

**Генерация и усиление в приборах с пульсирующим электронным пучком**

Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов,\* А.С. Фокин

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»  
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83*

В работе приводятся результаты экспериментального исследования взаимодействия электронного пучка периодически изменяющегося диаметра с электромагнитной волной большой амплитуды. Экспериментально выявлено влияние различных факторов на формирование пульсирующего пучка и величину плотности тока в сгустках. Экспериментально подтверждена возможность реализации усиления и генерации в приборе с пульсирующим пучком, по сравнению со схемами с торможением электронного пучка исследованный макет обладает большей широкополосностью и большим КПД.

PACS: 41.75.Fg, 41.85.Ct, 52.35.Mw, 05.45.-a. УДК: 537.862.

Ключевые слова: электронный пучок, терагерцовый диапазон.

**ВВЕДЕНИЕ**

Перспективным направлением современной электроники является освоение терагерцового диапазона частот, граничащего с фотоникой. Это обусловлено прежде всего такими физическими свойствами терагерцового излучения как широкая полоса частот и способность проникать через непрозрачные для оптического диапазона среды, что открывает возможности его применения в различных системах, как военных, так и гражданских, в том числе медицина, биология, телекоммуникации. Одним из возможных путей освоения этой частотной области является использование устройств, в основе действия которых лежат процессы, связанные со сложной динамикой электронного потока, обладающего непрерывным или дискретным распределением по скоростям. Многоскоростной электронный пучок представляет собой среду, параметры которой (электронная плотность, скорость электронов) непрерывно изменяются во времени и в пространстве. Определенный интерес представляет исследование многоскоростных пучков с периодически изменяющимся диаметром. Сочетание этих двух факторов может быть использовано для создания широкополосных усилительных и генераторных ламп, способных работать, в том числе в терагерцовом диапазоне частот. Усиление в таких приборах связано с взаимодействием пульсирующего электронного пучка с незамедленными волнами пространственного заряда [1]. Это так называемый электронно-волновой усилитель.

**1. ФОРМИРОВАНИЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

Сильно пульсирующий пучок формируется путем инжекции электронного пучка в неоднородное магнитное поле с радиусом отличным от равновесного или ненуле-

вым углом наклона. В таком пучке сильно изменяется величина заполнения пролетного канала, определяемая отношением радиуса электронного пучка к радиусу пролетного канала  $r_b/r_t \approx 0,1 \div 0,8$ . Последнее влияет на плотность тока в пучке: величина  $j_1/j_2 = r_2^2/r_1^2 \approx 49$  изменяется в  $50 \div 100$  раз, где  $j_1 = I/\pi r_1^2$ ,  $j_2 = I/\pi r_2^2$ . 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  $P_{in}/P_0$  ( $P_0 = I_0 \cdot U_0$ ) 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 ЛБВ усилителей, 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 высту-

\*E-mail: StarodubovAV@gmail.com

падет 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  $0,7 \div 0,5 U_0$ . 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 образует 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].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментально исследование осуществлялось с использованием разборной вакуумной установки. Питание лабораторного макета осуществлялось в импульсном режиме при напряжении  $U = 6 \div 8$  кВ и токе пучка  $I = 200\text{--}300$  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.

Перемещающее зондовое устройство (подвижный вывод энергии) вдоль макета, можно изменять длину пространства взаимодействия. Исследования проводились на частоте  $f = 1\text{--}2$  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. Основными выявленными факторами являются: сходимость электронного пучка, определяемая углом сходимости; первеанс пучка; величина магнитного поля, а также скоростной разброс. Увеличение угла сходимости  $\theta$  электронного

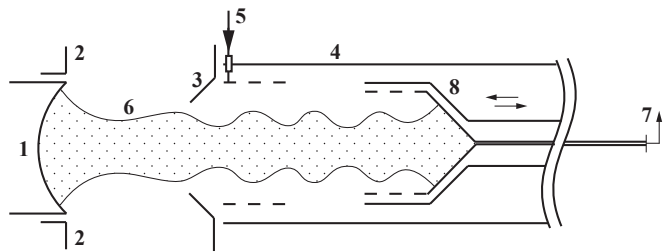


Рис. 1: Эскиз макета усилителя-генератора СВЧ. Цифрами на рисунке обозначено: 1 — катод, 2 — фокусирующий электрод, 3 — анод, 4 — труба дрейфа, 5 — ввод внешнего сигнала для усиления, пульсирующий электронный пучок, 7 — вывод СВЧ сигнала, 8 — подвижной исследовательский зонд, выполняющий роль коллектора,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

потока в пределах от 100 до 500 приводит к росту электронной плотности в сгустках от  $j/j_0 = 60$  (начальная плотность тока) до  $j/j_0 = 370$ , одновременно их протяженность от  $\Delta Z = 0,3$  до  $\Delta Z = 0,07$  (безразмерная величина  $Z = L/r_t$ , где  $L$  — длина пролетного канала,  $r_t$  — 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 падает от  $j/j_0 = 270$  до  $j/j_0 = 105$ , что объясняется влиянием сил пространственного заряда. С увеличением разброса электронов по скоростям в пучке  $\Delta v/v$  до величины 0,5, плотность в сгустках падала от  $j/j_0 = 110$  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, 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  $G$  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.

Отметим, что указанные результаты получены для случая больших входных сигналов. В случае ламин-

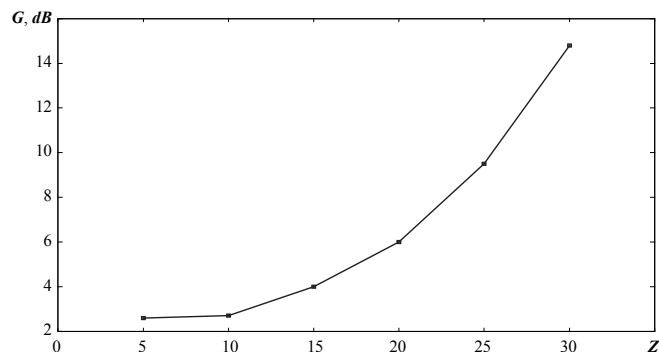


Рис. 2: Зависимость коэффициента усиления  $G$  от длины пространства взаимодействия  $Z$

Таблица I:

	Система с торможением электронного пучка	Система с пульсирующим электронным пучком
$P_{out}/P_{max}$	0,49	1,18
$\Delta f/f$	0,74	1,61
$\eta, \%$	3,5	9,8

нарного электронного пучка 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%. Сравнительные результаты с другими схемами низковольтного виркатора [10] представлены в табл. 1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально выявлено влияние различных факторов на формирование пульсирующего пучка и величину плотности тока в сгустках, а также подтверждена возможность реализации усилительных и генераторных ламп, использующих такие пучки.

По сравнению со схемами с торможением электронного пучка генераторы на пульсирующих турбулентных пучках более широкополосны (за счет образования большого числа сгустков пространственного заряда) и более эффективны (большой КПД по интегральной мощности).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (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).

- [1] Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.В. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. (Саратов, издательство Саратовского университета, 1962) с 14–132.
- [2] Dyott R.B., Davies M.C. IEEE Transaction. **ED-13**, №3. P. 374 (1966).
- [3] Дж. Роу. Теория нелинейных явлений в приборах СВЧ. (М.: Советское радио. 1969) 614 с.
- [4] Калинин Ю.А., Стародубов А.В. ЖТФ. **80**, № 12. С. 80. (2010).
- [5] Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. (М.: «Советское радио», 1966). 231 с.

- [6] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. ЖТФ. **77**, № 10. С. 139. (2007).
- [7] Kalinin Ju.A., Starodubov A.V., Fokin A.S. Physics of wave phenomena. **20**, № 3. P. 193. (2012).
- [8] Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н., Левин Ю.И. Письма в ЖТФ. **37**. Вып. 1. С. 32. (2011).
- [9] Стародубов А.В., Калинин Ю.А. ЖТФ. **83**, № 10. С. 108. (2013).
- [10] Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А., Стародубов А.В. Изв. РАН. Сер. физическая. **76**, № 12. С. 1485. (2012).

## Generation and amplification devices with pulsed electron beam

Yu. A. Kalinin, A. V. Starodubov<sup>a</sup>, A. S. Fokin

Chernyshevsky Saratov State University, ul. Astrakhanskaya 83, Saratov, 410012 Russia  
E-mail: <sup>a</sup>StarodubovAV@gmail.com.

The paper presents the results of experimental studies of the interaction of the electron beam periodically varying diameter with an electromagnetic wave of large amplitude. Experimentally revealed the influence of various factors on the formation and size of pulsed beam current density in the bunches. Experimentally confirmed the feasibility of amplification and generation of the device with the pulsed beam. Compared with schemes with inhibition of electron beam investigated mock-up over broadband and more efficiency.

PACS: 41.75.Fr, 41.85.Ct, 52.35.Mw, 05.45.-a.

Keywords: electron beam, terahertz range.

**Сведения об авторах**

1. Калинин Юрий Александрович — руководитель ОФНС НИИ ЕН СГУ; тел.: (8452)514412, e-mail: noios@sgu.ru.
2. Стародубов Андрей Викторович — зам. рук. ОФНС НИИ ЕН СГУ; тел.: (8452)512111, e-mail: StarodubovAV@gmail.com.
3. Фокин Александр Сергеевич — аспирант КЭКиВ ФНП СГУ; тел.: (8452)512111, e-mail: alexander1989fokin@mail.ru.