

10;11;12

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

© В.В. Закутин, А.Н. Довбня, Н.Г. Решетняк, Ю.Я. Волколупов, М.А. Красноголовец

Научно-исследовательский комплекс "Ускоритель"  
Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",  
61108 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 13 марта 2000 г.)

Приведены исследования мощных электронных пучков в магнетронных инжекторах на основе холодных вторично-эмиссионных катодов. Получен устойчивый процесс генерации электронного пучка мощностью до 8 MW.

### Введение

В последние годы широкий интерес вызывает исследование магнетронных пушек с холодными катодами обычного [1–6] и обращенного [6,7] типов, работающих в режиме вторичной эмиссии в скрещенных электрических и магнитных полях. 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 магнетронных пушек с холодными вторично-эмиссионными катодами при создании мощных долговечных СВЧ-источников [3] и быстродействующей высоковольтной техники [8]. Применение магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами в СВЧ приборах, например в клистронах, связано с возможностью получения мощных электронных пучков, что необходимо для достижения большой импульсной мощности СВЧ-колебаний.

### Экспериментальная установка

Эксперименты по получению мощных электронных пучков в магнетронных пушках с вторичноэмиссионными катодами проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Магнетронная пушка питалась от модулятора 1, формирующего импульс напряжения с амплитудой 4 ... 100 kV, длительностью 2 ... 10  $\mu$ s и частотой следования 10 ... 50 Hz. Импульс отрицательной полярности  $U_k$  подавался на медный катод 5, а анод 6 (из нержавеющей стали или меди) заземлен через резистор  $R_3$ . Запуск вторично-эмиссионного процесса производился двумя способами: на спаде специально сформированного выброса на импульсе катодного напряжения или на спаде импульса внешнего генератора 2. Магнитное поле для генерации и транспортировки пучка создавалось соленоидом 4. Измерение тока пучка производилось с помощью цилиндра Фарадея 7 и резистора  $R_4$ , напряжения на катоде — с помощью делителя  $R_1R_2$ , размеров пучка — с помощью отпечатка на рентгеновской пленке и на молибденовой фольге. Магнетронная пушка

размещалась в вакуумной камере 3 из нержавеющей стали, в которой поддерживалось разрежение  $\sim 10^{-6}$  Torr.

В экспериментах по получению мощных электронных пучков для создания магнитных полей для генерации пучка и его транспортировки использовались два метода: импульсный разряд конденсатора через соленоид [9] и питание постоянным током соленоида с водяным охлаждением [10]. На рис. 2 приведено распределение напряженности магнитного поля вдоль оси соленоида для этих двух случаев и показано расположение магнетронного диода 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 ... 6000 Oe). Такой метод можно использовать как для получения пучка в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом, так и для транспортировки электронного пучка в резонансной системе СВЧ прибора. Частота повторения импульсов магнитного поля ограничена выбором накопительной емкости и коммутатора. Кроме того, необходимо учитывать затухание импульсного магнитного поля при его диффузии через стенки резонаторов и вакуумной камеры, что может изменять продольное распределение импульсного магнитного поля (см., например, [9,11]). При работе магнетронной пушки с низкой частотой посылок за время между высоковольтными импульсами поверхность катода загрязняется примесями, которые под действием электронной бомбардировки выходят в промежуток анод–катод. Это может приводить к вакуумному пробою промежутка [12].

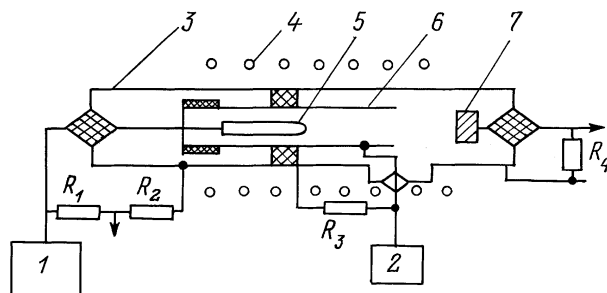


Рис. 1.

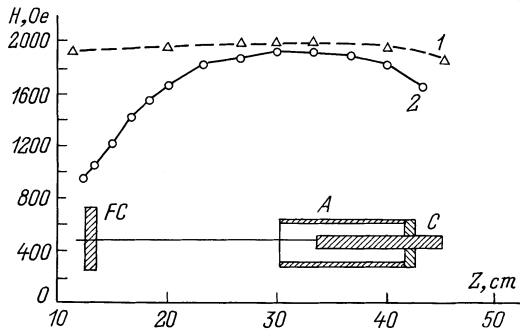


Рис. 2.

Во втором случае для создания постоянного магнитного поля при пропускании тока через соленоид требуются 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 учитывать также пульсации тока в катушках, что требует "привязки" импульсов запуска модулятора к частоте сети.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

Проведены экспериментальные исследования по получению больших мощностей в электронном пучке магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами. Исследована магнетронная пушка с медным катодом диаметром 40 мм и анодом из нержавеющей стали диаметром 78 мм и длиной ~ 100 мм. Запуск вторично-эмиссионного процесса происходил на спаде выброса (амплитудой до 160 кВ) на импульсе катодного напряжения. 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. При напряжении

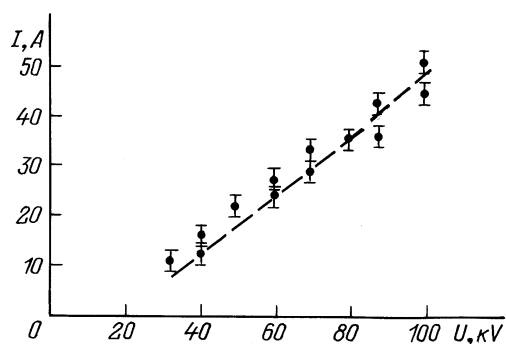


Рис. 3.

100 кВ получен режим устойчивой генерации пучка с током около 50 А, что соответствовало микропервеансу ~ 1.6 и мощности в пучке ~ 5 МВ. Магнитное поле составляло в этом случае ~ 1600 Ое. Измерения показали, что эта пушка надежно выдерживает напряжение 120 кВ, что позволит получить мощность в электронном пучке до 8 МВ.

Магнетронная пушка с медным катодом диаметром 40 мм и анода из нержавеющей стали диаметром 50 мм и длиной ~ 100 мм при напряжении 30 кВ и магнитном поле 2200 Ое генерировала ток пучка 50 А, что соответствовало микропервеансу ~ 10 и мощности в пучке ~ 1.5 МВ.

Аналогичные результаты получены в работе [6]. В этой работе магнетронная пушка изготовлена из материалов ВeCu и нержавеющей стали, обычного (диаметр катода 50 мм, диаметр анода 60 мм) и обращенного типов (диаметр катода 54 мм, диаметр анода 43 мм). Получен ток пучка ~ 100 А при напряжении 40 кВ и магнитном поле ~ 1800 Ое. Это соответствовало мощности в пучке ~ 4 МВ и микропервеансу ~ 12.

Как видно из приведенных результатов, магнетронные пушки с вторично-эмиссионными катодами позволяют получать значительные мощности в электронном пучке. Однако значительный микропервеанс и наружный диаметр пучка (который составляет в различных экспериментах 45 ... 55 мм) могут создать трудности при их использовании в СВЧ приборах.

Другой путь увеличения мощности в пучке состоит в использовании системы, состоящей из нескольких (6 и более) магнетронных пушек, включенных параллельно. При этом ток пучка, мощность, микропервеанс и размеры пучка каждой пушки невелики, но суммарный ток и мощность пучка системы имеют большую величину.

При создании системы параллельно включенных магнетронных пушек с вторично-эмиссионными катодами могут возникать трудности, такие же как и при параллельном включении коммутаторов. Это связано с тем, что при возникновении генерации пучка в одной из пушек амплитуда напряжения на катодах других пушек уменьшается, что может приводить к отсутствию генерации пучка в них. Возможно также снижение электрической прочности системы за счет увеличения общей площади электродов (пробивное напряжение обратно пропорционально  $S^{0.1}$ , где  $S$  — площадь электродов). Однако при создании системы из большого числа пушек (~ 6 и более) снижение электрической прочности невелико (~ 10–20%), а при использовании для их питания низкоомного модулятора уменьшение амплитуды составляет малую величину (в наших экспериментах менее 30% при выходном сопротивлении модулятора 2000  $\Omega$ ). В работе [13] показано, что генерация пучка сохраняется при изменении напряжения на катоде на 40%, что больше указанной величины. С другой стороны, оценки показывают, что напряжение на катодах пушек уменьшается через время, равное нескольким наносекундам. В работе [14] показано, что время формирования

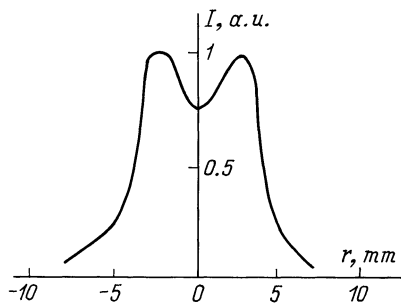


Рис. 4.

электронного слоя в магнетронных пушках с вторично-эмиссионными катодами, а следовательно и время нарастания импульса тока пучка, может быть уменьшено до 2 ns. Таким образом, проблемы, связанные с генерацией электронного пучка в системе магнетронных пушек, могут быть преодолены.

Эксперименты проводились с системой, состоящей из 6 и 8 магнетронных пушек. В первом случае система генерировала 6 пучков, все пушки располагались на окружности диаметром  $\sim 60$  mm с диаметром катода 5 mm и диаметрами анода 26 mm. Наружный диаметр пучка составляет  $\sim 9$  mm. При напряжении на катоде  $\sim 40$  kV и напряженности магнитного поля  $\sim 2000$  Oe каждая пушка генерирует ток пучка 18 A с микропервеансом  $\sim 2.5$ . Суммарный ток пучка всей системы составлял  $\sim 100$  A с мощностью в пучке  $\sim 4$  MW.

Во втором случае система генерировала 8 пучков, пушки располагались на окружности диаметром  $\sim 70$  mm с диаметрами катода 5 mm и диаметрами анода 22 mm. Наружный диаметр пучка также составляет  $\sim 9$  mm. При напряжении на катоде  $\sim 30$  kV и напряженности магнитного поля  $\sim 2000$  Oe суммарный ток пучка всей системы составлял  $\sim 60$  A с мощностью в пучке  $\sim 2$  MW, при этом микропервеанс каждого пучка составлял  $\sim 2$ . В настоящее время проводятся исследования, направленные на получение мощности в пучке такой системы, достигающей 10 MW.

Транспортировка пучка магнетронной пушки с вторично-эмиссионным катодом осуществлялась импульсным магнитным полем (рис. 2, кривая 1) на расстояние 50...100 mm от среза анода. Транспортировка пучка постоянным магнитным полем (рис. 2, кривая 2) производилась на расстояние 50 и 180 mm от среза анода. При измерении поперечных размеров пучка на коллекторе было обнаружено, что в обоих случаях пучки в поперечном сечении имеют вид колец с равномерным распределением интенсивности по азимуту, с внутренним диаметром, примерно равным диаметру катода, и толщиной "стенки" 1...1.3 mm. На рис. 4 показано радиальное распределение интенсивности электронов на выходе пушки на расстоянии от среза анода 50 mm при диаметре катода 5 mm и диаметре анода 26 mm. Видно, что наружный диаметр пучка не превышает 10 mm. При этом, как следует из кривой 2 на рис. 2, магнитное

поле вблизи расположения рентгеновской пленки уменьшалось примерно в 1.8 раз по сравнению с полем, в области которого находится магнетронная пушка. Однако размеры пучка во всех этих случаях практически одинаковы. Приведенные результаты указывают на то, что электронный пучок достаточно сильно "замагничен" и спадающее магнитное поле не приводит к расплыванию пучка. Это может быть использовано как для транспортировки электронного пучка, так и при инжекции электронного пучка из магнетронной пушки в другие системы.

## Заключение

Проведенные исследования показывают, что использование одиночных магнетронных пушек и системы магнетронных пушек позволяет получать значительные мощности в электронном пучке, что дает возможность применения магнетронных пушек с вторично-эмиссионными катодами в качестве источников электронов в мощных СВЧ приборах.

## 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] Dobbnya A.N., Zakutin V.V., Zhiglo V.F. et al. // Proc. The 5<sup>th</sup> Epac/ Ed. S. Myers, A. Pacheco, R. Pascual et al. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996. Vol. 2. P. 1508–1509.
- [4] Dobbnya A.N., Mitrochenko V.V. et al. // Proc. The 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. Вып. 2,3 (29,30). Т. 1. С. 134–140.
- [6] Saveliev Y.M., Sibbett W., Parkes D.M. // Physics of Plasmas. Vol. 4. N 7 (July). 1997. P. 2319–2321.
- [7] Чурюмов Г.И. // Радиоэлектроника. 1997. № 7. С. 77–80.
- [8] Вишневецкий А.И., Солдатенко А.И., Шендаков А.И. // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1968. Т. 11. № 6. С. 555–564.
- [9] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 390 с.
- [10] Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. 543 с.
- [11] Закутин В.В., Шендерович А.М. // ПТЭ. 1976. № 5. С. 238.
- [12] Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г. и др. // ВАНТ. Сер. ЯФИ. 1997. № 1 (28). С. 53–58.
- [13] Волколупов Ю.Я., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 000.
- [14] Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Митrochenko В.В. и др. // ВАНТ. Сер. ЯФИ (34). 1999. № 3. С. 38–40.