Численное моделирование и сравнение двух типов источников электронных пучков с плазменным катодом

В.Т. Астрелин¹, И.В. Кандауров¹, В.В. Куркучев¹, М.С. Воробьев²

¹ФГБУН Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090 Россия,

Новосибирск ²ФГБУН Институт сильноточной электроники СО РАН, 634055 Россия, Томск

e-mail: astrelin@inp.nsk.su, vorobyovmc@yandex.ru

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-70-75

Для экспериментов, выполненных в ИЯФ СО РАН по сравнению источников электронных пучков с металлическим и плазменным анодом, проведено численное моделирование формирования пучков и их транспортировки в нарастающем магнитном поле. Определены предельные токи пучка, при превышении которых появляются отраженные электроны. Получено объяснение экспериментальных осциллограмм для источника с плазменным анодом. Рассмотрены гипотезы причин пробоя диодов, ограничивающих длительность пучка.

Введение

В ИЯФ СО РАН ведутся эксперименты по формированию и транспортировке мощного электронного пучка большой длительности в нарастающем магнитном поле. Этот пучок используется [1] при испытаниях разных модификаций вольфрама, как материала, перспективного для применения в термоядерных реакторах.

Для ослабления влияния на источник пучка вольфрамовая мишень удалена от источника на расстояние порядка одного-двух метров, а пучок транспортируется до неё в ведущем магнитном поле. Магнитное поле нарастает от источника до мишени, что позволяет за счет сжатия пучка повысить удельную мощность энергии, которую он выделяет на мишени.

В проводимых ранее экспериментах [2] с мультиапертурным источником пучка диодного типа на основе плазменного эмиттера его параметры ограничивались пробоями между электродами. Для увеличения параметров пучка наши коллеги из ИСЭ СО РАН предложили использовать метод генерации пучка, применяемый на установке SOLO [3]. В нем плазменный эмиттер ограничен мелкоструктурной сеткой, а вместо анодного электрода используется анодная плазма. Такой источник был применен в ИЯФ для генерации электронного пучка [4]. Основным отличием от экспериментов [3] была большая энергия электронов и

транспортировка пучка до мишени в нарастающем магнитном поле с большим пробочным отношением.

Была проведена экспериментальная проверка работы рассматриваемых источников и сравнение параметров полученных на них пучков. Оно показало большую временную стабильность характеристик пучка, получаемого в мультиапертурном диоде и в ~ 1.8 раз большее энергосодержание пучка, сформированного в диоде с плазменным анодом [4]. Для сравнительного анализа условий формирования и транспортировки пучков в обеих системах было проведено их численное двумерное моделирование, представленное в настоящей работе.

Описание эксперимента

Приведем основные характеристики эксперимента, важные для моделирования. Общая схема эксперимента показана на Рис.1. Пучок генерируется в источнике в баке в почти однородном магнитном поле $B \sim 0.0063$ Тл и далее транспортируется в нарастающем поле через канал диаметром 10.6 см. Пучок принимается на заземленный коллектор в области расходящегося магнитного поля (аналог цилиндра Фарадея, далее ЦФ). На пути транспортировки пучка могут устанавливаться мишени: диагностическая на расстоянии $Z = 85$ см в поле ~ 0.0166 Тл и испытательная вольфрамовая на расстоянии 173.5 см от катода источника ($B \sim 0.179$ Тл).

Рис.1. Схема эксперимента по транспортировке электронного пучка для диода с мультиапертурной системой электродов: Вверху: распределение магнитного поля по длине ($Z=0$ – катод). Внизу: геометрия эксперимента: 1–катушки магнитного поля бака, 2–соленоид, 3–генератор плазмы, 4–катод, 5–анод диода; 6–электронный пучок, 7–приемник пучка (ЦФ), 8–проходной изолятор

Эмитирующая плазма создавалась дуговым разрядом в аргоне с импульсным напуском. Сравнимые источники различаются диодными узлами.

В мультиапертурном источнике плоский диодный зазор ~ 10 мм образован дисковыми молибденовыми электродами. Каждый электрод представляет собой решетку, содержащую по 241 отверстию, которые расположены в гексагональном порядке внутри окружности диаметром 83 мм. Отверстия в электродах размещены соосно напротив друг друга с точностью лучше 0.1 мм, образуя элементарные ускорительные ячейки. Диаметры отверстий в катодном и анодном электродах равны 3 мм и 4.4 мм, а

толщины этих электродов составляют 1.6 и 3 мм, соответственно.

В источнике пучка с сеточным катодом отверстие в катоде диаметром 83 мм закрыто плетеной сеткой с прозрачностью $\sim 50\%$ с ячейкой 0.4×0.4 мм. Анодная плазма создается электронным пучком в остаточном газе (аргоне) при прохождении внутри лайнера – заземленного анодного электрода. Лайнер представляет собой трубу длиной 350 мм и диаметром 90 мм, а минимальное расстояние между катодным и анодным электродами – 40 мм. Более детально условия экспериментов приведены в работах [4, 5].

Результаты эксперимента

Типичные осциллограммы для импульса мультиапертурного диода приведены на Рис.2. Осциллограммы для диода с сеточным эмиттером и такой же длительностью импульса пучка показаны на Рис.3. Зависимость токов от времени может объясняться следующим образом.

В начале импульса в обеих системах существует вакуумное распределение электрического поля. В системе с мультиапертурным диодом оно длится 2-3 мкс, проявляясь в задержке роста тока ЦФ на уровне 20-40 А. Далее ток эмиссии и ток на ЦФ практически постоянны во времени и совпадают на протяжении почти всего импульса. Максимально достижимые одновременно ток эмиссии и напряжение на диоде при длительности импульса ~ 0.4 мс имеют величину около 60 А и

Рис.2. Осциллограммы для мультиапертурного диода: 1 – потенциал катода [кВ]; 2 – эмиссионный ток [А]; 3 – ток ЦФ [А]

Рис.3. Осциллограммы для диода с плазменным анодом. Обозначения, как на Рис.3

80 кВ, соответственно.

В системе с сеточным катодом в начале импульса ($t \leq 320$ мкс) ток ЦФ близок к ~ 10 А, а $\sim 90\%$ эмитированного тока оседает на лайнер. Возникающее далее нарастание тока пучка, приходящего на ЦФ, указывает на появление так называемого «плазменного анода» внутри лайнера. Его появление должно приводить к ослаблению электрического поля между катодом и лайнером и приближению геометрии эффективного ускоряющего зазора к плоской – аналогично тому, как это происходит в источниках типа SOLO. Плазма в анодной трубе образуется как при ионизации остаточного газа, так и газа, десорбированного электронами пучка с поверхности анодной трубы.

При сопоставимой длительности импульсов около 0.4 мс максимальное значение тока пучка в диоде с сеточным катодом достигало величины 100 А при ускоряющем напряжении около 80 кВ.

Численное моделирование формирования пучка в диодах

Различие в поведении токов на ЦФ (Рис.3, 4) анализировалось с применением численного моделирования формирования пучков в обеих системах.

Моделирование проводилось пакетом POISSON-2 [6], использующим метод интегральных уравнений для решения

Рис.4. Траектории частиц в ячейке мультиапертурной ЭОС: режим 1) – без анодной плазмы; 2) и 3) – с анодной плазмой ($j_i = 0.3$ и 0.7 А/см²); черным выделены: катодный (слева) и анодный (справа) электроды

уравнения Пуассона, метод токовых трубок для вычисления зарядов и магнитных полей пучка на сетках и итерационный процесс для самосогласования стационарного решения. Полученные характеристики пучков используются далее при моделировании их транспортировки до мишени.

Мультиапертурный диод

Расчет элементарной ячейки мультиапертурного диода для режима Рис.2 приведен на Рис.4. Для диодного зазора 10 мм и напряжении на диоде 80 кВ заданы следующие параметры катодной плазмы: $n_c \sim 4.2 \cdot 10^{11}$ см⁻³, $T_{ec} \sim 10$ эВ, $T_{ic} \sim 1$ эВ, при которых основной параметр – эмиссионная способность поверхности плазмы – равна $j_e \sim 3.5$ А/см². Для нее ток в каждой ячейке составит ~ 0.25 А при полном токе пучка $I_0 \sim 60$ А. Без анодной плазмы (Рис.4, 1) среднеквадратичный угловой разброс пучка $\langle \theta \rangle \sim 0.16$ рад, очевидно, определяется перефокусировкой потока электронов в диодном зазоре, которая определяется вычисленной формой поверхности плазмы.

Влияние потоков из анодной плазмы проверялось для двух значений плотности тока ионов: $j_i \sim 0.3$ и 0.7 А/см². Угловой разброс электронов составил $\langle \theta \rangle \sim 0.09$ и 0.06 рад, уменьшаясь с ростом ионного тока (Рис.4, режимы 2 и 3). Эти углы находятся в согласии с результатами измерений в эксперименте [7].

Диод с сеточным катодом

Задача формирования электронного пучка в системе с плазменным анодом для установки SOLO была численно решена ранее [8]. Было показано, что при плотности эмиссионного тока $j_e \sim 4$ А/см² электроны приобретают поперечные энергии до 0.4-0.5 кэВ в неоднородных электрических полях, такой же как здесь, катодной сетки. При их ускорении до 80 кэВ угловой разброс в пучке будет составлять величину масштаба $\langle \theta \rangle \sim 0.08$. Основным отличием условий генерации пучка от наших является давление аргона $P \sim (2 \div 3) \cdot 10^{-2}$ Па в дрейфовой камере SOLO, значительно превышающее

давление остаточного газа $P \sim 4 \cdot 10^{-4}$ Па на стенде ИЯФ, и меньшая энергия пучка в SOLO, масштаба $\sim 10 - 20$ кэВ.

Поскольку в описываемых выше экспериментах параметры анодной плазмы и динамика заполнения ею лайнера и транспортного пространства определялась слабо контролируемые предполагаемыми факторами, моделирование процесса заполнения системы плазмой не проводилось. Моделировалось только начальное состояние системы без анодной плазмы и конечное, при котором анодная плазма заполняет лайнер и транспортный канал, нейтрализуя пространственный заряд пучка. При этом подразумевается, что ускорение электронов происходит в плоском ленгмюровском слое между катодной сеткой и поверхностью анодной плазмы.

Результат численного моделирования генерации пучка в диоде с сеточным катодом для начального состояния показан на Рис.5. При напряжении 80 кВ и токе эмиссии 95 А большая часть пучка поглощается лайнером, а выходной ток диода равен $I_0 \sim 5.4$ А. Этот результат хорошо согласуется с экспериментом Рис.4, если учесть, что в численном коде отражение электронов от поверхности лайнера не учитывается. Было проверено, что выходной ток диода практически не зависит от поперечной энергии электронов на выходе из сетки при ее изменении от 10 до 400 эВ, то есть потери, в основном, определяются электрическими полями в диодном зазоре и лайнере.

Моделирование транспортировки пучка через магнитную пробку

В таблице приведены результаты

Рис.5. Траектории электронов и эквипотенциали (-1, -2, ..., -9, -10, -20, ..., -70 кВ) в диоде с сеточным катодом в отсутствие анодной плазмы

численного моделирования для обеих схем генерации пучка. Коэффициент компрессии по магнитному полю $R \sim 30$, такой же, как для Рис.2 и 3. Для них моделировались два варианта: 1) – начальное состояние без плазмы в канале транспортировки и 2) – конечное, в предположении заполнения канала плазмой с полной компенсацией заряда пучка. Магнитное поле пучка учитывается всегда.

Распределение плотности тока эмиссии по поверхности эмиттера задается близким к однородному, которое было получено в эксперименте по измерению распределения мягкого рентгеновского излучения пучка на мишени [9]. Напряжение на диоде задавалось равным 80 кВ.

Во всех случаях распределение скоростей по углам моделировалось пятью группами траекторий (всего $5 \times 20 = 100$ траекторий) с углами, определяемыми на выходе из диода как $\theta_s = 0, \pm 0.03, \pm 0.06$ рад и равными для всех углов токами.

При моделировании ток эмиссии поднимался до появления первых отраженных траекторий. По результатам предыдущих экспериментов и моделирования их появление ассоциируется с предпробойным состоянием диода.

Результаты моделирования транспортировки пучка. Выделены отраженные траектории.			
	а) мультиапертурный диод		б) диод с сеточным катодом
Вариант 1) – учет всех полей пучка	<p>$I_0 \sim 25$ А, проходит ~ 24 А.</p>		<p>$I_0 \sim 62$ А, проходит ~ 5.4 А.</p>
Вариант 2) – без объемного заряда пучка	<p>$I_0 \sim 190$ А, проходит ~ 186 А.</p>		<p>$I_0 \sim 304$ А, проходит ~ 292 А.</p>

Результаты и их обсуждение

В мультиапертурном диоде при отсутствии плазмы в канале (таблица, Вар. 1а) отражение электронов начинается с тока пучка ~ 25 А. Очевидно, причиной отражения является комбинированное ограничение тока потенциалом объемного заряда пучка при наличии питч-углов, возрастающих с ростом магнитного поля. При полной компенсации заряда мог бы проходить ток до ~ 190 А (Вар. 2а). Он ограничивается влиянием собственного магнитного поля пучка в диоде, приводящего с ростом тока пучка к нарастанию начального питч-угла электронов между вектором их скорости и полным магнитным полем и, в результате, их отражению магнитной пробкой. В эксперименте до пробоя диода проходит ~ 60 А (Рис.4). Это означает, что в пучке происходит частичная (до $\sim 50\%$) компенсация объемного заряда плазмой.

В диоде с сеточным катодом без компенсации заряда пучка отражение электронов магнитной пробкой начинается как раз при достижении выходного тока из лайнера значения 5.4 А (Вар. 1б таблицы). Поскольку питч-углы электронов под действием расходящегося электрического поля в лайнере нарастают по радиусу, а предпробойный ток в эксперименте близок

Рис. 6. Измеренный профиль пучка

к расчетному, то это означает, что лайнер поглощает именно те электроны пучка, питч-углы которых лежат вне конуса прохождения через пробку. При появлении анодной плазмы и полной компенсации заряда пучок проходит через пробку без отражения с током до ~ 300 А. При этом из тока, эмитированного через катодную сетку, $I_0 \sim 304$ А, через лайнер проходит 292 А и потери электронов на лайнере малы. Это соответствует осциллограммам Рис.4 при $t \sim 500$ -600 мкс.

Проводилось также сравнение экспериментально измеренного профиля тока пучка, полученного из источника с сеточным катодом, на диагностической мишени ($Z = 85$ см) с вычисленным при моделировании. Рентгенографический отпечаток пучка, соответствующий ему радиальный профиль распределения плотности тока по сечению и расчетный профиль приведены на Рис. 6 и 7. Наблюдается качественное соответствие профилей. В обоих случаях в центре пучка присутствует резкий максимум тока. Измеренная ширина профиля на полувысоте составляет ~ 13 мм, а расчетная ширина – 4–5 мм. Форма профилей совпадает с точностью до статистических ошибок модельной дискретизации. Различие в поперечном размере профилей может объясняться тем, что в эксперименте измеряется усредненный по времени профиль, поскольку время высвечивания рентгенографической пленки больше длительности импульса пучка.

Из графиков таблицы видно, что синхронность циклотронного вращения

Рис.7. Расчетный профиль пучка

электронов приводит к периодическим пульсациям сечения по длине, причем распределение пульсаций по длине сдвигается при нейтрализации плазмой заряда пучка. При этом сжатии пучка плотность тока в центре резко возрастает, что проявляется в центральном пике измеренного профиля.

Заключение

Для двух схем генерации электронных пучков в диодах с плазменными катодами проведено численное моделирование формирования и транспортировки пучков в магнитном поле. Оно, в основном, подтверждает предварительные выводы, полученные при анализе экспериментов.

Благодарности

Работа частично поддерживалась Комплексной программой фундаментальных исследований Сибирского отделения РАН «Междисциплинарные интеграционные проекты 2018-2020г» (Проект СО РАН № 10).

Литература

[1] L.N. Vyacheslavov, A.S. Arakcheev, A.V. Burdakov, et al. Observation of dust particles ejected from the tungsten surface by transient heat flux with small-angle scattering of cw laser light // Nuclear Materials and Energy Volume 12, 2017, Pages 494-498

[2] L. Vyacheslavov, A. Arakcheev, A. Burdakov, et al. Novel electron beam based test facility for observation of dynamics of tungsten erosion under intense ELM-like heat loads. // AIP Conf. Proc. 1771, 060004 (2016)

[3] V.N. Devyatkov, N.N. Koval', P.M. Shchanin. Generation and transport of highcurrent, low-energy electron beams in a system with a gas-filled diode, Tech. Phys. 43 (1998) 39.

[4] V. Astrelin, I. Kandaurov, N. Koval, et al. Generation and transport of submillisecond intense electron beams in plasma cathode vacuum diodes // Vacuum, 2017, 143, p.495-500

[5] В.Т. Астрелин, М.С. Воробьёв, И.В. Кандауров, Н.Н. Коваль, В.В. Куркучеков, С.А. Сулакшин, Ю.А. Трунёв.

Генерация и транспортировка интенсивных субмиллисекундных электронных пучков в вакуумных диодах с плазменным катодом. *Настоящий сборник.*

[6] В.Т. Астрелин. Особенности решения задач плазменной эмиссионной электроники в пакете прикладных программ POISSON-2 // Успехи прикладной физики, том 1, 2013, №5, с.571-573.

[7] V Kurkuchekov, V Astrelin, I Kandaurov et al. Angular distribution of beam electrons in a source with arc plasma emitter // (Proc. of 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects 2016, Tomsk), Journal of Physics: Conference Series, 830 (2017), 012031

[8] V.T. Astrelin, A.V. Burdakov, S.V. Grigoriev, et al. An Influence of Grid Fields on Beam Characteristics in a Diode with Grid Stabilization of Plasma Emitting Surface // Proceedings of 16th International Symposium on High Current Electronics: Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2010, p.15-18.

[9] I.V. Kandaurov, V.V. Kurkuchekov and Yu.A. Trunев, Study of electron beam uniformity in large-area multiaperture diode with arc plasma cathode // (Proc. of 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects 2016, Tomsk), Journal of Physics: Conf. Series 830 (2017) 0012032 doi :10.1088/1742-6596/830/1/012032