

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1
СВЧ-ТЕХНИКА
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 2 (501)

2009

Издаётся с 1950 г.

Главный редактор
д.т.н. А.Н. Королев

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (зам. главного редактора),
д.т.н. **Б.Н. Авдонин** (зам. главного редактора, ОАО ЦНИИ «Электроника»),
к.т.н. **В.Н. Батыгин**, **Ю.А. Будзинский**, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**, **Б.Ф. Горбик**,
С.И. Гришин, д.ф.-м.н. **Б.Ч. Дюбуа**, д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **Ю.А. Кондрашенков**,
к.т.н. **А.С. Котов**, к.т.н. **Е.А. Котюргин**, к.т.н. **П.В. Куприянов**,
к.т.н. **В.В. Лисс**, д.т.н. **М.И. Лопин**, **В.М. Малышник**, **В.А. Мальцев**,
к.т.н. **П.М. Мелешкевич**, д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**,
Е.Н. Покровский, к.т.н. **А.В. Потапов**, к.т.н. **С.Е. Рожков**,
д.т.н. **К.Г. Симонов**, **В.П. Стебунов** (*ответственный секретарь*),
к.т.н. **А.М. Темнов**, д.т.н. **Н.Д. Урсуляк**,
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО НПП «Исток-Система»),
О.А. Морозов (ЗАО «НПП «Магратеп»),
к.т.н. **А.Г. Михальченков** (МУП «ДПРН Фрязино»),
д.ф.-м.н. **А.И. Панас** (ИРЭ РАН),
к.т.н. **В.В. Абрамов** (ФГУП СКБ ИРЭ РАН),
А.А. Туркевич (ФГУП «НПП «Циклон-Тест»)

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук)

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Выпуск 2(501)

2009

**Материалы юбилейной научно-технической конференции,
посвященной 65-летию ФГУП «НПП «Исток»
(28–29 августа 2008 г.)**

Ч а с т ь I

Электровакуумные приборы

<i>Каргин А.Н., Воскобойник М.Ф., Морозов О.А., Савенко Г.П.</i> – Мощный импульсный магнетрон L-диапазона	4
--	---

Комплексированные изделия

<i>Котов А.С., Закурдаев А.Д., Дюбуа Б.Ч., Востров М.С., Лаппо А.Я.</i> – Многофункциональные малогабаритные твердотельно-вакуумные СВЧ комплексированные изделия с малым временем готовности	10
---	----

Твердотельная электроника

<i>Гусев А.П., Куликов А.В., Куприянов П.В., Пожидаев В.Н.</i> – Автоматизированный комплекс для измерения параметров широкополосных приемных устройств СВЧ с расширенным динамическим диапазоном	23
---	----

<i>Темнов А.М., Дудинов К.В., Богданов Ю.М., Крутов А.В., Красник В.А., Лапин В.Г., Щербаков С.В.</i> – Комплект унифицированных МИС СВЧ для многоканальных приемопередающих модулей АФАР X-диапазона	31
---	----

Лазеры и их применение

<i>Королев А.Н., Котюргин Е.А., Лябин Н.А., Доманов М.С., Покровский Е.Н.</i> – Состояние и перспективы развития автоматизированных лазерных технологических установок типа «Каравелла» для прецизионной микрообработки материалов изделий СВЧ-техники на ФГУП «НПП «Исток»	45
---	----

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Published by Federal State Unitary Enterprise “RPC “Istok”

The Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation (MINPROMTORG)

Radioelectronic Industry Department

C O N T E N T S

Issue 2(501)	2009	Founded in 1950
---------------------	-------------	------------------------

The Proceedings of the Jubilee Scientific and Engineering Conference

Devoted to the 65-th Anniversary of FSUE «RPC «Istok»

(August 28–29, 2008)

Part I

Electrovacuum devices

Kargin A.N., Voskoboinik M.F., Morozov O.A., Savenko G.P. – L-band high power pulsed magnetron	4
--	---

Complex devices

Kotov A.S., Zakurdayev A.D., Djubua B.Ch., Vostrov M.S., Lappo A.Ya. – Multifunctional small-size solid-state vacuum microwave interconnected devices with a small readiness time	10
---	----

Solid-state electronics

Gusev A.P., Kulikov A.V., Kupriyanov P.V., Pozhidayev V.N. – An automated complex for measuring parameters of wideband receiving microwave devices with expanded dynamic range	23
--	----

<i>Temnov A.M., Dudinov K.V., Bogdanov Yu.M., Krutov A.V., Krasnik V.A., Lapin V.G., Scherbakov S.V.</i> – A set of unified MMICs for X-range multi-channel R/T active phased array modules	31
---	----

Lasers and their applications

<i>Korolev A.N., Kotyurgin Ye.A., Lyabin N.A., Domanov M.S., Pokrovsky Ye.N.</i> – The state and prospects of development of automated laser technological installations of “Karavella” type for precision microprocessing of materials for microwave engineering products at FSUE “RPC “Istok”	45
---	----

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.642.3

МОЩНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНЕТРОН *L*-ДИАПАЗОНА

А. Н. Каргин, М. Ф. Воскобойник, О. А. Морозов, Г. П. Савенко

ЗАО «НПП «Магратен» г. Фрязино

Описаны методы проектирования и особенности конструкции мощного импульсного магнетрона *L*-диапазона, созданного на основе компьютерного моделирования и оптимизации формы магнитного поля. Магнетрон со связками имеет умеренную высоту анода и простую конструкцию. КПД – порядка 60 % и небольшие габариты отличают его от известных длинноанодных магнетронов.

Methods of designing and design peculiarities of *L*-band high power pulsed magnetron manufactured on the basis of computer modeling and optimization of magnetic field shape have been described. Strapped magnetron has a moderate anode height and a simple design. The efficiency of about 60% and small dimensions differ it from well-known long-anode magnetrons.

КС: магнетрон, компьютерное моделирование, КПД

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для военных и промышленных целей потребовались СВЧ-генераторы с большой энергией импульса.

Сложились разные подходы к созданию таких генераторов. Наиболее известны релятивистские магнетроны [1], в которых получена гигаваттная мощность на очень коротких импульсах (десятка наносекунд). Низкий КПД таких приборов (менее 35 %) и слишком высокие напряжения требуют мощного и громоздкого оборудования.

При другом подходе используются магнетроны умеренной мощности, работающие с длинным импульсом в единицы микросекунд при КПД 50...60 % и напряжении менее 200 кВ [2]. Это позволяет резко уменьшить массу и габариты СВЧ-устройств.

Целью данной работы было создание 3-МВт магнетрона небольших габаритов, допускающих применение в мобильных установках.

2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Для создания сверхмощного магнетрона нужно решить следующие ключевые задачи:

1) генерация СВЧ-мощности, уровень которой может быть ограничен параметрами электродинамики и электроники, т.е. конструкцией анода;

- 2) рассеяние мощности обратной электронной бомбардировки на катоде;
- 3) обеспечение электрической прочности.

Поскольку взаимодействие электронов с СВЧ-полем происходит под щелями анодной структуры, генерируемая мощность пропорциональна полной высоте щелей NH (N – число резонаторов, H – высота анодного блока), однако при увеличении NH конструктор наталкивается на известные проблемы.

Так, высота анода обычно ограничивается, во избежание изменения СВЧ-поля вдоль оси магнетрона. С ростом высоты также слабеет влияние связок, что уменьшает разделение видов колебаний и снижает стабильность работы магнетрона.

С другой стороны, увеличение числа резонаторов ухудшает разделение видов и усложняет конструкцию.

Тем не менее в 50-е годы XX века в СССР и Великобритании были разработаны длинноанодные магнетроны, способные генерировать сверхбольшие мощности в соленоидной магнитной системе [3]. В магнетроне Бута использовался анод без связок высотой порядка длины волны λ . Разделение видов колебаний оказалось небольшим, но приемлемая устойчивость работы обеспечивалась специальным осевым выводом энергии с симметричной связью, реализованной соединением торцов ламелей с диском, который излучал энергию в выходной волновод (рис.1).

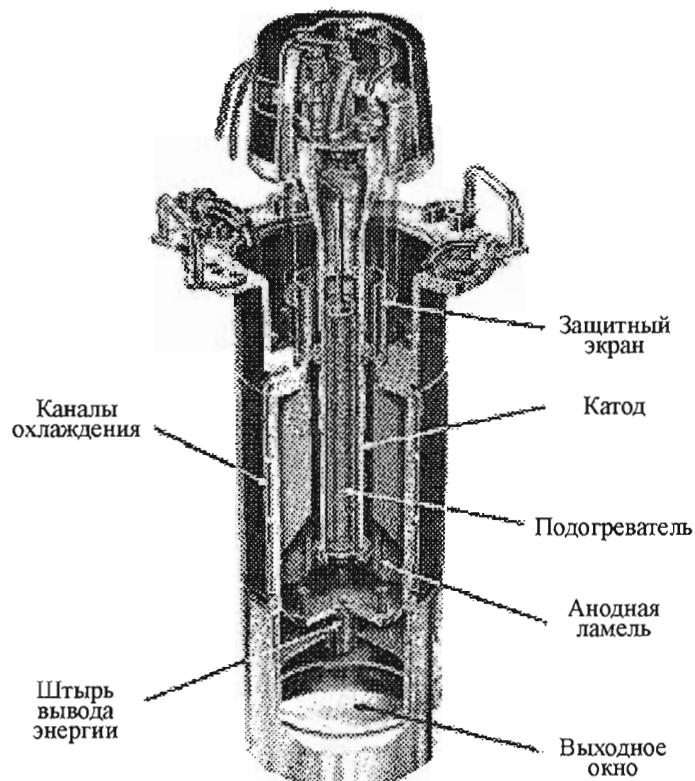


Рис. 1. Магнетрон M565 фирмы EEV, Великобритания
($P_{\text{вых}} = 5 \text{ МВт}$, $U = 48 \text{ кВ}$, $J = 240 \text{ А}$, $m = 33 \text{ кг}$)

Для создания малогабаритного магнетрона была выбрана классическая конструкция анода со связками. Такое решение стало возможным благодаря исследованию факторов, ограничивающих мощность генерации. Оказалось, что с увеличением анодного тока срыв генерации наблюдается при критической плотности заряда электронной спицы (рис. 2), равной плотности Бриллюэна.

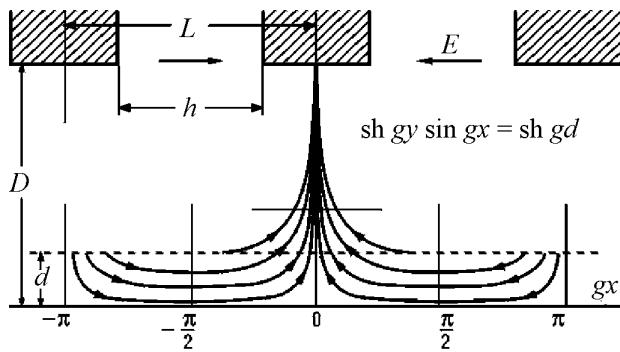


Рис. 2. Электронная спица в пространстве взаимодействия магнетрона

При этом максимальная мощность генерации на единицу полной высоты анода (без учета тепловых и эмиссионных ограничений) выражается формулой [4]:

$$\frac{P_{\max}}{NH_a} = \frac{2Q_{\text{BH}}}{p^2 C_{11}} \frac{3_a e_0}{6F_c} f_0 U_a^2,$$

где N – число анодных ламелей; H_a – высота анода; η_a – анодный КПД; $F_c = (\text{sh}\pi\alpha/\pi\alpha)(\Omega/\text{sh}2\Omega)$ – критическая функция; $\alpha = D/L$ – коэффициент формы ячейки; $\Omega = f_0/f_{\text{ц}}$ – нормированная частота; $f_{\text{ц}}$ – циклотронная частота; f_0 – частота генерации магнетрона; U_a – напряжение анода.

На основе полученной оценки мощности была уменьшена высота анода до минимума, что решило задачу получения требуемого магнитного поля. При напряжении анода 40 кВ прибор имеет расчетную максимальную мощность 3,8 МВт и КПД $\eta_a = 64\%$.

Расчет резонаторов проводился с помощью 3D-программы электромагнитного моделирования (рис. 3). Точность оценки резонансной частоты составила 2,0 %. Подбор осевого размещения связок обеспечил однородность СВЧ- поля по высоте резонатора не хуже 10 % (рис. 4).

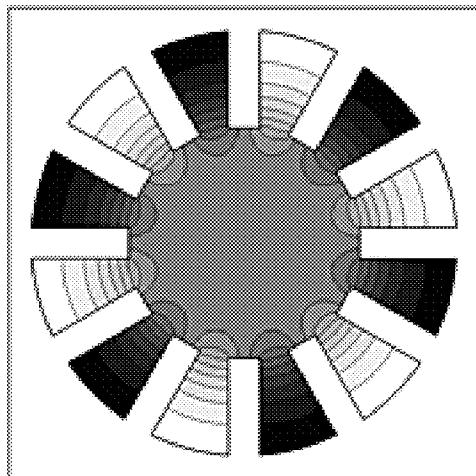


Рис. 3. Картина магнитного СВЧ- поля π -вида в резонаторах

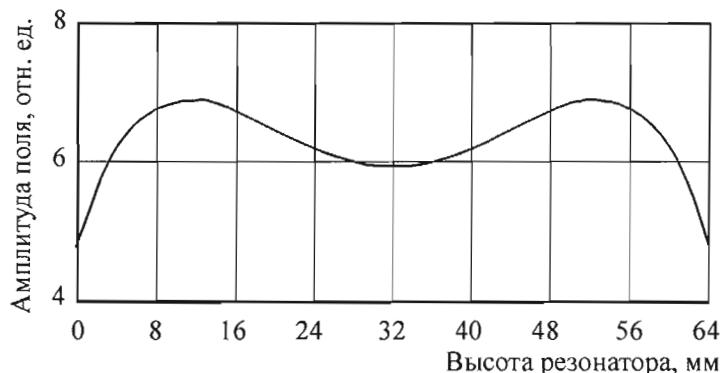


Рис. 4. Амплитуда электрического СВЧ-поля π -вида
вдоль высоты резонатора

3. КОНСТРУКЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Анод имеет 12 ламелей с двусторонними связками (рис. 5). В магнетроне применен симметричный вывод энергии типа «паук». Три лапки связи соединяются со штырем, возбуждающим прямоугольный волновод. Для подавления вторично-электронного разряда в выводе энергии применен штырь со стаканом, оригинальная форма которого подобрана с помощью компьютерного моделирования.



Рис. 5. Анодный блок с выводом энергии

Особое внимание было уделено отработке магнитной системы для формирования поля типа «прямая бочка». Благодаря компьютерному моделированию соленоида и полюсных наконечников достигнута однородность поля не хуже 1,5 %. Это позволяет реализовать расчетные параметры прибора и выровнять нагрузку на катод.

Особенностью магнетрона является применение оксидного катода. Специальная технология, разработанная А. М. Соколовым (ФГУП «НПП «Исток»), включает спекание Ni-губки на молибденовом керне, пропитку карбонатами и опрессовку под большим давлением (рис. 6).

Это обеспечивает устойчивость катода к обратной электронной бомбардировке и в результате – долговечность прибора порядка 4...5 тыс. ч.

Серьезные трудности вызвало обеспечение электрической прочности со стороны торцевой полости, в которой реализован вывод энергии. Исключение пробоев достигнуто благодаря применению полированного катодного экрана из нержавеющей стали (см. рис. 6).

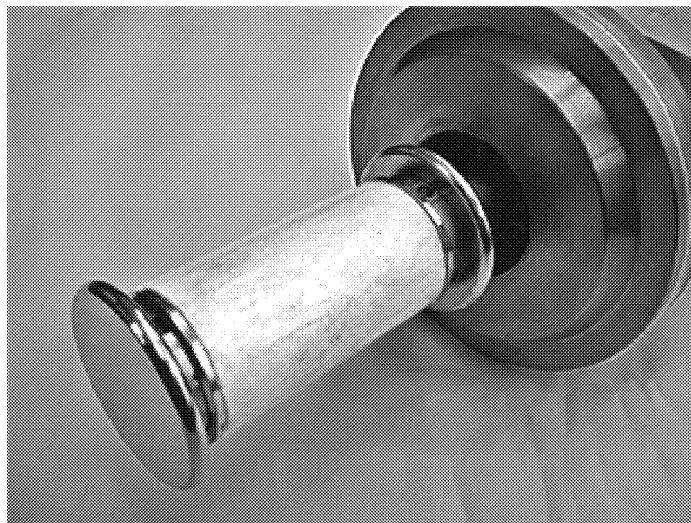


Рис. 6. Катодная ножка с полюсным наконечником

Экспериментальные данные магнетрона

Импульсная мощность, МВт	3,0
Длительность импульса, мкс	4,0
Энергия импульса, Дж	12
Импульсное напряжение анода, кВ	40
Импульсный ток, А	130
КПД, %	57,7
Магнитное поле, Тл	0,14
Скважность	1000
Добротность внешняя	130

КПД нашего прибора существенно выше известных аналогов: 58 % против 45 % у магнетрона M5051 фирмы EEV мощностью 2,2 МВт [5], благодаря оптимизации параметров и высокой однородности электромагнитных полей.

На рис. 7 показан внешний вид магнетрона с встроенным вакуумным насосом и водяным охлаждением. Магнетрон помещается в спиральный соленоид, сопряженный с коаксиально-волноводным переходом. Масса магнетрона – 9,5 кг, соленоида – 62 кг (рис. 8).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе компьютерной оптимизации разработан импульсный магнетрон *L*-диапазона мощностью 3 МВт с КПД порядка 60 %. Магнетрон со связками имеет умеренную высоту анода, конструкция прибора получилась проще, КПД выше, а габариты существенно меньше, чем у известных длинноанодных магнетронов фирм EEV(Англия) и «Торий» (Россия).



Рис. 7. Магнетрон мощностью 3 МВт

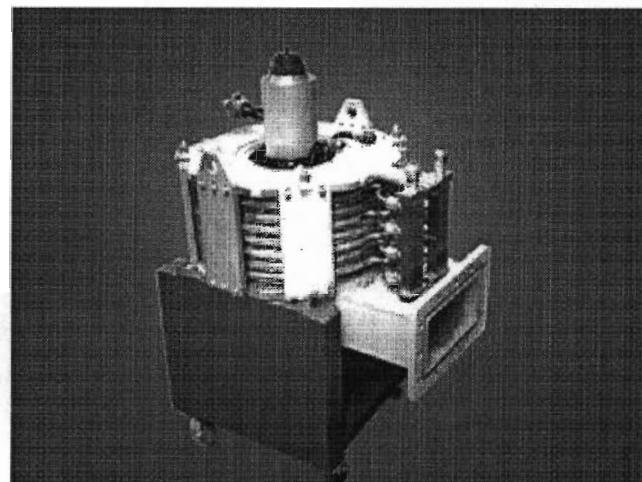


Рис. 8. Магнетрон в соленоиде

Создание такого прибора означает, что мы смогли восстановить на современном уровне технологию мощных импульсных магнетронов, существовавшую на «Истоке» в 50–60 годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Modern microwave and millimeter-wave power electronics / Edited by J. Barker and cat., Wiley-Interscience // IEEE PRESS, 2004.
2. High power, high efficiency, injection locked. Secondary emission magnetron / T.A. Tredo and cat. // IEEE Trans. Plasma Science. – 1992. – Vol. 20, No. 3. – P. 351-359.
3. Бут. Магнетроны с длинным анодом // Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями; пер. с англ. под ред. М.М. Федорова. – М.: Изд. иностр. лит-ры, 1961. – Т. 2.
4. Каргин А.Н. Миниатюрные синхронизированные магнетроны для систем связи // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 62-66.
5. EEV Data Book, 1994.

Статья поступила 5 декабря 2008 г.

КОМПЛЕКСИРОВАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

УДК 621.385.6:621.52

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАЛОГАБАРИТНЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНО-ВАКУУМНЫЕ СВЧ КОМПЛЕКСИРОВАННЫЕ ИЗДЕЛИЯ С МАЛЫМ ВРЕМЕНЕМ ГОТОВНОСТИ

А. С. Котов, А. Д. Закурдаев, Б. Ч. Дюбуа, М. С. Востров, А. Я. Лаппо

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Представлены результаты разработки двух типов малогабаритных мощных передающих комплексированных изделий (КИ) 2-см диапазона длин волн. В состав КИ входят твердотельный СВЧ-возбудитель (синтезатор частоты) и выходной импульсный усилитель на миниатюрном многолучевом клистроне. СВЧ КИ обеспечивают следующие характеристики формируемых сигналов: нестабильность частоты – не более $\pm 2 \cdot 10^{-4}$; уровень фазовых шумов – не более -(90...100) дБ/Гц на частотах анализа 5...10 кГц; уровень паразитных колебаний – не более -60 дБ; время готовности – не более 8 с при выходной импульсной мощности 350...400 Вт (скважность – 3) в полосе рабочих частот до 150 МГц (количество рабочих частот – до 10).

The results of the development of two types of small-size high power transmitting interconnected devices of 2 cm wavelength range are presented. The interconnected device consists of a solid-state microwave exciter (frequency synthesizer) and output pulse amplifier on a miniature multiple-beam klystron. Microwave interconnected devices provide the following characteristics of the signals being formed: frequency instability – not more than $\pm 2 \cdot 10^{-4}$; phase noise level – not more than -(90...100) dB/Hz at 5...10 kHz analyses frequencies; parasitic oscillation level – not more than -60 dB; readiness time – not more than 8 s at 350...400 W output pulse power (off-duty factor – 3) in operating frequency band – up to 150 MHz (the number of operating frequencies – up to 10).

КС: СВЧ комплексированное изделие, синтезатор частоты, миниатюрный многолучевой клистрон

1. ВВЕДЕНИЕ

Для современных когерентных доплеровских РЛС необходимы радиопередающие устройства, обладающие высокими техническими характеристиками по целому ряду параметров: уровню выходной импульсной (и средней) мощности, стабильности частоты выходных сигналов, относительному уровню амплитудных и фазовых шумов, времени готовности и другим. Указанные характеристики должны быть обеспечены при жестких ограничениях на массу и габариты передающего устройства в условиях воздействия внешних механических и климатических дестабилизирующих факторов.

На ФГУП «НПП «Исток» в течение последних лет проведены разработки двух типов твердотельно-вакуумных передающих комплексированных изделий (КИ), работающих в 2-см диапазоне длин волн, которые являются продолжением ранее выполненных работ.

2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ КИ

Структурная схема мощного, многофункционального СВЧ КИ, работающего на заданной фиксированной частоте, приведена на рис. 1. КИ состоит из двух основных частей: твердотельного возбудителя и выходного усилителя мощности на миниатюрном многолучевом кристалле (ММЛК) [1, 2], которые конструктивно располагаются на едином несущем каркасе.

Схема построения твердотельного возбудителя традиционная, в нем формируются сигнал 1-го гетеродина, сигнал передающего канала, контрольный сигнал и пилот-сигнал.

Основной особенностью структурной схемы данного КИ по сравнению с более ранними конструкциями является то, что в него введен блок формирования импульсного сигнала промежуточной частоты $F_{\text{пч}}$ и непрерывных опорных высокочастотных сигналов для приемного устройства и синхронизатора, что существенно расширило функциональные возможности КИ. Опорный высокостабильный кварцевый генератор является основным узлом этого блока. Кварцевый генератор формирует опорный сигнал F_{OKF} , который поступает на выход КИ, а также на цепочку из двух последовательно соединенных делителей частоты на два. Часть мощности сигнала с выхода первого делителя частоты $F_{\text{синх}} = F_{\text{OKF}}/2$ поступает на выход КИ, а вторая часть – на второй делитель частоты, который формирует сигнал на частоте $F_{\text{пп}} = F_{\text{OKF}}/4$. Этот сигнал подается на диодный преобразователь частоты, на второй вход которого поступает сигнал с опорного кварцевого генератора F_{OKF} . На выходе смесителя формируется сигнал промежуточной частоты $F_{\text{пч}} = F_{\text{пп}} + F_{\text{OKF}}$, который пропускается через узкополосный фильтр, обеспечивающий высокое подавление всех побочных сигналов (более 50 дБ). Для амплитудной модуляции сигнала промежуточной частоты используется $p-i-n$ -ключ со встроенным цифровым драйвером, который обеспечивает подавление сигнала $F_{\text{пч}}$ в паузе не менее 50...55 дБ. Остальная схема построения возбудителя не претерпела изменений. Канал формирования сигнала СВЧ гетеродина f_g состоит из малошумящего опорного СВЧ-генератора на биполярном транзисторе, умножителя (удвоителя) частоты и выходного усилителя мощности, выполненных на полевых транзисторах. Сигнал передающего канала, контрольный сигнал и пилот-сигнал образуются путем преобразования частоты сигнала гетеродина вниз на величину промежуточной частоты $f_{\text{пк}} = f_g - F_{\text{пч}}$.

Промежуточная частота в таких устройствах обычно составляет 24...300 МГц и является достаточно низкой по сравнению с частотой несущего колебания ($f_{\text{пк}} = 13,5...18$ ГГц). Это требует применения для формирования сигнала передающего канала эффективного транзисторного СВЧ-преобразователя частоты с уровнем подавления сигнала гетеродина в выходном сигнале не менее 15 дБ и использования для фильтрации выходного сигнала СВЧ-преобразователя высокодобротного полосно-пропускающего фильтра на диэлектрических резонаторах. В результате этих мер удается снизить уровень комбинационных составляющих в выходном сигнале до величины, не превышающей минус (50...60) дБ по отношению к мощности несущей.

В состав твердотельного возбудителя также входит канал формирования пилот-сигнала на доплеровской поднесущей частоте 50...500 кГц, используемый для контроля функционирования приемного устройства.

Сигнал передающего канала твердотельного возбудителя усиливается выходным усилителем мощности на миниатюрном многолучевом кристалле. Оптимальный уровень входной мощ-

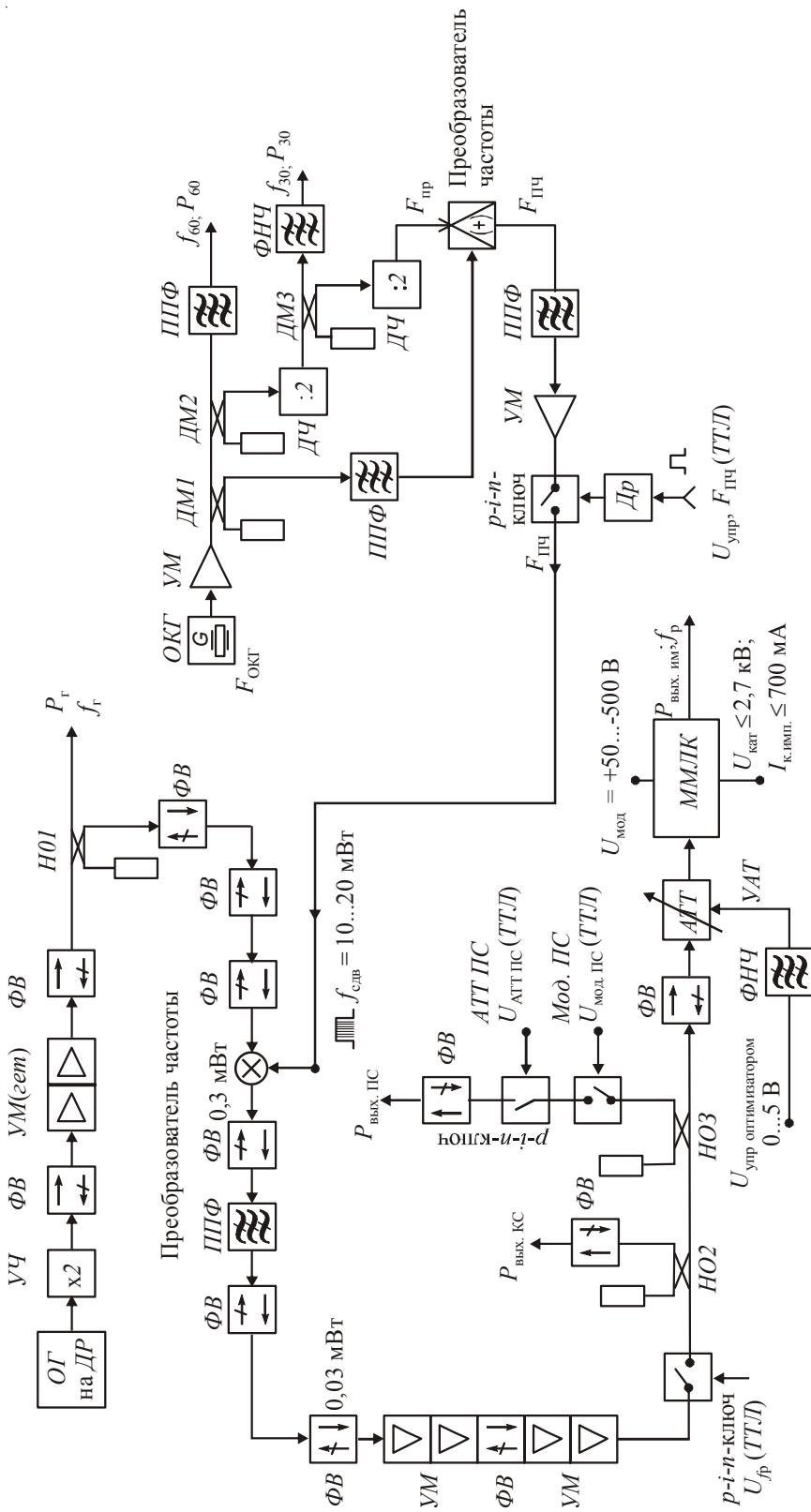


Рис. 1. Структурная схема многофункционального передающего СВЧ КИ, работающего на фиксированной частоте

ности клистронного усилителя обеспечивает $p-i-n$ -аттенюатор твердотельного возбудителя, управляемый от внешнего блока оптимизатора.

Основные характеристики данного КИ приведены в таблице.

Параметр	Тип КИ	
	I	II
Рабочий диапазон длин волн передающего сигнала $f_{\text{ПК}}$, ГГц	13–18	
Количество рабочих частот	1	≥ 10
Выходная импульсная мощность, Вт	≥ 350	≥ 400
Скважность выходного сигнала передающего канала	3	
Время готовности из холодного состояния, с	8	
Полоса усиления выходного ММЛК, МГц	≥ 40	≥ 150
Частота гетеродинного сигнала, МГц	$f_g = f_{\text{ПК}} + F_{\text{ПЧ}}$	
Относительная нестабильность частоты сигнала гетеродина и передающего канала, отн. ед.	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$	
Выходная непрерывная мощность сигнала гетеродина, мВт	60–120	90–150
Относительная спектральная плотность мощности амплитудных флуктуаций основного и гетеродинного выходных сигналов при отстройке от несущей на 5...450 кГц, дБ/Гц	-125	
Относительная спектральная плотность мощности частотных флуктуаций основного и гетеродинного выходных сигналов при отстройке от несущей на 5...450 кГц, дБ/Гц	$\leq -(90-100)$	
Ослабление основного выходного сигнала на выходе усилителя в паузе между импульсами, дБ	140	
Масса, кг	3,2	2,5
Масса с ИП, кг	5,0	4,6

В последнее время все более широкое применение находят мощные СВЧ КИ, использующие СВЧ-синтезаторы частоты для формирования выходных сигналов [5].

Структурная схема СВЧ КИ с электронным переключением частоты выходных сигналов 2-см диапазона длин волн представлена на рис. 2. КИ обеспечивает выходную мощность не менее 400 Вт в полосе 150 МГц.

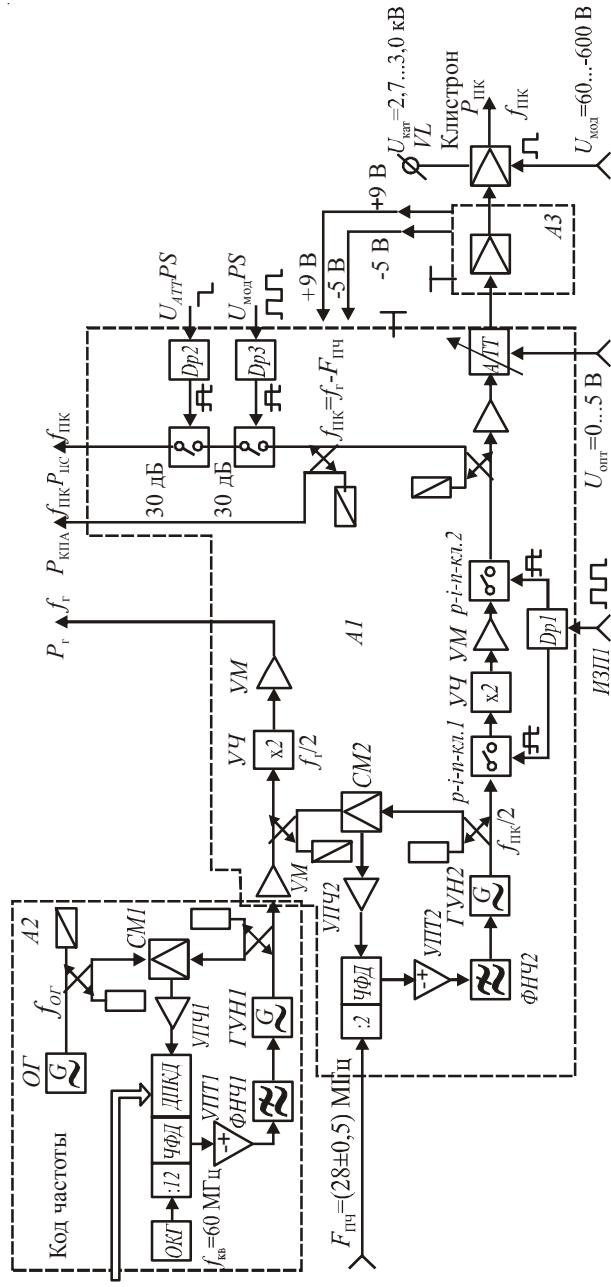


Рис. 2. Структурная схема многофункционального передающего СВЧ КИ
с электронным переключением частоты выходных сигналов

СВЧ КИ этого типа также состоит из двух основных частей: твердотельного СВЧ-синтезатора и усилителя мощности на ММЛК.

Твердотельный возбудитель формирует когерентные сигналы канала гетеродина f_r и передающего канала $f_{\text{пк}} = f_r - F_{\text{пч}}$. СВЧ-сигнал гетеродина непрерывный, а сигнал передающего канала импульсный.

Формирование сетки выходных частот обеспечивает задающий СВЧ-синтезатор частоты, который построен на основе косвенного синтеза частоты выходного сигнала гетеродина в системе фазовой автоподстройки частоты $\Phi\text{АПЧ1}$ под частоту опорного высокостабильного СВЧ-генератора. Переключение частоты выходного сигнала осуществляется по внешней команде за счет изменения коэффициента деления цифрового делителя частоты сигнала $F_{\text{пч1}} = f_{\text{ог}} - f_{\text{гун1}}$, поступающего на вход системы $\Phi\text{АПЧ1}$.

Сформированный синтезатором частоты высокостабильный сигнал $f_r/2$ поступает в усилительно-преобразовательный модуль. В канале гетеродина этот сигнал подается на умножитель частоты на два и далее – на выходной усилитель. В результате формируется сигнал f_r с непрерывной мощностью 90...150 мВт.

В этом модуле также формируется сигнал передающего канала, для этого используется еще одна система ($\Phi\text{АПЧ2}$), которая осуществляет сдвиг частоты сигнала гетеродина вниз на величину промежуточной частоты $F_{\text{пч}} = (28 \pm 0,5)$ МГц.

Для формирования импульсного сигнала передающего канала используются $p-i-n$ -модуляторы с подавлением сигнала в паузе не менее чем на 40 дБ. Оптимальная входная мощность клистронного усилителя может изменяться на 6 дБ в полосе рабочих частот, поэтому в передающем канале имеется управляемый $p-i-n$ -аттенюатор с регулируемым ослаблением 0...10 дБ. Управление $p-i-n$ -аттенюатором осуществляет оптимизатор мощности, не входящий в состав КИ. В модуле также формируется контрольный сигнал с выходной мощностью 0,2...0,6 мВт и пилот-сигнал для контроля функционирования приемного устройства.

Достаточно широкая полоса рабочих частот (для клистронного усилителя) требует введения предварительного усилителя с уровнем выходной мощности в режиме насыщения не менее 250 мВт, что позволяет обеспечить оптимальную входную мощность для клистрона во всей рабочей полосе.

Выбранная схема построения задающей СВЧ-части КИ является, на наш взгляд, оптимальной по целому комплексу параметров, таких, как время переключения частоты, уровень фазовых шумов, уровень паразитных сигналов, масса и габариты. Основные параметры КИ приведены в таблице (колонка II).

Твердотельные возбудители СВЧ КИ выполнены на основе гибридно-интегральной и гибридно-монолитной технологий. В возбудителях используются гибридно-монолитные генераторные, преобразовательные, умножительные и усилительные СВЧ-модули, а также миниатюрные микрополосковые ферритовые вентили. В устройствах фазовой автоподстройки частоты используются многофункциональные цифровые микросхемы, которые монтируются на гибридно-интегральных поликоровых подложках.

Все это позволило уменьшить массу и габариты возбудителя при расширении его функциональных возможностей.

В качестве выходных усилителей мощности сигнала передающего канала в КИ, как уже отмечалось, используются миниатюрные многолучевые клистроны [3,4]. ММЛК являются в настоящее время одним из основных типов выходных усилительных приборов для различных

бортовых систем благодаря, в первую очередь, своим более низким питающим напряжениям (по сравнению с ЛБВ), менее жестким требованиям к стабильности питающих и управляющих напряжений, а также малым габаритам и массе.

Следует отметить, что все эти качества реализуются при высоком уровне выходной импульсной и средней мощности.

ММЛК имеют 18- или 19-лучевые конструкции электронных пушек. Охлаждение ММЛК контактное, путем отвода тепла на элементы конструкции аппаратуры. ММЛК имеют, как правило, 5- или 6-резонаторную систему для увеличения полосы рабочих частот и КПД. В некоторых ММЛК в качестве выходных устройств используются двухсвязные фильтровые системы.

Высокие параметры кристаллов достигаются за счет специальных конструктивно-технологических решений. Особым требованием к ММЛК является полное отсутствие пробоев в условиях воздействия жесткой механической вибрации [4].

Кроме того, одним из важных требований для бортовых систем является обеспечение малого времени готовности. Время готовности кристалла по критерию $P_{\text{вых}} \geq 0,7 P_{\text{вых.ном}}$ определяется в основном временем разогрева катода. Таким образом, уменьшение времени готовности может быть достигнуто за счет уменьшения массы катода и применения специального режима включения кристалла с форсированным накалом. В последнее время был выполнен целый ряд работ, позволивших существенно улучшить эту характеристику ММЛК.

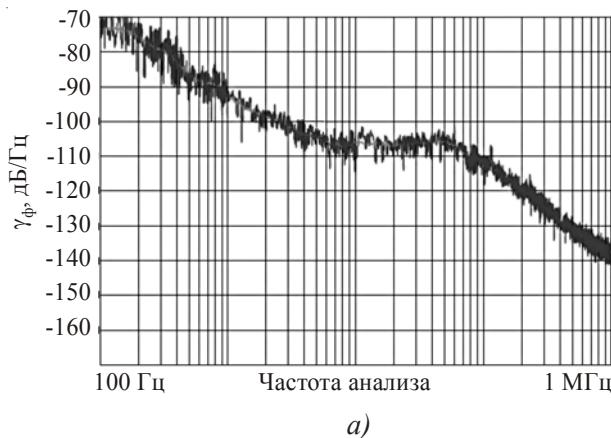
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЮЩИХ СВЧ КИ

Приведем основные экспериментальные результаты, полученные для СВЧ КИ обоих типов.

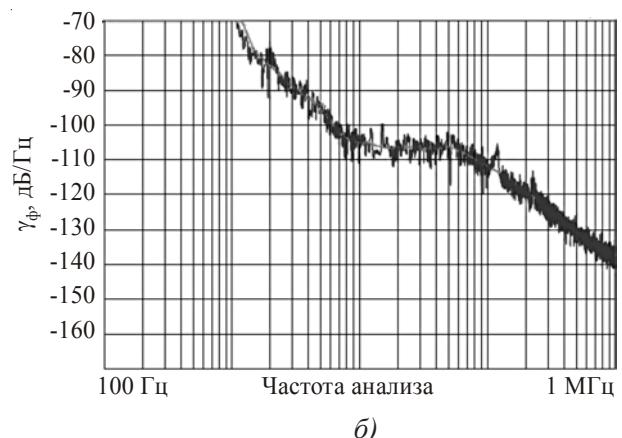
Так, на рис. 3 приведены характеристики относительного уровня частотных (фазовых) шумов сигнала СВЧ гетеродина КИ, работающего на фиксированной частоте без воздействия вибрации и при воздействии широкополосной случайной вибрации (ШСВ). Представленные данные показывают, что благодаря виброзашите опорного генератора ухудшение уровня фазовых шумов составляет не более 5 дБ (минус 96 дБ/Гц на частоте анализа 5 кГц) при значении среднеквадратичного ускорения 10г. На рис. 4 приведены спектры сигнала гетеродина вблизи несущей. Данные, представленные на рис. 4, б показывают, что ширина спектральной линии и уровень мощности сигнала гетеродина при воздействии вибрации остаются практически неизменными. На рис. 5 показан относительный уровень частоты фазовых шумов импульсного сигнала передающего канала, который в доплеровском диапазоне частот анализа не превышает минус 95 дБ/Гц ($F_a = 5 \dots 300$ кГц). На рис. 6 показан спектр импульсного сигнала передающего канала в полосе обзора 300 МГц. Видно, что уровень комбинационных составляющих с частотой $f_{\text{пп}} \pm kF_{\text{пп}}$ (где $k = 1,2,3\dots$) не превышает минус 60 дБ по отношению к несущей. На рис. 7 показан уровень мощности выходного сигнала в передающем канале в паузе между импульсами, который при напряжении $U_{\text{упр}} = -530$ В на управляющем электроде ММЛК составляет не более минус 90 дБ·мВт.

На рис. 8 показан спектр сигнала гетеродина КИ с электронным переключением частот в полосе обзора 10 кГц без воздействия ШСВ и при воздействии ШСВ.

На рис. 9 приведена зависимость относительного уровня мощности частотных (фазовых) шумов сигнала гетеродина в условиях воздействия ШСВ, при этом уровень частотных шумов в полосе частот анализа 5...500 кГц не превышает минус 90 дБ/Гц.

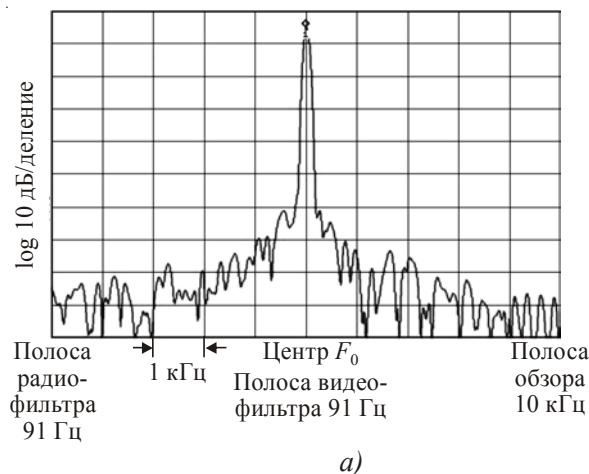


a)

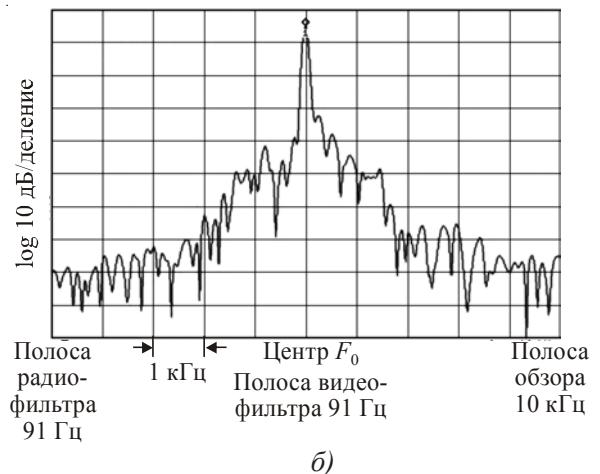


б)

Рис. 3. Относительный уровень фазовых шумов сигнала гетеродина СВЧ КИ, работающего на фиксированной частоте, в доплеровском диапазоне частот анализа:
а – без воздействия ШСВ; б – при воздействии ШСВ со среднеквадратичным значением ускорения $10g$



a)



б)

Рис. 4. Спектр сигнала гетеродина СВЧ КИ, работающего на фиксированной частоте в полосе обзора 10 кГц:
а – без воздействия ШСВ; б – при воздействии ШСВ со среднеквадратичным значением ускорения $10g$

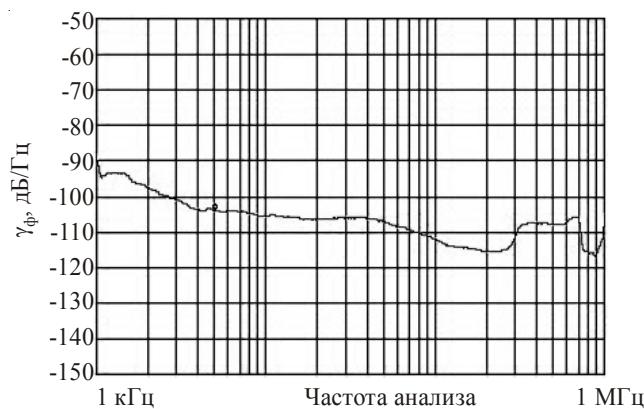


Рис. 5. Относительный уровень фазовых шумов сигнала передающего канала СВЧ КИ в доплеровском диапазоне частот анализа

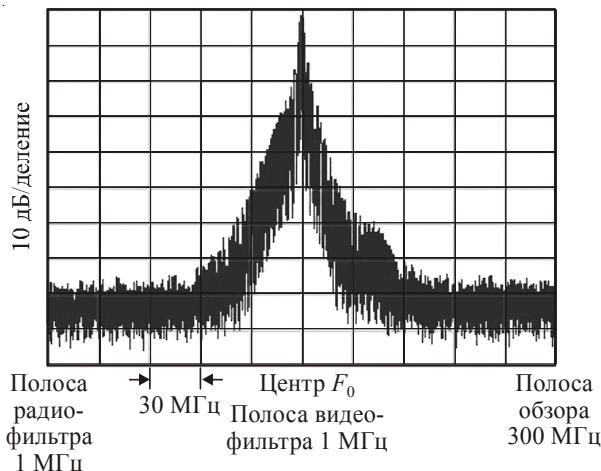


Рис. 6. Спектр выходного импульсного СВЧ-сигнала передающего канала СВЧ КИ в полосе обзора 300 МГц

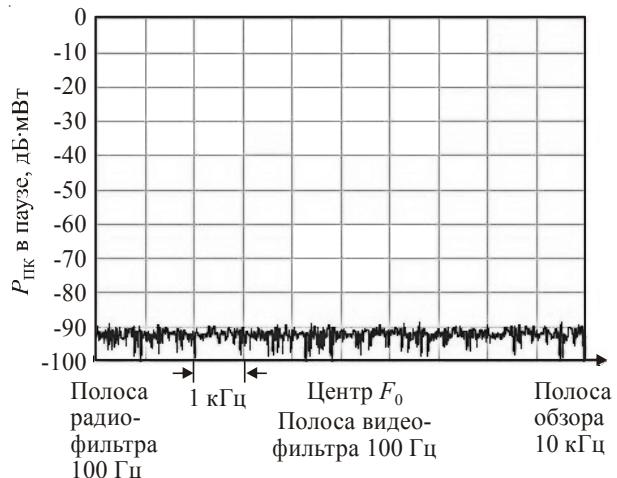
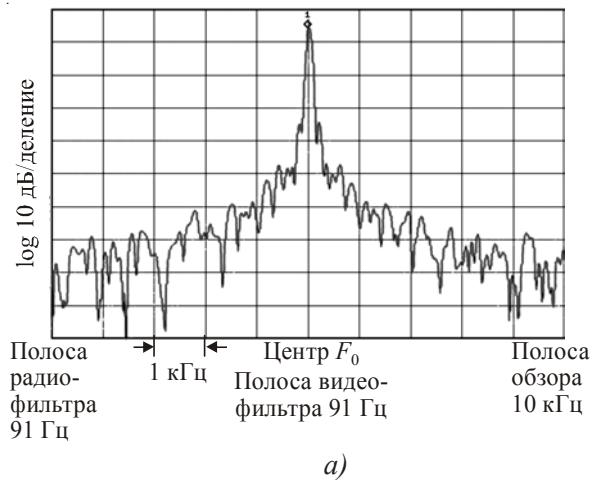
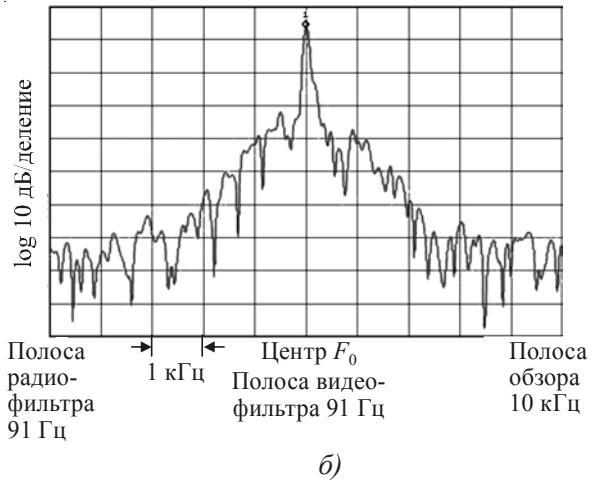


Рис. 7. Уровень мощности СВЧ КИ в передающем канале в паузе между импульсами



a)

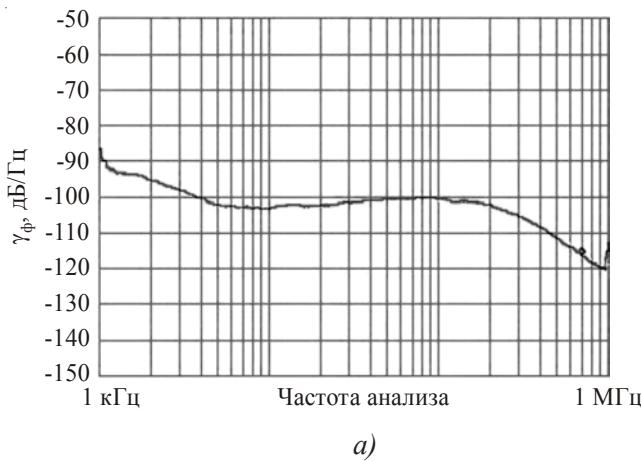
Рис. 8. Спектр сигнала гетеродина СВЧ КИ с электронным переключением частот в полосе обзора 10 кГц:
а – без воздействия ШСВ; б – при воздействии ШСВ со среднеквадратичным значением ускорения 8g



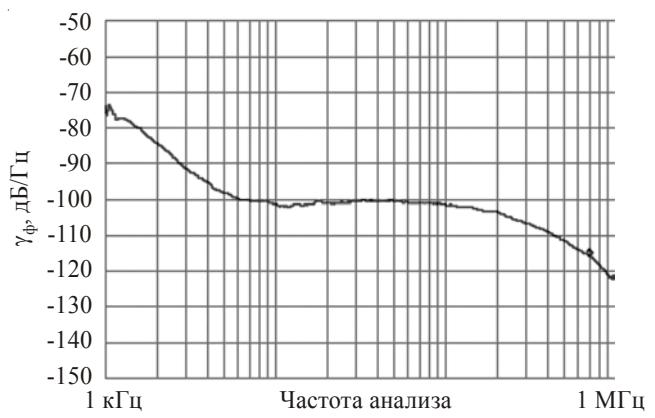
б)

На рис. 10 приведена зависимость времени перестройки частоты сигнала передающего канала для СВЧ КИ II-го типа для двух крайних значений рабочих частот. Максимальное время перестройки частоты не превышает 50 мкс.

На рис. 11 приведены амплитудно-частотные характеристики трех выходных усилителей СВЧ КИ этого же типа, а также характеристики изменения управляющего напряжения оптимизатора в рабочей полосе частот. В целом уровень выходной импульсной мощности составляет не менее 400 Вт (при скважности – 3) в полосе частот 150 МГц, перепад выходной мощности не превышает ± 1 дБ.



a)



б)

Рис. 9. Относительный уровень мощности фазовых шумов сигнала гетеродина СВЧ КИ с электронным переключением частоты:

а – без воздействия ШСВ; б – при воздействии ШСВ со среднеквадратичным значением ускорения $8g$

Рис. 10. Зависимости времени перестройки частоты сигнала передающего канала для двух крайних значений рабочих частот ($\Delta f = 150$ МГц)

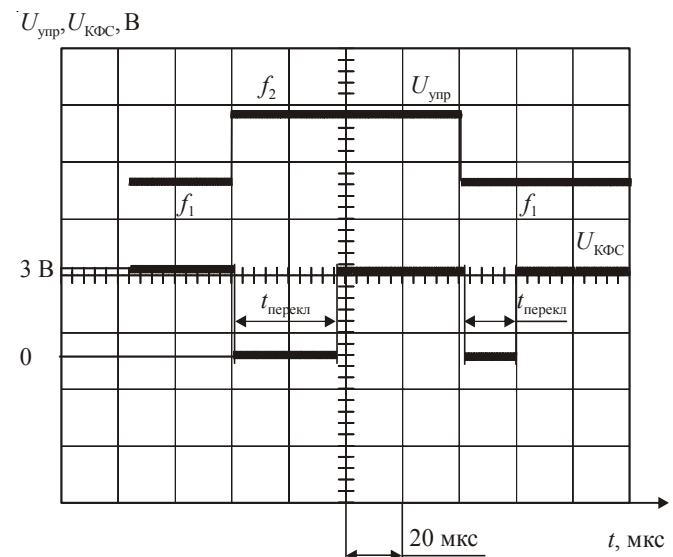
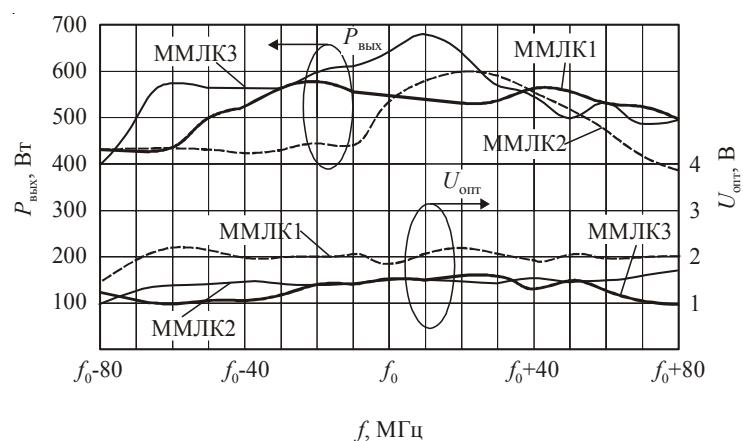


Рис.11. Амплитудно-частотная характеристика выходного усилителя (ММЛК) сигнала передающего канала СВЧ КИ с электронным переключением частоты



На рис. 12 показаны характеристики времени готовности выходного усилителя на ММЛК для СВЧ КИ II-го типа при номинальном и форсированном режимах накала. Как видно из представленных зависимостей, время готовности из холодного состояния в форсированном режиме не превышает 7 с.

На рис. 13, 14 показан внешний вид СВЧ КИ обоих типов.

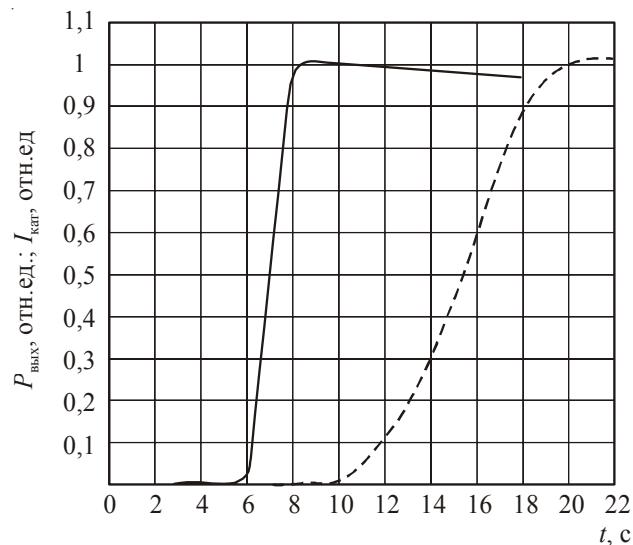


Рис.12 Характеристика времени готовности выходного усилителя (ММЛК)

из холодного состояния:

— при номинальном напряжении накала; - - - при форсированном напряжении накала 6 В

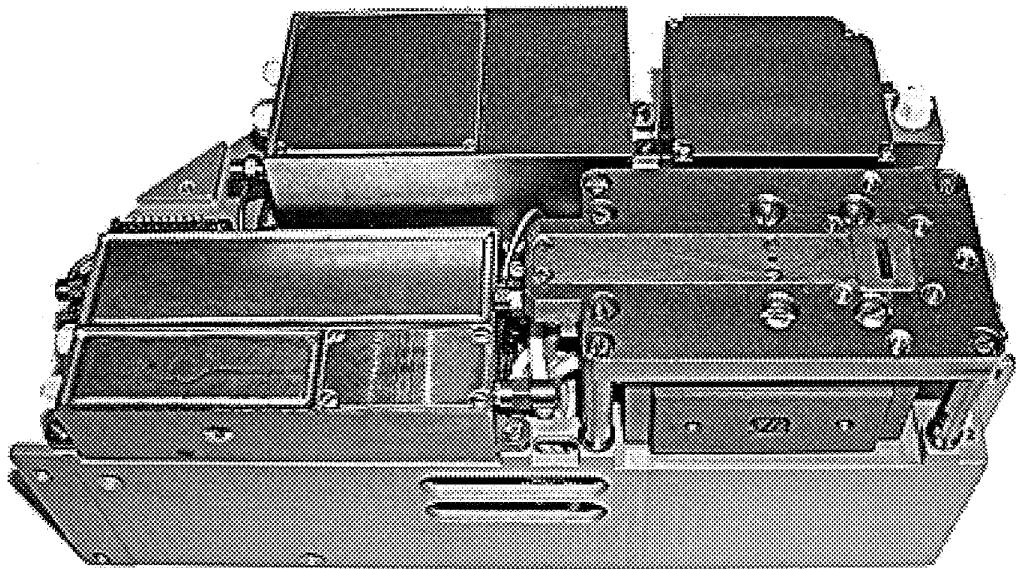


Рис.13. Многофункциональный СВЧ КИ, работающий на фиксированной частоте

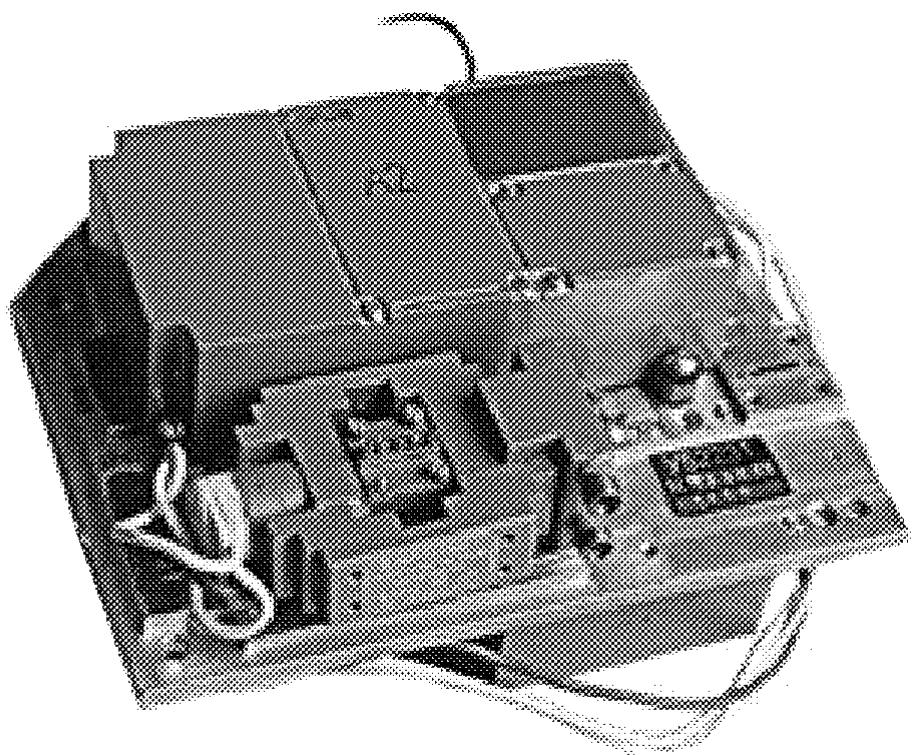


Рис.14. Многофункциональный СВЧ КИ с электронным переключением частоты

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие и улучшение технических характеристик передающих СВЧ КИ основано на совершенствовании двух главных составляющих КИ: твердотельного возбудителя и выходного усилителя мощности – миниатюрного многолучевого клистрона. Совершенствование твердотельного возбудителя основано на применении СВЧ гибридно-интегральных и гибридно-монолитных технологий, применении многофункциональных цифровых микросхем и др. В свою очередь, улучшение характеристик выходного усилителя основано на совершенствовании технологии изготовления ММЛК. Это позволило создать многофункциональные передающие СВЧ КИ со следующими параметрами:

Выходная импульсная мощность (при скважности – 3), Вт	400–600
Уровень фазовых шумов выходных сигналов на частоте ана-	
лиза 5–450 кГц, дБ/Гц	≤ минус (90–100)
Полоса рабочих частот, МГц	150
Количество рабочих частот	≥ 10
Время готовности из холодного состояния, с	8
Масса с источником питания, кг	4,5–5

ЛИТЕРАТУРА

1. *Котов А.С., Закурдаев А.Д., Лаппо А.Я.* Мощные малогабаритные радиопередающие устройства коротковолновой части сантиметрового диапазона с малым временем готовности // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2003. – Вып. 2(482). – С. 47-54.
2. *Закурдаев А.Д., Котов А.С.* Комбинированное радиопередающее устройство 2-сантиметрового диапазона длин волн // Радиотехника. – 2000. – № 2.
3. *Гельвич Э.А., Котов А.С.* Комплексированные изделия СВЧ: основные особенности и тенденции развития // Радиотехника. – 2004. – № 2.
4. *Закурдаев А.Д.* Мощные малогабаритные и миниатюрные усилительные клистроны для бортовых РЛС // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2003. – Вып. 2(482). – С. 40-46.
5. *Kotov A.S., Gelvich E.A. and Zakurdajev A.D.* Small-size complex microwave devices (CMD) for onboard applications // IEEE Trans. Electron Devices. – May 2007. – Vol. 54, No 5.

Статья поступила 15 декабря 2008 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

А. П. Гусев, А. В. Куликов, П. В. Куприянов, В. Н. Пожидаев

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Создан автоматизированный комплекс для измерения параметров широкополосных приемных устройств СВЧ с расширенным динамическим диапазоном. Данна структурная схема комплекса, описано программное обеспечение. Представлены основные технические характеристики и проиллюстрированы возможности комплекса по измерению приемного устройства в диапазоне частот 0,5...18 ГГц.

An automated complex for measuring parameters of wideband receiving microwave devices with expanded dynamic range has been created. The complex structural diagram is given, the software is described. The main specifications are presented and the capabilities of the complex for measuring the receiving device in 0.5...18 GHz frequency range are demonstrated.

КС: измерение, автоматизация, широкополосное приемное устройство СВЧ, расширенный динамический диапазон

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается рост потребности в широкополосных приемных устройствах (ШПУ) СВЧ с расширенным динамическим диапазоном. Такие устройства находят все более широкое применение в аппаратуре пассивной радиолокации, в измерительной технике и ряде других применений [1, 2]. ШПУ СВЧ представляют собой сложные по составу и конструктивному исполнению многомодульные блоки, характеризующиеся большим набором разнообразных электрических параметров.

Экспериментальное исследование подобных устройств, с одной стороны, представляет собой сложную научно-техническую проблему [3], связанную с выполнением, как минимум, нескольких тысяч измерений на СВЧ. С другой стороны, измерение электрических параметров является стандартной процедурой, выполняемой не только при приемосдаточных и других испытаниях продукции, но и в технологическом цикле изготовления, настройки и регулировки приемных устройств.

До недавнего времени это было самым «узким» местом всего технологического процесса производства ШПУ СВЧ. Проблема была решена в результате создания автоматизированного

измерительного комплекса для измерения параметров ШПУ СВЧ с расширенным динамическим диапазоном. В настоящей статье на примере этого комплекса показаны общие принципы построения подобных измерительных систем.

2. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Измерительный комплекс представляет собой набор стандартных измерительных приборов, удовлетворяющих по своим техническим характеристикам измеряемому изделию, персональный компьютер, комплект СВЧ- и НЧ-соединителей, лабораторный источник питания; вспомогательные приспособления. Структурная схема измерительного комплекса приведена на рис. 1.

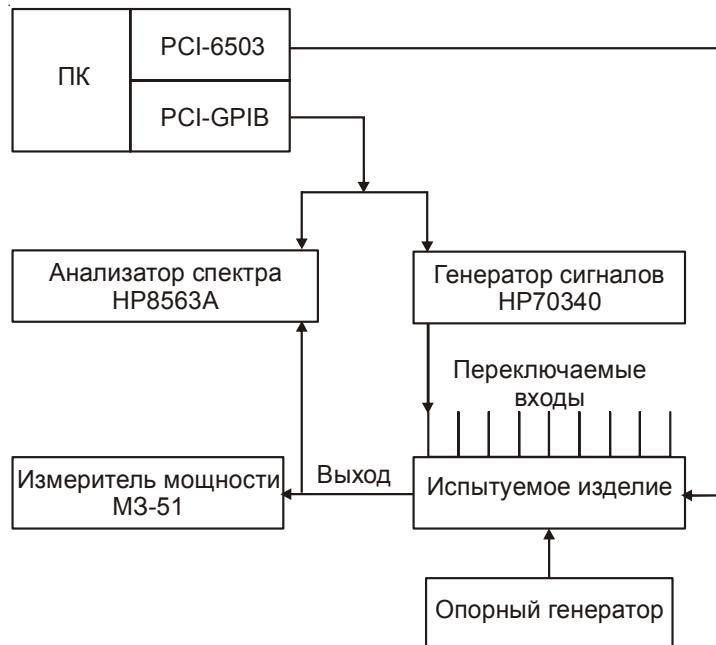


Рис. 1. Структурная схема измерительного комплекса

Принцип действия измерительного комплекса основан на анализе гармонических сигналов тестового генератора, преобразованных посредством испытуемого изделия. ШПУ СВЧ включается в измерительную схему, состоящую из синтезированного тестового генератора сигналов HP70340 и анализатора спектра HP8563A. Генератор и анализатор управляются по шине GPIB компьютером, который с помощью программы задает значения частоты и амплитуды тестовых сигналов на входе испытуемого устройства и фиксирует значения измеренных параметров выходного сигнала. Установка частоты настройки, а также других параметров испытуемого ШПУ СВЧ (значений входных и выходных аттенюаторов, режимов работы и т.д.) осуществляется компьютером через плату ввода/вывода PCI-6503. Для калибровки генератора и анализатора спектра с учетом СВЧ-соединителей используется измеритель мощности М3-51. Данные калибровки перед измерениями вводятся в управляющую программу, как будет описано ниже. При калибровке учитываются потери входного и выходного кабелей, неравномерность мощности генератора и чувствительности анализатора спектра.

3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

При разработке программного обеспечения (ПО) автоматизированного измерительного комплекса ставилась задача выбора такой его структуры, которая бы обеспечивала как возможность его модернизации под конкретные виды измерений, так и возможность наращивания выполняемых функций. Задача была решена путем разбиения общего ПО на отдельные независимые части: управляющую часть и набор программных модулей. Важной отличительной особенностью разработанного ПО является то, что его работа полностью определяется содержимым нескольких текстовых настроечных файлов, создаваемых самим пользователем под конкретные задачи и под конкретный состав измерительного оборудования.

В основу ПО положена единственная диалоговая программа (приложение Windows), называемая «Диспетчер программных модулей» (далее «Диспетчер»). «Диспетчер» работает по заранее написанному пользователем списку операций, сценарию. Каждая строка сценария задает имя программного модуля и имя задания для него. Выбирая сценарий, мы определяем вид конкретных измерений. Пользователю остается лишь запустить выполнение сценария, наблюдать за процессами измерения и обработки, а по окончании работы «Диспетчера» распечатать полученные и записанные на жесткий диск протоколы измерений.

При этом «Диспетчер» обеспечивает:

- последовательный запуск программных модулей в соответствии со сценарием;
- возможность оперативной регулировки скорости работы программных модулей для отладочных и демонстрационных целей;
- возможность подробного автоматического документирования работы программных модулей.

Основной набор программных модулей включает в себя программу измерения, программу обработки и программу формирования отчета. Создаваемые этими программами все файлы промежуточных и выходных данных могут быть непосредственно «открыты» программой Excel из пакета Microsoft Office.

4. ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Программа измерения может работать со следующими приборами:

- с набором приборов и устройств, управляемых через плату PCI-GPIB или порты компьютера;
- с набором приборов и устройств, управляемых через регистры плат цифрового ввода/вывода.

Связь с измерительными приборами в основном осуществляется с помощью интерфейса VISA (Virtual Instrument Software Architecture), позволяющего единым образом обращаться к приборам как через интерфейс GPIB (General Purpose Interface Bus) с помощью платы PCI-GPIB, так и через порты компьютера (COM, LPT).

Программа измерения всегда работает по одному алгоритму, который можно интерпретировать как последовательность действий при измерении семейства характеристик. Этого обычно достаточно для многих видов испытаний.

Все задания для программы измерения сосредоточены в одном секционированном текстовом файле, а имя задания является именем секции. Количество приборов стенда, каналы связи с ними, их адреса и т.п. описываются в отдельной секции этого же файла.

В каждом из заданий в формализованном виде задается следующая информация для программы измерения:

- количество шагов внешнего и внутреннего циклов измерения;
- последовательность выполнения команд для используемых в стенде устройств и приборов;
- имена устанавливаемых и измеряемых параметров;
- диапазоны изменения устанавливаемых параметров;
- настройки графика для оперативного вывода на экран результатов измерений;
- шаблоны командных строк, посылаемых в приборы, и др.

Следует отметить, что размещение командных строк для приборов в текстах заданий позволяет легко осуществлять замену приборов стенда на функционально аналогичные приборы (после соответствующей коррекции синтаксиса командных строк).

Командные строки для приборов и устройств, управляемых через регистры платы цифрового ввода/вывода, интерпретируются и выполняются самой программой измерения через эту плату. В частности, таким путем осуществляется управление режимами работы испытуемого широкополосного приёмника.

Результаты выполнения команд (имена и значения установленных и измеренных параметров) записываются в определенные таблицы выходного файла данных.

Полученные при измерениях файлы данных могут быть обработаны самим пользователем с помощью программы типа Excel или переданы программе обработки по ходу выполнения сценария.

5. ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОБРАБОТКИ

Программа обработки в соответствии с полученным заданием считывает информацию из входного файла данных, обрабатывает ее с отображением результатов обработки на графике и записывает их в выходной файл данных. Задания для программы обработки составляются аналогично заданиям для измерений: в каждом задании указываются входной и выходной файлы, задается вид обработки, перечисляются исходные и результирующие параметры и т.д.

Необходимость того или иного вида специальной обработки данных диктуется конкретным изделием и техническими требованиями к нему. В частности, для параметров широкополосного приёмника в состав программы были включены следующие виды обработки:

- поиск верхней границы линейности амплитудной характеристики образца;
- определение границ диапазона амплитудно-частотной характеристики образца;
- поиск участка на амплитудно-частотной характеристике с максимальной неравномерностью;
- усреднение и поиск экстремумов в массивах данных;
- сглаживание и дифференцирование массивов данных;
- расчеты по заданным формулам;
- отбор группы параметров при экстремальном значении одного из них;
- импорт данных из других файлов и др.

Например, последний из перечисленных видов обработки применяется для учёта информации о потерях в кабелях, что особенно удобно при измерениях в широком диапазоне частот. Сначала по специально написанному сценарию проводится измерение и определение частотно-зависимых потерь в применяемом кабеле. Полученная информация, которую можно интерпретировать как таблично заданную зависимость потерь от частоты, записывается в определенный файл данных. Далее, в процессе обработки результатов измерений при разных частотах, эти данные о потерях импортируются и для каждой текущей частоты интерполяцией вычисляется соответствующая величина потерь.

6. ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЧЕТА

Программа формирования отчета в качестве входного файла использует созданный программой Excel образец протокола испытаний (в формате *.xls), в котором отдельные ячейки электронной таблицы оставлены пустыми. После запуска программа заполняет эти ячейки числами из разных файлов полученных данных в соответствии с заданием и записывает заполненный файл в качестве выходного файла.

Задания для программы формирования отчета составляются аналогично заданиям для программ измерения и обработки: в них конкретизируется, какие данные и откуда нужно взять и куда записать в протоколе испытаний.

7. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА, ИЛЛЮСТРАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

К настоящему времени создан достаточно большой набор сценариев для проведения измерений основных электрических параметров разрабатываемых и выпускаемых на предприятии ШПУ СВЧ. В автоматическом режиме измеряются:

- среднее значение коэффициента передачи $K_{\text{неп.ср.}}$;
- неравномерность коэффициента передачи в выходной полосе частот 100 МГц $\Delta K_{\text{неп.100}}$;
- неравномерность коэффициента передачи в полной выходной полосе частот $\Delta K_{\text{неп.}}$;
- верхняя граница линейности амплитудной характеристики $P_{\text{лин.вх}}$;
- уровень паразитного канала приема $\alpha_{\text{пкп}}$;
- уровень фазовых шумов;
- уровень собственных паразитных сигналов $P_{\text{соб.пар.}}$.

Выходной протокол формируется исходя из конкретных требований к его оформлению и может быть представлен как в виде таблицы, так и виде зависимости. По требованию потребителя к протоколу может прилагаться его расширенная электронная версия, включающая первичные результаты измерений без последующей обработки. Кроме измерений характеристик законченных изделий, на стенде также проводятся автоматические измерения параметров входящих в их состав модулей: усилителей, фильтров, преобразователей и т.д.

В качестве иллюстрации возможностей стенда ниже приводится выходной протокол одноканального по входу и выходу ШПУ СВЧ в диапазоне частот 0,5...18 ГГц

Протокол измерения параметров ШПУ СВЧ

$F_{\text{настр}},$ ГГц	$\Delta F,$ ГГц	$K_{\text{пер.ср}},$ дБ	$\Delta K_{\text{пер100}},$ дБ	$\Delta K_{\text{пер}},$ дБ	$P_{\text{лин.вх}},$ дБ·Вт	$\delta_{\text{ПКП}},$ дБ	Уровень фазовых шумов, дБ/Гц	$P_{\text{соб.пар}},$ дБ·Вт
Норма	0,50–4,00 4,00–18,00	9–15	< 2 < 3	< 4 < 5	> -40	< -50 < -43	< -75 < -70	< - 80
0,50	0,50–0,70	10,5	1,6	2,0	-33,2	-54,9	-82	-95,0
0,60	0,50–0,70	10,2	1,0	1,2	-32,7	-54,9	-82,0	-96,0
0,85	0,70–1,00	10,5	1,1	1,2	-32,6	-55,0	-81,0	-97,0
1,20	1,00–1,40	12,4	1,2	1,9	-34,2	-57,9	-81,4	-98,8
1,50	1,40–1,65	12,6	1,5	2,3	-33,2	-58,1	-78,1	-96,0
1,75	1,50–2,00	11,8	2,0	2,7	-32,2	-58,7	-78,5	-96,3
2,25	2,00–2,50	14,2	1,0	2,1	-35,4	-53,9	-78,7	-99,8
2,55	2,30–2,80	13,6	1,4	2,1	-34,7	-58,6	-79,1	-95,0
2,75	2,80–3,00	12,6	1,4	2,6	-33,7	-50,1	-79,1	-96,0
3,25	3,00–3,50	11,1	1,2	2,1	-30,7	-58,8	-78,7	-97,0
3,75	3,50–4,00	9,2	1,5	2,2	-30,8	-54,8	-78,1	-95,0
4,25	4,00–4,50	13,5	1,4	2,0	-35,0	-51,4	-76,0	-95,2
4,75	4,50–5,00	13,6	1,2	2,4	-33,9	-51,4	-76,0	-94,0
5,25	5,00–5,50	13,7	2,0	3,3	-34,3	-51,0	-76,8	-92,7
5,60	5,35–5,60	13,3	1,2	2,7	-34,5	-50,0	-72,0	-92,5
5,75	5,60–6,00	13,8	1,0	1,8	-34,0	-49,4	-72,0	-92,0
6,25	6,00–6,50	12,4	0,8	1,4	-34,0	-65,0	-72,5	-100,0
6,75	6,50–7,00	12,6	0,8	1,9	-33,0	-65,1	-71,7	-99,3
7,25	7,00–7,50	13,7	1,1	2,6	-33,2	-64,0	-72,3	-98,0
7,75	7,50–8,00	12,7	1,6	4,7	-32,2	-65,0	-73,7	-91,3
8,25	8,00–8,50	14,8	1,4	2,5	-35,6	-50,5	-75,5	-100,0
8,75	8,50–9,00	14,3	1,9	3,2	-32,2	-51,8	-74,7	-99,5
9,25	9,00–9,50	14,8	2,5	3,6	-35,9	-50,4	-75,5	-100,0
9,75	9,50–10,00	14,3	1,6	2,5	-35,8	-65,1	-76,5	-96,3
10,25	10,00–10,50	14,9	1,3	3,1	-36,2	-65,2	-74,7	-100,0
10,75	10,50–11,00	14,2	1,3	2,3	-35,6	-65,4	-75,0	-101,0
11,25	11,00–11,50	14,5	1,2	2,6	-33,4	-65,3	-74,4	-100,0
11,75	11,50–12,00	13,9	1,7	2,9	-34,2	-65,5	-75,9	-100,0
12,25	12,00–12,50	13,4	1,9	3,1	-34,3	-51,8	-73,3	-97,2
12,75	12,50–13,00	13,8	1,3	1,9	-35,0	-66,2	-73,1	-95,2
13,25	13,00–13,50	13,8	0,7	1,3	-34,1	-64,1	-74,3	-97,3
13,75	13,50–14,00	14,5	0,9	1,2	-34,4	-63,2	-75,0	-97,2
14,25	14,00–14,50	14,3	1,7	4,0	-35,5	-62,1	-74,4	-92,7
14,75	14,50–15,00	12,8	1,4	2,4	-34,4	-63,2	-75,9	-97,3

Продолжение протокола

$F_{\text{настр}},$ ГГц	$\Delta F,$ ГГц	$K_{\text{пер.ср}},$ дБ	$\Delta K_{\text{пер}100},$ дБ	$\Delta K_{\text{пер}},$ дБ	$P_{\text{лин.вх}},$ дБ·Вт	бПКП, дБ	Уровень фазовых шумов, дБ/Гц	$P_{\text{соб.пар}},$ дБ·Вт
Норма	0,50–4,00 4,00–18,00	9–15	< 2 < 3	< 4 < 5	> -40	< -50 < -43	< -75 < -70	< -80
15,25	15,00–15,50	12,9	1,4	1,9	-34,9	-64,4	-72,6	-96,9
15,75	15,50–16,00	14,1	1,8	4,0	-34,1	-61,1	-72,8	-99,1
16,25	16,00–16,50	12,2	1,5	3,7	-31,6	-65,3	-77,7	-98,2
16,75	16,50–17,00	12,7	1,4	2,2	-31,2	-65,4	-76,6	-97,2
17,25	17,00–17,50	13,1	1,9	3,8	-32,3	-65,8	-77,50	99,0
17,75	17,50–18,00	10,8	2,5	5,0	-31,8	-66,2	-78,10	-97,2
18,00	17,75–18,00	10,2	0,9	0,9	-30,6	-64,2	-77,20	-95,1

На рис. 2 показана зависимость коэффициента передачи по каждому из десяти каналов 10-канального преобразователя.

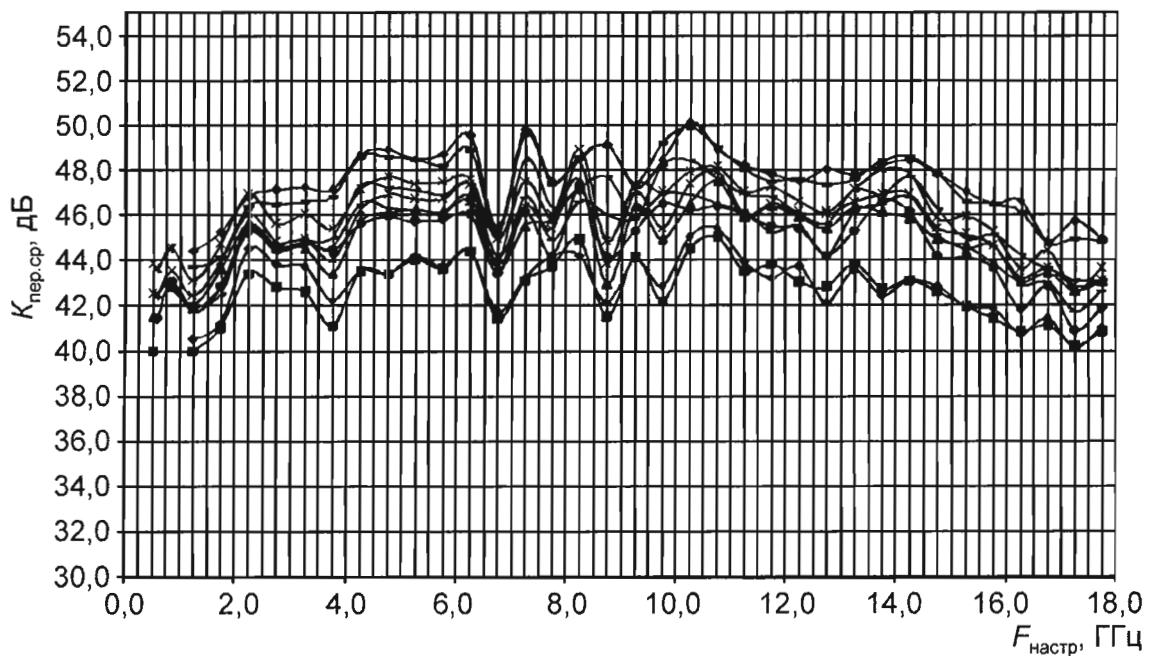


Рис. 2. Зависимости коэффициентов передачи 10-канального ШПУ СВЧ от частоты настройки

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в настоящей публикации автоматизированный измерительный комплекс для измерения параметров ШПУ СВЧ кардинально изменил технологический процесс произ-

водства последних. Одна из наиболее трудоемких процедур – измерение электрических параметров устройств, занимавшая ранее до 90 % времени технологических операций комплексной настройки и регулировки ШПУ СВЧ, сократилась почти на порядок. Соответствующим образом выросла эффективность использования дорогостоящего измерительного оборудования и производительность труда высококвалифицированного персонала.

Дальнейшее развитие и модернизация измерительного стенда видится в направлении расширения сервисных и интеллектуальных возможностей ПО. Прежде всего, речь идет о неком подсказчике, который по результатам измерений конкретного устройства будет давать рекомендации по его настройке и регулировке. Рекомендации будут вырабатываться на основании статистической обработки сопроводительной документации поставленных ранее устройств. Работа в данном направлении позволит исключить из технологического процесса производства ШПУ СВЧ некоторые неоправданные итерации, вызванные человеческим фактором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куприянов П.В. Широкополосные инфрадианные преобразователи СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2003. – Вып. 1(481). – С. 66-74.
2. Куприянов П.В. Широкополосные приемные устройства СВЧ с расширенным динамическим диапазоном // Радиотехника. – 2006. – Вып. 3. – С. 8-13.
3. Бакланов И.Г. Методы измерений в системах связи. – М.: «ЭКО-Трендз», 1999. – 196 с.

Статья поступила 25 сентября 2008 г.

УДК 621.3.049.77.029.64

**КОМПЛЕКТ УНИФИЦИРОВАННЫХ МИС СВЧ
ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ АФАР
Х-ДИАПАЗОНА**

**А. М. Темнов, К. В. Дудинов, Ю. М. Богданов, А. В. Крутов,
В. А. Красник, В. Г. Лапин, С. В. Щербаков**

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Разработан и начато серийное производство комплекта монолитных интегральных схем на арсениде галлия для многоканальных приемопередающих модулей АФАР Х-диапазона, включающего малошумящий усилитель, усилитель мощности, фазовращатель, аттенюатор, переключатель и защитное устройство.

A set of GaAs MMICs for X-range multi-channel R/T active phased array modules including low-noise amplifier, power amplifier, phase shifter, attenuator, switch and protective device has been developed and full-scale production has been launched.

КС: монолитная интегральная схема, арсенид галлия, Х-диапазон, многоканальный приемо-передающий модуль

1. ВВЕДЕНИЕ

В ноябре 2008 г. на ФГУП «НПП «Исток» была завершена ОКР «Прогресс-2004», нацеленная на разработку комплекта промышленных образцов монолитных интегральных схем (МИС) СВЧ на арсениде галлия, включающего малошумящий усилитель, усилитель мощности, фазовращатель, аттенюатор, переключатель и защитное устройство. Ей предшествовала инициированная в начале 90-х годов государственная программа «МАЛАХИТ», главной задачей которой было расширение серийного производства МИС СВЧ. В этой программе участвовали такие крупнейшие в области СВЧ-техники предприятия, как ФГУП «НПП «Исток», НИИ «Пульсар», НИИ «Салют», ОКБ «Октава», НПО «Светлана», ПО «Планета» и др. Одно из важнейших направлений программы – строительство пилотной линии по производству арсенидгаллиевых МИС СВЧ – было поручено ФГУП «НПП «Исток».

Строительство линии начали в 2001 г., а уже через три года стартовала ОКР «Прогресс-2004», в рамках которой к 2008 г. был создан комплект GaAs МИС СВЧ и наложен их серийный выпуск.

Технология изготовления GaAs СВЧ МИС разрабатывалась с учетом возможностей новейшего технологического оборудования. В перечень оборудования, которым в настоящее время располагает ФГУП «НПП «Исток», входят: электронный литограф; установки для взрывной литографии; установки для нанесения и проявления резиста; установки для сухого травления диэлектриков и арсенида галлия; установки для жидкостного травления канала; установка для

нанесения диэлектрика; установки для прецизионной шлифовки и полировки пластин; электронный и инспекционный микроскопы; эллипсометр; установки для измерения S -параметров и коэффициента шума; зондовая станция для измерения характеристик МИС СВЧ непосредственно на пластине и др.

Базовый технологический маршрут по изготовлению МИС СВЧ опирается на процессы, позволяющие формировать транзисторные структуры с Т-образным затвором длиной 0,25 мкм. Маршрут включает более 100 технологических операций, среди которых основными являются:

- формирование канала и затвора транзистора с помощью электронной литографии, пассивация канала;
- формирование конденсаторов, резисторов, индуктивных элементов, межсхемных соединений и контактных площадок;
- формирование верхней металлизации толщиной до 5 мкм;
- формирование «воздушных мостов»;
- утонение пластины до 25 мкм;
- формирование металлизированных сквозных отверстий;
- формирование интегрального теплоотвода толщиной 30 мкм;
- разделение пластины на кристаллы путем химического фрезерования.

Эпитаксиальные GaAs-пластины на ФГУП «НПП «Исток» поставляют предприятия Санкт-Петербурга и Новосибирска.

Разработанные в ОКР «Прогресс-2004» МИС СВЧ на арсениде галлия описаны далее.

2. GaAs МОНОЛИТНЫЕ СХЕМЫ

Малошумящий усилитель M421283

Электрическая схема усилителя [1] приведена на рис. 1. В состав схемы входят два усиительных каскада. Длина затворов транзистора равняется 0,25 мкм. Схема работает от однополярного источника питания. Для стабилизации рабочих точек транзисторов используются

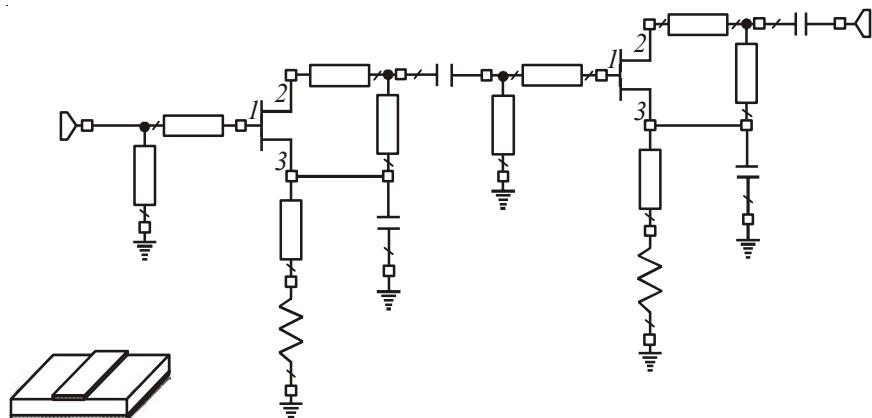


Рис. 1. Электрическая схема двухкаскадного малошумящего усилителя M421283

цепочки автосмещения, размещенные в цепях истока. Оба каскада усилителя гальванически развязаны. Для стабилизации коэффициента усиления и обеспечения низкого КСВН каждый каскад имеет отрицательную обратную связь по току за счет индуктивного элемента в цепи истока.

Расчет усилителя проводился с использованием распределенных и сосредоточенных элементов, размещенных на поверхности арсенидгаллиевой подложки толщиной 100 мкм. Топология усилителя представлена на рис. 2. Малошумящий усилитель вместе с транзисторами, схемами согласования, питания и развязки размещается на кристалле размерами $2 \times 1 \times 0,1$ мм. На входе и выходе усилителя предусмотрены кoplanарные выводы для измерения характеристик МИС на пластине. Такие выводы выполняются на всех монолитных схемах.

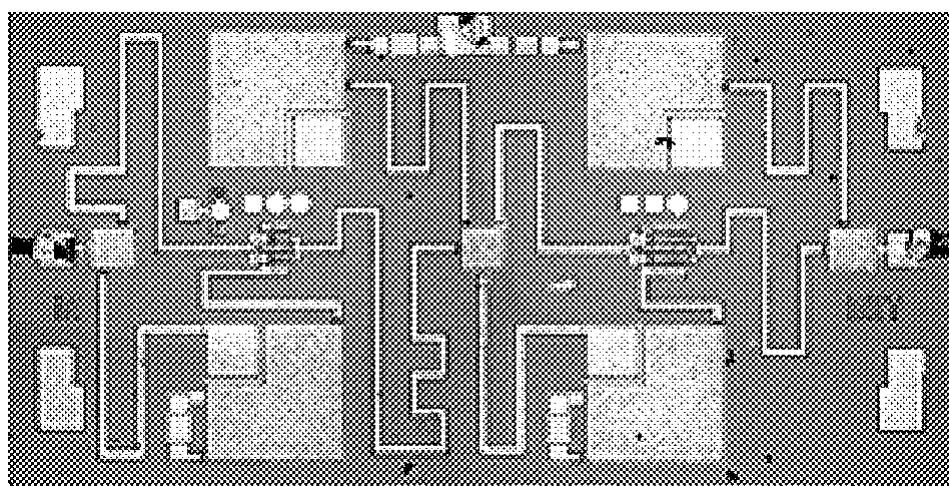


Рис. 2. Топология двухкаскадного малошумящего усилителя М421283

Малошумящие усилители поставляются в двух литерных вариантах: с коэффициентом шума 1,5 дБ – литера 1, с коэффициентом шума 2 дБ – литера 2. Частотные характеристики усилителя с коэффициентом шума 1,5 дБ приведены на рис. 3.

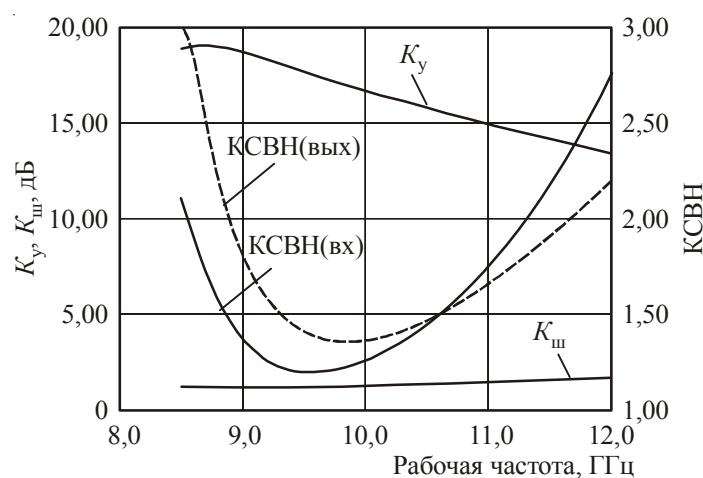


Рис. 3. Частотные характеристики GaAs МИС МШУ М421283

Усилитель мощности M42230

Электрическая схема усилителя мощности M42230 приведена на рис. 4. В схеме использованы два усилительных каскада. Выходная мощность 1 Вт обеспечена сложением мощности нескольких транзисторов. Усилитель питается от двух источников. Первый импульсный источник положительной полярности подключен к цепи стоков, второй источник отрицательной полярности – к цепи затворов. Оба усилительных каскада гальванически развязаны между собой.

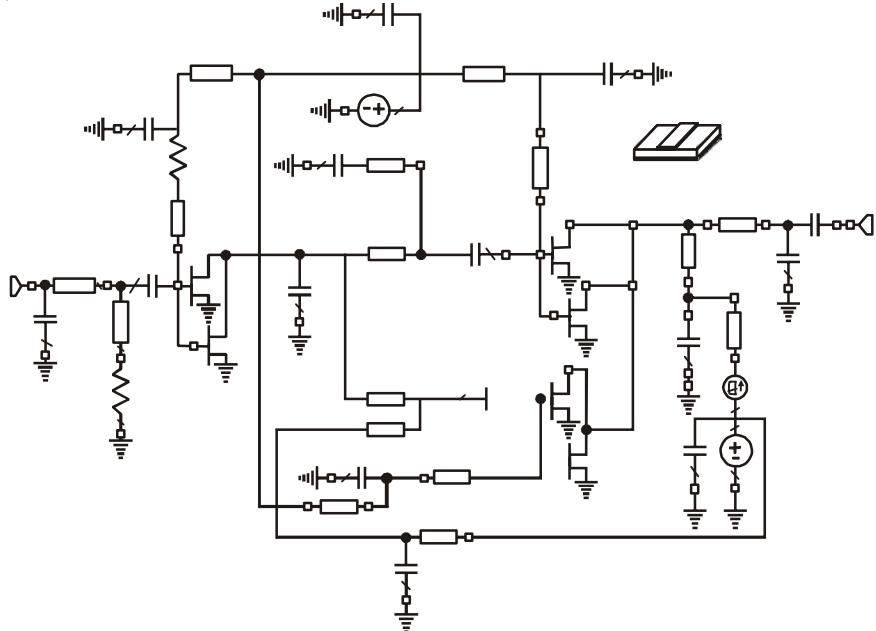


Рис 4. Электрическая схема усилителя мощности M42230

Расчет усилителя проводился с использованием распределенных и сосредоточенных элементов, размещенных на поверхности арсенидгаллиевой подложки толщиной 30 мкм. Выбор толщины подложки продиктован необходимостью обеспечения эффективного отвода тепла от транзисторов с высокой плотностью упаковки структуры. Топология усилителя приведена на рис. 5, типичные параметры – на рис. 6. Усилитель полностью согласован с 50-омным трактом. Размеры GaAs-кристалла с размещенной на нем двухкаскадной схемой усилителя, включающей схемы согласования, питания и развязки, составляют 2,8×1,5×0,1 мм.

Шестибитный фазовращатель M44146

Фазовращатель [2] построен на основе сосредоточенных RLC -элементов с транзисторными ключами. С целью снижения потерь и уменьшения взаимного влияния между битами 90 и 180 град установлен однокаскадный усилитель на ПТШ с отрицательной параллельной обратной связью. Электрическая схема 6-битного фазовращателя приведена на рис. 7, а его топология – на рис. 8.

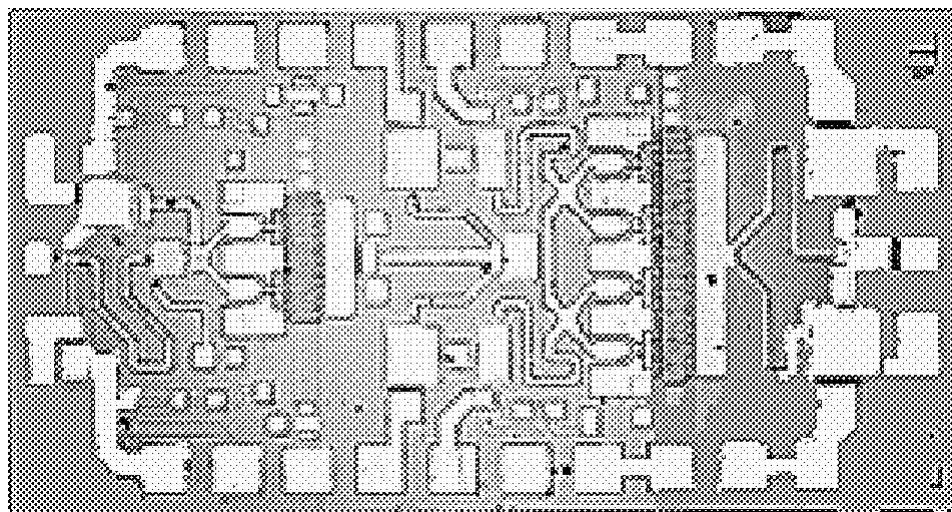
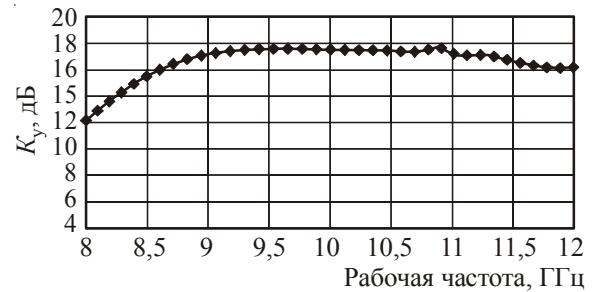
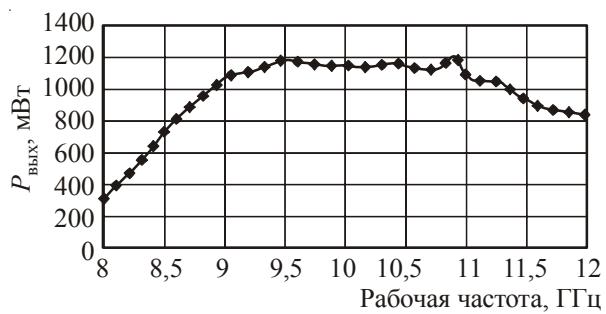


Рис. 5. Топология усилителя мощности М42230



a)



б)

Рис 6. Типичные параметры усилителя мощности М42230,
измеренные в рабочем диапазоне частот:
а – коэффициент усиления; б – выходная мощность

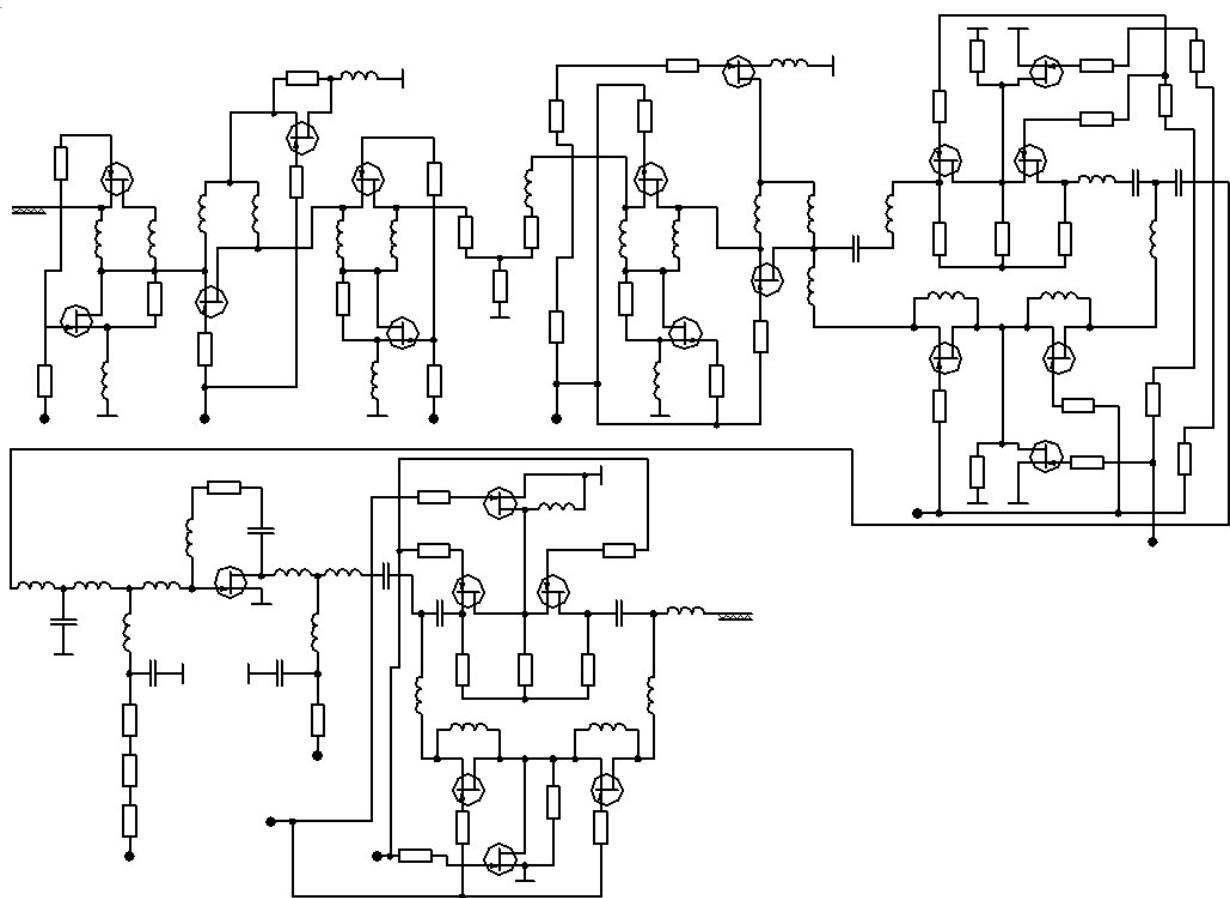


Рис. 7. Электрическая схема 6-битного фазовращателя M44146

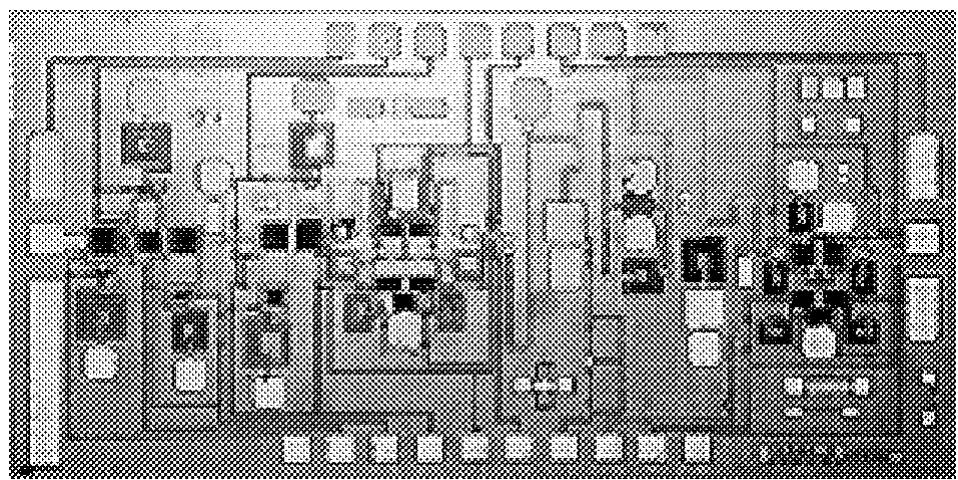


Рис. 8. Топология 6-битного фазовращателя M44146

Как и усилительные схемы, схема фазовращателя содержит все необходимые элементы согласования, питания и развязки. Общие размеры GaAs-кристалла с фазовращателем: $4,3 \times 2,2 \times 0,1$ мм. Электрические характеристики 6-битного фазовращателя представлены на рис. 9.



Рис. 9. Типичные параметры по точности установки фазового сдвига 6-битного фазовращателя M44146, измеренные в рабочем диапазоне частот

Пятибитный аттенюатор M44712

Электрическая схема 5-битного аттенюатора приведена на рис. 10, его топология – на рис. 11, измеренные характеристики – на рис. 12. Была выбрана последовательная схема подключения дискретов аттенюации. Полностью согласованная с 50-омным трактом схема аттенюатора занимает кристалл с размерами $2,4 \times 1,5 \times 0,1$ мм.

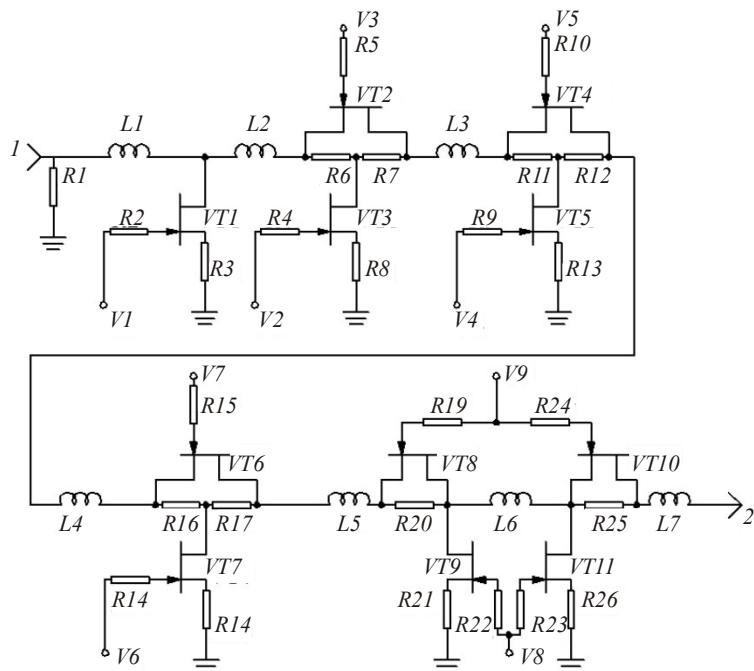


Рис. 10. Электрическая схема 5-битного аттенюатора M44712

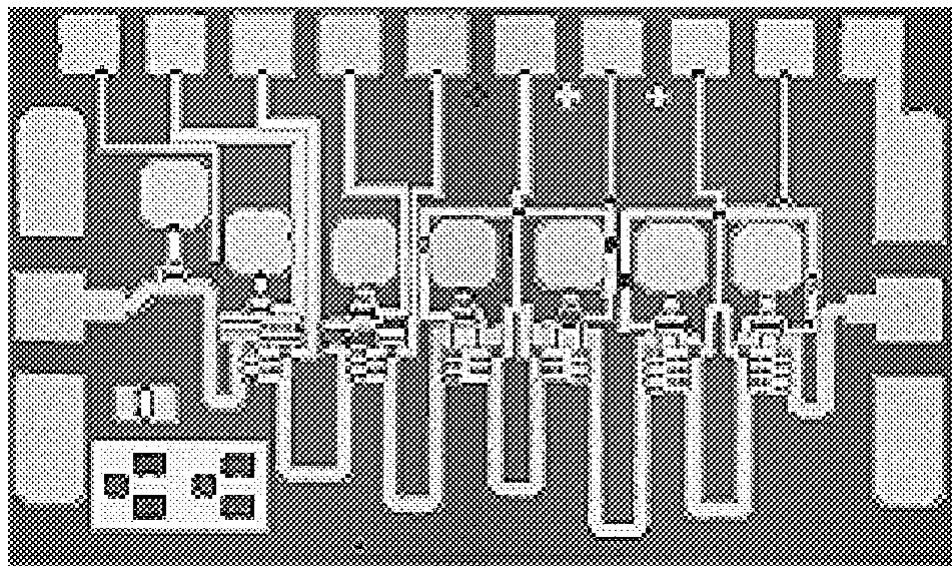


Рис. 11. Топология 5-битного аттенюатора M44712

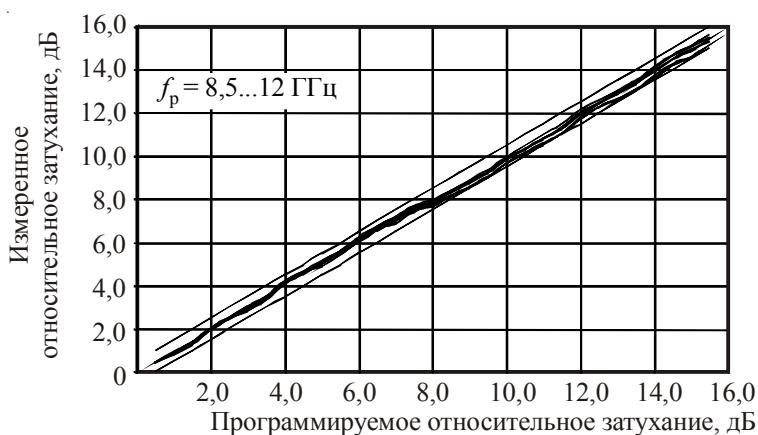


Рис. 12. Типичные параметры по точности установки затухания 5-битного аттенюатора M44712, измеренные в рабочем диапазоне частот

Сверхширокополосный переключатель 1×2 M44218

Электрическая схема, топология и частотные характеристики переключателя представлены на рис. 13–15. Переключатель построен по двухзвенной Г-образной схеме. Для компенсации влияния паразитной емкости ключевых ПТШ выбрана схема согласования со структурой ФНЧ.

Переключатель согласован с 50-омным трактом. Размеры GaAs-кристалла: 1,9×1,4×0,1 мм.

Защитное устройство M44417

Электрическая схема, топология и частотные характеристики защитного устройства [3] представлены на рис. 16–18. Защитное устройство предназначено для защиты малошумящего

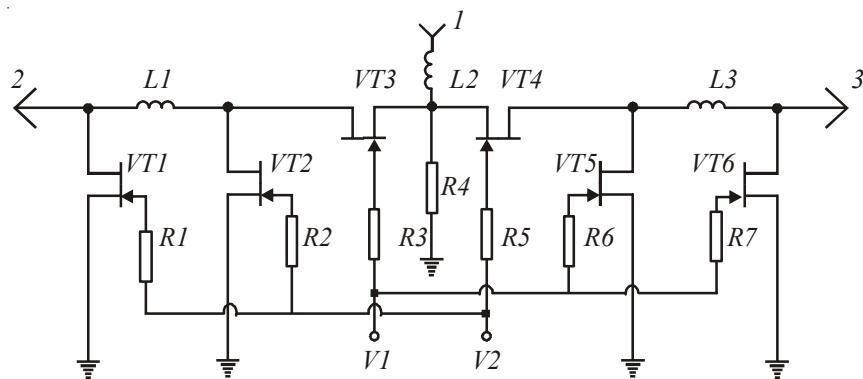


Рис. 13. Электрическая схема переключателя 1×2 M44218

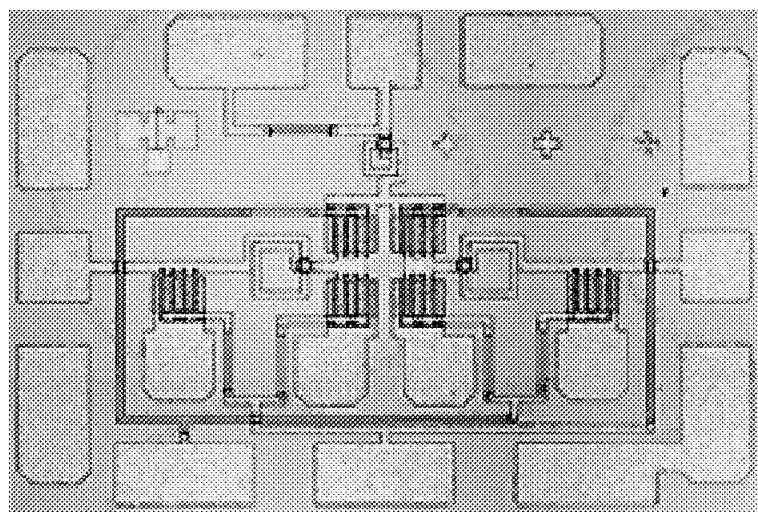


Рис. 14. Топология переключателя 1×2 M44218

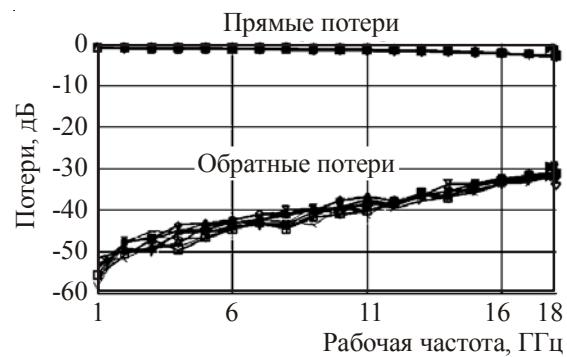


Рис. 15. Типичные параметры переключателя 1×2 M44218, измеренные в рабочем диапазоне частот

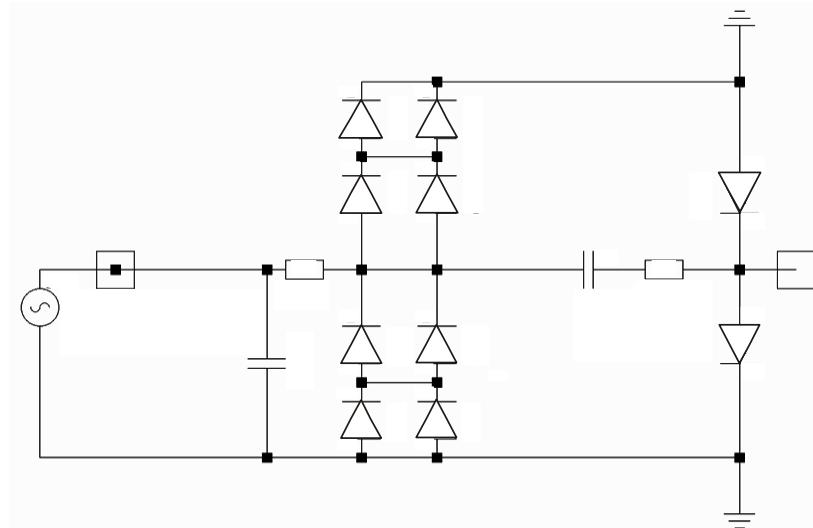


Рис. 16. Электрическая схема защитного устройства M44417

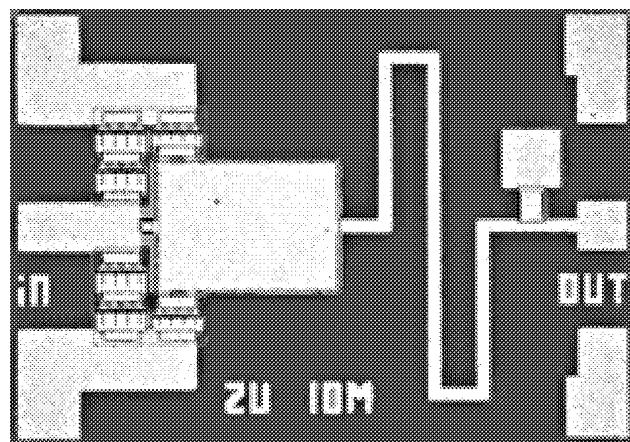


Рис. 17. Топология защитного устройства M44417

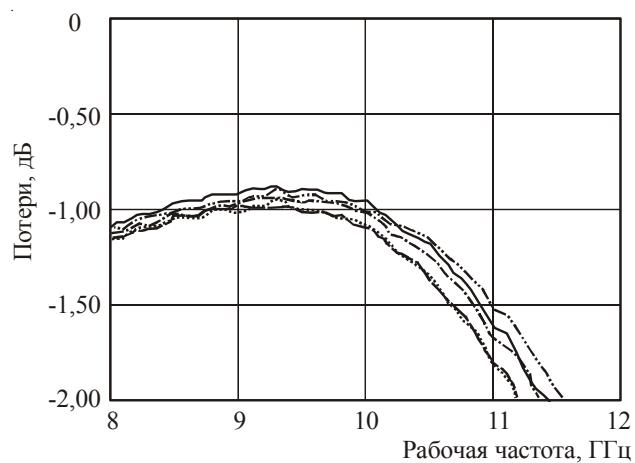


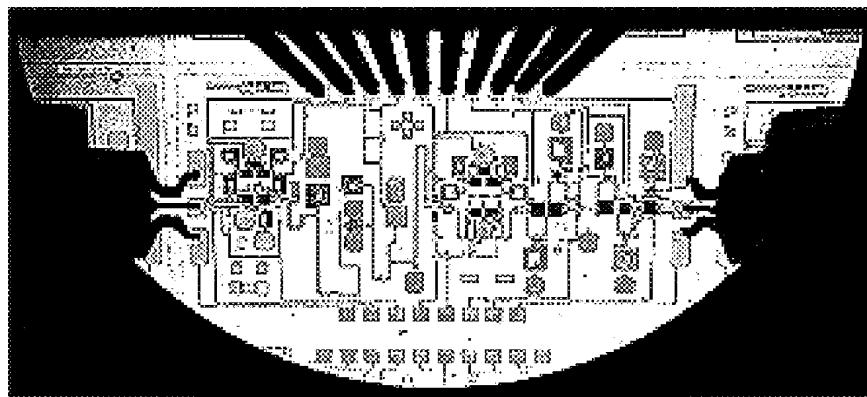
Рис. 18. Частотные характеристики защитного устройства M44417

усилителя приемника от воздействия СВЧ-сигналов большой мощности. Устройство реализовано по двухкаскадной схеме со встречно-параллельным включением диодов Шотки (рис.16). Схема полностью согласована с 50-омным трактом. Размеры GaAs-кристалла: $1,1 \times 0,8 \times 0,1$ мм.

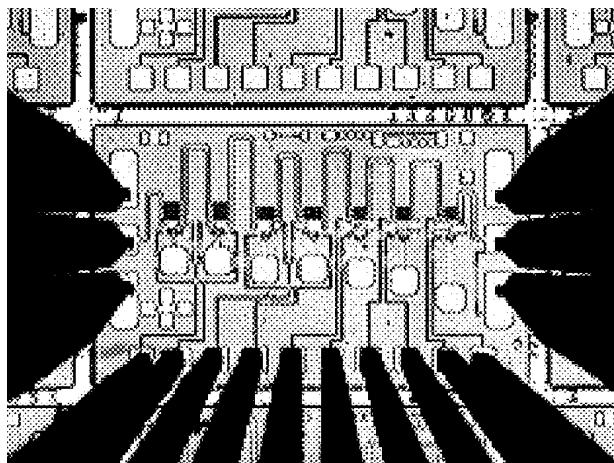
Для измерения параметров МИС на пластине используются зондовые станции. Они оснащены копланарными зондами для подключения к выводам входа и выхода МИС СВЧ. На ФГУП «НПП «Исток» разработаны собственные копланарные зонды [4].

Для подачи питания и управляющих сигналов на периферии кристаллов располагаются контактные площадки. Для подключения к ним используются специальные многоkontakteчные зонды, разработанные также на ФГУП «НПП «Исток» [5].

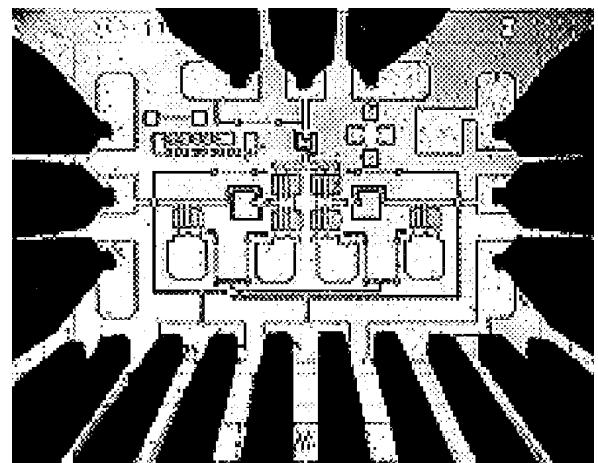
Ниже приведены фотографии (рис. 19), полученные с помощью микроскопа во время выполнения тестовых измерений характеристик фазовращателя, аттенюатора и переключателя на пластине с использованием зондовой станции, которая оснащена копланарными и многоkontakteчными зондами.



a)



б)



в)

Рис. 19. Фотографии получены с помощью микроскопа при проведении тестовых измерений характеристик фазовращателя (а), аттенюатора (б) и переключателя (в) с использованием зондовой станции

3. СТОЙКОСТЬ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИМ ФАКТОРАМ

МИС СВЧ разработаны в соответствии с требованиями группы 4У ГОСТ РВ 20.39.414.1–97, обладают необходимой стойкостью к воздействию механических и климатических факторов.

4. ПРИМЕНЕНИЕ

МИС СВЧ разработаны в климатическом исполнении УХЛ 4.1 (ГОСТ 15 150) и предназначены для использования в составе герметизированной аппаратуры, обеспечивающей их защиту от воздействия влаги, пыли, соляного тумана, плесневых грибов, инея, росы, агрессивных сред.

Охлаждение МИС СВЧ контактное за счет теплопередачи на элементы конструкции РЭА, обеспечивающее температуру основания модуля не более +85 °С.

Вводы и выводы СВЧ-энергии МИС СВЧ микрополосковые с волновым сопротивлением 50 Ом.

Рабочее положение МИС СВЧ произвольное.

Параметры разработанных МИС СВЧ приведены в таблице.

Параметр	Техническое условие
<i>Малошумящий усилитель M421283-1 (литера 1)</i>	
Рабочий диапазон частот, ГГц	9,0–10,0
Коэффициент усиления, дБ	≥ 15
Коэффициент шума, дБ	≤ 1,5
Выходная мощность в режиме насыщения, мВт	≥ 10
KCBН (вх/вых)	2/2
Напряжение питания, В	3,0
Потребляемый ток, мА	≤ 35
Габаритные размеры, мм	2×1×0,1
<i>Малошумящий усилитель M421283-2 (литера 2)</i>	
Рабочий диапазон частот, ГГц	9,0–10,0
Коэффициент усиления, дБ	≥ 15
Коэффициент шума, дБ	≤ 3,0
Выходная мощность в режиме насыщения, мВт	≥ 30
KCBН (вх/вых)	≤ 2/2
Напряжение питания, В	5,0
Потребляемый ток, мА	≤ 100
Габаритные размеры, мм	2×1×0,1
<i>Усилитель мощности M42230</i>	
Диапазон частот, ГГц	9–10
Коэффициент усиления, дБ	≥ 15
Выходная мощность, Вт	≥ 1

Продолжение

Параметр	Техническое условие
КСВН (вх/вых)	≤ 2
Напряжение питания (положительное), В	7,5
Потребляемый ток, мА	≤ 900
Напряжение питания (отрицательное), В	5,0
Потребляемый ток, мА	≤ 50
Габаритные размеры, мм	$2,8 \times 1,5 \times 0,1$
<i>Фазовращатель M44146</i>	
Рабочий диапазон частот, ГГц	9-10
Разрядность, бит	6
Средние потери, дБ	≤ 7
КСВН (вх/вых)	$\leq 2,5$
Среднеквадратичная ошибка установки фазы, град	≤ 6
Габаритные размеры, мм	$4,3 \times 2,2 \times 0,1$
<i>Аттенюатор M44712</i>	
Рабочий диапазон частот, ГГц	9–10
Разрядность, бит	5
Начальные потери, дБ	≤ 4
Дискрет затухания, дБ	0,5
КСВН (вх/вых)	≤ 2
Среднеквадратичная ошибка регулируемого затухания, дБ	0,5
Габаритные размеры, мм	$2,4 \times 1,5 \times 0,1$
<i>Переключатель M44218</i>	
Рабочий диапазон частот, ГГц	9-10
Вносимые потери, дБ	≤ 2
Развязка между каналами, дБ	≥ 25
КСВН (вх/вых)	≤ 2
Габаритные размеры, мм	$1,9 \times 1,4 \times 0,1$
<i>Защитное устройство M44417</i>	
Рабочий диапазон частот, ГГц	9–10
Вносимые потери в режиме пропускания, дБ	≤ 1
Входная мощность, Вт	≤ 2
Просачивающаяся мощность в режиме высокого уровня мощности, мВт	≤ 50
КСВН (вх/вых)	≤ 2
Габаритные размеры, мм	$1,1 \times 0,8 \times 0,1$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На ФГУП «НПП «Исток» разработан комплект МИС СВЧ на основе арсенида галлия для приемопередающего модуля АФАР, в том числе: малошумящий усилитель М421283 (литеры 1, 2);

усилитель мощности М42230; фазовращатель М44146; аттенюатор М44712; переключатель М44218; защитное устройство М44417.

На все разработанные МИС выпущены ТУ.

Начато серийное производство сложных функциональных МИС СВЧ на арсениде галлия.

В настоящее время на «Истоке» продолжаются работы по совершенствованию технологических процессов, а также расширению номенклатуры GaAs-продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Крутов А.В., Ребров А.С. Монолитные малошумящие усилители X-диапазона // Материалы Крымской конференции. 11–15 сентября 2006. – С. 183-184.*
2. *Полнофункциональный ряд дискретных управляющих GaAs МИС для АФАР / Ю.М. Богданов, А.В. Галдецкий, В.А. Красник и др. // Материалы Крымской конференции. 11–15 сентября 2006. – С. 185-186.*
3. *Крутов А.В., Ребров А.С. Исследование ограничительных характеристик полупроводниковых защитных устройств X-диапазона // Материалы Крымской конференции. 11–15 сентября 2006. – С. 129-130.*
4. Пат. 2285930 РФ. Зонд для измерения электрических характеристик планарных элементов интегральных схем / А.М. Темнов, Н.В. Шульга, К.В. Дудинов; приоритет 11.04.05.
5. Пат. 2293339 РФ. Многоконтактный зонд для испытания планарных элементов интегральных схем / А.М. Темнов, Н.В. Шульга, К.В. Дудинов; приоритет 25.07.05.

Статья поступила 27 января 2009 г.

ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

УДК 621.378.325

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ТИПА «КАРАВЕЛЛА» ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ МИКРООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ СВЧ-ТЕХНИКИ НА ФГУП «НПП «ИСТОК»

А. Н. Королев, Е. А. Котюргин, Н. А. Лябин, М. С. Доманов, Е. Н. Покровский

ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино

Интерес к лазерным технологиям для прецизионной микрообработки материалов изделий электронной техники связан с получением приборов с новыми качественными характеристиками. Высокое качество и воспроизводимость микрообработки в автоматизированных установках типа «Каравелла» на основе импульсного лазера на парах меди с длинами волн излучения $\lambda = 0,51$ и $0,58$ мкм (видимая область) позволяют получать малые шероховатость поверхности реза ($\leq 1...3$ мкм) и зону термического воздействия ($\leq 5...10$ мкм) широкого круга тонколистовых металлических и неметаллических материалов.

The interest to laser technologies for precision microprocessing of materials for electronic engineering products is connected with obtaining devices with new qualitative features. High quality and repeatability of microprocessing in automated installations of “Karavella” type based on copper vapor pulsed laser with $\lambda = 0.51$ and 0.58 μm radiation wavelengths (visible area) allow to get low cut surface roughness ($\leq 1...3$ μm) and thermal action zone ($\leq 5...10$ μm) in a wide range of thin-sheet metal and non-metal materials.

КС: лазерное технологическое оборудование, прецизионная микрообработка, лазер на парах меди

Внедрение лазерного технологического оборудования приводит к увеличению производительности труда, расширению круга конструкционных материалов, экономии материалов и энергоресурсов, снижению природоохраных расходов, что уменьшает себестоимость изготавливаемой продукции при одновременном повышении ее качества и надежности. При этом обеспечиваются гибкость производства и проведение НИОКР, возможность выпуска широкой номенклатуры продукции как единичными и малыми партиями, так и большими сериями, что повышает конкурентоспособность предприятия в целом.

Разрабатываемые на ФГУП «НПП «Исток» автоматизированные лазерные технологические установки (АЛТУ) типа «Каравелла» на базе лазера на парах меди со средней мощностью излучения $5...100$ Вт с коротковолновой ($0,51$ и $0,58$ мкм), короткоимпульсной ($10...30$ нс) и высокочастотной ($10...20$ кГц) природой излучения, с малой импульсной энергией ($0,1...5$ мДж) и высокой интенсивностью в пятне фокусировки ($10^8...10^{12}$ Вт/см 2) являются идеальными бесконтактными инструментами для производительной прецизионной микрообработки широкого круга металлических и неметаллических материалов изделий электронной техники (ИЭТ) [1].

Первая установка такого класса разработана на НПП «Исток» в 2003 году – АЛТУ «Каравелла-1» [2]. Основу АЛТУ составляют лазер на парах меди (ЛПМ) со средней мощностью излучения 10 Вт и система движения и управления (СДУ). Внешний вид установки представлен на рис. 1, основные технические параметры – в табл. 1, структурная схема – на рис. 2.



Рис. 1. АЛТУ «Каравелла-1»

Таблица 1

**Основные технические параметры
АЛТУ «Каравелла-1» и «Каравелла-1М»**

Параметр	«Каравелла-1»	«Каравелла-1М»
Длины волн излучения, нм	510,6 и 578,2	
Диаметр пучка излучения, мм	14	
Средняя мощность излучения, Вт	10	20
Частота повторения импульсов, кГц	12 – 15	
Длительность импульса излучения (по уровню 0,5), нс		10±1
Нестабильность средней мощности излучения в течение 8 ч, %	< 5	< 3
Импульсная энергия, мДж	0,1 – 1	0,5 – 1,5
Расходимость пучка излучения, мрад	0,1 – 0,3	
Фокусное расстояние объектива, мм	50 – 150	50 – 150, 200 – 300
Диаметр рабочего пятна излучения, мкм	10 – 30	

Продолжение табл. 1.

Параметр	«Каравелла-1»	«Каравелла-1М»
Толщина обрабатываемых материалов, мм: металлические полупроводники и диэлектрики	0,02 – 0,5 $\leq 1,2$	0,5 – 1,0 ≤ 2
Перемещение координатного стола в горизонтальной плоскости XY, мм		150x150
Перемещение координатного стола по вертикальной оси Z, мм		60
Максимальная скорость перемещения координатного стола, мм/с		20
Погрешность позиционирования по каждой оси при (20 ± 1) °C, мкм		± 2
Время непрерывной работы, ч		Неограниченно
Потребляемая мощность от трехфазной сети, кВт	≤ 5	$\leq 5,5$
Расход воды (система вода – вода), л/мин		20
Габаритные размеры, мм	2600x1700x1350	2600x2100x1650
Масса, кг	≤ 1150	≤ 1200
Гарантированная наработка, ч	≥ 1000	> 1500
Технический ресурс, лет		> 5

ЛПМ в АЛТУ двухканальный, работает по схеме задающий генератор (ЗГ) – пространственный фильтр-коллиматор (ФК) – усилитель мощности (УМ), позволяющий формировать мощные пучки излучения с дифракционным качеством. В ЛПМ применяются два отпаянных промышленных лазерных активных элемента «Кулон LT-10Си», установленные в водоохлаждаемые коаксиальные металлические теплосъемники. Накачка активных элементов производится высоковольтным (до 20 кВ) транзисторным источником питания, формирующим импульсы возбуждения с амплитудой до 300 А и длительностью не более 120 нс при частоте повторения импульсов 12...16 кГц. Для получения максимальной мощности выходного излучения источник питания обеспечивает точность синхронизации каналов ЗГ и УМ не хуже 2...4 нс.

СДУ состоит: из горизонтального координатного стола XY и вертикального стола Z на базе линейных синхронных двигателей с датчиками положения; блока управления координатными столами (БУКС); управляющего компьютера; системы ТВ-наблюдения с камерами бокового и верхнего обзора; комплекта программного обеспечения. Тип датчика обратной связи на каждой координатной оси – оптическая линейка с разрешением 0,1 мкм.

Координатные столы XYZ и лазер подключены к БУКСу, управляемому с помощью компьютера. Лазерная микрообработка заготовки производится в соответствии с программой на рабочий чертеж, заданной с помощью файла в формате DXF в конструкторском пакете AutoCad. Стол XY обеспечивает перемещение заготовки в горизонтальной плоскости, стол Z – переме-

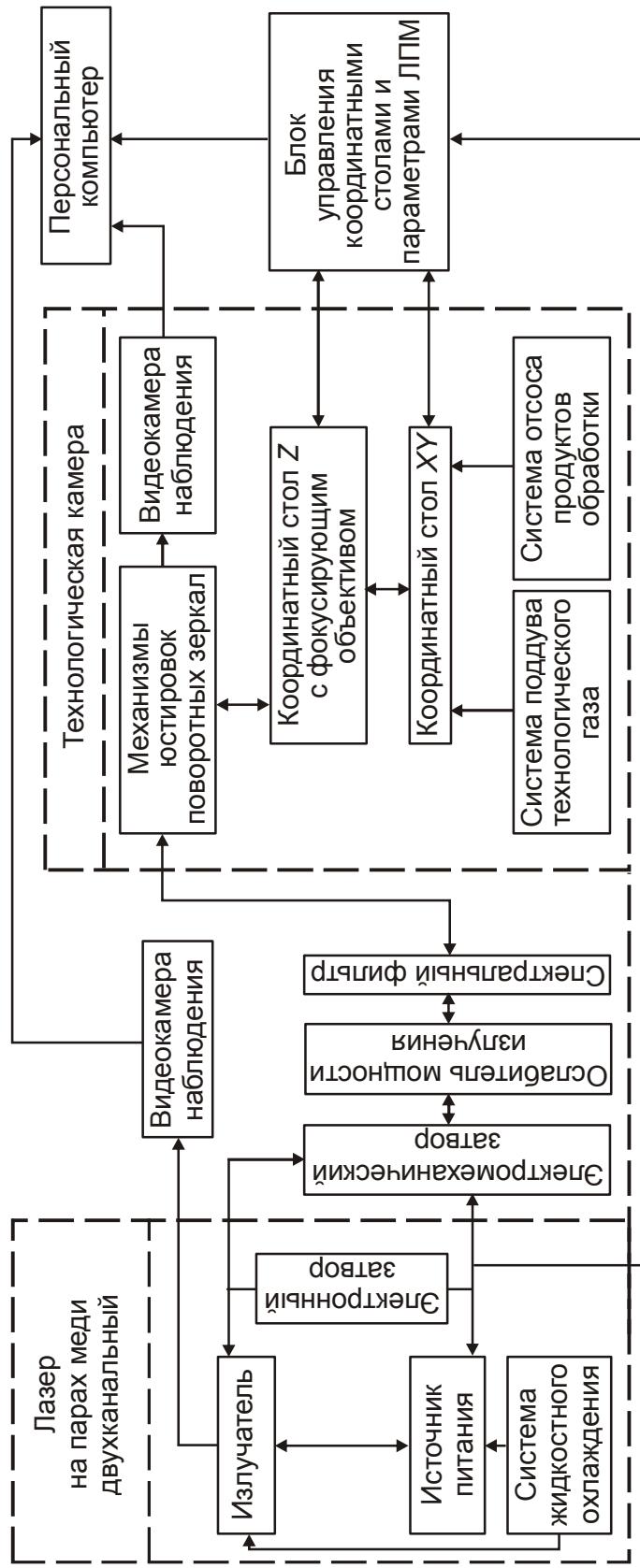


Рис. 2. Структурная схема АЛТУ «Каравелла»

щение силового фокусирующего объектива по вертикальной оси с точностью позиционирования не хуже ± 2 мкм.

В АЛТУ «Каравелла-1» на координатном столе XY дополнительно установлен моторизованный столик для обработки деталей в полярных (угловых) координатах. Данное устройство обеспечивает производительную обработку цилиндрических поверхностей.

За период 2004 – 2006 гг. была проведена отработка технологии прецизионной резки и сверления для основных материалов, применяемых в приборах СВЧ-техники и других ИЭТ: молибдена Mo, меди Cu, нержавеющей стали 12Х18Н10Т, алюминия Al, титана Ti, никеля Ni, вольфрама W, tantalа Ta, серебра Ag, золота Au, псевдосплавов (МД50 и МД 80), нитридов (AlN, BN), кремния Si, поликристаллического алмаза и других материалов.

На АЛТУ эффективно производится микрообработка металлических материалов толщиной 0,02...0,6 мм и неметаллических – толщиной до 1,2 мм. В 2009 году заканчивается разработка АЛТУ «Каравелла-1М» для производительной микрообработки металлических материалов толщиной до 1 мм и неметаллических, в частности искусственных поликристаллических алмазов и кремния, толщиной до 2 мм. В этой установке средняя мощность лазерного излучения составляет 20...25 Вт (см. табл. 1). В конструкции АЛТУ «Каравелла-1М» предусмотрена возможность установки высокоскоростного сканатора лазерного луча с фокусирующей F-Theta линзой (например, модель Racoон 16 фирмы Arges). Минимальное пятно обработки – 30 мкм, поле сканирования – 65x65 мм. Основное назначение сканатора – раскрой припоеv толщиной 10...50 мкм, перфорация трафаретов и фрезерование пеньковых структур со скоростью до 1...2 м/с.

В настоящее время на АЛТУ «Каравелла-1» для обеспечения НИОКР и серийных поставок приборов СВЧ-техники в соответствии с программами на рабочие чертежи изготавливаются со скоростью обработки 1...4 мм/с десятки типов плоских и объемных прецизионных деталей со сложной конфигурацией: диафрагмы, сетки, аноды, электроды, планки, чашки, экраны, контакты, лепестки, измерительные зонды и т.д., а также производится раскрой различных припоеv. С максимальной производительностью (5...10 мм/с) вырезаются диски, окна и чипы из искусственного поликристаллического алмаза и кремния толщиной до 1,2 мм. Производительность АЛТУ при односменной работе составляет в среднем 600...1500 деталей/месяц. По сравнению с традиционными способами обработки, включая и электроэрозионную обработку, изготовление прецизионных деталей сокращается на порядок и более.

Технологический процесс изготовления прецизионных деталей производится в три этапа: лазерная обработка, ультразвуковая обработка и химическая обработка. На рис. 3 представлены увеличенные фрагменты деталей из Mo и Cu на каждом этапе обработки.

Следует подчеркнуть, что качество лазерной обработки по сравнению с электроэрозионной значительно выше: меньше шероховатость и зона термического воздействия (см. рис. 4) и не происходит расслоения материала.

На рис. 5 представлены увеличенные фрагменты прецизионных деталей из различных материалов: Mo, W, Cu, псевдосплава, поликристаллического алмаза и Si с точностью изготовления 4...10 мкм и шероховатостью не хуже 2 мкм.

Оптимальные параметры обработки и время изготовления прецизионных деталей определяются требованиями рабочего чертежа. Но по времени и качеству обработки как простых, так и сложных деталей лазерная технология превосходит все известные традиционные способы изготовления (табл. 2).

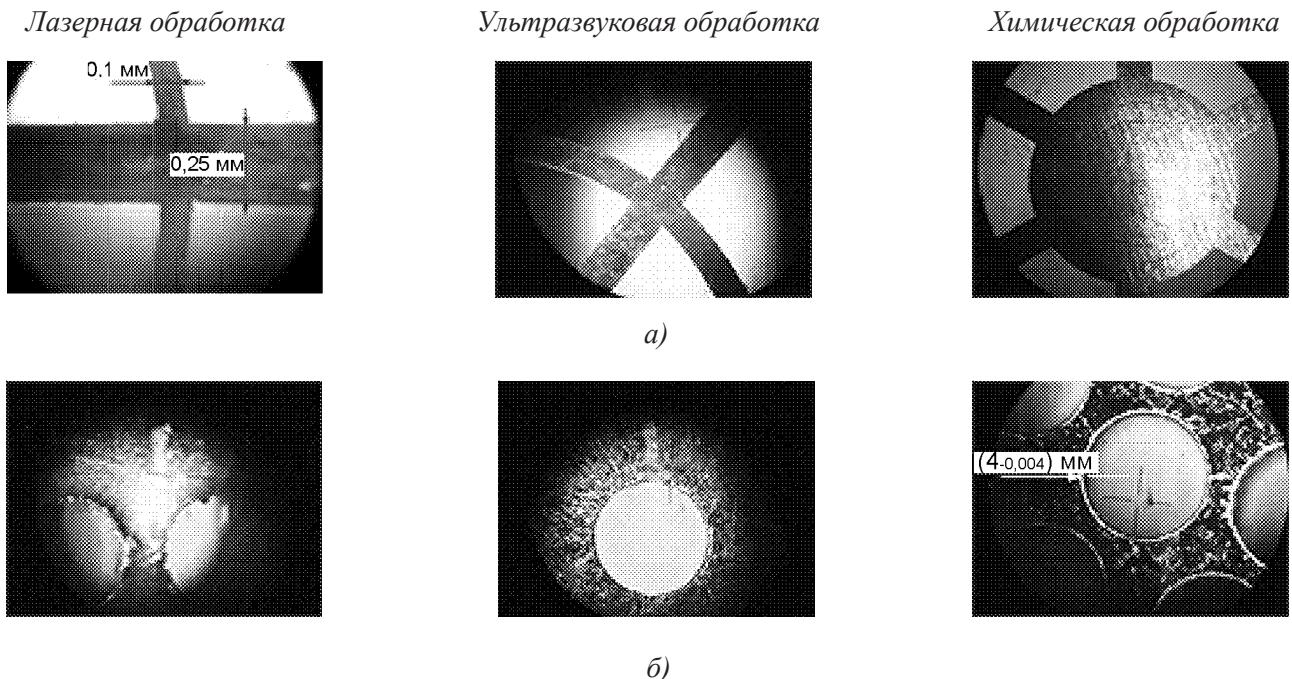


Рис. 3. Этапы технологии изготовления прецизионных деталей при лазерной обработке:
а – сферическая сетка из Mo толщиной 0,07 мм; б – плоская диафрагма из Cu толщиной 0,3 мм

Таблица 2

**Режимы и время изготовления
отдельных прецизионных деталей из Mo при лазерной обработке**

Параметры обработки				
Толщина, мм	0,1	0,1	0,45	0,16
Средняя мощность излучения, Вт	4,8	2,4	8,2	5,5
Фокусное расстояние объектива, мм	150	100	150	100
Скорость обработки, мм/с	1,5	1,3	3,5	2,0
Число проходов	11	7	22	8
Время изготовления, мин	7,5	45	105	420

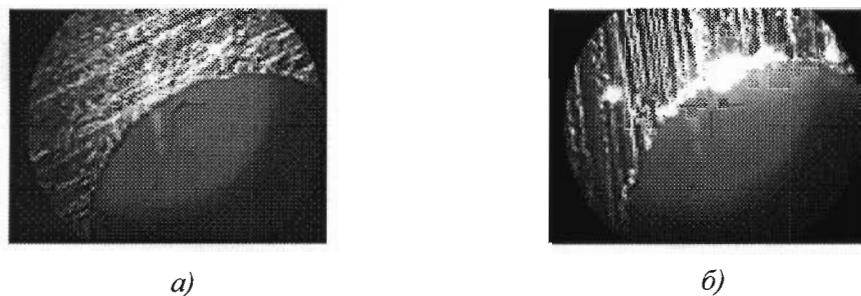


Рис. 4. Изображения фрагментов диафрагмы из Mo (толщина – 0,16 мм) при лазерной и электроэрозионной обработке ($\times 500$):
а – лазерная обработка; б – электроискровая обработка

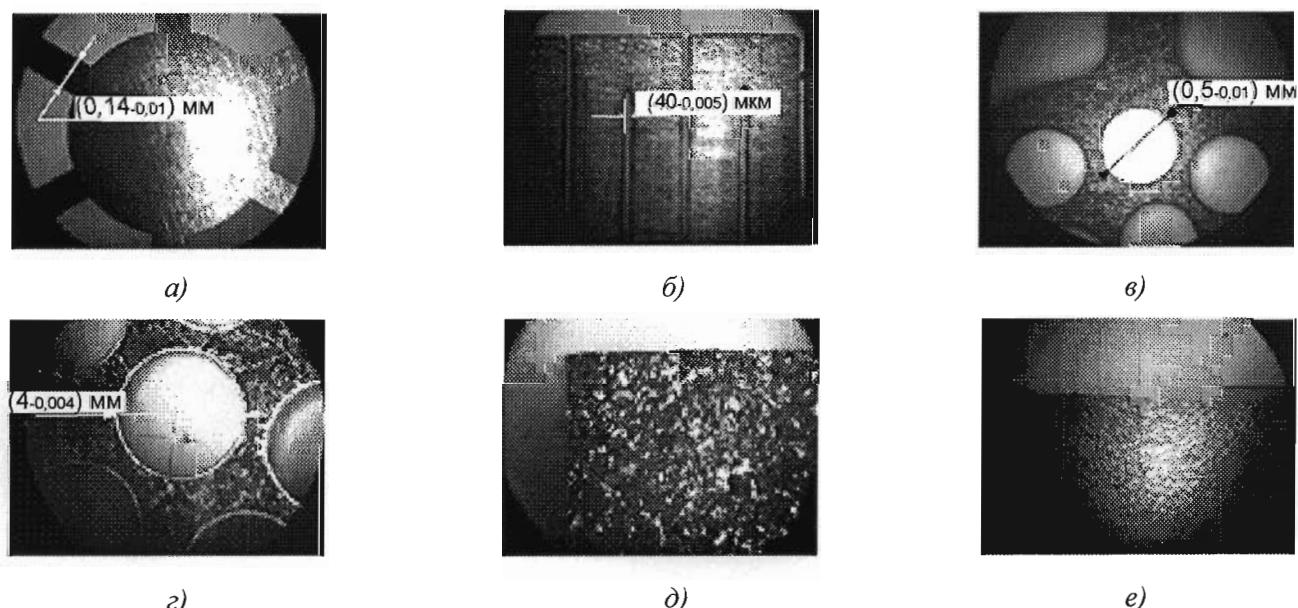


Рис. 5. Увеличенные фрагменты прецизионных деталей:

а – сферическая сетка из Mo толщиной 0,07 мм; б – пазы в пластине из W толщиной 0,2 мм; в – отверстия в диафрагме из псевдосплава МД-80 толщиной 0,6 мм; г – отверстия в диафрагме из меди МВ толщиной 0,3 мм; д – разрез подложки из поликристаллического алмаза толщиной 0,35 мм; е – разрез подложки из Si толщиной 1 мм

Необходимо подчеркнуть, что лазерный способ микрообработки материалов имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными способами, включая и электроэрозионную обработку:

- 1) широкая номенклатура обрабатываемых конструкционных материалов;
- 2) уменьшение количества операций и переходов;
- 3) экономия материалов при изготовлении и раскрое заготовки из листа;
- 4) высокая производительность изготовления деталей, особенно сложной конфигурации;
- 5) бесконтактная обработка (нет механического давления на материал);
- 6) эффективная обработка в атмосфере воздуха;
- 7) высокая точность изготовления деталей с допусками в пределах 4...20 мкм;
- 8) малая шероховатость поверхности разреза ($\leq 1 \dots 3$ мкм);
- 9) малая зона термического влияния ($\leq 5 \dots 10$ мкм);

- 10) отсутствие расслоения и микротрещин металла (Mo, W);
- 11) высокий процент выхода годных деталей;
- 12) невысокая трудоемкость изготовления и универсальность технологической оснастки;
- 13) высокая оперативность изготовления прецизионных деталей для обеспечения НИОКР;
- 14) наличие компьютерной базы данных на режимы лазерной обработки материалов;
- 15) управление технологическим процессом от ЭВМ;
- 16) существенное снижение влияния человеческого фактора на воспроизводимость технологического процесса.

Для обеспечения потребностей по прецизионной лазерной микрообработке материалов для изделий СВЧ-техники необходимо создание серии автоматизированных технологических установок со средней мощностью излучения 5...100 Вт (рис. 6).

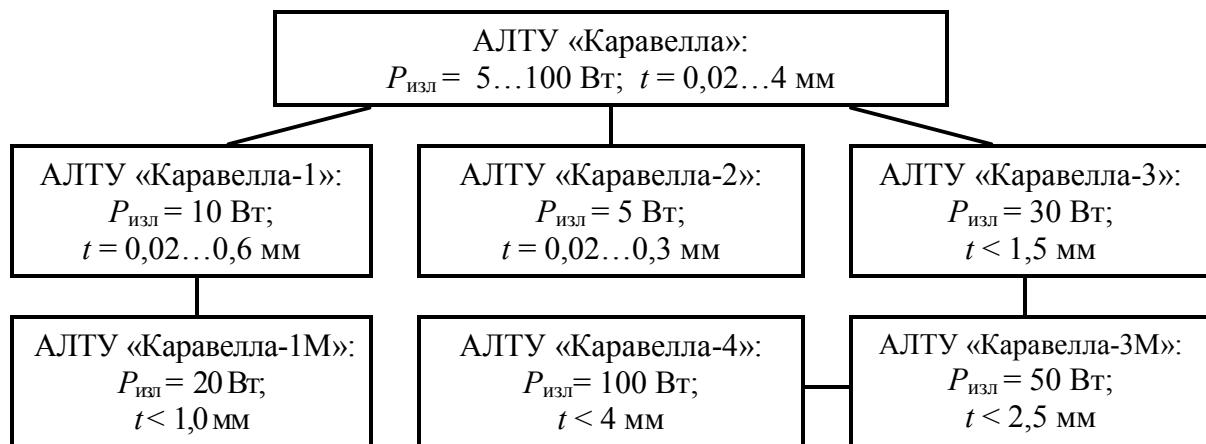


Рис. 6. Перспективы развития АЛТУ типа «Каравелла» на ФГУП «НПП «Исток»
(t – толщина материала)

АЛТУ «Каравелла-1М» со средней мощностью излучения 20 Вт, разработка которой заканчивается в 2009 году, предназначена для производительной микрообработки материалов толщиной до 1 мм.

АЛТУ «Каравелла-2» с мощностью 5 Вт может эффективно обрабатывать материалы толщиной до 0,3 мм, что достаточно для изготовления многих деталей приборов СВЧ-техники. Разработка этой установки началась в 2008 году. В этой установке ЛПМ одноканальный и выгодно отличается по массогабаритным показателям.

На перспективу рассматриваются возможности создания мощных АЛТУ типа «Каравелла-3» с мощностью излучения 30 Вт для производительной обработки материалов толщиной до 1,5 мм, «Каравелла-3М» с мощностью 50 Вт – до 2,5 мм, «Каравелла-4» с мощностью 100 Вт – до 4 мм. Разработка АЛТУ «Каравелла-3» предусмотрена в рамках инновационного проекта по техперевооружению атомно-лучевых трубок на парах цезия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди. – М.: Физматлит, 2005. – 312 с.
2. Лазерная технологическая установка «Каравелла-1» для прецизионной микрообработки тонколистовых материалов изделий электронной техники / А.Н. Королев, Н.А. Лябин, П.М. Мелешкевич и др. // Электронная промышленность. – 2006. – № 3. – С. 61-74.

Статья поступила 14 января 2009 г.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «СВЧ-ТЕХНИКА»

1. Статья должна иметь официальное направление от учреждения, в котором выполнена работа, и документ, подтверждающий возможность открытого публикования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), город, место работы, домашний и электронный адрес, телефон.

Объем публикуемой статьи, как правило, до 12 стр., включая иллюстрации.

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат DOC или RTF), записанного на магнитном (FDD 3,5") или оптическом (CD) носителе, и двух экземпляров распечатки.

4. Статья должна быть сформатирована через 1 интервал с выравниванием по ширине. Абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в “Редакторе формул” Word. Непосредственно в Word допускается использование только простых формул (символы с индексами, подстрочными и/или надстрочными). Не принимаются формулы, выполненные в виде рисунков. Расшифровка буквенных обозначений формул в тексте должна быть набрана в текстовом редакторе. Таблицы выполняются в формате Word.

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- растровые рисунки – в формате TIFF, разрешение 300 точек/дюйм (для полутооновых фотографий допускается формат JPEG, для рисунков – формат GIF); векторная графика – в формате CorelDRAW, WMF;
- размер рисунка – не более 17 × 20 см;
- буквенные и цифровые обозначения на рисунках должны соответствовать обозначениям в тексте, причем начертание греческих и русских букв – прямое, а латинских букв и цифр, обозначающих номера позиций, – курсивное;
- текстовая информация, не являющаяся неотъемлемой частью рисунка, и условные обозначения выносятся в текст статьи или в подпись к рисунку.

Фотографии принимаются в оригиналах (не более 18 × 24 см) или в электронном виде.

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

6. Следует строго соблюдать единообразие терминов, размерностей, условных обозначений, сокращений. Единицы измерения должны соответствовать системе СИ.

7. Формулы следует нумеровать в круглых скобках, например (2), литературные ссылки – в прямых, например [2], подстрочные замечания отмечаются звездочками *.

8. Таблицы должны иметь тематические заголовки. Все слова в заголовках граф даются без сокращений и в единственном числе.

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ 7.1 – 2003 и дается общим списком в конце статьи.

10. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией, о чем авторы ставятся в известность.

11. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.

Компьютерная верстка Земкова Л.А.

Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати

20.02.2009 г.

Заказ № 66

Усл. п. л. 6,5

Уч.-изд. л. 7

Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}

Тираж 500

5 статей

ФГУП «НПП «Исток» 141190, г.Фрязино, Московская обл., ул.Вокзальная, 2а

Тел.: (495)465-86-12. Факс: (495)465-86-12

E-mail: istok-info@flexuser.ru