



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (539)

2018



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(539)

2018

Издается с 1950 г.

Главный редактор

д.т.н. А.А. Борисов

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (*зам. главного редактора*);
к.т.н. **С.А. Зайцев** (*зам. главного редактора*);
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **П.В. Куприянов**;
д.т.н. **Н.А. Лябин**; д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;
В.П. Стебунов (*ответственный секретарь*);
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;
к.ф.-м.н. **В.Н. Вьюгинов**, АО «Светлана-Электронприбор», г. Санкт-Петербург;
д.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;
д.т.н. **В.М. Исаев**, АО «Российская электроника», г. Москва;
к.т.н. **П.П. Куцько**, ФГУП «МНИИРИП», г. Мытищи;
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;
д.т.н. **П.П. Мальцев**, ИСВЧ ПЭ РАН, г. Москва;
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «НПП «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **С.П. Морев**, АО «НПП «Торий», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.ф.-м.н. **Д.А. Усанов**, «СГУ им. Н.Г. Чернышевского», г. Саратов;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук».

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2018 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(539)

2018

Founded in 1950 г.

Editor-in-chief

D.T.Sc. **A.A. Borisov**

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**;
D.T.Sc. **N.A. Lyabin**; D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**;
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**; D.T.Sc. **K.G. Simonov**;
V.P. Stebunov (executive secretary);
C.T.Sc. **S.B. Alexandrov**, JSC «SP «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **L.I. Babak**, TUSUR, Tomsk;
D.T.Sc. **A.V. Baranov**, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;
C.Ph.M.Sc. **V.N. Vyuginov**, JSC «Svetlana-Elektronpribor», St. Petersburg;
D.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, ISPh SB RAS, Novosibirsk;
D.T.Sc. **V.M. Isaev**, JSC «Russian Electronics», Moscow;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, FSUE «MNIIRIP», Mytishi;
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;
D.T.Sc. **P.P. Maltsev**, IMWF SE RAS, Moscow;
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «RPC «Pulsar». Moscow;
D.T.Sc. **S.P. Morev**, JSC «RPC «Torij» Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.Ph.M.Sc. **D.A. Usanov**, «SSU named after N.G. Chernyshevsky», Saratov;
C.T.Sc. **A.U. Uschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

The journal is registered by the Federal Service for supervision in the field of communications, information technologies and mass media (certificate ПИИ № ФЦ 77-73640 dated September 7, 2018).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation the journal «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been included into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results nominated for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin»

СОДЕРЖАНИЕ

Твердотельная электроника

<i>Самохин С.А., Левашов А.С., Манченко Л.В., Лисицын А.А. – Многофункциональный малошумящий усилительный модуль диапазона частот 2...18 ГГц.....</i>	8
<i>Карасев М.С., Далингер А.Г., Жерновенков В.А., Щеголев С.А., Адиатулин А.В. – Методика измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала модуля АФАР после воздействия на вход СВЧ-импульса высокой мощности</i>	15
<i>Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Калинин А.С., Ковтунов Д.А., Рудый Ю.Б. – СВЧ акустоэлектронные компоненты.....</i>	19
<i>Петров С.А. – Входной малошумящий усилительный модуль с расширенным динамическим диапазоном.....</i>	31

Электроракумные приборы

<i>Симонов К.Г., Юнаков А.Н., Поливникова О.В., Гришин С.И., Духновский М.П., Ключников Н.А., Мамонтов А.В., Перминов И.Г., Правдиковская Г.И., Рыжов В.А., Цыберт А.О. – Высоковольтный металлокерамический изолятор для сверхмощных клистронов и электронных отпаянных пушек.....</i>	37
<i>Журавлев С.Д., Богачев Р.Ю., Роговин В.И., Петросян А.И., Шестеркин В.И., Гризбил Б.А., Рябухо В.П., Захаров А.А. – Применение лазерной интерферометрии для измерения тепловых уходов междуэлектродных зазоров в КСУ мощной импульсной ЛБВ и их влияние на макропараметры электронного пучка.....</i>	45

Технология и материаловедение

<i>Белоусов П.С., Бобылев М.А., Ковалев В.И., Каевицер Е.В., Любченко В.Е., Руковишников А.И., Петров К.П., Пелипец О.В., Темиров Ю.Ш., Рогачев И.А. – Синтез соединения SnAs в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs</i>	52
---	----

Медицинская электроника

<i>Казаринов К.Д., Полников И.Г. – Микроволновое излучение и кожа человека. Разработка неинвазивных методов исследования.....</i>	57
---	----



Краткие сообщения

<i>Балыко А.К., Балыко И.А., Терешкин Е.В. – Исследование элементов генераторов на связанных полосковых линиях.....</i>	66
<i>Кяргинский Б.Е. – Генерация шумовых сигналов электронными устройствами.....</i>	72

История

<i>Балыко А.К. – Лариса Анатольевна Парышкуро.....</i>	78
--	----

Тематический указатель.....	91
------------------------------------	----

Алфавитный указатель.....	96
----------------------------------	----



CONTENTS

Solid-state electronics

- Samokhin S.A., Levashov A.S., Manchenko L.V., Lisitsyn A.A.* – Multifunctional low-noise amplifier module of 2...18 GHz frequency range..... 8
- Karasev M.S., Dalinger A.G., Zhernovenkov V.A., Schegolev S.A., Adiatulin A.V.* – The methodology for measuring the recovery time of the transmission coefficient of the receiving channel of the active phased array module after exposure to the input of a high-power microwave pulse..... 15
- Dvoesherstov M.U., Cherednick V.I., Kalinin A.S., Kovtunov D.A., Rudy U.B.* – Microwave acoustoelectronic components..... 19
- Petrov S.A.* – Input low-noise amplifier module with extended dynamic range..... 31

Electrovacuum devices

- Simonov K.G., Yunakov A.N., Polivnikova O.V., Grishin S.I., Dukhnovsky M.P., Klyuchnikov N.A., Mamontov A.V., Perminov I.G., Pravdikovskaya G.I., Ryzhov V.A., Tsybert A.O.* – High-voltage metal-ceramic insulator for super-power klystrons and electron sealed-off guns..... 37
- Zhuravlev S.D., Bogachev R.U., Rogovin V.I., Petrosyan A.I., Shesterkin V.I., Grizbil B.A., Ryabukho V.P., Zakharov A.A.* – The use of laser interferometry for measuring thermal drifts of interelectrode gaps in cathode-grid nodes of a high-power pulsed TWT and their influence on electron beam macro-parameters..... 45

Technology and material science

- Belousov P.S., Bobylev M.A., Kovalev V.I., Kaevitser E.V., Lyubchenko V.E., Rukovishnikov A.I., Petrov K.P., Pelipets O.V., Temirov U.Sh., Rogachev I.A.* – Synthesis of SnAs compound in the course of molecular-beam epitaxy on GaAs substrates..... 52

Medical electronics

- Kazarinov K.D., Polnikov I.G.* – Microwave radiation and human skin. Development of noninvasive research methods..... 57



News in brief

<i>Balyko A.K., Balyko I.A., Tereshkin E.V.</i> – Invesigation of generators elements on coupled strip lines.....	66
<i>Kyarginsky B.E.</i> – Generation of noise signals by electronic devices.....	72

History

<i>Balyko A.K.</i> – Larisa Anatolyevna Paryshkuro.....	78
---	----

Subject index	91
----------------------------	----

Alphabetical index	96
---------------------------------	----





ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.375

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ 2...18 ГГц

С. А. Самохин, А. С. Левашов, Л. В. Манченко, А. А. Лисицын

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Обсуждаются возможности улучшения параметров отечественного сверхширокополосного малошумящего усилительного модуля в гибридно-интегральном исполнении для диапазона частот 2...18 ГГц. Приведены предварительные результаты разработки каскадов малошумящего усилителя и других узлов, входящих в разрабатываемый модуль: защитного устройства, аттенюатора и корректора АЧХ.

КС: СВЧ МШУ, обратная связь, амплитудный корректор, ГИС, АЧХ, МИС

MULTIFUNCTIONAL LOW-NOISE AMPLIFIER MODULE OF 2...18 GHz FREQUENCY RANGE

S. A. Samokhin, A. S. Levashov, L. V. Manchenko, A. A. Lisitsyn

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The possibilities of improving the parameters of the domestic ultra-wideband low-noise amplifier module in a hybrid-integrated version for 2...18 GHz frequency range are discussed. The preliminary results of the development of cascades of a low-noise amplifier and other nodes included in the module being developed such as a protective device, an attenuator and a frequency-response equalizer are presented.

Keywords: microwave low-noise amplifier, feedback, amplitude equalizer, HIC, AFC, MIC

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхширокополосные СВЧ малошумящие усилители (МШУ) применяются в измерительной технике, а также во входных цепях изделий специального назначения [1]. Совершенствование отечественных сверхширокополосных МШУ позволит улучшить тактико-технические характеристики современной и разрабатываемой перспективной аппаратуры. Полезно обеспечить стойкость МШУ к воздействию высоких уровней входных СВЧ-мощностей. Наряду с совершенствованием электрических параметров требуется улучшение массогабаритных параметров МШУ.

В [2] были приведены результаты разработки сверхширокополосного гибридно-интегрального (ГИС) МШУ полностью на отечественной элементной базе с параметрами на уровне отечественных и зарубежных аналогов.



В представляемой работе обсуждается возможность улучшения основных технических параметров СВЧ-модуля с целью получения следующих значений:

Частотный диапазон.....	2 – 18 ГГц
Коэффициент усиления	не менее 25 дБ
Коэффициент шума	не более 4,5 дБ
Неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).....	не более 2 дБ
КСВН по входам и выходам.....	не более 2,5
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по выходу при компрессии 1 дБ.....	не менее 30 мВт
Максимально допустимая входная непрерывная мощность	не менее 2,5 Вт

2. ВЫБОР СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ МШУ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ 2...18 ГГц

Применение МИС-усилителей в данной работе не рассматривается.

Для достижения требуемых параметров предлагается использовать следующую структурную схему (рис. 1).

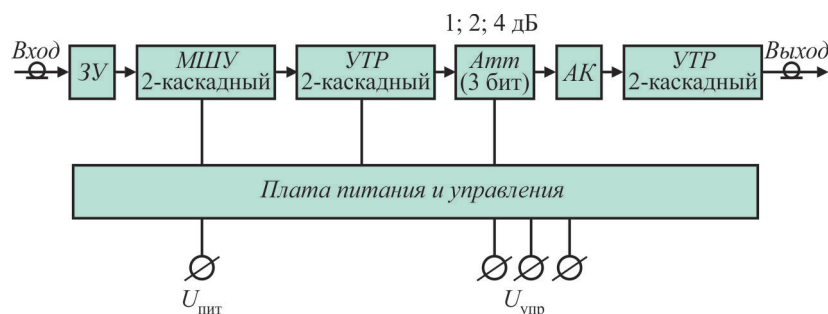


Рис. 1. Структурная схема модуля:

3У – пассивное защитное устройство; МШУ – малошумящий усилитель;
УТР – усилитель транзисторный; АК – амплитудный корректор;
Атт – ступенчатый управляемый аттенюатор

Существует три оптимальных способа построения схем входных каскадов сверхширокополосных МШУ [3].

1. С распределенным усилением. Для многокаскадных устройств такая схема позволяет получить оптимальные значения КСВН и неравномерности АЧХ. Но такие усилители потребляют большую мощность и имеют низкий КПД, а их реализация требует точного повторения параметров каждого каскада и оправдана только в монолитных интегральных схемах (МИС).

2. Балансные каскады на мостах Ланге. Такая схема позволяет получить наилучшие значения КСВН, но мосты Ланге увеличивают коэффициент шума $K_{ш}$, усложняют конструкцию и существенно ухудшают массогабаритные параметры МШУ.

3. С обратной связью (ОС). Такие схемы позволяют получить оптимальные значения неравномерности АЧХ и $K_{ш}$, но имеют достаточно высокие значения КСВН, а обратная связь уменьшает выходную мощность и КПД.

В качестве активных элементов МШУ выбраны выпускаемые в АО «НПП «Исток» им. Шокина» малошумящие GaAs pHEMT 3П3102-Б, которые не уступают по параметрам западным аналогам. Ширина затвора таких транзисторов составляет 180 мкм.



Как известно [3], резистивные компоненты на входе усилителя увеличивают $K_{ш}$ на нижних частотах. Поэтому было принято решение заземлять затвор через сверхширокополосную индуктивность, не имеющую резонанса в рабочей полосе частот. Для этого методами двумерного электромагнитного моделирования была спроектирована индуктивность, которая представляет собой микрополосковую спираль на подложке из поликора толщиной 0,25 мм. Оптимизация размеров спирали производилась исходя из требований минимальных потерь в рабочей полосе частот и минимальных значений КСВН 50-омной микрополосковой линии с подключенной к ней параллельно индуктивностью.

Электромагнитный анализ топологии (рис. 2) проводился в программе CST, экспериментальная проверка показала следующие характеристики (рис. 3).

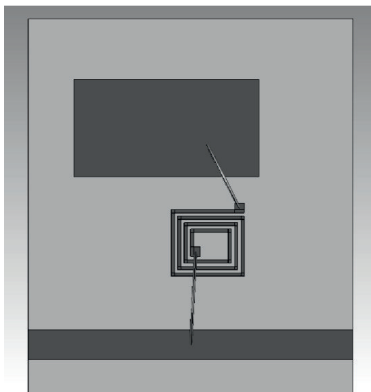


Рис. 2. Топология индуктивности, включенной в полосковую 50-омную линию

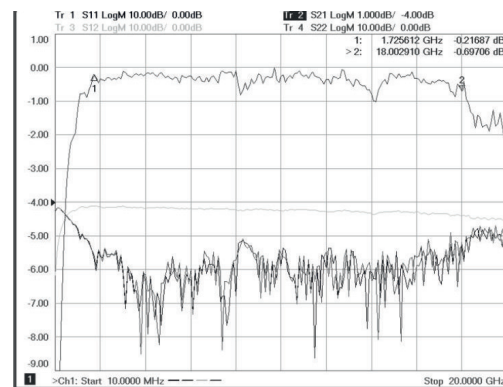


Рис. 3. S -параметры 50-омной линии с подключенной индуктивностью

3. БАЛАНСНЫЙ КАСКАД МШУ НА МОСТАХ ЛАНГЕ

Для балансного каскада был рассчитан трехсекционный направленный ответвитель (НО) на основе моста Ланге. Расчетные зависимости от частоты S -параметров разработанного моста Ланге приведены на рис. 4.

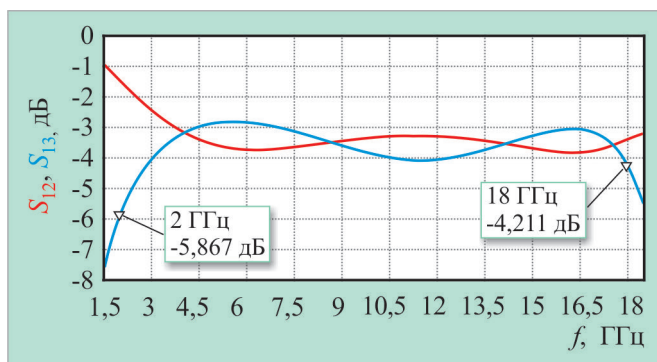
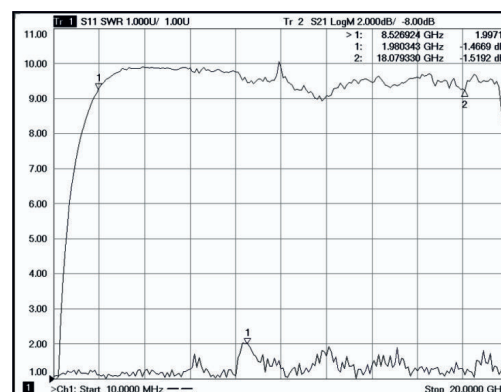


Рис. 4. Частотные зависимости S -параметров моста Ланге на подвешенной подложке

Разработанный НО был реализован на подложке из поликора толщиной 0,25 мм. На обратной стороне подложки под средней частью моста в экране расположено окно. В области окна расстояние до экрана составляет 1...2 мм. Экспериментальная проверка показала следующие результаты (рис. 5).



Рис. 5. Коэффициент передачи двух мостов Ланге, включенных навстречу друг другу



Разработанный НО имеет приемлемые значения КСВН (не более 2) и небольшие потери (не более 1 дБ) в рабочем диапазоне частот.

Проектирование согласующих цепей балансного усилителя производилось путем параметрической оптимизации элементов схемы усилителя с учетом мостов Ланге. Затем с помощью программ двумерного электромагнитного анализа моделировалась топология усилителя и рассчитывались его выходные характеристики. Расчетные характеристики K_y , $K_{ш}$ и КСВН балансного каскада МШУ в рабочей полосе частот приведены на рис. 6.

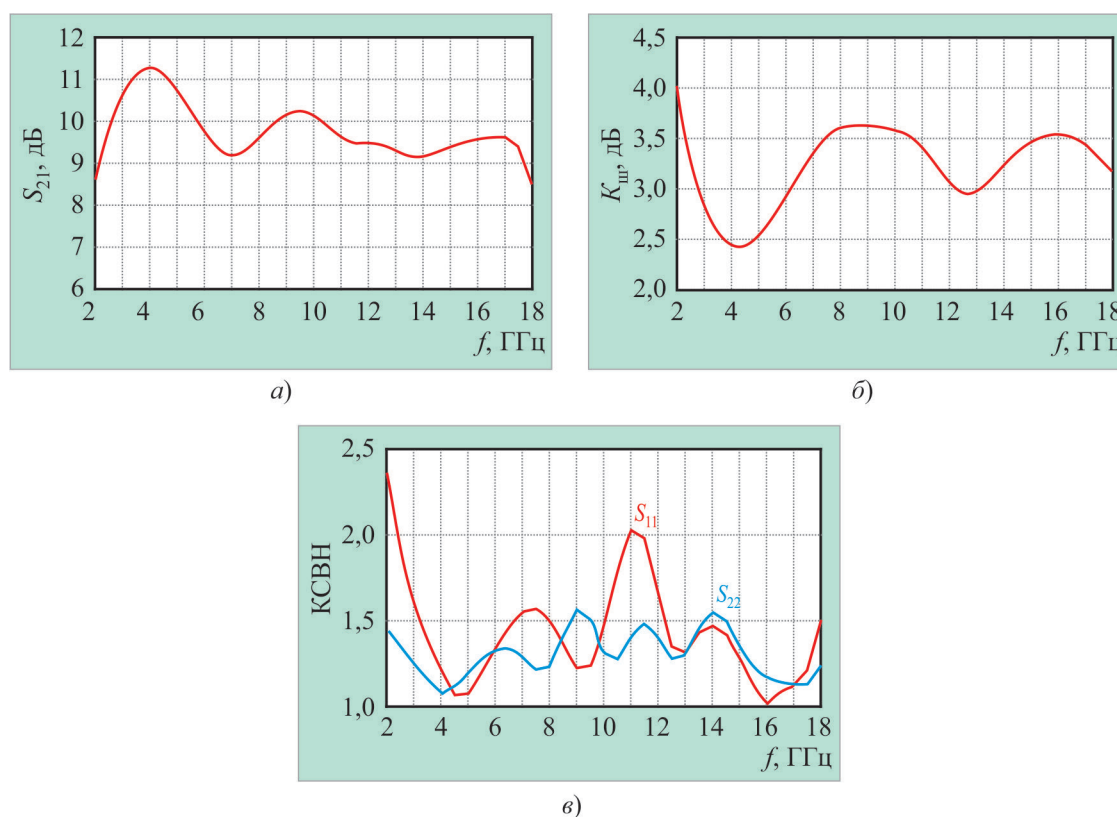


Рис. 6. Частотные зависимости K_y , $K_{ш}$ и КСВН балансного каскада

Рассчитанный балансный каскад в рабочем диапазоне частот показал хорошие значения КСВН (менее 2) и K_y (более 8,5 дБ). Но разработанная топология имеет большие размеры

(10×9 мм) и достаточно высокий $K_{ш}$ (до 3,5...4 дБ), следовательно, балансный каскад нецелесообразно использовать в разрабатываемом модуле.

4. КАСКАД МШУ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

При проектировании МШУ с отрицательной ОС транзистор моделировался эквивалентной схемой, включающей источники шума. Помимо цепи ОС, на входе и выходе усилителя расположены согласующие цепи, состоящие из отрезков микрополосковых линий. Оптимизация параметров элементов согласующих цепей производилась с целью получения минимальных значений $K_{ш}$, КСВН и неравномерности АЧХ в рабочем диапазоне частот. Индуктивность ОС моделировалась отрезком проволоки. Расчеты показали, что длина проволоки должна быть минимальна, а у сопротивления резистора ОС существует оптимальное значение.

МШУ с ОС реализован на подложке из поликора толщиной 0,25 мм и имеет достаточно малые габариты (5×7 мм). Для минимизации длин проволок и паразитных емкостей в цепи ОС использован навесной резистор. Разработанный каскад показал хорошие характеристики в рабочем диапазоне частот, но достаточно высокий КСВН (до 3). Подстройка элементов схемы усилительного каскада производилась с помощью индиевой фольги. При измерениях характеристик каскада МШУ с ОС были получены следующие результаты:

Частотный диапазон.....	2 – 18 ГГц
Коэффициент усиления	не менее 8,5 дБ
Коэффициент шума	не более 3 дБ
Неравномерность АЧХ.....	не более 2 дБ
КСВН по входам и выходам.....	не более 2,5

На рис. 7 приведены экспериментальные частотные зависимости коэффициента усиления и КСВН входа и выхода каскада МШУ с ОС.

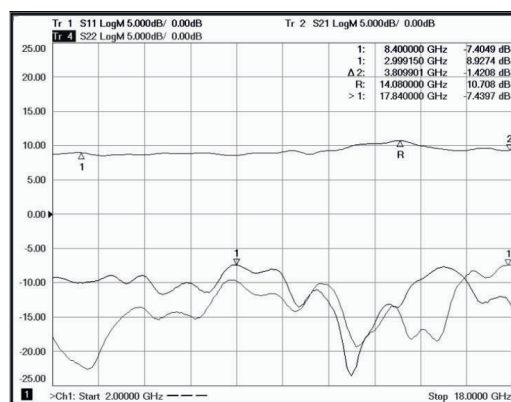


Рис. 7. Измеренные частотные зависимости K_y и КСВН каскада МШУ с ОС

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что в МШУ целесообразно использовать каскады с ОС. Неравномерность K_y первого каскада достигает 2 дБ, что приводит к необходимости корректировать АЧХ модуля в последующих каскадах и применять специально разработанные корректоры АЧХ.

5. КОРРЕКТОРЫ НЕРАВНОМЕРНОСТИ АЧХ УСИЛЕНИЯ

Один из главных недостатков существующих сверхширокополосных усилителей – довольно большая неравномерность АЧХ усиления. Как правило, в приёмном тракте с ростом частоты возрастают потери, а общая неравномерность АЧХ усиления МШУ в широкой полосе частот может достигать 5 дБ. Для улучшения неравномерности АЧХ усиления между каскадами применяют корректирующие цепи.

Задача состояла в создании амплитудного корректора с коэффициентом передачи $K_{\text{пер}}$, возрастающим на 3 дБ при увеличении частоты с 2 до 18 ГГц, и с возможностью увеличения угла наклона АЧХ. Коррекция АЧХ осуществляется следующим способом (рис. 8): шлейф $w1$ обеспечивает минимальные потери на верхних частотах, а последовательно соединенные шлейф $w2$, резистор R и заземление обеспечивают потери на нижних частотах; таким образом, с ростом частоты ослабление уменьшается. Электромагнитное моделирование, оптимизация топологий, а также все аналитические расчёты производились с помощью САПР ADS компании Keysight. АК рассчитывался на согласованный тракт с волновым сопротивлением 50 Ом для диапазона частот 2...18 ГГц. Разработанный корректор был реализован на подложке из поликора толщиной 0,25 мм и имеет небольшие размеры (3×0,5 мм). Топология АК и результаты экспериментальной проверки параметров приведены на рис. 8.

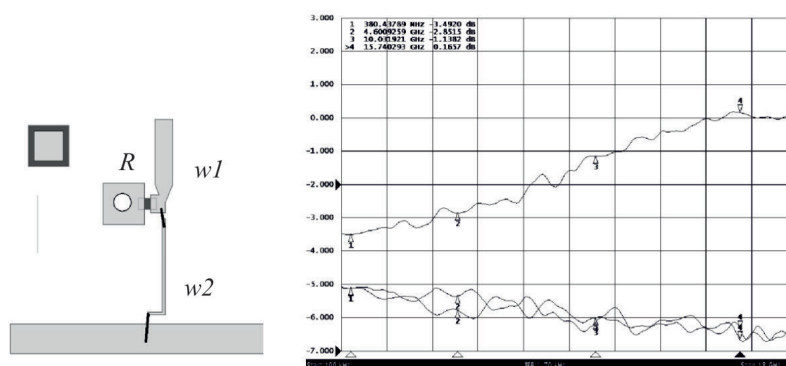


Рис. 8. Топология и частотные зависимости $K_{\text{пер}}$ и КСВН амплитудного корректора

При добавлении в цепь второго корректора увеличивается угол наклона АЧХ (рис. 9).

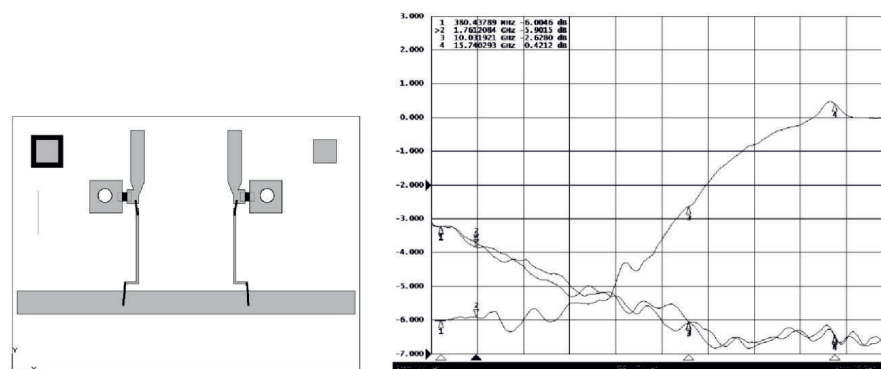


Рис. 9. Топология и частотные зависимости $K_{\text{пер}}$ и КСВН двойного амплитудного корректора



Разработанный АК позволяет корректировать величину спада АЧХ от 3 до 6 дБ в рабочей полосе частот и практически не имеет потерь на верхних частотах.

6. ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО

На входе МШУ предполагается использовать уже разработанное в АО «НПП «Исток» им. Шокина» ЗУ. Это устройство реализовано в виде МИС и не требует питания и дополнительных настроек. Прямые потери в режиме малого сигнала в рабочем диапазоне частот не превышают 1 дБ. Максимально допустимая входная непрерывная СВЧ-мощность составляет не менее 3 Вт. Уровень просачивающейся мощности от 15 до 40 мВт безопасен для транзисторов, используемых в МШУ.

7. АТТЕНЮАТОР

В разрабатываемом модуле для регулировки коэффициента усиления может быть использован цифровой аттенюатор с дискретом регулировки 1 дБ, работающий в диапазоне частот 0,1...20 ГГц [4].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После первого этапа работы получены предварительные результаты по разработке основных узлов сверхширокополосного малошумящего усилительного модуля диапазона частот 2...18 ГГц. Результаты расчетов и экспериментальной проверки позволяют ожидать улучшения параметров существующих отечественных сверхширокополосных малошумящих усилительных СВЧ-модулей, в том числе массогабаритных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кищинский, А.** Широкополосные транзисторные усилители: смена поколений / А. Кищинский // Электроника. – 2010. – № 2. – С. 60 – 67.
2. **Кручинин, И. В.** Широкополосный МШУ диапазона 2...18 ГГц / И. В. Кручинин, А. В. Левашов. – ЗАО «Научно-производственное предприятие «Салют 25», 2015.
3. **Niclas, Karl B.** Multi-octave performance of single-ended microwave solid-state amplifiers / Karl B. Niclas // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – August 1984. – Vol. MTT-32, No 8. – P. 896.
4. <http://www.micran.ru/productions/MIS/attenuators/MP108>.

Статья поступила 4 июля 2018 г.



УДК 621.396.677.494

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ ПРИЕМНОГО КАНАЛА МОДУЛЯ АФАР
ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВХОД
СВЧ-ИМПУЛЬСА ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ**

**М. С. Карасев, А. Г. Далингер, В. А. Жерновенков,
С. А. Щеголев, А. В. Адиатулин**

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Рассмотрены способы измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала модуля АФАР после воздействия на вход СВЧ-импульса мощностью 8 Вт. Описана структурная схема установки для измерений, а также полученные значения в процессе эксперимента. Проведено сравнение результатов, полученных при измерениях разными способами.

КС: методика измерений, время восстановления коэффициента передачи, структурная схема стенда для измерений, экспериментальная проверка, СВЧ-мощность

**THE METHODOLOGY FOR MEASURING THE RECOVERY TIME
OF THE TRANSMISSION COEFFICIENT OF THE RECEIVING CHANNEL
OF THE ACTIVE PHASED ARRAY MODULE AFTER EXPOSURE
TO THE INPUT OF A HIGH-POWER MICROWAVE PULSE**

M. S. Karasev, A. G. Dalinger, V. A. Zhernovenkov, S. A. Schegolev, A. V. Adiatulin

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

Methods for measuring the recovery time of the transmission coefficient of the receiving channel of the active phased array module after exposure to the input of 8W microwave pulse are considered. The block diagram of the installation for measurements is described as well as the values obtained during the experiment. A comparison of the results obtained when using different ways of measurements was conducted.

Keywords: methodology for measurements, recovery time of the transmission coefficient, block diagram of the installation for measurements, experimental validation, microwave power

1. ВВЕДЕНИЕ

При работе современных импульсных РЛС часто возникает ситуация, при которой на вход приемного канала попадает сигнал, уровень которого намного превышает его динамический диапазон. Это приводит к перегрузке функциональных узлов приемного модуля (ПРМ) и, как следствие, к изменению АЧХ и ФЧХ канала. Поэтому для правильной работы РЛС необходимо знать время восстановления канала ПРМ после воздействия мощной помехи.

Данная статья посвящена измерениям времени восстановления коэффициента передачи при воздействии на вход приемного канала СВЧ-импульса мощностью 8 Вт на собранном испытательном стенде с использованием разработанных методик. Методики отличаются количеством приборов, необходимых для измерений, и сложностью сборки испытательного стенда.



2. ИЗМЕРЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОГО ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ

Структурная схема стенда с одним генератором для измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала показана на рис. 1.

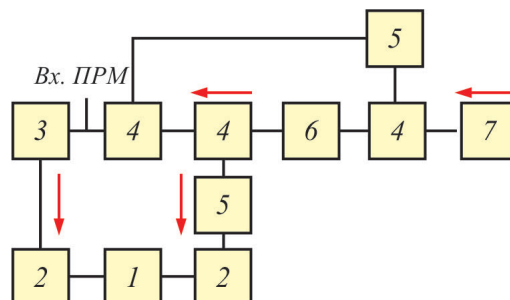


Рис. 1. Структурная схема стенда для измерений с использованием одного генератора сигналов:

1 – осциллограф; 2 – амплитудный детектор; 3 – измеряемый модуль [1]; 4 – направленный ответвитель (-10 дБ); 5 – аттенюатор регулируемый; 6 – усилитель мощности (8 Вт) [2]; 7 – генератор непрерывных сигналов; направление движения СВЧ-энергии показано черными стрелками

Из достоинств данного метода измерений можно выделить малое количество приборов, используемых на стенде, и относительную простоту сборки. Из недостатков – невозможность перестройки импульсной мощности, подаваемой на вход приемника, без изменения номиналов ослабления аттенюаторов и направленных ответвителей.

Полученные результаты значений амплитуды импульсов показаны на рис. 2.



Рис. 2. Результаты измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на вход импульса мощностью 8 Вт с одним генератором сигналов

Время восстановления усилителя ПРМ составило 96 нс.

Данный параметр, полученный в результате экспериментальной проверки, обеспечивает разработчика необходимыми сведениями о задании точных значений временных задержек, требуемых для корректной работы приемного канала приемопередающего устройства.



3. ИЗМЕРЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ ГЕНЕРАТОРОВ СИГНАЛОВ

Структурная схема стенда с двумя генераторами сигналов для измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала показана на рис. 3.

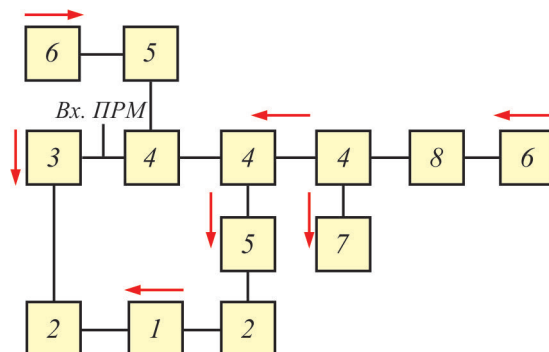


Рис. 3. Структурная схема стенда для измерений с использованием двух генераторов сигналов:

1 – осциллограф; 2 – амплитудный детектор; 3 – измеряемый модуль; 4 – направленный ответвитель (-10 дБ); 5 – аттенюатор (6 дБ); 6 – генератор непрерывных сигналов; 7 – измеритель мощности; 8 – усилитель мощности (8 Вт); направление движения СВЧ-энергии показано черными стрелками

Из достоинств данного метода измерений можно выделить возможность перестройки импульсной мощности, подаваемой на вход приемника, без изменения номиналов ослабления аттенюаторов и направленных ответвителей. Из недостатков – большое количество приборов, входящих в состав стенда.

Полученные значения импульсов показаны на рис. 4.

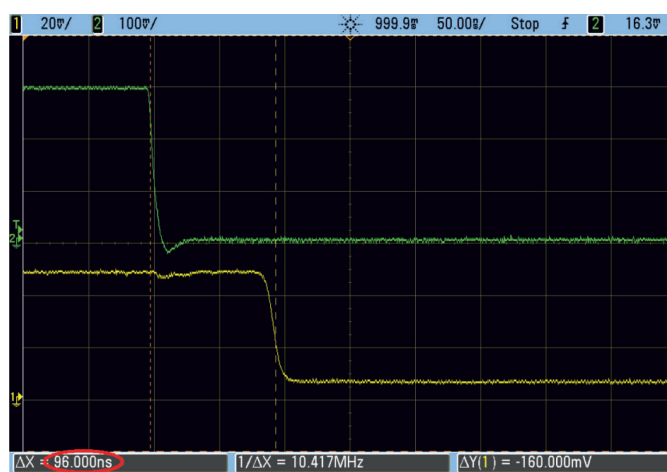


Рис. 4. Результаты измерений с использованием двух генераторов времени восстановления коэффициента передачи приемного канала после воздействия на вход 8-Вт импульса

Время восстановления усилителя ПРМ с использованием двух генераторов непрерывных сигналов в составе собранного стенда, как и в первом способе, составляет 96 нс.



4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы и результаты измерений времени восстановления коэффициента передачи приемного канала ПРМ АФАР после воздействия на вход СВЧ-импульса высокой мощности позволяют выбрать необходимые временные характеристики при разработке приемопередающих устройств, учитывающие временные окна для приема информации, что обеспечивает корректную работу всей системы.

Метод измерения с использованием одного генератора непрерывных сигналов позволяет использовать малое количество приборов и обеспечивает относительную простоту сборки стенда. Недостатком данного метода является невозможность изменения импульсной мощности, подаваемой на вход приемника, без изменения номиналов ослабления аттенюаторов и направленных ответвителей.

Метод измерения с использованием двух генераторов непрерывных сигналов имеет возможность изменения импульсной мощности, подаваемой на вход приемника, без изменения номиналов ослабления аттенюаторов и направленных ответвителей. Недостатком этого метода является большое количество приборов, входящих в состав стенда.

Оба метода, при сравнении результатов времени восстановления, показали одинаковые временные задержки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карасев, М. С.** Перспективный многофункциональный приемопередающий модуль АФАР X-диапазона / М. С. Карасев и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 1(532). – С. 45 – 48.
2. **Карасев, М. С.** Многофункциональный приемопередающий модуль АФАР нового поколения / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий, В. А. Жерновенков, Е. А. Синькова, С. А. Щеголев // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. тр. конф. – 2018.

Статья поступила 17 августа 2018 г.



УДК 534.2

СВЧ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ

М. Ю. Двоешерстов, В. И. Чередник

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

А. С. Калинин, Д. А. Ковтунов, Ю. Б. Рудый

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

На основе имеющихся литературных источников проведен анализ области применения СВЧ-устройств на поверхностных (ПАВ) и объемных (ОАВ) акустических волнах. Показано, что в настоящее время частота 2,5 ГГц является верхним пределом устройств на ПАВ. Также приведены результаты экспериментальных исследований образцов одночастотных тонкопленочных резонаторов с акустическим отражателем и полосовых фильтров на их основе.

КС: акустоэлектронные компоненты, поверхностные акустические волны, объемные акустические волны, резонаторы

MICROWAVE ACOUSTOELECTRONIC COMPONENTS

M. U. Dvoesherstov, V. I. Cherednick

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

A. S. Kalinin, D. A. Kovtunov, U. B. Rudy

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

On the basis of the available literature sources an analysis of the field of application of microwave devices on surface acoustic waves (SAW) and bulk acoustic waves (BAW) has been carried out. It is shown that currently the frequency of 2.5 GHz is the upper limit of devices on SAW. The results of experimental studies of thin-film resonators on SMR-BAW and band-pass filters based on them are also presented.

Keywords: acoustoelectronic components, surface acoustic waves, bulk acoustic waves, resonators

1. ВВЕДЕНИЕ

Современная акустоэлектроника является одним из основных направлений СВЧ-электроники, определяющих развитие в области радиоэлектронной техники, приборостроения, медицины, экологии и многих других применений [1–3].

Основные достоинства акустоэлектронных устройств СВЧ – чрезвычайная миниатюрность и прекрасная совместимость с существующими интегральными схемами самого разного назначения. Сегодня номенклатура СВЧ акустоэлектронных компонентов, выпускаемых в мире, достаточно широка. В ее состав входят: полосовые фильтры; дисперсионные фильтры; линии задержки; дисперсионные линии задержки; резонаторы и генераторы; устройства для кодирования и декодирования сигналов; устройства для быстрого преобразования Фурье; цифровые фильтры Найквиста; синтезаторы частоты; устройства для свертки и корреляции сигналов; сенсоры и т. д.

Широкое применение находят устройства как на поверхностных (ПАВ, SAW – surface acoustic wave), так и на объемных (ОАВ, BAW – bulk acoustic wave) акустических волнах. Однако по мере роста рабочей частоты изготовление таких устройств на ПАВ наталкивается на ряд серьезных технологических проблем. Так, с увеличением частоты уменьшаются размеры всех элементов резонаторов и фильтров до микронных и субмикронных и их изготовление современными методами фото- и электронной литографии становится проблематичным. Из-за уменьшения размеров снижается электрическая прочность структур. В настоящее время частота 2,5 ГГц является верхним пределом устройств на ПАВ, при котором параметры устройств еще остаются контролируемыми, а сами устройства – технологически воспроизводимыми.

Поэтому в последние десятилетия ведется активный поиск альтернативных путей создания акустических резонаторов и фильтров СВЧ-диапазона, работающих на ОАВ, которые распространяются в тонкопленочных пьезокристаллических структурах. Более подробное обсуждение и сравнение устройств на ПАВ и ОАВ можно найти, например, в [2]. На рис. 1 приведена диаграмма, показывающая область применения акустоэлектронных устройств (СВЧ резонаторов и фильтров) на ПАВ и ОАВ в зависимости от рабочего частотного диапазона.

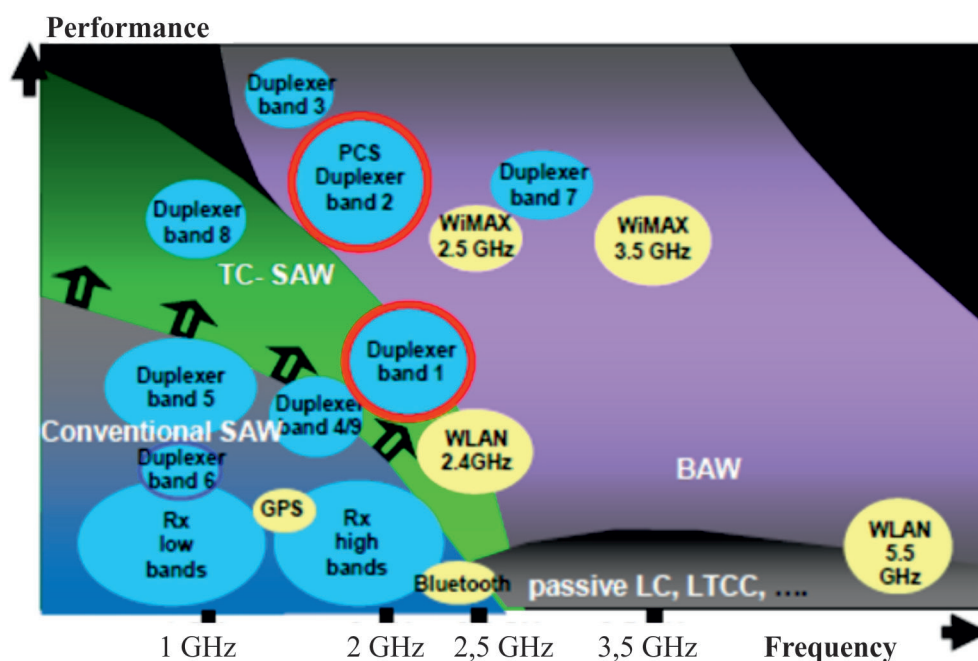


Рис. 1. Область применения СВЧ акустоэлектронных устройств на ПАВ (SAW) и ОАВ (BAW) в зависимости от частоты в системах современной мобильной связи

Ситуация переломилась в результате создания дуплексеров на основе тонкопленочных акустоэлектронных резонаторов (FBAR, film bulk acoustic resonator), которые позволили существенно уменьшить размеры, в частности толщины, мобильных телефонов [4]. Один из первых мобильных телефонов на FBAR, выпущенных в 2001 г. фирмой Sanyo, демонстрируется в популярном научно-фантастическом фильме «Люди в черном II» (2002 г.).

На рис. 2 приведена диаграмма, отображающая рост рынка устройств на ОАВ, которая была опубликована в [globalmarketforbulkacousticwave (BAW) devices] в январе 2013 г. Огромное ко-

личество разработок относится к частотной области около 2 ГГц. Это обусловлено востребованностью СВЧ-фильтров и дуплексеров для носимых устройств связи (мобильных телефонов, навигационных приборов).

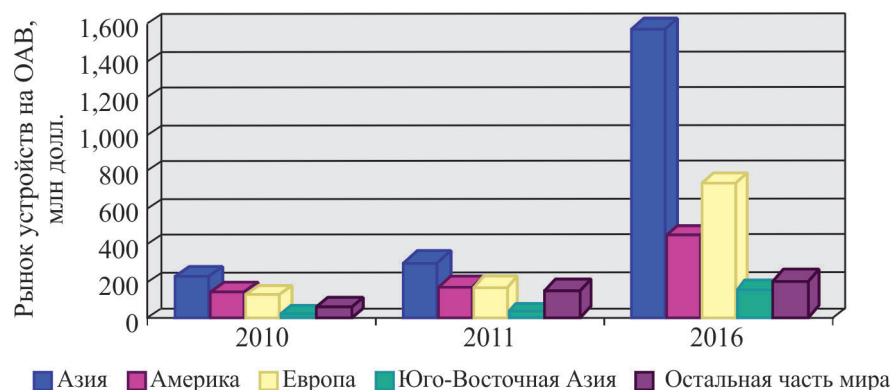


Рис. 2. Глобальный рынок устройств на ОАВ (June 7, 2013)

Требования к скорости передачи данных (более чем 2 Гбит/с) в беспроводных системах связи, системах высокоскоростного интернета, телевидении высокой четкости (HDTV) неуклонно возрастают. Одним из методов осуществления высокоскоростной передачи данных является применение миллиметровых широкополосных беспроводных систем. Одним из ключевых устройств в таких системах является миниатюрный широкополосный СВЧ-фильтр [2].

2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВЧ АКУСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В технологии изготовления СВЧ акустических приборов наиболее используемые пьезоэлектрики – это окись цинка ZnO, цирконат-титанат свинца (ЦТС) и нитрид алюминия AlN. Некоторые физические свойства этих материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физические свойства пьезоэлектрических пленок

Параметр, единица измерения	Материал		
	AlN (0001)	ZnO	ЦТС
Скорость звука (продольная волна), км/с	11,05	6,35	4,6
Модуль Юнга, 10^{11} Н/м ²	3,94	2,11	0,49
Пьезоэлектрическая константа, 10^{-12} Кл/Н	5,6	12,4	200
Электромеханическая связь, %	31	48	72
Коэффициент пьезоэлектрической связи, %	6,5	8,5	35
Теплопроводность, Вт/(м·К)	280	60	1,80

Продолжение табл. 1

Параметр, единица измерения	Материал		
	AlN (0001)	ZnO	ЦТС
Температурное расширение (при 300 К), $10^{-6}/\text{K}$	4,15	2,92	–
Температурный коэффициент ухода частоты, $10^{-8}/^\circ\text{C}$	-25	-60	–

Оксид цинка. Хорошо ориентированные текстурированные пленки ZnO имеют относительно большую константу пьезоэлектрической связи, но продвижение в СВЧ-область приводит к значительному увеличению затухания акустических волн. Это ограничивает применение пленок ZnO в гигагерцовом диапазоне частот. Кроме того, ZnO плохо совместим с технологиями CMOS, поскольку ZnO уменьшает времена жизни носителей в кремнии.

Цирконат-титанат свинца – сегнетоэлектрик и хороший пьезоэлектрик. Но из-за высоких акустических потерь его применение ограничено низкочастотными устройствами или устройствами, не требующими высокой добротности.

Нитрид алюминия – полупроводник с запрещенной зоной 6,2 эВ. Материал имеет кристаллическую решетку типа вюрцита с гексагональной симметрией (рис. 3), очень хорошие акустические параметры и считается более привлекательным по сравнению с ZnO с точки зрения его применения в полупроводниковых интегральных схемах. В настоящее время несколько мировых компаний разрабатывают пленочные технологии и производство пленок AlN для применения СВЧ акустических приборов.

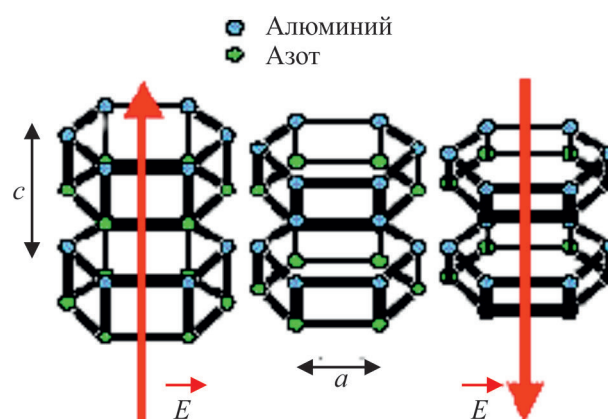


Рис. 3. Кристаллическая структура нитрида алюминия

В последнее десятилетие значительно возросло количество работ, посвященных исследованиям материалов, свойства которых определяются не свойствами элементов, из которых они состоят, а свойствами искусственной периодической структуры (фотонные и фононные кристаллы) (рис. 4). Наиболее очевидное применение фононных кристаллов в акустоэлектронике – использование в качестве полосовых электрически перестраиваемых фильтров [5] на частоты выше 3 ГГц.

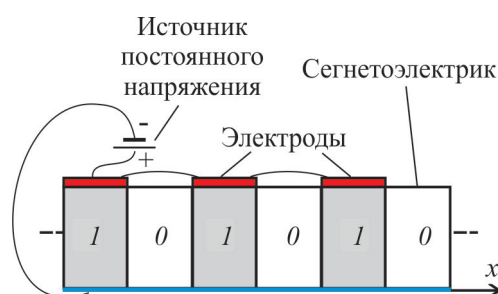


Рис. 4. Акустический материал с периодическими структурами, сформированными электрическим полем:

1 – пьезоэлектрическая область; 0 – диэлектрическая область

3. ТИПЫ РЕЗОНАТОРНЫХ СТРУКТУР НА ОАВ

Для решения прикладных задач, связанных с созданием новой элементной базы СВЧ, в частности активных резонаторов и фильтров для телекоммуникационных систем, работающих в новых участках СВЧ-диапазона, активно разрабатываются два основных типа резонаторных структур на ОАВ. Это – одночастотные тонкопленочные акустоэлектронные резонаторы, работающие на основной гармонике тонкопленочного пьезоэлектрического преобразователя, и высокочастотные акустические многочастотные резонаторы (HBAR, high overtone bulk acoustic wave) на ОАВ, работающие на высоких гармониках.

Одночастотные тонкопленочные резонаторы следует, в свою очередь, разделить на следующие разновидности:

- мембранного типа (рис. 5, а, б);
- с акустическим отражателем (SMR BAW, solidly mounted resonator bulk acoustic wave) (рис. 5, в);
- на сдвиговых ОАВ (LFE FBAR, lateral field excitation film bulk acoustic resonator) (рис. 5, г);
- на волнах Лэмба (Lamb wave) (рис. 5, д);

Многочастотные резонаторы показаны на рис. 5, е.

Наиболее сложной технологической задачей при создании тонкопленочных акустоэлектронных устройств является формирование качественной пьезоэлектрической пленки нужной ориентации. В настоящее время в мире освоен серийный выпуск тонкопленочных резонаторов и фильтров (дуплексеров) на их основе, работающих в диапазоне частот 2...3 ГГц, которые предназначены в основном для средств мобильной связи. Технология формирования ориентированной поликристаллической пленки нитрида алюминия толщиной 1...3 мкм в большинстве случаев основана на методах ионно-плазменного магнетронного ВЧ-напыления. На подложке (например, из кремния) сначала создается нижний электрод резонатора (например, из молибдена), а затем на его поверхности формируется пьезослой нитрида алюминия. При этом на качество выращенной пленки AlN влияет ряд факторов:

- материал и ориентация исходной подложки (например, Si (111));
- материал нижнего электрода;
- химическое состояние поверхности.

На более высоких рабочих частотах (например, 10 ГГц) требуемая толщина пленки из нитрида алюминия должна быть порядка 0,2 мкм. При такой толщине обеспечить качество (кристаллическость) пленки, используя технологию магнетронного напыления, практически невозможно.

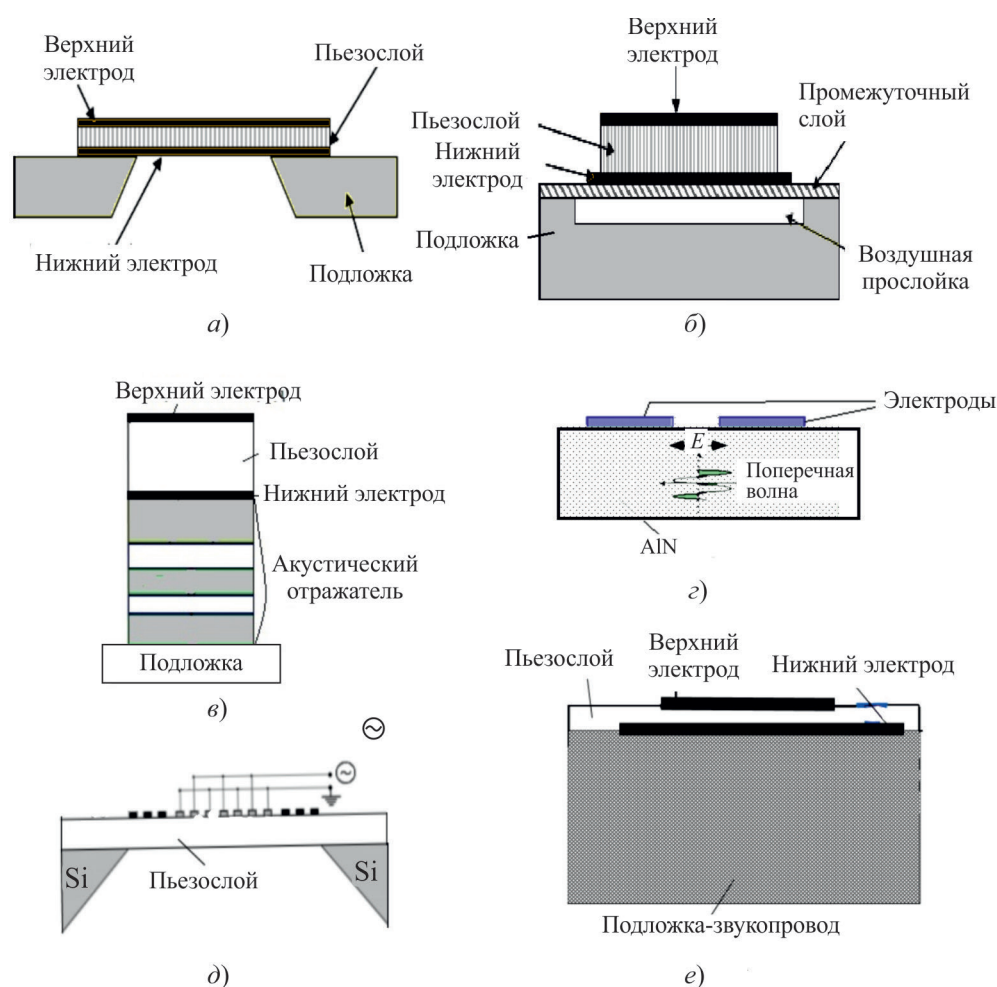


Рис. 5. Разновидности тонкопленочных резонаторов:
 а, б – мембранного типа; в – с акустическим отражателем; г – на сдвиговых ОАВ;
 д – на волнах Лэмба; е – многочастотные резонаторы

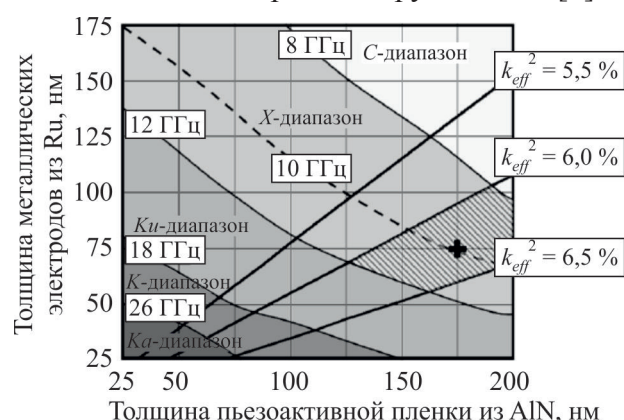
В то же время известно [6, 7], что гетероэпитаксиальные структуры AlN (001)/ Si (111), выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, являются перспективными для изготовления СВЧ-резонаторов с акустическим отражателем, работающих в диапазоне частот 4...25 ГГц.

Центральная частота одночастотного тонкопленочного резонатора мембранного типа определяется толщиной пьезослоя и скоростью продольной акустической волны. В первом приближении центральная рабочая частота тонкопленочного резонатора оценивается из простейшего соотношения $F = V/2h$, где V – скорость продольной объемной акустической волны вдоль направления, перпендикулярного поверхности пьезоактивного слоя из AlN (0001), h – толщина слоя. Скорость продольной объемной волны в AlN имеет величину около 11 км/с, что при толщине пленки в 0,2 мкм соответствует частоте 27,5 ГГц. Необходимо отметить, что свой понижающий частоту вклад вносит конечная толщина электродов, но даже с учетом этого обстоятельства рабочая частота тонкопленочного резонатора на объемных волнах может достигать 25 ГГц, что совершенно недостижимо для устройств на ПАВ.

В качестве примера на рис. 6 показаны диапазоны рабочих частот (C , X , K_u , K , K_a) тонко-

пленочных акустоэлектронных компонентов (резонаторов и фильтров) в зависимости от толщины пьезоактивной пленки из AlN и толщин металлических электродов из рутения Ru [7].

Рис. 6. Диапазоны рабочих частот тонкопленочных акустоэлектронных компонентов (k_{eff}^2 – коэффициент электромеханической связи)



Качество пьезоэлектрического слоя обычно проверяется с помощью дифракции рентгеновских лучей. Общепринятым критерием кристаллического качества пленки из AlN обычно является полная ширина на половинной высоте (FWHM) кривой качания вблизи C -оси или ориентации (0002), нормальной подложке. Чем меньше величина FWHM, тем выше качество пленки AlN. От этого напрямую зависят свойства пьезопленки.

В настоящее время технологии выращивания гетероструктур методом молекулярно-лучевой эпитаксии были существенно оптимизированы, что позволило получить качественные тонкопленочные пьезоструктуры AlN (0002).

Например, на рис. 7 показаны результаты рентгеноструктурного анализа (XRD-Spectrum) слоя AlN толщиной $h = 0,2$ мкм, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на Si (111).

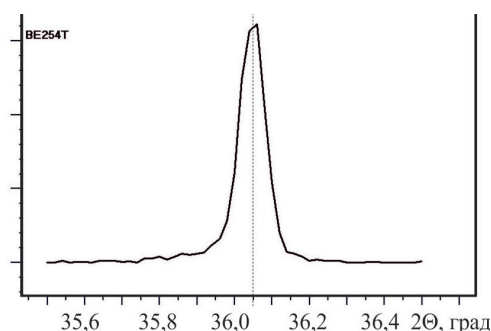


Рис. 7. Рентгеновская кривая качания FWHM слоя AlN ($h = 0,2$ мкм) на Si (111)

Обычно слой AlN диагностируется по пику (0002) $2\theta = 36,0$ град, что соответствует ориентации пленки нитрида алюминия в индексах Миллера (0002), т. е. C -ось направлена перпендикулярно поверхности пленки. Измеренная ширина пиков AlN_{hex} (0002) по углу поворота кристалла (ширина кривой качания) составила 0,4 град, что говорит о хорошей кристалличности выращенной пленки.

Шероховатость поверхности пленки, выращенной этим методом, равна ± 3 нм (рис. 8).

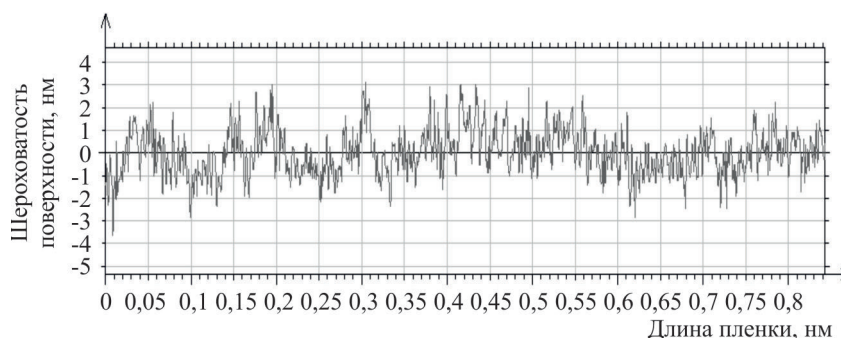


Рис. 8. Морфология поверхности пленки AlN ($h = 0,2$ мкм)

4. ОПЫТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ОДНОЧАСТОТНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗОНАТОРОВ С АКУСТИЧЕСКИМ ОТРАЖАТЕЛЕМ И ФИЛЬТРОВ И ИХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

По методике, описанной в [8], был изготовлен вдвоенный одночастотный тонкопленочный резонатор с акустическим отражателем. На рис. 9, а показана его структура, а на рис. 9, б – фотография (вид сверху). Типичные габаритные размеры такого резонатора – $1 \times 1 \times 0,4$ мм. В состав резонатора входят: пьезоэлектрический эпитаксиальный слой AlN, акустическое зеркало, состоящее из нескольких пар слоев SiO_2/Mo , верхний и нижний электроды из Mo. Вход выполнен в виде компланарной линии передачи типа «G-S-G».

Экспериментальные измерения параметров резонатора проводились на векторном анализаторе цепей E5071C (Agilent) при использовании зондовой станции Summit 12000B-M (Cascade Microtech) с микрозондовыми головками типа «G-S-G».

Результаты измерений резонатора, рассчитанного на резонансную частоту 4,18 ГГц, представлены на рис. 9, в, г.

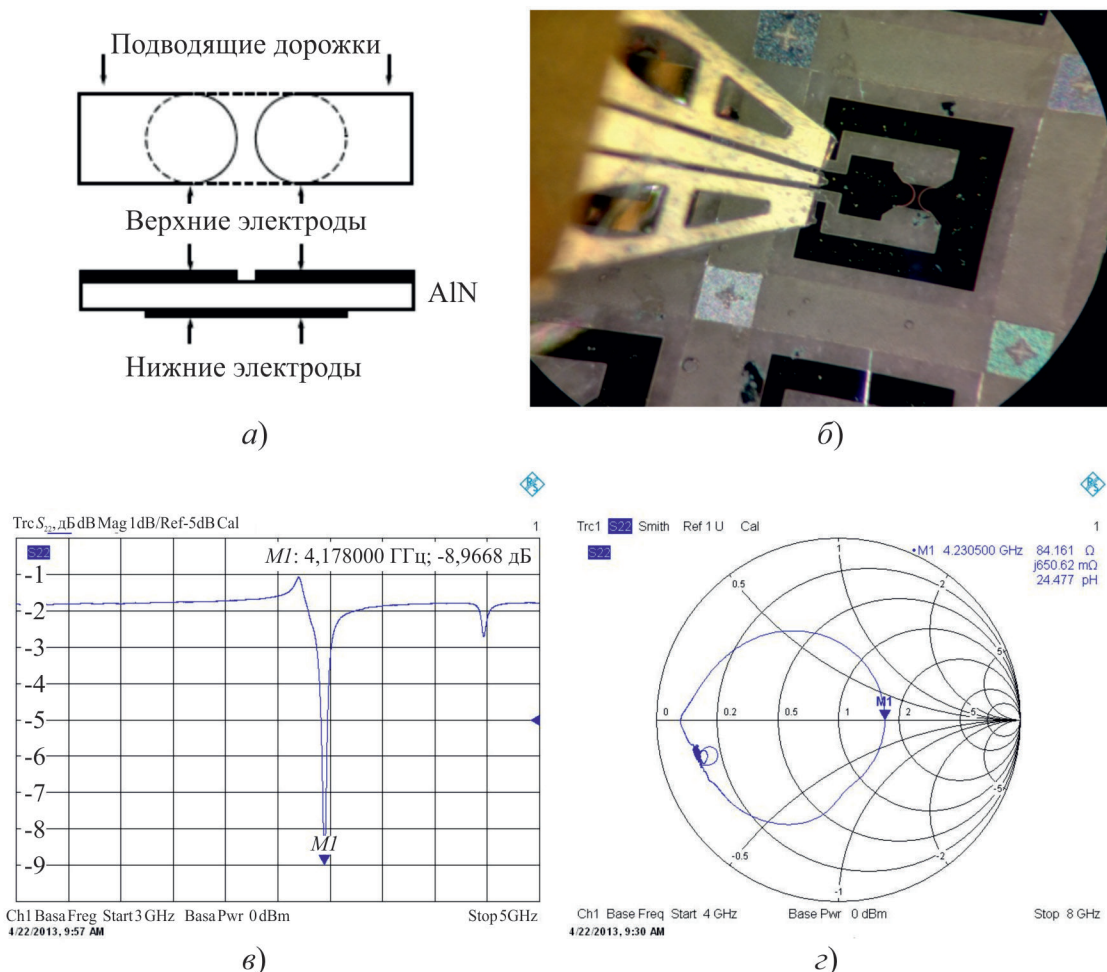


Рис. 9. Сдвоенный одночастотный тонкопленочный резонатор с акустическим отражателем:

а – структура; б – фотография общего вида; в – коэффициент отражения; г – диаграмма Смита

По результатам измерений были определены частоты последовательного f_s и параллельного f_p резонансов, максимальное и минимальное значения импеданса Z_{11} ; также рассчитаны величины добротности Q и коэффициента электромеханической связи k_{eff}^2 : $f_p = 4,1795$ ГГц, $f_s = 4,08075$ ГГц, $Z_{11max} = 106$ Ом, $Z_{11min} = 3$ Ом, $k_{eff}^2 = 5,7\%$, $Q = 390$.

Эксплуатационные характеристики тонкопленочных полосовых акустических фильтров на основе описанных выше акустоэлектронных резонаторов достигаются обычно путем использования лестничных и (или) решетчатых фильтров, образованных набором резонаторов, удовлетворяющих определенным требованиям.

Полосовые фильтры лестничного типа состоят из набора резонаторов, включенных последовательно и параллельно. Лестничный фильтр обычно содержит несколько звеньев (рис. 10). Чем их больше, тем больше подавление сигнала вне полосы пропускания.

Центральная частота и ширина полосы пропускания определяются свойствами последовательного и параллельного резонаторов. Резонансная частота последовательного резонатора и антирезонансная частота параллельного резонатора должны совпадать с центральной частотой полосы пропускания фильтра, тогда резонансная частота параллельного резонатора будет соответствовать левой границе полосы, а антирезонансная частота последовательного резонатора будет определять правую границу полосы.

Для формирования требуемой полосы пропускания фильтра антирезонансная частота f_p (частота параллельного резонанса) резонатора $X2$ должна равняться резонансной частоте f_s (частоте последовательного резонанса) резонатора $X1$.

Схема построения фильтра решетчатого типа (lattice filter) на тонкопленочных акустоэлектронных резонаторах показана на рис. 11, а, а схема формирования амплитудно-частотной характеристики фильтра – на рис. 11, б.

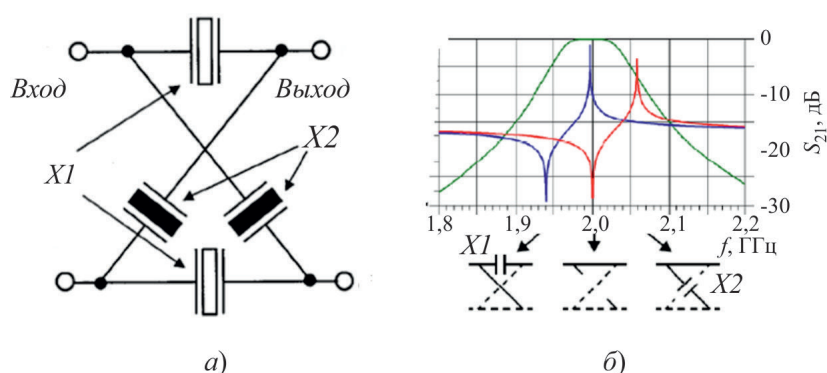


Рис. 11. Фильтр решетчатого типа на тонкопленочных акустоэлектронных резонаторах:
а – схема построения; б – формирование АЧХ

Для создания требуемой полосы пропускания фильтра антирезонансная частота (частота параллельного резонанса) резонатора $X2$ должна равняться резонансной частоте (частоте последовательного резонанса) резонатора $X1$.

Известны различные виды конструкций фильтров на тонкопленочных акустоэлектронных резонаторах [8–19]. В данной работе была реализована конструкция фильтра лестничного типа на основе сдвоенных резонаторов с акустическим отражателем. Подробную информацию о таких резонаторах, лестничных и решетчатых фильтрах можно найти также на сайте valentincherednik.com.

Электрическая схема фильтра показана на рис. 12.

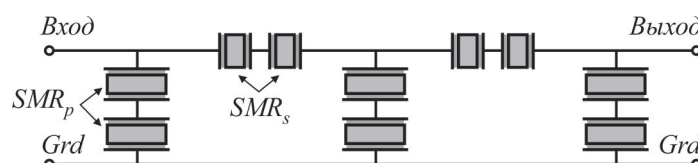


Рис. 12. Электрическая схема фильтра на основе сдвоенных резонаторов с акустическим отражателем

На рис. 13 показаны микрофотографии фильтров лестничного типа на сдвоенных резонаторах с акустическим отражателем (вид сверху) для двух различных конфигураций верхних электродов. Фильтры содержат три параллельных и два последовательных двойных резонатора с электродами круглой формы.

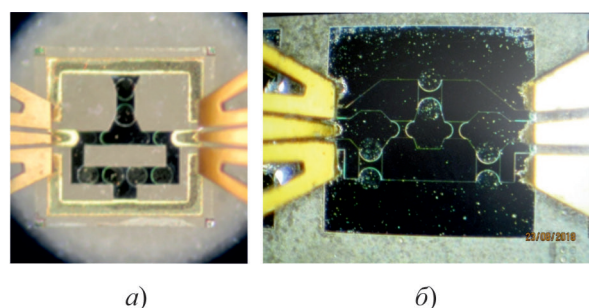


Рис. 13. Фильтры лестничного типа на резонаторах с акустическим отражателем:
а – фильтр 1; б – фильтр 2

Экспериментально измеренные частотные отклики фильтров показаны на рис. 14. Основные параметры фильтров с акустическим отражателем представлены в табл. 2.

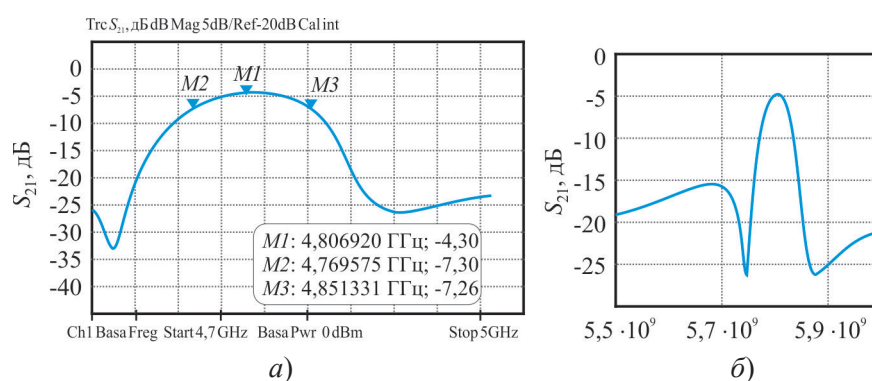


Рис. 14. Частотные отклики фильтров:
а – фильтр 1, рассчитанный на 4,8 ГГц; б – фильтр 2, рассчитанный на 5,8 ГГц

Таблица 2

**Основные параметры фильтров
на резонаторах с акустическим отражателем**

Параметр	Фильтр 1	Фильтр 2
Центральная частота f_0 , ГГц	4,8	5,8
Вносимые потери в полосе пропускания α , дБ	4,5	4,9
Полоса пропускания Δf по уровню -3дБ, МГц	80	65
Ослабление в полосе заграждения A_3 , дБ	25	20
Неравномерность прямых потерь в полосе пропускания, дБ	2	2
Коэффициент стоячей волны по напряжению	1,2	1,2
Импеданс на входе (выходе), Ом	50	50

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе имеющихся литературных источников проведен анализ области применения СВЧ акустических устройств на поверхностных и объемных акустических волнах. Показано, что в настоящее время частота 2,5 ГГц является верхним пределом устройств на ПАВ. Также приведены результаты экспериментальных исследований разработанных образцов СВЧ тонкопленочных резонаторов и фильтров на основе сдвоенных резонаторов с акустическим отражателем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базовые лекции по электронике в 2-х томах. Том II. Твердотельная электроника / Под ред. В. М. Пролейко. – М.: Техносфера, 2009. – 608 с.
2. Акустоэлектронные устройства обработки и генерации сигналов. Принципы работы, расчета и проектирования: монография / Под ред. Ю. В. Гуляева. – М.: Радиотехника, 2012. – 576 с.
3. **Двоешерстов, М. Ю.** СВЧ тонкопленочные акустоэлектронные компоненты. Типы и конструкции FBAR резонаторов и фильтров, алгоритмы и методы расчета их параметров: монография / М. Ю. Двоешерстов, В. И. Чередник. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2017. – 101 с.
4. **Moore, R. A.** High overtone bulk resonator stabilized microwave sources / R. A. Moore, J. T. Haynes, B. R. McAvoy // IEEE Ultrasonic Symp. Proc. – 1981. – P. 414 – 424.
5. **Пашенко, В. П.** Акустический материал с электрически управляемыми свойствами / В. П. Пашенко // XXVII сессия РАО. Санкт-Петербург, 16–18 апреля 2014 г. – С. 18.
6. **Hara, Motoaki.** X-band filters utilizing AlN thin film bulk acoustic resonators / Motoaki Hara, Tsuyoshi Yokoyama, Masanori Ueda and Yoshio Satoh // IEEE Ultrasonic Symposium. Proc. – 2007. – P. 1152 – 1155.
7. **Yokoyama, Tsuyoshi.** K-band ladder filters employing air-gap type thin film bulk acoustic resonators / Tsuyoshi Yokoyama, Motoaki Hara, Masanori Ueda, and Yoshio Satoh // IEEE International Ultrasonics Symp. Proc. – 2008. – P. 598 – 601.
8. **Dvoesherstov, M. Yu.** Microwave bandpass filters based on thin film acoustic resonators: theory and experiment / M. Yu. Dvoesherstov, V. I. Cherednik // Acoustical Physics. – 2015. – Vol. 61, No 6. – P. 657 – 664.
9. **Двоешерстов, М. Ю.** Перспективные направления развития акустоэлектронных устройств СВЧ-диапазона / М. Ю. Двоешерстов, В. И. Чередник // Материалы научно-технической конференции «Пассивные электронные компоненты – 2011». Нижний Новгород.



10. **Lakin K.** Thin film resonator technology // Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 44, No 5A. – P. 2883 – 2894.
11. **Ruby, R.** Review and comparison of bulk acoustic wave FBAR, SMR technology / R. Ruby // IEEE Ultrasonics Symp. Proc. – 2007. – P. 1029 – 1040.
12. **Kim, J.** AlN piezoelectric materials for wireless communication thin film components / J. Kim, S. Lee, J. Ahn, J. Lee // Journal of Ceramic Processing Research. – 2002. – Vol. 3, No 1. – P. 25 – 28.
13. **Lakin, K.** Thin film resonator technology / K. Lakin // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. – June 2005. – Vol. 52, No 5A. – P. 707 – 716.
14. **Двоешерстов, М.** Тонкопленочные акустоэлектронные компоненты СВЧ-диапазона / М. Двоешерстов, В. Чередник // Компоненты и технологии. – 2014. – № 5. – С. 12 – 16.
15. **Zhang, Hui.** Electrode effects on frequency spectra and electromechanical coupling factors of HBAR / Hui Zhang, Zuoqing Wang and Shu-Yi Zhang // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – June 2005. – Vol. 52, No 6. – P. 1020 – 1025.
16. **Lanz, R.** Bandpass filters for 8 GHz using solidly mounted bulk acoustic wave resonators / R. Lanz, P. Muralt // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – June 2005. – Vol. 52, No 6. – P. 936 – 946.
17. **Двоешерстов, М. Ю.** Полосовые СВЧ-фильтры на основе тонкопленочных акустических резонаторов. Теория и эксперимент / М. Ю. Двоешерстов, В. И. Чередник // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61, № 5. – С. 1 – 10.
18. **Cherednick, V. I.** Surface and bulk acoustic waves in multilayer structures / V. I. Cherednick, M. Y. Dvoesherstov // Waves in Fluids and Solids. – Ruben Pico Vila (Ed.), ISBN: 978-953-307-285-2. In Tech. Croatia. – September, 2011. – P. 69 – 102.
19. **Двоешерстов, М. Ю.** Численный и экспериментальный анализ параметров акустоэлектронного тонкопленочного СВЧ-резонатора / М. Ю. Двоешерстов, В. И. Чередник, С. И. Босов, И. Я. Орлов, О. В. Руденко // Акустический журнал. – 2013. – Т. 59, № 5. – С. 569 – 577.

Статья поступила 12 октября 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

АНЦЕВ Г. В., САРЫЧЕВ В. А. **Высокоточное оружие. Тезаурус.** – М.: Радио-техника, 2017. – 208 с.: ил.

Уникальное издание, не имеющее аналогов и включающее результаты многолетнего исследования, позволившего пересмотреть некоторые традиционные представления в области высокоточного оружия. Словарь включает тщательно сбалансированный подбор более 80 000 современных дефиниций и устойчивых словосочетаний с доступным определением и объяснением значений, новые тематические вкладки, учитывает новейшие разработки науки и информационных технологий в области высокоточного оружия и его статуса, систем наведения ВТО, миссии самонаведения ракетного ВТО, оптикоэлектронных систем самонаведения ВТО. Является прекрасным дополнением к различным курсам по высокоточному оружию.

Для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов вузов, специализирующихся в области создания и эксплуатации систем управления средствами вооружения и военной техники.





УДК 621.37

ВХОДНОЙ МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ С РАСШИРЕННЫМ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ

С. А. Петров

АО «НПК «Тристан», г. Москва

Рассматриваются способы расширения динамического диапазона широкополосных приемных устройств СВЧ. Предложены принципы проектирования входных малошумящих усилительных модулей. Представлен разработанный усилительный модуль диапазона 8...18 ГГц с расширенным динамическим диапазоном.

КС: широкополосное приемное устройство СВЧ, расширенный динамический диапазон, входной линейный тракт, входной малошумящий усилительный модуль, входной малошумящий усилитель СВЧ

INPUT LOW-NOISE AMPLIFIER MODULE WITH EXTENDED DYNAMIC RANGE

S. A. Petrov

JSC «RPC «Tristan», Moscow

Ways of expanding the dynamic range of microwave broadband receivers are considered. Principles of designing input low-noise amplifier modules are proposed. The developed amplifier module of the range 8...18 GHz with an extended dynamic range is presented.

Keywords: microwave broadband receiver, extended dynamic range, input linear path, input low-noise amplifier module, input low-noise microwave amplifier

1. ВВЕДЕНИЕ

Динамический диапазон (ДД) приемника пассивной радиолокации определяется, в том числе, параметрами широкополосных приемных устройств (ШПУ) СВЧ и входных малошумящих усилителей (ВМУ) СВЧ[1]. Проблема расширения ДД широкополосных приемников, применяющихся в системах и комплексах пассивной радиолокации, по-прежнему является актуальной.

ВМУ представляет собой защищенный по входу широкополосный малошумящий усилительный модуль СВЧ с регулируемым коэффициентом усиления. Параметры этого модуля в значительной степени определяют как нижнюю границу ДД – чувствительность СВЧ-приемника, так и его верхнюю границу. Современная элементная база СВЧ позволяет реализовать довольно высокие характеристики таких усилителей по полосе рабочих частот, коэффициенту шума, коэффициенту усиления, линейности амплитудной характеристики и другим параметрам.

Физические и технические механизмы ограничения ДД средств пассивной радиолокации, а также некоторые возможности его расширения, связанные со структурными и схемотехническими особенностями ВМУ в диапазоне СВЧ, были рассмотрены в [2]. Там же были представлены результаты практической реализации двухкаскадного входного линейного модуля (ВЛМ),



построенного по схеме с отключаемыми каскадами усиления. Была показана возможность существенного расширения ДД по сравнению со схемой с управляемым аттенуатором по входу.

В этом же направлении работают и другие исследовательские группы, что свидетельствует об актуальности проблемы. Так, в частности, в [3] описывается аналогичный СВЧ-модуль, выполненный по несколько отличной схеме с использованием ферритовых развязывающих приборов.

Основными недостатками обеих представленных выше схем являлись большой шаг ступеней ослабления сигнала и их ограниченное количество, определяемое числом каскадов. Кроме того, возникла потребность дальнейшего увеличения усиления и расширения полосы рабочих частот. В настоящей публикации рассматривается реализация ВМУ, сочетающего в себе положительные качества обоих подходов, представленных в [2].

2. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ

Рассмотрим упрощенную структурную схему совмещенного ВМУ, сочетающего в себе функции «регулируемого усилителя» и «регулируемого аттенуатора», представленную на рис. 1.

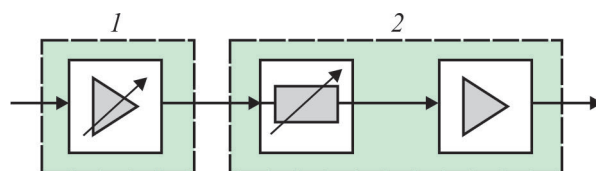


Рис. 1. Упрощенная структура совмещенного ВМУ:
1 – «регулируемый усилитель»; 2 – «регулируемый аттенуатор»

Сделаем предположение, что верхняя граница ДД ВМУ по выходу фиксирована, т. к. определяется параметрами последующих преобразовательных трактов ШПУ СВЧ. Причем усилительные каскады ВМУ имеют относительно этого фиксированного уровня некоторые запасы по линейной выходной мощности и в некотором диапазоне ослаблений не лимитируют общий ДД.

Другое важное условие для последующих рассуждений – максимальный коэффициент усиления ВМУ должен быть также фиксирован для реализации заданной чувствительности ШПУ СВЧ.

Видно, что показанная на рис. 1 схема в этих условиях может обеспечить как малый шаг регулировки ослабления, так и расширение ДД при введении ослабления «регулируемого аттенуатора» (рис. 2).

Рассмотрим ход зависимости ДД от ослабления a регулируемого выходного аттенуатора тонкой регулировки в двух режимах «регулируемого усилителя». Первый режим – усилитель подключен и усиливает входной сигнал. Второй режим – усилитель отключен, входной сигнал направляется в обход усилителя.

Начальная точка соответствует значению ДД при заданной чувствительности в первом режиме. Далее наблюдается рост ДД, подробно описанный в [2]. Предельное значение ДД ограничено коэффициентом усиления входного каскада и его линейностью.

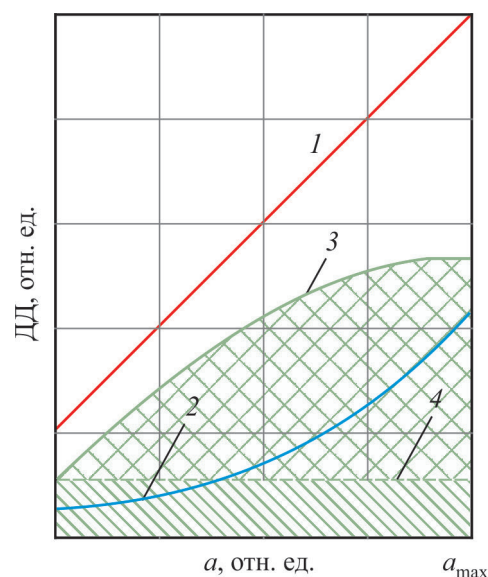
Во втором режиме приращения ДД не происходит, т. к. схема вырождается в «регулируемый аттенуатор». Но важно отметить, что совмещенная схема позволяет иметь малый шаг ослабления при реализации как первого, так и второго режима. Указанное обстоятельство крайне важно для применения в составе аппаратуры назначения.



Рис. 2. Зависимость ДД совмещенного ВМУ

от ослабления a в первом режиме:

1 – верхняя граница ДД; 2 – нижняя граница ДД; 3 – ДД;
4 – ДД «гипотетического» усилителя, построенного
по схеме «регулируемого аттенюатора»



Рассмотрим качественно ключевые аналитические выражения, вытекающие из рассмотрения графиков. Главным критерием, определяющим эффективность совмещенной схемы ВМУ, является получение максимального интегрального ДД ($ДД_{\text{инт}}$) во всем диапазоне ослаблений аттенюатора и во всех режимах:

$$ДД_{\text{инт}} = \int_0^A ДД(a) da, \quad (1)$$

где $ДД(a)$ – функция ДД от действующего значения ослабления коэффициента передачи; A – максимальное суммарное ослабление при регулировке коэффициента передачи.

Такой критерий хорошо согласуется с тактикой и логикой работы применения аппаратуры в условиях воздействия помех. При перегрузке входной сигнал ослабляется до необходимого уровня, несмотря на потерю чувствительности. Только в нашем случае при ослаблении входного сигнала чувствительность ухудшается несущественно, за счет чего возрастает ДД и повышаются технические характеристики аппаратуры назначения.

График, приведенный на рис. 2, заканчивается отключением входного усилителя, т. е. переходом из первого во второй режим. Здесь динамический диапазон достигает максимума и далее не растет. Величина ослабления выходного аттенюатора равна a_{max} . При более глубоком рассмотрении становится очевидным, что если в этой точке не перейти на второй режим, то ДД структуры, показанной на рис.1, будет уменьшаться за счет конечной линейности входного усилителя. Способ нахождения a_{max} может состоять в поиске экстремума (2) функции $ДД = f(a)$ динамического диапазона при изменении ослабления аттенюатора:

$$\frac{\partial f(a)}{\partial a} = 0. \quad (2)$$

Строгое решение задачи оптимизации на основе изложенных выше подходов возможно, но лежит за пределами настоящей статьи. Ниже приведена конструктивная реализация совмещенного ВМУ с учетом рассмотренных закономерностей на основе доступной элементной базы.



3. КОНСТРУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Структурная схема трехкаскадного ВМУ, модернизированного ВЛМ (ВЛМ-М) с двумя отключаемыми входными усилителями, изображена на рис. 3.

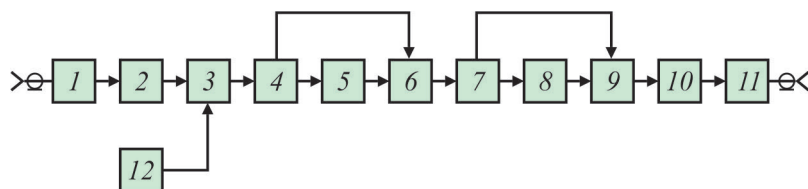


Рис. 3. Структурная схема ВЛМ-М

Ограничитель мощности 1, расположенный на входе, обеспечивает защиту модуля от воздействия помеховых СВЧ-сигналов с мощностью до 2 Вт в непрерывном режиме и постоянного напряжения. Полосно-пропускающий фильтр 2 обеспечивает подавление внеполосных сигналов. Модуль имеет возможность подключения по входу контрольного сигнала. В данном исполнении модуля через коммутатор СВЧ 3 можно подключить широкополосный генератор шума 12.

Отключаемые каскады усиления представляют собой схему из МШУ (5 и 8) и четырех коммутаторов (4, 6 и 7, 9 соответственно), обеспечивающих возможность включения линий передач в обход одного или обоих каскадов усиления. ВЛМ-М имеет три режима работы:

- 1-й, когда задействованы все три каскада;
- 2-й, когда отключен один входной каскад;
- 3-й, с отключением обоих входных каскадов.

Степень ослабления коэффициента передачи каждого из входных каскадов, обусловленная применяемой элементной базой, составила порядка 20 дБ.

Для тонкой регулировки усиления был задействован 5-битный цифровой аттенюатор СВЧ 10 с шагом ослабления 1 дБ и максимальным затуханием 31 дБ, расположенный в схеме ВЛМ-М, на выходе третьего каскада. Непосредственно после аттенюатора на выходе модуля был установлен усилитель мощности 11, точка IP3 по выходу которого составила 40 дБ·мВт.

ВЛМ-М с открытой СВЧ-частью показан на рис. 4.

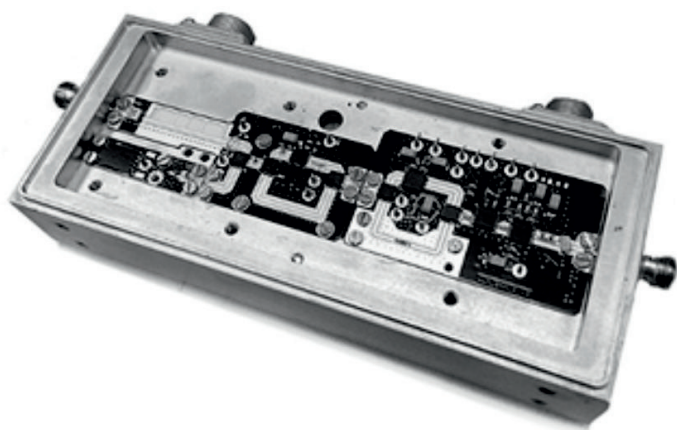


Рис. 4. Внешний вид ВЛМ-М

Конструкция модуля представляет собой двухсекционный металлический корпус, в нижней секции которого установлена плата питания и управления, а в верхней – СВЧ-часть. СВЧ-часть

разделена на две печатные платы с подложкой из материала Ro4350. Особенностью конструкции является то, что все платы выполнены по технологии автоматизированного монтажа SMD-компонентов, а соединение по СВЧ [4] и питанию [5] реализовано с использованием скользящих контактов. ВЛМ-М работает от внешнего постоянного напряжения 20...30 В и имеет габаритные размеры 135×64×27 мм.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспериментальном разделе представлены результаты измерений основных параметров ВЛМ-М. На рис. 5 показаны экспериментальные графики ДД, его верхней и нижней границы во всех трех режимах. Графики сняты путем последовательного увеличения ослабления аттенюатора тонкой регулировки в каждом из трех режимов работы модуля. При переходе в следующий режим аттенюатор тонкой регулировки сбрасывался в нулевое значение.

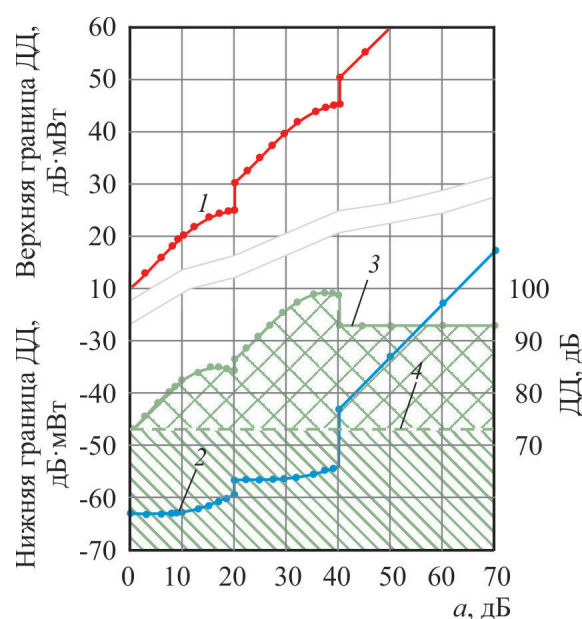


Рис. 5. Графики экспериментальные измерений ВЛМ-М:

1 — верхняя граница ДД ВЛМ-М; 2 — нижняя граница ДД (при эквивалентной полосе, равной 10 ГГц) ВЛМ-М; 3 — ДД ВЛМ-М; 4 — ДД «гипотетического усилителя, построенного по схеме «регулируемого аттенюатора»

Область, ограниченная линиями 3 и 4, соответствующая приращению $ДД_{инт}$, иллюстрирует достигнутое расширение ДД. Места разрыва экспериментальных кривых соответствуют моментам отключения первого и второго каскадов ВЛМ-М соответственно. Очевидно, что ВЛМ-М по динамическому диапазону превосходит «регулируемый аттенюатор» во всем диапазоне ослаблений. В частности, с отключенным первым каскадом мгновенный ДД ВЛМ-М возрастает на 12 дБ, а при отключении второго каскада эта величина превышает 20 дБ.

Представленный ВЛМ-М имеет полосу рабочих частот от 8 до 18 ГГц и коэффициент передачи 27...30 дБ. Достигнутые значения неравномерности коэффициента передачи модулей в различных режимах иллюстрирует рис. 6.

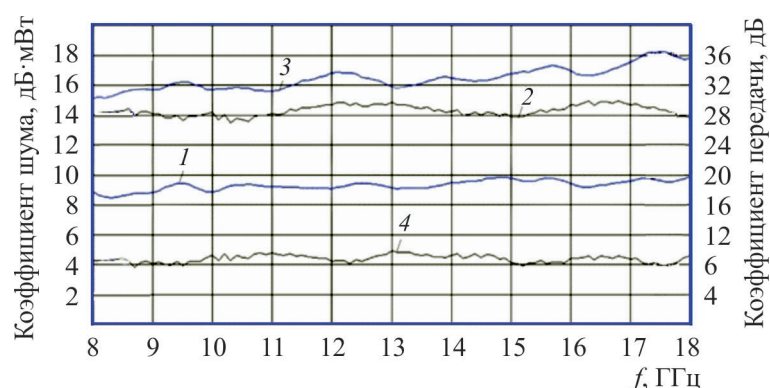


Рис. 6. Коэффициент передачи $K_{\text{п}}$ и коэффициент шума $K_{\text{ш}}$ ВЛМ-М:
 1 – $K_{\text{ш}}$ в 1-м режиме; 2 – $K_{\text{п}}$ в 1-м режиме; 3 – $K_{\text{ш}}$ во 2-м режиме; 4 – $K_{\text{п}}$ во 2-м режиме

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модернизированный модуль входного линейного тракта за счет достигнутого расширения ДД по входу позволил получить требуемые технические характеристики аппаратуры назначения. Конструкция модуля дала возможность свести необходимость ручной регулировки и настройки при производстве к минимуму. На ее основе разработан целый ряд аналогичных широкополосных СВЧ усилительных модулей с рабочим диапазоном частот от 200 МГц до 18 ГГц. В кратчайшие сроки потребителю было поставлено более 300 приборов. Модули продемонстрировали высокие показатели надежности и повторяемости электрических параметров.

Возможность дальнейшего расширения ДД модуля ВЛМ-М существует. Она связана с компьютерной оптимизацией параметров элементов схемы модуля по приведенному выше критерию максимума $\text{ДД}_{\text{инт}}$ в диапазоне ослаблений. Это будет являться предметом дальнейших исследований в данном направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Куприянов, П. В.** Широкополосные приемные устройства СВЧ с расширенным динамическим диапазоном / П. В. Куприянов // Радиотехника. – 2006. – Вып. 3. – С. 8 – 13.
2. **Гутенко, С. В.** О возможности расширения динамического диапазона широкополосных приемников СВЧ / С. В. Гутенко, С. А. Петров и др. // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т. 63, вып. 3. – С. 257 – 261.
3. **Кондукторов, А. А.** Расширение динамического диапазона малошумящего усилителя X-диапазона / А. А. Кондукторов, А. И. Кирпичников // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 2015. – Вып. 4(160) – С. 36 – 38.
4. **Джуринский К. Б.** Миниатюрные радиочастотные соединители / К. Б. Джуринский. – С. 48 – 51.
5. Datasheet // AF series, MAC8 // www.mac8sdk.co.jp.

Статья поступила 11 октября 2018 г.



ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.623

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЙ ИЗОЛЯТОР ДЛЯ СВЕРХМОЩНЫХ КЛИСТРОНОВ И ЭЛЕКТРОННЫХ ОТПАЯННЫХ ПУШЕК

К. Г. Симонов, А. Н. Юнаков, О. В. Поливникова, С. И. Гришин,
М. П. Духновский, Н. А. Ключников, А. В. Мамонтов, И. Г. Перминов,
Г. И. Правдиковская, В. А. Рыжов, А. О. Цыберт

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Разработаны принципы конструирования и технология изготовления крупногабаритного высоковольтного металлокерамического изолятора на основе керамики ВК94-1. Наружный диаметр изолятора составляет 155 мм, высота – 160 мм. Высоковольтный изолятор был разработан и применен при создании сверхмощного клистрона КИУ-257, способен выдерживать импульсное напряжение 250 кВ при длительности импульса 6 мкс. Рассмотрены возможности применения созданного высоковольтного изолятора в различных типах сверхмощных импульсных клистронов и в электронных отпаянных пушках непрерывного действия.

КС: высоковольтный металлокерамический изолятор, сверхмощный импульсный клистрон, электронная отпаянная пушка непрерывного действия

HIGH-VOLTAGE METAL-CERAMIC INSULATOR FOR SUPER-POWER KLYSTRONS AND ELECTRON SEALED-OFF GUNS

K. G. Simonov, A. N. Yunakov, O. V. Polivnikova, S. I. Grishin,
M. P. Dukhnovsky, N. A. Klyuchnikov, A. V. Mamontov, I. G. Perminov,
G. I. Pravdikovskaya, V. A. Ryzhov, A. O. Tsybert

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

Principles of design and manufacturing technology for a large-sized high-voltage metal-ceramic insulator based on BK94-1 ceramics have been developed. The outer diameter of the insulator is 155 mm, the height is 160 mm. The high-voltage insulator was developed and applied to create a super-power klystron КИУ-257 capable of withstanding pulse voltage of 250 kV with a pulse duration of 6 μ s. The possibilities of using the created high-voltage insulator in various types of super-power pulse klystrons and in CW electron sealed-off guns are considered.

Keywords: high-voltage metal-ceramic insulator, super-power pulse klystron, CW electron sealed-off gun

Основное применение сверхмощных импульсных клистронов – ускорители различного назначения.

За рубежом разработкой сверхмощных клистронов для ускорителей занимается ряд фирм, основные из них SLAC и CPI (США), THALES (Франция), Toshiba (Япония). Существенный



прогресс в разработках сверхмощных клистронов достигла в последние годы КНР. Получены импульсные мощности 5...65 МВт в промышленных образцах клистронов и до 150 МВт в экспериментальных образцах.

В России разработаны сверхмощные цепочки усилительных клистронов для ускорителей электронов:

- КИУ-12...КИУ-37 и КИУ-53...КИУ-37 с уровнем выходной импульсной мощности 20 МВт в диапазоне 2,8 ГГц;
- КИУ-15М...КИУ-17 с выходной импульсной мощностью 20 МВт в диапазоне 1,8 ГГц.

Цепочки клистронов КИУ-12...КИУ-37 и КИУ-15М...КИУ-17 разработаны на «Истоке»; клистрон КИУ-53 разработан на предприятии «Контакт», г. Саратов. На основе этих клистронов были созданы ускорительные центры в России, Украине, Белоруссии, Армении и Польше. Эти цепочки клистронов показали высокую надежность работы.

К сожалению, в настоящее время в России для ускорителей выпускается только одна сверхмощная цепочка усилительных клистронов (рис. 1), которая применяется в России и Польше. Её основные параметры приведены в таблице.



КИУ-15М



КИУ-17

Параметры клистронов	КИУ-15М	КИУ-17
Диапазон частот, МГц	1818±9	1818±9
Мощность выходная импульсная, МВт	20	0,1
Мощность выходная средняя, кВт	18	0,12
Анодное напряжение, кВ	250	50
Длительность импульса, мкс	6	8
Входная мощность, Вт	≤6000	≤0,1
КПД, %	40	25
Долговечность фактическая, ч	5000	5000
Масса, кг	80	23

В клистронов используется электромагнитная фокусирующая система

Рис. 1. Внешний вид и основные характеристики сверхмощной цепочки усилительных клистронов

В ускорительном центре АО «МРТИ РАН», созданном на основе клистронов КИУ-15М... КИУ-17, ведется промышленная стерилизация широкой номенклатуры медицинских изделий и пищевых продуктов (рис. 2).



Рис. 2. Облучаемые изделия на конвейере в стерилизационном ускорительном центре АО «МРТИ РАН»

В разработанных в России сверхмощных импульсных клистронах КИУ-12, КИУ-53 и КИУ-15М применяются высоковольтные стеклянные изоляторы.

Для повышения надежности работы клистронов потребовался высоковольтный керамический изолятор, который сможет выдерживать высокие импульсные и постоянные напряжения.

В 2013–2015 гг. был разработан сверхмощный импульсный клистрон КИУ-257 с высоковольтным металлокерамическим изолятором, представленным на рис. 3 [1].

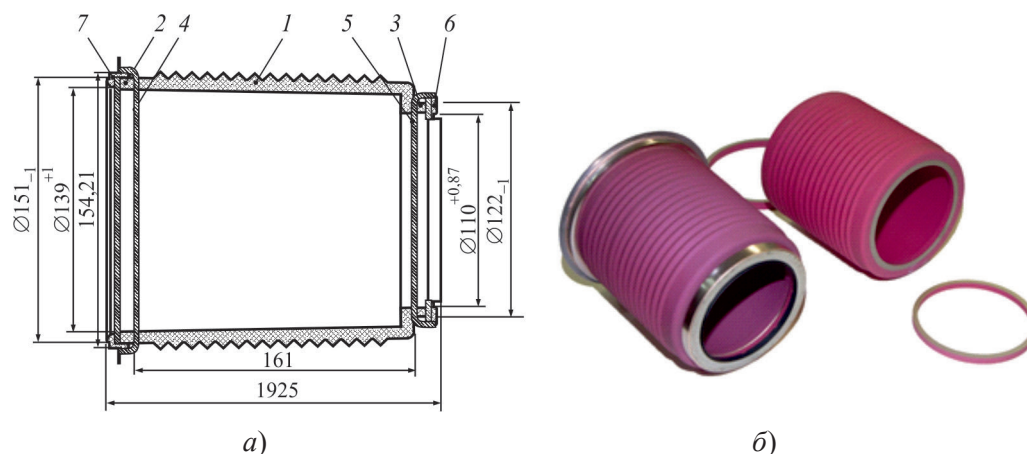


Рис. 3. Чертеж (а) и фотография (б) изготовленного высоковольтного металлокерамического изолятора

Высоковольтный изолятор содержит керамический цилиндр 1 диаметром 155 мм и высотой 160 мм, два керамических компенсаторных кольца 2 и 3, изготовленных из керамики ВК94-1. Две тонкостенные манжеты 4 и 5 изготовлены из константана, фланец 6 – из нержавеющей стали

12Х18Н10Т, а фланец 7 – из мельхиора, с припаянным к нему кольцом из ковара для сварки катодной ножки с анодным блоком.

Наружная поверхность цилиндра выполнена ребристой для увеличения электрической прочности по поверхности керамики.

Такой высоковольтный изолятор разработан в России впервые для сверхмощных импульсных клистронов с выходной импульсной мощностью 15 МВт и более. Рабочее напряжение клистрона – 230 кВ при длительности импульса 6 мкс. Создание такого крупногабаритного высоковольтного керамического изолятора потребовало разработки новых технологических процессов по изготовлению самой керамики, ее металлизации и пайки металлокерамического узла. Все это, в свою очередь, потребовало модернизации оборудования.

В процессе разработки технологии изготовления высоковольтного керамического изолятора возникли трудности с обеспечением герметичности швов. Узлы, паянные медным припоем, имели вакуумные течи, непропаи. При замене медного припоя на припой ПЗлМ35В удалось добиться качественных швов.

Созданный высоковольтный керамический изолятор был применен при разработке сверхмощного клистрона КИУ-257 (рис. 4...6). Диаметр катода – 110 мм.



Рис. 4. Катодная ножка сверхмощного клистрона КИУ-257

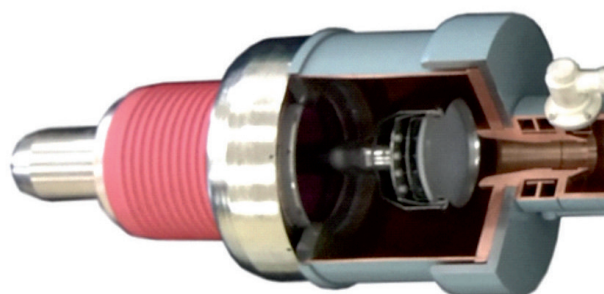


Рис. 5. Входной узел сверхмощного клистрона КИУ-257



Рис. 6. Сверхмощный клистрон КИУ-257

Кроме того, этот керамический изолятор планируется использовать при создании электронной отпаянной пушки непрерывного действия.

Как известно, АО «НПП «Исток» им. Шокина» имеет мировой приоритет в создании электронных отпаянных пушек различной конструкции [2, 3]. На рис. 7 представлена электронная отпаянная пушка импульсного действия.

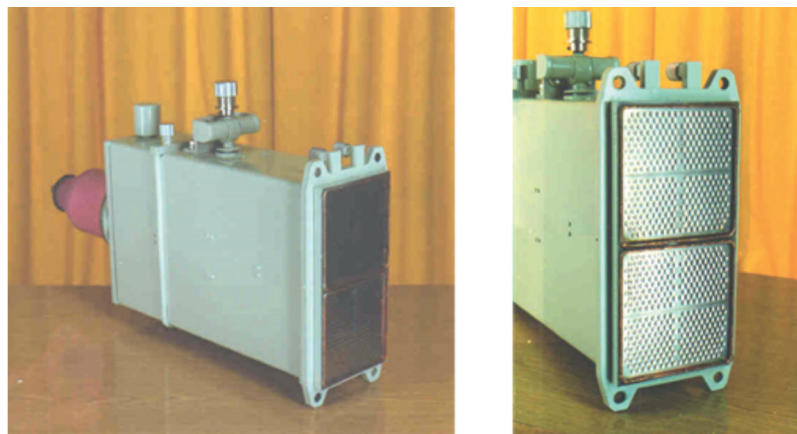


Рис. 7. Электронная отпаянная пушка, впервые в мире созданная в АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Импульсные напряжения, подаваемые на электронную пушку, составляют 160...200 кВ при длительности импульса от 3 до 5 мкс. Высоковольтный изолятор пушки выполнен в виде спаянных между собой цилиндрической и конической частей, изготовленных из керамики ВК94-1. Наружный диаметр цилиндрической части керамики составляет 96 мм. Окно вывода электронов выполнено в виде медной решетки, к которой с помощью диффузионной сварки приварена титановая фольга толщиной 20...30 мкм. Размеры окна вывода электронов составляют 100×200 мм. На основе электронных отпаянных пушек были созданы компактные установки электронно-лучевой технологии. Одна из установок работает в крупнейшей фирме 3М, США.

В электронной отпаянной пушке непрерывного действия планируется использовать алмазное окно вывода электронов. Это алмазное окно будет выполнено толщиной 2 мм и диаметром 60 мм. В нем будет углубление, так что в местах прохождения электронного пучка толщина окна будет составлять 20 мкм. На анод пушки будут подаваться постоянное напряжение 150 кВ и ток электронного пучка 20 мА.

На рис. 8 приведена модель конструкции электронной отпаянной пушки с разработанным высоковольтным керамическим изолятором.

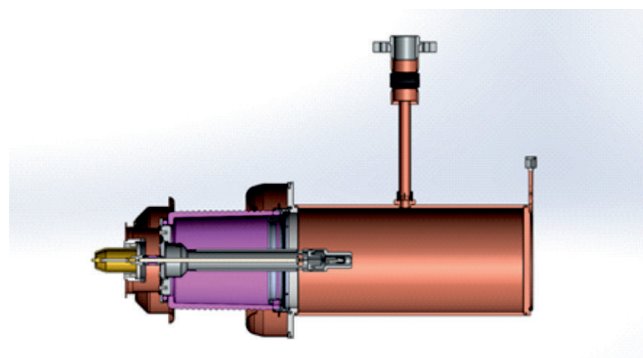


Рис. 8. Электронная отпаянная пушка с разработанным высоковольтным керамическим изолятором

На основе этой пушки будет создана установка, предназначенная для выращивания алмазной пленки на поверхности полупроводниковых структур с целью повышения их характеристик за счет улучшения теплоотвода.

Еще одно перспективное применение разработанного высоковольтного металлокерамического изолятора — использование его в однолучевых и многолучевых сверхмощных клистронах с магнетронной пушкой.

В предлагаемых клистронах с магнетронной пушкой эмитирующая поверхность катода клистрона имеет форму боковой поверхности усеченного конуса малого диаметра, порядка 30 мм, в отличие от классических сверхмощных клистронов, где диаметры катодов достигают 110 мм (рис. 9). В этом случае катод имеет протяженную эмитирующую поверхность в продольном направлении клистрона при сравнительно небольшом наружном диаметре как катода, так и электронной пушки.

Отметим, что однолучевые клистроны мегаваттных уровней с магнетронной пушкой и модуляцией по управляющему электроду были созданы в России (АО «НПП «Исток» им. Шокина») и за рубежом (фирма Litton, США). В этих приборах на анод подаётся постоянное напряжение, а импульсное напряжение подаётся на управляющий электрод.

Многолучевых клистронов как с диодной, так и триодной магнетронной пушкой в мире не существует, а однолучевые клистроны созданы только с триодной магнетронной пушкой.

«Исток» предложены однолучевые и многолучевые клистроны с диодной магнетронной пушкой [4, 5] и многолучевые клистроны с триодной магнетронной пушкой [6].

На рис. 10 показано схематическое изображение четырехлучевого клистрона с магнетронной пушкой в соленоиде с однородным магнитным полем и двумя выводами СВЧ-мощности. В этом приборе можно получить высокие импульсные мощности при существенно пониженных анодных напряжениях. Например, при напряжениях 170...180 кВ можно обеспечить выходную импульсную мощность более 50 МВт. В обычных сверхмощных клистронах импульсная мощность 50 МВт получается при напряжениях 320...340 кВ.



Рис. 9. Катоды магнетронной пушки и классического клистрона

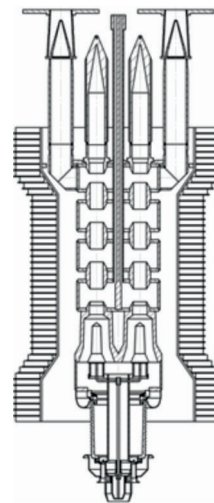


Рис. 10. Схематическое изображение четырехлучевого клистрона с магнетронной пушкой в соленоиде с однородным магнитным полем и двумя выводами СВЧ-мощности

На рис. 11 показан вариант конструкции четырехлучевой магнетронной пушки с разработанным высоковольтным металлокерамическим изолятором.

В клистроне каждый катод будет окружен анодом в виде массивной охлаждаемой медной детали, в котором выполнены 4 конусных отверстия.

Весьма интересным является также клистрон с выходной импульсной мощностью 50 МВт с четырехлучевой магнетронной пушкой и модуляцией электронного пучка по управляющему электроду, то есть с триодной электронной пушкой (рис. 12), также предложенный «Истоком». В этом случае целесообразно на анод клистрона подавать постоянное напряжение не более 170...180 кВ, при этом импульсное напряжение на управляющем электроде будет составлять около 60 кВ.

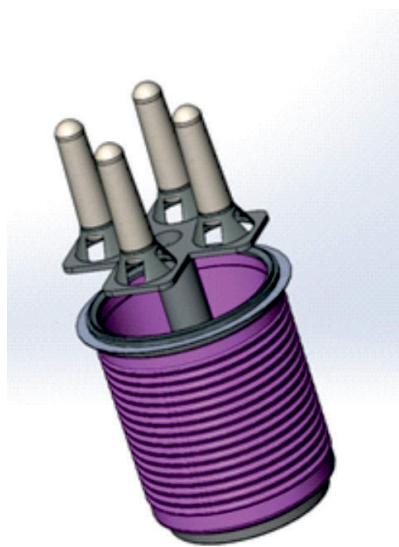


Рис. 11. Четырехлучевая магнетронная пушка клистрона с высоковольтным керамическим изолятором

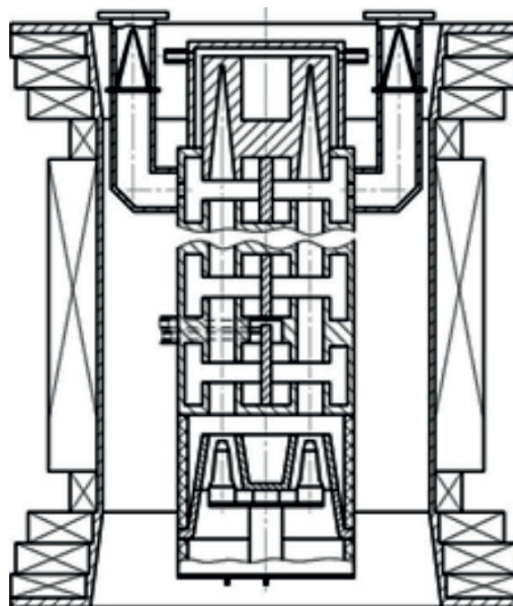


Рис. 12. Схематическое изображение четырехлучевого клистрона с триодной магнетронной пушкой в соленоиде с однородным магнитным полем и двумя выводами СВЧ-мощности

Итак, на основе разработанного металлокерамического высоковольтного изолятора создан сверхмощный импульсный клистрон КИУ-257. Также на основе этого изолятора планируется проведение перспективных работ по созданию электронной отпаянной пушки непрерывного действия с алмазным окном вывода электронов при постоянном анодном напряжении 150 кВ и импульсных сверхмощных однолучевых клистронов с диодной магнетронной пушкой, а также многолучевых клистронов с диодной и триодной магнетронной пушкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мамонтов, А. В.** Перспективы развития сверхмощного клистроностроения / А. В. Мамонтов, И. Г. Перминов, К. Г. Симонов // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* – 2016. – Вып. 1(528). – С. 31 – 40.
2. **Симонов, К. Г.** Электронные отпаянные пушки / Под ред. Н. Д. Девяткова. – М.: Радио и связь, 1985. – 128 с.
3. **Korolev, A.** Characteristics of sealed-off electron gun with wide beam / A. Korolev, K. Simonov, V. Pirozhenko // *Proceedings of EPAC. 2002, Paris, France.* – P. 2769 – 2771.

4. Пат. 2449467 РФ. Сверхмощное СВЧ-устройство / К. Г. Симонов. – Оpubл. Бюл. № 12, 2012; приоритет 26.04.2011.

5. Пат. 2554106 РФ. Сверхмощный многолучевой СВЧ-прибор клистронного типа / К. Г. Симонов. – Оpubл. Бюл. № 18, 2015; приоритет 30.12.2013.

6. Пат. 2562798 РФ. Сверхмощный СВЧ-прибор клистронного типа / А. А. Борисов, А. В. Мамонтов, К. Г. Симонов. – Оpubл. Бюл. № 25, 2015; приоритет 30.05.2014.

Статья поступила 17 сентября 2018 г.

== НОВЫЕ КНИГИ ==

БЕЛОВ А. В. Программирование ARDUINO. Создаем практические устройства + виртуальный диск. – Спб.: Наука и Техника, 2018. – 272 с.: ил.

Книга посвящена созданию практических устройств с использованием модуля Ардуино. Этот модуль в настоящее время стал очень популярным. Он оказался настолько удачной разработкой и получил настолько широкое распространение в мире, что сегодня признан идеальной основой для изучения премудростей микроконтроллерной техники.

Для данной книги автор специально разработал ряд практических схем и устройств, на основе которых читатель постепенно, от простого к сложному, сможет научиться писать программы и разрабатывать свои устройства на основе модуля Ардуино.

Книга содержит подробное описание каждой включенной в нее программы. Вы узнаете, как создается алгоритм, как разрабатывается схема и как пишется программа. Параллельно, на тех же примерах, идет изучение языка программирования Ардуино. Все функции, операторы и другие элементы этого языка подробно описываются перед тем, как они будут использованы в очередной конкретной программе.

Сотни тысяч плат Ардуино используются каждый день, стимулируя людей во всем мире создавать что-то новое и интересное. Книга предназначена для широкого круга радиолюбителей и для всех, кто изучает языки программирования и учится создавать электронные устройства.

Виртуальный диск содержит тексты всех программных примеров из книги, инсталляционный пакет среды разработки IDE, архивы используемых в книге программных библиотек, видеоролики, набор вспомогательной справочной информации и многое другое.

УДК 535.715.1:621.385.6

**ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ УХОДОВ МЕЖДУЭЛЕКТРОДНЫХ ЗАЗОРОВ
В КСУ МОЩНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ЛБВ
И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МАКРОПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

**С. Д. Журавлев¹, Р. Ю. Богачев¹,
В. И. Роговин^{1,3}, А. И. Петросян¹, В. И. Шестеркин¹,
Б. А. Гризбил^{2,3}, В. П. Рябухо^{2,3}, А. А. Захаров⁴**

¹Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз», г. Саратов

²Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

³Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н.Г. Чернышевского

⁴Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Представлены результаты экспериментального исследования изменения междуэлектродных расстояний в катодно-сеточном узле (КСУ) мощной импульсной ЛБВ в результате термического нагрева катода методом лазерной интерферометрии. Определено из численных расчетов влияние изменения междуэлектродных расстояний на модуляционные параметры КСУ и прохождение электронного потока через пролетный канал до коллектора.

КС: катодно-сеточный узел, электронная пушка, температурные смещения, лазерная интерферометрия

**THE USE OF LASER INTERFEROMETRY
FOR MEASURING THERMAL DRIFTS OF INTERELECTRODE GAPS
IN CATHODE-GRID NODES OF A HIGH-POWER PULSED TWT
AND THEIR INFLUENCE ON ELECTRON BEAM MACRO-PARAMETERS**

**S. D. Zhuravlev¹, R. Yu. Bogachev¹,
V. I. Rogovin^{1,3}, A. I. Petrosyan¹, V. I. Shesterkin¹,
B. A. Grizbil^{2,3}, V. P. Ryabukho^{2,3}, A. A. Zakharov⁴**

¹JSC «Research and Production Enterprise «Almaz», Saratov

²IPMC RAS, Saratov

³Saratov State University Named after N.G. Chernyshevsky

⁴Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin

The results of experimental studies of changes in the interelectrode distances in cathode-grid node of a high-power pulsed TWT as a result of thermal heating of the cathode using laser interferometry are presented. The effect of the change of interelectrode distances on modulation parameters of the cathode-grid nodes and the passage of the electron flow through the passage channel to the collector was determined from numerical calculations.

Keywords: cathode-grid node, electron gun, temperature drifts, laser interferometry

К импульсным ЛБВ предъявляются жесткие требования по обеспечению и сохранению в процессе эксплуатации выходных и модуляционных параметров. В свою очередь, модуляционные

параметры определяются конструкцией катодно-сеточного узла (КСУ) электронной пушки (ЭП) [1], а именно взаимным расположением катода, теневой и управляющей сеток, размещенных вблизи эмитирующей поверхности термоэмиссионного катода [2]. При заданных размерах, количестве кольцевых и радиальных перемычек сеток и расстоянии катод – анод расстояние между сетками определяет величины рабочего и «запирающего» напряжений на управляющей сетке, обеспечивающих требуемый ток катода и его «отсечку» соответственно. В рабочем режиме КСУ за счет высокой температуры катода (1050...1100 °С) и термического расширения входящих в него деталей и узлов межэлектродные расстояния катод – теневая сетка и теневая сетка – управляющая сетка изменяются относительно «холодных» размеров, заложенных в чертежах на их изготовление. Изменение этих расстояний в КСУ приводит к нарушению условий фокусировки и сопровождения электронного пучка до коллектора [3]. Уменьшение расстояния катод – управляющая сетка приводит к увеличению «запирающего» напряжения на управляющей сетке. При уменьшении расстояния катод – теневая сетка увеличивается «эффективная» эмиссионная площадь катода и, как следствие, возрастают ток и первичная скорость электронного пучка [4].

В этой связи перед конструкторами приборов стоит задача определения абсолютных значений термических уходов межэлектродных расстояний для каждой конструкции КСУ и внесения корректировки «холодных» размеров в чертежи на этапе проектирования прибора.

Таким образом, измерение температурных смещений электродов и определение «горячих» межэлектродных расстояний в КСУ, исследование их влияния на модуляционные и электронно-оптические характеристики ЭП и электронно-оптических систем мощных импульсных СВЧ-приборов является актуальной задачей.

Измерение тепловых смещений межэлектродных расстояний в процессе повышения температуры катода основано на регистрации продольного местоположения измеряемого электрода и его изменения относительно реперной точки на опорной поверхности, расположенной вдали от высокотемпературной области. Регистрация изменения местоположения электродов основана на использовании метода лазерной интерферометрии, в котором величина продольного перемещения определяется с точностью до долей длины волны лазерного излучения λ . В работе использован лазерный интерферометр [5], построенный по схеме интерферометра Майкельсона, с использованием цифровой фотокамеры для записи интерференционных картин (рис. 1).

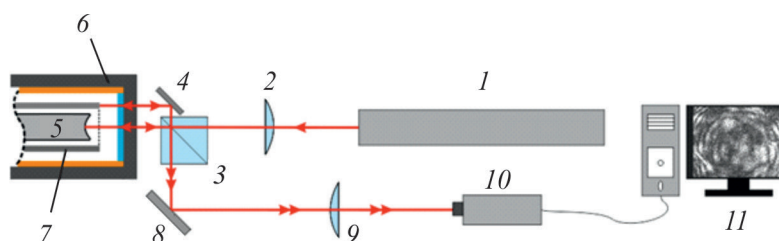


Рис. 1. Оптическая схема лазерного интерферометра:

- 1 – He-Ne-лазер; 2 – линза; 3 – светоделительный кубик; 4 – поворотное зеркало; 5 – катод;
6 – теплоизолирующая опора макета; 7 – управляющий электрод; 8 – поворотное зеркало;
9 – линза; 10 – цифровая фотокамера; 11 – персональный компьютер

Лазерный луч после прохождения линзы 2 и светоделительного кубика 3 разделялся на два луча. Один из лучей фокусировался на поверхность удаленного от высокотемпературной зоны

реперного электрода, а второй – на поверхность другого электрода, например управляющего электрода 7, как показано на рис. 1. Отраженные от обеих поверхностей лазерные лучи соединялись в светоделителе 3 в один суммарный луч, который с помощью поворотного зеркала 8 и объектива 9 направлялся на матричный фотодетектор 10 цифровой фотокамеры. Интерференционная картина от обоих лучей представляла собой систему максимумов и минимумов интенсивности излучения. Изменение взаимного положения поверхностей электродов в продольном направлении и, как следствие, относительное смещение поверхностей в продольном направлении на величину Δg приводило к взаимному фазовому сдвигу лазерных лучей на величину $\Delta\varphi = 2\pi 2\Delta g/\lambda$ и соответственно к периодически осциллирующему изменению интенсивности интерференционной картины. Относительное смещение местоположений электродов на четверть длины волны вызывает изменение интенсивности суммарного луча на половину периода. Подсчет количества таких полупериодов m изменений интенсивности в суммарном луче позволяет определить величину относительного смещения поверхностей электродов $\Delta g = m\lambda/4$. Для подсчета числа полупериодов осцилляций интенсивности в суммарном луче запись кадров изображения интерференционных картин осуществлялась с частотой более 2-х кадров за полупериод осцилляций. После цифровой обработки массива изображений интерференционных картин определялось количество полупериодов m и соответственно величина относительного смещения Δg . Таким образом, определялось изменение межэлектродных расстояний после введения катода в рабочий температурный режим. Достоинствами данного метода измерений являются его бесконтактность и высокая точность измерения.

В качестве объекта исследований была выбрана ЭП для мощной импульсной ЛБВ, включающая КСУ с импрегнированным металлопористым катодом и теневой и управляющей сетками (см. рис. 1). Сетки с радиально-кольцевыми перемычками были изготовлены из листового гафния толщиной 100 и 300 мкм соответственно (рис. 2).

«Холодные» размеры межэлектродных расстояний катод – теневая сетка и теневая – управляющая сетка составляли 100 и 300 мкм соответственно.

Измеренные величины изменения расстояния катод – теневая сетка во времени при различных установившихся температурах катода представлены на рис. 3.

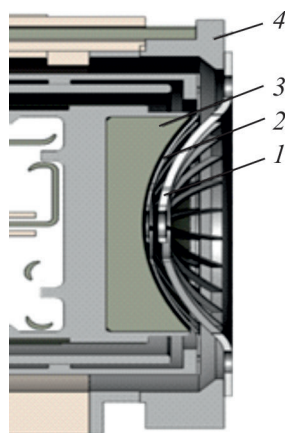


Рис. 2. Конструкция электронной пушки:
1 – управляющая сетка; 2 – теневая сетка;
3 – катод; 4 – управляющий электрод

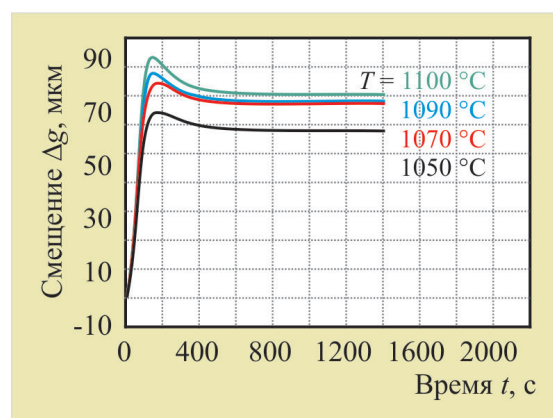


Рис. 3. Изменение расстояния катод – теневая сетка во времени при различных установившихся температурах катода T

**Значения максимальной $\Delta g_{\max}$ и стабилизированной Δg_{stab} величин
относительного смещения катод – теньевая сетка и максимальной скорости смещения $v_{\max}$**

Параметр	$T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 1070\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 1090\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\Delta g_{\max}$, мкм	65,0	73,3	76,6	83,0
Δg_{stab} , мкм	58,4	67,5	66,6	70,3
$v_{\max}$, мкм/с	0,7	0,7	1,0	1,2

Установлено, что основной вклад в изменение зазора катод – теньевая сетка внесен продольным перемещением катода относительно его «холодного» положения. Смещение теневой сетки в сторону катода не превышало 10 мкм. Таким образом, суммарное расстояние катод – теньевая сетка в установившемся «горячем» состоянии уменьшилось приблизительно на 68 мкм относительно холодного размера в рабочем режиме катода и составило около 32 мкм.

Результаты измерений были использованы для анализа влияния расстояния катод – теньевая сетка на модуляционные характеристики пушки и величину сохраняющего рабочий ток катода напряжения на управляющей сетке (напряжение превышения $U_{\text{прев}}$). Расчеты вольт-амперных характеристик ЭП с разным расстоянием $d_{\text{к-т.с}}$ между катодом и теневой сеткой, изменяющимся в результате теплового ухода катода, при разных напряжениях накала проведены по программе [6].

Влияние изменения расстояния $d_{\text{к-т.с}}$ на ток катода в ЭП при неизменном напряжении на управляющей сетке ($U_{\text{прев}} = 700\text{ В}$) представлено на рис. 4.

Уменьшение величины зазора $d_{\text{к-т.с}}$ приводит к увеличению тока катода за счет уменьшения экранирующего влияния перемычек теневой сетки и увеличению эффективной эмитирующей

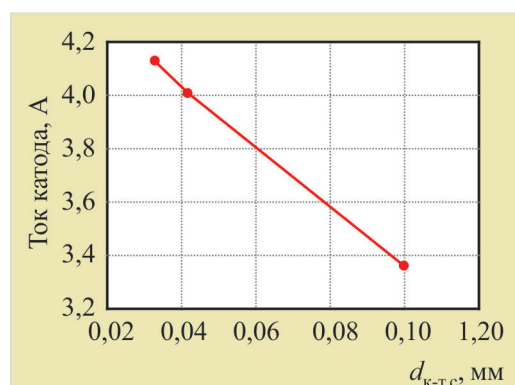


Рис. 4. Зависимость тока катода от расстояния катод – теньевая сетка

площади $S_{\text{эфф}}$ катода. Максимальное значение $S_{\text{эфф}}$ достигалось при минимальных значениях зазора $d_{\text{к-т.с}}$ и толщины теневой сетки. Однако размещение теневой сетки из гафния непосредственно на эмитирующей поверхности катода приводит к ее «охрупчиванию» и механическому разрушению. Поэтому теневую сетку из гафния размещают, как правило, над поверхностью катода с зазором, превышающим их величину взаимного термического смещения.

«Тепловое» смещение катода в сторону анода уменьшает расстояние катод – управляющая сетка $d_{\text{к-у.с}}$. При неизменных размерах ячеек в управляющей сетке и уменьшении $d_{\text{к-у.с}}$ напряжение запирающего тока пучка возрастает (рис. 5), а рабочее напряжение на управляющей сетке для $I_{\text{кат}} = \text{const}$ уменьшается (рис. 6). Напряжение запирающего $U_{\text{зап}}$ рассчитывалось по уровню катодного тока 0,01 % от номинального значения.

Изменение зазора катод – теньевая сетка вследствие тепловых смещений электродов КСУ оказывает существенное влияние на величину разброса электронов по углам наклона к оси. В области пространства, ограниченной поверхностью катода и перемычками теневой сетки, линии

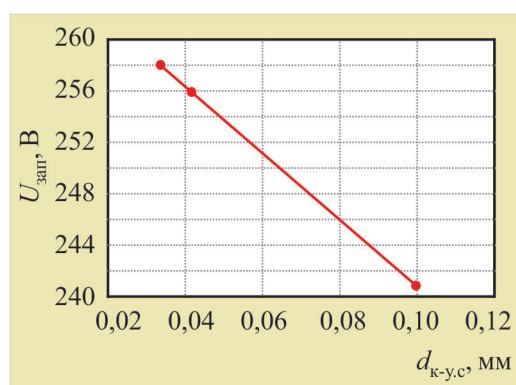


Рис. 5. Зависимость абсолютной величины «запирающего» катода напряжения на управляющей сетке $U_{\text{зап}}$ от расстояния катод – управляющая сетка

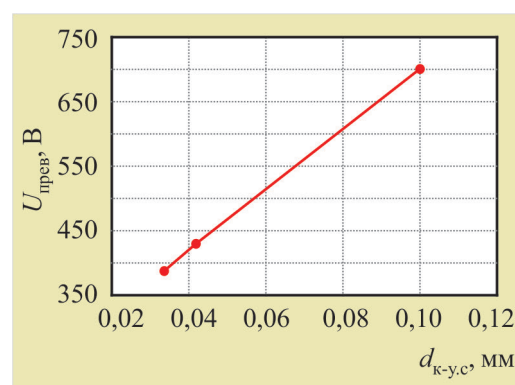
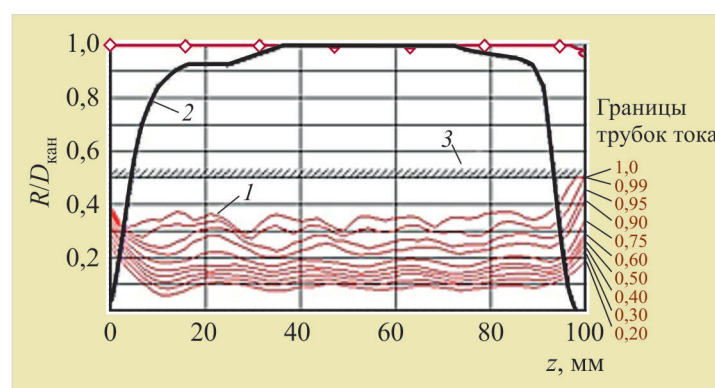


Рис. 6. Зависимость напряжения превышения $U_{\text{прев}}$, обеспечивающего рабочий ток, от расстояния катод – управляющая сетка

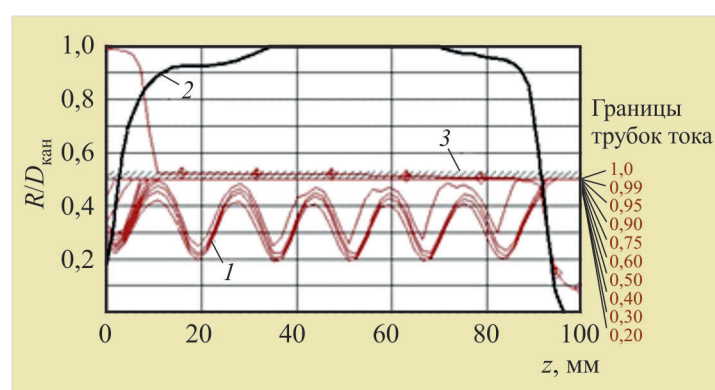
равного потенциала искривляются таким образом, что вектор напряженности электрического поля отклоняется от нормали к катоду и имеет составляющую, направленную к центру ячейки КСУ. Угол отклонения вектора напряженности электрического поля от нормали к катоду возрастает при увеличении расстояния $d_{\text{к-т.с}}$. Электроны, стартующие с поверхности катода вблизи переключки теневой сетки, отклоняются от нормали под большим углом, чем электроны, стартующие с поверхности катода вдали от переключек [4]. В результате за анодом ЭП в каждой точке по диаметру электронного пучка имеет место разброс по углам наклона траекторий электронов к оси пушки [7]. Увеличение углового разброса траекторий электронов приводит к существенному превышению среднего радиуса электронного пучка над бриллюэновским значением, что приводит к необходимости увеличения амплитуды магнитного поля для фокусировки пучка в пролетном канале [8].

На рис. 7 приведены результаты расчета огибающих электронного пучка и амплитуды их пульсаций в пролетном канале диаметром 3,5 мм импульсной ЛБВ с током 4,009 А, напряжением анода 21,5 кВ и индукцией постоянного магнитного поля 0,2 Тл при различных зазорах $d_{\text{к-т.с}}$. Расчёты проведены по программе анализа электронных пучков [9]. Для зазора катод – теневая сетка $d_{\text{к-т.с}} \approx 0,04$ мм, с учетом его уменьшения в результате их взаимного теплового смещения (рис. 7, а), заполнение пучком пролетного канала по огибающей, содержащей 100 % тока пучка, не превышало 77 %. Без учета взаимного смещения катод – теневая сетка для расстояния $d_{\text{к-т.с}} = 0,1$ мм оседание пучка происходило в переходной области магнитного поля на первой пульсации огибающей его границы. Амплитуда пульсации составляла приблизительно 43 % относительно среднего радиуса электронного пучка. Заполнение пучком пролетного канала составляло около 100 %.

В работе предложен способ и создана лабораторная установка для измерения тепловых смещений электродов в КСУ в процессе разогрева катода от комнатной температуры до рабочей. Способ основан на использовании метода лазерной интерферометрии. Он позволяет измерять величину продольного перемещения электродов и их взаимное расположение друг относительно друга с точностью до долей длины волны лазерного излучения λ . Результаты измерений были использованы в компьютерных расчетах по оценке влияния изменения межэлектродных расстояний на модуляционные параметры КСУ и токопрохождение в пролетном канале мощной ЛБВ.



а)



б)

Рис. 7. Границы трубок тока (1), содержащих разные доли тока пучка, в магнитном поле (2) фокусирующей системы в пролетном канале (3) ЛБВ:

$$a - d_{\text{к-т.с}} = 0,04 \text{ мм}; \quad б - d_{\text{к-т.с}} = 0,1 \text{ мм}$$

Приведенные в работе результаты исследований позволяют на этапе проектировки прибора вносить корректировку «холодных» размеров и величин управляющих напряжений на фокусирующем электроде ЭП или управляющей сетке в КСУ серийно выпускаемых приборов. Учет изменения термических смещений междуэлектродных расстояний особенно актуален при проектировании мощных импульсных ЛБВ в коротковолновой части СВЧ-диапазона, где требования к токопрохождению электронного пучка через пролетный канал чрезвычайно высоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гилмор-мл., А. С. Лампы с бегущей волной: монография / Под ред. Н. А. Бушуева. – М.: Техносфера, 2013. – 615 с.
2. Gardiner, T. M. Long life gridded guns / T. M. Gardiner // Int. Conf. on Microwave Tubes in Syst. London. – 1984. – P. 47 – 49.
3. Забирова, Е. Г. Комплексный анализ теплофизических, термомеханических и электронно-оптических процессов в электронных пушках ЭВП СВЧ / Е. Г. Забирова, С. П. Морев, А. П. Якунин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1986. – Вып. 2 (386). – С. 27 – 30.
4. Григорьев, Ю. А. Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Ю. А. Григорьев, Б. С. Правдин, В. И. Шестеркин // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1987. – Вып. 7 (1264).

5. А. с. 1374042 СССР. G 01 B 9/021. Интерференционный способ измерений относительных перемещений диффузно отражающих поверхностей и устройство для его осуществления / Б. Б. Горбатенко, И. С. Клименко, В. П. Рябухо, Л. А. Сурменко. – Оpubл. 15.02.88, Бюл. № 6.
6. Петросян, А. И. Комплекс программ для проектирования на ЭВМ электронных пушек с сеточным управлением / А. И. Петросян, В. Д. Журавлева, В. В. Пензяков, В. И. Роговин // Прикладная физика. – 2002. – № 3. – С. 127 – 133.
7. Алямовский, И. В. Электронные пучки и электронные пушки / И. В. Алямовский. – М.: Сов. радио, 1966. – 456 с.
8. Морев, С. П. Методы расчета электронных пучков с ненулевым фазовым объемом / С. П. Морев, В. В. Пензяков // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1984. – Вып. 2 (1000). – 43 с.
9. Журавлева, В. Д. Программа расчета многоскоростного аксиально-симметричного электронного пучка в магнитном поле / В. Д. Журавлева, С. П. Морев, В. В. Пензяков, В. И. Роговин // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. – 1985. – Вып.1. – С. 70.

Статья поступила 14 сентября 2018 г.

НОВЫЕ КНИГИ

РОМАНЮК В. А. **Аналоговые устройства приемопередатчиков.** – М.: СОЛОН-Пресс, 2018. – 144 с.: ил.

Изложены основные сведения о составе, механизме работы и характеристиках аналоговых устройств, применяемых в радиопередатчиках и радиоприемниках СВЧ. Несмотря на успехи современной цифровой техники, в приемопередатчиках сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн продолжают применяться аналоговые устройства: усилители мощности, автогенераторы, синтезаторы и смесители частот, модуляторы и демодуляторы.

Значительное внимание в пособии уделено функциональным схемам радиопередатчиков и радиоприемников, подробно рассмотрены параметры, определяющие их качество. При описании работы аналоговых устройств упор сделан на физические процессы с приведением необходимых математических выкладок, облегчающих понимание информации, отмечены особенности в случае аналоговой и цифровой формы радиосигналов. Материал, изложенный по каждому устройству, иллюстрируется примерами реализации, интегральными схемами с приведением их параметров.

В пособии намечены пути улучшения аналоговых устройств приемопередатчиков, связанные с созданием монолитных микроволновых интегральных схем (ММИС) на базе арсенида и нитрида галлия, карбида кремния и других современных полупроводниковых материалов. Информация пособия предназначена для подготовки бакалавров радиотехнического профиля.



ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.315.592

СИНТЕЗ СОЕДИНЕНИЯ SnAs В ПРОЦЕССЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ НА ПОДЛОЖКАХ ИЗ GaAs

П. С. Белоусов^{1,2}, М. А. Бобылев², В. И. Ковалев²,
Е. В. Каевицер², В. Е. Любченко², А. И. Руковишников²,
К. П. Петров^{1,2}, О. В. Пелипец¹, Ю. Ш. Темиров², И. А. Рогачев^{1,2}

¹АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

²ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке из Si-GaAs (100) синтезировано соединение олова с мышьяком в виде тонкопленочных гетероструктур при толщине слоев порядка десятков нанометров. Полученные структуры изучались методами Оже-спектроскопии и рентгеновского фазового анализа. Кроме того, изучались их электрофизические свойства и спектральная зависимость эллипсометрических параметров Ψ и Δ поверхности образцов. Предполагается, что данное соединение, относящееся по современным представлениям к классу топологических 3D-полуметаллов Вейля, может быть использовано для создания электронных приборов с бездиссипативным переносом заряда.

КС: соединение олова с мышьяком, молекулярно-лучевая эпитаксия, GaAs-подложка, тонкопленочная гетероструктура

SYNTHESIS OF SnAs COMPOUND IN THE COURSE OF MOLECULAR-BEAM EPITAXY ON GaAs SUBSTRATES

P. S. Belousov^{1,2}, M. A. Bobylev², V. I. Kovalev²,
E. V. Kaevitser², V. E. Lyubchenko², A. I. Rukovishnikov²,
K. P. Petrov^{1,2}, O. V. Pelipets¹, U. Sh. Temirov², I. A. Rogachev^{1,2}

¹JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

²FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino

Molecular-beam epitaxy on a Si-GaAs (100) substrate synthesized a compound of tin with arsenic in the form of thin-film heterostructures with a layer thickness of the order of tens of nanometers. The structures obtained were studied by Auger spectrometry and X-ray phase analysis. In addition, their electrophysical properties and spectral dependence of ellipsometric parameters Ψ and Δ of the sample surface were studied. It is assumed that this compound, which, according to modern concepts, belongs to the class of topological 3D Weyl semimetals can be used to create electronic devices with nondissipative charge transfer.

Keywords: compound of tin with arsenic, molecular-beam epitaxy, Ga-As substrate, thin-film heterostructure



1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс современной электроники неразрывно связан с успехами полупроводникового материаловедения. В последнее время все большую актуальность приобретают разработки новых перспективных материалов, в том числе интерметаллидов. Интересным представителем данного семейства является соединение SnAs с кубической решеткой типа NaCl. Объемные монокристаллы арсенида олова могут быть использованы в качестве высокопроводящей подложки при выращивании эпитаксиальных пленок GaAs аналогично монокристаллам NiSb [1], а тонкие пленки могут обладать аномальными электрофизическими свойствами, характерными для двумерных структур, в том числе свойствами топологических полуметаллов Вейля с фермионами Дирака [2]. В тонких слоях они под действием поверхностных потенциалов имеют специфическую зонную структуру с образованием конусов Дирака, т. е. с перекрытием зоны проводимости и валентной зоны или с очень узкой запрещенной зоной.

По современным представлениям вейлевские фермионы являются безмассовыми квазичастицами с нулевой эффективной массой, что позволяет управлять ими намного быстрее, чем обычными электронами. Поэтому вейлевские полуметаллы могут быть использованы для создания сверхбыстродействующих электронных устройств. В связи с этим SnAs представляет интерес для создания перспективных приборов СВЧ [3, 4]. Целью настоящей работы являлось проведение синтеза соединения SnAs в виде тонкопленочных гетероструктур, пригодных для приборных разработок.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Как известно, соединение SnAs кристаллизуется в кубической структуре каменной соли, пространственная группа – $Fm\bar{3}m$, размер элементарной ячейки $a = 0,5681$ нм, что очень близко к параметру решетки GaAs. Координационное число $Z = 4$, что предполагает образование четырех ковалентных связей при одинаковых межатомных расстояниях [5]. Диаграмма состояния двойной системы As–Sn представлена на рис. 1 [6].

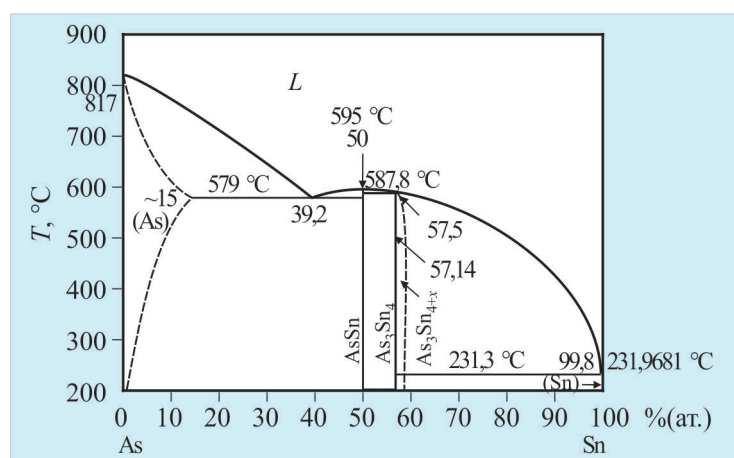


Рис. 1. Диаграмма состояния системы As–Sn [6]

Обычно кристаллы SnAs получают в кварцевых ампулах путем нагрева выше температуры ликвидуса (595 °C) и последующего длительного гомогенизирующего отжига [7]. В нашей

работе синтез соединения SnAs происходил в процессе выращивания тонких слоев методом молекулярно-лучевой эпитаксии в условиях высокого вакуума (около $5 \cdot 10^{-7}$ Па) на установке ЭПИАРС-Исток с радиационным нагревом образцов [8]. В качестве подложек использовались пластины полуизолирующего GaAs (100) с небольшим отклонением ($0,5 \dots 1^\circ$) в направлении [110], которое необходимо для создания моноатомных ступенек, облегчающих зародышеобразование. Подготовка подложки для синтеза сводилась к травлению в течение 3 мин в травителе $\text{HCl-H}_2\text{O}$ (1:10).

Для контроля состояния поверхности структур использовался метод спектральной эллипсометрии, который позволяет определять толщины слоев гетероструктур, их оптические константы, степень легирования и другие свойства [9]. В данной работе оценка толщины слоя естественного окисла на поверхности подготовленных для эпитаксии подложек и других параметров получаемых гетероструктур (рис. 2, 3) проводилась на усовершенствованном светодиодном спектральном эллипсометре «Эльф» с переключением ортогональных состояний поляризации [10]. Измерения проводились в спектральном диапазоне 270...1050 нм. Воспроизводимость измерения толщин оксидов на пиковых значениях длин волн светодиодов достигает значений 0,0001 нм. Зависимость эллипсометрических параметров Ψ и Δ исходных подложек GaAs представлена на рис. 2. Красная сплошная линия – расчетный спектр, построенный исходя из двухслойной модели GaAs – окисел; черные точки – экспериментальные данные. Исходя из данных эллипсометрии, толщина окисла перед загрузкой подложки в шлюзовую камеру установки не превышала 4 нм.

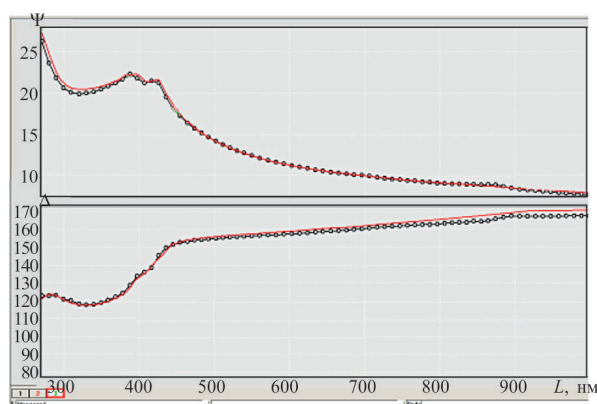


Рис. 2. Спектральная зависимость эллипсометрических параметров подложки из GaAs

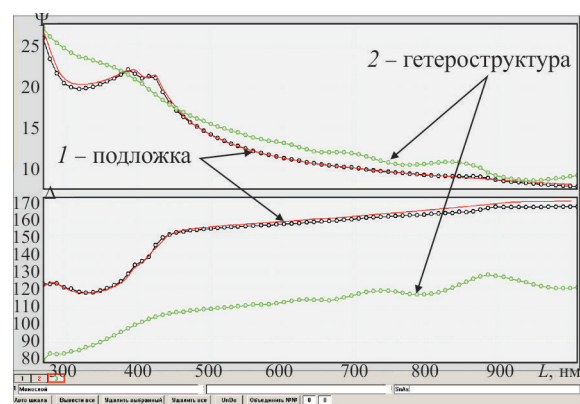


Рис. 3. Спектральная зависимость эллипсометрических параметров гетероструктуры GaAs-SnAs

Слои SnAs синтезировались в следующих условиях: температура источника олова – 980°C ; температура поверхности подложки – 550°C ; давление паров мышьяка в ростовой камере – $1 \cdot 10^{-5}$ Па.

Для формирования атомарно-гладкой поверхности подложки GaAs были проведены следующие технологические процессы:

- термическое удаление естественного окисла с поверхности подложки перед эпитаксиальным ростом. Для этого подложка нагревалась в камере до температуры 540°C в течение 15 мин;
- выдержка подложки в потоке As_4 в отсутствие атомов Ga при температуре, обеспечивающей формирование атомарно-гладких террас;
- наращивание иницирующего (буферного) слоя толщиной от нескольких нанометров до 0,5 мкм.

После этого заслонка Ga закрывалась, температура подложки устанавливалась несколько ниже температуры ликвидуса (595°C), открывалась заслонка Sn и производилось формирование слоя соединения. Выращивались два типа структур, с буферными слоями нелегированного и легированного оловом GaAs. Осаждение Sn проводилось в течение 1 ч. За это время образовывался слой SnAs толщиной 43 нм.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состав соединения определялся методом Оже-спектрии (рис. 4). Стехиометрическое соотношение элементов As:Sn – 0,5:0,45 % (ат.), что подтверждает образование химического соединения. Химический состав и структура образца были подтверждены методом РФА (рис. 5). Холловские измерения делались по методу Ван-дер-Пау. Удельное сопротивление составляло $122 \cdot 10^{-5}$ Ом·см, подвижность носителей заряда – $124 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Концентрация электронов – $4,12 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 3 (кривая 2) представлена зависимость эллипсометрических параметров структуры Ψ и Δ . Обращает на себя внимание поведение эллипсометрических параметров в области 800 нм. Как известно, соединение SnAs кристаллизуется в примитивной кубической решетке, что предполагает образование четырех ковалентных связей при одинаковых межатомных расстояниях. Как следует из

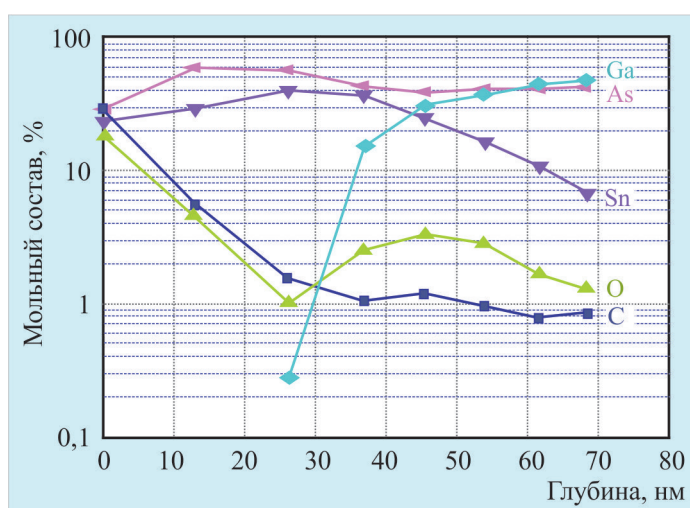


Рис. 4. Оже-профилограмма

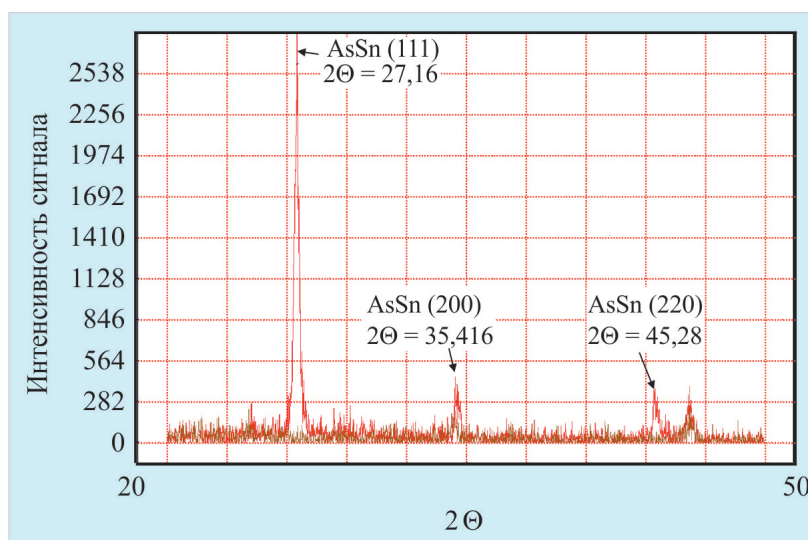


Рис. 5. Экспериментальная дифрактограмма, на которой присутствуют только рефлексы, относящиеся к фазе SnAs; рефлексов других фаз не обнаружено

диаграммы состояния, в системе $\text{Sn}_x\text{--As}_y$ в достаточно узком концентрационном интервале по Sn ($x = 0,5 \dots 0,6$) образуются соединения SnAs и As_3Sn_4 с ромбоэдрической решеткой, причем атомы Sn в последнем могут иметь переменную валентность от Sn^{2+} до Sn^{4+} [11]. Возможно, наличие лишних (не участвующих в образовании связи) электронов в атомах As и переменчивость валентного состояния атомов Sn облегчают образование квазичастиц типа вейлевских фермионов. А это приводит к ярко выраженной анизотропии свойств SnAs , что является следствием его низкосимметричного кристаллохимического строения [12] и проявляется в виде особенностей спектральных эллипсометрических характеристик. В результате проведенных экспериментов установлено, что характерной структурной особенностью, возможно, является слоистое строение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что синтезированные слои SnAs представляют интерес для создания перспективных приборов СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Айтхожин, С. А.** Выращивание эпитаксиальных слоев GaAs на подложках NiSb / С. А. Айтхожин, А. С. Артемьев, П. С. Белоусов и др. // Неорганические материалы. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 121 – 125.
2. **Xu, S.Y.** Discovery of a Weyl fermion semimetal and topological Fermi arcs. / S.Y. Xu et al. // Science. – 2015. – No 349. – P. 613 – 617.
3. **Hasea, Izumi.** Electronic structure of InTe, SnAs and PbSb: Valence-skip compound or not? / Izumi Hasea, Kouki Yasutomib, Takashi Yanagisawaa, Kousuke Odagiria, Taichiro Nishioc // Physica C: Superconductivity and its Applications. – 15 August 2016. – Vol. 527. – P. 85 – 90.
4. **Веденеев, С. И.** Квантовые осцилляции в трёхмерных топологических изоляторах / С. И. Веденеев // УФН. – 2017. – № 187. – С. 411 – 429.
5. **Угай, Л. А.** Арсенид олова – новый интерметаллический полупроводник / Л. А. Угай, Ю. П. Завальский, В. А. Угай и др. // Докл. АН СССР. – 1965. – Т. 163, № 3. – С. 663 – 668.
6. **Gokcen, N. A.** The As–Sn (Tin–Arsenic) system / N. A. Gokcen // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1990. – Vol. 11, № 3. – P. 243 – 245.
7. **Безотосный, П. И.** Исследование электронной зонной структуры сверхпроводника SnAs методом ARPES / П. И. Безотосный, К. А. Дмитриева, С. Ю. Гаврилкин, К. С. Перваков, А. Ю. Цветков, В. П. Мартовицкий, А. Г. Рыбкин, О. Ю. Вилков, В. М. Пудалов // Письма в ЖЭТФ. – Т. 106.
8. **Ангилев, Э. А.** Молекулярно-лучевая эпитаксия GaAs с использованием непосредственного радиационного нагрева подложек / Э. А. Ангилев, П. С. Белоусов, А. А. Исаев, В. А. Михайлов, М. Ф. Поточков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1988. – Вып. 9 (413).
9. **Швец, В. А.** Эллипсометрия – прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением / В. А. Швец, Е. В. Спесивцев, С. В. Рыхлицкий, Н. Н. Михайлов // Российские нанотехнологии. – Т. 4, № 3. – С. 72 – 84.
10. **Ковалёв, В. И.** Светодиодный широкодиапазонный спектральный эллипсометр с переключением ортогональных состояний поляризации / В. И. Ковалёв, А. И. Рукавишников, С. В. Ковалёв, В. В. Ковалёв // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, вып. 3. – С. 55 – 59; 2017. – Вып. 8. – С. 493 – 495.
11. **Shipatov, V. T.** Messbauer effect and the chemical bond in compounds of tin with elements of the fifth group / V. T. Shipatov, P. P. Seregin // Teoreticheskaya i eksperimental'naya Khimiya. – May-June, 1972. – Vol. 8, No 3. – P. 413 – 416.
12. **Макеев, М. О.** Исследования деградации резонансно-туннельных диодов на базе AlAs/GaAs-наногетероструктур / М. О. Макеев, Ю. А. Иванов, С. А. Мешков, Ю. Н. Литвак, Н. А. Ветрова // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып. 6.
13. **Tutuncu, H. M.** // J. Phys.: Condens. Matter. – 2012. – 24. – 455704.

Статья поступила 15 октября 2018 г.



МЕДИЦИНСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 61

МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И КОЖА ЧЕЛОВЕКА. РАЗРАБОТКА НЕИНВАЗИВНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

К. Д. Казаринов, И. Г. Полников

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

В статье представлены экспериментальные результаты изучения кожи человека с помощью радиоскопического метода акустического детектирования поглощенной мощности в диапазоне миллиметровых длин волн, а также с помощью измерения скорости трансэпителиального транспорта воды. Разработана модель, позволяющая интерпретировать результаты, полученные в ходе эксперимента. Показана перспектива терапевтического действия микроволнового излучения на кожу человека.

КС: неинвазивная диагностика, кожа человека, содержание воды в биологических тканях, микроволновое излучение, радиоспектроскопия, трансэпидермальная потеря воды, измерение влажности эпидермиса

MICROWAVE RADIATION AND HUMAN SKIN. DEVELOPMENT OF NONINVASIVE RESEARCH METHODS.

K. D. Kazarinov, I. G. Polnikov

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino

The article presents experimental results of studying the human skin using a radioscopic method of acoustic detection of the absorbed power in the range of millimeter wavelengths as well as by measuring the rate of transepithelial water transport. A model has been developed that allows interpreting the results obtained during the experiment. The perspective of the therapeutic effect of microwave radiation on human skin is shown.

Keywords: noninvasive diagnostics, human skin, water content in biological tissues, microwave radiation, radiospectroscopy, transepidermal loss of water, measurement of epidermis humidity

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время предметом интенсивного научного поиска являются принципиально новые методы диагностики, позволяющие оперативно, неинвазивно и с достаточной степенью точности получать информацию о функциональном состоянии организма. В связи с этим важнейшим объектом для исследований является кожа человека как один из наиболее функционально значимых и доступных для исследования органов, выполняющий многообразные жизненно важные функции организма в целом: защита от внешних воздействий, осязание, выделение, терморегуляция, газообмен и др. [1]. Кожа неразрывно связана с жизнедеятельностью всего организма и отражает его общее состояние. Кожа человека состоит из трех слоев: эпидермиса,



собственно кожи (дермы) и подкожной жировой клетчатки. В свою очередь, эпидермис состоит из рогового и росткового слоев. Роговой слой представляет собой омертвевшие роговые пластинки, которые непрерывно слущиваются с поверхности кожи, унося с собой грязь, выделения кожных желез и микроорганизмы. В ростковом слое происходит непрерывное размножение клеток, обновляющих роговой слой. В собственно коже расположены различные рецепторы, кожные луковицы, потовые и сальные железы. Жировая клетчатка защищает внутренние органы от механических воздействий и участвует в обмене веществ.

Кожа обеспечивает надежную защиту организма от вредных воздействий – температурных, химических, механических – и попадания микроорганизмов. Вместе с тем через кожу могут всасываться многие вещества, проникать кислород и углекислый газ.

Оценка скорости окислительной деструкции липидов, входящих в структуру биологических мембран, представляет интерес при изучении различных процессов в биосистемах и физико-химических воздействий на них, в частности, исследование поврежденной кожи человека при облучении микроволнами в терапевтических целях. Приведенные в работе [2] данные о возможностях хемилюминесцентного метода контроля состояния объекта при изучении биологических эффектов микроволнового излучения показывают его перспективность в случае анализа процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) и других реакций, связанных с участием активных форм кислорода и пероксидов. Предложена конструкция лабораторного хемилюминометра, позволяющего проводить измерения хемилюминесценции объекта одновременно с его микроволновым облучением. Для оценки состояния кожи с успехом используется также метод, основанный на измерении трансэпидермальной потери воды с ее поверхности [3]. В данной работе используется этот метод для оценки действия КВЧ-излучения на кожу человека *in vivo*. Основное внимание в данной работе уделено методу радиоспектроскопии, который основан на регистрации тепловых эффектов, сопровождающих поглощение модулированного микроволнового излучения кожей.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Метод радиоспектроскопии

Как следует из вышеизложенного, кожа представляет собой многокомпонентную тканевую систему со слоистой структурой, образованную эпидермисом, дермой и подкожной жировой клетчаткой. Слоистое строение кожи, а также большое содержание в ней воды определяют особенности дисперсии и поглощения ею микроволнового излучения. В работе [4] дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от 10 МГц до 300 ГГц при нормальной температуре человеческого тела оценивается соотношением, учитывающим наличие свободной и связанной воды в коже:

$$\varepsilon(\omega) - \varepsilon_{\infty} = \frac{\Delta\varepsilon_1}{1 + i\omega\tau_1} + \frac{\Delta\varepsilon_2}{1 + i\omega\tau_2}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\infty} = 3,97$; $\Delta\varepsilon_1 = 17,9$; $\Delta\varepsilon_2 = 15$; $\tau_1 = 1,8 \cdot 10^{-9}$ с; $\tau_2 = 7,1 \cdot 10^{-12}$ с (численные значения параметров приведены для кожи руки).

Первый и второй члены в правой части уравнения (1) описывают дисперсию, обусловленную соответственно связанной и свободной водой в коже.

Автору работы [4] удалось показать, что в коротковолновой части указанного выше диапазона диэлектрические свойства кожи описываются уравнением Дебая для чистой воды:

$$\varepsilon(\omega) - \varepsilon_{\infty} = \frac{\Delta\varepsilon}{1 + i\omega\tau_D},$$

где $\varepsilon_{\infty} = 4,18$; $\Delta\varepsilon = 70$; $\tau_D = 0,64 \cdot 10^{-12}$ с при температуре 36 °С (согласно работе [5]) с учетом доли ткани с низкой диэлектрической проницаемостью.

Эффективный коэффициент поглощения, по данным приведенных выше работ, составляет

$$\alpha(\omega) = 2 \frac{\omega}{c} I_m \left\{ \sqrt{\varepsilon^*(\omega)} \right\},$$

где c – скорость света.

Поглощение в коже оказывается при этом достаточно велико – несколько десятков сантиметров в минус первой степени ($1 \text{ см}^{-1} \approx 0,43 \text{ дБ/мм}$), хотя приблизительно в 2 раза меньше, чем в воде. В упомянутой уже работе [4] в качестве модели для расчета коэффициента отражения кожи в широкой полосе частот использовалась плоская четырехслойная структура. Первый слой моделировал роговой, зернистый и блестящий слои эпидермиса с низким содержанием воды. Второй и третий слои – высоководосодержащие слои дермы и подкожной жировой клетчатки. Четвертая, полубесконечная сфера – мышечную ткань. Частотный спектр коэффициента отражения от первого слоя, полученный в этой работе, имел вид плавной, убывающей с ростом частоты кривой. Расчеты показали, что абсолютная величина коэффициента отражения определяется, главным образом, величиной комплексной диэлектрической проницаемости сильно поглощающего второго слоя, практически не зависит от толщины слабо поглощающего первого слоя и слабо зависит от толщины подкожной жировой клетчатки. В результате интенсивного поглощения микроволнового излучения в дерме и подкожной жировой клетчатке интерференционных эффектов при моделировании обнаружено не было.

Методы радиоспектроскопии основаны на регистрации тепловых эффектов, сопровождающих поглощение электромагнитного излучения различными средами в широком диапазоне длин волн. Известны методы, основанные на регистрации термоупругих колебаний, вызванных поглощением излучения, модулированного по амплитуде низкой частотой (в акустическом диапазоне), которые принято называть методами акустического детектирования поглощенной мощности (АДПМ).

Периодический нагрев образца происходит на глубине проникновения излучения. Тепло, выделившееся вблизи поверхности, нагревает соприкасающийся с образцом тонкий слой воздуха, который периодически расширяется с частотой модуляции и формирует переменное давление в замкнутом объеме ячейки. Звуковое давление определяется в этом случае поглощенной КВЧ-мощностью, частотой модуляции и термодинамическими параметрами образца и воздуха.

Схема измерительной установки, реализующей метод АДПМ в наших экспериментах, представлена на рис. 1. Измерения проводились в диапазоне 33...55 ГГц. Тракты были собраны из стандартных волноводных элементов сечением 7,2×3,4 и 5,2×2,6 мм². В установке была предусмотрена возможность модуляции излучения несколькими способами: напряжением на сетке лампы обратной волны, с помощью $p-i-n$ -диодов, а также ферритовыми модуляторами. Использовалась 100%-я амплитудная модуляция.

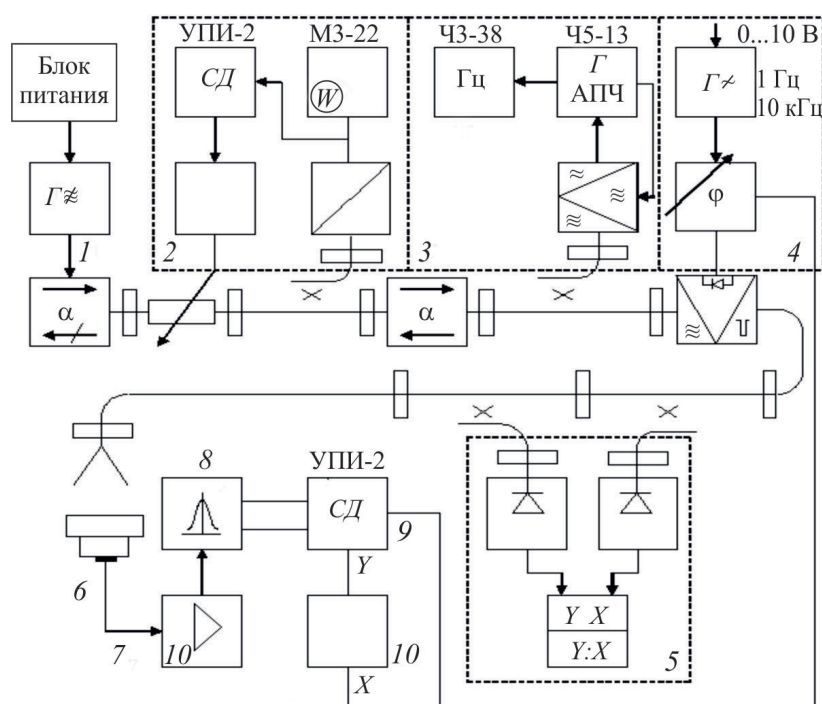


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – генератор КВЧ-излучения; 2 – блок измерения, регулировки и стабилизации мощности генератора; 3 – блок измерения частоты КВЧ-излучения; 4 – низкочастотный генератор опорного и модулирующего сигналов; 5 – блок измерения КСВН в тракте; 6 – акустическая измерительная ячейка; 7 – выносной усилитель; 8 – перестраиваемый узкополосный фильтр; 9 – синхронный детектор; 10 – регистрирующее устройство

Измерения в газовой фазе осуществлялись газоконденсаторными микрофонами типа 4129 с чувствительностью 47 мВ/Па. Детектирующая часть установки состояла из предварительного усилителя (шумы в области звуковых частот $5 \dots 10$ нВ/Гц^{1/2}), электрически перестраиваемого узкополосного фильтра, синхронного детектора с квадратурными каналами (УПИ-2). Фильтр и синхронный детектор были охвачены фазовой автоподстройкой частоты фильтрации для устранения температурной нестабильности элементов фильтра. Экспериментальная установка позволяла проводить измерения при уровне звукового давления не ниже 10 мкПа.

Примеры измерительных ячеек, использованных в нашей работе, приведены на рис. 2. Выбранный нами вариант (рис. 2, б) для широкополосных измерений позволял добиваться чувствительности не хуже 0,5 мВт/Гц при использовании конструкции ячейки с низкочастотными акустическими резонансами, позволяющей размещать объект у торца волновода. В данном случае для обеспечения минимального возмущения КВЧ-поля мы использовали пенопластовые или фторопластовые ячейки, соединенные диэлектрической трубкой с вынесенным из зоны облучения микрофоном. В частности, использовались трубки из полиэтилена диаметром 1,5...2 мм с толщиной стенок 0,3 мм и длиной 50 мм. При таких измерениях отношение сигнал/шум оказывалось несколько хуже, т. к. сказывалось в большей мере влияние внешних акустических шумов, увеличение объема газа в ячейке и затухание сигнала в звукопроводящем канале. Такое решение оправдано при исследовании сильно поглощающих сред с заметным содержанием воды.

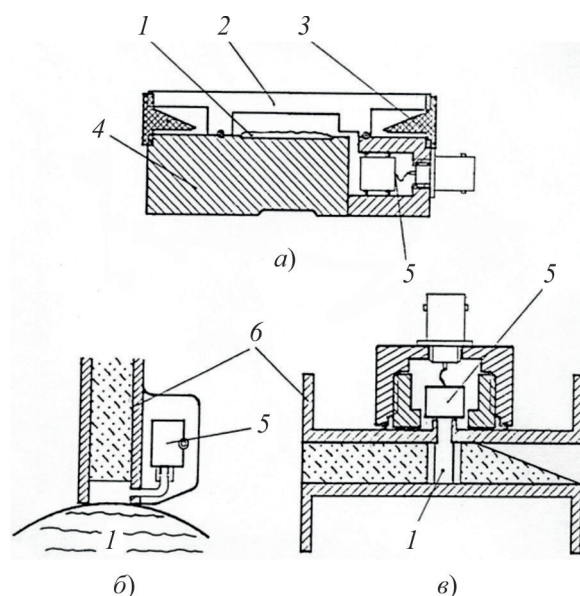


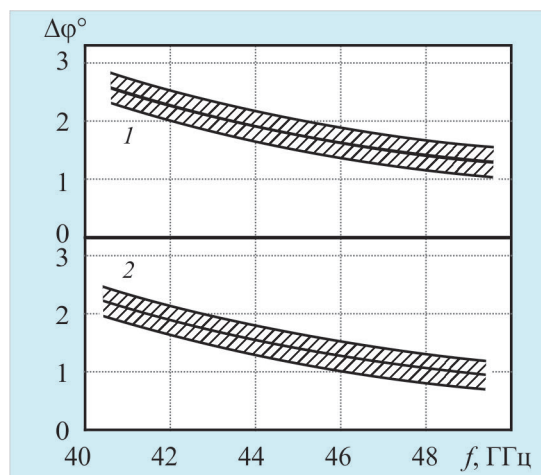
Рис. 2. Конструкции ячеек для регистрации акустического сигнала, вызванного поглощением модулированного СВЧ-излучения:

1 – образец; 2 – корпус газомикрофонной ячейки; 3 – внешний корпус, выполненный из СВЧ-поглопителя; 4 – термостатируемая металлическая подложка; 5 – микрофон; 6 – волновод с пенопластовым наполнением

На рис. 3 показаны зависимости сдвига фаз между модулирующим и акустическим сигналами от частоты несущей для простой модели кожи млекопитающих – влажной бумаги, однослойной 1 и двухслойной 2. На рис. 4 представлены аналогичные зависимости для однослойной модели 1 и собственно кожи человека 2, 3. С увеличением частоты микроволнового излучения сдвиг фаз монотонно убывает в обоих случаях, что свидетельствует о монотонном уменьшении глубины проникновения излучения в модельную структуру (примерно на 200 мкм) с ростом частоты излучения в указанных пределах. Этот вывод соответствует известным представлениям о частотной зависимости коэффициента поглощения в объектах с большим содержанием воды и свидетельствует о том, что такая структура модельного объекта, по-видимому, не оказывает заметного влияния на распределение электромагнитного поля и его частотную зависимость.

Рис. 3. Частотная зависимость сдвига фаз между акустическим и модулирующим сигналами при поглощении в объекте КВЧ-излучения:

1 – влажная однородная фильтровальная бумага;
2 – образец слоистой бумаги с полиэтиленовым покрытием.
Штриховкой показана шумовая дорожка графика



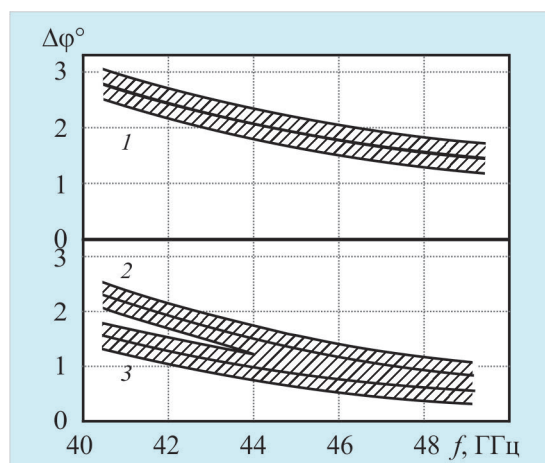


Рис. 4. Частотная зависимость сдвига фаз между акустическим и модулирующим сигналами при поглощении в объекте КВЧ-излучения: 1 – влажная фильтровальная бумага; 2 и 3 – препараты кожи. Штриховкой показана шумовая дорожка графика

Очевидно, что точность подобного заключения определяется воспроизводимостью измерений, но следует отметить, что даже в каждой отдельно взятой реализации зависимости не было выявлено немоного изменения сдвига фаз в узкой полосе частот используемого нами в эксперименте КВЧ-излучения.

2.2. Метод регистрации влажности эпидермиса

Кожа играет значительную роль в процессе терморегуляции организма. Количество тепла, рассеиваемого кожей в окружающее пространство, определяется параметрами кожной микроциркуляции и влажностью эпидермиса. В том случае, когда организму необходимо снизить потери тепла через кожу, происходит сужение кровеносных сосудов, залегающих под кожей, ее температура падает и снижается поток отдаваемого тепла. Когда же, наоборот, организму необходимо увеличить количество рассеиваемого тепла в окружающую среду, то подкожные сосуды расширяются. Кроме указанного, существует и другой механизм терморегуляции – путем изменения количества испаряемой воды. Когда организму необходимо охлаждение, жидкость, находящаяся внутри потовых желез, сокращением соответствующих мышц выдавливается к поверхности. Здесь она впитывается в сухой эпидермис и из него испаряется, отнимая теплоту. Охлаждение кожи регулируется частотой и интенсивностью сокращения мышц у основания потовой железы.

Как отмечалось выше, роговой слой состоит из чешуек, образованных слоями мертвых клеток. Исходя из этого обстоятельства, легко понять, почему он хорошо впитывает воду и не создает значительной преграды для ее диффузии. Таким образом, вода из межклеточной жидкости диффундирует к поверхности кожи и испаряется в окружающее пространство. Этот поток принято называть трансэпидермальным потоком воды (ТЭПВ).

Межклеточная жидкость состоит из воды и растворенных в ней органических и неорганических веществ. В основном это ионы калия, натрия и хлора, обеспечивающие высокую электропроводность живых тканей. При диффузии воды через эпидермис создается разность осмотических давлений, препятствующая диффузии воды через кожу. Таким образом, устанавливается динамическое равновесие между потоками покидающей организм воды и возвращаемой назад осмотическим давлением. Второй из этих потоков снижает ТЭПВ и соответственно общую потерю организмом воды до приемлемых значений. ТЭПВ определяется следующими

факторами: давлением межклеточной жидкости; концентрацией в ней растворенных веществ; влажностью приповерхностного слоя воздуха; проницаемостью рогового слоя для воды; загрязненностью поверхности кожи растворимыми в воде веществами.

При обеспечении постоянной влажности окружающего воздуха, проницаемости эпидермиса и достаточной чистоте поверхности кожи, с учетом постоянства внутренней среды организма, можно извлечь информацию о давлении межклеточной жидкости и микроциркуляции соответственно, исследуя влажность кожи. Из информации о микроциркуляции можно получить данные о работе сердечно-сосудистой системы, периферической нервной системы и т. д.

Одним из наиболее известных способов определения влажности эпидермиса является измерение влажности воздуха над ним. При этом можно измерять влажность воздуха как в замкнутом объеме над кожей, так и в проходящем с постоянной скоростью потоке вдоль поверхности кожи. Различные варианты этих методов использовались для исследования зависимости ТЭПВ от температуры окружающего воздуха и температуры кожи, влажности окружающей среды и других факторов. Известен также метод КВЧ-диэлектротметрии для изучения водного обмена тканей кожи [6]. В этом методе на основе измерения комплексной диэлектрической проницаемости кожи человека на частоте 42 ГГц осуществляется расчет влагосодержания тканей кожи *in vivo*. Исследована реакция влагосодержания кожи на стандартную физическую нагрузку и нетоксичную дозу никотина. Эти исследования имеют важное научное значение, но их результаты показывают сложность применения описанного метода в медицинской практике из-за невозможности обеспечения нужной повторяемости условий измерений. Кроме необходимости создания стабильных внешних условий, проведение подобных измерений требует наличия дорогостоящего оборудования [6].

В наших экспериментах при наложении металлического электрода на кожу перекрывается ТЭПВ в окружающее пространство и начинается процесс увлажнения рогового слоя эпидермиса, расположенного под ним. Так как под роговым слоем залегают ткани с низким сопротивлением, область под электродом обогащена водой по сравнению с остальной частью рогового слоя.

При приложении определенного напряжения через роговой слой течет ток. Измеряя проводимость между электродом и насыщенными водой внутренними слоями кожи, можно определять влажность эпидермиса.

Электрод должен прижиматься к коже с постоянным давлением, так как реальная площадь его контакта с неровной поверхностью эпидермиса сильно зависит от прижимающей силы. Основным преимуществом данного метода регистрации влажности эпидермиса является относительно низкое влияние внешних условий на результаты измерений и высокая их повторяемость. Это обусловлено тем, что измеряются внутренние характеристики системы, определяемые состоянием организма человека, и их отклик на легко стандартизируемое воздействие. Таким образом, отпадает необходимость проводить измерения в специальном помещении, где поддерживаются постоянная температура и влажность.

Устройство должно обеспечивать измерение и регистрацию проводимости кожи, запоминать ее значения в два момента времени, истекшего с момента фиксации измерительного электрода на поверхности кожи, и инициировать первое из них либо разность между вторым и первым.

Прибор состоит из трех частей: измерительного блока, датчика и выносного блока питания. Датчик устанавливается на кожу торцом. При этом электроды прижимаются к поверхности кожи внутренней пружиной. В датчик встроен индикатор, сигнализирующий о проведении измерений.

Для подтверждения правильности наших представлений о физических явлениях, протекающих в коже, проводили сравнение с поведением простейшей модельной системы. В нашем случае модельная система состоит из V -образной трубки с налитым в нее физиологическим раствором. Нижний конец трубки закрыт полупроницаемой целлофановой мембраной. Эта мембрана, как и эпидермис, пропускает через себя воду, но ионы растворенных в физиологическом растворе солей не могут проникать сквозь нее. Разность уровней жидкости в двух коленах создает избыточное давление, имитирующее давление крови в организме. Уровень влажности измерялся с помощью гигрометра. Результаты экспериментальных исследований подтвердили идентичность отклика модельной системы и кожи человека на изменение разности гидростатических и осмотических давлений.

Результат воздействия КВЧ-излучения на кожу (рис. 5) проявлялся в изменении наклона кривой зависимости проводимости кожи от времени, т. е. увеличении скорости изменения ТЭПВ. Для оценки влияния микроволнового излучения на кожу вычислялось отношение разности средней производной за время облучения и средней производной до и после облучения к значению средней производной за весь период, и эта величина K выражалась в процентах.

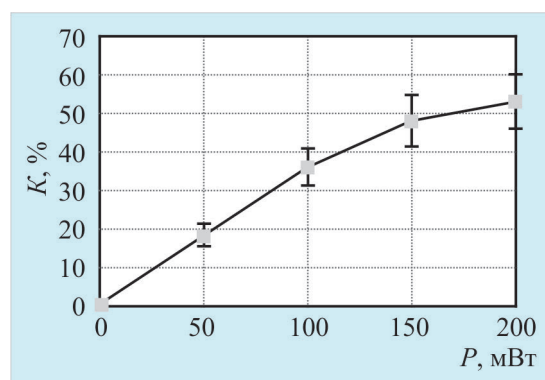


Рис. 5. Изменение удельной электропроводности эпидермиса в относительных единицах при микроволновом (диапазон КВЧ) облучении кожи (пояснения см. в тексте)

Отклик на КВЧ-облучение оказался прямо пропорциональным мощности воздействия, но имел насыщение при достижении интенсивности излучения в тракте около 100 мВт (см. рис. 5). Аналогичный эффект был получен на физической модельной системе, что свидетельствует о том, что за наблюдаемый в данном *in vivo* эксперименте эффект ответственны физические процессы переноса воды в коже, не опосредованные регуляцией на уровне живого организма.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиоспектроскопический метод АДПМ, в котором сам объект исследований является датчиком контролируемой мощности, представляется весьма удобным средством для корректной дозиметрии КВЧ-излучения в медико-биологической практике и эффективным методом изучения биологических объектов и газовых сред, сильно поглощающих микроволновое излучение, который может найти применение для изучения условий облучения и особенностей поглощения микроволн в таких биологических объектах, как кожа человека, препараты водосодержащих тканей, суспензий клеток и водных растворов.

Представлена методика контроля воздействия микроволнового излучения на кожу человека с помощью измерения скорости трансэпителиального транспорта воды в эпидермисе. Разработана модель, позволяющая интерпретировать результаты, полученные в ходе эксперимента. Слабое нагревание поверхности кожи приводит к возрастанию капиллярного давления. Этот поток воды, способствующий набуханию рогового слоя эпидермиса (РСЭ), прекращается после выравнивания химического потенциала в толще рогового слоя. При охлаждении эпидермиса, вследствие снижения капиллярного давления, должно происходить понижение химического потенциала воды в пространстве, примыкающем к роговому слою эпидермиса. Возникающий при этом поток воды через мембрану направлен от поверхности РСЭ вглубь, и степень набухания рогового слоя уменьшается.

Недавно полученные результаты наших исследований свидетельствуют и о перспективах терапевтического действия КВЧ-излучения на кожу человека. Известно, что кожа содержит в своей структуре значительное количество иммунных клеток, обеспечивающих защиту организма от внешних воздействий. При этом считается, что нагрузка на эти клетки значительно превышает те, которые достаются иммунным клеткам, циркулирующим в кровотоке [8]. В нашей работе, опубликованной в этом году [9], представлены результаты экспериментальных исследований влияния КВЧ-излучения на иммунные клетки. Было показано, что микроволновое излучение в диапазоне КВЧ способно усиливать активацию нейтрофилов, вызванную бактериями или же опсонизированным зимозаном. Таким образом, намечается направление исследований терапевтического действия микроволнового излучения на кожу человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Федюкович, Н. И.** Анатомия и физиология человека / Н. И. Федюкович. – Ростов н/Д: Феникс, 2003. – С. 340.
2. **Казаринов, К. Д.** Изучение биологического действия микроволнового излучения с помощью хемилюминесцентного метода / К. Д. Казаринов, И. Г. Полников // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2010. – № 2. – С. 57 – 71.
3. **Johnsen, G. K.** Stratum corneum in vivo water content from TEWL-measurements / G. K. Johnsen, A. B. Haugsnes, O. G. Martinsen, S. Grimnes // Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2008. – P. 3166 – 3169.
4. **Калмыков, Ю. П.** Миллиметровые волны в биологии и медицине / Ю. П. Калмыков // Сб. трудов ИРЭ АН СССР. – М., 1989. – С. 284 – 288.
5. **Hasted, J. B.** Aqueous dielectrics / J. B. Hasted. – London: Charman and Hall, 1973. – 286 p.
6. **Кузнецов, А. Н.** // Биофизика. – 2003. – Т. 48, вып. 1. – С. 73 – 75.
7. **Тимофеев, Г. А.** // Косметика и медицина. – 2005. – № 4. – С. 30 – 38.
8. **Jiang, X.** Skin infection generates non-migratory memory CD8⁺ T(RM) cells providing global skin immunity / X. Jiang, R. A. Clark, L. Liu, A. J. Wagers, R. C. Fuhlbrigge, T. S. Kupper // Nature. – 2012. Feb 29. – Vol. 483 (7388). – P. 227 – 231.
9. **Vlasova, I. I.** Extremely high frequency electromagnetic radiation promotes neutro-phil antimicrobial activity / I. I. Vlasova, E. V. Mikhalechik, A. A. Gusev, N. G. Balabushevich, S. A. Gusev and K. D. Kazarinov // Bioelectromagnetics. – February 2018. – Vol. 39, Is. 2. – P. 144 – 155.

Статья поступила 2 октября 2018 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.372.412

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ГЕНЕРАТОРОВ НА СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

А. К. Балыко, И. А. Балыко, Е. В. Терешкин

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Описан общий подход к моделированию элементов на связанных полосковых линиях и получены выражения для сопротивления резонаторов в виде отрезков линий, прямоугольной спирали, «кольца» и «подковы», а также для коэффициента передачи фазовращательных элементов, построенных на связанных линиях.

КС: связанная полосковая линия, резонатор, коэффициент передачи, фаза сигнала СВЧ

INVESTIGATION OF GENERATORS ELEMENTS ON COUPLED STRIP LINES

A. K. Balyko, I. A. Balyko, E. V. Tereshkin

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

A general approach to the modeling of elements on coupled strip lines is described and expressions for the resonators resistance in the form of line segments, rectangular spiral, ring and «horseshoe» as well as for transfer coefficients of phase shifter elements built on coupled lines are obtained.

Keywords: coupled strip line, resonator, transfer coefficient, microwave signal phase

В работе [1] приведены приближенные формулы для расчета реактивности некоторых типов элементов на связанных линиях. При этом не учтено влияние на характеристики этих элементов электромагнитной связи между соседними участками элементов в виде многовитковых спиралей и меандров. Представляет интерес получение аналитических выражений для характеристик полосковых элементов с учетом электромагнитной связи между проводниками.

Наиболее простым вариантом полоскового резонатора является отрезок разомкнутой на одном конце линии длиной l . Полное входное сопротивление такого резонатора определяется из выражения

$$Z_{\text{вх}} = Z \operatorname{cth}(\gamma l), \quad (1)$$

где

$$Z = [(R' + j\omega L')/(G' + j\omega C')]^{0.5}, \quad (2)$$
$$\gamma = [(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')]^{0.5}$$



– соответственно волновое сопротивление и волновое число линии с учетом потерь; R', L', G', C' – распределенные удельные параметры линии: последовательное сопротивление и индуктивность, параллельная проводимость и емкость. При условии малости потерь: $R'/\omega L' \ll 1$ и $G'/\omega C' \ll 1$ – выражения (2) можно записать в виде

$$\begin{aligned} Z &= Z_0(1 - j(\alpha_n - \alpha_d)/\beta), \\ \gamma &= \alpha_n + \alpha_d + j\beta, \end{aligned} \quad (3)$$

где $Z_0 = (L'/C')^{0.5}$ – волновое сопротивление линии без потерь; $\beta = \omega n = \omega(L'/C')^{0.5}$ – волновое число линии без потерь; $\alpha_n = R'/2Z_0$ – составляющая постоянной затухания, характеризующая омические потери в проводнике; $\alpha_d = G'Z_0/2$ – составляющая постоянной затухания, характеризующая потери в подложке; n – замедление волны в линии. Для материалов, применяемых в технике СВЧ, потери в подложке, как правило, существенно меньше омических потерь в металле, т. е. в (3) можно пренебречь α_d и получить

$$\begin{aligned} Z &= Z_0(1 - j\alpha_n/\beta), \\ \gamma &= \alpha_n + j\beta. \end{aligned} \quad (4)$$

Собственные добротности резонатора на частотах последовательного f_{1m} и параллельного f_{2m} резонансов определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} Q_{01m} &= (f_{1m}/2R_{\text{BX}})dX_{\text{BX}}/df \quad \text{при } f = f_{1m}, \\ Q_{02m} &= (f_{2m}/2G_{\text{BX}})dB_{\text{BX}}/df \quad \text{при } f = f_{2m}, \end{aligned} \quad (5)$$

где R_{BX} и G_{BX} – активные составляющие входного сопротивления Z_{BX} и проводимости $Y_{\text{BX}} = Z_{\text{BX}}^{-1}$; X_{BX} и B_{BX} – реактивные составляющие входного сопротивления и проводимости при отсутствии потерь; $m = 1, 2, 3, \dots$

Частоты собственных колебаний определяются в результате решения уравнений $X_{\text{BX}}(f_{1m}) = 0$ или $B_{\text{BX}}(f_{2m}) = 0$.

Для отрезка длиной линии при условии $\alpha_n l \ll 1$ из (1) имеем:

$$X_{\text{BX}} = -Z_0 \operatorname{ctg} \theta, \quad B_{\text{BX}} = -Z_0^{-1} \operatorname{tg} \theta,$$

$$R_{\text{BX}} = Z_0 \alpha_n l [(1 - \sin \theta \cos \theta)/\theta]/\sin^2 \theta, \quad G_{\text{BX}} = \alpha_n l / Z_0 [(1 - \sin \theta \cos \theta)/\theta]/\cos^2 \theta,$$

где $\theta = \beta l = (\omega l/c)n$ – электрическая длина резонатора на частоте f ; $\omega = 2\pi f$; c – скорость света. R_{BX} и G_{BX} связаны соотношениями $G_{\text{BX}} = R_{\text{BX}}/X_{\text{BX}}^2$, $R_{\text{BX}} = G_{\text{BX}}/B_{\text{BX}}^2$.

Используя эти формулы, запишем выражение (5) для собственной добротности на частотах параллельного резонанса в виде

$$Q_{02m} = (f_{2m}/2G_{\text{BX}})dB_{\text{BX}}/df = (f_{2m}/2R_{\text{BX}})dB_{\text{BX}}/df \quad \text{при } f = f_{2m}.$$

Электрические длины резонаторов на частотах последовательного и параллельного резонансов определяются из выражений

$$\begin{aligned} \theta_{1m} &= \pi(2m - 1)/2, \\ \theta_{2m} &= \pi m, \quad m = 1, 2, \dots \end{aligned}$$

При этом выражения для собственных добротностей принимают вид $Q_{01m} = 2\pi f_{1m} n Z_0 / (R_m c)$, $Q_{02m} = 2\pi f_{2m} n Z_0 / (R_m c)$, где R_m характеризует потери на соответствующих резонансных частотах.



Для резонансной частоты f_0 длины резонаторов составляют: $l_{1m} = c(2m - 1)/(4f_0n)$, $l_{2m} = c(2m)/(4f_0n)$, а значения добротностей при последовательном и параллельном резонансах равны $Q_0 = 2\pi f_0 n Z_0 / (R'c)$.

Если толщина t проводящего полоска с шириной W превышает толщину скин-слоя δ_s ($t > \delta_s$), то сопротивление $R' = \rho_s / (W\delta_s) = R_s / W$, где $R_s = \rho_s / \delta_s$ – поверхностное сопротивление, ρ_s – удельное сопротивление проводящего полоска. Для металла $R_s = (\pi f \mu_0 \rho_s)^{0.5}$, $\delta_s = (\rho_s / \pi f \mu_0)^{0.5}$, следовательно, R_s и R' возрастают пропорционально $f^{0.5}$. Если толщина скин-слоя $\delta_s > t$, то сопротивление проводящего полоска $R_s = W R' = \rho_s / t$ не зависит от частоты.

При этом добротность резонатора $Q_0 = 2\pi f_0 h Z_n / (c R_{st})$, где $R_{st} = R_s$ при $t > \delta_s$ и $R_{st} = \rho_s / t$ при $t < \delta_s$; $Z_n(\epsilon, W/h, t/h) = (W/h) Z_0 n$ (h – толщина диэлектрической подложки).

Значения Z_n (W/h) для микрополосковой линии с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 9,6$ и относительной толщиной $t/h = 0,005$ приведены в таблице.

W/h	0,1	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
Z_n , Ом	26,1	83,2	128,0	176,0	247,0	292,0

Для полосковой линии с толщиной полоска $t \gg \delta_s$ выражение принимает вид $Q_0 = (2h/\delta_s)(Z_n/120\pi)$. В частности, для микрополоскового резонатора, выполненного из поликора ($\epsilon = 9,6$) толщиной $h = 1$ мм, с медным полоском ($\rho_s = 1,72 \cdot 10^{-6}$ Ом·см при $T = 300$ К) шириной $W = 1$ мм и толщиной $t = 5$ мкм на частоте $f = 1$ ГГц получаем: $\delta_s = 2$ мкм и $Q_0 = 350$.

Длина рассмотренного выше линейного отрезка полоскового резонатора сравнительно велика, особенно в длинноволновой части диапазона СВЧ. Уменьшение его размера достигается свертыванием полоска в меандр или спираль. При расчете характеристик таких резонаторов необходимо учитывать электромагнитную связь между полосками. Влияние электромагнитной связи на добротность можно оценить на примере резонатора, образованного двумя связанными полосками. Резонатор из двух полосок представляет собой восьмиполосник (рис. а), описываемый матрицей сопротивлений $[Z]$, связывающей напряжения U_j и токи I_j на его клеммах ($j = 1 \dots 4$):

$$U = [Z] I. \quad (6)$$

Компоненты матрицы $[Z]$ определяются из выражений [2]:

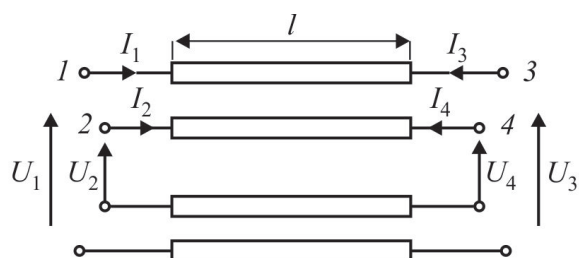
$$\begin{aligned} Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = Z_{44} &= (Z_e^{11} + Z_o^{11})/2, \\ Z_{12} = Z_{21} = Z_{34} = Z_{43} &= (Z_e^{11} - Z_o^{11})/2, \\ Z_{13} = Z_{31} = Z_{24} = Z_{42} &= (Z_e^{12} + Z_o^{12})/2, \\ Z_{14} = Z_{41} = Z_{23} = Z_{32} &= (Z_e^{12} - Z_o^{12})/2, \\ Z_{e,0}^{11} &= Z_{0e,0o} \operatorname{cth}(\gamma_{e,o} l), \\ Z_{e,0}^{12} &= Z_{0e,0o} \operatorname{sh}^{-1}(\gamma_{e,o} l), \end{aligned} \quad (7)$$

где $Z_{0e,0o}$ и $\gamma_{e,o}$ – комплексные волновые сопротивления и постоянные распространения четного и нечетного типов волн в связанных линиях.

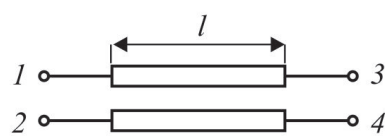
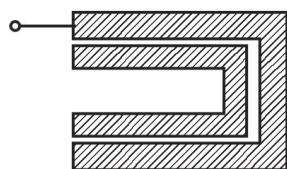
Если считать, что потери в линиях малы, а волновые числа для четного и нечетного типов волн примерно равны, то выражения (7) существенно упрощаются, поскольку тогда

$$Z_{11} = -j\rho \operatorname{ctg}\theta, Z_{12} = -j\Delta \operatorname{ctg}\theta, Z_{13} = -j\rho \sin^{-1}\theta, Z_{14} = -j\Delta \sin^{-1}\theta, \quad (8)$$

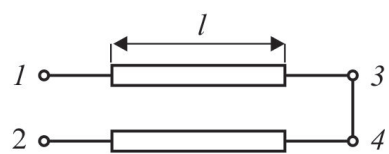
где $\rho = (Z_{0e} + Z_{0o})/2$, $\Delta = (Z_{0e} - Z_{0o})/2$, $\theta = \omega n l / c$.



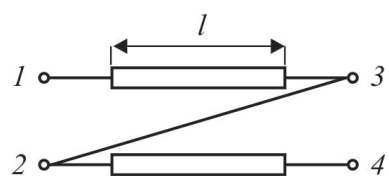
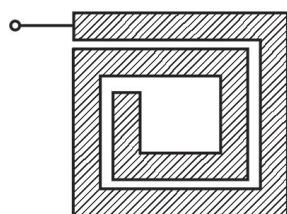
а)



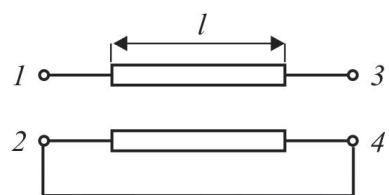
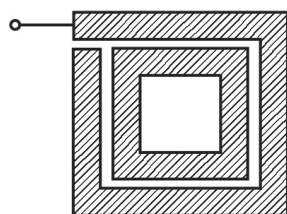
б)



в)



г)



д)

Резонаторы из двух связанных линий (а) в виде разомкнутых отрезков линий (б), «подковы» (в), двухвитковой спирали (г), «кольца» (д)



Из двух связанных линий можно составить несколько типов резонаторов (см. рисунок). Входные полные сопротивления этих резонаторов определяются из условий, при которых токи или напряжения на свободных клеммах равны 0.

1. Клеммы 2...4 разомкнуты. Относительно клемм 1 резонатор представляет разомкнутые отрезки связанных линий (рис. б), поэтому $Z_{\text{вх}} = Z_{11}$.

2. Клеммы 2 разомкнуты, а клеммы 3 и 4 соединены между собой. В этом случае образуется резонатор в виде «подковы» (рис. в).

$$Z_{\text{вх}} = Z_{11} - 0,5(Z_{13} - Z_{14})^2 / (Z_{11} - Z_{12}).$$

3. Клеммы 4 разомкнуты, а клеммы 3 и 2 соединены между собой (резонатор в виде двухвитковой спирали, рис. г).

$$Z_{\text{вх}} = Z_{11} - 0,5(Z_{12} - Z_{13})^2 / (Z_{11} - Z_{14}).$$

4. Клеммы 3 разомкнуты, а клеммы 2 и 4 соединены между собой (резонатор в виде «кольца», рис. д).

$$Z_{\text{вх}} = Z_{11} - 0,5(Z_{12} - Z_{13})^2 / (Z_{11} - Z_{13}).$$

Помимо этих четырех резонаторов представляет интерес полосковый элемент на связанных линиях, в котором между клеммами 2 и 4 включено комплексное сопротивление Z . Исследуем, в частности, как Z влияет на фазу сигнала СВЧ, прошедшего с входа 1 на выход 3.

Коэффициент передачи S_{31} между клеммами 1 и 3 с учетом включенного сопротивления Z имеет вид

$$S_{31} = \frac{2Z_0(Z_{13} - Z_1)}{(Z_{11} + Z_1 + Z_0)^2 - (Z_{13} - Z_1)^2}, \quad (9)$$

где Z_0 – волновое сопротивление подводящих линий;

$$Z_1 = \frac{(Z_{14} - Z_{12})^2}{Z + 2(Z_{13} - Z_{11})}. \quad (10)$$

После подстановки выражений (8) в (9) и (10) получаем окончательную формулу

$$S_{31} = C \frac{Z + A}{Z + B}, \quad (11)$$

где

$$C = \frac{1}{\cos(\theta) + jm \sin(\theta)},$$

$$B = -j2\rho \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \left\{ 1 - j \frac{\Delta^2}{\rho Z_0} \cdot \frac{\sin(\theta) + j \frac{Z_0}{\rho} [1 - \cos(\theta)]}{\cos(\theta) + jm \sin(\theta)} \right\}, \quad (12)$$

$$A = -j2\rho \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right].$$

Рассмотрим два крайних значения сопротивления Z .

Если клеммы 2 и 4 разомкнуты, то $Z = \infty$ и $S_{31} = C$, тогда фаза прошедшего сигнала φ определяется из уравнения

$$\operatorname{tg}(\varphi) = -m \cdot \operatorname{tg}(\theta). \quad (13)$$

При $m = 1$ коэффициент передачи $S_{31} = e^{-j\theta}$ и фаза равна $-\theta$, что соответствует формуле (13): $\varphi = -\theta$. Условие $m = 1$ описывает случай, когда расстояние между связанными полосками существенно больше толщины диэлектрика. Так, согласно [3], при $\epsilon = 9,6$; $W/h = 1$ и $S/h > 5$ сопротивление $Z_{0e} = Z_{0o} = \rho = 50$ Ом. Когда расстояние между связанными полосками существенно меньше толщины диэлектрика, то, согласно [3], при $\epsilon = 9,6$; $W/h = 1$ и $S/h = 0,05$ имеем: $Z_{0e} = 65$ Ом; $Z_{0o} = 25$ Ом, $\rho = 45$ Ом. При дальнейшем сближении двух полосок они превращаются в один полосок шириной $W/h = 2$, при этом сопротивление стремится к $\rho = 35$ Ом [3].

Поскольку для $\rho > Z_0$ и $\rho < Z_0$ величина m всегда имеет значения, превышающие 1, то фаза прошедшего сигнала (13) не равна $-\theta$, а зависит как от θ , так и от m . При $\theta = \pi/4$ тангенс угла θ равен 1, поэтому $\operatorname{tg}(\varphi) = -m$. Как правило, величина m незначительно превышает 1, поэтому можно считать, что в первом приближении $\varphi = -\pi/4 - (m - 1)/2$.

Таким образом, у сигнала СВЧ, прошедшего через связанную полосковую линию, один полосок которой имеет разомкнутые концы, фаза получает дополнительный набег, равный $(m - 1)/2$.

Если клеммы 2 и 4 короткозамкнуты, то $Z = 0$ и коэффициент передачи (11) принимает вид

$$S_{31} = C \cdot \frac{A}{B} = \frac{1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2 [1 - \cos(\theta)]}{\cos(\theta) \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2 \right] + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2 + j \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{Z_0^2 + \rho^2 - \Delta^2}{2\rho Z_0}}. \quad (14)$$

Фаза прошедшего сигнала φ определяется из уравнения

$$\operatorname{tg}(\varphi) = - \frac{\sin(\theta) \left[m - \frac{\rho}{2Z_0} \cdot \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2 \right]}{\cos(\theta) \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2 \right] + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta}{\rho}\right)^2}. \quad (15)$$

Когда расстояние между связанными полосками существенно больше толщины диэлектрика, то $\Delta = 0$ и уравнение (15) совпадает с (13) при $m = 1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маттей, Г. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1. / Г. Маттей, Л. Янг, Е. М. Джонс; пер. с англ.; под ред. А. В. Алексеева и Ф. В. Кушнера. – М.: Связь, 1971. – 365 с.
2. Альтман, Дж. Устройства СВЧ / Дж. Альтман; пер. с англ.; под ред. И. В. Лебедева. – М.: Мир, 1968. – 487 с.
3. Ганстон, М.А.Р. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ / М.А.Р. Ганстон. – М.: Связь, 1976.

Статья поступила 25 октября 2018 г.

УДК 621.317.765.8:621.38

ГЕНЕРАЦИЯ ШУМОВЫХ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Б. Е. Кяргинский

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Рассматриваются вопросы генерации шумовых широкополосных сигналов с помощью ЛБВ, транзисторов и микросхем, приводятся экспериментальные результаты.

КС: спектр, мощность, напряжение, ток

GENERATION OF NOISE SIGNALS BY ELECTRONIC DEVICES

B. E. Kyarginsky

FIRE named after V.A. Kotelnikov RAS, Fryazino

The issues of generating wideband noise signals using TWTs, transistors and microcircuits are considered, and experimental results are presented.

Keywords: spectrum, power, voltage, current

Генерацию шумовых сигналов можно производить с помощью ламп бегущей волны (ЛБВ), транзисторов, диодов, микросхем и других электронных устройств. С этой целью использовали две ЛБВ типа УВ-35. Выход одной ЛБВ, применяемой в качестве нелинейного элемента, соединялся с входом другой ЛБВ, называемой усилителем. Выход усилителя через тройник подключался к входу нелинейного элемента. Тройник представлял собой кольцевой сумматор, выполненный на полосковой линии из материала ФАФ толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью 2,8. Сумматор рассчитан на частоту 4 ГГц. ЛБВ работали при следующих электрических режимах: для усилителя $U_{\text{кол}} = 1400$ В, $U_{\text{а}} = 220$ В, $U_{\text{фок}} = -10$ В, $U_{\text{зс}} = 1230$ В, $I_{\text{кол}} = 9$ мА, $I_{\text{зс}} = 0,8$ мА; для нелинейного элемента $U_{\text{кол}} = 1400$ В, $U_{\text{а}} = 110$ В, $U_{\text{фок}} = -80$ В, $U_{\text{зс}} = 1120$ В, $I_{\text{кол}} = 2$ мА, $I_{\text{зс}} = 0,1$ мА.

Так как ЛБВ при усилении сигналов имеет большой коэффициент усиления и широкую полосу частот усиления сигналов, то соединение в кольцо двух ЛБВ создавало благоприятные условия для генерации шумоподобных сигналов в широкой полосе частот [1–3]. Шумовой сигнал имел спектр, показанный на рис. 1, а, его мощность составляла около 60 мВт, полоса сигнала располагалась от 3 до 4,5 ГГц по уровню примерно 15 дБ от максимума. Для подстройки режима производилась небольшая перестройка напряжения питания замедляющих структур и фокусирующих элементов ламп. Для измерения мощности сигнала применялся ваттметр типа МЗ-56.

На рис. 1, б приведены зависимости $P_{\text{вых}}$ от $P_{\text{вх}}$ для лампы УВ-35 при режиме питания: $U_{\text{кол}} = 1400$ В, $U_{\text{фок}} = -5$ В, $U_{\text{а}} = 200$ В, $U_{\text{зс}} = -1350$ В, $I_{\text{кол}} = 5$ мА, $I_{\text{зс}} = 0,5$ мА, если усиливать гармонический сигнал. Кривая 1 принадлежит частоте 4 ГГц, кривая 2 – частоте 4,5 ГГц, кри-

вая 3 – частоте 5 ГГц. Измерения проведены при токе коллектора ниже номинального, поэтому выходная мощность была меньше номинальной, с которой работает лампа.

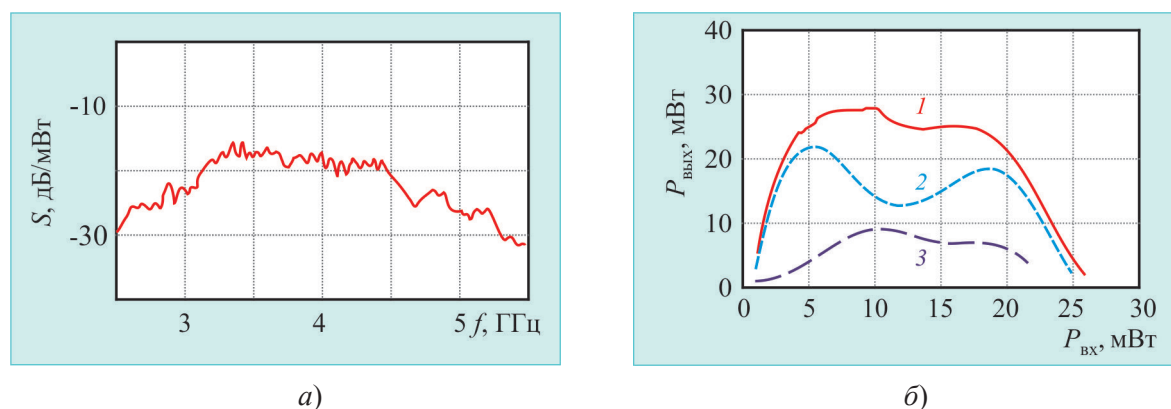


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности мощности выходного сигнала от частоты (а) и $P_{\text{вых}}$ от $P_{\text{вх}}$ (б) при генерации на ЛБВ типа УВ-35

Если две лампы типа УВ-35 заменить на лампы УВ-34, то можно получить шумовой сигнал в полосе от 2 до 4 ГГц по уровню 15 дБ от максимума. При этом режим питания был следующий: для усилителя $U_{\text{кол}} = 1400$ В, $U_{\text{зс}} = 1220$ В, $U_{\text{а}} = 210$ В, $U_{\text{фок}} = 0$, $I_{\text{кол}} = 11$ мА, $I_{\text{зс}} = 0,3$ мА и для нелинейного элемента $U_{\text{кол}} = 1400$ В, $U_{\text{зс}} = 1130$ В, $U_{\text{а}} = 130$ В, $U_{\text{фок}} = -30$ В, $I_{\text{кол}} = 4$ мА, $I_{\text{зс}} = 0,3$ мА. Суммарная мощность выходного сигнала составляла около 160 мВт.

При использовании ламп типа УВ-42 генерация наблюдалась в диапазоне от 2,75 до 5,5 ГГц по уровню 15 дБ от максимума с выходной суммарной мощностью около 32 мВт.

Для ламп типа УВ-43 можно было получить шумовой сигнал в полосе от 2,5 до 4,0 ГГц, при этом суммарная выходная мощность составляла около 26 мВт.

Применение транзисторов для генерирования шумовых сигналов было осуществлено в следующей конструкции. Генератор состоял из двух полосовых фильтров, к которым подключены три транзистора типа 2Т647А-2 (рис. 2). Конструкция выполнена на микрополосковой линии (материал – ФАФ толщиной 1 мм с диэлектрической проницаемостью 2,8) и содержала переменные конденсаторы типа КПК-1 величиной 4...20 пФ. Базовые выводы транзисторов находились на земле, эмиттеры через сопротивление 1 Ом были подсоединены к напряжению

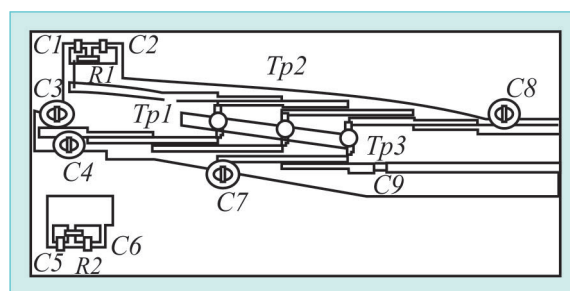


Рис. 2. Топология генератора на транзисторах типа 2Т647А-2 и полосно-пропускающих фильтрах:

$C1, C2, C5, C6$ – емкости по 0,01 мкФ; $C3, C4, C7, C8$ – переменные емкости по 4...20 пФ; $C9$ – емкость 100 пФ; $R1 = 1$ Ом; $R2 = 5$ Ом; $Tp1...Tp3$ – транзисторы 2Т647А-2

$U_{\text{э}} = -0,72$ В, сопротивление заблокировано емкостями $0,01$ мкФ типа К10-9. На коллекторные выводы подавалось напряжение 5 В через сопротивление 5 Ом, заблокированное емкостями $0,01$ мкФ. Полосовые фильтры трехзвенные, четвертьволновые, с длиной звена $4,5$ мм. Для получения генерации необходимо производить небольшие изменения питающих напряжений и подстройки переменных конденсаторов, потребляемый ток – 100 мА. Спектр выходного сигнала показан на рис. 3, его мощность составляла около $2,4$ мВт.

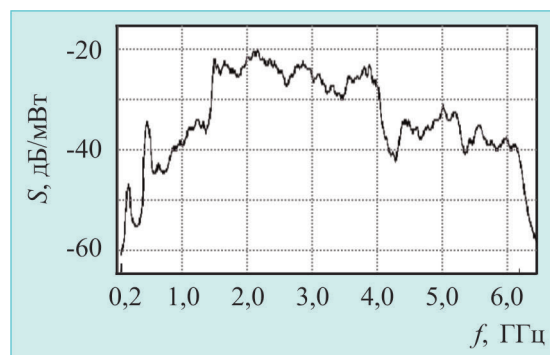


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности мощности выходного сигнала от частоты с транзисторами типа 2Т647А-2

Полосно-пропускающие фильтры (рис. 4), используемые в генераторе, рассчитаны по чебышевской характеристике [3, 4].

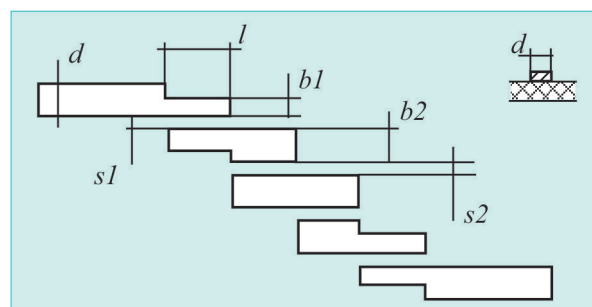
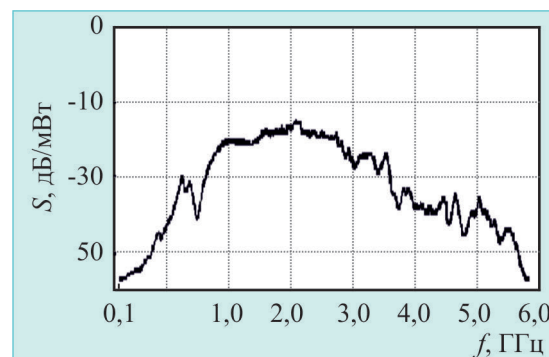


Рис. 4. Топология полосно-пропускающего фильтра ($b1 = 1,7$ мм; $s1 = 0,1$ мм; $b2 = 1,7$ мм; $s2 = 1$ мм)

В конструкции (см. рис. 2) применены также транзисторы типа 2Т938А-2, в этом случае длина звеньев увеличена до 15 мм при сохранении прежними других размеров фильтров. Генерируемый сигнал показан на рис. 5. Питание генератора: $U_{\text{кол}} = 5$ В, $U_{\text{э-б}} = -0,7$ В, $I_{\text{кол}} = 0,26$ мА; выходная

Рис. 5. Зависимость спектральной плотности мощности выходного сигнала от частоты с транзисторами типа 2Т938А-2





мощность сигнала составляла 2,6 мВт. Увеличение коллекторного напряжения до 10 В позволяло увеличить выходную мощность без изменения характера самого сигнала до 20 мВт.

Исследования показали, что интегральные микросхемы, применяемые в качестве усилителей СВЧ-сигналов, можно использовать как генераторы широкополосных шумовых сигналов. Если усилители соединить в кольцо, связав их через переменные емкости, то можно получить шумовую генерацию сигналов.

Схема генератора состояла из трех интегральных усилителей типа ADA-4743 (рис. 6), включенных в микрополосковую линию (материал – ФАФ толщиной 1 мм, с диэлектрической проницаемостью 2,8). Обратная связь осуществлялась через кольцевой сумматор, рассчитанный на центральную частоту 4 ГГц. С него сигнал, ослабленный на 6 дБ, поступал на входной усилитель $Uc1$ через переменную емкость $C1$ типа TZCO3 (2...6 пФ). Такая же переменная емкость $C4$ поставлена между вторым $Uc2$ и третьим $Uc3$ усилителями. Две постоянные емкости по 50 пФ ($C1$ и $C6$) типа К10-9 разделяют усилители $Uc1$ и $Uc2$ и выход $Uc3$ с кольцевым сумматором. На усилители подавалось напряжение 3,8 В при токе 0,13 А. Питание подавалось через сопротивление $R1$ величиной 5 Ом, блокированное емкостями $C5$ и $C6$ (0,01 мкФ), напряжением 3,7 В при токе 0,1 А. Зависимость спектральной плотности широкополосного шумоподобного сигнала от частоты при выходной мощности сигнала 1 мВт показана на рис. 7.

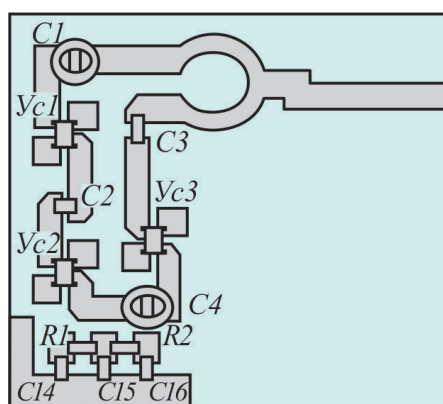


Рис. 6. Топология генератора с тремя микросхемами

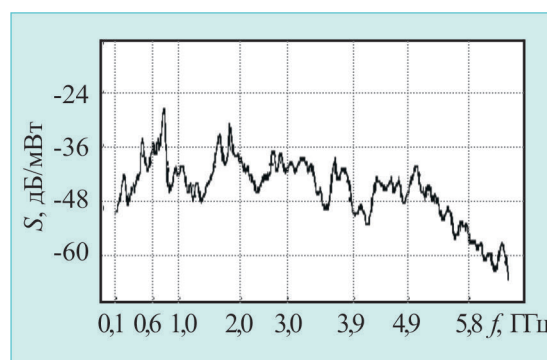


Рис. 7. Зависимость спектральной плотности мощности выходного сигнала от частоты при генерации с тремя микросхемами ADA-4743

Для получения широкополосного сигнала с частотой 3 ГГц и выше были применены два фильтра верхних частот с усилителями на двух микросхемах ADA-4743. Они были подсоединены к широкополосному генератору, причем первый фильтр верхних частот поставлен после генератора и перед первым усилителем, второй – после усилителей. Один фильтр не полностью подавлял нижние частоты, поэтому был поставлен второй фильтр. Зависимость спектральной плотности сигнала от частоты дана на рис. 8 при выходной мощности сигнала 4,4 мВт. Фильтр верхних частот рассчитан по чебышевской характеристике [3], число звеньев – семь, они состоят из трех конденсаторов величиной по 0,6 пФ и четырех индуктивностей (две индуктивности – по 0,7 нГн и две индуктивности – по 1,1 нГн). Индуктивности сконструированы в виде полосок шириной 2 мм и длиной 2 и 3 мм, один конец полоски заземлен. Характеристика одного фильтра показана на рис. 9.

Топология генератора представлена на рис. 10. В ней $Uc1...Uc4$ – микросхемы ADA-4743; $C1, C4$ – переменные конденсаторы типа TZCO3 по 2...6 пФ; $C2, C3, C11...C13$ – конденсаторы



по 50 пФ; $C5...C10$ – конденсаторы по 0,6 пФ; $C14...C16$ – конденсаторы по 0,01 мкФ. Питание подавалось через сопротивления $R1$ и $R2$ величиной по 5 Ом напряжением 3,0 В при токе 0,2 А.

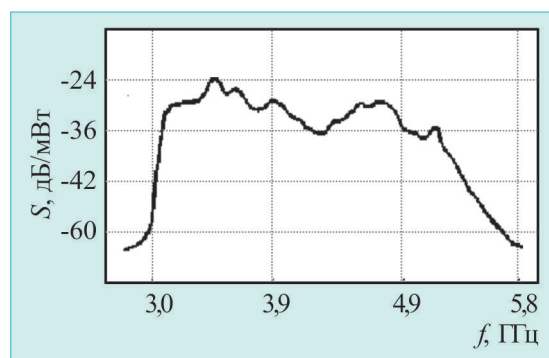


Рис. 8. Зависимость спектральной плотности мощности выходного сигнала от частоты при генерации с пятью микросхемами ADA – 4743

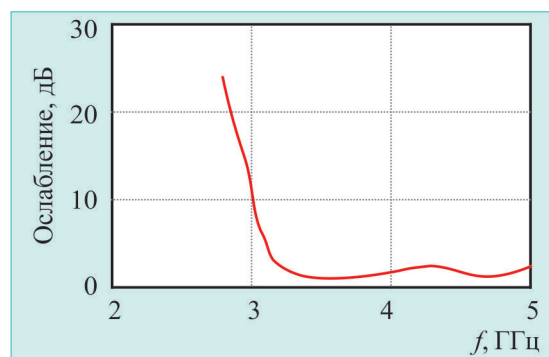


Рис. 9. Характеристика фильтра верхних частот

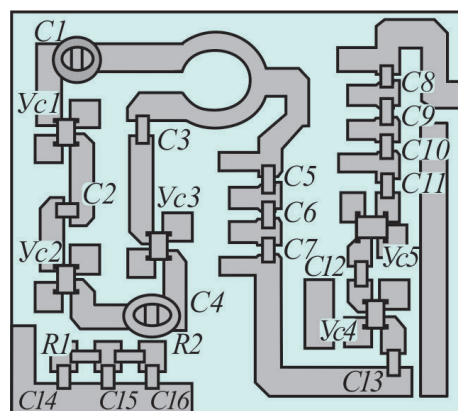


Рис. 10. Топология генератора с пятью микросхемами

Рассмотренные примеры генерации широкополосных шумовых сигналов дают возможность применять те или другие виды электронных устройств в зависимости от поставленной задачи.



ЛИТЕРАТУРА

1. **Дмитриев, А. С.** Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио- и СВЧ-диапазонах / А. С. Дмитриев и др. // Радиотехника. – 2000. – № 3.
2. **Кальянов, Э. В.** Кольцевая многокаскадная автоколебательная система с хаотической динамикой / Э. В. Кальянов и др. // Радиотехника. – 2005. – № 3.
3. **Фуско, В.** СВЧ-цепи / В. Фуско. – М.: Радио и связь, 1990.
4. Конструирование и расчет полосковых устройств / Под ред. И. С. Ковалева. – Изд. Связь, 1974.

Статья поступила 20 апреля 2018 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

БАНКОВ С. Е. Интегральная СВЧ-оптика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 600 с.: ил.

В книге излагаются принципы построения, методы теоретического исследования и методы проектирования интегральных квазиоптических устройств СВЧ-диапазона. Рассмотрены вопросы электродинамики таких структур, в том числе эквивалентные граничные условия на тонких пленках и волны в планарных волноводах с тонкими пленками. Рассмотрены конструкции и методы проектирования планарных зеркал, в том числе двухслойных, а также конструкции и методы проектирования различных типов интегральных линз, включая линзы с принудительным преломлением, линзы на основе частопериодических решеток, градиентные линзы. Анализируются облучатели квазиоптических линз и зеркал; наибольшее внимание уделено многоканальным матричным облучателям. Приведен обзор построенных с использованием оптических принципов интегральных многоканальных, многолучевых приемопередающих устройств СВЧ- и миллиметрового диапазонов.

Книга предназначена студентам старших курсов и аспирантам радиотехнических и радиофизических специальностей, специалистам в области разработки радиоаппаратуры СВЧ- и миллиметрового диапазонов.

Электроника интегральных схем. Лабораторные работы и упражнения. Учебное пособие под редакцией д-ра техн. наук К. О. Петросянца. – М.: СОЛОН-Пресс, 2017. – 556 с.: ил.

Рассмотрены принципы работы и электрические характеристики биполярных и МОП-транзисторов интегральных схем, базовых элементов цифровой и аналоговой схемотехники, БМК и ПЛМ, микроконтроллеров и микропроцессоров. Описаны методики выполнения лабораторных, расчетных на ЭВМ, курсовых, самостоятельных и др. работ. Пособие предназначено для бакалавров и магистров различных специальностей, изучающих электронику, микроэлектронику и схемотехнику; отдельные разделы могут быть полезными для аспирантов и инженеров-практиков.



ИСТОРИЯ

УДК 001 (09)

ЛАРИСА АНАТОЛЬЕВНА ПАРЫШКУРО

А. К. Балыко

АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

LARISA ANATOLYEVNA PARYSHKURO

A. K. Balyko

JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino



Лариса Анатольевна Парышкуро
(1924 – 1991 гг.)

Имя Ларисы Анатольевны Парышкуро неотделимо от славного «Истока» и столь же славного города Фрязино.

Выдающийся специалист Министерства электронной промышленности СССР, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, кавалер двух орденов Ленина, орденов Трудового Красного Знамени и «Знак Почета», «Почетный радист СССР», пенсионер Союзного значения, член КПСС с 1954 г. В течение 35 лет она была на вершине славы и почета, в центре основных событий подразделения, предприятия и министерства.

Л. А. Парышкуро родилась 26 декабря 1924 г.

Свою научно-производственную деятельность Лариса Анатольевна начала на «Истоке» в 1948 году после окончания Московского энергетического института. Её первыми руководителями и наставниками были Николай Дмитриевич Девятков и Сергей Михайлович Никифоров – начальник лаборатории № 173, лауреат Ленинской премии (полученной в период работы на ленинградском объединении «Светлана»). Успехи и огорчения в разработке новых изделий электронной техники (ИЭТ) она делила со своими молодыми сотрудниками Еленой Алексеевной Зюлиной и Михаилом Борисовичем Голантом. После переезда С. М. Никифорова в Ленинград она работала под руководством начальников Евгении Степановны Евтифеевой, Ахмата Тимуровича Мишкина и Ивана Ивановича Бродуленко. За 13 лет Л. А. Парышкуро прошла должности инженера, старшего и ведущего инженера. В отделе 170 познавала она азы электронной техники и её

технологии, работала, не жалея сил и здоровья. На скромную зарплату содержала маму и воспитывала брата.

В 1961 году Л. А. Парышкуро возглавила лабораторию, а позднее и большой отдел в НПК-17. Она являлась одним из самых авторитетных руководителей и специалистов в НПК-17 и НПП «Исток» в области разработки и применения приборов для генерирования малых мощностей. За 40 лет своей энергичной и результативной научно-производственной деятельности она совместно с возглавляемым ею коллективом разработала и внедрила в производство более 40 типов ИЭТ, на базе которых была создана радиоэлектронная аппаратура различного назначения, успешно используемая и в настоящее время.

В коллективе Ларисы Анатольевны работали известные на предприятиях страны специалисты: кандидат технических наук Ю. Н. Кузнецов; кандидат технических наук В. Н. Русаков, впоследствии ставший начальником НПК-7; В. А. Мальцев, возглавлявший НПК-17 в течение четверти века; начальник лаборатории В. А. Павлов; лауреаты Государственной премии СССР главные конструктора Н. П. Антоненко, В. Н. Лебедев, А. М. Сергиенко; ведущие инженеры А. М. Бугаева, Э. А. Бердацева, А. К. Русакова; кандидаты технических наук Д. А. Ковтунов и А. И. Абраменков; начальник технического бюро цеха А. К. Галанин; кандидат технических наук, впоследствии главный инженер НПП «Циклон-тест», А. И. Афанасьев; Глава города Фрязино в 1994 – 2000 гг. доктор физико-математических наук В. П. Савченко и многие другие.

О Ларисе Анатольевне трудно сказать и написать коротко из-за ее огромного и разностороннего вклада в электронную технику, общественно-политическую деятельность и жизнь нашего предприятия. Её жизнь и деятельность – редкий выдающийся пример преданности делу, Родине, государству и общественно-политическому строю.

Понятие о личной жизни у неё отсутствовало, а вся её научно-производственная и общественно-политическая работа была направлена на то, чтобы сделать больше и лучше в короткие сроки. Она работала на износ, беспощадно была требовательна к себе и подчинённым. Не была равнодушной не только на работе, но и ко всему окружающему в городе и стране. Её энергии и инициативе не было конца, во всём и везде она была неиссякаема. Стремилась в делах быть первой и оригинальной. Все, кто пассивно и безответственно работал, был непринципиальным, лживым, препятствовал разработкам и внедрению ИЭТ в производство и аппаратуру, не работал в полную нагрузку, проявлял недисциплинированность и пренебрежение к культуре производства, считались её первыми врагами, от которых она требовала её защитить и охранять. Она любила и наслаждалась живой, оперативной работой, той работой, которая «горела». Не по душе ей была глубокая научно-техническая работа, связанная с анализами, обобщениями и расчётами. Будучи одарённым человеком, талантливым организатором, она была влюблена в свою работу, признавала её самой важной и нужной, а остальные работы считала менее актуальными. В связи с этим нередко была субъективна в оценке научно-технической деятельности других специалистов, проявляла излишнюю эмоциональность, что отрицательно сказывалось на взаимоотношениях в коллективе и на её здоровье. В конечном счёте всегда побеждал её светлый ум и железная логика и устанавливался мир в коллективе. И ради общего дела, ради защиты интересов коллектива и каждого сотрудника, ради разработки, внедрения и применения ИЭТ, успешного выполнения их поставок, независимо от того, кто их конструктор, забывалось всё и оказывалась ею всевозможная помощь.

Лариса Анатольевна внесла большой вклад в развитие отечественной электронной техники СВЧ. Одна из основных её заслуг в этой области состоит в разработке и внедрении в произ-

водство новых материалов и технологических процессов, обеспечивших качественный скачок в надёжности и долговечности ИЭТ малой мощности нескольких классов, широко используемых в различной РЭА не только в нашей стране, но и за её пределами. В частности, она принимала самое активное участие в разработке ИЭТ для Кубы и передавала опыт разработок ИЭТ китайским специалистам.

Старейший сотрудник «Истока», 25 лет возглавлявший завод «Рений» при НПО «Исток», 24 сентября 2018 г. отметивший свое 90-летие, Иван Михайлович Панас рассказывает: «На протяжении многих лет Л. А. Парышкуро олицетворяла целую эпоху в жизни и деятельности НПК-17 и предприятия в целом. Начиная новые разработки, Лариса Анатольевна не допускала и мысли, что созданные ею изделия не будут внедрены в производство и не будут применены. Ибо весь смысл её жизни состоял в результативности работы».

Начальник НПК-17 (1957 – 1982 гг.), ветеран Великой Отечественной войны, лауреат Ленинской премии, кандидат технических наук Иван Иванович Бродуленко так вспоминал о своей первой помощнице: «Лариса Анатольевна была уважаемым авторитетом для разработчиков приборов и производственников, надёжным партнером и коллегой, а для больших вышестоящих начальников и безупречным ответственным исполнителем, никогда и ни в чем их не подводившим. Это был Человек дела, фанатик и партнер, специалист и руководитель, с которым, как она сама часто повторяла, можно было ходить в разведку и успешно выполнять самые сложные и срочные задания. И это хорошо понимали вышестоящие руководители, которых она очень любила и почитала, и известные разработчики РЭА, часто злоупотреблявшие ее деловыми качествами и производственной нагрузкой. В связи с этим она, пытаясь им помочь, часто отрывалась от реальных производственных возможностей, требовала от себя, непосредственных ее руководителей и подчиненных работ, зачастую не реализуемых по срокам и объему, что отрицательно сказывалось на состоянии ее здоровья».

Напряженная многолетняя работа не могла не сказаться на ухудшении здоровья Ларисы Анатольевны. Наконец оно стало настолько плохим, что выполнять роль первой она была не в состоянии, а второй она быть не хотела, не могла и не привыкла. Последовали сначала устные, а потом и письменные заявления об освобождении ее от занимаемой должности начальника отдела и переводе на любую, не руководящую работу. При этом было высказано пожелание остаться в непосредственном подчинении А. И. Афанасьева, в котором она видела талантливого специалиста и к которому все время питала особую симпатию, по-матерински опекая его, передавая ему огромный жизненный и производственный опыт. В. П. Савченко она пророчила большую общественно-политическую карьеру. С ее благословения он был избран секретарем комсомольской организации, а затем секретарем парткома НПО «Исток».

Работая в отделе, возглавляемом сначала В. П. Савченко, а затем А. И. Афанасьевым, Лариса Анатольевна просила руководство сохранить этому подразделению № 173, т. е. тот номер, с которым были связаны ее молодость, взлет ее организаторских способностей, напряженная многолетняя работа, отмеченная высокими государственными и правительственными наградами и поощрениями. Желание закончить производственную деятельность в подразделении № 173 было не прихотью женщины, а ностальгией Ларисы Анатольевны по тому времени, когда она была полна энергии и жажды достичь новых высот в электронной технике.

Знаменательно, что по ее инициативе и при ее непосредственном участии был создан на нашем предприятии величественный стенд «Они сражались за Родину». В этот стенд она вложила

часть своей души и изобретательства. Каждый День Победы Лариса Анатольевна возлагала к пьедесталу воина-освободителя во Фрязино букет красных тюльпанов.

Вся ее жизнь, ее светлый облик постоянно напоминают сотрудникам предприятия, в том числе ветеранам войны и труда, о легендарной женщине, так много сделавшей для коллектива НПК-17 и «Истока» и всей отечественной электронной техники».

Начальник НПК-17 (1982 – 1986 гг.) кандидат технических наук Анатолий Гаврилович Михальченко рассказывает: «Как одаренный разработчик электровакуумных приборов СВЧ, Лариса Анатольевна внесла большой вклад и в развитие твердотельных приборов СВЧ. С присущей ей требовательностью и ответственностью, она участвовала в создании опытно-производственного технологического участка гибридно-интегральных схем (ГИС), который в дальнейшем стал важным звеном в разработке и выпуске генераторов, фильтров, синтезаторов, в том числе для принципиально новой для «Истока» программы «Синтез – Союз». Своему воспитаннику А. И. Афанасьеву – главному конструктору блока задающих генераторов для системы «Синтез», созданному на ГИС и гибридно-монолитных и монолитных схемах (ГМИС и МИС), она оказывала организационную и техническую помощь в разработке этого сложного устройства, с которым на первых порах было много проблем.

Не без гордости отмечу, что после перевода меня в Москву заместителем генерального директора и генерального конструктора крупного радиопромышленного предприятия – ЦНИИРТИ НПО им. Плешакова мне удалось по подобию участка в НПК-17 создать целое подразделение по изготовлению тонкопленочных ГИС и в дальнейшем развить его с целью применения в них ГМИС и МИС, разработанных в НПК-4 «Истока». Это сыграло решающую роль в разработке новых систем для обороны страны.

НПК-17 всегда был на острие научных и производственных задач предприятия, поэтому не обходилось без проблемных вопросов со смежными министерствами, включая и Министерство обороны, как это было, например, с изделием «Звездочет».

Во всех случаях Лариса Анатольевна занимала твердую, принципиальную позицию, отстаивая интересы своих сотрудников, в том числе и перед генеральным директором С. И. Ребровым, одновременно мобилизуя их на поиск путей выхода из сложных ситуаций.

Ларисе Анатольевне была свойственна и политическая прозорливость. Приход к власти Горбачева М. С. она приняла критически и впоследствии глубоко переживала происходящие в стране события».

Начальник НПК-17 (1986 – 2009 гг.) Валентин Алексеевич Мальцев рассказывает: «Уникальность отделения 17, крепость коллектива и эффективная его работа, на мой взгляд, заключалась, прежде всего, в том, что в НПК-17 не только существовали, но и плодотворно работали специалисты двух полярных школ. Ни в одном другом подразделении предприятия одновременно не трудились два таких разных во всех отношениях человека и крупнейших специалиста, как Л. А. Парышкуро и М. Б. Голант. Оба были светилами отечественной электроники. Оба имели многочисленные государственные награды и звания. Соперничество двух великих «маэстро» не было непримиримой борьбой, это была плодотворная, открытая научно-техническая конкуренция, которая имела только благодатные плоды.

М. Б. Голант был человеком высокоинтеллигентным, мягким. Обладал энциклопедическими знаниями. Всегда был готов всем и всё объяснить. Если не понял, объяснит ещё сто раз. При этом на его лице, как бы вы не старались, никогда бы не заметили и тени раздражения. Он был человеком слова и на ветер слов не бросал, умел всегда взвешивать свои мысли и высказывания.

С другой стороны, М. Б. Голант по-своему, даже как-то болезненно, воспринимал понятия «жёстких» сроков выполнения НИР и ОКР, достижения высокой рентабельности своих работ, необходимости «любой ценой» получить результат. Будучи человеком, практически не подверженным каким-то эмоциональным воздействиям, Михаил Борисович привлекал к себе сотрудников своим пытливым умом, научной организованностью. Кто хотел быстро защитить кандидатскую диссертацию, естественно, был с ним. Его идеи не всегда было легко реализовать на практике, и другая «школа» высказывалась по этому поводу.

Л. А. Парышкуро, напротив, была человеком весьма эмоциональным и весьма энергичным. Своим энтузиазмом, если хотите, умела заразить за пять минут. Поставленной цели специалисты её школы добивались, проходя, казалось, через непроходимые преграды. Личный пример этой выдающейся женщины буквально завораживал. Работая под её началом, с первых минут начинаешь понимать, что срок завершения работы – это такой же параметр прибора, как сто других, оговорённых в ТЗ. Она глубоко вникала в любую проблему, работала без устали и требовала такого же отношения к делу от своих подчинённых. В результате на свет появлялись уникальные приборы с высокими параметрами, причём в строго установленные сроки и не мгновением позже! Высочайшая ответственность за порученное дело, научная интуиция, умение организовать и увлечь за собой коллектив – вот те три кита, на которых стоял её замечательный талант организатора. Таких людей, как Лариса Анатольевна, я нигде и никогда больше не встречал.

Нас, молодых специалистов, конкуренция этих двух школ не то чтобы увлекала, она поглотила полностью. Из неё мы черпали знания, опыт, примеры беспощадной, прежде всего к себе, борьбы за параметры приборов и многое другое, что нам пригодилось выполнять впоследствии».

Начальник НПК-17 (2009 – 2018 гг.) кандидат технических наук Виталий Юрьевич Мякинчиков отмечал ее выдающиеся черты: «Лариса Анатольевна была примером в чёткости, ясности, оперативности и деловитости взаимоотношений между разработчиком и потребителем ИЭТ. Её стиль работы, сложившийся в течение многих лет, обеспечивал качественные разработки и успешное внедрение ИЭТ в производство и аппаратуру в сжатые сроки. Она внесла неоценимый вклад в воспитание и формирование многих специалистов НПК-17. И поэтому Лариса Анатольевна заслуженно считается одним из первых руководителей школы разработчиков ИЭТ НПК-17, проявившим способность умело и рационально использовать специалистов различных уровней, мобилизовать их на решение актуальных проблем, разработку и внедрение электронной техники в производство.

Коллектив, возглавляемый ею, всегда был загружен производственными работами. Однако, вдохновенно работая, умел весело и дружно отдыхать и всегда принимал активное участие в культурно-массовых и общественно-политических мероприятиях подразделения и предприятия».

Доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии РФ Владимир Петрович Савченко вспоминает: «Лариса Анатольевна была ярким представителем советской молодежи, воспитанной в духе патриотизма и веры в коммунистические идеалы. Безропотно и мужественно перенесла она все тяготы и страдания военного и послевоенного времени, закладывала вместе с другими специалистами организационные основы и научно-технические направления развития электронной техники на «Истоке».

Нельзя забывать и о той значимой роли, которую сыграла Лариса Анатольевна при организации и осуществлении строительства МЖК в г. Фрязино.

Из всех праздников самыми светлыми и торжественными для нее были 8 Марта и День Победы. И только очень плохое состояние здоровья было для нее помехой возложения цветов

к могиле Неизвестного солдата в Москве. Лариса Анатольевна искренне и глубоко верила в могучий Советский Союз. Считала, что именно благодаря мощи СССР и его Вооруженных Сил была одержана наша Победа в Великой Отечественной войне. Она преклонялась перед фронтовиками и активно участвовала во всех мероприятиях, связанных с их чествованием.

Лариса Анатольевна регулярно участвовала в праздничных демонстрациях, субботниках, культурно-массовых мероприятиях, юбилеях подразделения и сотрудников нашего коллектива. Но при этом категорически запрещала устраивать любые мероприятия в честь своих юбилеев и дней рождения даже близким, товарищам и коллегам.

С большой доброжелательностью и радостью она приглашала к себе домой и на дачу своих сотрудников для совместного отдыха и душевных разговоров. И вот тут-то в полную меру проявлялись ее хлебосольство, искусство вкусно приготовить и подать на стол редкие блюда, создать уют и тепло для гостей.

Не без гордости скажу, что фотография Ларисы Анатольевны по сей день украшает мой рабочий кабинет».

Владимир Иванович Чибисов, 32 года проработавший начальником отдела внедрения «Истока», однокурсник лауреата Нобелевской премии Ж. И. Алферева, 1 июня 2018 г. отметивший свое 90-летие, вспоминает: «На этапе внедрения роль главного конструктора трудно переоценить. Мне посчастливилось работать со многими разработчиками. Наиболее эффективно внедрялись приборы Л. А. Парышкуро. Они, как правило, шли в важнейшую радиоэлектронную аппаратуру. Хотелось бы отметить, что разработки Ларисы Анатольевны были выполнены на очень высоком уровне, хорошо проработаны, а потому и внедрение их шло спокойно, без срывов. В те годы практически все главные конструкторы сами выезжали на заводы, где внедрялись их изделия. Лариса Анатольевна по много часов сидела с монтажниками и показывала им все операции. То же самое она проделывала и на измерительном стенде».

Лев Андреевич Ракчеев, художник, автор герба Фрязино, ветеран Великой Отечественной войны, в своих воспоминаниях писал: «В конце 50-х годов появилось ответственное правительственное задание: в короткие сроки разработать усилительный клистрон. Работа была поручена Л. А. Парышкуро. В качестве прототипа доставили обгорелый деформированный клистрон американского производства. Мне необходимо было по этой «головешке» выполнить технический рисунок будущего прибора. Лариса Анатольевна приносила мне выполненные ею эскизы узлов, мы подолгу обсуждали с ней детали и компоновали единое целое. Меня восхищала в ней глубина знания и понимания необходимости мельчайших деталей сложнейших приборов, причем не только отечественных, «истоковских», но и зарубежных. Каждое утро директор предприятия Михаил Мстиславович Федоров приглашал Ларису Анатольевну с докладом о ходе работы. Рисунок клистрона нужен был, прежде всего, чтобы понять сложность конструкции, номенклатуру применяемых материалов и уникальность технологических процессов. Параллельно под ее руководством готовились чертежи для разработки и последующего выпуска нового отечественного прибора. Окончательные чертежи и рисунки затем продемонстрировали Председателю Совета Министров СССР А. Н. Косыгину».

Последние три года Лариса Анатольевна работала старшим научным сотрудником, продолжая испытывать недуги. Резкий поворот в производственной и общественно-политической деятельности Ларисы Анатольевны, экономический и общественно-политический кризис в стране усиливали её депрессионное состояние. В 1987 году она окончательно прекращает научно-производственную деятельность на «Истоке», который был для нее по значимости в жизни

основным родным домом в течение более 40 лет. Здесь она творила, сражаясь за отечественную электронную технику, превратив доверенное ей подразделение, по существу, в боевой штаб, работающий круглосуточно.

Всем, проработавшим с Ларисой Анатольевной в непосредственном научно-производственном контакте и знавшим хорошо ее деловые и человеческие качества, ее бурную общественно-политическую деятельность, трудно сказать все о ней на нескольких страницах. И хотя она не была человеком-ангелом и доброй тетей для всех, для большинства, кто к ней обращался за помощью и советом, она сделала очень много хорошего, полезного и доброго. А это не всегда просто и легко и требовало больших усилий, нервов, здоровья и изобретательности.

Она человек и руководитель того периода, который сегодня лихо называется «застойным и административно-командным». Но, независимо от состояния общественно-политической и экономической формации, она всегда оставалась человеком и руководителем большого гражданского долга и никогда не имела особых льгот и привилегий, не злоупотребляла своим авторитетом, а пыталась использовать для нужд коллектива.

Ей, как начальнику лаборатории и отдела, приходилось решать самые сложные и деликатные вопросы, связанные с зарплатой и жильем подчиненных. Но при этом она никогда не злоупотребляла своим авторитетом и уважением, не превышала своих полномочий и действовала только в рамках решений и постановлений четырехугольника НПК-17.

Лариса Анатольевна постоянно и весьма успешно пропагандировала достижения по СВЧ-генераторам малой мощности, была одним из инициаторов и организаторов их выставок, научно-технических конференций и семинаров, активным членом НТС предприятия и подразделения.

За свой безупречный труд Лариса Анатольевна была удостоена высших наград и званий Родины. В 1969 году ей было присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и золотой медали «Серп и Молот». Л. А. Парышкуро была награждена орденом «Знак Почета» (1957 г.), орденом «Трудового Красного Знамени» (1963 г.), вторым орденом Ленина (1963 г.). В 1965 г. она в составе авторского коллектива была удостоена звания лауреата Ленинской премии.

В конце 80-х годов секретарь парткома «Истока» В. П. Савченко создал в городе общественную организацию «Благоустройство» и пригласил в нее всех неравнодушных к виду города. Лариса Анатольевна взялась провести конкурсы среди школьников на лучшее сочинение и рисунок по теме «Мой город». Руководители гороно, школ, учителя горячо откликнулись на это начинание. Конкурс был проведен, победители определены, отрывки из лучших сочинений Л. Н. Гутник опубликовала в газете «За передовую науку», лучшие рисунки детей на больших стендах были выставлены в витринах магазинов по проспекту Мира. Лариса Анатольевна на свои деньги купила редкие книги и художественные альбомы и торжественно в школах вручила их победителям вместе с подписанными ей и В. П. Савченко Почетными грамотами.

Лариса Анатольевна Парышкуро – почетный гражданин города Фрязино.

Л. А. Парышкуро скоропостижно скончалась 15 марта 1991 года на 67 году жизни.

Своим трудовым подвигом Лариса Анатольевна воздвигла себе памятник, призывающий нас продолжать добрые и полезные дела коллектива «Истока» во всех направлениях его многогранной деятельности.



Л. А. Парышкуро – студентка МЭИ



Л. А. Парышкуро – инженер отдела 170



На праздничной демонстрации руководители НПК-17:
М. Б. Голант, В. С. Савельев, Л. А. Парышкуро, И. И. Бродуленко



Министр А. И. Шокин вручает «Истоку» орден Трудового Красного Знамени
(Л. А. Парышкуро крайняя слева)



Митинг при вручении «Истоку» ордена Трудового Красного Знамени
(Л. А. Парышкуро в центре президиума)





Лауреаты Ленинской и Государственной премий СССР.

Слева направо первый ряд: Ю. А. Вецгайлис, А. С. Тагер, А. И. Мельников, В. И. Новоселц, Е. В. Холоднов, Н. А. Лебедев;
второй ряд: В. Г. Бравинский, А. И. Мельников, В. Г. Кармазин, С. И. Ребров, Н. М. Воронков, В. И. Мнойн, Ю. П. Мякинков, Е. В. Чибисова;
третий ряд: Н. И. Прохоров, Г. И. Бродуленко, В. П. Беляев, Л. А. Парышкуро, М. Б. Голант, С. П. Кантюк, К. Г. Ноздрина, В. Я. Эфрос, С. В. Королев;
четвертый ряд: В. А. Волков, Н. И. Лобашов, Г. М. Кауфман, И. И. Бродуленко, А. И. Морозов, Б. С. Самохин, Л. Н. Тимошин, Г. А. Кудинцева, Б. П. Никонов



В президиуме конференции. Слева направо: С. И. Ребров, Ю. И. Седенков, А. Г. Михальченков, И. М. Панас, представитель вышестоящей организации, Л. А. Парышкуро, начальник 1-го Главка И. Т. Якименко, В. И. Волк



Разработчик ОКБ «Светлана» В. Г. Уман вручает Л. А. Парышкуро адрес по случаю ее юбилея

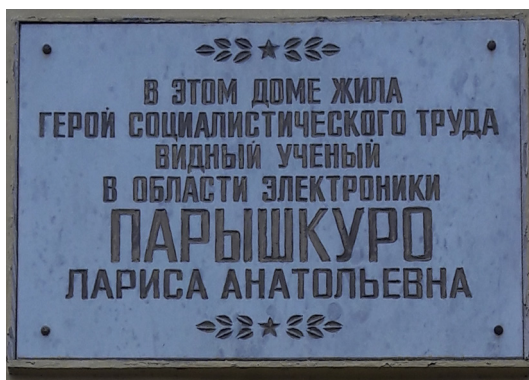




Совещание главных конструкторов «Истока» на базе отдыха «Электрон»
(Л. А. Парышкуро в центре)



В президиуме Всесоюзного совещания передовиков труда
(Л. А. Парышкуро четвертая слева)



Памятная доска на доме,
где жила Л. А. Парышкуро



Бюст Л. А. Парышкуро на аллее Героев Труда



ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

статей, опубликованных в течение 2018 г. в «СВЧ-технике» – первой серии
научно-технического сборника «Электронная техника»

1. История

1. *Балыко А.К.* – 90-летний юбилей Роберта Андреевича Силина. – Вып. 1 (536). – С. 83 – 96.
2. *Балыко А.К.* – От идеи – к прибору. – Вып. 2 (537). – С. 87 – 105.
3. *Балыко А.К.* – Легендарный «истоковец». – Вып. 3 (538). – С. 113 – 125.
4. *Балыко А.К.* – Лариса Анатольевна Парышкуро. – Вып. 4 (539). – С. 78 – 90.

II. Комплексированные изделия и аппаратура

1. *Батаев В.Я., Гринев А.Ю., Измайлов А.А., Евсеев Д.А., Волков А.П.* – Принципы построения и практическая реализация антенных систем с частотно-селективными структурами. – Вып. 3 (538). – С. 16 – 24.
2. *Гаврилов И.А., Степушкин В.А.* – Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование пассивной части широкополосного усилителя СВЧ-сигналов на основе коаксиальных волноводов. – Вып. 3 (538). – С. 36 – 42.
3. *Демшиевский В.В., Цитович А.А.* – Низкопрофильная антенна вытекающей волны с широкой диаграммой направленности на основе волновода, интегрированного в подложку. – Вып. 3 (538). – С. 31 – 35.
4. *Демшиевский В.В., Цитович А.А., Левашов М.С.* – Разработка и электродинамический анализ СВЧ-плат на основе волновода, интегрированного в подложку. – Вып. 3 (538). – С. 25 – 30.
5. *Семёнов М.Г., Семёнов А.С., Налогин А.Г., Першина Л.К., Василевский В.А.* – Комплект ферритовых приборов повышенного уровня мощности для применения в модулях АФАР X-диапазона частот. – Вып. 3 (538). – С. 8 – 15.

III. Краткие сообщения

1. *Балыко А.К., Балыко И.А., Терешкин Е.В.* – Исследование элементов генераторов на связанных полосковых линиях. – Вып. 4 (539). – С. 66 – 71.





2. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – Колебательное движение электрона в кулоновском поле двух положительных зарядов. – Вып. 3 (538). – С. 110 – 112.

3. *Балыко И.А., Балыко А.К.* – Число ветвящихся деревьев графа и число ионизированных частиц в полупроводнике. – Вып. 1 (536). – С. 75 – 82.

4. *Кяргинский Б.Е.* – Генерация шумовых сигналов электронными устройствами. – Вып. 4 (539). – С. 72 – 77.

IV. Медицинская электроника

1. *Казаринов К.Д.* – Исследование мембранотропной активности электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. – Вып. 2 (537). – С. 62 – 75.

2. *Казаринов К.Д., Борисенко Г.Г., Полников И.Г.* – Влияние ЭМИ низкой интенсивности, микроволнового диапазона на окислительные процессы в клетках. – Вып. 1 (536). – С. 60 – 68.

3. *Казаринов К.Д., Полников И.Г.* – Опыт использования волноводно-диэлектрической камеры для измерения концентрации воды в органических средах и облучения биологических объектов. – Вып. 3 (538). – С. 92 – 102.

4. *Казаринов К.Д., Полников И.Г.* – Микроволновое излучение и кожа человека. Разработка неинвазивных методов исследования. – Вып. 4 (539). – С. 57 – 65.

V. Радиоэлектронные устройства

1. *Перегонов С.А.* – Звуковые сигналы СВЧ-стереорадара для слепых. – Вып. 1 (536). – С. 43 – 51.

VI. Твердотельная электроника

1. *Балыко А.К., Мякинков В.Ю., Терешкин Е.В.* – Расчет автогенераторов СВЧ. – Вып. 2 (537). – С. 44 – 51.

2. *Баранов А.В., Козиков А.Л.* – Взаимодополняющие приемы проектирования трехточечных СВЧ-автогенераторов. – Вып. 3 (538). – С. 75 – 82.

3. *Вилков Е.А., Максимов Н.А., Чигарев С.Г., Михайлов Г.М., Черных А.В., Панас А.И.* – Резонансные эффекты спин-инжекционного излучения терагерцовых волн в наноразмерных магнитных переходах. – Вып. 2 (537). – С. 6 – 12.





4. *Вяхирев В.Б.* – Измерение и интерпретация теплового сопротивления кремниевых транзисторных сборок. – Вып. 3 (538). – С. 83 – 91.

5. *Данилин Н.С., Димитров Д.М., Булаев И.Ю.* – Повышение эффективности работы микропроцессоров в режиме реального времени с применением аппаратных акселераторов для построения высокоскоростной аппаратуры. – Вып. 2 (537). – С. 13 – 16.

6. *Данилин Н.С., Димитров Д.М., Димитров М.Д., Сабиров И.Х., Волков С.А.* – Интеграция изделий фотоники и кремниевой микроэлектроники. – Вып. 2 (537). – С. 17 – 21.

7. *Двоешерстов М.Ю., Чередник В.И., Калинин А.С., Ковтунов Д.А., Рудый Ю.Б.* – СВЧ акустоэлектронные компоненты. – Вып. 4 (539). – С. 19 – 30.

8. *Карасев М.С., Далингер А.Г., Жерновенков В.А., Щеголев С.А., Адиатулин А.В.* – Методика измерения времени восстановления коэффициента передачи приемного канала модуля АФАР после воздействия на вход СВЧ-импульса высокой мощности. – Вып. 4 (539). – С. 15 – 18.

9. *Корчагин И.П., Калита Д.В.* – Многоканальный усилитель X -диапазона с суммарной выходной мощностью не менее 55 Вт. – Вып. 1 (536). – С. 21 – 24.

10. *Латин В.Г.* – Возможности и перспективы использования Г-образного затвора для изготовления полевых транзисторов СВЧ. – Вып. 2 (537). – С. 52 – 61.

11. *Маковецкая А.А., Калита Д.В., Пчелин В.А., Латин В.Г., Пашковский А.Б., Лукашин В.М., Щербаков С.В., Новиков С.И., Журавлев К.С., Торопов А.И.* – Усилительный каскад X -диапазона частот с выходной мощностью более 6 Вт на гетероструктурных полевых транзисторах с донорно-акцепторным легированием. – Вып. 1 (536). – С. 25 – 31.

12. *Новиков С.И., Пашковский А.Б., Мартынов Я.Б., Латин В.Г., Лукашин В.М., Маковецкая А.А.* – Особенности заполнения размерно-квантованных подзон в обращённых гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием. – Вып. 1 (536). – С. 6 – 20.

13. *Петров С.А.* – Входной малошумящий усилительный модуль с расширенным динамическим диапазоном. – Вып. 4 (539). – С. 31 – 36.

14. *Самохин С.А., Левашов А.С., Манченко Л.В., Лисицын А.А.* – Многофункциональный малошумящий усилительный модуль диапазона частот 2...18 ГГц. – Вып. 4 (539). – С. 8 – 14.

15. *Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М.* – Корпуса SMD для герметизации мощных МИС диапазона до 40 ГГц. – Вып. 2 (537). – С. 22 – 43.



VII. Технология и материаловедение

1. Белоусов П.С., Бобылев М.А., Ковалев В.И., Каевицер Е.В., Любченко В.Е., Руковишников А.И., Петров К.П., Пелипец О.В., Темиров Ю.Ш., Рогачев И.А. – Синтез соединения SnAs в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs. – Вып. 4 (539). – С. 52 – 56.
2. Дяденко М.В., Любецкий Н.В., Карпович В.А., Петуховская А.Г. – Стекловидные материалы с различным комплексом электрофизических характеристик. – Вып. 1 (536). – С. 52 – 59.
3. Зубков Н.П., Кочмарев Л.Ю., Шилов И.П. – Применение метода PCVD для осаждения слоев кварцевого стекла, легированного фтором, на кремниевые подложки в резонансном СВЧ-разряде пониженного давления на волне H_{10} . – Вып. 3 (538). – С. 64 – 74.

VIII. Экономика

1. Чекаданова М.В. – Инновационно-территориальный радиоэлектронный кластер как часть национальной инновационной системы России. – Вып. 1 (536). – С. 69 – 74.
2. Чекаданова М.В. – Стартовые условия и цели создания инновационно-территориального радиоэлектронного кластера на базе ОЭЗ «Исток». – Вып. 3 (538). – С. 103 – 109.
3. Чекаданова М.В., Каиштанов И.Н. – Практика формирования особых экономических зон технико-внедренческого типа как прообраза инновационных кластеров в сфере высоких технологий. – Вып. 2 (537). – С. 76 – 86.

IX. Электровакуумные приборы

1. Акимов П.И., Никитин А.П., Сыровой В.А. – К вопросу об адекватности численных моделей при расчете электронно-оптических систем приборов СВЧ с осесимметричными и ленточными электронными пучками. – Вып. 1 (536). – С. 32 – 42.
2. Быковский С.В., Будзинский Ю.А., Калина В.Г., Котов В.Е., Саврухин О.А. – Циклотронные защитные устройства: граница линейности и переход в режим защиты. – Вып. 3 (538). – С. 43 – 49.



3. Жабин Г.А., Магамеднебиев З.М., Пашков А.Н. – Молекулярно-напыленный оксидный катод с повышенной до 10 А/см^2 плотностью тока. – Вып. 3 (538). – С. 50 – 58.

4. Журавлев С.Д., Богачев Р.Ю., Роговин В.И., Петросян А.И., Шестеркин В.И., Гризбил Б.А., Рябухо В.П., Захаров А.А. – Применение лазерной интерферометрии для измерения тепловых уходов междуэлектродных зазоров в КСУ мощной импульсной ЛБВ и их влияние на макропараметры электронного пучка. – Вып. 4 (539). – С. 45 – 51.

5. Симонов К.Г., Юнаков А.Н., Поливникова О.В., Гришин С.И., Духновский М.П., Ключников Н.А., Мамонтов А.В., Перминов И.Г., Правдиковская Г.И., Рыжов В.А., Цыберт А.О. – Высоковольтный металлокерамический изолятор для сверхмощных клистронов и электронных отпаянных пушек. – Вып. 4 (539). – С. 37 – 44.

6. Фурсаев М.А. – Зависимость параметров магнетрона в режиме срыва генерации от параметров нагрузки. – Вып. 3 (538). – С. 59 – 63.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

ГАВРИЛОВ Л. П. Расчет и моделирование линейных электрических цепей с применением ПК. – М.: СОЛОН-Пресс, 2018. – 634 с.: ил.

В книге изложены основы теории линейных электрических цепей. Изложение теоретических сведений сопровождается иллюстрацией симуляции процессов в линейных электрических цепях с использованием систем схемотехнического моделирования MultiSim и MicroCap. Книга содержит большое количество решенных примеров и задач по теории электрических цепей и задания для самостоятельной работы студентов.

Изложенный материал соответствует программе курса «Теоретические основы электротехники», «Электротехника и электроника» для электротехнических вузов. Ряд глав содержит материал, который может использоваться для углубленного изучения теории электрических цепей.

В книгу включены исследования автора по применению метода степенных рядов и разложений по ортогональным полиномам к расчету переходных процессов в электрических цепях. Более полные сведения по применению метода степенных рядов и разложений в ряды по ортогональным полиномам к анализу процессов в электрических цепях и автоматизации анализа на их основе приведены в Приложении, где указаны работы автора по этой тематике.

Книга будет полезна студентам технических вузов, аспирантам, специалистам в области электроэнергетики, электротехники, электроники.



АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

авторов, опубликовавших свои работы в «СВЧ-технике» – первой серии
научно-технического сборника «Электронная техника» в течение 2018 г.

Цифры, стоящие рядом с фамилией автора, показывают: первая (римская) – номер раздела тематического указателя, в котором помещена статья, вторая (арабская) – порядковый номер статьи в соответствующем разделе.

- | | |
|---|----------------------------------|
| <i>Адиатулин А.В.</i> VI.8 | <i>Жерновенков В.А.</i> VI.8 |
| <i>Акимов П.И.</i> IX.1 | <i>Журавлев К.С.</i> VI.11 |
| <i>Балыко А.К.</i> I.1 – 4; III.1 – 3; VI.1 | <i>Журавлев С.Д.</i> IX.4 |
| <i>Балыко И.А.</i> III.1 – 3 | <i>Захаров А.А.</i> IX.4 |
| <i>Баранов А.В.</i> VI.2 | <i>Зубков Н.П.</i> VII.3 |
| <i>Батаев В.Я.</i> II.2 | <i>Измаилов А.А.</i> II.1 |
| <i>Белоусов П.С.</i> VII.1 | <i>Каевицер Е.В.</i> VII.1 |
| <i>Бобылев М.А.</i> VII.1 | <i>Казаринов К.Д.</i> IV.1 – 4 |
| <i>Богачев Р.Ю.</i> IX.4 | <i>Калина В.Г.</i> IX.2 |
| <i>Борисенко Г.Г.</i> IV.2 | <i>Калинин А.С.</i> VI.7 |
| <i>Будзинский Ю.А.</i> IX.2 | <i>Калита Д.В.</i> VI.9, 11 |
| <i>Булаев И.Ю.</i> VI.5 | <i>Карасев М.С.</i> VI.8 |
| <i>Быковский С.В.</i> IX.2 | <i>Карпович В.А.</i> VII.2 |
| <i>Василевский В.А.</i> II.5 | <i>Кашистанов И.Н.</i> VIII.3 |
| <i>Вилков Е.А.</i> VI.3 | <i>Ключников Н.А.</i> IX.5 |
| <i>Волков А.П.</i> II.1 | <i>Ковалев В.И.</i> VII.1 |
| <i>Волков С.А.</i> VI.6 | <i>Ковтунов Д.А.</i> VI.7 |
| <i>Вяхирев В.Б.</i> VI.4 | <i>Козиков А.Л.</i> VI.2 |
| <i>Гаврилов И.А.</i> II.2 | <i>Корчагин И.П.</i> VI.9 |
| <i>Гризбил Б.А.</i> IX.4 | <i>Котов В.Е.</i> IX.2 |
| <i>Гринев А.Ю.</i> II.1 | <i>Кочмарев Л.Ю.</i> VII.3 |
| <i>Гришин С.И.</i> IX.5 | <i>Кяргинский Б.Е.</i> III.4 |
| <i>Далингер А.Г.</i> VI.8 | <i>Латин В.Г.</i> VI.10 – 12 |
| <i>Данилин Н.С.</i> VI.5, 6 | <i>Левашов А.С.</i> VI.14 |
| <i>Двошерстов М.Ю.</i> VI.7 | <i>Левашов М.С.</i> II.4 |
| <i>Демшиевский В.В.</i> II.3, 4 | <i>Лисицын А.А.</i> VI.14 |
| <i>Димитров Д.М.</i> VI.5, 6 | <i>Лукашин В.М.</i> VI.11, 12 |
| <i>Димитров М.Д.</i> VI.6 | <i>Любецкий Н.В.</i> VII.2 |
| <i>Дудинов К.В.</i> VI.15 | <i>Любченко В.Е.</i> VII.1 |
| <i>Духновский М.П.</i> IX.5 | <i>Магомеднебиев З.М.</i> IX.3 |
| <i>Дяденко М.В.</i> VII.2 | <i>Маковецкая А.А.</i> VI.11, 12 |
| <i>Евсеев Д.А.</i> II.1 | <i>Максимов Н.А.</i> VI.3 |
| <i>Емельянов А.М.</i> VI.15 | <i>Мамонтов А.В.</i> IX.5 |
| <i>Жабин Г.А.</i> IX.3 | <i>Манченко Л.В.</i> VI.14 |



Мартынов Я.Б. VI.12
Михайлов Г.М. VI.3
Мякинников В.Ю. VI.1
Налогин А.Г. II.5
Никитин А.П. IX.1
Новиков С.И. VI.11, 12
Панас А.И. VI.3
Пашков А.Н. IX.3
Пашковский А.Б. VI.11, 12
Пелипец О.В. VII.1
Перегонов С.А. V.1
Перминов И.Г. IX.5
Першина Л.К. II.5
Петров К.П. VII.1
Петров С.А. VI.13
Петросян А.И. IX.4
Петуховская А.Г. VII.2
Поливникова О.В. IX.5
Полников И.Г. IV.2 – 4
Правдиговская Г.И. IX.5
Пчелин В.А. VI.11
Рогачев И.А. VII.1
Роговин В.И. IX.4
Рудый Ю.Б. VI.7
Руковишников А.И. VII.1

Рыжов В.А. IX.3
Рябухо В.П. IX.4
Сабиров И.Х. VI.6
Саврухин О.А. IX.2
Самохин С.А. VI.14
Семенов А.С. II.5
Семенов М.Г. II.5
Симонов К.Г. IX.5
Степушкин В.А. II.2
Сыровой В.А. IX.1
Темиров Ю.Ш. VII.1
Темнов А.М. VI.15
Терешкин Е.В. III.1, 2; VI.1
Торопов А.И. VI.11
Фурсаев М.А. IX.6
Цитович А.А. II.3, 4
Цыберт А.О. IX.5
Чекаданова М.В. VIII.1 – 3
Чередник В.И. VI.7
Черных А.В. VI.3
Чигарев С.Г. VI.3
Шестеркин В.И. IX.4
Шилов И.П. VII.3
Щеголев С.А. VI.8
Щербаков С.В. VI.11
Юнаков А.Н. IX.5





ПРАВИЛА НАПРАВЛЕНИЯ, РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ И ОПУБЛИКОВАНИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ СБОРНИКЕ «ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА», СЕРИЯ 1, «СВЧ-ТЕХНИКА»

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

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой 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 .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста 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 не менее 300 точек/дюйм (для полутоновых фотографий допускается формат JPEG); 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 (не более 18 × 24 см) принимаются 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. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

11. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленных в редакцию материалов принимается редакционной коллегией на основании заключения рецензентов, о чем авторы ставятся в известность.

12. Редакция направляет авторам представленных материалов копии рецензий или мотивированный отказ, а также обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса. Рецензии на все опубликованные статьи хранятся в редакции издания 5 лет.

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.



ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2019 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 7200 руб., включая НДС (20 %). Издается в цветном варианте.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук).

Для оформления подписки необходимо произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН 5050108496, КПП 509950001, р/с 40702810840020011663, ПАО Сбербанк России, г. Москва, БИК 044525225, к/с 30101810400000000225 – и выслать копию платежного поручения и бланк-заказ по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел.: (495)465-86-12.

Счет-фактура высылается заказчику после получения оформленных документов на подписку.

ЗАКАЗ

Прошу принять подписку на научно-технический сборник "Электронная техника", серия 1, "СВЧ-техника" на 2019 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

Заказ оплачен платежным поручением № _____ дата _____
на сумму _____ за _____ экз.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

«СВЧ-ТЕХНИКА»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Редактор Хоточкина Л.Н.
Переводчик Барабанова Л.В.
Компьютерная верстка Земскова Л.А.
Коррекция рисунков Лазарева Т.В.

Подписано к печати 30.11.2018 г.
Отпечатано в ООО "КУТИНОВ ПРИНТ"
г. Москва

Усл. п. л. 12,0
Уч.-изд. л. 12,5
Индекс 36292

Формат 60×88^{1/8}
Тираж 500
11 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина» 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, д. 2а,
корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12
E-mail: istokstebunov@mail.ru; info@istokmw.ru



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2018, вып. 3 (538), с. 98

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

