

Краткие сообщения

09;10;11;12

Получение мощных электронных пучков в магнетронных пушках с холодными вторично-эмиссионными катодами

© А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, Ю.Я. Волколупов, М.А. Красногоровец

Научно-исследовательский комплекс „Ускоритель“
 Национальный научный центр „Харьковский физико-технический институт“,
 61108 Харьков, Украина
 e-mail: dovbnya@nik.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 12 марта 2002 г.)

Приводятся результаты исследований генерации мощных электронных пучков в одиночной и системе инжекционных магнетронных пушек с холодными вторично-эмиссионными катодами. Получены трубчатые электронные пучки с током 50...100 А, энергией частиц 30...100 кВ и импульсной мощностью 1...5 МВт. Такие пучки могут быть использованы как источники электронов в ускорительной технике и при создании мощных СВЧ приборов обычного и многолучевого типов.

Введение

В последние годы широкий интерес вызывает исследование магнетронных инжекционных пушек с холодными катодами, обычного [1–6] и обращенного [6,7] типов, работающих в режиме вторичной эмиссии. Интерес к таким источникам связан с рядом преимуществ (большое время жизни, высокая плотность тока, относительная простота конструкции, получение трубчатых пучков и т.д.), которые дают возможность использования таких пушек в ускорительной технике, при создании мощных долговечных СВЧ источников [3], быстродействующей высоковольтной техники [8]. Принцип действия магнетронных инжекционных пушек с холодными вторично-эмиссионными катодами основан на обратной бомбардировке катода (коэффициент вторичной эмиссии материала катода больше единицы) первичными электронами, которые, двигаясь в спадающем электрическом поле, увеличивают свою энергию (первичные электроны могут образовываться за счет автоэмиссии, эмиссии с диэлектрических вкраплений на поверхности катода или эмиссии с дополнительного термокатода [6,9]). При этом происходит процесс вторично-эмиссионного размножения с лавинным нарастанием плотности электронов; образование электронного слоя вблизи катода; формирование и вывод электронного пучка из пушки. Процесс вторично-эмиссионного размножения в начальной стадии образования электронного слоя обусловлен набором энергии электронами за счет спада электрического поля за время движения электрона по участку циклоиды, а после накопления электронов на стационарной стадии — за счет электрических полей, возникающих при колебаниях плотности пространственного заряда. Представляет интерес исследование процессов стабильной генерации электронных пучков в магнетронных инжекционных пушках с холодными вторично-эмиссионными

катодами при большой импульсной мощности. Настоящая работа посвящена исследованиям по получению мощных электронных пучков в одиночной и системе магнетронных пушек, изучению зависимости тока пучка от величины электрических и магнитных полей, а также измерениям поперечных размеров пучков.

Экспериментальная установка и методика исследования

Эксперименты по получению мощных электронных пучков в магнетронных пушках с вторично-эмиссионными катодами проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Магнетронная пушка питалась от модулятора 1, формирующего импульс напряжения с амплитудой 4...200 кВ, длительностью $\sim 4 \mu\text{s}$ и частотой следования 10...50 Гц. Импульс отрицательной полярности (с выбросом на вершине и плоской ее частью) подавался на медный катод 5, а анод 6 (из нержавеющей стали или меди) заземлен через

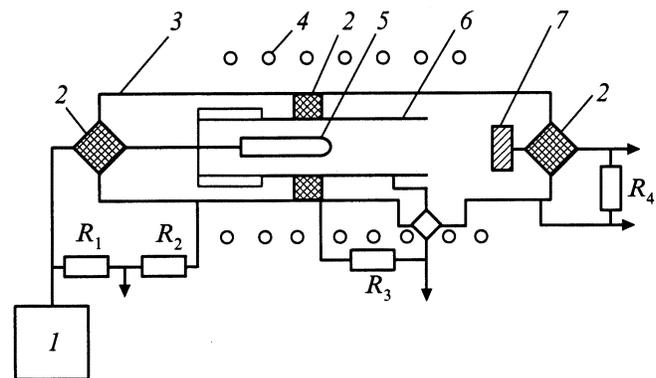


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

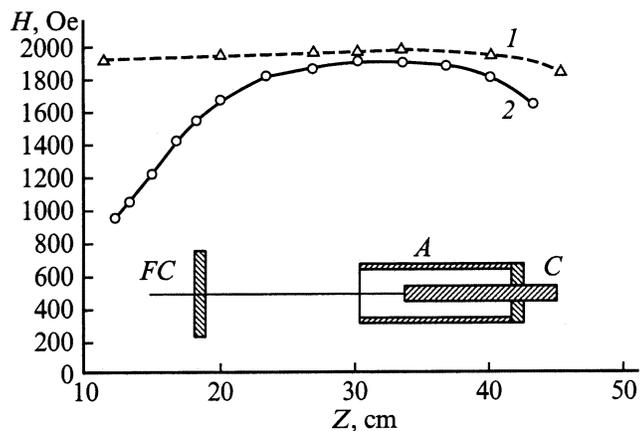


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль оси соленоида и расположение пушки (*A* — анод, *C* — катод) и цилиндра Фарадея (*FC*). *1* — импульсное магнитное поле, *2* — постоянное магнитное поле.

резистор R_3 . Запуск вторично-эмиссионного процесса происходил в спадающем электрическом поле, которое создается спадом (длительностью $0.6 \mu\text{s}$ и крутизной спада $50 \dots 100 \text{ kV}/\mu\text{s}$) специально сформированного выброса на вершине импульса катодного напряжения [4]. Магнитное поле создавалось соленоидом 4. Измерение тока пучка производилось с помощью цилиндра Фарадея 7 и резистора R_4 ; напряжения на катоде — с помощью делителя R_1R_2 ; измерения анодного тока — с помощью резистора R_3 ; размеров пучка — с помощью отпечатка на рентгеновской пленке и на молибденовой фольге, расположенных на цилиндре Фарадея. Магнетронная пушка размещалась в вакуумной камере 3 из нержавеющей стали, в которой поддерживалось разрежение $\sim 10^{-6}$ Торг, и была изолирована от нее изоляторами 2.

В экспериментах по получению мощных электронных пучков для генерации пучка и его транспортировки использовались два метода создания магнитных полей: импульсный разряд конденсатора через соленоид [10] и питание соленоида постоянным током [11]. На рис. 2 приведено распределение напряженности магнитного поля вдоль оси соленоида для этих двух случаев и показано расположение магнетронной пушки и цилиндра Фарадея.

В первом случае (рис. 2, кривая *1*) могут быть получены высокая однородность поля вдоль оси соленоида ($\pm 5\%$) и значительная его величина (до $5000 \dots 6000$ Ое). При этом необходимо учитывать затухание импульсного поля при его диффузии через стенки резонаторов и вакуумной камеры, что может изменять продольное распределение импульсного магнитного поля (см., например, [9,12]). Частота повторения импульсов магнитного поля ограничена выбором накопительной емкости и коммутатора. При работе магнетронной пушки с низкой частотой посылок за

время между высоковольтными импульсами происходит загрязнение поверхности катода примесями, которые под действием электронной бомбардировки выходят в промежуток анод–катод, что может приводить к вакуумному пробоям промежутка [9].

Во втором случае для создания постоянного магнитного поля значительной величины при пропускании тока через соленоид требуется большая мощность питания и водяное охлаждение. При этом величина магнитного поля ограничивается нагревом соленоида, а распределение магнитного поля вдоль оси соленоида имеет худшую однородность (рис. 2, кривая *2*). Необходимо также учитывать пульсацию тока в соленоиде, что требует „привязки“ импульсов запуска модулятора к частоте питающей сети.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

1) Получение мощных пучков в одиночных магнетронных пушках. Получение мощных пучков в одиночных магнетронных пушках возможно при значительных диаметрах катода. Это связано с тем, что увеличение тока пучка и, следовательно, мощности в пучке обусловлено повышением напряжения между катодом и анодом пушки, а увеличение напряжения ограничивается развитием пробоя между этими электродами. При увеличении диаметра катода уменьшается напряженность электрического поля на катоде и, следовательно, вероятность пробоя, что позволяет использовать более высокие напряжения. Исследования проводились с магнетронными пушками с диаметрами катодов $40 \dots 80$ мм и диаметрами анодов $50 \dots 140$ мм, амплитуда напряжения изменялась от 20 до 120 кВ.

В одиночной магнетронной пушке с диаметром катода 40 мм и анода диаметром 78 мм, длиной ~ 100 мм при амплитуде импульса напряжения 100 кВ (здесь и ниже указана амплитуда плоской части вершины) получен режим устойчивой генерации пучка с током около 50 А, что соответствовало микропервансу ~ 1.6 и мощности в пучке ~ 5 МВт. Магнитное поле составляло в этом случае ~ 1800 Ое. На рис. 3 приведена зависимость тока пучка на цилиндре Фарадея от амплитуды импульса катодного напряжения. Как следует из рисунка, ток пучка подчиняется закону $3/2$. При этом в процессе измерений каждому фиксированному значению напряжения соответствовало оптимальное значение магнитного поля, при котором амплитуда тока пучка была максимальной. Измерения показали, что эта пушка надежно выдерживает напряжение 120 кВ, что позволит получить мощность в электронном пучке до 8 МВт. В процессе исследований измерялся ток электронов на анод. Величина анодного тока составляла $1 \dots 10\%$ тока в пучке в зависимости от условий эксперимента.

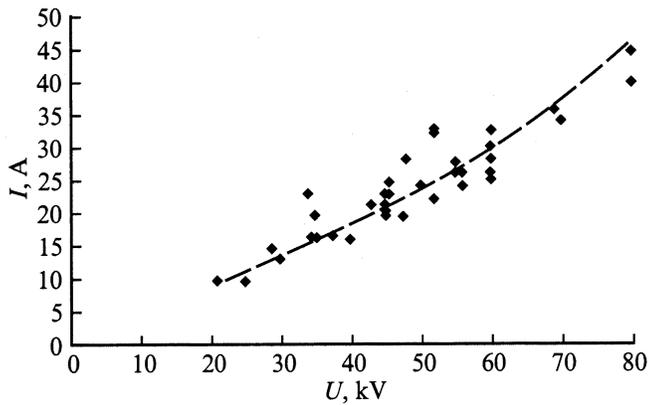


Рис. 3. Зависимость тока пучка на цилиндре Фарадея от амплитуды напряжения на катоде. Штриховая линия — расчет по закону $3/2$.

Было проведено также исследование параметров пучка в зависимости от электрического и магнитного полей. При значениях амплитуды напряжения на катоде выше или ниже оптимальной (при фиксированном магнитном поле) нарушаются условия вторично-эмиссионного размножения, что приводит к срыву вторично-эмиссионного процесса. При формировании импульса напряжения с синусоидальной модуляцией его вершины на выходе пушки наблюдаются сгустки электронов, расположенные по времени в тех местах, где синусоида имеет спад (принудительная модуляция [4]). Исследование зависимости тока пучка от величины магнитного поля показало, что при увеличении магнитного поля (при постоянной амплитуде напряжения на катоде) амплитуда тока пучка на цилиндре Фарадея имеет резкий рост, плоское плато и резкий спад. Такой характер зависимости связан с изменением траекторий и условиями набора энергии электронами в промежутке анод–катод при увеличении магнитного поля. При изменении амплитуды магнитного поля импульс тока пучка изменялся. Так, при напряжении на катоде пушки 55 кВ и магнитном поле 700 Ое импульс тока пучка приобретает пиковый характер с амплитудным значением тока ~ 30 А и с длительностью пиков 10...30 нс. При увеличении магнитного поля до ~ 1200 Ое импульс тока электронного пучка имеет плоскую вершину.

При исследовании магнетронной пушки с медным катодом диаметром 40 мм и анодом из нержавеющей стали диаметром 50 мм и длиной ~ 100 мм при напряжении 30 кВ и магнитном поле 2200 Ое получен ток пучка 50 А, что соответствовало микропервансу ~ 10 и импульсной мощности в пучке ~ 1.5 МВт.

Следует отметить, что в работе [6] одиночная магнетронная пушка, изготовленная из материалов ВеСu (катод) и нержавеющей стали (анод), обычного (диаметр катода 50 мм, диаметр анода 60 мм) и обращенного типов (диаметр катода 54 мм, диаметр анода 43 мм) генерировала ток пучка ~ 100 А при напряжении 40 кВ

и магнитном поле ~ 1800 Ое. Это соответствовало мощности в пучке ~ 4 МВт и микропервансу ~ 12 , что согласуется с приведенными выше результатами.

2) Получение многолучевых электронных пучков в системе магнетронных пушек. Другой путь увеличения мощности в пучке состоит в использовании системы, состоящей из нескольких магнетронных инжекционных пушек, включенных параллельно. При этом ток пучка, мощность, микроперванс и размеры пучка каждой пушки невелики, но суммарный ток и мощность пучка системы имеют значительную величину.

При формировании стабильных электронных пучков с помощью системы параллельно включенных магнетронных пушек с вторично-эмиссионными катодами могут возникать трудности, подобные тем, какие возникают при параллельном включении коммутаторов. Это связано с тем, что при возникновении генерации пучка или пробое в одной из пушек амплитуда напряжения на катодах других пушек снижается, что может приводить к отсутствию генерации или нестабильности пучка в них. Оценки показывают, что в реальных системах уменьшение напряжения на катодах остальных пушек, связанное с наличием паразитных индуктивностей и емкостей, происходит за время, равное нескольким наносекундам. В работе [13] показано, что время формирования электронного слоя в магнетронных пушках с вторично-эмиссионными катодами, а следовательно, и время нарастания импульса тока пучка могут составлять 2 нс (при запуске процесса вторично-эмиссионного размножения наносекундным спадом импульса напряжения с крутизной спада более 300 кВ/мкс). Таким образом, возможно образование электронного слоя и генерация пучка в системе пушек даже при пробое в одной из них. Уменьшение амплитуды питающего импульса при генерации пучка при использовании для питания пушек модулятора с низким выходным сопротивлением составляет малую величину (в наших экспериментах менее 20% при выходном сопротивлении модулятора 2000 Ω). Авторами показано, что генерация пучка сохраняется (при фиксированном магнитном поле) при изменении напряжения на катоде на 30%, что больше указанной величины. Это говорит о том, что трудности, возникающие при генерации электронного пучка в системе магнетронных пушек, могут быть преодолены.

В системе магнетронных пушек возможно также снижение электрической прочности за счет увеличения общей площади электродов (пробивное напряжение обратно пропорционально $S^{0.1}$, где S — площадь электродов). В системе из большого числа пушек (8 и более) это снижение пробивного напряжения составляет ~ 15 –20%. Эксперименты показали, что в системе из 8 пушек с диаметрами катодов 5 мм и анодов 22 мм пробивное напряжение уменьшилось примерно на 30% (с 70 кВ до 50 кВ) по сравнению с одиночной пушкой с такими же диаметрами катода и анода. Следует отметить, что такое снижение пробивного напряжения связано не только

с указанным эффектом, но и с некоторой несимметрией пушки при сборке, вакуумными условиями и другими факторами.

Эксперименты по получению мощных пучков проводились с системой, состоящей из 6 и 8 магнетронных пушек. Катоды и аноды пушек были изготовлены из меди, длина пушки составляла ~ 100 mm.

В первом случае система генерировала 6 электронных пучков, все пушки располагались на окружности диаметром ~ 60 mm с диаметрами катода 5 mm и диаметрами анода 26 mm. При напряжении на катоде ~ 40 kV и напряженности магнитного поля ~ 2000 Oe каждая пушка генерирует ток пучка 18 A с микропервеансом ~ 2.5 . Суммарный ток пучка всей системы составлял ~ 100 A с мощностью в пучке ~ 4 MW.

Во втором случае система генерировала 8 пучков, пушки располагались на окружности диаметром ~ 70 mm и диаметрами катода 5 mm и диаметрами анода 22 mm. При напряжении на катоде ~ 30 kV и напряженности магнитного поля ~ 2000 Oe суммарный ток пучка всей системы составлял ~ 60 A с мощностью в пучке ~ 2 MW, при этом микропервеанс пучка составлял ~ 2 .

3) Измерение размеров пучков. Транспортировка пучков магнетронных пушек с вторично-эмиссионными катодами осуществлялась на расстоянии 50...100 mm от среза анода. Измерение поперечных размеров пучков магнетронных пушек показало, что пучки в поперечном сечении имеют вид колец с равномерным распределением интенсивности по азимуту, с внутренним диаметром, примерно равным диаметру катода, и толщиной „стенки“ $\sim 1 \dots 2$ mm.

Поперечные размеры пучка одиночной магнетронной пушки при диаметре катода 40 mm и анода 70 mm составляли: наружный диаметр пучка 45 mm, внутренний — 41 mm. Для магнетронного диода с диаметром катода 80 mm и анода 140 mm обнаружено, что при нахождении катода в неоднородном электрическом поле в поперечном направлении около 5% след пучка в азимутальном направлении имел область с четким отпечатком и область с размытым широким отпечатком, при увеличении неоднородности поля наблюдался разрыв пучка по азимуту (длиной около 20 mm). Эти результаты указывают на жесткие требования к соосности электродов пушки.

При измерении поперечных размеров пучков многолучевой магнетронной пушки обнаружено, что пучки каждой магнетронной пушки расположены равномерно по окружности заданного радиуса (60 mm или 70 mm) и размеры каждого пучка соответствуют размерам пучка одиночной пушки (наружный диаметр пучка составляет ~ 9 mm, внутренний ~ 5 mm) с равномерным распределением интенсивности по азимуту.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показывают возможность получения электронных пучков значительной мощности в магнетронных пушках с холодными вторично-эмиссионными катодами. Исследованы зависимости тока пучка от величины электрических и магнитных полей, рассмотрены вопросы генерации пучка и электрической прочности в системе магнетронных пушек.

Список литературы

- [1] Skowron J.F. // Proc. IEEE. 1973. Vol. 61. N 3. P. 69–101.
- [2] Черенищев С.А. // Электронная техника. Сер. 1. 1973. № 6. С. 20–28.
- [3] Dovbnya A.N., Zakutin V.V., Zhiglo V.F. et al. // Proc. Fifth Epac / Ed S. Myers, A. Pacheco, R. Pascual et al. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1996. Vol. 2. P. 1508–1509.
- [4] Dovbnya A.N., Mitrochenko V.V., Zakutin V.V. et al. // Proc. 1997. Pac / Ed. M. Comyn, M.K. Craddock, M. Reiser, J. Thomson. Vancouver, 1997. Vol. 3. P. 2820–2822.
- [5] Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М. // ВАНТ, Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. 2, 3 (29, 30). Т. 1. С. 134–140.
- [6] Saveliev Y.M., Sibbett W., Parkes D.M. // Physics of Plasmas. 1997. Vol. 4. N 7. July. P. 2319–2321.
- [7] Чурюмов Г.И. // Радиоэлектроника. 1997. № 7. С. 77–80.
- [8] Вишневский А.И., Солдатенко А.И., Шендаков А.И. // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1968. Т. 11. № 6. С. 555–564.
- [9] Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г. и др. // ВАНТ, Сер. ЯФИ. 1997. № 1. (28). С. 53–58.
- [10] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 390 с.
- [11] Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. 543 с.
- [12] Закутин В.В., Шендерович А.М. // ПТЭ. 1976. № 5. С. 238.
- [13] Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Митроченко В.В. и др. // ВАНТ, Сер. ЯФИ (34). 1999. № 3. С. 38–40.