

Выбор системы инжекции для высокочастотного ускорителя ионов

М.Ф.Ворогушин, Ю.А.Свистунов, А.П.Строкач, С.Ю.Удовиченко
*Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им.Д.В.Ефремова, С-Петербург, Россия*

Введение

Система формирования должна обеспечить на выходе инжектора пучок ионов с эмиттансом, вписывающимся в акцептанс ускорителя. Например, для успешного прохождения канала с ПОКФ нужно сформировать на входе канала сходящийся к оси симметричный пучок с определенной ориентацией осей представляющего эллипса в фазовом пространстве. Система формирования включает в себя элементы фокусировки пучка и его доускорения до энергии инжекции в ускоритель. Плотность нейтрального газа, поступающего из ионного источника, падает по направлению к ускорителю за счет интенсивной откачки.

Если длительность импульса пучка больше времени компенсации объемного заряда вторичными заряженными частицами, образованными при ионизации газа, то пучок при транспортировке в инжекторе будет скомпенсированным. С уменьшением давления газа пучок становится частично скомпенсированным, и под действием объемного заряда будет происходить нелинейное искажение фазовых характеристик и увеличение эффективного эмиттанса. Чтобы избежать чрезмерного расширения пучка и облегчить согласование его эмиттанса с акцептансом ускорителя, необходимо на участке недокомпенсации в инжекторе применять магнитные или электростатические линзы.

Сравнение магнитной и электростатической формирующих систем

На рост эмиттанса пучка в инжекторе влияют следующие основные факторы: хроматические и апертурные aberrации, нелинейные эффекты объемного заряда, пучково-плазменные неустойчивости, газовый разряд, инициируемый пучком во внешнем электрическом поле. Отметим основные свойства электростатических и магнитных ионно-оптических систем (ИОС).

1. Магнитная линза не меняет энергию пучка, поэтому по сравнению с электростатической имеет меньшие хроматические aberrации. Уменьшение апертурных aberrаций связано с проблемой уменьшения поперечных размеров пучка.

2. Магнитная фокусировка низкоэнергетичного пучка малоэффективна, так как фокусирующая сила пропорциональна скорости пучка. В этом случае предпочтение отдается электростатической формирующей системе.

3. Минимальные искажения фазового объема, как показывают расчеты динамики пучка [1], достигаются при принудительной компенсации объемного заряда в тракте инжектора, т.е. поднятия давления газа вблизи ускорителя до $P < 10^{-5}$ Тор. С этой точки зрения, выгодно использовать магнитную систему формирования пучка, так как при больших потенциалах в электростатической системе ($U > 50$ кВ) и при достаточно высоком давлении газа повышается вероятность пробоев в инжекторе.

4. В электростатической формирующей системе нескомпесированный заряд пучка максимален из-за ухода частиц плазмы, образованной пучком, на электроды, и нелинейные искажения фазовых характеристик пучка проявляются в полной мере. При увеличении тока пучка эти искажения возрастают.

С другой стороны, в пучке отсутствуют коллективные процессы, связанные с возбуждением спектра собственных колебаний плазмы. В нестабильном пучке плазменные колебания на участке дрейфа между ионным источником и электростатической линзой, а также на всей длине инжектора при применении магнитооптики приводят: к коллективному нагреву частиц пучка и увеличению эффективного эмиттанса [2], а также к динамической декомпенсации объемного заряда пучка [3]. Экспериментальные данные показывают [4]: при нестабильностях тока пучка менее 2% существенного роста эмиттанса не наблюдается; с увеличением нестабильности наблюдается существенное увеличение эмиттанса.

Выбор системы инжекции для ВЧ-ускорителя на частоте 433 МГц

Указанные критерии выбора формирующих систем были использованы при создании инжектора в НПК ЛУЦ НИИЭФА. Инжектор включает в себя поверхностно-плазменный источник с пеннинговской геометрией электродов, поворотный фокусирующий магнит, служащий также для сепарации пучка от примесных заряженных частиц, и электростатическую систему фокусировки и доускорения пучка от 20 до 60 КэВ, представляющую собой аксиально-симметричную линзу с периодическим изменением потенциала на электродах в пределах указанных величин.

Использование в инжекторе поворотного магнита и дифференциальной откочки позволило снизить газовую нагрузку на электроды оптики и тем самым исключить пробой в инжекторе. Согласно расчетам, выполненным интегрально-кинетическим методом, давление газа в области ИОС составило $P < 10^{-6}$ Тор. Позднее это было подтверждено экспериментально [5].

Преимущества выбранной схемы инжекции следующие:

1) умеренные токи ($I < 40$ мА) и умеренный объемный заряд позволяют использовать пучки с нескомпесированным объемным зарядом; 2) отсутствие колебаний плазмы и пучковых неустойчивостей после поворотного магнита; 3) коллективный нагрев ионов в промежутке между источником и первым электродом ИОС незначителен; 4) можно обеспечить низкое давление газа на входе ускорителя (около $5 \cdot 10^{-7}$ Тор); 5) возможно формирование пучков как положительных, так и отрицательных ионов водорода с токами до 40 мА.

С целью создания малогабаритного инжектора для ускорителя с ВЧК-фокусировкой на частоте 433 МГц был проведен расчет формирующей системы без фокусирующего поворотного магнита и электростатической оптики.

Схема этого инжектора приведена на рис.1. Для первичного формирования пучка

ионов предполагается использовать поверхностно-плазменный источник с пеннинговской геометрией электродов. В последнее время в катод этого источника были установлены таблетки из LaB_6 , что позволило снизить напряжение на разряде в 2 раза без введения в разряд паров цезия и получать пучки протонов с токами до 30 мА при сохранении фазовых характеристик [5]. При токе разряда 30 А содержание первой компоненты H^+ в пучке достигает 75%.

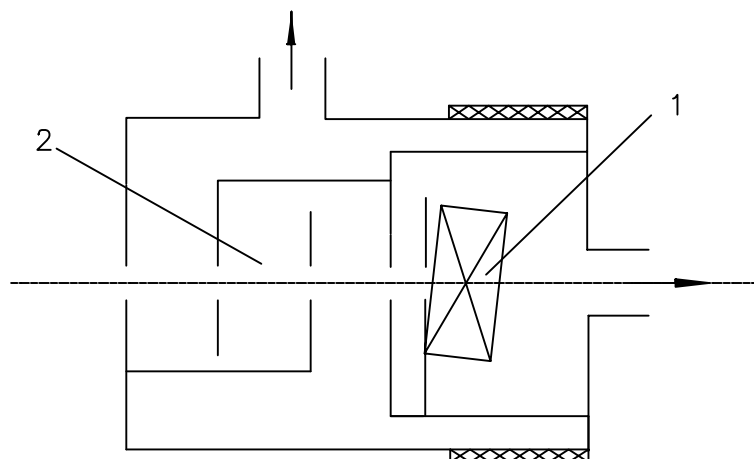


Рис.1 Схема инжектора: 1 — ионный источник, 2 — ИОС.

Расчет местоположения электродов ИОС и их формы производится путем численного моделирования динамики пучка методом крупных частиц [7]. Расстояние между источником и первым электродом оптики составляет 3 см. Давление газа на этом участке, рассчитанное интегрально-кинетическим методом, достигает 10^{-4} Тор.

Результаты расчетов [6] показывают, что пучок положительных ионов полностью скомпенсирован по заряду на участке до первой линзы и движется в условиях положительного радиального перепада потенциала, который оказывает на него слабое дефокусирующее влияние. Пучок отрицательных ионов частично декомпенсирован и слабо дефокусируется в условиях отрицательного радиального перепада потенциала. Проведена оценка коллективного нагрева ионных пучков H^+ , H^- ($W_b=20$ кэВ, $I_b=30$ мА) под действием высокочастотных и низкочастотных колебаний плазмы [6]. Согласно [2], максимальный приведенный эмиттанс пучка H^+ при воздействии электронных колебаний плазмы равен $\epsilon_e = \beta m_e / 2M\gamma_e \approx 5 \cdot 10^{-7} \pi$ рад \cdot м, где $\beta = v_b/c$; v_b — скорость пучка, γ_e — инкремент колебаний, m_e и M — масса электронов плазмы и ионов пучка. Амплитуда насыщения электронных ленгмюровских колебаний при захвате в них электронов плазмы $\tilde{\phi}_{max} = m_e v_b^2 / 2e \approx 16,3$ В. Параметры пучка и плазмы те же, что и в [6], но радиус аксиально-симметричного пучка взят $r_b = 0,3$ см. Максимальный эмиттанс пучка отрицательных ионов при воздействии ионных ленгмюровских колебаний плазмы равен $\epsilon_i = \beta \tilde{\phi}_{max} / M v_b^2 \gamma_i \approx 4,2 \cdot 10^{-7} \pi$ рад \cdot м, где γ_i — инкремент неустойчивости, $\tilde{\phi}_{max} \approx M v_{\Phi\perp}^2 / 2$ — амплитуда насыщенных поперечных колебаний при захвате в них ионов плазмы, $v_{\Phi\perp}$ — фазовая скорость ионных колебаний. Таким образом, при заданном эмиттансе $\epsilon = 5 \cdot 10^{-7}$ рад \cdot м нагрев пучка в электростатическом инжекторе между источником и первой линзой не существен.

Заключение

Разработанная в НПК ЛУЦ НИИЭФА система инъекции ионов H^+ , H^- с поворотным магнитом и электростатической ИОС надежна и обеспечивает требуемые параметры пучка для 2 МэВ-го линейного ускорителя с ВЧК-фокусировкой на частоте 433 МГц. Расчеты показывают, что реализация малогабаритного инжектора с электростатической ИОС без поворотного магнита, формирующего пучки с токами до 30 мА возможна без существенного ухудшения фазовых характеристик пучка. При увеличении тока пучков свыше 50 мА система инъекции с магнитной ИОС может оказаться предпочтительней.

Литература

1. Ваганов Н.Г., Сидоров В.П., Удовиченко С.Ю.//ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1992, вып. 4, с. 36-39.
2. Сидоров В.П., Удовиченко С.Ю.//ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1992, вып. 4, с. 31-35.
3. Удовиченко С.Ю. К теории декомпенсации объемного заряда ионного пучка.//ЖТФ, 1994, т. 64, вып.8, с.104-112.
4. Ralph R., Stevens Jr. High-current negative ion beam transport. — Proc. of Symp. on the production and neutralization of negative ions and beams. Brookhaven, USA, 1992, p.646.
5. Strokach A.P., Afanasiev Yu.V., Vakhrushin Yu.P., Vorogushin M.F., Grigorenko S.V., Svistunov Yu.A. — Ion beam injector for RFQ linac. - abid, p.770.
6. Свистунов Ю.А., Удовиченко С.Ю. Распределение потенциала ионного пучка в инжекторе ВЧ-ускорителя. — Труды совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1994, т.3, с.66-71.
7. Вьюга Е.Н., Зуев Ю.В. Компьютерное проектирование согласующей ИОС инжектора компактного ускорителя с ПОКФ. — Там же, с.118-123.
8. Семашко Н.Н. и др. Инжекторы быстрых атомов водорода. — М.: Энергоатомиздат, 1981, с.43.