УДК 533.932

М.А. КРАСНОГОЛОВЕЦ, канд. физ.-мат. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ИНТЕНСИВНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

В последнее время существенно возрос интерес к получению и ускорению килоамперных ионных потоков [1—2]. Это обусловлено большими возможностями их практического использования. В настоящее время пучки ионов применяются в экспериментальной технике для инжекции в магнитные системы, в исследованиях свойств плазмы, в создании мощных источников радиоизлучения, в накачке активных сред квантовых генераторов, в разделении изотопов, в создании электрореактивных двигателей, в промышленности — для обработки поверхности, получения чистых материалов, выращивания кристаллов, в металлургии, плазмохимии и т.п. Поэтому необходимо изучение новых методов получения и ускорения многоамперных ионных пучков.

Нами исследован метод формирования и ускорения интенсивного ионного пучка в магнитоактивном плазменном эмиттере. Характерной особенностью такого эмиттера являлось наличие в нем электронов высоких энергий — «горячих» электронов, которые повышали устойчивость эмиттера и эффективность ускорения ионов. Эмиттером ионов служил пучково-плазменный разряд, ограниченный стационарным неоднородным магнитным полем, конфигурация которого представляла собой адиабатическую магнитную ловушку [3]. Пучково-плазменный разряд получали с помощью взаимодействия пучка, движущегося по спиральной траектории, причем шаг спирали можно было регулировать. Уменьшение шага спирали траектории пучка приводило к усилению эффекта взаимодействия пучка с плазмой, сопровождающегося сильной диссоциацией кинетической энергии пучка: достигнуто отношение $\mathcal{E}/\mathcal{E}_0 \approx 0{,}8$, где $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}_0$ — энергия пучка на входе в область взаимодействия и после взаимодействия. Диссоциация энергии пучка не объяснима с точки зрения парных взаимодействий частиц. Она сопровождалась возбуждением широкого спектра высокочастотных колебаний. Поглощение энергии высокочастотных колебаний электронами разряда приводило к повышению их концентрации n_e, температуры T_e, а также степени ионизации рабочего газа.

Использование стандартного набора современных методов диагностики позволило установить основные закономерности функционирования плазменного эмиттера ионов. Погружение тонкого вольф-

рамового зонда в объем ионного эмиттера вызывало появление жесткого ($h\nu \geq \mathcal{E}_0$) рентгеновского излучения. Перемещая зонд вдоль оси ловушки и по радиусу, регистрировали интенсивность и временные характеристики рентгеновского излучения; таким образом определяли область, занимаемую эмиттером, и его эволюцию во времени. Кроме того, важную информацию об ионном эмиттере давало непосредственное его фотографирование в рентгеновских лучах камерой-обскурой.

Данные исследования показали, что ионный эмиттер как на активной, так и на пассивной стадиях представлял собой резко очерченную пространственную область в виде эллипсоида вращения. Объем эллипсоида составлял $(4/3)\pi r^2 l \approx 2{,}5 \cdot 10^3$ см^3 при $l/r \approx 6$, где l — длина большей оси, направленной вдоль оси магнитной системы; r — радиус эмиттера в центральной части ловушки. Характерные геометрические размеры адиабатической магнитной ловушки $L>l$, что важно для формирования, ускорения и исследования ионных потоков.

Анализ временных характеристик свидетельствует о том, что ионный эмиттер макроскопически устойчив и время жизни «горячих» электронов на активной стадии (взаимодействие с пучком) составляло $\tau_1 \approx 10$ мс, а на пассивной (в период охлаждения) $\tau_0 \approx 100$ мс. Кроме того, ионный эмиттер находился в сильно неравновесном состоянии, так как температура электронов T_e и ионов T_i удовлетворяли соотношению $T_e/T_i \gg 1$. «Горячие» электроны, имея площадь сечения взаимодействия $\sigma \approx 10^{-19} \ldots 10^{-20}$ см^2 с нейтральным газом и ионами, являлись хорошо замагниченными, т.е. $\rho_e/\lambda_e \ll 1$ (ρ_e, λ_e — циклотронный радиус и длина свободного пробега «горячего» электрона в эмиттере), и тем самым обеспечивались устойчивость и высокие эксплуатационные характеристики ионного эмиттера.

Экспериментальная установка включала в себя вакуумную камеру, магнитную систему, электронный инжектор, ионный ускоритель с электронным компенсатором, системы электропитания и средств диагностики.

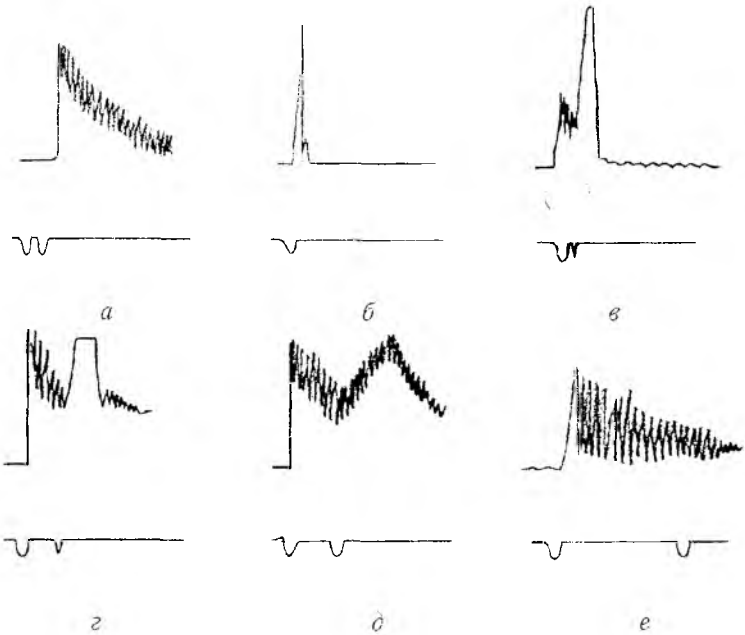
Ускорение ионного потока осуществлялось с помощью кольцевого электрода, установленного в центральной части магнитной системы концентрично относительно ее оси. На электрод подавался импульс напряжения отрицательной полярности. Размеры, форма и мощность импульса были идентичны параметрам импульса, подаваемого на электронный инжектор. Устройство синхронизации позволяло плавно и независимо менять временное расположение импульсов относительно импульса запуска регистрирующей аппаратуры. Как правило, во многих экспериментах наблюдалась большая подвижность в электрическом поле электронов M_e по сравнению с ионами M_i.

Это являлось причиной того, что электрическое поле в основном совершало работу над электронной компонентой. Нами исследован метод существенного уменьшения подвижности электронов по сравнению с ионами, т.е. достижения отношения $M_e/M_i \langle\langle 1$. Уменьшение подвижности электронов эмиттера в направлении ускорения вызывалось тем, что ускорение замагниченных электронов проводилось перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля. Электроны совершали замкнутый электрический дрейф по азимуту со скоростью $V_\varphi \approx E_r/B_z$, где E_r — направленность электрического поля; B_z — магнитная индукция. Вследствие столкновений электронов с ионами дрейф сопровождался диффузией электронов в направлении, противоположном направлению электрического поля. Условие свободного ускорения ионов при сохранении замагниченности электронов можно записать в виде $\frac{m_i V_i}{q_i B_z} \approx R$; $\frac{m_e V_e}{eB_z} \leq R$, где $m_i, m_e, q_i, e, V_i, V_e$ — масса, заряд, скорость ионов и электронов соответственно; R — радиус ионного ускорителя.

Убыль ионов в эмиттере вследствие их ускорения вызывала появление электрического поля поляризации. Компенсация этого поля осуществлялась с помощью специально разработанного коллектора-компенсатора, катодом которого служила накаливаемая вольфрамовая нить. Поле поляризации управляло потоком электронов вдоль оси системы и тем самым обеспечивало устойчивый процесс ускорения ионов в радиальном направлении. Некоторые результаты исследований отражены на рисунке, где представлены шесть кадров осциллограмм, регистрируемых двухлучевым осциллографом . Приведены следующие осциллограммы: на позициях *а—в* — тормозное рентгеновское излучение, возникающее в системе и регистрируемое стандартными сцинтилляционными методами, причем порог регистрации рентгеновского излучения определялся соотношением $h\nu \geq eU$; на позициях *г—е* — импульсы напряжения, формирующие ионный эмиттер и ускоряющий ионный пучок. Все кадры отличаются друг от друга временными сдвигами между этими импульсами. Длительность развертки t = 20 мс, давление рабочего газа P = 5,2 мПа.

На позиции *а* отражена ситуация, когда сначала подавался импульс на ускоряющей электрод, а затем через τ = 2 мс — на электронный инжектор. Как видно, только после инжекции электронного пучка появлялся стабильный ионный эмиттер, из объема которого испускалось тормозное излучение. Ускоряющий электрод представлял собой касательно расположенное в центре ловушки кольцо диаметром 10 см и шириной 2 см. На кольце с помощью изоляторов крепилась

вольфрамовая нить, которая при нагреве могла эмитировать электроны. Площадь рабочей поверхности нити S = 35см^2. Пучок электронов эмитируемых нитью, достигал силы 50 А, ускорялся напряжением 20 кВ по радиусу к оси системы. Назначение электронного пучка — компенсировать поток ионов, выходящий из плазменного эмиттера. Таким образом, предварительная подача импульса на ускоряющий электрод не приводила к ионизации и ускорительным процессам вследствие намагниченности электронов.



Последующие позиции соответствуют случаю, когда время задержки импульса, ускоряющего ионный пучок, постепенно увеличивалось по отношению к продолжительности импульса, создающего электронно-горячую плазму: от 1,4 мс для позиции *б* до 13 мс для *е*. За время воздействия импульса, приложенного к электронному инжектору, формировалась плазма с концентрацией заряженных частиц $n_e \approx n_i \approx 10^{13}$ см$^{-3}$ и двумя группами электронов: с $T_{em} \approx 100$ кэВ и $T_e \approx 0{,}1$ кэВ.

После подачи импульса ускорения ионного пучка происходил процесс сепарации электронов и ионов в плазме. Возникающее при

этом поле поляризации управляло потоком электронов вдоль оси системы. Таким образом, наблюдалось ускорение всей массы ионов при сохранении квазинейтральности плазмы. Ослабление поля поляризации и улучшение условий ускорения ионов, особенно при малых временных сдвигах между импульсами, достигалось также включением электронного пучка компенсатора. Низкоомная нагрузка, которую представляла собой плазма при малых временных сдвигах между импульсами (позиции *б*, *в*), практически закорачивала источник питания ускорителя ионов. Позиции *г*—*е* характеризуются более поздними временами включения импульса ускорителя, т.е. в процесс ускорения вовлекалась все меньшая концентрация ионов.

Измерения распределения по радиусу потенциала ускорителя в плазме, выполненные с помощью плавающего электрического зонда, показали, что это распределение в первом приближении можно аппроксимировать линейной зависимостью; следовательно, напряженность электрического поля является величиной постоянной. Поэтому время ускорения ионов $\tau = (m_i r)^{1/2}(2ZeE_r)^{-1/2}$ для глубинных и периферийных слоев слабо зависит (как $r^{1/2}$) от их положения.

Описанный эффект приводил к некоторой «бунчеровке» ускоренного ионного пучка, так как ионы более глубинных слоев набирают бо́льшую скорость в процессе ускорения. В среднем в течение $\tau \approx$ 3 мкс все ионы плазмы достигают ускоряющего электрода. В результате поглощения кинетической энергии ионного пучка поверхностью ускорительный электрод нагревался и испарялся. Скорость движения границы испарения материала электрода V_0 = 1000 м/с, т.е. сравнима со скоростью звука в металле. Определенную роль в поступлении вещества в объем плазмы играл адсорбированный газ на поверхности ускоряющего электрода. При десорбировании всех атомов концентрация газа вблизи ускорительного электрода $n_a \approx N/V_a t$, где N — число адсорбированных атомов на поверхности электрода.

При наличии ионослоя атомов $N = 10^{16}$ см$^{-2}$ через время t = 3 мкс образовывался слой десорбированного газа толщиной l_1 = 0,3 см с концентрацией $n_a = 3 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$.

Рассмотрим процесс выброса материала электрода в плазменный объем из-за испарения, который хорошо описывается моделью джоулева разогрева. При температуре поверхности ускоряющего электрода, равной или выше температуры плавления T, наблюдались интенсивные процессы эрозии.

Выражение для массы вещества, унесенного в течение импульса, имеет такой вид [4]:

$$M = 5{,}3 \cdot 10^{-2} \frac{\rho \left[\sqrt{R_0} \int_0^{t_u} I_a(t)dt \right]}{c_\phi \ln\left(T/T_0 \right)},$$

где ρ — плотность материала коллектора; R_0 — удельное сопротивление; t_u — длительность импульса; I_a — плотность тока; c_ϕ — теплоемкость единицы объема решетки; T_0, T — начальная и конечная температуры электрода.

Расчетная масса металла, которая уносится за время импульса с ускоряющего электрода, для позиции *б* рисунка составляла $M \approx 10$ мкг/см^2, что хорошо соответствовало результатам экспериментальных проверок.

Таким образом, поток адсорбированного газа и материала электрода в плазменный объем, где имелись высокоэнергетичные электроны, приводил к резкому усилению тормозного излучения. Последнее можно оценить, использовав выражение

$$Q = 1{,}5 \cdot 10^{-31} \frac{n_{er} n_a \sqrt{T_{er}}}{z^2},$$

где n_{er}, n_a — концентрации «горячих» электронов и нейтрального газа; z — эффективный заряд ядер потока газа.

Интенсивность тормозного рентгеновского излучения увеличивалась на три порядка (см. рисунок, позицию *б*) и регистрирующая аппаратура находилась в состоянии насыщения.

Измеренное воздействие ионного пучка на ускоряющий электрод достигало 700 А.

Список литературы: 1. *Волколупов Ю.Я.* Инверсия населенностей при активном охлаждении плазмы // Материалы 11-й Всесоюз. конф. по когерентной и нелинейной оптике. Ереван, 1982. С. 16—17. 2. *Габович М.Д.* Ионная пучковая плазма и распространение компенсированных пучков // Успехи физ. наук. 1977. Т. 121, вып. 2. С. 259—284. 3. *Габович М.Д.* Компенсированные ионные пучки. М.: Знание, 1980. 64 с. 4. *Mesyats O.A., Bazhenov C.P., Litvinov E.A.* Prok of 5th enter // Simposium on discharges and electrical insulation vacuum. Poznan, 1972. P. 185.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 03.11.97