

О применении изофокусирующей электростатической линзы для согласования ионного пучка с оптическим каналом

С.В.Бажал, В.А.Романов

ГНЦ РФ Физико–энергетический институт, Обнинск, Россия

Акseptанс низкоэнергетичной ступени перезарядного ускорителя, длина которой, как правило, составляет несколько метров, ограничен небольшой (обычно 5-10 мм) апертурой обдирочного устройства. В этих условиях ускорение ионного пучка с минимальными потерями под высоковольтным электродом (кондуктором) возможно лишь при обеспечении во всем энергетическом диапазоне согласования его входных характеристик с оптическим каналом ускорителя. Основная проблема, возникающая при разработке систем согласования, связана здесь с естественной сильной собирающей линзой, которую образуют эквипотенциальные линии поля на входе в ускоряющую трубку (УТ) [1]. Ее фокусное расстояние приблизительно равно $4V_0/E$, где V_0 – потенциал входного электрода трубки, а E – напряженность однородного поля в ускорительном канале. Поэтому при постоянной энергии инжекции имеет место сильная зависимость положения оптического изображения фиксированного точечного источника от ускоряющего напряжения [2], что заметно осложняет транспортировку пучка через перезарядное устройство.

В настоящее время существует несколько подходов к решению данной проблемы. Например, широкое распространение получили системы инжекции, в которых “провисание” поля, образующее неконтролируемую линзу, устраняется с помощью металлической сетки, установленной в плоскости входной диафрагмы [3]. Для согласования параметров пучка с оптическим каналом в этом случае применяются электростатические линзы. Нередко подобные системы используются в сочетании с высоковольтной инжекцией, при которой энергия частиц на входе в трубку достигает нескольких сотен кэВ. Однако, несомненно улучшая ионно–оптические характеристики низкоэнергетичной ступени ускорителя, данная схема инжекции обладает рядом существенных недостатков. Взаимодействие пучка с сеткой вызывает появление вторичных электронов, которые при положительной полярности кондуктора ускоряются в канале УТ. Соударение этих частиц с электродами трубки, сопровождаемое рентгеновским излучением, может вызывать нарушение вакуумной и газовой изоляции ускорителя. На сетке происходит потеря частиц (до 10–15 % от первоначальной интенсивности). В случае применения низковольтной инжекции “провисающее” через ячейки сетки поле оказывает заметное влияние на поперечное движение ионов, приводя в результате к росту эффективного эмиттанса пучка. Поэтому вполне объясним возросший интерес к схемам инжекции с открытым входом в трубку [4 - 6].

Для того, чтобы параксиальные свойства трубки с открытым входом не зависели от ускоряющего напряжения, должны быть выполнены следующие условия: 1) положение оптического предмета не изменяется; 2) отношение кинетической энергии частиц под высоковольтным электродом к энергии инжекции в трубку сохраняется постоянным; 3) распределение потенциала на оси трубки изменяется пропорционально потенциалу высоковольтного электрода. Выполнение условий 1–2 можно обеспечить с помощью изофокусирующей линзы. Изофокусирующей называется иммерсионная линза, отличающаяся от обычной иммерсионной линзы режимом работы [7]. На электроды линзы, которая представляет собой соосные цилиндры, подается напряжение таким образом, чтобы при постоянной входной энергии частиц и фиксированном положении их источника (предметной диа-

фрагмы), положение оптического изображения, формируемого линзой, оставалось постоянным вне зависимости от выходной энергии. В настоящем докладе обсуждается возможность применения изофокусирующей линзы для согласования пучка в схеме инъекции с открытым входом в трубку. Принцип работы предлагаемого устройства поясняется рис. 1. Пучок, поступающий из инжектора, проходит через предметную диафрагму 1 и фокусируется иммерсионной линзой,

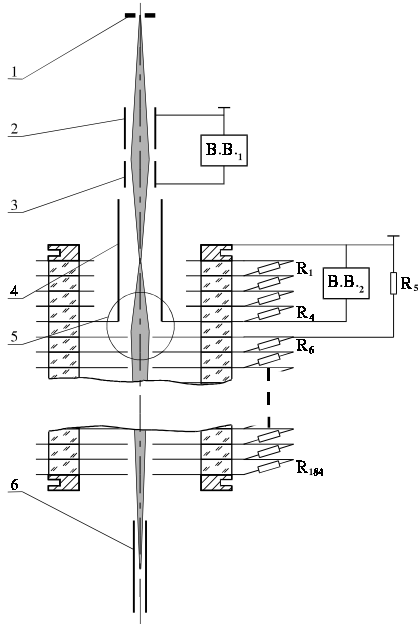


Рис. 1. Схема применения изофокусирующей линзы в системе согласования пучка на перезарядном ускорителе.

состоящей из трех цилиндрических электродов 2–4 в кроссовер, расположенный внутри электрода 4 в области, экранированной от поля. Энергия инъекции частиц в трубку W_0 с помощью выпрямителя **В.В.2** поддерживается пропорциональной их энергии W_k под высоковольтным электродом, а положение оптического изображения предметной диафрагмы (не совпадающее с кроссовером) фиксируется изменением напряжения управляющего выпрямителя **В.В.1**. Изображение диафрагмы является предметом для линзы, образованным открытым входом в трубку 5, которая преобразует его в плоскость, находящуюся в центре перезарядной мишени 6.

Анализ системы был выполнен на основании ионно–оптических расчетов на примере оптического канала низкоэнергетичной ступени перезарядного ускорителя ЭГП–15 ГНЦ РФ ФЭИ [8]. Характеристики линз определялись решением уравнения параксиального луча[7]

$$\left(r\Phi^{0.25}\right)'' + \frac{3}{16}\left(\frac{\Phi'}{\Phi}\right)^2\left(r\Phi^{0.25}\right) = 0, \quad (1)$$

где Φ – распределение потенциала на оси системы. Для нахождения Φ численно интегрировалось уравнение Лапласа в цилиндрической системе координат

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Нами была использована вычислительная схема метода зарядовой плотности, изложенная в монографии [9], что позволило находить значения потенциала с относительной погрешностью 0,03–0,05%. Непрерывное распределение потенциала по его значениям в отдельных точках оси, найденным из уравнения (2), аппроксимировалось кубическим сплайном. При расчетах предполагалось, что для всех энергетических режимов ускорителя кинетическая энергия частиц на выходе из инжектора W_i поддерживается постоянной и равна 30 кэВ. Для электродов линзы (рис. 2) были определены потенциалы Φ_k , при которых осуществляется изофокусирующий режим

$P/Q=2$, где P – расстояние от предметной диафрагмы до плоскости, проходящей через центр второго электрода перпендикулярно оптической оси, Q – расстояние от этой плоскости до плоскости оптического изображения, формируемого внутри третьего электрода (нулевым считался потенциал тех точек, в которых частица имеет нулевую скорость). Характеристика (рис. 2) была использована для определения напряжений на электродах. На рис. 3 представлена зависимость управляющего напряжения U_2 на втором электроде линзы (3, рис. 1) от напряжения согласования U_3 на третьем электроде (4, рис. 1). С учетом полученных параметров линзы было выбрано ее положение относительно входа в УТ. Рис. 4 представляет зависимости напряжения U_3 , при котором входная линза трубки преобразует промежуточное изображение диафрагмы на перезарядную мишень (кривая 1)

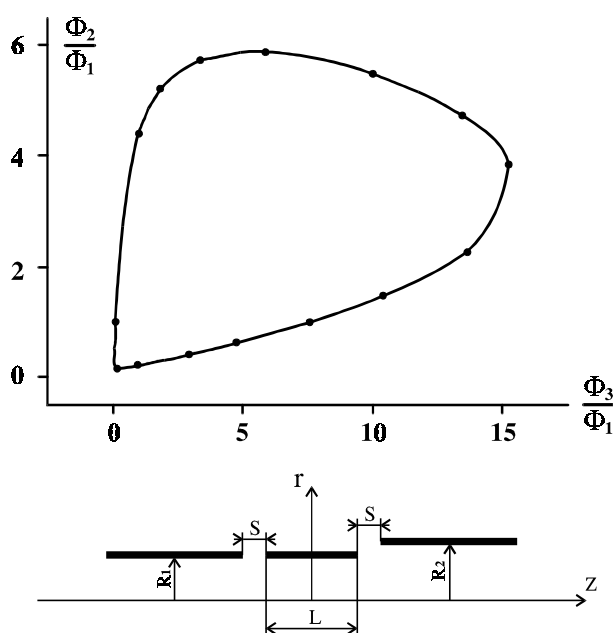


Рис. 2. Зависимости потенциалов электродов линзы в изофокусирующем режиме $P/Q=2$; $R_2/R_1=1,25$; $L/R_1=2$; $S/R_1=0,5$.

и увеличения M оптической системы канала низкоэнергетичной ступени ускорителя (кривая 2) от кинетической энергии частиц W_k под высоковольтным электродом. Для оценки эффективности предлагаемой системы при различных значениях W_k были определены огибающие пучка. Расчеты выполнялись в предположении, что в плоскости предметной диафрагмы пучок сформирован в кроссовер с $r_0=1,5 \cdot 10^{-3}$ м, а его нормализованный эмиттанс составляет $3 \text{ мм} \cdot \text{мрад} \cdot (\text{МэВ})^{0,5}$. На рис. 5 показаны огибающие пучка в низкоэнергетичной ступени ускорителя при энергии 8,0 и 2,0 МэВ.

Полученные численные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1) Предлагаемая схема вполне

работоспособна и может обеспечивать согласование во всем энергетическом диапазоне ускорителя ЭГП–15 с фиксацией изображения предметной диафрагмы на перезарядной мишени. 2) Изменение оптического увеличения системы, которое близко к единице, при изменении напряжения на высоковольтном электроде находится в допустимых пределах и не должно вызывать проблем транспортировки пучка. 3) Почти линейный характер зависимости согласующего напряжения от энергии частиц (рис. 4) может быть хорошей основой автоматизации управления системой согласования. 4) Для практического применения изофокусирующей линзы в системе согласования потребуются детальная проработка вопросов ее вакуумной электрической прочности и, как следствие, оптимизация формы электродов.

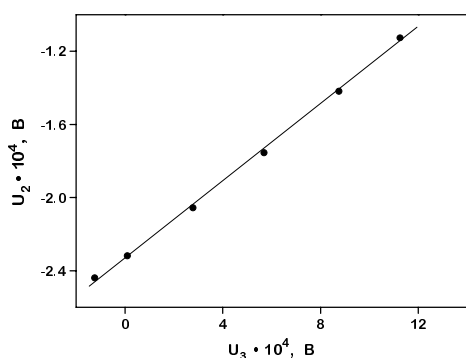


Рис. 3. Зависимость управляющего напряжения U_2 от согласующего напряжения U_3 .

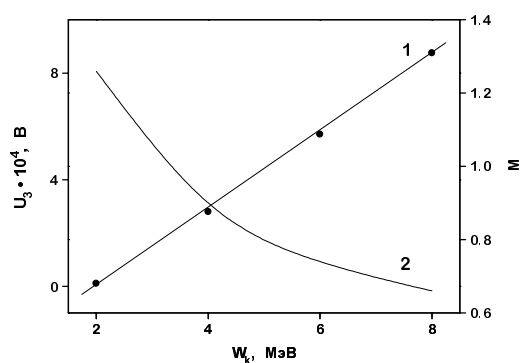


Рис. 4. Зависимости от энергии W_k согласующего напряжения U_3 (1) и увеличения оптической системы M (2).

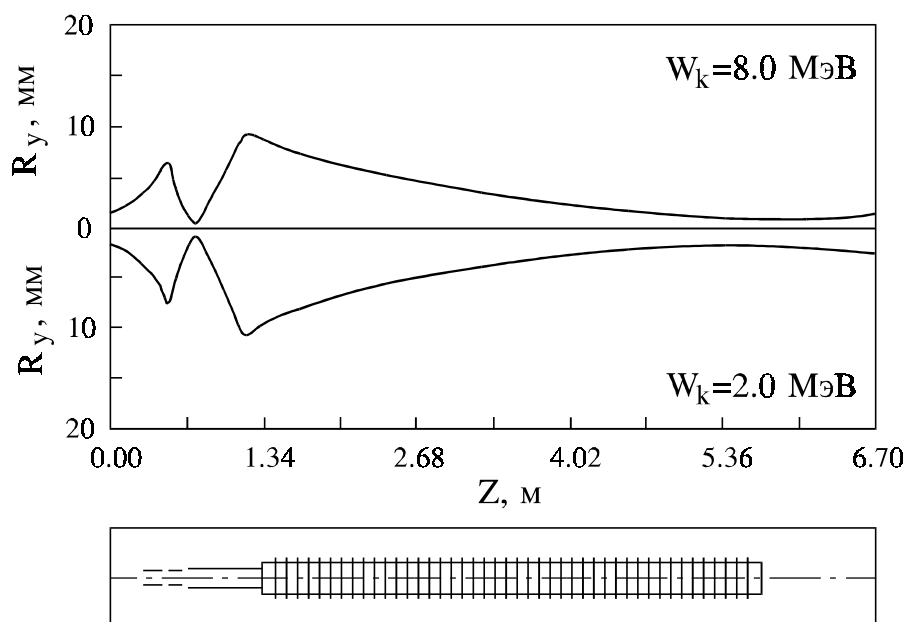


Рис. 5. Огибающие ионного пучка в оптическом канале низкоэнергетичной ступени перезарядного ускорителя ЭГП-15.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-02-17294а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Larson J.D. Resolving beam transport problems in electrostatic accelerators // Rev. de Physique Appliquee. 1977. 12, p.1551–1561.

2. Elkind M. Ion optics in long, high voltage accelerator tubes // Rev. Sci. Instr. 1953. V.24, 2, p.129–137.
3. Purser K.H. Heavy ion injection for tandem accelerators // Nucl. Instr. Meth. 1977. V.146, p.115–119.
4. Hellborg R. et.al. A new design for low–energy optics of the Lund Pelletron accelerator // Nucl. Instr. Meth. 1990. A287, p.161–165.
5. Фридрих М. Устранение потерь ионов в перезарядном ускорителе ЭГП–10–1 // ПТЭ. 1986. №4. С.33–35.
6. Mous D.J.W. et. al. Recent development at HVEE // Nucl. Instr. Meth. 1995. B99, p.697–700.
7. Баранова Л.А., Явор С.Я. Электростатические линзы (обзор) // ЖТФ. т.54. в.8, с. 1417–1452.
8. Романов В.А. и др. Электростатический перезарядный ускоритель ЭГП–15 // Труды IX Всесоюзного совещания по обмену опытом эксплуатации и усовершенствования ЭСУ. Обнинск, 1991, с.147–151.
9. Силадьи М. Электронная и ионная оптика - М.: "Мир", 1990.