

УДК 621.385.63

Мощные широкополосные пучково-плазменные усилители СВЧ-колебаний

*В. И. Переводчиков, П. В. Боровиков, С. И. Гусев,
М. А. Завъялов, В. А. Конкин, Ю. А. Кузнецов,
В. Ф. Мартынов, П. М. Тюрюканов, А. Л. Шапиро*

ГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина», Москва, Россия

Приведены основные характеристики мощных широкополосных усилителей СВЧ-колебаний на базе плазменной ЛБВ и современного источника питания. Нерелятивистский черенковский пучково-плазменный прибор СВЧ с гибридной замедляющей структурой на базе цепочки связанных резонаторов с плазменным заполнением пролетного канала обладает высокими параметрами: эффективность — 30 %, ширина полосы — 25 % и выходная мощность ~15 кВт.

Плазменная электроника возникла после основополагающих работ Ахиезера и Файнберга, Бома и Гросса (1949 г.), предсказавших явление пучковой неустойчивости, состоящее в эффективном возбуждении колебаний и волн в плазме электронным пучком. В течение последнего десятилетия разработаны черенковские пучково-плазменные СВЧ-усилители (плазменные ЛБВ), основанные на гибридных замедляющих электродинамических структурах, представляющих собой цепочку связанных резонаторов с плазменным заполнением пролетного канала [1–3]. Выбор гибридной замедляющей структуры в виде цепочки связанных резонаторов (ЦСР) с заполненным плазмой пролетным каналом обусловлен возможностью пространственного разделения в такой структуре областей транспортировки электромагнитной энергии и взаимодействия пучка с возбуждаемой волной.

Высокие параметры нерелятивистских черенковских СВЧ пучково-плазменных усилителей (ППУ) определяются эффективностью взаимодействия пучок — плазма, имеющего объемный характер, компенсацией пространственного заряда электронного пучка, а также длительным синхронизмом

пучка с волнами гибридных замедляющих структур при использовании продольных градиентов концентрации плазмы и магнитного поля. Гибридные плазменно-резонаторные системы сочетают в себе высокую эффективность взаимодействия, характерную для плазменных волноводов, с возможностью практически полного излучения энергии возбуждаемых СВЧ-полей. Анализ показывает также увеличение полосы пропускания гибридных электродинамических структур в область более высоких частот.

Реализация преимуществ гибридных плазменно-резонаторных систем потребовала, с одной стороны, детального исследования их дисперсионных характеристик и динамики взаимодействия электронного пучка с гибридными волнами, а с другой стороны — разработки принципов конструирования и технологии пучково-плазменных приборов, обеспечивающих достаточно большой срок службы при наличии в них плазмы высокой концентрации и интенсивных электронных и ионных потоков.

Решающим шагом в создании ППУ явилась разработка в ВЭИ им. В. И. Ленина газодинамической системы, обеспечивающей изменение рабочего давления водорода в области ЦСР при сохранении достаточно высокого вакуума в электронной пушке.

Разработка вакуумно-технологических процессов и оригинальные конструктивные решения узлов ППУ позволили создать отпаянный прибор (рис. 1) с высоким сроком службы [4]. Электронный пучок (20 кэВ, 3 А), транспортируемый в пролетном канале ЦСР в магнитном поле с индукцией 0,25 Тл, создает пучковую плазму с концентрацией до 10^{12} см⁻³ и электронной температурой 20 эВ при давлении водорода $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

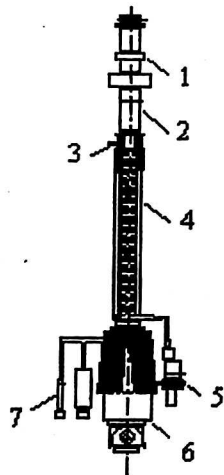


Рис. 1. Схема пучково-плазменного прибора — плазменного ЛБВ:

- 1 — электронная пушка; 2 — система дифференциальной откачки; 3 — коаксиальный вход; 4 — электродинамическая система; 5 — окно вывода СВЧ-мощности; 6 — коллектор электронного пучка; 7 — генераторы водорода

Газодинамическая система ППУ позволяет регулировать давление газа в электродинамической структуре в диапазоне $10^{-6}+10^{-2}$ мм рт. ст. При этом обеспечивается вакуумный перепад между электродинамической структурой и электронной пушкой. Это делает возможным как вакуумный, так и плазменный режим работы СВЧ-ППУ. На рис. 2 представлена зависимость мощности электромагнитного излучения на выходе усилителя от давления рабочего газа (водорода) при неизменных параметрах электронного пучка. Плазменный режим работы прибора с электронным КПД 30 % достигается при давлении $(0,8 \div 1) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Исследование и разработка гибридных электродинамических резонаторных систем, заполненных плазмой, позволили расширить рабочий диапазон усилителя.

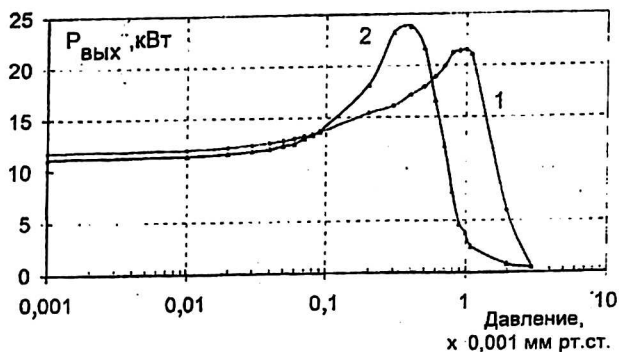


Рис. 2. Зависимость мощности электромагнитного излучения усилителя от давления рабочего газа:
1 — потенциал коллектора $U_{кол} = 0$ В; 2 — $U_{кол} = -60$ В

Характеристики КСВ по входу ППУ, показывающие, что в плазменном режиме работы область согласования прибора расширяется в диапазон более высоких частот, приведены на рис. 3. Предположение, высказанное выше, подтверждается исследованиями амплитудно-частотных характеристик ППУ. На рис. 4 даны кривые амплитудно-частотных характеристик ППУ для вакуумного и плазменного режимов работы, полученные при фиксированной мощности входного сигнала. Характеристики подтверждают преимущества плазменного режима работы: увеличение выходной мощности и расширение рабочей полосы частот.

Рис. 3. Зависимость КСВ коаксиального входного устройства ППУ от частоты:
1 — вакуумный режим;
2 — плазменный режим

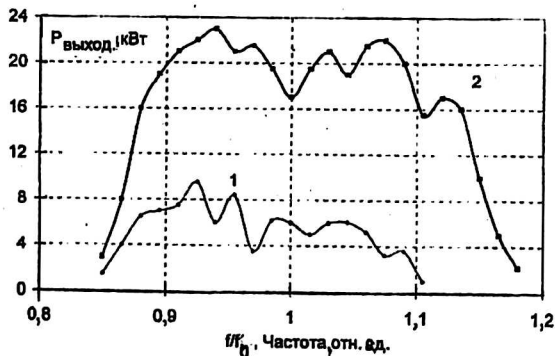
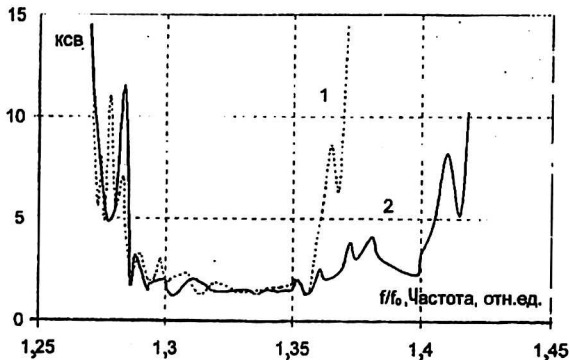


Рис. 4. Зависимость выходной мощности ППУ от частоты:
1 — вакуумный режим;
2 — плазменный режим

Возможность применения мощных плазменных ЛБВ в системах связи и радиолокации вызывает появление ряда специфических требований, таких как низкий уровень собственных шумов и низкий уровень побочных колеба-

ний, в том числе на гармониках частоты основного колебания. Анализ спектра собственного шума ППУ проводился с помощью модернизированного панорамного измерителя спектральной плотности мощности ИСПМ-1, разработанного в Московском энергетическом институте (МЭИ). Измерение спектральной плотности мощности (СПМ) собственных шумов ППУ проводилось в широкой полосе частот, превышающей рабочую полосу усилителя при вакуумном и плазменном режимах работы, при этом мощность на входе ППУ равнялась нулю.

Анализ спектра выявил ряд особенностей. Реальный спектр состоит из дискретных составляющих, обусловленных импульсным режимом питания ППУ. Основной спектр находится вне рабочей полосы усилителя. Полученные результаты дали возможность оценить отношение интегральной мощности шума к мощности на выходе ППУ (20 кВт) — 57 дБ в рабочей полосе частот и отношение интегральной мощности шума в исследованной полосе частот к мощности на выходе ППУ — 45 дБ. Подробные результаты измерений приведены в работе [5].

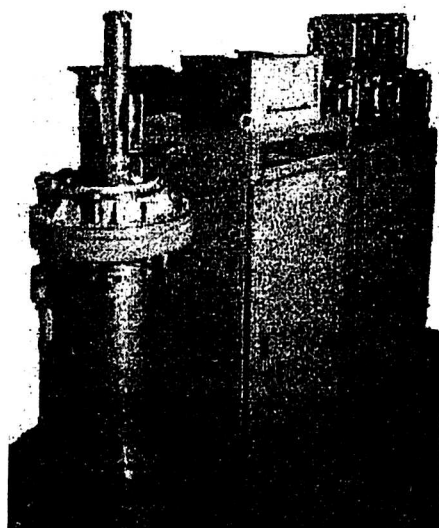
Исследование уровней побочных колебаний проводилось в диапазоне частот до третьей гармоники основного (усиливаемого) колебания включительно с помощью комплекта оригинальной измерительной аппаратуры, разработанной в МЭИ. Относительный уровень второй гармоники по отношению к мощности 20 кВт составил 50 дБ, а уровень третьей гармоники — 45 дБ [6].

Основные параметры разрабатываемых ППУ сантиметрового диапазона приведены ниже.

Выходная СВЧ-мощность, кВт	15
Ширина рабочей полосы частот по уровню 3 дБ, %	25
КПД, %	30
Ускоряющее напряжение, кВ	~20
Коэффициент усиления, дБ	22
СПМ шума в рабочей полосе, мВт/МГц, не более.....	0,5
Относительный уровень шума в рабочей полосе, дБ, не более	-57
Уровень второй гармоники, дБ, не более	-40

Создание усилителя на плазменной ЛБВ (рис. 5) сопровождалось разработкой мощного компактного источника питания, отвечающего современным требованиям. Для обеспечения минимальных массогабаритных показателей в источнике питания используется инвертор, повышающий рабочую частоту с 50 Гц до 8 КГц, а также конвертер, стабилизирующий отбор мощности из сети в режиме большой длительности импульсов. В высоковольтном трансформаторе используются аморфное железо и твердотельная изоляция. Трансформатор имеет жидкостное охлаждение. На выходе источника питания установлен электронный коммутатор на специально разработанной электронной лампе — электронно-лучевом вентиле. Коммутатор обеспечивает формирование импульсов в широком диапазоне частоты и скважности, ограничивает ток нагрузки и обеспечивает защитные функции. Масса усилителя, включающего плазменную ЛБВ с соленоидом и источник питания, не превышает 600 кг.

Рис. 5. Вид пучково-плазменного усилителя с источниками питания



Возможность применения пучково-плазменных приборов в системах связи и телекоммуникациях, а также в СВЧ-разрядных технологиях определяет направление дальнейших исследований.

Литература

1. Fainberg Y. B., Tkatch Y. V., Gadetsky N. P. et al. // Ukr. Phys. J. 1978. Vol. 23. P. 1902.
2. Zavjalov M. A., Mitin L. A., Perevodchikov V. I., Shapiro A. L. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1994. Vol. 22. № 5. P. 600—607. Oct.
3. Borovikov P. V., Perevodchikov V. I., Kuznetsov Y. A. et al. // High Power Wide Bandwidth Plasma-beam Amplifier: Proc. Int. Vacuum Electronics Conf. — Monterrey, 2000.
4. Мартынов В. Ф., Завьялов М. А., Переводчиков В. И. и др. Пат. 2084985, 2084986, 1447256, 1400467, 1572328 РФ.
5. Буряк В. С., Конкин В. А., Леонов А. М., Пучков В. С., Завьялов М. А. 10-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: Матер. конф. — Севастополь, Крым, Украина, 11—15 сент. 2000. С. 463—464.
6. Боровиков П. В., Завьялов М. А., Переводчиков В. И., Тюрюканов П. М., Конкин В. А. 8-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии": Матер. конф. Севастополь, Крым, Украина, 14—17 сент. 1998. Т. 2. С. 725—726.

High power wide-bandwidth beam-plasma microwave amplifiers

V. I. Perevodchikov, P. V. Borovikov, S. I. Gusev,
M. A. Zavjalov, V. A. Konkin, Yu. A. Kuznetsov, V. F. Martinov,
P. M. Tjurjukanov, A. L. Shapiro
The Lenin's All-Russian Electrotechnical Institute, Moscow, Russia

Main parameters of high-power broad-band microwave amplifiers based on plasma-filled TWT and state-of-art power supply unit are presented. Non-relativistic Cherenkov type beam-plasma amplifier (plasma-filled TWT), based on hybrid slow-wave coupled-cavities structure with plasma-filled transit channel, has been developed. Plasma-filled CC TWT, designed as sealed tube, are characterized by a combination of high efficiency (30 %), wide bandwidth (25 %), high output power (15 kW).