

(F18p24)

THE 3-GAP RF ACCELERATOR FOR HIGH ENERGY ION IMPLANTER

Nariaki Hamamoto, Hiroshi Fujisawa and Yasuaki Nishigami

High Technology Research and New Business Division, Nissin Electric Co., Ltd.

575 Kuze Tonoshiro-cho, Minami-ku, Kyoto-shi 601-8205 Japan

A new 3-gap radio frequency (rf) acceleration cavity of quasi-quarter wave type has been developed for high energy ion implanter. To minimize the length of beam line with RFQ and successive rf accelerators, an electric field of the cavity should be as large as possible. To this end, structural optimization is carried out with the aid of the low power models and 3D eigenmode solver "MAFIA". Two rf cavities has been installed and tested as the post accelerator in the present RFQ beam line. Our No. 2 rf accelerator (RF#2) holds the total voltage gradient about 230kV at 5kW in CW mode. The energy gain of two rf accelerators is 390keV maximum with the incident energy of B⁺ 945keV from RFQ.

高エネルギーイオン注入装置用 3 Gap 加速管

[1]はじめに

近年、DRAMの製造プロセスにおいて素子分離の改善、プロセスコスト削減の面から、MeV オーダーでのイオン注入が注目されるようになった¹⁾。このような市場のニーズを背景に、現在RFQを使用した高エネルギーイオン注入装置の開発を行っている²⁾。RFQはビームの輸送効率が高いので大電流でビームを加速することができるが、周波数が一定の場合エネルギーを変化させることができない。従ってRFQをイオン注入装置に適用するためには様々なイオンに対して広いエネルギー可変範囲を有する後段加速部が必要である。これはギャップ数の少ない加速管を多段接続し、各加速管に投入する高周波パワー及び位相を独立に制御することによって達成される。

2~3のギャップを有するRF加速管は比較的早くから存在する。重イオンを加速する場合、加速管の共振周波数はできるだけ低い(10~50MHz)方が良いが、インダクターを長くする必要があるため加速管のサイズは大きくなる。インダクターをスパイラル状に巻くとタンクの大きさを小さくすることができ、このタイプのRF加速管は精力的に研究されている^{3),4)}。そこで、既存のRFQビームラインにスパイラル型加速管を取り付け加速試験を行ったが⁵⁾、装置仕様を満足するだけのエネルギーゲインを得ることができなかった。

一方、低い周波数で動作する1/4波長型共振器として、インダクターが螺旋状に巻かれたヘリカル共振器があり、Q値やインピーダンスについて実験的に詳しく調べられている⁶⁾。そこで新たにこの構造を採用し、3つの加速ギャップを有するヘリカル型3 Gap加速管を2台製作し、既存のRFQビームラインで検証した。以下、加速管の最適化及びビーム加速試験について報告する。

[2]加速管の構造

加速管の構造をFig.1に示す。アルミ製のタンク内には螺旋状に巻かれたインダクターが2本取り付けられており、一端はタンクの底面に固定され、反対側はドリフトチューブが取り付けられている。共振周波数は約33.8MHzであるのでインダクター部の総延長長さは約2.2mである。また銅管を曲げて製作するので機械的に

不安定であり、振動を防止するためドリフトチューブ側が高純度アルミナで製作された絶縁板によってタンク壁面に固定されている。インダクターの接地部は可動式になっており、インダクターの長さを変えることによって周波数の微調が可能である。インダクターの内部には冷却用のパイプが挿入されており2重管構造になっている。電力は導入口より容量結合で投入される。パワー投入による周波数変化は容量可変型チューナーによって補償される。加速管にはそれぞれL及びC型の高周波モニターが取り付けられており、それぞれチューナー制御回路、加速管の位相制御回路につながっている。

加速管は基本モードにおいてCWで励振され、パワーを投入するとドリフトチューブに互いに位相が π 異なる励振電圧が発生する。中央のギャップは両側のギャップに比べて2倍の加速電界強度を持つ。入射イオンの速度が加速時に一定であると仮定した場合、加速管のエネルギーゲインは次式で与えられる。

$$E = 4qVT \cos \phi \quad (2-1)$$

$$T = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\pi \frac{\beta_0}{\beta} \right) \right] \frac{\sin \left(\frac{\pi g}{\beta \lambda} \right)}{I_0 \left(\frac{2\pi d}{\beta \lambda} \right) \frac{\pi g}{\beta \lambda}} \quad (2-2)$$

$$\beta = \frac{v}{c}, \beta_0 = \frac{v_0}{c} = \frac{2L_g}{\lambda} \quad (2-3)$$

ここで q は電荷、 V はドリフトチューブの励振電圧、 ϕ は中央ギャップの中心をビームが通過するときの位相、 T はTTF、 I_0 は変形0次ベッセル関数、 β はビームの規格化速度、 g はギャップ長、 λ は共振波長、 d はドリフトチューブのボア径、 L_g はセル長である。

[3]ローパワーテスト及び最適化

RFQの後段加速部として1段目の加速管パワーモデルを製作するにあたり、先ず等倍サイズのローパワーモデルを使用し加速管のインピーダンス等を評価した。各モデルの高周波パラメーターをTable.1に示す。ここでfo

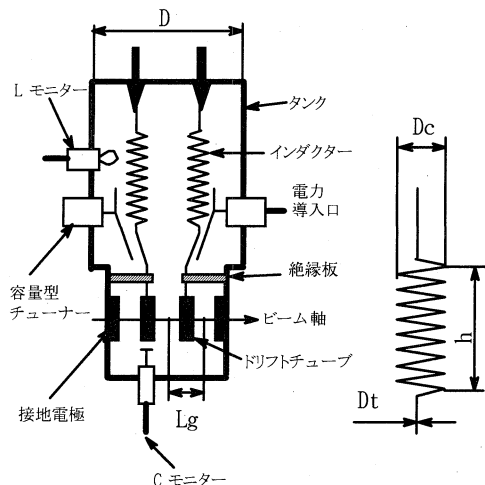


Fig.1 加速管の構造

	fo	Qo	Ro/Qo	Ro	D	Dc	Dt	h
	(MHz)		(Ω)	(MΩ)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
A	36	1520	1968	3.03	300	50	10	260
B	36.4	1540	2106	3.24	350	50	10	260
C	33	1740	1954	3.46	300	80	10	260
D	33.8	1780	2102	3.74	350	80	10	260
C*	31.1	4224	1943	8.21	300	80	10	260
D*	31.9	4377	2031	8.89	350	80	10	260
RF#1	33.8	2000	2250	4.50	350	80	10	200

Table.1 ローパワーモデルパラメーター

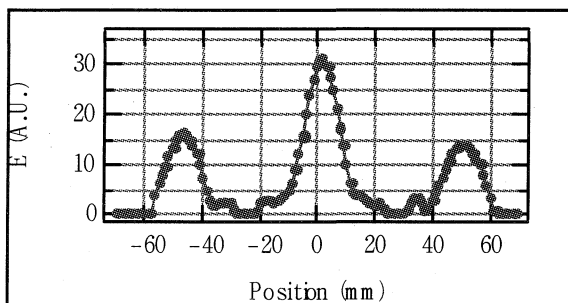


Fig.2 ビーム軸上電場分布

は共振周波数、 R_o は加速管あたりのシャントインピーダンスで次のように定義される。

$$R_o = \frac{\int |E| dz}{2P} \quad (3-1)$$

ここで E は加速電場、 P は投入パワーである。 Q_o は無負荷 Q 値、 R_o / Q_o は加速管の特性インピーダンス、 D はタンク内径、 D_c はインダクター巻き径、 D_t はインダクターのチューブ径、 h はインダクター巻き部の高さである。(Fig.1 参照) 表中の A~D はタンク内径及びインダクター巻き径を変化させたものである。 Q_o はネットワークアナライザ、 R_o / Q_o は金属小球による摂動法で測定した。ビーム軸上の加速電場分布を Fig.2 に示す。ローパワーモデルでは絶縁板にマコールを使用している。

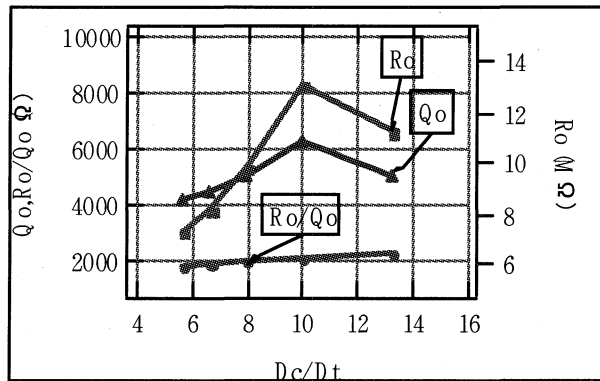


Fig.3 D_c/D_t と高周波パラメーターの関係

タンク径、インダクター巻き径を大きくすると R_o が大きくなっている。共振周波数はタンク内径が大きくなると高くなるが、これはインダクターとタンク間の容量成分が減少するためだと考えられる。

加速管で使用している絶縁板の誘電損失が大きいと Q 値の低下を招く。また R_o / Q_o は加速管の総インダクタンス、キャパシタンスをそれぞれ L, C として

$$R_o / Q_o = (L/C)^{0.5} \quad (3-2)$$

で表される。すなわちインダクタンスを上げキャパシタンスを下げれば加速管の R_o は上がることになる。この点を踏まえ、パワーモデル製作時ローパワーモデルに対して以下のような改造を行った。

- 絶縁板にマコールに比べ誘電損失の 1 桁小さい高純度アルミナを使用する。
- インダクターの高さ h を小さくする、すなわち巻きピッチを小さくすることによりインダクタンスを上げる。
- ドリフトチューブを小さくすることによってキャパシタンスを下げる。

1 段目の加速管 (RF#1) パラメーターを Table.1 の最下段に示す。ローパワーモデルに比べ Q_o 、 R_o / Q_o 共に上がっていることがわかる。 R_o は $4.5M\Omega$ である。またモデル C, D に対する 3 次元動電磁場解析 "Mafia" のシミュレーション結果 (C*, D*) を Table.1 に示す。尚シミュレーションにおいては、絶縁板の誘電損失を考慮していない。 Q_o は約 2.5 倍、 R_o / Q_o は実験結果とほぼ同じ値が得られている。

2 段目の RF 加速管を製作するにあたっては、さらに R_o の改善を図るべく、"Mafia" を使用しタンク内径、インダクター巻き径等、様々なパターンについてシミュレーションを行った。その結果以下のような傾向が見られることがわかった。

- タンク内径のみを変化させた場合、 R_o はスケールリング値に対して約 0.5 乗に比例して大きくなる。
- インダクター巻き径とインダクターチューブ径の比 (D_c / D_t) が約 10 の時に R_o が最大になる。

タンク内径 (D) が 350mm、インダクターチューブ径 (D_t) が 8mm において、インダクター巻き径 (D_c) を変化させたときの各高周波パラメーターを Fig.3 に示す。 Q_o は D_c / D_t が 10 の時最大になり、それ以下では急激に減少する。

	fo	Ro	Qo	Ro/Qo	Lg	D	Dc	Dt
	(MHz)	(M Ω)	(Ω)	(Ω)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
RF#1	33.8	4.5	2000	2250	60	350	80	10
RF#2	33.8	5.3	2300	2304	68	500	100	10
RF#1*	33.7	9	4500	2000	60	350	80	10
RF#2*	33	13	6012	2129	68	500	100	10

Table.2 加速管パラメータ

一方 R_o/Q_o は単調に増加する。 D_t については 10mm、12mm についても計算を行い、いずれも同様の結果を得た。但し、 D_t が大きくなるに従って R_o の変化は穏やかになる。

以上の結果から 2 段目の RF 加速管(RF#2)はタンク内径を 500mm、インダクター巻き径を 100mm、インダクターチューブ径を 10mm で製作した。それぞれの加速管パラメータ (RF#1、RF#2) 及びシミュレーション値 (RF#1*, RF#2*) を Table.2 に示す。2 段目の R_o は 1 段目に比べ約 17%改善されていることがわかる。一方シミュレーションで期待されるほどの改善は得られていない。特にシミュレーションでは Q_o の改善率が大きめに計算されているようである。これは実際のパワーモデルと比べて、インダクターとタンクの電気的接触抵抗が考慮されていない、誘電体の損失を計算に含めていないことが原因として考えられる。

[4] 加速試験

後段加速部の概略図を Fig.4 に示す。RFQ で加速されたビームは 2 段の RF 加速管によって加速が行われる。RF 加速管の間にはビームを収束させるための静電 4 重極レンズが挿入されている。加速管に投入するパワーの設定及び同期位相の制御は PC 端末より任意に調整すること

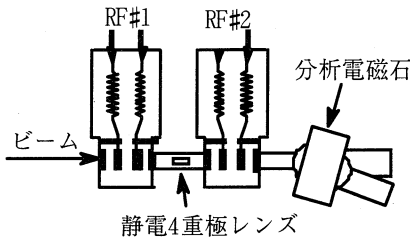


Fig.4 後段加速部概略図

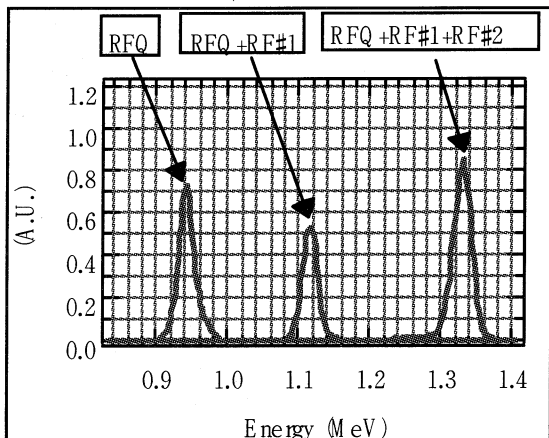


Fig.5 エネルギースペクトル

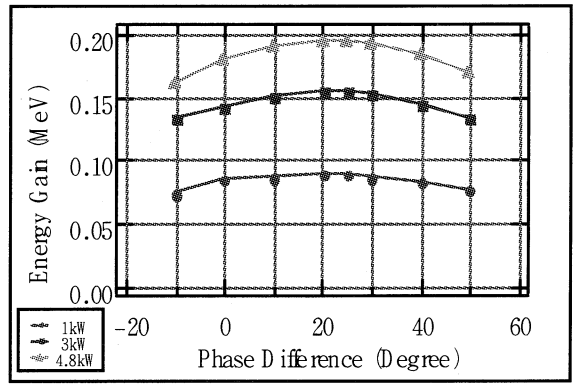


Fig.6 パワー、位相に対するエネルギー変化

ができる。エネルギーの測定は校正された 15° 分析電磁石で行った。RFQ より出射される B^+ (945keV) を後段加速部で加速したときのエネルギースペクトルを Fig.5 に示す。投入パワーは 1 段目、2 段目とも 5kW、同期位相はそれぞれ -20° 、 0° である。エネルギーゲインは +174keV、+215keV で後段加速部としては最大 +390keV の加速エネルギーを得ることができる。2 段目の加速管の 5kW 入力時における加速電圧は 230kV である。次に 1 段目の RF 加速管における、位相及びパワーに対するエネルギーの変化を Fig.6 に示す。Fig.6 の横軸は RFQ と 1 段目 RF 加速管の励振電場の位相差である。エネルギーゲインはパワーの 0.5 乗に比例して大きくなり、パワーと位相を調整すれば任意のエネルギーが得られることがわかる。

[5] まとめ

既存の RFQ ビームラインに 2 台の 3GapRF 加速管を増設し加速試験を行った。加速管の最適化はローパワーモデル及び 3 次元動電磁場解析ソフト "Mafia" を使用して行った。2 段目の RF 加速管のシャントインピーダンスは 5.3M Ω であり、5kW 入力時の加速電圧は 230kV である。後段加速部としては B^+ を最大 390keV まで加速することができる。また高周波パワー及び同期位相を調整することによって後段加速部におけるエネルギーゲインを連続的に変化させることができる。

[Reference]

- 1) 鎌田, "高エネルギーイオン打ち込みによるウェル形成、低温下、大口径化による効果と課題", 月刊 Semiconductor World, pp. 102-106, May 1997.
- 2) H. Fujisawa, N. Hamamoto and Y. Inouchi, "4-rod RFQ Linac for Ion Implantation", Proceeding of the 7th International Symposium on Advanced Nuclear Energy Research, March 18-20, 1996, Takasaki, Japan, JAERI-Conf 97-003, pp. 436-440, March 1997.
- 3) A. Schempp and H. Klein, "Properties of Spiral Loaded Cavities", Nucl. Inst. and Meth., 135, pp. 409-414, 1976.
- 4) E. Muller and H. Klein, "The Splitring Loaded RF-Cavity", Nucl. Inst. and Meth., 224, pp. 17-26, 1984.
- 5) H. Fujisawa, "34MHz $\lambda/4$ Spiral Resonator", Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University, Vol. 72, No.1, 1994.
- 6) A. I. Zverev and H. J. Blinichikoff, "Realization of a Filter with Helical Components", IRE Transactions on Component Parts, pp. 99-110, September 1961.