, d, L_1, L, v_0 は定数。

\therefore 三角波電圧の大きさ V はスキャンの幅 l に比例する。

オシロスコープによるビーム電流モニター

実際のイオン注入装置の運転に際しては、オシロスコープによりビーム電流をモニターしながらスキャンの三角波の波高値や三角波の平均値のオフセット電圧を調整する。図 10 にオシロスコープで観測したビーム電流の波形 (上 X スキャン・下 Y スキャン) を示す。

図 10 の上の写真は横軸に水平方向のスキャン電圧に比例した電圧信号を入力し、縦軸にビーム電流値に比例した電圧信号を入力したオシロスコープの写真である。同じく下は横方向に垂直方向のスキャン電圧に比例した電圧信号を入力し、横軸にビーム電流値に比例した電圧信号を入力したオシロスコープの写真である。

ターゲットにビームが全て当たっているところが台形の上底部分になり、ビームが当たっていないと

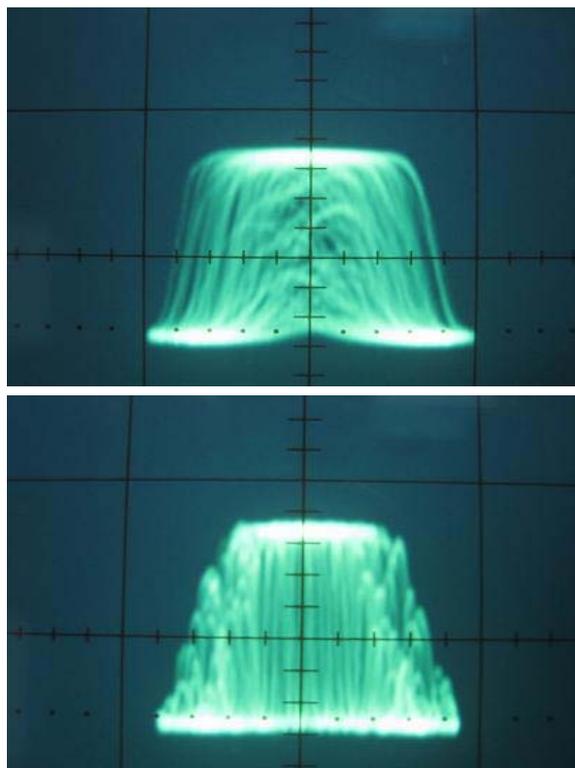


図 10. オシロスコープで観察したビーム電流の波形
(上は X スキャン、下は Y スキャンの様子を示す)。

ころが下底部分にあたる。そして、ビームが一部分当たっているところが斜辺部分にあたる。この台形波の整形がうまくできていないと、注入がうまくできないので、きれいに整形する必要がある。

今後の課題

イオン注入装置で Fe (鉄)、Ar (アルゴン) のイオン注入に成功した。一方、2 価の注入 (ダブルチャージ) については検収の際行ったが、自分自身

で注入する機会が無かったので今後トライする必要がある。他にも、高温・低温ペーパライザーでの注入、B (ホウ素)・P (リン)・As (ヒ素) を使った注入も自分自身で実際にやってみる必要がある。

また、研究室の誰でもイオン注入装置が操作できるように、分かりやすい短いマニュアルをまとめる。

謝辞

今回、私学助成により 1 億 4 千万円もの高額な中電流型イオン注入装置を導入できたのは、大学当局、教学、法人諸幹部の理解の賜物と考えています。この装置の性能仕様は日本で最高の、或いは私の知る限り世界で最高の性能仕様を持った研究用イオン注入装置として位置づけられるものと確信しています。全国の国立大学、或いはどの国立の研究機関にも設置されていない、かくも価値ある研究装置を導入して頂き、深謝致します。今後この装置を当研究室あるいは関連する情報科学科水野研究室において存分に利用し、研究成果を出していくことは勿論のことですが、さらに工学部を含めた全学で使えるような体制を整え、教員各位の利用に供したいと考えています。

文献

- 1) 蒲生健次 (1986) *半導体イオン注入技術*. 産業図書, 東京.
- 2) 藤本文範・小牧研一郎 (2000) *イオンビームによる物質分析・物質改質*. 内田老鶴圃, 東京.
- 3) 藤本文範・小牧研一郎 (1995) *イオンビーム工学イオン・固体相互作用編*. 内田老鶴圃, 東京.
- 4) 電気学会 (1995) *電子・イオンビーム工学*. オーム社, 東京.
- 5) 山崎泰規 (1994) *粒子線物理学*. 丸善, 東京.