

быть существенно меньше размеров системы. При расчетах их полагали равными $x_r = 0,1 \div 0,2$; $y_r = 0,01$. Оптимизация параметров y_0 и K позволила добиться эффективности рекуперации энергии ионов $\sim 98\%$ для ионов любой энергии. Для пучков шириной $0,1 \leq d \leq 0,5$ оптимальные значения этих параметров составляют $K = 0,25$; $0,8 \leq y_0 \leq 1,3$. Зависимость эффективности рекуперации энергии ионов η от y_0 и K показана на рис. 2. Расчеты показали, что пятипроцентная неточность расположения электродов, задающих распределение потенциалов в системе (зависящая от параметра y_0) и задания потенциалов на них (зависящая от параметра K), существенно не влияет на расположение коллекторов ионов и эффективность преобразования их энергии. Погрешность счета, определяемая как $|(W - e\varphi_K) - (mv_K^2/2)|/W$, составляла $\sim 1\%$ (φ_K — потенциал точки сбора; v_K — скорость иона в ней). Расположение коллекторов для ионов энергией W определяется формулой

$$|y_k| = \frac{\gamma^2 (2 - y_0) + 4y_0 (1 - K)}{2(2 - y_0 K)},$$

где $\gamma = v/v_{др}$ ($v = \sqrt{2W/M}$).

Система не снижает своей эффективности при довольно большой расходимости пучка ($\theta = \pm 0,04$ рад). При увеличении ширины пучка до $d = 0,5 = 0,25D$ эффективность снижается только на 2%.

Расход мощности на нагрев термоэммиттеров и ускорение электронов во внешнем электрическом поле и в поле пучка в системе с неоднородным электрическим полем так же, как и в системе с однородным электрическим полем [1], в сумме составляет менее 1%. Снижение к. п. д. из-за ионизации и ускорения молекул остаточного газа

можно уменьшить до 1% при давлении остаточного газа в рекуператоре не выше $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Полный к. п. д. системы равен $\sim 95\%$.

Возможный диапазон по плотности пучка ионов n работы рекуператора с неоднородным электрическим полем так же, как и для системы с однородным электрическим полем [1], определяется возможностью искажения внешнего магнитного поля собственными магнитными полями компенсирующих электронных потоков:

$$\left(\frac{d}{r_d}\right)^2 \ll \frac{Mc^2}{W_0} \left(\frac{d}{D}\right)^2 \approx 10^6 \frac{A}{W_0 [\text{кэВ}]} \left(\frac{d}{D}\right)^2,$$

где d/r_d — параметр, характеризующий влияние пространственного заряда ионов; $r_d = (W_0/2\pi e^2 n)^{1/2}$; A — атомная масса ионов. Для инжектора дейтронов ($A = 2$) энергией ($80 \div 160$) кэВ $d/r_d \leq (5-10)$. На входе в рекуператор плотность мощности пучка ионов может составлять десятки кВт/см² и даже при степени торможения по энергиям (0,95–0,98) плотность мощности ионов на коллекторе составит 1 кВт/см². Для улучшения теплового режима на коллекторе, а также для улучшения отдачи рекомендуется выполнение коллекторов ионов в виде жалюзей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова О. А. и др. «Атомная энергия», см. наст. вып. с. 375.
2. Морозов А. П., Лебедев С. В. В кн.: Вопросы теории плазмы. М., Атомиздат, 1974.

Поступило в Редакцию 02.04.79

УДК 621.039.623/629

Рекуперация энергии заряженных частиц для инжекторов на отрицательных ионах

ДИМИТРОВ С. К., МАХИН А. В., ТУРКУЛЕЦ С. В.

В настоящее время в ряде лабораторий разрабатывают конструкции инжекторов, в которых для получения пучка атомов большой энергии используется обдирка отрицательных ионов на газовой или плазменной мишени [1]. Коэффициент преобразования на газовой мишени достигает 0,65 (при энергии ионов в сотни килоэлектронвольт), а на плазменной — 0,8. При этом соответственно 35 и 20% мощности потока ионов остается неиспользованной и в виде тепла принимается теплоемником инжектора, что уменьшает к. п. д. инжектора в целом. Согласно оценкам, при инжекции мощных пучков в термоядерный реактор потери достигают десятков и сотен мегаватт. Кроме того, возникает проблема снятия такой мощности. Поэтому в системе инжекции целесообразно применять рекуперацию энергии ионов, что позволяет существенно снизить потери и решить проблему снятия тепла (рис. 1).

При рассмотрении уравнений баланса частиц в газовой или плазменной мишени можно показать, что в оптимальном случае, т. е. когда число образовавшихся быстрых атомов максимально, плотность токов отрицательных и положительных ионов на выходе из камеры перезарядки примерно одинакова.

В схеме рекуперации со скрещенными электрическим (E) и магнитным (H) полями [2] одинаковые к. п. д. преобразования энергии можно получить для положительных и отрицательных ионов. Идея рекуператора состоит в том, что заряженные частицы, влетающие в область скрещенных полей со скоростью $v_0 = 2v_{др}$, где $v_{др} = c(E/H)$, движутся по циклоиде и имеют в конце ее скорость, близкую к нулю (т. е. к. п. д. близок к 100%). Одновремен-

но осуществляется разделение и торможение пучков заряженных частиц с разными знаками, а пучок быстрых атомов проходит в термоядерный реактор. На к. п. д. преобразования в таком рекуператоре влияют начальный угловой разброс, пространственный заряд и ширина пучка.

В рассматриваемых инжекторах [1] начальным угловым разбросом частиц в потоке перед рекуператором можно пренебречь. Основной фактор, влияющий на к. п. д. системы преобразования, — собственный пространственный заряд пучка. При торможении в такой системе положительно заряженных ионов влияние объемного заряда

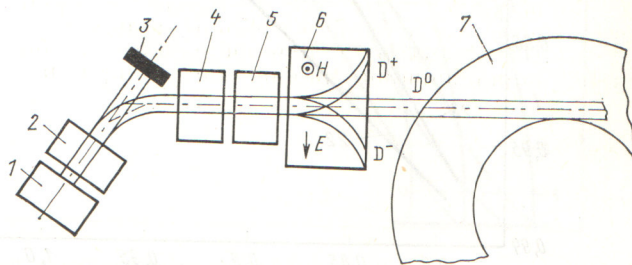


Рис. 1. Схема инжектора с рекуперацией: 1 — источник ионов D^+ энергией 5–10 кэВ; 2 — первая мишень для перезарядки $D^+ \rightarrow D^0$; 3 — приемник атомов D^0 ; 4 — система доускорения; 5 — вторая мишень для перезарядки $D^- \rightarrow D^+$; 6 — рекуператор с $E \times H$ -полями; 7 — термоядерный реактор

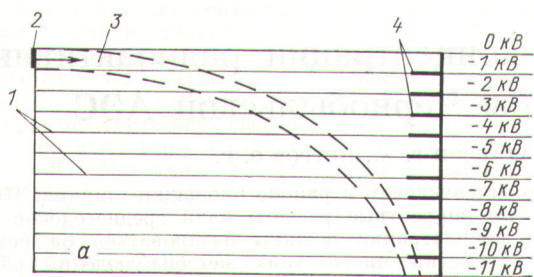


Рис. 2. Положение пучка в области торможения и картина эквипотенциалов при энергии частиц на входе 11 кэВ и $d/r_d = 0,09$ (а) и $d/r_d = 0,3$; 1, 7 — эквипотенциалы; 2, 5 — эмиттер; 3, 6 — пучок; 4 — коллекторы

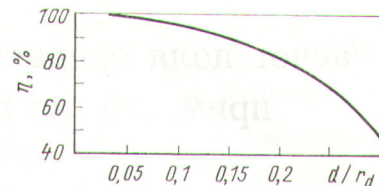
можно уменьшить, поставив вдоль тракта пучка специальные эмиттеры электронов и скомпенсировав таким образом заряд ионов зарядом электронов [3] (при этом необходимая для нагрева эмиттеров мощность несколько снизит общий к. п. д. системы). При торможении пучка отрицательных ионов его объемный заряд нейтрализовать трудно.

Возникает вопрос о предельных значениях плотности тока и, следовательно, объемного заряда для системы рекуперации в скрещенных E и H полях.

Систему моделировали на ЭВМ с помощью метода «крупных частиц». Задачу решали на двумерной прямоугольной области размером 11×20 см (рис. 2, а, б), которую разбивали сеткой с размером ячейки $0,5 \times 0,5$ см. Потенциалы задавали на границах и в некоторых фиксированных точках внутри области. С помощью этих точек моделировали коллекторы. Магнитное поле было ортогонально плоскости прямоугольной области, изображенной на рис. 2.

На каждом шаге по времени решали уравнение Пуассона методом конечных разностей с учетом объемного заряда (число частиц в каждом узле сетки при этом известно). Затем в определенном потенциальном поле решали уравнения движения методом «быстрого преобразования Фурье». После перераспределения частиц по узлам сетки снова решали уравнение Пуассона и весь процесс повторяли. Число частиц, влетающих с эмиттера, подбирали из соображения наиболее равномерного распределения их по пучку без торможения. Потенциалы между узлами сетки находили с помощью линейного интерполирования.

Рис. 3. Зависимость эффективности η от d/r_d



На каждом шаге машина выдавала значения потенциалов в узлах, число частиц в каждом узле, число частиц, пересекающих на каждом шаге линию границ (т. е. попавших на коллекторы) и средние координаты точек пересечения пучка с границей. По этим данным можно определить к. п. д. рекуперации.

На рис. 2, а показано положение пучка в области плотности тока $J = 10$ А/м². Объемный заряд удобно оценивать отношением d/r_d , где d — диаметр пучка; $r_d = \sqrt{W/2\pi e^2 n m}$, W — энергия частиц на входе в рекуператор; m — масса частицы; n — плотность частиц на входе. Для $J = 10$ А/м² при энергии 11 кэВ $d/r_d = 0,009$, если тормозятся электроны. В этом случае практически все частицы долетают до эквипотенциала -11 кВ и к. п. д. рекуперации близок к 100%. Искажений электрического поля нет, так как объемный заряд мал. Магнитное поле равно $2,4 \cdot 10^{-3}$ Тл.

На рис. 2, б показано положение пучка в области для $J = 10^4$ А/м² ($d/r_d = 0,3$). В этом случае наблюдается значительное искажение внешнего поля полем объемного заряда, и частицы попадают на коллекторы, находящиеся под потенциалом от -4 до -7 кВ, к. п. д. системы резко падает.

По полученным данным построена зависимость к. п. д. от d/r_d (рис. 3). Из нее следует, что примерно до $d/r_d = 0,1$ заметного уменьшения к. п. д. не происходит. Для разрабатываемых в настоящее время инжекторов на отрицательных ионах [1] значение d/r_d не превосходит 0,1. Поэтому рассматриваемый рекуператор позволит преобразовывать энергию ионов с высокой (90% и более) эффективностью без применения компенсации.

Модель системы с E - и H -полями исследована экспериментально [2]. Тормозили редкий пучок электронов энергией 4 кэВ и $d/r_d = 0,003$. Максимальный к. п. д. достигал 90% и определялся лишь числом секций — коллекторов, используемых для создания однородного электрического поля. Следует отметить положительный факт полного отсутствия в такой системе обратного потока частиц (отраженных и вторичных, поскольку все они дрейфуют в том же направлении, что и первичный поток) и связанных с ним потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьячков Б. А. и др. Препринт ИАЭ-2523. М., 1975.
2. Виноградова О. А. и др. В кн.: IV Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям и ионным инжекторам. Сб. тезисов докладов. М., изд. ВНИИЦ, 1978, с. 134.
3. Виноградова О. А. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 5, с. 441.

Поступило в Редакцию 23.07.79