

12

## **Экспериментальное исследование взаимодействия пульсирующего электронного пучка с электромагнитной волной большой амплитуды**

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, А.С. Фокин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: StarodubovAV@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 сентября 2014 г.

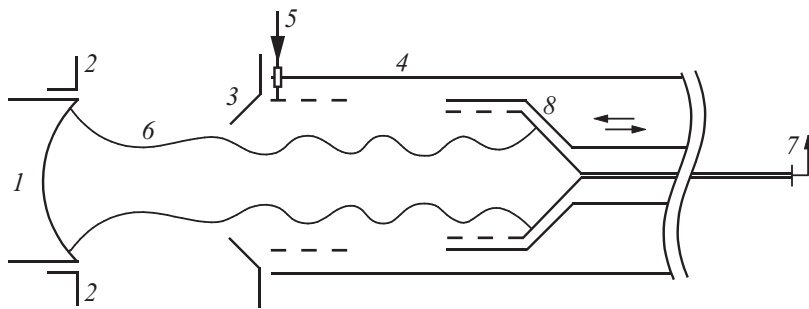
Приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия электронного пучка периодически изменяющегося диаметра с электромагнитной волной большой амплитуды. Экспериментально обнаружено влияние различных факторов на формирование пульсирующего пучка и величину плотности тока в сгустках. По сравнению со схемами с торможением электронного пучка (низковольтные виркаторные системы) генераторы на пульсирующих турбулентных пучках более широкополосны (за счет образования большого числа сгустков пространственного заряда) и более эффективны (в 2–2.5 раза больший КПД по интегральной мощности).

Процессы, связанные со сложной динамикой электронного потока, обладающего непрерывным или дискретным распределением по скоростям, представляют большой интерес в связи с исследованием и разработкой широкополосных усилителей, а также непосредственно самих источников микроволнового излучения. Многоскоростной электронный пучок представляет собой среду, параметры которой (электронная плотность, скорость электронов) неравномерно изменяются во времени и в пространстве. Определенный интерес представляет исследование многоскоростных пучков с периодически изменяющимся диаметром (пульсирующий электронный пучок). Усиление в таких приборах связано со взаимодействием пульсирующего электронного пучка с незамедленными волнами пространственного заряда [1]. Это так называемый электронно-волновой усилитель. Целью данной работы было проведение экспериментального исследования процессов усиления и взаимодействия электромагнитной волны большой амплитуды с многоскоростным

пульсирующим электронным пучком. Сильно пульсирующий пучок формируется путем инжекции электронного пучка в неоднородное магнитное поле с радиусом, отличным от равновесного, или ненулевым углом наклона. В таком пучке сильно изменяется величина заполнения пролетного канала, определяемая отношением радиуса электронного пучка к радиусу пролетного канала  $r_b/r_t \approx 0.1-0.8$ . Последнее влияет на плотность тока в пучке: величина  $j_1/j_2 = r_2^2/r_1^2 \approx 49$  изменяется в 50–100 раз, где  $j_1 = I/\pi r_1^2$ ,  $j_2 = I/\pi r_2^2$ ,  $I$  — ток пучка,  $r_1$  — радиус пульсирующего электронного пучка в месте его сжатия,  $r_2$  — радиус пульсирующего электронного пучка в месте его расширения. Один из механизмов передачи энергии от пучка высокочастотному полю состоит в том, что при расширении пучка электронный поток производит работу, определяемую радиальными силами расталкивания пространственного заряда, а при сжатии пучка производится работа против сил пространственного заряда. Кроме того, возможно взаимодействие пульсирующего электронного пучка с собственными колебательными модами цилиндрического волновода. В работе [2] экспериментально показан факт взаимодействия с прямой волной пространственного заряда, распространяющейся в пучке. В электронном пучке распространяются волны электронной плотности, так что, меняя расстояние между сжатиями пучка (период пульсаций), можно добиться попадания пучностей электронной плотности в местах сжатия пучка, в результате чего создаются благоприятные условия для передачи энергии от пучка полю. Оба указанных подхода могут быть использованы при создании усилительных ламп с электронно-волновым взаимодействием. Отметим, что указанные эффекты проявляются наилучшим образом при работе с большими входными сигналами, так как взаимодействие происходит с волной, распространяющейся в самом пучке, а не в замедляющей системе. В данном случае важно, чтобы пучок на входе был сильно промодулирован. Поясним, что под большим уровнем входного сигнала следует подразумевать отношение входной мощности сигнала  $P_{in}$  к мощности электронного пучка  $P_0$ :  $P_{in}/P_0$  (где  $P_0 = I_0/U_0$ ,  $I_0$  — ток пучка в отсутствие внешнего сигнала,  $U_0$  — ускоряющее напряжение), в нашем случае равное  $\sim 5 \cdot 10^{-2}$  в то время как в традиционных усилительных лампах это значение не превышает уровня  $10^{-5}$ . Известен подобный режим работы усилителей на основе лампы бегущей волны, получивший название крестатронного [3]. Среди приборов, использующих сложную динамику электронного пучка в качестве источника СВЧ-сигнала, можно указать так называемые генераторы

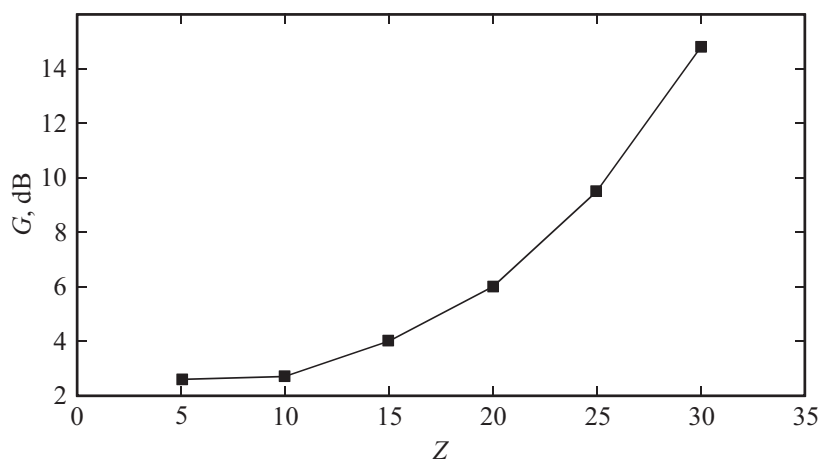
на турбулентных пучках [4]. Ключевым моментом здесь выступает величина разброса скоростей электронов, которая, с одной стороны, ухудшает качество сгустка (величина  $j/j_0 \sim 100$ , где  $j_0$  — начальная плотность тока, фиксируемая на выходе из электронной пушки), с другой стороны, за счет большего числа электронных сгустков в таком потоке обеспечивается широкая полоса генерируемых частот при слабой изрезанности спектра выходного сигнала. Проведенное предварительное численное моделирование (расчет осуществлялся по методике, описанной в работе [5]) показало, что в области сжатия пульсирующего электронного пучка потенциал понижается до величины  $0.7-0.5 U_0$ . За счет наличия разброса электронов по скоростям в пучке происходит отражение определенной части электронов обратно в сторону катода, за счет чего создается электронная обратная связь. Здесь можно провести аналогию с виркаторными системами и, в частности, с низковольтным виркатором [6]. Если в низковольтном виркаторе обратная связь осуществляется за счет отраженных электронов с малой энергией (скоростью), которые при их движении в сторону пушки ускоряются и отбирают энергию у поля, то в рассматриваемом случае обратную связь образуют все те электроны, которые оказываются неспособными преодолеть понижение потенциала в местах сжатия. Переход от усиления к генерации в пульсирующем пучке можно осуществить посредством изменения распределения электронов по скоростям, что достигается за счет использования катодных систем специальной конструкции, например системы с двумя сетками [7,8].

Экспериментальное исследование осуществлялось с использованием разборной вакуумной установки. Питание лабораторного макета осуществлялось в импульсном режиме при напряжении  $U_0 = 6-8$  кВ и токе пучка  $I_0 = 200-300$  мА, длительности импульса  $\tau = 50$  мкс, скважности  $Q = 1000$ . Электронная пушка (сходимость  $\theta = 30^\circ$ ) сформировала аксиально-симметричный пучок, который далее проходил по трубе диаметром  $d = 20$  мм. Для фокусировки пучка использовалось неоднородное магнитное поле амплитудой  $B = 0.05$  Т и периодом  $b = 25$  мм. Схема исследуемой лампы представлена на рис. 1. Перемещая зондовое устройство (подвижный вывод энергии) вдоль макета, можно изменять длину пространства взаимодействия. Исследования проводились в диапазоне частот  $\Delta f = 0.5-3$  ГГц. Методом подвижного зондового устройства [9] исследовали структуру электронного пучка. Экспериментально выявлено влияние различных факторов на формирование пульсирующего пучка и величину плотности тока в сгустках. Основны-



**Рис. 1.** Эскиз макета усилителя-генератора СВЧ: 1 — катод, 2 — фокусирующий электрод, 3 — анод, 4 — труба дрейфа, 5 — ввод внешнего сигнала для усиления, пульсирующий электронный пучок, 7 — вывод СВЧ-сигнала, 8 — подвижной исследовательский зонд, выполняющий роль коллектора, совмещенного со съемником энергии.

ми выявленными факторами являются: сходимость электронного пучка, определяемая углом сходимости; первеанс пучка; величина магнитного поля, а также скоростной разброс. Увеличение угла сходимости  $\delta$  электронного потока в пределах от  $10^\circ$  до  $50^\circ$  приводит к росту электронной плотности в сгустках от  $j/j_0 = 60$  (начальная плотность тока) до  $j/j_0 = 370$ , одновременно уменьшается их протяженность  $\Delta Z$  от 0.3 до 0.07 (безразмерная величина  $Z = L/r_t$ ,  $\Delta Z = \Delta L/r_t$ , где  $L$  — длина пролетного канала,  $\Delta L$  — протяженность электронного сгустка,  $r_t$  — радиус пролетного канала), другими словами, сгустки становятся более компактными. Микропервеанс  $P_\mu$  влияет главным образом на плотность электронных сгустков и с увеличением  $P_\mu$  от 1 до 10 плотность  $j/j_0$  падает от 270 до 105, что объясняется влиянием сил пространственного заряда. С увеличением разброса электронов по скоростям в пучке  $\Delta v/v$  до величины 0.5, плотность в сгустках  $j/j_0$  падала от 110 до 40, при этом сами сгустки становились более протяженными —  $\Delta Z$  изменялась от 0.3 до 0.82. Увеличение разброса по скоростям приводит к турбулизации электронного потока, в результате пульсирующий пучок очень быстро утрачивает пульсирующий характер, плотные электронные сгустки, расположенные в местах сжатия пучка, пропадают и вместо них появляются локальные неоднородности в местах пересечения отдельных электронных траекторий. Установлено,

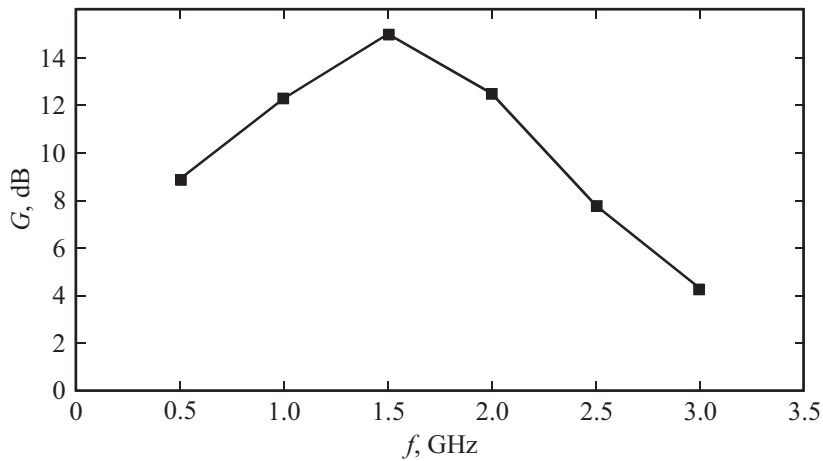


**Рис. 2.** Зависимость коэффициента усиления  $G$  внешнего полезного сигнала на частоте 1.5 GHz от длины пространства взаимодействия  $Z$ .

что наибольшее влияние на величину плотности в электронных сгустках оказывает величина магнитного поля. При значении  $B = 0.02$  Т плотность составляла  $j/j_0 = 20$  при протяженности сгустка  $\Delta Z = 0.3$ , дальнейшее увеличение амплитуды магнитного поля до значения  $B = 0.12$  Т привело к росту плотности тока в сгустках до  $j/j_0 = 520$ , а сами сгустки становились более компактными (величина протяженности электронных сгустков не превысила значения  $\Delta Z = 0.14$ ).

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента усиления сигнала на частоте 1.5 GHz от длины пространства взаимодействия. В данном случае использовалась конструкция катодного узла, позволяющая управлять величиной скоростного разброса, а именно система с двумя сетками. Установлено, что усиление  $G$  достигает 15 дБ при длине пространства взаимодействия порядка 300 мм. Также была исследована зависимость коэффициента усиления сигнала от частоты внешнего сигнала. Результат исследований представлен на рис. 3. Установлено, что при длине пространства взаимодействия 300 мм максимальное значение коэффициента усиления достигается на частоте 1.5 GHz.

Отметим, что указанные результаты получены для случая больших входных сигналов. В случае ламинарного электронного пучка



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента усиления  $G$  внешнего полезного сигнала от частоты внешнего сигнала  $f$ .

	Система с торможением электронного пучка (1)	Система с пульсирующим электронным пучком (2)
$P_{\max(1)}^{out}/P_{\max(2)}^{out}$	0.49	1.0
$\Delta f/f$	0.74	1.61
$\eta$ , %	3.5	9.8

усиление отсутствовало. Введение скоростного разброса электронов в прикатодной области приводит к уменьшению  $G$  и возникновению генерации. Полоса генерируемых частот составляла  $\Delta f/f \sim 1.6$ . КПД, измеренный по интегральной мощности, приближается к уровню в 10%. В таблице приведены параметры системы с торможением электронного пучка и системы с пульсирующим электронным пучком: максимальное значение выходной интегральной мощности  $P_{\max}^{out}$ , полоса генерации  $\Delta f/f$  и КПД  $\nu$ . Установлено, что по сравнению со схемами с торможением электронного пучка (низковольтные виркатронные системы [10,11]) генераторы на пульсирующих турбулентных пучках более широкополосны (за счет образования большого числа сгустков

пространственного заряда) и более эффективны (большой КПД по интегральной мощности). Особенностью исследованной системы является то, что усиление полезного внешнего сигнала осуществляется за счет взаимодействия пульсирующего электронного пучка с незамедленными волнами пространственного заряда [1]. Таким образом, для работы подобных устройств отсутствует необходимость в наличии замедляющей системы. Последнее может оказаться перспективным с точки зрения использования при разработке широкополосных усилителей, способных работать в том числе в терагерцовом диапазоне частот. Одной из важных причин снижения выходной мощности на коротких миллиметровых волнах является снижение эффективности взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы из-за того, что поле концентрируется вблизи ее поверхности. Этот эффект можно скомпенсировать за счет увеличения отношения полной ширины пучка к его толщине (в случае кольцевого пучка — отношения длины окружности к толщине пучка), но при этом в замедляющей системе могут возникать высшие виды колебаний, что потребует дополнительных методов их подавления. Возможны и другие причины неустойчивости: генерация на обратной волне, циклотронные эффекты, уменьшение поперечных размеров периодических замедляющих структур в пространстве взаимодействия и необходимость увеличения плотности рабочего тока (до десятков и сотен ампер с квадратного сантиметра). Таким образом, использование физических эффектов взаимодействия пульсирующего электронного пучка с незамедленными волнами пространственного заряда при проектировании и разработке усилителей миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов может стать одним из возможных решений вышеописанных проблем.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-02-90006), а также грантов президента РФ по поддержке ведущих научных школ (проект НШ-828.2014.2) и молодых ученых — кандидатов наук (проект МК-1373.2014.2).

## Список литературы

- [1] Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1962. 334 с.
- [2] Dyott R.B., Davies M.C. // IEEE Transaction. 1966. ED-13. N 3. P. 374.

- [3] Роу Дж. Теория нелинейных явлений в приборах СВЧ. М.: Сов. радио, 1969. 614 с.
- [4] Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 12. С. 80–85.
- [5] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
- [6] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 10. С. 139–142.
- [7] Kalinin Ju.A., Starodubov A.V., Fokin A.S. // Physics of wave phenomena. 2012. V. 20. N 3. P. 193–198.
- [8] Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н., Левин Ю.И. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 1. С. 32–39.
- [9] Стародубов А.В., Калинин Ю.А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 10. С. 108–112.
- [10] Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 12. С. 1485–1488.
- [11] Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Kalinin Ju.A., Kurkin S.A., Starodubov A.V., Hramov A.E. // Phys. Lett. A. 2014. V. 378. N 32–33. P. 2423–2428.