

氏 名 梁 桂华(LEO KWEE WAH)

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1550 号

学位授与の日付 平成24年9月28日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Ion Beam Handling by an Einzel Lens Chopper for the KEK
Digital Accelerator

論文審査委員 主 査 准教授 鄭 淳讚
准教授 安達 利一
教授 大澤 哲
教授 高山 健
教授 内藤 富士雄
教授 堀岡 一彦 東京工業大学
准教授 篠塚 勉 東北大学

The KEK-Digital Accelerator (DA) has been constructed, and it is in commission now. This accelerator is a rapid cycle synchrotron. Its acceleration principle is based on the induction synchrotron (IS) concept which was demonstrated in 2006 using the existing KEK 12 GeV proton synchrotron. For KEK-DA, an ion beam is extracted from an ion source, chopped, post-accelerated and immediately guided to be injected to the DA ring. Presently, a permanent magnet type of Electron Resonance Ion Source (ECRIS) is utilized as the ion source for the KEK-DA. In order to mitigate the space charge effect and closed orbit distortion caused by a remanent field in the ring, the ion beam must be accelerated further after extraction. Therefore, the KEK-DA ECRIS is embedded inside a 200 kV High Voltage Platform (HVP).

In order to accelerate an ion beam in a synchrotron, a beam pulse length must be less than revolution time period in the ring. Since the typical revolution time is $\sim 10 \mu\text{s}$ in the KEK-DA, a ms ion beam which is produced from an ECRIS must be chopped before injection into the ring. For such purpose, a novel chopper device has been developed. The novel chopper, so-called Einzel lens chopper, has been developed and demonstrated. Its principle is rather simple: by modulating a voltage applied to the middle electrode of the Einzel lens, it is worked as a longitudinal gating device as well as the focusing device. This performance can be realized by introducing a Marx generator to provide a pulse voltage in a desired duration time. The Marx generator used in the present studies has the fast response of rising and falling times with the solid-state switching device.

For this implementation, the functionality and performance of the Marx generator have been confirmed by measurement and simulation. At first, in order to obtain a voltage for beam blocking and another voltage for beam optics matching of the Einzel lens, a beam blocking experiment was carried out by using the helium and nitrogen ion beams. In addition, a simulation was also performed by using the IGUN code. The chopping performances with different chopping timings and time durations have been investigated by observing time profiles of the chopped beam at a Faraday cup. The results were further confirmed and explained by using the circuit model of the Faraday cup. Reconstruction of a beam profile from the observed signal, which is modified by the Faraday cup response, is important to investigate a chopper performance. By solving the inverse problem, the beam profile was reconstructed successfully.

A chopped beam is transported through a transport line and injected into the ring. In order to avoid a beam loss during transportation, it is important to know a beam emittance. Therefore, a beam emittance measurement was carried out by using a pepper pot emittance monitor. Through this experiment, the measurement and analysis procedures have been established. The optimization of the LEBT parameter was performed to reduce the beam losses.

For further investigation of the transient beam behavior from the Einzel lens to the DA ring, a simple code was developed. By using the simulation result, the intrinsic characteristic of the Einzel lens chopper was indentified. Such an intrinsic nature is that the bunch head is retarded and bunch tail is moving forward. This source is originated from the transient time region of the Einzel lens chopper voltage, which modulates a momentum at the bunch head and tail. This phenomenon, which is called as “drift compression”, has been confirmed by comparing the bunch profile at the entrance and exit of transportation line. For the beam motion in the ring, beam diffusion or spread is also observed in the experimental and simulation results. For a long distance beam motion in the ring, the space charge effect is clearly seen: the particles are diffused from the bunch in time. The experimental results for the longitudinal motion can be quantitatively reproduced by using our simulation code.

Presently, the Einzel lens chopper has been operating successfully with its stable and reliable performances and without causing any trouble during the KEK-DA beam commissioning.

Leo氏の提出論文の主な内容は、KEK デジタル(KEK-DA) 加速器が要求する入射ビームの条件を満たすパルスビーム供給法に関する開発研究である。KEK-DAは、旧500MeVブースターを改造し、KEKの12GeV-PS(Proton Synchrotron)を用いて実証された誘導加速の原理を導入した、世界初の誘導加速シンクロトロンの実用機である。現在、その試運転が行われている。Leo氏は、電子サイクロトロン共鳴型イオン源(ECRIS)によるビームの生成、加速器の入射条件に合わせたビームのパルス化、ビームの評価等を担当し、その試運転には中核的なメンバーとして活躍している。当論文では、ここで得られた研究成果を纏めながら、特にビーム操作(ビームのパルス化及び評価)という観点から焦点を絞って論じている。

当論文では、数マイクロ秒程度の幅を持ち、10Hzで繰り返すパルスビームを生成するために、イオン源から引き出されたビームの動径方向収束用光学要素としてよく用いられるアインツェルレンズの動作原理に注目した。開発した手法は、ビームが進行する方向に静電バリアーを設けておき、必要な時間のみ解除することで、アインツェルレンズによるビームのパルス化を行う「軸方向チョッピング」手法である。アインツェルレンズチョッパーの製作に当たっては、半導体スイッチ素子を用いた4段式パルス電圧発生器(Marx generator)を製作して、ビームパルスに要求される早い時間応答を実現させた。ビームのパルス化の為に、新たな要素を追加するのではなく、既存の要素の動作原理に着目し、目的とする新たな機能を付け加えた上で安定に動作させることは工学的に重要な試みである。

アインツェルレンズによるビームのパルス化は世界初めての試みである。そのため、生成されたパルスビームの動的振る舞いについての考察が不可欠である。具体的には、パルス化された後、加速器に入射されるまでとKEK-DAのリングの中で、ビームエミッタンスがどう変わって行くのかについて、数値解析と実測の比較を行い、丁寧に論じている。軸方向のエミッタンスについては、独自に開発したイオン光学の数値解析コードによるシミュレーション結果との比較を行っている。これによって、アインツェルレンズによるパルスビームの時間特性を定量的に解析することが可能となり、軸方向チョッパーの普遍的な特性とも言える「ドリフトバンチ圧縮」と呼ぶべき現象が生まれることを見出した。この現象は、有限な時間で立ち上がり、立ち下がるバリアー電圧のパルス特性に起因する軸方向運動量への摂動の必然的帰結であり、リングの中で加速せずに周回させながら測定したビームのパルス波形の時間変化として観測された。当論文での解析結果は、これを見事に再現している。縦・横方向のエミッタンス、ビームの輸送効率についても論じおり、測定値とのずれ(~30%程度)についての定性的な考察が行われている。

当研究で開発されたアインツェルレンズチョッパーは、KEK・DAが要求するビームの安定供給を実現しており、当手法は動作原理の定量的な解析も含めて技術的に完成されたと考えられる。又、より一般化した技術として当手法の更なる発展が期待される。

独創的なビーム操作手法のアイデアを、綿密な数値解析と実測によって追及し、技術的に完成させた当研究は、加速器の運用に欠かせないビーム供給手法の一つとして、ビーム生成に当たるイオン源分野のみならず、加速器分野にも有用な寄与をされると考えられる。

以上により、審査員全員はLeo氏の研究は博士論文に値すると判断した。