

多価イオンビーム用 エミッタンス測定装置の製作

山田 千櫻 研究室 吉川 倫紀

【目的】

本研究室では、EBIT(電子ビームイオントラップ)を用いて生成される多価イオンを固体表面に照射し、それによって生じる様々な現象を観測し研究する事が大きなテーマの一つである。

そこで本研究では、EBITにより生成される多価イオンビームのエミッタンスを測定する事を目的として、装置の製作を行った。

エミッタンスとは、ビームの質の良否を表す物理量であり、今後新たな多価イオン衝突実験装置を設計したり、ビームラインを改良する際に大変重要となる。

【原理】

1. エミッタンスの定義

荷電粒子源からビームを引き出すとき、一般にその源の粒子の熱攪乱のために、ビームは進行方向の運動に加えて、進行方向およびそれに垂直な方向にランダムな速度分布を伴っており、それがビームのエネルギー幅を生じる一つの原因となっている。また、ビームの進行方向に対して垂直な方向のランダムな速度分布は、ランダムさが大きいほど、ビームの各粒子がそれぞれ勝手な軌道をとることを意味し、ランダムさの大きさがビームの質の良否を示す指標になる。

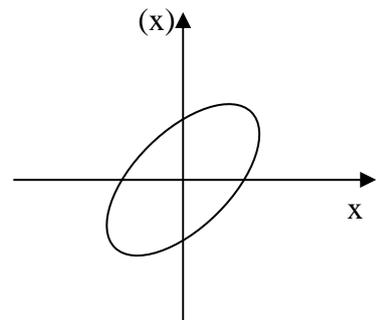


図1：エミッタンス図

特に、ビームの進行方向に対して垂直な方向の位置と、運動量または軌道の傾角度を座標にとった二次元の位相空間において、ビーム中の全ての軌道は点集合で表すことができる。この点集合の包絡線を示す閉曲線のことをエミッタンス図(図1)といい、その面積を π で割ったものをエミッタンス()という。式に表すと以下のようなになる。

$$\varepsilon = \frac{1}{\pi} \int \alpha(x) dx \quad [\text{m} \cdot \text{rad}]$$

エミッタンスが小さいということは、拡がり角 $\alpha(x)$ やサイズが小さいということであり、ビームは絞られた平行度の高い状態であると言える。

逆にエミッタンスが大きいということは、平行度の低い拡がったビームを表している。

2. 不変性

エミッタンスは、加速電圧を一定にしてやれば、レンズ等でビームを変形・偏向しても変わらない不変量である。つまり、ビームのエミッタンスを知っておけば、対象

となる装置のアクセプタンスとの相互関係を考えることで、イオンの輸送効率を見積もることが出来、新たに設置する機器に最適な条件を見出すことができる。

【測定方法】

$x=0$ をビームの中心とし、そこからの変位 x において、ビームをスリットにより切り出す。そのビーム形状を測ることにより、検出面に当たったビームの中心からの拡がり幅 x を求める。スリットと検出面の距離 d と x から、位置 x におけるビームの拡がり角 $\alpha(x)$ を算出する。(図2)

$$\tan \alpha(x) = \frac{x}{d}$$

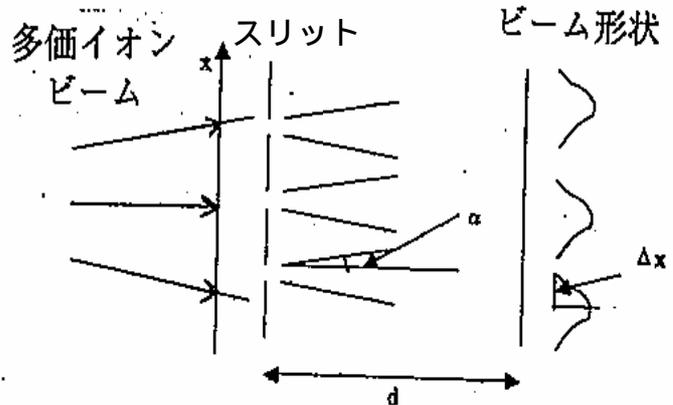


図2：拡がり角の算出

【エミッタンス測定装置】

スリット幅：~0.1mm 間隔：~0.6mm

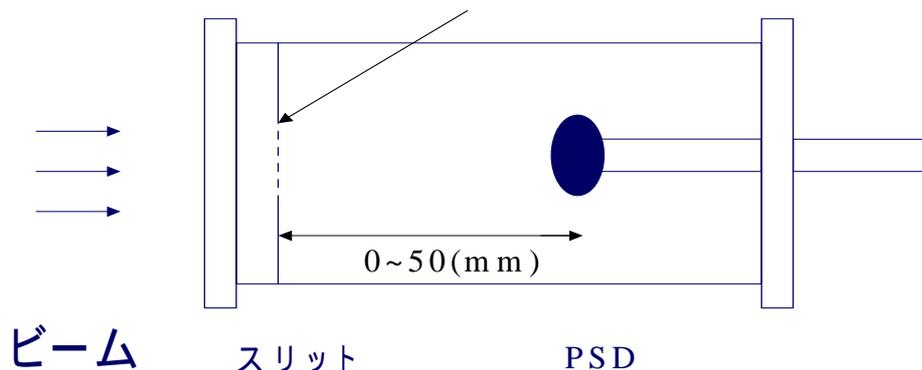


図3：エミッタンス測定装置

図3に今回製作したエミッタンス測定装置を示す。

入射したビームをスリットにより分割し、それぞれの位置におけるビームプロファイルを位置有感型検出器(PSD)によって測定する。スリットの幅は~0.1mmであり、およそ0.6mm間隔で並んでいる。PSDは、検出面に当たった粒子の位置を二次元で測定する検出器であり、PSDにより得られる画像から、ビーム形状を割り出すことが可能となっている。

また、PSDをビーム進行方向に移動可能にし、最もスリットに近づいた状態を $d=0$ 、最も離れた状態で $d=50\text{mm}$ となるようにした。これは、ビームのエミッタンスが大きい、つまり平行度が低く拡がったビームの時はビーム像同士の干渉を防ぐために距離 d をなるべく小さくとらなくてはならず、逆にエミッタンスの小さい平行度の高いビームでは距離 d をなるべく大きくとらないと小さな拡がり角 $\alpha(x)$ を算出できないからである。

【実験~動作確認~】

製作した装置の動作確認を行うために、実機(EBIT)に取り付ける前に、イオン銃を用いてテスト実験を行った。イオン銃とスリットとの間隔はおよそ 1m で、実験は $\sim 10^{-9}$ torrの真空中で行った。その条件下において、ビームが持つべき角度とエミッタンスの予想値と実測値を比較する。

【実験結果】

1. ビーム形状

図 4 に、 $d=50$ 時の PSD の画像を示す。下の図の縦線ひとつひとつがスリットを通過して入射してきたビームを表し、上の図はその強度分布である。

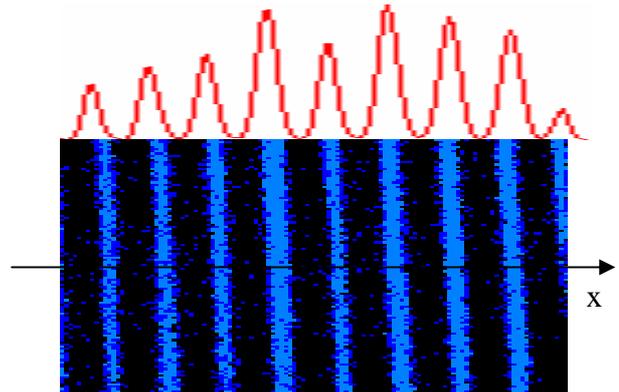


図 4 : PSD の画像($d=50$ 時)

2. エミッタンス図

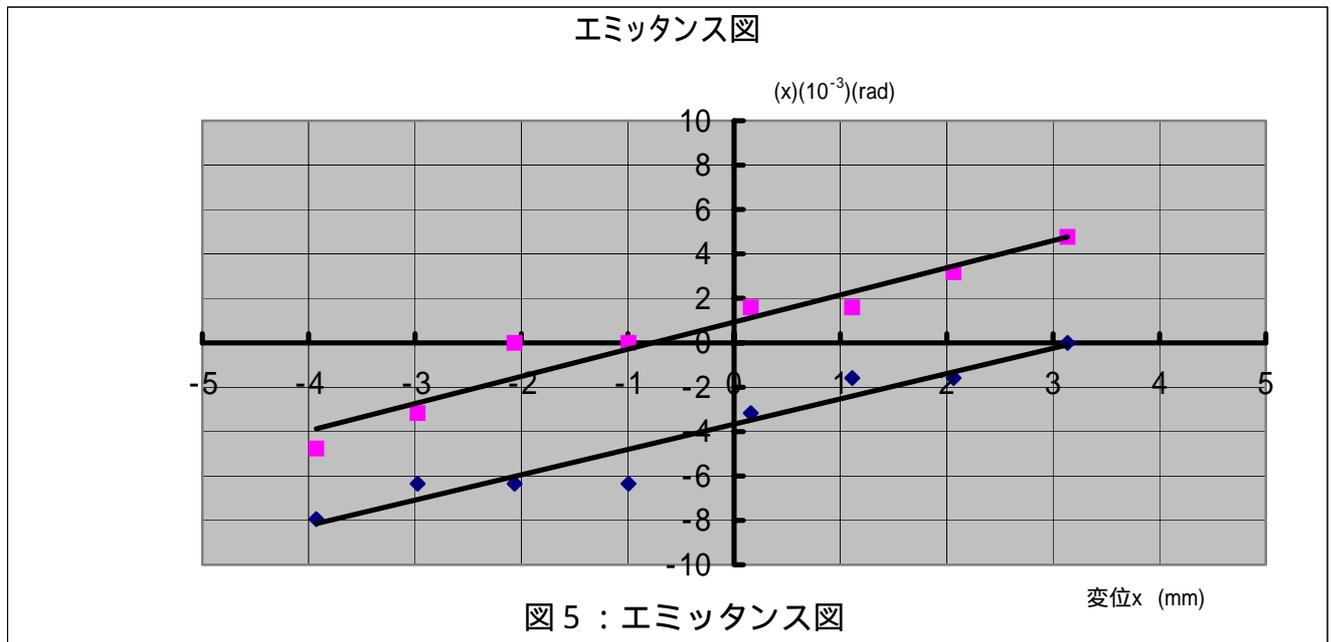


図 5 : エミッタンス図

図 4 から得られたエミッタンス図を図 5 に示す。測定に使用したイオン銃からのイオンビームは発散が大きく、スリット内に収まる程のビーム径にはできなかった。そのため、測定においてはスリットを通過してきたビームだけを考えるため、楕円の両端を切ったような形になっていると考えられる。

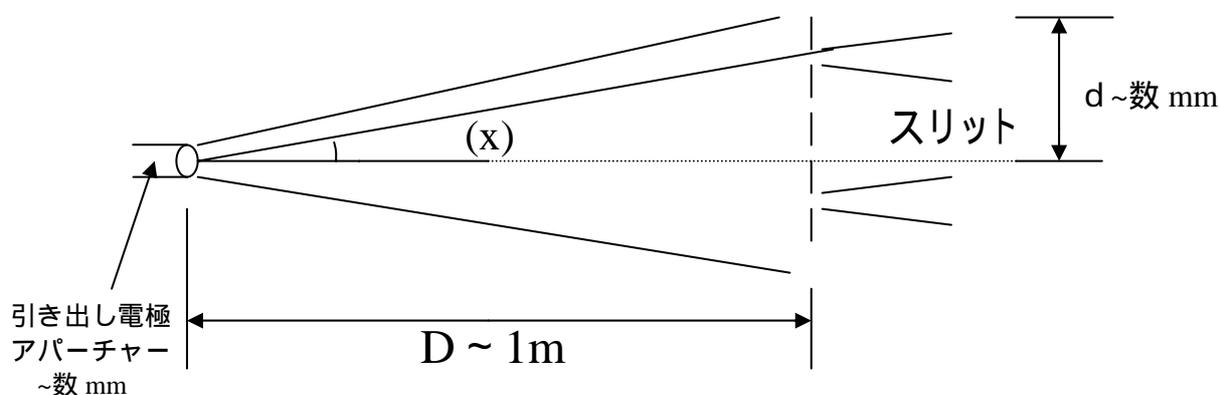
3. エミッタンスの値

図5のエミッタンス図からエミッタンスの値を算出すると、以下のようになった。

$$=3.2 \times 10^{-5} \quad [\text{m} \cdot \text{rad}]$$

【考察】

イオン源から発生したイオンは、引き出し電極のアパーチャーを通過して、ビームとなる。そのビームが更にエミッタンス測定装置入り口のスリットを通過してきた場合どの程度の角度拡がりを持っているかを考える。引き出し電極のアパーチャーのサイズは数 mm 程度であり、ビームを切り出すスリットの幅も数 mm 程度である。これに対してイオン銃とスリットの距離はおよそ 1 m である。



このような条件下では、 $\frac{d}{D} \sim 10^{-3}$ となり、理論的には $(x) = \tan^{-1} \frac{d}{D} \cong 10^{-3} [\text{rad}]$ となる。そのような (x) において、スリット全体の大きさが $10^{-2} [\text{m}]$ 程度であることから、その面積、つまりエミッタンスの値は、およそ $10^{-5} [\text{m} \cdot \text{rad}]$ になると予想される。

結果からわかるように、実測値が予想値と一致することが分かった。

	予想値	実測値
(x)	$\sim 10^{-3} [\text{rad}]$	$-7.0 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3} [\text{rad}]$
	$\sim 10^{-5} [\text{m} \cdot \text{rad}]$	$3.2 \times 10^{-5} [\text{m} \cdot \text{rad}]$

【まとめ・今後】

今回の実験により、私の製作したエミッタンス測定装置の動作確認を終えた。よって今後は冒頭の目的を達成するためにも、EBITのビームライン上に設置し、多価イオンビームのエミッタンスを測りたい。しかし、その設置の際には新たな問題が生じてくると思われる。(例えば、測る位置によってはx線をどう防ぐかが問題となる。)そこで設置する場所をどこにするかなど、最良の条件を模索し、実際の測定を行わなくてはならない。