

## スリット-ハーブ法による高速エミッタンス測定システムの開発

### DEVELOPMENT OF A FAST EMITTANCE MEASUREMENT SYSTEM WITH THE SLIT-HARP METHOD

柏木啓次<sup>#</sup>, 宮脇信正, 倉島俊

Hirotsugu Kashiwagi<sup>#</sup>, Nobumasa Miyawaki, Satoshi Kurashima

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

#### Abstract

An emittance measurement system with the slit-harp method have been developed in TIARA AVF cyclotron in order to reduce the measurement time compared with the double-slit method using two pair of slits that were developed for measuring the acceptance of the cyclotron. Two harp units with 48 wires are installed for horizontal and vertical measurements just after the beam position defining slits that are used for double-slit method. The test results showed that the measurement time of the transverse emittance using the system was 8 times faster than with the double-slit method.

#### 1. はじめに

量研機構高崎研 AVF サイクロトロン施設[1]では、イオン源で生成したビームの損失を最小限にして加速する入射ビーム調整のため、サイクロトロン横方向アクセプタンスと入射ビーム横方向エミッタンスを測定するシステムを開発した[2]。本システムにおけるエミッタンス測定は、アクセプタンス測定と同じ方式であるダブルスリット法で行ってきた。ダブルスリット法は、入射ビームの位置と角度を制限する 2 つのスリットで任意の位相平面座標を中心とした微小領域のビームを通し、その座標のビーム強度を測定する方法である。この方法では、各スリットの位置を適切な位置に移動することで、スリット可動範囲内であれば任意の座標の測定が可能であるが、その領域は単一である。ダブルスリット法におけるエミッタンス測定では、この単一の領域を Figure 1 のように測定領域内で走査することで行われる。

我々はダブルスリット法において比較的短時間の測定が可能となるように、測定座標ごとスリットを停止させるの

ではなく、スリットを動かしながら測定座標とビーム電流を連続的に取得する方式の測定方法を採用している。これにより、エミッタンス測定時間は、水平・鉛直の各位相平面上で通常 7 分程度が実現できているが、高精度の測定、つまり、測定領域の走査軌道を密にした測定や、イオン源やその他のビーム輸送の条件を変えて複数回測定する場合は、多くの測定時間が必要となっていた。そこで我々は迅速なエミッタンス測定を実現するため、複数の座標について同時測定が行えるスリット-ハーブ法でのエミッタンス測定システムを開発し、既存システムに組み込んだ。

本稿ではスリット-ハーブ法の測定システム及び測定結果について述べる。

#### 2. スリット-ハーブ法によるエミッタンス測定システム

##### 2.1 スリット-ハーブ法

横方向エミッタンス測定では位相平面上におけるビーム強度分布を測定する。つまり、位相平面上の座標とその座標におけるビーム強度を測定することでエミッタンスが測定される。Figure 2 に示すように、スリット-ハーブ法(スリット-グリッド法)ではビームの位置を制限するスリットとビームの発散角成分を測定する複数のワイヤーから成る。上流のスリットで任意の位置のビームを通し、下流の複数のワイヤーにて、各ワイヤーの位置とスリットの位置及びスリットとワイヤーユニット間の距離から決まる角度座標に対応したビーム強度を測定する。ダブルスリット法では 2 つのスリットを動かして 1 座標ずつ測定するのにに対し、スリット-ハーブ法はハーブの本数分の座標について同時に測定可能であるため、ダブルスリット法に比べて高速な測定が実現できる。

##### 2.2 測定システム

ダブルスリット法によるエミッタンス測定はアクセプタンス測定と同じスリットを用いていたため、

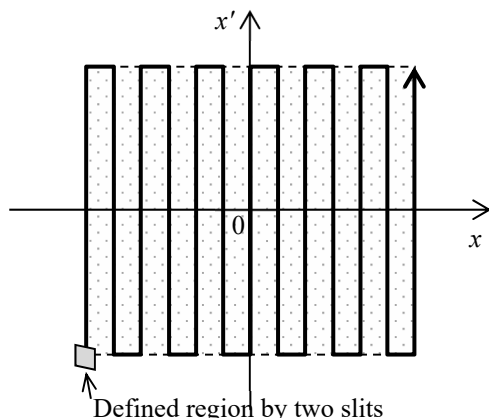


Figure 1: Scanning orbit of the defined region by two slits in the double-slit method.

<sup>#</sup> kashiwagi.hirotsugu@qst.go.jp

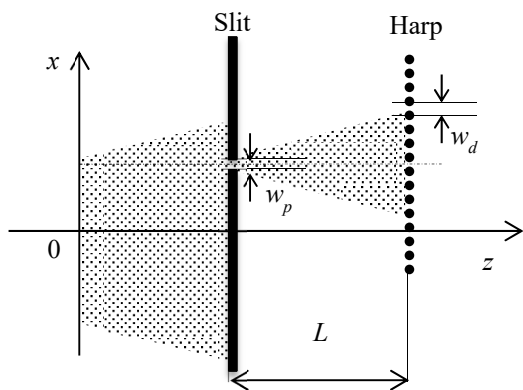


Figure 2: Schematic representation of a slit-harp device.

ビームライン上の同一の位置でのエミッタンスとアクセプタンスが得られることが、エミッタンスとアクセプタンスの整合を評価する上で利点であった。

そこで、スリット-ハーブ法においても、ビーム位置制限スリットはダブルスリット法と共通にし、新たに 48 本のワイヤーを備えたビーム発散角を測定するハーブユニットを下流に設置することで、アクセプタンス測定と同位置でのエミッタンス測定を可能にした。これらのワイヤーは直径 0.1 mm の金メッキタングステン線であり、ハーブユニット中心を中心として 24 本ずつ ±7.05 mm の範囲に設置されている。また、隣り合うワイヤーの水平もしくは鉛直方向の距離は 0.3 mm であり、製作の制約から Figure 2 の z 軸方向に 4 本ずつ 1 mm 位置をずらしてワイヤーを設置している。位置制限スリットからワイヤーまでのビーム軸方向距離は、水平方向ユニットについては 338.75, 339.75, 340.75, 341.75 mm、鉛直方向ユニットについては 338.25, 339.25, 340.25, 341.25 mm である。測定角度範囲は約 ±20 mrad、ワイヤの位置から決まる角度分解能は約 0.9 mrad である。

このハーブユニットはステッピングモータによって駆動し、各ハーブで検出されたビーム電流は 96 チャンネル (水平方向用 48 チャンネル、鉛直方向用 48 チャンネル) の電流-電圧変換アンプによって電圧変換後、DAQ デ

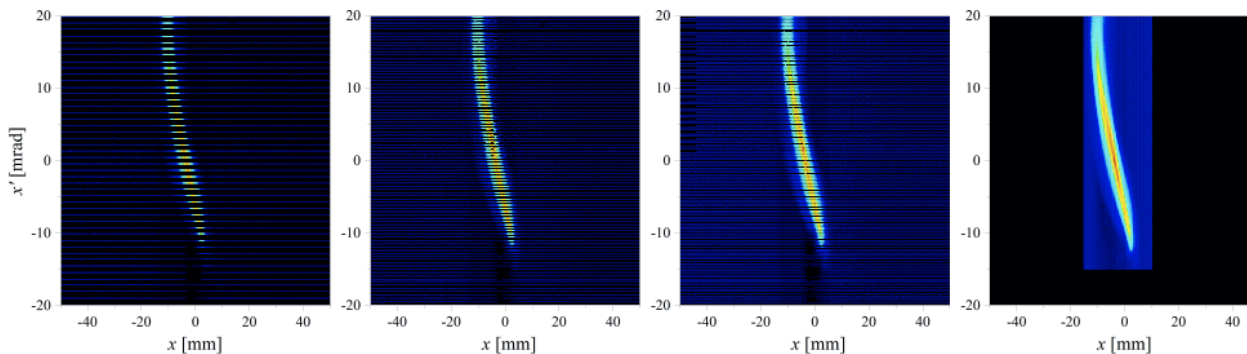


Figure 4: Measurement results of the horizontal emittance of 20.9 keV He<sup>2+</sup>. (a) Slit-harp with normal resolution (b) Slit-harp with double resolution (c) Slit-harp with triple resolution (d) Double-slit.

バイスによって測定され、PC にデータが取り込まれる。

### 2.3 測定方法

Figure 3 にスリット-ハーブ法における測定座標の走査軌道を示す。測定座標の数はワイヤーの本数と同じ 48 だが、18 に省略して描いている。このように、スリット-ハーブ法によるエミッタンス測定では、ハーブの数の座標を同時測定するため、ワイヤーの設置位置で決まる測定分解能 0.9 mrad の測定では往復走査の必要がなく、1 スキャンで測定が終了する。つまり、例えば x 位置範囲  $-p < x < p$  で測定する場合、位置制限スリットとハーブユニットを同時に  $-p$  から  $p$  まで移動させる。同時に、DAQ デバイス (National Instruments 製 NI PXI-6255) で測定したビーム強度と位置制限スリット及びハーブユニットの位置から決定される測定座標の算出を連続的に行うことで、エミッタンスが測定される。

また、より高い分解能で測定を行う場合は、上記の 1 スキャン後にハーブユニットの位置をハーブ間隔の 0.3 mm 以内で移動させてさらに複数回測定する。例えば、2 倍の分解能で測定する場合、位置制限スリットとハーブユニットの中心位置の差を  $\Delta x$  とすると、 $\Delta x = 0$  と  $\Delta x = 0.3 \text{ mm}/2$  で 2 スキャン (1 往復) 測定する。

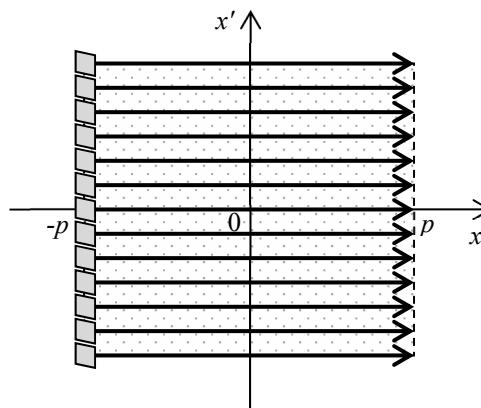


Figure 3: Orbit of each measured region in slit-harp method.

以上の測定プログラムを National Instruments 社の LabVIEW™ で作成し、従来のアクセプタンス・エミッタンス測定プログラムと統合した。

### 3. エミッタンス測定試験

本システムを用いてエミッタンスの測定試験を行った。測定に用いたビームは 20.9 keV の  $\text{He}^{2+}$  (サイクロトロンで 107 MeV 加速するビーム入射エネルギー) である。 $x$ - $x'$  位相平面の測定結果を Figure 4 に示す。ハーブユニットの中心位置をスキャンごとに動かして測定分解能を向上させる測定法に関しては、通常(1倍)分解能(1スキャン)から 3 倍(3 スキャン)について、スキャン回数に比例した精度で測定が正しく行われていることを確認した。また、ダブルスリット法による測定結果と同様な測定結果が得られたことを確認した。

また、ダブルスリット法とスリット-ハーブ法の測定時間の比較実験を行った。両方法で同様の測定分解能となるよう、測定範囲  $-47 \text{ mm} < x < 48 \text{ mm}$ 、ダブルスリット法の測定間隔 1 mm、スリット-ハーブ法の測定分解能 2 倍の条件で測定を行った。その結果、ダブルスリット法 406 秒に対し、スリット-ハーブ法は 51 秒であった。以上より、ダブルスリット法に比べ、スリット-ハーブ法により測定時間を約 1/8 に短縮したことを確認した。

### 参考文献

- [1] K. Arakawa *et al.*, “Construction and first year’s operation of the JAERI AVF Cyclotron”, Proc. 13th. Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, 1992, pp. 119-122.
- [2] Kashiwagi *et al.*, “A transverse emittance and acceptance measurement system in a low-energy beam transport line.” Rev Sci Instrum., 2014, pp. 02A735-1-02A735-5.