

# Формирование пучка в термоэмиссионной высокочастотной пушке сантиметрового диапазона

В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, С.А. Пережогин, И.В. Ходак  
НИК “Ускоритель”, Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, Харьков, Украина, kushnir@kipt.kharkov.ua

## Введение

Высокочастотные (ВЧ) пушки известны как источники высококачественного электронного пучка [1-3]. В ВЧ-пушке катод установлен непосредственно в резонансной СВЧ-системе, где частицы ускоряются и формируются в сгустки. Одним из достоинств таких источников электронов является отсутствие высоковольтного оборудования, что важно при создании малогабаритных линейных электронных ускорителей, в частности, сантиметрового (X или K) диапазона [4-6]. Основной проблемой при создании таких ускорителей является весьма ограниченный выбор подходящих источников СВЧ-питания. Существующие, например, в X-диапазоне компактные низковольтные СВЧ-генераторы (магнетроны) имеют выходную мощность не превышающую 1.8 МВт. Поэтому весьма важной задачей является разработка как эффективных ускоряющих структур [7-9], так и инжекторных систем, позволяющих сформировать качественный пучок электронов при минимальной вводимой СВЧ-мощности. В данной работе представлены результаты разработки термоэмиссионной высокочастотной электронной пушки с энергией электронов на выходе 350-470 кэВ и импульсным током пучка 50 мА. Рабочая частота составляет 12.5 ГГц, а мощность СВЧ-питания не превышает 100 кВт.

## 1. Выбор резонансной системы пушки

При создании ВЧ-пушки определяющим является выбор типа высокочастотной резонансной системы, поскольку именно распределение и напряженность высокочастотного электрического поля в резонаторе пушки определяют основные характеристики пучка: эмиттанс, энергию частиц, их фазовый и энергетический разброс. При этом важно определить какая из этих характеристик пучка является доминантной.

В настоящей работе рассматривается возможность создания ВЧ-пушки с максимальной энергией электронов при приемлемых параметрах пучка на выходе. Резонансные системы большинства имеющихся в мире ВЧ-пушек с термоэмиссионным катодом состоят из одного, либо из двух  $E_{010}$  цилиндрических резонаторов. В последнем случае резонаторы могут быть связаны между собой ( $\pi$  тип колебаний), или иметь раздельное СВЧ-питание. Величина вводимой в резонатор СВЧ-мощности, например в S-диапазоне, составляет 1–2 МВт, а напряженность поля  $E_0$  – 30–50 МВ/м. При этом величина относительной напряженности электрического

поля  $\alpha = \frac{eE_0\lambda_0}{2\pi mc^2} \approx 1$ . В настоящее время разработаны общие подходы при создании таких источников элект-

тронов (см., например, [10]). При уменьшении длины волны для сохранения такого же характера движения частиц, как и в пушках десятисантиметрового диапазона, необходимо соответственно увеличивать напряженность электрического поля. Например, при  $\lambda_0 \approx 2.5$  см для достижения  $\alpha$ , близкого к единице напряженность поля должна превышать 1 МВ/см, что в нашем случае, когда уровень вводимой мощности ограничен, представляется весьма сложной задачей. Предварительные расчеты динамики частиц в одно- и двухрезонаторной резонансной системах показали, что в таких системах одновременное достижение высокой энергии частиц (более 300 кэВ) и получение малого эмиттанса и фазовой протяженности сгустка практически недостижимо.

В результате проведенного анализа были сформулированы следующие основные требования к резонансной системе пушки:

1. Для обеспечения требуемого набора энергии, резонаторная система должна состоять из нескольких резонаторов.
2. Длина первого резонатора и напряженность поля в нем должны обеспечить доставку значительного количества эмитированных с катода электронов на вход второго резонатора. Особое внимание необходимо уделить геометрии прикатодной области, которая в значительной мере определяет эмиттанс пучка.
3. Во втором и третьем резонаторах происходят компрессия энергетического спектра и группировка частиц по фазам. Выбором геометрических размеров первого резонатора необходимо добиться такого фазо-энергетического распределения частиц, чтобы при данном ускоряющем поле электроны, расположенные в

"голове" сгустка попали во второй резонатор в тормозящей фазе, а частицы "хвоста" сгустка - в ускоряющей фазе. При этом частицы "голова" сгустка приобретут меньшую энергию, чем частицы "средины" сгустка. В результате этого произойдет компрессия энергетического спектра. Фазо-энергетическое распределение на входе в третий резонатор должно быть таким, чтобы обеспечить как ускорение частиц, так и дальнейшую группировку по фазам.

4. Основной набор энергии должен осуществляться в последующих резонаторах.
5. Конструкция резонаторов должна быть простой и технологичной.

Эти требования могут быть реализованы в предложенной нами резонансной системе, представляющей собой неоднородную цепочку связанных цилиндрических резонаторов, в которых возбуждается  $\pi/2$  тип колебаний. Связь между резонаторами осуществляется через центральные отверстия для пролёта пучка. За основу была выбрана резонансная система, состоящая из четырёх ускоряющих резонаторов и трёх резонаторов связи.

## 2. Результаты расчета резонансной системы и численного моделирования динамики частиц

Выбор геометрических размеров резонаторов, определение распределения и амплитуды электрического поля в каждом из них проводилось путем многократных расчетов с применением вычислительных программ *SUPERFISH* и *PARMELA* [11,12]. На первом этапе проводилась настройка резонансной системы на рабочую частоту, определение распределения электрического поля и основных электродинамических характеристик системы. На втором этапе проводилось моделирование динамики частиц в приближении заданного поля с учетом объёмного заряда и зависимости плотности эмиссии от напряженности поля (эффект Шоттки). При этом полагалось, что ток с поверхности катода диаметром 1 мм составляет 100 мА. В ходе этого этапа осуществлялся анализ характера движения частиц в каждом из резонаторов, и определялись характеристики пучка на выходе пушки. Затем проводились необходимые изменения конфигурации распределения электрического поля и соответственно размеров системы, и повторное моделирование динамики.

Геометрия окончательного варианта резонансной системы ВЧ-пушки и пространственное распределение поля представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

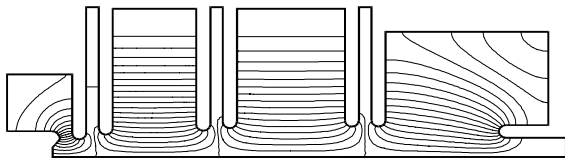


Рис. 1. Резонансная система пушки.

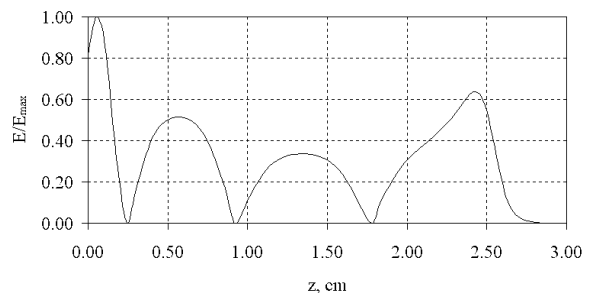


Рис. 2. Распределение электрического поля на оси резонансной системы.

Добротность резонатора составляет 4900, шунтовое сопротивление – 127 МОм/м. При входной мощности 100 кВт среднее ускоряющее поле на оси  $E_0 \approx 21$  МВ/м, при его максимальном значении в первом резонаторе  $E_{\max} \approx 68$  МВ/м. На поверхности резонансной системы максимальное поле сосредоточено в районе катодного узла и составляет  $8,28 E_0$ .

Анализ динамики частиц в пушке показал, что в первом резонаторе электроны приобретают энергию около 50 кэВ, фазовая протяженность сгустка на выходе резонатора –  $80^\circ$ . Основное формирование сгустка происходит во втором и третьем резонаторах. На этом участке частицы ускоряются до энергии 200-260 кэВ, происходит значительное уменьшение разброса электронов по энергии и некоторое уменьшение фазовой протяженности сгустка ( $60^\circ$ ). В четвертом ускоряющем резонаторе происходит ускорение частиц до энергии 380-430 кэВ и дополнительное сжатие сгустка. Потери частиц не превышают 50%, причем, основная их часть (35%) теряется в первом резонаторе.

На рис. 3 представлены фазовый и энергетический спектры электронов, а также их распределения в радиальном направлении и в поперечной фазовой плоскости. Нормализованный эмиттанс пучка на выходе пушки составил  $3.83 \text{ п. мм} \cdot \text{мрад}$ .

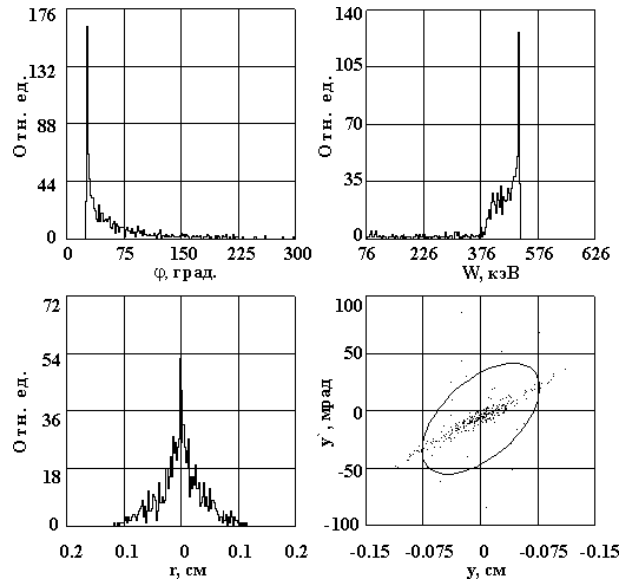


Рис. 3. Фазовый, энергетический спектры и пространственные распределения частиц пучка.

Результаты расчётов характеристик пучка на выходе пушки для различных уровней входной СВЧ-мощности приведены в таблице. Здесь под коэффициентом захвата понимается отношение количества частиц на выходе пушки к общему количеству частиц эмитированных с поверхности катода.

Таблица. Характеристики пучка на выходе пушки.

СВЧ-мощность, кВт	80	100	120
Максимальная энергия $W_{\max}$ , МэВ	0.429	0.475	0.515
Средняя энергия $W_{\text{авт}}$ , МэВ	0.338	0.387	0.423
$\Delta W/W$ , % (70% частиц)	17	15	18
Коэффициент захвата $\kappa$ , %	50.7	53.7	55.0
$\epsilon_{\text{rms}}$ , $\mu\text{м} \cdot \text{мрад}$ .	3.68	3.83	4.4
$\Delta \phi$ , о (70% частиц)	54	48	42

### Заключение

Таким образом, разработанная ВЧ-пушка позволяет получать пучки достаточно высокого качества при сравнительно малой (100 кВт) мощности СВЧ-питания. Исследованная ВЧ-пушка может быть использована как в качестве отдельного источника электронов, так и в качестве начальной части ускорителя на стоячей волне. В настоящее время разработаны технологические приемы изготовления и методики настройки элементов пушки, что позволяет приступить к созданию действующего опытного образца.

Авторы весьма признательны проф. А.Н. Довбне за поддержку работы и доктору ф-м наук Н.И. Айзацкому за полезные и конструктивные обсуждения.

### Литература

- [1] С. Travier RF-guns: review. – Orsay cedex (France): 1990. 38 с. (Preprint. / Laboratoire de l'Accelérateur Lineaire; RT 98-13). SERA/90-219/RFG, RFG Note 07. LAL, 1990.
- [2] J.E. Clendenin. RF photoinjectors. – Proceedings of the 18th International Linear Accelerator Conference. Geneva, Switzerland, 1996, Vol.1, p.298-302.
- [3] V.A. Kushnir. High-frequency Electron Guns – Current Status. - ВАНТ, Серия: Ядерно-физические исследования, 1999, вып.3(34), с.3-6.
- 4) И.С. Щедрин. Линейные ускорители электронов трехсантиметрового диапазона. – ВАНТ, Серия: Техника физического эксперимента, 1985, вып.2(23), с.71-75.

- [5] J. Gonichon, D. Tronc. Acceleration and Bunching in a 6 MeV X band Linac. - Proceedings of the PAC 96, 1996, v.2, p.1362-1364.
- [6] S.M.Hanna. Application of X-band Technology in Medical Accelerators. - Proceedings of the PAC 99, 1999, v.5, p.2516-2518.
- [7] E.Tanable et al. A Small Diameter Standing Wave Linear Accelerator Structure. - IEEE Trans., 1985, NS-32, No.5, p.2975-2977.
- [8] Sun Xiang, Tong Dechun, Jin Qingxiu et al. A Portable X-band On-axis Standing Wave Linac Structure. - Proceedings of the PAC 97, 1997, v.1, p.1221-1223.
- [9] H. Deruyter, A.V. Mishin, T. Roumbanis et al. Latest Results on Portable X-band Linac Development. - Proceedings of the EPAC 96, 1996, v.1, p.819-821.
- [10] В.В. Митроченко. Формирование и ускорение пучков в высокочастотных источниках электронов. - Диссертация на соискание ученой степени кандидата ф.м. наук. Харьков, 1999.
- [11] L.M. Young. PARMELA . (Preprint / Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1835), Los Alamos, 1996, 93 с.
- [12] J.H. Billen, L.M. Young. POISSON/SUPERFISH on PC compatibles - Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference, Washington (USA), 1993, p. 790 – 792.