

A Low Beam Intensity Measuring Device for Acceptance Measurement

Hirotsugu Kashiwagi #, Nobumasa Miyawaki, Satoshi Kurashima, Susumu Okumura
Takasaki Advanced Radiation Research Institute, Japan Atomic Energy Agency
1233 Watanuki-machi, Takasaki, Gunma, 370-1292

Abstract

A measurement method for low beam intensity has been studied using a scintillation counter. For more than about 1 pA, counting rate of the scintillation counter is so high that the pulses by multi particles are overlapped and piled up. Beam intensity is estimated from the sum of the number of the pulses, which is measured by discriminating the pulse height if the height of pileup pulse is discrete for each number of pile-ups. Measurement of beam time width shows that the height is discrete and they are differentiable by pulse-height thresholds. It was confirmed that the beam intensity of the order of between 1pA and 100pA could be measured.

アクセプタンス計測のための微小ビーム強度計測装置

1. はじめに

原子力機構高崎量子応用研究所のサイクロトロン施設では、微細構造を持った半導体デバイスや生物細胞等への高精度なビーム照射^{[1][2]}のため、ビーム径及び照射精度が 1 μ m のビーム“マイクロビーム”の形成及びその実験利用を進めている^[3]。マイクロビーム形成には、加速器への入射ビームの高輝度領域をマイクロビームライン末端まで迅速に輸送することが求められている。また、通常運転においてもイオン源で生成したビームの高効率利用のため、加速器内でのビームロスを低減することも求められている。

これらの要求を満たすためには加速器へのビーム入射において、加速器側のアクセプタンスと入射ビームのエミッタンスの整合を最適化することが重要である。この最適化のためにはエミッタンス・アクセプタンスを求め、整合の評価を行うことが必要である。

我々は現在、縦横方向のエミッタンス・アクセプタンスの整合のうち、横方向の整合を評価する装置の開発を進めている。

横方向アクセプタンス計測装置は、低エネルギービーム輸送ライン(LEBT)において位相空間の特定の微小領域を加速器に入射する位相空間領域制限装置及び、ビームラインを含む加速器システムを通過したビームを検出するビーム電流モニターで構成される。LEBT に設置した位置と角度を制限する 1 対または 2 対のスリットからなる位相空間領域制限装置により、位相空間の微小領域のビームを下流へ出射し、加速器で加速されたそのビームを高エネルギービーム輸送ラインに設置したビーム電流測定装置によって検出する。

入射ビームラインでビームを制限することにより、nA 以下のビームが加速器に入射するため、加速後のビームモニターでもこれと同程度以下の微小なビーム電流の検出が要求される。この測定にはシンチレーション粒子検出器や微小電流測定用高精度ファラデーカップが用いられる。

本論文ではシンチレーション粒子検出器による微小電流計測方法及び、計測テスト実験結果について報告する。

2. シンチレーション粒子検出器による微小ビーム強度計測

2.1 計測原理

シンチレーション粒子検出器によるビーム強度検出は、微弱なビームを発光体(シンチレーター)に当て、その発光を光電子増倍管で増幅し、そのカウントレートを測定する。

1 カウントの間隔が十分に離れている、つまりパルスが重ならない条件では単純にカウントレートがビーム強度に比例する。しかし、ビーム強度が高く(\sim pA)なると各パルスが重なった(パイルアップした)波形となる。粒子の存在確率が時間に依存しないのであれば、ビーム強度が増加するにつれてパルス間隔が狭まっていくことになるが、高周波で加速する加速器から出射するビームは、その位相アクセプタンスによりある時間幅内に複数のパルスが存在する確率が高くなる。

この時間幅が光電子増倍管のパルス幅よりも十分短いとすると、重なったパルスの高さは 1 パルスの整数倍になると考えられる。このパイルアップしたパルスの高さはとびとびの値をとるので、パルスの高さごとにパイルアップしたパルスの数が判別できる。従って、ビーム強度はパルスを波高弁別し、各パイルアップのパルスの数を計測し、式(1)により求められる。

$$\text{ビーム電流} \propto \sum_i \frac{N_i \cdot i}{t} \quad (1)$$

N_i は i 個のパルスがパイルアップしたパルスの数
 t は計測時間を表す。

2.2 ビーム時間幅と光電子増倍管からの出射パルス幅の関係

光電子増倍管から出射するパイルアップしたパルス波高がとびとびの値になるためには、ビームの時間幅が光電子増倍管のパルスに比べ十分小さいことが本計測には求められる。そこで、光電子増倍管のパルス幅とビームの時間幅について測定を行った。光電子増倍管は浜松ホトニクス製 H6533 である。

1 粒子が入射した場合の光電子増倍管からの出射波形をオシロスコープで測定した結果を図 1 に示す。電子増倍部への印加電圧は-1.3kV であり、この時のパルス幅の半値全幅は 10.2ns であった。

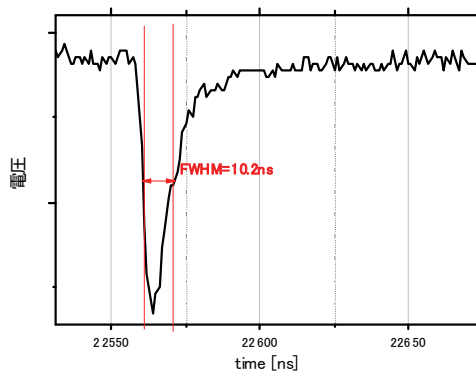


図 1 : 1 粒子がシンチレーターに入射した時の光電子増倍管の波形 (ビームは 160MeV O⁶⁺)

ビーム時間幅は、加速高周波の 1 周期の間のある基準時間に対してビーム中の粒子が測定される時間差を多数の粒子について測定し、その分布から求められる。加速高周波の基準時間はある位相とし、粒子の検出時間は粒子の検出信号の立ち下がり中のある決まった基準位置になる時間とした。これらは、ディー電極のピックアップ信号及び、粒子のシンチレーターによる発光を光電子増倍管で増幅した信号にコンスタント・フラクシオン・ディスクリミネーター(CFD)を用いて決定した。これら 2 つの信号の時間差をピコセカンド・タイムアナライザーによって計測した。この計測結果を図 2 に、ビーム存在確率と時間幅を表 1 に示した。

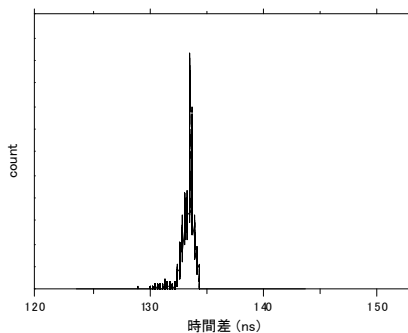


図 2 ビーム時間幅測定結果

ビーム存在確率	時間幅
40%	0.20ns
60%	0.39ns
80%	0.63ns
90%	0.85ns

表 1 ビーム存在割合とビームの時間幅

図 2 の横軸の全幅は加速周波数 15.114MHz の半周期(33ns)としてある。ビーム時間幅は中心部に鋭いピークを持つ分布であった。ビーム中の粒子の存在確率 90%で時間幅 0.85ns であった。従って光電子増倍管のパルス幅の 1/10 以下の時間幅であることが分かった。

ビーム強度計測において、例えば 2 つの粒子のパイルアップ信号の波高は図 1 の波形の重ね合わせとなる。粒子に時間差がない場合は単純にピークの電圧値の二倍がパイルアップ信号の波高となるが、時間差がある場合は、一方のパルスの電圧値がピークから外れた場所にもう一方の粒子が入射するため、パイルアップ信号の波高は二倍よりも低くなる。粒子が上述の最大 0.85ns の時間差で入射すると、パイルアップ信号の波高誤差は同時に入射した場合に比べ、最大約 4.5%であることが図 1 の波形より求めた。従って、例えば 5 つの粒子信号がパイルアップしたとしても波高の誤差は 1 パルスの波高の約 23%($\approx 4.5 \times 5$)となり、パイルアップした信号が連続した波高にはならず、パイルアップ数ごとに明確に識別可能であることが分かる。

2.3 シンチレーション粒子検出器による微小ビーム強度計測装置

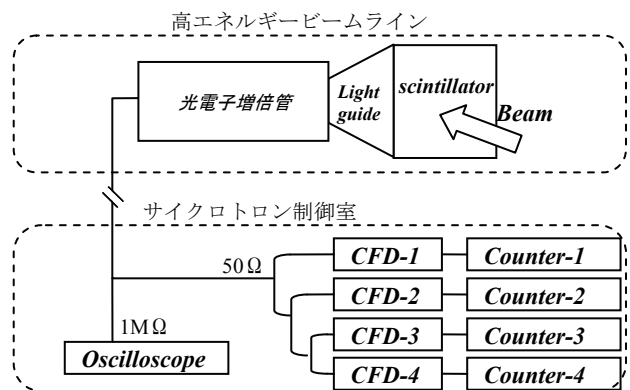


図 3 微小ビーム強度計測システム

図 3 に計測システム図を示す。ビームチョッパーによってある時間幅に規定されたビームがプラスチックシンチレーターに入射し、その蛍光をライトガイドで光電子増倍管に輸送する。光電子増倍管で増幅された信号は 4 分岐され CFD に接続されている。CFD-n(n は図中の番号を示す)は n 個の粒子のパイルアップ信号に対応した電圧閾値に設定されてお

り、後続のカウンターにてそのパイルアップ信号の総数(式(1)の i)を求める。求めた i と式(1)によりビーム強度を算出する。ビームの時間幅を規定するのはシンチレーターの過熱損傷を避けるためである。

2.3 ビーム強度測定

160MeV の O^{6+} ビームを用いてテスト実験を行った。光電子増倍管からの出射信号であるパイルアップしたパルス列をオシロスコープで測定した結果を図4に示す。縦軸は計測された電圧値を1粒子が入射した時の電圧値で割ったものであり、パイルアップした信号の数に相当している。波高が連続的でなく、とびとびの値になっていることより、パルスごとにパイルアップした信号の数が明確に識別できることがわかる。

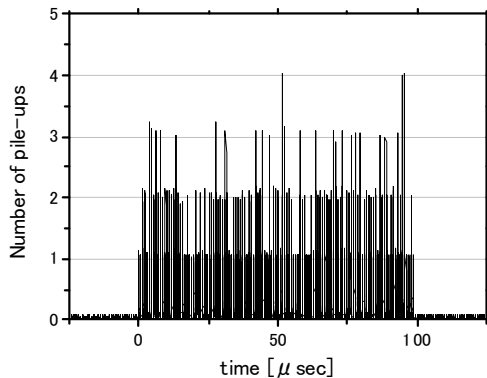


図4 パイルアップしたパルス列の一例

図5に計測結果から式(1)によって算出したビーム強度とビーム電流の関係を示す。ビーム電流は照射ポートの1つに設置してある高精度ファラデーカップによって計測した。ビーム電流が数 pA～約 100pA 程度までビーム強度と電流値がほぼ比例関係にあることから、本方法でビーム強度が正しく計測できていることが分かる。100pA 付近になると比例関係から外れているが、これはビーム強度が高いことによる5パルスのパイルアップ発生が原因である。現在の計測システムでは4パルスのパイルアップまでの計測であるため、数え落としが発生しているた

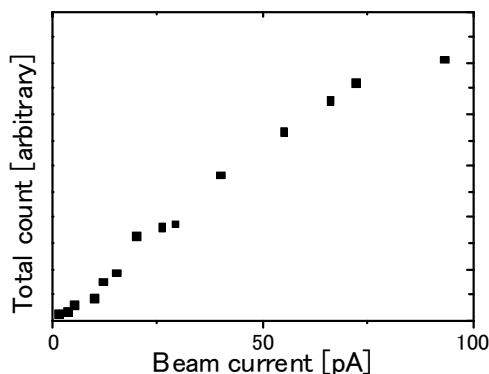


図5 計測したビーム強度とビーム電流

めである。

3. まとめ

シンチレーション粒子検出器による微小ビーム強度計測について、各パルスがパイルアップするカウントレートが高い領域における計測原理と計測実証について報告した。

本計測方法はパイルアップした波形を波高弁別することによってビーム強度を求めることを示し、ビーム時間幅測定よりパイルアップした信号が連続した波高にはならず、パイルアップ数ごとに識別可能であることを示した。ビーム強度測定により、本計測方法が数 pA～約 100pA のビーム強度測定に有効であることを確認した。

参考文献

- [1] T. Hirao, et al. “Transient current mapping obtained from silicon photodiodes using focused ion microbeams with several hundreds of MeV” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 267, p2216 (2009)
- [2] Y. Kobayashi, et al., “Microbeams of heavy charged particles” Biological Science in Space 18 p235 (2004).
- [3] M. Oikawa, et al., “Focusing high-energy heavy ion microbeam system at the JAEA AVF cyclotron” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 260 p85 (2007).