

ТРАНСПОРТИРОВКА СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ПЛАЗМЕ И В ПЛАЗМОПОЛНЕННЫХ ДИОДАХ

А. В. Агафонов

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Приведены результаты численного моделирования нестационарных процессов в различных схемах нейтрализации заряда высокопоточных электронных пучков и результаты измерений параметров пучков. Основное внимание уделено пучкам с током, превышающим предельный ток Альвена.

Different schemes of non-stationary charge neutralization of high-current electron beams are considered by means of computer simulation. Some issues concerning electron beam transport and measurements of the beam currents are discussed. Of particular interest are beams of currents exceeding Alven's limiting current.

PACS: 29.90.+g

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов увеличения тока транспортируемых высокопоточных электронных пучков является частичная нейтрализация их объемного заряда. Для этой цели используется инжекция пучка в нейтральный газ, в заранее подготовленную плазму, натягивание ионов в пучок собственным полем пространственного заряда из локализованной вне пучка плазмы, а также формирование пучков в плазмозаполненных диодах [1–7]. Последние используются для получения высокопоточных низкоэнергичных пучков электронов для технологических применений. В них достигается многократное превышение тока Альвена в отличие от случая транспортировки пучков в заранее подготовленной плазме. Так, в установке «Ритм» при напряжении 45 кВ формировался пучок с током до 30 кА, что соответствует почти пятикратному превышению I_A [6], в экспериментах [7, 8] при напряжении 20 кВ ток пучка достигал 12 кА, что соответствует почти трехкратному превышению I_A .

1. ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКА В ПЛАЗМУ

Инжекцию пучка в плазму рассмотрим на примере конкретного эксперимента по измерению параметров высокопоточных электронных пучков, формируемых в X-пинчах. Пучки и возникающее жесткое излучение являются неотъемлемой составляющей и в большей или меньшей степени присутствуют во всех экспериментах с X-пинчами [9].

Измерение тока пучка и косвенно (по энергии отсечки) энергии электронов проводилось в геометрии, показанной на рис. 1. Пучок из диода, в котором размещался X-пинч, через отверстие диаметром 3 или 8 мм и попадал на цилиндр Фарадея (ЦФ), находящийся на расстоянии 2,5 см от анода. Диаметр входного окна ЦФ составлял 2,5 см, диаметр коллектора 2 см. Коллектор ЦФ размещался на расстоянии 0,5 см от входного окна, которое использовалось как фильтр, отсекающий электроны с энергией ниже некоторой. При условии, что распределение плотности тока по сечению близко к однородному, окно ЦФ обычно диафрагмируют и данные измерений пересчитывают на полное сечение пучка. В данном случае из-за неопределенностей в распределении плотности тока, поперечного размера и положения пучка измерялся полный ток.

В экспериментах пиковые значения тока электронных пучков, эмитированных из диода X-пинча, достигали нескольких килоампер. Если считать, что максимальная энергия электронов соответствует верхней границе спектра тормозного излучения, т. е. составляет около 100 кэВ, то нетрудно показать, что транспортировка электронных пучков с токами даже килоамперного диапазона от диода до ЦФ, а также между электродами ЦФ невозможна из-за запираания собственным пространственным зарядом. Для этого необходима практически полная зарядовая нейтрализация пучка, по крайней мере, в области между диодом и ЦФ [3, 4]. Что касается регистрации тока непосредственно в ЦФ, куда электронный пучок проходит через фильтр, полностью отсекающий ионную компоненту, определяющим фактором в ЦФ остается собственный пространственный заряд пучка.

Возможно несколько естественных сценариев формирования таких частично-нейтрализованных пучков: 1) ионизация пучком остаточного газа (но время нейтрализации в условиях технического вакуума существенно превышает регистрируемые длительности импульсов тока); 2) натекание плазмы из внутреннего объема диода, образуемой в течение процесса формирования пинча (плотность которой, достаточная для обеспечения транспортировки пучка, невелика и составляет $10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$); 3) вытягивание ионов из плазмы собственным полем пучка через отверстие в аноде (при достаточно высокой, на уровне $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$, плотности плазмы внутри диода). Последний сценарий реализуется, например, в так называемый диод Люса [2]. Основное внимание уделено сценарию с транспортировкой пучка в плазме как наиболее естественному.

Расчеты транспортировки пучка от диода до коллектора ЦФ проведены по электромагнитному PIC-коду KARAT [10] в геометрии, показанной на рис. 1, для второго и

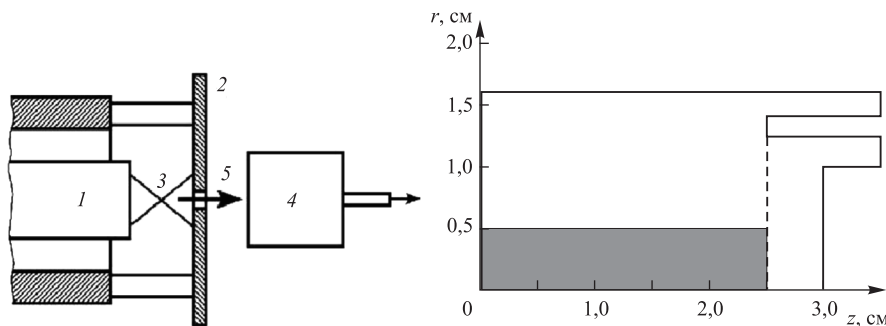


Рис. 1. Геометрия эксперимента и расчетная геометрия. 1 — катод; 2 — анод; 3 — X-пинч; 4 — ЦФ; 5 — пучок

третьего сценариев. Импульсный электронный пучок с различным пиковым током инжектируется из диода X-пинча через апертуру диаметром 8 мм в аноде диода (левый электрод на рисунке) с однородным распределением по энергии от 80 до 100 кэВ и однородным угловым распределением от 0 до 30°. Длительность трапецеидального импульса тока пучка составляет 3 нс (фронт, вершина, спад тока — по 1 нс). В начальный момент времени плазма с плотностью $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ однородно заполняет объем диаметром 1 см между анодом диода и фильтром ЦФ (промежуточный электрод на рисунке). Коллектор ЦФ (правый электрод) расположен на расстоянии 0,5 см от фильтра.

Расчеты проведены для плазмы, образованной легкими ионами (водород) и ионами средней массы (Al). На рис. 2 показана форма инжектируемого тока (b, 2E), форма тока пучка (b, 1A) и тока плазменных электронов (e, 1A) на фильтр ЦФ для пиковых токов пучка 5, 10, 20 и 30 кА при условии, что фильтр ЦФ полностью поглощает все частицы (электроны пучка, плазменные электроны и ионы). Видна четкая дискриминация тока пучка, достигающего фильтра ЦФ, на уровне около 10 кА независимо от величины тока инжекции. При токах инжекции 5 и 10 кА (рис. 2, а, б) пучок весь проходит до фильтра ЦФ, а при больших значениях (рис. 2, в, г) ограничивается собственным магнитным полем и, соответственно, примерно равен предельному току Альвена $I_A = 17\beta\gamma \text{ кА}$, где γ — релятивистский фактор, а β — скорость электронов в единицах скорости света. При энергии электронов 100 кэВ $I_A \approx 11 \text{ кА}$. Изменение плотности плазмы в широком диапазоне (до возникновения токовой нейтрализации) практически не влияет на полученные результаты. Транспортировка сопровождается трансформацией продольной скорости электронов в поперечную, т. е. пучок становится «горячим», увеличением энер-

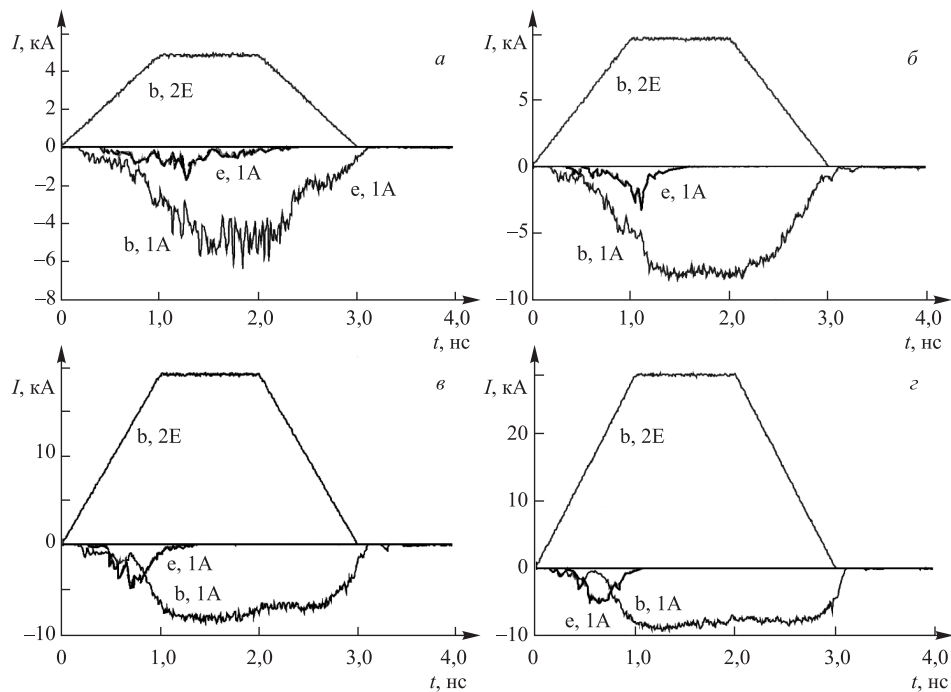


Рис. 2. Транспортировка пучка в водородной плазме

гетического разброса и неоднородности поперечного распределения тока, что сильно сказывается на его прохождении уже внутри ЦФ. Следует подчеркнуть, что из-за образования виртуального катода внутри ЦФ отраженные от него электроны возвращаются в область между диодом и ЦФ и могут существенно влиять на эффективность транспортировки пучка в этой области.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА В ПЛАЗМОНАПОЛНЕННОМ ДИОДЕ

Сильноточные низкоэнергичные пучки электронов находят ряд технологических применений, прежде всего, в импульсной пучковой модификации поверхностей материалов. Для генерации таких пучков используются плазмонаполненные диоды с взрывоэмиссионными катодами. Ускорение электронного пучка в них происходит в тонком слое, который образуется вблизи примыкающей к поверхности катода плазме с началом импульса ускоряющего напряжения. Формирование сильноточного пучка исследовалось на модели установки [7, 8].

В начальный момент времени плазменный столб того же диаметра, что и сильноточный катод (1 см), полностью заполняет в продольном направлении пространство между катодом и анодным электродом. Плотность плазмы однородна в аксиальном и радиальном направлениях, начальная температура варьировалась в пределах 2–10 эВ. Приведенные ниже результаты получены для плотности плазмы $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Напряжение, подаваемое на катод, нарастало до 20 кВ за 10 нс и затем оставалось на постоянном уровне. С ка-

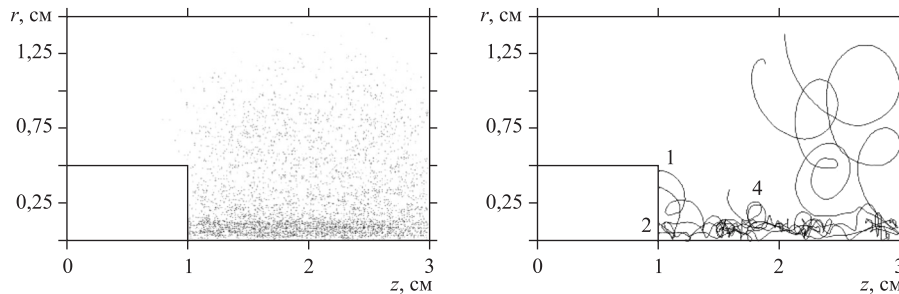


Рис. 3

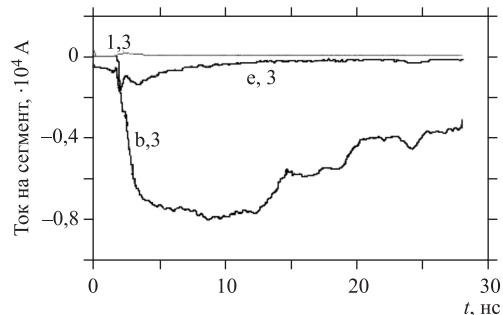


Рис. 4

тодной и анодной поверхностей был разрешен выход электронов в плазму при наличии вытягивающего поля, превышающего заданное значение.

Расчеты были проведены для водородной, азотной и ксеноновой плазмы для различных значений внешнего магнитного поля, в том числе и при его отсутствии. На рис. 3 показаны структура пучка в некоторый момент времени и характерный вид траекторий нескольких электронов. На рис. 4 приведены формы тока пучка (b , 3), тока плазменных электронов (e , 3) и тока ионов (i , 3) на анод. Пиковое значение тока пучка примерно в два раза превышает I_A .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования подтверждают полученные экспериментальные данные для плазмонаполненных диодов. В то же время, по крайней мере, в численном моделировании инъекции СЭП с аналогичными параметрами в заранее созданную плазму с относительно невысокой плотностью (чтобы избежать возникновения токовой нейтрализации) ток проходящего пучка «режется» на уровне I_A , как и при формировании пучка в сценарии продольной нейтрализации. Причины подобного поведения связаны, по-видимому, с условиями формирования пучка в плазмонаполненных диодах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту №09-02-00715.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов А. В. Транспортировка интенсивных электронных пучков // АТЗР. 1973. № 10. С. 31–45.
2. Luce J. S., Sahlin H. L., Crites I. R. Collective Ion Acceleration of Intense Ion Beams in Vacuum // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1973. V. NS-20, No. 3. P. 336–341.
3. Агафонов А. В. и др. Распространение и фокусировка сильноточных электронных пучков в диэлектрических каналах // Физика плазмы. 1981. Т. 7, № 2. С. 267–275.
4. Агафонов А. В. и др. Частично-нейтрализованные сильноточные электронные пучки // Физика плазмы. 1988. Т. 14, № 5. С. 559–565.
5. Озур Г. Е., Проскуровский Д. И. Формирование субмикросекундных низкоэнергетических сильноточных пучков в пушке с плазменным анодом // ПЖТФ. 1988. Т. 14. С. 413–423.
6. Озур Г. Е., Попов С. А., Федущак В. Ф. Формирование узконаправленных низкоэнергетических высокоинтенсивных электронных пучков // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 7. С. 103–110.
7. Агафонов А. В. Низкоимпедансные плазменные системы для генерации сильноточных низкоэнергетических электронных пучков // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 7(136). С. 19–26.
8. Agafonov A. V., Tarakanov V. P. Computer Simulation of Low-Energy High-Current Electron Beam Dynamic in a Long Plasma-Filled Diode // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. «Nuclear Physics Investigations» (49). 2008. No. 3. P. 136–138.
9. Агафонов А. В. и др. Ускоренные электроны и жесткое излучение в X-пинчах // Физика плазмы. 2008. Т. 34, № 9. С. 816–833.
10. Tarakanov V. P. User's Manual for code KARAT. Springfield, VA: Berkeley Research Associates, Inc., 1992. 127 p.