

SEPARATED FUNCTION TYPE RFQ ELECTRODE

S. Arai

Institute for Nuclear Study, University of Tokyo
Midori-cho 3-2-1, Tanashi-shi, Tokyo 188, Japan

Abstract

New RFQ electrode is proposed which is favorable to accelerate the beam in higher energy region than that covered by conventional RFQ linac. This electrode can take the place of drift tube which is used in Wideroe and Alvarez linacs, because the feature of this electrode is very similar to drift tube containing the quadrupole magnet and the functions of accelerating and focusing are separated.

§ 1 はじめに

今までの RFQ Linac で使用されてきた電極によって作られる電場は、加速電場と四極電場からなり、電極の形状、配列に応じて、周期的にそれぞれお互いに関係しながら変化していて、言わば今までの RFQ は加速機能と収束機能が結合した combined type と言える。今までは、drift tube type linac に入射可能な energy を得る為に高電圧の Cockcroft が使われて来たが、この様な low energy 領域で、強い収束力が得られると同時に、加速電極の周期長を短くすることが出来るこの type の RFQ は現在、非常に低電圧のイオン源との組合せで、Cockcroft にとって代わりつつある。一方、高い energy 領域では drift tube linac の様に、加速収束機能が分離している加速器のほうが energy gain をかせげると言う点で優れているので、combined type の RFQ は drift tube type linac にとって代わることが出来ないでいる。それゆえ、もし drift tube linac に於いて、magnetic quadrupole を rf によって励起される electric quadrupole に換えることが出来るならば、RFQ の利点と drift tube linac の利点を生かせるので、画期的なことである。この電極を使うことによって drift tube linac が改善される点は次のようになる。1) Linac の部品（電磁石とその電源）が減り、加速器の信頼性が高まる。2) 部品の減少により、建設費が低くなると期待出来る。3) 電極の対抗面積が小さくなり、drift tube linac より電極電圧を上げることが期待出来る。この論文では、この様な linac を実現する為に、加速機能と収束機能が分離している separated function type RFQ 電極を提案する。

§ 2 原理

加速電場と四極電場が独立に作られる様に、Fig. 1 に示される様な四極電極と加速電極からなる電極が考案された。Beam が収束力と発散力を交互に受ける、FDFD lattice の場合には、電極は one cell ごとに軸に対して 90° づつ回転している。四極電極は三つの部分に分けられる。即ち、電圧 V が二つの電極間に掛けられたとき、Fig. 2 に示す様に、軸上の電位が軸にそって直線的に増大する部分、Q1、と一定な部分、Q2、と更に増大する部分、Q3、とに分けられる。Fig. 2 では、 $z=0$ と $z=z_5$ は加速 gap の中心であると定義されている。四極電極で作られる三つの部分の電場は、Laplace の方程式を満足する電位から求められる。Q1, Q3 部の電位を決めるとき、四極電極の両端の壁面にある beam hole の効果は無視されている。Q1 部の電位は軸にそって直線的に変化するという条件と、 $z = z_1$ で $U = 0$ 、 $z = z_2$ で $U = V/2$ という境界条件から次式で与えられる。

$$U(x, y, z) = \frac{V}{2} \left(1 + \frac{x^2 - y^2}{a^2} \right) \frac{z - z_1}{z_2 - z_1}$$

ここで、 a は四極電極の bore radius である。 $U = 0$ の電位面を表す式と、 $U = V$ の電位面を表す式から、この部分の電極の形状が決められる。同様に、Q2, Q3 部の電位と電極の形状が求められる。一方、四極電極を粒子が通過する時 Q1 部と Q3 部で加速または減速を受ける。そして、 $k z_1 + \pi = k z_3$ 、 $k z_2 + \pi = k z_4$ である時、二つの場所での energy gain の和はゼロになる。この条件が満たされる様に、四極電極が決められるとき、加速と収束の機能はそれぞれ分離される。同時に、Q1 部と Q3 部を粒子が通過するとき rf 電圧は小さくなっているため、Q1 部と Q3 部の粒子に対する寄与が小さくなり、電位を決めるとき無視した beam hole の効果も小さくすることが出来る。粒子は加速 gap を通過するとき発散力を受け、四極電極の中を通過するとき Q-field によって収束力または発散力を受ける。しかし、四極電極の条件を適当に選ぶことによって、粒子を発散させることなく加速することが出来る。ここでは、これらの力による運動を

Hill の方程式で表し、粒子の軌道を与える変換 matrix を求め、粒子の軌道を計算した
 § 3 軌道計算

計算の中で一番問題になる事は、粒子の乗る rf の位相によって収束力が異なるという事である。それ故、加速の同期位相を中心にとどのくらいの位相まで横方向の運動に関しても安定であるかを、調べなければならない。この目的の為に加速位相を色々変えて、beam 軌道の envelope と、収束系の強さを表す、betatron 振動の β 関数の最大値と、phase advance を求めた。normalized emittance 0.6π mm mrad を持つ、kinetic energy 0.1, 1.0, 10 MeV の proton beam が表-1 に示された RFQ electrode で加速されたときの様子が計算された。この計算の中では、一周期に渡って kinetic energy は一定であると仮定されている。Fig.3 に、収束系一周期の beam envelope が示されている。図に示されている様に、加速 gap が収束電極の中心にないのは、加速の同期位相を -30° に設定した場合、 -30° を中心に充分な中で、効率のよい収束作用を働かせる為に加速 gap を 40° 前にずらした為である。0.1 MeV の場合には、 0° から -70° までの envelope が斜線の中に入っている。1.0, 10 MeV の場合には、 0° から -90° までの envelope が斜線の中に入っている。Figs. 4 and 5 には、 β function の最大値と phase advance の accelerating phase dependence が電極電圧を 2 kV から 12 kV まで変えて示されている。

§ 4 議論

計算結果は、この電極が充分使用しうるということを示した。標準的な、normalized emittance 0.6π mm mrad を持つ beam の径は 10 kV の電極電圧を使用するなら $-30^\circ \pm 30^\circ$ の加速 phase で 5 mm の bore 半径より充分小さくなる。電極電圧 10 kV は電極の断面形状を円近似したとき、最大電場 2.4 kV/mm で、0.21 Kilpatrick' unit に相当している。それ故 1.5 Kilpatrick まで電圧が掛けられるとすれば、charge to mass ratio $1/7$ までの ion を同じ条件で加速できる。この電極の Wideroe, Alvarez への適用例が Fig. 6 に示されている。加速 gap に関しては、Wideroe の $\pi-\pi$ mode の場合加速 gap が四極電極の為に使われ半分になる。しかし、 $\pi-3\pi$ mode に適用する場合には、加速 gap が減ることはない。Alvarez に適用する場合には、特に加速 gap を減らすことなく、四極電極を配置することが出来る。一方 tank 径に関しては、Wideroe に適用した場合、電極の容量が増大するので、径は小さくなるが、Alvarez に適用した場合には、容量は小さくなるので逆に径は大きくなる。

Table 1. Parameters of beam and RFQ electrode

Beam species	Proton	
Kinetic energy	0.1, 1.0, 10.0 MeV	
Normalized emittance	0.6π mm mrad	
Electrode voltage	10 kV	
Frequency	100 MHz	
Bore radius	5 mm	
z1	$23/72$	$\beta\lambda$
z2	$29/72$	$\beta\lambda$
z3	$59/72$	$\beta\lambda$
z4	$65/72$	$\beta\lambda$
z5		$\beta\lambda$

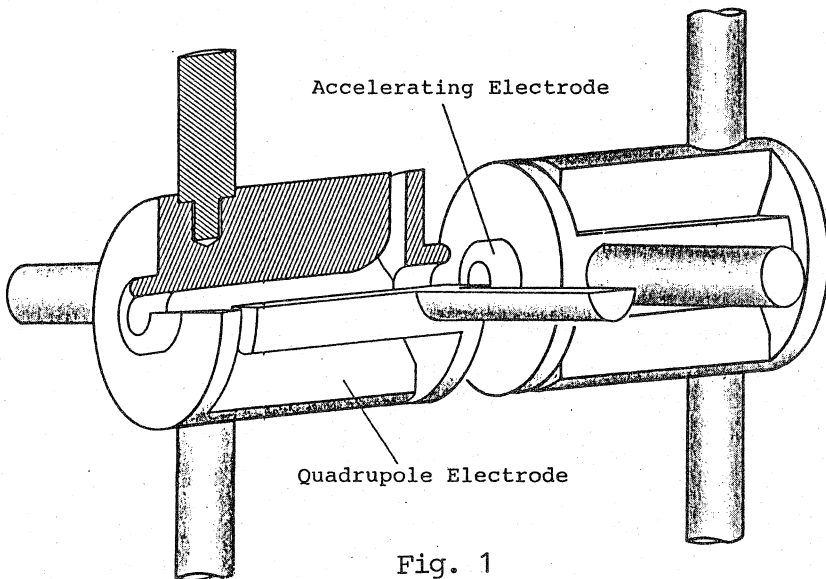


Fig. 1

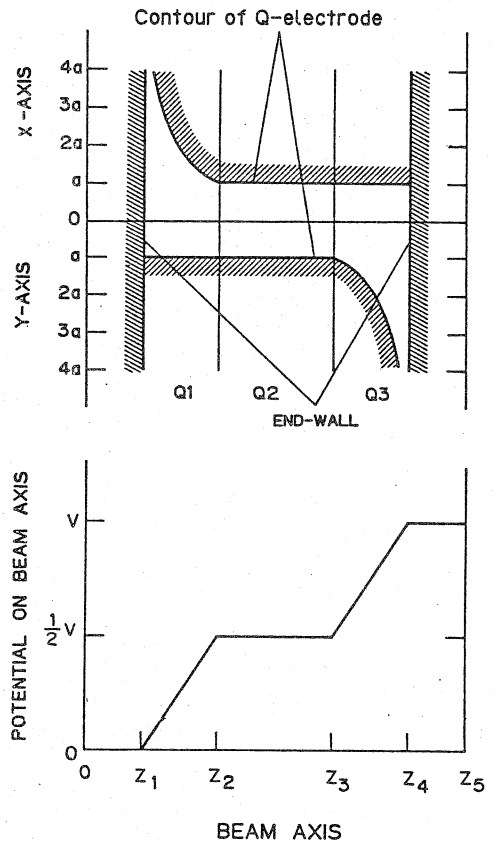


Fig.2

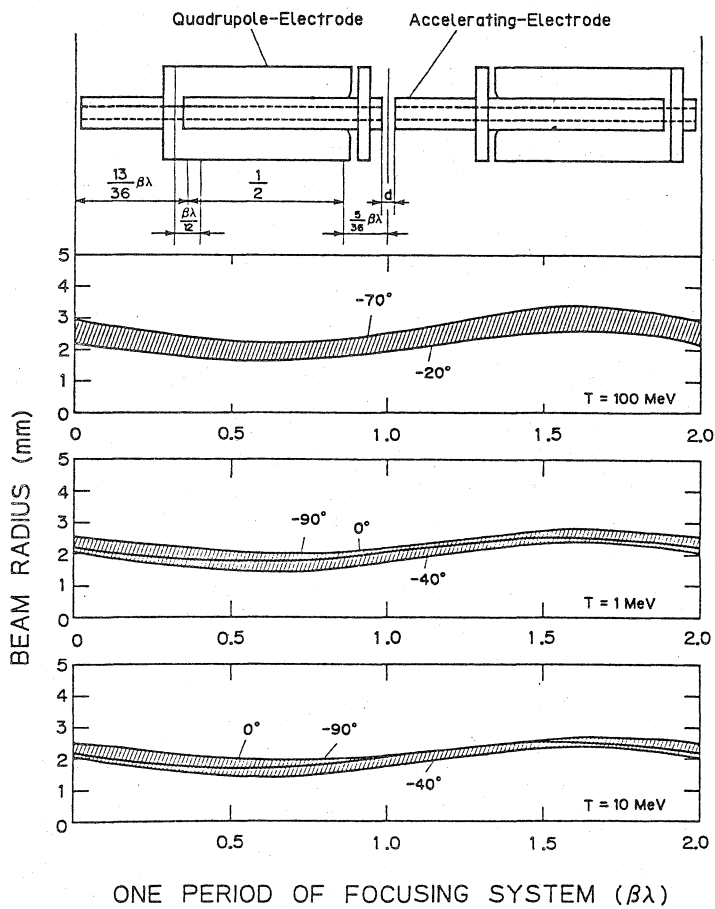


Fig. 3

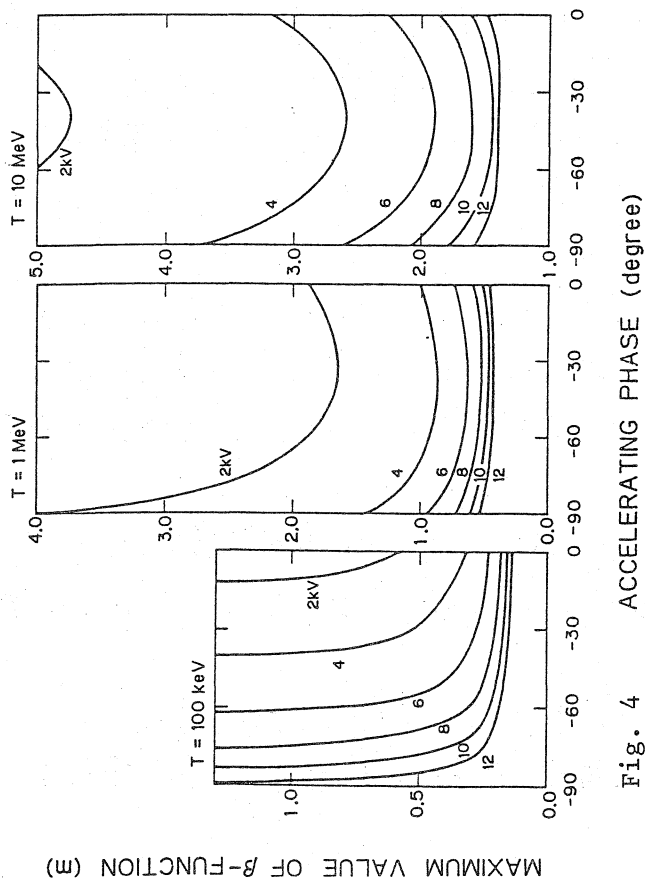


Fig. 4 ACCELERATING PHASE (degree)

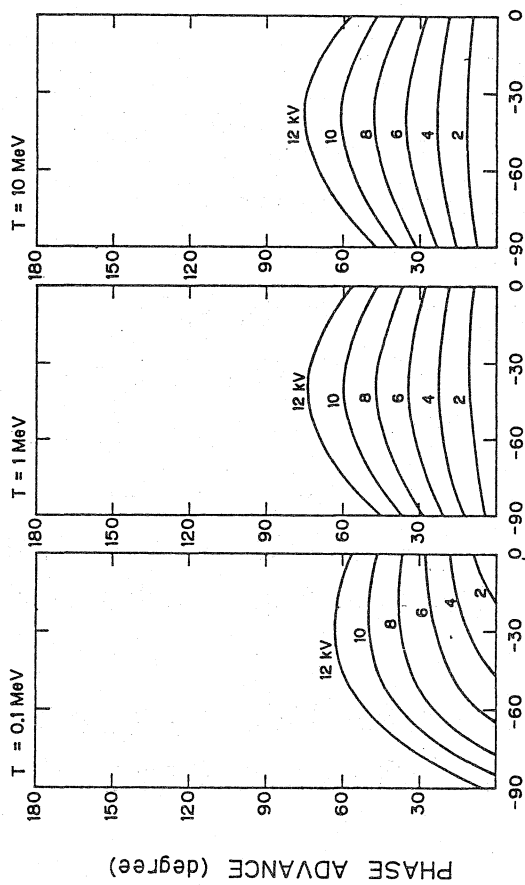


Fig. 5 ACCELERATING PHASE (degree)

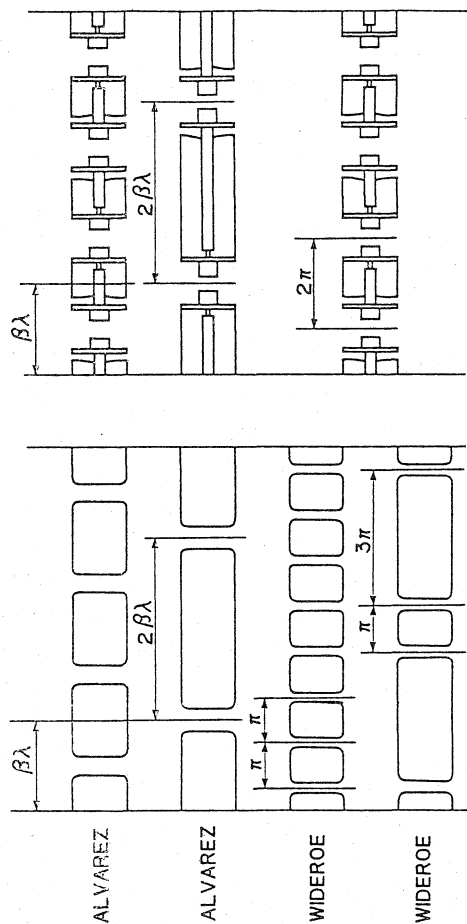


Fig. 6