

09; 10

© 1992

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОГО УСИЛЕНИЯ В МОЩНОМ ИМПУЛЬСНОМ СВЧ УСИЛИТЕЛЕ СО ВЗРЫВОЭМИССИОННОЙ ПУШКОЙ

А.Б. Волков, Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков,
Н.Ф. Ковалев, Б.Д. Кольчугин,
Г.С. Кораблев, И.С. Кулагин

Переход к сильноточным релятивистским электронным пучкам и многомодовым электродинамическим системам позволил в сантиметровом диапазоне длин волн существенно (до 10^9 - 10^{10} Вт) поднять выходную мощность СВЧ генераторов [1, 2]. В усилительных же приборах такого рода мощности пока менее высоки [3-5], что связано прежде всего с ограничением величины усиления как большими шумами, присущими, вероятно, сильноточным электронным пучкам, формируемым с взрывоэмиссионных катодов, так и возрастанием опасности самовозбуждения не только рабочей, но и паразитных мод (и/или их комбинаций).

Один из возможных методов преодоления этих ограничений состоит в разбиении пространства взаимодействия на секции с различными режимами работы [6, 7] и в сужении полосы усиления. Если одна из секций работает в режиме регенеративного усиления, а остальные секции - устойчивые к самовозбуждению широкополосные усилители, то вблизи стартового режима мощность шума на выходе прибора ($P_{\text{шум}} \approx S \Delta f k_p (\prod_i k_i)$) не зависит от величин, изменяющих $I_{\text{ст}}$, например, от диаметра пучка. Связано это с тем, что максимальное значение регенеративного усиления $k_p \sim (I_{\text{ст}}/I-1)^{-\alpha}$, а его полоса $\Delta f/f \sim (I_{\text{ст}}/I-1)^\alpha$. Здесь α - постоянная, не зависящая от $I_{\text{ст}}$, S - спектральная плотность шума на входе, $\prod_i k_i$ - произведение коэффициентов усиления в широкополосных усилительных секциях.

Экспериментальные исследования проводились на трехсекционном усилителе с регенеративной секцией (рис. 1) [8]. В секциях ЛОВ и ЛБВ применялись электродинамические системы в виде отрезков плавно гофрированных волноводов с поперечными размерами $D \geq \lambda$, где λ - длина волны излучения.

Трубчатый электронный пучок (энергия электронов $\approx 4 \cdot 10^5$ эВ, ток $\approx 10^3$ А, длительность $\approx 2 \cdot 10^{-8}$ с) формировался ускорителем „Синус-6” [9]. Его диаметр в первом каскаде D_1 можно было менять за счет изменения частичной экранировки импульсного ведущего магнитного поля (длительность полупериода ≈ 3 мс, индук-

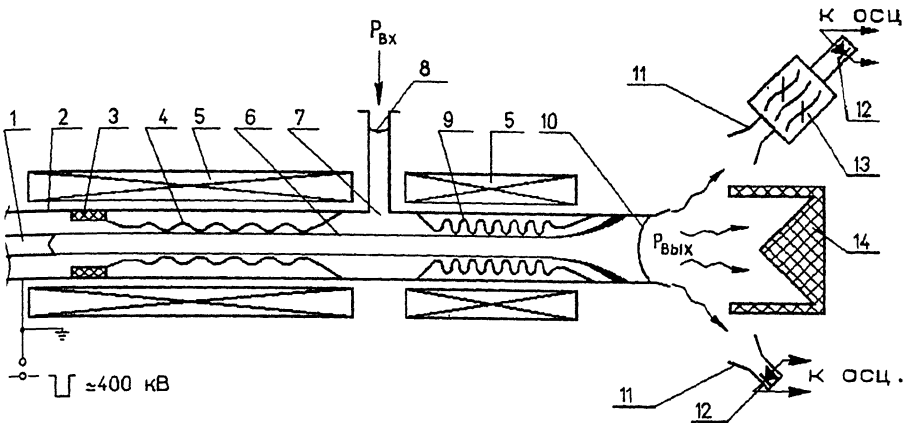


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 - катод, 2 - анод, 3 - СВЧ поглотитель, 4 - ЛОВ, 5 - соленоиды, 6 - электронный пучок, 7 - квазиоптический ввод мощности, 8 - входное вакуумное окно, 9 - ЛБВ, 10 - выходное вакуумное окно, 11 - приемные рупоры, 12 - СВЧ детекторы, 13 - полосовой фильтр, 14 - калориметр.

ция ≈ 2 Тл) подбором времени „встрела“. Тем самым изменялось соотношение $I/I_{ст}$, регулировалась полоса усиливаемых частот в ЛОВ и коэффициент регенеративного усиления k_p . Сопротивление излучения в осесимметричную волну электрического типа в ЛБВ было подобрано несколько большим оптимального, соответствующего максимальному КПД, значения ($R_{\Sigma}/R_{\Sigma \text{ опт}} \approx 2-5$) [10], что позволило реализовать сравнительно широкую полосу усиления ($\Delta f_3 \geq 0.1 f$) без заметного снижения эффективности взаимодействия (расчетный КПД $\eta > 0.2$) [10]. Высокочастотная мощность вводилась квазиоптическим преобразователем в промежуток между ЛОВ и ЛБВ и отсюда в недовозбужденную ЛОВ. Промодулированный в ЛОВ электронный пучок, пройдя участок дрейфа (квазиоптический преобразователь), поступал на вход широкополосной ЛБВ ($\Delta f_3/f \approx 0.1$).

При диаметре пучка в первой секции, превышающем некоторое критическое значение ($D_1 > D_{кр}$), секция ЛОВ самовозбуждалась на рабочей волне с частотой 8.95 ГГц и система генерировала излучение без входного сигнала. Выходная мощность и КПД в этих режимах достигали $P \leq 100$ МВт и $\eta \leq 0.25$. Отметим, что при всех допустимых в эксперименте диаметрах пучка ЛБВ была устойчива, а ЛОВ могла самовозбуждаться только на рабочей волне.

Если диаметр пучка в первой секции был меньше критического и входной сигнал отсутствовал, мощность на выходе усилителя становилась ниже пороговой ($P_{\text{мин}} \approx 10^6$ Вт) для использованного

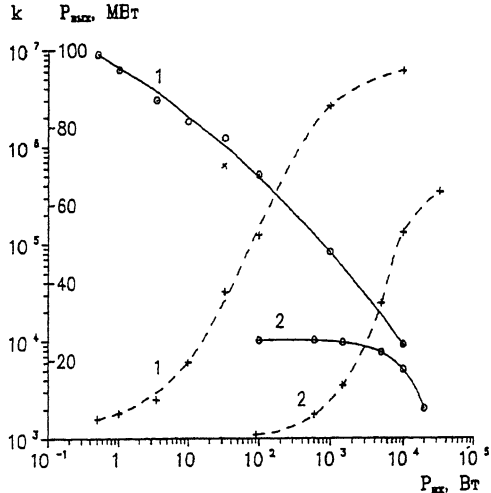


Рис. 2. Выходная мощность (пунктирные линии) и коэффициент усиления (сплошные линии) в зависимости от входной мощности для двух диаметров электронного пучка в ЛОВ: 1 - $D_1 = D_{\text{кр}} - 0.01$ см; 2 - $D_1 = D_{\text{кр}} - 0.11$ см.

калориметра [11]. Порог чувствительности ($P_{\text{мин}}$) измерителя выходной мощности выбран так, что $P_{\text{шум}} < P_{\text{мин}} \ll P_{\text{макс}}$, поэтому без входного сигнала ($P_{\text{вх}} = 0$) мощность на выходе прибора могла наблюдаться только при $I > I_{\text{ст}}$, а в области $0 \leq I_{\text{ст}}/I - 1 \ll 1$, где реализуются большие коэффициенты усиления, шумовой сигнал не регистрировался ($P_{\text{шум}} < P_{\text{мин}}$).

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости зависимости полного коэффициента усиления $k = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ и выходной мощности $P_{\text{вых}}$ от входной $P_{\text{вх}}$ для двух значений диаметра пучка в ЛОВ $D_1: D_1 = D_{\text{кр}} - 0.11$ см и $D_1 = D_{\text{кр}} - 0.01$ см. В первом случае усиление не превышало 40 дБ. На границе ($P_{\text{вх}} \approx 5 \cdot 10^3$ Вт), где начинается ограничение усиления, выходная мощность и КПД составляли $P_{\text{вых}} \approx 4 \cdot 10^7$ Вт и $\eta \approx 0.1$. При $D_1 = D_{\text{кр}} - 0.01$ см усиление малых сигналов было существенно выше и достигало ≈ 70 дБ, а область режима „линейного“ усиления уменьшилась до $P_{\text{вх}} \leq 1$ Вт. На границе этой области мощность и КПД ($P_{\text{вых}} \approx 10^7$ Вт, $\eta \approx 0.02$) заметно отличаются от первого случая, что связано, по-видимому, с дополнительным ограничением усиления в ЛОВ и дрейфовом пространстве.

Во всех проведенных экспериментах структура поля выходного излучения соответствовала расчетной, что свидетельствует о работе секций на рабочих модах электродинамических систем. Центральные частоты спектров входного и выходного сигналов были близки. Полоса усиливаемых частот при $D_l = D_{кр} - 0.11$ см была $\approx 3\%$, а при $D_l = D_{кр} - 0.01$ см — значительно меньше.

Примечательно, что в проведенных экспериментах с увеличением $D_l (D_l < D_{кр})$ стабильность параметров выходного излучения заметно снижалась. Особенно это было заметно в режимах усиления малых сигналов ($P_{вх} < 1$ Вт), когда наблюдались даже пропуски выходных импульсов. Таким образом, для успешной реализации примененного метода усиления, связанного с работой ЛОВ вблизи стартового режима, необходимо иметь электронный пучок с достаточно стабильными параметрами. Кроме того, желательно увеличение длительности импульса тока ввиду сужения полосы усиления.

Авторы благодарят М.И. Петелина за внимание к работе и полезные обсуждения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] А б у б а к и р о в Э.Б., Б е л о у с о в В.И., В а р г а н о в В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 9. С. 533-535.
- [2] Б у г а е в С.П., К а н а в е ц В.И., К л и м о в А.И. и др. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. В. 7. С. 1488-1495.
- [3] W h a r t o n С.В., В u l t e r J.M., F u r u k a w a S. et al. In: Proc. 8-th Int. Conf. on High-Power Particle Beams, Novosibirsk, 1990. V. 2. P. 1229-1234.
- [4] А б у б а к и р о в Э.Б., Б о т в и н н и к И.Е., Б р а т м а н В.Л. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 11. С. 186-187.
- [5] S h i f f l e r D., I v e r s J.D., K e r s l i c k G.S. et al. // Appl. Phys. Lett. 1991. V. 58. N 9. P. 899-901.
- [6] К л e e n W., Р ö s c h l K. Einführung in die Mikrowellen Elektronik. Teil 2. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 1958. 270 с.
- [7] А б у б а к и р о в Э.Б., К о в а л е в Н.Ф., П е т е л и н М.И. и др. В сб.: Тез. докл. Всес. семинара по релятивистской высокочастотной электронике. М.: МГУ, 1984. с. 72.
- [8] З а й ц е в Н.И., И л я к о в Е.В., К о в а л е в Н.Ф. и др. В сб.: Тез. докл. 6 Всес. симпоз. по сильноточной электронике. Часть 3. Томск: ИСЭ СО АН СССР, 1986. С. 26-28.

- [9] М е с я ц Г.А. В сб.: Релятивистская высокочастотная электроника. Вып. 4. Горький: ИПФ АН СССР, 1984. С. 192-216.
- [10] К о в а л е в Н.Ф., С м о р г о н с к и й А.В. // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. В. 6. С. 1305-1307.
- [11] З а й ц е в Н.И., И л я к о в Е.В., К о в н е р и с т ы й Ю.К. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1992. В. 2.

Институт прикладной
физики РАН,
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию
23 января 1992 г.
В окончательной редак-
ции 27 мая 1992 г.