

09;10;11;12

## Формирование электронных пучков в магнетронных пушках с вторично-эмиссионными катодами с большим аспектным отношением

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

Научно-исследовательский комплекс "Ускоритель"  
Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",  
61108 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 21 мая 2001 г.)

Исследована генерация электронных пучков в магнетронных пушках с холодными металлическими вторично-эмиссионными катодами малого диаметра с большим аспектным отношением. Приведены параметры электронных пучков в зависимости от величины электрического и магнитного полей при различных методах формирования импульса напряжения для вторично-эмиссионного размножения электронов и генерации пучка.

### Введение

Исследование магнетронных пушек с холодными металлическими катодами, работающих в режиме вторичной эмиссии [1–8], связано с рядом их преимуществ (большое время жизни, высокая плотность тока, относительная простота конструкции и т.д.), которые дают возможность их использования в качестве источников электронов в ускорительной технике и при создании мощных долговечных СВЧ приборов [2,9–11]. Принцип работы таких пушек основан на обратной бомбардировке катода первичными электронами. При этом происходят процессы вторично-эмиссионного размножения электронов, образования электронного облака и формирования электронного пучка [1–4,8] в скрещенных электрических и магнитных полях. Настоящая работа посвящена исследованиям по генерации пучков в магнетронных пушках с холодными вторично-эмиссионными катодами малого диаметра (2...5 мм).

### Экспериментальная установка и методики исследований

Исследования по генерации пучка в магнетронных пушках с холодными вторично-эмиссионными катодами проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. В этих экспериментах импульс отрицательной

полярности от модулятора 1, формирующего импульс напряжения с амплитудой 4...100 кВ, длительностью 4...10 мкс и частотой следования 50 Нз, подается на катод 5 пушки, а ее анод 6 заземлен через резистор  $R_3$  и подключен к импульсному генератору 2. В первом случае процесс вторично-эмиссионного размножения электронов осуществлялся на спаде импульса напряжения специальной формы, который формировался модулятором 1, во втором — спадом импульса напряжения генератора 2.

Магнетронная пушка с медным катодом диаметром 2 мм и анодом из нержавеющей стали или меди длиной 120 мм размещалась внутри вакуумной камеры 3, которая откачивалась до давления  $\leq 10^{-6}$  Торр.

Магнитное поле для генерации и транспортировки пучка создавалось соленоидом 4, который состоял из 4 секций общей длиной 550 мм, питаемых от отдельных источников тока, что позволяло изменять пространственное распределение магнитного поля и его амплитуду. Транспортировка пучка осуществлялась на расстояние 80...160 мм от среза анода до цилиндра Фарадея.

Измерение тока пучка производилось с помощью цилиндра Фарадея 7, выполненного в виде отрезка коаксиальной линии и резистора  $R_4 = 12 \Omega$ , равного волновому сопротивлению линии, напряжения на катоде — с помощью делителя  $R_1R_2$ , размеров пучка — с помощью отпечатка на рентгеновской пленке и на молибденовой фольге, расположенных на торце коаксиальной линии.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

1) Особенности формирования пучка в магнетронных пушках. В работах [6,8] показано, что в магнетронных пушках с вторично-эмиссионными катодами формируется трубчатый электронный пучок, при этом внутренний диаметр пучка примерно равен диаметру

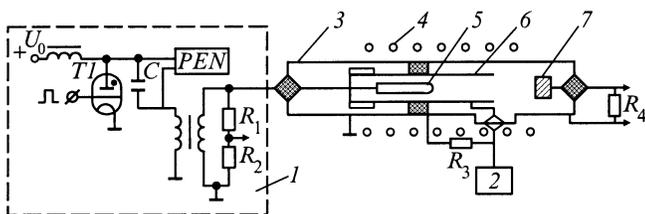


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

тру катода, а толщина стенки составляет 1.5...2 mm. С целью получения малых поперечных размеров пучка в экспериментах исследовалась генерация пучков и измерялись их параметры в одиночных пушках с диаметром катода 2 и 5 mm и диаметрами анодов, равными 10, 22, 50 и 78 mm. В этих экспериментах аспектное отношение ( $R_a/r_c$ ), т.е. величина отношения радиуса анода  $R_a$  к радиусу катода  $r_c$ , изменялась в широких пределах — 5...39. Эта область аспектного отношения практически не исследована.

Необходимое для генерации пучка в магнетронной пушке электрическое поле в промежутке анод–катод должно иметь два временных интервала: первый — участок со спадающим полем, на котором происходит вторично-эмиссионное размножение и формирование облака электронов вокруг катода, и второй — участок с постоянным полем, обеспечивающий стационарную стадию вторично-эмиссионного процесса и генерацию пучка [1,3,8]. Крутизна и длительность спада выброса определяют стабильность генерации пучка и временную нестабильность генерации фронта импульса тока пучка. Величина крутизны спада, которая обеспечивает процесс вторично-эмиссионного размножения, должна превышать 20...30 kV/ $\mu$ s [1,8]. В дальнейшем при постоянной амплитуде вершины импульса наступает стационарная стадия генерации пучка. Неравномерность вершины плоской части импульса может приводить к модуляции импульса тока пучка, или к ее срыву на неравномерных участках вершины импульса напряжения, или к генерации нескольких электронных сгустков в одном импульсе напряжения [8], а также определяет допустимый энергетический разброс электронного пучка. Поэтому при проведении экспериментов уделялось значительное внимание формированию необходимой временной зависимости напряжения между катодом и анодом пушки. Получение заданной зависимости электрического поля от времени между катодом и анодом достигается формированием импульса напряжения специальной формы с выбросом на вершине с коротким спадом и длительной плоской частью на катоде или одновременной подачей двух импульсов напряжения на катод и анод, формирующих заданное электрическое поле.

2) Формирование заданной зависимости электрического поля от времени. Первый метод основан на формировании импульса катодного напряжения специальной формы с выбросом на вершине. В модуляторе с полным разрядом формирующей линии импульс напряжения с выбросом на вершине и плоской его частью можно получать с помощью корректирующей емкости  $C$  (рис. 1), подключенной параллельно формирующей линии [12]. Изменяя значение  $C$ , можно регулировать амплитуду выброса. В этом случае генератор 2 отключен. Формирующая линия (PFL) имела волновое сопротивление 40  $\Omega$ , длительность импульса на полувысоте 4.5  $\mu$ s. Импульс напряжения модулятора на «холостом ходу» при отсутствии корректирующей емкости имел выброс  $\sim 25\%$  от амплитуды плоской

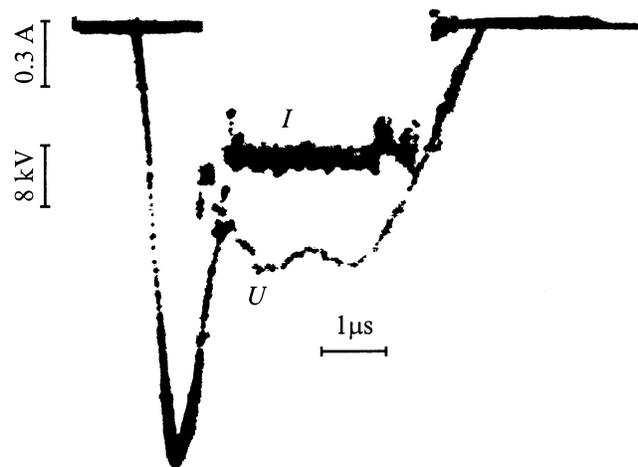


Рис. 2. Осциллограммы тока пучка и напряжения на катоде.

части импульса напряжения, что оказалось недостаточно для генерации пучка. При подключении корректирующей емкости  $C = 7.5$  nF амплитуда выброса возрастала до 50%, а при  $C = 15$  nF амплитуда выброса составляла 80% от амплитуды импульса напряжения. Крутизна спада при этом составляла соответственно 25 и 40 kV/ $\mu$ s при длительности спада 0.6  $\mu$ s, что было достаточно для развития процесса вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка. Возможен также другой способ формирования импульса — это суммирование на общей нагрузке — катоде двух импульсов напряжения: длительного импульса с плоской вершиной и короткого импульса с крутым спадом и получение импульса напряжения, близкого по форме к описанному выше.

На рис. 2 приведена типичная осциллограмма импульса напряжения на катоде ( $U$ ) и импульса тока пучка ( $I$ ) на цилиндре Фарадея для приведенной схемы формирования импульсов напряжения для пушки с диаметрами катода 2 mm и анода 50 mm. При амплитуде напряжения на плоской части  $\sim 32$  kV ток пучка составлял 0.6 А (при магнитном поле  $\sim 800$  Oe), а крутизна спада составляла  $> 40$  kV/ $\mu$ s. Видно, что процесс вторично-эмиссионного размножения начинается на спаде выброса импульса напряжения, а на плоской части импульса — стационарная стадия генерации пучка. Следует отметить, что, как видно из осциллограмм, на спаде выброса достаточно большая часть электронов имеет энергию, превышающую их энергию на стационарной стадии генерации пучка, что расширяет энергетический спектр пучка. Для уменьшения энергетического разброса частиц пучка и сокращения времени нарастания импульса тока пучка необходимо уменьшать длительность и увеличивать крутизну спада. Для достижения этой цели необходимо использовать другую схему формирования импульсов.

Второй метод — это суммирование в зазоре анод–катод электрических полей двух импульсов: длительного импульса с плоской вершиной, подаваемого на катод,

и короткого импульса с крутым спадом, подаваемого на анод пушки, для получения заданной зависимости суммарного электрического поля от времени [6]. Импульс напряжения достаточно большой длительности с плоской вершиной от модулятора 1 (при отключенной емкости  $C$ ) подается на катод пушки. Генератор 2 подключается к сопротивлению  $R_3$ , и импульс напряжения малой длительности с коротким спадом поступает на анод пушки с задержкой во времени. В зазоре анод-катод эти импульсы создают необходимую для генерации пучка зависимость электрического поля от времени. В этой схеме разделение цепей подачи импульсов позволяет использовать для передачи импульса от генератора 2 на анод широкополосную передающую линию. При этом длительность спада импульса на аноде, обеспечивающая процесс вторично-эмиссионного размножения и синхронизацию импульсов тока пучка может достигать нескольких наносекунд, а крутизна спада иметь величину  $\sim 1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$ .

3) Исследование процессов генерации пучков и измерение их параметров. Исследования параметров пучков производились с использованием обоих методов формирования импульса напряжения. Эксперименты показали, что амплитуда тока пучка на цилиндре Фарадея имеет пороговую зависимость от крутизны спада и не зависит от схемы возбуждения вторично-эмиссионного процесса. На рис. 3 приведена зависимость тока на цилиндре Фарадея от амплитуды напряжения на катоде пушек при указанных выше диаметрах анодов. Видно, что результаты измерений согласуются с расчетом по закону « $3/2$ ». В процессе измерений, в каждой точке, величина магнитного поля устанавливалась по максимальному значению тока пучка. Например, в пушке с диаметром катода 2 мм и анода 50 мм при амплитуде напряжения на катоде 50 кВ получен тока

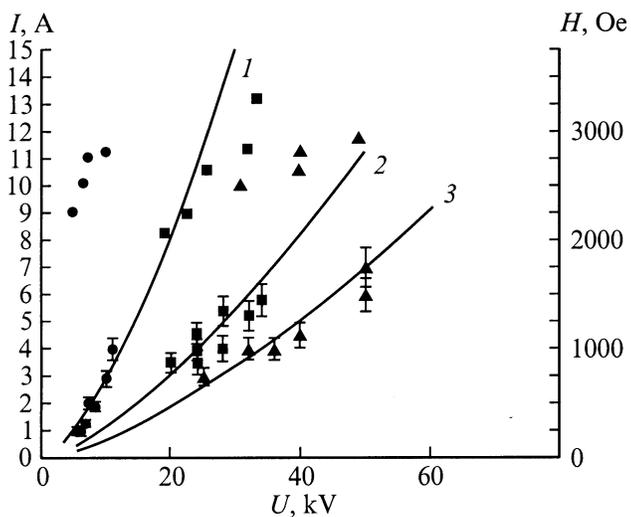


Рис. 3. Зависимость тока пучка от напряжения на катоде при различных диаметрах анода. Диаметр анода, мм: 1 — 10, 2 — 22, 3 — 50. Диаметр катода 2 мм.

$d, \text{ mm}$	$D, \text{ mm}$	$U, \text{ kV}$	$I, \text{ A}$	$H, \text{ Oe}$
2	50	40...55	0.8	800...1200
2	50	40...55	7	2500
2	78	40...55	1.0	700...1200
5	50	45...55	0.5	1150
5	50	45...55	1.0	1300
5	50	45...55	10	2200
5	78	26	0.5	350
5	78	26	3	1100

пучка 7 А, что соответствует импульсной мощности в пучке 350 кВ и микропервансу  $\sim 0.6$ . Напряженность магнитного поля при этом составляла 2900 Ое.

Проведены исследования по генерации электронных пучков в магнетронных пушках с диаметром катодов 2 и 5 мм и диаметрами анодов 50 и 78 мм в зависимости от величины магнитного поля. Показано, что при диаметре катода 2 мм, амплитуде напряжения плоской части импульса 40...55 кВ и небольших магнитных полях (700...1200 Ое) наблюдается генерация электронных пучков с током 0.5...1.5 А (поле отсечки Хелла в этом случае составляло соответственно  $\sim 600$  и  $\sim 400$  Ое). При этом наружный диаметр пучка составлял  $\sim 15$  мм. При увеличении магнитного поля до 2500...3000 Ое получены электронные пучки с током 5...7 А при величине магнитного поля 2500...3000 Ое. В этом случае пучок магнетронной пушки с диаметром катода 2 и анода 50 мм на расстоянии 130 мм от среза анода имел наружный диаметр 4 и внутренний 2 мм. Аналогичные результаты получены и для диаметра катода 5 мм и тех же диаметрах анода.

Были проведены расчеты при энергии электронов 60 кВ и токе пучка 10 А, при этом наружный диаметр пучка составлял 5 мм. Расчеты показали, что в пределах изменения энергетического разброса электронов в пучке от 0 до  $\pm 20\%$  диаметр пучка при его транспортировке в спадающем магнитном поле на расстоянии до 150 мм увеличивается не более чем на 20%, что согласуется с результатами экспериментов. В таблице приведены значения тока на цилиндре Фарадея  $I$ , напряжения на катоде  $U$ , напряженности магнитного поля  $H$ .

Как следует из приведенных результатов, при небольших магнитных полях ларморовский радиус электронов достаточно велик, но электроны при своем движении набирают энергию, достаточную для вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка. Электронный слой занимает значительную область межэлектродного пространства вблизи катода в поперечном направлении. При этом провисание потенциала в промежутке катод-анод, связанное с пространственным зарядом электронного слоя, обеспечивает процесс вторично-эмиссионного размножения и генерацию пучка на стационарной стадии работы пушки. При больших магнитных полях ларморовский радиус уменьшается и поперечные размеры электронного слоя вблизи катода существенно мень-

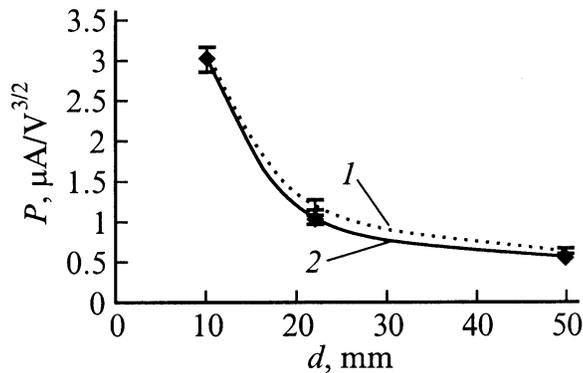


Рис. 4. Зависимость микропервеанса пучка от диаметра анода: 1 — расчет, 2 — эксперимент.

ше. В этом случае провисание потенциала сильнее и это обеспечивает набор энергии электронов до необходимой для развития процесса вторично-эмиссионного размножения на меньшей длине. Это позволяет также иметь больший пространственный заряд электронного слоя и, как следствие, больший ток пучка. Как следует из вышеприведенного, в пушках с большим аспектным отношением, по-видимому, существует широкая зона (или несколько зон внутри нее) генерации пучка в зависимости от магнитного поля с различными поперечными размерами и величиной тока пучка.

На рис. 4 приведена зависимость микропервеанса пучка магнетронной пушки (с диаметром катода 2 mm) от диаметра анода. Видно, что величина микропервеанса изменяется в широких пределах, а результаты измерений хорошо согласуются с зависимостью первеанса от диаметра анода как  $1/(R_a - r_c)$ . Это можно объяснить тем, что зависимость электронного тока в протяженном цилиндрическом диоде при постоянном напряжении на катоде и достаточно большом аспектном отношении ( $R_a/r_c > 5$ ) обратно пропорциональна радиусу анода (см., например, [13]). В этом случае величине тока на цилиндре Фарадея определяется двумя факторами. Первый фактор — это количество электронов в промежутке катод–анод вдоль оси пушки, которое зависит от напряженности электрического поля на катоде и от радиуса анода. Второй фактор — влияние выходного участка анода, играющего роль электростатической линзы для вывода электронного пучка из пушки. При постоянной амплитуде напряжения на катоде второй фактор слабо зависит от диаметра анода, поскольку краевое электрическое поле вблизи оси имеет большую продольную составляющую и электроны успевают набрать значительную энергию до области анода, где имеется большая поперечная составляющая электрического поля. Поэтому амплитуда тока на цилиндре Фарадея в каждом случае будем зависеть только от количества электронов в промежутке катод–анод, что определяется радиусом анода и иллюстрируется рис. 4.

## Заключение

Проведенные исследования показывают возможность запуска вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка при различных методах формирования импульсов напряжения. Экспериментально показано существование широкой зоны магнитного поля для генерации пучков в магнетронных пушках с большим аспектным отношением. При напряженности магнитного поля  $\sim 2500$  Oe получены электронные пучки с наружным радиусом  $\sim 4$  mm и энергий частиц 5...60 keV.

## Список литературы

- [1] Ломакин В.М., Панченко Д.В. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1970. Вып. 2. С. 33–42.
- [2] Skowron J.F. // Proc. IEEE. 1973. Vol. 61. N 3. P. 69–101.
- [3] Черенищikov С.А. // Электронная техника. Сер. 1. 1973. № 6. С. 20–28.
- [4] Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М. // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 2, 3 (29, 30). С. 134–140.
- [5] Saveliev Y.M., Sibbett W., Parkes D.M. // Phys. Plasmas. 1997. Vol. 4. N 7. P. 2319–2321.
- [6] Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г. и др. // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования (35). 1999. Вып. 4. С. 34–35.
- [7] Айзацкий Н.И., Довбня А.Н., Закутин В.В. и др. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 1999. Вып. 111. С. 59–63.
- [8] Довбня А.Н., Закутин В.В., Решетняк Н.Г. и др. // ЖТФ. 2001. Т. 1. Вып. 2. С. 227–234.
- [9] Иванов Г.М., Махненко Л.А., Опанасенко А.Н., Черенищikov С.А. ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 4,5 (31, 32). С. 40–42.
- [10] Вигдорчик В.М., Науменко В.Д., Тимофеев В.П. // ДАН УССР. Сер. А. Физико-математические и технические науки. 1975. № 7. С. 633–636.
- [11] Науменко В.Д., Черенищikov С.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. XXVII. № 2. С. 250–256.
- [12] Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
- [13] Власов В.Ф. Электрорадиотехника. М.: ГИЛ, 1949. 519 с.