





## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ШИРОКОПОЛОСНЫХ ШУМОПОДОБНЫХ СВЧ-КОЛЕБАНИЙ НА МНОГОСКОРОСТНЫХ НЕЛАМИНАРНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКАХ

*Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Н.Н. Кузнецов, Ю.И. Левин*

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований многоскоростных электронных пучков. Показано, что в таких электронных пучках формируется турбулентность, приводящая к возникновению множественных сгустков пространственного заряда, которые являются источниками широкополосных шумоподобных колебаний. Приведены результаты экспериментального исследования малогабаритного лабораторного макета генератора, в основу которого положены принципы формирования и использования многоскоростных турбулентных электронных пучков.

*Ключевые слова:* Вакуумная СВЧ-электроника, генераторы широкополосных шумоподобных колебаний, многоскоростной электронный пучок, турбулентность, физический эксперимент.

1. В настоящее время такие источники широкополосных шумоподобных сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний как приборы на виртуальном катоде (виркаторы) достаточно широко известны. Различные схемы сверхвысоковольтных и низковольтных виркаторов рассмотрены, например, в работах [1–5]. На наш взгляд, имеются некоторые общие принципы, которые объединяют вышеуказанные приборы виркаторного типа. Это, прежде всего, использование многоскоростных электронных пучков, приводящее к их турбулизации и образованию сгустков пространственного заряда. Существующее между сгустками пространственного заряда пространственно-временное взаимодействие создает условие для формирования электронной обратной связи и, следовательно, приводит к генерации. Доказательством этого механизма служит тот факт, что генерация обнаруживается в тех случаях, когда потенциал в пространстве взаимодействия не достигает потенциала катода (условие образования виртуального катода), а значительно превышает его [6]. Кроме того, создав многоскоростной пучок, легче затормозить его небольшим понижением потенциала коллектора-отражателя. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что в диоде, через который распространяется замедляющийся электронный

поток, возникает неустойчивость колебаний в СВЧ-диапазоне. Эта неустойчивость имеет место, когда в стационарном состоянии минимум потенциала в диоде не образуется, и может быть использована, например, для повышения КПД генерации при осуществлении обратной связи по электронному потоку в приборах виркаторного типа [6].

**2.** Перейдем к рассмотрению вопросов формирования многоскоростных электронных пучков. Известно, что разброс начальных (поперечных и продольных) скоростей электронов, обусловленный нагревом катода и действием пространственного заряда, достаточно мал и не превышает долей процента от среднего значения. Этот разброс увеличивается до значений процента при работе катода в режиме температурного ограничения. Таким образом, для получения большего разброса электронов по скоростям необходимо использовать другие физические механизмы изменения скорости электронов.

**2.1.** Одним из способов, позволяющих добиться большого разброса электронов по скоростям, является применение управляющей сетки. Суть данного способа заключается в следующем. В непосредственной близости у катода располагается сетка, на которую подается потенциал, существенно больший «естественного» («естественный» потенциал равен потенциалу эквипотенциали, на которую помещается сетка). Действие ячеек сетки на электроны приводит к тому, что электроны, прошедшие через центральную часть ячейки и вблизи краев, приобретают разные скорости как по модулю, так и по направлению. Другими словами, ячейка сетки играет роль своего рода рассеивающей линзы для электронных пучков, проходящих через нее. Разброс электронов по скоростям может достигнуть 2–3 %. С целью защиты управляющей сетки от перегрева перед ней располагается экранирующая сетка, находящаяся под потенциалом катода, витки которой закрывают витки управляющей сетки [7].

Увеличение разброса электронов по скоростям осуществляется структурой, состоящей из нескольких радиальных сеток (рис. 1). Первая сетка 2 является экранирующей и ее витки закрывают витки второй сетки 3 – управляющей. Экранирующая сетка находится под потенциалом катода 1 и защищает управляющую сетку от перегрева. Управляющая сетка имеет потенциал, равный ускоряющему потен-

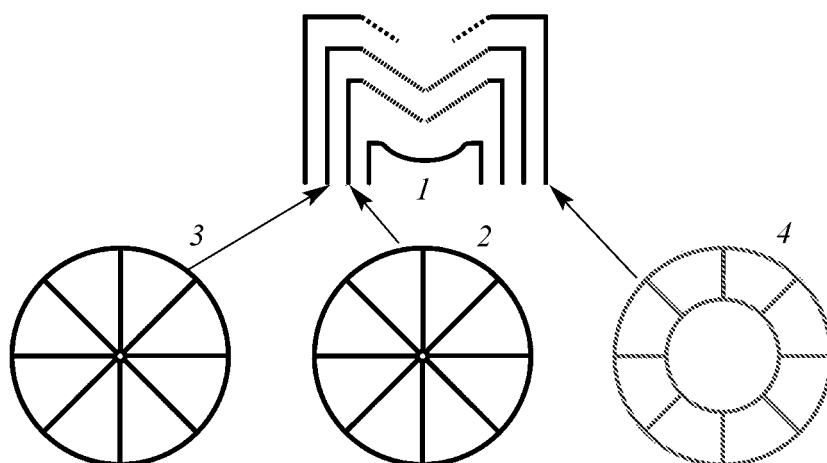


Рис. 1. Конструкция сеточной структуры с радиальными сетками у катода: 1 – катод, 2 – экранирующая сетка, 3 – управляющая сетка, 4 – тормозящая сетка

циалу  $U_0$ . После управляющей сетки располагается третья сетка 4, причем витки третьей сетки расположены таким образом, что она оказывает воздействие только на периферийные электроны. Чтобы оказывать тормозящее действие на электроны, проходящие через витки третьей сетки, на нее *подается потенциал, меньший ускоряющего*. Таким образом, в данной конструкции можно добиться *существенно больших* значений разброса электронов по скоростям. Эти значения будут определяться соотношением потенциалов на второй (управляющей) и третьей (тормозящей) сетках.

**2.2.** Еще одним способом, позволяющим увеличить разброс электронов по скоростям, является использование неоднородного магнитного поля. Изменение поперечного (углового) момента количества движения электронов в неоднородном магнитном поле приводит к увеличению разброса электронов по скоростям [8]. В случае медленно нарастающего магнитного поля создаются условия для получения больших значений углового момента количества движения. В результате азимутальная скорость электронов будет увеличиваться, а продольная уменьшаться. При этом приосевые электроны практически не изменят своей скорости, а периферийные замедлятся, что и приводит к большому разбросу электронов по скоростям в поперечном сечении пучка. Происходит смещение электростатических пульсаций в различных слоях электронного пучка, огибающая пучка утрачивает пульсирующий характер, что ведет к перемешиванию слоев с переходом в неламинарность (турбулентность). Образуются сгустки пространственного заряда, которые взаимодействуют друг с другом. Эти сгустки неустойчивы во времени и пространстве. Они совершают интенсивные пространственно-временные колебания, которые являются источниками широкополосного шумоподобного излучения в СВЧ-диапазоне.

**2.3.** Таким образом, многоскоростной электронный пучок в неоднородном магнитном поле образует места с повышенной плотностью заряда (электронные сгустки). Как правило, такие сгустки возникают вблизи периферии пучка, где сходятся в один объем много электронных траекторий. Сплошной пучок становится близким к трубчатому (полуму). Следует ожидать, что плотность тока в области сгустка значительно возрастает относительно среднего значения. Наличие скрещенных электрических и магнитных полей формирует силы, приводящие к смещению электронов в направлении перпендикулярном векторам напряженностей обеих полей. За счет такого смещения пучок изгибается, а затем разделяется на отдельные «струи», в поперечном сечении имеющие S-образную форму. При этом чем сильнее первоначальная неоднородность, тем ярче проявляются указанные эффекты. Другими словами, трубчатым электронным пучкам присущ механизм нарастания первоначальных возмущений плотности пространственного заряда.

**2.4.** Еще одним фактором, значительно влияющим на разброс электронов по скоростям, является наличие тормозящего электрического поля. В этом случае часть электронов многоскоростного пучка возвращается в область катода, усиливая таким образом электронную обратную связь. Отраженные электроны при этом попадают в область сгустков пространственного заряда и, в силу их небольшой скорости, существенно увеличивают плотность тока в области сгустка. Такие плотные сгустки пространственного заряда очень неустойчивы, они разрушаются, возникая в других местах пространства.

**2.5.** Кратко коснемся влияния положительных ионов на формирование плотных сгустков пространственного заряда. Здесь необходимо учесть то, что мы имеем дело с двумя процессами, влияние на пространственный заряд которых противоположно. С одной стороны, наличие положительных ионов в электронных пучках позволяет более длительное время удерживать электронные сгустки от развала, что способствует увеличению плотности тока в сгустке и более длительному его существованию. Понятно, что повышение плотности интенсивно колеблющихся электронных структур положительно скажется в итоге на мощности и полосе генерации. С другой стороны, положительные ионы компенсируют отрицательный заряд электронных сгустков. Таким образом, в настоящее время пока затруднительно однозначно выделить доминирующее влияние положительных ионов на сгустки пространственного заряда в рассматриваемом многоскоростном электронном пучке. Данный вопрос требует более детального как экспериментального, так и теоретического изучения, в том числе, с использованием численного моделирования.

**3.** Перейдем к рассмотрению результатов численного моделирования. Расчет непараксиальных неламинарных траекторий электронных пучков проводился на основе решения уравнений движения электронов в цилиндрических координатах [8–9]. Предполагается, что пучок электронов является аксиально-симметричным. В модели электронный пучок разбивается на  $N$  заряженных слоев толщиной  $dr$ , вложенных друг в друга, каждый из которых заменяется бесконечно тонким заряженным цилиндром. Каждому цилиндру присваивается ток  $j$ . Решая уравнения движения, можно получить представление о форме траекторий пучка. Для подсчета напряженности электрического поля, созданного пространственным зарядом, была использована теорема Гаусса. Описанная расчетная модель является приемлемой, поскольку в рассматриваемой задаче исследуется аксиально-симметричный электронный пучок. Следует подчеркнуть, что данная модель является одной из возможных для описания электронных пучков с аксиальной симметрией. Компьютерные расчеты показали, что данная модель позволяет качественно описать внутреннюю структуру турбулентного электронного пучка. Система уравнений решалась численно методом Рунге–Кутты 4-го порядка с шагом  $h = 0.01$  [8]. Заметим, что теоретически электроны аксиально-симметричного пучка не могут пересекать ось, так как при подходе электронов к оси силы электрического расталкивания неограниченно возрастают. Чтобы сгладить подобную сингулярность, в нашей модели вводится приосевой слой толщиной  $\varepsilon = 0.001$ . Если траектория попадает в этот слой, то знак ее тангенса угла наклона меняется на противоположный и траектория тем самым отражается от оси. Такой метод сглаживания данной сингулярности является приемлемым в силу условия аксиальной симметрии пучка. Используемая модель позволяет задавать потенциалы на входе и выходе пространства взаимодействия, соответствующие ускоряющему напряжению и тормозящему потенциалу коллектора, а также задать начальный разброс электронов по скоростям на входе в пространство взаимодействия и величину внешнего магнитного поля. Величина начального скоростного разброса определяется параметрами электронной пушки и соотношением напряжений на ускоряющей и замедляющей сетках. При проведении численного моделирования величина разброса электронов по скоростям, входящих в пространство взаимодействия, была выбрана равной 50%. Расчет проводился для значений тока пучка от 200 до 800 мА и напряжениях, соответствующих рассмотренным в эксперименте режимам. Метод

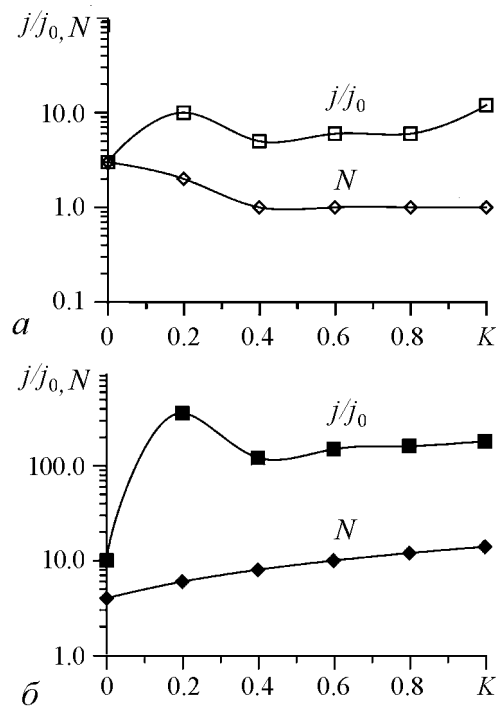


Рис. 2. Результаты численного моделирования зависимостей плотности тока  $j/j_0$  в электронных сгустках и их количества  $N$  от коэффициента торможения электронного пучка  $K$ : *а* – случай отсутствия начального разброса по скоростям, *б* – случай наличия начального разброса по скоростям. Магнитное поле  $B = 0.05$  Тл, ток пучка  $I = 0.2$  А

зависимость имеет место и при наличии неоднородного магнитного поля  $B_0 = 0.05$  Тл (рис. 2, б). Была исследована зависимость плотности тока в сгустках пространственного заряда и количества сгустков пространственного заряда от амплитуды магнитного поля  $B_0$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что с ростом амплитуды неоднородного магнитного поля наблюдается рост как плотности тока в сгустках пространственного заряда, так и их количество. Исследование зависимости плотности тока в сгустках пространственного заряда и количества сгустков пространственного заряда от тока пучка  $I$  показали, что в достаточно большом интервале изменений значений тока пучка  $I$  (до значений  $I_{max} = 0.8$  А) наблюдается слабое изменение как плотности тока в сгустках, так и их количество.

4. Рассмотрим результаты экспериментальных исследований. Принципиальная схема исследуемого макета генератора широкополосных шумоподобных колебаний представлена на рис 3, а. В лабораторном макете генератора использовался оксидный катод 1 диаметром 18.3 мм. Расстояние между катодом 1 и экранирующей сеткой 2 составляло 1 мм. Расстояние между экранирующей сеткой 2 и управляющей сеткой 3 составило 1.8 мм. Расстояние между управляющей сеткой 3 и тормозящей сеткой 4 составило 2.3 мм. В макете использовались сетки с проницаемостью 92%. Длина пространства взаимодействия в лабораторном макете составила 60 мм, диаметр трубы дрейфа 54 мм. Диаметр съемника б СВЧ-энергии 32 мм. Внешнее магнитное поле формировалось полем соленоида. Качественный вид распределения магнитного поля представлен на рис. 3, б. Питание лабораторного макета осуществлялось

позволяет строить траектории движения частиц в пространстве взаимодействия, а также определять плотность тока в заданной точке, рассчитывая число частиц попавших в эту точку.

Как уже было отмечено выше, для формирования плотных сгустков пространственного заряда необходим начальный разброс электронов по скоростям. Были проведены исследования зависимости плотности тока  $j_{max}/j_0$  (где  $j_0$  – среднее значение плотности тока) и числа сгустков  $N$  от параметра торможения электронного пучка  $K$ , который определяется следующим образом:

$$K = 1 - U_{col}/U_0,$$

где  $U_{col}$  – потенциал, подаваемый на коллектор;  $U_0$  – ускоряющее напряжение. В случае отсутствия внешнего магнитного поля установлено, что при токе пучка  $I = 0.2$  А и ускоряющем напряжении  $U_0 = 700$  В плотность тока в сгустках при наличии начального разброса электронов по скоростям возрастает в 10 и более раз (рис. 2, а). Аналогичная зависимость

в непрерывном режиме. Ускоряющее напряжение варьировало в диапазоне  $U_0 = 700 - 1000$  В при токе до 200 мА, что соответствует значениям микропереванса, не превышающим 11 ед. Величина разброса электронов по скоростям в лабораторном макете генератора достигалась 20–30%. Таким образом, описанный выше экспериментальный макет генератора представляет собой достаточно короткую систему. Расчет показывает [10], что для такой геометрии короткой системы критическое значение микропереванса составляет около 38 ед. при токе пучка 200 мА и ускоряющем напряжении 700 В.

В качестве контрольно-измерительного оборудования были использованы измеритель мощности Agilent Technologies N1912A P-series и спектроанализатор Agilent Technologies ESA-E Series Spectrum Analyzer E4402B.

Методами физического эксперимента с использованием разборной вакуумной установки [11,12] и набором соответствующих зондов были проведены исследования структуры многоскоростных турбулентных электронных пучков. На рис. 4 приведены результаты экспериментальных исследований, отражающие качественную картину части продольной структуры турбулентного электронного пучка. Из полученных результатов следует, что в турбулентном электронном пучке наблюдаются как узкие, но очень плотные электронные сгустки, в которых соотношение  $j/j_0 \approx 350$ , так и более протяженные электронные структуры, но с гораздо меньшей плотностью  $j/j_0 \approx 60$ .

На рис. 5 представлена динамика плотности тока в радиальном сечении пучка в процессе его движения по пространству взаимодействия. В сечении  $Z = Z_1$  на

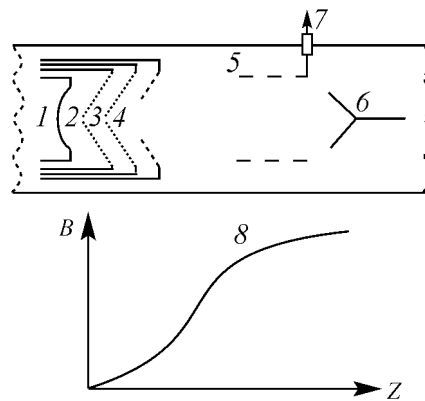


Рис. 3. Принципиальная схема конструкции лабораторного макета генератора широкополосных шумоподобных колебаний: 1 – катод, 2 – экранирующая сетка, 3 – управляющая сетка, 4 – тормозящая сетка, 5 – съемник энергии, 6 – коллектор, 7 – широкополосный вывод энергии

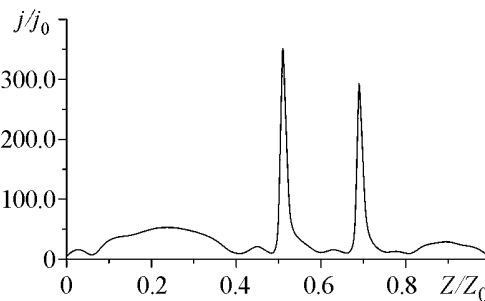


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований зависимости  $j/j_0$  вдоль части пространства дрейфа электронного пучка

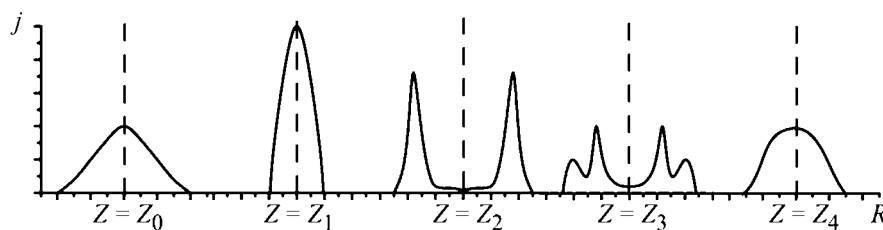


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований динамики плотности тока в радиальном сечении пучка в процессе его движения по пространству взаимодействия

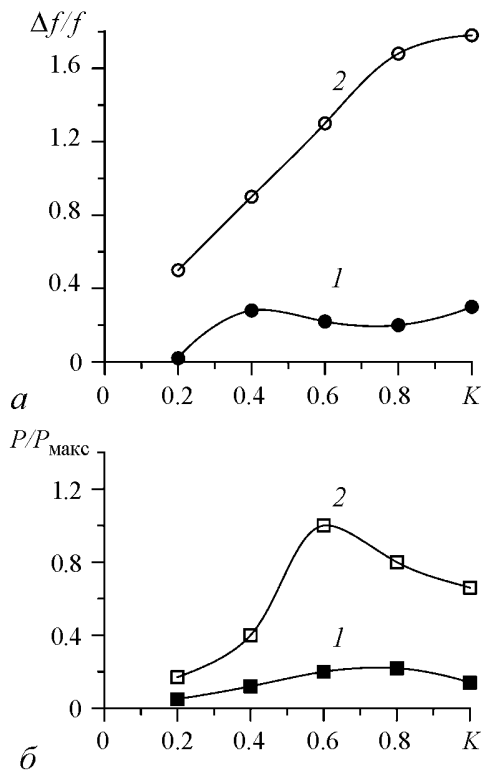


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований: зависимость полосы генерации  $\Delta f/f$  (а) и выходной мощности  $P/P_{max}$  (б) от коэффициента торможения электронного пучка  $K$ . Здесь 1 – случай отсутствия начального разброса электронов по скоростям, 2 – случай наличия начального разброса электронов по скоростям

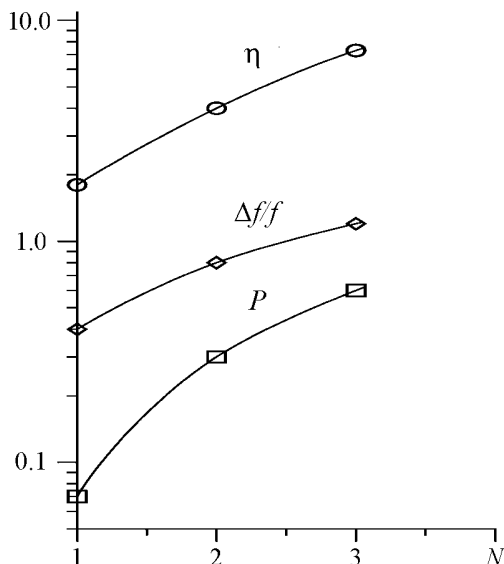


Рис. 7. Зависимости выходной мощности СВЧ-генерации  $P$ , КПД  $\eta$  и полосы генерации  $\Delta f/f$  для различных режимов работы прибора  $n$

пучок оказывает влияние неоднородное магнитное поле, сильно сжимая его. Далее, за счет кулоновских сил происходит расширение электронного пучка. Исследования показали, что сгустки возникновения появляются вблизи периферии пучка (сечение  $Z = Z_2$ ), где сходятся в один объем много электронных траекторий. Таким образом, сплошной пучок становится близким к трубчатому (полому), которому, как было отмечено выше, присущ механизм нарастания первоначальных возмущений плотности пространственного заряда ( $Z = Z_3$ ). В итоге трубчатый (полый) электронный пучок снова переходит в сплошной ( $Z = Z_4$ ).

На рис. 6 приведены зависимость выходной интегральной мощности (а) и полосы генерации (б) от параметра торможения электронного пучка  $K$ , определяющего соотношение ускоряющего и тормозящего напряжений. Видно, что наличие начального разброса электронов по скоростям (кривые 2) существенно улучшают (ср. с кривыми 1) выходные характеристики СВЧ излучения. Анализ полученных результатов показывает, что наиболее оптимальными значениями коэффициента торможения  $K$  электронного пучка являются значения, лежащие в диапазоне от  $K = 0.6$  до  $K = 0.8$ . Именно в этом диапазоне изменений значений коэффициента  $K$  торможения электронного пучка и тока пучка порядка 200 мА достигается максимальное соотношение выходной интегральной мощности и полосы генерации исследуемого лабораторного макета генератора.

На рис. 7 приведены зависимости выходной мощности СВЧ-генерации, КПД и полосы генерации для различных режимов работы прибора. Напряжения менялись в пределах до 1000 В при токе пучка до 200 мА. Первому режиму ( $n = 1$ ) соответствует случай отсутствия начального разброса электро-



нов по скоростям ( $\Delta v/v = 0.20.3$ ) и неоднородного магнитного поля  $B_0 = 0$  Тл при соотношении ускоряющего напряжения и напряжения на коллекторе  $K = 1 - U_{col}/U_0 = 0.6$ . Второй режим ( $n = 2$ ) характеризуется наличием начального разброса электронов по скоростям ( $\Delta v/v = 0.2 - 0.3$ ) при отсутствии неоднородного магнитного поля  $B_0 = 0$  Тл и соотношении ускоряющего напряжения и напряжения на коллекторе  $K = 1 - U_{col}/U_0 = 0.6$ . При этом разброс определяется соотношением тормозящего и ускоряющего напряжений в пространстве взаимодействия (за счет этого удается получать сильно неоднородный по скорости пучок), а также определяется параметрами самой пушки (единицы процента от среднего значения). При проведении численного моделирования по выше указанной методике было установлено, что начальный разброс электронов по скоростям приводит как к росту плотности тока в электронных сгустках, так и к росту их количества, что должно положительным образом сказаться на выходных характеристиках генератора. Сравнивая первый и второй режимы работы лабораторного макета генератора, видно, что наличие начального разброса электронов по скоростям приводит к росту мощности генерации и расширению полосы генерации. Третий режим ( $n = 3$ ) характеризуется наличием как начального разброса электронов по скоростям ( $\Delta v/v=0.2\div 0.3$ ), так и неоднородного магнитного поля  $B_0 = 0.05$  Тл, параметр  $K = 1 - U_{col}/U_0 = 0.6$ . Результаты предварительного численного моделирования показывают (см. рис. 2), что неоднородное магнитное поле при неизменных прочих параметрах схемы также может способствовать как росту мощности генерации, так и расширению полосы генерируемых сигналов. Из рассмотрения полученных зависимостей видно, что создание многоскоростных турбулентных электронных пучков приводит к образованию плотных сгустков пространственного заряда, что, в свою очередь, ведет к повышению мощности генерации. Установлено, что КПД прибора может достигать  $\eta \approx 10\%$ , а полоса частот  $-\Delta f/f \approx 1.6$ . Максимальная выходная мощность при этом составляет порядка 14 Вт при ускоряющем напряжении 700 В и токе пучка до 200 мА средняя частота генерации составляет 1 ГГц.

5. Таким образом, в данной работе рассмотрены различные механизмы создания многоскоростных турбулентных электронных пучков. Показано, что для формирования турбулентных электронных пучков важным фактором является наличие начального разброса электронов по скоростям. Рассмотрены эффективные механизмы формирования начального разброса электронов по скоростям. В работе приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований по анализу структуры турбулентных электронных пучков. Показано влияние таких управляющих параметров, как начальный разброс электронов по скоростям, амплитуда неоднородного магнитного поля, коэффициент торможения электронного пучка на параметры сгустков пространственного заряда в формируемых турбулентных электронных пучках. Используя сеточные структуры у катода, можно добиться начального разброса электронов по скоростям до 50%. Это значение зависит от соотношения напряжений на ускоряющей и тормозящей сетках. Другими словами, такие сеточные структуры позволяют управлять начальным разбросом электронов по скоростям и тем самым оптимизировать формирование плотных сгустков пространственного заряда в пространстве дрейфа. Разброс электронов по скоростям за счет появления азимутальной скорости электронов, при фокусировке пучка неоднородными магнитными полями в пространстве дрейфа, может достигать 2–3%. Разброс электронов по скоростям за счет наличия тормозящего электрического поля в пространстве дрейфа не превышает 5–7%.

Обобщая полученные результаты, можно заключить, что такое фундаментальное физическое явление как турбулентность в интенсивных электронных пучках, наблюдаемое в приборах и устройствах вакуумной электроники, может быть рассмотрено с новых позиций, путем его использования для генерации принципиально широкополосных шумоподобных колебаний. Источники широкополосного шумоподобного излучения могут быть использованы в системах радиопротиводействия и радиоподавления, в перспективных системах шумовой радиолокации, в информационно-телекоммуникационных системах, а также в ряде других отраслей промышленности [13–15].

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 13-02-01209 А, № 14-02-00329 А, № 14-02-90006 Бел\_а, а также Президентской программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-828.2014.2) и молодых ученых-кандидатов наук (проект МК-1373.2014.2)*

### **Библиографический список**

1. Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перелыгин С.Ф., Фоменко Г.П. Генерация мощного СВЧ-излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5, № 6. С. 321.
2. Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. Виркаторы (обзор) // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37, № 3. С. 385.
3. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
4. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 6. С. 575.
5. Калинин Ю.А., Куркин С.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. СВЧ-генераторы хаотических колебаний на основе электронных пучков с виртуальным катодом // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. Т. 9. С. 53.
6. Пащенко А.В., Залкинд В.М., Лонин Ю.Ф., Мележик О.Г., Романов С.С., Ситников Д.А., Тарасов И.К., Тарасов М.И., Шаповал И.Н., Новиков В.Е., Яцышин В.А. Неустойчивость замедляющегося электронного потока, инжектированного в плоский диод // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, вып. 24. С. 83.
7. Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н., Лёвин Ю.И. Малогабаритный сверхнизковольтный генератор широкополосных хаотических колебаний // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 1. С. 56.
8. Калинин Ю.А., Волкова Л.Н. Генератор широкополосных шумоподобных СВЧ-колебаний на турбулентных электронных пучках // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 14. С. 65.
9. Афанасьев В.И., Лукин К.А., Ракитянский В.А. Возбуждение хаотических колебаний в ЛОВо неламинарными электронными потоками // Радиофизика и электроника. 1997. Т. 2, № 1. С. 115.
10. Алямовский И.В. Интенсивные электронные потоки: Учебное издание. М., 1991.
11. Калинин Ю.А., Стародубов А.В. Широкополосные генераторы хаотических ко-

лебаний на турбулентных электронных потоках с внутренней электронной обратной связью // ЖТФ. 2010. Т. 80, № 12. С. 80.

12. Калинин Ю.А., Есин А.Д. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ-электронике. Саратов: Изд-во СГУ, 1991.
13. Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
14. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
15. Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Березин С.И. О взаимодействии микроволнового излучения с микро- и наноструктурами водонефтяных эмульсий // Наука и технологии в промышленности. 2009. № 3. С. 28.

Поступила в редакцию 27.04.2012

После доработки 24.05.2013

## INVESTIGATION OF THE BROADBAND NOISE-LIKE MICROWAVE GENERATOR ON MULTISPEED NONLAMINAR ELECTRON BEAMS

*Yu.A. Kalinin, A.V. Starodubov, N.N. Kuznetsov, Yu.I. Levin*

Saratov State University

The paper presents the results of theoretical and experimental studies of multispeed electron beams. Theoretical and experimental studies of the structure of such beams are considered. It is shown that turbulence forms in such electron beams. It leads to the formation of multiple bunches of space charge, which are sources of broadband noise-like fluctuations. The results of experimental studies of small-sized laboratory model of the generator based on the principles of formation and use of multispeed turbulent electron beams are shown.

**Keywords:** Vacuum microwave electronics, generator of broadband noise-like oscillations, multispeed electron beam, turbulence, physical experiment.

*Калинин Юрий Александрович* – родился в Саратове (1937). Окончил физический факультет СГУ по кафедре электроники (1959) и поступил на работу в НИИ «Волна». Кандидат физико-математических наук (1968, СГУ), старший научный сотрудник (1972), доктор физико-математических наук (1981, СГУ), профессор (1982). С 1994 года работает в НИИ механики и физики СГУ сначала в должности заместителя директора по научной работе, а затем директором (с 1999 года). В 2005–2014 годах руководитель Отделения физики нелинейных систем Научно-исследовательского института Естественных наук СГУ. В настоящее время ведущий научный сотрудник Отделения физики нелинейных систем Научно-исследовательского института Естественных наук СГУ. Область научных интересов: вакуумная электроника и микроэлектроника, физический эксперимент, физические эффекты и неустойчивости в электронных пучках. Автор более 350 печатных работ и более 40 патентов. Под его руководством защищено 32 кандидатские работы.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail: noios@sgu.ru





*Стародубов Андрей Викторович* – родился в Саратове (1982). Окончил факультет нелинейных процессов СГУ (2005), кандидат физико-математических наук (2008). В настоящее время старший научный сотрудник Отделения физики нелинейных систем НИИ Естественных наук СГУ. Область научных интересов: нелинейная динамика, вакуумная электроника и микроэлектроника, физический эксперимент, численное моделирование физических процессов, физические эффекты и неустойчивости в электронных пучках, нанотехнологии, взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, микро- и наноструктуры, наночастицы. Автор более 30 печатных работ и 9 патентов.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail: StarodubovAV@gmail.com



*Кузнецов Николай Никифорович* – родился в Саратове (1938), окончил физический факультет СГУ (1961). Работал в Саратовском НИИ Машиностроения (1961-1965). С 1965 года инженер НИИ механики и физики СГУ. В настоящее время инженер факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов: вакуумная электроника и микроэлектроника, физический эксперимент, вакуумные исследовательские установки, методы исследования электронных пучков, физические эффекты и неустойчивости в электронных пучках. Автор более 10 печатных работ, имеет авторские свидетельства.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail:n.n.kuznetzov@yandex.ru



*Левин Юрий Иванович* – родился в Саратове (1942), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974). В настоящее время декан факультета нелинейных процессов СГУ, профессор, заведующий кафедрой физики открытых нелинейных систем СГУ. Автор более 100 научных статей, научно-методических пособий и руководств.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail:levin@nonlin.sgu.ru