

12

Прозрачные лампы бегущей волны с многоскоростными электронными пучками

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов[¶]

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

[¶] E-mail: StarodubovAV@gmail.com

Поступило в Редакцию 27 февраля 2018 г.

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования выходных характеристик прозрачных ламп бегущей волны (без локального поглотителя) с многоскоростными (турбулентными) электронными пучками. Показано, что в этом случае достигаются более высокие коэффициенты усиления (до 20 dB) и коэффициенты полезного действия (40–50%) по сравнению с выходными характеристиками прозрачных ламп бегущей волны с моноскоростными (ламинарными) электронными пучками. Указанный эффект объясняется формированием в многоскоростном электронном пучке гораздо более плотных сгустков пространственного заряда, чем для моноскоростных электронных пучков.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.18.46612.17266

Известны лампы бегущей волны (ЛБВ), в конструкции пространства дрейфа которых отсутствует локальный поглотитель, вследствие чего такие ЛБВ называют прозрачными [1]. Указанные прозрачные ЛБВ могут работать при больших параметрах несинхронности (значения параметра несинхронности лежат в диапазоне 2.5–3.5) и высоких уровнях мощности входных сигналов [2–5], что определяет такой режим работы как крестатронный [3]. Данный режим работы характеризуется большим электронным коэффициентом полезного действия (КПД), но малым коэффициентом усиления (8–10 dB). Указанные приборы используются в усилительных цепочках в качестве выходного каскада (усилителя мощности) и повышают выходную мощность цепочки. Как правило, в прозрачных ЛБВ в рабочем режиме формируются интенсивные электронные пучки, близкие к ламинарным.

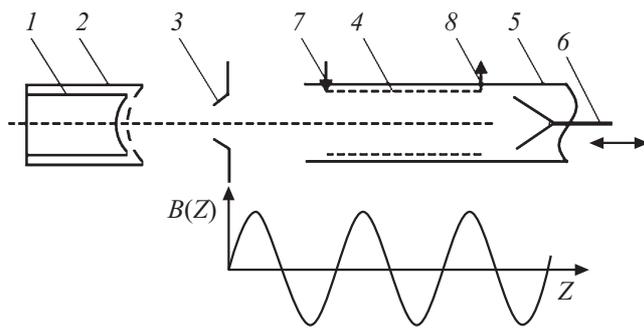


Рис. 1. Схема макета прозрачной ЛБВ с турбулентным электронным пучком и распределение периодического магнитного поля в нем. 1 — катод, 2 — управляющий электрод, 3 — анод, 4 — замедляющая система, 5 — корпус, 6 — подвижный коллектор, 7 — ввод СВЧ-энергии, 8 — вывод СВЧ-энергии.

В настоящее время задачи оптимизации процессов взаимодействия в приборах электроники больших мощностей для получения необходимых характеристик мощного выходного СВЧ-излучения не утратили своей актуальности. Одной из центральных здесь является задача улучшения выходных характеристик источников СВЧ-излучения: повышение выходной мощности и коэффициента полезного действия, повышение частоты, расширение полосы генерируемых частот [6]. Одним из возможных решений указанных задач может быть использование многоскоростных (турбулентных) электронных пучков. Такие пучки могут найти применение в широкополосных генераторах на виртуальном катоде — низковольтных виркаторах, в лампах обратной волны и т.д. [7–9]. Отличительной особенностью многоскоростных (турбулентных) пучков является наличие сверхплотных сгустков пространственного заряда, совершающих интенсивные пространственно-временные колебания [10]. В настоящей работе рассматривается влияние интенсивных сгустков пространственного заряда, образованных многоскоростными электронными пучками, на энергетические и спектральные характеристики усилителей СВЧ-сигнала на базе прозрачных ЛБВ.

Схема лабораторного макета прозрачной ЛБВ представлена на рис. 1. Экспериментальные исследования проводились с использованием разборной вакуумной установки [11], в рабочей камере которой

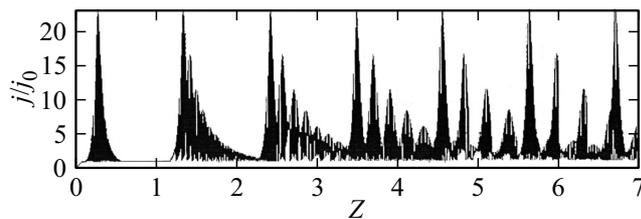


Рис. 2. Результаты численного моделирования вида распределения плотности тока j/j_0 в сгустках пространственного заряда.

осуществлялось размещение всех элементов лабораторного макета прозрачной ЛБВ. В разработанном лабораторном макете электронная пушка со сферическим катодом формирует цилиндрический пучок с током $I = 500\text{--}700\text{ mA}$ при ускоряющем напряжении $U_0 = 8\text{--}10\text{ kV}$ в импульсном режиме (длительность импульса $50\text{ }\mu\text{s}$, скважность $Q = 1000$). Изменение величины разброса электронов по продольным скоростям $\Delta V/V_0$ (ΔV — величина разброса скоростей, V_0 — средняя скорость электронов) проводилось путем изменения потенциала прикатодной сетки, величина которого менялась в диапазоне $U_n/U_{nat} = 1\text{--}3.5$ (U_n — потенциал сетки, U_{nat} — естественный потенциал сетки). Изменяя таким образом потенциал сетки, можно получить величину разброса $\Delta V/V_0 \sim 25\text{--}40\%$. Величина разброса электронов по продольным скоростям определялась экспериментально с использованием метода тормозящего поля [10], для чего в канал пространства дрейфа помещался подвижный зонд с диафрагмой с диаметром отверстия $50\text{ }\mu\text{m}$. Конструкция зондового устройства включала в себя коллектор, выполненный в виде цилиндра Фарадея, на который подавался задерживающий потенциал. В лабораторном макете использовалась спиральная замедляющая система с вводом и выводом СВЧ-энергии. Электронный пучок фокусировался с помощью магнитной периодической системы с амплитудой поля $B = 0.05\text{--}0.1\text{ T}$ и периодом $d = 25\text{ mm}$.

В соответствии с методикой, приведенной в [12], было выполнено численное моделирование структуры многоскоростных электронных пучков. На рис. 2 приведено распределение относительной плотности тока j/j_0 в пролетном канале (j — плотность тока в пролетном канале, j_0 — плотность тока на входе в пролетный канал). Приве-

Результаты экспериментального исследования макета прозрачной ЛБВ

Тип пучка	$\Delta V/V_0, \%$	U_0, kV	I, mA	P_{in}, W	G, dB	P_{out}, kW	$\eta_e, \%$	$\eta_r, \%$
1	0	8	320	100	10	1	35	47
2	30	10	540	25	20	2.5	46	63

денные результаты соответствуют величине разброса электронов по продольным скоростям $\Delta V/V_0 \sim 30\%$. Из рис. 2 видно, что начальный разброс электронов по скоростям приводит к образованию сгустков пространственного заряда в пролетном канале. Результаты проведенных исследований в рамках численного моделирования показали (рис. 3, *a*), что плотность тока в сгустках пространственного заряда также существенно зависит от величины амплитуды магнитного поля и достигает величин $j/j_0 \sim 400$ при амплитудах магнитного поля $B_0 \sim 0.1 \text{ Т}$. Зависимость плотности тока в сгустках пространственного заряда j/j_0 от величины разброса электронов по продольным скоростям $\Delta V/V_0$ для амплитуды магнитного поля $B_0 = 0.06 \text{ Т}$ приведена на рис. 3, *b*. Видно, что, с одной стороны, наличие разброса электронов по скоростям позволяет получать более плотные сгустки. С другой стороны, имеется оптимальное значение величины разброса электронов по скоростям, при котором наблюдаются наиболее плотные сгустки пространственного заряда.

На рис. 3, *c* и *d*, а также в таблице приведены результаты экспериментального исследования макета прозрачной ЛБВ с моноскоростным (случай 1) и многоскоростным (случай 2) электронными пучками. Все экспериментальные результаты получены в диапазоне частот 1–2 GHz. Зависимость коэффициента усиления G от величины разброса скоростей $\Delta V/V_0$ приведена на рис. 3, *c*. Из представленного рисунка видно, что для многоскоростного (турбулентного) электронного пучка максимальное значение коэффициента усиления достигает $G = 20 \text{ dB}$ при $\Delta V/V_0 = 30\%$, а для моноскоростного (ламинарного) — $G = 10 \text{ dB}$. На рис. 3, *d* приведена зависимость электронного КПД от величины мощности входного сигнала. Видно, что максимальное значение электронного КПД для многоскоростного (турбулентного) электронного пучка достигается при $P_{in} \sim 25 \text{ W}$, а для моноскоростного

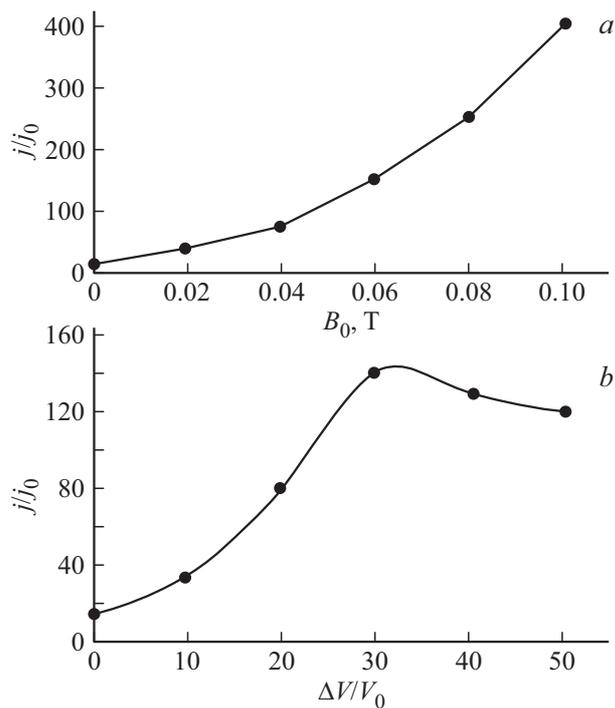


Рис. 3. Результаты численного моделирования (*a, b*) и экспериментальных исследований (*c, d*). *a* — зависимость относительной плотности тока j/j_0 от амплитуды магнитного поля B_0 , полученная при численном моделировании; *b* — зависимость относительной плотности тока j/j_0 от величины разброса электронов по продольным скоростям $\Delta V/V_0$, полученная при численном моделировании; *c* — экспериментально полученная зависимость коэффициента усиления G от величины разброса электронов по продольным скоростям $\Delta V/V_0$; *d* — экспериментально полученная зависимость электронного КПД η_e от величины входного сигнала P_{in} : 1 — прозрачная ЛБВ с ламинарным пучком, 2 — прозрачная ЛБВ с турбулентным пучком.

(ламинарного) электронного пучка — при $P_{in} \sim 100$ W. Результаты экспериментального исследования обобщены в таблице.

Таким образом, в рамках данной работы проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния многоскоростного (турбу-

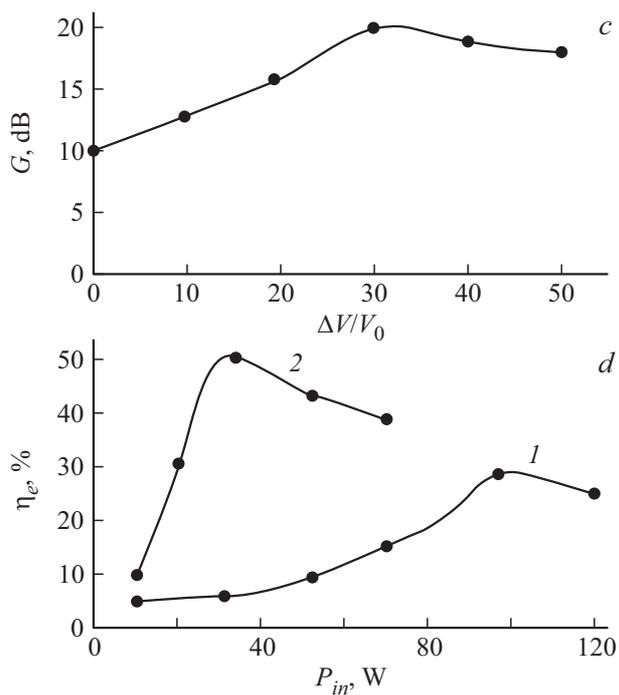


Рис. 3 (продолжение).

лентного) электронного пучка на характеристики ЛБВ без локального поглотителя (прозрачная ЛБВ). Анализ полученных результатов показал следующее.

1. Применение многоскоростного (турбулентного) электронного пучка с интенсивными сгустками пространственного заряда в статическом режиме позволяет существенно улучшить выходные характеристики прозрачных ЛБВ.

2. Имеется оптимальное значение величины разброса электронов по скоростям, при котором достигаются наибольшие плотности тока в сгустках пространственного заряда, что ведет к получению максимальных значений величины коэффициента усиления и выходной мощности исследуемой прозрачной ЛБВ.

3. Применение многоскоростных электронных пучков в прозрачных ЛБВ позволяет достигать коэффициента усиления 20 dB при электронном КПД $\eta_e \sim 40\text{--}50\%$ и техническом КПД $\eta_t \sim 60\%$.

Авторы выражают благодарность А.С. Фокину за помощь в подготовке и оформлении работы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-02-00238, а также Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части госзадания (проект № 3.859.2017/4.6).

Список литературы

- [1] Калинин Ю.А., Фокин А.С., Стародубов А.В. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 18. С. 32–37.
- [2] Калинин Ю.А., Кац А.М., Песин Б.В. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1973. В. 6. С. 52–59.
- [3] Rowe J.E. // Proc. IRE. 1959. V. 47. N 4. P. 536–545.
- [4] Калинин Ю.А., Кац А.М. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1980. Т. 23. № 10. С. 36–39.
- [5] Закурдаев А.Д., Победоносцев А.С. Многолучевой СВЧ-прибор. Патент РФ № 2054733 от 20.02.1996.
- [6] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High power microwaves. Boca Raton: CRC Press, 2007. 552 p.
- [7] Стародубов А.В., Калинин Ю.А. // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 10. С. 108–112.
- [8] Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 19. С. 52–58.
- [9] Афанасьев В.М., Лукин К.А., Ракитянский В.А. // Радиофизика и электроника. 1997. Т. 2. № 1. С. 115–118.
- [10] Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 12. С. 80–85.
- [11] Калинин Ю.А., Ессин А.Д. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ-электронике. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1991. 212 с.
- [12] Molokovsky S.I., Sushkov A.D. Intense electron and ion beams. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 281 p.