

SOLID-STATE (MOSFET) MARX GENERATOR DRIVEN ION BEAM CHOPPER

Teruo Arai¹, Toshikazu Adachi^{1,2}, Leo Kwee Wah², Ken Takayama^{1,2,3}, Akira Tokuchi^{1,4}

¹KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

²The Graduate University for Advanced Studies, Hayama, Kanagawa, Japan

³Tokyo Institute of Technology, Nagatsuda, Kanagawa, Japan

⁴Pulse Power Japan Lab., Kusatsu, Shiga, Japan

Solid-State Marx Generator 駆動イオンビームチョッパー

Abstract

In the pulse mode ECR operation, it takes a time duration of msec to achieve a saturation in the plasma density. An injection pulse length of 5 μsec in the KEK digital accelerator is expected, because it has a revolution time period of 12 μsec for a low energy ion, where one turn injection is employed. A beam chopper is required. A longitudinal chopper called “Einzel lens chopper” has been newly developed for this purpose. This chopper functionality is implemented in the Einzel lens that is placed right after the ion source for beam optics matching downstream. The longitudinal chopper is realized by controlling the Einzel lens middle-electrode potential to gate the ion beam stream. Marx Generator is used to generate negative high voltage pulses which is added to the positive high voltage for blocking an ion beam. All devices are installed near the ion source and just upstream the post-acceleration of 186 kV. As the result, X-ray, secondary electrons or out gassing can be minimized, which are big figure of merits. Rising/falling times of a 5 μsec long beam pulse are sufficiently short; then the chopper is being operated very stably in beam commissioning experiments now.

1. 緒言

KEK 旧 500MeV ブースターリングを改装して、RF 加速装置を誘導加速装置に置き換え、誘導加速シンクロトロン[1, 2]として動作するデジタル加速器[3, 4]が運転を開始した[5, 6] (図 1 参照)。

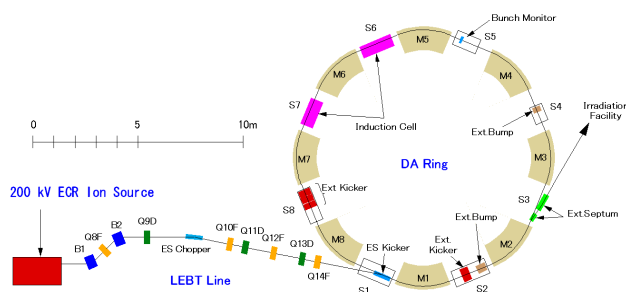


図 1：デジタル加速器の概略

この加速リングに供給するイオン源として、新たにパルスモードで動作する永久磁石 x-band ECR イオン源を開発し用いている[7]。取り出し電圧 14 kV で引き出されたイオンは 186 kV の post-acceleration を受け、イオン選別磁石で選別され、Low Energy Beam Transport (LEBT)を経由して、デジタル加速器リングに入射される。入射には静電キッカーが用いられる。入射前に 20 kV まで印加されたキッカー電圧は入射したビームパルスが 1 ターンして戻って来るまでにアース電圧に降圧される。有限な falling 時間を考慮して入射されるビームパルス長は 5 μsec に決められた。

パルスモード ECR 方式の特性として、プラズマの成長に msec オーダーの時間を必要とする。この事情からビームチョッパーが必須となる。

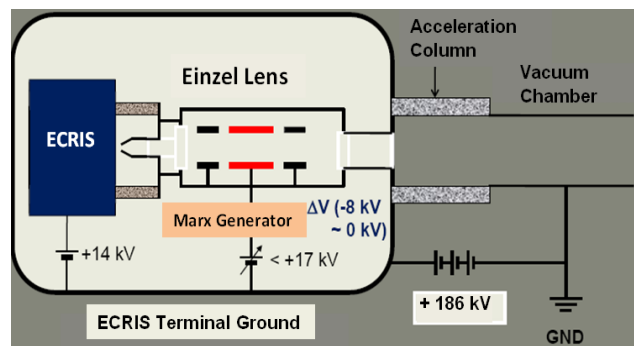


図 2：イオン源構成の概略

ビームチョッパーとして通常の横方向ではなく、縦方向（ビーム軸方向）にチョップする方法が考案された。ECR イオン源と 200 kV 加速管の間に置かれた横方向 matching 用 Einzel レンズにこの機能を担わせた (図 2 参照)。製作されたチョッパーとその動作特性については論文[8]に詳しいが、ここではそのアウトラインを紹介する。

収束用として不可欠な Einzel レンズとの共用でチョッパーヘッドは不要になり、コストの大幅減につながる。又、最小エネルギーでビームハンドリングを行う事により X 線や二次電子エネルギーが小さくアウトガスも低く抑えられる等のメリットが強調される。

2. Einzel レンズと Longitudinal Gating のアイデア

Einzel レンズは、イオン源引き出し電極の直下に置かれる 3 個の円筒状の電極で、中間電極を正電圧に印加し、前後の電極はアース電位とする。中心から外れたイオンは電極ギャップを通過する際に中心からの距離依存性を持った減速と加速の力を順次受け、収束される。通常下流の optics に応じ、matching 最適化の条件から中間電極の電位は決められる。

この中間電極の電位を ECR イオン源からの引き出し電圧ないし、それより大きな電圧に維持すると下流域へのイオン流をブロックできることは容易に想像できる。即ち、この中間電極電位の制御によってイオン流のコントロールが可能になる筈である。これを longitudinal gating と呼ぼう。この中間電極電位を変化させた場合のイオンの動きについてシミュレーションした結果を図 3 に示す。

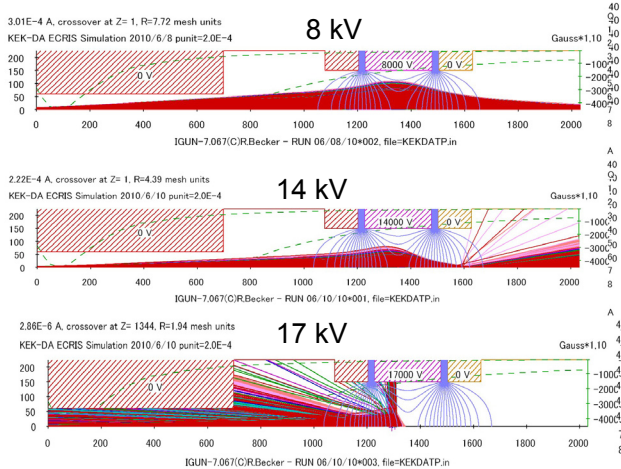


図 3 : Einzel Lens 域の IGUN シミュレーション

17 kV でイオン流が完全にブロックされる事が示された。この予想に従って実測が行われた。イオン源直下に置いたファラデーカップによりイオン電流を測定したところ、17 kV を少し超えたところでイオン電流はゼロになり、イオンビームが完全にブロックできることが確認された (図 4 参照)。

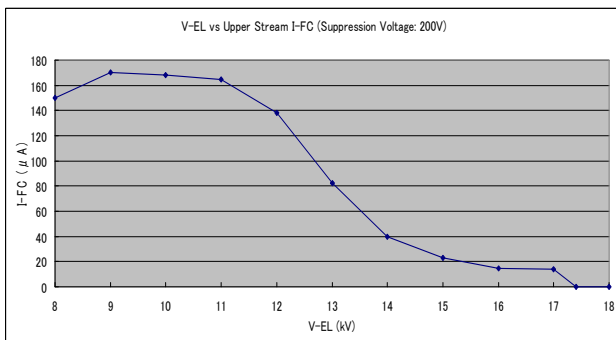


図 4 : イオン電流の中間電極電位依存性

この Longitudinal gating を μsec オーダーで行えば、結果としてそれがここで求めるチョッパーとなる。

即ち、中間電極電位を、通常は完全にイオン流をブロック出来る電位に保持し、イオンが必要な時間幅のみ横方向収束に必要な電位 (今回のケースでは 11 kV) まで落としてやれば良い。この目的のために次節で解説する負電圧の矩形パルスを生成する Marx Generator を製作した。

3. MOSFET Marx Generator

Einzel レンズ中間電極には、高压電源から供給されるブロック電圧がコンデンサにチャージされた形で印可され、そのコンデンサとグランド間に 4 段構成の Marx Generator が接続される。各段のコンデンサには負極性の高压が供給され、常時並列充電されている。各スイッチ (MOSFET) を同時にオンすることで直列放電させ、ブロック電圧に重畳される。MOSFET のオン抵抗と等価に設定されたスイッチを仮定し、図 5 (上) に示した等価回路のシミュレーションを行った。

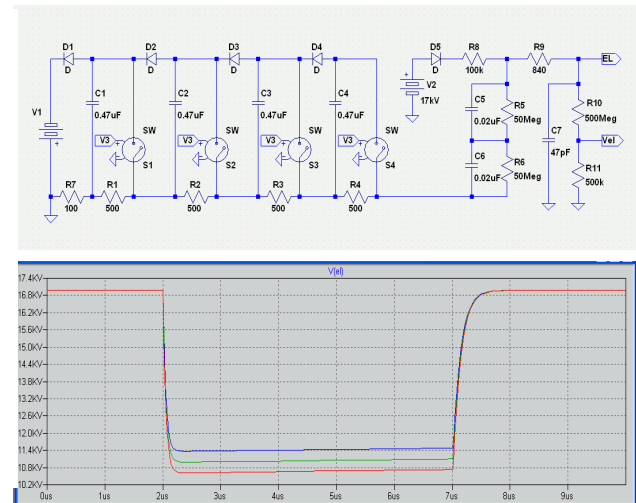


図 5 : 重畳電圧のシミュレーション結果

波形の立下り立ち上がりおよび平坦度ともに十分な特性が予想された。製作された Marx Generator はコンデンサバンクと耐圧 4 kV 電流パルス最大 3 A の MOSFET が 3 並列接続等を中心に組み立てられ、それを 4 段直列に構成される。

4. 電圧重畳波形とビームチョッパー

これらの装置一式をイオン源下流に組み込んだ後、電気特性およびビームチョップ性能について検証した。電気的には、シミュレーション回路にも含まれている抵抗分圧回路を用いて観測された。結果を図 6 に示す。波形の形状及び平坦度ともにシミュレーション結果と良く一致しており、概ね想定どおりの特性が得られた。

一方、チョップされたビーム電流は 186 kV の post-acceleration を経て分析磁石下流 2.5 m に置かれたファラデーカップで測定された。実験では 5 msec 長のイオン源からのパルス (図 7 参照) の異なるタイミングでチョップされた。イオンビーム電流パルス波形を図 8 に示す。

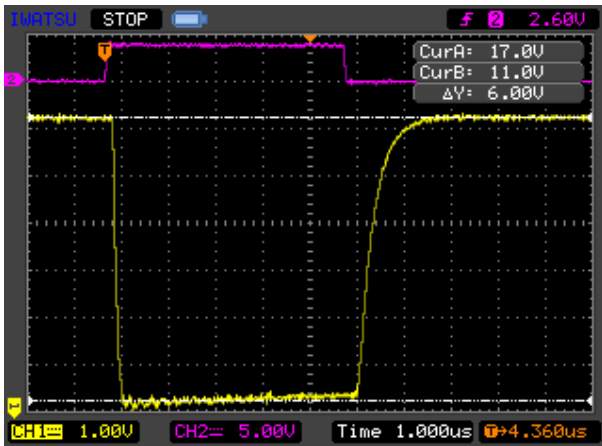


図 6 : Marx Generator 重畳電圧の実測結果
CH2 : 各スイッチへのトリガー波形、CH1 : 直列放電された-6 kV をブロック電圧である+17 kV に重畳した中間電極電圧波形。

5 msec He¹⁺ Ion Beam

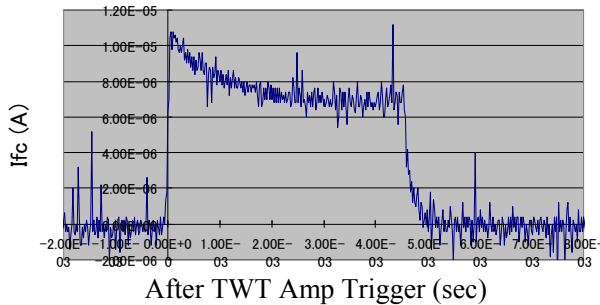


図 7 : イオン源に 9.3GHz 700W のマイクロ波を 5 msec 間照射して引き出されたイオンビーム電流

5 μ S Chopped Beam

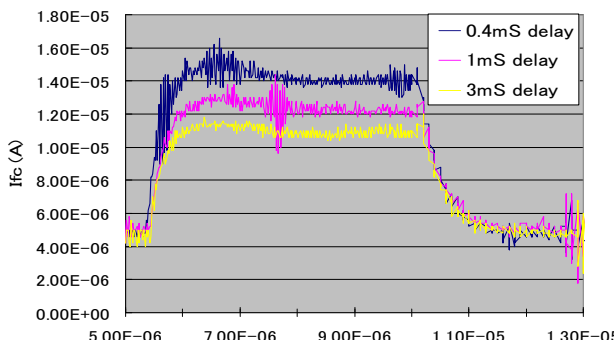


図 8 : マイクロ波を増幅する TWT アンプのトリガー信号から 0.4、1、3 msec 後に Marx Generator をトリガーしたビームチョップ波形

図 8 の波形の立ち上がり立下りのなまりは、ファラデーカップ測定系（同軸ケーブル長等）に起因するもので、電流値は 5 msec ビームパルスの各チョップ箇所の値と符合しており、リング内の静電モニターではビームの切れは十分と判断された。また、

平坦度についても、ファラデーカップと静電モニターの観測から十分なレベルと考えられる[5, 6]。

5. まとめ

MOSFET Marx Generator 駆動 Einzel レンズチョッパーの利点を要約すると；

- 専用のチョッパーヘッドを必要としない。
- 特別な高圧制御の部品は必要としない。
- 低エネルギー段階でのビーム処理のため付随する弊害も軽微となる。
- 結果的に同目的の横方向チョッパーとして比較してそのコストは十分の程度である。

今後の課題は；

- ビーム電流を増やした場合チョッパー域の真空排気系の増強。
- 多価イオンを扱う際のチョッパータイミングの最適化。

現在このチョッパーは安定にデジタル加速器へビームを供給している[5, 6]。

謝辞

江教授（長岡技科大）がパワー半導体利用の Marx Generator の情報をもたらした。荒木田是夫氏（KEK）は SPICE シミュレーションへのアドバイスを、高木昭氏（KEK）は Marx Generator 用の DC 充電器の初期セットアップに協力した。

参考文献

- [1] K. Takayama, Y. Arakida, T. Dixit, T. Iwashita, T. Kono, E. Nakamura, K. Otsuka, Y. Shimosaki, K. Torikai, M. Wake, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 054801-4 (2007).
- [2] “Induction Accelerators”, K.Takayama and R.Briggs (Eds.) (Springer, 2010).
- [3] K. Takayama, Y. Arakida, T. Iwashita, Y. Shimosaki, T. Dixit, and K. Torikai, *J. of Appl. Phys.* **101**, 063304-8 (2007) Patent No. 3896420, PCT/JP2006/308502 (2006).
- [4] T. Iwashita, T. Adachi, K. Takayama, T. Arai, Y. Arakida, M. Hashimoto, E. Kadokura, M. Kawai, T. Kawakubo, Tomio Kubo, K. Koyama, H.Nakanishi, K. Okazaki, K. Okamura, H. Someya, A. Takagi, A. Tokuchi, K. W. Leo, and M. Wake, *Phys. Rev. ST-AB* **14**, 071301 (2011).
- [5] T. Iwashita *et al.*, TULH04 in this Conference.
- [6] T. Iwashita *et al.*, TULH04 8th annual proceeding.
- [7] Leo Kwee Wah, K.Takayama, T.Arai, K.Okazaki, A.Takagi, T.Adachi, K.Koyama, M.Wake and Y.Arakida, *19th International Workshop on ECR Ion Sources*, August 23-26, 2010 Grenoble, France, TUPOT15 (2010).
- [8] T. Adachi, T. Arai, K. W. Leo, K.Takayama, and A. Tokuchi, *Rev. Sci. Inst.* (2011) in print.