

12;13

## Прозрачные лампы бегущей волны с модуляцией электронного пучка вблизи катода

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

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail: alexander1989fokin@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 марта 2014 г.

Рассмотрены результаты экспериментального исследования лабораторного макета усилителя на основе прозрачной лампы бегущей волны с подачей входного сигнала на модулирующую прикатодную сетку и с традиционной схемой подачи сигнала на вход спирали замедляющей системы, приведены зависимости коэффициента усиления и КПД от уровня входной мощности, для схемы с модулирующей сеткой получены значения электронного КПД 50–56% при коэффициенте усиления 12–13 дВ.

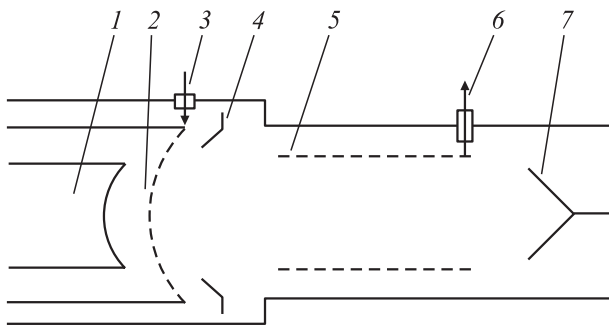
В настоящее время все более актуальной становится задача оптимизации процессов взаимодействия в приборах электроники больших мощностей для получения необходимых характеристик мощного выходного СВЧ-излучения. Одной из центральных здесь является задача улучшения выходных характеристик источников СВЧ-излучения: выходной мощности, коэффициента полезного действия, повышения частоты, расширения полосы генерируемых частот [1]. В частности, низкий КПД классических усилителей на основе лампы бегущей волны (ЛБВ) с большим (30–40 дВ) усилением связан как с длительным процессом группировки, так и с потерями, вызванными наличием поглотителя. Известны сравнительно короткие прозрачные ЛБВ, работающие без внутреннего поглотителя, в которых процесс группировки и отбора энергии идет на сравнительно небольшой длине [2–6]. Эффект нелинейного захвата электронов волной большой амплитуды лежит в основе мощных прозрачных ЛБВ, используемых в передатчиках СВЧ-диапазона. Прозрачные ЛБВ имеют электронный КПД примерно в 2–2.5 раза выше, чем КПД ламп традиционной конструкции. ЛБВ со спиральной замедляющей системой (ЗС) являются широкополосными усилителями мощности, применяемыми в СВЧ-технике. Широкополосность опреде-

ляется электродинамическими характеристиками ЗС, линейным характером дисперсии в значительной области частот. Преимуществом таких приборов является большая широкополосность, небольшие прямые потери, большая выходная мощность и КПД, при этом они характеризуются малыми значениями коэффициента усиления — 7–9 dB, что делается во избежание возбуждения лампы, вследствие отражения от вводов-выводов энергии.

ЛБВ является системой с нарастающей волной, в которой сигнал вдоль высокочастотной (ВЧ) структуры нарастает вначале экспоненциально, а затем, после достижения нелинейной области, нарастание замедляется. При постепенном увеличении  $b$  — параметра скорости, характеризующего разность скоростей пучка и волны, начиная от точки максимального усиления, величина амплитуды волны уменьшается и в конечном итоге становится либо очень мала при наличии потерь, либо равна нулю, если потерь нет [7]. В этом случае нарастание сигнала прекращается. Возможно возникновение другого режима усиления, связанного с биениями волн постоянной амплитуды. Работа в этом режиме, который получил название крестатронного, является достаточно эффективной, позволяя при работе с большими входными сигналами достичь больших значений КПД.

В этой связи представляет интерес исследование влияния величины входного сигнала, подаваемого в прикатодную область электронной пушки на КПД прибора в крестатронном режиме.

Перейдем к рассмотрению результатов экспериментальных исследований. Исследования проводились на прозрачной ЛБВ со спиральной ЗС, схема которой представлена на рис. 1. Отличие этой лампы от лампы классической конструкции [8] состоит в том, что входной сигнал подается не на ЗС через коаксиальный ввод энергии, а на модулирующую сетку, расположенную вблизи катода. Назовем традиционную конструкцию ЛБВ вариантом 1, а с наличием модулирующей сетки в прикатодной области — вариантом 2. Был исследован импульсный режим работы усилителя, при котором длительность импульсов составляла  $50 \mu\text{s}$ , а скважность 1000. Ускоряющее напряжение  $U_0$  изменялось в диапазоне 8–9 kV, ток пучка  $I_0$  составлял 300–400 mA, мощность входного сигнала  $P_{in}$  изменялась в диапазоне от 20 до 100 W, что соответствует величине  $P_{in}/P_0 \sim 7 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$ . Для классических приборов с большим усилением отношение мощности входного сигнала к мощности пучка равно величине порядка  $10^5 - 10^6$ . Все измерения проводились в диапазоне частот 1–2 GHz.



**Рис. 1.** Схема прозрачной ЛБВ с модуляцией электронного пучка в области катода: 1 — катод, 2 — модулирующая сетка, 3 — коаксиальный ввод энергии, 4 — анод, 5 — замедляющая система, 6 — вывод энергии, 7 — коллектор.

Расчет электронного КПД и коэффициента усиления проводился по формулам

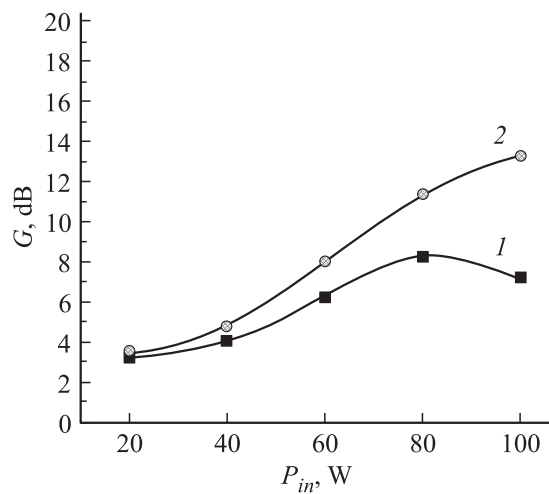
$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_{\text{out}} - P_{\text{in}}}{P_0},$$

$$K_{\text{у}} = 10 \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}},$$

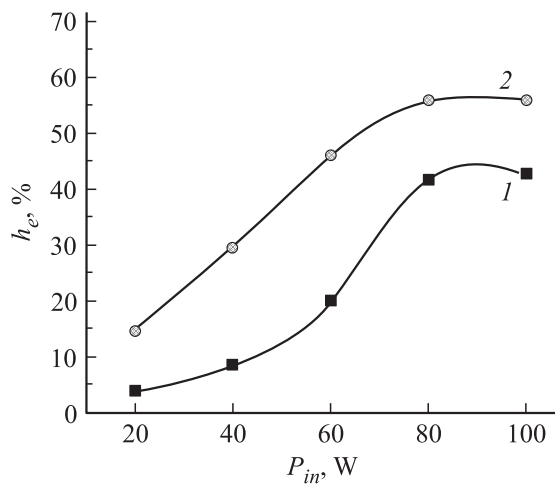
где  $P_{\text{in}}$ ,  $P_{\text{out}}$  — мощность на входе и выходе усилителя соответственно,  $P_0 = U_0 \cdot I_0$  — мощность постоянного тока.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента усиления от величины входного сигнала, подаваемого на вход спирали (вариант 1) и на модулирующую прикатодную сетку (вариант 2). Видно, что во втором случае существенно возрастает коэффициент усиления до величины порядка 13.26 дБ, соответствующей выходной мощности  $P_{\text{out}} = 2116 \text{ W}$  при  $P_{\text{in}} = 100 \text{ W}$ . Возбуждение прибора при этом не зафиксировано.

На рис. 3 приведены зависимости электронного КПД от величины входного сигнала, подаваемого на вход спирали (вариант 1) и на модулирующую прикатодную сетку (вариант 2). Установлено, что максимальная величина электронного КПД для варианта 2 составляет 56% по сравнению с 43% для варианта 1. При этом удается небольшая рекуперация одноступенчатым коллектором. Технический КПД равен 73–75%. Незначительно увеличилась полоса рабочих частот до величины  $\Delta f/f \sim 1.5\text{--}1.7$ .



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента усиления от величины входного сигнала: 1 — первый вариант лампы, 2 — второй вариант лампы.



**Рис. 3.** Зависимость электронного КПД от величины входного сигнала: 1 — первый вариант лампы, 2 — второй вариант лампы.

В работе Роу [2] первый вариант усилителя на основе ЛБВ получил название крестатрона. В данной работе экспериментально продемонстрированы преимущества второго варианта конструкции с наличием модулирующей сетки, расположенной вблизи катода, на которую подается входной сигнал. Данный вариант конструкции можно назвать крестатродом.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают, что схема с вводом СВЧ-сигнала посредством его подачи на модулирующую сетку, расположенную вблизи катода, обладает существенным преимуществом, которое заключается в высоком значении коэффициента усиления и КПД усилительной ЛБВ, работающей в крестатронном режиме при больших значениях мощности входного сигнала, а также в расширении полосы рабочих частот.

Работа выполнена при поддержке базовой части государственного задания Минобрнауки России (задание № 2014/203 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности), гранта РФФИ № 14-02-00329-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).

## Список литературы

- [1] *Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007. P. 43–97.
- [2] *Rowe J.E.* // Proc. IRE. 1959. V. 47. N 4. P. 536–545.
- [3] *Колдуэлл Дж.* // Лампа с бегущей волной. М.: Госэнергоиздат, 1959. Стр. 105–138.
- [4] *Калинин Ю.А., Кац А.М., Песин Б.В.* // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1973. В. 6. С. 52–59.
- [5] *Калинин Ю.А., Кац А.М.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1980. Т. 23. № 10. С. 36–39.
- [6] *Антипов В.С., Безязычный И.А., Бережная И.В., Галайдыч К.В., Карнилов Е.А., Сотников Г.В.* // Вопросы атомной науки и техники. 2008. № 4. С. 38–42.
- [7] *Роу Дж.Е.* Теория нелинейных явлений в приборах сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1969. С. 236.
- [8] *Kompfner R.* The invention of the travelling wave tube. San Francisco: San Francisco Press, 1964. P. 730–738.