

О турбулентных электронных пучках, формируемых магнетронно-инжекторными пушками

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, А.В. Муштаков

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: StarodubovAV@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 27 апреля 2010 г. В окончательной редакции 1 ноября 2010 г.)

Проведено детальное экспериментальное исследование генераторов с магнетронно-инжекторной пушкой (МИП). Анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что генераторы с МИП обладают значительным преимуществом перед другими устройствами, так как позволяют получать достаточно мощные широкополосные шумоподобные сверхвысокочастотные колебания. Это объясняется тем, что магнетронно-инжекторные пушки формируют турбулентные электронные пучки практически на выходе из области пушки.

Введение

В настоящее время опубликовано много работ, посвященных исследованию сложной нелинейной динамики, включая режимы хаотической генерации, явления синхронного поведения приборов и устройств СВЧ электроники [1–7]. В ряде работ отмечается [5,6,8,9], что приборы, в которых используется магнетронно-инжекторная пушка, всегда демонстрируют высокий уровень шума. Ранее большинство исследований было направлено на то, чтобы всеми возможными способами уменьшить аномально высокий шум в таких приборах. В настоящее время в связи с появлением новых способов передачи информации, радиолокации, а также потребностей обрабатывающей промышленности шумоподобные широкополосные сигналы приобретают еще ряд важных прикладных назначений [2–4] помимо классических задач радиопротиводействия и радиоподавления.

В работе [9] приведены некоторые экспериментальные результаты исследования основных режимов поведения системы при использовании пучков, формируемых магнетронно-инжекторной пушкой (МИП). В настоящей работе рассмотрены результаты более детального экспериментального исследования структуры пучка и выходных характеристик генераторов с МИП.

Экспериментальная установка

Объектом исследования выступал макет МИП (рис. 1, *a*), в котором использовался катод конической формы с эмитирующим металлопористым термопояском шириной 1–3 мм, управляющие электроды и анод. Ширина зазора анод-коллектор составляла 3 мм. Угол наклона поверхности катода к оси составлял 15°. Для анализа колебательных явлений, измерения спектральной плотности мощности шума в пучках с МИП использовался анализатор, представляющий собой отрезок спиральной замедляющей системы, закрепленной в экране с помощью керамических стержней и согласованный с выводом энергии. За анализатором располагался

коллектор электронов (высокочастотный зонд), который через согласующие элементы соединялся с выводом энергии. Магнитное поле в исследуемом макете создавалось постоянными магнитами, максимальная величина напряженности магнитного поля составляла 0.15 Т.

В макете была предусмотрена возможность продольного и поперечного перемещения магнитной фокусирующей системы. Измерения проводились в импульсном режиме: длительность импульса составила 50 мкс, скважность 16 000 мкс. На другие электроды МИП на-

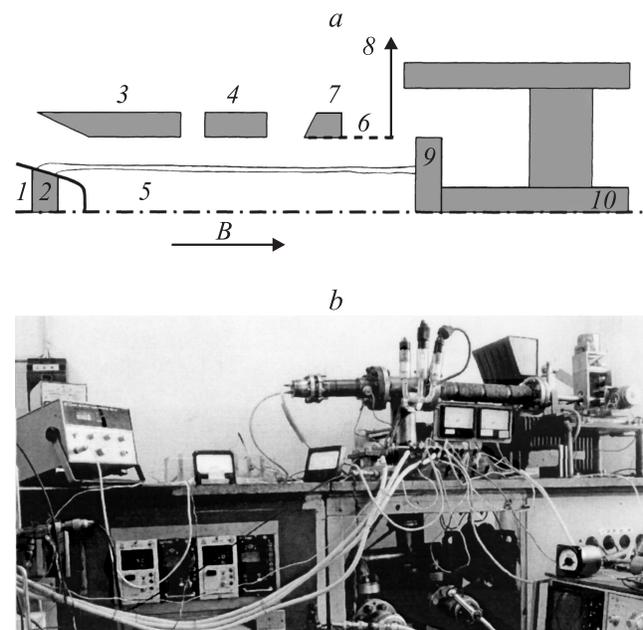


Рис. 1. *a* — магнетронно-инжекторная пушка гиротронного типа. 1 — катод, 2 — эмитирующий пояс, 3 — управляющий электрод, 4 — анод, 5 — электронный пучок, 6 — отрезок спирали, 7 — поглощающая вставка, 8 — вывод энергии, 9 — высокочастотный зонд (коллектор), 10 — центральный проводник ВЧ зонда. *b* — фотография экспериментальной разборной вакуумной установки для исследования лабораторных макетов низковольтных викаторов с магнетронно-инжекторными пушками.

пряжения подавались от источников постоянного напряжения.

Были проведены исследования структуры пучка, формируемого МИП, выходной интегральной мощности и полосы генерации от величины магнитного поля. Экспериментальные исследования структуры электронного пучка были проведены с помощью разборной вакуумной установки, изображенной на рис. 1, *b*. Установка включает в себя полый цилиндрический отсек — пролетный канал, в который помещались элементы магнетронно-инжекторной пушки, отрезок замедляющей системы и коллектор. В пролетном канале давление остаточных газов составляло 10^{-4} – 10^{-5} Па. Для исследования распределения плотности тока в электронном пучке, формируемом МИП, в пролетный канал вместо коллектора вводился подвижный зонд с диафрагмой и коллектором в виде цилиндра Фарадея. Диафрагма имела отверстие диаметром $50\ \mu\text{m}$. Зонд перемещался в трех взаимно перпендикулярных плоскостях на расстоянии 150 – $200\ \text{mm}$ от пушки. В каждом сечении пучка фиксировалась величина максимальной плотности тока j_{max} и сравнивалась с этой величиной на выходе из МИП (рис. 2). Используемая разборно-вакуумная установка позволяла перемещать зонд не только в продольной плоскости, но и в поперечной. При перемещении зонда с погрешностью $\pm 0.05\ \text{mm}$ с помощью шаговых двигателей ШД-4 в поперечной плоскости пучка было проведено измерение плотности тока в различных точках поперечного сечения. Методика проведения экспериментальных исследований соответствовала методике, описанной в работе [10].

Результаты экспериментальных исследований

Результаты, приведенные на рис. 2, 3, получены при ширине термопояска $1\ \text{mm}$. На рис. 2 представлено распределение максимальной плотности тока вдоль пролетного канала, измеренной при различных величинах магнитного поля. Видно, что при некоторых значениях магнитного поля увеличиваются как значения максимальной плотности тока, так и колебания этой величины вдоль пролетного канала. Это говорит о том, что в пучке образуются интенсивные сгустки пространственного заряда.

На рис. 3 представлено распределение плотности пространственного заряда в поперечном сечении пучка на расстоянии $4\ \text{mm}$ от катода. Из рисунка хорошо видна азимутальная неоднородность электронного пучка, которую он приобретает уже практически на выходе из области пушки. Механизм образования сгустков пространственного заряда в поперечном сечении пучка подробно описан в [10]. Таким образом, анализ рис. 2 и 3 показывает, что в системах с МИП имеет место образование сгустков пространственного заряда не только в плоскости (r, z) , но и в плоскости (r, φ) . Пространственно-временные колебания этих сгустков

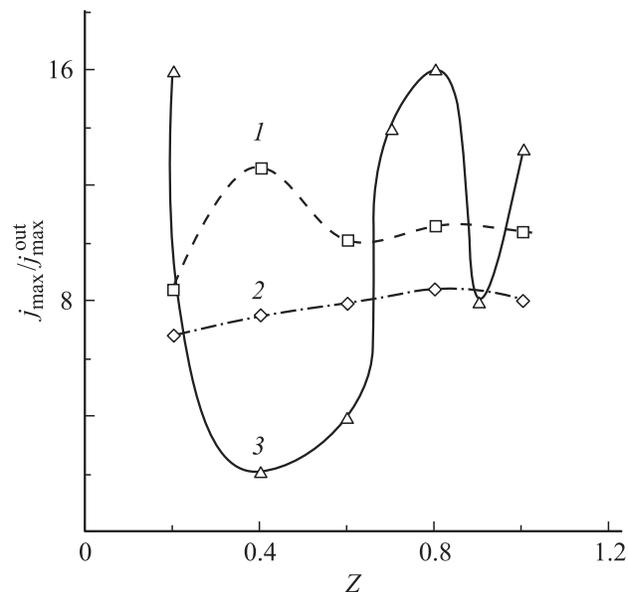


Рис. 2. Изменения максимальной плотности тока пучка вдоль длины дрейфа. 1 — $B = 0.04$, 2 — 0.02 , 3 — $0.056\ \text{T}$.

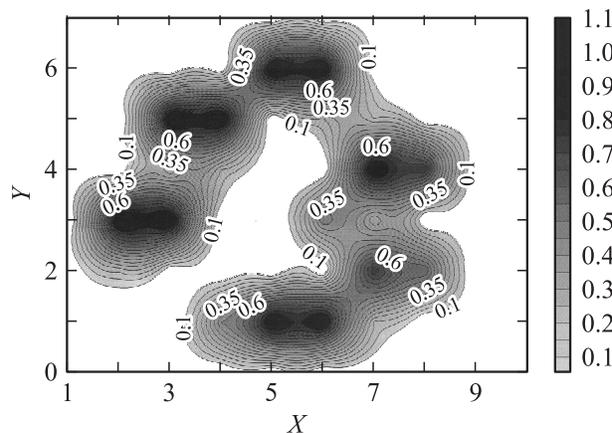


Рис. 3. Качественное изображение в безразмерных координатах (X, Y) сгустков электронов в поперечном сечении пучка на расстоянии $4\ \text{mm}$ от катода. В градациях серого изображена плотность пространственного заряда (в безразмерных единицах). Справа от рисунка приведена шкала градуировки величины плотности пространственного заряда в градациях серого.

являются причиной генерации шумоподобных колебаний в подобных системах [11,12].

Таким образом, электронный пучок в системах с МИП является принципиально турбулентным, что связано с особенностями его формирования в области пушки. Можно предположить, что такая неоднородность электронного пучка, генерируемого МИП, связана с различными характеристиками групп электронов, эмитируемых с разных концов термопояска катода, которые приобретают различные по модулю и по направлению скорости. Таким образом, происходит некоторое расхождение электронного пучка: скорость и направление

Таблица 1. Зависимость плотности тока j_{\max}/j_0 и количества сгустков N пространственного заряда от ширины термопояска катода h

Ширина эмитирующего термопояска h , mm	Плотность тока h_{\max}/j_0	Количество сгустков пространственного заряда N
1	6	34
2	14	112
3	22	184

эмитируемых электронов будут зависеть от того, с какой части термопояска они были эмитированы. Различие в характеристиках эмитируемых электронов (направление их скорости и модуль скорости) будет возрастать, если увеличивать ширину эмитирующего термопояска катода. Последнее должно приводить к еще большему возрастанию неоднородной в электронном пучке, к еще большему его расслоению. Для детального рассмотрения данного вопроса и подтверждения сделанных предположений было проведено исследование зависимости плотности тока, а также количества сгустков пространственного заряда от ширины эмитирующего термопояска катода.

В табл. 1 представлены данные, характеризующие зависимости плотности тока и количества сгустков пространственного заряда от ширины эмитирующего термопояска h . Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что с увеличением ширины термопояска наблюдается рост как плотности тока, так и количества сгустков пространственного заряда. Другими словами, турбулентность электронного пучка проявляется тем больше, чем больше ширина эмитирующего термопояска катода. В пространстве дрейфа такой пучок становится сильно неламинарным, что приводит к образованию

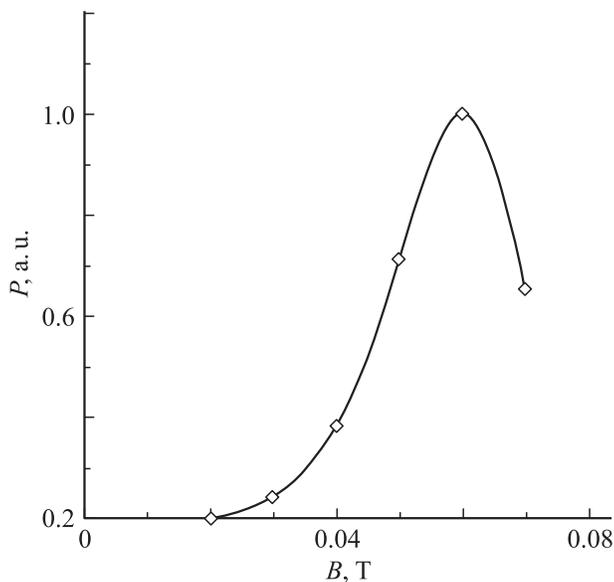


Рис. 4. Зависимость выходной интегральной мощности (в безразмерных единицах, нормирована на максимальное значение) от величины магнитного поля B .

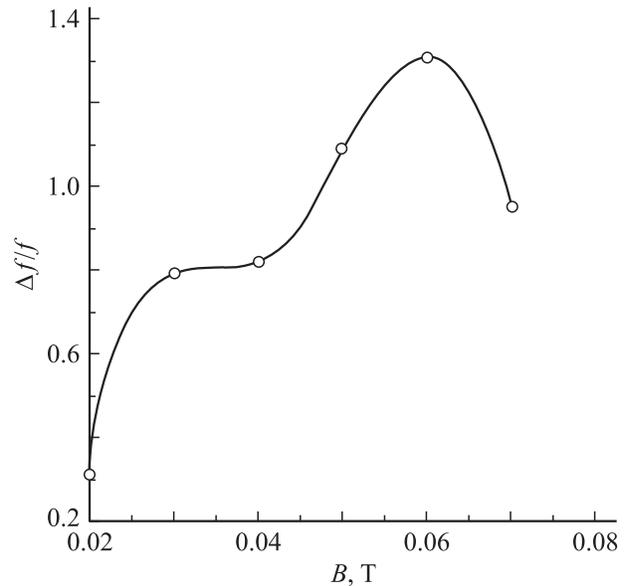


Рис. 5. Зависимость полосы генерации шумоподобных СВЧ колебаний от величины магнитного поля B .

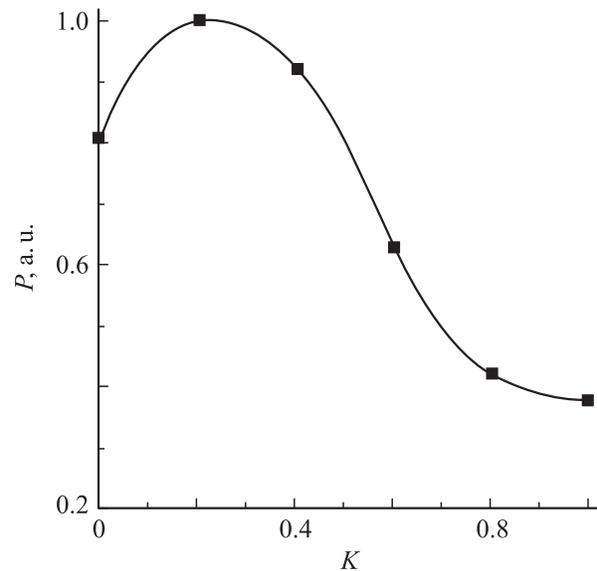


Рис. 6. Зависимость выходной интегральной мощности (в безразмерных единицах, нормирована на максимальное значение) от величины коэффициента торможения K .

большого числа сгустков плотности пространственного заряда.

Перейдем теперь к рассмотрению экспериментальных результатов исследования выходных характеристик генераторов с МИП. Рис. 4–6 получены при ширине эмитирующего термопояска 1 mm. На рис. 4 представлена зависимость выходной интегральной мощности от величины магнитного поля. Видно, что при $B = 0.05–0.06$ Т наблюдается максимум выходной интегральной мощности, что хорошо согласуется с результатами, представленными на рис. 2.

Таблица 2. Зависимость выходной интегральной мощности P и относительной полосы генерации $\Delta f/f$ от ширины термопояска катода h при значении коэффициента торможения $K = 1$

Ширина эмитирующего термопояска h , mm	Интегральная выходная мощность, P , W	Относительная полоса генерации, $\Delta f/f$
1	8	0.18
2	31	0.6
3	70	1.6

Таблица 3. Зависимость выходной интегральной мощности P и относительной полосы генерации $\Delta f/f$ от ширины термопояска катода h при значении коэффициента торможения $K = 0.4$

Ширина эмитирующего термопояска h , mm	Интегральная выходная мощность, P , W	Относительная полоса генерации, $\Delta f/f$
1	14	0.5
2	52	1.62
3	120	2.8

На рис. 5 представлена зависимость полосы генерации от величины магнитного поля. Представленный на данном рисунке результат подтверждает, что наличие интенсивных сгустков плотности пространственного заряда приводит к увеличению полосы и мощности генерации шумоподобных колебаний. Отметим, что максимальная мощность достигает 47.25 W при значении микропервенса пучка 2.58 и КПД 21%.

Для дальнейшего анализа полученных результатов экспериментальных исследований введем в рассмотрение параметр торможения электронного пучка K . Данный параметр определяется отношением величины напряжения на коллекторе U_k к величине ускоряющего напряжения U_0 : $K = 1 - (U_k/U_0)$. На рис. 6 представлена зависимость выходной интегральной мощности генерируемых сигналов от коэффициента торможения K . Из рисунка видно, что зависимость мощности генерации от K достаточно слабая, однако можно сделать вывод о том, что максимальная мощность генерации наблюдается при значениях параметра K , близких к 0.5.

В табл. 2–5 приведены результаты экспериментальных исследований характеристик и параметров низковольтного виркатора с МИП. В табл. 2 представлены результаты исследования выходной интегральной мощности P и относительной полосы генерации от ширины термопояска h . Эти результаты получены с использованием отрезка замедляющей системы при потенциале коллектора, равном ускоряющему потенциалу ($K = 0$, торможение электронного пучка отсутствует). Полученные данные свидетельствуют о том, что увеличение ширины термопояска приводит к резкому возрастанию тока и выходной мощности, а также к существенному расширению полосы генерации.

В табл. 3 приведены данные по зависимости мощности и ширины полосы генерации при подаче тормозящего потенциала на коллектор ($K = 0.4$). Из представленных экспериментальных данных следует, что наличие тормозящего потенциала приводит к увеличению мощности шумоподобных колебаний и расширению полосы частот генерации. Зависимость перепада мощности $S = A_{\max}/A_{\min}$ в спектре выходного сигнала от ширины термопояска и величины тормозящего потенциала представлена в табл. 4. Анализ представленных в таблице данных показывает, что перепады мощности уменьшаются при увеличении ширины термопояска и увеличении тормозящего потенциала до величины $K = 0.5$. Значение S составляет 3.7 dB при $K = 0.5$. При больших значениях тормозящего потенциала величина S возрастает до 6–8 dB. Зависимости максимальной частоты в спектре выходного сигнала от толщины термопояска и величины тормозящего потенциала приведены в табл. 5. Из таблицы следует, что максимальная частота генерации составляет около 4.5 GHz.

Таким образом, из представленных в табл. 2–5 данных можно сделать вывод о том, что ширина полосы термопояска значительно влияет на характеристики генерируемых сигналов: с ростом ширины термопояска наблюдается рост мощности и ширины полосы частот генерируемых сигналов, а также увеличение максимальной частоты генерации. Более того, с увеличением ширины термопояска уменьшается перепад мощности в спектре выходного сигнала. Полученный результат объясняется тем, что с увеличением ширины эмитирующего термопояска наблюдается рост как плотности тока, так и количества сгустков пространственного заряда (см. табл. 1), пространственно-временные колебания ко-

Таблица 4. Зависимость перепада мощности в спектре выходного сигнала S от ширины термопояска катода h при различных значениях коэффициента торможения K

Ширина эмитирующего термопояска h , mm	Перепад мощности в спектре выходного сигнала S , dB			
	$K = 0$	$K = 0.2$	$K = 0.5$	$K = 0.8$
1	12	9.2	7.4	13.1
2	7.8	7.1	5.2	7.8
3	6.4	6	3.5	6.3

Таблица 5. Зависимость максимальной частоты генерации f_{\max} от ширины термопояска катода h при различных значениях коэффициента торможения K

Ширина эмитирующего термопояска h , mm	Максимальная частота генерации f_{\max} GHz			
	$K = 0$	$K = 0.2$	$K = 0.5$	$K = 0.8$
1	0.63	0.81	1.6	1.2
2	1.23	1.5	2.5	2.1
3	1.52	1.9	4.55	2.85

торых являются источниками мощных широкополосных микроволновых шумов [11,12].

Выводы

Таким образом, анализ полученных экспериментальных результатов показывает, что, с одной стороны, отсутствуют противоречия с уже имеющимися данными по экспериментальным исследованиям СВЧ генераторов на турбулентных электронных пучках [11,12]. С другой стороны, генераторы с МИП обладают значительным преимуществом перед другими устройствами, так как позволяют получать достаточно мощные широкополосные шумоподобные СВЧ колебания. Причинами аномально высокого уровня шумов в генераторах с МИП являются: образование сгустков пространственного заряда в плоскостях (r, z) и (r, φ) ; пучок, формируемый МИП, состоит из различных слоев электронов (расслоенные пучка), имеющих разные характеристики (модуль и направление скорости, плотность и т.п.).

Преимущества генераторов с МИП могут быть использованы при разработке и создании современных систем шумовой радиолокации, систем передачи информации, а также для решения классических вопросов радиопротиводействия и радиоподавления. Целый ряд технологических процессов (например, обезвоживание, очистка и повышение качества нефти и нефтепродуктов, органический синтез с использованием поглощения СВЧ энергии, промышленная сушка веществ, медицинские задачи и т.п.) также представляется перспективной областью применения генераторов с МИП.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 11-02-00047-а, № 10-02-00256-а, президентской программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ 3407.2010.2) и аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)“ (РНП 2.1.1/235).

Список литературы

- [1] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003–2004.
- [2] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [3] Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
- [4] Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 1 / Под ред. А.А. Курасова, Д.И. Трубецкова; Т. 2 / Под ред. А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова. М.: Физматлит, 2009.
- [5] Банеман Г. // Электронные СВЧ приборы со скрещенными полями. 1961. Т. 1. С. 179–203.
- [6] Ушеревич Б.Л. // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. 1969. Вып. 7. 49 с.
- [7] Pikoisky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization: a universal concept in nonlinear sciences. Cambridge, University Press, 2001.
- [8] Алямовский И.В. Интенсивные электронные потоки. М.: Уч. изд., 1991.
- [9] Калинин Ю.А., Кожевников В.Н., Лазерсон А.Г., Александров Г.И., Железовский Е.Е. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 7. С. 83–91.
- [10] Калинин Ю.А., Ессин А.Д. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ электронике. Ч. 1. Саратов: Изд-во СГУ, 1991. 212 с.
- [11] Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 12. С. 880–85.
- [12] Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 19. С. 852–58.