

Исследование генерации электронных пучков в магнетронных пушках с холодными вторичноэмиссионными катодами

В.В.Закутин

НИК “Ускоритель” ННЦ ХФТИ, г. Харьков

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы широкий интерес вызывает исследование источников электронов с холодными катодами, работающих в режиме вторичной эмиссии [1-3]. Интерес к таким источникам связан с рядом преимуществ (большое время жизни, высокая плотность тока, относительная простота конструкции и т.д.), которые дают возможность использования магнетронных пушек с холодными вторичноэмиссионными катодами при создании мощных долговечных СВЧ-источников [14] и быстродействующей высоковольтной импульсной техники [15]. Принцип работы магнетронной пушки основан на обратной бомбардировке катода (при спаде напряжения) электронами, накопленными в промежутке между анодом и катодом, вторичноэмиссионном размножении электронов, создании электронного облака и выводе электронов из пушки. Эти вопросы изучались различными авторами [1-4]. Тем не менее имеется недостаточное количество как экспериментальных так и теоретических работ по исследованию различных аспектов генерации пучка. Настоящая работа посвящена обзору исследований по получению и измерению параметров электронных пучков и некоторых режимов работы магнетронных пушек с вторичноэмиссионными катодами.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное исследование генерации пучка производилось на установке, схема которой приведена на рис. 1.

Установка содержит:

- - высоковольтный импульсный модулятор 1 (амплитуда напряжения 5...200 кВ, длительность импульса 2...10 мкс, частота следования импульсов 10...50 Гц;
- - высоковольтный генератор 2 для запуска вторичной эмиссии: в первом случае с амплитудой запускающего импульса до 15 кВ и длительностью ~70 нс, во втором случае с амплитудой до 3,5 кВ и длительностью 1...10 нс (генератор мощных наносекундных импульсов Г5-39);

- - фокусирующий соленоид 4 с напряженностью магнитного поля до 3500 Э с неоднородностью в продольном направлении ~8%;
- - вакуумную камеру 3 с вторичноэмиссионной пушкой коаксиального типа с центральным медным катодом 5 и трубчатым анодом из нержавеющей стали, давление в камере поддерживается магниторазрядным насосом на уровне 10^{-6} Торр;
- - систему индикации - датчиков тока и напряжения, цилиндра Фарадея 7 с калориметрическим измерителем мощности. Измерение энергии электронов производилось методом поглощения в алюминиевой фольге. Измерение размеров пучка с помощью отпечатка на рентгеновской пленке и на молибденовой фольге;
- - систему синхронизации.

Исследование параметров электронного пучка, формируемого магнетронной пушкой, питаемой от модулятора, производилось с частотой следования импульсов 10...50 Гц.

В экспериментах запуск вторичной эмиссии осуществлялся как внешним импульсом напряжения, подаваемым на анод пушки от отдельных импульсных источников ($U=1...15$ кВ, $t_{\text{спада}} \sim 1...100$ нс, так и спадом специально сформированного выброса в начальной части импульса напряжения на катоде амплитуда которого изменялась от 25 кВ до 200 кВ.

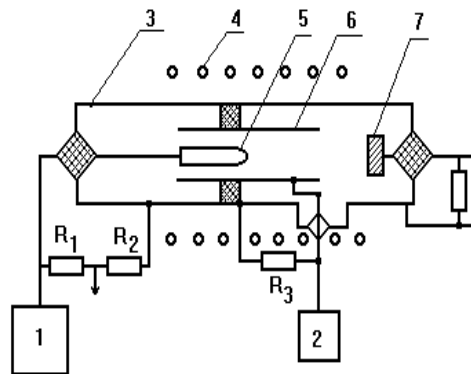


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Длительность спада составляла ~1 мкс (Рис. 3). Были

изучены параметры электронного пучка в пушках с диаметром катода изменяемым от 1 до 80 мм, диаметра анода - от 7 до 140 мм, длины электродов - от 40 до 140 мм.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении исследований были изучены параметры электронных пучков в пределах изменения диаметра катода d от 2 до 80 мм, диаметра анода D от 10 до 140 мм, длины электродов от 40 до 140 мм. В таблице 1 приведены значения токов пучка I на цилиндре Фарадея и напряжения на катоде U_k пушки при различных диаметрах анода и катода [10].

Таблица 1

d , мм	D , мм	U , кВ	I , А	B , Т
5	26	32	14	0,19
5	50	60	1	0,14
5	50	60	10	0,20
5	78	26	0,6	0,04
16	26	10	6	0,16
16	50	17	5	0,06
40	50	11	18	0,17
80	100	19	8	0,11

Эксперименты показали важную роль тренировки катода. В первое время после генерации тока пучка наблюдались выбросы на токе пучка с цилиндра Фарадея [7], связанные с десорбцией газа с поверхности катода. По мере тренировки выбросы смещались к концу импульса и затем полностью исчезали; в дальнейшем ток пучка на цилиндре Фарадея практически не изменялся.

Исследования показали, что запуск вторичноэмиссионного процесса происходит только на спаде импульса напряжения [5]. Измерение зависимости тока пучка от крутизны спада показало, что эта зависимость носит пороговый характер [6] и зависит от амплитуды напряжения на катоде пушки, при этом выше порога генерации амплитуда тока пучка практически не изменяется при дальнейшем увеличении крутизны спада.

Исследована зависимость тока пучка от электрического и магнитного полей в пушке. Исследована зависимость тока пучка на цилиндре Фарадея от амплитуды импульса напряжения на катоде. При изменении амплитуды катодного импульса ток пучка изменялся по закону “ $3/2$ ”, причем значение напряженности магнитного поля подбиралось оптимальным для каждого значения напряжения на катоде [5] (рис. 2). Исследован диапазон генерации пучка при фиксированном значении магнитного поля при изменении амплитуды напряжения на катоде. При постоянном значении

магнитного поля генерация электронного пучка сохраняется при изменении амплитуды напряжения на $\pm 10\%$ от оптимального значения [5]. Исследован диапазон генерации пучка при изменении магнитного поля и фиксированном значении амплитуды импульса напряжения на катоде. Измерения показали, что изменение напряженности магнитного поля на $\pm 30\%$ от среднего значения приводит к срыву генерации пучка [8]. Однако следует отметить, что при большом расстоянии анод-катод эта зависимость становится более плавной и ток пучка может увеличиваться в 10 раз при изменении магнитного поля от 0,14 до 0,2 Т (см. табл.1, $d = 5$ мм, $D = 50$ мм). Это может быть объяснено тем, что при уменьшении магнитного поля увеличивается Ларморовский радиус и электронный слой смещается ближе к аноду [11]. При этом изменяется концентрация электронов, что приводит к изменению тока пучка. В экспериментах показано, что генерация пучка происходит при величине дрейфовой скорости электронов $v_{др} = (0,1 \dots 0,2)$ с в зависимости от условий эксперимента. Осциллограммы импульсов напряжения и тока пучка приведены на рис.3.

Исследована зависимость тока пучка от поперечных размеров электродов. На рис. 4 показан ток пучка как функция диаметра катода при постоянном зазоре анод-катод. Анализ этих зависимостей дает возможность утверждать, что ток

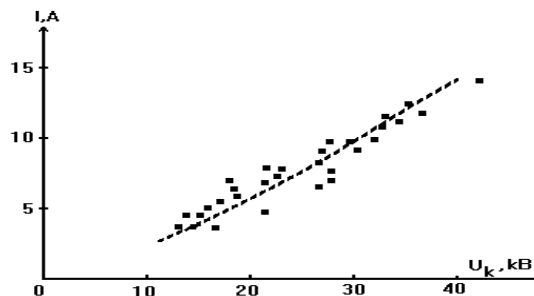


Рис. 2. Зависимость тока пучка от напряжения на катоде.

пучка возрастает обратно пропорционально логарифму отношения диаметров анода к катоду, что согласуется с зависимостью полученной для классических магнетронов [9]. Из рис. 4 видно, что с увеличением межэлектродного промежутка ток пучка уменьшается, однако при этом требуются меньшие магнитные поля (см. табл.1), что обличает требования к соленоиду 4 (см. рис. 1). Кроме того, это дает возможность конструирования магнетронной пушки с заданными параметрами. Плотность тока в пушке составляла ~ 50 А/см², при этом пучки имели в поперечном сечении вид колец с внутренним

диаметром примерно равным диаметру катода с толщиной "стенки" ~2 мм.

Проведено измерение энергии частиц пучка методом поглощения в алюминиевой фольге. Например, для магнетронной пушки с диаметром

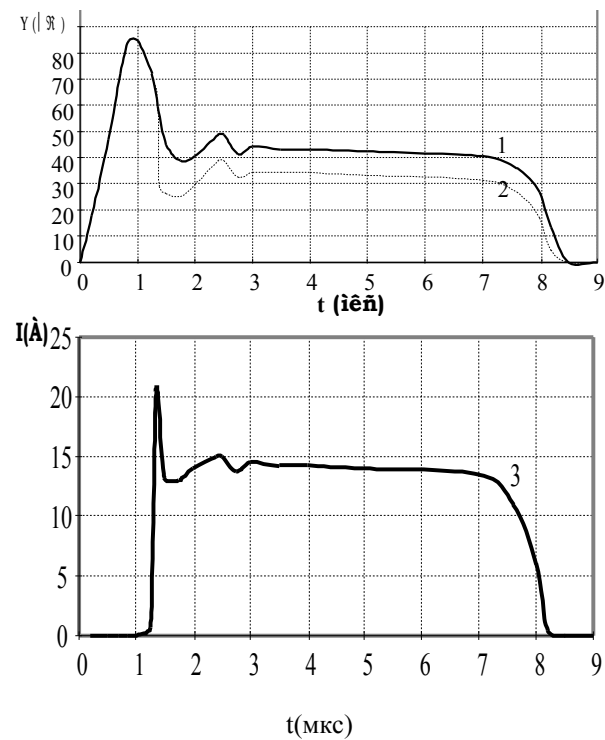


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения на катоде(кривая 1 - соответствует холостому ходу модулятора, кривая 2 - в режиме генерации пучка) и тока пучка (кривая 3) с цилиндра Фарадея.

катода 5 мм, диаметром анода 26 мм при амплитуде импульса напряжения на катоде 39 кВ средняя энергия частиц составляет »32 кэВ, что может быть объяснено влиянием накопленного пространственного заряда на распределение потенциала в промежутке анод-катод. Согласно проведенным расчетам это

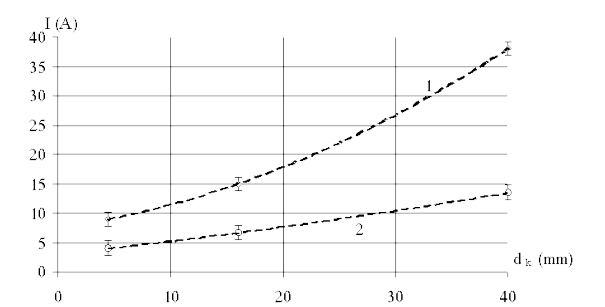


Рис. 4. Зависимость тока пучка от диаметра катода (1 - зазор анод - катод 5 мм, 2 - 20 мм)

изменение может составлять (20...40)%. Оценки, проведенные исходя из толщины стенки кольцевого пучка (»2 мм), показывают, что энергетический разброс в пучке может достигать ~1 кэВ.

Исследован режим генерации нескольких сгустков в одном импульсе напряжения [6]. Как отмечалось [8], отклонение электрического или магнитного поля от оптимального значения может привести к срыву генерации пучка. Если промодулировать вершину импульса напряжения на катоде (рис. 5, 6) колебаниями достаточно большой амплитуды, то импульс тока будет иметь вид сгустков, расположенных по времени в тех

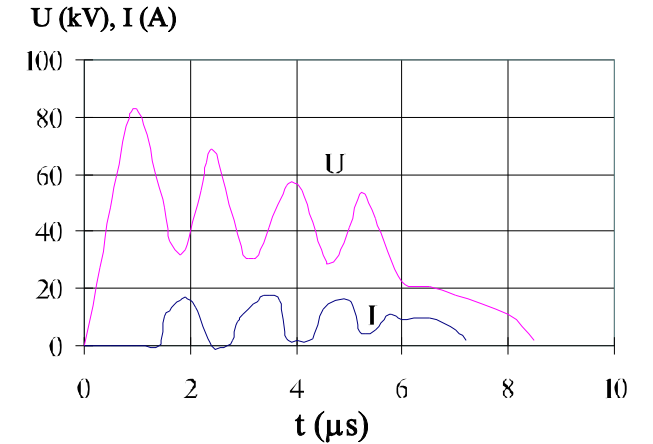


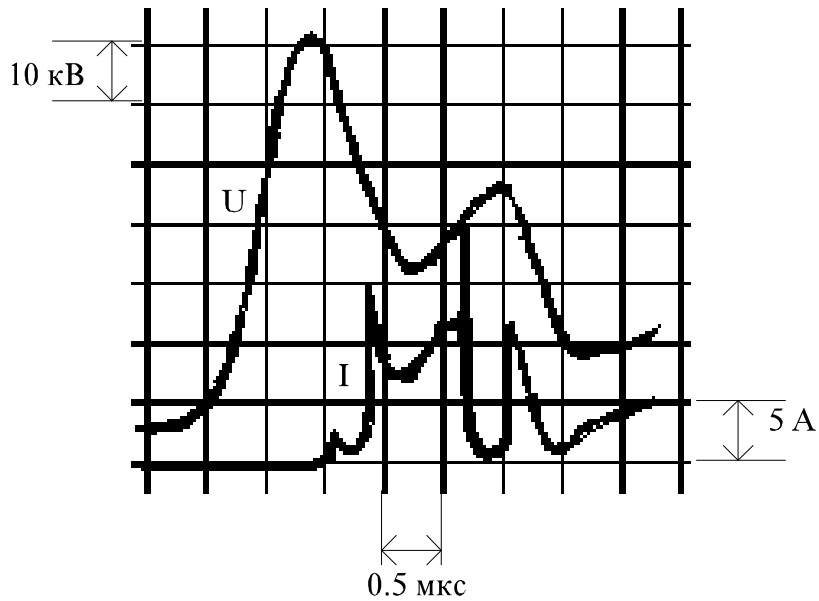
Рис. 5. Осциллограмма тока пучка и напряжения на катоде(диаметр катода - 40 мм, диаметр анода - 78 мм, H - 700 Э)

местах, где напряжение имеет спад. В частности, при диаметре катода 40 мм, анода - 78 мм, магнитном поле 700 Э получено 4 сгустка длительностью ~1 мкс при длительности импульса напряжения ~8 мкс. Следует отметить, что в экспериментах был обнаружен режим, при котором длительность сгустков составляла ~10 нс с периодом следования ~10 нс при длительности импульса напряжения на катоде ~2 мкс. Это согласуется с [12, 13], где проведены расчеты и оценки, показывающие возможность наносекундных времен формирования электронного слоя в магнетронах.

Измерение анодного тока показало, что его форма соответствует форме импульса тока на цилиндре Фарадея, а амплитуда не превышает 4-5% от тока пучка. Это согласуется с данными работы [12], где получены аналогичные результаты при расчете тока на анод магнетронного диода (меньше 10%).

4. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показывают возможность получения прямолинейных электронных пучков с высокой плотностью тока в магнетронных пушках с вторичноэмиссионными металлическими катодами. Получены трубчатые электронные пучки с плотностью тока до 50 А/см² с внутренним диаметром от 5 мм до 80 мм с толщиной стенки ~2 мм и энергией частиц до 60 кэВ при длительности импульса 10 мкс с частотой



Дей. 6. *Îñîëëëïãðàèà òèèà ïó÷èà è ïàèäÿæàéëÿ ïà èàðîüà, ïèò÷-àííàÿ ïðå ðàáîòà ïàáèàððîðèé ïóøèè ñ àèàèàððîðè èàðîüà 5 ï, àèàèàððîðè àíüà 26 ï, H=1800 Ý.*

с внутренним диаметром от 5 мм до 80 мм с толщиной стенки ~2 мм и энергией частиц до 60 кэВ при длительности импульса 10 мкс с частотой повторения 50 Гц. Экспериментально показана возможность генерации нескольких сгустков электронов в одном импульсе напряжения.

Показана возможность регулировки тока пучка в 10 раз при изменении магнитного поля в пушке.

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 IEEE 1973, v.61, #3, p.69-101.
3. Черенщиков С.А. "Электронная техника", сер.1, "Электроника СВЧ", 1973, вып.6, с. 20-28.
4. Закутин В.В. и др. Тезисы докладов 13-го Харьковского Семинара по линейным ускорителям заряженных частиц (Харьков, 25-28 мая 1993 г.), Харьков, 1993, изд. ХФТИ, с.28.
5. Довбня А.Н. и др. ВАНТ, сер. ЯФИ, вып.2, 3 (29,30), Харьков, 1997, с.204-206.
6. Довбня А.Н., и др. ВАНТ., сер. ЯФИ., вып.2, 3 (29, 30), Харьков, 1997, с.164-165.
7. Dovbnya A.N. et al. Proc. of the Fifth EPAC 10-14 June 1996, vol.2, p.1508-1509.
8. Довбня А.Н. и др. ВАНТ, сер. ЯФИ, вып.1(28), 1997, Харьков, с.53-57.
9. Соминский Г.Г. и др. ЖТФ, 1964, XXXIV вып.9, с. 1666-1676.
10. Dovbnya A.N. et al. PAC-97, Abstract, Vancouver, 1997, v.42, N 3, p. 1235.
11. Чурюмов Г.И. и др. ВАНТ, сер. ЯФИ, вып.4, 5(31, 32), 1997, Харьков, с.24-26.
12. Агафонов А.В. и др. ВАНТ, сер. ЯФИ, вып. 4, 5(32, 32), 1997, Харьков, с.137-139.
13. Жигло В.Ф. ВАНТ, сер. ЯФИ, вып. 4, 5(31, 32), 1997, Харьков, с. 32-34.
14. Иванов Г.М., Черенщиков С.А. Тезисы докладов 13-го Харьковского семинара по линейным ускорителям заряженных частиц (Харьков, 25-28 мая 1993 г.), Харьков, 1993, с.27.
15. Вишневецкий А.И., и др. Изв. ВУЗов, сер. Радиоэлектроника, 1968, т.11, № 6, с.555-564.

Статья поступила: в редакцию 25 мая 1998 г.;
в издательство 1 июня 1998 г.