

УДК 621.384:537.3

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПУШКЕ С ПЛАЗМЕННЫМ ФЕРРОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ КАТОДОМ

В.А. Кушнір, И.В. Ходак

ННЦ «Харьковский Физико-Технический Институт», ул. Академическая, 1, 61108, г.Харьков, Украина
E-mail: khiv@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 21 марта 2007 г.

В высокочастотных электронных пушках десятисантиметрового диапазона могут быть сформированы электронные пучки с зарядом превышающим 10^2 нК в импульсе длительностью $\sim 10^{-8}$ сек. Это возможно при условии, если эмиттер электронов обладает плотностью тока эмиссии более 10^2 А/см². Одними из источников электронов, способных обеспечить достаточную плотность тока эмиссии являются плазменные ферроэлектрические катоды. Подобные катоды широко применяются в источниках электронных пучков с импульсным ускоряющим напряжением. Особенности формирования электронных пучков с импульсным зарядом $\sim 10^2$ нК в высокочастотных пушках связаны с особенностями формирования плазменной эмиттирующей поверхности в таких катодах при воздействии высокочастотного поля пушки с напряженностью $\sim 10^7$ В/м. Предметом исследований в данной работе являются параметры пучка, получаемые в результате влияния конфигурации плазменного катода на формирование его эмиттирующей поверхности. Основные исследования выполнены экспериментально. Для оценки и анализа полученных результатов был использован метод численного моделирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокочастотная пушка, ферроэлектрик, плазменный катод, объемный заряд, импульсный ток, динамика частиц.

Источники электронных пучков на основе высокочастотных пушек (ВЧ пушек) широко применяются в линейных резонансных ускорителях электронов благодаря их качеству формировать электронные пучки с высокой яркостью и с высокой интенсивностью. В общем случае, ВЧ пушка [1, 2] состоит из эмиттера электронов (катода), расположенного внутри полого цилиндрического резонатора с полем значительной напряженности ($\sim 10^7$ В/м). Для формирования электронных пучков с импульсным зарядом, превышающим 10^2 нК в высокочастотных пушках, целесообразно использовать эмиттеры с плотностью тока эмиссии электронов более 10^2 А/см². Катоды с эмиссией электронов из плазменного слоя удовлетворяют этому условию. Плазменный слой на поверхности катода может быть сформирован в результате различных физических процессов. Так, например, на поверхности металлического катода плазменный слой может быть образован путем облучения ее лазерным импульсом с плотностью потока мощности более 10^9 Вт/см² [3]. В этом случае эмитированные электроны непосредственно с плоскости катода ускоряются сильным однородным ВЧ полем в резонаторе пушки. Аналогично процесс формирования сгустков реализуется в наносекундных ВЧ пушках с металлическими или диспенсерными фотокатодами [4, 5] с плотностью эмиссии $\sim 10^2$ А/см². По иному происходит формирование пучка в случае, когда эмиссия электронов происходит с протяженного движущегося плазменного образования в неоднородном ВЧ поле. Именно этот случай реализуется, в частности, в ВЧ пушках с эмиссией из плазмы, образующейся в результате управляемого незавершенного разряда на поверхности диэлектрика с высоким значением диэлектрической проницаемости [6-8]. Преимущественно для катодов применяются ферроэлектрики с $\epsilon \sim 10^3$. Плотность тока электронной эмиссии в плазменном ферроэлектрическом катоде достигает 10^3 А/см² при длительности импульса тока пучка $\sim 10^{-8}$ с. В однорезонаторной ВЧ пушке с таким катодом был сформирован пучок с максимальным зарядом в сгустке 3 нК [8]. Одним из возможных путей увеличения тока пучка на выходе ВЧ пушки, на первый взгляд, является увеличение поперечного сечения канала эмиссии, занимаемого плазмой. В то же время параметры пучка на выходе ВЧ пушки определяются в значительной степени динамикой электронов в прикатодной области резонатора [9]. В этой области скорости частиц малы и параметры пучка на выходе пушки могут существенно изменяться при изменении положения эмиттирующего фронта плазмы. Основная цель настоящей работы заключается в получении информации о зависимости параметров пучка от конфигурации плазменного катода.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Плазменный ферроэлектрический катод для использования в высокочастотном поле пушки напряженностью $\sim 10^7$ В/м разработан на основе принципа пространственного разделения процессов формирования плазменного слоя и последующего ускорения электронов [8]. Основу катода составляет ферроэлектрический диск 2 (рис. 1) из соединения $BaTiO_3$ ($\epsilon=2150$) толщиной 0,8 мм и площадью 0,8 см². С одной стороны на диск напылен управляющий электрод 3 для подачи на катод импульсного напряжения $U_{упр.}$. С другой стороны диск покрывает формирующий электрод 1, одной из функций которого является уменьшение

напряженности высокочастотного поля в области контакта формирующего электрода с диском до величины, исключающей возникновение самопроизвольного СВЧ разряда. Выполнение данной функции обеспечивает цилиндрический канал в электроде. Напряженность высокочастотного поля в канале экспоненциально падает в сторону ферроэлектрического диска. При длине (h) и диаметре (d) канала равных 1,5 мм в случае $\lambda_0 \cong 10$ см, напряженность поля у контактирующей поверхности на 2 порядка меньше, чем в резонаторе пушки.

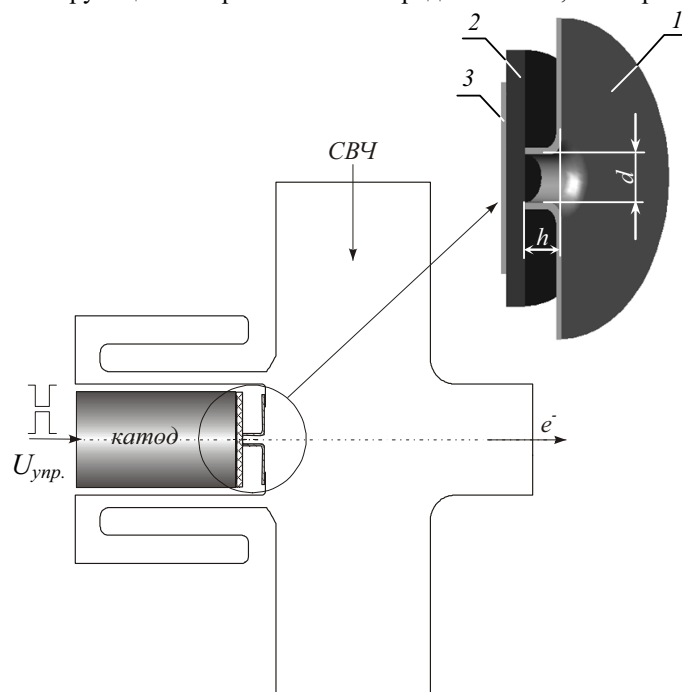


Рис. 1. Плазменный катод в ВЧ пушке:

1 – формирующий электрод, 2 – ферроэлектрический диск, 3 – управляющий электрод

К формирующему электроду катода может быть приложено напряжение $U_{упр.}$ как положительной, так и отрицательной полярности относительно управляющего электрода. Под воздействием $U_{упр.}$ в канале катода образуется плазма. Плазма возникает в местах контакта торца канала в формирующем электроде с ферроэлектрическим диском и расширяется в сторону резонатора. Для экспериментального исследования процессов формирования пучка было изготовлено три отдельных формирующих электрода с различными размерами канала (см. табл. 1). Значение глубины канала выбиралось из расчета поддержания неизменной напряженности с.в.ч. поля в области контакта металл-ферроэлектрик.

Таблица 1. Спецификация катодов

Номер катода	1	2	3
Диаметр канала d , мм	1,5	3	5
Глубина канала h , мм	1,5	3,5	5,5

Изменение размеров катода приводит к соответствующему изменению резонансной частоты. Максимальное значение этого изменения при использовании в ВЧ пушке катода 3 составляет $\cong 300$ кГц, что находится в пределах полосы подстройки собственной частоты резонатора.

Исследования проводились с использованием однорезонаторной ВЧ пушки S-диапазона (рабочая частота $f_0=2797,15$ МГц) [6]. Процессы формирования пучка в ВЧ пушке исследовались на специальном стенде для испытания инжекторов линейных ускорителей. Источником высокочастотной мощности является клистронный усилитель, работающий в режиме автогенератора с внешней обратной связью [10]. Высокочастотная мощность в резонатор пушки подавалась через направленный ответвитель, обеспечивающий регулировку мощности в диапазоне 0,08-1 МВт. Измерительные системы стенда позволяют измерять параметры электронных пучков с энергией частиц от 10^4 эВ до 10^6 эВ. Импульсный ток ВЧ пушки измерялся индукционным измерителем тока, с временным разрешением 0,5 нс. Энергия электронов измерялась с использованием системы магнитного анализатора и цилиндра Фарадея (ЦФ). Длительность импульса ВЧ мощности составляла 2 мкс. Источник импульсного напряжения $U_{упр.}$ выполнен по схеме источника с линией передачи. Длина линии обеспечивает генерацию импульса напряжения $U_{упр.}$ длительностью 60 нс по уровню напряжения $0,9 \cdot U_{max}$. Величина $U_{упр.}$ регулируется в пределах 1-3 кВ. Выходное сопротивление источника $\cong 5$ Ом согласовывается с волновым

сопротивлением линии передачи $\rho=50$ Ом посредством трансформатора сопротивлений. Трансформатор выполнен из отрезков коаксиальных линий, что позволяет получить фронт импульса не более 10 нс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В первой серии экспериментов, исследуемые катоды 1, 2 и 3 (см. табл. 1) последовательно помещались в ВЧ пушку. Для создания одинаковой начальной плотности плазмы импульсное напряжение $U_{упр.}$, подаваемое на электрод 3 (см. рис.1) на всех катодах, устанавливалось неизменным +3 кВ. При максимально возможной в условиях эксперимента питающей ВЧ мощности $\cong 940$ кВт, импульсный ток пучка был максимален (8,4 А) при использовании катода 1, т.е. катода с каналом минимальных размеров. При этой же ВЧ мощности импульсный ток пучка на выходе пушки с катодами 2 и 3 составлял соответственно 6,2 А и 5,2 А (табл. 2). При этом импульсный заряд в пучке при использовании катодов 1, 2 и 3 составил соответственно 505 нК, 560 нК и 625 нК соответственно. Временные характеристики пучка на выходе ВЧ пушки с различными катодами измерялись при близких по величине значениях импульсного тока, для чего устанавливался различный уровень питающей ВЧ мощности (см. табл. 2).

Таблица 2. Импульсный ток и заряд в пучке

Номер катода	1	2	3
$P_{ВЧ\text{ рез.}}$, кВт	940	940	940
$E_{рез.}$, МВ/м	47	47	47
$I_{п.}$, А	8,4	6,2	5,2
$Q_{имп.}$, нК	505	560	625

Типичные осциллограммы импульсов тока на выходе ВЧ пушки для различных катодов приведены на рис.2. Значение $t=0$ соответствует началу воздействия на катод управляющего импульсного напряжения.

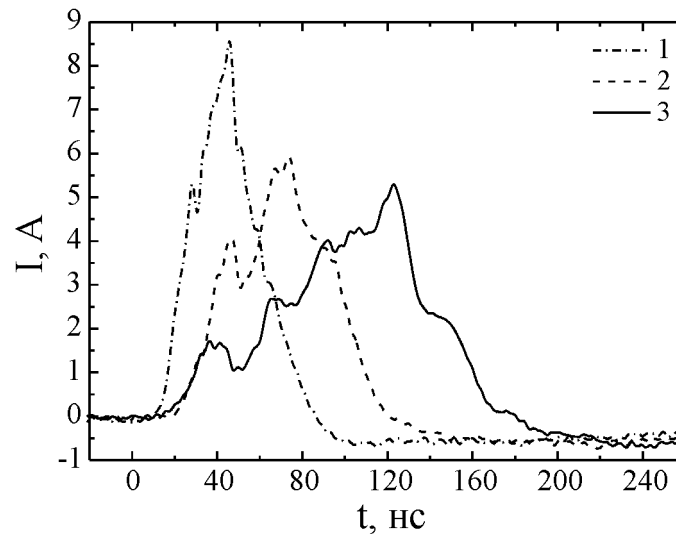


Рис. 2. Осциллограммы тока пучка на выходе ВЧ пушки с катодами конфигурации 1, 2 и 3.

Как следует из рис. 2, длительность фронта импульса тока пучка увеличивается с увеличением длины канала. Кроме того, на фронте импульса тока на выходе пушки наблюдаются осцилляции, которые наиболее выражены в случае катода 3 с наибольшей длиной канала (рис. 2, кривая 3). Было установлено, что в течение времени фронта импульса тока напряженность поля в резонаторе пушки практически не изменяется. Однако при достижении тока на выходе пушки максимального значения напряженность поля в резонаторе быстро (в пределах 10 нс) уменьшается практически до нуля и не восстанавливается до окончания действия импульса ВЧ мощности. Амплитуда импульса отраженной из резонатора ВЧ мощности в этот момент времени также быстро возрастает. Это свидетельствует о полном отражении ВЧ мощности от резонатора пушки, вызванном сдвигом рабочей частоты резонатора пушки вследствие проникновения в него плазмы.

Как следует из результатов измерений, величина импульсного тока пучка (рис. 3, кривая I) уменьшается при увеличении диаметра и длины канала и неизменной средней напряженности поля. Уменьшение импульсного тока свидетельствует о снижении плотности эмиссионного тока, происходящем в результате заполнения плазмой всего поперечного сечения канала увеличенного размера. В то же время вследствие большего времени нахождения плазмы в канале, импульсный заряд в пучке увеличивается (рис. 3, кривая Q).

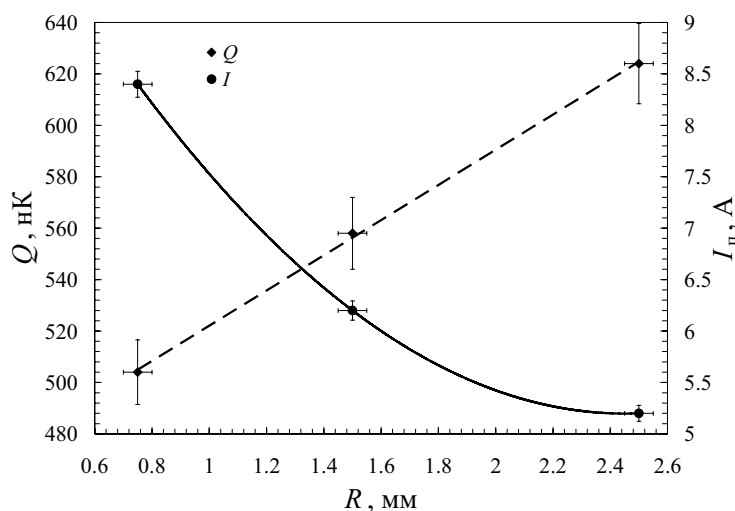


Рис. 3. Импульсный заряд и ток пучка в зависимости от радиуса канала катода.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные результаты могут быть объяснены следующим образом. Очевидно, что движение плазменного слоя в протяженном канале катода должно приводить к изменению параметров пучка на выходе ВЧ пушки в течение времени этого движения. Слой плазмы, обладая проводимостью близкой к идеальной (предполагается, что плотность плазмы существенно превышает критическое значение), образует виртуальный катод. Изменение его положения относительно торцевой стенки резонатора ВЧ пушки приводит к изменению распределения напряженности поля в канале катода и в прикатодной области резонатора. Поскольку время прохождения эмитирующего слоя плазмы в канале существенно больше периода высокочастотных колебаний, периодически могут реализовываться условия наилучшего формирования пучка в основной части резонатора. Это и приводит к наблюдаемому осцилляторному характеру нарастания импульса тока пучка на выходе пушки. Незначительное изменение напряженности ВЧ поля, а, следовательно, и малая расстройка резонатора пушки в течение фронта импульса тока свидетельствует о том, что плазма находится в канале катода и занимает малый объем. В момент максимального значения импульсного тока на выходе пушки происходит экстракция плазмы из канала в объем резонатора, изменение собственной частоты резонатора и диссипация энергии высокочастотного поля. На основании анализа результатов измерений была оценена скорость распространения плазмы в канале, которая для исследуемых катодов 1, 2 и 3 составила $(4 \pm 0,7) \cdot 10^6$ см/с. Это значение соответствует значению скорости распространения плазмы в вакууме, которое экспериментально было получено в импульсной сильноточной электронной пушке со взрывоэмиссионным катодом [11], а также в многочисленных экспериментах по исследованию плазмы искровых источников электронов [12, 13]. Это косвенно указывает на то, что состояние основного плазменного объема в канале катода (без учета взаимодействия плазмы со стенками канала) может быть охарактеризовано закономерностями, присущими для состояния плазмы в вакууме.

Аналогичные осцилляторные изменения тока, энергии и эмиттанса пучка были получены при моделировании динамики частиц в исследуемой пушке в зависимости от положения эмиттирующей поверхности в канале катода. Моделирование проводилось в приближении заданного поля (программа PARMELA [14]) и идеальности проводимости эмитирующего слоя плазмы (предполагается, что плотность плазмы в момент разряда $n_e \geq 10^{22}$ м⁻³). При этом полагалось, что при движении плазма занимает все поперечное сечение канала. Плотность тока эмиссии плазменного слоя для всех трех катодов рассчитывалась согласно зависимости [13]:

$$j = en_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \exp \left(\frac{\sqrt{e^3 E}}{kT_e} \right), \quad (1)$$

где e – заряд электрона, m_e – масса электрона; T_e – температура плазмы; n_e – электронная плотность плазмы; E – напряженность электрического поля; k – постоянная Больцмана. Это выражение справедливо для плазмы при условии, если распределение электронов в плазме подчиняется статистике Максвелла-Больцмана. Данное условие для искровых источников плазмы, к которым и относятся исследуемые катоды, выполняется, так как такие источники характеризуются значениями $n_e \leq 10^{22}$ м⁻³ и T_e более 10^4 К [15]. При этих значениях n_e и T_e потенциальная энергия электронов в плазме мала по сравнению с тепловой энергией, так что выполняется

условие $n_e V_D \gg 1$, где V_D - объем дебаевской сферы (в исследуемых катодах $V_D \sim 10^{-4} \text{ см}^3$). Поэтому плазма искровых источников по своему термодинамическому поведению близка к идеальному газу, а, следовательно, электроны плазмы подчиняются статистике Максвелла-Больцмана. Для принятого значения напряженности поля и для электронной температуры плазмы катода $\sim 4 \text{ эВ}$ значение экспоненциальной функции в выражении (1) близко к единице и может не учитываться при расчете плотности тока в данном случае.

В результате моделирования при средней напряженности поля в резонаторе 30 МВ/м получены зависимости тока пучка (рис. 4 а), энергии частиц (рис. 4 б) и эмиттанса (рис. 4 с) на выходе ВЧ пушки от продольной координаты положения плоскости эмиссии в каналах катодах 1, 2 и 3. Координата $Z=0 \text{ см}$ в этих зависимостях соответствует положению плоскости формирующего электрода, обращенной внутрь резонатора.

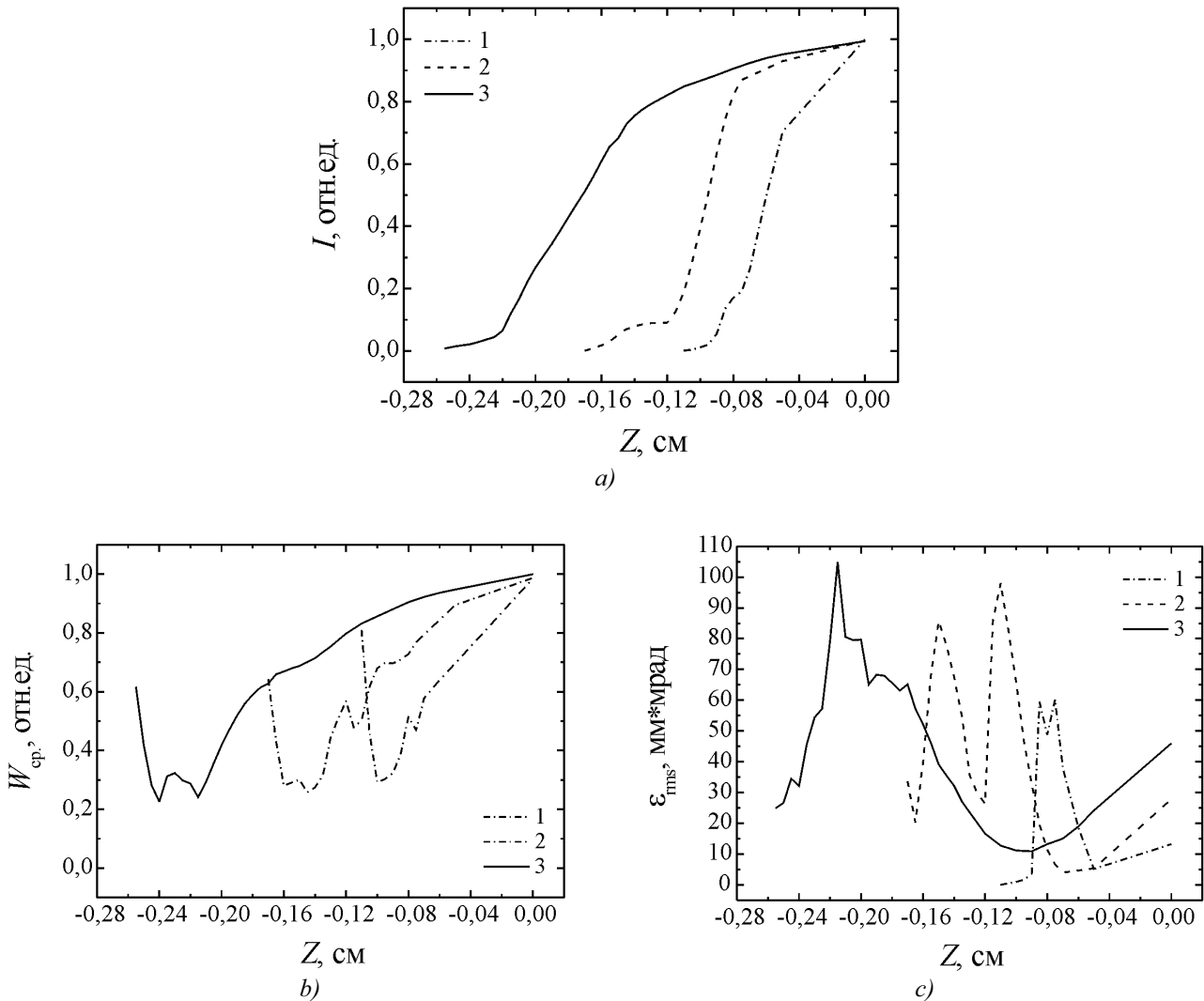


Рис. 4. Параметры пучка на выходе ВЧ пушки с катодами 1, 2 и 3:
а - ток, б – энергия, с - эмиттанс.

Из результатов моделирования следует, что в течение времени распространения плазмы в канале происходят значительные изменения амплитуды, энергии и пространственных характеристик частиц пучка на выходе пушки. Изменения энергии и эмиттанса пучка имеют осцилляторный характер. На определенном интервале длины каждого канала плазменного катода происходит быстрое по сравнению с временем распространения плазмы в канале увеличение, а затем такое же быстрое уменьшение энергии частиц в пучке (рис. 4 б). Эти изменения энергии связаны с изменениями фазы инжекции частиц из плазменного слоя в ускоряющее электрическое поле резонатора пушки. Количество осцилляций уменьшается при уменьшении протяженности канала плазменного катода. Этот результат моделирования качественно соответствует результатам, полученным экспериментально.

Как следует из рис. 4 с, с уменьшением диаметра канала интегральный по импульсу эмиттанс пучка уменьшается. Для принятого по результатам расчета тока эмиссии 30 А это уменьшение не зависит от увеличения влияния объемного заряда вследствие увеличения плотности тока и связано, прежде всего, с уменьшением начального геометрического эмиттанса.

ВЫВОДЫ

Исследования проявили характер влияния конфигурации каналов эмиссии в плазменном катоде на параметры пучка ВЧ пушки.

В плазменном катоде увеличение диаметра канала эмиссии и, соответственно, длины канала не приводит к увеличению импульсного тока, но позволяет увеличить импульсный заряд. В то же время, пучок в этом случае характеризуется значительными внутриимпульсными изменениями параметров.

Время прохождения эмитирующего слоя плазмы по каналу катода определяет длительность фронта импульса тока на выходе пушки. Для формирования импульсного пучка малой длительности с минимальными внутриимпульсными изменениями параметров целесообразно использовать ферроэлектрический плазменный катод с каналом эмиссии минимальных размеров. В этом случае при выборе размеров канала необходимо учитывать ограничивающее действие сил объемного заряда [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Travier C. RF Guns: A Review // Preprint RT 98-13. Laboratoire de l'Accelérateur Linéaire; Orsay cedex (France), 1990.
2. Кушнір В.А. Высокочастотные источники электронов для линейных резонансных ускорителей // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. -2001. -№12. -С. 19-34.
3. Wang X.J., Tsang T., Kirk H. et al. Intense electron emission due to picoseconds laser-produced plasmas in high gradient electric field // J.Appl.Phys. -1992. -V. 72(3). -P. 888-894.
4. Travier C., Boy L., Cayla J.N. et al. CANDELA photo-injector experimental results. (electronic preprint <http://arxiv.org/abs/acc-phys/9411003>).
5. Айзацкий Н.И., Биллер Е.З., Борискин В.Н. и др. Электронный резонансный сильноточный ускоритель для исследования коллективных методов ускорения // Физика плазмы. -1994. -Т. 20, №7,8. -С. 671-673.
6. Месяц Г.А. О природе электронной эмиссии из ферроэлектрической керамики // Письма в ЖТФ. -1994. -№20. -С. 17-19.
7. Rosenman G., Shur D., Krasik Ya. E. and Dunaevsky A. Electron emission from ferroelectrics // J.Appl.Phys. -2000. -V. 88. -P. 6109-6161.
8. Khodak I.V., Kushnir V.A. RF gun with ferroelectric cathode // NIM A. -2006. -V. 562(2). -P. 662-665.
9. Кушнір В.А., Митроченко В.В. Исследование динамики электронов в высокочастотных пушках // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования. -2000. -№3(29,30). -С. 96-98.
10. Белоглазов В.И., Вишняков В.А., Гришаев И.А. и др. Использование клистронного автогенератора на двухсекционном ускорителе // Вопросы атомной науки и техники, Сер.: Линейные ускорители. -1976. -№1(2). -С. 18-19.
11. Закутин В.В., Насонов Н.Н., Шендерович А.М. Получение пилообразного импульса тока пучка в сильноточной электронной пушке // ПТЭ. -1975. -№2. -С. 25-27.
12. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. -М.: «Сов. радио», 1974. -256 с.
13. Месяц Г.А. Эктоны. - Екатеринбург: Наука, 1994. - Часть 1.-243 с.
14. Young L.M. PARMELA. Los Alamos: 1996. 93с. (preprint / Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835).
15. Геккер И.Р. Взаимодействие сильных электромагнитных полей с плазмой. -М.: Атомиздат, 1978. -312 с.

FEATURES OF ELECTRON BEAM FORMATION IN RF GUN WITH PLASMA FERROELECTRIC CATHODE

I.V. Khodak, V.A. Kushnir

NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology", Akademicheskaya St. 1, 61108, Kharkov, Ukraine
E-mail: khiv@kipt.kharkov.ua

Electron beams with a charge over 10^2 nC in a pulse of $\sim 10^{-8}$ s duration can be produced in RF guns. It is possible upon the condition that an electron emitter has emission current density over 10^2 A/cm². One of electron sources that are able to provide sufficient emission current density is a plasma ferroelectric cathode. Such cathodes are widely used in electron beam sources with pulsed accelerating voltage. Features of shaping of electron beams with pulse charge $\sim 10^2$ nC in RF guns with such cathodes are bounded with features of plasma interaction with RF field of $\sim 10^7$ V/m strength. The subject of the research in the present paper is the beam parameters obtained through the effect of plasma cathode configuration on its emitting surface formation. The most of the research is carried out experimentally. The estimation and analysis of the experimental results has been carried out using computer simulation. There are also analyzed the results of experimental study of plasma behavior on the surface of the plasma ferroelectric cathode of special design for application in RF gun.

KEY WORDS: RF gun, ferroelectric, plasma cathode, space charge, pulse current, particle dynamics.