

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

Н.И. Айзацкий, А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, Ю.Я. Волколупов
Научно-исследовательский комплекс «Ускоритель»,
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина

Приводятся результаты исследований по генерации мощных электронных пучков в одиночной и системе инжекционных магнетронных пушек с холодными вторичноэмиссионными 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 обращённого [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 вторичноэмиссионными катодами основан на обратной бомбардировке катода первичными электронами. При этом за счёт процесса вторичноэмиссионного размножения происходит лавинное нарастание плотности электронов; образование электронного слоя вблизи катода; формирование и вывод электронного пучка из пушки. Работа посвящена исследованиям по стабильной генерации мощных электронных пучков в одиночной и системе магнетронных пушек, изучению зависимости тока пучка от величины электрических и магнитных полей, измерениям поперечных размеров пучков.

Экспериментальная установка и методики исследования

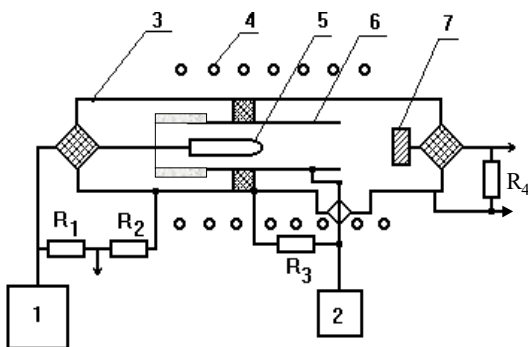


Рис. 1.

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 ~4 мкс и частотой следования 10...50 Гц. Импульс отрицательной полярности (с выбросом на вершине и плоской её частью) подавался на медный катод 5, а анод 6 (из нержавеющей стали или меди) заземлен через резистор R3. Запуск вторично-эмиссионного процесса происходил на спаде (длительностью 0,6 мкс и крутизной спада 50...100 кВ/мкс) специально сформированного выброса на вершине

импульса катодного напряжения [4] или на спаде импульса внешнего генератора 2. Магнитное поле создавалось соленоидом 4. Измерение тока пучка производилось с помощью цилиндра Фарадея 7 и резистора R4; напряжения на катоде – с помощью делителя R1R2; измерение анодного тока – с помощью резистора R3; 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 ~10⁻⁶ Торр. Эксперименты по получению мощных пучков проводились с одиночной и с системой, состоящей из 6 и 8 магнетронных пушек. Катоды пушек были изготовлены из меди, а аноды из меди или нержавеющей стали, длина пушек составляла ~100 мм. В одном случае система генерировала 6 электронных пучков, все пушки располагались на окружности диаметром ~60 мм. В другом случае система генерировала 8 пучков, пушки располагались на окружности диаметром ~70 мм.

В экспериментах по генерации пучка и его транспортировке использовалось два метода создания магнитных полей: импульсный разряд конденсатора через соленоид и питание соленоида постоянным током. На рис. 2 приведено распределение напряженности магнитного поля вдоль оси соленоида для этих двух случаев (1 – импульсное, 2 – постоянное поле) и показано расположение магнетронной пушки и цилиндра Фарадея.

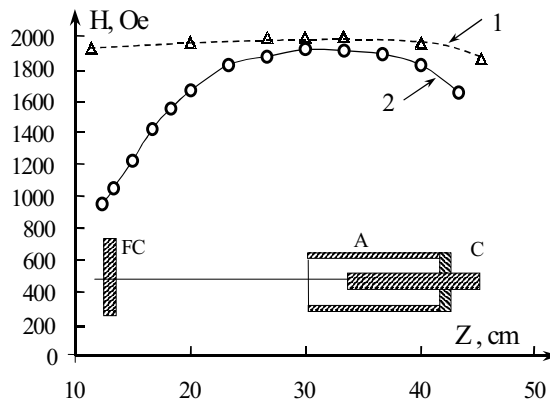


Рис. 2.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Одиночные магнетронные пушки позволяют получать мощные электронные пучки при больших диаметрах катода. Это связано с тем, что при этом уменьшается напряжённость электрического поля на катоде и, следовательно, вероятность пробоя, что позволяет использовать более высокие напряжения и токи пучка. Другой путь увеличения импульсной 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.

В **таблице** приведены результаты исследований с одиночной и системой магнетронных пушек.

Число пушек	Диаметр катода мм	Диаметр анода Мм	Рабочее напряжение кВ	Ток пучка А	Магнитное поле Ое	Микроперванс	Импульсная Мощность пучка
1	40	78	100	50	1800	1.6	5
1	40	50	30	50	2200	10	1.5
6	5	26	40	100	2000	2,5	4
8	5	22	30	60	2000	2	1.8

Как видно из таблицы, импульсная мощность в пучке может достигать значительных величин. На ис. 3 приведена зависимость тока пучка на цилиндре Фарадея от амплитуды импульса катодного напряжения (с диаметром катода 40 мм и диаметром анода 78 мм). 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. Величина анодного тока составляла 1...10% тока пучка в зависимости от условий эксперимента.

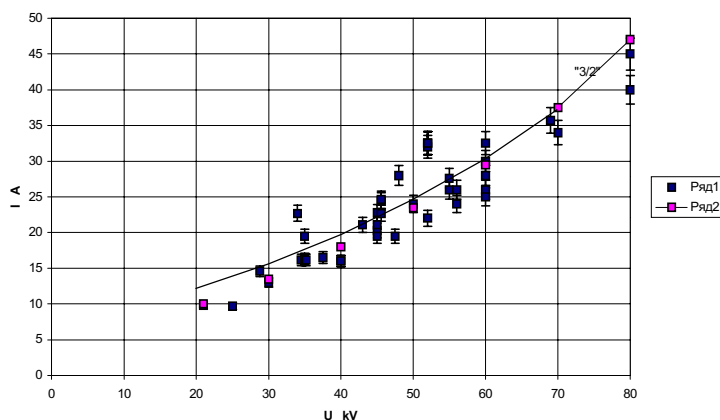


Рис. 3.

Исследование параметров пучка в зависимости от электрического поля показало, что при значениях амплитуды напряжения на катоде выше или ниже оптимальной (при фиксированном магнитном поле), нарушаются условия вторичноэмиссионного размножения, что приводит к срыву вторичноэмиссионного процесса. Это даёт возможность при формировании вершины импульса напряжения с синусоидальной модуляцией на выходе пушки получать сгустки электронов, расположенные по времени в тех местах, где синусоида имеет спад (принудительная модуляция [4]). При изменении величины магнитного поля происходит изменение амплитуды и формы импульса тока пучка. Так, например, на выходе пушки с диаметром катода 40 мм и диаметром анода 78 мм 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 нсек. При увеличении магнитного поля до ~ 1200 Ое импульс тока электронного пучка имеет плоскую вершину амплитудой 15..20 А.

При генерации электронных пучков с помощью системы параллельно включенных магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами, могут возникать трудности, связанные с тем, что при возникновении генерации пучка или пробое в одной из пушек, амплитуда напряжения на катодах других пушек снижается. Это может приводить к нестабильной генерации пучка. Оценки показывают, что в реальных системах уменьшение напряжения на катодах остальных пушек, происходит за время равное нескольким наносекундам.

В работе [9] показано, что время нарастания импульса тока пучка, можно уменьшить до 2 нс, т.е. генерация пучка может произойти, когда уменьшения напряжения ещё не произошло. При использовании модулятора с низким выходным сопротивлением для питания пушек амплитуда приложенного напряжения уменьшается незначительно (в наших экспериментах – менее 20% при выходном сопротивлении модулятора 2000 Ом). С другой стороны, в работе [10] показано, что генерация пучка сохраняется при изменении напряжения на катоде на 30%, что больше указанной величины. Таким образом, проведенный анализ показывает, что трудности, возникающие при генерации электронного пучка в системе магнетронных пушек, могут быть преодолены.

В системе магнетронных пушек возможно также снижение электрической прочности за счёт увеличения общей площади электродов (пробивное напряжение обратно пропорционально $S^{0,1}$, где S – площадь электродов). 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 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.

Транспортировка пучков магнетронных пушек с вторично-эмиссионными катодами осуществлялась на расстояние 50...100 мм от среза анода. Поперечные размеры пучка одиночной магнетронной пушки при диаметре катода 40 мм и анода – 70 мм составляли: наружный диаметр пучка – 45 мм, внутренний – 41 мм. При измерении поперечных размеров пучков многолучевой магнетронной пушки обнаружено, что пучки каждой магнетронной пушки расположены равномерно по окружности заданного радиуса (60 мм или 70 мм) и размеры каждого пучка соответствуют размерам пучка одиночной пушки (наружный диаметр пучка составляет ~ 9 мм, внутренний – ~ 5 мм) 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.

Список литературы

- [1] Skowron J.F. - Proceed. of the IEEE, 1973, vol. 61, № 3. P. 69-101.
- [2] Черенчиков С.А. // Электронная техника. Сер. 1. 1973. № 6. С. 20-28.
- [3] Dovbnya A.N., Zakutin V.V., Zhiglo V.F. et al. - Proceed. of the Fifth Epac /Ed. S. Myers, A. Pacheco, R. Pascual Et Al. Institute Of Physics Publishing. Bristol And Philadelphia. 1996, vol. 2, p. 1508-1509.
- [4] Dovbnya A.N., Mitrochenko V.V., Zakutin V.V. et al. - Proceed. of the 1997 Pac / Ed Comyn M., Craddock M.K., Reiser M., Thomson J. 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), том 1, с. 134-140.
- [6] Y.M.Saveliev, W.Sibbett, D.M.Parkes. // Physics of Plasmas, Vol.4, No.7, July 1997, pp.2319-2321.
- [7] Чурюмов Г.И. // Радиоэлектроника, 1997, №7. С.77-80.
- [8] Вишневецкий А.И., Солдатенко А.И., Шендаков А.И. // Известия Вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1968. Т.11. № 6. С. 555-564.
- [9] Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Митrochenko В.В. и др. // ВАНТ, №3, 1999, сер. ЯФИ (34), с. 38-40.
- [10] Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г. и др. Получение электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторично-эмиссионным катодом. // ЖТФ (в печати).