

# 超高エネルギー重イオン注入用線形加速器の研究 (全体設計)

服部俊幸<sup>1</sup>、土屋和利、山本和男、長江大輔、林崎規託、  
柏木啓次、高橋康之、畑寿起、高野淳平、高野智  
東京工業大学 原子炉工学研究所  
152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1

## 概要

3次元半導体製造用の核子当たり1MeV近くまでB、Pを加速する超高エネルギー重イオン注入機システムを計画し概念設計を行った。永久磁石型ECR重イオン源からのイオンを加速入射後、2台のAPF-IH型線形加速器で加速し、エネルギーの可変性を持たせている。B、P、Asの多価重イオン発生用永久磁石型ECRイオン源は現在製作中である。また第1線形加速器は軌道計算、1/2スケール高周波試験モデルのテストを行い、現在はAPF-IH型加速空洞の電磁場特性について計算機シミュレーション中である。

## 1. はじめに

3次元IC半導体や先端のCCD素子への利用を考慮した、十分に3次元重イオン注入が可能で、B、P、Asを核子当たり1MeV近くまで加速するシステムを計画している。

超高エネルギー領域の重イオン注入に対して、現在一般に実用化されている高エネルギー重イオン注入機である、静電加速器や単空洞重連加速器<sup>[1]</sup>は対応することが困難である。そこで、永久磁石型ECR多価重イオン源を既存の中エネルギーイオン注入機へ搭載し、これを入射機として2台のAPF-IH型線形加速器でB、P、Asを核子当たり1MeV近くまで、エネルギー可変性を有しながら加速するシステムの概念設計をおこなった。

## 2. 全体設計

考案した超高エネルギー重イオン注入機システムは、永久磁石型ECRイオン源と2台の線形加速器により構成され、加速粒子は $B^{2+}$ 、 $P^{6+}$ 、 $As^{8+}$ イオンを予定している。線形加速器は格段に電力効率の良いIH型とし、低エネルギー入射が必要なために、これに適したAlternating Phase Focus (APF) 収束構造<sup>[2-11]</sup>を採用した。運転周波数は入射のセル長と小型化を考慮して65MHzとしている。

第1線形加速器の加速エネルギーは、BやPについては1MeV近く、Asは10MeVとした。入射エネルギーは、既存の中エネルギーイオン注入機の加速エネルギーである200kVを考慮して20keV/uとした。

最初の線形加速器で10MeVのAsイオンを発生させ、第2線形加速器で最大エネルギー0.91MeV/u、すなわち10MeVのBと28MeVのPを発生できる。第1線形加速器と第2線形加速器の加速電圧、高周波位相の組み合わせにより、完全なエネルギーの可変性を実現させることが可能であろう。2台の加速器と連結部分を入れた加速器長は3mである。

## 3. 多価重イオン生成イオン源

半導体用のB、P、Asなどの多価イオンを発生するために小型永久磁石型ECRイオン源を現在開発中である。常伝導型ECRイオン源ではミラーコイル電力として100kW前後を必要とし、その冷却用の冷却水がまた必要となる。超伝導コイルでは電力や電源は小さくなるが、イオン源自体が大型化する。このため、ミラーコイル磁石を永久磁石化することで、省電力と小型化を狙った。

イオン源の開発は、放射線医学総合研究所と服部研究室で共同研究を行っている永久磁石型ECR型イオン源<sup>[12]</sup>をベースにしながら、経済産業省の「大学発事業創出実用化研究開発事業」の支援を受けて進められている。この小型永久磁石型ECRイオン源を利用して、システムを組み上げることを考えている。その詳細については、本研究会で報告予定である<sup>[13]</sup>。

## 4. 第1線形加速器

第1線形加速器の設計にあたっては、これまでに服部研究室が開発して2001年に陽子加速に成功したAPF-IH型線形加速器（入射エネルギー11keV/u、出射エネルギー90keV/u、運転高周波数65MHz）を参考にした。第1線形加速器の入射エネルギーは20keV/uで、出射エネルギーは10MeVのAsが得られる140keV/uとした。加速空洞の内径は70cm、長さは70cm、共振周波数は65MHzを予定している。この第1線形加速器のパラメータを表-1に示す。

イオン源から第1線形加速器への入射エネルギーは $As^{8+}$ （電荷/質量比： $\epsilon = 1/9.4$ ）において187.5kVを必要とする。このため、既存の200kVの中エネルギー重イオン注入機に永久磁石型ECRイオン源を搭

<sup>1</sup> E-mail: thattori@nr.titech.ac.jp

載し、入射器とすることを考えている。

この第1線形加速器については、現実的な設計開発を進めており、詳細は本研究会で報告予定である<sup>[14]</sup>。

表-1 第1線形加速器の設計パラメータ

Acceleration Particle (q/A)	$B^{2+}, P^{6+}, As^{8+} \geq 1/9.4$
Input Energy	20 keV/u
Output Energy	140 keV/u
Operation Frequency	65 MHz
Synchronous Phase	$-35^\circ, -35^\circ, 35^\circ, 35^\circ$
Number of Cell	18
Cavity Length	70 cm
Cavity Diameter	70cm
Focusing Sequence	$-35^\circ, -35^\circ, 35^\circ, 35^\circ$
Transverse Acceptance	$152 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$
Longitudinal Acceptance	$30^\circ$
Transmission	60 % by Buncher
Acceleration Voltage/Gap	50-150kV
Acceleration Rate	1.6 MV/m

## 5. 第2線形加速器

第1線形加速器における加速後、イオンは収束用四重極磁石を通過して第2線形加速器に入射する。このとき第1と第2線形加速器の加速電圧と加速位相を制御することにより、第2線形加速器の入射エネルギーから出射最大エネルギーまでのエネルギーを変えることが可能である。

したがってイオン種別によって、第2線形加速器の運転方法が異なる。Asの場合は、すでに第1線形加速器によって10MeVまで加速されているので、そのまま素通りして、イオン注入ラインに輸送される。BやPにおいては0.91MeV/uの加速がおこなわれ、Bが10MeV、Pが28MeVの最大加速エネルギーが得られる。

第2線形加速器の空洞内径は100cm、長さは180cm、共振周波数は65MHzを予定している。その設計パラメータを表-2に示す。

表-2 第2線形加速器の設計パラメータ

Acceleration Particle (q/A)	$B^{2+}, P^{6+} \geq 1/5.5$
Input Energy	140 keV/u
Output Energy	910 keV/u
Operation Frequency	65 MHz
Synchronous Phase	$-30^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 30^\circ$
Number of Cell	22
Cavity Length	180 cm
Cavity Diameter	100cm
Focusing Sequence	$-30^\circ, -30^\circ, 30^\circ, 30^\circ$
Transmission	~100 %
Acceleration Voltage/Gap	200-350kV
Acceleration Rate	2.35 MV/m

## 参考文献

- [1] M.Tsukihara and M.Sugihara; Proc. 1<sup>st</sup> Symposium on Accelerator and Related Technology for Application Nov30-Dece1, 1(1998)91-94
- [2] T.Hattori, K.Isokawa, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, T.Yoshida, S.Majima, S.Yamada and S.Yamaki : Proc.21<sup>st</sup> Linear Accelerator Meeting,21(1996) 278-280.
- [3] T.Hattori, K.Isokawa, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, T.Yoshida, S.Majima, N.Sakamoto, S.Yamada and S.Yamaki : Proc.22<sup>nd</sup> Linear Accelerator Meeting,22(1997) 22-24.
- [4] T.Hattori, K.Isokawa, S.Matsui, K.Sasa, T.Ito, H.Tomizawa, N.Hayashizaki, T.Yoshida, N.Sakamoto, S.Yamada S.Yamaki,E.Osvath, D.Dudu and H.Schubert : Proc.23rd Linear Accelerator Meeting,23(1998) 352-354.
- [5] K.Isokawa, T.Hattori, S.Majima and S.Yamada : Proc.21<sup>st</sup> Linear Accelerator Meeting,21(1996) 281-283
- [6] K.Isokawa, T.Hattori, S.Majima and S.Yamada : Proc.22nd Linear Accelerator Meeting,22(1997) 302-304
- [7] K.Isokawa, T.Hattori, T.Ito, N.Hayashizaki, S.Majima and S.Yamada : Nucl. Inst. and Meth.,A145(1998) 287-290
- [8] T.Hattori, K.Sasa, M.Okamura, T.Ito, H.Tomizawa, T.Katayose, N.Hayashizaki, T.Yoshida, K.Isokawa, M.Aoki, N.Fujita and M.Okada: Fusion Engineering and Design 32-33(1996)359-363.
- [9] T.Hattori, S.Matsui, N.Hayashizaki, H.Tomizawa, T.Yoshida, K.Sasa, S.J.Gates,K.Kawasaki, T.Niizeki, K.Isokawa, T.Ito and M.Okamura; Nucl. Inst. and Meth., B161-163(2000)1174-1177;
- [10] S.Matsui, T.Hattori, N.Hayashizaki, H.Tomizawa, K.Sasa, T.Yoshida, K.Isokawa and T.Ito.; Nucl. Inst. and Meth., B161-163(2000)1178-1181;
- [11] N.Hayashizaki, T.Hattori, S.Matsui, H.tomizawa, T.Yoshida, K.Isokawa, A.Kitagawa, M.Muramatsu, S.Yamada and M.Okamura.; Reviw of Scientific Instruments 71(2000)990-992
- [12]M.Muramatsu, A.Kitagawa, Y.Sato S.Yamada, T.Hattori, M.Hanagasaki, T.Fukushima and H.Ogawa; Review of Scientific Instruments, 73(2002)573-575
- [13] D.Nagae; in these proceedings.
- [14] K.Tuchiya; in these proceedings.