

## Исследование генерации электронных пучков в миниатюрных магнетронных пушках с вторично-эмиссионным катодом с внешним запуском

*Н.И.Айзацкий, П.И.Гладких, А.Н.Довбня, В.В.Закутин, М.А.Красноголовец, В.А.Кушнир, В.В.Митроченко, Н.Г.Решетняк, В.П.Ромасько, Ю.Д.Тур*

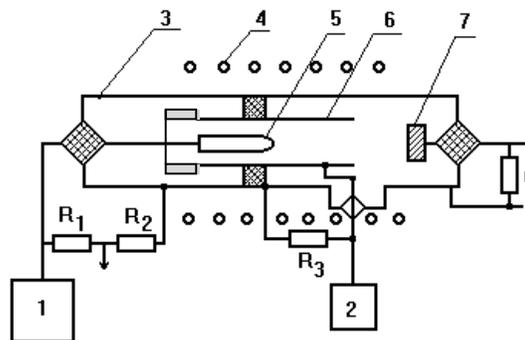
*НИК "Ускоритель" ННЦ ХФТИ, г. Харьков*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения импульсной и средней мощности СВЧ-источников, увеличения их долговечности тесно связана с разработкой электронных пушек с ненакаливаемым катодом [1-4]. Как известно, магнетронные пушки, в которых используется холодный вторично-эмиссионный металлический катод, характеризуется большим временем жизни [2] и высокой плотностью [4-6] эмиссии электронов с катода, относительной простотой конструкции и могут быть использованы для решения этой проблемы. Кроме того, магнетронные пушки с вторичноэмиссионным катодом представляют интерес при создании электронных пушек для ускорителей [7] и быстродействующей высоковольтной импульсной техники [8]. Несмотря на все эти преимущества, имеется недостаточное количество как экспериментальных, так и теоретических работ по объяснению некоторых эффектов, связанных с генерацией пучка. Одним из слабо изученных является, в частности, вопрос об условиях и времени накопления пространственного заряда [9, 10].

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

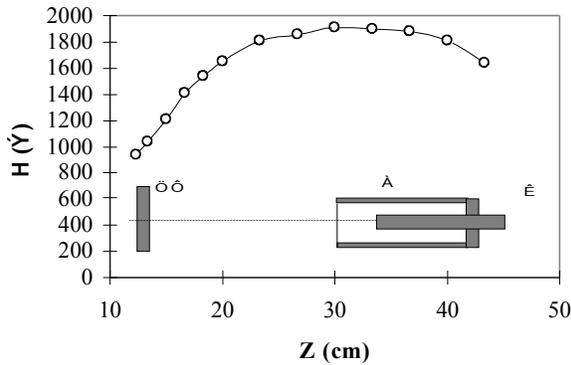
Данная работа посвящена экспериментальному исследованию формирования пучков и измерению их параметров при наносекундных временах спада запускающего импульса, численным расчетам



*Рис. 1. Схема экспериментальной установки.*

траекторий электронов в магнетронных пушках при запуске вторично-эмиссионного процесса спадом импульса напряжения от внешнего генератора.

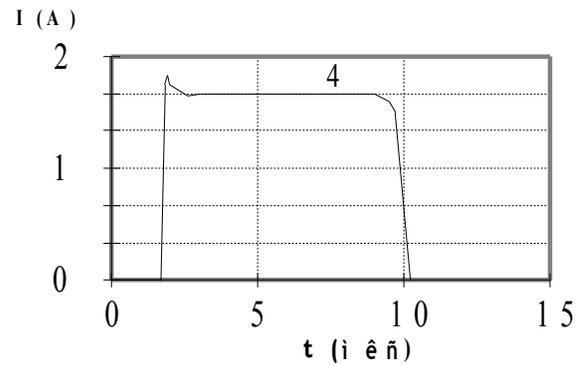
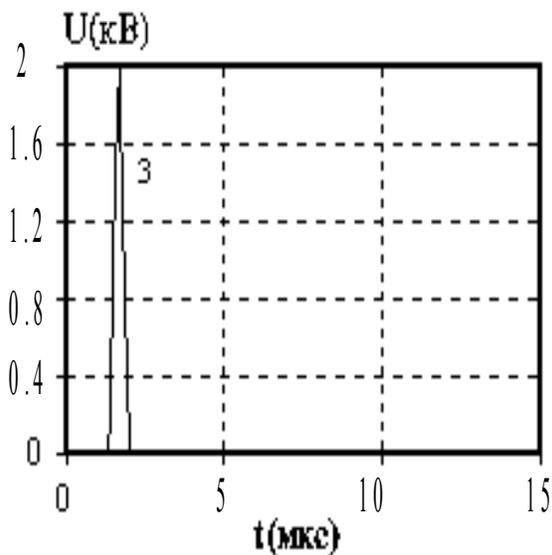
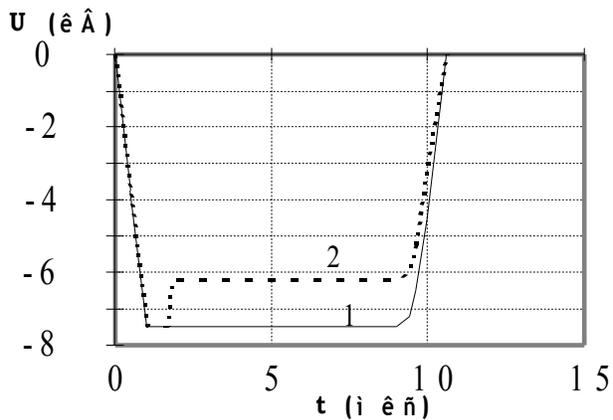
Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Пушка питается от модулятора, формирующего прямоугольный импульс напряжения амплитудой 4...100 кВ, длительность импульса 2...10 мкс, частота следования импульсов 10...50 Гц. Импульс отрицательной полярности подается на катод 3 пушки, а ее анод 4 заземлен. Для запуска вторично-эмиссионного процесса использовался внешний импульсный генератор 2 с амплитудой напряжения 1,5...15 кВ и длительностью спада от 1,5 до 70 нс, что позволяло изменять крутизну спада напряжения от 50 до 1500 кВ/мкс. Магнитное поле создавалось соленоидом 5 с напряженностью магнитного поля до 3000 Э с неоднородностью в продольном направлении  $\sim \pm 8\%$ . На рис. 2 приведено распределение напряженности магнитного поля вдоль оси соленоида и показано расположение магнетронной пушки и цилиндра Фарадея. Измерение тока пучка производилось с помощью цилиндра Фарадея 7 и резистора R4, а размеров пучка - с помощью отпечатка на рентгеновской пленке и на молибденовой фольге.



**Рис. 2.** Распределение магнитного поля вдоль оси соленоида и расположение пушки в нем (ЦФ - цилиндр Фарадея, А - анод, К - катод).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Была изучена зависимость параметров электронного пучка от размеров пушки в пределах изменения диаметра катода 1...3 мм и диаметра анода от 5 до 14 мм. Исследования показали, что запуск пушки происходит только на спаде запускающего импульса. Ток можно было генери-



**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов напряжения (1 - х.х. модулятора, 2 - при генерации пучка), 3 - затравочный импульс, 4 - ток пучка.

ровать в различные моменты времени на плато импульса напряжения путем изменения времени начала запуска вторичной эмиссии. Типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде, импульса запуска вторичной эмиссии и тока пучка с цилиндра Фарадея приведены на рис. 3. Измерение зависимости тока пучка от крутизны спада показало, что эта зависимость имеет пороговый характер. Так запуск магнетронной пушки (диаметр катода 2 мм, диаметр анода 7 мм) при напряжении на катоде ~7 кВ происходил только при крутизне спада более 1000 кВ/мкс (амплитуда напряжения запускающего импульса ~2,4 кВ, длительность спада ~2 нс). При минимальном значении напряжения на катоде ~7 кВ и магнитном поле ~3000 Э получен электронный пучок с током ~2 А. При запуске магнетронной пушки другой геометрии (диаметр катода - 2 мм, диаметр анода - 10 мм) минимальная крутизна спада при которой происходит генерация пучка при минимальном напряжении на катоде 5 кВ, составляет ~300 кВ/мкс (амплитуда напряжения запускающего импульса 4 кВ, длительность спада 13 нс). При этом получен ток электронного пучка 0,7...0,9 А, а магнитное поле было ~1900 Э.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что в первом случае электронный пучок возникает через ~1,5...2 нс, а во втором ~10 нс после спада амплитуды импульса запуска. Это также наблюдалось по "подгрузке" импульса напряжения на катоде (см. рис. 3). При этом временная нестабильность начала импульса тока пучка не превышает длительности импульса запуска и может достигать единиц наносекунд. В этих экспериментах магнитное поле изменялось в соответствии с изменением электрического и выбиралось оптимальным, с точки зрения генерации пучка. При этом генерация электронного пучка происходила в узких пределах изменения магнитного поля  $\pm 10\%$ .

При изменении поперечных размеров пучка 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 с толщиной “стенки” 1...1,3 мм. Измерение размеров пучка производилось на расстоянии 180 мм от среза анода. При этом, как следует из кривой (см. рис. 2), магнитное поле вблизи расположения рентгеновской пленки уменьшалось примерно в 1,8 раза, по сравнению с напряженностью магнитного поля, в области которой находится магнетронная пушка. Приведенные результаты показывают, что электронный пучок достаточно сильно замагничен, поскольку при движении в спадающем дефокусирующем магнитном поле его размеры практически не изменяются, по сравнению с размерами на расстоянии 5 см за срезом анода. Это может быть использовано при инъекции электронного пучка из магнетронной пушки в другие системы.

Расчеты, выполненные в одночастичном приближении, подтверждают выше приведенные результаты. Они показывают, что электроны, выйдя из катода на спаде напряжения импульса запуска, могут набирать энергию больше 300 эВ, достаточную для вторично-эмиссионного размножения за время 1 нс, что не противоречит расчетам, выполненным в работе [9] для цилиндрического магнетронного диода с вторично-эмиссионным катодом. В этом случае количество первичных электронов невелико, но поскольку крутизна спада велика, то процесс вторично-эмиссионного размножения идет достаточно эффективно.

Следует заметить, что в экспериментах, выполненных с магнетронными пушками, в пределах изменения диаметра катода от 5 мм до 30 мм и диаметра анода от 26 мм до 140 мм в режиме автозапуска [4], при крутизне спада 20...50 кВ/мкс, запуск пушки происходил через время 100...500 нс (в зависимости от условий эксперимента) от начала спада импульса напряжения. В этом случае для создания электронного слоя пространственного заряда необходимо накопить значительное число первичных электронов. Поэтому процесс накопления в этом случае более длительный по времени и носит статистический характер с разбросом десятки наносекунд, что и определяет временную нестабильность начала токового импульса.

В таблице приведены результаты исследований различных типов магнетронных пушек как в режиме запуска вторичной эмиссии от внешнего импульсного генератора, так и в режиме автозапуска.

Дк <sub>1</sub> , mm	Да <sub>1</sub> , mm	U <sub>к</sub> , kV	I, A	B, T	U, kV	τ, нс
2	7	7	1.9	0.3	2.4	2
2	10	5	0.8	0.19	4	13
2	10	7	1.6	0.21	3	11
3	14	8	2.3	0.14	3	14

#### 4. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что возможно накопление пространственного заряда за время 1,5...2 нс и получение электронного пучка при напряжении на катоде 5...7 кВ. Получены трубчатые пучки электронов с током 1...2 А (напряжение 5...7 кВ) с внутренним диаметром 2 мм и наружным 3...3,5 мм. При этом магнитное поле составляло 1900...3000 Э.

#### Литература

1. Ломакин В.М., Панченко Л.В. Электронная техника, сер. 1; Электроника СВЧ, 1970, вып. 2, с. 33-42.
2. Skowron J.F. Proc. of the IEE 1973, v. 61, #3, p. 69-101.
3. Черенчиков С.А. Электронная техника, сер. 1; Электроника СВЧ, 1973, вып. 6, с. 20-28.
4. Dovbnya A.N. et al. Proc. of the Fifth EPAC 10-14 June 1996, vol. 2, p. 1508-1509.
5. Dovbnya A.N. et al. Abstract of PAC-97, Vancouver, 1997, v. 42, N 3, p. 1235.
6. Довбня А.Н. и др. ВАНТ, 1997, сер.: Ядерно-физические исследования, вып. 2,3 (29, 30), том 1, с. 204-206.
7. Иванов Г.М., Черенчиков С.А. Тезисы докладов 13<sup>го</sup> Харьковского семинара по линейным ускорителям заряженных частиц, (Харьков, 25-28 мая 1993 г.), Харьков, 1993, с. 27.
8. Вишневский А.И., и др. Известия вузов, сер. Радиоэлектроника, 1968, т. 11, №6, с. 555 - 564.
9. Агафонов А.В. и др. ВАНТ, 1997, сер.: Ядерно-физические исследования, вып. 2,3 (29, 30), том 1, с. 134-140.
10. Чурюмов Г.И. Радиоэлектроника, 1997, №7, с. 77 - 80

• Статья поступила: в редакцию 15 мая 1998 г.,  
в издательство 1 июня 1998 г.