

10;11,12

Быстрое формирование электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным металлическим катодом

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

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

(Поступило в Редакцию 26 февраля 2001 г. В окончательной редакции 13 марта 2002 г.)

Проведено исследование начальной стадии формирования электронного слоя и генерации электронного пучка в магнетронных пушках при запуске вторично-эмиссионного процесса наносекундными импульсами. В пушках с малыми поперечными размерами получены трубчатые пучки электронов с наружным диаметром 4...6 мм и током 1...2 А при напряжении на катоде 5...10 кВ. Полученные результаты показывают возможность формирования электронного облака и генерации фронта импульса тока пучка за время ≥ 2 нс.

Введение

В последние годы широкий интерес вызывает исследование источников электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии в скрещенных электрическом и магнитном полях [1–5]. Интерес к таким источникам связан с рядом достоинств (большое время жизни, высокая плотность тока, относительная простота конструкции и т.д.), которые дают возможность использования магнетронных пушек с холодными вторично-эмиссионными катодами в ускорительной технике, при создании мощных долговечных СВЧ источников [5] и быстродействующей высоковольтной техники [6]. Процесс формирования электронного пучка в таких источниках происходит следующим образом. На спаде импульса катодного напряжения первичные электроны (возникающие за счет автоэмиссии или внешней инжекции), возвращаемые магнитным полем бомбардируют поверхность катода. При своем движении по циклоидальным траекториям к катоду электроны набирают энергию, пропорциональную изменению электрического поля за время пролета. При определенных условиях, когда энергия падающих электронов становится достаточной для достижения коэффициента вторичной эмиссии больше единицы, начинается процесс вторично-эмиссионного размножения и при дальнейшем лавинообразном увеличении числа электронов вокруг катода образуется электронный слой, из которого происходит вытягивание электронов и формирование пучка. В работе проведено изучение вопроса о времени формирования пространственного заряда электронного слоя и временной стабильности генерации пучка в магнетронных пушках при длительности спада 2...10 нс.

Экспериментальная установка и методики исследования

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Магнетронная пушка с медным катодом 5 и анодом 6 из нержавеющей стали длиной

120 мм размещается внутри вакуумной камеры 3, которая откачивалась до давления $\leq 10^{-6}$ Торр. Аксиальное магнитное поле в пушке создавалось соленоидом 4. Импульс напряжения отрицательной полярности U_c от модулятора 1, амплитудой 4...100 кВ, длительностью 2...10 μ s и частотой следования 10...50 Hz подается на катод 5 магнетронной пушки, а ее анод 6 через резистор R_3 заземлен или присоединен к генератору 2. Использовались два метода создания спадающего электрического поля. В первом использовался прямоугольный импульс модулятора 1, процесс вторично-эмиссионного размножения осуществлялся на спаде импульса напряжения генератора 2 (длительность импульса 2...40 нс, амплитуда 3.5 кВ на нагрузке 50 Ω , длительность переднего фронта и спада ~ 1 нс), который подавался на анод 6. Во втором для осуществления вторично-эмиссионного размножения использовался спад (длительностью $\sim 0.6 \mu$ s) специально сформированного выброса на вершине импульса напряжения модулятора 1 [5] (генератор 2 при этом отключался). Это позволило осуществить эксперименты и выполнить измерения при длительности спада от 2 до 600 нс и крутизне спада напряжения от 20 до 1200 кВ/ μ s. Измерение тока пучка и размеров пучка производилось на расстояниях до 180 мм от среза анода с помощью

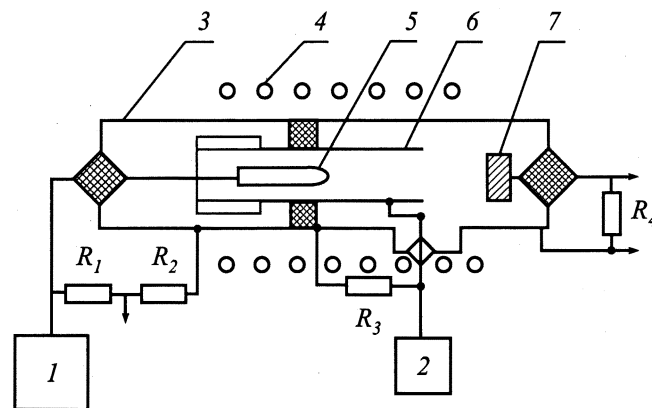


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

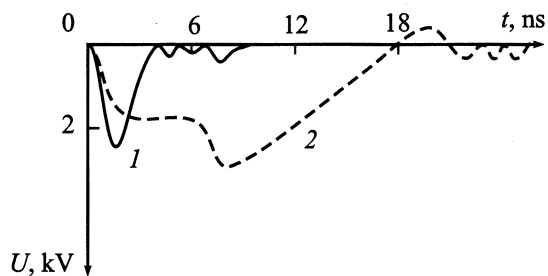


Рис. 2. Осциллограммы запускающего импульса между катодом и анодом пушки. 1 — длительность 2 ns, 2 — длительность 11 ns.

цилиндра Фарадея 7, выполненного в виде отрезка коаксиальной линии длиной ~ 40 см, и резистора R_4 , разного волновому сопротивлению линии 18 Ohm, измерение напряжения на катоде — с помощью делителя R_1R_2 , размеров пучка — с помощью отпечатка на рентгеновской пленке и на молибденовой фольге.

Для осуществления вторично-эмиссионного процесса при наносекундных импульсах от генератора 2 необходимо учитывать искажения их формы в передающих цепях. На описанной установке в цепь передачи импульса запуска входят коаксиальный кабель, высоковольтный изолятор, вакуумная линия передачи, конструкция крепления анода пушки. С целью определения реальной формы импульса были проведены измерения его параметров между анодом и катодом пушки. На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов, полученные для двух случаев. В первом случае длительность импульса генератора составляла ~ 2 ns, а во втором — ~ 6 ns. Сигналы регистрировались осциллографом И2-7 (полоса пропускания ≈ 3000 MHz). Осциллограммы показывают, что короткий импульс практически не изменил форму, его время спада составляло ~ 2 ns, а более длинный деформировался, длительность его спада увеличилась и составила ~ 11 ns.

В проведенных экспериментах взрывная электронная эмиссия с катода отсутствовала. Это было проверено при подаче импульса напряжения амплитудой до 70 kV на катод пушки. При этом (при магнитном поле, равном нулю) ток с катода отсутствовал, а на вершине импульса катодного напряжения не наблюдалось спада, характерного для взрывной эмиссии (вследствие закорачивания промежутка анод–катод металлической плазмой сопротивление промежутка близко к нулю, ток определяется мощностью источника питания, а напряжение между катодом и анодом также близко к нулю).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследование генерации пучка производилось при различных параметрах импульса запуска вторично-эмиссионного размножения.

В экспериментах, выполненных при длительности спада импульса запуска $\sim 0.6 \mu\text{s}$ и крутизне спада 20...50 kV/ μs (второй метод), начало процессов вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка происходили через промежуток времени $\sim 100 \dots 500$ ns (в зависимости от условий эксперимента) от начала спада импульса напряжения. При такой небольшой крутизне спада количество первичных электронов должно быть значительным, так как лишь небольшая часть этих электронов набирает энергию, достаточную для процесса вторично-эмиссионного размножения. Поэтому процесс накопления первичных электронов в этом случае длительный по времени и носит статистический характер с разбросом десятки наносекунд, что определяет временную нестабильность начала токового импульса и энергетический разброс частиц в пучке. С другой стороны, длительность фронта импульса тока пучка определяется также крутизной спада запускающего импульса, поэтому в этих экспериментах длительность фронта импульса тока пучка составляла десятки наносекунд.

Для улучшения временной стабильности, сокращения длительности фронта импульса и уменьшения разброса энергий электронов в пучке необходимо увеличивать крутизну спада импульса запуска и уменьшать его длительность.

С этой целью были проведены эксперименты, при которых запуск процесса вторично-эмиссионного размножения осуществлялся импульсами (рис. 2) с наносекундной длительностью спада (первый метод). В этих экспериментах электронный пучок возникал через $\sim 1.5 \dots 2$ ns в первом случае и через ~ 10 ns во втором случае после начала спада амплитуды импульса запуска. Это также наблюдалось по уменьшению амплитуды импульса напряжения на катоде за счет нагрузки пучком. На рис. 3 приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде и тока пучка с цилиндра Фарадея, полученного в магнетронной пушке с диаметром катода 2 mm и диаметром анода 10 mm. При этом временная нестабильность начала импульса тока пучка не превышает длительности спада импульса запуска и достигает единиц наносекунд.

В таблице приведены результаты исследований, где d_c , D_a — соответственно диаметры катода и аноды пушки; U_c — напряжение на катоде; I — ток пучка; U , τ — соответственно амплитуда и длительность спада импульса запуска; H — магнитное поле. В процессе измерений амплитуда напряжения на катоде изменялась в пределах, ограниченных развитием пробоя между катодом

№ пушки	d_c , mm	D_a , mm	U_c , kV	I , A	H , Oe	U , kV	τ , ns
1	2	7	6	1.4	3000	2.4	2
2	2	10	5.5	1	2200	4	12
3	2	10	7.3	1.6	2400	3	11
4	3	14	7.6	2	1400	3	14

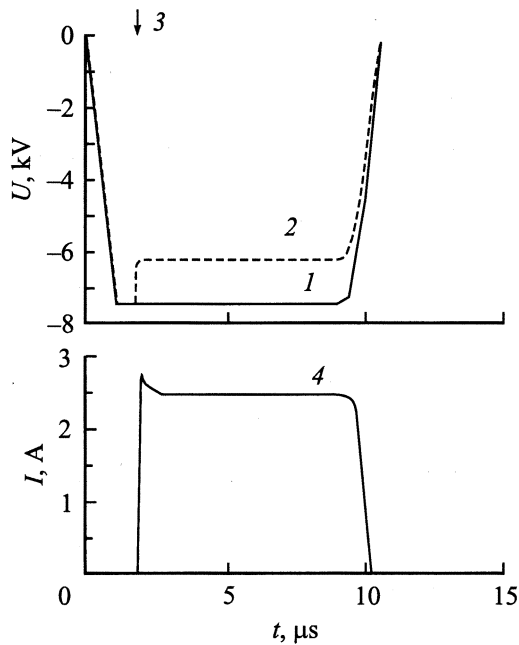


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока пучка на цилиндре Фарадея (4) и катодного напряжения без пучка (1) и с подгрузкой током пучка (2). Момент подачи запускающего импульса показан стрелкой 3.

и анодом пушки (в зависимости от конфигурации пушки максимальная амплитуда составляла 15...25 kV). В таблице указаны значения той минимальной амплитуды напряжения, при которой еще сохраняется генерация пучка, что представляет интерес с практической точки зрения, поскольку характеризует те минимальные значения напряжения, при которых происходит процесс вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка. Это связано с возможностью использования таких пушек в относительно низковольтных источниках электронов для СВЧ-приборов. С другой стороны, для медного катода, энергия первичных электронов бомбардирующих катод, должна быть $\sim 0.4 \dots 0.6$ keV. При этих энергиях электронов коэффициент вторичной эмиссии достигает максимума и процессы вторично-эмиссионного размножения протекают весьма интенсивно. В этом случае энергия первичных электронов составляет $\sim 10\%$ от энергии электронов на выходе пушки, что представляет интерес с точки зрения формирования и устойчивости электронного слоя, а также электронного пучка со значительным энергетическим разбросом частиц.

Исследование генерации пучка в зависимости от крутизны спада показало, что эта зависимость имеет пороговый характер. Как видно из таблицы, запуск магнетронной пушки 1 и генерация пучка происходили при крутизне спада более 1000 kV/ μ s, а для магнетронной пушки 2 — при крутизне спада более 300 kV/ μ s. Аналогичные зависимости получены для магнетронных пушек 3 и 4. При наносекундных временах запуска для устойчивой генерации пучка крутизна спада должна

иметь значительно большую величину, чем при длительности спада $0.4 \dots 0.6$ μ s.

При запуске пушки импульсом напряжения с наносекундным спадом улучшается энергетический спектр пучка за счет уменьшения количества высокоэнергетических электронов, образованных на спадающей части импульса, и уменьшения их энергетического разброса за счет малой его амплитуды.

Экспериментальные результаты находятся в удовлетворительном согласии с результатами численного моделирования процессов формирования электронного слоя в скрещенных полях. Расчеты, проведенные авторами [5], а также в работах [7,8], показывают, что электроны на спаде напряжения импульса запуска за время $1 \dots 2$ ns могут набирать энергию, достаточную для развития процесса вторично-эмиссионного размножения. При таком быстром спаде напряжения число первичных электронов невелико, однако за счет большой крутизны спада импульса напряжения они за небольшое число гиропериодов приобретают достаточно большую энергию, при которой коэффициент вторичной эмиссии больше единицы и процесс вторично-эмиссионного размножения идет достаточно интенсивно.

Измерение поперечных размеров пучка показало, что в обоих случаях пучки в поперечном сечении имеют вид колец с равномерным распределением интенсивности по азимуту и с внутренним диаметром, примерно равным диаметру катода, с толщиной „стенки“ $1 \dots 2$ mm. Например, пучок магнетронной пушки 2 на расстоянии 130 mm от среза анода имел наружный диаметр 4 mm и внутренний 2 mm. Пучок пушки 4 на расстоянии 55 mm от среза анода имел наружный диаметр ~ 6 mm и внутренний ~ 2.5 mm.

Выводы

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что возможно накопление облака пространственного заряда и генерация электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом за время ~ 2 ns. Это позволяет формировать импульсы тока пучка с наносекундными временами нарастания и осуществлять синхронизацию импульсов тока пучка с наносекундной точностью. При напряжении на катоде $5 \dots 10$ kV и магнитном поле $1900 \dots 3000$ Oe получены трубчатые пучки электронов с током $1 \dots 2$ A с наружным диаметром $4 \dots 6$ mm.

Список литературы

- [1] Skowron J.F. // Proc. IEEE. 1973. Vol. 61. N P. 69–101.
- [2] Черенищikov С.А. // Электронная техника. Сер. 1. 1973. № 6. С. 20–28.
- [3] Zakutin V.V., Dovbnya A.N., Reshetnyak N.G. et al. // Proc. of the 1997 PAC/Ed. Comyn M., Craddock M.K., Reiser M., Thomson J. Vancouver, 1997. Vol. 3. P. 2820–2822.

- [4] *Saveliev Y.M., Sibbett W., Parkes D.M.* // Phys. Plasmas. 1997. Vol. 4. N 7. P. 2319–2321.
- [5] *Волколупов Ю.А., Довбня А.Н., Закутин В.В.* и др. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 98–104.
- [6] *Вишнеvский А.И., Солдатенко А.И., Шендаков А.И.* // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1968. Т. 11. № 6. С. 555–564.
- [7] *Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1997. Вып. 2,3 (29, 30). Т. 1. С. 134–140.
- [8] *Агафонов А.В., Тараканов В.П., Федоров В.М.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования (35). 1999. № 4. С. 11–13.