



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

738
83

7/2-83

P13-82-780

А.Д.Дымников, Г.М.Осетинский

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПОЛЯ
ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ЧАСТИЦ
В ПРОТОННОМ МИКРОЗОНДЕ

Направлено в Оргкомитет VII межотраслевого научно-технического совещания по обмену опытом эксплуатации и усовершенствования электростатических ускорителей, Обнинск, 23-25 ноября 1982 года.

1982

В настоящей работе рассматривается возможность создания высокочастотного микрозонда для пучка протонов с энергией в несколько МэВ.

Известно, что изменяющиеся во времени поля могут быть использованы для поперечной фокусировки частиц ^{/1/}. В ряде случаев системы ВЧ-фокусировки могут оказаться конструктивно проще и дешевле, чем, например, системы жесткой фокусировки.

В данной работе ограничимся исследованием фокусировки 1-го порядка в ВЧ-микрозонде.

Введем безразмерные четырехмерные векторы y и U , где

$$U = \frac{dy}{ds}, \quad /1/$$

$$y_j = \frac{y_j^*}{a}, \quad U_j = \frac{p_j}{m_0 c}, \quad j = 1 \div 3,$$

/2/

$$y_4 = ct, \quad U_4 = \frac{W}{m_0 c^2}.$$

Здесь y_1^* и y_2^* - поперечные координаты частицы, y_3^* - продольная координата; p_1 и p_2 - поперечные импульсы, p_3 - продольный импульс; t - время, c - скорость света, W - полная энергия, m_0 - масса покоя частицы, a - характерный размер системы.

Пусть продольное электрическое поле E_3 имеет вид бегущей волны:

$$E_3 = E \sin \left(\frac{\omega}{c} y_4 - k y_3 \right), \quad /3/$$

а уравнение траектории осевой частицы /обозначается индексом "0"/ имеет вид:

$$y_4^0 = \frac{c}{\omega} k y_3^0. \quad /4/$$

Из последнего выражения следует уравнение для четырехмерных импульсов осевой частицы:

$$\frac{U_3^0}{U_4^0} = \frac{\omega}{ck}. \quad /5/$$

Представляя y_4 в виде

$$y_4 = y_4^0 + \Delta y_4, \quad /6/$$

найдем продольное поле для внеосевой частицы:

$$E_3 = E \sin \frac{\omega}{c} \Delta y_4. \quad /7/$$

Поскольку на оси /траектории осевой частицы/ продольное поле равно нулю ($E_3^0 = 0$), то $U_3^0 = \text{const}$, $U_4^0 = \text{const}$. При этом

$$U_3^0 = \sqrt{U_4^0{}^2 - 1}. \quad /8/$$

Для удовлетворения уравнений Максвелла вдоль траектории осевой частицы необходимо выполнение следующих равенств:

$$\left(\frac{\partial E_1}{\partial y_1}\right)^0 = \left(\frac{\partial E_2}{\partial y_1}\right)^0 = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} E \frac{U_4^0}{U_3^0}, \quad /9/$$

$$\left(\frac{\partial B_2}{\partial y_1}\right)^0 = \left(\frac{\partial B_1}{\partial y_2}\right)^0 = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} E.$$

Таким образом, рассматриваемое электромагнитное поле в первом приближении имеет вид:

$$E_1 = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} E \frac{U_4^0}{U_3^0} y_1, \quad B_1 = -\frac{1}{2} \frac{\omega}{c} E y_2, \quad /10/$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} E \frac{U_4^0}{U_3^0} y_2, \quad B_2 = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} E y_1,$$

$$E_3 = E \cdot \sin \frac{\omega}{c} \Delta y_4, \quad B_3 = 0.$$

Будем считать, что $\omega/c \Delta y_4 \leq 0,5$, т.е. пучок занимает приблизительно линейную часть изменения поля E_3 .

Первое приближение уравнений движения для такого поля записывается следующим образом:

$$\frac{d y_1}{d y_3} = \frac{U_1}{U_3^0}, \quad \frac{d y_2}{d y_3} = \frac{U_2}{U_3^0}, \quad \frac{d \Delta y_4}{d y_3} = -\frac{\Delta U_4}{(U_3^0)^3},$$

$$\frac{d U_1}{d y_3} = \frac{1}{2} \frac{1}{(U_3^0)^2} \frac{\omega}{c} E \cdot y_1, \quad \frac{d U_2}{d y_3} = \frac{1}{2} \frac{\omega}{(U_3^0)^2 c} E \cdot y_2, \quad /11/$$

$$\frac{d \Delta U_4}{d y_3} = -E \frac{\omega}{c} \Delta y_4,$$

что эквивалентно трем уравнениям II порядка с разделенными переменными:

$$y_1'' - \frac{1}{2} \psi y_1 = 0, \\ y_2'' - \frac{1}{2} \psi y_2 = 0, \quad /12/ \\ (\Delta y_4)'' + \psi \Delta y_4 = 0,$$

где

$$\psi = \frac{\omega}{c} E \frac{1}{(U_3^0)^3}. \quad /13/$$

При $E < 0$ имеем $\psi < 0$. В этом случае ВЧ-линза в поперечных направлениях ведет себя как осесимметричная собирающая линза длины L с фокусным расстоянием $HF = f$

$$f = \frac{1}{\beta \sin \beta L}, \quad /14/$$

положением фокуса $SF = S'F'$, отсчитываемым от края линзы

$$SF = S'F' = \frac{1}{\beta \operatorname{tg} \beta L}, \quad /15/$$

где

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \psi} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\omega}{c} E \frac{1}{(U_3^0)^3}}. \quad /16/$$

Пусть S_0 и S_2 - положения начального и конечного канонических фазовых портретов /расстояния от положения портрета до входа/выхода в систему/, r_1 и r_2 - радиусы I и II диафрагм, l - расстояние между диафрагмами ($l \approx S_0$),

$$\eta_0 = \frac{r_1}{r_2} l. \quad /17/$$

Тогда увеличение ВЧ-микроскопа M и величина S_2 определяются выражениями:

$$M = \frac{f}{\sqrt{\eta_0^2 + (S_0 - SF)^2}}, \quad /18/$$

$$S_2 = S'F' + (S_0 - SF)M^2. \quad /19/$$

В микрозонде обычно $\beta L \approx \frac{\pi}{2}$, $\eta_0 \ll S_0$. При этом $SF = 0$,

$$f = \frac{2L}{\pi}, \quad M = \frac{2L}{\pi S_0}, \quad S = \frac{4L^2}{\pi^2 S_2}$$

$$\omega E = \frac{(U_3^0)^3 \pi^2 c}{2}$$

Для энергии частиц в 3 МэВ имеем $U_3^0 \approx 0,3$. Объектив ВЧ-микрозонда может состоять как из структуры с бегущей волной /волновод/, так и структуры со стоячей волной /резонатор/. В простейшем случае - это зазор между трубками дрейфа с продольной компонентой ВЧ-поля на оси зазора. Поперечная фокусировка в таком поле реализуется во время фазовой /продольной/ дефокусировки.

Дальнейшее исследование возможности использования ВЧ-поля в протонном микрозонде требует рассмотрения aberrаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоусон Дж. Физика пучков заряженных частиц. "Мир", М., 1980.
2. Андрианов С.Н., Дымников А.Д., Осетинский Г.М. ПТЭ, 1982, 1, с. 39.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 ноября 1982 года.

Дымников А.Д., Осетинский Г.М.

P13-82-780

Об использовании высокочастотного поля для
фокусировки частиц в протонном микрозонде

Рассматривается возможность создания высокочастотного микрозонда для пучка протонов с энергией в несколько МэВ. Приводятся значения амплитуды ВЧ-поля, его частоты, ограничения на размеры сгустков и оптические характеристики идеальной системы формирования протонных пучков микронных размеров.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Dymnikov A.D., Osetinskij G.M.

P13-82-780

On the Use of High Frequency Field for Particle
Focusing in Proton Microprobe

A possibility is considered of designing a high frequency microprobe for proton beam with a few MeV energy. Values of amplitude of h.f. field are given: its frequency limitations to bunches sizes and optical characteristics of ideal system of forming the proton beams of micron sizes.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.