

[F16p22]

Improvement of a Clipping Module in the BPM Readout Electronics for the ATF Damping Ring

M. Takano, H. Hayano^a, J. Urakawa^a, T. Okugi^b

Toho University

2-2-1 Miyama, Funabashi, Chiba 274-0072, Japan

^aHigh Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^bTokyo Metropolitan University

1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0364, Japan

ABSTRACT

In the ATF (Accelerator Test Facility) damping ring, 96 button-type beam position monitors (BPMs) are installed. Clipping modules and 14-bit charge-sensitive ADCs are used in the readout system so as to measure the beam position in a single revolution of beam. The position resolution was about 50 μm at a beam intensity of 0.5×10^{10} electrons. But higher resolution became increasingly necessary for our beam studies. We improved the noise figure of a preamplifier in the clipping module. In addition, we are developing a fast clipping circuit to respond to a high frequency component in a BPM signal.

ATF ダンピング・リングに用いるビーム位置モニター用クリッピング・モジュールの改良

1. はじめに

ATFは、将来の電子・陽電子衝突実験用線型加速器の技術を開発するために高エネルギー加速器研究機構に建設された試験加速器である。将来の電子・陽電子衝突実験では規格化エミッタンスで $\gamma\epsilon_r = 30 \text{ nm}$ の超低エミッタンスが要求されている。このようなエミッタンスを実現するひとつの方法がダンピング・リングであるが、ビームの分散の補正が不可欠である。分散関数を測定するには RF 周波数をずらしたときの閉軌道歪みを比較しなければならないので、ビーム軌道の精密測定が必要である。このために、ATF ダンピング・リングでは $5 \mu\text{m}$ 以下の位置分解能が必要とされている[1]。

2. BPM 読み出し系

ATF ダンピング・リングには 96 台のボタン型 BPM が配置されている。それらは内径 24 mm の円筒形で、直径 12 mm のボタン型電極が 4 個ずつ着いている。ビームが誘起した BPM 信号は約 40 m の同軸ケーブル (RG223/U) を通してクリッピング・モジュールに送られる。共通のトリガー信号で同じ周回の BPM 信号を読み取れるように、ビームの飛行時間の差を考慮して、各おのの BPM に対するケーブルの長さが決められている。BPM 信号は両極性であるが、クリッピング・モジュールで極性を単一にして電荷積分型 14 ビット ADC で信号の大きさを読み出す。各おのの ADC のゲート信号は共通のトリガー信号から発生させるようにしてあるので、共通のトリガー信号の遅延時間を変えるだけで任意の周回のビーム軌道を測定できる。[2]

3. クリッピング・モジュール

クリッピング・モジュールは図 1 に示したように 2 段の増幅器、2 個のフィルター、クリップ回路で構成されている。2 段の増幅器の利得は可変であるが、普段は十分なビーム強度があるので、最小の利得で使っている。遮断周波数 100 MHz の低域通過フィルターは CLC401 の安定な動作のために必要である。中心周波数 30 MHz の帯域通過フィルターは図 2 に示したクリップ回路のショットキー・ダイオード (松下 MA700A) の安定な動作のためである。このショットキー・ダイオードは 30 MHz 以上の高周波信号に対してはコンデンサーのように振る舞う[3]。

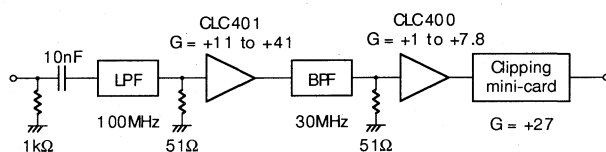


図 1. クリッピング・モジュールのブロック図。

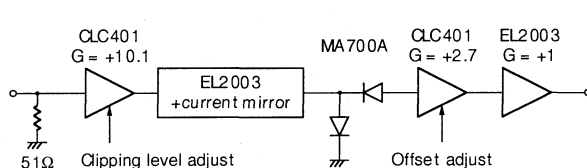


図 2. クリッピング・ミニカードのブロック図。

3.1. クリッピング・モジュールの線形性

パルス発生器による疑似信号またはビームによる BPM 信号を用いてクリッピング・モジュールの線形性を

調べた。あるチャンネルの例を図3に示した。ビームによるBPM信号を用いる場合には、入射リニアックからダンピング・リングに次のビーム・バンチを入射しないで、あるビーム・バンチをダンピング・リングに蓄積したままにする。ビーム強度は次第に減衰してくるので、繰り返しBPM信号を読み出すと様ざまのビーム強度のBPM信号を得ることができる。疑似信号は、500 MHzパルス発生器HP8131Aで発生させたパルス幅1 nsのパルスを5 pFのコンデンサーで微分したものを利用した。疑似信号の大きさは、ADC値を比較することによって、相当するビーム強度に換算した。図3に見られるようにショットキー・ダイオードの特性に起因する非線形性がある。各チャンネルについてこのような特性を予め調べてあるので、ADC値を読み出す度にこの非線形性を補正している。

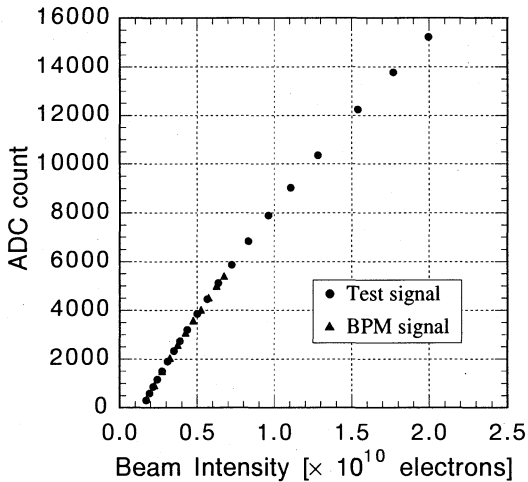


図3. クリッピング・モジュールの線形性。

3.2. BPMの位置分解能

疑似信号を用いてクリッピング・モジュールのS/N比に起因する位置分解能を調べた。このとき、同一の疑似信号をスプリッターでふたつのチャンネルに分配した。向き合う電極間で、誘起された電気量が Q_1 、 Q_2 であるとき、ビーム位置 X は一次近似的に

$$X = S \cdot \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 + Q_2}$$

のように表せる、ここで S は位置感度係数で $S = 6388 \mu\text{m}$ である。疑似信号による試験ではふたつのチャンネルのADC値 A_1 、 A_2 とそれらの平均値 M_1 、 M_2 を用いて

$$X = S \cdot \frac{\frac{A_1 - A_2}{M_1} - \frac{A_2 - A_1}{M_2}}{\frac{A_1 - A_2}{M_1} + \frac{A_2 - A_1}{M_2}}$$

として、平均値で規格化することでチャンネル間の利得や非線形性の違いを一次近似的に補正した。位置分解能は X の分布のRMSとして評価した。蓄積ビームで位置分解能を評価する場合、ビームはある同一の閉軌道を走る

と仮定した。あるビーム強度の領域でADC値間の相関を多項式 P で当てはめておいて、ビーム位置 X を近似的に

$$X = S \cdot \frac{P(A_1) - A_2}{P(A_1) + A_2}$$

として、位置分解能を調べた。疑似信号(丸印)あるいは蓄積ビーム(三角印)を用いて評価した位置分解能をビーム強度の関数として図4に示す。位置分解能はビーム強度に反比例しているが、非線形性のためにビーム強度が大きいくところでは位置分解能が飽和している。 0.5×10^{10} electronsのビーム強度では位置分解能は約 $50 \mu\text{m}$ であった。この位置分解能を改善するにはクリッピング・モジュールのS/N比を良くしなければならない。

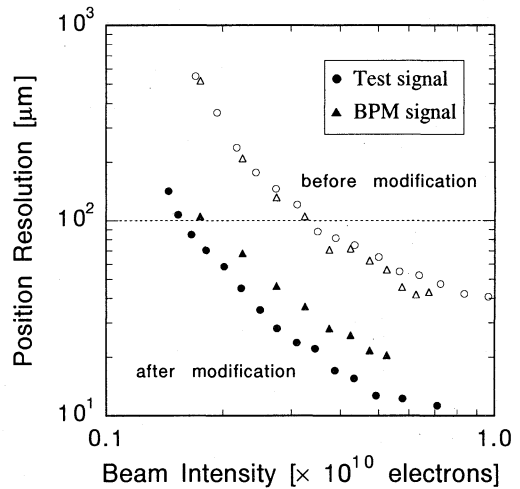


図4. BPMの位置分解能とビーム強度。

4. クリッピング・モジュールの改良

位置分解能を改善するためにクリッピング・モジュールの前段増幅器の入力雑音を減少させた。図5のように、1段目のCLC401を低雑音のCLC425に変更し、帰還抵抗(R_G と R_F)を減少した。更に前段増幅器の入力にトランスを用いた。変更点を表1にまとめた。

表1. クリッピング・モジュールの改良点。

| | before | after |
|---------------------------------|--------|--------|
| OP amplifier | CLC401 | CLC425 |
| R_G [Ω] | 200 | 12 |
| R_F [Ω] | 2000 | 240 |
| Transformer | n/a | 1:4 |
| e_n [nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$] | 4.35 | 0.73 |
| NF [dB] | 20 | 6 |
| σ [μm] | 17 | 3 |

これらの変更により、雑音は入力雑音電圧に換算して $4.35 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ から $0.73 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ に減少し、雑音指数は20 dBから6 dBに減少することが期待される[4]。これは 1×10^{10}

electrons のビーム強度で $3\ \mu\text{m}$ の位置分解能に相当する。疑似信号による試験では 1×10^{10} electrons のビーム強度相当の疑似信号で約 $8\ \mu\text{m}$ の位置分解能を得た。蓄積ビームによる試験では期待していた位置分解能を得られなかったが、 0.5×10^{10} electrons で $20\ \mu\text{m}$ まで改善した (図 4)。

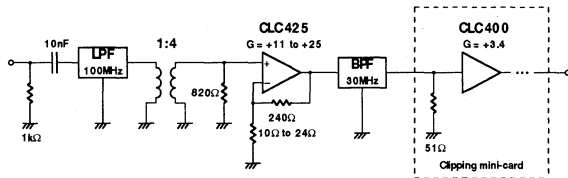


図 5. クリッピング・モジュールの改良版.

5. クリップ回路の開発

クリップ回路に使われているショットキー・ダイオードは 30 MHz 以上の速い信号では動作しない。しかし BPM 信号はそれ以上の高周波成分が主であるので、クリップ回路が速い信号で動作できれば S/N 比を良くすることができる。そこで、MOS FET を B 級動作で使用したクリップ回路を試作した。使用した MOS FET (日立 2SK439) の伝達特性を図 6 に示す。試作した回路を図 7 に示す。初段の接合型 FET (日立 2SK291) と 2 段目の MOS FET は前段増幅回路で、3 段目の MOS FET が B 級動作になっている。

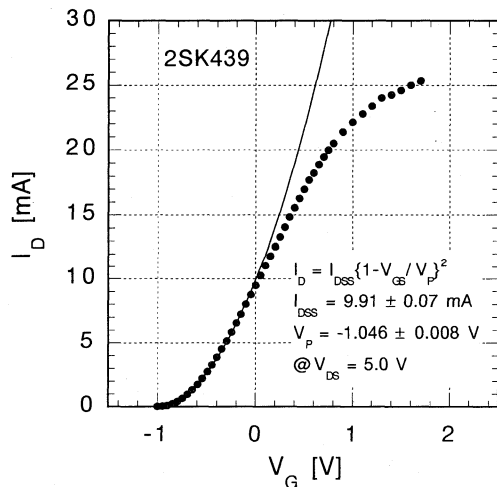


図 6. 2SK439 の伝達特性.

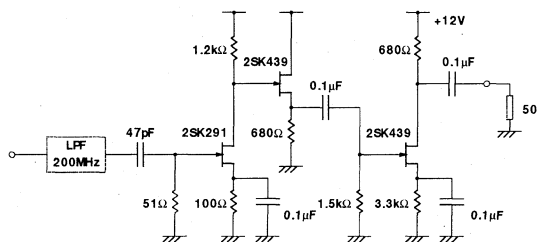


図 7. MOS FET を用いたクリップ回路.

疑似信号を用いて位置分解能を調べた結果を図 8 に示す。この試験の場合、疑似信号は、帯域 1 GHz、利得 15 dB の増幅器を通してから 2 チャンネルの試作回路に入力した。横軸は遮断周波数 200 MHz の低域通過フィルターを通した後の信号の振幅である。増幅器の非線形性による位置分解能の飽和が見られるが、約 $5\ \mu\text{m}$ の分解能が得られた。 0.5×10^{10} electrons のビーム強度のとき、遮断周波数 200 MHz の低域通過フィルターを通して BPM 信号を見ると約 40 mV の振幅になるので、前段増幅器の利得を 20 dB 上げることで $10\ \mu\text{m}$ 以下の位置分解能が得られそうである。

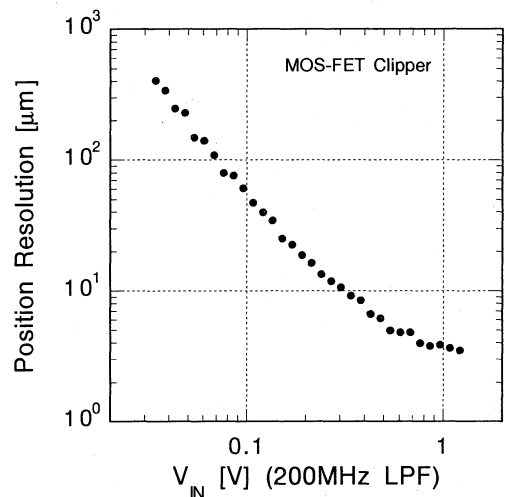


図 8. MOS FET クリップ回路の位置分解能.

6. まとめ

現在 ATF ダンピング・リングで使用しているクリッピング・モジュールでは BPM の位置分解能は、 0.5×10^{10} electrons のビーム強度で $50\ \mu\text{m}$ であった。クリッピング・モジュールの前段増幅器の入力雑音を減少することで $20\ \mu\text{m}$ まで改善した。また、ショットキー・ダイオードの代わりに B 級動作の MOS FET を用いたクリップ回路を試作した。前段増幅器の利得を 20 dB 上げることで $10\ \mu\text{m}$ まで改善できそうである。

謝辞

クリッピング・モジュールの前段増幅器の入力雑音を評価していただいた SLAC の Smith 氏に深く感謝します。

参考文献

- [1] F. Hinode *et al.*, KEK Internal 95-4 (1995).
- [2] F. Hinode *et al.*, Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (1997).
- [3] M. Takano *et al.*, Proceedings of the 11th Symposium on Accelerator Technology and Science (1997).
- [4] S. Smith (SLAC), private communication (1998).