

ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

УДК 537.563.2

РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА-
ДРАЙВЕРА КЛИСТРОНА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2.8 ГГц

© 2025 г. М. С. Дмитриев^a, *, М. В. Дьяконов^a, С. А. Туманов^a

^aНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: msdmitriyev@mephi.ru

Поступила в редакцию 21.06.2024 г.

После доработки 21.06.2024 г.

Принята к публикации 04.07.2024 г.

Разработан прототип усилителя с рабочей частотой $f = 2.8$ ГГц, предназначенный для импульсного ВЧ питания мощных усилительных клистронов. Разработана блок-схема усилителя, предложены топологии плат для каждого усилительного модуля. Произведена сборка и настройка макетов усилительных модулей. Выполнена сборка макета усилителя и проведены его испытания.

Ключевые слова: клистрон, усилительный модуль, импульсный СВЧ-генератор, импульсная СВЧ мощность

DOI: 10.56304/S207956292501004X

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным способом получения мощности порядка нескольких МВт в гигагерцовом диапазоне являются клистроны. В настоящее время в НИЯУ МИФИ разрабатывается усилитель для клистрона, способного выдавать 6.5 МВт импульсной мощности на частоте $f = 2.8$ ГГц. Для необходимой модуляции пучка электронов мощность, подаваемая в первый резонатор клистрона должна составлять около 100 Вт. При этом сами ВЧ импульсы должны иметь длительность не менее $\tau = 8$ мкс и следовать с частотой $f_{\text{имп}} = 100$ Гц.

Зарубежные усилители имеют ряд недостатков, к которым относится не только сложность приобретения данных устройств, но и их малая универсальность. В связи с этим возникает необходимость создания отечественного усилителя, выходные параметры которого смогут обеспечить надежную непрерывную работу клистрона. Также данный усилитель должен обладать высокой воспроизводимостью и обеспечивать технологическую независимость.

1. ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ УСИЛИТЕЛЯ

В рамках данной задачи для питания усилителя был разработан СВЧ генератор, способный выдавать до 80 мВт импульсной мощности на частоте $f = 2.8$ ГГц с заданными длительностью импульса и заполнением. За генератором будет располагаться усилитель, выходная импульсная мощность которого должна составлять не менее $P_{\text{вых}} = 100$ Вт. Важ-

но заметить, что данное значение уже учитывает потери в линии передачи СВЧ мощности от СВЧ усилителя к клистрону.

На рис. 1 представлена блок схема разрабатываемого усилителя. Она состоит из 4 усилительных модулей (каскадов), системы питания и схемы управления. Минимальная входная мощность данного усилителя составляет 10 мВт. Первый усилительный модуль представляет из себя сборку из 3 отечественных транзисторов ЗП618А производства “Планета-Аргалл”. Это арсенидгаллиевые полевые транзисторы, имеющие широкий диапазон рабочих частот (табл. 1). Второй и третий усилительные модули строятся на согласованных транзисторах MPAL2731M30 и ILT2731M30. Данные транзисторы являются аналогами друг друга, поэтому каскады являются идентичными. Каждый из транзисторов способен выдавать до 40 Вт импульсной мощности на частоте $f = 2.8$ ГГц (табл. 1).

Завершающий четвертый усилительный модуль строится на базе биполярного транзистора IB2729M120. Основные параметры данного транзистора приведены в табл. 1. Номинальная выходная мощность данного транзистора составляет порядка 120 Вт в его рабочем диапазоне частот. При этом максимальная выходная мощность данного транзистора на частоте $f = 2.8$ ГГц соответствует 190 Вт. Входная мощность для данного транзистора составляет около 20–25 Вт.

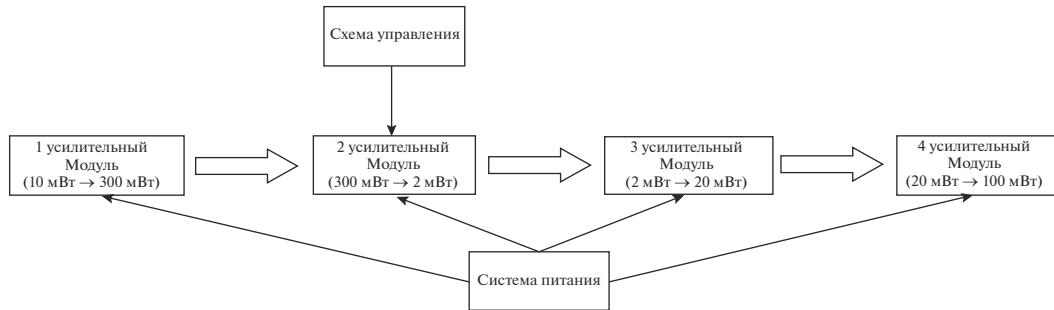


Рис. 1. Блок-схема усилителя.

2. РАЗРАБОТКА ПЕРВОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

В качестве первого каскада усилителя выступает сборка из трех транзисторов ЗП618А. На рис. 2 приведена топология платы данной сборки. Сначала входной сигнал усиливается первым транзистором сборки, затем мощность делится с помощью моста Уилкинсона и попадает на еще два таких же транзистора, после чего суммируется.

В программном пакете CST Studio Suite для выбранного диэлектрика были рассчитаны параметры 50-омной линии и мосты Уилкинсона.

Была произведена сборка макета первого усилительного модуля (рис. 3). Сборка выполнена на диэлектрике FR4 с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 4.7$. Были проведены испытания разработанного моста Уилкинсона как отдельного устройства. По результатам измерений мощность делится по -3.61 дБ в каждое из плеч моста, а разница между плечами составляет 0.01 дБ для моста в качестве делителя и 0.05 дБ при использовании моста в качестве сумматора. Отражение от моста составляет -17 дБ при использовании моста в качестве делителя и -12 дБ при использовании в качестве сумматора. Большое значение имеет тангенс угла диэлектрических потерь выбранной подложки моста. Так, в одном таком устройстве может течь до трети, приходящей на него мощности.

Плата с отверстиями под транзисторы помещена на медную подложку, служащую радиатором. Такое решение позволяет не только легко заземлить исток, но также улучшить теплоотвод от транзистора. Так как транзисторы достаточно чувствительны к нагреву, для их пайки использовался сплав Розе. Для исключения влияния транзисторов друг на друга между ними расположен заземленный полигон.

Были измерены характеристики данного модуля на различных частотах. На рис. 4а представлено значение выходной импульсной мощности с модуля на частоте $f = 2.8$ ГГц при входной мощности 10 мВт. Выходная мощность при этом составляет 25 дБм, что соответствует 320 мВт импульсной мощности. Стоит отметить, что данный модуль лучше работает на более низких частотах. Например, на частоте $f = 1.428$ ГГц выходная мощность со сборки соответствует 700 мВт.

Для испытаний данной сборки использовались одно общее напряжение на три стока и одно общее напряжение на три затвора. В таком варианте подключения мощность снижается за счет разброса характеристик каждого транзистора. При индивидуальном питании каждого транзистора можно добиться на 10–15% большей мощности. Для питания сборки от единого источника питания необходимо подбирать номиналы резисторов делителей для каждого затвора.

Таблица 1.

Наименование транзистора	ЗП618А	MPAL2731M30	IB2729M120
Диапазон рабочих частот, ГГц	0.5–4	2.7–3.1	2.7–2.9
$P_{\text{вх}}$, необходимая для работы в нормальном режиме, Вт	—	2	20
$P_{\text{вых}}$, Вт	250 мВт	30	120
k_{yc} на частоте $f = 2.8$ ГГц, дБ	>15	11–15	8.97
$\tau_{\text{имп}}$, максимальная длительность импульса, мкс	—	300	300
D , максимальный коэффициент заполнения, %	—	10	10

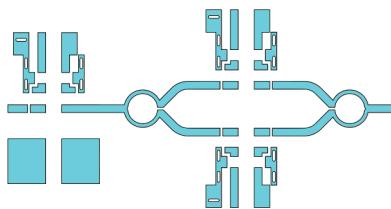


Рис. 2. Топология первого усилительного модуля.

На рис. 4б представлена форма сигнала на выходе с данного усилительного модуля. Сигнал имеет синусоидальную форму. В итоге на частоте $f = 2.8$ ГГц максимально возможная мощность с данного модуля составила 320 мВт.

3. РАЗРАБОТКА ВТОРОГО И ТРЕТЬЕГО УСИЛИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ

Основой второго и третьего усилительных модулей являются транзисторы MPAL2731M30 и ILT2731M30. В связи с трудностью приобретения диэлектрика, рекомендованного для создания схемы под данные транзисторы, с помощью программного пакета CST Studio Suite были рассчитаны параметры 50-омной линии под доступный для изготовления материал подложки. На рис. 5а приведена топология платы, а на рис. 5б расположение элементов на ней. Из рисунка видно, что для транзисторов не требуется дополнительных цепей согласования. Для защиты от попадания СВЧ сигналов в цепи затвора и стока по ним стоят LC-фильтры.

Была проведена сборка макетов второго и третьего усилительного модуля (рис. 6). Плата каждого из них расположена на медной теплоотводящей подложке, внутри которой располагается специальное углубление под транзистор. Каждый модуль помещен в фрезерованный алюминиевый корпус, который выполняет не только функцию радиатора, но и препятствует выходу СВЧ-излучения в окружающее пространство.

С обеих сторон от платы расположены СВЧ изоляторы, обеспечивающие защиту модуля от отраженной СВЧ волны. Потери, вносимые одним подобным устройством, составляют порядка 0.3 дБ, что допустимо в рамках данной задачи, так как транзисторы в каждом из мощных модулей имеют значительный запас по выходной мощности.

Были проведены испытания макетов второго и третьего усилительных модулей. При этом сборки отличаются только отсутствием изоляторов на одной из них. На рис. 7а представлена выходная импульсная мощность после третьего усилительного модуля. Она составила 45 дБм, что соответствует 32 Вт. На рис. 7б представлена форма сиг-

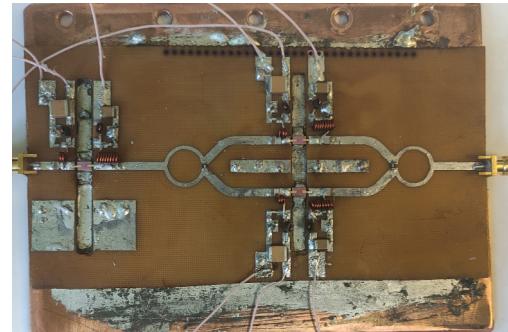


Рис. 3. Вид макета первого усилительного модуля.

нала на выходе с третьего модуля, а на рис. 7в огибающая высокочастотного импульса.

4. РАЗРАБОТКА ЧЕТВЕРТОГО УСИЛИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ И ИСПЫТАНИЯ УСИЛИТЕЛЯ

Заключительный усилительный модуль строится на биполярном транзисторе IB2729M120. Данный транзистор обладает высокой надежностью и имеет защиту от перегрузок. Стоит отметить, что данный транзистор является несогласованным, в связи с чем на входе и выходе данного транзистора стоят специальные согласующие цепи (рис. 8а). В цепи питания также имеется полосковый фильтр, не пропускающий СВЧ сигнал в источник питания. Питание данного транзистора производится с использованием электролитического конденсатора емкостью $C = 4700$ мкФ.

Была проведена сборка макета четвертого усилительного модуля и проведены испытания макета всего усилителя. Макет четвертого модуля представлен на рис. 8б, а макет всего усилителя на рис. 9.

На вход усилителя подавалась импульсная мощность равная 10 мВт с частотой $f = 2.8$ ГГц. При этом мощность на выходе усилителя равнялась 50 дБм, что соответствует 100 Вт импульсной мощности (рис. 10а). На рис. 10б представлена форма сигнала на выходе усилителя.

В результате испытаний было выявлено, что второй усилительный модуль перегревался в связи с повышенным потреблением мощности, что могло негативно сказаться на надежности устройства. В связи с тем, что задающий генератор данного усилителя, а также первый усилительный модуль могут работать в непрерывном режиме, было принято решение подавать с генератора на вход усилителя постоянную СВЧ мощность. При этом импульсный ВЧ сигнал на выходе в созданном прототипе усилителя реализован с использованием схемы управления, в которой входной синхроимпульс через драйвер управляет затвором второго усилительного модуля.

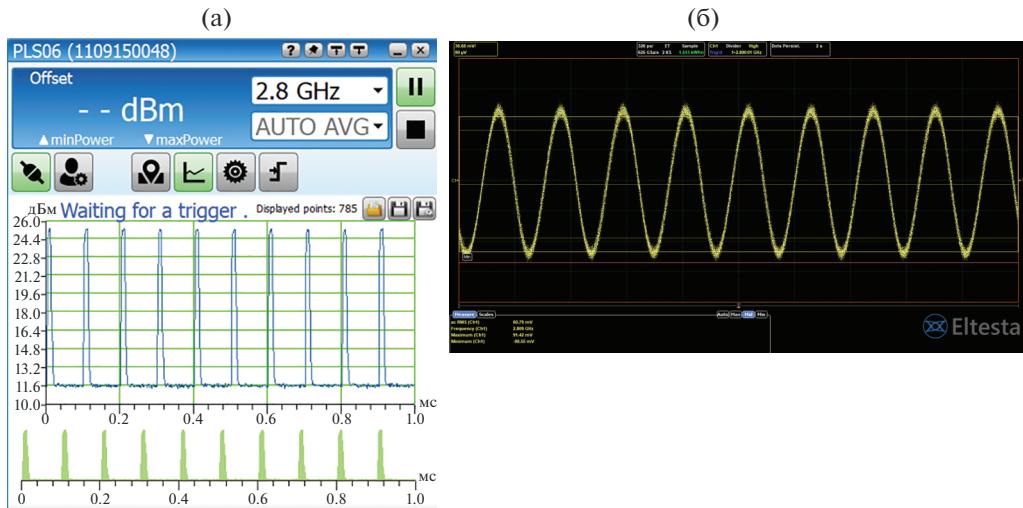


Рис. 4. Результаты измерений характеристик первого усилительного модуля: (а) импульсная мощность; (б) форма ВЧ сигнала с модуля.

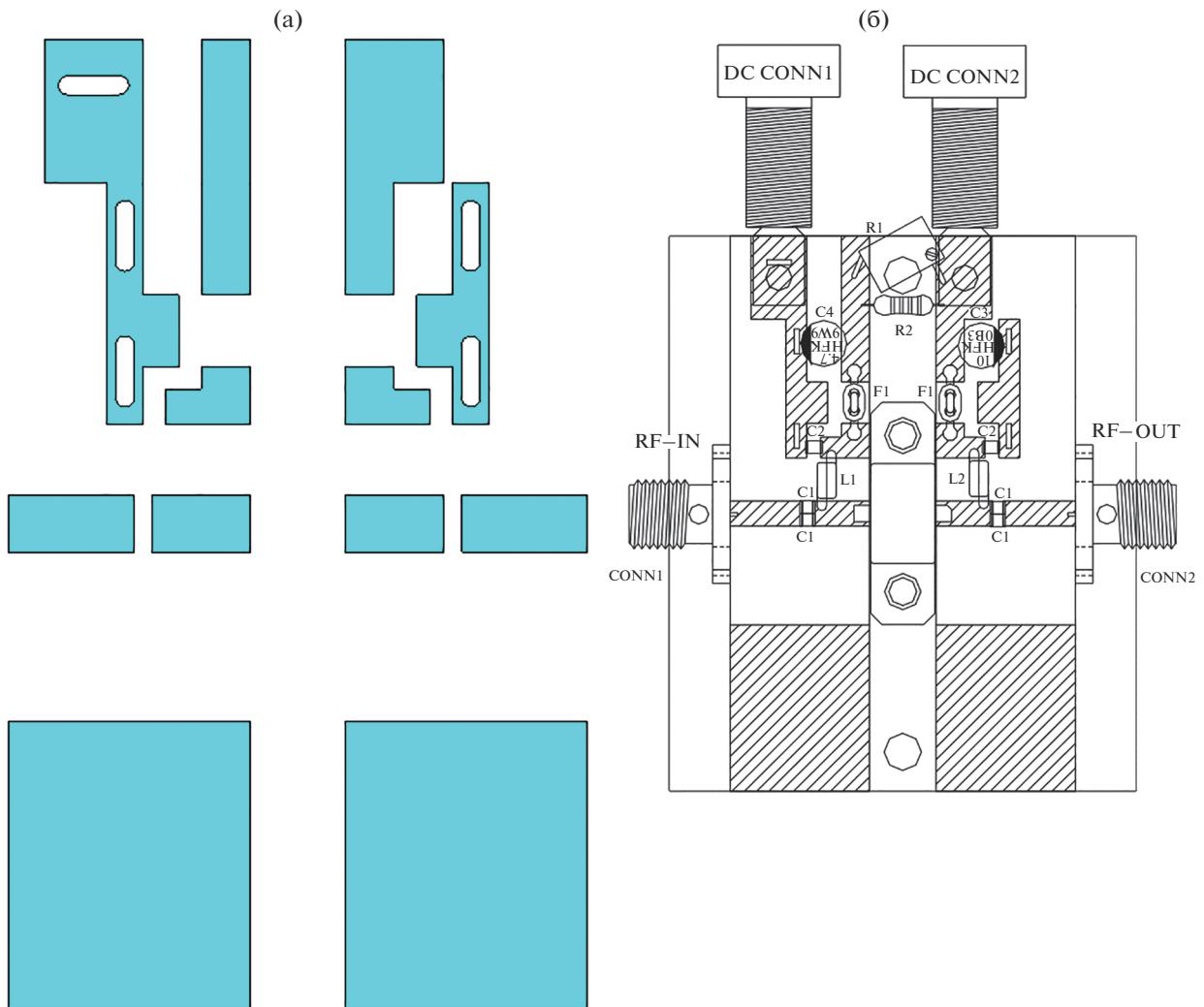


Рис. 5. Вид платы второго усилительного модуля: (а) рассчитанная топология платы; (б) вид платы с сосредоточенными элементами.

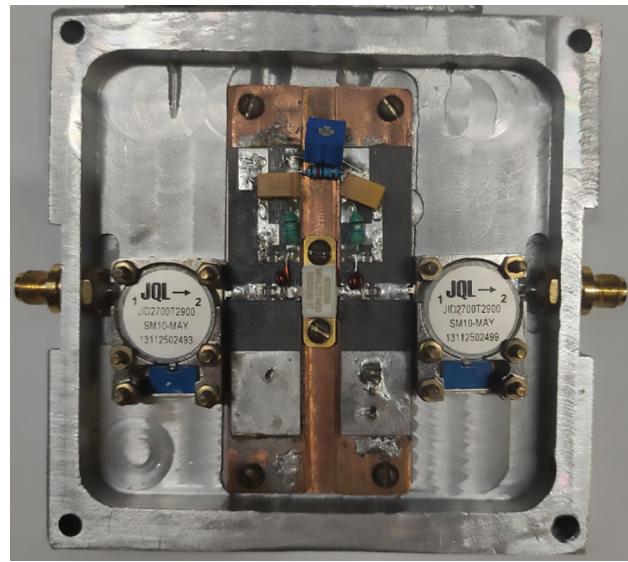


Рис. 6. Вид второго усилительного модуля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведена разработка СВЧ усилителя, способного выдавать не менее 100 Вт импульсной мощности на частоте $f = 2.8$ ГГц. При этом длительность импульсов составляет не менее $\tau = 8$ мкс, а частота их следования не менее $f_{\text{имп}} = 100$ Гц. В рамках данной задачи разработана блок схема усилителя и определена ее компонентная база. Выполнены разработка топологий плат для каждого усилительного модуля, сборка и настройка макетов мо-

дулей для их работы в расчетном режиме. Проведены испытания каждого модуля в отдельности и макета усилителя в целом, а также измерены их основные характеристики. Полученные результаты свидетельствуют об успешном создании прототипа мощного СВЧ усилителя, предназначенного для работы в составе генератора-драйвера усилительно-го клистрона с рабочей частотой $f = 2.8$ ГГц. Данное устройство является отечественным аналогом мощных СВЧ усилителей, широко используу-

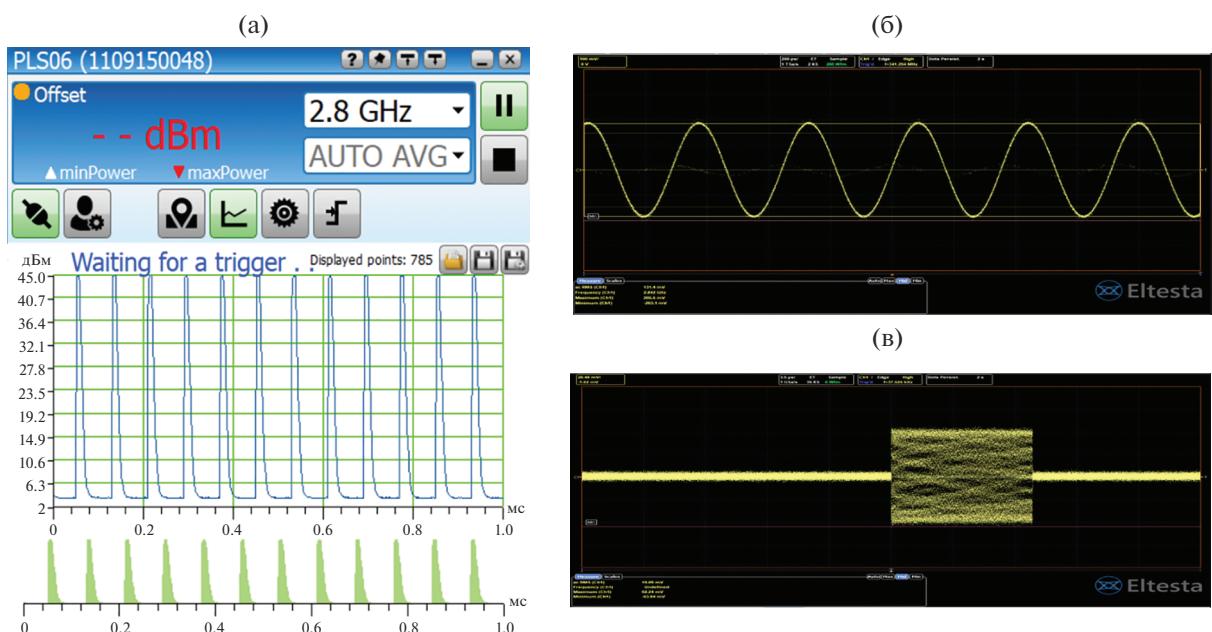


Рис. 7. Выходные параметры с третьего усилительного модуля: (а) импульсная мощность; (б) форма сигнала с модуля; (в) огибающая высокочастотного импульса.

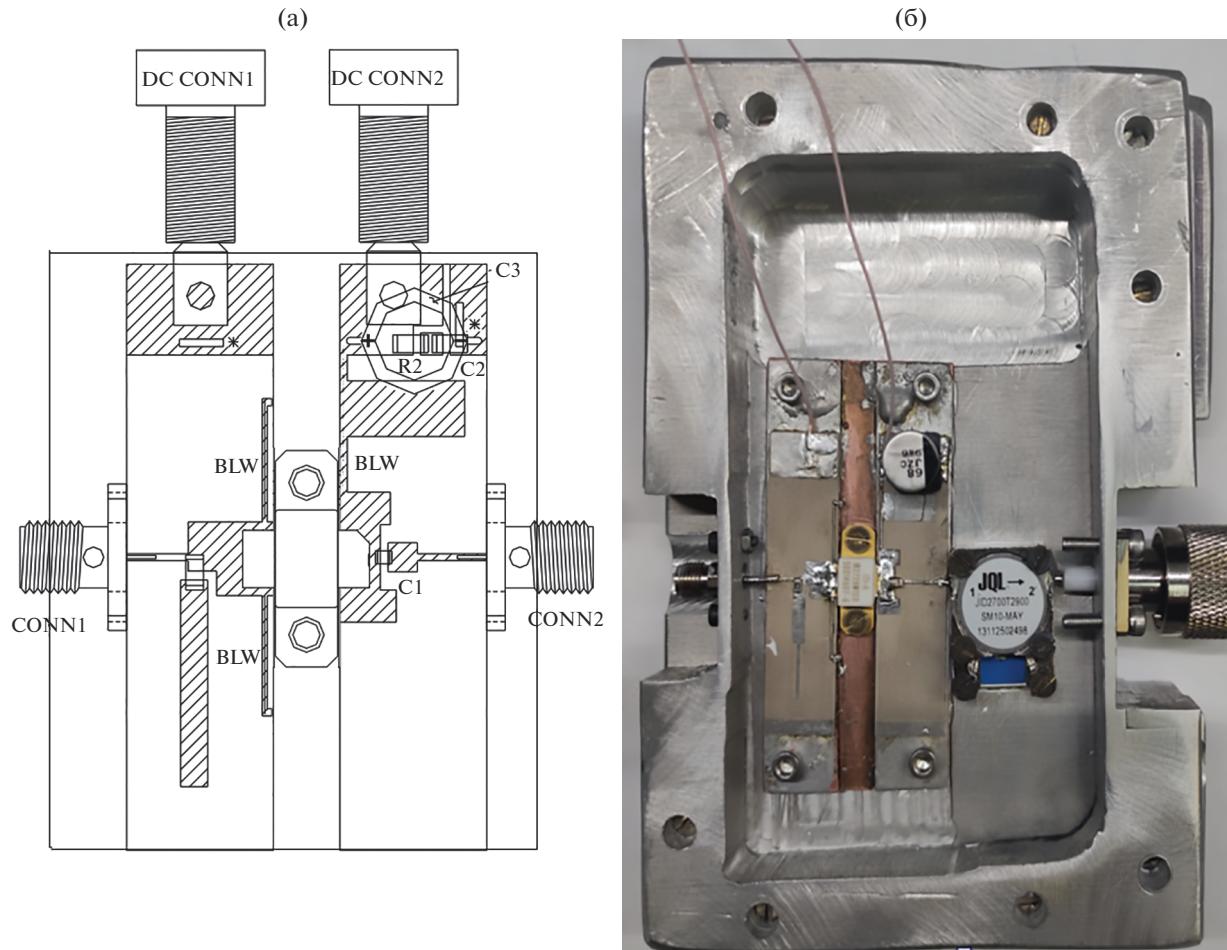


Рис. 8. Вид четвертого усилительного модуля: (а) вид платы с сосредоточенными параметрами; (б) вид макета модуля.

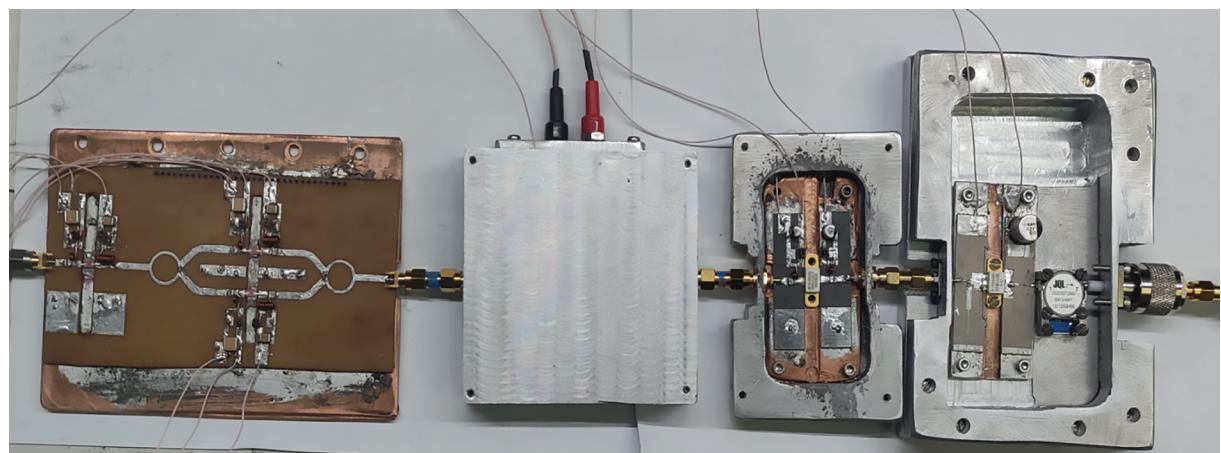


Рис. 9. Вид макета усилителя.

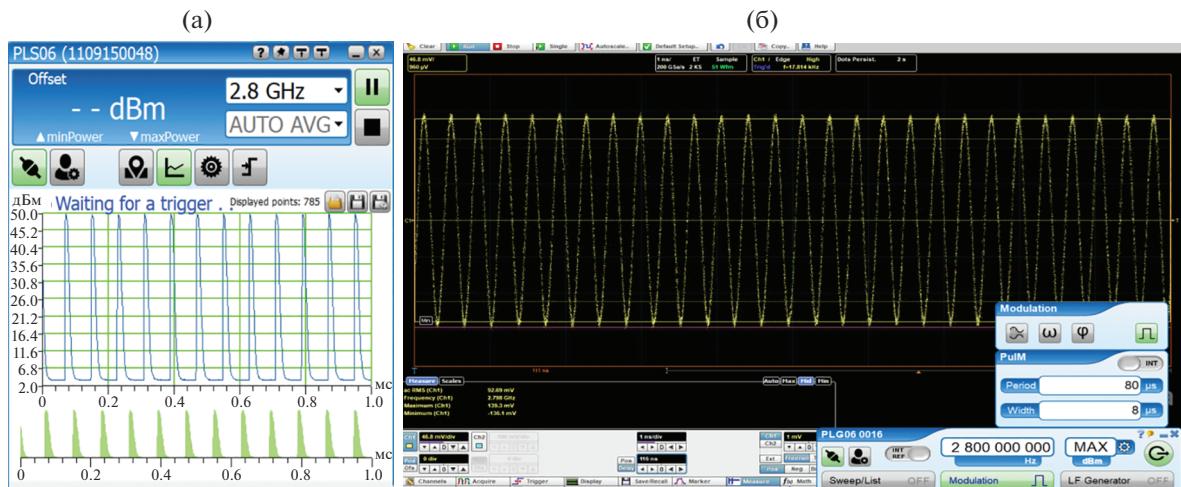


Рис. 10. Выходные сигналы макета усилителя: (а) импульсная мощность; (б) форма выходного сигнала макета усилителя.

емых за рубежом, и может являться основой для разработки более мощных импульсных усилителей, применяемых в системах ВЧ питания ускорителей и других мощных СВЧ установках.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г.)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Sainkar S.R. et al. // Fusion Eng. Des. 2020. V. 158. P. 111692.
2. Gaspar M. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. 2011. V. 637 (1). P. 18–24.
3. Jacob J. CAS—CERN Accelerator School: Power Converters. 2016. P. 197–216.
4. Nakatani K., Ishizaki T. // J. Electromagn. Eng. Sci. 2015. V. 15 (2). P. 82–88.

5. Di Giacomo M. // Proc. PAC'09. Vancouver, BC, Canada. 2009. P. 757. <https://accel-conf.web.cern.ch/PAC2009/papers/tu4rai01.pdf>
6. Wojtasik W., Gryglewski D., Sędek E. // J. Telecommun. Inform. Tech. 2002. No. 1. P. 11–13.
7. Goyal U. et al. // Proc. IEEE Applied Electromagnetics Conf. (AEMC). Guwahati, India. 2015 P. 1. <https://doi.org/10.1109/aemc.2015.7509249>
8. Motahari S.R., Pahlevaninezhad H., Beyragh D.S. // Proc. Int. Symp. Signals, Systems and Electronics. Nanjing, China. 2010. V. 1. P. 1. <https://doi.org/10.1109/issse.2010.5607080>
9. Franco M.J. // Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symposium Digest (MTT). Seattle, WA. 2013. P. 1. <https://doi.org/10.1109/mwsym.2013.6697351>
10. Mitani E., Aojima M., Sano S. // Proc. Eur. Microwave Integrated Circuit Conf. Munich, Germany. 2007. P. 176–179. <https://doi.org/10.1109/emicc.2007.4412677>
11. Suebsombut P., Koch O., Chalermwisutkul S. // Proc. ECTI Int. Conf. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Chiang Mai, Thailand. 2010. P. 561–565.

Development of an Amplifier for a 2.8 GHz Clistron Pulse Generator-Driver

M. S. Dmitriev¹, * , M. V. D'yakonov¹, and S. A. Tumanov¹

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: msdmitriyev@mephi.ru

Received June 21, 2024; revised June 21, 2024; accepted July 4, 2024

Abstract—Prototype amplifier with operating frequency of $f = 2.8$ GHz for pulsed RF power supply of high-power amplifying klystrons has been developed. The amplifier block diagram has been developed. The board topologies for each amplifier module have been proposed. The amplifier module models have been assembled and adjusted. The amplifier model has been assembled and tested.

Keywords: klystron, amplifier module, pulsed microwave generator, pulsed microwave power