

Краткие сообщения

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

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники,
61726 Харьков, Украина

(Поступило в Редакцию 30 октября 2000 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 наружным диаметром 3...6 мм с током 1...2 А при напряжении на катоде 5...7 кВ. Полученные результаты показывают возможность генерации импульсов тока пучка с наносекундной точностью.

Введение

В последние годы широкий интерес вызывает исследование источников электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии в скрещенных электрическом и магнитном полях [1–4]. 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 вторично-эмиссионными катодами при создании мощных долговечных СВЧ источников [5] и быстродействующей высоковольтной техники [6]. В работе проведено изучение вопроса о времени формирования пространственно заряда и временной стабильности генерации пучка в магнетронных пушках в диапазоне 1...10 ns.

Экспериментальная установка и методики исследования

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Импульс отрицательной полярности U_c от модулятора 1, формирующего прямоугольный импульс напряжения с амплитудой 4...100 кВ, длительностью 2...10 μ s и частотой следования 10...50 Hz, подается на катод 5 пушки, а ее анод 6 заземлен через резистор R_3 . Запуск вторично-эмиссионного процесса осуществлялся спадом импульса напряжения. В одном случае использовались два импульсных генератора 2: первый — с амплитудой напряжения $U = 2...15$ кВ и длительностью спада $\tau \sim 70$ ns, второй — с амплитудой импульса 3.5 кВ на нагрузке 50 Ω и длительностью фронта и спада импульса ~ 1 ns. В другом случае для запуска вторично-эмиссионного размножения использовался спад (длительностью 0.6 μ s) специально сформированного выброса на вершине импульса напряжения [5]. Это позволяло

при проведении экспериментов изменять длительность спада от 2 до 600 ns и крутизну спада напряжения от 20 до 1200 кВ/ μ s. Магнитное поле напряженностью $H \leq 3000$ Ое создавалось соленоидом 4. Измерение тока пучка и размеров пучка производилось на расстояниях до 180 mm от среза анода с помощью цилиндра Фарадея 7, выполненного в виде отрезка коаксиальной линии длиной ~ 40 см, и резистора R_4 , равного волновому сопротивлению линии 18 Ω , измерение напряжения на катоде — с помощью делителя R_1R_2 ; размеров пучка — с помощью отпечатка на рентгеновской пленке и на молибденовой фольге. Магнетронная пушка с медным катодом и анодом из нержавеющей стали длиной 120 mm размещается внутри вакуумной камеры 3, которая откачивалась до давления $\leq 10^{-6}$ Торр.

При запуске вторично-эмиссионного процесса наносекундными импульсами необходимо учитывать искажения их формы в передающих цепях. На описанной установке в цепях передачи импульса запуска вторично-эмиссионного размножения входят коаксиальный кабель, высоковольтный изолятор, вакуумная линия передачи, конструкция крепления анода пушки. С целью определения реальной формы наносекундного импульса запус-

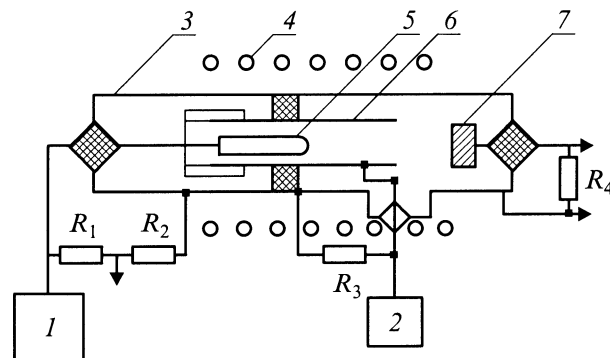


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

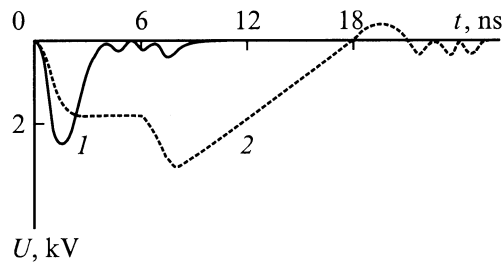


Рис. 2. Осциллограммы запускающего импульса между катодом и анодом пушки. Длительность, ns: 1 — 2, 2 — 11.

ка были проведены измерения его параметров между анодом и катодом пушки с учетом влияния паразитных индуктивностей и емкостей. 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 и время спада его увеличилось и составляло ~ 11 ns.

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 ~ 0.6 μ s и крутизне спада $20 \dots 50$ kV/ μ s, начало процессов вторично-эмиссионного размножения и генерации пучка происходило 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 пучка необходимо увеличивать крутизну спада импульса запуска и уменьшать его длительность.

С этой целью были проведены эксперименты, при которых запуск процесса вторично-эмиссионного раз-

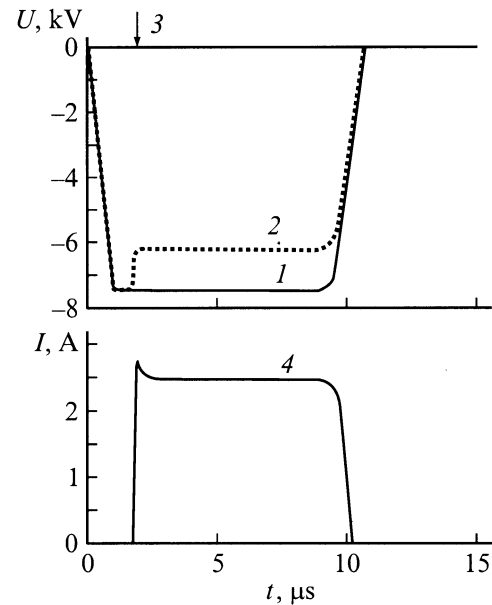


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока пучка на цилиндре Фарадея (4) и катодного напряжения без пучка (1) и с подгрузкой током пучка (2). Момент подачи запускающего импульса показан стрелкой 3.

множения осуществлялся импульсами с наносекундной длительностью спада (рис. 2) и крутизной спада более 300 kV/ μ s. В этих экспериментах электронный пучок возникал через $\sim 1.5 \dots 2$ ns в первом случае и через ~ 10 ns во втором случае после спада амплитуды импульса запуска. Это также наблюдалось по "подгрузке" импульса напряжения на катоде (рис. 3). На этом рисунке приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения на катоде и тока пучка с цилиндра Фарадея, полученного в магнетронной пушке (диаметр катода 2 mm, диаметр 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. Здесь: d_c, D_a — соответственно диаметры катода и анода 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 и анодом пушки (в зависимости от конфигурации пушки максимальная амплитуда составляла $15 \dots 25$ kV). В та-

№ пушки	d_c , mm	D_a , mm	U_c , kV	I , A	H , Oe	U , kV	τ , ns
1	2	7	7	1.9	3000	2.4	2
2	2	10	5	0.8	1900	4	13
3	2	10	7	1.6	2100	3	11
4	3	14	8	2.3	1400	3	14

ближе 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 тем, что 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. При наносекундной длительности спада для устойчивой генерации пучка крутизна спада должна иметь значительно большую величину, чем при большой длительности спада. Так, запуск магнетронной пушки 1 и генерация пучка происходили при крутизне спада более $1000 \text{ kV}/\mu\text{s}$, а для магнетронной пушки 2 — при крутизне спада более $300 \text{ kV}/\mu\text{s}$, что более чем на порядок превышает значения крутизны, полученные для длительности спада $0.6 \mu\text{s}$. Аналогичные зависимости получены для магнетронных пушек 3 и 4.

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

Экспериментальные результаты находятся в удовлетворительном согласии с результатами численного моделирования процессов формирования электронного слоя в скрещенных полях. Расчеты, проведенные в данной работе, 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 гироспериодов 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, с внутренним диаметром, примерно равным диаметру катода, и с толщиной "стенки" $1 \dots 1.5$ mm. Например, пучок магнетронной пушки 2 на расстоянии 180 mm от среза анода имел наружный диаметр 4 mm и внутренний 2 mm.

Выводы

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что возможно накопление облака пространственного заряда и генерации электронного пучка в магнетронной пушке с вторично-эмиссионным катодом за время ~ 2 ns. Это позволяет осуществлять синхронизацию импульсов тока пучка с наносекундной точностью. При напряжении на катоде $5 \dots 7$ kV и магнитном поле $1900 \dots 3000$ Oe получены трубчатые пучки электронов с током $1 \dots 2$ A и наружным диаметром $3 \dots 6$ mm.

Список литературы

- [1] Ломакин В.М., Панченко Л.В. // Электронная техника. Сер. 1. 1970. № 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] Dobbnya A.N., Zakutin V.V., Reshetnyak N.G. et al. // Proc. the 5th EPAC / Ed. Myers A. Pacheco, R. Rascual et al. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 1996. Vol. 2. P. 1508–1509.
- [5] Zakutin V.V., Dobbnya A.N., Reshetnyak N.G. et al. // Proc. 1997. PAC / Ed. M. Comyn, M.K. Craddock, M. Reiser, J. Thomson. Vancouver, 1997. Vol. 3. P. 2820–2822.
- [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. Т. 1. Вып. 2, 3 (29, 30). 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.