

10;12

## **Формирование пространственно-периодических электронных пучков в системе магнетронных пушек со вторично-эмиссионными катодами**

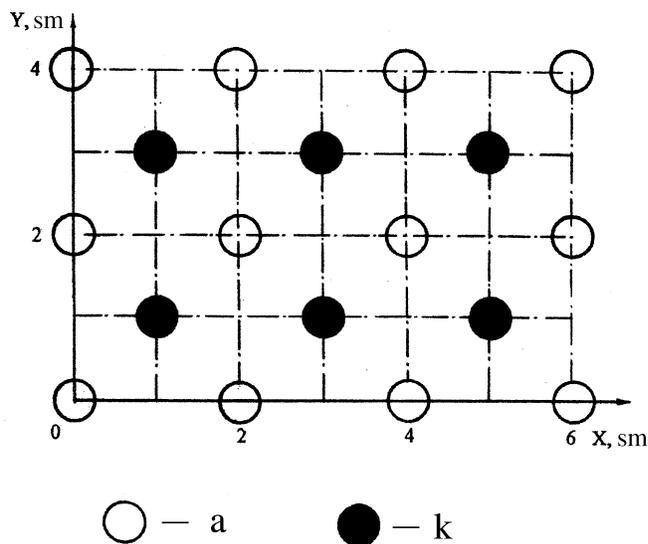
© Н.И. Айзацкий, А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк,  
В.П. Ромасько, Ю.Я. Волколупов, М.А. Красноголовец

НИК "Ускоритель" ННЦ "ХФТИ", Харьков

Поступило в Редакцию 21 мая 2001 г.

Проведено исследование процессов генерации электронного пучка в системе магнетронных пушек со вторично-эмиссионными катодами и анодами в виде периодически расположенных металлических штырей.

1. Магнетронные инжекционные пушки с холодными металлическими вторично-эмиссионными катодами представляют интерес как источники электронов для ускорителей электронов и мощных СВЧ-приборов. Они характеризуются высокой плотностью тока ( $50 \dots 70 \text{ A/cm}^2$ ), большим временем жизни (по оценкам  $\sim 100\,000 \text{ h}$ ) и имеют несложную конструкцию, содержащую цилиндрический катод и трубчатый анод с наложенным на них магнитным полем. Проведенные исследования [1–4] показали, что такие пушки формируют трубчатый электронный пучок с внутренним диаметром, примерно равным диаметру катода, и наружным диаметром, определяемым наложенным магнитным полем и диаметром анода. Геометрия анода определяет распределение электрического поля на катоде и условия вторично-эмиссионного процесса и генерации пучка, а также профиль и наружные размеры пучка. В случае коаксиальной системы с цилиндрическим анодом пучок имеет трубчатую структуру, при небольшой асимметрии пучок приобретает форму серпа с разрывом, находящимся в области наибольшего расстояния анода от катода. При создании систем магнетронных пушек [5] наличие цилиндрических анодов не позволяет уменьшать расстояние между пучками менее диаметра анода и получать систему плотно расположенных пучков на выходе



**Рис. 1.** Схема пространственно-периодической системы магнетронных пушек со штыревыми анодами (а) и катодами (к).

пушек. Этот недостаток можно устранить при расположении анодов в местах пересечения взаимно перпендикулярных линий (в вершинах квадратов), а катодов — в местах пересечения диагоналей, соединяющих аноды. В этом случае распределение электрического поля в зазоре анод-катод будет неоднородным. Процессы вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка в таких системах не изучены. В настоящей работе проведены исследования генерации пучка в магнетронных пушках с холодными металлическими вторично-эмиссионными катодами и анодами, выполненными из металлических штырей.

2. Исследуемая система представлена на рис. 1. Как видно из рисунка, аноды расположены в горизонтальной плоскости, на пересечении осей  $x$  и  $y$ , которые образуют квадраты, а катоды расположены между ними на пересечении диагоналей. В результате образуется пе-

риодическое расположение электронных пушек, число которых можно увеличивать как в одну (пучок близкий к линейному), так и в обе стороны (образуя любую конфигурацию пучка в плоскости  $x, y$ ). Таким образом образуется система ячеек, из которых можно составлять пушки, формирующие заданную конфигурацию пучков. При исследовании генерации пучка в такой геометрии, когда распределение электрического поля существенно отличается от распределения электрического поля в коаксиальной системе, мы предполагаем, что вблизи катода электрическое поле достаточно однородно и возможно выполнение условий вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка.

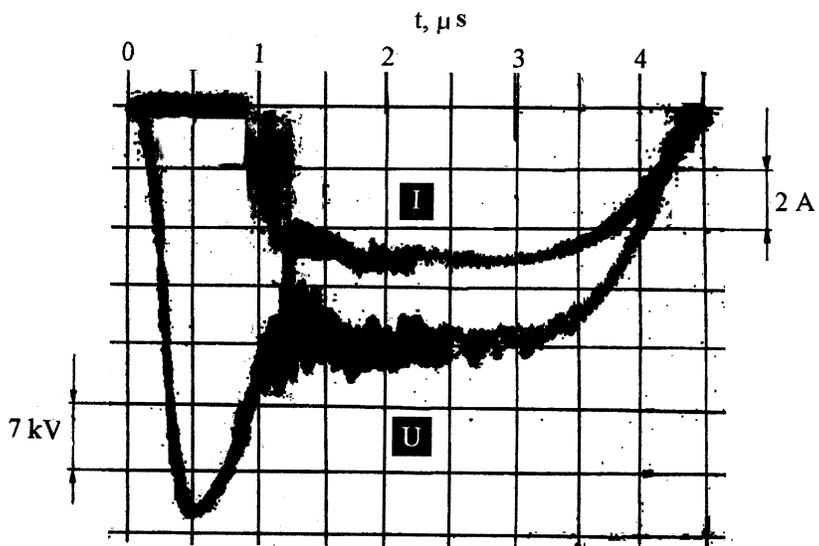
На первом этапе эксперименты проводились с одной ячейкой. Ячейка содержала анод, состоящий из четырех медных штырей диаметром 5 мм, образуя квадрат со стороной 20 мм между центрами штырей. Катод располагался на пересечении диагоналей квадрата, так что расстояние между штырями и катодом составляло  $\sim 9.5$  мм. Использовались катоды с диаметром 2, 5, 16 мм, длина пушки была 120 мм.

На втором этапе исследования проводились с системой пушек, состоящей из 4 ячеек, описанных выше, с катодами и анодами диаметром 5 мм.

Эксперименты проводились на установке, описанной в [2]. Магнетронная пушка питалась от модулятора, формирующего импульс напряжения с амплитудой до 100 кВ, длительностью импульса  $\sim 5 \mu\text{s}$ , частотой следования импульсов 50 Нз. Отрицательный импульс подавался на катод, а штыревые аноды были заземлены. Запуск вторично-эмиссионного процесса осуществлялся на спаде (длительностью 0.6  $\mu\text{s}$ ) специально сформированного выброса на импульсе катодного напряжения. Магнетронная пушка размещалась в вакуумной камере, в которой поддерживалось разряжение  $\sim 10^{-6}$  Торр. Магнитное поле для генерации и транспортировки пучка создавалось соленоидом. В процессе исследований проводились измерения напряжения на катоде и тока электронного пучка на цилиндре Фарадея, а также размеров пучка с помощью отпечатка на алюминиевой и молибденовой фольге.

3. Проведены исследования по генерации электронного пучка и изучены его параметры в одной ячейке при диаметрах катода 2, 5 и 16 мм.

В экспериментах реализовано вторично-эмиссионное размножение и генерация электронного пучка. Изучена зависимость тока пучка на цилиндр Фарадея от напряженности магнитного поля при амплитуде напряжения на катоде 40 кВ и его диаметре 5 мм. При увеличении



**Рис. 2.** Осциллограммы тока пучка  $I$  и напряжения на катоде  $U$ .

магнитного поля ток пучка на цилиндр Фарадея увеличивается, достигая 12 А при напряженности магнитного поля  $\sim 2500$  Ое. Измерено время нарастания тока пучка, которое составляет 5...15 нс, в зависимости от величины магнитного поля. При амплитуде напряжения 28 кВ и напряженности магнитного поля  $\sim 1600$  Ое ток пучка составлял 5,3 А. Аналогичные зависимости получены и для других напряжений на катоде. На рис. 2 показаны типичные осциллограммы импульсов тока пучка и напряжения на катоде.

На интегральном отпечатке пучка, полученном после исследований, в центральной области виден след пучка с наружным диаметром  $\sim 7$  мм и внутренним диаметром  $\sim 5$  мм, который образовался при большой величине напряженности магнитного поля. Ореол пучка (диаметром около 15 мм) соответствует генерации пучка при небольшом значении напряженности магнитного поля, когда электроны могли выходить в про-

межутков между штырями, в направлении, перпендикулярном движению пучка.

При диаметре катода 2 mm также были реализованы условия вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка. При амплитуде напряжения на катоде  $\sim 26$  kV и напряженности магнитного поля  $\sim 3000$  Oe ток пучка на цилиндре Фарадея составлял 2.6 A. На расстоянии 80 mm от пушки отпечаток пучка имел вид кольца с наружным диаметром  $\sim 6$  mm и внутренним  $\sim 3$  mm.

Эксперименты были проведены также с диаметром катода 16 mm. Исследования показали, что ток, идущий на цилиндр Фарадея, мал (0.1 . . . 0.2 A, 40 kV, 1300 Oe). При увеличении магнитного поля процесс вторично-эмиссионного размножения срывается и прекращается ток на цилиндр Фарадея. Это связано с тем, что в условиях малого ( $\sim 4$  mm) межэлектродного расстояния и сильной неоднородности электрического поля не реализуются условия для эффективного вторично-эмиссионного размножения и генерации электронного пучка.

Исследования, проведенные с 4 ячейками, показали, что в такой системе происходят вторично-эмиссионное размножение и генерация электронного пучка в каждой ячейке. При этом суммарный ток пучка на цилиндре Фарадея примерно равен учетверенному значению тока пучка для одной ячейки. Например, при напряжении на катоде  $\sim 28$  kV и напряженности магнитного поля  $\sim 2200$  Oe ток пучка на цилиндр Фарадея составлял  $\sim 22$  A.

Исследования показали, что в некоторых режимах на вершине импульса тока пучка возникают высокочастотные колебания с частотой  $\sim 300$  MHz и выше и с глубиной модуляции  $\sim 15$  . . . 25%. Колебания, возникающие на вершине импульса тока на цилиндр Фарадея, мы связываем со взаимодействием электронов пучка с периодической резонансной структурой, образованной анодными штырями.

4. В системе магнетронных пушек со штыревыми анодами с неоднородным электрическим полем возможны реализация процессов эффективного вторично-эмиссионного размножения электронов и генерация пространственно-периодических пучков. В системе, состоящей из 4 ячеек, получен суммарный ток пучка  $\sim 22$  A, что соответствует учетверенному значению тока пучка для одной ячейки. При этом импульсная мощность в пучке составляла  $\sim 600$  kW. Такие пучки могут быть использованы в многопучковых СВЧ-приборах. Увеличение количества ячеек, ограничивающееся только объемом, в котором су-

шествует магнитного поле, дает возможность получать интенсивные пространственно-развитые потоки электронов, которые могут найти применение в различных приложениях.

## Список литературы

- [1] *Skowron J.F.* // Proc. of the IEEE. 1973. V. 61. N 3. P. 69–101.
- [2] *Волколупов Ю.А., Довбня А.Н., Закутин В.В.* и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 2. С. 98–104.
- [3] *Saveljev Y.M., Sibbett W., Purkes D.M.* // Physics of Plasmas. 1997. V. 4. N 7. P. 2319–2321.
- [4] *Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М.* // ВАНТ. Сер. ЯФИ. 1997. В. 2, 3 (29, 30). Т. 1. С. 134–140.
- [5] *Закутин В.В., Довбня А.Н., Решетняк Н.Г.* и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. В. 3. С. 78–80.