

Экспериментальное исследование прозрачной лампы бегущей волны с модуляцией электронного пучка вблизи катода

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

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

Проведено экспериментальное исследование макета прозрачной лампы бегущей волны с возможностью подачи входного сигнала на модулирующую прикатодную сетку и на вход спирали, приведено сравнение значений электронного КПД и коэффициента усиления для указанных способов модуляции электронного пучка, для схемы с модулирующей сеткой полученный электронный КПД в 2–2,5 раза выше, чем для схемы со спиралью.

PACS: 41.20.-q.

УДК: 537.862.

Ключевые слова: лампа бегущей волны, крестатронный режим.

Перспективным направлением современной вакуумной электроники является переход в терагерцовый диапазон частот, что обусловлено физическими свойствами этой области электромагнитного излучения, граничащей с фотоникой, в частности, его способностью проникать через непрозрачные для оптического диапазона среды, что открывает возможности его применения в системах, как военного, так и гражданского назначения. Однако многие традиционные подходы, применяемые в СВЧ электронике в данном диапазоне, оказываются сложно реализуемыми. Так существенно возрастают требования к качеству изготовления электродинамических систем, связанные с уменьшением сечения пролетного канала и периода замедляющей системы. Малые размеры пролетного канала ограничивают ток пучка, а, следовательно, и максимальную выходную мощность.

Одним из возможных путей решения этой проблемы является отказ от замедляющих систем и использование сложной динамики электронного потока, обладающего непрерывным или дискретным распределением по скоростям. В частности, большой интерес представляет исследование многоскоростных пучков с периодически изменяющимся диаметром. Такие пучки могут быть использованы при создании широкополосных усилительных и генераторных ламп. Рассмотрим подробнее вопросы усиления и генерации в приборах с пульсирующими электронными пучками.

Усиление связано с взаимодействием пульсирующего электронного пучка с незамедленными волнами пространственного заряда [1]. Это так называемый электронно-волновой усилитель. Пульсирующий пучок формируется путем инжекции электронного пучка в неоднородное магнитное поле с радиусом отличным от равновесного или ненулевым углом наклона. В таком пучке сильно меняется величина заполнения пролетного канала $r_n/r_{\text{тр}} \approx 0,1 \div 0,8$, что влияет на

плотность тока в пучке — величина $j_1/j_2 = r_2^2/r_1^2$ 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 в/ч 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 пролетного канала. В работе [2] был экспериментально показан факт взаимодействия с прямой волной пространственного заряда, распространяющейся в пучке. 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 — в основе их работы лежит эффект нелинейного захвата электронов волной большой амплитуды. Под большими входными сигналами следует подразумевать отношение $P_{\text{вх}}/P_0 \sim 5 \cdot 10^{-2}$, где $P_{\text{вх}}$ — мощность входного сигнала, а P_0 — мощность пучка.

Перейдем теперь к рассмотрению процесса генерации. Приборы, использующие сложную динамику электронного пучка в качестве источника СВЧ сигнала, исследуются достаточно давно — это, в частности, так называемые генераторы на турбулентных пучках [3]. Величина разброса скоростей электронов, влияет на процесс формирования электронных сгустков в пучке. Большая величина скоростного разброса ухудшает качество сгустков, уменьшая величину отношения плотности тока в сгустках к плотности тока пучка до значения $j/j_0 = 100$, но в то же время за счет большего числа электронных сгустков обеспечивает большую полосу рабочих частот и меньшую изрезанность спектра выходного сигнала. В случае пульсирующего пучка, возможно существенно повысить КПД такого генератора. Так как в области сжатия потенциал провисает, то разброс скоростей электронов позволяет создать условия, при которых в пучке часть элект-

*E-mail: alexander1989fokin@mail.ru

тронов окажется не в состоянии преодолеть образовавшийся потенциальный барьер и отразится обратно в направлении катода, создавая тем самым электронную обратную связь. Если в низковольтном виркаторе обратная связь осуществляется за счет отраженных электронов («мягких») 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.

Экспериментально исследование осуществлялось на базе разборной вакуумной установки. Питание лабораторного макета осуществлялось в импульсном режиме при напряжении $U = 6\text{--}8\text{ кВ}$ и токе пучка $I = 200\text{--}300\text{ мА}$, длительности импульса $\tau = 50\text{ мкс}$, скважности $s = 1000$. Электронная пушка (сходимость $\Theta = 300$) сформировала аксиально симметричный пучок, который далее проходил по трубе диаметром $d = 20\text{ мм}$. Для фокусировки пучка использовалось неоднородное магнитное поле амплитудой $B = 0,05\text{ Тл}$ и периодом $b = 25\text{ мм}$. Перемещая зондовое устройство (подвижный вывод энергии) вдоль макета, можно изменять длину пространства взаимодействия. Исследования проводились на частоте $f = 1\text{--}2\text{ ГГц}$. Плотность тока в электронном пучке измеряли методом подвижного зондового устройства. В макете использовалась конструкция катодного узла с двумя сетками [4], позволяющая управлять величиной скоростного разброса, а также подвижная магнитная система, позволяющая создавать необходимую для формирования пульсирующего пучка конфигурацию магнитного поля

Предварительно было произведено численное моделирование траекторий электронов по методике работы [5] с целью рассмотрения возможности создания пульсирующего электронного пучка (с периодически изменяющимся радиусом). Расчеты показали, что наибольшее влияние на формирование более плотных сгустков оказывает величина фокусирующего магнитного поля и распределение поля $B(z)$. Результаты численного моделирования показывают, что удается сформировать электронный пучок с максимальным радиусом $r_{max}/r_{тр} = 0,7$ и минимальным радиусом $r_{min}/r_{тр} = 0,15$, при этом период пульсаций составлял $Z = 2$, а их число на длине $Z = 30$ составляло 15 пульсаций. Угол сходимости пучка при этом составлял $\Theta = 300$, первеанс $P\mu = 1,0$, величина магнитного поля $B = 0,05\text{ Тл}$.

Результаты экспериментального исследования качественно подтверждают выводы расчетов. Экспериментально выявлено влияние различных факторов на формирование пульсирующего пучка и величину плотности тока в сгустках. Основными факторами являются: сходимость электронного пучка, определяемая углом сходимости; первеанс пучка; величина магнитного поля, а также скоростной разброс. Угол сходимости Θ электронного пучка сильно влияет на электронную плотность в сгустках и их протяженность. С ростом

угла сходимости от 100 до 500 протяженность сгустков уменьшилась от $\Delta Z = 0,3$ до $\Delta Z = 0,07$, т.е. сгустки становятся более компактными. Как и в случае расчетных данных, наибольшее влияние при формировании пульсирующего пучка наряду с углом сходимости оказывает величина и конфигурация магнитного поля. При значении амплитуды поля $B = 0,02\text{ Тл}$ плотность составляла $j/j_0 = 20$ при протяженности сгустка $\Delta Z = 0,3$, дальнейшее увеличение амплитуды магнитного поля до значения $B = 0,05\text{ Тл}$ привело к росту плотности тока в сгустках до $j/j_0 = 520$, а сами сгустки становились более компактными — $\Delta Z = 0,14$. В режиме усиления именно эти факторы оказываются наиболее существенными. Первеанс $P\mu$ 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 $\Delta v/v$ от 0 до 0,5, плотность в сгустках падала от $j/j_0 = 110$ до 40, при этом сами сгустки становились более протяженными — ΔZ 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 сгустки, расположенные в местах сжатия пучка, пропадают и вместо них появляются локальные неоднородности в местах пересечения отдельных электронных траекторий, что качественно подтверждается результатами численного моделирования.

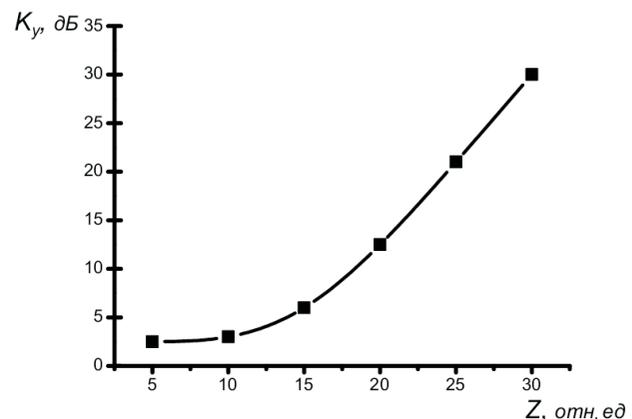


Рис. 1: Зависимость коэффициента усиления от длины пространства взаимодействия

На рис. 1 приведена зависимость коэффициента усиления от длины пространства взаимодействия, измеренная для случая больших входных сигналов ($P_{вх}/P_0 \sim 10^{-2}$) при $P_{вх} = 20\text{--}30\text{ Вт}$. На длине пространства взаимодействия порядка $\Delta Z = 20$ коэффициент усиления K_y составлял 15 дБ и увеличивался с дальнейшим ростом ΔZ . Однако при длине, превышающей $\Delta Z = 30$ рост коэффициента усиления пре-

крашался, что обусловлено разрушением периодической структуры электронного пучка.

Увеличивая скоростной разброс в пучке до 20% посредством катодного угла с двумя сетками удалось достичь перехода к генерации. Можно выделить две основных причины такого перехода: процессы отражения электронов в местах сжатия пульсирующего пучка, приводящие к возникновению электронной обратной связи, а также усложнение динамики электронного потока с последующим разрушением периодичности и переходом к турбулентному характеру движения. На рис. 2 приведены значения выходной мощности, полосы частот и КПД для указанных режимов. Электронный КПД составляет порядка 50%, что оказывается в 2–2,5 раза выше, чем при использовании турбулентного пучка постоянного сечения. Также наблюдается рост выходной мощности и увеличение рабочей полосы частот, что подтверждает рассмотренный выше механизм возникновения электронной обратной связи. Однако, в случае турбулентного пучка изрезанность спектра выходного сигнала оказывается ниже.

Таким образом, электронный пучок с периодически изменяющимся диаметром позволяет реализовать усиление ($K_y \sim 15$ дБ) в случае использования входных сигналов большого уровня мощности, а также генерацию со значением электронного КПД порядка 50%. Экспериментально полученные параметры электронного пучка качественно хорошо согласуются с расчетны-

ми данными, что позволяет утверждать о справедливости рассмотренных механизмов возникновения генерации и усиления.

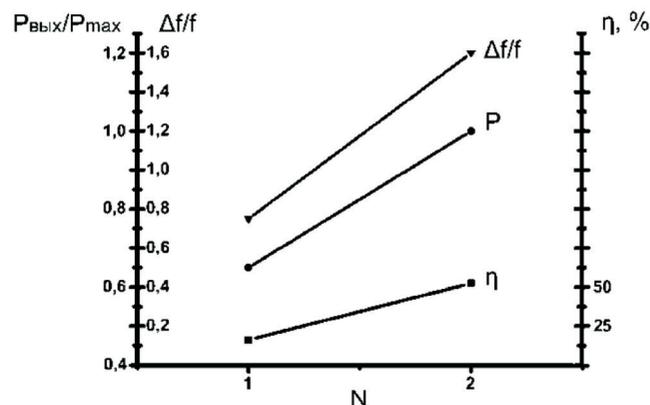


Рис. 2: Выходная мощность P , полоса частот $\Delta f/f$ и электронный КПД η для пучка постоянного сечения (точка 1) и пульсирующего электронного пучка (точка 2)

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-01209-а, № 14-02-90006), а также гранта Президента РФ по поддержке 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).
- [2] Dyott R.B. Davies M.C. IEEE Transaction. **ED-13**, №3. P. 374. (1966).
- [3] Калинин Ю.А., Волкова Л.Н. Письма в ЖТФ. **36**. В. 14.

С. 65. (2010).

- [4] Kalinin Ju.A., Starodubov A.V., Fokin A.S. Physics of wave phenomena. **20**, N 3, P.193. (2012).
- [5] Калинин Ю.А и др. Письма в ЖТФ. **37**, Вып. 1. С. 32. (2011).

Transparent traveling wave tube modulated electron beam near the cathode

Yu. A. Kalinin, A. S. Fokin^a, A. V. Starodubov

Saratov state university Faculty of Nonlinear Processes

Saratov 410012, Russia

E-mail: ^aalexander1989fokin@mail.ru

The results of experimental research laboratory model based on a transparent amplifier traveling-wave tube feed input for modulating the near-cathode grid and the traditional voltage supply input to the spiral delay system, shows the dependence of the gain and efficiency of the input power level for the modulation scheme with mesh obtained values of the electron efficiency 50–56% at a gain 12–13.26 dB.

PACS: 41.20.-q.

Keywords: traveling wave tube, krestatron regime.

Сведения об авторах

1. Калинин Юрий Александрович — докт. технических наук, профессор; e-mail: noios@sgu.ru.
2. Фокин Александр Сергеевич — аспирант; тел.: (927) 917-01-33, e-mail: alexander1989fokin@mail.ru.
3. Стародубов Андрей Викторович — кандидат физ.-мат. наук, руководитель ОФНС НИИ ЕН СГУ; e-mail: StarodubovAV@yandex.ru.