



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (535)

2017

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(535)

2017

Издается с 1950 г.

Главный редактор
д.т.н. **А.А. Борисов**

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.А. Зайцев** (зам. главного редактора),
к.т.н. **С.В. Щербаков** (зам. главного редактора),
Ю.А. Будзинский, к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**,
Б.Ф. Горбик, д.т.н. **А.Д. Закурдаев**, к.т.н. **Н.П. Зубков**,
д.т.н. **С.С. Зырин**, к.т.н. **А.С. Котов**,
д.т.н. **П.В. Куприянов**, к.т.н. **В.Г. Лапин**,
д.т.н. **М.И. Лопин**, д.т.н. **Н.А. Лябин**, **В.М. Малышик**,
д.т.н., профессор **П.П. Мальцев** (ИСВЧ ПЭ РАН), к.т.н. **П.М. Мелешкевич**,
д.т.н., профессор **В.П. Мещанов** (ОАО «ЦНИИИА»),
к.т.н. **А.Г. Михальченко**,
д.т.н. **С.П. Морев** (ФГУП «НПП «Торий»), **О.А. Морозов** (ЗАО «НПП «Магратеп»),
к.т.н. **В.Ю. Мякинчиков**, д.ф.-м.н. **А.И. Панас**,
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**, к.ф.-м.н. **С.А. Плешанов**, **Е.Н. Покровский**,
к.т.н. **О.В. Поливникова**, к.т.н. **А.В. Потапов**,
д.т.н., профессор **Р.А. Силин**, д.т.н. **К.Г. Симонов**,
В.П. Стебунов (ответственный секретарь),
д.т.н. **М.М. Трифонов** (ЗАО «НПП «Исток-Система»),
д.т.н., профессор **Н.Д. Урсуляк**

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.).

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 декабря 2015 г. научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, вновь 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», 2017 г.

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(535)

2017

Founded in 1950 г.

Editor-in-chief

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

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief),
C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief),
U.A. Budzinsky, C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**,
B.F. Gorbik, D.T.Sc. **A.D. Zakurdaev**, C.T.Sc. **N.P. Zubkov**,
D.T.Sc. **S.S. Zyrin**, C.T.Sc. **A.S. Kotov**, D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**,
C.T.Sc. **V.G. Lapin**, D.T.Sc. **M.I. Lopin**, D.T.Sc. **N.A. Lyabin**, **V.M. Malyschik**,
D.T.Sc., professor **P.P. Maltsev** (IMWF SE RASc), C.T.Sc. **P.M. Meleshkevich**,
D.T.Sc., professor **V.P. Meschanov** (JSC «TSNIIIA»),
C.T.Sc. **A.G. Mikhalchenkov**,
D.T.Sc. **S.P. Morev** (FSUE «RPC «Torij»), **O.A. Morozov** (JSC «RPC «Magratep»),
C.T.Sc. **V.U. Myakinkov**, D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**,
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**, C.Ph.M.Sc. **S.A. Pleshanov**, **E.N. Pokrovsky**,
C.T.Sc. **O.V. Polivnikova**, C.T.Sc. **A.V. Potapov**, D.T.Sc., professor **R.A. Silin**,
D.T.Sc. **K.G. Simonov**, **V.P. Stebunov** (executive secretary),
D.T.Sc. **M.M. Trifonov** (JSC RPC «Istok-System»),
D.T.Sc., professor **N.D. Ursulyak**

The journal is registered by the Ministry on mass media of the Russian Federation (certificate ПИ № ФС 77-24651 date June 6, 2006).

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated December 29, 2015 the scientific and technical collection «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been reincluded into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results for candidate's thesis and doctoral thesis must be published».

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

СОДЕРЖАНИЕ

Электровакuumные приборы

- Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. Частотно-унитарная LCR-модель..... 6
- Пчелин В.А., Сазонов М.С.* – Малогабаритный волноводно-полосковый переход для мощных усилителей СВЧ..... 12

Катоды и материалы

- Жабин Г.А., Пашков А.Н., Пелипец О.В.* – Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов..... 15

Радиоэлектронные устройства

- Гусинский А.В., Волковец А.И., Ланин В.Л., Свирид М.С., Кондрашов Д.А., Самонов В.Е., Гурский С.С., Булавко Д.Г., Дубновицкая Т.А.* – Особенности конструкции и технология сборки радиовысотомера миллиметрового диапазона..... 22

Технология и материаловедение

- Ляпин Л.В., Осипов А.В., Далингер А.Г.* – Низкотемпературная керамика в технологии изготовления многослойных керамических плат LTCC..... 28

Твердотельная электроника

- Губарев В.Ф.* – СВЧ-генератор на активном элементе – ЧИП-усилителе..... 44
- Иовдальский В.А.* – Новая парадигма развития техники ГИС СВЧ-диапазона..... 54

Экономика

- Чекаданова М.В.* – Принципы построения суверенной национальной инновационной системы РФ в части высокотехнологичных производств..... 65

История

- Покровский Е.Н.* – Останкинской телебашне 50 лет: лазер «Истока» на службе строителей (воспоминания участника работ)..... 74
- Балыко А.К.* – Наш академик (к 110-летию Николая Дмитриевича Девяткова)..... 79

- Тематический указатель**..... 92

- Алфавитный указатель**..... 96

CONTENTS

Electrovacuum devices

Kalina V.G., Budzinsky U.A., Bykovsky S.V. – Cyclotron protective device. Frequency-unitary LCR-model..... 6

Pchelin V.A., Sazonov M.S. – Small-size waveguide-strip transition for high-power microwave amplifiers..... 12

Cathodes and materials

Zhabin G.A., Pashkov A.N., Pelipets O.V. – The study of the influence of temperature annealing on the emission properties of sputter-deposited oxide cathodes..... 15

Radioelectronic devices

Gusinsky A.V., Volkovets A.I., Lanin V.L., Svirid M.S., Kondrashov D.A., Samonov V.E., Gursky S.S., Bulavko D.G., Dubnovitskaya T.A. – Features of the design and technology of assembling millimeter range radio altimeter..... 22

Technology and material science

Lyapin L.V., Osipov A.V., Dalinger A. G. – Low-temperature ceramics in the technology of manufacturing multilayer ceramic boards – LTCC..... 28

Solid-state electronics

Gubarev V.F. – The microwave oscillator on the active element – chip amplifier..... 44

Iovdalsky V.A. – A new paradigm for the development of microwave HIC technology..... 54

Economics

Chekadanova M.V. – Principles of construction of the sovereign national innovation system of the RF in the part of high-tech technologies..... 65

History

Pokrovsky E.N. – Ostankino television tower is 50 years old. «Istok»'s laser is in the service of the builders (memoirs of a participant of the work)..... 74

Balyko A.K. – Our academician (to the 110-th anniversary of Nikolai Dmitrievich Devyatkov) 79

Subject index..... 92

Alphabetical index..... 96

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.6

ЦИКЛОТРОННОЕ ЗАЩИТНОЕ УСТРОЙСТВО. ЧАСТОТНО-УНИТАРНАЯ *LCR*-МОДЕЛЬ

В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский

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

Секция циклотронного защитного устройства представлена *LCR*-моделью, центральная частота которой равна 1 Гц. Частотные характеристики модели, сопротивление элементов, их зависимость от сопротивления резонатора, электронного луча и внешнего тракта одинаковы для любого диапазона частот. Частотно-унитарная модель может быть преобразована в СВЧ-модель заданной частоты несколькими арифметическими операциями. Методика построения унитарной модели, переход к модели СВЧ пояснены примерами расчёта.

КС: циклотронное защитное устройство, LCR-модель, частотно-унитарная модель, СВЧ-модель заданной частоты, методика построения унитарной модели

CYCLOTRON PROTECTIVE DEVICE. FREQUENCY-UNITARY *LCR*-MODEL

V. G. Kalina, U. A. Budzinsky, S. V. Bykovsky

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

The section of the cyclotron protective device is represented by *LCR*-model, the central frequency of which is 1 Hz. The frequency characteristics of the model, the resistance of the elements, their dependence on the resistance of the resonator, the electron beam and the external path are the same for any frequency range. The frequency-unitary model can be converted into a microwave model of the given frequency by several arithmetic operations. The method of constructing the unitary model, the transition to the microwave model are explained by examples of calculation.

Keywords: cyclotron protective device, LCR-model, frequency-unitary model, microwave model of the given frequency, method of constructing the unitary model

1. ВВЕДЕНИЕ

Расчёт СВЧ циклотронного защитного устройства (ЦЗУ) на основе *LCR*-модели позволяет определить характеристики устройства в зависимости от сопротивления и частоты резонатора, частоты циклотронных колебаний пучка электронов, сопротивления тракта нагрузки, индуктивности проводника связи с трактом [1, 2].

Примеры расчёта в указанных работах относятся к моделям с заданным значением центральной частоты. Применимы ли результаты расчёта конкретных моделей при изменении центральной частоты от f_{01} до f_{02} , при смене диапазона частот?

Ниже приведена частотно-унитарная модель секции ЦЗУ с индуктивным автотрансформатором. Элементы модели определяются заданной полосой пропускания, сопротивлением резонатора и внешнего тракта, индуктивным сопротивлением проводника связи с трактом. Для унификации последующих переходов к моделям СВЧ-диапазона центральная частота полосы пропускания принята равной 1 Гц.

Частотные характеристики и сопротивление элементов модели, нормированные к центральной частоте полосы пропускания, одинаковы при любом значении центральной частоты.

Элементы и характеристики частотно-унитарной модели несколькими арифметическими операциями могут быть преобразованы в параметры СВЧ-модели с необходимым значением центральной частоты.

2. ЧАСТОТНО-УНИТАРНАЯ МОДЕЛЬ. ЭЛЕМЕНТЫ И УСЛОВИЯ РАСЧЁТА

Модель секции ЦЗУ представлена двухзвенным LCR-фильтром [3], который через индуктивный автотрансформатор нагружен сопротивлением $Z_0 + iX_i$ (рис. 1). Модель содержит элементы сопротивления электронного луча с циклотронными колебаниями R, L_c, C_c ; элементы резонатора C, L_1, L_2 ; индуктивность L_i проводника связи с внешней нагрузкой Z_0 . Сопротивления реактивных элементов модели $iX_{L_c} = i2\pi f_0 L_c, iX_{C_c}, iX_C, iX_2, iX_1, iX_i$ определены для центральной частоты полосы пропускания фильтра f_0 .

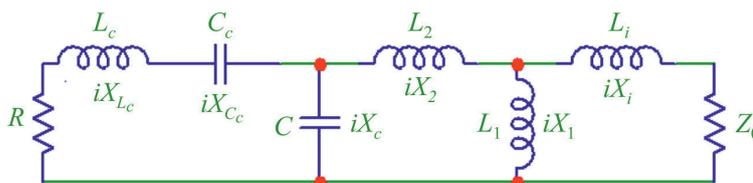


Рис. 1. Двухзвенная модель секции ЦЗУ с индуктивным автотрансформатором связи и нагрузкой

Условия согласования модели на центральной частоте полосы пропускания, как полосового фильтра с вещественными сопротивлениями луча R и нагрузки Z_0 , индуктивным сопротивлением проводника связи X_p , определим системой двух уравнений:

$$ax^2k^2 - [a^2(1 - x^2)^2 + x^2]Z_{0N} = 0, \quad (1a)$$

$$X_{iN}x^{-1} + \{a^2(1 - x^2)[1 - (1 - k)x^2] + x^2(1 - k)\}k[a^2(1 - x^2)^2]^{-1} = 0. \quad (1б)$$

Уравнения (1a) и (1б) определяют условия согласования вещественных и мнимых компонентов сопротивлений луча и внешней нагрузки [2]. Нормированное индуктивное сопротивление проводника связи X_{iN} в уравнении (1б) вместо собственной частоты резонатора, указанной в [2], определено для центральной частоты полосы пропускания, что исключило требование ступенчатого решения системы.

Уравнения (1) опираются на пять нормированных переменных: сопротивление луча с циклотронными колебаниями a , частота сигнала x , сопротивление нагрузки Z_{0N} , индуктивное сопротивление проводника, соединяющего резонатор с внешним трактом iX_{iN} , коэффициент включения нагрузки k .

Здесь $a = R/\rho = 2\pi\delta/\delta F$, где R – вещественное сопротивление луча с циклотронными колебаниями; ρ – характеристическое сопротивление резонатора; $\delta F = \Delta F/f_0$ – относительная

полоса пропускания; ΔF – полоса пропускания по допустимому уровню КСВН σ_{\max} ; δ – функция величины σ_{\max} [3]; f_0 – центральная частота; $x = f/f_{\text{рез}}$; f – текущее значение частоты; $f_{\text{рез}}$ – собственная частота резонатора; L_1 и L_2 – составляющие индуктивности резонатора, образующие автотрансформатор; $k = L_1/(L_1+L_2)$ – коэффициент связи с нагрузкой; $Z_{0N} = Z_0/\rho$ – нормированное сопротивление нагрузки; Z_0 – внешняя вещественная нагрузка; $X_{iN} = 2\pi f_0 L_i/\rho$ – нормированное индуктивное сопротивление проводника связи с внешней нагрузкой на центральной частоте f_0 ; L_i – индуктивность проводника.

Система двух уравнений (1) ориентирована на поиск двух неизвестных из общего числа пяти переменных. Три остальные переменные определяются принятыми условиями построения модели.

Поиск резонансного значения нормированной частоты $x_0 = f_0/f_{\text{рез}}$ необходим для определения собственной частоты резонатора $f_{\text{рез}}$. Выбор другого неизвестного определяется условиями задачи. Это может быть поиск необходимого сопротивления луча a при параметрах X_{iN} , Z_{0N} , k с последующим определением относительной полосы частот δF по уровню КСВН σ_{\max} либо определение одного из параметров схемы, например коэффициента включения k по данным X_i , Z_{0N} и сопротивления луча a , т. е. ширины полосы частот.

3. ПОСТРОЕНИЕ ЧАСТОТНО-УНИТАРНОЙ МОДЕЛИ

Расчёт унитарной модели, как пропускающего фильтра, центральная частота которого равна $f_0 = 1$ Гц, ниже опирается на комплекс исходных данных: сопротивление колебаний пучка, величина которого определяется необходимой полосой пропускания, сопротивление внешнего тракта, а также устанавливаемое в ходе проектирования ЦЗУ индуктивное сопротивление проводника связи и сопротивление резонатора.

Рассмотрим построение унитарной модели на основе конкретного комплекса данных: относительная полоса частот $\delta F = 0,04$ по уровню КСВН $\sigma_{\max} = 1,24$, сопротивление нагрузки $Z_0 = 50,8$ Ом (согласованный коаксиальный тракт сечением $3,5 \times 1,5$ мм), сопротивление резонатора $\rho = 55$ Ом, индуктивное сопротивление проводника связи на центральной частоте $X_i = 2\pi f_0 L_i = 47,12389$ Ом (например, проводник с индуктивностью $7,5$ Гн на частоте $1,0$ Гц; проводник с индуктивностью $0,25$ нГн на частоте 30 ГГц).

Этапы расчёта модели:

– по значениям относительной полосы частот δF по уровню КСВН σ_{\max} и сопротивления резонатора ρ определяется необходимое сопротивление луча R ;

– решением уравнений (1) при условии равенства КСВН $\sigma = 1$ на центральной частоте x_0 , сопротивлении проводника связи $X_{iN} = X_i/\rho$, сопротивлению луча $R_{\max} = R\sigma_{\max}$ и внешней нагрузки $Z_{0N} = Z_0/\rho$ определяется коэффициент включения k и нормированная частота согласования x_0 , т. е. частота резонатора $f_{\text{рез}}$, а также его элементы C , L_1, L_2 ;

– при сопротивлении луча R , величине КСВН, равной σ_{\max} на центральной частоте f_0 , определяются элементы L_c , C_c последовательной резонансной цепи, моделирующей комплексное сопротивление луча с циклотронными колебаниями.

Определив необходимое значение вещественного сопротивления электронного луча [3]:

$$R = 2\pi\delta\rho/\delta F = 2\pi \cdot 0,08888 \cdot 55/0,04 = 767,868976 \text{ (Ом)}, \quad (2)$$

где $\delta = 0,08888$ – коэффициент, определяемый допустимым значением КСВН $\sigma_{\max} = 1,24$ в пределах полосы пропускания, установим исходные переменные системы уравнений (1):

– нормированное сопротивление электронного луча при $\sigma_{\max} = 1,24$:

$$a_{\max} = R\sigma_{\max} / \rho = (767,868076 \cdot 1,24) / 55 = 17,311935, \quad (3)$$

– нормированное сопротивление нагрузки:

$$Z_{0N} = Z_0 / \rho = 50,8 / 55 = 0,92363636. \quad (4)$$

Параллельный резонатор модели (см. рис.1) при найденных сопротивлениях пучка a и нагрузки Z_{0N} , согласно системе уравнений (1), имеет нормированную частоту согласования $x_0 = 1,0348163$ и коэффициент включения $k = 0,35818489$.

При этом собственная частота и значения реактивных элементов резонатора следующие:

$$f_{\text{рез}} = f_0 / x_0 = 0,966355084 \text{ (Гц)}, \quad (5)$$

$$L = \rho / 2\pi f_{\text{рез}} = 9,05828718 \text{ (Гн)}, \quad (6)$$

$$L_1 = kL = 3,24454164 \text{ (Гн)}, \quad (7)$$

$$L_2 = (1 - k)L = 5,81374558 \text{ (Гн)}, \quad (8)$$

$$C = 1 / 2\pi f_{\text{рез}} \rho = 2,9944751 \cdot 10^{-3} \text{ (Ф)}. \quad (9)$$

Определим характеристическое сопротивление, индуктивность и ёмкость последовательной резонансной цепи имитации колебаний луча:

$$\rho_c = R^2 \sigma_{\max} / \rho = 1,32932821 \cdot 10^4 \text{ (Ом)}, \quad (10)$$

$$L_c = \rho_c / 2\pi f_0 = 2,11569155 \cdot 10^3 \text{ (Гн)}, \quad (11)$$

$$C_c = 1 / 2\pi \rho_c f_0 = 11,9725845 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}. \quad (12)$$

Результирующая модель с исходными параметрами $R = 767,868$ Ом, $Z_0 = 50,8$ Ом, $\rho = 55$ Ом, $X_i = 47,12389$ Ом показана на рис. 2, частотная характеристика КСВН модели – на рис. 3.

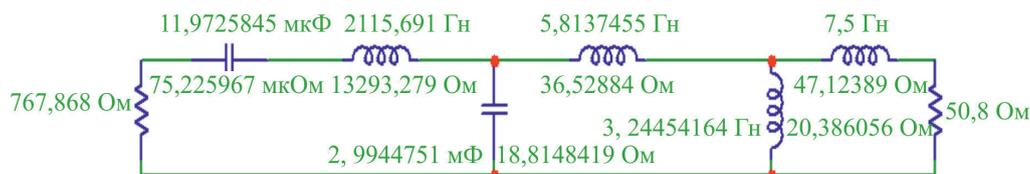


Рис. 2. Частотно-унитарная модель ЦЗУ при относительной полосе частот $\delta F = 0,04$ по КСВН $\sigma_{\max} = 1,24$, сопротивлению нагрузки $Z_0 = 50,8$ Ом, резонатора $\rho = 55$ Ом, индуктивном сопротивлении проводника связи $X_i = 47,12389$ Ом

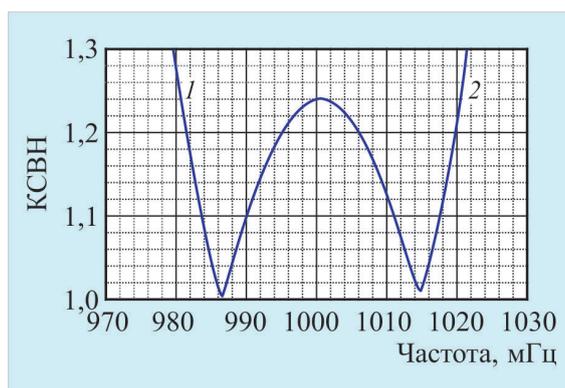


Рис. 3. Частотная характеристика КСВН унитарной модели при относительной полосе частот $\delta F = 0,04$, сопротивлению нагрузки $Z_0 = 50,8$ Ом по КСВН $\sigma_{\max} = 1,24$, резонатора $\rho = 55$ Ом, индуктивном сопротивлении проводника связи $X_i = 47,12389$ Ом

4. МОДЕЛЬ СВЧ-ДИАПАЗОНА

Частотно-унитарная модель характеризуется сопротивлением луча, нагрузки и реактивных элементов. Сопротивление элементов модели, определяемое исходными данными, не зависит от центральной частоты, и реактивные элементы унитарной модели с принятым значением центральной частоты $f_0 = 1$ Гц могут быть преобразованы в элементы модели СВЧ-диапазона.

Для определения реактивных элементов СВЧ-модели с центральной частотой f_{01} реактивные сопротивления унитарной модели с частотой $f_0 = 1$ Гц следует разделить на значение частоты $2\pi f_{01}$ либо разделить на значение f_{01} величину реактивных элементов унитарной модели. Частота резонатора и численные значения шкалы частотных характеристик при переходе к СВЧ-модели возрастают в f_{01} раз.

Для отмеченного в разд. 1 изменения центральной частоты СВЧ-модели от f_{01} до f_{02} реактивные элементы модели следует умножить на коэффициент f_{01}/f_{02} . Частота резонатора и численные значения частотной шкалы характеристик при этом изменяются в f_{02}/f_{01} раз.

Параметры СВЧ-модели с трансформированной частотой – относительная полоса частот, активное сопротивление электронного пучка и внешней нагрузки, сопротивление резонатора и цепи имитации циклотронных колебаний пучка, реактивное сопротивление элементов, коэффициент связи с нагрузкой, относительное уменьшение частоты резонатора – повторяют исходные параметры унитарной модели.

Результаты расчёта элементов и характеристики КСВН модели СВЧ при изменении центральной частоты унитарной модели (см. рис. 2) от 1,0 Гц до произвольно выбранного значения 15 ГГц приведены на рис. 4 и 5.

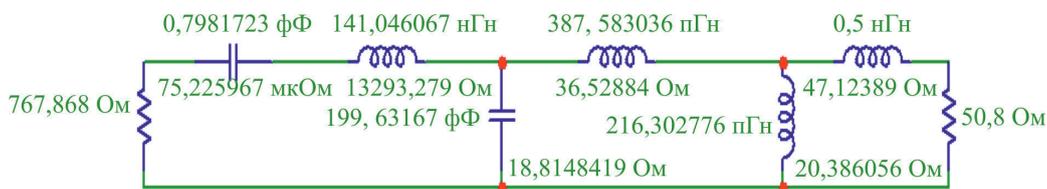


Рис. 4. Модель с центральной частотой 15 ГГц. Данные модели повторяют данные модели с частотой 1,0 Гц: сопротивление луча $a = 767,868$ Ом, относительная полоса частот $\delta F = 0,04$, сопротивление нагрузки $Z_0 = 50,8$ Ом, резонатора $\rho = 55$ Ом, индуктивное сопротивление проводника связи $X_i = 47,12389$ Ом

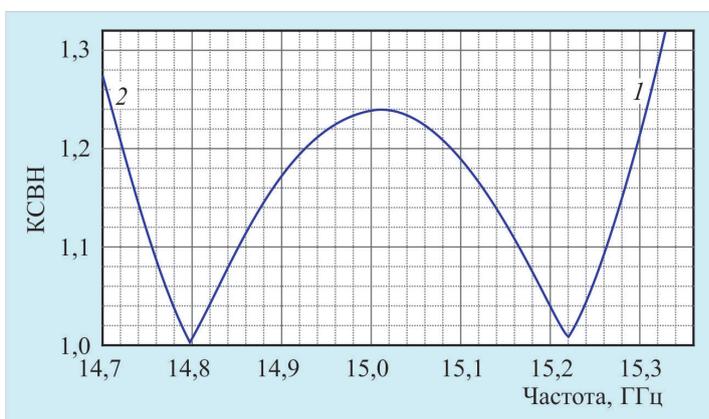


Рис. 5. Частотная характеристика КСВН модели с центральной частотой 15 ГГц. Ширина полосы частот $\Delta F = 600$ МГц по уровню КСВН $\sigma = 1,24$, относительная ширина полосы $\delta F = 0,04$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная частотно-унитарная LCR-модель со значением центральной частоты, принятым равным 1 Гц, даёт возможность общего, унифицированного подхода к расчёту и оценке характеристик секций СВЧ ЦЗУ. Результаты расчёта модели справедливы для аналогичных моделей с необходимыми значениями центральной частоты.

Расчёт секций ЦЗУ на основе частотно-унитарной модели позволяет создать единый реестр моделей с необходимыми сочетаниями относительной ширины полосы и сопротивления внешнего тракта для доступных на практике сопротивлений резонатора и проводника связи. Пример расчёта элемента LCR-реестра секций ЦЗУ, в данном случае элемента со структурой двухзвенного фильтра, приведен в статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Калина, В. Г.** Циклотронное защитное устройство. Модель с автотрансформатором / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 1 (532). – С. 74 – 83.
2. **Калина, В. Г.** Циклотронное защитное устройство. LCR-модель с индуктивным проводником вывода / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 3 (534). – С. 41 – 49.
3. **Калина, В. Г.** Расчёт циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / В. Г. Калина, Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2014. – Вып. 1 (520). – С. 19 – 38.

Статья поступила 5 сентября 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием. Монография / Под ред. В.Н. Лепина. – М.: Радиотехника, 2017. – 416 с.

Рассмотрены теоретические основы и принципы построения помехозащищенных бортовых радиоэлектронных систем. Проанализированы методы, устройства и алгоритмы защиты радиолокационных станций самолетов и головок самонаведения ракет от помех, а также показана их эффективность. Дан анализ перспективных средств создания помех и способов борьбы с ними.

Для инженеров и научных работников. Может быть полезна студентам и преподавателям вузов.

УДК 621.372.8

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ВОЛНОВОДНО-ПОЛОСКОВЫЙ ПЕРЕХОД ДЛЯ МОЩНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ СВЧ

В. А. Пчелин, М. С. Сазонов

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

Представлена конструкция герметичного волноводно-полоскового перехода для передачи повышенной СВЧ-мощности. Переход удобен для применения в выходных каналах СВЧ-аппаратуры и антенно-фидерных системах.

КС: *волноводно-полосковый переход, антенно-фидерная система*

SMALL-SIZE WAVEGUIDE-STRIP TRANSITION FOR HIGH-POWER MICROWAVE AMPLIFIERS

V. A. Pchelin, M. S. Sazonov

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

The design of a sealed waveguide-strip transition for transmission of high microwave power is presented. The transition is convenient for use in the output channels of microwave equipment and antenna-feeder systems.

Keywords: *waveguide-strip transition, antenna-feeder system*

В СВЧ-технике широко используется микрополосково-волноводный переход (МВП) типа «зонд». В этой конструкции микрополосковая линия (МПЛ) располагается на верхней стенке волновода и через проводник (зонд), проходящий сквозь отверстие в стенке, происходит передача энергии с МПЛ в волновод. На рис. 1 схематично показана конструкция такого перехода.

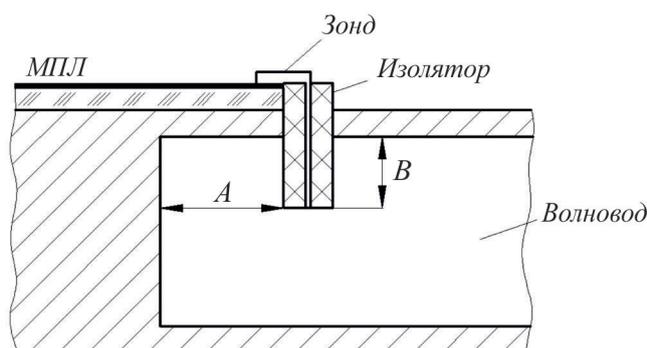


Рис. 1. МВП зондового типа

Рабочая частота МВП зависит от глубины B погружения зонда и расстояния A от закороченной стенки волновода. Полоса частот перехода по уровню коэффициента отражения $-(10...15)$ дБ находится в пределах 10 %. Подобная конструкция имеет определённые недостатки, а именно:

- малая механическая прочность и виброустойчивость;
- отсутствие отвода тепла от зонда при передаче большой мощности;

- негерметичность;
- относительно большие размеры.

Нами разработан малогабаритный МВП (рис. 2), исключая указанный недостатки. В представленной конструкции коаксиальный СВЧ-ввод (КРПГ 433.434.015-02) [1] герметично впаян в торцевую стенку волновода. МПЛ и проводник расположены в одной плоскости, при этом проводник наглухо впаян в согласующий трансформатор («сухарь»), который, в свою очередь, припаян к нижней стенке волновода. Этим обеспечиваются хороший теплоотвод, механическая прочность и герметичность МВП. Подразумевается, что МПЛ находится в герметичном объёме. Дополнительным преимуществом подобного МВП является совместимость с волноводами пониженного сечения, обычно применяемыми в антенно-фидерных устройствах.

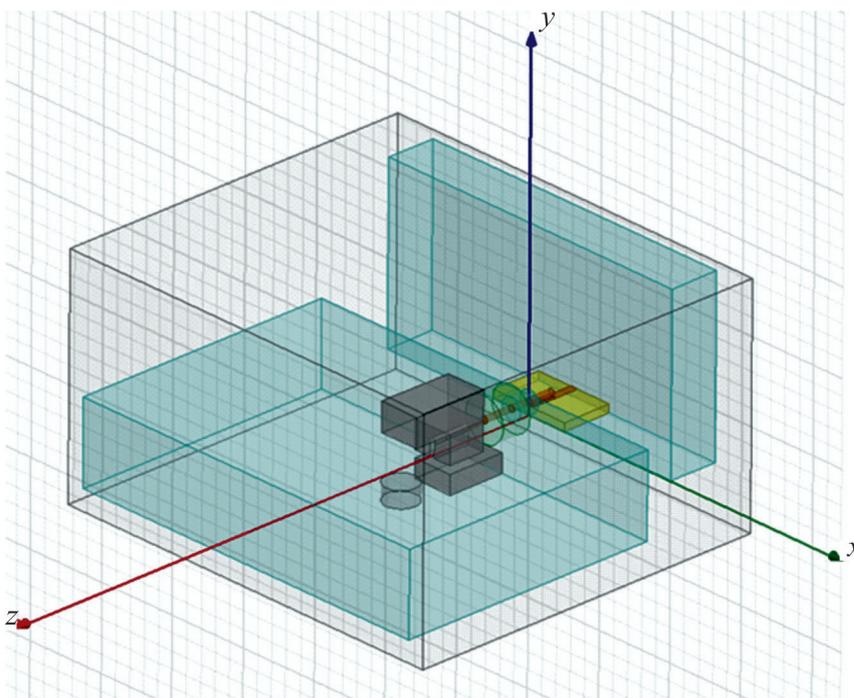


Рис. 2. Изометрический вид модели МВП

Расчет МВП на частоты 11, 14 и 16 ГГц проводился на основе точного электродинамического моделирования. В настоящей работе представлены результаты расчёта и конструкция МВП на частоту 16 ГГц, размер волновода – 16×4 мм. Конструкция МВП и расчётные характеристики приведены на рис. 2...4. Вносимые потери перехода составляют не более 0,2 дБ.

МВП подобного типа применяются в серийно выпускаемых усилителях мощности М42229 (9 Вт на частоте 16 ГГц), а также в усилителях СВЧ ИФУС.434811.001 на 14 ГГц и 16-ваттном усилителе мощности на 11 ГГц [2]. Представ-

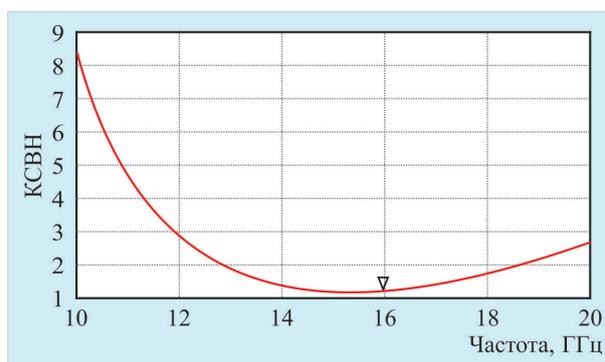


Рис. 3. Результаты расчёта КСВН МВП ($F = 16$ ГГц, КСВН – 1,26 при погружении настроечного винта в волновод на 0,3 мм)

ленную конструкцию (рис. 5) можно также использовать для реализации коаксиально-волноводного перехода.

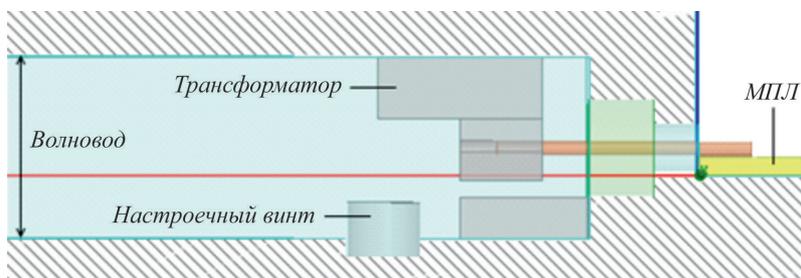


Рис. 4. Продольное сечение перехода

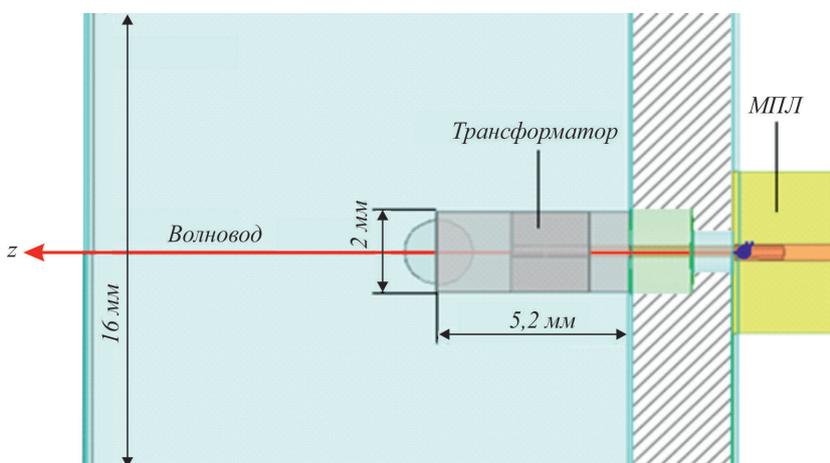


Рис. 5. Микрополосково-волноводный переход (вид сверху)

Таким образом, представлена герметичная конструкция МВП, обладающая механической прочностью, устойчивостью и хорошим теплоотводом вывода энергии. Конструкция перехода удобна для применения в антенно-фидерных устройствах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Джуринский, К. Б.** Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. – М.: Агентство «Издательский сервис», 2003. – С. 35.
2. Разработка технологии создания комплекта субблоков для модуля бортового антенного: отчет по ОКР / АО «НПП «Исток» им. Шокина»; А. А. Лисицын. – Фрязино, 2016. – № 15-93189.

Статья поступила 13 июля 2017 г.

КАТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.385.73

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА МОЛЕКУЛЯРНО-НАПЫЛЕННЫХ ОКСИДНЫХ КАТОДОВ

Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец

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

Представлены результаты исследования влияния отжига на молекулярно-напыленные оксидные катоды (МНОК) маломощных СВЧ-приборов. Приведены эмиссионные характеристики МНОК. С помощью рентгеновской дифрактометрии, Оже-спектроскопии и растровой электронной микроскопии исследованы внутренняя и поверхностная структуры ядра катода. Показано, что дополнительный отжиг ядра после нанесения пленки иридия позволяет улучшить эмиссионные свойства катодов.

КС: циклотронное защитное устройство, молекулярно-напыленный оксидный катод, накальная характеристика, оксидный катод, оксидный слой, активировка, диффузия, рентгеновская дифрактометрия, электронная Оже-спектроскопия, растровая электронная микроскопия

THE STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ANNEALING ON THE EMISSION PROPERTIES OF SPUTTER-DEPOSITED OXIDE CATHODES

G. A. Zhabin, A. N. Pashkov, O. V. Pelipets

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

The article presents the results of the study of the annealing effect on the characteristics of sputter-deposited oxide cathodes in low noise microwave devices. The emission characteristics of the cathodes are given. The internal and surface structures of the cathode core were investigated using X-ray diffractometry, Auger spectroscopy and scanning electron microscopy. It is shown that additional core annealing after iridium film deposition improves the emission properties of sputter-deposited oxide cathodes.

Keywords: cyclotron protective device, sputter-deposited oxide cathode, emission characteristics, oxide cathode, oxide layer, activation, diffusion, X-ray diffractometry, Auger-electron spectroscopy, scanning electron microscopy

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных РЛС широко применяются маломощные циклотронные защитные устройства (ЦЗУ) [1]. В качестве эмиттера в них используются прямонакальные молекулярно-напыленные оксидные катоды (МНОК) с толщиной оксидного слоя около 800...1000 нм. Увеличенная плотность покрытия позволяет отбирать токи с большей плотностью, чем стандартный ОК, за счет устойчивости покрытия к искрению и большей проводимости оксидного

слоя [2]. Структура такого покрытия формируется вне зависимости от величины зерен исходных карбонатов щелочно-земельных металлов. В плотном покрытии МНОК атомы бария мигрируют по границам микрокристаллов, а не по порам, как в ОК. В ЦЗУ с такими катодами плотность отбираемого тока с эмиссионной поверхности размерами $0,02 \times 0,7$ мм составляет $1,5 \dots 2,0$ А/см² при температуре $560 \dots 600$ °С с долговечностью $2 \dots 3$ тыс. ч. Эмиссионные свойства МНОК зависят как от структуры и толщины покрытия, так и от состава материала керна.

Металл керна содействует восстановительному активированию. Степень восстановительного действия зависит и от содержащихся в керне примесей или присадок [3]. Наименьшая скорость испарения МНОК наблюдается на пассивном керне, в то же время на таком керне плохая воспроизводимость величины эмиссии. Еще одна возможная роль присадки может быть в связывании газа, растворенного в объеме металла, и уменьшении его потока в оксидном слое. Основную роль играет процесс термической диссоциации окиси бария. Основным компонентом испарения на пассивном керне МНОК является окись бария, а на активном керне преобладает испарение бария. При температуре 1000 К на активном керне скорость испарения бария на порядок больше скорости испарения окиси бария [4].

В приборе эмиссионные свойства МНОК зависят также от рабочей температуры катода, электронно-оптической системы, остаточных газов и качества обработки поверхности внутренней оболочки прибора [5].

В данной работе с помощью методов рентгеновской дифрактометрии, электронной Оже-спектроскопии и РЭМ исследовались особенности влияния температурного отжига керна катода на эмиссионные свойства МНОК.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТОДОВ

Перед нанесением эмиссионного покрытия керны катодов из вольфрамениевого сплава ВР-27ВП были химически обработаны в растворе щелочи, в растворе на основе перекиси водорода и отожжены в водороде при 1050 °С в течение 30 мин. После отжига на керны катодов была напылена пленка иридия толщиной $250 \dots 300$ нм методом магнетронного напыления в атмосфере ксенона при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Методом ионно-плазменного напыления в атмосфере аргона и углекислого газа на пленку иридия нанесли эмиссионное покрытие, состоящее из $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$, имеющее состав щелочно-земельных металлов соответственно 50, 44 и 6 %.

Были изготовлены две партии катодов и контрольные образцы в виде пластин толщиной 50 мкм из материала ВР-27ВП. В первой партии отжиг кернов катодов и пластин после нанесения пленки иридия не проводился. Во второй партии после напыления пленки иридия осуществлялся повторный отжиг при 1050 °С в течение 30 мин в остро осушенном водороде с точкой росы -60 °С. Обе партии катодов монтировались в макеты приборов с расстоянием анод-катод 0,1 мм и после технологических операций монтажа, заварки, откачки поступали на стенд эмиссионной тренировки. Каких-либо других различий при режимах напыления и проведения технологических операций в ходе монтажа, отжига деталей и откачки приборов не было, или они были минимизированы.

Эмиссионные характеристики получены для шести катодов с отжигом после напыления иридия и без отжига (рис. 1).

Микронные размеры эмиссионной поверхности миниатюрных МНОК не позволили провести

рентгеновское дифракционное исследование и исследование с помощью Оже-спектроскопии непосредственно на катодах. Поэтому эти исследования проводились на двух контрольных образцах пластин толщиной 50 мкм из сплава ВР-27ВП размерами 12×12 мм, прошедших все перечисленные операции химической обработки, напыления иридия и отжига вместе с партиями катодов. Дифракционные измерения структуры образцов проводились на установке ДРОН-8 (рис. 2, 3). При измерениях использовалась рентгеновская трубка с анодом из кобальта, напряжение анода рентгеновской трубки $U = 40$ кВ, ток анода рентгеновской трубки $I = 20$ мА. Углы сканирования 2θ составляли от 33 до 164°. Рентгеновские дифрактограммы фиксировались в трех разных точках на каждом образце. Измерения Оже-спектроскопии двух образцов пластин ВР-27ВП были сделаны на установке 09ИОС-10-005. Оже-анализ поверхности проводился при комнатной температуре с использованием первичного пучка электронов с энергией 3 кэВ и диаметром 20 мкм. Для послойного анализа использовался пучок ионов аргона с энергией 3 кэВ и диаметром 400 мкм. Оже-спектры и кривые распределения элементов вольфрама, рения, иридия в образцах показаны на рис. 4 и 5.

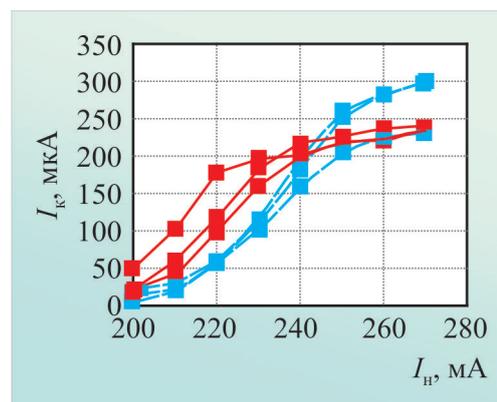


Рис. 1. Недокальные характеристики МНОК: красным цветом показаны МНОК с отжигом после нанесения на керн пленки иридия, синим – без отжига

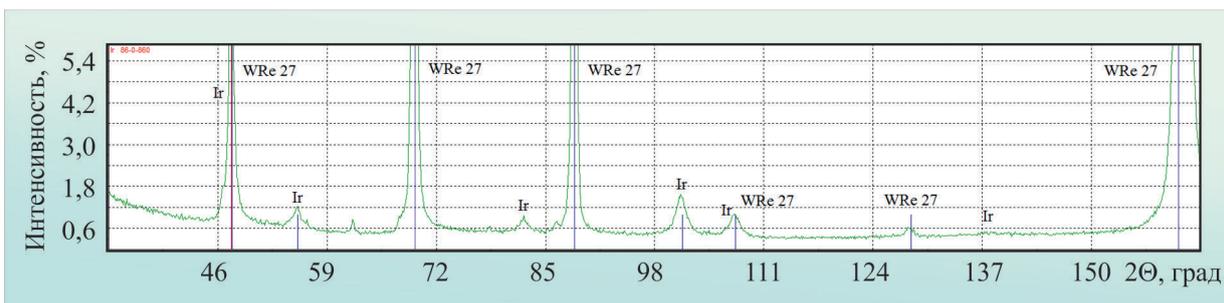


Рис. 2. Дифрактограмма образца сплава ВР-27ВП с напыленной пленкой иридия, без отжига

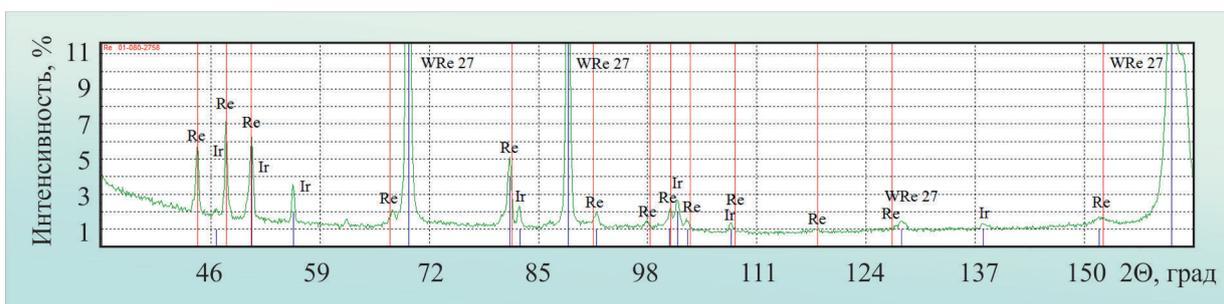
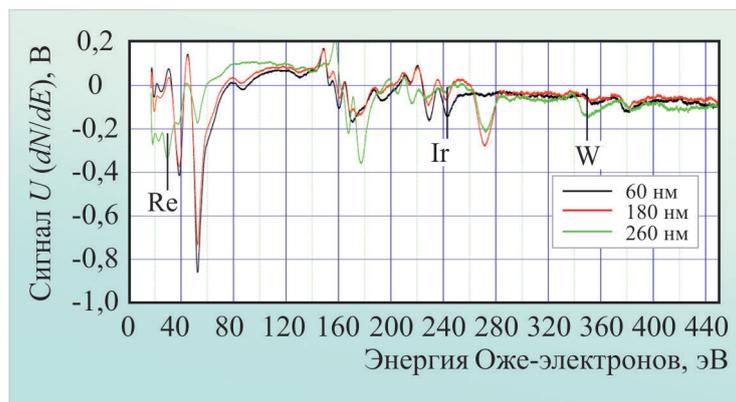
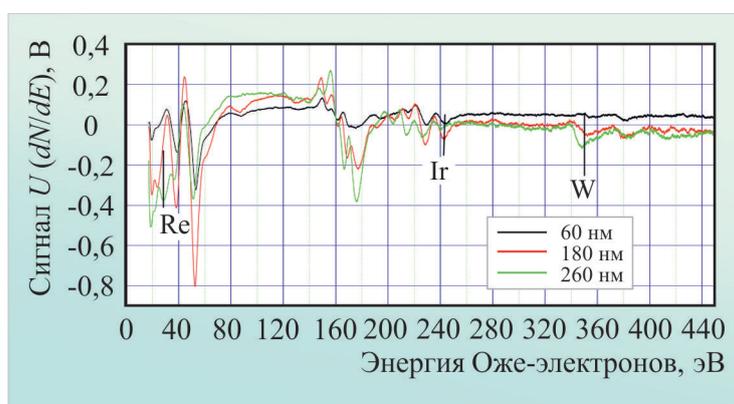


Рис. 3. Дифрактограмма образца сплава ВР-27ВП с напыленной пленкой иридия после отжига при температуре 1050 °C в течение 30 мин

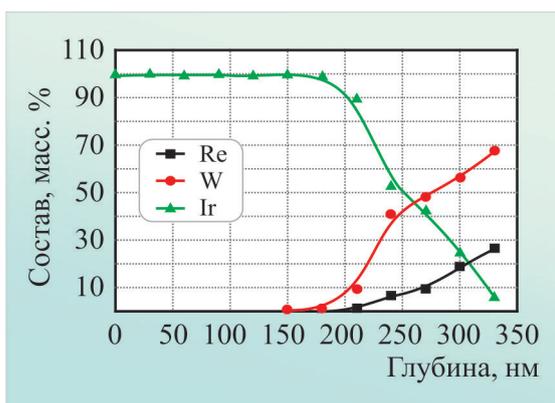


а)

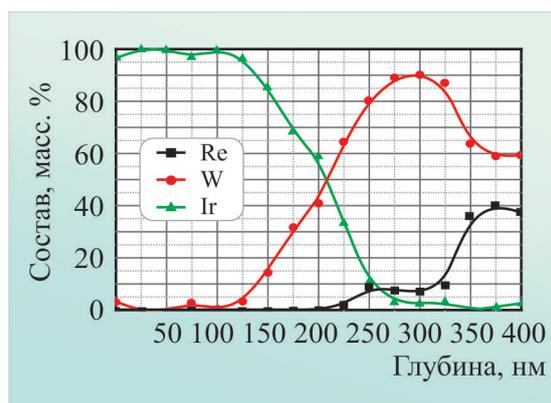


б)

Рис. 4. Оже-спектры контрольных образцов без отжига (а) и с отжигом (б) в зависимости от глубины травления



а)



б)

Рис. 5. Профили концентрации образцов сплава ВР-27ВП, покрытых пленкой иридия, полученные из Оже-спектров: а – до отжига; б – после отжига

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ графиков Оже-спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии образцов с пленкой иридия показал, что после температурного отжига в результате взаимной диффузии в слое иридия изменяется состав. В сплаве ВР-27ВП происходит выделение фазы рения. В слое иридия возрастает концентрация атомов вольфрама и рения. В ходе отжига также происходит диффузия атомов иридия в сплав ВР-27ВП.

Концентрация вольфрама на поверхности иридия после отжига составляет 3...4 %, а атомов рения на поверхности иридия – 0,5...1 %.

В работе [6] показано, что рений замедляет процессы диффузии в катодах, не образует промежуточных соединений и поддерживает катод в активном состоянии в течение нескольких тысяч часов. Положительное влияние рения заключается также в том, что скорость испарения стронция из окиси стронция на рениевом керне почти на 2 порядка меньше, чем на вольфрамовом керне [7].

Вольфрам активно реагирует с окислами щелочно-земельных металлов, что увеличивает генерацию атомов бария. Это приводит к усиленному испарению активного вещества из катода, снижает долговечность и эмиссионные свойства. В ходе восстановления окиси бария на границе керн катода – оксид может образовываться промежуточный слой вольфраматов $BaWO_4$, который является барьером и повышает сопротивление эмиссионного слоя [3].

Пленка иридия в МНОК пассивирует отрицательное воздействие вольфрама на эмиссионный слой для обеспечения долговечности.

Анализ эмиссионных характеристик (см. рис. 1) показал, что точка перегиба недокальной характеристики катодов с пленкой иридия без отжига соответствует 250 мА и более, это соответствует температуре катода около 600...620 °С. Точка перегиба для катодов с отжигом после напыления пленки иридия соответствует 220...240 мА, при этом температура катода составляет 540...560 °С. Разница в температуре катодов с отожженным слоем иридия и катодов без отжига составляет 40...80 °С. Таким образом, недокальные характеристики с пленкой иридия без отжига сдвигаются в высокотемпературную область. Сдвиг недокальной характеристики в высокотемпературную область свидетельствует о более высокой работе выхода катода без отжига и малой активности его эмиссионного слоя. В случае работы такого МНОК при более высокой температуре будет происходить быстрое испарение окиси бария и уменьшаться долговечность прибора. Точка перегиба недокальной характеристики у МНОК с отжигом после нанесения иридия смещается в низкотемпературную область по сравнению с неотожженным керном, что связано с уменьшением работы выхода катодов.

При отжиге керна МНОК происходит взаимная диффузия атомов вольфрама, рения и иридия. Образуется новая трехкомпонентная система, в которой часть атомов рения выделяется в виде отдельной фазы. Поверхность пленки иридия становится пористой, с размером пор 150...200 нм (рис. 6).

При последующем напылении на такую пленку эмиссионного слоя, МНОК имеют улучшенные эмиссионные свойства и более быстрое время активирования (25...30 мин), чем катоды с пленкой иридия без отжига (45...50 мин). Время термотренировки составляет соответственно 50 и 70 ч.

Таким образом, технологически и экспериментально подобраны такие значения толщины пленки иридия, температуры и времени отжига, когда достаточно высокий уровень эмиссионной активности МНОК при низкой рабочей температуре и долговечности обеспечивается достигнутым динамическим равновесием в системе окислов щелочно-земельных металлов.

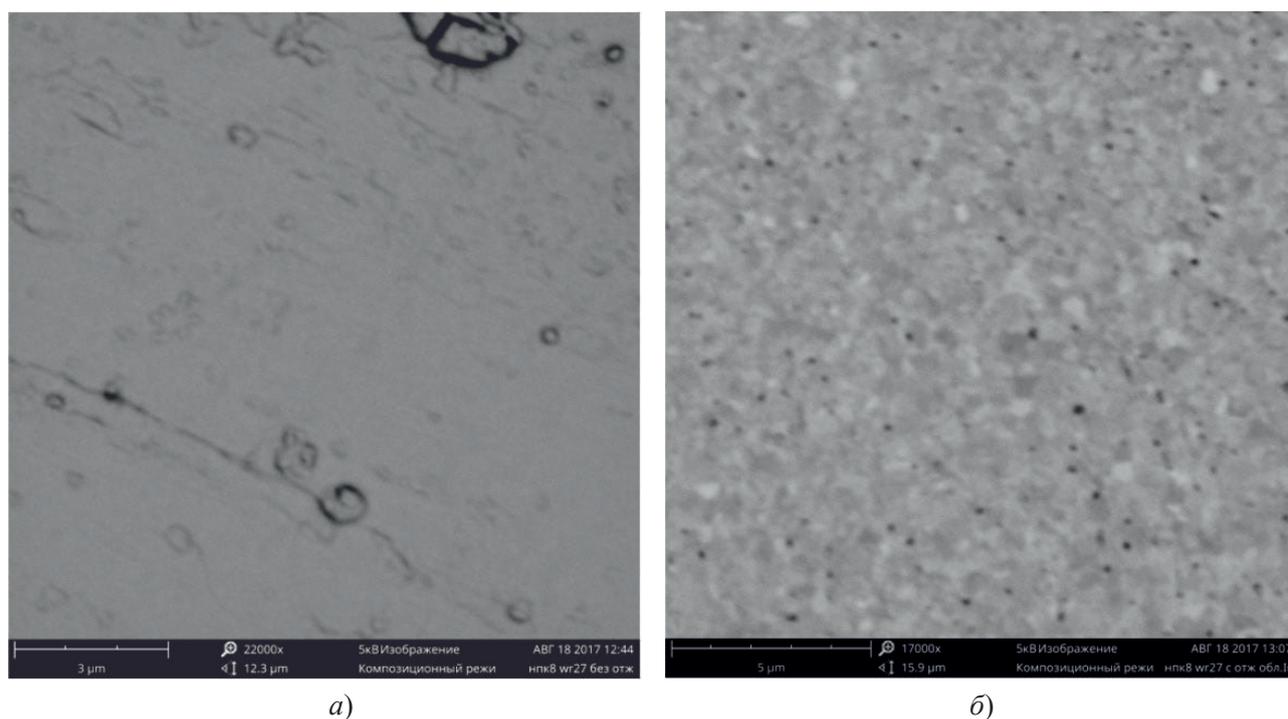


Рис. 6. Изображения поверхности пленки иридия, напыленной на пластину ВР-27ВП до отжига (а) и после отжига (б), полученные методом растровой электронной микроскопии

Уменьшение работы выхода МНОК, повышение эмиссионных и эксплуатационных характеристик может быть связано также с изменениями в кристаллической структуре и морфологии поверхности (см. рис. 6). Исследование пленки иридия методом РЭМ после температурного отжига показало, что в результате рекристаллизации и взаимной диффузии на поверхности образовалась мозаичная структура и наноразмерные поры, которые могут служить дополнительными каналами взаимодействия оксидного слоя с активирующими примесями вольфрама и рения.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены дифракционные измерения структуры контрольных образцов с отжигом и без отжига, измерения концентрации примеси на поверхности с помощью электронной Оже-спектроскопии, исследования с помощью РЭМ.

Скорость активирования МНОК зависит от толщины пленки иридия, температуры отжига и продолжительности отжига. Многочисленные натурные испытания показали, что оптимальными эмиссионными свойствами обладают катоды, температура и время отжига которых после нанесения пленки иридия составляют соответственно 1050 °С и 30 мин. Для получения оптимальных эксплуатационных и эмиссионных характеристик МНОК толщина иридиевой пленки должна быть 250...300 нм. При напылении более толстых пленок иридия для получения необходимых эмиссионных свойств потребуются большие значения времени и температуры отжига. При меньших значениях толщины пленки иридия на керне МНОК долговечность катода

будет уменьшаться из-за увеличения скорости диффузии атомов вольфрама в слой иридия и последующего его взаимодействия с оксидным слоем, увеличения концентрации свободного бария в оксидном слое и повышения испарения активного вещества с поверхности катода.

После отжига напыленной пленки иридия изменяется микроструктура ее поверхности, появляется пористость с размерами пор 100...252 нм, повышается концентрация активирующих примесей вольфрама и рения. Вышеуказанные изменения в морфологии и химическом составе пленки иридия способствуют ускоренному активированию и улучшению эмиссионных свойств МНОК. По сути, отжиг пленки иридия подобранной толщины обеспечил последующий требуемый транспорт вольфрама от ядра к оксиду (как и при традиционной технологии без отжига более тонкой пленки), но при этом позволил отказаться от длительной активировки и тренировки катода при повышенной температуре, удорожающей технологию и расходующей ресурс катода.

Авторы выражают признательность А. В. Галдецкому за внимание к работе и ряд полезных советов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Будзинский, Ю. А.** Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, И. И. Голеницкий, В. Г. Калина // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. Труды юбилейной конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток».* Ч. 1. – 2013. – Вып. 3(518). – С. 136 – 141.
2. **Дружинин, А. В.** Новый эффективный термокатод / А. В. Дружинин, Ю. А. Кондращенко // *Радиотехника и электроника.* – 1973. – Т. 18, № 7. – С. 15 – 31.
3. **Герман, Г.** Оксидный катод / Г. Герман, С. Вагнер. – М.: Гостехиздат, 1949. – 508 с.
4. **Князев, А. Я.** Свойства молекулярно-напыленного оксидного катода на ионнолегированном ядре / А. Я. Князев, В. Ф. Шнюков // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* – 1979. – Вып. 2. – С. 64 – 69.
5. **Жабин, Г. А.** Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // *Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника.* – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 49 – 53.
6. **Warin, M. P.** The use of pure and alloyed rhenium in oxide-coated thermionic cathodes / M. P. Warin. – In: *Rhenium.* Amsterdam – New York. – 1962. – P. 175 – 181.
7. **Киселев, А. Б.** Применение рения в качестве материала для ядер высокотемпературных катодов / А. Б. Киселев, Т. Ф. Кулешова, Б. П. Никонов // *Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1.* – 1961. – № 2. – С. 107 – 113.

Статья поступила 22 августа 2017 г.

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.38

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ РАДИОВЫСОТОМЕРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

**А. В. Гусинский, А. И. Волковец, В. Л. Ланин, М. С. Свирид, Д. А. Кондрашов,
В. Е. Самонов, С. С. Гурский, Д. Г. Булавко, Т. А. Дубновицкая**

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Рассмотрена конструкция радиовысотомера миллиметрового диапазона, выполненного по схеме линейно-частотно-модулированного сигнала, в котором большинство элементов используется в бескорпусном исполнении. Сборка радиовысотомера выполнена по модульному принципу, с применением пьедесталов из псевдосплава медь-молибден. Оптимизированы технологические режимы ультразвуковой сварки золотой проволоки диаметром 18 мкм в глубоких колодцах.

КС: радиовысотомер, миллиметровая волна, конструкция, технология сборки, поверхностный монтаж, ультразвуковая микросварка, проволочное соединение

FEATURES OF THE DESIGN AND TECHNOLOGY OF ASSEMBLING MILLIMETER RANGE RADIO ALTIMETER

**A. V. Gusinsky, A. I. Volkovets, V. L. Lanin, M. S. Svirid, D. A. Kondrashov,
V. E. Samonov, S. S. Gursky, D. G. Bulavko, T. A. Dubnovitskaya**

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

The article considers the millimeter range radio altimeter design made according to the scheme of linear-frequency-modulated signal in which the majority of unpacked elements are used. The altimeter assemblage is executed by a modular principle with the use of pedestals from copper-molybdenum pseudo-alloy. Technological modes of ultrasonic welding of a gold wire 18 μm in diameter in deep wells are optimized.

Keywords: radio altimeter, millimeter wave, design, assembly technology, SMT, ultrasonic microwelding, wire connection

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиовысотомеры (РВ) малых высот (до 1500 м) применяют для измерения высоты, на которой находится летательный аппарат (ЛА), относительно земной поверхности, для управления ЛА в вертикальной плоскости в системах захода на посадку и автоматической посадки. В РВ малых высот применяется принцип измерения высоты с использованием непрерывного линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала. Большинство РВ малых высот дают информацию не только о текущей высоте полета, но и о достижении ЛА установленной (заданной) высоты полета (или опасной высоты), а также о своем состоянии и исправности. Эта информация поступает на индикаторы РВ и в систему управления ЛА.

Из известных аналогов можно выделить радиовысотомер Miniature Radar Altimeter (MRA) Type2 производства Roke Manor Research Limited (Англия). По сравнению с представленным радиовысотомером, MRA Type2 имеет меньшую выходную мощность, более широкую диаграмму направленности, большие габаритные размеры, меньший диапазон измерения высоты.

2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

РВ построен по классической схеме РВ малых высот с ЛЧМ зондирующим сигналом. Отличительная особенность в построении – способ управления зондирующим сигналом и способ слежения за истинной высотой. Управление высотомером, обработка сигналов, а также информационный обмен с внешними устройствами реализованы на ПЛИС Spartan-6 фирмы Xilinx. Структурная схема РВ приведена на рис. 1.

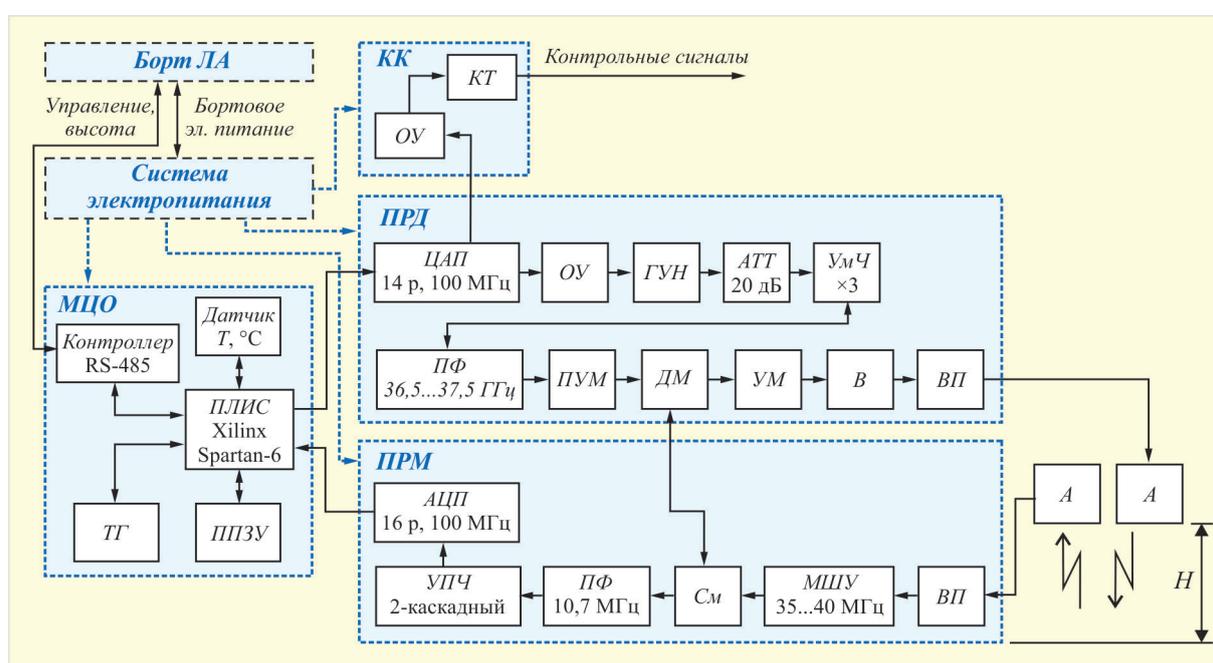


Рис. 1. Структурная схема РВ:

КК – контрольный канал; ОУ – операционный усилитель; КТ – контрольная точка; МЦО – модуль цифровой обработки; ТГ – тактовый генератор; ППЗУ – перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство; ПРД – передатчик; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ГУН – генератор, управляемый напряжением; АТТ – аттенуатор; УмЧ – умножитель частоты; ПФ – полосовой фильтр; ПУМ – предварительный усилитель мощности СВЧ; ДМ – делитель мощности; УМ – усилитель мощности СВЧ; В – волноводный переход; ВП – волноводный переход; А – антенна; ПРМ – приемник; МШУ – малозумяющий усилитель СВЧ; См – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Конструктивно РВ выполнен в виде параллелепипеда (рис. 2), внутри которого с одной стороны фрезерованием выполнены углубления для размещения СВЧ-элементов, а также волноводные переходы с площадкой для крепления антенн, на противоположной стороне размещена плата модуля цифровой обработки, включающая устройство управления и цифровой обработки.

В РВ использованы рупорные конические антенны. Подавляющее большинство элементов

СВЧ с рабочей частотой выше 30 ГГц выполнены в бескорпусном исполнении, что позволяет существенно улучшить параметры разрабатываемого устройства, уменьшить его габаритные размеры [1]. Сборка СВЧ-устройств на бескорпусных элементах осуществляется с применением технологических операций сборки гибридных интегральных схем.

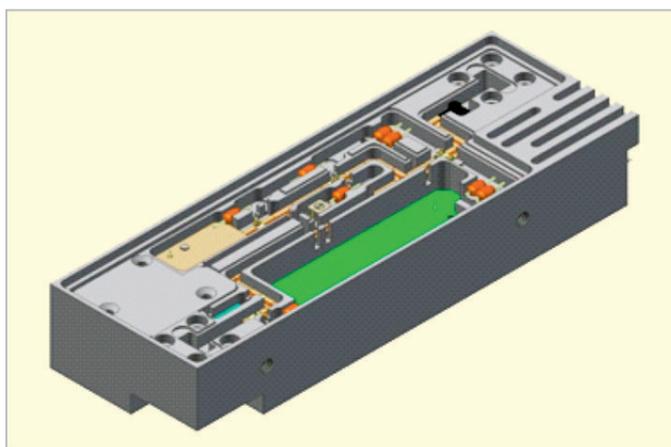


Рис. 2. Конструктивное исполнение РВ

Для построения СВЧ-тракта РВ выбрана элементная база в бескорпусном исполнении производства NEDI Technology (Китай), METDA Semiconductors (Китай), Analog Devices/Hittite Microwave (США), ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов» (Беларусь). Активные элементы выполнены на арсениде галлия толщиной 50...100 мкм.

СВЧ-тракт высотомера собран по модульному принципу. Конструкция модуля на примере малошумящего усилителя (МШУ) представлена на рис. 3.

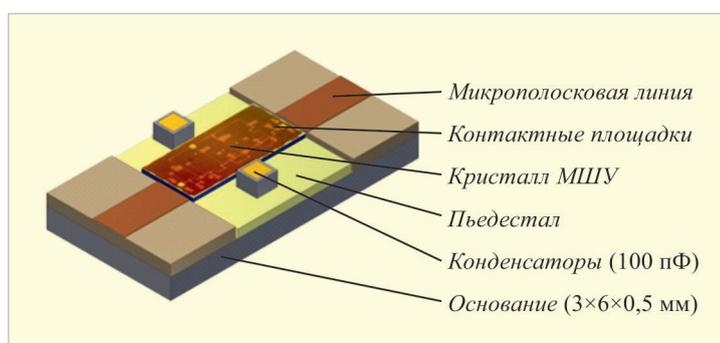


Рис. 3. Конструкция модуля малошумящего усилителя

Основание изготовлено из листа АМг2-0,5 (ГОСТ 21631–76) с покрытием О-Ви(99,8)6. Пьедестал – из псевдосплава медь-молибден (Мо – 85 %, Cu – 15 %) размером 3,0×2,7×0,2 мм с покрытием золотом.

Микрополосковая линия передач – из Al_2O_3 (99,6 %) шириной 0,254 мм, с медной фольгой толщиной 18 мкм и с покрытием золотом. На основание устанавливаются пьедестал и микрополосковые линии на электропроводящий двухкомпонентный компаунд Н20Е производства ЕРО-ТЕК. Затем с помощью того же компаунда устанавливается кристалл МШУ NC10117C-2640 (GaAs толщиной 100 мкм) и конденсаторы с определенной величиной зазора (рис. 4).

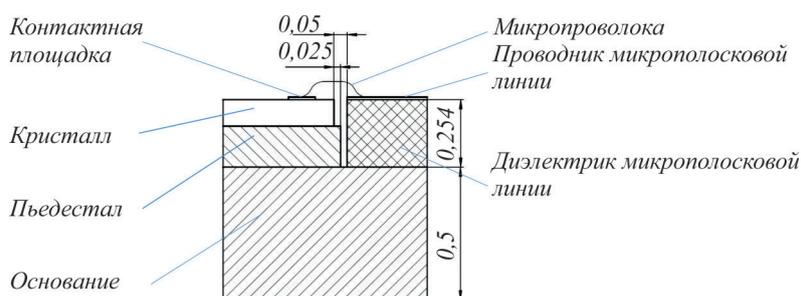


Рис. 4. Разрез модуля МШУ

Соединение контактных площадок СВЧ-микросхемы с микрополосковой линией и конденсаторами выполнено золотой проволокой диаметром 18 мкм. При разварке микропроволоки необходимо принимать во внимание специфику сборки СВЧ-элементов. Для уменьшения потерь на отражение необходимо минимизировать влияние неоднородностей линии передач с волновым сопротивлением 50 Ом. В рассматриваемой структуре основной неоднородностью является микропроволока, основными параметрами которой являются длина и диаметр.

В качестве соединительных элементов СВЧ-узлов предпочтительно использование золотой ленты либо нескольких микропроволок, включённых параллельно (рис. 5). На рис. 6 и в таблице приведены результаты моделирования коэффициентов передачи и отражения в зависимости от длины перемычки в диапазоне частот 20...60 ГГц.

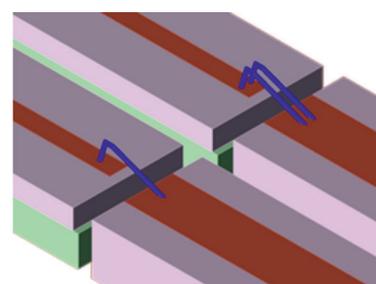


Рис. 5. Модели проволочных соединений

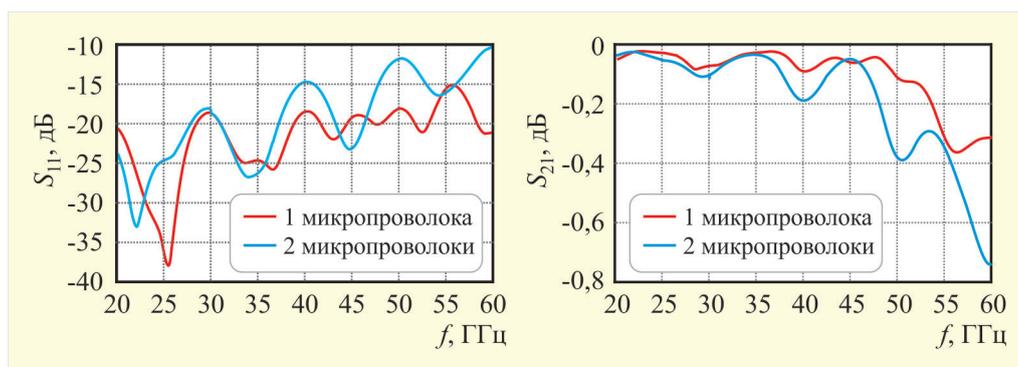


Рис. 6. Результаты моделирования параметров отражения и передачи микропроволоки

Зависимость коэффициентов передачи и отражения от длины перемычки в диапазоне частот до 40 ГГц

Количество перемычек	Параметр	Длина перемычки, мкм		
		250	300	350
1	S_{21} , дБ	-0,19	-0,4	-0,5
	S_{11} , дБ	-15,0	-12,0	-11,0
2	S_{21} , дБ	-0,09	-0,15	-0,18
	S_{11} , дБ	-18,0	-15,0	-16,0

Типичные значения размеров контактных площадок используемых элементов составляют 60...80 мкм. Монтаж более двух параллельно включенных проволок диаметром 18 мкм затруднителен.

3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ

Для формирования соединений внутри отдельных устройств использована установка присоединения выводов ультразвуковой сваркой ЭМ-4320-2 производства ОАО «Планар» (Беларусь). В качестве электродов применены капилляры для разварки методом «клин-клин» 30АВТ-ТI-2015-1.00-СМ и FP30-ТI-1515-1.00-СМ производства «Small Precision Tools» (США).

Собранные модули тестированы в измерительной оснастке. В качестве контактирующих устройств применены коаксиально-микророскопические переходы ХМ-РВ1-292F (до 50 ГГц) и ХМ-РВ1-185F (до 67 ГГц) фирмы «X-Microwave» (США).

Следующим этапом в сборке тракта РВ является установка на клей модулей в каналы и соединение модулей между собой. Особенностью межмодульных соединений является необходимость осуществления разварки в глубоком канале. Ширина канала составляет 3 мм, глубина – 3 мм. При межмодульном соединении ширина микророскопической линии (0,5 мм) позволяет осуществлять монтаж трёх параллельно включенных проволок.

При разварке межмодульных соединений использована установка присоединения выводов контактной сваркой ЭМ-4320-4, которая характеризуется 32-мм глубиной проникновения в зону сварки, что позволяет производить сварку в глубоких колодцах и каналах [2]. В качестве инструментов применены электроды для контактной сварки ЭК2-18-80 (НПООО «Спектрин», Беларусь). Для разварки оптимизирован рабочий режим со следующими параметрами:

Усилие прижима при касании	90 усл. ед.
Усилие прижима на первой сварке	90 усл. ед.
Усилие прижима на второй сварке	90 усл. ед.
Высота зоны поиска (для каждой из двух точек сварки).....	30 мм
Напряжение сварочного импульса.....	0,67 – 0,7 В
Длительность сварочного импульса	0,15 – 0,20 с

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный РВ миллиметрового диапазона, в отличие от всех видов выотомеров, используемых в беспилотной авиации (лазерных, акустических, барометрических), обладает неоспоримым достоинством – всепогодностью при обеспечении требуемой высокой точности и относительно малых габаритных размерах и массе. Технические характеристики РВ следующие:

Габаритные размеры РВ без антенн.....	120×40×24 мм
Масса РВ с рупорными антеннами.....	0,25 кг
Рабочая длина волны.....	8 мм
Мощность зондирующего сигнала.....	не более 1 Вт
Диапазон измеряемых высот.....	0,3 – 300 м
Интерфейс управления и информационного обмена	RS-485

Особенностями конструкции РВ являются использование элементов СВЧ в бескорпусном исполнении, модульный принцип конструирования, применение пьедесталов из псевдосплава

медь-молибден для монтажа кристаллов в модулях. Сборка РВ осуществлена по технологии гибридных интегральных схем с использованием проволочного монтажа в глубоких колодцах.

РВ прошел весь цикл климатических, лётных и виброиспытаний. Лётные испытания проводились на моделях БЛА «Ranger EX» и БЛА 1ЛА-150 «Гриф» из состава беспилотного авиационного комплекса БАК-100. Среднеквадратическая ошибка измерения высоты в диапазоне 0,3...10 м составила $\pm 0,2$ м, в диапазоне высот 10...100 м – не более ± 3 % от значения измеряемой высоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Климачев, И. И.** СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / И. И. Климачев, В. А. Иовдальский. – М.: Техносфера, 2006. – 351 с.
2. **Ланин, В. Л.** Формообразование проволочных соединений повышенной плотности в изделиях электронной техники / В. Л. Ланин, И. Б. Петухов // Технологии в электронной промышленности. – 2014. – № 2. – С. 76 – 78.
3. **Сосновский, А. А.** Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов: справочник / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович. – М.: Транспорт, 1987. – 256 с.
4. **Викторов, В. А.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В. А. Викторов, Е. В. Лукин, А. Ф. Совлуков; под ред. В. А. Викторова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.

Статья поступила 27 июня 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

Антенны и радары с электронным управлением лучом / Под ред. А.И. Синани, Г.В. Кауфмана. – М.: Радиотехника, 2016. – 234 с.

Рассмотрены наиболее значительные результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области антенной техники. Показана эффективность электронного управления лучом в радаров различного назначения. Проанализированы основные направления развития технологии антенных систем с электронным управлением лучом.

Для научных работников, аспирантов, инженеров-практиков, преподавателей и студентов радиотехнических специальностей.

ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 666.3

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КЕРАМИКА В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ LTCC

Л. В. Ляпин, А. В. Осипов, А. Г. Далингер

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

Проведено краткое ознакомление с технологией LTCC и основными этапами изготовления многослойных керамических плат по этой технологии. Показаны преимущества систем LTCC по сравнению с системами HTCC. Приведены результаты работы по созданию отечественной системы LTCC – СКМ и производственного процесса изготовления многослойных плат по технологии LTCC. Система включает низкотемпературную керамику СКМ и согласованные с ней проводниковые и резистивные пасты на основе драгметаллов Ag, Ag/Pd, Ag/Pt, Au, Au/Pt, обжигаемые в одном технологическом процессе при максимальной температуре 860 °С. Система LTCC – СКМ не уступает наиболее известной за рубежом системе «green tape™ 951» фирмы Du Pont. Приведены примеры ее применения в разработках и производстве компактных модулей СВЧ.

КС: низкотемпературная керамика «green tape», технология LTCC, многослойные платы, толсто- пленочные проводники, металлизация, ламинирование, совместный обжиг «co-fire»

LOW-TEMPERATURE CERAMICS IN THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING MULTI-LAYER CERAMIC BOARDS – LTCC

L. V. Lyapin, A. V. Osipov, A. G. Dalinger

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

A brief introduction to LTCC technology and to the main stages of manufacturing multi-layer ceramic boards using this technology has been made. The advantages of LTCC systems over HTCC systems are shown. The results of work on creating home-made LTCC – glass ceramics system and production process of manufacturing multi-layer boards using LTCC technology are presented. The system includes low-temperature glass ceramics and matching conductive and resistive pastes based on precious metals Ag, Ag/Pd, Ag/Pt, Au, Au/Pt, fired in one and the same technological process at maximal temperature 860 °C. LTCC – glass ceramics system is not inferior to the most well-known abroad system «green tape™ 951» by Du Pont company. The examples of its application in developments and production of compact microwave modules are given.

Keywords: low-temperature ceramics «green tape», LTCC technology, multi-layer boards, thick-film conductors, metallization, lamination, «co-fire»

1. ВВЕДЕНИЕ

В середине 60-х годов для повышения степени интеграции РЭА и снижения ее массы и габаритных размеров фирма RCA Corporation предложила новую прогрессивную концепцию

изготовления объемных (3D) электронных схем [1, 2], согласно которой проводники должны размещаться в объеме керамического тела в виде фрагментов схемы, расположенных на разных уровнях, разделенных диэлектриком и соединенных в нужных местах проводниками, пропущенными через слой диэлектрика. Для практической реализации этой концепции фирма IBM разработала технологию изготовления многослойных коммутационных керамических плат (МКП) [3]. Процесс начинался с изготовления пластифицированной керамической пленки «green tape», которая резалась на листы одинакового формата. В листах пробивались отверстия межслойных соединений, которые заполнялись проводниковой пастой. Далее на эти листы трафаретной печатью наносились толстопленочные проводники – фрагменты схемы. Листы с фрагментами схемы собирались в строгой последовательности в пакет и спрессовывались (ламинировались) до монолитного состояния. При ламинировании фрагменты схемы разных уровней соединялись между собой через сквозные отверстия межслойных соединений. В итоге формировалась компактная схема в объеме платы. Обжиг керамики и вжигание проводников проводились одновременно в одном процессе – процессе «co-fire». Число слоев платы могло достигать нескольких десятков. Технология нашла широкое применение в производстве корпусов и МКП с высоким (94 %) содержанием корунда и получила название HTCC (high temperature co-fire ceramic) – высокотемпературная совместно обжигаемая керамика. В системе HTCC были использованы проводники из вольфрама и молибдена. Обжигались корпуса и МКП при температурах 1500...1600 °С в восстановительной атмосфере. Однако высокое удельное сопротивление проводников (не менее 0,05 Ом/□) и относительно высокая диэлектрическая проницаемость корундовой керамики ($\epsilon = 9,4...10$) ограничивали быстродействие электронных схем.

С развитием компьютерной техники и аппаратуры беспроводной связи для повышения быстродействия электронных схем были сделаны попытки заменить проводники из тугоплавких металлов на проводники из серебра, золота и их сплавов с палладием и платиной. У этих металлов электрическое сопротивление на порядок меньше (не более 0,005 Ом/□), а температуры спекания их порошков лежат в пределах 750...900 °С. Чтобы обеспечить реализацию процесса «co-fire» при таких температурах, были разработаны новые керамические материалы, согласованные с проводниками по температуре обжига 850...900 °С и имеющие меньшие величины диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь на СВЧ.

Принцип формирования новой многослойной структуры остался таким же, как и в технологии HTCC, но процесс обжига (co-fire) проводился при 850...900 °С на воздухе. Новая технология носит название LTCC (low temperature co-fire ceramic) – низкотемпературная совместно обжигаемая керамика [4...6]. Интерес к новой технологии со стороны зарубежных фирм привел к созданию многообразия систем LTCC. Многие фирмы, в основном японские, создавали свои системы LTCC под свои конкретные задачи [7]. Это положение сохраняется и в настоящее время. Производители МКП, не владеющие методами синтеза керамических материалов, используют уже разработанные материалы LTCC, учитывая специфику технологии LTCC, которая состоит в том, что смешивать материалы разных систем LTCC нельзя.

Последующий зарубежный опыт становления и совершенствования технологии LTCC подтвердил её основные достоинства:

- компактные размеры и прочность конструкции плат;
- возможность интеграции пассивных компонентов и непосредственной установки чип-компонентов на плату;

- объемный дизайн (многослойные ВЧ/СВЧ-модули и коммутационные трехмерные платы аппаратуры с рабочими частотами до 100 ГГц) [8];
- высокая добротность и малые потери;
- стабильность параметров при внешних воздействиях;
- высокая повторяемость параметров;
- расширенный (в сравнении к многослойным печатным платам) диапазон рабочих температур и механических нагрузок;
- возможность организации массового производства.

2. ЭТАПЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МКП LTCC

Процесс изготовления многослойных плат можно разделить на два основных этапа, схематично представленных на рис. 1.

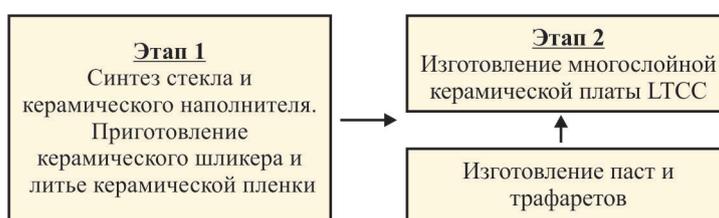


Рис. 1. Этапы технологии изготовления МКП LTCC

Этап 1. На этом этапе проводятся подготовка шихты и варка стекла в печах на воздухе, грануляция расплава стекла, дробление и помол гранул в дробилке, планетарных и вибрационных мельницах до частиц размером не более 10 мкм.

На этом же этапе по традиционной керамической технологии готовится наполнитель, например порошок α – Al_2O_3 [9, 10], с типичным распределением частиц порошков по размерам, представленным на рис. 2.

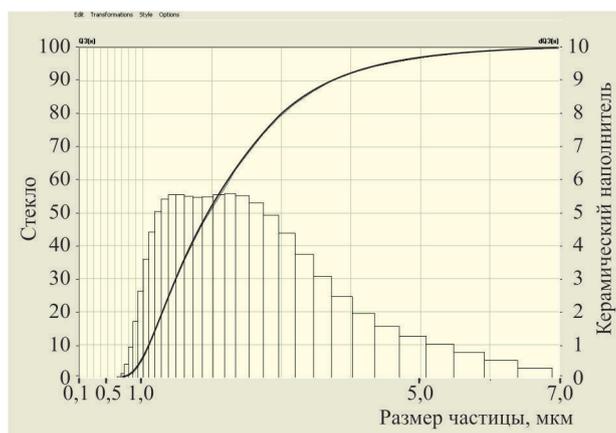


Рис. 2. Распределение по размерам частиц порошков стекла и керамического наполнителя

Завершается этап приготовлением керамического шликера и литьем из него керамической пленки. Порошки стекла и керамики, взятые в определенной пропорции, смешиваются вначале между собой, а затем с органическим биндером, пластификатором и растворителем для получения

керамического шликера определенной вязкости, контролируемой вискозиметром, например, Брукфильда. Шликер после гомогенизации и удаления из него газовых пузырьков выливается через щель фильеры на движущуюся ленту (майларовый носитель) для принудительной сушки, где из него постепенно удаляется растворитель. Полученная в итоге пластифицированная керамическая пленка вместе с майларом сматывается в рулон и затем режется на карты стандартных форматов (5×5; 6×6; 8×8 дюймов).

На рис. 3 приведена последовательность процессов изготовления керамической пленки.

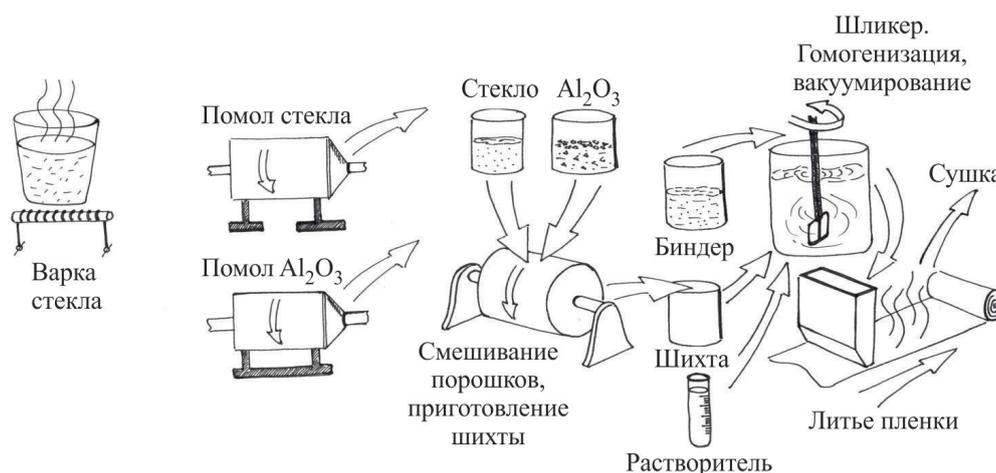


Рис. 3. Технология приготовления керамической пленки

Этап 2. Изготовление МКП LTCC. Типовая пооперационная схема процесса приведена на рис. 4. Этот этап начинается с операции раскроя керамической пленки на карты-заготовки. Для однозначной ориентации карт на последующих операциях изготовления плат и достижения более высокой точности совмещения слоев в плате, в картах в одном цикле прошиваются отверстия совмещения, реперные отверстия, отверстия межслойных соединений и сквозные окна. Операцию выполняют на автоматах, оснащенных штамповочными головками или лазером с ультрафиолетовым спектром излучения.

На следующей операции отверстия межслойных соединений заполняются проводящей пастой методом контактной трафаретной печати через фольговые трафареты-экраны или через майларовую основу, после чего на керамические карты также трафаретной печатью наносят послойно проводники через сетчатые трафареты. Карты с проводниками собираются в строгой последовательности в пакет и спрессовываются в ламинат на изостатическом прессе при давлении 180...250 кг/см² и температуре 55...90 °С. Затем из ламината вырезаются «сырые» полуфабрикаты плат, на торцы которых, при необходимости, наносятся металлизационные покрытия.

Обжиг платы проводится в одном процессе «co-fire», когда осуществляется выжиг органической связки, обжиг керамики и одновременное вжигание проводников.

В связи с тем что системы LTCC разных фирм отличаются составами керамики и проводников, а следовательно, и физико-химическими процессами формирования стеклокристаллической структуры, температурные профили обжига плат индивидуальны для каждой системы.

После обжига на плату пайкой или с помощью клея монтируются навесные элементы и выводы для коммутации цепей платы с внешними устройствами.

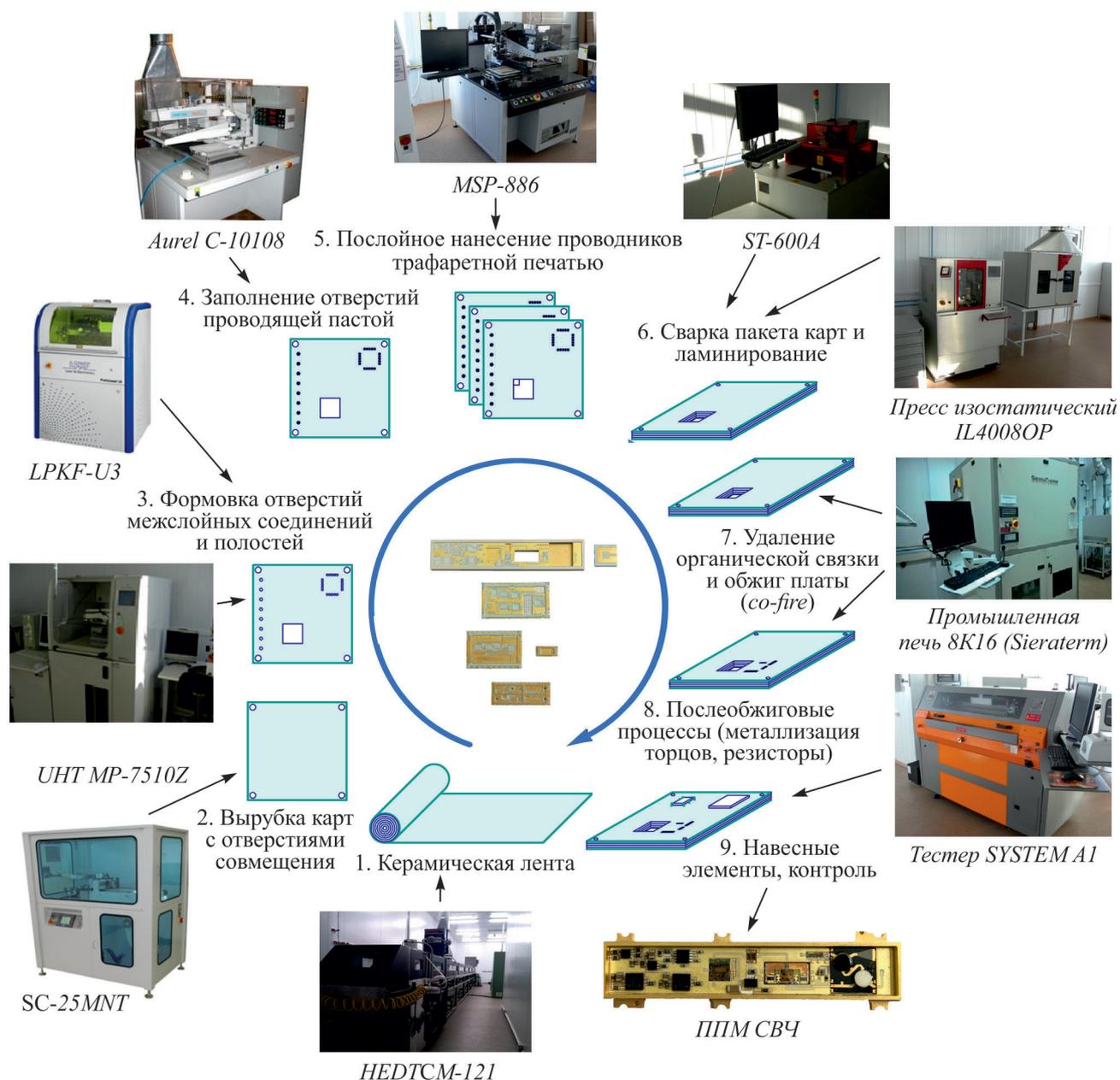


Рис. 4. Схема процесса изготовления МКП LTCC

Весь процесс должен сопровождаться жестким контролем технологических режимов и межоперационным контролем:

- топологии отверстий межслойных соединений;
- качества заполнения отверстий проводящей пастой;
- топологии проводников;
- цепей платы и изоляции между проводниками;
- пригодности проводников к пайке припоями и сварке золотой проволоки;
- геометрических размеров плат;
- параметров СВЧ-трактов (при необходимости).

Для обеспечения основного процесса предусмотрено также изготовление проводниковых паст, фотошаблонов, фольговых и сетчатых трафаретов.

3. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СИСТЕМАХ LTCC

3.1. Керамика

В системах LTCC применяются низкотемпературные стеклокерамические и керамические материалы с возможно низкими значениями диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ на СВЧ. Примеры комбинаций материалов в системах LTCC приведены в табл. 1 [11]. Там же для сравнения дана комбинация материалов в системах HTCC.

Таблица 1

Примеры комбинаций материалов в системах LTCC и HTCC

Система	Керамика	ϵ ($\text{tg}\delta$, %)	$T_{\text{обж}}$, °C	Проводник	ρ , Ом·см
LTCC	Стеклокерамический наполнитель (КН) Кристаллизующееся стекло (КС) КС / КН	5,6 – 7,8 (0,1 – 0,3)	850 – 900	Au Ag Ag/Pd Ag/Pt	2,3 1,6 10,3 1,7 – 3,3
HTCC	Корундовая керамика (92 – 98 % Al_2O_3)	9 – 11 (0,05 – 0,1)	1500 – 1650	Mo W	5,8 5,5

В табл. 2 приведены системы LTCC и некоторые свойства низкотемпературных стеклокерамических материалов зарубежных фирм.

Таблица 2

Системы LTCC некоторых зарубежных фирм

Фирма	Состав стеклокерамики	ϵ ($\text{tg}\delta$, %)	ρ , Ом·см	$\alpha \cdot 10^6$, 1/град	λ , Вт/(м·К)	σ , МПа
Asahi glass	Al_2O_3 – 35 % Форстерит – 25 % BSG* – 40 %	7,4 (0,2)	10^{14}	5,9	4,2	235
Kyocera	Al_2O_3 + ЗК-стекло	6,2 (0,15)	10^{14}	4,2	3	210
Fujitsu	Al_2O_3 – 50 % BSG – 50 %	5,6 (0,18)	10^{14}	4,0	4,0	200
Matsushita	(PbO + BSG) – 45 % Al_2O_3 – 55 %	7,3 (0,2)	10^{12}	6,0	3,0	260
KOA	Al_2O_3 + SiO_2 + MgO + B_2O_3	7,0 (0,3)	10^{13}	5,5	3,0	250

* BSG – боросиликатное стекло.

Окончание табл. 2

Фирма	Состав стеклокерамики	ε (tg δ , %)	ρ , Ом·см	$\alpha \cdot 10^6$, 1/град	λ , Вт/(м·К)	σ , МПа	
Heraeus CT700, CT800	Al, B, Na, Si, Co, Ti	7,8 (0,2)	10^{12}	6,4	3	170	
Ferro A6	CaO + B ₂ O ₃ + SiO ₂ Li, Na, K	5,9 (0,2)	10^{12}	7,0	2,0	170	
Du Pont	951	Al ₂ O ₃ + CaZrO ₃ + стекло	7,8 (0,3)	10^{12}	5,8	3,0	320
	943	Al, B, La, Cu, Mg, Na, Si, Li, Ca, Fe, Pb	7,5 (0,2)	10^{12}	4,5	4,4	230
	9K7	–	7,1 (0,1)	10^{12}	4,4	4,6	230

Стеклокерамика (СКМ), по определению, включает стекло и керамический наполнитель, которые в целом определяют конечные свойства СКМ. В зависимости от требуемых параметров СКМ, стекла могут быть кристаллизующимися в процессе обжига «co-fire», некристаллизующимися, а также могут быть в виде их смесей [12]. В большинстве своем применяются боросиликатные стекла и керамика, синтезируемые в системах оксидов Al₂O₃, CaO, SiO₂, B₂O₃, MgO, ZnO, а также готовые соединения форстерит и кордиерит.

К настоящему времени наибольшее распространение нашли четыре последние системы (см. табл. 2), среди которых первое место занимает система «green tape 951».

Этими фирмами организовано коммерческое производство керамических пленок и согласованных с ними проводниковых паст.

Аналогичные работы по созданию отечественных систем ЛТСС проводятся в России.

Наиболее завершенная разработка отечественной низкотемпературной керамики системы ЛТСС – СКМ проведена АО «НПП «Исток» им. Шокина» [13], а согласованных с ней проводниковых паст – ООО «НПП «Дельта-Пасты».

В табл. 3 приведены свойства керамики этой системы.

Таблица 3

Свойства низкотемпературной керамики системы СКМ

Параметр	Значение
Оксиды в составе материала СКМ	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , B ₂ O ₃ , CaO, MgO, ZnO, ZrO ₂ , CuO
Толщина керамических листов, мкм	100±10; 150±15; 250±20
Размеры, мм	(130×130)±0,5 (152×152)±0,5 (200×203)±0,5
Диэлектрическая проницаемость (на 10 ГГц)	7,2 – 0,2
Тангенс угла диэлектрических потерь (на 10 ГГц)	0,0012
Сопротивление изоляции, Ом·см	10^{12}

Окончание табл. 3

Параметр	Значение
Электрическая прочность, кВ/мм	$\geq 10^4$
Температура обжига, °C	860
Усадка (X, Y), %	8,2±0,3
Коэффициент масштабирования (X, Y)*	1,089
Усадка (Z), %	15,0±0,4
Коэффициент масштабирования (Z)*	1,176
Плотность, г/см ³	3,1
ТКЛР, 1/град (в диапазоне 100...400 °C)	$(58 - 72) \cdot 10^{-7}$
Механическая прочность на изгиб, МПа	260
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	3,0
Шероховатость поверхности, мкм	1,25
Кривизна поверхности, мкм/см	20

* Коэффициент масштабирования – это количественная характеристика обжиговой усадки керамики. Он необходим при составлении программ для изготовления фотошаблонов послойной топологии проводников и пробивки отверстий межслойных соединений в «сырой керамике».

Керамический материал СКМ изготавливается по ТУ6366-004-07622667-2012 в виде порошка, а «сырая» керамическая пленка – по ТУ6366-001-07622667-2008 в виде листов.

На практике температурный профиль режима обжига керамики должен подбираться по температурным точкам фазовых переходов, которые определяются при проведении дифференциально-термического анализа (ДТА).

График ДТА для керамики системы СКМ приведен на рис. 5 и 6.

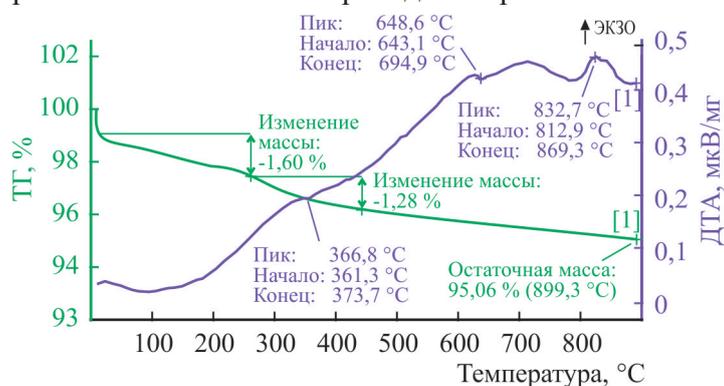


Рис. 5. Термовесовой (ТГ) и дифференциально-термический (ДТА) анализ СКМ. Нагрев на воздухе со скоростью 10 К/мин

На стадиях 1 и 2 происходит нагрев образца и выжиг основной массы органической связки. Длительность стадии 2 при числе керамических слоев до шести должна быть не менее 2 ч. С увеличением числа диэлектрических слоев в плате длительность может увеличиваться до 10 ч. Выжиг остатка связки продолжается при подъеме температуры до начала плавления стекла (стадия 3). На этих стадиях преследуется главная цель – добиться полного удаления связки до

начала плавления стекла. На стадиях 4 и 5 расплавленное стекло взаимодействует с керамическим наполнителем и частично кристаллизуется, в результате чего формируется плотная структура керамики с необходимыми электрическими свойствами на СВЧ. Охлаждение (стадия 6), как правило, принудительное для сохранения структуры, сформированной на стадии 5. Скоростью подъема температуры на стадии 4 можно сдерживать или интенсифицировать процессы плавления стекла и кристаллизации как самого стекла, так и продуктов его взаимодействия с наполнителем и таким способом регулировать усадку керамики*. Выдержка на стадии 5 проводится при пиковой температуре 860 °С.

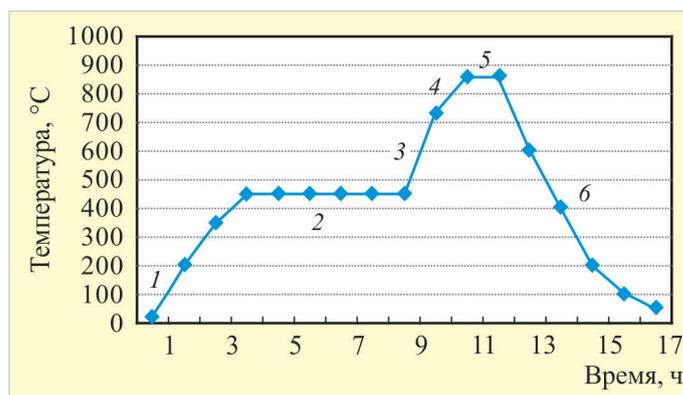


Рис. 6. Типовой режим обжига низкотемпературной керамики LTCC – СКМ

3.2. Проводники

В систему СКМ входят проводниковые пасты на основе Ag, Au и их сплавов Ag/Pd и Ag/Pt, Au/Pd. Пасты совместимы с керамикой СКМ по обжиговой усадке и производятся ООО «НПП «Дельта-Пасты» (ТУ 6365-023-59839838-2012).

Пасты в системах LTCC представляют собой смесь компонентов, каждый из которых выполняет определенные функции.

Проводящий компонент – это металлический порошок (или смесь порошков), который при вжигании спекается в непрерывную матрицу со свойствами проводника.

Адгезионный компонент – это порошки керамики, стекла или их смеси, пропитывающие матрицу проводника и обеспечивающие сцепление проводника с керамикой, а также регулирующие интенсивность спекания металлических порошков и согласование, усадку проводников и керамики при обжиге.

Органическая связка – компонент, придающий пасте необходимые для печати реологические свойства.

Технология сборки модулей СВЧ на базе МКП предъявляет к проводникам технологические требования по их стойкости к расплавам низкотемпературных припоев при пайке навесных элементов, по обеспечению возможности термокомпрессионной и термозвуковой сварки коммутационной проволоки и фольги, а также по прочности сцепления с керамикой.

Все эти требования обеспечиваются созданием ряда паст по назначению.

* Предметом дополнительных исследований должно стать изучение влияния скорости подъема температуры на стадии 4 на электрические параметры керамики ϵ и $\text{tg}\delta$, которые предположительно могут отличаться от заявленных величин (см. табл. 3) вследствие переменности конечной структуры керамики [14].

Пасты на основе серебра, золота имеют высокую проводимость и применяются для печати сигнальных проводников и СВЧ-трактов на наружных и внутренних слоях платы. Для термокомпрессионной и термозвуковой сварки золотой проволоки используют пасты на основе золота.

Подобные пасты, но с большей вязкостью и большим массовым содержанием проводящей компоненты применяются для заполнения отверстий межслойных соединений в керамических слоях.

Пасты, содержащие сплавы Ag/Pd, Ag/Pd/Au, Ag/Pt и Au/Pt, применяются для экранных слоев и площадок, стойких к расплавам низкотемпературных припоев.

Эти пасты могут также применяться для металлизации плат после обжига.

Сводные данные по назначению паст приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Проводники ООО «НПП «Дельта-Пасты»
(ТУ6365-023-59839838-2012)**

Назначение	Золотые	Серебряные	Смешанные
Сигнальные линии, цепи питания	ПП-151	ПП-121 ПП-131	ПП-132 (Ag/Pd) ПП-141 (Ag/Pd)
Внутренние проводники, экраны	ПП-151	ПП-121 ПП-131	ПП-132 (Ag/Pd) ПП-141 (Ag/Pd)
Заполнение отверстий	ПП-153	ПП-111	ПП-112 (Ag/Pd/Au)
Внешние проводники: термокомпрессионная сварка, Au-проволока пайка припоями: на «сырую керамику»	ПП-151	ПП-121	– ПП-152 (Au/Pt) ПП-141 (Ag/Pd) ПП-441 (Ag/ Pt) ПП-441 (Ag/ Pt)
второй слой на обожженные проводники			

4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ LTCC

Перед началом процедуры проектирования платы выбирается конкретная система LTCC, исходя из конструкции платы, рабочих частот аппаратуры, стоимости материалов LTCC и их доступности. Материалы выбранной системы необходимо применять или приобретать комплектом, который должен включать керамическую пленку «green tape» и проводниковые пасты. При выборе материалов следует руководствоваться рекомендациями фирмы-производителя по согласованию материалов в процессе производства плат и при сборке конечного изделия.

При проектировании МКП необходимо учитывать возможности технологии LTCC, накладывающие технологические и конструктивные ограничения. Известно, что при обжиге неметаллизированные керамические детали уменьшаются в размерах за счет усадки в процессе жидкофазного спекания порошков. Усадка и усадочный коэффициент масштабирования K_{yc} керамики некоторых систем LTCC приведен в табл. 5.

Усадка металлизированной керамики отличается от величин, приведенных в табл. 5, и зависит от степени насыщенности платы проводниками, наличия колодцев, сквозных отверстий и их положения на плате. Фактический K_{yc} конкретной платы находят на этапе её макетирования. В дальнейшем он учитывается в расчетах топологии проводников опытных образцов, нано-

симых на заготовки из «сырой» керамики, а также координат центров отверстий межслойных переходов.

Таблица 5

**Усадка и усадочный коэффициент масштабирования K_{yc}
керамики некоторых систем LTCC**

Оси координат	«Green tape 951»	«Green tape 943»	9К7	Ferro, А6	СКМ
X, Y	12,7±0,3 %	9,5±0,3 %	9,1±0,3 %	15,5±0,3 %	8,2±0,3 %
$K_{yc XY}$	1,145±0,003	1,105±0,003	1,100±0,003	1,183±0,003	1,089±0,003
Z	15,0±0,4 %	10,3±0,4 %	11,8±0,4 %	22,5±0,4 %	15,0±0,4 %
K_{ycZ}	1,176±0,004	1,115±0,004	1,134±0,004	1,290±0,004	1,176±0,004

Диаметры отверстий межслойных переходов могут составлять 0,15; 0,2 и 0,3 мм, причем оптимальным следует считать диаметр, равный толщине керамического слоя. Суммарная высота межслойных переходов, расположенных на одной оси и следующих один за другим, не должна превышать 3-х слоев керамики.

Диаметры теплоотводящих отверстий межслойных переходов должны быть равны 0,2 или 0,3 мм, но предпочтение отдается диаметру 0,2 мм.

Минимальная ширина проводников и минимальный зазор между ними должны составлять 150 мкм при серийном производстве и в отдельных случаях 100 мкм.

Число керамических слоев в плате может достигать 20 шт. при толщине слоя 130 мкм и 10 шт. при толщине слоя 220 мкм.

Экранные слои необходимо выполнять в виде сетки, а площадь металлизационного покрытия на внутренних слоях не должна превышать 50 и 80 % на внешних слоях топологии. Для исключения или уменьшения коробления плат при обжиге в проектах рекомендуется соблюдать равномерность заполнения проводниками площади слоев и объема многослойного модуля. При этом свободные от проводников площади и объемы платы должны заполняться «ложными» проводниками и межслойными соединениями с плотностью, близкой к проектной.

В зависимости от сложности проекта и по экономическим соображениям платы могут выполняться в двух вариантах:

- первый вариант предусматривает применение проводниковых паст серии ПП на основе Au (ПП-151, ПП-153) и Au/ Pt (ПП-152);
- второй – применение проводниковых паст серии ПП на основе металлов: Ag (ПП-111, ПП-121), Au (ПП-151), Ag/Pd (ПП-141), Ag/Pd/Au (ПП-112), Ag/Pt (ПП-441).

Более подробно правила проектирования МКП LTCC изложены в источниках [15...17].

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ LTCC В СВЧ-ТЕХНИКЕ

Применение технологии LTCC в СВЧ-технике основано на её достоинствах, приведенных в разд. 1.

5.1. Полосно-пропускающие фильтры (ППФ)

Внешний вид ППФ показан на рис. 7



Рис. 7. Полосно-пропускающие фильтры с центральными частотами в диапазоне 2,1...3,6 ГГц

Фильтры соответствуют техническим условиям (АБУК.434830.004 ТУ), максимальные потери в полосе пропускания от 2 до 20 % по уровню 3 дБ – не более минус 6 дБ (фактические потери – от 3,5 до 4,5 дБ), максимальное заграждение вне полосы пропускания – 60 дБ.

5.2. Герметичный корпус для СВЧ функциональных узлов

На рис. 8 показан корпус малошумящего усилителя (МШУ), выполненный из 4-х слоев керамики с толсто пленочными проводниками. Толщина каждого слоя керамики составляет 210 мкм в обожженном состоянии. Корпус предназначен для герметизации трех кристаллов: защитного устройства (ЗУ или ЗУА), МШУ и согласующего усилителя. Ввод и вывод СВЧ-энергии выполнены в виде микрополосковой линии, которая проходит под внешним ободком. На внешней стороне корпуса микрополосковая линия переходит в копланарную линию передачи, что обеспечивает наилучшее согласование передающей линии при дальнейшем использовании корпуса в составе модулей СВЧ. Потери СВЧ-мощности такого перехода в X-диапазоне не превышают 0,15 дБ. КСВН – не более 1,3.

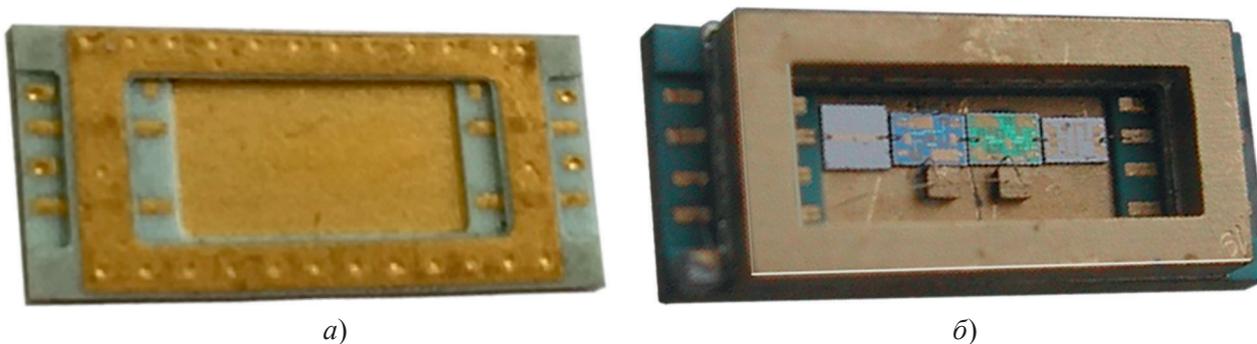


Рис. 8. Корпус МШУ
а – из керамики LTCC – СКМ; б – с микросхемами приёмного канала

Верхний слой корпуса покрыт золотой пастой, предназначенной для пайки на него рамки из сплава 29НК.

Кристаллы в корпус могут устанавливаться на электро- и теплопроводящий клей. Внутри корпуса располагаются дополнительные элементы (конденсаторы, резисторы, индуктивности и т. д.), обеспечивающие необходимую развязку по цепям питания и управления. В месте размещения кристалла ЗУ в керамических слоях выполнены металлизированные переходные отверстия, которые обеспечивают отвод тепла от кристалла на нижнюю поверхность корпуса.

Герметизируется корпус крышкой из сплава 29НК (на рисунке не показана), которая приваривается к рамке шовно-роликовой сваркой.

Развязка по СВЧ вход/выход данного корпуса составляет более 50 дБ. Это позволяет размещать в нем функциональные узлы с общим усилением 30...35 дБ. ЗУ в данном корпусе испытывалось на входную импульсную мощность до 15 Вт.

Данный корпус может применяться в разработках функциональных узлов иного назначения, требующих герметичности и не выделяющих при работе большого количества тепла. На рис. 9 приведены примеры встраивания корпуса с МШУ как функционального узла в submodule АФАР X-диапазона длин волн.

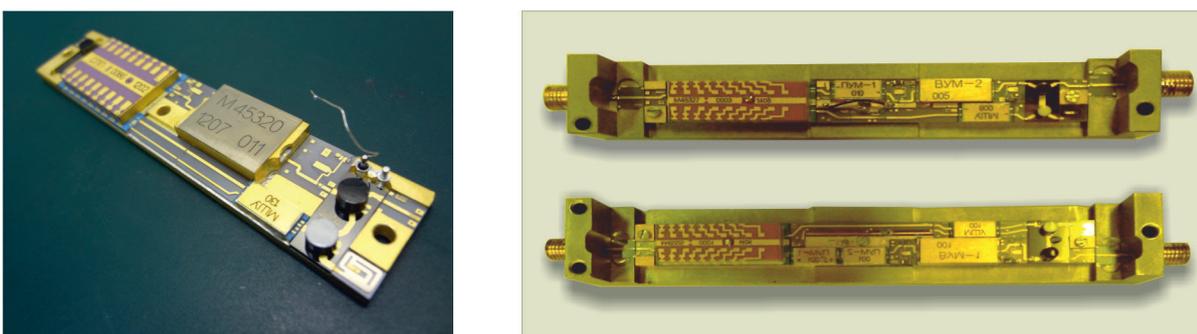


Рис. 9. Корпус МШУ в составе submodule АФАР

5.3. Многослойные керамические платы в submodule АФАР

Многослойные платы содержат слои диэлектрика толщиной 140 и 210 мкм. Изображенные на рис. 10 платы предназначены для применения в составе приемопередающих модулей (ППМ) АФАР, разрабатываемых в АО «НПП «Исток» им. Шокина».

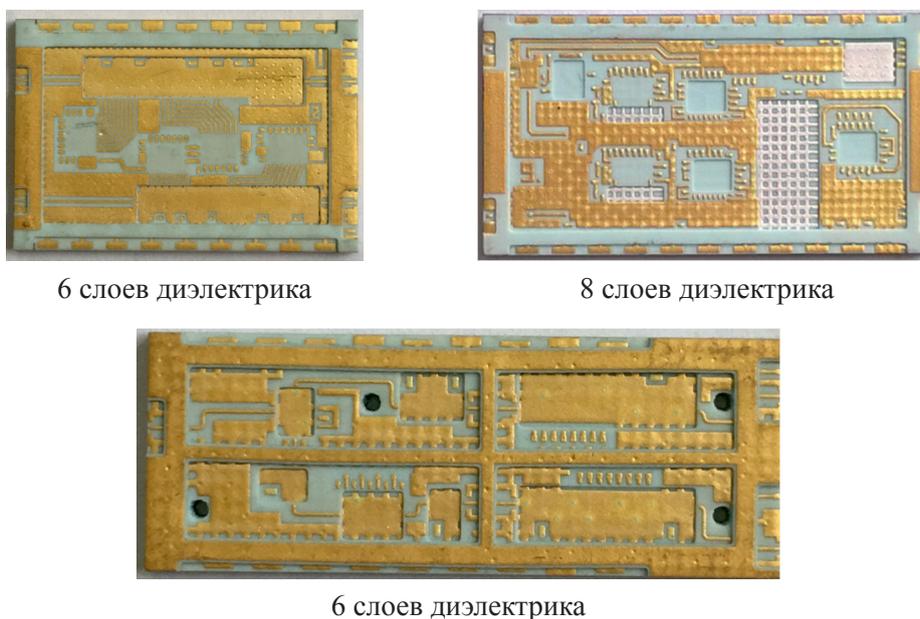


Рис. 10. LTCC-платы диаграммообразующих submodule АФАР

Отличительной особенностью диаграммообразующих модулей является большое количество внешних связей: это управление дискретными аттенуаторами, управление дискретными фазовращателями, переключатели «прием/передача», цепи питания и контроля. При параллельном управлении общее количество контактов может достигать 170 шт. Применение последовательно-параллельного управления снижает количество внешних связей до 10...12. Однако внутреннее количество управляющих цепей не уменьшается. Для решения этой проблемы в LTCC-платах выделяется 2...3 слоя разводки внутренних цепей. Цепи питания и управления экранируются металлизированными слоями. Для передачи СВЧ-сигналов выделены два верхних слоя. На этом этапе все МИС СВЧ и НЧ располагаются на верхнем слое, что обеспечивает удобство их установки и разварки контактных площадок.

Основные СВЧ-элементы схем рассчитывались с применением программы АДС. Устойчивость каналов ПРМ и ПРД проверялась экспериментально, и по результатам экспериментов вносились необходимые изменения в топологию слоев.

Расположение навесных элементов на LTCC-платах различных submodule приведено на рис. 11.

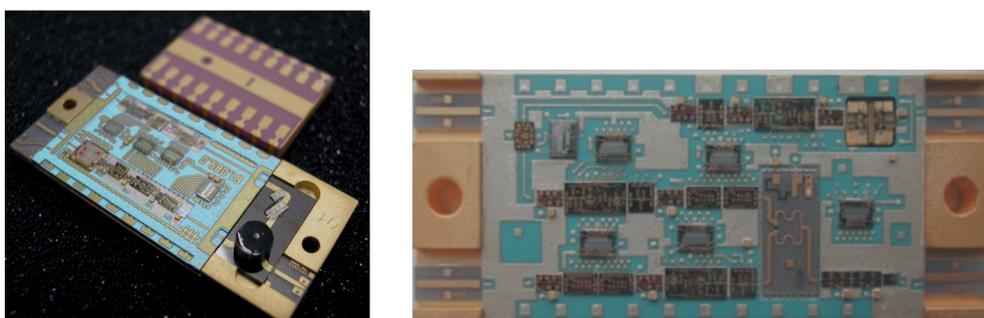


Рис. 11. Многослойные платы в составе ППМ СВЧ АФАР

Следующим шагом в развитии этого направления стала разработка 14-слойной платы, на базе которой собираются submodule АФАР X-диапазона. В отличие от предыдущих конструкций (см. рис. 9 и 11) submodule, данный submodule собран на одной плате, к которой до установки навесных элементов припаиваются металлическое основание и рамка из сплава 29НК припоем Au80Sn20. Внешний вид платы показан на рис. 12, а submodule АФАР – на рис. 13.

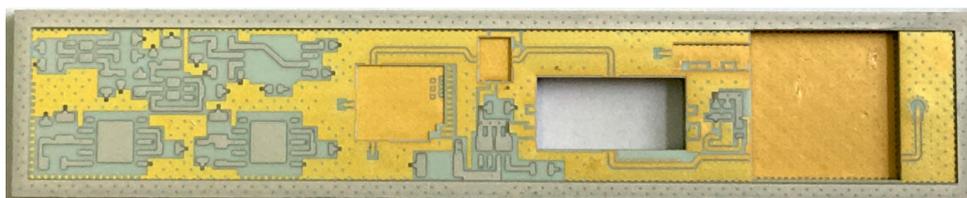


Рис. 12. Многослойная плата системы СКМ для ППМ СВЧ-изделия

Многослойная конструкция плат LTCC позволила в разработанных submodule с помощью переходных отверстий произвести необходимую разводку СВЧ- и НЧ-проводников внутри слоев керамики, обеспечивая при этом значительную экономию пространства внутри ППМ. Это придает ППМ компактные размеры и многофункциональность, поскольку появилась возможность установить внутри модуля дополнительные элементы для обработки сигнала.

Высокая плотность компоновки элементов внутри модуля довольно часто приводит к возникновению нежелательных взаимосвязей между ними. Использование LTCC-керамики позволяет снизить возникновение таких связей к минимуму, т. к. каждый слой имеет свою экранировку.

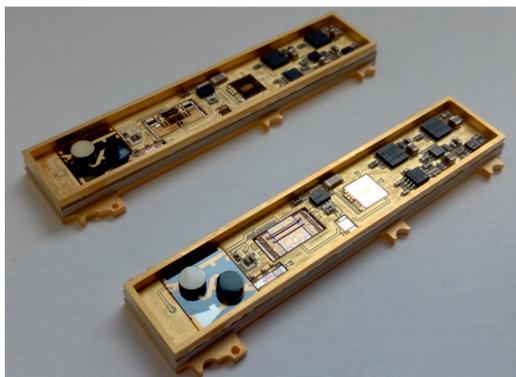


Рис. 13. Субмодули АФАР СВЧ-изделия, собранные на базе многослойной платы системы СКМ

Главным требованием при разработке таких типов ППМ было обеспечение поверхностного контактного соединения модулей (ПКСМ) [18]. ПКСМ – это способ соединения, основанный на прижатии, через контактный соединитель, выходного СВЧ- и НЧ-контакта модуля к поверхности, на которой размещаются ППМ, для дальнейшей работы. Так как особенности LTCC-технологии позволяют при помощи переходных отверстий переходить из слоя в слой, то выводы контактов СВЧ и НЧ должны находиться на нижнем поверхностном слое LTCC-основания (рис. 14).

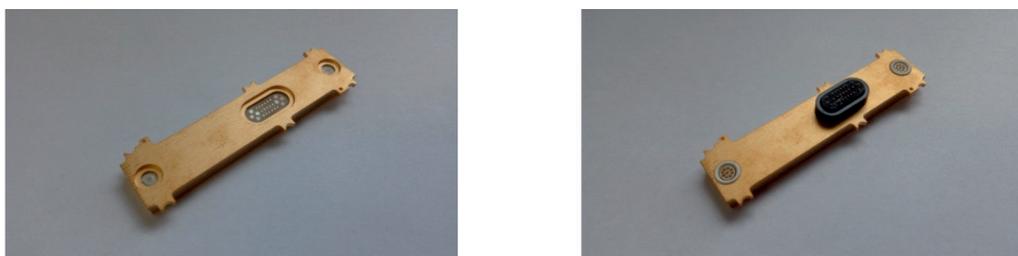


Рис. 14. СВЧ- и НЧ-контакты, выведенные на нижний слой LTCC-керамики

Использование ПКСМ обеспечивает низкие потери СВЧ, плотное и надежное соединение в линейке АФАР и легкую замену модулей при их неисправностях.

В разработанных ППМ АФАР вся элементная база МИС СВЧ (АО «НПП «Исток» им. Шокина») выполнена на материале GaAs. Поэтому использование LTCC-материала является приоритетным, т. к. значения КТР GaAs и LTCC-керамики близки, что устраняет большое количество проблем, возникающих при сборке и эксплуатации ППМ.

Авторы выражают свою признательность сотрудникам АО «НПП «Исток» им. Шокина» Ю. И. Тодосечуку, С. С. Спиридоновой, В. С. Горяйнову и А. А. Васильеву за участие в подготовке иллюстраций к статье, а также С. В. Шацкому, М. С. Карасеву, А. А. Лисицину, В. И. Алексеенкову за проведенные работы по разработке и использованию LTCC-керамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоэлектроника за рубежом. – 1981. – Вып. 6.
2. Electronics. – 1980. – Vol. XI, No 25. – P. 50 – 51.
3. **Patent 3189978. U.S.** Methods of making multilayer circuits / H. Stetson. – June, 1965.
4. Production Engineering. – Vol. VI, No 6. – P. 30 – 35.
5. **Minges, M. L.** Electronic materials / M. L. Minges // Handbook, Vol. I, Packaging (ASM International, 1989).
6. **Tummala, R. R.** Ceramics and glass-ceramic packaging in the 1990 / R. R. Tummala // J. Am. Ceram Soc. – 1991. – Vol. 74, No 5. – P. 895 – 908.
7. **Sawhill, H. T.** Materials compatibility and cosintering aspects of shrinkage control in LTCC packages / H. T. Sawhill // Ceram. Substrates and Package Electron. Appl. Proc. Int. Symp. Ceram. Substrates and Package, Denver, Colo, Oct. 18 – 21, 1987. – Westerville (Ohio), 1989. – P. 307 – 319.
8. Трехмерные СВЧ-схемы на основе многослойных керамических структур // Новости СВЧ-техники / АО «НПП «Исток» им. Шокина». – 2000. – № 11. – С. 1 – 7.
9. **Кинжери, У. Д.** Введение в керамику / У. Д. Кинжери. – Москва, 1964.
10. **Батыгин, В. Н.** Вакуумно-плотная керамика и её спаи с металлами / В. Н. Батыгин, И. И. Метелкин, А. М. Решетников // Москва, 1973.
11. **Imanaka.** Multilayered low temperature co-fire ceramics (LTCC) technology / Yoshihiko Imanaka // Fujitsu Laboratories, Ltd, Japan, 2005.
12. **Патент 5216207 США**, июнь 1993.
13. **Патент 2410358**, 06.07.2009.
14. **Патент 2009/0110939. A1**, апрель 2009.
15. Сайт www.mcm.dupont.com.
16. Сайт www.anaren.com.
17. Сайт www.atceramics.com.
18. **Далингер, А. Г.** Совершенствование структуры приемопередающего модуля АФАР СВЧ-диапазона / А. Г. Далингер, В. М. Мальщик, В. А. Иовдальский // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 2 (533). – С. 75 – 83.

Статья поступила 10 октября 2017 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.373.4

СВЧ-ГЕНЕРАТОР НА АКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ – ЧИП-УСИЛИТЕЛЕ

В. Ф. Губарев

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

Проведен анализ СВЧ-генератора, активным элементом которого является усилитель, выполненный в виде кристалла или чип-конструкции. Усилитель включается в схему генератора таким образом, чтобы между обратной стороной кристалла и основанием генератора был образован импеданс обратной связи. Представлены результаты анализа частоты и мощности генератора в зависимости от параметров обратной связи и нагрузки. Проведено сравнение перестройки частоты экспериментального генератора с результатами расчета.

КС: СВЧ-генератор, чип-усилитель, модель с отрицательным сопротивлением, мощность, перестройка частоты

THE MICROWAVE OSCILLATOR ON THE ACTIVE ELEMENT – CHIP AMPLIFIER

V. F. Gubarev

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

An analysis of the microwave oscillator, the active element of which is an amplifier manufactured in the form of a crystal or a chip structure, has been made. The amplifier is included into the oscillator circuit in such a way that a feedback impedance is formed between the reverse side of the crystal and the oscillator base. The results of the frequency analysis and the oscillator power analysis are presented depending on feedback and load parameters. The frequency tuning of the experimental oscillator is compared with the results of the calculation.

Keywords: microwave oscillator, chip amplifier, negative resistance model, power, frequency tuning

Генераторы, построенные на усилителях в виде функционально самостоятельных устройств (корпусированных или в виде ГМИС), известны давно и рассмотрены как в зарубежной, так и в отечественной литературе [1]. Как правило, такой усилитель представляет собой достаточно протяженную (по сравнению с рабочей длиной волны) конструкцию и монтируется непосредственно на «заземляющую» поверхность для устранения нежелательных возбуждений. Чтобы построить генератор, необходимо с выхода усилителя на его вход обеспечить обратную связь (ОС), которая, в силу конструкции усилителя, имеет размеры, превышающие рабочую длину волны, и ее создание представляет собой часто непростую задачу. Это обстоятельство приводит к тому, что генераторы требуют достаточно трудоемкой настройки цепи ОС и работают, как правило, в узкой полосе частот. Известны, например, генераторы с ДР в цепи ОС, работающие

на фиксированной частоте или имеющие очень небольшую электрическую перестройку (менее 1 %) [2]. Для повышения диапазона перестройки (до 10 % и более) могут применяться, например, перестраиваемые фильтры на магнитоэлектрических волнах в цепи ОС. Однако эти фильтры имеют габаритные размеры, значительно большие, чем габариты усилителя, и требуют для перестройки использования токов до 1 А [3].

Развитие полупроводниковой технологии последних лет привело к появлению в каталогах фирм, производящих СВЧ электронную комплектацию, широкого перечня усилителей, которые выполнены полностью на полупроводниковом кристалле, имеющем размеры одного порядка с размерами дискретного транзистора. Например, кристалл усилителя NBB-300 размерами $0,4 \times 0,4$ мм меньше кристалла полевого транзистора 3A612-A5. В дальнейшем в качестве примера будут использованы характеристики усилителя, близкие к параметрам NBB-300. Для выполнения функции усилителя кристалл NBB-300 должен быть посажен на хорошо «заземленную» поверхность с целью обеспечения его устойчивости. Однако, если обеспечить между посадочной стороной кристалла и общим основанием схемы некоторый импеданс (импеданс ОС), то возможно возникновение автоколебаний и, следовательно, создание генерирующей структуры. Если сравнивать генераторы, построенные на кристаллах усилителя и транзистора, то общим для них является механизм образования ОС. Но при этом есть и существенная разница. Во-первых, входное и выходное сопротивления усилителя, в отличие от транзистора, обычно согласованы с 50 Ом, что приводит к различному построению внешних цепей. Во-вторых, обеспечить питание генератора на усилителе проще, т. к. этому способствует структура цепей питания внутри кристалла усилителя, следовательно, возможно уменьшение размеров генератора. И в-третьих, коэффициент усиления усилителей (15...20 дБ), как правило, больше, чем у транзисторов (менее 10 дБ). Это дает дополнительные возможности улучшения характеристик, обеспечения стабильности и устойчивости колебаний при изменении внешних воздействующих факторов и параметров цепей генератора для различных целей, например для увеличения диапазона электрической перестройки, повышения выходной частоты и др.

При анализе генератора для определения его основных характеристик и области работоспособности оправдано использование максимально упрощенной (пока это не входит в противоречие с экспериментальными результатами) эквивалентной схемы усилителя. Такой усилитель, у которого вход и выход абсолютно развязаны и согласованы с 50 Ом, изображен на рис. 1.

Идеализированная характеристика зависимости выходной мощности усилителя от входной показана на рис. 2.

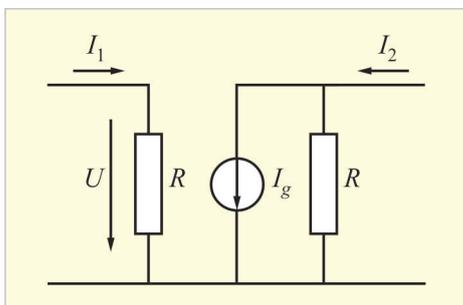


Рис. 1. Схема идеального усилителя

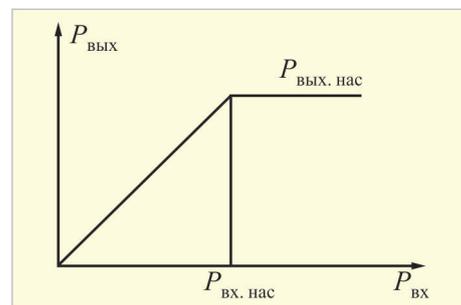


Рис. 2. Зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}$ усилителя от входной мощности $P_{\text{вх}}$

Коэффициент усиления на линейном участке $K_{у.лин} = P_{вых.нас} / P_{вх.нас}$. При использовании усилителя в схеме генератора, усилитель принципиально должен работать на участке характеристики, который правее $P_{вх.нас}$. Это следует из того, что уровень автоколебаний, возникающих при малом сигнале (когда действует $K_{у.лин}$), на выходе генератора возрастает до тех пор, пока не будет задействован механизм ограничения роста уровня выходного сигнала. Таким механизмом является уменьшение коэффициента усиления, а это возможно только при $P_{вх} > P_{вх.нас}$ или при $K_y < K_{у.лин}$. Если обратиться к справочным данным усилителя NBB-300, то на частотах в области 10 ГГц приблизительные данные таковы: $P_{нас} = 40$ мВт (16 дБм), $K_{у.лин} = 14$ дБ (25 раз), откуда $P_{вх.нас} = 1,6$ мВт (2 дБм).

Зависимость коэффициента усиления усилителя от входной мощности приведена на рис. 3.

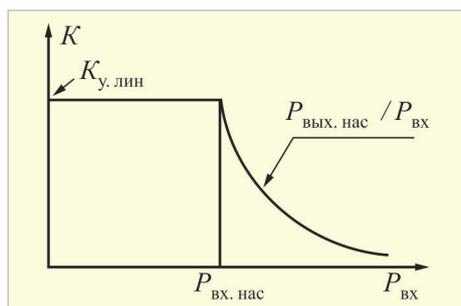


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления K_y от входной мощности $P_{вх}$ усилителя

Из рис. 1...3 вытекают следующие соотношения:

$$\begin{aligned} I_g &= gU = gI_1R; \quad I_2 = gI_1R/2; \quad P_{вх} = I_1^2R; \quad P_{вых} = I_2^2R = g^2I_1^2R^3/4, \\ P_{вх.нас} &= I_{нас}^2R; \quad P_{вых.нас} = g^2I_{нас}^2R^3/4; \quad g = (2/RI_1)\sqrt{(P_{вых}/R)}, \end{aligned} \quad (1)$$

где g – крутизна передаточной характеристики усилителя, и предполагается работа усилителя на согласованную нагрузку. На участке характеристики, где работает генератор ($P_{вх} > P_{вх.нас}$), выражение (1) можно привести к виду

$$g = 2\sqrt{K_{у.лин}}/Ry, \quad (2)$$

где $y = I_1/I_{нас}$; $I_{нас}$ – входной ток при $P_{вх.нас}$.

Выражение (2) полезно тем, что определяет нелинейную зависимость крутизны передаточной характеристики усилителя от входного тока (входной мощности), что позволит рассчитать мощностные характеристики генератора, построенного на этом усилителе.

Для построения генератора в схему (см. рис. 1) должен быть введен импеданс ОС емкостного или индуктивного характера между «землей» усилителя и основанием генератора. Реально в 2...3-см диапазоне импеданс ОС представляет собой шлейф шириной 0,4...0,5 мм и длиной порядка 1 мм, на который осуществляется посадка кристалла усилителя. Изменение длины шлейфа позволяет оптимизировать величину ОС. Схема генератора изображена на рис. 4, где $Z_H = R_H + X_H$ – сопротивление нагрузки; $Z_{ОС}$ и Z_L – импедансы, образующие в генераторе цепь ОС. Z -матрица усилителя с импедансом обратной связи $Z_{ОС}$ имеет вид [4]

$$\begin{pmatrix} R + Z_{ОС} & Z_{ОС} \\ -gR^2 + Z_{ОС} & R + Z_{ОС} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

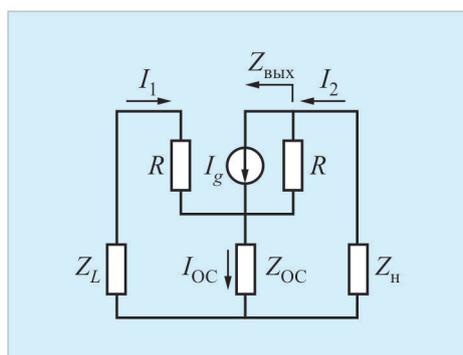


Рис. 4. Эквивалентная схема генератора

На основании (3) получается выражение для выходного сопротивления подключенной к нагрузке схемы активной части генератора (см. рис. 4):

$$Z_{\text{ВЫХ}} = R + Z_{\text{OC}} - \frac{Z_{\text{OC}}(-gR^2 + Z_{\text{OC}})}{R + Z_{\text{OC}} + Z_L}. \quad (4)$$

Для определенности примем: $Z_{\text{OC}} = -jX_{\text{OC}}$ – импеданс емкостного характера; $Z_L = jX_L$ – импеданс индуктивного характера. Разделяя в (4) активную и мнимую части, нормируя все сопротивления относительно R , с учетом (2) получим:

$$R_{\text{АЭ}} = 1 + v \frac{v - a(u - v)}{1 + (u - v)^2}, \quad (5)$$

$$X_{\text{АЭ}} = -jv \left(1 + \frac{a + v(u - v)}{1 + (u - v)^2} \right), \quad (6)$$

где $v = X_{\text{OC}}$, $u = X_L$, $a = 2\sqrt{K_{\text{лин}}}/y$ и все величины сопротивлений отнесены к R .

Выбор значений v , u , a существенным образом влияет на такие параметры генератора, как выходная мощность и диапазон перестройки. Причем подход к выбору различен, в зависимости от того, что является целью – получение максимальной мощности на фиксированной частоте или широкого диапазона перестройки.

Мощность $P_{\text{АЭ}}$, отдаваемая активной частью генератора, может быть записана как:

$$P_{\text{АЭ}} = \frac{1}{2} |I_2|^2 R_{\text{АЭ}}. \quad (7)$$

Используя схему (см. рис. 4), можно получить $I_{\text{OC}} = I_1 \frac{R + jX_L}{-jX_{\text{OC}}}$, откуда

$$|I_2|^2 = |I_1|^2 \frac{1 + (u - v)^2}{v^2},$$

$$P_{\text{АЭ}} = \frac{1}{2} \frac{P_{\text{ВЫХ.НЭС}}}{K_{\text{УЛИН}}} y^2 \frac{1 + (u - v)^2}{v^2} R_{\text{АЭ}}. \quad (8)$$

В режиме установившихся колебаний $R_{\text{АЭ}} + R_{\text{Н}} = 0$. Тогда из (5) можно получить

$$y = \frac{2\sqrt{kv}(u-v)}{(1+r) + (1+r)(u-v)^2 + v^2}. \quad (9)$$

Здесь $r = R_{\text{Н}}/R$. Для упрощения записи формул далее обозначение $K_{\text{у.лин}}$ заменено на k и $P_{\text{вых.нас}}$ – на p . С учетом (9) выходная мощность генератора P из (8) на фиксированной частоте имеет вид

$$P = 2pr(u-v)^2 \frac{1+(u-v)^2}{(1+r+(1+r)(u-v)^2+v^2)^2}. \quad (10)$$

Зависимости выходной мощности P и y от параметров u, v, r, p показаны на рис. 5...10. При этом графики y определяют область параметров u, v, r , при которых возможна работоспособность генератора ($y > 1$).

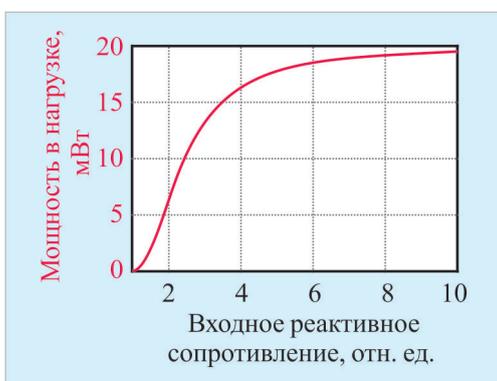


Рис. 5. Зависимость выходной мощности генератора P от u при $p = 40, r = 1, v = 1$ и $k = 25$

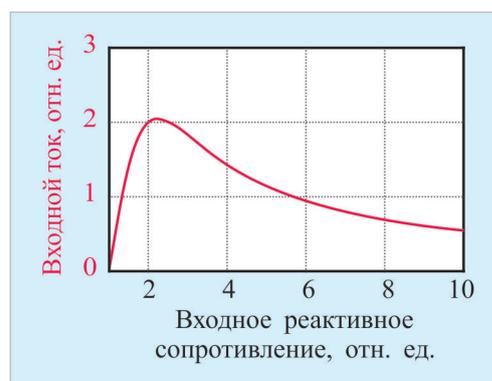


Рис. 6. Зависимость y от u при $r = 1, v = 1$ и $k = 25$.
Область работоспособности: $1,3 < u < 5,6$

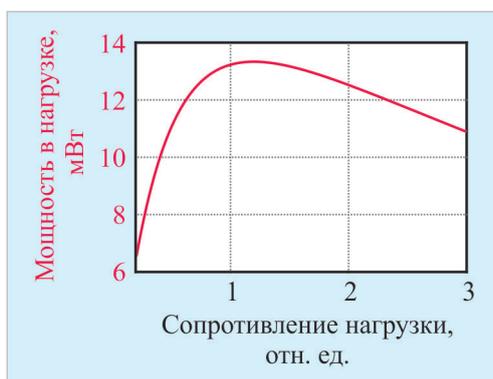


Рис. 7. Зависимость выходной мощности генератора P от r при $p = 40, u = 3, v = 1$ и $k = 25$

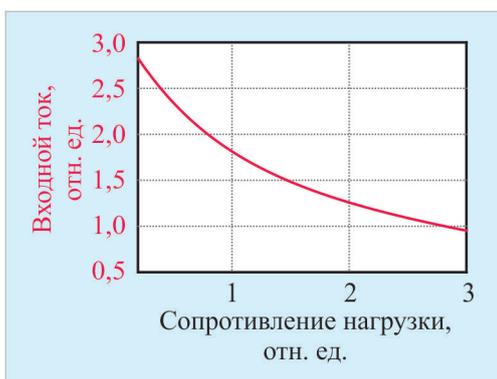


Рис. 8. Зависимость y от r при $u = 3$, $v = 1$ и $k = 25$.

Область работоспособности: $r < 2,8$

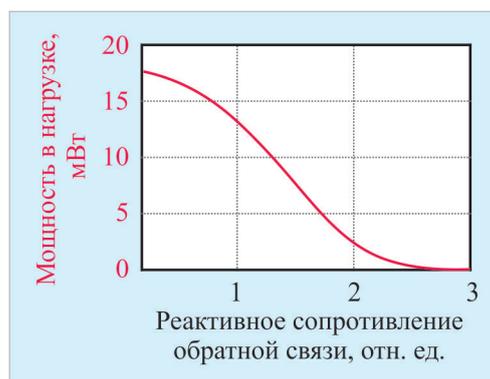


Рис. 9. Зависимость выходной мощности генератора P от v при $p = 40$, $u = 3$, $r = 1$ и $k = 25$

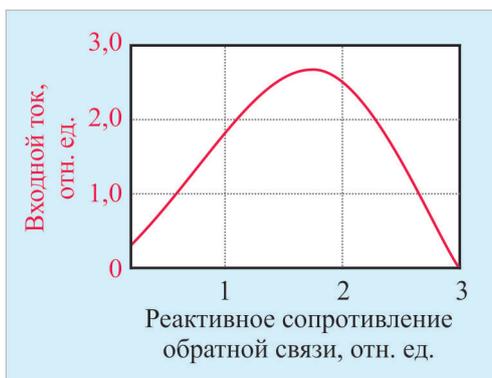


Рис. 10. Зависимость y от v при $u = 3$, $r = 1$ и $k = 25$.

Область работоспособности: $0,5 < v < 2,7$

Анализируя вышеприведенные зависимости (см. рис. 5...10) при различных v , r , u , можно сделать следующие выводы. Выходная мощность генератора увеличивается с ростом импеданса на входе усилителя, однако с ростом мощности падает y , поэтому рост мощности возможен до того момента, пока y не уменьшится до 1. На практике следует выбирать величину u , избегая работы при y , близком к 1, т. к. снижается устойчивость работы генератора. Можно рекомендовать участок, близкий к середине между значениями u , при которых $y = 1$, хотя при этом мощность генератора несколько снижается по сравнению с максимально возможной в данном случае. Оптимальные значения нагрузки r находятся в районе единицы, что, по-видимому, связано с выходным сопротивлением усилителя, близким к 50 Ом. Импеданс обратной связи v при значениях более 1 ведет к резкому снижению выходной мощности. При v менее 0,5 работа невозможна.

Частота и мощность генератора при перестройке по частоте определяются из условия баланса амплитуд и фаз, который в рассматриваемом методе анализа имеет вид: $R_{AЭ} + R_H = 0$, $X_{AЭ} + X_H = 0$. Используя соотношения (5) и (6), можно записать:

$$1 + v \frac{v - a(u - v)}{1 + (u - v)^2} + R_H / R = 0, \quad (15a)$$

$$-v \left(1 + \frac{a+v(u-v)}{1+(u-v)^2} \right) + X_H / R = 0. \quad (156)$$

Введем обозначения: $X_H/R = x$, $R_H/R = r$. Если зафиксировать значения u , v и x на частоте ω_0 , имея в виду, что X_{OC} представляет собой емкость, а X_L и X_H – индуктивности, при изменении частоты параметры X_{OC}/R , X_L/R и X_H/R будут соответственно меняться по закону: v/f , uf и xf . Здесь $f = \omega/\omega_0$, ω – текущая частота, ω_0 – фиксированная частота, на которой определены значения u , v и x . После этого, проделав несложные выкладки с выражениями (15), можно получить:

$$R(f) = y = 2\sqrt{k} \left[\frac{v}{f^2 u - v} + (1+r) \left(\frac{f^2}{uvf^2 - v^2} + \frac{uf^2 - v}{v} \right) \right]^{-1},$$

$$J(f) = y = 2\sqrt{k} \left[\left(x \frac{f^2}{v} - 1 \right) \left(1 + \frac{(uf^2 - v)^2}{f^2} \right) - \frac{v(uf^2 - v)}{f^2} \right]^{-1}. \quad (16)$$

Решение системы уравнений (16) относительно y и f определяет частоту и мощность генератора в зависимости от параметров нагрузки (r , x) и цепи обратной связи (u , v). Решение удобно провести в приложении Mathcad, построив функции $R(f)$ и $J(f)$. Точка их пересечения (рис. 11) даст искомые значения частоты f и мощности генератора $P_{\text{вых.г}}$ (определяется с помощью y и выражения (8)).

$$P_{\text{вых.г}} = 0,5 y^2 r P_{\text{вых.нас}} \frac{(uf^2 - v)^2 + f^2}{kv^2}. \quad (17)$$

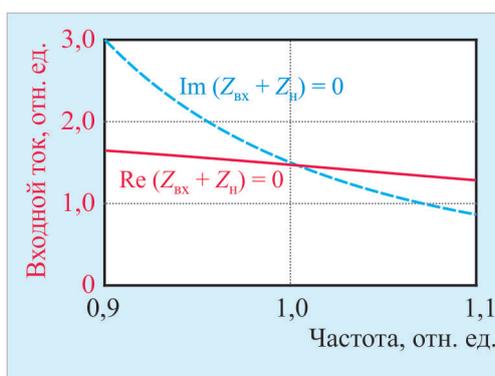


Рис. 11. График определения частоты и мощности генератора ($f = 1$; $y = 1,47$; $P_{\text{вых.г}} = 11,4$ мВт; $v = 0,74$; $u = 2,17$; $r = 1,19$; $k = 25$)

График рис. 11 позволяет определить характеристики перестройки генератора при изменении импеданса в любой из подключенных к усилителю цепей. При этом следует контролировать параметр y . Как только он становится равным или меньше единицы, дальнейшее изменение частоты при изменении параметра импеданса невозможно, т. к. режим генератора становится неустойчивым. Графики режимов перестройки при изменении параметра входной цепи и показаны на рис. 12 и 13 для уменьшения и увеличения частоты соответственно. Увеличение u

означает увеличение результирующего индуктивного входного импеданса. В случае сложной входной цепи, в которую включен варактор, это реализуется выбором варактора, а также способом его включения и структурой схемы входного импеданса. Увеличение результирующей индуктивности приводит к смещению кривых, определяющих баланс амплитуд и фаз, таким образом, что точка их пересечения уходит в область более низких частот (см. рис. 12), уменьшая частоту генератора.

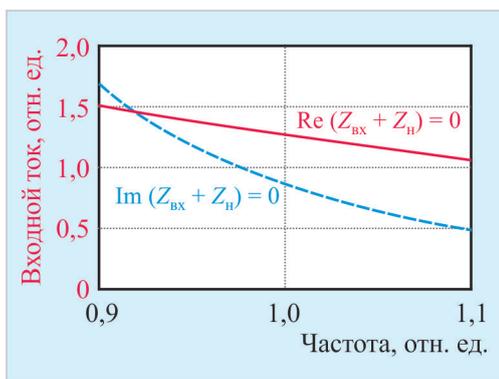


Рис. 12. График определения частоты и мощности генератора
 $(f = 0,91; y = 1,48; P_{\text{вых.г}} = 12,4 \text{ мВт};$
 $v = 0,74; u = 2,8; r = 1,19; k = 25)$

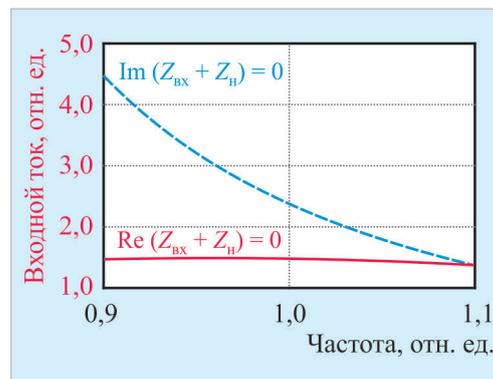


Рис. 13. График определения частоты и мощности генератора
 $(f = 1,09; y = 1,39; P_{\text{вых.г}} = 9,5 \text{ мВт};$
 $v = 0,74; u = 1,7; r = 1,19; k = 25)$

При уменьшении результирующей индуктивности точка пересечения уходит в область более высоких частот (см. рис. 13), увеличивая частоту генератора.

Экспериментальные исследования генератора, топология которого показана на рис. 14, проводились на базе кристалла усилителя NBB-300 в диапазоне 13...15 ГГц. Напряжение питания генератора (усилителя) составляло 3...3,9 В, ток – 40...50 мА. Элементами ОС здесь являлись посадочная площадка кристалла усилителя, емкость, которой можно было варьировать в диапазоне 0,2...0,5 пФ, и шлейф на входе усилителя, который совместно с разварочной проволокой между кристаллом и шлейфом реализовывал эквивалент входной индуктивности. Изменением длины шлейфа осуществлялась перестройка частоты генератора и определялась зависимость этой частоты от длины шлейфа (результаты показаны в табл. 1). Эта зависимость при разработке генератора, управляемого напряжением (ГУН), позволит оценить схему включения варактора во входную цепь и требования к его параметрам, в частности к коэффициенту перекрытия по емкости и его минимальной емкости.

Рис. 14. Топология экспериментального генератора

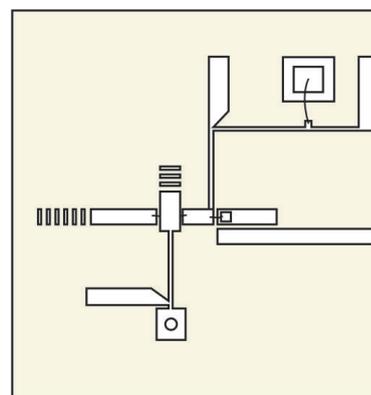


Таблица 1

Эксперимент

L , мм	2,2	1,5	1,1
F , ГГц	13	14	15

Для сравнения была рассчитана частота генератора, изображенного на рис. 4, где вместо входной индуктивности был включен шлейф вместе с проволокой, соединяющей кристалл усилителя со шлейфом. Расчет проводился с помощью приложения AWR (рис. 15). Определялась сумма выходного адмиттанса активной части генератора и адмиттанса нагрузки. Равенство нулю суммы активной и реактивной частей этого адмиттанса в точке их пересечения определяет частоту генератора. Результаты расчета приведены в табл. 2. Некоторое расхождение результатов расчета и эксперимента можно объяснить, во-первых, линейным приближением модели в программе AWR; во-вторых, различием реальных и используемых в расчете параметров шлейфа и емкости ОС; в-третьих, входной КСВН усилителя NBB-300 в рассматриваемом диапазоне частот по справочным данным имеет достаточно высокое значение (2...2,5) – это говорит о наличии заметной входной реактивности, что вносит дополнительные коррективы. Также в 2-см диапазоне всегда существуют неучтенные эффекты, связанные с распределением электромагнитных полей и излучением элементов устройства.

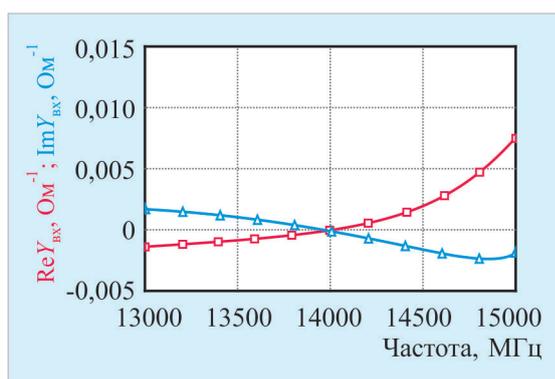


Рис. 15. Частота генератора, рассчитанная с помощью AWR

Таблица 2

Расчет (КСВН – 1)

L , мм	2,8	2,3	1,7
F , ГГц	13	14	15

При введении на вход усилителя реактивности, повышающей его входной КСВН, при расчете наблюдались эффект укорачивания входного шлейфа (табл. 3) и более близкое совпадение результатов расчета и измерения.

Таблица 3

Расчет (КСВН – 2,5)

L , мм	2,3	1,9	1,5
F , ГГц	13	14	15

Итак, проведен анализ СВЧ-генератора, активным элементом которого является усилитель, выполненный в виде полупроводникового кристалла или чип-конструкции. Усилитель включается в схему генератора таким образом, чтобы между обратной стороной кристалла и основанием генератора был образован импеданс ОС. Определены области работоспособности генератора в зависимости от изменения цепей ОС и нагрузки. Представлены экспериментальные характеристики перестройки генератора. Полученные результаты могут быть использованы при разработке как стабильных генераторов с ДР, так и ГУН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бродуленко, И. И.** Стабильные и высокостабильные полупроводниковые СВЧ-генераторы на диэлектрических резонаторах / И. И. Бродуленко, А. И. Абраменков, Д. А. Ковтунов, В. Н. Лебедев, А. М. Сергиенко // *Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ.* – 1989. – Вып. 10 (1454). – С. 37 – 38.
2. **Loboda, M. J.** Frequency stability of *t*-band, two-port dielectric resonator oscillators / M. J. Loboda, T. E. Parker, G. K. Montress // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – Dec. 1987. – Vol. MTT-35, No 12.
3. Разработка ряда перестраиваемых СВЧ-генераторов на магнитоэлектрических волнах (МЭВ) в диапазоне 6...12 ГГц: научн.-техн. отчет / ФГУП «НПП «Исток»; Ю. Б. Рудый, В. Ф. Губарев, А. П. Кузнецов, В. Ю. Мякинков и др. – Фрязино, 2005. – № 8-9261.
4. **Дж. Зелингер.** Основы матричного анализа и синтеза / Дж. Зелингер. – М.: Советское радио, 1970.

Статья поступила 11 октября 2017 г.

УДК 621.3.049.77.029.64

НОВАЯ ПАРАДИГМА РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. А. Иовдальский

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

Сообщается о разработке структуры концептуальной парадигмы конструкторско-технологического развития техники ГИС СВЧ-диапазона. Структура разработана на основе созданной ранее системы конструкторско-технологических направлений развития техники ГИС СВЧ-диапазона путём формирования концепций отдельных направлений и их анализа. Проведена разбивка сформированных концепций по уровням, соответствующим уровням развития в системе конструкторско-технологических направлений. Дальнейший анализ совокупности концепций каждого из уровней привел к пониманию, что каждая из сформированных совокупностей концепций образует парадигму, соответствующую и отражающую уровень развития науки и технологии на соответствующий период времени. Установлено, что изменение (смена) парадигмы развития техники ГИС СВЧ-диапазона при переходе от уровня к уровню носит эволюционно-циклический характер.

КС: система конструкторско-технологических направлений развития техники ГИС СВЧ-диапазона; иерархия отдельных направлений и уровней развития; улучшение электрических, массогабаритных, тепловых и других характеристик ГИС; концепция; структура концептуальной парадигмы конструкторско-технологического развития техники ГИС СВЧ-диапазона; технологическая концепция

A NEW PARADIGM FOR THE DEVELOPMENT OF MICROWAVE HIC TECHNOLOGY

V. A. Iovdalsky

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

The article presents the development of the conceptual paradigm structure of the design and engineering evolution of microwave HIC technology. The structure is based on the previously developed system of design and engineering directions of microwave HIC technology evolution by way of forming concepts for separate directions and their analysis. The breakdown of the formed concepts into levels corresponding to the levels of development in the system of design and engineering directions was carried out. Further analysis of the set of concepts for each of the levels led to the understanding that each of the formed sets of concepts forms a paradigm corresponding and reflecting the level of development of science and technology for an appropriate period of time. It is established that the change of the paradigm for microwave HIC technology development during the transition from level to level has an evolutionary-cyclic character.

Keywords: system of design and engineering directions of microwave HIC technology evolution; hierarchy of individual directions and levels of development; improvement of electrical, mass-dimensional, thermal and other HIC characteristics; concept; the conceptual paradigm structure of the design and engineering evolution of microwave HIC technology; technological concept

1. ВВЕДЕНИЕ

Появление системы конструкторско-технологических направлений развития техники ГИС СВЧ-диапазона [1] внесло определённую ясность в последовательность и закономерность появления отдельных направлений развития, формирования из них уровней развития, определяемых успехами в развитии технологии, конструирования, материаловедения, машиностроения, а также иерархии отдельных направлений и уровней.

2. ФОРМИРОВАНИЕ КОНЦЕПЦИЙ ОТДЕЛЬНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ И УРОВНЕЙ РАЗВИТИЯ

Создание отдельных новых направлений в развитии техники ГИС СВЧ-диапазона обычно вызвано появлением новых возможностей улучшения электрических, массогабаритных, тепловых и других характеристик ГИС за счёт совершенствования их конструкции, технологии, а также применения новых материалов. Каждое отдельное направление основывается на определённых принципах, совокупность которых позволяет создать определённую систему взглядов, определяющих это конструкторско-технологическое направление, то есть концепцию [2]. При этом концепция по названию будет повторять название направления и во всяком случае будет с ним созвучна. Это оказалось удобным, так как устанавливает их соответствие.

Концепция нулевого уровня является отправной точкой начала работы. Она представляет собой систему взглядов, при которой считалось, что надёжная работа и защита активных компонентов ГИС может быть обеспечена только применением корпусированных полупроводниковых приборов, серийно выпускаемых специализированными предприятиями. Корпусированные полупроводниковые приборы размещались на поверхности платы или в специально изготовленных отверстиях в ней и присоединялись к проводникам топологического рисунка платы при помощи пайки выводов. Вполне оправданным в этих условиях было применение в ГИС керамических конденсаторов типа К-10-17 и других аналогичных электрорадиоэлементов, например проволочных резисторов и катушек индуктивности. При этом температура сборки обычно не превышала 200 °С и сборка осуществлялась при помощи микропаяльников. Это было очень удобно, так как не предъявляло к структуре проводников повышенных требований, связанных с явлениями взаимной диффузии слоёв. Поэтому структура металлизации проводников имела адгезионный слой (подслой хрома), проводящий слой напылённой и гальванически осаждённой меди и антикоррозионный слой гальванически осаждённого золота. В состав топологического рисунка металлизации плат входили плёночные резисторы, выполненные напылением тантала с последующей фотолитографией. Кроме того, применение корпусированных полупроводниковых приборов снижало требования к герметизации ГИС или их совокупности при размещении в общем корпусе. Таким образом, данному уровню развития конструкции ГИС соответствовал вполне определённый уровень развития применяемой элементной базы и технологии изготовления топологического рисунка металлизации плат, а также сборки ГИС, не исключающий применение флюса для обеспечения качественной пайки.

Концепция построения ГИС СВЧ-диапазона на базе корпусированных полупроводниковых приборов может быть сформулирована следующим образом: **применение корпусированных полупроводниковых приборов позволяет проводить сборку ГИС с использованием низкотемпературных методов (до 250 °С) пайки, не предъявляет высоких требований по термостойкости структуры металлизации проводников и плёночных резисторов плат и к герметичности общего корпуса схемы (концепции 0.1 и 0.2 нулевого уровня развития).**

Такая конструктивная и соответствующая ей технологическая концепция делала ГИС СВЧ-диапазона мало отличающейся от аналогичных печатных плат, а РЭА, собранная с их использованием, соответствовала первой графической модели компоновочных структур, представленной в работе [3].

Резкое увеличение потребности в изделиях на базе ГИС СВЧ-диапазона, повышение требований к электрическим и массогабаритным характеристикам, а также их надёжности потребовали изменения данной концепции.

Основным недостатком таких ГИС было наличие в конструкции корпусов полупроводниковых приборов. Они обладали большими паразитными ёмкостями, что резко снижало электрические характеристики схемы. Кроме того, наличие корпусов в конструкции ГИС существенно увеличивало их массу и габариты.

Таким образом, появление следующей концепции стало закономерным и обоснованным. Она может быть сформулирована следующим образом: **построение ГИС на базе бескорпусных полупроводниковых приборов и малогабаритных конденсаторов в виде кристаллов позволяет существенно улучшить электрические и массогабаритные характеристики, повышает надёжность схемы, но ужесточает требования к герметичности общего корпуса, увеличивает температуру сборки (до 420 °С) и, вследствие этого, повышает требования к термостабильности структуры металлизации проводников и плёночных резисторов плат** (концепция 1.3 первого уровня развития).

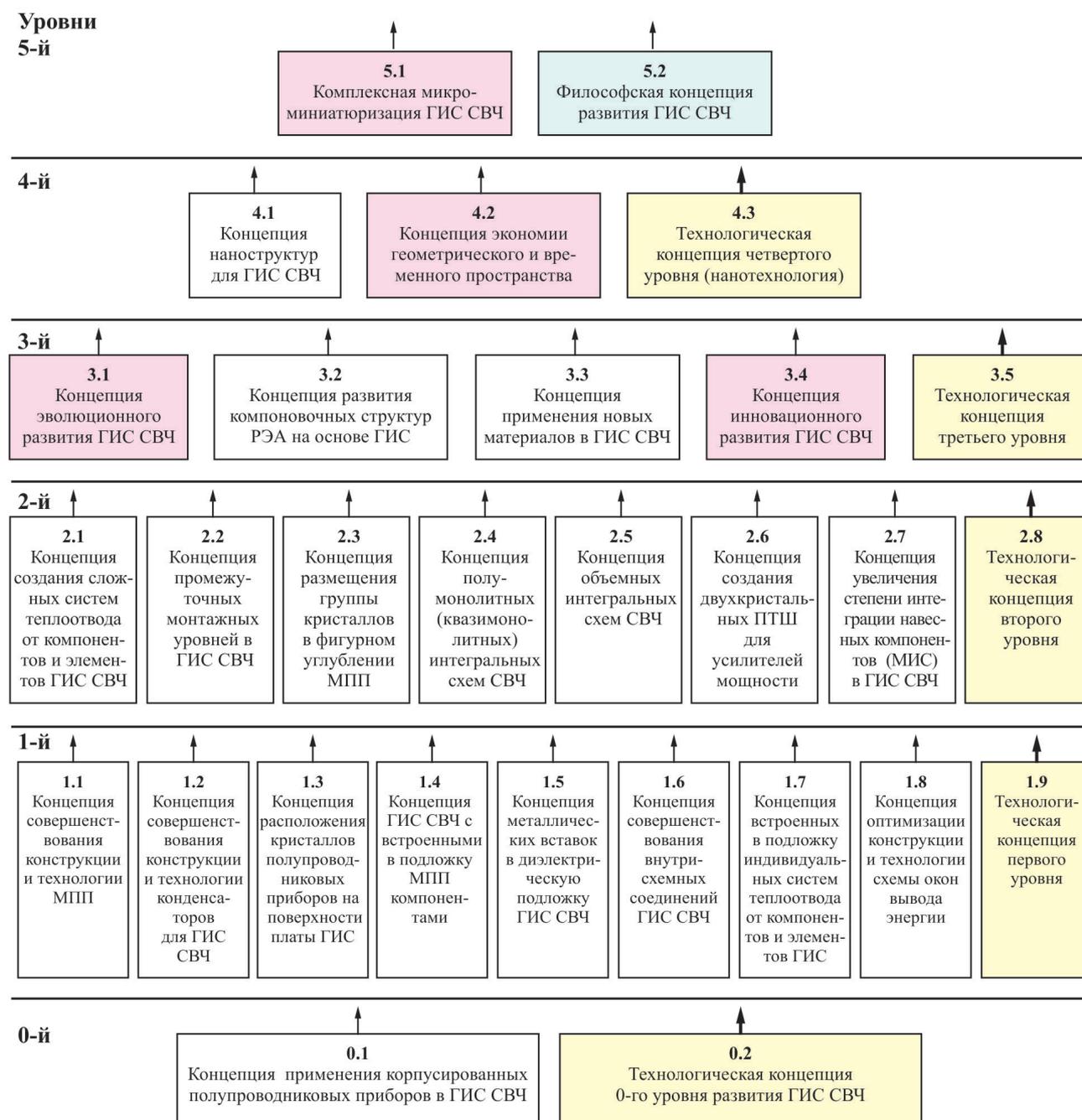
Переход к использованию бескорпусных полупроводниковых приборов и малогабаритных конденсаторов давал явные преимущества в улучшении электрических, массогабаритных, тепловых и надёжных характеристик ГИС. Однако он не был простым и потребовал существенных изменений в технологии сборки, что, в свою очередь, потребовало доработки конструкции составных частей схемы.

Переход на использование бескорпусных кристаллов потребовал их монтажа и подключения к элементам схемы с применением тех же процессов, что и при посадке их в индивидуальные корпуса, а это означало резкое увеличение температуры сборки (вплоть до 420 °С). Изменились требования к корпусированию схемы.

Так появились направления 1.1 и 1.2, а также соответствующие им концепции. Концепция конструирования и технологии микрополосковой платы (МПП): **правильный выбор конструкции, материалов слоёв и нанесение слоистой структуры металлизации МПП ГИС СВЧ-диапазона, а также их согласование с материалами и температурными режимами, применяемыми при сборке, позволяют создавать надёжные ГИС, обеспечивающие высокие электрические характеристики, а групповая технология, создающая необходимые условия для их серийного изготовления, существенно снижает трудоёмкость и сокращает расход материалов** (концепция 1.1) [4].

Концепция совершенствования конструкции и технологии конденсаторов: **эволюционное развитие конструкции и технологии изготовления конденсаторов для ГИС СВЧ-диапазона приводит к появлению, а потом к постепенной замене чип-конденсаторов конденсаторами в составе МПП, а затем в составе кристаллов навесных активных компонентов, что ведёт к улучшению электрических и массогабаритных характеристик ГИС за счёт сокращения длины их соединений в схеме и повышению надёжности схемы за счёт исключения или, по крайней мере, существенного сокращения числа сварных и паяных соединений** (концепция 1.2).

Появление следующей концепции – концепции ГИС СВЧ с встроенными в подложку МПП компонентами – имело важное значение, и в настоящее время она всё чаще используется в разработках зарубежных и отечественных фирм. Она может быть отображена в следующей формулировке: **использование объёма подложки МПП ГИС СВЧ-диапазона для расположения кристаллов навесных компонентов с планаризацией их лицевых поверхностей с поверхностью платы позволяет одновременно улучшать электрические, тепловые и массогабаритные характеристики** (концепция 1.4).



Структура концептуальной парадигмы конструкторско-технологического развития техники ГИС СВЧ-диапазона

Дальнейшее развитие конструкции и технологии позволило сформулировать концепцию металлических вставок в подложку ГИС: **применение металлических вставок в диэлектрическую подложку платы СВЧ ГИС способствует реализации эффективного теплоотвода от тепловыделяющих элементов и компонентов схемы, позволяет осуществлять заземление элементов топологии металлизации, расположенных на лицевой стороне МПП, создавать монтажные площадки для размещения компонентов на поверхности или внутри подложки МПП, использовать их в качестве нижних обкладок конденсаторов, создавать экраны для проходящих сигналов** (концепция 1.5).

Стремление к улучшению электрических характеристик привело к появлению концепции внутрисхемных соединений: **использование плоских ленточных или балочных внутрисхемных соединений в ГИС СВЧ-диапазона взамен круглых проволочных и оптимизация их геометрии позволяют существенно улучшить электрические характеристики и повысить надёжность ГИС** (концепция 1.6).

Необходимость улучшения теплоотвода от тепловыделяющих компонентов и элементов ГИС привела к концепции индивидуальных встроенных теплоотводов: **формирование в объёме подложки МПП индивидуальных систем теплоотвода от тепловыделяющих элементов и компонентов позволяет улучшить тепловые и электрические характеристики ГИС СВЧ-диапазона** (концепция 1.7).

Совершенствование устройств ввода и вывода сигнала привело к появлению концепции оптимизации конструкции и технологии схем окон ввода и вывода энергии: **оптимизация геометрических размеров отверстия в пленочном металлизационном покрытии, диэлектрической проницаемости и толщины подложки ГИС окна вывода энергии, а также его закрепления позволяет снизить потери мощности проходящего сигнала, расширить полосу рабочих частот и создать оригинальную технологию их серийного изготовления, внедрение которой позволило снизить трудоёмкость изготовления** (концепция 1.8).

Появление этих новых для того времени концепций основано, прежде всего, на успехах в технологии. Технология присутствует в каждой из этих концепций и является основой для их формирования. Поэтому правомочным является выделение новых взглядов на возможности технологии в отдельную технологическую концепцию 1-го уровня развития, которая и обеспечила его формирование: **разработка новых методов формообразования подложек МПП, внутрисхемных соединений, нанесения слоёв металлизации МПП и их группового изготовления, монтажа металлических вставок, посадки кристаллов в углубления и др. обеспечивает реализацию новых перспективных концепций в разрабатываемых изделиях** (концепция 1.9).

Однако процесс развития науки и техники непрерывен, а дальнейшие достижения в области конструирования, технологии и материаловедения позволяют продолжать развитие техники ГИС СВЧ-диапазона. Началось формирование следующих концепций, более высокого (2-го) уровня на базе предыдущих теоретических и практических достижений нижних (0-го и 1-го) уровней.

Так, появилась концепция сложных комплексных систем теплоотвода: **формирование в объёме подложки МПП сложных комплексных систем теплоотвода позволяет улучшать тепловые и электрические характеристики ГИС СВЧ-диапазона за счёт стабилизации теплового режима** (концепция 2.1).

Следующая концепция предполагает создание в конструкции ГИС дополнительных монтажных уровней для размещения составных частей конструкции: **появление сложных конст-**

рукций ГИС СВЧ-диапазона, таких, как двухъярусное расположение кристаллов, использование металлических вставок в подложку МПП, применение многослойных подложек и разновысотных выступов металлического основания привело к появлению конструкций ГИС с несколькими монтажными уровнями (плоскостями), которые могут быть использованы для размещения компонентов схемы и элементов конструкции внутри подложки МПП, что дополнительно позволяет сократить длину внутрисхемных связей, а значит, улучшить электрические и массогабаритные характеристики схемы (концепция 2.2).

Реализация следующей концепции – расположение группы кристаллов в фигурном углублении в МПП – также направлена на повышение плотности расположения компонентов ГИС: создание конструкции ГИС СВЧ-диапазона с компактным, в том числе двухъярусным, расположением группы кристаллов компонентов в фигурных углублениях в подложке МПП позволяет значительно улучшить массогабаритные и электрические характеристики ГИС СВЧ-диапазона (концепция 2.3).

Накопление количества изменений конструкции ГИС и соответствующих концепций приводит к появлению нового качества, то есть новых представлений. Так, в результате постепенного сближения конструкции ГИС с конструкцией монолитных интегральных схем (МИС) появился промежуточный вариант – полумонолитные (гибридно-монолитные, или квазимонолитные) интегральные схемы и соответствующая новая концепция: достижения в развитии конструкции и технологии ГИС СВЧ-диапазона направлений первого уровня развития привели к закономерному появлению нового класса – полумонолитных интегральных схем (ПМИС), которые, в связи с особенностями конструкции и технологии, по совокупности параметров имеют превосходство над ГИС, но уступают МИС СВЧ-диапазона (концепция 2.4).

Идея реализации трёхмерной или объёмной обработки сигнала ещё в 80-е годы привела к появлению концепции объёмных интегральных схем (ОИС): создание объёмных многослойных конструкций ГИС СВЧ-диапазона позволяет существенно улучшить их электрические и массогабаритные характеристики за счёт сокращения длины гальванических связей, применения электромагнитных и ёмкостных связей между элементами отдельных слоёв, а также возможности расположения компонентов схемы во внутренних слоях многослойной подложки (концепция 2.5).

Разновидностью трёхмерной, или объёмной, обработки сигнала явилась концепция создания двухкристалльных ПТШ для сложения мощности в усилителях мощности: расположение кристаллов полупроводниковых приборов (ПП) с балочными выводами лицевыми сторонами друг к другу, плотное прижатие, соединение их однофункциональных выводов и подключение к проводникам МПП, расположение и закрепление кристалла одного ПП в выемке выступа металлического основания заподлицо с его поверхностью, организация теплоотвода и заземления второго кристалла ПП расположением и закреплением его в выемке в теплоотводящей пластине (дополнительном теплоотводе) и закрепление её на выступе металлического основания дают возможность эффективно складывать их мощность и тем самым реализовать новый принцип сложения мощности полупроводниковых приборов (концепция 2.6).

Достижения в разработке МИС привели к появлению концепции увеличения степени интеграции компонентов ГИС: увеличение степени интеграции компонентов (МИС) ГИС СВЧ-диапазона приводит к постепенному переносу элементов схемы в компоненты, существенно повышает их функциональные возможности, плотность компоновки устройств и

их надёжность, улучшает электрические и массогабаритные характеристики ГИС и РЭА на их основе (концепция 2.7).

Завершает 2-й уровень развития техники ГИС СВЧ-диапазона соответствующая технологическая концепция, так как без неё невозможна реализация соответствующих концепций его составляющих: **использование и развитие технологических методов предыдущих уровней развития, таких, как формообразование подложек МПП и многослойная компоновка слоев плат, разработка новых методов, например технологии многослойных плат на основе низкотемпературной керамики (ЛТСС), размещение кристаллов компонентов во внутренних слоях многослойной платы, технологии полупроводниковых приборов, МИС и др. обеспечивают реализацию новых перспективных концепций 2-го уровня в разрабатываемых изделиях** (концепция 2.8).

Выход на более высокий, 3-й уровень развития предполагает разработку обобщающего подхода к данной проблеме. Поэтому концепции, образующие 3-й уровень, приобретают всё более общий философский характер.

Так появилась концепция эволюционного развития ГИС СВЧ-диапазона, которая методом индукции от частного рассмотрения развития конструкции фрагмента ГИС малошумящего усилителя [5], а также ГИС генератора, управляемого напряжением [6], позволяет перейти к общему рассмотрению процесса развития конструкции и технологии ГИС СВЧ-диапазона. Формулировка данной концепции может быть выражена следующим образом: **рассмотрение возможности постепенной модернизации конструкции и технологии изготовления ГИС СВЧ-диапазона с целью улучшения характеристик отдельных устройств позволяет сделать вывод о их всеобщем постепенном эволюционном характере развития под действием накопления новых знаний** (концепция 3.1).

Таким образом, в данном случае можно, во-первых, наблюдать применение метода индукции и говорить о переходе от частного к общему, а во-вторых, наблюдать переход количества накопленных знаний в новое качество – концепцию эволюционного развития.

Поскольку современная РЭА базируется на ГИС СВЧ-диапазона, то их развитие приводит к совершенствованию компоновочных структур РЭА, предложенных ранее [7]. Поэтому закономерным является появление концепции развития компоновочных структур РЭА, которая может быть сформулирована так: **анализ новых конструктивно-технологических вариантов исполнения ГИС СВЧ-диапазона позволяет путем выявления их основных признаков синтезировать новые модели компоновочных структур РЭА и дать рекомендации для их применения в аппаратуре, а также проследить динамику развития РЭА на базе ГИС** (концепция 3.2).

Появление следующей новой концепции связано с накоплением знаний в области материаловедения [8] и успешным их применением в ГИС СВЧ-диапазона. Соответственно она получила название концепции применения новых материалов в ГИС СВЧ-диапазона: **использование уникальных свойств новых материалов в конструкции и технологии ГИС СВЧ-диапазона позволяет улучшать их характеристики** (концепция 3.3).

Появление новой концепции инновационного развития соответствует современной тенденции модернизации промышленности. Формулировка этой концепции может иметь следующее определение: **синтез новых конструкторско-технологических решений, накопление объёма информации о мировом уровне развития исследуемого направления и смежных направлений, а также повышение информированности специалистов и их компетентности, разум-**

ное и быстрое внедрение новейших достижений науки и техники в разработку ГИС СВЧ-диапазона позволяют улучшить их характеристики и обеспечивают прогресс в данном направлении (концепция 3.4).

Завершение 3-го уровня связано с разработкой соответствующей технологической концепции, которая базируется на достижениях настоящего времени и обеспечивает реализацию современных образцов ГИС СВЧ-диапазона и РЭА на их основе.

Технологическая концепция 3-го уровня может иметь следующую формулировку: **усложнение конструкции, появление новых конструктивно-технологических решений ГИС СВЧ-диапазона и их составных частей, применение новых материалов повлекло за собой усложнение технологии, разработку новых сложных технологических маршрутов изготовления отдельных составных частей и сборки всей ГИС, соответствующих 3-му уровню развития техники ГИС СВЧ-диапазона** (концепция 3.5).

Четвёртый уровень состоит из направлений, которым соответствуют концепции, находящиеся в стадии формирования и носящие характер прогнозирования. Они ещё не сложились полностью, тем не менее первая редакция их уже может быть предложена: **появление принципиальной возможности получения основных элементов МИС или компонентов ГИС транзисторов с нанометрическими размерами позволяет прогнозировать резкое повышение степени интеграции компонентов ГИС и существенное увеличение их функциональной сложности, что, в свою очередь, приведёт к резкому улучшению электрических, энергетических и массогабаритных характеристик** (концепция 4.1).

Технологическое обеспечение концепции 4.1 составляет концепция 4.3, развитию которой в настоящее время уделяется большое внимание. Примерной формулировкой технологической концепции 4-го уровня развития может быть: **развитие технологии получения наноструктур различных материалов, в том числе не применявшихся ранее, позволяет создавать электронные приборы (транзисторы) с моноатомными размерами элементов и достигать уникальных электрических, массогабаритных и энергетических характеристик** (концепция 4.3).

Заключительной концепцией этого уровня является концепция экономии геометрического и временного пространства: **совершенствование конструкции и технологии неминусом приводит к снижению материалоемкости, экономии геометрического и временного пространства, занимаемого ГИС СВЧ-диапазона, а значит, и РЭА на их основе** (концепция 4.2).

Концепции 4-го уровня, как никакие другие, соответствуют генеральному направлению комплексной микроминиатюризации изделий, поскольку переход на структуры с нанометрическими размерами практически исключает паразитные индуктивности и ёмкости из схемы, а достигается это за счёт уменьшения размеров.

Пятый уровень включает две концепции, 5.1 и 5.2. Первая из них представляет собой концепцию генерального направления развития электроники – комплексную микроминиатюризацию (КММ) [9] и, в применении к ГИС СВЧ-диапазона и РЭА на их основе, может иметь следующую формулировку: **КММ, являясь генеральным направлением развития радиоэлектроники, определяет направление на постоянное увеличение отношения функционального содержания, сложности, степени интеграции устройства (ГИС СВЧ-диапазона и РЭА на их основе) к его материальному содержанию (массе, объёму, стоимости) и предполагает улучшение характеристик устройства за счёт уменьшения габаритов** (концепция 5.1) [4,9].

Философская концепция развития техники ГИС СВЧ-диапазона (5.2) может быть отражена в следующих положениях:

1. Успех развития общего направления – развития техники ГИС СВЧ зависит от темпов развития отдельных составляющих направлений развития конструкции, технологии, материаловедения и т. д., как базовых элементов.

2. Определен сложный характер совокупности эволюционного и циклического развития отдельных составляющих направлений и их взаимного влияния друг на друга.

3. Определено условие успешного воплощения комплекса новых базовых элементов конструкции, технологии и т. д. в реальное изделие для улучшения его характеристик, как решение кванта взаимодействия.

4. Глобальные причины сложного эволюционно-циклического развития промышленности и общества в целом оказывают существенное влияние на развитие узконаправленных специфичных отраслей, например на развитие техники ГИС СВЧ и изделий на их основе.

5. Изучение закономерностей и динамики развития отдельных направлений, их влияния друг на друга и подверженности общей тенденции развития общества помогает правильно оценить и спрогнозировать дальнейший путь развития конкретных областей знаний (концепция 5.2) [10].

3. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАДИГМЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА

Формирование концепций отдельных направлений и уровней их развития позволяет перейти к анализу их возникновения, развития и взаимодействия. Анализ концепций, составляющих нулевой уровень развития, показывает наличие вполне сложившейся теоретической основы системы понятий и представлений о конструировании и серийном изготовлении ГИС СВЧ-диапазона и РЭА на их основе.

Несмотря на столь скромное название, нулевой уровень имеет в своей основе достаточно прочную теоретическую базу, основанную на достижениях начала 80-х годов. Эту теоретическую базу, следуя современной терминологии, следует рассматривать как определённую парадигму, основанную на концепциях 0.1 и 0.2, соответствующих тому уровню развития науки и технологии.

Однако резкое увеличение потребности в ГИС СВЧ-диапазона и РЭА на их основе и ужесточение требований к электрическим и массогабаритным характеристикам и надёжности, а также стоимости изделий потребовало коренного изменения совокупности системы отдельных концепций.

Разработка ряда новых концепций развития техники ГИС СВЧ-диапазона, присущих определённому времени, техническому уровню развития науки и техники, соответствующих ему, сложности создаваемых конструкций и решаемых технических задач, привела к формированию определённого уровня развития техники (1-му уровню), а в теоретическом плане к совокупности новых концепций или следующей концептуальной парадигме, отличающейся от представлений предыдущего (0-го) уровня.

При формировании концепций 2-го уровня развития появились концепции: 2.4, соответствующая появлению гибридно-монолитных, полумонолитных (или квазимонолитных) интегральных схем, и 2.5, соответствующая появлению объёмных интегральных схем, которые могли рассматриваться на определённом этапе развития как новые парадигмы, поскольку количество накопленных в них конструктивно-технологических изменений было значительно и вполне соответствовало совокупности изменений определённых концепций. Однако в настоящее

время их значимость на фоне следующих достижений соответствует отдельным, хотя и очень важным, концепциям.

Совокупность концепций 2-го уровня развития техники ГИС СВЧ-диапазона характеризуется значительными достижениями в формировании важных концепций и может рассматриваться как новая парадигма. Эта парадигма отражает состояние развития ГИС на данном этапе развития. Она пока носит концептуальный характер и не представляет собой сложившейся теории. Однако эта парадигма основана на реальных достижениях техники ГИС, отражает и представляет уровень знаний сегодняшнего дня.

Концепции 3-го уровня, как отмечалось выше, носят обобщающий и, в определённой мере, философский характер и в совокупности с концепциями второго уровня также образуют соответствующую парадигму развития ГИС СВЧ-диапазона.

Хотя концепции 4-го уровня носят характер прогнозирования, уже сейчас понятно, что их реализация будет обозначать очередную смену парадигмы, то есть появление новой прогнозируемой парадигмы развития техники ГИС СВЧ-диапазона. Реализация 4-го уровня развития и соответствующей парадигмы вплотную подводит к формированию завершающего, 5-го уровня развития и соответствующих концепций 5.1 и 5.2, а возможно, и новой парадигмы.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ динамики развития структуры концептуальной парадигмы конструкторско-технологического развития техники ГИС СВЧ-диапазона, представленной на рисунке, показывает, что обновление парадигмы происходит примерно каждые 5...8 лет. Структура не претендует на полный перечень концепций развития, составляющих отдельные уровни. Уровни могут быть дополнены неучтёнными концепциями, а также вновь появляющимися. Однако структура позволяет проследить закономерность смены парадигмы и цикличность данного процесса. Вместе с тем нельзя не заметить эволюционный постепенный поступательный характер развития всего общего направления в соответствии с генеральным направлением комплексной микроминиатюризации ГИС и РЭА на их основе. Кроме того, система наглядно иллюстрирует закономерность перехода количества накопленных знаний (концепций) в новое качество – новую парадигму. Философский подход к изучению процесса развития ГИС СВЧ-диапазона позволяет выявить его сложный эволюционно-циклический характер, а также многофакторность этого процесса.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты следует рассматривать как создание теоретической основы структуры концептуальной парадигмы конструкторско-технологического развития техники ГИС СВЧ-диапазона. Структура концептуальной парадигмы конструкторско-технологического развития техники ГИС СВЧ-диапазона не является законченной, строго обоснованной теорией. Она находится в стадии развития, изучения и дополнения. Развиваются уже сформированные концепции, а также появляются новые, сформированные в последнее время. Кроме того, структура не охватывает некоторые концепции, например концепции МЭМС, ДИС и другие. Тем не менее систематизация знаний о развитии ГИС СВЧ-диапазона позволяет проследить иерархическую взаимосвязь отдельных концепций и более осознано использовать их при проектировании современной РЭА с уникальными характеристиками на основе ГИС СВЧ-диапазона.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иовдальский, В. А.** Система конструкторско-технологических направлений развития техники ГИС СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2011. – Вып. 4 (511). – С. 41 – 49.
2. **Кузин, Ф. А.** Методика написания, правила оформления и порядок защиты: Диссертация канд. / Ф. А. Кузин – Изд. «Ось -89», 2003. – С. 131 – 133.
3. **Гуськов, Г. Я.** Монтаж микроэлектронной аппаратуры / Г. Я. Гуськов, Г. А. Блинов, А. А. Газаров. – М.: Радио и связь, 1986. – С. 45.
4. **Климачёв, И. И.** СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / И. И. Климачёв, В. А. Иовдальский. – М.: Техносфера, 2006. – 352 с.
5. **Иовдальский, В. А.** Эволюция конструкции типовых фрагментов ГИС СВЧ // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2007. – Вып. 1 (489). – С. 38 – 45.
6. **Иовдальский, В. А.** Совершенствование конструкции широкодиапазонных генераторов на полевых транзисторах с варакторной перестройкой / В. А. Иовдальский, А. К. Балыко // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 1994. – Вып. 1 (461). – С. 11 – 15.
7. **Иовдальский, В. А.** Концепция конструктивно-технологического синтеза новых компоновочных моделей микроэлектронной аппаратуры на основе ГИС СВЧ / В. А. Иовдальский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2006. – Вып. 1 (487). – С. 77 – 86.
8. **Васильев, А. Г.** СВЧ-приборы и устройства на широкозонных полупроводниках / А. Г. Васильев, Ю. В. Колковский, Ю. А. Концевой. – М.: Изд. Техносфера. – 2011. – 416 с.
9. **Высоцкий, Б. Ф.** Конструирование и расчёт БГИС, микросборок и аппаратуры на их основе / Под ред. Б. Ф. Высоцкого. – М.: Радио и связь, 1981. – С. 5 – 7.
10. **Иовдальский, В. А.** Философские аспекты и цикличность развития техники ГИС СВЧ // В. А. Иовдальский // «Циклы». Материалы 7-й Международной конференции. Т. 2.– Ставрополь: Северо-Кавказский государственный технический университет, 2005. – С. 67 – 70.

Статья поступила 8 февраля 2016 г.

ЭКОНОМИКА

УДК 338

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СУВЕРЕННОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ ИННОВАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РФ В ЧАСТИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

М. В. Чекаданова

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

Выделены причины отсутствия инновационного прорыва в РФ и предложены принципы построения национальной инновационной системы РФ, определены пути решения задачи построения комбинации организационно-управленческих решений по объединению возможностей, предоставляемых концепциями ОЭЗ ТВТ и СТИК, и приведен практический пример.

КС: принципы построения, национальная инновационная система РФ, высокотехнологичное производство

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF THE SOVEREIGN NATIONAL INNOVATION SYSTEM OF THE RF IN THE PART OF HIGH-TECH TECHNOLOGIES

M. V. Chekadanova

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

In the article the reasons for the lack of an innovative breakthrough in the RF and the principles for constructing a national innovation system of the RF are outlined, ways of solving the problem of constructing a combination of organizational and managerial solutions for combining the opportunities provided by the concepts of the SEZ and sectoral territorial innovation cluster are determined, a practical example is given.

Keywords: principles for constructing, national innovation system of the RF, high-tech production

Понимание сложности задач организации и управления инновационным развитием стран привело к необходимости поиска способов консолидации сложившихся теоретических подходов к их решению, предлагавшихся различными учеными и научными школами [1–13]. Такая консолидация произошла в последнее двадцатилетие прошлого века в рамках концепции национальных инновационных систем (НИС). «Концепция призвана была помочь формированию основы нового подхода к определению развития на основе национальных инноваций, достаточно операбельного и непосредственно сфокусированного на выработке мер государственной политики, направленной на инновационное развитие», – отмечает О. Г. Голиченко [14].

В современное время в РФ во многом сократилось административное влияние аппарата министерств и ведомств на характер решения задач инновационного развития, сформировались

разнообразные, аналогичные зарубежным элементы сопровождения инноваций: венчурные фонды и компании; технопарки и бизнес-инкубаторы; инжиниринговые и проектные центры; технологические платформы; центры трансфера технологий и т. д. Приняты программные документы по инновационному развитию [15–20]. Однако результаты подобных трансформаций пока не оправдывают ожиданий и вложенных средств (таблица и рис. 1).

Инновационная активность организаций в России, % [21]

Показатель	Год					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Инновационная активность организаций	9,5	10,4	10,3	10,1	9,9	9,3
Удельный вес инновационных товаров, работ, услуг в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	4,8	6,3	8,0	9,2	8,7	8,4
Удельный вес затрат на технологические инновации в общем объеме отгруженных товаров, выполненных работ, услуг	1,6	2,2	2,5	2,9	2,9	2,6
Удельный вес организаций, осуществлявших технологические инновации	7,9	8,9	9,1	8,9	8,8	8,3
Удельный вес организаций, осуществлявших организационные инновации	3,2	3,3	3,0	2,9	2,8	2,7
Удельный вес организаций, осуществлявших маркетинговые инновации	2,2	2,3	1,9	1,9	1,7	1,8
Удельный вес организаций, осуществлявших экологические инновации	4,7	5,7	2,7	1,5	1,6	1,6

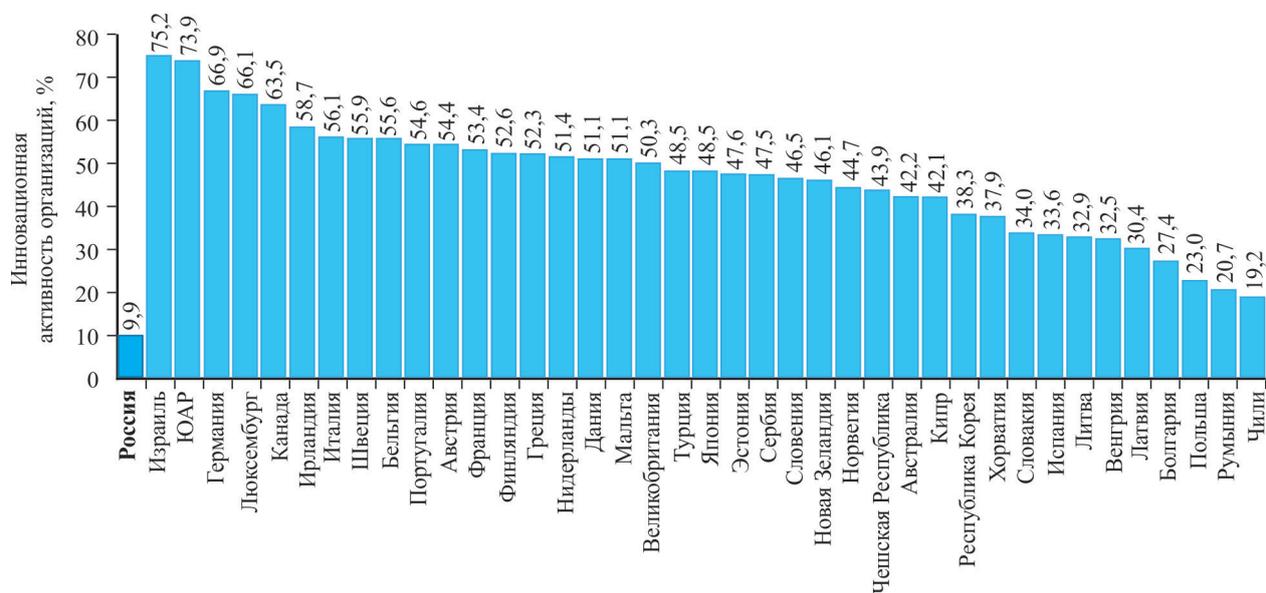


Рис. 1. Совокупный уровень инновационной активности организаций по странам мира в 2014 г. [22]

В результате своей практической работы и научных изысканий автор выделил четыре наиболее существенные причины отсутствия инновационного прорыва:

1. В РФ наблюдается научный и промышленный государственный монополизм (см. другие статьи автора). Т. е. конкуренция не является основной движущей силой, мобилизующей предприятия на реализацию дополнительных усилий в расширение производства, выход на новые рынки или внедрение новаций, что является неотъемлемой частью рыночной экономики.

2. В нашей стране нет подъема базовых отраслей промышленности (энергетического, нефтегазового, транспортного и тяжелого машиностроения, а также станкоинструментальной промышленности и горно-металлургического комплекса). Сильные базовые отрасли являются той объективной технико-экономической предпосылкой, которая необходима для «инновационного рывка» страны.

3. Спрос на инновационные товары конечного потребления напрямую зависит от покупательной способности населения, которая в РФ с 1998 г. снижается. В структуре ВВП нашей страны зарплата составляет 51,8 %, а в себестоимости продукции в среднем по стране доля зарплаты составляет 20...25 %, что говорит о преобладании низкооплачиваемых рабочих мест, производящих минимум добавленной стоимости, что играет против эффективного инновационного развития.

4. В РФ вопросами инновационного развития занимаются различные структуры (министерства, РАН, ФАНО, вузы, НИИ и т. д.), но в общем деятельность фрагментарна и бессубъектна*. Органы, организации и структуры находятся в непрерывном движении и взаимодействии, состоят в разнообразных отношениях взаимозависимости и подчиненности, но часто отстаивают диаметрально противоположные интересы, порой весьма отличные от целей и задач в инновационной деятельности, декларируемых первыми лицами государства.

Среди иных проблем, сдерживающих инновации в России, можно также назвать: отсутствие доверия у населения к власти и бизнесу, выраженное в отказе инвестировать в промышленное развитие за счет сбережений домохозяйств; слепое копирование органами исполнительной власти не всегда лучших организационно-управленческих решений западных стран в сфере подготовки кадров, организации науки и инноваций; отсутствие масштабной национальной идеи, способной воодушевить трудящихся на свершения, связанные не только с поддержанием уровня жизни; коррупция.

Обратимся к Концепции долгосрочного социально-экономического развития РФ до 2020 г., в которой содержится утверждение о том, что «...переход экономики России на инновационный тип развития невозможен без формирования конкурентоспособной в глобальном масштабе НИС и комплекса институтов правового, финансового и социального характера, обеспечивающих взаимодействие образовательных, научных, предпринимательских и некоммерческих организаций и структур во всех сферах экономики и общественной жизни» [24]. Таким образом, определено ключевое разделение взаимодополняющих понятий собственно инновационной системы и комплекса специальных институтов, призванных обеспечить взаимодействие ее компонентов. Указанный «комплекс институтов» образует внешнюю среду для инновационной системы, и в зависимости от его эффективности НИС либо достигает своих целей, либо остается невостребованной умозрительной конструкцией. По мнению

* Бессубъектность – одна из патологий в организационных отношениях, вскрытая А. И. Пригожиным в работе [23].

автора, исследование состава этого комплекса и его вариантов, в зависимости от ставящихся задач обеспечения инновационного развития, поможет в решении проблемных вопросов, обозначенных выше.

В настоящее время системный подход к инновациям, помимо национального, также реализуется еще на двух уровнях: региональном и секторальном*.

Для конкретизации понятия региональная инновационная система (РИС) приведу определение К. Л. Жихарева: «РИС – это совокупность активно взаимодействующих друг с другом участников инновационной деятельности, вовлеченных в процессы создания, распространения и использования новых знаний в целях освоения различного рода инноваций на территории определенного региона, оказывающая на данный регион комплексное социально-экономическое воздействие» [25]. Мировой опыт создания РИС позволяет выделить три их наиболее устойчивых вида [26]. Первый – территориально укорененные системы. Второй – регионализированные НИС. И третий вид – инновационные системы с региональной сетевой структурой, или сетевые РИС (Скандинавские РИС) – объединяет признаки двух предыдущих.

Для дальнейших рассуждений воспользуемся определением, предложенным в [27]: «Секторальная инновационная система представляет собой сети агентов, чья деятельность основывается на единой научной и технологической парадигме и базе знаний, встроена в экономическую, социальную и институциональную среду и направлена на генерирование, диффузию и использование знаний и инноваций, формирование стратегий и политики для обеспечения конкурентоспособности секторальной продукции».

Анализ экономик инновационно развитых стран показал конфигурацию инновационных систем (рис. 2) и выявил лидирующий тренд – выделение в структуре НИС региональных инно-



Рис. 2. Инновационная система государства в глобальном окружении

* В своей работе автор не рассматривает подробно еще один из уровней инновационных систем – глобальный, так как его влияние на НИС носит, как правило, объективный характер и может расцениваться как одно из институциональных условий функционирования НИС. Глобальная инновационная система состоит из ресурсов и институтов, которые построены за счет взаимодействия между организациями из многих стран и также доступны компаниям из разных стран мира.

вационных систем – территориальных кластеров, специализированных на инновациях в том или ином секторе промышленности. Согласно мнению экспертов, в развитых странах на кластеры приходится 50 % всей экономики.

Оценка зарубежного опыта построения инновационных систем в области электроники, основанного на комбинации регионального и секторального подходов, позволила автору сделать следующие выводы, ценные для дальнейшего исследования:

1) инновационные электронные кластеры за рубежом формируются на основе сочетания принципов «тройной спирали», кластерного подхода (территориальной близости размещения участников) и государственно-частного партнерства;

2) ведущую роль в кластере, как правило, играет или университет, или авторитетная научно-исследовательская компания (якорная компания кластера);

3) административные вопросы кластера решаются преимущественно специализированной управляющей компанией, в задачи которой входят также поддержание и развитие его инфраструктуры, расширение числа резидентов;

4) стимулирование резидентов кластера к осуществлению профильной деятельности производится с федерального, регионального и местного уровней. Основная поддержка направлена на развитие НИОКР в приоритетных направлениях развития электроники, укрепление материально-технической базы исследований и разработок, коммерциализацию результатов НИОКР путем выделения компаний на принципах «спин-офф», а также создание и поддержание новых рабочих мест;

5) виды поддержки резидентов кластера: налоговые преференции; участие государства в капитале «стартапов»; государственное финансирование НИОКР и коммерциализация их результатов; компенсация части затрат на техническое перевооружение и развитие экспорта; компенсация части процентной ставки по кредитам на развитие; предоставление государственных гарантий для резидентов, не располагающих достаточными активами, для получения кредита требуемой величины; целевое льготное кредитование;

б) проблемы, препятствующие инновационной деятельности в российской экономике, из числа рассмотренных выше, не являются сдерживающим фактором для коммерциализации инноваций в зарубежных электронных кластерах.

По мнению автора, назначение кластеров в РФ состоит в обеспечении инновационной активности промышленных предприятий в контексте внедрения маркетинговых и организационных инноваций и, особенно, новых технологий. Учитывая многообразие регионов, специфику концентрации и специализации в их границах различных видов экономической деятельности, готовность к инновациям, кластеризация выступает оптимальной формой организации ускоренных процессов модернизации технологической структуры промышленности, не широкоформатно в рамках всей территории страны и во всех без исключения видах экономической деятельности, а регионально с созданием «точек роста». В продолжение теоретического обоснования автора условий для обеспечения результативности инновационного развития высокотехнологичных производств, сформулирую определение секторального территориального инновационного кластера (СТИК). СТИК – это формируемый вокруг авторитетного научно-производственного комплекса территориально компактный шлейф компаний, специализированных в той же области, что и инициатор (якорное предприятие) кластера, а также компании инновационной инфраструктуры, обеспечивающие синергию подобного организационного решения.

Теперь обратимся к «комплексу институтов». Одним из самых распространенных в мире

способов обеспечения форсированного национального инновационного развития и в целом экономического роста является привлечение иностранных инвестиций от стран, обладающих современной техникой и высокими технологиями. Причем речь идет о реальных (капиталообразующих) инвестициях, то есть вложениях в создание новых, реконструкцию и техническое перевооружение действующих предприятий. Такой путь прошли в послевоенный период страны Европы, в первую очередь Германия, а в последующем – страны Юго-Восточной Азии и ряд других. Между тем в истории мировой экономики известен другой путь интенсификации развития – опора на собственные силы. Например, крупная размовка лидера Южной Кореи Пака Чжон Хи с МВФ в 1973 г. по созданию в стране мощной металлургии и судостроения. Несмотря на это, сегодня республика владеет 25 % мирового судостроения и претендует на место одного из основных производителей автомобилей [28].

Автор предлагает следующие основные принципы построения НИС с акцентом на ее высокотехнологичный компонент и с опорой на собственные силы и возможности, частично рассчитывая на содействие дружественных нам стран (рис. 3):



Рис. 3. Принципы построения суверенной НИС в части высокотехнологичных производств

Для построения суверенной НИС необходимо решение еще одной задачи – создание единых для всех участников инновационного процесса экономических условий. Анализ действующей системы стимулирования инноваций обнаружил, что она не обеспечивает равенства участников, будучи избирательно ориентированной. В Федеральном законе от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» определены формы государственной поддержки и направления инновационного процесса, на которые она ориентирована. Поддержка осуществляется на федеральном, региональном и отраслевом уровнях, что закреплено в законодательных актах. По статистическим данным, дорогостоящая многоуровневая сложнейшая система поддержки инновационного развития не работает на развитие, а лишь компенсирует скорость разрушения инновационного потенциала.

Между тем проведенное автором исследование показало, что и в российской и в зарубежной теории и практике организации и управления инновационным процессом можно вычленив рациональную траекторию поведения, способную в наших условиях обеспечить действительное инновационное развитие приоритетных областей экономики национального хозяйства. Речь идет о комбинации возможностей, предоставляемых отечественным законодательством, о свободных экономических зонах [29], и мировом опыте построения инновационных кластеров в высокотехнологичных секторах экономики.

Федеральным законом от 22 июля 2005 г. № 116-ФЗ «Об особых экономических зонах в Российской Федерации» для всех резидентов ОЭЗ формируются одинаковые исходные рамочные условия, делающие их бизнес более привлекательным, нежели за ее пределами, но при этом оставляя открытым вопрос о лидерстве в условиях свободной конкуренции участников данного закрытого территориального образования. В этих условиях можно также ожидать, что при создании высокотехнологичного кластера в рамках функционирующей ОЭЗ ТВТ система льгот и преференций, предусмотренная действующим законодательством, наконец, окажет ожидаемое стимулирующее воздействие на инновационную деятельность ее резидентов.

Пути решения задачи построения комбинации организационно-управленческих решений по объединению возможностей, предоставляемых концепциями ОЭЗ ТВТ и СТИК, в своей практической деятельности автор реализует через развитие радиоэлектронного кластера в ОЭЗ ТВТ «Исток», созданной в городском округе Фрязино Московской области. С положениями стратегии развития можно ознакомиться в статьях автора и в «Стратегии развития ОЭЗ «Исток».

В заключение выделю, что основным организационным решением в ходе создания и/или развития высокотехнологичного кластера (помимо территориальной концентрации однопрофильных предприятий) должно стать выделение из якорной компании ее дочерних фирм на принципах «спин-офф» для коммерциализации инновационных разработок материнской компании, включая выпуск гражданской продукции в системе ОПК. Непременными участниками подобных территориальных образований должны быть представители Высшей школы. Их задачи: обеспечение кластера квалифицированными трудовыми ресурсами и генерация новых знаний. Роль администрации региона в кластере заключается в решении организационных вопросов построения инновационной инфраструктуры и создании необходимых социальных условий для персонала участников. Подобная конфигурация позволит обеспечить «замыкание» инновационного цикла на различных компаниях, выпускающих и/или коммерциализирующих инновационную продукцию, а также гарантировать участникам синергию взаимного дополнения и развития в рамках СТИК высокотехнологичных отраслей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Freeman, C.** Unemployment and technical innovation / C. Freeman, J. Clark, L. Soete. – London: Pinter, 1982.
2. **Freeman, C.** Technology policy and economic performance: lessons from Japan / C. Freeman. – London and New York: Pinter Publishers, 1987.
3. **Perez, C.** Structural change and assimilation of new technologies in the economic and social systems / C. Perez // *Futures*. – 1983. – P. 357 – 375.
4. **Perez, C.** Microelectronics, long waves and world structural change: new perspectives for developing countries / C. Perez // *World Development*. – 1985. – Vol. 13, No 3. – P. 441 – 463.
5. **Dosi, G.** Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change / G. Dosi // *Research Policy*. – 1982. – Vol. 11, No 3. – P. 147 – 162.
6. **Soete, L.** Systems of innovation // L. Soete, B. Verspagen, Weel B. Ter; eds. B. H. Hall, N. Rosenberg // *Handbook of the Economics of Innovation*. Elsevier. – 2010. – Vol. 2. – P. 1160 – 1180.
7. **Nelson, R.** An evolutionary theory of economic change / R. Nelson, G. W. Winter. – Cambridge, MA: Harvard University Press, 1982.
8. **Lundvall, B. A.** National systems of innovation. Towards a theory of innovation and interactive learning / B. A. Lundvall. – London: Pinter Publishers, 1992.
9. **Макаров, В. Л.** Экономика знаний: уроки для России / В. Л. Макаров // *Вестник РАН*. – 2003. – Т. 73, вып. 5. – С. 450 – 456.
10. **David, P.** Assessing and expanding the science and technology knowledge base / P. David, D. Foray // *STI Review*. – 1995. – Vol. 16. – P. 14 – 42.
11. **Shinn, T.** The triple helix and new production of knowledge: prepackaged thinking in science and technology / T. Shinn // *Social Studies of Science*. – 2002. – Vol. 32, No 4. – P. 599 – 614.
12. **Meadows, D. H.** The Limits to growth / D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. W. Behrens. – New York: Universe Books, 1972.
13. **Nelson, R. R.** National innovation systems: a comparative analysis / R. Nelson. – New York: Oxford University Press, 1993.
14. **Голиченко, О. Г.** Концепция национальной инновационной системы: истоки и перспективы развития // *Региональные инновационные системы: анализ и прогнозирование динамики. Материалы Шестнадцатых Дружеровских чтений* / О. Г. Голиченко; под ред. Р. М. Нижегородцева. – 2013. – С. 13 – 27.
15. **Российская Федерация. Законы.** О науке и государственной научно-технической политике: федер. закон от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ (ред. на 23.05.2016).
16. **Российская Федерация. Законы.** Об особых экономических зонах в Российской Федерации: федер. закон от 22 июля 2005 г. № 116-ФЗ (ред. на 03.07.2016).
17. **Российская Федерация. Законы.** О промышленной политике в Российской Федерации: федер. закон от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ (ред. на 3.07.2016).
18. О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642.
19. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Экономическое развитие и инновационная экономика»: постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 316.
20. Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года: распоряжение Правительства РФ от 8 декабря 2011 г. № 2227-р.
21. http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/science_and_innovations/science/# (Дата обращения 26.07.2017).
22. **Городникова, Н. В.** Индикаторы инновационной деятельности: 2016: статистический сборник / Н. В. Городникова, Л. М. Гохберг, К. А. Дитковский и др. // *Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики»*. – М.: НИУ ВШЭ, 2016. – 320 с.
23. **Пригожин, А. И.** Методы развития организаций / А. И. Пригожин. – М.: МЦФЭР, 2003. – 864 с.

24. О концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года: распоряжение Правительства РФ от 17 ноября 2008 г. № 1662-р (ред. от 10.02.2017).
25. **Жихарев, К. Л.** Содержание и сущность концепции региональной инновационной системы / К. Л. Жихарев // Российский экономический интернет-журнал. – 2011. – № 2. – С. 72 – 89.
26. **Эшейм, Б.** Базы знаний и региональные инновационные системы: сравнение скандинавских кластеров // Синергия пространства: региональные инновационные системы, кластеры и перетоки знания / Б. Эшейм, Л. Коэнен; ред. А. Н. Пилясов. – Москва-Смоленск: Ойкумена, 2012. – С. 43 – 45, 696 – 721.
27. **Гапоненко Н. В.** Секторальные инновационные системы в экономике, основанной на знаниях: дисс... д-ра экон. наук / Н. В. Гапоненко; РАНХиГС при Президенте РФ. – Москва, 2015. – 350 с.
28. **Кудрявцев, М.** Как поднимались другие страны / М. Кудрявцев, С. Миронин, Р. Скорынин. – URL: <http://www.contrtv.ru/print/1184/> (Дата обращения 4.09.2017).
29. **Российская Федерация. Законы.** Об особых экономических зонах в Российской Федерации: федер. закон от 22 июля 2005 г. № 116-ФЗ (ред. на 03.07.2016).

Статья поступила 20 октября 2017 г.

НОВЫЕ КНИГИ

БАНКОВ С.Е., ГРИБАНОВ А.Н., КУРУШИН А.А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ-структур с использованием ФЕКО. – М.: СОЛОН-Пресс, 2017. – 412 с.

Данная книга представляет собой систематическое описание одной из самых мощных современных программ электродинамического моделирования – ФЕКО.

Программа ФЕКО имеет мощную систему черчения сложных трехмерных СВЧ-конструкций и расчет электромагнитных полей несколькими методами. Это базовый метод моментов, методы геометрической и физической оптики, метод конечных элементов, а также новый мультипольный метод расчета, в котором используются последние достижения в решении систем линейных уравнений с помощью выделения блоков. ФЕКО – это универсальная программа, которая решает задачи так, что отдельные части структуры могут рассчитываться разными методами. Это позволяет ФЕКО решать широкий круг задач и моделировать объекты с размерами много больше длины волны. Описания интерфейса и диалогов, а также примеров относятся к ФЕКО версии 6.

В книге имеется теоретический раздел, в котором дается описание метода моментов, на конкретных примерах рассмотрены разные аспекты методов расчета и установок опций, особенности черчения и моделирования рупорных, печатных, а также многопортовых антенных систем, волноводных и микрополосковых транзисторных СВЧ-усилителей. Рассмотрен ряд оригинальных структур современных антенн с линейной и круговой поляризацией. Рассматривается оптимизация СВЧ-структур, значительно повышающая эффективность проектирования.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, студентов и аспирантов, изучающих проектирование СВЧ-приборов и методы расчета электромагнитных полей в неоднородных средах.

ИСТОРИЯ

УДК 621.378.325(09)

ОСТАНКИНСКОЙ ТЕЛЕБАШНЕ 50 ЛЕТ: ЛАЗЕР «ИСТОКА» НА СЛУЖБЕ СТРОИТЕЛЕЙ (воспоминания участника работ)

Е. Н. Покровский

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



Е. Н. Покровский

OSTANKINO TELEVISION TOWER IS 50 YEARS OLD. «ISTOK»'s LASER IS IN THE SERVICE OF THE BUILDERS (memoirs of a participant of the work)

E. N. Pokrovsky

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

В начале 60-х годов прошлого века в НИИ электронной техники (теперь это АО «НПП «Исток» им. Шокина») в лаборатории В. П. Тычинского (отдел 300, начальник отдела В. П. Беляев) активно шли разработки газовых лазеров. В 1963 году в ходе НИР был создан первый в СССР промышленный образец газового лазера на смеси газов гелия и неона (длина волны – 6328 Å, красная область видимого спектра). Лазеру было присвоено обозначение ОКГ-11, предназначался он для лабораторных исследований. Уже в 1964 году началось его серийное производство на опытном заводе при НИИ (с 1971 года – завод «Рений»).



В. П. Беляев

В 1964 году на смеси газов гелия и неона был разработан лазер, получивший обозначение ОКГ-12 (главный конструктор В. Ф. Мартынов), а в 1965 – 1966 гг. – два типа гелий-неоновых лазеров (главный конструктор В. Ф. Мартынов) для промышленного применения (ОКГ-13 и ОКГ-14). Приборы ОКГ-12 и ОКГ-13 были быстро освоены в серийном производстве на опытном заводе «Рений» и длительное время выпускались в значительных количествах, лазер ОКГ-14 в серийное производство не пошёл из-за ограниченного спроса, он был изготовлен в количестве не более 15 штук непосредственно в лаборатории.

В 1964 году на предприятии была образована лаборатория № 30, которую возглавил А. М. Цейтлин, а впоследствии В. А. Парилов. Курировал работы этой лаборатории главный инженер И. И. Девяткин.

Основные задачи, которые должна была решать лаборатория, – поиск путей использования СВЧ-энергии в народном хозяйстве и создание для этих целей приборов и устройств на базе изделий СВЧ, которые разрабатывались и выпускались на предприятии. Одним из направлений разработок этой лаборатории стало создание приборов и устройств на базе газовых лазеров.

Специфические свойства лазерного излучения – высокая монохроматичность, острая направленность, когерентность и большая плотность мощности излучения – предопределили область применения приборов и устройств на его основе: в строительстве, при выравнивании площадок (например, взлётно-посадочных полос), при прокладке тоннелей и разметке рисовых чеков.

Уже в 1965 – 1966 гг. были созданы лазерные визеры ЛВ-1 (на базе ОКГ-13), ЛВ-2 (на базе ОКГ-11) и ЛВ-3 (на базе ОКГ-14). При создании лазерных визиров тесно взаимодействовали руководители (В. П. Беляев, А. М. Цейтлин), специалисты-лазерщики (В. Ф. Мартынов, В. А. Порозов) и специалисты лаборатории 30 (А. С. Фёдоров, Э. Д. Домнина),



В. Ф. Мартынов

меня привлекали как заводского технолога по изготовлению лазеров и регулировке их в составе визиров, привлекались также специалисты по строительной технике (в том числе из МИСИ).

Лазерные визеры, разработанные на предприятии, использовались при сооружении мемориального комплекса Могила неизвестного солдата у Кремлёвской стены. В газете «Правда», в номере от 25 февраля 1967 года (рис. 1), журналист Владимир Орлов писал:

Линейка и отвес были инструментами классических зодчих, возводивших грандиозные здания и великие гробницы. Теперь наука дает им в руки иной, могущественный инструмент. Это – луч лазера.

По лазерному лучу выверяются вертикали высочайших башен, а сегодня работники электронной промышленности (читай НИИ электронной техники из Фрязино. – Е. П.) принесли лазер к подножию Кремлевской стены <...>.

Луч лазера столь ярок, что его рубиновая нить отчетливо заметна на фоне зимних сумерек. Медленно падающие снежинки искорками вспыхивают в этом луче. <...> Вдоль этой светящейся горизонтали лягут каменные плиты гробницы. Линия, существовавшая пока лишь в воображении архитекторов, сделалась зримой. Это как бы первый штрих эскиза монументального сооружения, прочерченный огненным пером... Символично, что над усыпальницей того, кто отдал жизнь за торжество коммунизма, за победу разума, словно древко алого знамени, склоняется луч лазера <...>.

В 1965 году появилась идея создания лазерного устройства для применения при строительстве высотных сооружений с целью контроля вертикали. Так на базе газового лазера ОКГ-14 появился зенит-центрир ЛЗЦ-1 (рис. 2).

Луч лазерного зенит-центрира устанавливается в вертикальном положении с помощью устройств, включающих в себя установочные и микрометрические регулировочные винты, шкалы отсчёта и уровни. Эти устройства были заимствованы из геодезических и маркшейдерских приборов. В зенит-центрире можно задать не только вертикаль, но и определённый угол отклонения от вертикали. Точность установки вертикальной оси составляет 4×10^{-5} рад (около 8"), что соответствует отклонению луча от вертикали на высоте объекта 500 метров не более 8...10 мм.

Другими важными характеристиками зенит-центрира (да и лазерных визиров тоже) являются диаметр луча и угол его расходимости. Для газовых гелий-неоновых лазеров типичный угол расходимости составляет 8...10' (определяется размерами разрядного канала и радиусами кривизны зеркал резонатора) при диаметре луча на выходе 1 мм (для ОКГ-13), 2 мм (для ОКГ-14), 3 мм (для ОКГ-11). Для расстояний 10...30 м такой угол расходимости вполне приемлем и не создаёт трудностей при индикации пятна лазерного излучения. Однако на расстояниях 100 м и тем более 500 м при таком значении угла расходимости лазерного пучка диаметр лазерного луча превышает 15 см и 1500 см соответственно.



Рис. 1. Коллаж из газетных вырезок конца 60-х годов: о лазере

Острую направленность (уменьшение угла расходимости) позволяет обеспечить оптический коллиматор – известный в оптике инструмент. Коллиматор стал неотъемлемой составной частью лазерных визиров и зенит-центрира. В экспериментах, при отладке приборов (лазерных визиров и зенит-центриров) в полигонных испытаниях достигались углы расходимости луча 15...20", при этом диаметр лазерного луча на выходе из коллиматора составлял 15...20 мм.

Это позволяло получать диаметр лазерного пятна на экранах на расстоянии 100 м – 30 мм, на расстоянии 300 м – 50 мм, на расстоянии 500 м – 70 мм.

В конце 1965 года и в начале 1966 года В. Ф. Мартынов вместе со специалистами лаборатории 30 несколько раз выезжал в институт «Моспроект» и, видимо, ещё в какие-то организации, участвовавшие в строительстве телебашни, для согласования возможности и условий опробования и использования зенит-центрира при строительстве. Согласование состоялось, и в апреле – мае 1966 года было намечено опробовать зенит-центрир в реальных условиях строящейся телебашни. В. Ф. Мартынов взял на это испытание меня для обеспечения работы непосредственно у зенит-центрира, вместе с нами был ещё А. С. Фёдоров.

Мы с зенит-центриром подъехали на автомашине непосредственно к основанию телебашни. Вокруг этого основания была обычная обстановка строительной площадки. По моим сегодняшним оценкам, высота башни в тот период была доведена примерно до уровня, где сейчас располагаются смотровая площадка и ресторан «Седьмое небо», то есть 300...340 м.

Нас встретили четыре специалиста от организаций, участвующих в строительстве. К сожалению, ни фамилий, ни должностей, ни организаций, которые они представляли, я не знал. В. Ф. Мартынов и А. С. Фёдоров, видимо, это знали и общались с ними, как со старыми знакомыми.

Зенит-центрир был установлен точно в центре площадки основания башни (на нулевом уровне) на специально подготовленном месте. Мы включили лазер, отрегулировали горизонтальную плоскость и провели небольшие корректировки вертикальной оси.

Далее вся команда отправилась наверх, а меня оставили внизу для контроля режима работы зенит-центрира.

Вернулись все часа через полтора. Были довольны. Один из участников опробования и испытания сказал на прощанье примерно следующую фразу: «Конечно, зенит-центрир значительно облегчит нам контроль вертикали при дальнейшем наращивании телебашни, хотя от традиционных методов мы полностью тоже, конечно, не откажемся. Если будут возникать вопросы или проблемы, будем просить вас помогать нам».

Зенит-центрир ЛЗЦ-1 остался на строительстве, а мы уехали к себе, во Фрязино. По дороге домой Виктор Фёдорович вкратце рассказал о результатах. Луч лазера на высоте испытательной площадки они нашли сразу, вертикаль построенной части башни была выдержана очень точно, что подтвердили измерения положения луча от зенит-центрира. Луч на этой высоте имел диаметр



Рис. 2. Зенит-центрир

5...6 см (по оценкам В. Ф. Мартынова), окружность светового пятна была очень чёткой, все измерения проводить было легко. Виктора Фёдоровича поразило, что, оказывается, башня качается и световое пятно на экране перемещается относительно центра площадки на 5...6 м в каждую сторону. Поскольку луч лазера не мог перемещаться и жестко выдерживал вертикаль, это означало, что с такой амплитудой раскачивается башня под действием ветра. Это подтвердили и присутствовавшие строители башни. Там же, наверху, они вместе обсудили «технологию» контроля вертикали: измеряется расстояние между двумя крайними положениями светового пятна, середина этого отрезка и есть правильное значение положения вертикали на этой высоте и относительно этой точки нужно осуществлять все строительные действия.

Так закончилось это испытание. Насколько я знаю, Виктор Фёдорович ещё 2-3 раза в течение 1966 и в начале 1967 года ездил для участия в обсуждениях получавшихся результатов использования зенит-центрира при строительстве Останкинской телебашни.

Все работы по строительству телебашни и телецентра были завершены в срок: к 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции. 4 ноября 1967 года был подписан Акт Государственной комиссии о приемке в эксплуатацию первой очереди строительства башни.



Рис. 3. Останкинская телебашня

Останкинская телебашня начала трансляцию в эфир четырех телевизионных и трех радиовещательных программ. Мощные передатчики обеспечили уверенный прием сигналов на расстоянии 120 км от башни. Высота башни в момент окончания строительства составила 533,3 м, а в 1999 году подросла до 540 м. До 1975 года Останкинская телебашня была высочайшей башней в мире (рис. 3).

Творение главного конструктора Останкинской башни, талантливого инженера Николая Васильевича Никитина навсегда войдет в историю отечественной архитектуры как самое высокое сооружение Советского Союза.

Башня в Останкине знаменита еще и тем, что, являясь одной из самых высоких в мире, представляет собой еще и уникальное железобетонное высотное сооружение. Конструктор башни Николай Васильевич Никитин однажды сказал, что башня будет стоять на земле, пока не надоеет людям.

Когда в апреле 1971 года над Москвой пронесся сильнейший ураган, какой бывает раз в сто лет, амплитуда колебаний башни достигла

Статья поступила 20 сентября 2017 г.

УДК 621.38(09)

НАШ АКАДЕМИК
(к 110-летию Николая Дмитриевича Девяткова)

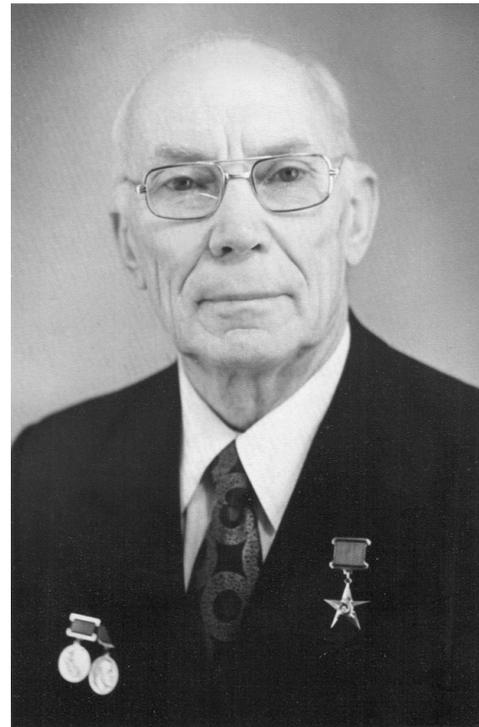
А. К. Балыко

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

OUR ACADEMICIAN
(to the 110-th anniversary
of Nikolai Dmitrievich Devyatkov)

A. K. Balyko

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



Николай Дмитриевич Девятков
(1907 – 2001 гг.)

1. ВВЕДЕНИЕ

11 апреля 2017 года исполнилось 110 лет со дня рождения выдающегося ученого, Героя Социалистического Труда, действительного члена АН СССР и РАН Николая Дмитриевича Девяткова. На протяжении 70-ти лет имя его было неразрывно связано с электроникой. Жизнь Николая Дмитриевича являет собой ярчайший пример служения отечественной науке и технике.

В течение двух десятилетий мне посчастливилось общаться с академиком, к которому я всегда испытывал и продолжаю испытывать огромное уважение и личную симпатию и бережно сохраняю память об этом удивительном человеке. Николаю Дмитриевичу я посвятил одну из своих книжек об ученых и сотрудниках «Истока».

Настоящая статья содержит два больших раздела. В первом я постарался, в меру своих возможностей, осветить Н. Д. Девяткова как ученого и человека, во второй раздел включены материалы о состоянии отечественного вооружения в предвоенный и военный периоды, которые Николай Дмитриевич написал по моей просьбе к 50-летию Победы советского народа в Великой Отечественной войне. Они были опубликованы в газете «Истока» «За передовую науку» 20 марта 1995 года. Именно они положили начало работы академика над своими «Воспоминаниями», которые были изданы отдельной книгой в 1998 г. (второе издание – в 2000 г.), хотя и не были включены в нее.

**2. Н. Д. ДЕВЯТКОВ – ОСНОВОПОЛОЖНИК
ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ СВЧ**

Девятков Н. Д. родился 11 апреля 1907 года в исконно русском городе Вологде в семье ремесленника купеческого рода. В 1916 г. поступил в Вологодское реальное училище, которое

закончил в 1924 г. Естественное стремление молодого человека к знаниям определило его желание продолжить учебу в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ), где уже учились его братья и сестра. Тем не менее, поступить в ЛПИ оказалось непросто из-за большого конкурса на все факультеты института, который составлял 25...28 человек на место.

Поэтому, переехав в Ленинград в 1925 г., он поступил на работу в Ленинградский физико-технический институт (ЛФТИ) сначала в качестве практиканта, а затем был переведен на должность лаборанта. Одновременно с работой он посещал лекции и лабораторные занятия в ЛПИ вольнослушателем. После собеседования с директором ЛФТИ академиком А. Ф. Иоффе Николаю Дмитриевичу предложили работать в радиолaborатории А. А. Чернышева. Без сомнения, это было счастливое предложение, ибо имя выдающегося ученого и талантливого изобретателя А. А. Чернышева, известного автора работ в области энергетики и радиоэлектроники, привлекало молодежь.

Начальник лаборатории определил нового сотрудника к дипломнику, работавшему над созданием высоковольтной установки для борьбы с загрязнением воздуха. Эта проблема для Ленинграда в те годы стояла очень остро, поскольку Выборгский металлургический завод выбрасывал в атмосферу огромное количество окиси цинка при плавке латуни, приводившее к многочисленным заболеваниям людей. Работа над установкой продолжалась около года и была сопряжена с риском для здоровья самих исследователей. Впоследствии созданная установка нашла широкое применение и стала выпускаться серийно, а вот ее автора – дипломника – врачи не смогли спасти – слишком сильно оказался отравлен его организм окисью цинка. Лаборанта Н. Д. Девяткова перевели в лабораторию А. В. Москвина, где разрабатывались газовые разрядники.

В 1927 г. по предложению А. А. Чернышева он поступает в ЛПИ на новый факультет – индустриального земледелия, где конкурс составлял 7 человек на место, а через год обучения переводится на электромеханический факультет. Одновременно он продолжает работать, совмещая учебу с деятельностью научного работника. В 1931 г. Н. Д. Девятков заканчивает ЛПИ и получает профессию инженера. Первую свою работу «Газовые разрядники для защиты линий слабого тока от перенапряжения» молодой ученый опубликовал в журнале «Электричество» в 1931 году (№ 21). Примечательно, что его работой открывается этот номер журнала. Последующие его работы были посвящены мощным газовым разрядникам, устройствам для защиты от акустических ударов, газоразрядным лампам с калящимся катодом для излучения в инфракрасной части спектра, фотоэлементам. В 1934 году его работа «Газовые разрядники» была опубликована в «Трудах Всемирной конференции», конференция проходила в Париже. Из первой серии работ Николая Дмитриевича следует отметить также разработку высокочувствительных серебряно-цезиевых фотоэлементов, которые были использованы в первых отечественных передающих телевизионных приборах, так называемых иконоскопах.

В период с 1927 по 1935 годы ЛФТИ несколько раз реорганизовывался. Как с улыбкой отмечал Николай Дмитриевич, менялись только вывески и названия, а его рабочее место оставалось прежним. При последней реорганизации, в 1935 г., он стал сотрудником Государственного НИИ-9. С этого же года в лаборатории Г. А. Разоренова он начал исследования в области СВЧ. Перед лабораторией была поставлена задача разработки мощных электровакуумных приборов, в частности магнетронов непрерывного генерирования, для радиотехнических установок, предназначенных для поражения самолетов. После очередной реорганизации Н. Д. Девятков был назначен начальником лаборатории.

Этот период трудовой деятельности Николая Дмитриевича по праву можно назвать чрезвычайным.

чайно плодотворным. Он предлагает ряд новых конструкций электровакуумных приборов, исследует их замечательные свойства, оформляет на свои изобретения заявки и публикует ряд пионерных исследований. Н. Д. Девяткову принадлежит приоритет в создании СВЧ-триодов с плоскопараллельными электродами – маломощных генераторных ламп с практически безынерционным выводом сетки. Оригинальные идеи, заложенные в конструкции СВЧ-триодов, послужили основой для создания множества типов таких ламп, а также усилителей и генераторов на их основе не только в СССР, но и в Англии, США, Германии.

Продолжая работы в этом направлении, Н. Д. Девятков с Е. Н. Данильцевым в 1939 г. приходят к выдающемуся изобретению – одному из вариантов отражательного клистрона. «При разработке двухконтурных клистронов, – писал в своих воспоминаниях [1] Николай Дмитриевич, – мне с Е. Н. Данильцевым пришла мысль создать одноконтурный клистрон, в котором за контуром по оси электронного потока поместить отражающий электроны электрод и таким образом осуществить группировку электронов не в дрейфовой трубке, а в пространстве, где электроны двигались в обратном направлении, от отражателя в контур. Был проведен расчет такого клистрона и изготовлены первые образцы, которые сразу же показали возможность получать генерацию и частотную модуляцию при изменении потенциала на отражателе. На эту «электронную лампу» было в 1939 году получено авторское свидетельство. Такой одноконтурный клистрон в дальнейшем стал называться отражательным клистроном».

Отражательный клистрон впоследствии стал основным промышленным типом электровакуумных приборов, используемых до настоящего времени в различных радиоэлектронных системах.

В лаборатории Н. Д. Девяткова были разработаны прямопролетные клистроны, магнетроны, триоды с плоскопараллельными электродами, двуханодные диоды с оксидным катодом. В начале 1941 года в лаборатории Н. Д. Девяткова была закончена ОКР по прямопролетным клистроном на длину волны 15 см. Освоение серийного выпуска предполагалось на заводе «Радиолампа» в поселке Фрязино, но с началом войны и эвакуацией завода в Ташкент передача в производство не состоялась. Разработанные приборы были положены в основу создания радиолокационных установок.

На второй день после начала Великой Отечественной войны Н. Д. Девяткова вызвали Правительственной телеграммой в Москву. Там Николаю Дмитриевичу было поручено участвовать в проектировании радиолокатора для ночного бомбардировщика на клистролах его разработки.

10 февраля 1942 г. Государственный Комитет Обороны (ГКО) принял Постановление о разработке и серийном производстве отечественных станций орудийной наводки и об организации для этих целей завода № 465 в Москве. На заводе были созданы лаборатории по разработке радиотехнических элементов станций и электровакуумных приборов, а также сборочные цеха для серийного выпуска станций. Начальником электровакуумной лаборатории был назначен В. М. Егиазаров, его заместителем – Н. Д. Девятков.

По мере вхождения в строй эвакуированных на восток страны радиозаводов и радиотехнических научно-исследовательских институтов потребность в электровакуумных приборах для радиолокации и связи увеличивалась. Постановлением ГКО от 4 июля 1943 г. на базе фрязинского завода «Радиолампа» был организован научно-исследовательский институт № 160 с опытным заводом. Директором института был назначен С. А. Векшинский, его заместителем – В. И. Егиазаров, а начальником лаборатории электровакуумных приборов – Н. Д. Девятков.

Целиком его лаборатория с завода № 465 была переведена в НИИ-160 в 1944 году. В это же время академик А. И. Берг привлек Николая Дмитриевича к работе в Комитете по радиолокации.

После окончания войны Н. Д. Девятков был командирован в Берлин для обследования подвалов Рейхстага, где, по данным нашей разведки, было обнаружено какое-то радиопроизводство. Пребывание Н. Д. Девяткова в Берлине затянулось на 3 года. Вернулся он во Фрязино только в мае 1948 года в чине майора и был назначен заместителем директора НИИ-160 по научной части. С тех пор его жизнь неизменно связана с «Иостоком».

За более чем полувековой период, во многом благодаря усилиям Н. Д. Девяткова, в «Иостоке» нашли свое развитие многие современные научные направления. Под его научным руководством на предприятии впервые в мире были начаты работы по освоению миллиметрового диапазона длин волн. Он сразу понял и оценил преимущества этого диапазона, открывшие для электроники и радиотехники новые горизонты. Ведущими сотрудниками «Иостока» при непосредственном участии Н. Д. Девяткова были разработаны лампы обратной волны, перекрывающие весь миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн. Крупным достижением «Иостока» явилась разработка цепочки вакуумных приборов 8-мм диапазона, состоящей из задающего клистронного генератора, усилительного клистрона и мощного выходного прибора на мазере на циклотронном резонансе. Выходная мощность цепочки составила рекордное значение – 10 кВт. Цепочка использовалась в наземных радиолокационных станциях.

В 1953 году Н. Д. Девятков был избран член-корреспондентом АН СССР, а немного позднее он был утвержден председателем научного совета АН СССР по проблеме «Генерирование, усиление и преобразование в миллиметровом диапазоне длин волн».

В 1953 году в Москве был организован Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР, а через несколько лет – его филиал во Фрязино. Первый директор ИРЭ академик А. И. Берг со дня организации института привлек к его работе Н. Д. Девяткова в качестве заведующего отделом СВЧ-электроники. «Общей направленностью работ отдела было изучение процессов взаимодействия электронных потоков с электромагнитными полями, создаваемыми различными электродинамическими системами в приборах О-типа; создание оригинальных приборов СВЧ; изучение плазмы и использование плазменно-электронной фокусировки при создании электронных лучей; изучение плазменных образований в разряженной среде; изучение электронно-оптических систем; создание оригинальных электронных пушек и мощных электровакуумных приборов на их основе; изучение шумовых свойств плазменных и электронных приборов СВЧ, создание СВЧ-шумотронов; теоретическое изучение хаотических процессов в электромагнитных полях»[2].

Позднее Николай Дмитриевич принимал самое активное участие и в открытии филиала ИРЭ в Саратове, а также в создании ИРЭ в Харькове, Кишиневе, Ереване и других городах.

К впечатляющим достижениям последних десятилетий по праву относятся работы Н. Д. Девяткова в области применения СВЧ электронных приборов и квантовых генераторов в народном хозяйстве и медицине. Широта и глубина его познаний, высокая интеллигентность и доброжелательность, уважительное отношение к сотрудникам позволили Н. Д. Девяткову выполнить исключительно важную миссию, которая, возможно, и была посильна только ему, – создать уникальные творческие коллективы специалистов для совместных работ в таких разрозненных областях, как электроника, медицина, биология и т. д. Основные работы, выполненные под руководством Н. Д. Девяткова в этом направлении: применение лазеров в хирургии и терапии, использование гипертермического нагрева опухолей до их разрушения,

создание гаммы устройств для гастроэнтерологии, тепловизионной диагностической аппаратуры, установок для облучения семян с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

Особенно поражают результаты, полученные Н. Д. Девятковым с сотрудниками, по исследованию специфического воздействия электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона длин волн на биологические структуры и организмы с целью эффективного терапевтического лечения ряда болезней путем повышения иммунологических способностей организма. Результаты этой плодотворной работы были высоко оценены – группе сотрудников из «Истока» и ИРЭ РАН, возглавляемой Н. Д. Девятковым, была присуждена Государственная премия Российской Федерации. Случилось это за несколько месяцев до кончины выдающегося ученого.

Н. Д. Девятков с необычайным интересом относился к новаторской деятельности изобретателей. Первое свое изобретение он предложил еще в 1930 году. В списке его трудов значится не так уж много авторских свидетельств на изобретения. Между тем едва ли не каждый изобретатель на «Источке» считал за честь поделиться с Николаем Дмитриевичем своими мыслями, заручиться его поддержкой и выслушать критические замечания по поводу своего новаторского технического предложения. Многие изобретатели за эти услуги предлагали Н. Д. Девяткову включить его в число соавторов изобретения. Однако Николай Дмитриевич никогда не позволял себе стать «псевдоавтором», более того, высказывал критические замечания в адрес «генераторов» идей за излишнее расширение состава авторского коллектива.

Н. Д. Девятков автор (соавтор) более 250 научных трудов и изобретений.

На протяжении всей своей долгой жизни Николай Дмитриевич вел поистине титаническую научно-организационную работу. С 1975 года и до конца дней он являлся председателем Научного совета АН СССР и РАН по проблеме «Физическая электроника», в течение 10 лет был членом отделения общей физики и астрономии АН СССР, 25 лет входил в состав Высшей аттестационной комиссии (ВАК) и пленума ВАК, много лет был членом Комитета по Ленинским и Государственным премиям СССР в области науки и техники, членом НТС Военно-промышленного комитета, возглавлял НТС министерства электронной промышленности по СВЧ-электронике, был членом НТС министерства.

12 лет (1983 – 1995 гг.) Н. Д. Девятков был главным редактором журнала «Радиотехника и электроника». С момента организации и до последних дней возглавлял редколлегию научно-технического сборника «Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ» («СВЧ-техника»). Он всегда был желанным и преимущественно безотказным научным редактором многочисленных монографий и сборников научных трудов сотрудников различных предприятий и академических институтов.

Н. Д. Девятков горячо поддержал созданную в 1946 г. во Фрязино аспирантуру при НИИ-160 и до конца жизни являлся главным вдохновителем ее работы. В течение многих лет являлся председателем двух диссертационных советов по защите докторских и кандидатских диссертаций при «Источке» и ИРЭ РАН.

Николая Дмитриевича с почетом и уважением принимали на всех научных форумах. Он был председателем организационных комитетов более 100 научных конференций и симпозиумов. Доброжелательное отношение его к собеседникам, сердечная отзывчивость к просьбам сотрудников предприятия сыскали ему славу истинного интеллигента, «нашего» академика. Поэтому основное детище Николая Дмитриевича, благодаря которому стало возможным многое

из того, что создано им или связано с его именем, – это атмосфера постоянного научного поиска, которая всегда исходила от него, окружала его и привлекала к нему лучшие умы и силы.

Заслуги Н. Д. Девяткова перед отечественной наукой и техникой отмечены самыми высокими званиями и правительственными наградами: доктор технических наук (1957), действительный член (академик) АН СССР (1968) и РАН, Герой Социалистического Труда (1969), лауреат Сталинской (Государственной) премии СССР (1949), Ленинской премии (1965), Государственной премии Российской Федерации (2000), премии Совета Министров СССР (1984), премии Правительства Российской Федерации (1996), лауреат Золотой медали имени А. С. Попова (1986), кавалер двух орденов Ленина, ордена Октябрьской Революции, двух орденов Трудового Красного Знамени, ордена Красной Звезды.

Н. Д. Девятков – почетный житель города Фрязино.

Все, кто встречался с Н. Д. Девятковым, отмечали в нем не только выдающегося ученого, но и необыкновенного человека, истинного интеллигента. Кому приходилось неоднократно участвовать в заседаниях советов, председателем которых являлся Н. Д. Девятков, всякий раз не переставали восхищаться тем, с каким вниманием и пониманием относился академик к докладчику, не делая различия между молодым инженером и соискателем на докторскую степень. Его вопросы, как правило, находили самые «темные» места в докладах и иногда заставляли тушеваться выступающего. В то же время, создавая спокойную обстановку для ответа, Н. Д. Девятков старался, если в том была необходимость, помочь докладчику разобраться в этих «темных» местах. Такая доброжелательность к выступающему и заинтересованность академика в представленных результатах воодушевляла соискателей и придавала им дополнительные силы для последующей успешной научной работы.

Особых слов благодарности сотрудников «Истока» и жителей города Фрязино, в котором Н. Д. Девятков прожил без малого 50 лет, заслуживает его глубокое великодушие, проявляющееся в многочисленных фактах содействия фрязинцам, нуждающимся в медицинской помощи. Не было случая, чтобы Николай Дмитриевич отказал какому-то сотруднику предприятия в этом. Его телефонные звонки и рекомендательные письма в лучшие клиники страны были подчас теми спасательными ниточками, которые позволили продлить жизнь многим жителям нашего города.

Н. Д. Девятков являлся образцом русского интеллигента, готового прийти на помощь каждому, кто в ней нуждается, человеком большого ума и высокой внутренней культуры.

Николай Дмитриевич безгранично обожал свою супругу Зою Васильевну, с которой в любви и согласии прожил почти 70 лет, своего сына Михаила, доктора физико-математических наук, безвременно ушедшего из жизни в 1984 году в возрасте 48-ми лет.

Николай Дмитриевич прожил большую и необычайно плодотворную жизнь. Новые направления в электронике СВЧ, активно развиваемые ученым и его коллегами и учениками, позволили приоткрыть завесу таинства природы, установить необъятные возможности для использования СВЧ-волн в оборонной технике, народном хозяйстве, медицине, биологии.

Приборы, созданные ученым, продолжают работать, напоминая нам о светлом облике выдающегося ученого современности – Николая Дмитриевича Девяткова.

3. ВОЕННЫЕ ГОДЫ

Начну с того, что имя Н. Д. Девяткова навечно вписано в энциклопедию «Великая Отечественная война 1941 – 1945 г.» [3]:

«Девятков Николай Дмитриевич (р. 1907). Ученый в области электроники, академик АН СССР (1968), Герой Социалистического Труда (1969). Окончил Ленинградский политехнический институт (1931). Основные труды по генерированию, усилению и преобразованию сверхвысокочастотных колебаний и исследованию механизма этих процессов. В годы войны вел разработки и руководил производством различных типов электровакуумных приборов для радиолокационной аппаратуры. Лауреат Ленинской премии (1965) и Государственной премии СССР (1949). Награжден двумя орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, Красной Звезды».

Предвоенные и военные годы, как известно, были связаны с бурным развитием отечественной радиолокации. Значительную роль в становлении этой области радиоэлектроники играли сотрудники НИИ-9, и в их числе Н. Д. Девятков. Поэтому его взгляд на то время представляет огромный интерес для нынешнего поколения. К 50-летию Победы в газете «Истока» «За передовую науку» были опубликованы воспоминания Николая Дмитриевича об этом времени. Ниже публикуются эти воспоминания.

«Прежде чем говорить о роли и значении радиолокации в период Отечественной войны, остановимся кратко на истории развития радиолокации в нашей стране.

Возможность радиолокационного обнаружения самолетов стала активно обсуждаться среди ученых, инженеров и военных представителей Наркомата обороны в начале 30-х годов. 1933 – 1934 годы у нас в стране официально считаются годами становления радиолокации как самостоятельной научно-технической области. В период с 1933 г. до начала Великой Отечественной войны ряд научных организаций активно подключился к разработке научных основ радиолокации и созданию действующих образцов радиолокационных станций различного назначения.

Начнем с зенитной радиолокации. Первый положительный результат обнаружения самолета был получен в Ленинграде в Центральной радиолоборатории (ЦРЛ) в дециметровом диапазоне длин волн при непрерывном генерировании с использованием эффекта Доплера (Ю. К. Коровин). Опыты ЦРЛ сыграли решающую роль в привлечении к работам по радиообнаружению сотрудников Ленинградского электрофизического института (ЛЭФИ), где я в то время работал. В 1934 – 1935 гг. в ЛЭФИ был разработан и изготовлен экспериментальный макет зенитной установки на волне 25 см (разработчик – Б. К. Шембель). Таким образом, в середине 1935 года в ЦРЛ и ЛЭФИ одновременно были созданы и испытаны первые радиолокационные установки обнаружения самолетов для зенитной артиллерии, определявшие две угловые координаты: азимут и угол места.

Осенью 1935 года ЛЭФИ был преобразован в научно-исследовательский институт № 9 (НИИ-9). Работы по радиолокации получили здесь значительное развитие. К концу 1939 года были созданы весьма совершенные зенитные «радиоискатели» на длине волны 15 см с мощностью 12 Вт. Они давали значительно лучшие результаты по сравнению с применяемыми в то время звукоулавливателями как в отношении точности и дальности действия, так и малой чувствительности к внешним воздействиям (ветер).

Следующая модель зенитного радиоискателя «Луна» включала две установки: азимутальную и радиодальномер для определения дальности, высоты полета или угла места цели. Азимутальная установка работала в непрерывном режиме на прямопролетных клистродах с длиной волны 15...16 см и мощностью излучения 20 Вт и имела веерообразную (плоскую) диаграмму направленности в вертикальной плоскости. В радиодальномере предусматривался импульс-

ный режим работы на волне 80 см с мощностью излучения 10...15 кВт и веерообразной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости.

Разработка опытного образца «Луны» должна была закончиться в марте 1941 г. по договору с одним из заводов радиопромышленности. Но до начала Великой Отечественной войны работа не была закончена, а потом началась война, эвакуация завода, и до серийного производства дело так и не дошло. НИИ-9 тоже во время блокады в основном прекратил свою деятельность. Несколько экспериментальных образцов установки, имевшихся в НИИ-9, как только началась война, были переданы системам ПВО Ленинграда и Москвы, где успешно работали.

С началом Великой Отечественной войны были мобилизованы все силы и средства на борьбу и разгром немецкого фашизма. Большие города, особенно Москва и Ленинград, «ощетинились» сотнями стволов зенитных орудий, прикрылись истребительной авиацией, а в ночное время – сетью аэростатов воздушного заграждения. С началом ночных налетов сотни прожекторов стали обыскивать небо, чтобы дать возможность зенитной артиллерии вести прицельный огонь, а истребительной авиации – осуществлять перехват освещенных самолетов противника. Для защиты Москвы с воздуха была создана опытная зенитная батарея. Она состояла из средств зенитной артиллерии и опытного образца радиоскателя НИИ-9. Позднее в нее была включена радиолокационная станция орудийной наводки, полученная из Англии.

Работы по созданию радиолокационной аппаратуры в НИИ-9 велись одновременно с разработкой электровакуумных приборов СВЧ-диапазона. Были разработаны прямопролетные клистроны, магнетроны, триоды с плоскопараллельными электродами, двуханодные диоды с оксидным катодом (Н. Д. Девятков, Е. Н. Данильцев и др.). Разработанные приборы были положены в основу создания радиолокационных установок.

В начале 1941 года была закончена опытно-конструкторская разработка прямопролетных клистронов на длину волны 15 см. Освоение серийного выпуска предполагалось на заводе «Радиолампа» в поселке Фрязино, но с началом войны и эвакуации завода в Ташкент передача в производство не состоялась. Обстоятельства сложились так, что разработку и освоение в производстве приборов СВЧ для радиолокации во время Великой Отечественной войны не было возможности проводить. Возобновились они и стали быстро развиваться в послевоенные годы на ряде предприятий электронной промышленности во главе с НИИ-160 (теперь ГНПП «Исток»).

Радиолокационная станция орудийной наводки, находящаяся в составе опытной зенитной батареи, показала высокую эффективность в борьбе с авиацией противника. Работала она в метровом диапазоне длин волн и с достаточно большой точностью выдавала данные координат цели для зенитной артиллерии. С приобретением боевого опыта батарея вскоре стала огневым щитом на подступах к Москве.

10 февраля 1942 г. Государственный Комитет Обороны (ГКО) принял Постановление о разработке и серийном производстве отечественных станций орудийной наводки, аналогичных английской станции, и об организации для этих целей завода № 465 в Москве. На заводе были созданы лаборатории по разработке радиотехнических элементов станций и электровакуумных приборов, а также сборочные цеха для серийного выпуска станций. Начальником электровакуумной лаборатории был назначен В. М. Егиазаров, его заместителем – Н. Д. Девятков. К ноябрю 1942 г. были закончены разработка и изготовление двух опытных образцов станций орудийной наводки (СОН-2). Испытание и приемка станций проводились прямо в прифронтовой полосе под Москвой в боевых условиях. С начала 1943 г. был организован серийный выпуск СОН-2.

По мере вхождения в строй эвакуированных на восток страны радиозаводов и радиотехнических научно-исследовательских институтов потребность в электровакуумных приборах для радиолокации и связи увеличивалась. Постановлением ГКО от 4 июля 1943 г. на базе фрязинского завода «Радиолампа» был организован научно-исследовательский институт № 160 с опытным заводом. Основной целью нового предприятия была разработка и выпуск электронных приборов для радиолокационной техники. Началось становление отечественной СВЧ электронной отрасли, развитие которой возглавил вновь созданный институт. Лаборатория электровакуумных приборов завода № 465 была переведена в НИИ-160.

Перейдем теперь к истории развития радиолокации дальнего обнаружения. Разработкой и освоением импульсной техники на УКВ, приведшей к созданию станций дальнего обнаружения, у нас в стране начали заниматься с 1935 года в Ленинградском физико-техническом институте под руководством Ю. Б. Кобзарева. В созданном в 1938 году экспериментальном макете использовался генератор на лампе И2-8 (разработчик – В. В. Цимбелин) мощностью 40...50 кВт в импульсе при анодном напряжении 15...22 кВ. Антенна излучающего устройства состояла из открытого двухпроводного фидера и направленного излучателя типа «Уда-Яги», расположенного на мачте высотой 12 м. Приемная станция располагалась на расстоянии 1000 м от излучающей и имела такую же антенну. На основе экспериментального макета с привлечением НИИ радиопромышленности была разработана подвижная станция «Редут». Станция работала на волне 4 м с мощностью в импульсе 40...50 кВт. В 1940 г. станция «Редут» была принята на вооружение войск ПВО под названием РУС-2.

Станции РУС-2 привели к тактико-технической революции в службе воздушного наблюдения и коренным образом повлияли на эффективность ПВО страны, так как с помощью этих станций командование могло наблюдать за динамикой воздушной обстановки в зоне радиусом 100 км, достоверно следить за действиями воздушного противника, наиболее целесообразно планировать и использовать свои силы и средства в борьбе с врагом. Применение станций типа РУС-2 в ходе войны оказалось столь эффективным, что потребность войск в них непрерывно росла и потребовала организации их производства на нескольких заводах. До конца войны было выпущено несколько сотен станций, обеспечивших основные потребности войск ПВО. Наличие достаточного количества радиолокационных станций дальнего обнаружения сыграло огромную роль в защите Москвы, Ленинграда и других больших городов.

Во время блокады Ленинграда сотрудником НИИ-9 Э. И. Голованевским была разработана система телевизионной передачи информации с радиолокаторов на КП ПВО, что давало возможность командующим истребительной авиацией и зенитной артиллерии непосредственно наблюдать за воздушной обстановкой и принимать оптимальные решения. Это значительно увеличивало эффективность борьбы с самолетами противника.

Коротко остановимся на самолетных станциях радиообнаружения. Мысль о необходимости применения радиолокации в истребительной авиации ВВС возникла у военного инженера НИИ ВВС С. А. Данилина в конце 1939 года. В НИИ-20 под руководством Д. Б. Слепушкина в начале 1941 года был разработан эскизный проект станции и создан лабораторный макет «Гнейс-1» на прямопролетных клистронах НИИ-9, работающих в импульсном режиме (разработчик – Н. Д. Девятков). Но, в связи с тем что во время блокады Ленинграда работы по клистронам были прекращены, а НИИ-20 был эвакуирован из Москвы на Восток, продолжать дальнейшие работы над станцией в дециметровом диапазоне не представлялось возможным. Было принято решение разрабатывать бортовую станцию в метровом диапазоне длин волн. Руководство работой было поручено В. В. Тихомирову.

Эвакуация НИИ-20 и радиозаводов на Восток создала большие трудности в разработке этой станции, получившей название «Гнейс-2». В июне 1942 года первый экспериментальный образец был создан и установлен на двухместном самолете «Пе-2» для заводских испытаний. Во второй половине 1942 года станция была принята на вооружение и запущена в серийное производство.

Такие станции в декабре 1942 года использовались для перехвата немецких самолетов, снабжавших окруженную в Сталинграде армию Паулюса продовольствием и боеприпасами, а часть их весной 1943 г. участвовала в боях под Ленинградом. Полк самолетов «Пе-2», оборудованных станциями «Гнейс-2», участвовал в боях под Ригой, Львовом, Познанью и Вацлавом.

В специальном конструкторском бюро к концу 1942 г. был создан опытный образец станции ПНБ (прицел наведения бомбардировщиков) под руководством В. В. Мигулина и П. Н. Куксенко. По основным тактико-техническим характеристикам станция ПНБ, работающая на длине волны 1,5 м, была аналогична станции «Гнейс-2», а по некоторым превосходила ее, но серийный выпуск ПНБ во время войны не был осуществлен, т. к. генераторная импульсная лампа по типу Nt-99 была разработана в НИИ-160 в 1944 году.

Во время войны по мере развертывания радиоинститутов и заводов радиопромышленности после эвакуации значительно расширился объем работ в области радиолокации, но этого было еще недостаточно. Все шире разворачивалось применение радиолокации на различных участках советско-германского фронта. Особенно показательны были результаты использования радиолокации в битве за Москву, в противовоздушной обороне блокированного Ленинграда, в операциях Северного и Черноморского фронтов, в обеспечении безопасности проводки в Мурманск караванов транспортных судов в Северном и Баренцовом морях.

Расширение возможностей выпуска радиолокационной аппаратуры в количествах, необходимых для армии и флота, было крупной государственной задачей. Было решено привлечь к решению этой задачи, кроме радиоэлектронных предприятий Наркомата электротехнической промышленности (НКЭП), ряд заводов оборонных отраслей промышленности и создать правительственный орган управления с широкими полномочиями. Постановлением ГКО от 4 июля 1943 года был создан Совет по радиолокации. Председателем Совета был назначен член ГКО Г. М. Маленков. Заместителем председателя Совета был утвержден академик А. И. Берг, который осуществлял повседневное руководство деятельностью Совета, одновременно он был заместителем народного комиссара электропромышленности до октября 1944 г. Промышленным отделом по радиолокации руководил А. И. Шокин. Руководство развитием этой важной отрасли техники и осуществление необходимых мероприятий было сосредоточено в Совете по радиолокации.

Деятельность Совета расширилась после того, как в начале 1945 года в нем был создан научно-технический совет (НТС), главной задачей которого было определять научно-техническую политику в развитии радиолокации. Председателем НТС был назначен академик А. Н. Щукин.

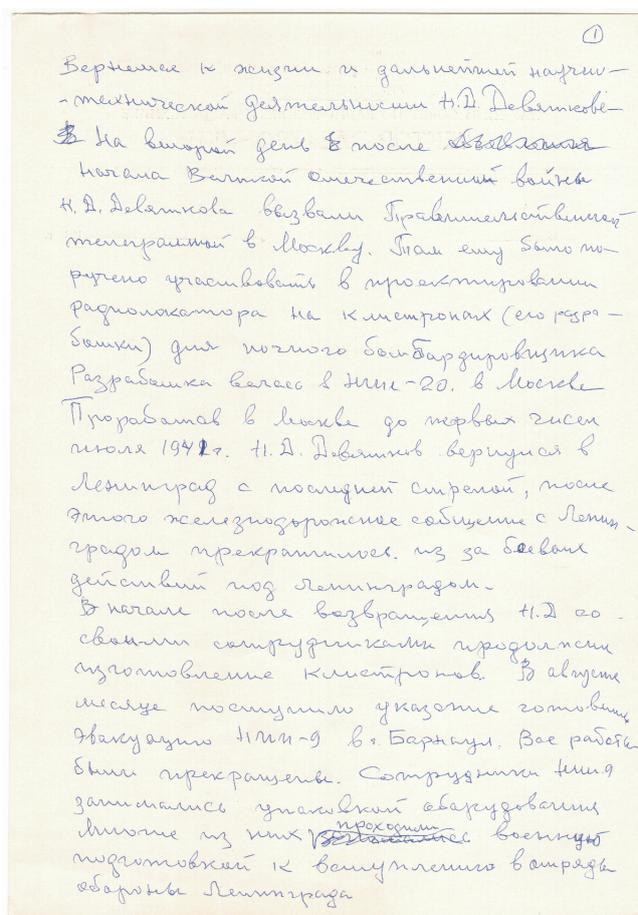
Развитие радиолокационной промышленности, начавшееся во время Великой Отечественной войны, бурными темпами продолжалось и в послевоенные годы. Успешное освоение новых диапазонов длин волн (дециметрового, сантиметрового и миллиметрового) на предприятиях электронной промышленности дало возможность создания весьма совершенной радиолокационной аппаратуры многоцелевого назначения».

Воспоминания Н. Д. Девяткова о его жизни и научно-технической деятельности в военное время приведем далее.

«На второй день после начала Великой Отечественной войны Н. Д. Девяткова вызвали Правительственной телеграммой в Москву. Там Николаю Дмитриевичу было поручено участвовать в проектировании радиолокатора для ночного бомбардировщика на клистронах его разработки. Разработка велась в НИИ-20. Проработав в Москве до первых чисел июля 1941 г., он вернулся в Ленинград с последней «стрелой». После этого железнодорожное сообщение с Ленинградом прекратилось из-за начала боевых действий под северной столицей. Вначале Николай Дмитриевич со своими сотрудниками продолжил изготовление клистронов. Однако уже в августе поступило указание готовить эвакуацию НИИ-9 в г. Барнаул. Все работы были прекращены. Сотрудники НИИ-9 занимались упаковкой оборудования. Многие из них проходили военную подготовку к вступлению в отряды обороны города. Но эвакуация НИИ-9 не была осуществлена – началась блокада Ленинграда. Большая часть сотрудников ушла в ополчение.

В конце октября Н. Д. Девяткова в составе группы инженеров из 4-х человек вызвали в Москву. В Правительстве обсуждался вопрос о создании в столице завода № 465 для разработки и выпуска радиолокационных станций орудийной наводки (СОН). Военная обстановка под Москвой была очень напряженная, решение о создании завода № 465 откладывалось и группу временно командировали в Свердловск для срочной разработки радиолитии связи на клистронах, которые удалось вывезти из Ленинграда. Эта линия должна была осуществлять направленную связь через Ладожское озеро. В течение ноября и декабря на территории спецлаборатории 4-го Управления НКВД, которая размещалась во дворе Свердловской тюрьмы, аппаратура линии связи была разработана и отправлена под Ленинград. В январе 1942 г. вся группа сотрудников была возвращена в Москву, а 10 февраля вышло Постановление Правительства об организации завода № 465. На заводе была создана большая электровакуумная лаборатория. Н. Д. Девятков был одним из руководителей этой лаборатории и главным конструктором импульсной генераторной лампы с торированным карбидированным катодом. Всего за 8 месяцев были созданы и отлажен выпуск примерно 30 типов электровакуумных приборов и усилительных радиоламп. Первые образцы СОН с этими приборами в ноябре 1942 г. прошли войсковые испытания и были применены во фронтовых условиях. После создания НИИ-160 Николай Дмитриевич вместе с электровакуумной лабораторией был переведен в этот институт.

После окончания войны он был командирован в г. Берлин для обследования подвалов Рейхстага, т. к. по данным разведки там было обнаружено какое-то радиопроизводство. Обследовав весь



Страница рукописи воспоминаний
Н. Д. Девяткова

Рейхстаг, подвалов обнаружить не удалось, но на остатках второго этажа Рейхстага были найдены стенды и валявшиеся на полу металлокерамические лампы. Это говорило о том, что все-таки производство их в этом районе существовало. С помощью разведчиков и опроса населения было установлено, что под Рейхстагом строилось до войны глубинное метро. Вход в него был найден на территории бывшего парка «Тиргартен», примыкавшего к Рейхстагу. Глубоко под землей, в помещениях строившейся станции метро «Рейхстаг» и было обнаружено производство металлокерамических ламп дециметрового диапазона длин волн, пальчиковых магнетронов и других приборов. Кроме того, там была найдена конструкторская и технологическая документация разных немецких фирм.

Пребывание Н. Д. Девяткова в Берлине затянулось на 3 года. Вернулся он во Фрязино только в мае 1948 года в чине майора. Столь длительная командировка была вызвана тем, что в июне 1945 г. в Берлин прибыла комиссия Совета по радиолокации под председательством капитана первого ранга А. И. Шокина. Целью работы комиссии было определение уровня немецкой науки и техники в области радиолокации и радиосвязи на конец войны. Находившийся тогда в Берлине Н. Д. Девятков был включен в состав этой комиссии. Проработав примерно полгода, комиссия собрала большое количество материалов, которые в дальнейшем обрабатывались в Москве. По результатам деятельности, комиссией было принято решение создать в Берлине совместно с немецкими учеными лабораторно-конструкторское бюро (ЛКБ) с опытным производством. Первая задача, поставленная перед ЛКБ, – восстановление технологии металлокерамических ламп. Николай Дмитриевич вместе с другими русскими специалистами стал работать в этом бюро. В 1946 г. он был назначен главным конструктором разработки металлических отражательных клистронов. В 1948 г. разработка клистронов в ЛКБ была закончена и передана в Ленинград на завод «Светлана», а Н. Д. Девятков вернулся во Фрязино и был назначен заместителем директора НИИ-160 по научной части».

4. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕТКИ

Приведу несколько не связанных между собой отдельной темой эпизодов из жизни Н. Д. Девяткова.

«Перед войной я жил в Ленинграде на улице Социалистической в доме № 9, в квартире № 9. Каждое утро я садился в трамвай № 9 и ехал на работу в лабораторию 9 «НИИ-9», – рассказывал Николай Дмитриевич.

Когда сотрудники «Истока» сделали открытие и создали лавинно-пролетный диод (ЛПД), открытием заинтересовались военные. Как рассказал мне один из создателей устройств на ЛПД Аркадий Дмитриевич Ходневич, в кабинете академика было устроено совещание, на котором военные настойчиво допытывались, как использовать ЛПД для обороны страны. «Да погодите Вы, – сказал Николай Дмитриевич, – ЛПД еще не успел родиться, а Вы уже натягиваете на него солдатские сапоги».

Как-то, в перерыве между защитами диссертаций, приезжие члены совета и оппоненты, среди которых были киевляне, вместе с академиком пошли обедать в «истоковскую» столовую. За обедом Николай Дмитриевич начал разговор не с обсуждения научных проблем, а о прошедшем накануне футбольном матче между чемпионом страны – киевским «Динамо» и французской командой «Монако», при этом он со знанием говорил о тонкостях футбольного мастерства игроков обеих команд.

Н. Д. Девятков активно пропагандировал народные средства медицины. В частности, он советовал от головокружения, связанного с остеохондрозом, использовать им проверенный метод:

закрывать глаза и носом в прямую и обратную стороны прочертить в воздухе числа от 0 до 9. Очень советовал по весне есть в сыром виде молодую крапиву, в которой содержится много кремния. «Этот элемент, – говорил он, – является лучшим средством профилактики от рака».

Особая признательность Н. Д. Девяткову от всех любителей спорта за то, что он был одним из инициаторов создания теннисного корта во Фрязино и активным игроком. Рассказывал, что в молодости он играл в теннис с директором института А. Ф. Иоффе. Об этом можно прочитать в статье, опубликованной в 1995 году в популярном спортивном журнале «Теннис+».

Хочу несколько слов уделить приемной Н. Д. Девяткова и его секретарю с многолетним стажем их совместной с академиком работы Кларе Васильевне Белоусовой. В приемной генерального директора «Истока» среди посетителей всегда чувствовалось некое напряжение, что, в общем-то, понятно. Иная обстановка царила в приемной академика. Сюда шли за советом, просьбой о помощи, зная, что Николай Дмитриевич внимательно выслушает и примет единственно верное решение. В его приемной всегда было много посетителей. Клара Васильевна, как и академик, обладала чувством юмора. Она любила в меру поговорить, любила и послушать. Знала, кого пустить вперед, а кого придержать, но в целом сохраняла живую очередь.

Я лишь однажды, когда академик уже редко приезжал на «Исток», но продолжал активно работать дома, в том числе и руководить диссертационным советом, был в московской квартире Н. Д. Девяткова. Посередине комнаты (зала) стоял большой стол, на котором на специальных подставках располагались различные приборы, преимущественно электровакуумные лампы СВЧ. Закончив дела совета, Николай Дмитриевич, как-то незаметно, перешел на рассказ об истории развития СВЧ-приборов, демонстрируя технические решения на размещенных на столе экспонатах. Захватывающий по простоте и красоте речи рассказ продолжался около двух часов. Прощаясь, Николай Дмитриевич подписал мне на память свою фотографию.

Увлекательный рассказ о работе А. Ф. Иоффе над полупроводниковой тематикой опубликован в книге «Воспоминания об А. Ф. Иоффе» (Ленинград, 1973 г.) его ближайшей сотрудницей по исследованию полупроводников физиком-экспериментатором, кандидатом сельскохозяйственных наук Еленой Дмитриевной Девятковой, старшей сестрой академика. Некоторое время Е. Д. Девяткова работала в организованном А. Ф. Иоффе Физико-агрономическом институте, где и подготовила диссертационную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Девятков, Н. Д. Воспоминания / Н. Д. Девятков. – М., 2000.
2. Девятков, Н. Д. Воспоминания / Н. Д. Девятков. – М., 1998.
3. Советская энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1985.

Статья поступила 21 августа 2017 г.



Бюст Н. Д. Девяткова на Аллее Героев Социалистического труда

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

статей, опубликованных в течение 2017 г. в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника»

I. История

1. *Балыко А.К.* – Наш академик (к 110-летию Николая Дмитриевича Девяткова). – Вып. 4 (535). – С. 79 – 91.
2. *Балыко И.А., Балыко А.К.* – Плотность распределения частиц в полупроводнике в условиях ударной ионизации. – Вып. 2 (533). – С. 110 – 119.
3. *Балыко А.К., Попов Р.М., Рожков В.В.* – Сергей Иванович Ребров – директор и человек. – Вып. 3 (534). – С. 69 – 82.
4. *Кузнецова Т.А., Алмазов-Долженко К.И.* – Взаимно обогащающий союз науки, производства и образования. – Вып. 3 (534). – С. 83 – 89.
5. *Покровский Е.Н.* – Останкинской телебашне 50 лет: лазер «Истока» на службе строителей (воспоминания участника работ). – Вып. 4 (535). – С. 74 – 78.
6. *Попов Р.М.* – Заграница нам поможет. – Вып. 2 (533). – С. 89 – 109.

II. Катоды и материалы

1. *Жабин Г.А., Пашков А.Н., Пелипец О.В.* – Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов. – Вып. 4 (535). – С. 15 – 21.
2. *Шестеркин В.И., Бессонов Д.А., Ерзов С.В., Мельников В.Д., Шалаев П.Д., Шумихин К.В., Косырев В.С.* – Исследование стойкости к механическим воздействиям острийных автоэмиссионных катодов из стеклоуглерода с большим аспектным отношением. – Вып. 1 (532). – С. 84 – 88.

III. Комплексируемые изделия и аппаратура

1. *Данилин Н.С., Потюпкин А.Ю., Волков С.А., Булаев И.Ю.* – Микроминиатюризация электронной компонентной базы на основе микросистем в корпусе СВЧ-диапазона для малых спутников. – Вып. 3 (534). – С. 28 – 33.

IV. Краткие сообщения

1. *Кяргинский Б.Е.* – Исследование микросхем в качестве широкополосных шумовых генераторов. – Вып. 3 (534). – С. 64 – 68.

V. Медицинская электроника

1. *Казаринов К.Д., Баранова О.А., Полников И.Г., Чеканов А.В.* – Изучение возможности применения наночастиц в радиочастотной онкотермии. – Вып. 1 (532). – С. 89–99.
2. *Казаринов К.Д., Тихонова Е.А., Солосин В.С.* – Конструкция волноводного устройства для измерения параметров жидкостей. – Вып. 2 (533). – С. 84 – 88.

VI. Радиоэлектронные устройства

1. *Гусинский А.В., Волковец А.И., Ланин В.Л., Свирид М.С., Кондрашов Д.А., Самонов В.Е., Гурский С.С., Булавко Д.Г., Дубновицкая Т.А.* – Особенности конструкции и технология сборки радиовысотомера миллиметрового диапазона. – Вып. 4 (535). – С. 22 – 27.

VII. Твердотельная электроника

1. *Баранов А.В.* – Частные и обобщенные эквивалентные трехточечные схемы СВЧ-автогенераторов. – Вып. 1 (532). – С. 18 – 25.
2. *Губарев В.Ф.* – СВЧ-генератор на активном элементе – ЧИП-усилителе. – Вып. 4 (535). – С. 44 – 53.
3. *Далингер А.Г., Малыщук В.М., Иовдальский В.А.* – Совершенствование структуры приёмопередающего модуля АФАР СВЧ-диапазона. – Вып. 2 (533). – С. 75 – 83.
4. *Иовдальский В.А.* – Новая парадигма развития техники ГИС СВЧ-диапазона. – Вып. 4 (535). – С. 54 – 64.
5. *Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Жерновенков В.А.* – Перспективный многофункциональный приемопередающий модуль АФАР X-диапазона. – Вып. 1 (532). – С. 45 – 48.
6. *Куликова И.В., Ланин В.Г., Лукашин В.М., Паиковский А.Б., Приступчик Н.К.* – Исследование тепловых режимов мощных полевых транзисторов с донорно-акцепторным легированием. – Вып. 3 (534). – С. 6 – 21.
7. *Ланин В.Г.* – Перспективы развития и применения ДА-рНЕМТ в СВЧ МИС. – Вып. 1 (532). – С. 26 – 44.
8. *Маковецкая А.А.* – Особенности рассеяния тепла в полевых транзисторах на гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием. – Вып. 1 (532). – С. 59 – 65.
9. *Приступчик Н.К., Куликова И.В., Легенкин С.А.* – Моделирование систем подогрева СВЧ-аппаратуры для Арктической зоны. – Вып. 1 (532). – С. 49 – 58.

10. Пчелин В.А., Лисицын А.А., Трезубов В.Б., Корчагин И.П., Манченко Л.В., Маковецкая А.А., Семенюк С.С. – Малогабаритные усилители с выходной мощностью не менее 0,5 и 6 Вт для АФАР Ки-диапазона. – Вып. 3 (534). – С. 22 – 27.

11. Темнов А.М., Дудинов К.В., Емельянов А.М., Воронин А.А., Катков Д.А., Рогачев И.А., Мешков О.И. – Новое поколение мощных усилительных ГМИС X-диапазона на алмазной плате и нитридгаллиевых транзисторах. – Вып. 2 (533). – С. 54 – 74.

VIII. Технология и материаловедение

1. Вашин С.А., Корепин Г.Ф. – Полевая десорбция поверхностных газов и электрическая прочность ЭВП. – Вып. 3 (534). – С. 56 – 63.

2. Лябин Н.А., Парамонов В.С., Парамонова Г.М., Клименко В.И., Колоколов И.С., Чурсин А.Д., Осотов О.В., Виноградов К.Ю., Бетина Л.Л., Лихачева И.Е., Трубачева Г.А. – Прецизионная микрообработка материалов ИЭТ на автоматизированных лазерных технологических установках «Каравелла». – Вып. 2 (533). – С. 12 – 21.

3. Ляпин Л.В., Осипов А.В., Далингер А.Г. – Низкотемпературная керамика в технологии изготовления многослойных керамических плат LTCC. – Вып. 4 (535). – С. 28 – 43.

4. Налогин А.Г., Пашков А.Н., Горбатюк С.М. – Получение макетов композиционного материала SiC–Al методом горячего прессования. – Вып. 2 (533). – С. 6 – 11.

5. Рогачёв И.А., Курочка А.С., Мешков О.И., Князьков А.В., Никитин Д.А., Зинкин С.Д., Верещагина А.С. – Использование капсулирования с целью сохранения морфологии омических контактов Ti/Al/Ni/Au на гетероструктурах AlGaIn/GaN. – Вып. 3 (534). – С. 50 – 55.

6. Семёнов М.Г., Першина Л.К., Подуваев В.А., Семенов А.С. – Современные тенденции развития полосковых ферритовых развязывающих приборов S- и X-диапазонов. – Вып. 1 (532). – С. 6 – 17.

IX. Экономика

1. Чекаданова М.В. – Принципы построения суверенной национальной инновационной системы РФ в части высокотехнологичных производств. – Вып. 4 (535). – С. 65 – 73.

X. Электровакуумные приборы

1. Вашин С.А., Корепин Г.Ф. – Компрессия по водороду в отпаянных ЭВП. – Вып. 2 (533). – С. 22 – 28.

2. Галдецкий А.В., Лопин М.И., Грицук Р.В., Рыжов В.А., Мишкин Т.А., Духина Н.Г., Закурдаев А.Д., Сапрынская Л.А. – Мощный электровакуумный усилитель метрового диапазона. – Вып. 2 (533). – С. 29 – 48.

3. *Жабин Г.А.* – Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах. – Вып. 2 (533). – С. 49 – 53.

4. *Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. Модель с автотрансформатором. – Вып. 1 (532). – С. 74 – 83.

5. *Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. LCR-модель с индуктивным проводником вывода. – Вып. 3 (534). – С. 41 – 49.

6. *Калина В.Г., Будзинский Ю.А., Быковский С.В.* – Циклотронное защитное устройство. Частотно-унитарная LCR-модель. – Вып. 4 (535). – С. 6 – 11.

7. *Пчелин В.А., Сазонов М.С.* – Малогабаритный волноводно-полосковый переход для мощных усилителей СВЧ. – Вып. 4 (535). – С. 12 – 14.

8. *Симонов К.Г., Мамонтов А.В., Алхименко Е.А., Батькова Т.А., Ключников Н.А., Перминов И.Г., Правдиковская Г.И.* – Инжекторы электронов для ускорителей. – Вып. 3 (534). – С. 34 – 40.

9. *Симонов К.Г., Правдиковская Г.И., Алхименко Е.А., Перминов И.Г., Ключников Н.А., Гришин С.И., Атюнина С.А., Неретина Т.А.* – Волноводные баночные СВЧ-окна нового типа для сверхмощных СВЧ-приборов и ускорителей. – Вып. 1 (532). – С. 66 – 73.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

авторов, опубликовавших свои работы в “СВЧ-технике” – первой серии научно-технического сборника “Электронная техника” в течение 2017 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.

- Алмазов-Долженко К.И. I.4
Алхименко Е.А. X.8, 9
Атюнина С.А. X.9
Балыко А.К. I.1-3
Балыко И.А. I.2
Баранов А.В. VII.1
Баранова О.А. VI.1
Батькова Т.А. X.8
Бессонов Д.А. II.2
Бетина Л.Л. VIII.2
Будзинский Ю.А. X.4 - 6
Булавко Д.Г. VI.1
Булаев И.Ю. III.1
Быковский С.В. X.4 - 6
Вашин С.А. VIII.1; X.1
Верещагина А.С. VIII.5
Виноградов К.Ю. VIII.2
Волков С.А. III.1
Волковец А.И. VI.1
Воронин А.А. VII.11
Галдецкий А.В. X.2
Горбатюк С.М. VIII.4
Гришук Р.В. X.2
Гришин С.И. X.9
Губарев В.Ф. VII.2
Гурский С.С. VI.1
Гусинский А.В. VI.1
Далингер А.Г. VII.3, 5; VIII.3
Данилин Н.С. III.1
Дубновицкая Т.А. VI.1
Дудинов К.В. VII.11
Духина Н.Г. X.2
Емельянов А.М. VII.11
Ерзов С.В. II.2
Жабин Г.А. II.1; X.3
Жерновенков В.А. VII.5
Закурдаев А.Д. X.2
Зинкин С.Д. VIII.5
Иовдальский В.А. VII.3, 4
Казаринов К.Д. VI.1, 2
Калина В.Г. X.4 - 6
Карасев М.С. VII.5
Катков Д.А. VII.11
Клименко В.И. VIII.2
Ключников Н.А. X.8, 9
Князьков А.В. VIII.5
Колоколов И.С. VIII.2
Кондрашов Д.А. VI.1
Корепин Г.Ф. VIII.1; X.1
Корчагин И.П. VII.10
Косырев В.С. II.2
Кузнецова Т.А. I.4
Куликова И.В. VII.6, 9
Курочка А.С. VIII.5
Кяргинский Б.Е. IV.1
Ланин В.Л. VI.1
Латин В.Г. VII.6, 7
Легенкин С.А. VII.9
Лисицын А.А. VII.10
Лихачева И.Е. VIII.2
Лотин М.И. X.2
Лукашин В.М. VII.6
Лябин Н.А. VIII.2
Ляпин Л.В. VIII.3
Маковецкая А.А. VII.8, 10
Мальщик В.М. VII.3
Мамонтов А.В. X.8
Манченко Л.В. VII.10

Мельников В.Д. II.2
Мешков О.И. VII.11; VIII.5
Мишкин Т.А. X.2
Налогин А.Г. VIII.4
Неретина Т.А. X.9
Никитин Д.А. VIII.5
Осипов А.В. VIII.3
Осотов О.В. VIII.2
Парамонов В.С. VIII.2
Парамонова Г.М. VIII.2
Пашков А.Н. II.1; VIII.4
Пашковский А.Б. VII.6
Пелипец О.В. II.1
Перминов И.Г. X.8, 9
Першина Л.К. VIII.6
Подуваев В.А. VIII.6
Покровский Е.Н. I.5
Полников И.Г. V.1
Попов Р.М. I.3, 6
Потюпкин А.Ю. III.1
Правдиковская Г.И. X.8, 9
Приступчик Н.К. VII.6, 9
Пчелин В.А. VII.10; X.7

Рогочев И.А. VII.11; VIII.5
Рожков В.В. I.3
Рыжов В.А. X.2
Сазонов М.С. X.7
Самонов В.Е. VI.1
Сапрынская Л.А. X.2
Свирид М.С. VI.1
Семенов А.С. VIII.6
Семенов М.Г. VIII.6
Семенюк С.С. VII.10
Симонов К.Г. X.8, 9
Солосин В.С. V.2
Темнов А.М. VII.11
Тихонова Е.А. V.2
Трегубов В.Б. VII.10
Трубачева Г.А. VIII.2
Чекаданова М.В. IX.1
Чеканов А.В. V.1
Чурсин А.Д. VIII.2
Шалаев П.Д. II.2
Шацкий С.В. VII.5
Шестеркин В.И. II.2
Шумихин К.В. II.2

**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 публикования (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 2018 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 7200 руб., включая НДС (18 %). Издается в цветном варианте.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС 77-24651 от 6 июня 2006 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание 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, АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОНТИ; тел./факс: (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 2018 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 15.12.2017 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
10 статей

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



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2017, вып. 4(535), с. 1-98

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»

