

УДК 533.9

## ТРАНСПОРТИРОВКА ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ВАКУУМНОМ ТРАКТЕ С ПЛАЗМЕННЫМИ ПЕРЕМЫЧКАМИ

*А. Е. Дубинов, В. С. Жданов, В. Г. Корнилов,  
В. Д. Селемир, А. А. Хижняков, В. И. Челпанов*

Российский федеральный ядерный центр –  
ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

Для увеличения тока электронного пучка, транспортируемого в вакуумном тракте, предложено создавать в тракте поперечные плазменные перемычки. Проведена численная проверка идеи. Показано, что в отсутствие перемычек в тракте формируется виртуальный катод с отражением значительной части электронов пучка, в то время как тракт, нагруженный рядом плазменных перемычек, пропускает весь пучок полностью. Осуществлена экспериментальная проверка такого тракта на ускорителе прямого действия КОВЧЕГ и подтверждена его работоспособность.

To increase electron beam current, transported in the vacuum section, it is proposed to create transversal plasma disks. Numerical check of this idea has been made. It is shown that without the disks virtual cathode is formed, reflecting significant part of the beam electrons, whereas the section, loaded with a number of disks, passes the whole beam. Experimental check of this section with accelerator of direct operation KOVCHEG has been made, and its operational capability is confirmed.

Для решения ряда научных и технических задач необходимо обеспечить передачу энергии в виде сильноточных электронных пучков на большие расстояния без заметных потерь. Для этих целей разрабатываются вакуумированные транспортировочные тракты с магнитным сопровождением пучка [1, 2].

Однако описанные в [1, 2] тракты транспортировки имеют принципиальное ограничение на величину транспортируемого тока [3], при превышении которой в тракте формируется виртуальный катод и тракт «запирается».

Оригинальное решение, направленное на повышение величины транспортируемого тока сверх существующего предела, было предложено в работе [4]. Суть этого решения заключается в разбиении тракта на секции и отделении их друг от друга электропроводящими пленками, фольгами или сетками, которые имеют толщину, много меньшую длины свободного пробега электронов.

Отметим, что такой тракт может и не содержать системы магнитного сопровождения пучка. Так как проводящая пленка (фольга, сетка) вблизи себя шунтирует радиальное дефокусирующее электрическое поле пучка (вдоль проводящей поверхности тангенциальная составляющая электрического поля равна нулю), то вблизи пленки на электроны действуют только силы магнитной фокусировки благодаря собственному магнитному полю пучка, и необходимость внешней фокусировки снимается. Однако возможно использование такого тракта и с магнитной системой.

Недостатком транспортировочного тракта типа [4] является сильное угловое рассеяние электронов атомами пленки (фольги, сетки), что приводит к потерям электронного пучка и снижает КПД транспортировки. Кроме того, тонкие пленки достаточно недолговечны и повреждаются после небольшого количества импульсов электронного тока.

Начиная с 1995 г., в РФЯЦ–ВНИИЭФ проводятся теоретические и экспериментальные исследования формирования сильноточных релятивистских электронных пучков в диодах с анодом в виде плазменного слоя. Эти работы направлены на создание СВЧ-генераторов с виртуальным катодом — виркаторов [5, 6]. Укажем, что формирование сильноточных электронных пучков в диодах с плазменным анодом для других целей описано также в [7–9].

Эти работы навели нас на мысль о замене тонких пленок и фольг в транспортировочных трактах на тонкие плазменные перемычки. Но данное техническое решение нуждается в проверке: не возникнут ли в тракте пучковые или плазменно-пучковые неустойчивости, которые сорвут процесс транспортировки? С целью ответа на этот вопрос был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований.

Теоретические исследования проводились методом компьютерного моделирования. Для этого использовалась 2,5-мерная версия известного пакета программ «КАРАТ» [10], основанного на полностью согласованном релятивистском электромагнитном *particle-in-cell*-коде — варианте метода крупных частиц.

Тракт транспортировки представлял собой плоский волновод длиной 30 см и шириной 10 см, на который наложено сильное продольное магнитное поле величиной 50 кГс. В волновод инжектировался электронный пучок с линейной плотностью тока 400 А/см с энергией электронов 0,5 МэВ.

Моделировались две ситуации: свободный волновод и волновод, нагруженный двумя плазменными перемычками толщиной 3 см каждая и с концентрацией плазмы в них  $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Результаты моделирования показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

Получено, что в отсутствие плазменных перемычек в тракте формируется виртуальный катод (рис. 1, б), что свидетельствует о том, что данная величина электронного тока для данного волновода является запредельной.

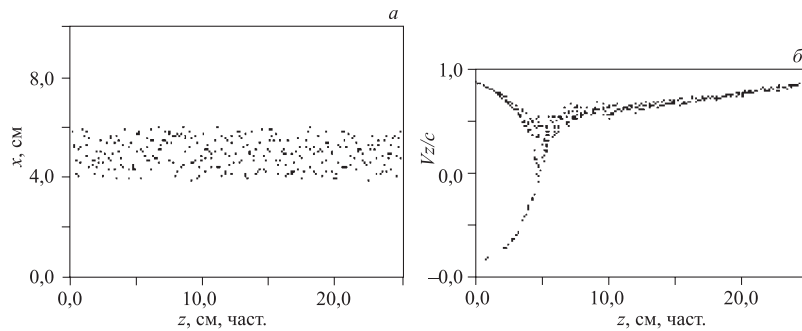


Рис. 1. а) Геометрия тракта с пучком. б) Фазовый портрет пучка

При наличии же в тракте плазменных перемычек электронный пучок полностью проходит через волновод, не образуя виртуального катода (рис. 2, б).

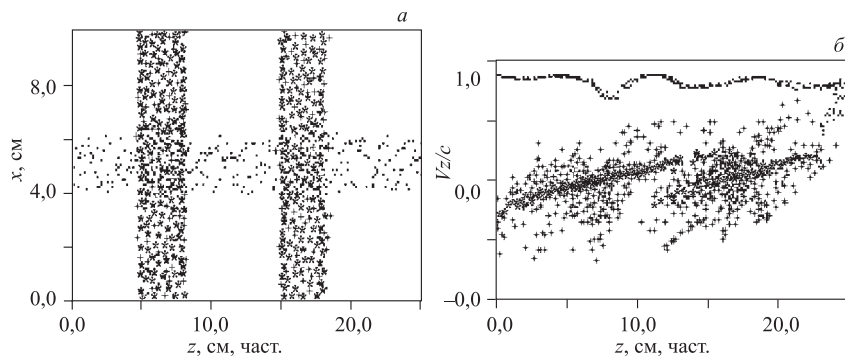


Рис. 2. а) Геометрия тракта с пучком и плазменными перемычками. б) Фазовый портрет пучка: □ — электроны; + — электроны плазмы; \* — ионы плазмы

Таким образом, при моделировании было установлено, что тракт транспортировки, нагруженный плазменными перемычками, может пропускать электронные пучки с запердельными токами без заметных потерь.

Следует обратить внимание, что электронный пучок захватывает в коллективное движение положительные ионы плазмы, что может оказаться полезным для ускорения ионных пучков. В этом случае, а также при необходимости получения чистого электронного пучка на выходе тракта транспортировки можно поставить магнитный сепаратор частиц.

Эксперименты по транспортировке запердельного электронного пучка проводились на установке КОВЧЕГ [11], представляющей собой электронный ускоритель прямого действия со взрывоэмиссионным катодом  $\varnothing 180$  мм. Источник энергии ускорителя — четыре генератора Маркса общей емкостью 1,28 мкФ с выходным напряжением 300 кВ. Коаксиальная вакуумная линия, установленная между генераторами Маркса и диодом, может также выполнять роль индуктивного накопителя энергии при использовании плазменного прерывателя тока. Этот режим, однако, не использовался в описываемой серии экспериментов. Суммарная индуктивность контура равна 1,2 мкГн. Узел плазменного анода — фланец, в который встроены три коаксиальных газоплазменных инжектора. Полость, образованная двумя пластинами, и кольцевое сопло формируют радиально сходящийся плазменный поток. Минимальный зазор между пластинами, образующими сопло, равен 6 мм; диаметр отверстия, внутри которого находится плазменный слой, равен 140 мм, минимальная толщина слоя  $\approx 2$  см. Аксиальная составляющая скорости оценивается величиной 3 мм/мкс. Изменение длительности инжекции плазмы до включения генераторов Маркса позволяет регулировать начальную плотность плазмы и начальный диодный зазор между катодом и эффективной границей плазменного слоя. Максимальная плотность плазмы  $\approx 1 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ . В качестве плазмообразующего газа использовался ксенон. За узлом плазменного анода расположена труба дрейфа диаметром 355 мм общей длиной 1,8 м.

Эксперименты выполнялись в двух режимах:

1) в режиме плазменного анода. В этом случае вместо сетки анодом служил плазменный анод, а дополнительного плазменного слоя в тракте транспортировки не создавалось.

С помощью этой конфигурации определялись особенности работы диода с плазменным анодом;

2) в режиме транспортировки в конфигурации сеточного анода с узлом плазменного слоя в тракте, расположенного на расстоянии 50 см от сеточного анода (рис. 3). С помощью этой конфигурации экспериментально подтверждалась возможность транспортировки запердельного электронного пучка через вакуумный тракт с плазменными перемычками.

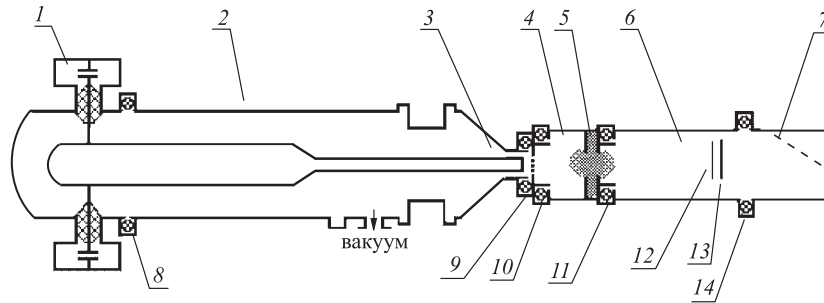


Рис. 3. Схема экспериментов на установке КОВЧЕГ: 1 — генераторы Маркса; 2 — передающая линия; 3 — диодная секция; 4, 6 — вакуумный тракт транспортировки; 5 — узел плазменного слоя; 7 — радиационная отражающая сетка; 8, 9, 10, 11, 14 — пояса Роговского; 12 — фольговый коллектор; 13 — толстый коллектор

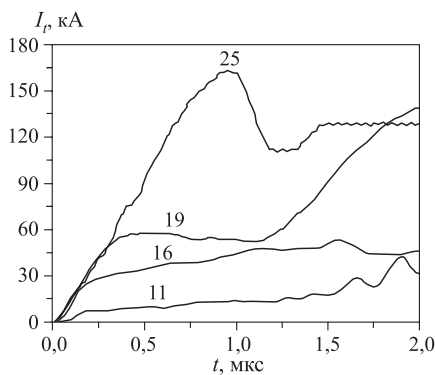


Рис. 4. Семейство осциллограмм диодного тока в режиме плазменного анода: цифры над кривыми соответствуют задержке включения диодного напряжения по отношению к включению батареи плазменного инжектора (в мкс)

На рис. 4 приведено семейство осциллограмм диодного тока в режиме плазменного анода. Цифры над осциллограммами соответствуют задержке включения диодного напряжения по отношению к включению батареи плазменного инжектора в микросекундах (задержка 25 мкс соответствует моменту, близкому к закорачиванию зазора 50 мм). Мы видим, что увеличение задержки, эквивалентное уменьшению диодного зазора, приводит к уменьшению начального диодного импеданса.

В режиме плазменного анода проведена серия экспериментов в попытке разделения электронного и ионного токов в двухколлекторном варианте. В этом случае в конце 1 м вакуумного тракта помещалась сборка из фольгового коллектора (Al толщиной 80–100 мкм) и толстого металлического коллектора. Предполагалось, что первый коллектор, пропуская электроны, будет полностью поглощать ионный ток, который будет регистрироваться с помощью шунта. Второй коллектор должен регистрировать электронный ток. Однако поскольку процесс коллективного ускорения ионов связан с поте-

рей энергии электронного пучка, поглощение электронов первым коллектором оказалось значительным, сигнал с шунта почти всегда был отрицательным. При задержках около 20 мкс и больше фольговый коллектор разрушался после одного импульса. Характер разрушения — расплавление и разрыв. По нашим оценкам, в режиме плазменного анода на расстояние 1 м транспортируется свыше 10% энергии, выделяемой в диоде в виде электрон-ионного потока. При этом и за расплавление, и за разрыв в результате передачи импульса в равной мере могут быть ответственны как электроны, так и ионы. Таким образом, для измерения корпускулярных потоков в условиях транспорта энергии требуется разработка дополнительных диагностик.

В режиме транспортировки мы варьировали размер эффективного вакуумного промежутка между сеточным анодом и плазмой, как и в предыдущем случае, — путем изменения толщины плазменного слоя на момент включения диодного тока. На рис. 5 приведено семейство осциллограмм пролетного тока в этом режиме. Цифры над осциллограммами также соответствуют задержке включения диодного напряжения по отношению к включению батареи плазменного инжектора (0 — без плазмы). При задержке 25 мкс явно проявляется влияние плазмы на работу диода.

Если плазменная перемычка отсутствовала, то за сетчатым анодом формировался виртуальный катод. Об этом свидетельствуют оценки предельного тока, выполненные по методу [2], и наличие СВЧ-излучения из транспортировочного тракта. При наличии плазмы наблюдается увеличение пролетного тока, причем с уменьшением длины тракта амплитуда пролетного тока возрастает. Увеличение пролетного тока сопровождалось значительным увеличением тормозного излучения, регистрируемого в конце трубы дрейфа. Это убедительно свидетельствует о возможности транспортировки запердельного электронного пучка в вакуумном тракте с плазменными перемычками.

Один из основных экспериментальных результатов: глубокое влияние пространственно-ограниченных плазменных слоев как на работу диода, так и на процессы в дрейфовом пространстве. Диод работает существенно большее время и в более сильноточном режиме; в дрейфовом пространстве происходит ускорение ионов, формируется плазменный канал, по которому эффективно транспортируется РЭП, изменяются электродинамические свойства дрейфовой области, что приводит к изменению спектра электромагнитного излучения. Влияние плазменного слоя нельзя свести к «расплыванию» его, т. е. к диффузионному заполнению дрейфовой трубы плазмой, но эти эффекты требуют продолжения исследований.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 1629. Авторы приносят благодарность В. П. Тарakanову за консультацию по использованию пакета «КАРАТ».

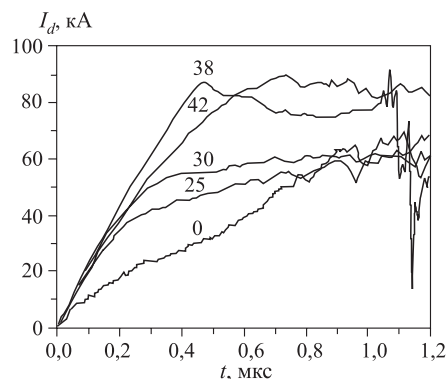


Рис. 5. Семейство осциллограмм диодного тока в режиме транспортировки: цифры над кривыми соответствуют задержке включения диодного напряжения по отношению к включению батареи плазменного инжектора (в мкс)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешков И. Н. Транспортировка пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 1991.
2. Босамыкин В. С. и др. Безжелезные линейные ускорители электронов — мощные генераторы коротких импульсов тормозного излучения // Высокие плотности энергии: Сб. науч. тр. Саров, 1997. С. 107–133.
3. Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Устойчивость релятивистских электронных пучков в плазме и проблема критических токов // УФН. 1971. Т. 103, вып. 4. С. 609–640.
4. Adler R. J. et al. Alternate transport techniques for electron induction linacs // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1983. V. NS-30, No. 4. P. 3198–3200.
5. Бабкин А. Л. и др. Виркатор. Патент РФ № 2046440 с приоритетом от 8.06.93; МКИ: Н 01 J 25/00 // Бюлл. изобр. 1995. № 29.
6. Бабкин А. Л. и др. Теоретическое и экспериментальное исследование виркатора с плазменным анодом // Физика плазмы. 1997. Т. 23, вып. 4. С. 343–349.
7. Иремашвили Д. В. и др. Сильноточная плазменная электронная пушка с током 50 кА в импульсе // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 17, вып. 1. С. 11–13.
8. Santoru J. et al. Plasma-anode electron gun // J. Appl. Phys. 1994. V. 76, No. 10. P. 5629–5635.
9. Nazarov D. S. et al. Production of low-energy high-current electron beams in a reflected-discharge plasma-anode gun // Digest of techn. papers of the 11th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Baltimore, 1997. P. 1335–1340.
10. Tarakanov V. P. User's manual for code «KARAT». Berkley Research Associate, Inc., Springfield, WA, 1992.
11. Babkin A. L. et al. Powerful electron accelerator «COVCHEG»: status, parameters and physical experiments // Digest of techn. papers of the 11th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Baltimore, 1997. P. 765–769.

Получено 20 мая 2003 г.