



ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 1 (565)

2025

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 1(565)

2025

Издается с 1950 г.

Главный редактор

д.т.н. А.А. Борисов

Редакционная коллегия:

к.т.н. **С.В. Щербаков** (зам. главного редактора);
к.т.н. **С.А. Зайцев** (зам. главного редактора);
к.ф.-м.н. **А.В. Галдецкий**; д.т.н. **В.М. Исаев**;
д.т.н. **П.В. Куприянов**; д.т.н. **Н.А. Лябин**;
д.ф.-м.н. **С.П. Морев**; д.ф.-м.н. **А.И. Панас**;
д.ф.-м.н. **А.Б. Пашковский**; д.т.н. **К.Г. Симонов**;
В.П. Стебунов (ответственный секретарь);
к.т.н. **С.Б. Александров**, АО «ГЗ «Пульсар», г. Москва;
д.т.н. **Л.И. Бабак**, ТУСУР, г. Томск;
д.т.н. **А.В. Баранов**, АО «НПП «Салют», г. Нижний Новгород;
д.т.н. **С.А. Гамкрелидзе**, ИСВЧПЭ РАН, г. Москва;
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «Микроволновые системы», г. Москва;
к.ф.-м.н. **В.И. Роговин**, АО «НПП «Алмаз», г. Саратов;
д.э.н. **М.В. Чекаданова**, ОЭЗ ТВТ «Исток», г. Фрязино;
к.т.н. **А.Ю. Ющенко**, АО «НИИПП», г. Томск

Учредитель: АО «НПП «Исток» им. Шокина».

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

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации сборник «Электронная техника», серия 1 «СВЧ-техника», издаваемый АО «НПП «Исток» им. Шокина» с 1950 года, включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук» (кварталь 2).

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2025

ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 1(565)

2025

Founded in 1950

Editor-in-chief

D.T.Sc. A.A. Borisov

Editorial staff:

C.T.Sc. **S.V. Scherbakov** (deputy editor-in-chief);
C.T.Sc. **S.A. Zaitsev** (deputy editor-in-chief);
C.Ph.M.Sc. **A.V. Galdetsky**; D.T.Sc. **V.M. Isaev**;
D.T.Sc. **P.V. Kupriyanov**; D.T.Sc. **N.A. Lyabin**;
D.Ph.M.Sc. **S.P. Morev**; D.Ph.M.Sc. **A.I. Panas**;
D.Ph.M.Sc. **A.B. Pashkovsky**; D.T.Sc. **K.G. Simonov**;
V.P. Stebunov (executive secretary);
C.T.Sc. **S.B. Alexandrov**, JSC «SP «Pulsar», Moscow;
D.T.Sc. **L.I. Babak**, TUSUR, Tomsk;
D.T.Sc. **A.V. Baranov**, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;
D.T.Sc. **S.A. Gamkrelidze**, IMWFSE RAS, Moscow;
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIIET», Voronezh;
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «Microwave systems», Moscow;
C.Ph.M.Sc. **V.I. Rogovin**, JSC «RPC Almaz», Saratov;
D.E.Sc. **M.V. Chekadanova**, SEZ TIT «Istok», Fryazino;
C.T.Sc. **A.Yu. Yuschenko**, JSC «NIIPP», Tomsk

Founder: JSC «RPC «Istok» named after Shokin».

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

By the Resolution of the Presidium of the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation the journal «Elektronnaya Tekhnika», series 1 «SVCH-tekhnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been included into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results nominated for candidate's thesis and doctoral thesis must be published» (quartile 2).

© JSC «RPC «Istok» named after Shokin», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Радиоэлектронные устройства

<i>Ильчук А.Р., Каргашин Ю.Д., Меркулов В.И., Чернов В.С.</i> – Градиентный алгоритм траекторного управления при наведении управляемых ракет «воздух-воздух» по методу параллельного сближения.....	6
<i>Щёголев С.А., Карасев М.С., Калита Д.В., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Адиатулин А.В., Кинденев Д.С.</i> – Приемопередающий модуль X-диапазона на отечественной ЭКБ для серийного производства.....	14

Технология и материаловедение

<i>Ларионов М.И., Иванова В.И., Корнилов И.Д.</i> – Оценка качества сырьевых материалов, используемых при синтезе ферритов.....	20
<i>Жабин Г.А., Шарапов Н.А., Есипова Т.М.</i> – Особенности напыления, состав и структура поверхности тонкопленочных катодов.....	30

Твердотельная электроника

<i>Фадеев К.К., Савельев Е.И.</i> – Разработка ферритового циркулятора с высоким уровнем мощности в дециметровом диапазоне.....	41
<i>Иовдальский В.А., Ганюшкина Н.В., Дудинов К.В., Фролов П.В., Сторин П.А.</i> – Улучшение конструкции усилителя мощности СВЧ-диапазона.....	50

Электровакуумные приборы

<i>Мелешкевич П.М.</i> – О токовой эрозии поверхности автоэмиссионных катодов.....	61
<i>Комаров Д.А., Юнаков А.Н., Мамонтов А.В., Евсеев С.В., Моисеев Д.С.</i> – Оптимальный клистрон	73
<i>Комаров Д.А., Юнаков А.Н., Мамонтов А.В., Евсеев С.В., Моисеев Д.С.</i> – Выходной кольцевой резонатор многолучевого клистрона с охватывающим пассивным звеном.....	81
<i>Тихонов Ю.С., Мирошниченко А.Ю., Царев В.А., Акафьева Н.А.</i> – Исследование двухззорного многоканального резонатора с дополнительным элементом в виде КППР и возможностью подавления высших мод.....	87

CONTENTS

Radioelectronic devices

- Ilchuk A.R., Kargashin Yu.D., Merkulov V.I., Chernov V.S.* – Gradient algorithm of trajectory control when aiming air-to-air guided missiles using the parallel approach method..... 6
- Shchegolev S.A., Karasev M.S., Kalita D.V., Dalinger A.G., Shatskiy S.V., Adiatulin A.V., Kindenov D.S.* – X-band transceiver module on domestic ECB for mass production..... 14

Technology and material science

- Larionov M.I., Ivanova V.I., Kornilov I.D.* – The quality assessment of the raw materials used in the synthesis of ferrites..... 20
- Zhabin G.A., Sharapov N.A., Esipova T.M.* – Deposition features, composition and surface structure of thin-film cathodes..... 30

Solid-state electronics

- Fadeev K.K., Savelyev E.I.* – The development of a ferrite circulator with a high power level in the decimeter range..... 41
- Iovdalskiy V.A., Ganyushkina N.V., Dudinov K.V., Frolov P.V., Storin P.A.* – Improving the design of a microwave power amplifier..... 50

Electrovacuum devices

- Meleshkevich P.M.* – On current erosion of the surface of auto-emission cathodes..... 61
- Komarov D.A., Yunakov A.N., Mamontov A.V., Yevseev S.V., Moiseev D.S.* – Optimal klystron..... 73
- Komarov D.A., Yunakov A.N., Mamontov A.V., Yevseev S.V., Moiseev D.S.* – Output ring resonator of a multiple-beam klystron with an enclosing passive contour..... 81
- Tikhonov Yu.S., Miroshnichenko A.Yu., Tsarev V.A., Akafyeva N.A.* – Research of a double-gap multichannel resonator with an additional element in the form of a CeSRR and the possibility of suppressing higher modes..... 87

РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.607

ГРАДИЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИ НАВЕДЕНИИ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ «ВОЗДУХ-ВОЗДУХ» ПО МЕТОДУ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СБЛИЖЕНИЯ

А. Р. Ильчук, Ю. Д. Каргашин, В. И. Меркулов, В. С. Чернов

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

Проблема высокоточного наведения управляемых ракет класса «воздух-воздух» является весьма актуальной и во многом определяется качеством функционирования применяемых на них радиоэлектронных систем радиоуправления. При наведении указанных типов управляемых ракет применяются различные методы самонаведения. К известным методам наведения относится метод параллельного сближения, для реализации которого разработаны различные способы и алгоритмы траекторного управления. Однако их практическое применение связано с определенными трудностями. Необходима разработка новых способов и алгоритмов траекторного управления, которые могут быть применены на управляемых ракетах «воздух-воздух» и обеспечить высокую точность наведения на воздушные объекты. Представлены результаты разработки градиентного способа и соответствующего алгоритма траекторного управления, обеспечивающего реализацию метода параллельного сближения. Полученные результаты могут быть полезны специалистам, занимающимся разработкой радиоэлектронных систем радиоуправления для управляемых ракет «воздух-воздух».

КС: метод параллельного сближения, градиентный алгоритм, промах, путевой угол

GRADIENT ALGORITHM OF TRAJECTORY CONTROL WHEN AIMING AIR-TO-AIR GUIDED MISSILES USING THE PARALLEL APPROACH METHOD

A. R. Ilchuk, Yu. D. Kargashin, V. I. Merkulov, V. S. Chernov

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

The problem of high-precision aiming air-to-air guided missiles is very urgent and is largely determined by the quality of the electronic radio control systems used on them. When aiming these types of guided missiles, various homing methods are used. The known methods of aiming include the parallel approach method, for which various methods and algorithms of trajectory control have been developed. However, their practical application is associated with certain difficulties. It is necessary to develop new methods and algorithms for trajectory control, that can be used on air-to-air guided missiles and ensure high accuracy of aiming aerial objects. The results of developing the gradient method and the corresponding trajectory control algorithm which ensure the implementation of the parallel approach method are presented. The results obtained may be useful for specialists involved in the development of electronic radio control systems for air-to-air guided missiles.

Keywords: parallel approach method, gradient algorithm, miss, track angle

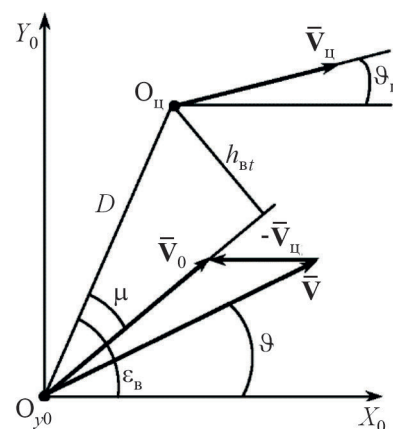
1. ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим особенности построения алгоритмов траекторного управления управляемых ракет (УР) при наведении их методом параллельного сближения.

Как известно [1], для систем самонаведения важным показателем точности является промах. Вполне резонно предположить, что промах УР будет обусловлен не только параметрами самой системы, но и условиями ее применения. Полагая, что каналы управления систем самонаведения в различных плоскостях являются идеальными и не влияют друг на друга, определим для вертикальной плоскости зависимость текущего промаха от условий наведения, определяемого мгновенными значениями координат относительного движения цели и УР.

На рисунке показано взаимное расположение объекта управления (управляемой ракеты) O_{y0} и цели $O_{ц}$ на текущий момент времени t в вертикальной плоскости в невращающейся системе координат $O_{y0}X_0Y_0$, связанной с центром массы управляемого объекта O_{y0} . На этом рисунке \vec{V} и $\vec{V}_{ц}$ – векторы скоростей объекта управления и цели; ϑ и $\vartheta_{ц}$ – путевые (земные) углы движения объекта управления и цели; $\varepsilon_{в}$ – угол визирования цели; $h_{вт}$ – текущий промах, определяемый как наименьшее расстояние между целью и объектом управления в плоскости рассеяния. Примем, что, начиная с рассматриваемого момента t , цель и объект управления движутся прямолинейно и с постоянной скоростью в направлении вектора относительной скорости $\vec{V}_0 = \vec{V} - \vec{V}_{ц}$. При этом наводимая УР пройдет от цели на минимальном расстоянии $h_{вт} = D \sin \mu$, где μ – угол между направлением относительного движения и линией визирования (ЛВ) на момент времени t , а D – расстояние между объектом управления и целью.

Геометрия взаимного расположения
объекта управления (управляемой ракеты) и цели



Из рисунка видно, что $\omega_{в} = \dot{\varepsilon}_{в} = V_0 \sin \mu / D$. Откуда $\sin \mu = D \omega_{в} / V_0$. Тогда

$$h_{вт} = D^2 \omega_{в} / V_0. \quad (1)$$

Аналогичное соотношение

$$h_{гт} = D^2 \omega_{г} / V_0 \quad (2)$$

можно получить и для горизонтальной плоскости. Если в качестве управляемого объекта используется ракета «воздух-воздух», то вместо вертикальной и горизонтальной плоскостей могут быть использованы ортогональные плоскости управления 1–1 и 2–2 с соответствующей заменой в (1) и (2) индексов «в» и «г» на индексы «1» и «2».

Очевидно, что конечный промах

$$h_{\text{fk}} = D_{\text{k}}^2 \omega_{\text{fk}} / V_{\text{ок}}, \quad (3)$$

определяемый дальностью D_k окончания управления, угловой скоростью ЛВ ω_{ik} ($i = г, в, 1, 2$) и относительной скоростью $V_{ок}$ на момент T окончания наведения, будет тем меньше, чем больше $V_{ок}$ и чем меньше D_k и ω_{ik} . В идеальном случае для попадания объекта управления в контур цели необходимо выполнять условие $\omega_i = \omega_{ik} = 0$, при этом в процессе наведения УР линия визирования ракета – цель будет перемещаться параллельно самой себе [1]. Для выполнения указанного условия ракета должна наводиться по методу параллельного сближения [1, 2], для реализации которого необходимо знание значения угловой скорости ЛВ.

В настоящее время известны четыре основных способа траекторного управления, разработанных для реализации метода параллельного сближения [2–7].

Угловой способ управления. При данном способе УР движется так, что линия, соединяющая цель и УР, перемещается параллельно ЛВ в момент пуска УР. При этом параметр рассогласования равен разности между текущим углом визирования и начальным углом, исходя из чего, способ условно называется угловым. Достоинством этого алгоритма является простота его практической реализации.

Проекционный способ управления. Проекционный способ основан на том положении, что для выполнения условия $\omega_i = \omega_{ik} = 0$ проекции скоростей цели и УР либо проекции расстояний между УР – точка перехвата и цель – точка перехвата на нормаль к ЛВ должны быть равны между собой.

Первым вариантом проекционного способа (равенство проекций скоростей) является алгоритм, приведенный в [2]. Для определения требуемого направления полета в [2] предварительно рассчитывается требуемое значение угла между ЛВ и вектором скорости ракеты, при котором обеспечивается равенство проекций скоростей ракеты и цели на перпендикуляр к ЛВ. При этом предполагается, что угловые положения и величины векторов цели и УР относительно ЛВ известны.

Описание второго варианта способа проекционного алгоритма приведено в [3], где получено уравнение для требуемого значения угла между ЛВ УР – цель и линией, соединяющей УР и точку встречи при идеальном наведении. Для этого использовано условие, что при идеальном наведении проекции расстояний, пройденных как целью, так и УР до точки перехвата, на ЛВ УР – цель должны быть равны. Для вычисления требуемого значения угла необходимо знание величин скоростей УР и цели, а также углового положения векторов скорости относительно ЛВ УР – цель.

Из изложенного выше следует, что для реализации проекционного алгоритма управления могут использоваться различные варианты формирования требуемого направления полета УР.

Способ управления с вычислением координат точки перехвата. Главный принцип предлагаемого в [4] способа параллельного сближения основан на том, что необходимо при известном векторе скорости и координатах цели, а также известных координатах УР и численном значении ее скорости найти такой курс и угол тангажа ракеты, которые бы обеспечивали самое короткое подлетное время до цели в точке перехвата (встречи). Для этого необходимо вычислить координаты точки встречи. Вычислить их можно, исходя из того, что отношение расстояний от ракеты до точки встречи и от цели до точки встречи обратно пропорционально отношению скоростей УР и цели.

При реализации предлагаемого способа управления находится время полета до точки встречи, затем определяются координаты точки встречи. По вычисленным координатам точки встречи можно найти необходимые для наведения УР курс и угол тангажа. Далее вычисляется численное значение углового рассогласования вектора скорости УР и ЛВ УР – точка встречи.

Модифицированный способ управления с выходом в точку перехвата на окружности Аполлония. Известен модифицированный вариант метода параллельного сближения [5, 6], обеспечивающий модификацию разработанного ранее [7] метода параллельного сближения, в котором осуществлялось управление вектором движения преследователя (управляемой ракеты) таким образом, чтобы направление векторов движения УР и цели пересекались в точках, принадлежащих окружностям Аполлония (окружность Аполлония – геометрическое место точек на плоскости, отношение расстояний от которых до двух заданных точек – величина постоянная, не равная единице). Координаты центра окружности и ее радиус вычисляются на основе оценок прямоугольных координат УР и цели и значений скоростей полета УР и цели. При сближении УР с целью величина радиуса окружности уменьшается, а положение ее центра изменяется. Точки окружности Аполлония показывают положение точек встречи при условии, что УР движется точно в точку встречи. Таким образом, в нашем случае окружность Аполлония – это место возможных встреч УР с целью [6].

Предлагаемая модификация основана на том, что УР, выбирая шаг на этапе итераций, будет стараться следовать прогнозируемым траекториям.

Как было показано выше, для реализации метода параллельного сближения требуется знание угловой скорости ЛВ, которую можно получать по результатам ее измерения в угломерном канале радиолокационной головки самонаведения (РГС). **Однако в реальных системах в некоторых случаях угловая скорость измеряется с большими погрешностями. В ситуации, когда в РГС оцениваются координаты и параметры движения цели и УР, а также параметры их относительного движения, можно воспользоваться вычислительной процедурой определения угловой скорости ЛВ.**

Далее в статье представлены результаты разработки градиентного способа и соответствующего ему алгоритма траекторного управления, обеспечивающего реализацию метода параллельного сближения.

2. ГРАДИЕНТНЫЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ

2.1. Общие сведения

о процедуре градиентного поиска минимума функции

Для наведения УР могут быть использованы градиентные методы, разработанные на основе градиентного метода минимизации целевой функции. Под градиентом функции $q(\mathbf{x})$, обозначаемым $\text{grad } q(\mathbf{x})$ или $\nabla q(\mathbf{x})$, понимают вектор, величина которого определяет скорость изменения функции $q(\mathbf{x})$, а направление совпадает с направлением наибольшего возрастания этой функции [8].

Вектор $-\nabla q(\mathbf{x})$, указывающий направление наибольшего убывания функции $q(\mathbf{x})$, называется антиградиентом функции $q(\mathbf{x})$.

Пусть n -мерный векторный аргумент $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ определяет состояние управляемого объекта. Тогда градиент функции будет представлять вектор-столбец вида

$$\nabla q(\mathbf{x}) = \text{grad } q(\mathbf{x}) = \left[\frac{\partial q(\mathbf{x})}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial q(\mathbf{x})}{\partial x_n} \right]^T.$$

Стратегия градиентного метода поиска минимума целевой функции представляет собой последовательность шагов, каждый из которых содержит две операции [8]:

1) определение направления наибольшей крутизны спуска, т. е. направления антиградиента функции $q(\mathbf{x})$;

2) перемещение в выбранном направлении на заданное расстояние.

Математически стратегия градиентного метода получается, если перемещение Δx_i на каждом шаге вдоль каждой из n осей будет пропорционально составляющей градиента $\frac{\partial q(\mathbf{x})}{\partial x_i}$ в направлении этой оси: $\Delta x_i = -\gamma \frac{\partial q(\mathbf{x})}{\partial x_i}$, $i = \overline{1, n}$, где γ – коэффициент, определяющий «вес» градиента в процедуре оптимизации.

При этом поправка на k -м шаге решения задачи может быть представлена в виде

$$\Delta x_i = -\gamma \nabla q(\mathbf{x}(k)). \quad (4)$$

При достижении минимума целевой функции градиент ∇q будет равен нулю и поиск минимума автоматически заканчивается.

2.2. Разработка градиентного алгоритма управления

Конкретизация постановки задачи нахождения оптимального управления применительно к наведению УР методом параллельного сближения связана с выбором целевой функции. При этом градиентный метод предполагает использование целевой функции, имеющей минимум. Непосредственно использовать в качестве целевой функции угловую скорость ω_1 ЛВ, которая зависит от путевого угла ϑ_{p1} , не представляется возможным, так как она не имеет точки минимума и изменяет свой знак при переходе через нулевое значение.

Поэтому для определения величины и направления шага перемещения в качестве целевой функции воспользуемся значением модуля $|\omega_1|$ угловой скорости ЛВ ω_1 , которое может быть получено в результате умножения коэффициента -1 на угловую скорость ω_1 при ее отрицательном значении и на $+1$ при ее положительном значении. Градиент целевой функции $|\omega_1|$ в данном случае представляет собой производную величины ω_1 по путевому углу при ее положительном значении и производную величины $(-\omega_1)$ при отрицательном значении ω_1 .

Для определения производной используем аналитическое выражение для угловой скорости ω_1 ЛВ УР – цель, где ε_1 – угол визирования цели в плоскости управления; $\vartheta_{ц1}$ и ϑ_{p1} – путевые углы движения цели и ракеты в этой плоскости; $V_{ц}$ и V_p – скорости полета цели и ракеты:

$$D_1 \omega_1 = (V_p - V_{ц}) \varepsilon_1 + V_{ц} \vartheta_{ц1} - V_p \vartheta_{p1}, \quad (5)$$

особенностью которого является зависимость ω_1 от углов ϑ_{p1} и ε_1 . Наведение УР путем изменения угла ϑ_{p1} приводит одновременно к изменению угловой скорости ω_1 и угла визирования цели ε_1 . В то же время скорости изменения этих величин значительно отличаются. Поэтому при нахождении требуемого шага изменения угла ϑ_{p1} зависимостью изменения ω_1 от изменения угла ε_1 на шаге перемещения можно пренебречь, так как временная продолжительность шага перемещения достаточно мала. В этом случае производная угловой скорости равна

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial \vartheta_{p1}} = -\frac{V_p}{D}. \quad (6)$$

Направление шага перемещения находится на основе нормированной величины $\omega_1/|\omega_1|$, где $|\omega_1|$ – модуль угловой скорости ЛВ. Эта величина принимает значение $+1$ или -1 в зависимости

от полярности угловой скорости ω_1 ЛВ, т. е. в зависимости от положительного или отрицательного значения ω_1 . Отсюда следует, что при положительных и отрицательных значениях угловой скорости ω_1 поиск требуемого путевого угла $\vartheta_{\text{плт}}$ будет осуществляться в противоположных направлениях. Градиент модуля угловой скорости определяется формулой

$$\nabla \omega_1(\vartheta_{\text{пл}}) = -\frac{V_p \omega_1}{D |\omega_1|}.$$

Конечная (результатирующая) формула вычисления значения шага перемещения для итерационного градиентного алгоритма имеет вид

$$\Delta \vartheta_{\text{пл}} = -\gamma \nabla \omega_1(\vartheta_{\text{пл}}) = \gamma \frac{\omega_1 V_p}{|\omega_1| D}. \quad (7)$$

После определения величины и направления шага перемещения его значение суммируется с предыдущим значением требуемого путевого угла полета ракеты. Полученный результат используется для формирования параметра рассогласования, представляющего собой разность требуемого $\vartheta_{\text{плт}}$ и фактического $\vartheta_{\text{пл}}$ путевых углов движения ракеты.

При равенстве угловой скорости ω_1 нулю, когда фактический и требуемый путевые углы равны между собой, процесс нахождения требуемого угла $\vartheta_{\text{плт}}$ должен быть приостановлен.

При изменении тактической ситуации, например при изменении путевого угла цели $\vartheta_{\text{цл}}$, угловая скорость ω_1 станет отличаться от нуля. В этом случае вновь начинается процесс поиска требуемого значения путевого угла $\vartheta_{\text{плт}}$ ракеты.

Таким образом, использование итерационного алгоритма (7) формирования шага перемещения позволяет реализовать на практике наведение УР методом параллельного сближения с целью. Данный алгоритм задает движение с шагом перемещения, величина которого определяется текущими значениями скорости полета ракеты, дальности до цели и направления вращения ЛВ.

Наряду с рассмотренным выше градиентным алгоритмом управления (7) может быть предложен еще один вариант реализации градиентного алгоритма траекторного управления ракетой.

Идея разработки такого алгоритма основана на том факте, что в процессе формирования численного значения поправки на каждом k -м шаге решения задачи оптимизации, по существу, находитесь требуемая скорость изменения путевого угла $\dot{\vartheta}_{\text{пл}}$ движения ракеты.

В то же время известно [1], что нормальное ускорение ракеты определяется соотношением $\dot{j}_{\text{пл}} = V_p \dot{\vartheta}_{\text{пл}}$.

Отсюда следует, что изменение угла $\vartheta_{\text{пл}}$ может быть достигнуто за счет управления ускорением ракеты. При выборе в качестве производной путевого угла ракеты значения, соответствующего алгоритму (7) определения шага перемещения, требуемое значение ускорения УР имеет вид

$$\dot{j}_{\text{плт}} = \gamma_0 \frac{\omega_1 V_p^2}{|\omega_1| D},$$

где γ_0 – коэффициент, определяющий «вес» градиента в процедуре оптимизации.

Соответственно параметр рассогласования определяется как разность требуемого и фактического значений ускорения ракеты: $\Delta_1 = \dot{j}_{\text{плт}} - \dot{j}_{\text{пл}}$.

Отличие данного алгоритма траекторного управления от достаточно часто применяемого на практике алгоритма, соответствующего методу пропорционального наведения [1], состоит в том, что в нем используются такие фазовые координаты, как скорость полета ракеты V_p , дальность D до цели и отношение $\omega_1/|\omega_1|$.

2.3. Градиентный алгоритм при нелинейном кинематическом уравнении

Следует отметить, что выше при разработке алгоритмов траекторного управления использовалось выражение для угловой скорости ЛВ ω_1 , соответствующей малой (небольшой) разности углов визирования и ориентации вектора скорости объекта управления. Для ситуаций с повышенной (относительно большой) разностью этих углов могут быть разработаны (предложены) градиентные алгоритмы траекторного управления, в которых при нахождении градиента целевой функции используется (выбирается) выражение угловой скорости ЛВ ω_1 , полученное на основе нелинейного кинематического уравнения. В этом случае значение градиента целевой функции дополнительно будет зависеть также от косинуса разности углов визирования и ориентации вектора скорости объекта управления:

$$\nabla \omega_1(\vartheta_{p1}) = -\frac{V_p}{D} V_p \cos(\varepsilon_1 - \vartheta_{p1}) \frac{\omega_1}{|\omega_1|}.$$

В заключение заметим, что основным отличием градиентного способа перехвата объекта преследования по сравнению с известными является отсутствие необходимости знания значений модуля и углового положения (ориентации) вектора скорости цели. Поэтому данный способ преследования может применяться в случае, когда в процессе наведения по какой-либо причине не удастся сформировать точные оценки указанных параметров движения цели.

2.4. Требуемая информация для наведения методом параллельного сближения

Из выражения (7) следует, что для наведения методом параллельного сближения необходима информация о скорости ракеты, угловой скорости ЛВ и дальности до цели. Необходимая информация может быть получена двумя способами.

Первый способ предполагает непосредственное измерение угловой скорости ЛВ ω_1 и дальности до цели D с помощью РГС ракеты, а измерение скорости V_{p1} выполняется соответствующим датчиком (акселерометром) ракеты. При втором способе угловая скорость ЛВ ω_1 может рассчитываться с использованием кинематического уравнения (5). Для этого необходима дополнительная информация об угловом положении ЛВ ε_1 , путевом угле ракеты ν_{p1} , а также сведения о скорости $V_{ц1}$ и путевом угле цели $\nu_{ц1}$. Угол ε_1 измеряется угломерным каналом РГС, а путевой угол ракеты ν_{p1} специальным датчиком, установленным на ракете. Сведения о скорости $V_{ц1}$ и путевом угле цели $\nu_{ц1}$ могут быть получены путем использования известных процедур оценивания абсолютных и относительных координат и параметров движения цели, приведенных, например, в [9].

3. ВЫВОДЫ

В настоящее время известны следующие способы траекторного управления, обеспечивающие наведение по методу параллельного сближения: угловой способ управления, проекционный способ управления, способ управления с вычислением координат точки перехвата, модифицированный способ управления с выходом в точку перехвата, находящуюся на окружности Аполлония. В статье предложены, а также разработаны градиентные алгоритмы управления. Градиентные

алгоритмы позволяют находить величину и направление изменения путевого угла на каждом шаге решения задачи минимизации угловой скорости ЛВ либо требуемую величину ускорения УР.

Для реализации известных алгоритмов траекторного управления при наведении методом параллельного сближения необходимо знание соответствующих оценок координат и параметров движения УР и цели, в частности прямоугольных координат УР и цели, векторов их движения, а также дальности до цели, углового положения и угловой скорости ЛВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авиационные системы радиоправления: учебник для военных и гражданских вузов и научно-исследовательских организаций* / В. И. Меркулов, В. С. Чернов, В. А. Гандурин [и др.]; под ред. В.И. Меркулова. – М.: Изд. ВВИА им. проф. Жуковского, 2008. – 423 с.
2. **Паньков, С. Я.** Теория и методика управления авиацией: учеб. пособие. В 2-х частях. Ч. 1 / С. Я. Паньков, Ю. Е. Забураев, А. М. Матвеев; под общ. ред. В.А. Мещерякова. – Ульяновск: УВАУТА, 2006. – 190 с.
3. *Радиоправление реактивными снарядами и космическими аппаратами* / Л. С. Гуткин, Ю. Б. Борисов, А. А. Валуев [и др.]; под ред. проф. Л. М. Гуткина. – М.: Советское радио, 1968. – 680 с.
4. **Соловатов, И. А.** Выбор метода перехвата маневренных и высокоскоростных целей / И. А. Соловатов, Н. В. Митюков // *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*. – 2022. – № 2. – С. 58 – 66.
5. **Дубанов, А. А.** Кинематические модели задачи преследования на плоскости методами параллельного сближения и погони / А. А. Дубанов, В. А. Нефедова // *Информация и ее применение*. – 2022. – Т. 16, вып. 3. – С. 103 – 109.
6. **Дубанов, А. А.** Моделирование методов погони и параллельного сближения в задачах преследования на плоскости и поверхности: монография / А. А. Дубанов. – М.: РУСАЙНС, 2023. – 226 с.
7. **Петросян, В. А.** Преследование на плоскости / В. А. Петросян, Б. Б. Рихенев. – М.: Наука, 1991. – 96 с.
8. *Угломерные двухпозиционные пассивные системы радиомониторинга воздушного базирования. Методы и алгоритмы оценивания и управления: монография* / В. С. Чернов, В. С. Верба, В. И. Меркулов [и др.]; под ред. В. С. Верба. – М.: Радиотехника, 2022. – 232 с.
9. *Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч. 3* / В. С. Верба, В. И. Меркулов, В. В. Дрогалин [и др.]; под ред. В. С. Вербы и В. И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2010. – 472 с.

Статья поступила 16 октября 2024 г.

УДК 623.482

ПРИЕМОПЕРЕДАЮЩИЙ МОДУЛЬ X-ДИАПАЗОНА НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭКБ ДЛЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С. А. Щёголев, М. С. Карасев, Д. В. Калита, А. Г. Далингер,
С. В. Шацкий, А. В. Адиатулин, Д. С. Кинденов

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

Разработан и изготовлен в АО «НПП «Исток» им. Шокина» приемопередающий модуль с использованием только отечественной ЭКБ. Описаны основные конструктивно-технологические особенности и полученные электрические характеристики. Проведен анализ результатов разработки.

КС: приемопередающий модуль, X-диапазон, экспериментальная проверка, анализ электрических параметров

X-BAND TRANSCEIVER MODULE ON DOMESTIC ECB FOR MASS PRODUCTION

S. A. Shchegolev, M. S. Karasev, D. V. Kalita, A. G. Dalinger,
S. V. Shatskiy, A. V. Adiatulin, D. S. Kindenov

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

A transceiver module using only domestic electronic component base (ECB) was developed and manufactured in JSC «RPC «Istok» named after Shokin». The main design and technological features and the obtained electrical characteristics are described. The analysis of the development results is carried out.

Keywords: transceiver module, X-band, experimental check, analysis of electric parameters

1. ВВЕДЕНИЕ

Одно из наиболее перспективных направлений в современной микроволновой электронике – твердотельные приемопередающие модули (ППМ) для радиолокационных систем (РЛС) [1, 2]. Современные РЛС способны отвечать высоким требованиям, таким, как многофункциональность, высокая дальность обнаружения объектов и разрешающая способность, устойчивость к всевозможным помехам. Такого рода системы состоят из приемных и передающих модулей или многоканальных систем, предназначенных для приема радиосигналов, а также формирования и усиления радиосигналов с целью дальнейшего излучения в эфир. Чтобы соответствовать возрастающим требованиям к таким системам, необходимо постоянное улучшение тактико-технических характеристик применяемых ППМ [1, 2]. При этом важно учитывать необходимость импортозамещения, снижения массы и габаритов разрабатываемых устройств, а также уменьшения их общей стоимости. Разработка модулей на основе отечественных компонентов, способных конкурировать с зарубежными аналогами, является сложной и чрезвычайно важной задачей для российской микроволновой электроники.

В данной работе представлен разработанный и изготовленный в АО «НПП «Исток» им. Шокина» ППМ с использованием только отечественной ЭКБ, а также описаны его основ-

ные конструктивно-технологические особенности и полученные электрические параметры в ходе экспериментальной проверки.

2. КОНСТРУКЦИЯ ППМ X-ДИАПАЗОНА

Конструкция ППМ представлена на рис. 1.

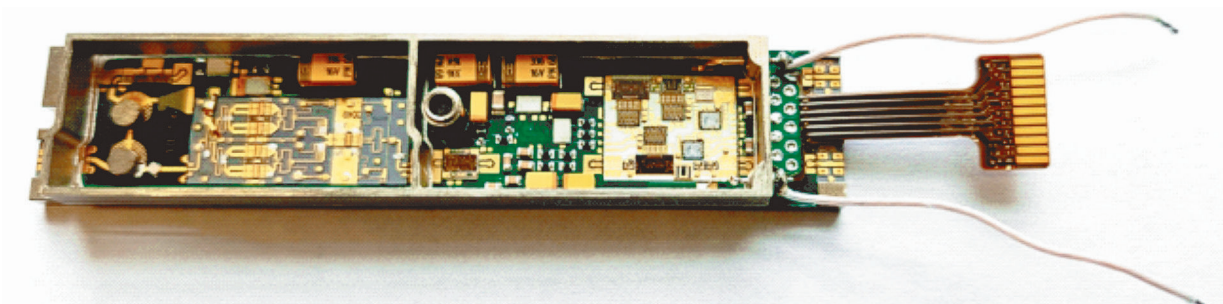


Рис. 1. Конструкция ППМ X-диапазона

С целью обеспечения стабильных серийных поставок, а также снижения общей стоимости изделия, в составе конструкции модуля были применены монолитные интегральные схемы (МИС) низкой степени интеграции. Использование таких МИС позволило разработать узел «Векторный модулятор», который включает в себя усилительные каскады, набор управляемых аттенюаторов и фазовращателей производства АО «НПП «Исток» им. Шокина», а также элементы управления, такие, как преобразователи последовательного кода в параллельный производства АО «НИИМЭ» и преобразователи уровня производства АО «КТЦ «Электроника». Внешний вид узла «Векторный модулятор» представлен на рис. 2.

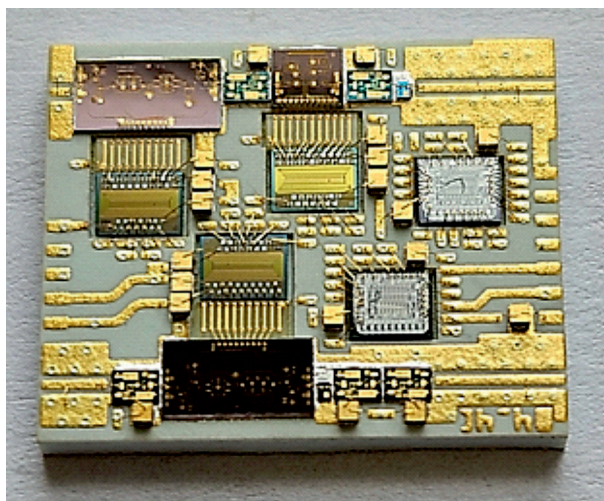


Рис. 2. Внешний вид узла «Векторный модулятор»

Используемые МИС, выполняющие функцию диаграммообразования, и вышеупомянутые элементы управления размещены на низкотемпературной совместно обжигаемой керамике (*LTCC, low temperature co-fired ceramic*) производства АО «НПП «Исток» им. Шокина». Вследствие того, что «Векторный модулятор» изготавливается в виде отдельного функционального узла, установка

МИС и выполнение операции разварки соединительных перемычек производится полностью в автоматическом режиме при помощи специализированного оборудования.

Одной из особенностей модуля является использование в составе конструкции многослойной печатной платы (МПП) из материала FR-4 производства компании АО «Резонит». МПП показана на рис. 3.

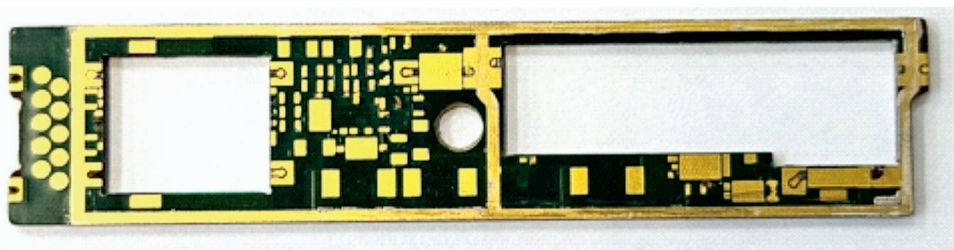


Рис. 3. Внешний вид МПП

МПП была специально разработана под особенности применения ППМ в составе аппаратуры заказчика и имеет выборки под мощный выходной усилитель, Х-циркулятор, векторный модулятор, а также отверстие под установку металлической втулки для сквозного крепления ППМ к теплоотводящей плите. Основными преимуществами применения материала FR-4 в конструкции ППМ являются низкая стоимость изготовления платы, стабильная повторяемость геометрических размеров, высокое качество пайки низкочастотных элементов, надежное соединение СВЧ-компонентов ППМ.

В своем составе ППМ имеет встроенный модулятор питания и управления согласующими усилителями приемного канала и выходными усилителями передающего канала. Модулятор изготовлен полностью на отечественной ЭКБ с применением функциональных элементов производства АО «ВЗПП-С». Наличие такого встроенного модулятора питания позволяет исключить влияние нежелательных «наводок» по цепи питания и управления, а также не допустить одновременного включения приемного и передающего каналов даже если импульсы управления питанием функциональных узлов подаются одновременно.

Основные детали корпуса ППМ выполнены из сплава Д16Т. Внешний вид металлического основания, крышки и рамки ППМ показан на рис. 4.



Рис. 4. Металлическое основание ППМ

Применение материала Д16Т обеспечивает минимальную массу таких деталей, эффективный теплоотвод от функциональных узлов ППМ и необходимую прочность конструкции. Для соединения вышеописанных элементов конструкции применяется клей марки ЭЧЭ-С. Применение такого клея позволяет добиться высокой степени радиогерметичности изделия, обеспечить прочностные характеристики соединения деталей, высокие теплопроводность и электропроводимость.

Подача питания и управление основными функциональными узлами осуществляются через гибкую печатную плату (ГПП) производства компании АО «Резонит». ГПП имеет толщину 0,3 мм и 11 проводников. Внешний вид ГПП приведен на рис. 5.

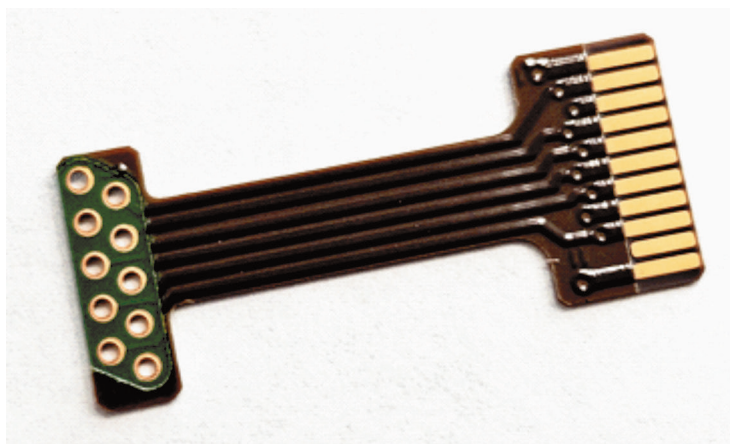


Рис. 5. Гибкая печатная плата ППМ

Такой подход позволил снизить трудоемкость подключения ППМ к аппаратуре заказчика, исключив тем самым большое количество проводов.

Напряжение питания предварительного и выходного мощного усилителя подается через герметичные вводы, впаянные в рамку ППМ. Такое конструктивное решение позволило использовать провод типа МГТФ 1×0,2, тем самым снизив потери напряжения питания усилителей, что в значительной степени влияет на уровень выходной мощности ППМ.

Выходной мощный усилитель изготовлен на ЭКБ производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» и включает в себя пять транзисторов типа «Принц 4-70», выполненных по GaAs-технологии. Внешний вид выходного мощного усилителя приведен на рис. 6.

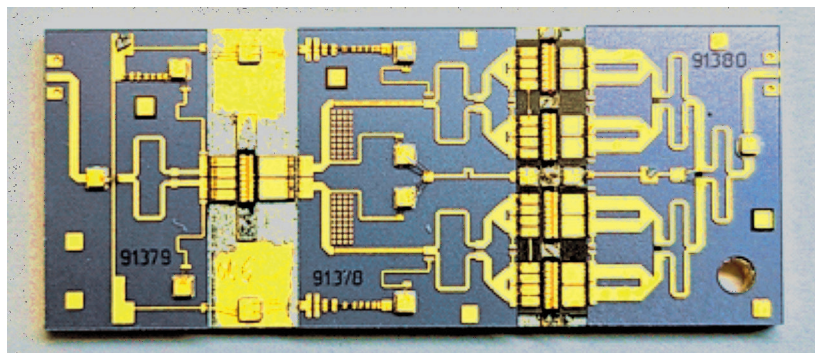


Рис. 6. Выходной мощный усилитель передающего канала ППМ

Применения данного мощного усилителя позволило достичь уровня выходной мощности передающего канала более 13 Вт.

Примененные современные конструктивно-технологические решения мирового уровня позволили существенно снизить массогабаритные характеристики ППМ по сравнению с имеющимися аналогами на российском и зарубежном рынках, повысить надежность изделия в це-

лом, а также уменьшить затраты на ЭКБ и производство модуля за счет автоматизации технологических процессов. Использование МИС СВЧ низкой степени интеграции производства АО «НПП «Исток» им. Шокина» в составе ППМ обеспечило высокую мощность на выходе передающего тракта, минимальное значение коэффициента шума приемного тракта, стабильность коэффициента усиления, минимальную среднеквадратичную ошибку амплитуды и фазы как передаваемого, так и принимаемого сигналов.

В результате работы были изготовлены опытные образцы ППМ и получены измеренные значения коэффициента усиления и коэффициента шума приемного канала, а также выходной мощности передающего канала. Полученные результаты экспериментальной проверки ППМ изображены на рис. 7...9.

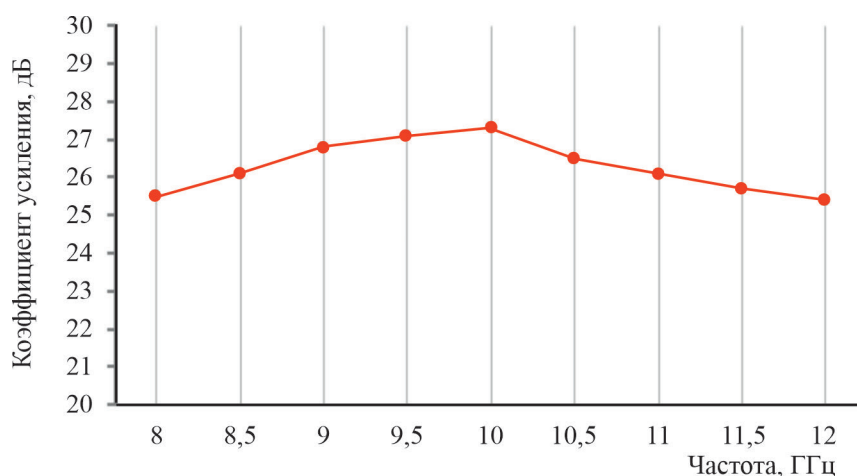


Рис. 7. Коэффициент усиления приемного канала
в зависимости от частоты

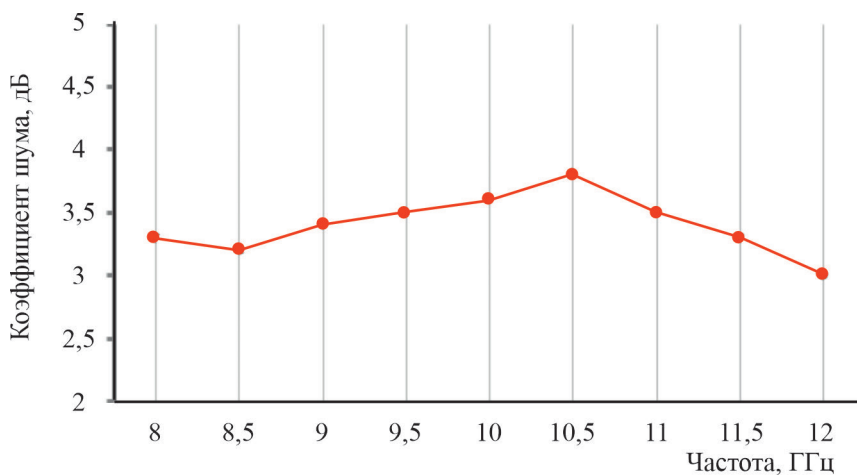


Рис. 8. Коэффициент шума приемного канала
в зависимости от частоты

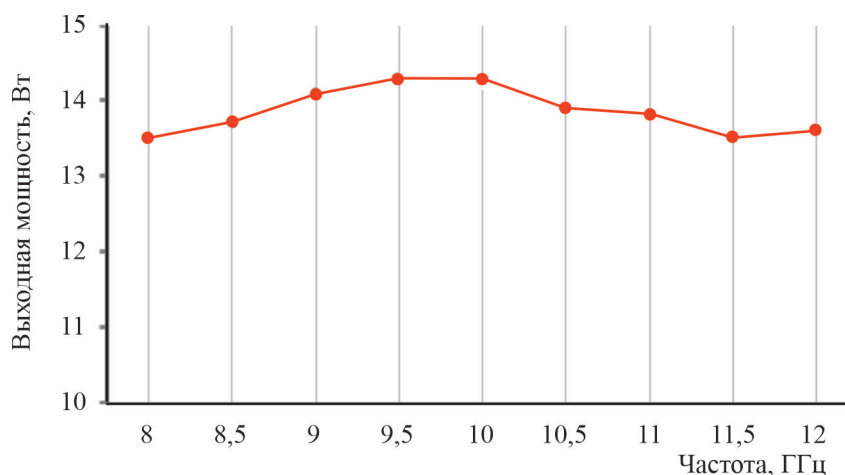


Рис. 9. Выходная мощность передающего канала
в зависимости от частоты

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментальной проверки разработанного ППМ X-диапазона частот подтверждают правильность принятых решений при разработке. Полученные измеренные электрические характеристики ППМ, изготовленного с использованием только отечественной ЭКБ, сопоставимы с показателями ведущих мировых производителей ППМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многофункциональный приемопередающий модуль X-диапазона частот / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3 (542). – С. 51 – 54.
2. Карасев, М. С. Методика измерений параметров перспективных ППМ АФАР с применением поверхностного контактного соединителя / М. С. Карасев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 4 (531). – С. 37 – 44.

Статья поступила 7 октября 2024 г.

УДК 621.315:621.318

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЗУЕМЫХ ПРИ СИНТЕЗЕ ФЕРРИТОВ

М. И. Ларионов, В. И. Иванова, И. Д. Корнилов

АО «НИИ «Феррит-Домен», г. Санкт-Петербург

Рассматривается возможность применения статистического и корреляционного анализов для оценки качества поступающих сырьевых материалов, а также взаимосвязи между свойствами сырья и электромагнитными параметрами изделий.

КС: феррит, синтез, сырьевой материал, качество, статистический анализ, корреляционный анализ

THE QUALITY ASSESSMENT OF THE RAW MATERIALS USED IN THE SYNTHESIS OF FERRITES

M. I. Larionov, V. I. Ivanova, I. D. Kornilov

JSC «Research Institute «Ferrite-Domen», Saint-Petersburg

The possibility of using statistical and correlation analyses to assess the quality of incoming raw materials as well as the interconnection between the properties of raw materials and electromagnetic parameters of products is being considered.

Keywords: ferrite, synthesis, raw material, quality, statistical analysis, correlation analysis

1. ВВЕДЕНИЕ

Ферриты – это неорганические соединения оксида железа (III) Fe_2O_3 с оксидами других металлов, обладающие магнитными свойствами. Формально ферриты можно рассмотреть как соли несуществующей железистой кислоты. Общая формула ферритов $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{Me}_k\text{O}_l$, где Me_kO_l – оксид металла.

Существуют разные типы ферритов, но наибольший интерес в промышленности имеют следующие [1]:

- 1) феррошпинели – ферриты со структурой минерала шпинели с общей формулой $\text{Me}_n\text{Fe}_2\text{O}_4$, где Me – ион двухвалентного или одновалентного металла;
- 2) феррогранаты – ферриты со структурой минерала граната с общей формулой $\text{Me}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, где Me – ион редкоземельного элемента;
- 3) гексаферриты – ферриты со структурой минерала магнетоплюмбита с общей формулой $[(\text{Me}_1 + \text{Me}_2)^{k+}\text{O}^{2-}_k]_{m/2}$, где Me_1 – Ba, Sr, Pb; Me_2 – Mn, Fe, Ni, Co, Zn и Mg;
- 4) ортоферриты – ферриты со структурой перовскита с общей формулой MeFeO_3 , где Me – ион редкоземельного элемента.

В производстве ферритовые порошки получают в результате твердофазного синтеза (керамическая технология). Предварительно исходные компоненты, взятые в определённом мольном соотношении, смешивают, а затем смесь подвергают высокотемпературному обжигу (ферритизации). Спёк после ферритизации измельчают. Полученный таким образом порошок (шихта) обладает рядом характеристик, таких, как элементный состав, фазовый состав, гранулометрический состав, форма частиц, концентрация поверхностных групп и дефектов, которые напрямую влияют на электромагнитные параметры готовых изделий. На свойства шихты помимо технологических режимов в первую очередь оказывают влияние параметры исходных сырьевых материалов.

В качестве сырья для твердофазного синтеза ферритов используют оксиды и карбонаты. К исходным материалам предъявляется ряд требований, с помощью которых определяется их пригодность. К таким требованиям можно отнести: содержание основного вещества, концентрация примесей, фазовый состав, гранулометрический состав, концентрация поверхностных групп и дефектов. Остановимся кратко на характеристиках сырьевых материалов.

Содержание основного вещества. Для синтеза ферритов используют исходные соединения с максимально возможным содержанием основного вещества. Сырьё должно быть квалификации не ниже «Ч». Для определённых марок ферритов используется сырьё не ниже квалификации «ОСЧ».

Концентрация примесей. Содержание примесей в сырье должно удовлетворять требованиям соответствующих ГОСТов или ТУ. Примеси могут оказывать значительное влияние на свойства ферритовой шихты и изделий на её основе. С одной стороны, ряд примесей может ухудшать электромагнитные параметры готовых изделий. С другой стороны, определённые примеси влияют на концентрацию дефектов кристаллической решётки того или иного оксида, что может положительно отразиться на свойствах ферритовой шихты [1].

Фазовый состав. То или иное соединение может иметь разное строение кристаллической решётки при сохранении химического состава (полиморфизм). Например, оксид титана (IV) имеет три модификации: рутил, анатаз, брукит. Каждая из кристаллических модификаций обладает различной химической активностью, что непосредственно влияет на свойства ферритовой шихты.

Гранулометрический состав, концентрация поверхностных групп и дефектов. Данную группу свойств можно объединить под общим названием «химическая активность». Химическая активность исходных компонентов определяет, в каком температурном интервале проходит процесс ферритизации, влияет на степень ферритизации (содержание феррита в шихте) и на химическую активность ферритовой шихты.

Свойства поступаемого сырья могут варьироваться от «партии к партии», от «мешка к мешку» и даже от «уровня к уровню». Такое различие обуславливается технологическими особенностями получения того или иного соединения или нарушения заданного технологического режима. Кроме того, свойства того или иного оксида или карбоната также зависят от производителя сырья, использующего разные технологии получения. Среди используемых сырьевых материалов наибольшее влияние на свойства ферритов будет оказывать Fe_2O_3 , поскольку его содержание в шихте составляет от 50 % (масс.).

Каким образом влияет тот или иной параметр на свойства шихты, а тем более изделий, пока до конца не известно. Проблема осложняется тем, что воздействие оказывает не каждый фактор по отдельности, а их совокупность. Одним из решений данной проблемы может стать применение статистического и корреляционного анализов. Статистический анализ позволяет увидеть, как изменяются в определённый промежуток времени те или иные свойства. Корреляционный анализ устанавливает количественную взаимосвязь свойств сырья – свойств шихты – свойств изделий.

Цель работы: проведение статистического анализа результатов входного контроля оксида железа (III), а также отслеживание взаимосвязи качества Fe_2O_3 с электромагнитными характеристиками конечной продукции.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первом этапе определяли однородность поступаемого в АО «НИИ «Феррит-Домен» оксида железа (III) марки А (ТУ 2611-022-05761270-2002) производства ООО «МЗХР» (партия 41) от «мешка к мешку» и от «уровня к уровню». Анализировали содержание основного вещества, массовую долю примесей, время растворения в HCl , удельную поверхность, средний размер частиц, потери при прокаливании. Результаты представлены в табл. 1.

Теперь проведём статистическую обработку результатов входного контроля на примере содержания основного вещества от «мешка к мешку» и от «уровня к уровню» при доверительной вероятности $P = 0,95$ [2]:

1. Рассчитывается Q -критерий (оценка грубых промахов) по формуле:

$$|Q| = \frac{(x_n - x_{n-1})}{(x_{\max} - x_{\min})}, \quad (1)$$

где x_n – параметр, «подозреваемый» на грубую ошибку; x_{n-1} – параметр, соседний с «подозреваемым» значением; x_{\max} – максимальное значение параметра; x_{\min} – минимальное значение параметра.

Найденное значение Q -критерия сравнивают с табличным значением. Если $Q > Q_{\text{табл}}$, то x_n можно считать грубым промахом; если $Q \leq Q_{\text{табл}}$, то результат не отбрасывают. В нашем случае $Q_{\text{табл}} = 0,40$ и грубых промахов не выявлено.

2. Рассчитываются среднее значение \bar{x} , отклонения d_i , сумма квадратов отклонений $\sum d_i^2$:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \quad d_i = |x_i - \bar{x}|, \quad (2)$$

где x_i – значение параметра; n – количество измерений.

3. Рассчитывается стандартное отклонение:

$$S = \pm\sqrt{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где σ – дисперсия.

4. Рассчитывается доверительный интервал погрешности Δx :

$$\Delta x = \frac{S \cdot t_{\alpha, n-1}}{\sqrt{n}}, \quad (4)$$

где $t_{\alpha, n-1}$ – коэффициент Стьюдента.

5. Проверка однородности (критерий Стьюдента):

$$t_{\text{расч}} = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{(m-1)S_x^2 + (n-1)S_y^2}} \sqrt{\frac{mn(m+n-2)}{m+n}}, \quad (5)$$

где \bar{x}, \bar{y} – средние значения параметра 1-й и 2-й выборок; m, n – объёмы 1-й и 2-й выборок; S_x, S_y – стандартные отклонения 1-й и 2-й выборок.

Таблица 1

Результаты входного контроля Fe_2O_3 партии 41

Параметр (норма по ТУ)												
№ мешка	Mg, % (≤0,02)	Si, % (0,008 – 0,02)	Mn, % (0,01 – 0,04)	Al, % (≤0,02)	Cu, % (≤0,02)	Na+K, % (≤0,02)	Ca, % (0,008 – 0,02)	Fe ₂ O ₃ , % (≥99,2)	Время растворения в HCl, с (не норми- ровано)	S ₀ по ПСХ-11А, м ² /г (не норми- ровано)	d _{ср} по ПСХ-11А, мкм (не норми- ровано)	ППП при 1100 °С, % (<0,65)
1	верх	<0,003 <0,003	0,007 0,007	0,026 0,026	0,007 0,007	<0,010 <0,010	0,007 0,005	99,57	117,5	3,00	0,382	0,20
	середина	<0,003 <0,003	0,010 0,010	0,030 0,028	0,009 0,008	<0,010 <0,010	0,005 0,005	99,54	97,5	3,06	0,374	0,25
	низ	<0,003 <0,003	0,008 0,007	0,028 0,026	0,007 0,005	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	99,59 0,005	99,5	3,02	0,379	0,25
2	верх	<0,003 <0,003	0,009 0,007	0,030 0,028	0,005 0,005	<0,010 <0,010	0,007 0,005	99,50	109,0	3,14	0,365	0,22
	середина	<0,003 <0,003	0,007 0,009	0,030 0,028	0,005 0,005	<0,010 <0,010	0,005 0,007	99,57	96,0	3,26	0,351	0,16
	низ	<0,003 <0,003	0,007 0,009	0,028 0,030	0,005 0,005	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	99,68 0,007	91,0	3,18	0,360	0,23
3	верх	<0,003 <0,003	0,010 0,010	0,026 0,028	0,007 0,005	<0,010 <0,010	0,007 0,007	99,50	89,5	3,25	0,352	0,31
	середина	<0,003 <0,003	0,010 0,009	0,028 0,028	0,005 0,005	<0,010 <0,010	0,007 0,007	99,80 0,007	85,5	3,21	0,357	0,31
	низ	<0,003 <0,003	0,007 0,009	0,028 0,028	0,005 0,007	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	99,75 0,007	95,5	3,13	0,366	0,31
4	верх	<0,003 <0,003	0,005 0,005	0,022 0,022	0,009 0,008	<0,010 <0,010	0,005 0,003	99,81	81,5	3,20	0,358	0,35
	середина	<0,003 <0,003	0,005 0,005	0,025 0,025	0,010 0,008	<0,010 <0,010	0,010 0,008	99,83 0,008	76,5	2,92	0,392	0,35
	низ	<0,003 <0,003	0,007 0,005	0,022 0,020	0,010 0,008	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	99,73 0,005	71,0	2,94	0,389	0,30
5	верх	<0,003 <0,003	0,007 0,007	0,025 0,024	0,009 0,007	<0,010 <0,010	0,005 0,005	99,70	71,5	3,10	0,369	0,23
	середина	<0,003 <0,003	0,007 0,007	0,028 0,027	0,011 0,010	<0,010 <0,010	0,008 0,008	99,77 0,008	71,5	3,05	0,375	0,20
	низ	<0,003 <0,003	0,005 0,005	0,025 0,025	0,011 0,010	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	99,63 0,006	72,0	2,88	0,398	0,25

Окончание табл.1

Параметр (норма по ТУ)													
№ мешка	Mg, % (≤0,02)	Si, % (0,008 – 0,02)	Mn, % (0,01 – 0,04)	Al, % (≤0,02)	Cu, % (≤0,02)	Na+K, % (≤0,02)	Ca, % (0,008 – 0,02)	Fe ₂ O ₃ , % (≥99,2)	Время растворения в HCl, с (не норми- ровано)	S ₀ по ПСХ-11А, м ² /г (не норми- ровано)	d _{ср} по ПСХ-11А, мкм (не норми- ровано)	ППП при 1100 °С, % (<0,65)	
6	верх	<0,003 <0,003	0,006 0,005	0,022 0,022	0,011 0,009	<0,010 <0,010	0,005 0,005	99,51	67,5	3,10	0,353	0,36	
	середина	<0,003 <0,003	0,005 0,005	0,022 0,020	0,008 0,009	<0,010 <0,010	0,005 0,003	99,48	78,5	3,15	0,354	0,35	
	низ	<0,003 <0,003	0,007 0,007	0,022 0,024	0,007 0,007	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	0,005 0,003	99,83	85,5	2,95	0,366	0,29
7	верх	<0,003 <0,003	0,007 0,007	0,022 0,024	0,007 0,007	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	0,005 0,003	99,83	85,5	3,11	0,375	0,25
	середина	<0,003 <0,003	0,007 0,009	0,020 0,022	0,007 0,007	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	0,005 0,005	99,69	81,0	3,23	0,385	0,25
	низ	<0,003 <0,003	0,009 0,009	0,022 0,022	0,005 0,005	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	0,005 0,005	99,81	72,0	3,18	0,361	0,20
8	верх	<0,003 <0,003	0,012 0,012	0,022 0,024	0,009 0,007	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	0,007 0,007	99,59	78,5	2,99	0,352	0,33
	середина	<0,003 <0,003	0,010 0,010	0,020 0,020	0,009 0,009	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	0,007 0,005	99,83	81,5	3,12	0,357	0,31
	низ	<0,003 <0,003	0,012 0,010	0,022 0,024	0,011 0,009	<0,003 <0,003	<0,010 <0,010	0,007 0,005	99,54	83,5	3,17	0,366	0,27
9	верх	<0,003 <0,003	0,008 0,008	0,020 0,022	<0,003 <0,003	0,010 0,008	<0,010 <0,010	<0,010 <0,010	99,71	86,5	3,10	0,380	0,31
	середина	<0,003 <0,003	0,009 0,010	0,023 0,022	<0,003 <0,003	0,009 0,010	<0,010 <0,010	<0,010 <0,010	99,85	70,0	3,08	0,363	0,35
	низ	<0,003 <0,003	0,008 0,008	0,020 0,020	<0,003 <0,003	0,010 0,010	<0,010 <0,010	<0,010 <0,010	99,90	73,0	3,02	0,369	0,30
10	верх	<0,003 <0,003	0,008 0,010	0,020 0,022	<0,003 <0,003	0,010 0,010	<0,010 <0,010	<0,010 <0,010	99,78	73,0	2,98	0,374	0,34
	середина	0,004 0,003	0,015 0,013	0,026 0,025	<0,003 <0,003	0,009 0,010	<0,010 <0,010	<0,010 <0,010	99,90	67,0	3,10	0,356	0,25
	низ	<0,003 <0,003	0,008 0,010	0,020 0,022	<0,003 <0,003	0,009 0,009	<0,010 <0,010	<0,010 <0,010	99,81	84,5	3,01	0,386	0,20

По заданному уровню значимости α и числу степеней свободы $(m + n)$ из таблиц распределения Стьюдента находят критическое значение $t_{кр}$. Если $|t_{расч}| > t_{кр}$, то гипотезу однородности (отсутствия различия) отклоняют, если же $|t_{расч}| < t_{кр}$, то гипотезу однородности принимают. Результаты расчётов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты статистического анализа

Параметр	Верх	Середина	Низ
x_i	99,57; 99,50; 99,50; 99,81; 99,70; 99,51; 99,83; 99,59; 99,71; 99,78	99,54; 99,57; 99,80; 99,83; 99,77; 99,48; 99,69; 99,83; 99,85; 99,90	99,59; 99,68; 99,75; 99,73; 99,63; 99,83; 99,81; 99,54; 99,90; 99,81
Объём выборки n	10	10	10
Среднее значение \bar{x}	99,65	99,73	99,73
Стандартное отклонение S	0,125	0,140	0,110
Доверительный интервал Δx	0,09	0,10	0,08
$\bar{x} \pm \Delta x$	99,65 \pm 0,09	99,73 \pm 0,10	99,73 \pm 0,08
$t_{расч}$	Выборка однородная		

По результатам статистического анализа можно сделать вывод, что оксид железа (III) марки А партии 41 однороден.

Теперь проверим однородность нескольких партий оксида железа (III) марки А, используя статистический анализ. Рассмотрим содержание Fe_2O_3 в партиях 2, 14, 40, 53. В каждой партии анализировали по шесть мешков по разным уровням (верх, середина, низ). В табл. 3 представлены результаты статистического анализа по нескольким партиям оксида железа (III).

Таблица 3

Результаты статистического анализа

Номер мешка	Содержание Fe_2O_3 марки А, %			
	Партия № 2	Партия № 14	Партия № 40	Партия № 53
1	99,71	99,80	99,61	99,54
2	99,75	99,75	99,67	99,81
3	99,58	99,58	99,68	99,63
4	99,78	99,77	99,72	99,77
5	99,70	99,51	99,69	99,50
6	99,75	99,54	99,67	99,72

Окончание табл. 3

Номер мешка	Содержание Fe ₂ O ₃ марки А, %			
	Партия № 2	Партия № 14	Партия № 40	Партия № 53
Объём выборки n	6	6	6	6
Среднее значение \bar{x}	99,71	99,66	99,67	99,66
Стандартное отклонение S	0,07	0,13	0,04	0,13
Доверительный интервал Δx	0,07	0,14	0,04	0,13
$\bar{x} \pm \Delta x$	99,71±0,07	99,66±0,14	99,67±0,04	99,66±0,13
$t_{\text{расч}}$	Выборка однородная			

Из табл. 3 видно, что Fe₂O₃ марки А разных партий однороден. Таким образом, применение статистического анализа позволяет отслеживать качество поступающего на предприятие сырья.

С целью отслеживания взаимосвязи между качеством поступающего сырья и электромагнитными параметрами изделий использовался корреляционный анализ. Для этого рассчитывают коэффициенты корреляции Пирсона по формуле [3, 4]:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (6)$$

где r_{xy} – коэффициент корреляции.

В зависимости от величины r_{xy} определяют тесноту (силу) корреляционной связи:

- 1) если $r_{xy} < 0,3$, то связь слабая;
- 2) если $0,3 \leq r_{xy} < 0,5$, то связь умеренная;
- 3) если $0,5 \leq r_{xy} < 0,7$, то связь заметная;
- 4) если $0,7 \leq r_{xy} \leq 0,9$, то связь высокая;
- 5) если $r_{xy} > 0,9$, то связь высокая.

При этом если коэффициент корреляции положителен, то связь между исследуемыми параметрами прямая. Если r_{xy} отрицателен, то связь обратная.

В табл. 4 представлены результаты измерения параметров изделий (К20×12×6) из феррита марки 2000НМ1 и параметры используемого оксида железа (III) марки А. Все изделия обжигались одновременно в одних и тех же условиях. В табл. 5 приведены результаты корреляционного анализа.

Рассмотрим только те коэффициенты корреляции, для которых значение больше 0,5 по абсолютной величине. Остановимся подробнее на взаимосвязи параметров Fe₂O₃ и кольцевых сердечников марки 2000НМ1.

1. *Высокая обратная связь между содержанием оксида железа (III) в сырье и тангенсом магнитных потерь.* Чем выше квалификация используемого Fe₂O₃, тем ниже $\text{tg} \delta / \mu \cdot 10^{-6}$, т. е. в та-

Таблица 4

Параметры изделий и Fe_2O_3

№ мешка	$\mu_{\text{н}}$	$\text{tg}\delta/\mu \cdot 10^{-6}$	ТК μ при		Fe_2O_3 , %	Время растворения в HCl , с	S_0 , $\text{м}^2/\text{г}$	ППП, %	Mg, %	Si, %	Mn, %	Al, %	Cu, %	Na+K, %	Ca, %
			-60 °C	+50 °C											
1	2603	12,89	0,09	1,21	99,68	90,17	3,20	0,31	0,003	0,009	0,028	0,006	0,003	0,010	0,007
2	2573	12,95	0,72	0,15	99,68	90,17	3,20	0,31	0,003	0,009	0,028	0,006	0,003	0,010	0,007
3	2347	15,07	0,64	0,2	99,70	71,67	3,01	0,23	0,003	0,006	0,026	0,010	0,003	0,010	0,007
4	2212	16,06	0,66	0,12	99,70	71,67	3,01	0,23	0,003	0,006	0,026	0,010	0,003	0,010	0,007
5	2255	16,71	0,82	0,36	99,79	76,33	3,02	0,33	0,003	0,005	0,023	0,009	0,003	0,010	0,006
6	2368	15,8	0,83	0,38	99,79	76,33	3,02	0,33	0,003	0,005	0,023	0,009	0,003	0,010	0,006
7	2084	19,51	1	0,44	99,79	76,33	3,02	0,33	0,003	0,005	0,023	0,009	0,003	0,010	0,006
8	2171	19,06	1,05	0,53	99,79	76,33	3,02	0,33	0,003	0,005	0,023	0,009	0,003	0,010	0,006
9	1925	7,74	0,76	0,47	99,58	98,67	3,19	0,20	0,003	0,008	0,029	0,005	0,003	0,010	0,006
10	1923	7,74	0,83	0,47	99,58	98,67	3,19	0,20	0,003	0,008	0,029	0,005	0,003	0,010	0,006

* $\mu_{\text{н}}$ – начальная магнитная проницаемость; $\text{tg}\delta/\mu \cdot 10^{-6}$ – относительный тангенс угла магнитных потерь; ТК μ – температурный коэффициент магнитной проницаемости; S_0 – удельная поверхность; ППП – потери при прокаливании.

Таблица 5

Результаты корреляционного анализа

Параметр	μ_n	$\text{tg}\delta/\mu \cdot 10^{-6}$	ТК μ при	
			-60 °C	+50 °C
Содержание Fe_2O_3	-0,26	-0,76	-0,36	-0,13
Время растворения в HCl	-0,23	-0,88	-0,24	0,37
S_0	0,07	-0,82	-0,46	0,42
ППП	0,52	0,72	0,13	0,22
Mg	0	0	0	0
Si	0,24	-0,77	-0,62	0,35
Mn	-0,04	-0,89	-0,52	0,18
Al	0,14	0,85	0,29	-0,41
Cu	0	0	0	0
Na+K	0	0	0	0
Ca	0,69	-0,02	-0,69	-0,04

ком реагенте содержится меньше примесей, которые в ферритовой шихте будут создавать неоднородности, повышающие тангенс потерь.

2. *Высокая обратная связь между временем растворения Fe_2O_3 в соляной кислоте и тангенсом магнитных потерь.* Большое время растворения в HCl свидетельствует о низкой химической активности оксида железа (III), что приводит к появлению в шихте неоднородностей, увеличивающих $\text{tg}\delta/\mu \cdot 10^{-6}$. Слишком активный оксид железа (III) тоже будет способствовать появлению неоднородностей.

3. *Высокая обратная связь между удельной поверхностью и тангенсом магнитных потерь.* Величина удельной поверхности связана с химической активностью Fe_2O_3 . Что в свою очередь влияет на тангенс угла магнитных потерь.

4. *Высокая прямая связь между ППП и тангенсом магнитных потерь, заметная прямая связь между ППП и начальной магнитной проницаемостью.* Чем больше ППП, тем меньше содержание основного вещества, т. е. больше примесей, что приведёт к появлению неоднородностей, которые увеличивают $\text{tg}\delta/\mu \cdot 10^{-6}$. При этом величина ППП указывает на химическую активность Fe_2O_3 . Чем величина потерь больше, тем оксид железа (III) активнее, что в свою очередь приводит к получению химически более активной ферритовой шихты. В результате спекания заготовок из такой шихты получаются изделия с крупными зёрнами, что повышает величину начальной магнитной проницаемости.

5. *Высокая связь между примесями (Si, Mn, Al) и тангенсом потерь, заметная связь между примесями (Si, Mn, Ca) и ТК μ , заметная связь между примесями (Ca) и начальной магнитной проницаемостью.* Влияние примесей на электромагнитные параметры ферритовых изделий имеет достаточно сложный характер и до конца не изучено. Как говорилось ранее, какие-то примеси приводят к появлению неоднородностей. Другие примеси увеличивают или уменьшают концентрацию дефектов кристаллической решётки, что отражается на химической активности

сырья и непосредственно ферритовой шихты. При этом стоит упомянуть, что примеси влияют не только по отдельности, но и совместно.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые расчёты позволяют в первом приближении оценить как качество поставляемого сырья, так и влияние различных параметров исходных компонентов на электромагнитные параметры готовых изделий. Помимо параметров сырья на конечный результат также оказывают (и порой значительно оказывают) влияние различные технологические факторы (время помола, температура и время ферритизации, температура и время выдержки при обжиге изделий). С помощью статистического и корреляционного анализов можно выразить влияние различных факторов на параметры конечных изделий не только качественно, но и количественно в виде математической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Левин, Б. Е.** Физико-химические основы получения, свойства и применения ферритов / Б. Е. Левин, Ю. Д. Третьяков, Л. М. Летюк. – М.: Металлургия, 1979.
2. **Трофимова, Е. А.** Теория вероятности и математическая статистика: учебное пособие / Е. А. Трофимова, Н. В. Кисляк, Д. В. Гилёв. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2018.
3. **Харченко, М. А.** Корреляционный анализ: учебное пособие для вузов / М. А. Харченко. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008.
4. **Дюкина, Т. О.** Модифицированный коэффициент корреляции. Аналитика и управление данными в области с интенсивным использованием данных / Т. О. Дюкина. – 2017. – С. 174 – 179.

Статья поступила 4 октября 2024 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Основы теории радиосистем и комплексов радиоэлектронной борьбы:
Учебное пособие / В.И. Кошелев. – М.: КУРС, 2025. – 200 с.

В учебном пособии изложены общетеоретические вопросы радиоэлектронной борьбы, математические основы принятия решений в задаче обнаружения сигналов, различные варианты уравнения дальности радиосвязи и радиолокации в условиях шумов и помех, методы формирования помех и борьбы с ними; рассмотрены структурные схемы основных устройств защиты от помех. Приводятся примеры применения методов радиоэлектронной борьбы в системах радиолокации и радионавигации.

УДК 621.385.69

ОСОБЕННОСТИ НАПЫЛЕНИЯ, СОСТАВ И СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КАТОДОВ

Г. А. Жабин, Н. А. Шарапов, Т. М. Есипова

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

Изучен рентгенофазовый состав катодомишеней тройных карбонатов щелочно-земельных металлов до и после процесса ионно-плазменного распыления. Проведен рентгенофазовый анализ молекулярно-напыленных оксидных покрытий, полученных при давлениях рабочего газа 0,13...0,11 Па. С применением атомно-силовой, сканирующей микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского анализа установлен химический состав и структура поверхности пленок.

КС: молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), оксидно-карбонатная катодомишень (КМ), недокальные характеристики, срок службы, атомно-силовая микроскопия (АСМ), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), энергодисперсионный анализ (ЭДА)

DEPOSITION FEATURES, COMPOSITION AND SURFACE STRUCTURE OF THIN-FILM CATHODES

G. A. Zhabin, N. A. Sharapov, T. M. Esipova

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

In this work, the X-ray phase analysis of targets of alkali-earth metal ternary carbonates is investigated before and after the ion-plasma sputtering process. The X-ray analysis of molecular-sprayed oxide coatings obtained at working gas pressures of 0.13...0.11 Pa was carried out. The chemical composition and surface structure of the films were determined using atomic force, scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersion analysis (EDA).

Keywords: molecular sputter-deposited oxide cathode, oxide-carbonate target, emission characteristics, durability, scanning electron microscopy (SEM), atomic force microscopy (AFM), energy dispersion X-ray analysis (EDXA)

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ) применяются молекулярно-напыленные термоэмиссионные оксидные микрокатоды (МНОК) с толщиной эмиссионного покрытия 0,8...1 мкм, работающие при плотности тока 1...2 А/см² [1, 2]. Ленточные тонкопленочные МНОК наиболее эффективны по потреблению мощности. Рабочая температура таких катодов составляет 600...620 °С. Использование ионно-плазменного осаждения молекулярно-напыленных эмиссионных покрытий (МНОП) позволяет создавать термоэмиссионные микрокатоды со сроком службы более 10 тыс. ч [3].

Ионно-плазменное напыление – широко используемый метод физического осаждения из паровой фазы. Он заключается в распылении отрицательно смещенной катодомишени (КМ) ионами реактивной плазмы. Плазма зажигается при подаче высокого напряжения между КМ и заземленным подложкодержателем. Ионы создаются в плазменной камере, ускоряясь при паде-

нии потенциала. После приобретения энергии выше энергии связи материала мишени ионы газа распыляют ее [4]. Структура, рентгенофазовый анализ (РФА) и состав пленок $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$, применяемых в качестве термоэмиссионных покрытий микрокатодов, до и после отжига исследовались в работах [5, 6]. Технология синтеза тройных карбонатов щелочно-земельных металлов (ЩЗМ) исследована в работе [7]. Эффективным способом ионно-плазменного напыления в смеси газов аргона/ксенона и CO_2 с карбонатной мишени $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ является осаждение эмиссионного покрытия в едином вакуумном цикле на равномерно вращающиеся со скоростью 4...6 об/мин керны МНОК. Помимо электрофизических параметров напыления большое значение придается исходному составу и технологии изготовления КМ, плотности ее покрытия и размеру зерен [8].

Для улучшения параметров ЦЗУ вопросы совершенствования работы микрокатодов и оценки их качества после осаждения эмиссионных покрытий требуют дальнейшего изучения. Ионно-плазменное распыление с горячей мишени тройных карбонатов – эффективный способ изготовления высокоэмиссионных МНОК. Однако остается нерешенной проблемой недостаточно хорошая воспроизводимость стехиометрического и фазового состава пленок при незначительном изменении параметров (температуры мишени, состава и давления газа) распыления КМ [9]. Процесс напыления состоит из нескольких стадий: бомбардировка ионами и атомами рабочего газа горячей КМ; распыление атомов КМ через газовую среду ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) в пространство дрейфа подложка – мишень; формирование пленки многокомпонентного состава $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ на поверхности кернов микрокатодов. На первом и втором этапах на процесс переноса распыленных атомов в пространстве дрейфа влияют химический состав КМ, давление и состав рабочего газа, расстояние между мишенью и анодом с подложкой (напыляемыми образцами). На третьем этапе значительную роль играют атомарный состав, температура и структура поверхности подложки [10].

Целью работы являлось исследование физико-химических процессов, происходящих при ионно-плазменном распылении КМ тройных карбонатов ЩЗМ на керны МНОК для оптимизации эмиссионных параметров катодов. Для этого изучены рентгенофазовый состав КМ и напыленных пленок, влияние керна катода и толщины покрытия на эмиссионные свойства МНОК. С применением атомно-силовой (АСМ) и сканирующей электронной (СЭМ) микроскопии показаны поверхностная и поперечная структура пленок.

2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Катодомишени $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ для ионно-плазменного напыления изготавливали методом пульверизации [2, 8]. Соотношение активных элементов ЩЗМ в ней – 47:45:8, толщина покрытия мишеней – 130...132 мкм.

Существует взаимосвязь между технологическими параметрами осаждения и структурными и электрофизическими свойствами МНОП. Поэтому исследовали фазовый и компонентный состав напыленных образцов и эмиссионные свойства полученных микрокатодов с пленкой МНОП в зависимости от условий их осаждения.

При стандартных параметрах осаждения покрытия с КМ на микрокатоды в установке вакуумного напыления марки УРМ температура мишени составляла около 770...780 °С, отрицательное напряжение на мишени равнялось 800 В, ток разряда – 200 мА, потенциал подложки – 0, давление газа варьировалось от 0,13 до 0,11 Па с применением вакуумметра ВМБ-14. Магнитное поле в области напыления – 0,7 мТл. Температура подложки в процессе напыления – 220...252 °С. Расстояние КМ – подложка (катод) равнялось 2,2 см. Контроль температуры осуществлялся с по-

мощью термопары, размещенной на подложкодержателе. В качестве рабочего газа использовалась смесь $\text{Ar} + \text{CO}_2$. Мощность разряда составляла 160...165 Вт.

Кристаллическая структура и фазовый состав полученных пленок исследовались методом рентгеновской дифракции (XRD) с помощью дифрактометра ДРОН-8 (материал анода – Co , напряжение – 40 кВ, ток – 20 мА, шаг сканирования $2\Theta = 0,05$ град, время экспозиции – 2 с). Морфология поверхности и поперечное строение пленок исследовались методами АСМ на микроскопе марки «Аист-НТ», сканирующей микроскопии на микроскопе марки «Jeol» на подложках из WRe-27, сапфира и кремния. Химический состав пленок – с помощью рентгенофлуоресцентного метода и энергодисперсионной приставки «Jeol System».

Были выбраны два режима напыления: с постоянным давлением смеси газов $P = 0,13$ Па и комбинированный режим, 2/3 времени которого напыление осуществлялось с давлением 0,13 Па, а последние 60 мин – при $P = 0,11$ Па.

В работе исследовались эмиссионные характеристики ленточных микрокатодов с керном из вольфраморениевского сплава WRe-20 с пленкой и без пленки иридия, изготовленных по технологии, описанной в [11].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Рентгенофазовый анализ МНОП

На рис. 1 приведена дифрактограмма КМ толщиной 130 мкм с исходным химическим составом. Хорошо определяются фазы C_2BaO_4 , $\text{Ca}_{0,2}\text{Sr}_{0,8}\text{O}$, $\text{Ba}_{0,504}\text{Sr}_{0,496}\text{O}$, приведенные в табл. 1.

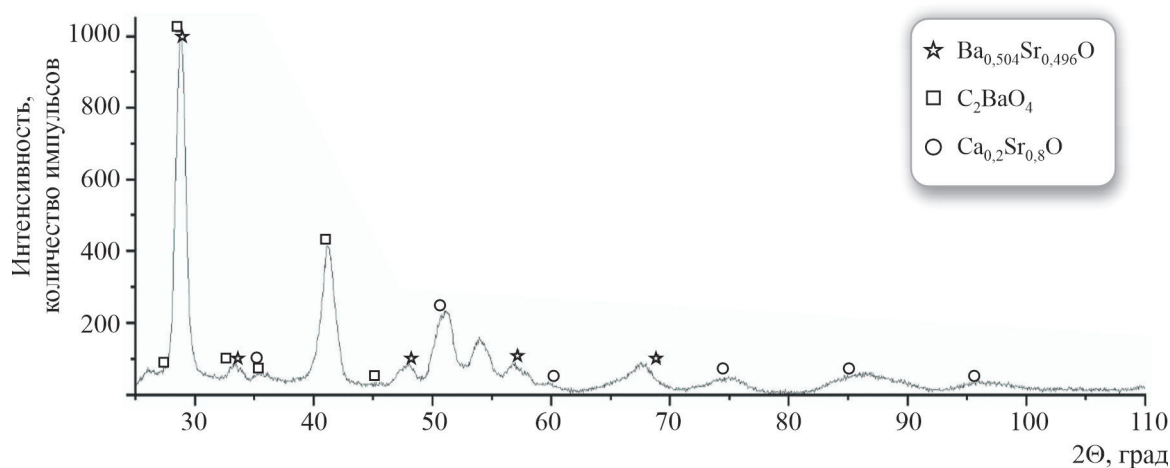


Рис.1. Рентгеновская дифрактограмма КМ с исходным составом

Таблица 1

Параметры фаз исследуемого образца КМ с исходным составом

Химическая формула	Сингония	№ карточки	$d1$	$d2$	$d3$
C_2BaO_4	—	00-037-0674	3,5900	3,1688	3,1168
$\text{Ca}_{0,2}\text{Sr}_{0,8}\text{O}$	Cubic	00-048-1475	2,5447	2,9389	1,7995
$\text{Ba}_{0,504}\text{Sr}_{0,496}\text{O}$	Cubic	01-089-4121	3,0724	2,6660	1,8852

Примечание. $d1, d2, d3$ – межплоскостные расстояния.

На рис. 2 показана дифрактограмма КМ после процесса разложения в ней карбонатов в вакууме и последующего распыления в смеси аргона и диоксида углерода. В табл. 2 приведены найденные при РФА фазы карбонатов, оксидов и ЦЗМ.

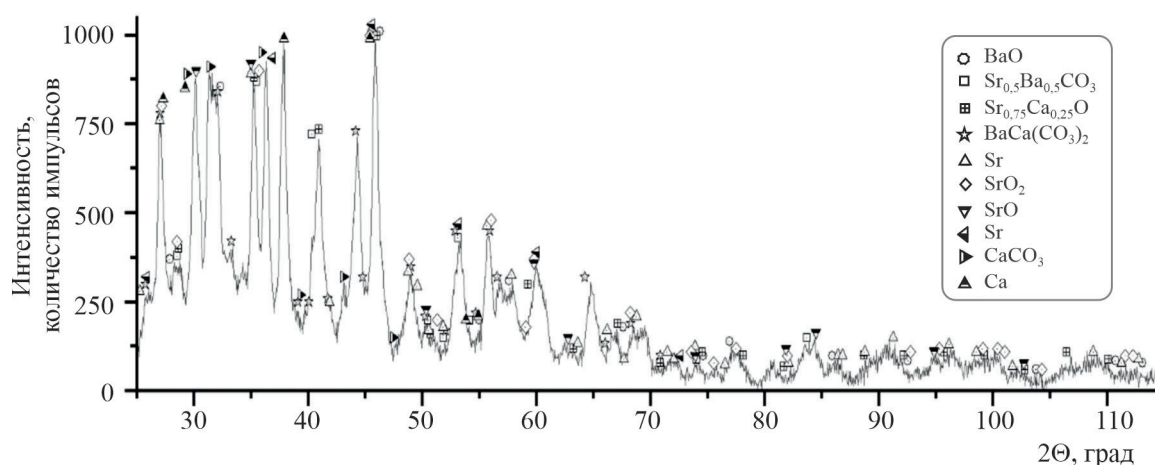


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма КМ после процесса распыления

Таблица 2

Параметры фаз исследуемого образца КМ после распыления

Химическая формула	Сингония	№ карточки	$d1$	$d2$	$d3$
$\text{Sr}_{0,75}\text{Ca}_{0,25}\text{O}$	Cubic	01-080-3136	2,5590	2,9549	1,8095
Sr	Cubic	01-089-4047	3,4436	1,9882	2,4350
$\text{Ca}(\text{CO}_3)$	Rhombohedral	01-078-3262	3,0418	1,8792	2,2894
$\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{CO}_3$	Orthorhombic	00-047-0224	3,6290	2,9360	2,5960
$\text{BaCa}(\text{CO}_3)_2$	Monoclinic	00-015-0285	3,1250	3,1400	4,0180
Sr	Hexagonal	03-065-5486	3,2988	3,5250	3,7326
SrO_2	Tetragonal	03-065-2652	2,5152	3,1269	3,2800
SrO	Cubic	01-074-1227	2,5620	2,9583	1,8116
BaO	Cubic	01-072-5462	3,1979	2,7695	1,9583
Ca	Hexagonal	01-071-3773	3,0542	3,2650	3,4554

На рис. 3 показана дифрактограмма напыленного на образцы из WRe-27 МНОП в течение 3 ч. Толщина эмиссионного покрытия на подложке составила около 2,7 мкм. В табл. 3 приведены обнаруженные при РФА фазы карбонатов и оксидов ЦЗМ и фаза подложки W_{13}Re_7 .

Сравнительный анализ показал наличие одинаковых фаз в осажденном покрытии и распыляемой мишени (см. рис. 2, табл. 2): $\text{BaCa}(\text{CO}_3)_2$, $\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{CO}_3$, $\text{Sr}_{0,75}\text{Ca}_{0,25}\text{O}$.

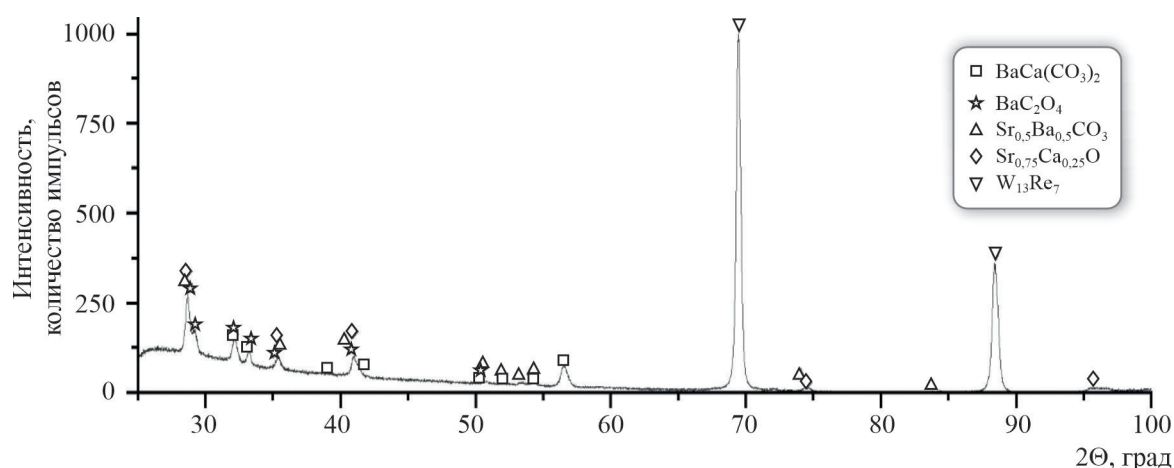


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма напыленной пленки на подложке WRe-27

Таблица 3

**Параметры фаз исследуемого образца пленочного эмиссионного покрытия
после напыления на подложку WRe-27**

Химическая формула	Сингония	№ карточки	$d1$	$d2$	$d3$
$W_{13}Re_7$	Cubic	03-065-8387	2,2196	1,2515	1,5695
$BaCa(CO_3)_2$	Monoclinic	00-015-0285	3,1250	3,1400	4,0180
$Sr_{0.5}Ba_{0.5}CO_3$	Orthorhombic	00-047-0224	3,6290	2,9360	2,5960
BaC_2O_4	Triclinic	00-057-0007	3,5436	3,5744	4,3081
$Sr_{0.75}Ca_{0.25}O$	Cubic	01-080-3136	2,5590	2,9549	1,8095

3.2. Морфология и структура поверхности

На рис. 4 приведены строение поверхности и поперечное сечение МНОП, напыленного на различных подложках. Изображения получены с помощью АСМ (рис. 4 а, б) и с применением СЭМ (рис. 4, в, г).

На рис. 4, в показана поверхность МНОП толщиной ≈ 5 мкм, напыление проводилось в две стадии с использованием двух КМ. После первой стадии напыления вольфраморениевая подложка после полного остывания вынималась на атмосферу для смены мишени. Общее время напыления составляло 6 ч. Установлено, что такой способ напыления способствует образованию повышенных дефектов и трещин в покрытии. Размер зерен МНОП неоднородный и может достигать от 80 нм до 1 мкм.

Показано, что поперечная структура МНОП в большинстве случаев имеет столбчатую структуру (рис. 4, г), что подтверждают и ранее полученные исследования авторов [9].

Использование рентгенофлуоресцентного метода показало, что состав осажденного эмиссионного покрытия катодов отличается по процентному соотношению ЦЗМ от состава мишени тройных карбонатов ЦЗМ в сторону увеличения Ва и уменьшения Sr и Ca. (рис. 5, табл. 4).

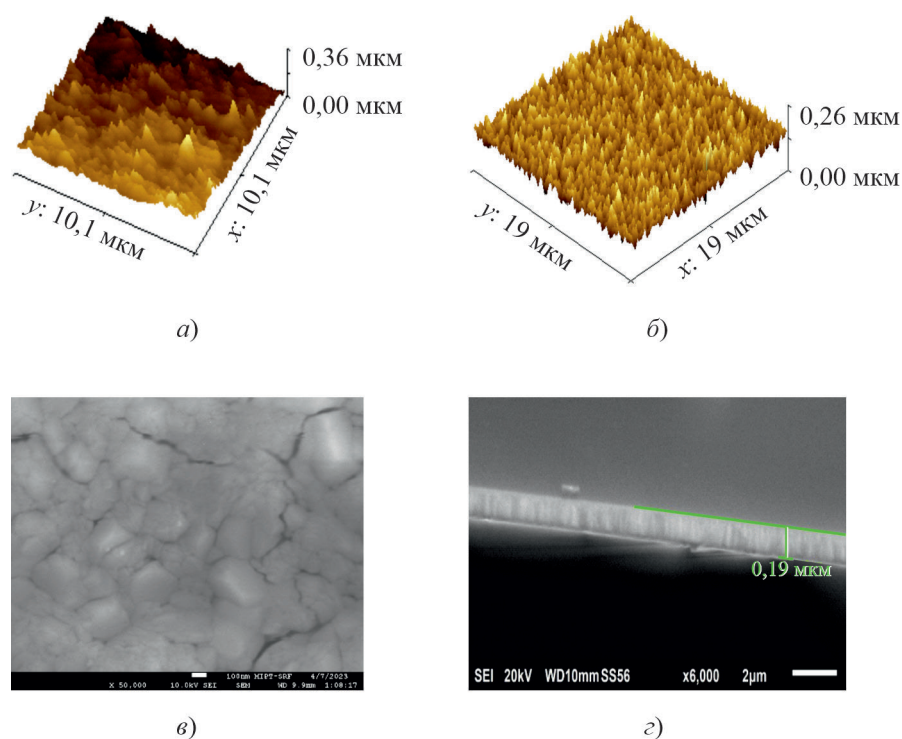


Рис. 4. Строение поверхности МНОП, осажденного в смеси ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) на подложках WRe-27 (а, в), сапфира (б), и поперечный срез покрытия на Si (г)

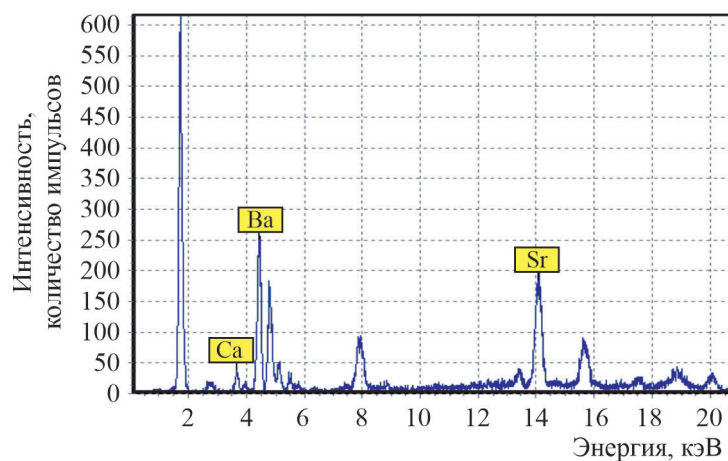


Рис. 5. Спектры ЦЗМ пленки эмиссионного покрытия катодов

Таблица 4

Состав осажденного покрытия

Элемент	Концентрация, %	Погрешность, %
Ca	3,9	0,4
Ba	77,6	0,61
Sr	18,4	0,48

Проведено исследование состава образцов 1 и 2 на СЭМ с энергодисперсионной приставкой JEOL EDS System (рис. 6). Образец 1, напыленный по технологии понижения давления газа в процессе осаждения покрытия с первоначального 0,13 до 0,11 Па, имеет большую концентрацию Ba, чем образец 2 с постоянным давлением 0,13 Па. Соотношение массовых долей элементов Ba/O в первом образце составило 1,85, а во втором – 0,97. Соотношение Ba/Sr в образце 1 составило 1,96; в образце 2 – 1,42 (табл. 5 и 6).

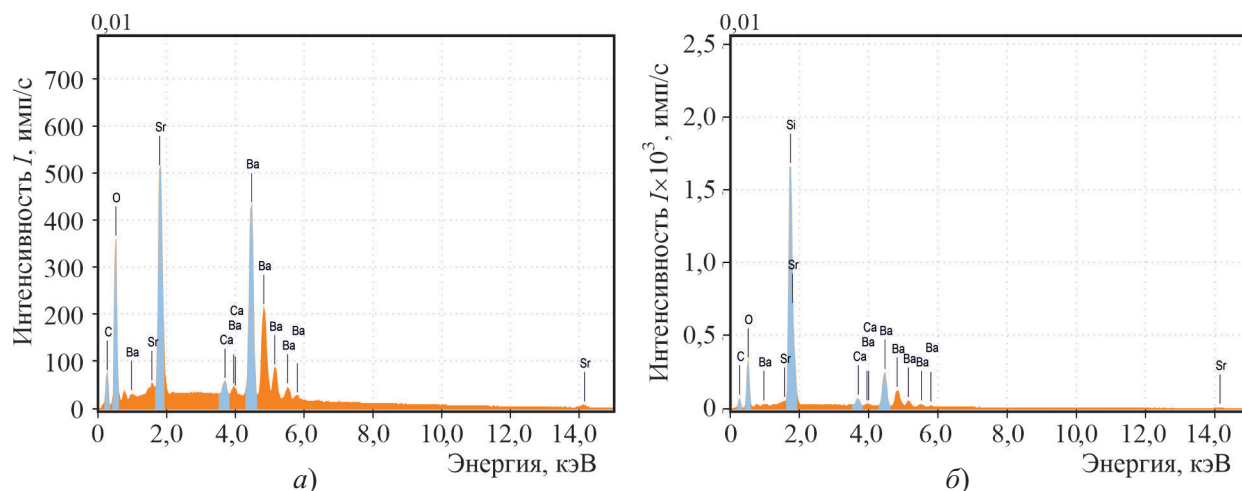


Рис. 6. Энергодисперсионный анализ МНОП на подложке Si:

а – образец 1 ($P = 0,13 \dots 0,11$ Па); б – образец 2 ($P = 0,13$ Па)

Таблица 5

Химический состав МНОП на образце 1

Элемент	Массовая доля, %	Атомная доля, %	Погрешность измерений	Линия спектра
C	9,31	27,20	0,01	K
O	23,69	51,97	0,03	K
Ca	0,75	0,66	0,01	K
Sr	22,39	8,97	0,06	L
Ba	43,86	11,21	0,05	L

Таблица 6

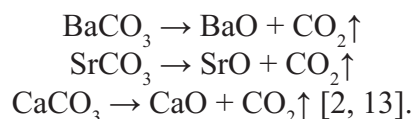
Химический состав МНОП на образце 2

Элемент	Массовая доля, %	Атомная доля, %	Погрешность измерений	Линия спектра
C	12,90	28,51	0,01	K
O	23,18	38,47	0,03	K
Si	24,50	23,16	0,03	K
Ca	1,09	0,72	0,01	K
Sr	15,78	4,78	0,07	L
Ba	22,54	4,36	0,03	L

После полного разложения карбонатов мишени в течение 80 мин, в соответствии с технологическим режимом, проводился процесс напыления на образцы и катоды в течение 3 ч. В процессе распыления мишени перенос атомов от нее к подложке происходит за счет образования направленного потока частиц, рассеяния на атомах рабочего газа и диффузионного движения атомов на подложку. В результате бомбардировки мишени ионами газа они проникают в структуру ее материала, где возникают упругие столкновения атомов и ионов, обмен энергией и импульсом между ними, что способствует преодолению сил связи атомов мишени. В процессе высокотемпературного разложения карбонатов и последующего распыления стехиометрический состав поверхности КМ изменяется, что влияет на состав осаждаемой пленки. Качество разложения поверхности КМ также влияет на характеристики газового разряда. Увеличение температуры мишени и одновременное уменьшение давления газа с 0,13 до 0,11 Па приводит к увеличению потока и скорости транспорта распыленных атомов на подложку и катоды. При увеличении температуры КМ до 780...800 °С уменьшается степень покрытия ее поверхности окислами и возрастает ее скорость распыления.

Увеличение плотности потока приводит к изменению механизма массопереноса распыляемых атомов и увеличению скорости роста пленки [10, 12].

Микрокатоды с осажденным МНОП при давлениях $P = 0,13...0,11$ Па установили в катодно-подогревательный узел макета ЦЗУ. На откачном посту в вакууме не хуже $1,1 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. происходило разложение карбонатов эмиссионного покрытия путем термической диссоциации и формирование окислов. Разложение карбонатов ЦЗМ в КМ и покрытия микрокатодов осуществляется по реакциям:



Активирование и отбор тока с микрокатодов происходили в отпаянном приборе на стенде термоэмиссионной тренировки в непрерывном режиме с подачей на подогреватель катода тока накала I_n , а на анод ускоряющего напряжения U_a . На рис. 7, а показаны эмиссионные характеристики катодов с покрытием, нанесенным при варьировании давления газа 0,13...0,11 Па и при постоянном давлении 0,13 Па. Характеристики сняты в режиме ускоряющего напряжения на аноде 22 В, на управляющем электроде 5 В. Из рисунка следует, что МНОК, изготовленные при повышенном давлении газа, имеют более высокий ток накала в рабочей точке (260 мА), чем напыленные при давлении 0,13...0,11 Па (245 мА), а значит, и меньший срок службы.

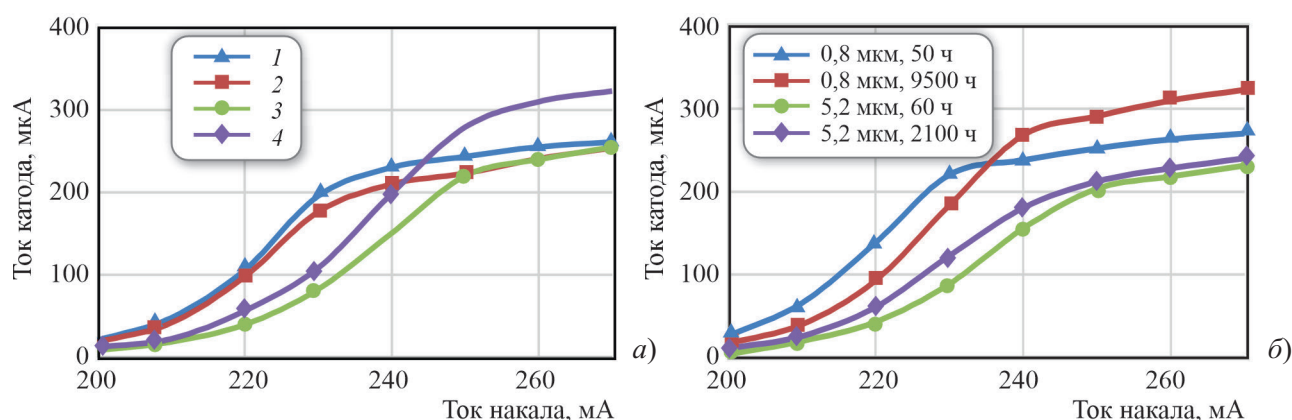


Рис. 7. Эмиссионные характеристики МНОК (а) при $P = 0,13...0,11$ Па (1, 2) и 0,13 Па (3, 4), а также характеристики катодов с тонким и толстым МНОП (б)

На рис. 7, б приведены сравнительные эмиссионные характеристики катодов с тонким и толстым покрытием. Покрытие толщиной 0,8 мкм осаждалось в атмосфере $\text{Xe} + \text{CO}_2$ на керн WRe-20 без слоя иридия. Анализ рисунка показал, что МНОК с толщиной эмиссионного покрытия 5,2 мкм имеет более высокую температуру и меньшую активность по сравнению с катодом с тонким покрытием. Катод проработал 2100 ч без падения тока и 900 ч в циклическом режиме без токоотбора. После работы в циклическом режиме была вновь снята его эмиссионная характеристика, которая показала, что падения тока нет. Однако после вскрытия катода из прибора и 4 ч выдержки при комнатной температуре на атмосфере покрытие отслоилось.

На рис. 8, а показаны эмиссионные характеристики в зависимости от времени работы МНОК с тонким эмиссионным покрытием 0,8 мкм, у которого пленка Ir напылена на керн WRe-20 в атмосфере азота. На рис. 8, б приведены кривые зависимости тока катодов от времени работы. Показания снимались для трех МНОК с толщиной МНОП 0,8 мкм: без пленки иридия, с пленкой иридия, напыленной в аргоне и в азоте. Наибольшую долговечность показал МНОК на керне WRe-20 без пленки иридия. У него низкий рабочий ток накала (240 мА), а общий срок службы составил более 15 000 ч. Присутствие в фазе оксида бария нанопримесей W, Re снижает работу выхода катода и улучшает его эмиссионную способность [13, 14].

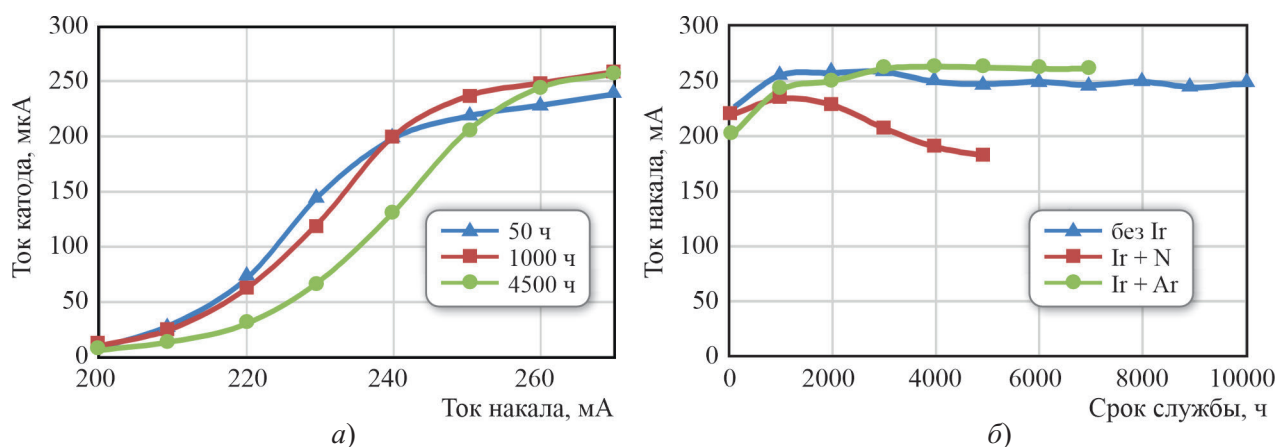


Рис. 8. Эмиссионные характеристики МНОК с пленкой иридия, напыленной в азоте (а); сравнение долговечности МНОК без пленки Ir и с пленкой Ir, напыленной в азоте и в аргоне (б)

Катод с пленкой иридия, напыленной магнетронным способом в азоте, показал невысокие эмиссионные свойства и меньшую долговечность. В работе [15] исследовалось образование нейтральных и ионных комплексов диазота иридия, таких, как $\text{Ir}(\text{N}_2)$, $\text{Ir}(\text{N}_2)_2$, а также нитридных комплексов IrN , $\text{Ir}(\text{N})_2$ в результате реакции атомов иридия, подвергнутых лазерной абляции, с молекулами и атомами азота. Известно, что соединения нитридов являются твердыми, тугоплавкими и устойчивыми к высокотемпературному отжигу. Возможно, что наличие подобных комплексов в пленке иридия после магнетронного распыления может приводить в процессе работы МНОК к повышению сопротивления керна и его рабочей температуры, что отрицательно сказывается на долговечности катода.

Повышение давления рабочего газа приводит к уменьшению скорости доставки компонентов мишени и скорости роста пленки. Поэтому при энергодисперсионном анализе второго образца (см. рис. 6, б) детектируются атомы подложки – Si. Несоответствие скоростей доставки распыленных атомов мишени и роста пленки приводит к нарушению структуры МНОП,

возникновению напряжений и ухудшению эмиссионных свойств катодов. Температурные условия при формировании пленок также влияют на их компонентный, фазовый состав и эмиссионные характеристики МНОК [9].

В работе [16] показано, что повышение скорости осаждения и концентрации атомов бария за счет увеличения мощности разряда при напылении эмиссионных покрытий на МНОК позволило увеличить эмиссионную способность микрокатодов на пассивных и активных ядрах.

Хорошие эмиссионные свойства катодов получены при уменьшении давления смеси газов с 0,13 до 0,11 Па в процессе распыления. За счет уменьшения количества столкновений распыляемых атомов мишени с газом и изменения механизма роста пленки происходит повышение концентрации атомов Ва в твердом растворе.

Напыление при постоянном давлении $0,11 \geq P \geq 0,13$ Па в среде $\text{Ar} + \text{CO}_2$ приводит к менее стабильным по эмиссионным свойствам катодам с повышенной рабочей температурой (током) накала (см. рис.7, а).

Полученные экспериментальные данные показали, что понижение давления газа с 0,13 до 0,11 Па в процессе распыления КМ увеличивает энергию осаждаемых частиц, скорость напыления и концентрацию атомов Ва в МНОП, что позволяет получать оптимальные по фазовому составу и эмиссионным свойствам катоды для ЦЗУ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован процесс фазовых изменений в КМ после разложения карбонатов и ионно-плазменного напыления эмиссионного покрытия на образцы и катоды. Установлено, что фазовый состав распыляемой мишени и напыленного покрытия различается, однако у них обнаружены общие фазы: $\text{BaCa}(\text{CO}_3)_2$, $\text{Sr}_{0,5}\text{Ba}_{0,5}\text{CO}_3$, $\text{Sr}_{0,75}\text{Ca}_{0,25}\text{O}$. Изменение давления рабочего газа ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) при напылении влияет на стехиометрический состав пленок и их эмиссионные свойства. Способ напыления с понижением давления смеси газа с 0,13 до 0,11 Па в процессе осаждения МНОП позволил увеличить концентрацию атомов Ва в эмиссионном покрытии. Стехиометрический состав пленок отличается от состава исходных мишеней в сторону повышения процентного содержания атомов Ва. В МНОК без пленки Ir (возможно, из-за присутствия в фазе оксида бария нанопримесей W, Re) снижается работа выхода катода и улучшаются его эмиссионная способность и долговечность [13, 14]. Использование азота в качестве рабочего газа в магнетронном напылении иридия МНОК показало уменьшение срока службы микрокатодов из-за возможного захвата соединений N в ядре во время осаждения Ir. МНОК толщиной около 5,2 мкм показал меньшую стабильность эмиссионных свойств по сравнению с тонким покрытием (0,8...1 мкм). Применение методов рентгеноструктурного и энергодисперсионного микроанализа при изготовлении КМ и МНОП позволит оптимизировать процесс получения эффективных пленочных МНОК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2747505 РФ. Молекулярно-напыленный оксидный катод : № 2020131146 : заявл. 21.09.2020 : опубл. 06.05.2021 / Ю. А. Будзинский, Н. А. Лябин, Г. А. Жабин [и др.].
2. Никонов, Б. П. Оксидный катод / Б. П. Никонов. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.
3. Жабин, Г. А. Долговечность молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин, И. П. Иваненко // Прикладная физика. – 2020. – № 6. – С. 73 – 79.

4. Берлин, Е. В. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. – М.: Техносфера, 2010. – 528 с.
5. Жабин, Г. А. Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – Вып. 4 (535). – С. 15 – 21.
6. Жабин, Г. А. Морфология поверхности, фазовый и элементный состав молекулярно-напыленных оксидных покрытий / Г. А. Жабин, М. В. Злыгостов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3 (542). – С. 44 – 50.
7. Технология синтеза и электронная структура тройных карбонатов бария-стронция-кальция для катодов СВЧ-приборов / В. И. Капустин, И. П. Ли, Н. Е. Кожевникова, Э. Ф. Худайгулова // Российский технологический журнал. – 2022. – Вып. 10 (6). – С. 60 – 69. – DOI: <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-6-60-69>.
8. Жабин, Г. А. Влияние способа изготовления мишени $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ и рабочего газа на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных микрокатодов / Г. А. Жабин, А. В. Коннов // Прикладная физика. – 2023. – № 2. – С. 73 – 79.
9. Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, Д. М. Седловец, М. П. Темиряева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 1 (544). – С. 46 – 55.
10. Статистическое моделирование процесса осаждения тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ при ионно-плазменном распылении / В. А. Вольпяс, С. В. Разумов, А. В. Тумаркин, А. Б. Козырев // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, вып. 7. – С. 60 – 68.
11. Жабин, Г. А. О технологии изготовления молекулярно-напыленных оксидных катодов с повышенной плотностью тока / Г. А. Жабин // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург: СПбГЭТУ, 2018. – С. 182 – 186.
12. Термостабильные сегнетоэлектрические конденсаторы на основе градиентных пленок титаната бария-стронция / А. В. Тумаркин, С. В. Разумов, В. А. Вольпяс [и др.] // ЖТФ. – 2017. – Т. 87, вып. 10. – С. 1585 – 1591. – DOI:10.21883/JTF.2017.10.45005.2168.
13. Киселев, А. Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. – М.: Изд. МФТИ, 2001. – 240 с.
14. Капустин, В. И. Влияние микропримесей d -элементов на электронную структуру кристаллитов ВаО в катодах СВЧ-приборов / В. И. Капустин, И. П. Ли, А.В. Шуманов, С.О. Москаленко, Р.Р. Залялиев, Н.Е. Кожевникова // XXVI Научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Судак, 16 – 21 сентября 2019 г. – С. 278 – 282.
15. Tony Stüker. A cornucopia of iridium nitrogen compounds produced from laser-ablated iridium atoms and dinitrogen / Tony Stüker, Dr. Helmut Beckers, Prof. Sebastian Riedel // Chemistry. A European journal. – 2020. – Vol. 26, Issue 3. – P. 7384 – 7394. – <https://doi.org/10.1002/chem.201905514>.
16. Жабин, Г. А. Влияние условий магнетронного распыления при осаждении покрытий $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ на термоэлектронную эмиссию пленочных микрокатодов / Г. А. Жабин, О. В. Пелипец, Н. А. Шарапов // Письма в ЖТФ. – 2024. – Т. 50, № 11. – С. 38 – 41. – DOI: 10.61011/PJTF.2024.11.57909.19827.

Статья поступила 28 февраля 2025 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.372.832.8

РАЗРАБОТКА ФЕРРИТОВОГО ЦИРКУЛЯТОРА С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ МОЩНОСТИ В ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

К. К. Фадеев, Е. И. Савельев

АО «НИИ «Феррит-Домен», г. Санкт-Петербург

Представлен ферритовый циркулятор с высоким уровнем мощности в дециметровом диапазоне длин волн для поверхностного монтажа с допустимой входной непрерывной мощностью СВЧ-сигнала до 1500 Вт. Проведены комплексный анализ, электродинамическое и тепловое моделирование прибора. Описаны конструкция циркулятора и применяемые технические решения. Изготовлен опытный образец. На базе разработки представлена линейка развязывающих приборов в диапазоне 200...600 МГц.

КС: ферритовый циркулятор, высокий уровень мощности, СВЧ

THE DEVELOPMENT OF A FERRITE CIRCULATOR WITH A HIGH POWER LEVEL IN THE DECIMETER RANGE

K. K. Fadeev, E. I. Savelyev

JSC «Research Institute «Ferrite-Domen», Saint-Petersburg

A ferrite circulator with a high power level in the decimeter wavelength range for surface mounting with an acceptable continuous input power of a microwave signal up to 1500 W is presented. A comprehensive analysis, electrodynamic and thermal modeling of the device were carried out. The circulator design and the applied technical solutions were described. A prototype was made. Based on the development a line of decoupling devices in 200...600 MHz range is presented.

Keywords: ferrite circulator, high power level, microwave

1. ВВЕДЕНИЕ

Ранее в АО «НИИ «Феррит-Домен» был реализован проект «Разработка узкополосных ферритовых циркуляторов высокого уровня мощности с полосковыми выводами для поверхностного монтажа» (далее по тексту – проект «Циркулятор») [1], в результате которого был получен ряд типовых ферритовых развязывающих устройств с рабочей непрерывной мощностью СВЧ-сигнала до 700 Вт. В качестве дальнейшего развития данного направления авторами была определена концепция по увеличению мощности СВЧ-сигнала в дециметровом диапазоне длин волн.

Цель работы – разработка циркулятора высокого уровня мощности (ВУМ) для поверхностного монтажа с новыми конструктивными и технологическими решениями, на основе ранее отработанных в рамках проекта «Циркулятор», для обеспечения рабочей непрерывной мощности не менее 1500 Вт (максимальное значение данного параметра будет определяться по результатам работы).

В процессе разработки используется отработанная методика проектирования ферритовых развязывающих приборов ВУМ с применением современных подходов и средств автоматизированного проектирования (САПР) для полного электродинамического, магнитного и теплового моделирования.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

При проектировании циркуляторов ВУМ накладываются ограничения, связанные с величиной рабочей средней и импульсной мощности. По результатам комплексного проекта «Циркулятор» [1] и данным из специализированной литературы [2], выделены следующие основные ограничения в допустимом уровне непрерывной СВЧ-мощности в ферритовых развязывающих устройствах:

- механическое разрушение феррита из-за нелинейного теплового расширения материала, вызванного неравномерным температурным распределением по его объему;
- значительное ухудшение основных электрических параметров изделия из-за температурного сдвига намагнитченности насыщения феррита, вызванного сильным разогревом из-за выделяемой тепловой энергии;
- уровень и способ отвода тепла от ферритовых дисков.

Неравномерное температурное распределение по ферриту – следствие низкой теплопроводности материала. Подходящие ферритовые материалы со значительно более высокой теплопроводностью отсутствуют. Наиболее простой вариант уменьшить неравномерность – это увеличение размеров феррита для распределения выделившейся тепловой энергии по большему объему.

Компенсация существенного температурного изменения намагнитченности насыщения ферритов затруднена и не оправдана, так как потребуются значительное количество термокомпенсирующего материала и большие усилия для отработки такой конструктивной схемы. Уменьшить разогрев ферритов можно за счет увеличения их диаметра, распределив выделившуюся энергию ВУМ СВЧ по большей площади пятна контакта с основанием для эффективного теплоотвода. Однако рост данного параметра ограничивается низкой теплопроводностью самих ферритов. Очевидным решением является уменьшение толщины ферритовых дисков, но в данном случае имеются дополнительные ограничения, связанные с электрической прочностью устройства и хрупкостью материала.

Применение гораздо более производительной жидкостной системы охлаждения приведет к значительному усложнению и удорожанию конструкции и не оправдано для приборов рассматриваемого уровня мощности. Но в отдельных случаях может стать хорошим решением при реализации нестандартных задач.

С учетом вышеизложенных ограничений увеличение допустимого уровня непрерывной мощности при сохранении требуемых основных электрических параметров невозможно с применением имеющихся технических решений. Следовательно, необходима разработка новой конструкции циркулятора с увеличенным диаметром ферритов.

3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Для определения оптимального размера ферритов проведен аналитический тепловой расчет методом электротепловой аналогии [3]. По полученным результатам расчетов и результатам проведения испытаний в проекте «Циркулятор» [1], при воздействии входной непрерывной СВЧ-

мощности в 700 Вт определена оптимальная геометрия ферритовых вкладышей для обеспечения основных электрических параметров циркулятора при входной мощности не менее 1500 Вт.

На следующем этапе построена электродинамическая модель циркулятора с учетом сформированной геометрии ферритов для синтеза конфигурации полоскового разветвления и определения величины внешнего поля подмагничивания H_0 , при которых достигаются оптимальные значения основных электрических параметров циркулятора.

Далее проведено трёхмерное магнитное моделирование в САПР для определения конструкции магнитной системы и вычисления предварительной геометрии постоянного магнита, обеспечивающей необходимую величину магнитного поля H_0 . Здесь важно учитывать, что для оптимальной работы циркулятора необходимо равномерное распределение напряженности магнитного поля по всему объему ферритовых дисков, что достигается близкими по значению размерами деталей в паре «феррит-магнит».

С учетом полученной геометрии ферритовых вкладышей, полоска и магнитной системы определяются габариты самого изделия и принципиальная конструкция прибора в целом, описываемая далее (рис.1).

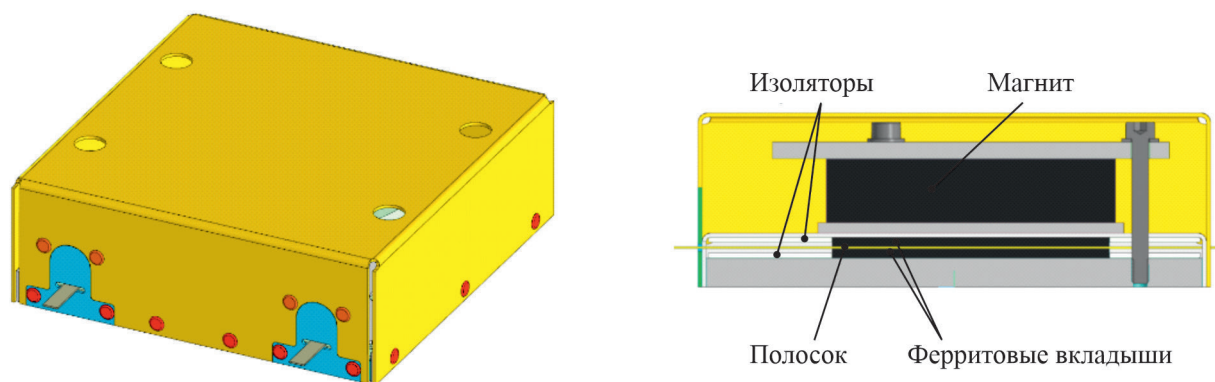


Рис.1. Разработанная типовая конструкция циркуляторов ВУМ на Y-разветвлении:

a – общий вид; *б* – поперечный разрез

Циркулятор выполнен на основе симметричной полосковой линии, образованной ферритовыми вкладышами и полосковым Y-разветвлением, заземленным через верхнее и нижнее основания.

Магнитная система циркулятора включает в себя постоянный магнит, магнитопровод, нижнее основание и полюсный наконечник. Для настройки величины напряженности магнитного поля в нижнем основании предусмотрены специальные пазы под стальные замыкатели.

Роль экрана, замыкающего силовые линии магнитного поля, выполняет крышка из листовой стали толщиной 1 мм.

Охлаждение прибора кондуктивное, через нижнее массивное основание, толщина которого подобрана для обеспечения равномерного отвода тепла от ферритов и механической жесткости общей сборки, а также для формирования изолированной по полю магнитной системы.

Разработанная конструкция унифицированная, позволяет использовать как полосковые выводы для поверхностного монтажа изделия, так и коаксиальные разъемы.

Вместе с увеличением размеров феррита и соответствующим изменением общих габаритов макета выполнен переход к новому типоразмеру разрабатываемых изделий: 124×124×42 мм без учета соединителей (см. рис. 1).

Отметим технологические особенности разработанной конструкции и организации процесса сборки изделий.

Здесь каждая деталь является в некотором роде элементом пространственного ориентирования для каждой последующей при изготовлении приборов. Такой принцип обеспечивает взаимную симметричность проводящей линии за счет плотно сопрягаемых деталей, что упрощает сборку, также снижается время на подготовительные операции и уменьшается процент брака.

Применяемая несимметричная магнитная система позволяет минимизировать количество составных деталей и использовать один цельный постоянный магнит. Такое решение обеспечивает непосредственный контакт основания циркулятора с ферритом, что значительно увеличивает интенсивность теплоотвода от ферритовых вкладышей.

На текущий момент в аналогичных по функционалу приборах для защиты проводящей линии от попадания посторонних частиц, а также снижения уровня паразитного СВЧ-излучения повсеместно используются металлические пластины или их вариации. Крепление таких щитков на корпусные элементы осуществляется в основном с помощью клеевого соединения. Отличительной особенностью представленной конструкции является отсутствие необходимости применения клеев, что значительно снижает потребность в человеческих ресурсах и повышает экологичность производства – не требуются особые условия труда для персонала при работе с вредными веществами, такими, как ацетон или бензин (с классом опасности 4) и эпоксидные клеи (с классом опасности 3). Вместо большого количества щитков применяются единые цельные скобяные элементы, изготавливаемые по технологии сгиба, которые затем крепятся посредством минимального количества винтов или заклепок к корпусу прибора.

Таким образом, за счет уменьшения количества деталей, проработки технологии сборки и отказа от клеевых соединений удалось значительно снизить трудоемкость при массовом производстве.

4. РАСЧЕТЫ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИГНАЛА ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

Для получения точной картины теплового распределения по всему объему прибора, и по ферритовым дискам в частности, проведен трёхмерный нестационарный тепловой анализ в специализированном САПР. Анализ проводился в предельно допустимом режиме эксплуатации разрабатываемого изделия, когда сигнал, проходя из плеча 1 в плечо 2, полностью отражается от выхода и идет в плечо 3 (режим КЗ: КСВН плеча 2 равен ∞). Отвод тепла задается через основание прибора (кондуктивное охлаждение), при этом в модели не учитывается передача тепла излучением. По полученному результату (рис. 2) определен максимальный разогрев ферритов и оптимальный уровень кондуктивного охлаждения (табл. 1).

Далее проводится оценка допустимой импульсной мощности устройства. Ее расчет представляет собой сложную электродинамическую задачу, решение которой требует знания полной структуры электромагнитного поля в исследуемом объеме. Аналитическое решение представляется возможным только для регулярных линий и элементарных неоднородностей, для которых были выведены и подтверждены экспериментально расчетные формулы [4]. Для получения картины поля в сложных структурах необходимо воспользоваться трёхмерным электродинамическим моделированием на ЭВМ.

Предельная импульсная мощность в полосковом циркуляторе ограничивается возможностью возникновения электрического пробоя в воздушных зазорах полоскового разветвления. Электри-

ческая прочность воздушного зазора зависит от расстояния между проводниками, конфигурации поля в зазоре, частоты приложенного поля и условий среды. Для пробоя промежутка между плоскими проводниками (с однородным полем) в воздухе при нормальных условиях нужна напряженность электрического поля порядка $3 \cdot 10^6$ В/м [4].

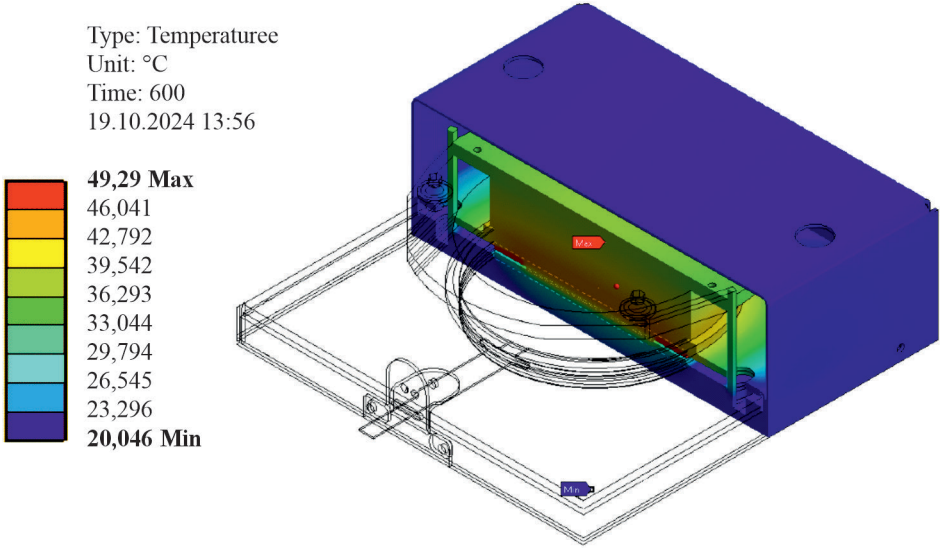


Рис. 2. Распределение температуры по объему изделия (разрез)

Таблица 1

Результаты теплового расчета

Входная средняя мощность, Вт	Максимальный разогрев ферритов, °C	Режим работы	Температурный перепад по ферриту, °C		Уровень кондуктивного охлаждения, Вт/см²
			верхний	нижний	
1500	28	КСВН плеча 2 равен ∞	10	10	1,5

В случае неоднородного поля вычисления производятся с помощью интегрирования. Также необходимо учесть фазы падающего и отраженного сигналов в предельном режиме работы. Для этого применяется специальная методика расчетов предельной импульсной мощности ферритовых развязывающих устройств с автоматической обработкой данных в программном пакете Matlab, разработанная в ходе проекта «Циркулятор». Алгоритм позволяет вычислить значение входной предельной импульсной мощности по распределению напряженности электрического поля на рассматриваемом участке между двумя проводящими частями полоскового разветвления или между полоском и корпусом циркулятора. К конечным результатам расчетов для соответствия реальным условиям эксплуатации изделия применяются коэффициенты запаса, учитывающие различные факторы технологического и климатического характера [4].

На рис. 3 приведены результаты электродинамического моделирования, по которым определены наиболее критические участки возможного электрического пробоя в продольной плоскости. В данном случае рассматриваются участки между согласующими емкостными элементами и центральным резонатором в плече 2 циркулятора, так как в предельном режиме работы именно в этом

плече возможно синфазное сложение проходящего и отраженного СВЧ-сигналов с наибольшей амплитудой. Для дополнительной изоляции резонатора в промежутки между проводящими частями добавляется кремнийорганический вазелин КВ-3/10Э.

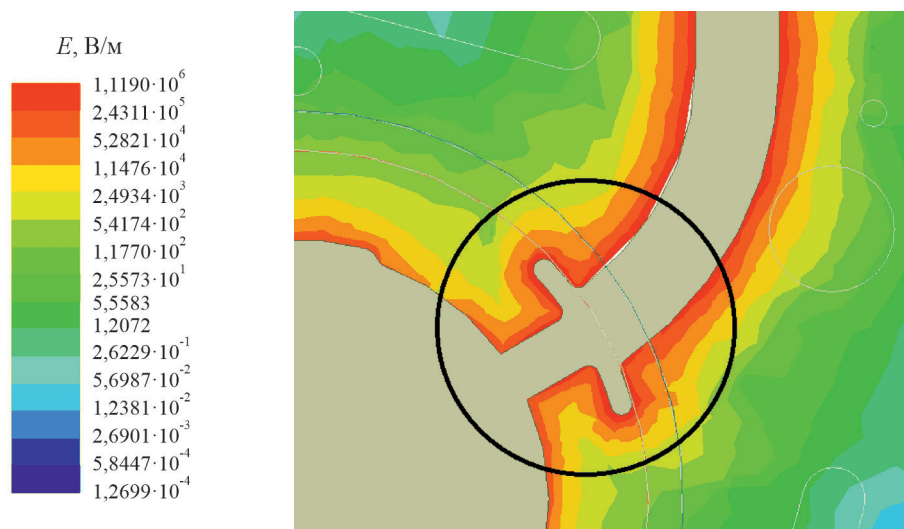


Рис. 3. Картина распределения линий напряженности электрического поля во втором плече циркулятора. Линией отмечен критический участок

В поперечной плоскости рассматриваются участки между центральным проводником и основаниями симметричной полосковой линии, для изоляции которых внесены слои из фторопласта толщиной 1 мм. Электропрочность слоя составляет 55 кВ/мм.

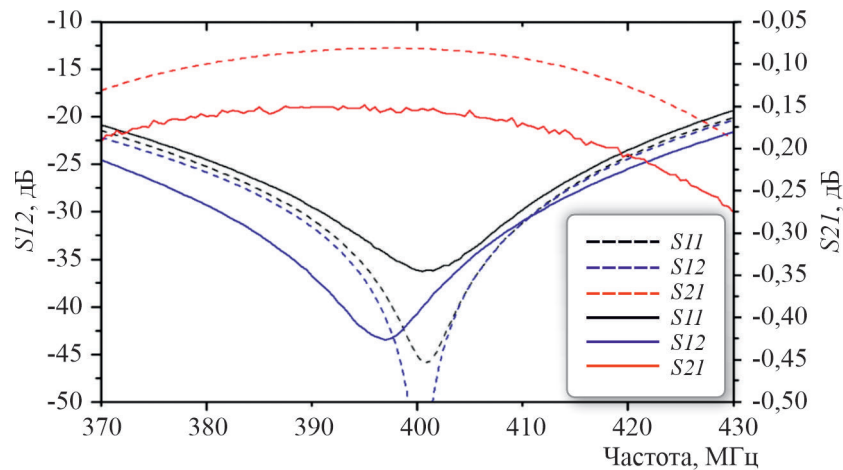
Следующие возможные критические области – это промежутки между выводами сигнала и корпусом изделия. Для полоскового исполнения прибора в плечах закладываются специальные диэлектрические изоляторы, при этом предельное значение импульсной мощности устройства составляет не менее 10 кВт в режиме КЗ. При применении коаксиальных разъемов максимально допустимая импульсная мощность ограничивается электропрочностью последних и однозначно может быть определена при проведении натурных испытаний.

5. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

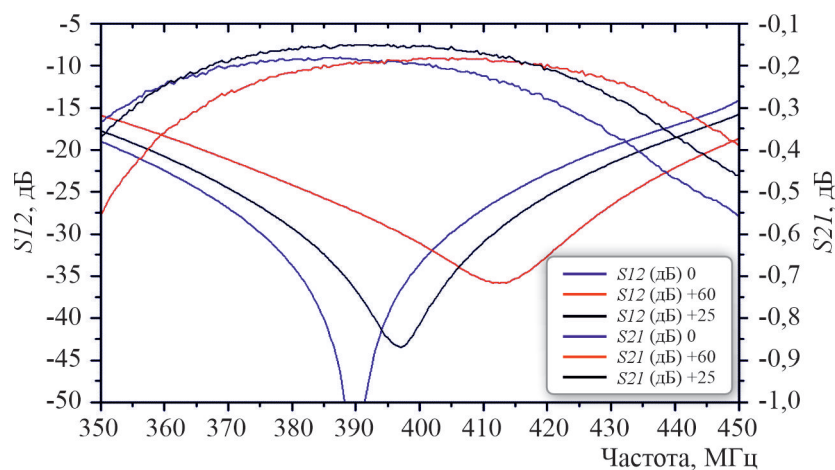
На основе полученных результатов комплексного моделирования и расчетов изготовлен первый макет устройства. В процессе его проработки и уточнения конфигурации полоскового разветвления достигнуты оптимальные значения основных электрических параметров в диапазоне частот 390...410 МГц (рис. 4).

Как видно из приведенных графиков, S -параметры макета и модели практически совпали. Небольшая разница в согласовании (S_{11} , S_{12}) связана с тем, что в реальном приборе имеется погрешность геометрии деталей и их взаимного расположения. Немного большее значение прямых потерь (S_{21}) связано с неидеальностью параметров ферритового материала и прочими факторами технологического характера при сборке и изготовлении составных компонентов изделия.

S -параметры циркулятора в рабочем диапазоне частот при нормальных климатических условиях: прямые потери S_{21} – не более 0,17 дБ; развязка S_{12} – не менее 31 дБ; потери на отражение S_{11} – не менее 29 дБ (соответствует КСВН плеча 1 не более 1,07).

Рис. 4. S -параметры модели (штриховая линия) и макета (сплошная линия)

На рис. 5 приведены результаты измерения основных электрических параметров макета при различных значениях температуры окружающей среды. Из полученных графиков видно, что с изменением температуры смещается центральная частота рабочего диапазона. В табл. 2 приведены значения основных электрических параметров прибора, обеспечиваемые в диапазоне частот 390...410 МГц при температуре 0...+60 °С. Для исключения влияния данного внешнего воздействующего фактора, в случае необходимости, можно добавить в магнитную систему прибора диски из термокомпенсирующего материала, от геометрии которых будет зависеть ширина рабочего температурного интервала.

Рис. 5. S -параметры макета при различных температурах окружающей среды

S -параметры циркулятора в рабочем диапазоне частот при температуре 0...+60 °С: прямые потери – не более 0,24 дБ; развязки – не менее 27 дБ; потери на отражение – не менее 27 дБ (соответствует КСВН плеча 1 не более 1,1).

Далее анализировалась возможность перестройки центральной частоты прибора для работы в других частотных диапазонах на дециметровых длинах волн. Без внесения изменений в конструкцию и компоненты циркулятора возможна перестройка в полосе частот от 350 до 450 МГц путем подбора намагниченности магнита в процессе настройки.

Таблица 2

Основные характеристики предлагаемой линейки изделий

Диапазон частот, МГц	Прямые потери (max), дБ	Развязка (min), дБ	КСВН (max)	КСВН (нт) (max)	Входная мощность, непрерывная*, Вт	Рабочая температура, °С
220 – 230	0,30	25	1,15	10	1500	0...+50
245 – 255	0,30	25	1,15	10	1500	0...+55
295 – 305	0,30	25	1,15	10	1500	0...+60
340 – 360	0,30	25	1,15	10	1500	0...+60
390 – 410	0,30	25	1,15	10	1500	0...+60
440 – 460	0,30	25	1,15	10	1500	0...+60
490 – 510	0,30	25	1,15	10	1500	0...+60
540 – 560	0,30	25	1,15	10	1500	0...+60
590 – 610	0,30	25	1,15	10	1500	0...+60

* Приведенные значения максимальной входной мощности соответствуют режиму КСВН (нт) ≥ 10 . В случае уменьшения данного параметра входная мощность может достигать 2500 Вт в непрерывном режиме с сохранением прочих параметров прибора.

На рис. 6 приведена часть результатов расчетов электродинамической модели с различной формой полоска и величиной напряженности подмагничивающего поля H_0 в ферритах. На основе данных оптимизации модели и полученных результатов отработки макета сформирована линейка изделий в новой типовой конструкции на рабочие частоты от 200 до 600 МГц с полосой от 10 до 20 МГц (см. табл. 2).

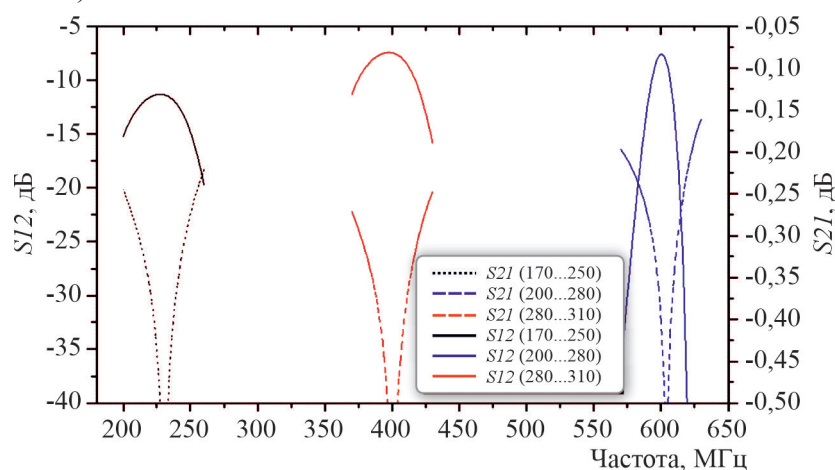


Рис. 6. S-параметры модели в различных диапазонах частот

Таким образом, обеспечивается высокая степень унификации изделия. В случае необходимости имеется возможность расширения рабочей полосы частот циркулятора, однако при этом увеличится значение прямых потерь в ферритах (что скажется на разогреве последних) и соответственно уменьшится величина допустимой непрерывной мощности. Если рассматривать применение приборов в трактах с импульсным сигналом и относительно высокими значениями скважности, то режимы эксплуатации по мощности могуткратно превосходить значения, рассчитанные в данной работе, при условии одновременного расширения рабочей полосы частот.

В результате отработки макета определена финальная конструкция прибора. Полученный опытный образец представлен на рис. 7. В случае необходимости по запросу конечного потребителя в плече 3 циркуляторов возможно размещение оконечной нагрузки с установкой радиатора воздушного охлаждения или без него (по желанию заказчика).

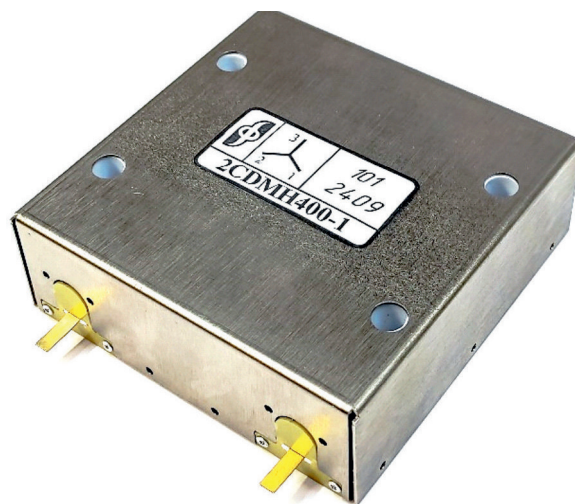


Рис. 7. Опытный образец циркулятора на диапазон частот 390...410 МГц с полосковыми выводами

6. ВЫВОДЫ

В результате работы была получена новая конструкция циркуляторов на уровень непрерывной мощности не менее 1500 Вт и отработана методика их проектирования.

Произведены аналитические и компьютерные электродинамические расчеты циркулятора.

Выполнено нестационарное трехмерное тепловое моделирование.

Произведен расчет предельной импульсной мощности специальной методикой.

Изготовлен опытный образец прибора в полосковом исполнении.

Проработана возможность работы изделия в соседних частотных диапазонах.

Предложен новый типоразмер ферритовых развязывающих устройств для поверхностного монтажа, ранее отсутствующий в номенклатуре выпускаемых изделий АО «НИИ «Феррит-Домен». Возможные варианты исполнения данного типа прибора в зависимости от диапазона частот будут отражены в новом разделе каталога выпускаемой продукции.

Достигнутые результаты в дециметровом диапазоне длин волн СВЧ-сигнала будут взяты за основу при разработке аналогичных устройств, работающих на частотах ниже 150 МГц, при аналогичных уровнях мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фадеев, К. К.** Разработка узкополосных ферритовых циркуляторов высокого уровня мощности с полосковыми выводами для поверхностного монтажа / К. К. Фадеев, В. Кислицын, Е. Савельев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2024. – Вып. 2 (562). – С. 38 – 47.
2. **Douglas, K.** Linkhart microwave circulator design / K. Douglas. – Second edition. «Artech House», 2014.
3. **Князев, А. Г.** Теплофизические основы современных высокотемпературных технологий: учебное пособие / А. Г. Князев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 357 с.
4. **Райцын, Д. Г.** Электрическая прочность СВЧ-устройств / Д. Г. Райцын. – «Советское радио», 1977.

Статья поступила 28 октября 2024 г.

УДК 621.3.049.77.029.64

УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В. А. Иовдальский, Н. В. Ганюшкина, К. В. Дудинов,
П. В. Фролов, П. А. Сторин

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

Рассмотрены современные конструкции усилителей отечественных и зарубежных разработчиков, выявлены их преимущества и недостатки. Представлена конструкция усилителя мощности СВЧ-диапазона с двухъярусным расположением кристаллов монолитных интегральных схем (МИС). Проведены расчеты тепловых возможностей для кристаллов МИС из GaAs и GaN, которые показали, что при постоянной мощности кристаллов 10 Вт обеспечивается эффективный теплоотвод, позволяющий добиться практически одинаковой температуры нагрева обоих кристаллов. Расчёты проводились для разной теплопроводности теплоотводящей пластины и разной ее толщины. Сравнение электрических характеристик двухъярусной конструкции гибридной интегральной схемы усилителя мощности с характеристиками аналогичной одноярусной конструкции подтверждает их улучшение. При этом двухъярусная конструкция обеспечивает существенное улучшение массогабаритных характеристик.

КС: усилитель мощности, кристалл монолитной интегральной схемы, двухъярусная конструкция, теплопроводность, электрические характеристики, хорошо теплопроводящая пластина, массогабаритные характеристики

IMPROVING THE DESIGN OF A MICROWAVE POWER AMPLIFIER

V. A. Iovdalskiy, N. V. Ganyushkina, K. V. Dudinov,
P. V. Frolov, P. A. Storin

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

Modern amplifier designs of domestic and foreign developers are considered, their advantages and disadvantages are revealed. The design of a microwave power amplifier with a two-tier arrangement of crystals of monolithic integrated circuit (MIC) is presented. The calculations of the thermal capabilities were conducted for GaAs and GaN MIC crystals which showed that at constant crystal power of 10 W the effective heatsink is ensured which makes it possible to achieve almost the same heating temperature for both crystals. Calculations were conducted for different thermal conductivity of the heat sink plate and its different thickness. A comparison of electrical characteristics of the two-tier design of the power amplifier hybrid integrated circuit with those of a similar one-tier design confirms their improvement. Besides, the two-tier design ensures significant improvement of weight and size characteristics.

Keywords: power amplifier, monolithic integrated circuit crystal, two-tier design, thermal conductivity, electrical characteristics, well heat-conducting plate, weight and size characteristics

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается увеличение потребности в бортовой радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) СВЧ-диапазона аэрокосмического и наземного базирования. Кроме того, следует отметить постоянное ужесточение требований к её электрическим и массогабаритным характе-

ристикам. Это привело к функциональному и конструктивному усложнению как самой РЭА, так и её составных частей. При создании РЭА СВЧ-диапазона важным и во многом определяющим направлением является совершенствование техники твердотельных усилителей мощности (УМ), в особенности их конструкции.

2. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ УМ

Анализ современных конструкций УМ показывает, что УМ по-прежнему изготавливаются в виде гибридных интегральных схем (ГИС) СВЧ-диапазона. При этом в качестве активных элементов в таких ГИС используются монокристаллические интегральные схемы (МИС) [1–4].

Так, в 2018 году в одной из отечественных организаций разработан УМ [1] с полосой рабочих частот 8...12 ГГц, выходной импульсной мощностью не менее 20 Вт, коэффициентом усиления 21 дБ, КПД не менее 30 %, напряжением питания 9 В, током питания не более 9 А. Габаритные размеры усилителя – 14,5×8,1×1,5 мм. Конструкция ГИС УМ представлена на рис. 1.

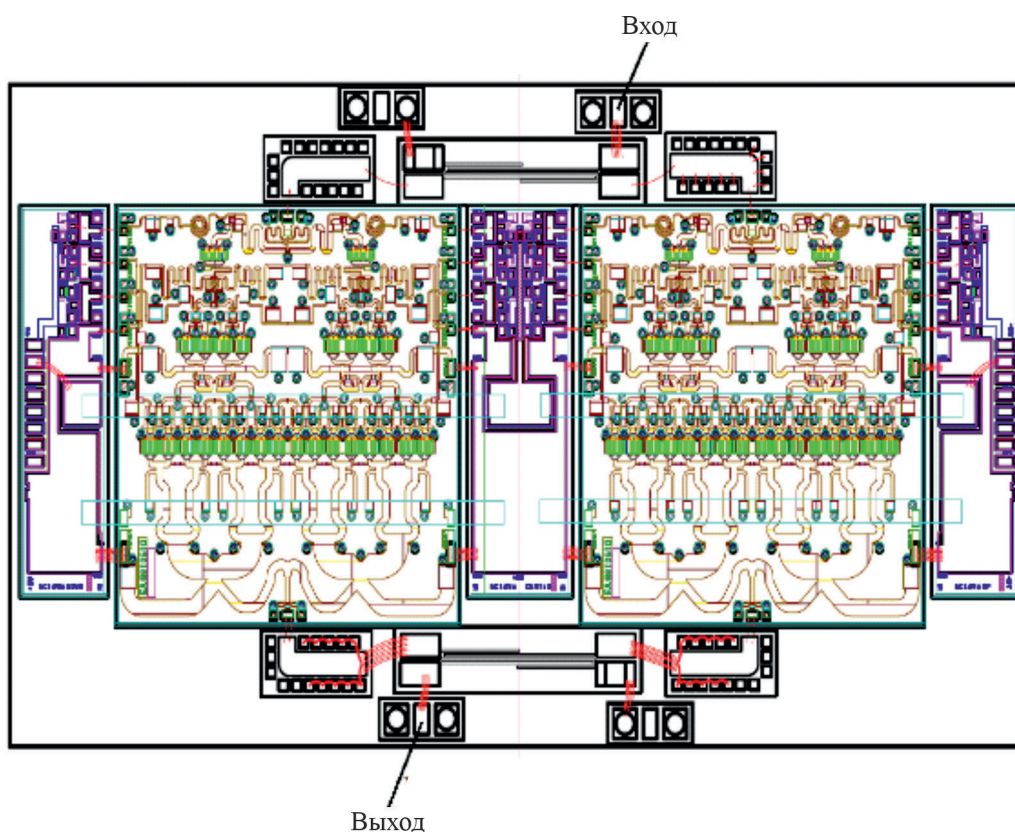


Рис.1. Одноярусная (плоскостная) конструкция усилителя СВЧ-диапазона

В ГИС используется суммирование мощности двух кристаллов GaAs МИС. Каждая МИС имеет трёхкаскадную структурную схему.

Первый (входной) каскад УМ содержит два транзистора, второй каскад – восемь и третий (выходной) каскад – шестнадцать. Сечение проводников на кристалле МИС увеличивается от первого до третьего каскадов пропорционально увеличению мощности проходящего по ним сигнала. Это необходимо для предотвращения выгорания проводников на кристалле МИС.

ГИС УМ состоит из металлического основания из сплава Al–SiC с платой делителя мощности в виде моста Ланге на входе усилителя, который делит входящий сигнал, подлежащий усилению, на равные части и подает на входы двух МИС. Входящие сигналы усиливаются в МИС и поступают на сумматор мощности (аналогичный делителю), где происходит сложение усиленных частей сигнала. Затем объединённый усиленный сигнал подаётся на выход усилителя. Питание кристаллов МИС УМ осуществляется с трёх плат питания: две из них расположены с внешних боковых сторон кристаллов МИС и одна плата – между кристаллами МИС на металлическом основании. Часть контактных площадок плат питания соединены между собой (для выравнивания потенциалов между цепями с одинаковыми функциями) специальными молибденовыми проводниками, расположенными над кристаллами МИС.

Такая конструкция имеет ряд недостатков: недостаточно высокие электрические характеристики, связанные с потерями мощности проходящего сигнала в схемах делителей и сумматоров мощности; использование проволочных соединительных проводников, обладающих большими паразитными ёмкостями и индуктивностями; большая площадь плат питания, что ухудшает массогабаритные характеристики усилителя; наличие громоздких молибденовых проводников, соединяющих однофункциональные контактные площадки схем питания.

В других публикациях [2–4] сообщается о разработке бортового 125-ваттного GaN-усилителя с полосой рабочих частот 17,3...20,2 ГГц для спутниковых линий связи, выполненной в рамках проекта FLEXGAN в 2023 г. компаниями TTI Norte, Tecnnalia, Macom European Semiconductor Center (бывшая компания OMMIC), Франция; главный заказчик разработки – AIRBUS Defense and Space SAS.

Необходимая мощность (125 Вт) усилителя достигалась суммированием мощности шестнадцати 10-ваттных МИС с усилением 24 дБ, имеющих трёхкаскадную схему (рис. 2).

Как видно из рис. 2, кристаллы МИС УМ выполнены со строго симметричной топологией, вход и выход УМ размещены в середине сторон кристалла. При сборке УМ кристаллы МИС устанавливались эвтектической пайкой в медные корпуса, имеющие герметичные НЧ- и СВЧ-выводы. Размеры готового усилителя – 316×232×84 мм, масса – 3,6 кг.

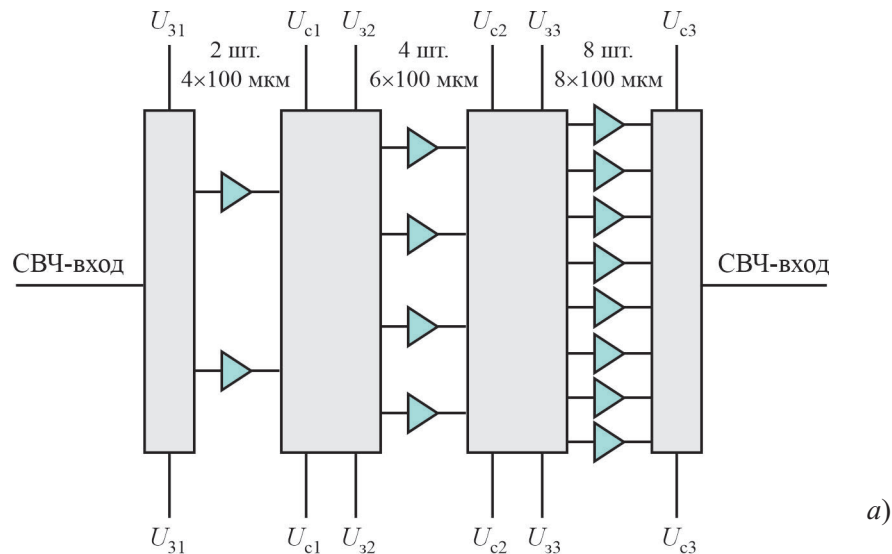


Рис. 2. Структурная схема (а) и готовая МИС (б)
УМ варианта AKILOS2 (см. также с. 53)

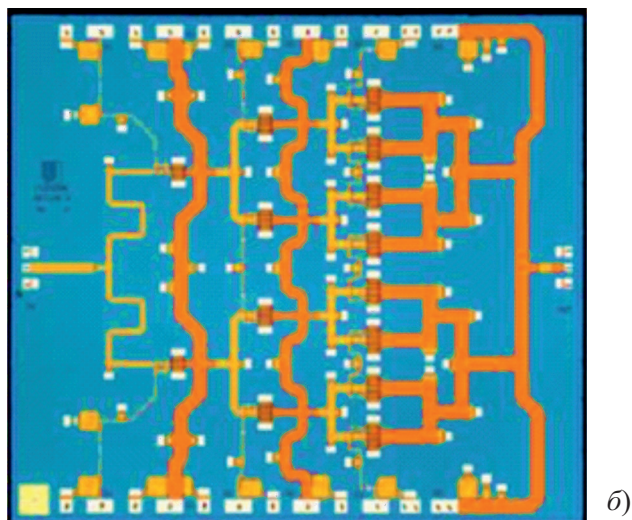


Рис. 2. Структурная схема (а) и готовая МИС (б)
УМ варианта AKILOS2

В компании Qorvo (США) разработан компактный корпусированный GaN/SiC усилительный модуль, обеспечивающий в непрерывном режиме при напряжении 32 В выходную мощность 42,7...60,3 Вт, КПД по добавленной мощности 30,4...42,9 % и усиление 23,3...24,8 дБ в полосе рабочих частот 1...6 ГГц [5]. Поскольку разработанный УМ предназначен для использования в РЭА систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ), радиолокации и связи, в том числе и военного назначения, то понятие «компактный усилительный модуль» приобретает важное значение. Размеры его корпуса в основании составляют 15,2×15,2 мм (рис. 3).

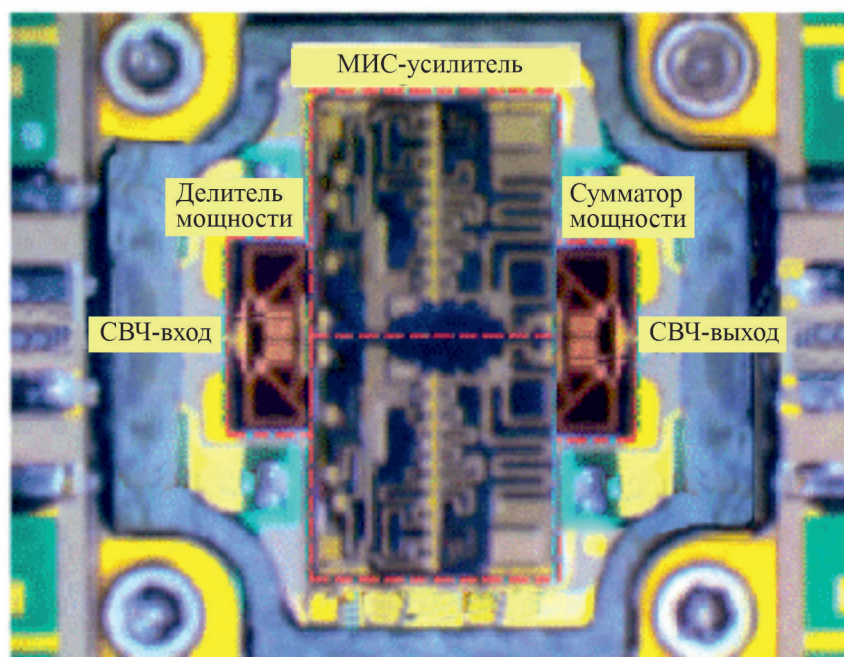


Рис. 3. GaN/SiC МИС-усилитель, установленный внутри корпуса
вместе с делителем/сумматором мощности

Кристаллы МИС УМ, изготовленные компанией Qorvo, имели размеры 5,4×5,3 мм. В корпусе установлено две одинаковые МИС с зеркальным отображением топологии на кристаллах. Их мощность суммируется на выходе с помощью сумматора, изготовленного на отдельном кристалле с размерами 1,8×4 мм. На таком же кристалле размещен делитель мощности, подключенный к входам МИС-усилителей. Модуль имеет 50-омные выводы.

Зеркальность топологии кристаллов в данном случае имеет важное значение, так как на этих кристаллах входы и выходы МИС-усилителей находятся близко к краям соприкасающихся сторон кристаллов МИС, а это способствует сокращению длины связей с делителем и сумматором мощности, а также сокращению длины проводников внутри схем делителя и сумматора мощности. Тем самым снижаются их паразитные ёмкости и индуктивности, а значит, улучшаются электрические характеристики УМ. Эти конструктивные особенности МИС, делителя и сумматора мощности проходящего сигнала и УМ СВЧ-диапазона в целом являются важным преимуществом такой конструкции ГИС.

При этом кристаллы МИС стараются подбирать с одинаковым сопротивлением для получения одинаковой проходящей по кристаллам мощности. Это обычно обеспечивается изготовлением кристаллов МИС на одной пластине. Однако в случае кристаллов с зеркальным отображением топологии это создаёт некоторые неудобства и имеет определённые сложности.

В УМ, приведенном на рис.4, применена двухкаскадная схема с распределёнными параметрами. Первый каскад МИС УМ содержит три усилительные ячейки, а второй каскад – десять.

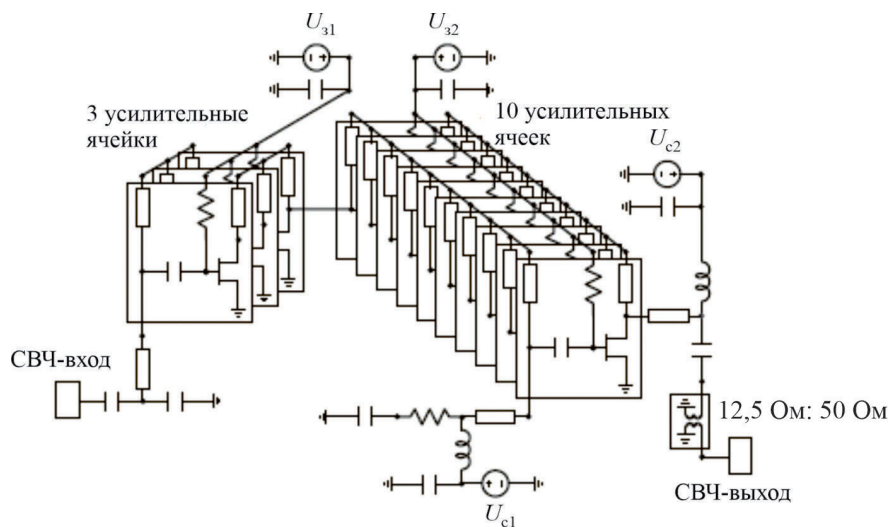


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема усилителя с распределёнными параметрами

Для улучшения массогабаритных характеристик усилителей в работе [6] предложен вариант компактного корпусирования – корпусирование GaN МИС УМ на уровне пластины с «разветвлением выводов» (*fan-out wafer level packaging, FOWLP*). Этот метод предполагает для защиты кристаллов МИС от механических повреждений использовать эпоксидный формовочный компаунд (*epoxy molding compound*), а для сигнальной трассировки применять многослойную структуру. Достоинствами корпусирования способом FOWLP являются устранение проволочных соединений и монтажной подложки, возможность использования кристаллов с воздушными мостами, а также свободный доступ к открытой металлизированной обратной стороне кристалла

для эффективного отвода от него тепла и улучшение электрических характеристик усилителя. Принцип корпусирования способом FOWLP поясняет рис. 5.

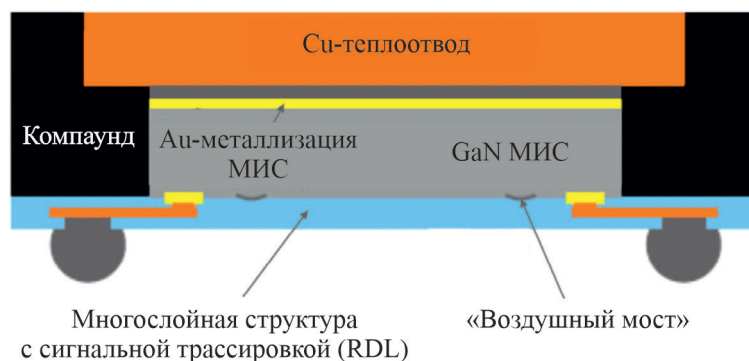


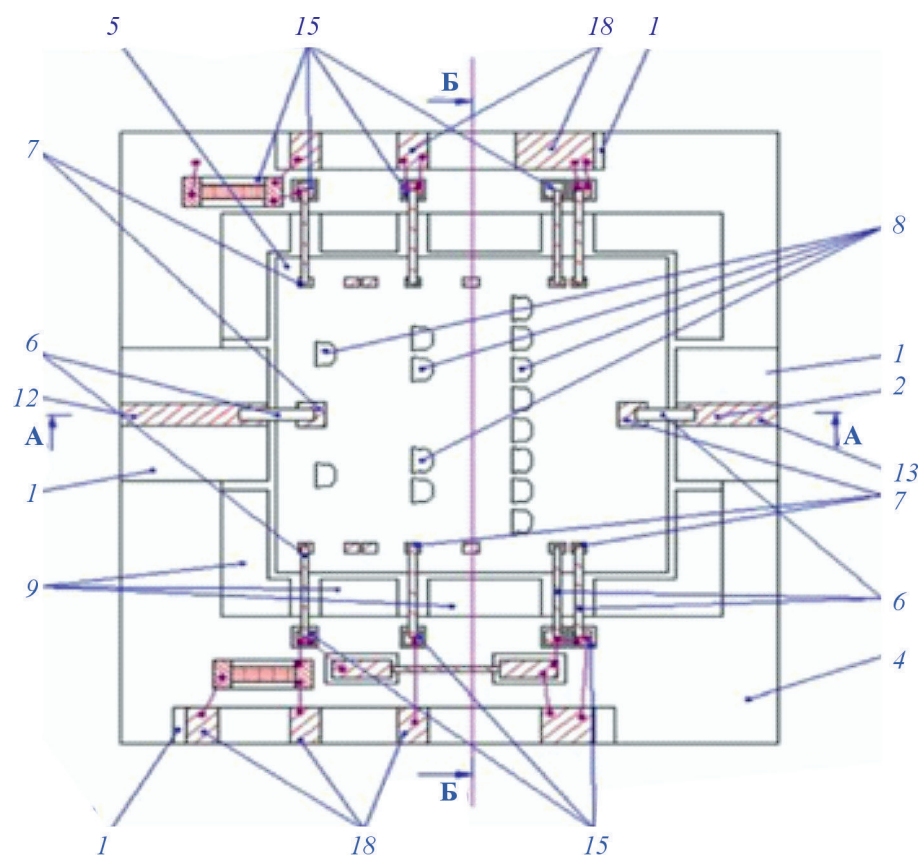
Рис. 5. Корпусирование GaN МИС способом FOWLP

Медный теплоотвод прикрепляется прямо к металлизации обратной стороны кристалла, и всё вместе погружается в эпоксидный формовочный компаунд. Электрическое подключение схемных элементов, размещённых на лицевой стороне МИС, осуществляется через многослойную структуру, состоящую из диэлектрических слоёв и медных линий, соединённых с контактными площадками с помощью микронных отверстий. Монтаж корпусированной GaN МИС на печатную плату выполняется обычным способом с помощью контактных шариковых матриц. Общие размеры корпуса в опытном образце GaN МИС-усилителя составили 7,1×4,7 мм.

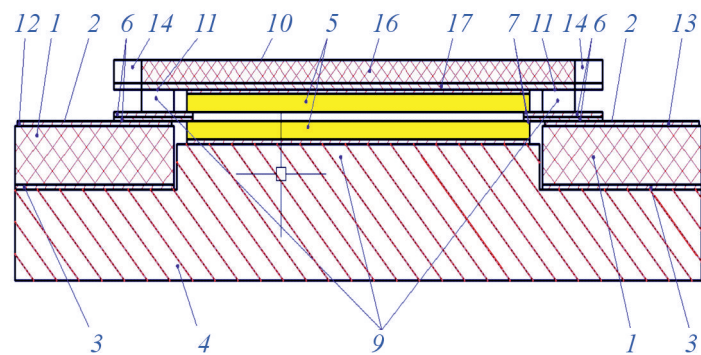
3. ДВУХЪЯРУСНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ГИС УМ

Целью разработки двухъярусной конструкции усилителя мощности является улучшение его электрических и массогабаритных характеристик. Ещё в 2005 – 2006 гг. возникла новая концепция сложения мощности кристаллов полупроводниковых приборов СВЧ-диапазона [7]. Ужесточение требований к электрическим и массогабаритным характеристикам РЭА и её составных частей, в том числе УМ, послужило причиной вспомнить о возможности двухъярусного расположения кристаллов в ГИС. Так появилась конструкция УМ с двухъярусным расположением МИС [8], представленная на рис. 6.

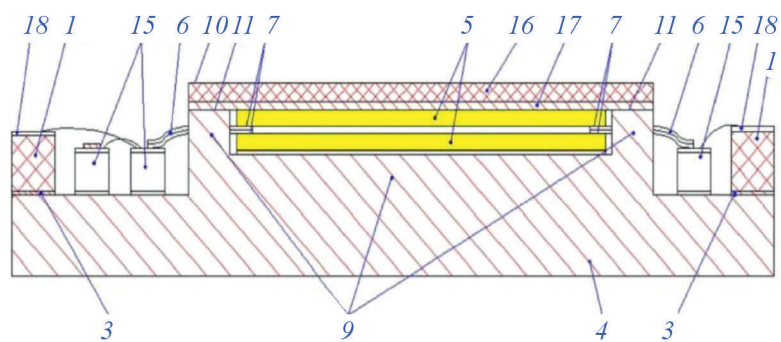
Двухъярусная конструкция ГИС УМ [8] содержит диэлектрическую подложку с топологическим рисунком на лицевой и экранной заземляющей металлизацией на обратной стороне. Подложка размещена обратной стороной на теплоотводящем основании и соединена с ним заземляющей металлизацией. Два кристалла МИС УМ с плоскими балочными выводами соединены как с контактными площадками на их лицевой стороне, так и между собой. Каждый из кристаллов МИС включает в себя транзисторы. На теплоотводящем основании 4 (см. рис. 6) выполнен выступ 9, высота которого обеспечивает расположение лицевой стороны нижнего кристалла МИС в одной плоскости с лицевой стороной диэлектрической подложки. Часть балочных выводов соединена с топологическим рисунком металлизации. Верхний кристалл МИС соединен обратной стороной с пластиной 10, выполненной из электро- и теплопроводящего материала. Края пластины выступают за пределы второго (верхнего) кристалла МИС. На верхней плоскости выступа 9 основания с двух сторон нижнего кристалла МИС выполнены монтажные площадки 11. Кристаллы МИС расположены лицевыми сторонами друг к другу. На одной части диэлектрической подложки расположена входная линия передачи входного СВЧ-сигнала, а на другой – выходная линия



A-A



Б-Б



a)

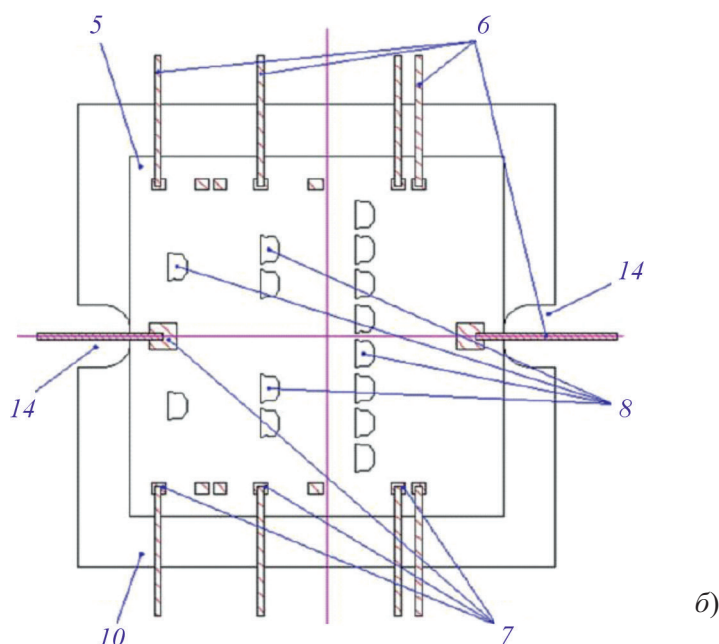


Рис. 6. Конструкция ГИС УМ с двухъярусным расположением МИС:

а – ГИС без МИС верхнего яруса и пластины из электро- и теплопроводящего материала; *б* – пластина из хорошо электро- и теплопроводящего материала с верхним кристаллом МИС УМ; 1 – диэлектрическая подложка; 2 – топологический рисунок металлизации; 3 – экранная заземляющая металлизация; 4 – металлическое теплопроводящее основание; 5 – кристаллы полупроводниковых приборов (МИС УМ); 6 – плоские балочные выводы; 7 – контактные площадки кристалла полупроводникового прибора (МИС УМ); 8 – транзисторы; 9 – выступ на металлическом теплопроводящем основании; 10 – пластина из электро- и теплопроводящего материала; 11 – монтажные площадки на верхней плоскости выступа металлического основания; 12 – входная линия передачи; 13 – выходная линия передачи; 14 – выборки на краях пластины из электро- и теплопроводящего материала; 15 – дополнительные компоненты; 16 – диэлектрик с теплопроводностью, большей, чем у металлов; 17 – металлизационное покрытие пластины из диэлектрика; 18 – контактные площадки для соединения с внешними устройствами

передачи выходного СВЧ-сигнала. Теплопроводящая пластина имеет толщину от 0,1 до 0,5 мм, при этом её края фиксируются на монтажных площадках, размеры которых варьируются от 0,3×0,3 мм до 3,0×5,0 мм. Эти площадки располагаются по периметру кристалла МИС. Высота выступа 9 металлического основания в местах расположения монтажных площадок 11 увеличена до краёв пластины 10. На краях электро- и теплопроводящей пластины, в местах расположения балочных выводов, а также входной и выходной линий передачи СВЧ-сигнала, выполнены выборки глубиной до кристаллов МИС УМ. На металлическое основание с двух сторон от кристаллов МИС УМ установлены дополнительные компоненты, образующие цепи их питания, электрически соединённые с балочными выводами кристаллов МИС и между собой.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХЪЯРУСНОЙ КОНСТРУКЦИИ УМ

Исследование тепловых характеристик двухъярусной конструкции выполнено с использованием программы трёхмерного моделирования [9]. Исследование проводилось расчётным ме-

тодом для варианта с выделением мощности 10 Вт с каждого кристалла МИС. Результаты исследований представлены в таблице.

Значения максимальной температуры, °С, для нижнего (числитель) и верхнего (знаменатель) кристаллов из GaN и GaAs в зависимости от теплопроводности и толщины пластины 10

Толщина теплоотводящей пластины 10 (см. рис. 6), мм	Теплопроводность, Вт/(м·К)				
	250	500	750	1000	2000
Кристалл из GaAs					
0,20	3,85/24,99	3,83/15,22	3,81/11,68	3,79/9,02	3,76/7,00
0,35	3,83/17,05	3,79/10,78	3,78/8,55	3,75/7,38	3,73/6,05
0,50	3,81/13,67	3,76/8,92	3,75/7,31	3,74/6,68	3,71/5,64
Кристалл из GaN					
0,20	3,34/22,56	3,29/10,05	3,27/7,93	3,26/6,80	3,25/6,31
0,35	3,31/15,80	3,28/10,05	3,26/7,93	3,25/6,80	3,22/4,99
0,50	3,29/12,76	3,27/8,29	3,25/6,66	3,24/5,81	3,20/4,53

Вариантами исследования являлись: изменение теплопроводности теплопроводящей пластины 10 от 250 до 2000 Вт/(м·К), а также её толщины от 0,2 до 0,5 мм. Таблица содержит сведения о значениях максимальных температур для нижнего и верхнего кристаллов МИС УМ для разных материалов (GaAs и GaN). Поскольку при расчётах температура нижней поверхности основания 4 (см. рис. 6) предполагалась равной 0 °С, это позволило оценивать полученные температуры как перепады температур относительно металлического основания. На рис. 7 представлены зависимости температурного перепада от теплопроводности теплопроводящей пластины 10.

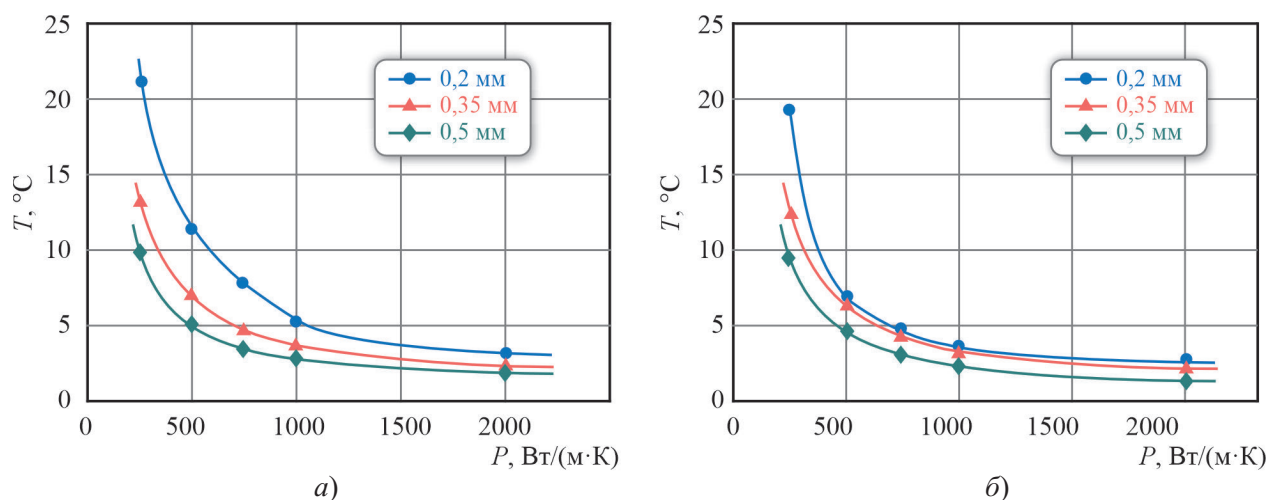


Рис.7. Зависимости температурного перепада между максимальными значениями на верхнем и нижнем кристаллах МИС из GaAs (а) и GaN (б) от теплопроводности теплопроводящей пластины 10 для трёх толщин пластины (от 0,2 до 0,5 мм) и пяти значений её теплопроводности (от 250 до 2000 Вт/(м·К))

При этом, согласно данным [8], теплопроводность 250 Вт/(м·К) соответствует теплопроводности псевдосплава МД-50, а теплопроводность от 500 до 2000 Вт/(м·К) соответствует алмазу [10]. Расчёты проводились с условием, что площади теплоотводящих контактов от обоих кристаллов равны, то есть площадь нижнего кристалла равна сумме площадей всех монтажных площадок на верхней плоскости выступа металлического основания, контактирующих с пластиной 16 (из диэлектрика с теплопроводностью, большей, чем у металлов, т. е. из алмаза толщиной 0,2...0,5 мм).

5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При двухъярусном расположении кристаллов МИС они обращены друг к другу тепловыделяющими поверхностями. Казалось бы, это должно приводить к тому, что кристалл с большей температурой (верхний кристалл) будет нагревать нижний кристалл. Исследование показало, что это не происходит. Причиной является наличие воздушного зазора, равного двойной толщине балочных выводов и являющегося теплоизолятором, а также небольшая разница температур кристаллов. Максимальная разница температур нагрева верхнего и нижнего кристаллов МИС получается при толщине теплопроводящей пластины 10 из псевдосплава МД-50 0,2 мм и составляет для кристаллов из GaAs всего 21 °С. А минимальная разница равна 1,33 °С при толщине пластины 0,5 мм, выполненной из алмаза с теплопроводностью 2000 Вт/(м·К), для кристаллов МИС, выполненных из GaN. Из таблицы видно, что увеличение теплопроводности пластины 10 до 2000 Вт/(м·К) ведёт к уменьшению температуры верхнего кристалла МИС в 3-4 раза, в то время как температура нижнего кристалла практически не изменяется. Для надёжной работы УМ важно равенство мощностей сигналов, проходящих через кристаллы, как в однослойной конструкции ГИС УМ, так и при двухъярусной конструкции. В связи с этим стараются использовать кристаллы МИС, изготовленные на одной полупроводниковой пластине. В этом случае обеспечивается равенство их сопротивлений, а значит, и равенство мощностей сигналов, проходящих по кристаллам, в особенности при равенстве их температуры.

Оценка улучшения электрических характеристик двухъярусного УМ, по сравнению с характеристиками однослойного [1], предполагает, что за счёт исключения плат делителя и сумматора мощности, а также четырёх соединительных плат и проволочных соединений между ними заметно уменьшатся потери мощности проходящего сигнала, а это улучшит электрические характеристики. Кроме того, значительно уменьшилась площадь, занимаемая УМ (с 117,45 до 75,33 мм², то есть на 36 %), при незначительном увеличении его толщины (на 0,3 мм) и толщине теплоотводящей пластины 0,5 мм.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная конструкция УМ СВЧ-диапазона с двухъярусным расположением кристаллов МИС УМ, соединением их однофункциональных балочных выводов между собой и теплоотводом от верхнего кристалла МИС через хорошо теплоотводящую пластину из алмаза обеспечила улучшение электрических характеристик за счёт исключения делителя входного сигнала на входе усилителя и сумматора сигнала на его выходе. Кроме того, двухъярусная конструкция УМ по отношению к аналогичной серийно выпускаемой плоскостной (одноярусной) позволила существенно (на 36 %) сократить площадь, занимаемую УМ, при незначительном (на 0,3 мм) увеличении толщины усилителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка и освоение серийного производства двух литер сверхвысокочастотных усилителей мощности с полосами не более 1 октавы в диапазоне частот 8...12 ГГц с выходной мощностью 4 и 12 Вт и повышенным коэффициентом полезного действия до 35 %: технический проект на ОКР / Н. И. Заднепрная – РПГ.434816.129ТП, 2018.
2. An efficient and linear SSPA with embedded power flexibility for *Ka*-band downlink SatCom applications / R. Giofre, L. Cabria, Remy Leblanc [et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techiques. – 2024. – Vol.72, No 1. – P. 563 – 574.
3. Презентация проекта «FLEXGAN – *Ka*-band GaN based SSPA for flexible payloads and multicarrier operations for 5G satellite concept». – November 19th, 2019.
4. A GaN – based solid state power amplifier for satellite communications / R. Giofre, L. Cabria, R. Leblance [et al.].
5. A 50W CW 1–6 GHz GaN MMIC power amplifier module with greater than 30 % power added efficiency / M. Roberg J. Zhang, R. Flynt, M. Irvine // IEEE/MTT-S International Microwave Symposium. – 2022. – P. 426 – 428.
6. Fan-out wafer level packaging of GaN traveling wafer amplifier / D. Schwantuschke, Erdin Ture, Tanja Braun, T. D. Nguyen // Proceedings of the IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – 2022. – P. 579 – 582.
7. **Иовдальский, В. А.** Новая концепция сложения мощности кристаллов ПТШ в ГИС усилителей мощности СВЧ-диапазона / В. А. Иовдальский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2006. – Вып.1 (487). – С. 44 – 51.
8. **Патент № 2817537 РФ, МПК Н 01 L 25/11, МПК Н 01 L 27/12, Н 05 К 1/18.** Мощная гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона: приоритет 19.12.2023; опубл. 16.04.2024; бюл. № 11 / В. А Иовдальский, К. В. Дудинов, Н. В. Ганюшкина.
9. **Алямовский, А. А.** Solid Works Simulanion. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 562 с.
10. **Васильев, А.** Новое поколение полупроводниковых материалов и приборов / А. Васильев, В. Данилин, Т. Жукова // Электроника. – 2007. – № 4. – С. 68 – 76.

Статья поступила 29 октября 2024 г.

ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.032.21

О ТОКОВОЙ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ

П. М. Мелешкевич

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

Рассмотрены основные характеристики и причины деградации автоэмиссионных катодов, а также физика процессов, протекающих на поверхности эмиттера в рабочем режиме с образованием локальных эмиссионных центров. Введено понятие токовой эрозии поверхности эмиттера и предложена ее физическая модель. Предложены основные критерии, позволяющие проводить сравнительный анализ скорости токовой эрозии для эмиттеров из различных материалов.

КС: автоэмиссионный катод, микровакуумные приборы, приборы СВЧ с полевым катодом, деградация автоэмиссионных катодов

ON CURRENT EROSION OF THE SURFACE OF AUTO-EMISSION CATHODES

P. M. Meleshkevich

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

The main characteristics and causes of degradation of auto-emission cathodes are considered, as well as the physics of processes occurring on the emitter surface in the operating mode with the formation of local emission centers. The concept of current erosion of the emitter surface is introduced and its physical model is proposed. The main criteria are proposed that allow to make a comparative analysis of the current erosion rate for emitters made of various materials.

Keywords: auto-emission cathode, microvacuum devices, microwave devices with a field-effect cathode, degradation of auto-emission cathodes

1. ВВЕДЕНИЕ

Идеи создания СВЧ-прибора на автоэмиссионном катоде (АК) будоражат умы разработчиков уже многие десятилетия. Феноменальный эффект – холодная эмиссия электронов в сильном электрическом поле с неудержимой силой привлекает к себе все новые поколения молодых исследователей. Работы по микровакуумным приборам и СВЧ-приборам О-типа с АК включаются в стратегические программы исследований [1]. Защищаются многочисленные кандидатские и докторские диссертации по созданию новых типов АК. Проводятся работы по созданию микровакуумных триодов и приборов СВЧ О-типа.

Наибольшие ожидания по применению АК в микровакуумных триодах, ЛБВ и клистронах просматривались в конце прошлого века после разработки в 1973 – 1976 гг. конструкции и технологии изготовления матричного катода Спиндта (рис. 1, а) [2]. Разработанная технология обеспечивала создание катода, состоящего из нескольких тысяч эмиттеров. Это позволяло мак-

симально уменьшить ток с единичного эмиттера и повысить долговечность катодов. На базе катодов Спиндта начались разработки микровакуумных триодов (рис. 1, б), ЛБВ и клистронов.

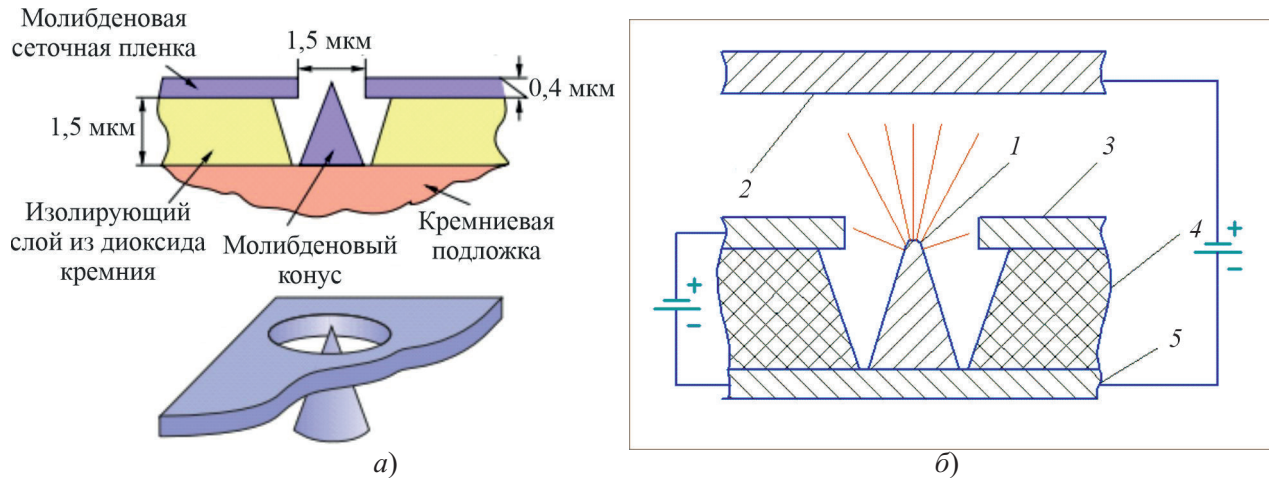


Рис. 1. Схематическое изображение катода Спиндта (а) и конструкция ячейки микровакуумного триода (б):
1 – катод; 2 – анод; 3 – сетка; 4 – изолятор; 5 – подложка

В части микровакуумных приборов считалось, что важнейшим их преимуществом перед полупроводниковыми приборами является радиационная и термическая стойкость, что открывает такие сферы использования, как космическая и военная техника, контроль ядерных реакторов, реакторы управления и синтеза, контроль ракетных двигателей, управление геотермальными скважинами т. п. [3].

Для электровакуумных приборов СВЧ применение АК обеспечивает мгновенное время готовности.

По данной тематике опубликовано огромное количество работ, имеются также хорошие обзорные работы. Так, в работе [4] показаны результаты в области микровакуумных приборов и приборов СВЧ с АК, достигнутые примерно за 35 лет. В работе [5] дано современное состояние в области разработки АК, описаны их основные характеристики и механизмы деградации.

Однако следует отметить, что, несмотря на многолетние усилия, нет заметных успехов в части применения АК в микровакуумных приборах и приборах СВЧ О-типа. Промышленные типы микровакуумных приборов отсутствуют. В большинстве публикаций по этому направлению в основном приводятся вольт-амперные характеристики диодных и триодных систем разных конструкций с различными типами АК.

В части ЭВП СВЧ наилучшим достижением можно считать создание экспериментального образца ЛБВ с катодом Спиндта, с выходной мощностью до 100 Вт в С-диапазоне, которая проработала в течение 150 ч [6]. Полученный экспериментальный образец ЛБВ по техническим параметрам значительно уступает серийным образцам ЛБВ этого диапазона как по долговечности, так и по выходной мощности. Промышленные образцы ЭВП СВЧ О-типа с АК также отсутствуют.

Отрицательные результаты многолетних настойчивых попыток использования АК в приборах СВЧ заставляют задуматься, что же мешает их практическому применению? И какими свойствами должны обладать АК для их практического использования? Чтобы разобраться с этими вопросами, следует рассмотреть основные характеристики и основные причины деградации АК.

2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОЭМИССИОННОГО КАТОДА

2.1. Основным параметром АК является его эмиссионная характеристика. Ток автоэлектронной эмиссии имеет экспоненциальную зависимость от напряженности электрического поля и работы выхода [2]:

$$J = A \frac{E^2}{\phi} \exp\left(-\frac{B\phi^{3/2}}{E}\right),$$

где J – плотность тока автоэмиссии; А/мкм²; E – напряженность электрического поля, В/мкм; ϕ – работа выхода, эВ; A и B – коэффициенты, связанные с конструкцией катода.

Как следствие, ток АК может очень сильно меняться при изменении размеров эмиттера и его работы выхода.

2.2. Ток АК нестабилен в течение времени и имеет значительный уровень пульсаций различной формы (рис. 2). Пульсации могут быть как шумового характера, так и содержать выраженные релаксационные колебания, иметь резкие броски и провалы тока. С увеличением плотности тока уровень пульсаций увеличивается.

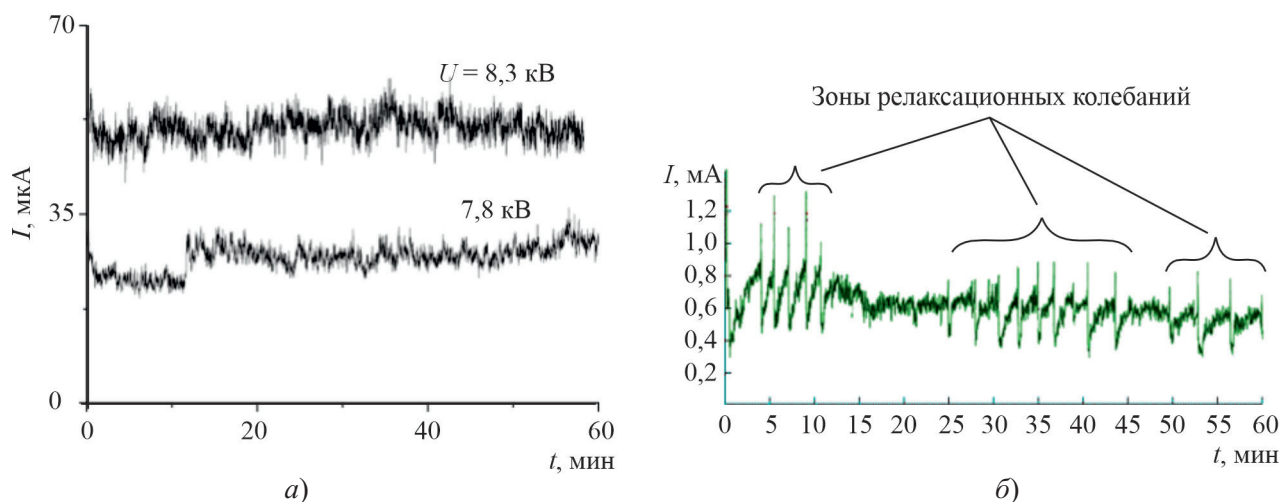


Рис. 2. Зависимости тока эмиссии АК от времени работы:

a – катод из кремния с металлфуллереновым покрытием [7]; *б* – вольфрамовый катод [8]

2.3. АК работают в режиме полевой эмиссии только при сравнительно небольших токах. При увеличении тока происходит разогрев острия АК, и он переходит в режим автотермоэмиссии. Чем меньше размеры острия АК и чем меньше электрическая проводимость материала эмиттера, тем быстрее он переходит в режим автотермоэмиссии с ростом тока.

2.4. Очень важным параметром АК является его долговечность. В литературе публикуются противоречивые данные по этому параметру. Например, в работе [5] приводятся данные по стабильной работе АК из стеклоуглерода СУ-2000 в течение 2000 ч. В работе [8] для АК из этого же материала отмечается падение тока с 300 до 100 мкА в течение 5 ч.

Долговечность АК чрезвычайно сильно зависит не только от материала АК, но и от режима испытания. При малом токоотборе, непрерывной откачке (обеспечивающей высокий вакуум) и низких рабочих напряжениях (при которых не возникает ионной бомбардировки и электрических пробоев) фиксируется стабильность тока в течение нескольких тысяч часов. Любое нарушение этих условий приводит к быстрой деградации АК.

Многие разработчики АК избегают предоставлять результаты испытаний на долговечность. Например, в работе [7], посвященной разработке АК для высоковольтных электронных устройств, приводятся данные по наработке в течение всего лишь 180 мин. И это далеко не единичный случай. Однако сам факт непредоставления таких результатов (а организация испытаний на несколько сотен часов не представляет собой никаких проблем) вызывает законные подозрения в стабильности полученных результатов.

В целом можно отметить, что отсутствие промышленных образцов СВЧ-приборов с АК не позволяет достоверно оценить их долговечность в реальных условиях эксплуатации.

3. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ АВТОЭМИССИОННОГО КАТОДА

Под деградацией АК здесь подразумевается изменение эмиссионного тока в процессе эксплуатации. В литературе, как правило, указывается, что деградация параметров АК происходит за счет ионной бомбардировки, электрических пробоев, а также деформации эмиттера в сильном электрическом поле [5].

3.1. Ионная бомбардировка. Ионная бомбардировка катода возникает в электровакуумных приборах при наличии остаточного газа, который ионизируется потоком электронов. Ионная бомбардировка приводит к распылению острия АК. Скорость разрушения острия возрастает при ухудшении вакуума в устройстве и увеличении рабочего напряжения. Распыление острия АК приводит к падению тока.

Кроме того, при ионной бомбардировке на острие эмиттера адсорбируются атомы внутривакуумных газов, что приводит к изменению его работы выхода. Это также приводит к изменению тока АК [5].

Ряд авторов считают ионную бомбардировку основной причиной деградации АК и для увеличения их долговечности направляют усилия на создание АК из материалов, устойчивых к ионной бомбардировке [7].

3.2. Электрические пробой. АК работают при напряженности электрического поля порядка $10^7 \dots 10^8$ В/см. При такой напряженности существуют различные механизмы развития электрических пробоев между электродами [9–11], и большинство авторов, работающих с АК, указывают на эту проблему. Электрический пробой сопровождается резким увеличением тока и может привести к разрушению эмиттера. Мощность пробоев возрастает с увеличением напряжения между электродами, поэтому наиболее опасные пробой – это пробой между эмиттером и анодом, которые могут привести к полному выгоранию катодного модуля.

При работе с АК обязательно применение быстродействующих защитных устройств, ограничивающих ток пробоя и предотвращающих разрушение АК при пробоях.

3.3. Деформация эмиттера в электрическом поле. Процессы, связанные с изменением геометрических размеров эмиттера в сильном электрическом поле, детально исследованы для диодных структур [9, 10].

При нахождении эмиттера в сильном электрическом поле происходит удлинение и заострение эмиттера за счет поверхностной диффузии атомов. Удлинение эмиттера, в свою очередь, сопровождается увеличением напряженности электрического поля, что приводит к увеличению тока эмиттера, разогреву как самого эмиттера, так и анода. Это сопровождается ухудшением вакуума. Постепенно эти процессы принимают лавинообразный характер и завершаются развитием электрического пробоя и выгоранием эмиттера.

В триодных системах (типа катода Спиндта) структура электрического поля иная. Расчеты показывают, что в катоде Спиндта при определенной длине эмиттера напряженность электрического поля на его вершине достигает максимума и быстро уменьшается с дальнейшим увеличением длины эмиттера. Поэтому в катоде Спиндта не происходит неконтролируемый рост длины эмиттера с его последующим разрушением.

Кроме перечисленных механизмов деградации, по мнению автора, существует еще один механизм деградации АК, связанный с эрозией (распылением) его поверхности при прохождении тока автоэмиссии. Для пояснения этого механизма целесообразно более подробно рассмотреть явление поверхностной диффузии атомов в электрическом поле.

4. О ПОВЕРХНОСТНОЙ ДИФФУЗИИ АТОМОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

При подаче напряжения на электроды на поверхности анода формируется положительный заряд, на поверхности катода – отрицательный, при этом между электродами возникают электрическое поле E_0 и сила притяжения между электродами (рис. 3), которая при больших значениях напряженности поля может привести к механической деформации обоих электродов.

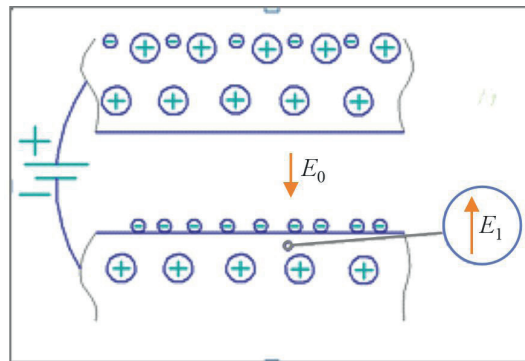


Рис. 3. Структура электрического поля в прикатодной области

Кроме того, на катоде возникает электрическое поле E_1 между поверхностным слоем атомов кристаллической решетки и зарядом электронов, расположенных на поверхности электрода. Поскольку расстояние между этими зарядами очень мало, то напряженность электрического поля E_1 может значительно превышать напряженность электрического поля E_0 , особенно на микрошероховатостях поверхности катода. Под действием суммарного электрического поля $E_0 + E_1$ будет происходить деформация атомов кристаллической решетки катода, которая может быть упругой или неупругой, в зависимости от жесткости материала катода и величины электрического поля.

Жесткость материала, т. е. его способность сопротивляться упругому растяжению (сжатию), характеризуется модулем Юнга. Чем больше модуль Юнга, тем большее усилие выдерживает материал без пластической деформации.

Применительно к воздействию электрического поля, очевидно, что при постепенном увеличении электрического поля E_1 сила воздействия на атомы кристаллической решетки превысит предел упругости и начнется пластическая деформация (поверхностная диффузия) атомов, направленная к поверхности. Это будет происходить, прежде всего, в местах нарушения структуры кристаллической решетки или на местах различных шероховатостей, где электрическое поле больше.

Явление поверхностной диффузии атомов в электрическом поле детально исследовалось при изучении физических процессов одного из механизмов развития электрических пробоев в вакууме [9–11], который выражается в следующем:

- на отрицательном электроде за счет поверхностной диффузии атомов происходит увеличение высоты имеющихся микрошероховатостей с формированием острия, при этом напряженность электрического поля на их вершинах непрерывно возрастает;
- с некоторого момента с их вершин начинается автоэмиссия, ток которой непрерывно возрастает из-за продолжающегося процесса роста высоты острия;
- ток автоэмиссии приводит к разогреву как острия, так и поверхности анода, бомбардируемой током автоэмиссии, что приводит к газовыделению с этих поверхностей и ухудшению вакуума;
- постепенно скорости увеличения высоты острия, тока автоэмиссии, разогрева электродов и ухудшения вакуума возрастают и переходят в лавинообразную форму с развитием электрического пробоя;
- предвестником пробоя зачастую являются искрения на катоде, связанные с распылением вершины микроострий, которое происходит при сравнительно высоком вакууме и не приводит к развитию пробоя.

При проведении электротренировки приборов при напряженности электрического поля между электродами 10...15 кВ/мм время протекания описанных процессов обычно составляет несколько минут.

5. ТОКОВАЯ ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ АВТОКАТОДА

Как указывалось выше, процесс поверхностной диффузии атомов начинается при напряженностях электрического поля, на порядки меньших, чем требуется для возникновения автоэлектронной эмиссии. На поверхности автоэмиссионных катодов с напряженностью электрического поля порядка $10^7...10^8$ В/см скорость поверхностной диффузии атомов может быть очень высока.

В катоде Спиндта эмиссия электронов происходит не только с вершины острия эмиттера, но и с верхней части его конусной боковой поверхности. Для упрощения можно представить, что эмитирующая часть АК состоит из совокупности небольших плоских участков, прилегающих друг к другу. Рассмотрим, что может происходить на таких небольших участках автоэмиссионного катода (рис. 4, а).

Под действием электрического поля в месте какой-либо дислокации кристаллической решетки начнется формирование микроострия, и, так как его рост осуществляется за счет диффузии соседних атомов, вокруг острия будет формироваться небольшая лунка (рис. 4, б). Поскольку данное острие выступает над плоскостью автокатаода и на нем происходит усиление электрического поля, то и плотность тока с острия будет возрастать по мере увеличения длины острия. Фактически это острие представляет собой локальный эмиссионный центр (ЛЭЦ), который будет проходить те же этапы эволюции, которые описаны в разд. 4. То есть с ростом длины острия ЛЭЦ будет происходить увеличение тока с его вершины, затем начнется его разогрев с появлением тока термоэмиссии, далее произойдет расплавление острия и его дальнейшее вытягивание, затем произойдет переход этих процессов в лавинообразную форму с последующим распылением острия и ЛЭЦ прекратит свое существование. После его распыления в образовавшейся лунке останется расплавленный остаток металла (рис. 4, в). Распыление ЛЭЦ будет сопровождаться ухудшением вакуума за счет распыления адсорбированных в острие газов.

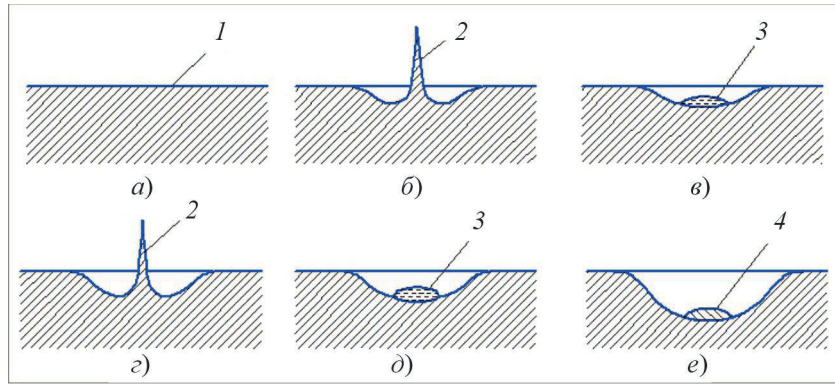


Рис. 4. Участок поверхности АК:

a – начальное состояние; *б, в* – образование ЛЭЦ; *г, д* – состояние поверхности после выгорания ЛЭЦ; *е* – конечное состояние; 1 – начальная форма поверхности; 2 – ЛЭЦ; 3 – расплав металла; 4 – оплавленная поверхность

После выгорания данного ЛЭЦ велика вероятность того, что в этом же месте возникнет следующий ЛЭЦ. Это обусловлено тем, что подвижность атомов расплавленного металла гораздо выше, чем их подвижность в составе кристаллической решетки. Поэтому, несмотря на то, что напряженность электрического поля в основании образовавшейся лунки меньше, чем на соседних участках, вероятность роста очередного эмиссионного центра на месте расплава металла очень высока. Формирование и выгорание очередного ЛЭЦ на этом же месте приведет к дальнейшему углублению и расширению лунки на поверхности автокатода (рис. 4, *г, д*). Последовательное многократное возникновение и выгорание ЛЭЦ на одном месте приведет к формированию относительно глубокой лунки с пониженным значением напряженности электрического поля в ее глубине, и процесс формирования ЛЭЦ в этом месте прекратится, а на месте их выгорания останется небольшой участок оплавленной поверхности (рис. 4, *е*).

Аналогичные процессы на соседних участках поверхности автокатода будут приводить к формированию волнообразной поверхности. Естественно, на выступающих бугорках поверхности, где происходит усиление электрического поля, создаются условия для формирования более крупных ЛЭЦ, которые будут формироваться по аналогичному механизму. Схематически этот процесс поясняется рис. 5. Периодическое формирование и выгорание крупных ЛЭЦ будет приводить к выраженным релаксационным колебаниям тока эмиттера (см. рис. 2, *б*).

В целом формирование и выгорание ЛЭЦ на поверхности катода будет приводить к следующим эффектам:

- происходят пульсации тока катода, тем большие, чем больше размеры ЛЭЦ. По пульсациям тока катода можно оценить скорость образования ЛЭЦ, зависимость их величины от напряженности электрического поля и долю тока АК в отдельных ЛЭЦ. Например, из кривых, приведенных на рис. 2, можно сделать следующие выводы. С увеличением плотности тока увеличиваются размеры ЛЭЦ. Время жизни ЛЭЦ составляет от долей секунды и менее для мелких ЛЭЦ до минут для крупных ЛЭЦ. Выгорание мелких ЛЭЦ происходит при токах, составляющих 5...10 % от тока катода, а крупных – при токах 50...100 % и более;

- происходит эрозия поверхности АК, выражающаяся как в распылении материала катода, так и в формировании волнообразной оплавленной поверхности. Эффект оплавленной поверхности будет создаваться за счет слияния оплавленных оснований ЛЭЦ при их хаотическом перемещении по поверхности АК. Эффект оплавления не связан со средней температурой поверхности АК и будет происходить при любых токах;

– происходит постепенное ухудшение вакуума при выгорании ЛЭЦ за счет выделения газов, адсорбированных на поверхности эмиттера, и создаются условия для возникновения электрического пробоя;

– происходит запыление окружающих электродов и диэлектриков продуктами распыления ЛЭЦ.

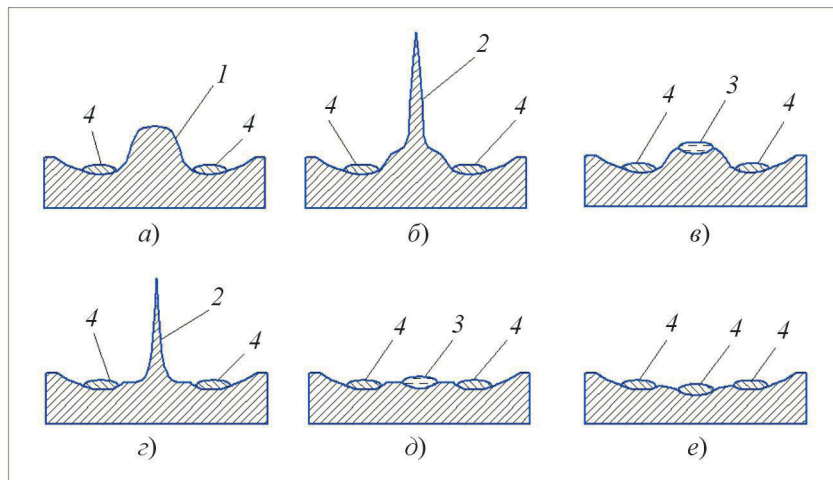


Рис. 5. Процессы на поверхности автокатода:

a – начальное состояние поверхности; *б, в* – образование ЛЭЦ; *в, д* – состояние поверхности после выгорания ЛЭЦ; *е* – конечное состояние; *1* – начальная форма поверхности; *2* – ЛЭЦ; *3* – расплав металла; *4* – оплавленная поверхность

Описанное явление можно назвать токовой эрозией поверхности АК, т. е. эрозией, непосредственно связанной с протеканием автоэмиссионного тока.

При использовании АК из материалов, которые при нагреве не имеют жидкой фазы (алмазоподобные, стеклоуглероды, графиты и пр.), процессы эрозии поверхности катода будут происходить аналогично. Отличие будет только в том, что выгорание ЛЭЦ будет происходить за счет сублимации материала и будет отсутствовать эффект оплавления поверхности АК.

6. АНАЛИЗ ВНЕШНЕГО ВИДА АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ ПОСЛЕ ИХ ИСПЫТАНИЙ

В связи с вышеизложенным, желательно провести анализ поверхности работавших АК. В качестве рабочего материала можно воспользоваться высококачественными фотографиями АК, которые приведены в работе [8]. В данной публикации изложены результаты исследования одиночных острых катодов из разных материалов и приведены фотографии эмиттеров из вольфрама и стеклоуглерода до и после испытания (рис. 6. 7).

На фотографиях хорошо видны следы эрозии на вершинах эмиттеров для обоих типов материалов. Но характер эрозии отличается.

В работе [8] указано, что вольфрамовый эмиттер (см. рис. 6, *a*) изготавливался методом лазерного фрезерования и не проходил очистки перед испытанием. Боковые поверхности эмиттера имеют гладкую форму, но на них остались шлаки от лазерной обработки. Кроме того, видно, что вершина эмиттера оплавлена и приобрела каплеобразную форму. По-видимому, произошел перегрев острия эмиттера при его изготовлении.

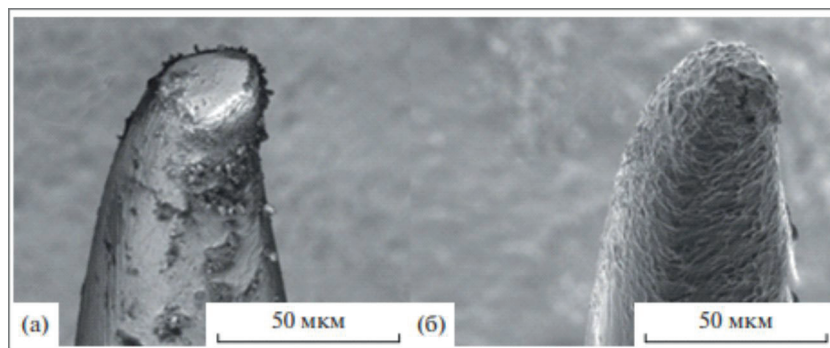


Рис. 6. Вид эмиттера из вольфрама до (а) и после (б) испытаний [8]

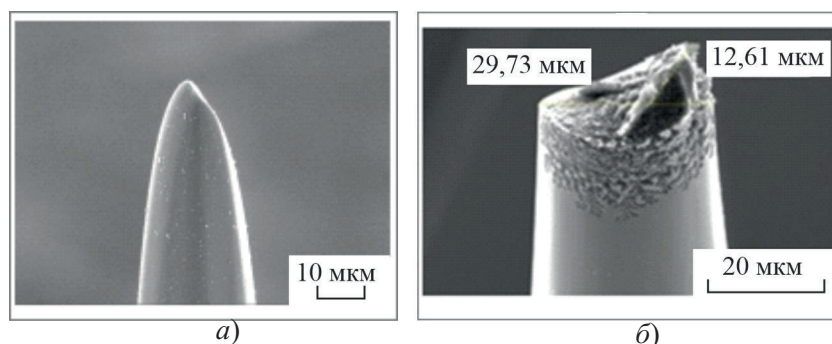


Рис. 7. Вид эмиттера из стеклогуглерода СУ-2000 до (а) и после (б) испытаний [8]

После испытания (см. рис. 6, б) структура поверхности кардинально изменилась. Вершина эмиттера заострилась, произошла эрозия каплеобразного наплыва. Произошло выгорание всех выступающих неоднородностей (шлаков), рабочая поверхность эмиттера приобрела волнообразную форму и воспринимается как потеки оплавленного металла. В нижней части эмиттера поверхность гладкая, она сохранила свой первоначальный вид.

Эмиттер из стеклогуглерода до работы имел гладкую заостренную поверхность (см. рис. 7, а). После работы форма эмиттера сильно изменилась – произошло значительное выгорание вершины острия, вскрылась скрытая пора в материале, произошла сильная эрозия боковой поверхности, которая также приобрела характерную волнообразную структуру (см. рис. 7, б).

Таким образом, внешний вид эмиттеров автокатодов после испытания подтверждает выводы проведенного выше физического анализа: в процессе работы АК происходит эрозия его поверхности с приобретением характерной волнообразной структуры.

7. ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МАТЕРИАЛОВ К ТОКОВОЙ ЭРОЗИИ

Модель токовой эрозии очень проста по своей физической сути и позволяет, в первом приближении, сравнивать между собой материалы по скорости эрозии поверхности эмиттеров.

Действительно, токовая эрозия эмиттеров происходит за счет формирования локальных эмиссионных центров и разогрева их вершин до температуры кипения (сублимации) с последующим распылением. Поэтому можно выделить основные факторы, влияющие на скорость токовой эрозии, к которым можно отнести следующие:

1. Жесткость материала эмиттера. Чем больше жесткость, тем медленнее происходит рост ЛЭЦ за счет поверхностной диффузии атомов.

2. Работа выхода материала эмиттера. Чем меньше работа выхода, тем меньше будет напряженность электрического поля на эмиттере для получения заданного тока, тем меньше будет скорость роста ЛЭЦ.

3. Температура плавления и кипения (сублимации) материала. При достижении температуры плавления жесткость материала резко падает и существенно ускоряется рост размера ЛЭЦ. А чем выше температура кипения (сублимации), тем больший ток будет выдерживать ЛЭЦ без распыления материала.

4. Удельное сопротивление материала. Чем меньше сопротивление, тем меньше будет разогрев ЛЭЦ, тем больший ток он будет выдерживать без распыления материала.

5. Пористость материала. Для пористого материала распыление части поверхности приводит к большей потере суммарного объема, чем для сплошного материала. Например, работа нанесённых на эмиттер каких-либо пористых покрытий будет недолговечна из-за их быстрой эрозии.

В качестве примера проведем оценку относительной скорости токовой эрозии для трех типов материалов с близкими значениями работы выхода: вольфрама, молибдена и стеклоуглерода СУ-2000. Основные характеристики этих материалов приведены в таблице [12].

Материал	Температура плавления, °С	Температура кипения, °С	Удельное сопротивление, Ом·м	Модуль Юнга, ГПа	Пористость, %	Работа выхода, эВ
Вольфрам	3380	5550	$5,5 \cdot 10^{-8}$	400	0	4,55
Молибден	2610	4612	$5,2 \cdot 10^{-8}$	336	0	4,2
Стеклоуглерод СУ-2000	3700 (сублимация)		$4 \cdot 10^{-5}$	25 – 35	2 – 5	4,45 – 4,81 (для графита)

Из данных таблицы можно сделать вывод, что из приведенных материалов вольфрам должен иметь наименьшую скорость эрозии. Он имеет максимальную жесткость, максимальные температуры плавления и кипения и низкое удельное сопротивление.

Молибден по сравнению с вольфрамом имеет:

- немного меньшую жесткость (скорость роста ЛЭЦ будет несколько больше);
- практически такое же значение по электропроводности (будет происходить идентичный разогрев ЛЭЦ при одинаковых токах);
- температуру плавления на 770 °С ниже (при достижении температуры плавления падает величина модуля Юнга и скорость роста ЛЭЦ резко возрастает);
- температуру кипения на 940 °С ниже (распыление ЛЭЦ будет происходить при меньших токах).

Вывод: скорость токовой эрозии молибдена должна быть больше, чем у вольфрама.

Стеклоуглерод по сравнению с вольфрамом обладает:

- более чем в 10 раз меньшей жесткостью (скорость роста ЛЭЦ будет значительно больше);
- на 3 порядка большим удельным сопротивлением (разогрев ЛЭЦ будет значительно больше при одинаковых токах);
- температурой сублимации, которая на 1800 °С ниже температуры кипения вольфрама (распыление ЛЭЦ будет происходить при значительно меньших токах).

Вывод: скорость токовой эрозии стеклоуглерода должна быть значительно больше, чем у вольфрама.

Конечно, такая оценка скорости токовой эрозии носит чисто качественный характер. Провести точный расчет очень сложно. Скорость роста ЛЭЦ и сам процесс выгорания носят лавинообразный характер, для точной оценки разогрева ЛЭЦ необходимо учитывать теплоемкость, удельный вес, теплоту плавления и пр. При этом многие параметры (теплоемкость материала, модуль Юнга и пр.) могут очень сильно зависеть от температуры. Но провести качественную оценку любого материала по сравнению с вольфрамом вполне реально.

Интересно отметить, что теоретический вывод, сделанный по материалам таблицы, совпадает с выводом авторов экспериментальной работы [8] по сравнительному анализу эмиссионных характеристик эмиттеров из гафния, вольфрама, молибдена и стеклоуглерода – эмиттеры из вольфрама оказались предпочтительны.

Из вышеизложенного следует, что для уменьшения токовой эрозии необходимо обращать внимание как на материал эмиттера, так и на выбор режима его работы.

В части материала – в идеале материал должен обладать низкой работой выхода, высокой жесткостью, высокой электрической проводимостью, высокими температурами плавления и кипения (сублимации). В реальной жизни – надо оценить, есть ли материалы, менее склонные к токовой эрозии, чем вольфрам. Пористые материалы, материалы с малой жесткостью, низкой проводимостью и низкой температурой кипения (сублимации) непригодны для создания долговечных сильноточных АК.

В части режима работы – следует выбирать режим работы эмиттера с пониженными значениями напряженности электрического поля, т. е. снижать плотность тока с единичного эмиттера, увеличивая их количество для получения заданного тока.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена физическая модель токовой эрозии поверхности АК, которая происходит путем образования и распыления микроострий ЛЭЦ, возникающих на поверхности эмиттера за счет поверхностной диффузии атомов в сильном электрическом поле.

Токовая эрозия приводит к непрерывным кратковременным пульсациям рабочего тока и распылению поверхности эмиттера, с формированием на ней волнообразной оплавленной (для металлов) структуры, а также сопровождается ухудшением вакуума в рабочем объеме.

Обосновано, что для уменьшения скорости токовой эрозии следует изготавливать эмиттер из материала с низкой работой выхода, высокой жесткостью, высокой электрической проводимостью, высокими температурами плавления и кипения (сублимации).

Скорость токовой эрозии уменьшается при уменьшении плотности тока с эмиттера.

Токовая эрозия сопровождает работу АК и, по мнению автора, является одним из основных механизмов их деградации. В сочетании с остальными механизмами деградации она затрудняет возможность создания сильноточных долговечных АК.

Автор выражает признательность к.т.н. Виктору Ивановичу Пугнину за детальное обсуждение данного материала и квалифицированные критические замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегическая программа исследований технологической платформы «СВЧ-технологии»: утверждена 17.12.2012.

2. **Трубецков, Д. И.** Вакуумная микроэлектроника / Д. И. Трубецков // Соросовский общобразовательный журнал. – 1987. – № 4.
3. **Spindt, C.** / C. Spindt, C. Holland, R. D. Stowe // Appl. Surf. Sci. – 1983. – Vol. 16, No 1-2. – P. 268.
4. **Трубецков, Д. И.** О современном состоянии сверхвысокочастотных вакуумных электронных и микроэлектронных приборов с управляемой эмиссией / Д. И. Трубецков, Г. М. Краснова // Изв. вузов «ПНД». – 2013. – Т. 21, № 1.
5. **Шестеркин, В. И.** Эмиссионно-эксплуатационные характеристики различных типов автоэмиссионных катодов / В. И. Шестеркин // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65, № 1.
6. / D. R. Whaley, R. Duggal, C. M. Armstrong [et al.] // IEEE Trans. ED. – 2009. – Vol. 56, No 5. – P. 896.
7. **Тарадаев, Е. П.** Многоострийные полевые эмиттеры для высоковольтных электронных устройств : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.
8. Крупноструктурные автоэмиссионные ячейки и электронно-оптические системы на их основе: расчеты и эксперименты / С. П. Морев, А. Н. Дармаев, К. В. Кузьмич [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67, № 10.
9. Электрический пробой и разряд в вакууме / Н. Н. Сливков, В. В. Михайлов [и др.]. – Атомиздат, 1966.
10. **Ашкинази, Л. А.** Вакуум для науки и техники / Л. А. Ашкинази. – М.: Наука, 1987.
11. **Литвинов, Е. А.** Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные процессы при вакуумных разрядах / Е. А. Литвинов, Г. А. Месяц, Д. И. Проскуровский // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 139, вып. 2.
12. Википедия.

Статья поступила 13 августа 2024 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Применение беспилотных летательных аппаратов (дронов) / коллектив авторов; под общ. ред. Н.А. Максимова. – Москва : КНОРУС, 2024. – 400 с.

Раскрыта история развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Изложена теория и даны рекомендации по применению БПЛА. Освещены вопросы применения БПЛА при управлении огнем артиллерии. Приведен порядок работы должностных лиц артиллерийских подразделений при подготовке и выполнении огневых задач. Рассматриваются основные задачи комплексов воздушной разведки с БПЛА, особенности организации боевого применения подразделений воздушной разведки, оснащенных комплексами воздушной разведки БПЛА.

УДК 621.385.623

ОПТИМАЛЬНЫЙ КЛИСТРОН

Д. А. Комаров, А. Н. Юнаков, А. В. Мамонтов,
С. В. Евсеев, Д. С. Моисеев

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

Представлены результаты численного моделирования пространства взаимодействия многорезонаторных клистронов в самосогласованной постановке для различных методов получения максимального электронного КПД. Показано, что методы упорядоченного группирования, ВАС и инверсии частот имеют предельные переходы и фактически приводят к одной оптимальной конфигурации фазовых траекторий.

КС: численное моделирование, многорезонаторный клистрон, пространство взаимодействия, максимальный электронный КПД, метод упорядоченного группирования, ВАС-метод, метод инверсии частот

OPTIMAL KLYSTRON

D. A. Komarov, A. N. Yunakov, A. V. Mamontov,
S. V. Yevseev, D. S. Moiseev

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

The results of numerical simulation of the interaction space of multiresonator klystrons in a self-consistent formation for various methods of obtaining maximum electronic efficiency are presented. It is shown that the methods of ordered grouping, BAC (bunching alignment collecting) and frequency inversion have limited transitions and actually lead to one optimal configuration of phase trajectories.

Keywords: numerical simulation, multiresonator klystron, interaction space, maximum electronic efficiency, method of ordered grouping, BAC-method, frequency inversion method

1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск оптимального пространства взаимодействия клистронных усилителей с целью получения предельно достижимых значений электронного коэффициента полезного действия (КПД) начался с момента появления первых нелинейных моделей клистрона [1]. В различных работах выбирались и различные критерии «оптимальности»: Роу определял оптимум КПД по достижению максимальной величины первой гармоники конвекционного тока. В работе [2] было показано, что критерием оптимальности должна служить «тонкая» структура электронного потока, определяемая по фазовой диаграмме. На сегодняшний день можно отметить целый ряд методов повышения КПД: метод упорядоченной группировки Малыхина – Петрова, метод ВАС Гузилова и метод инверсии Комарова – Якушкина, рассмотренные в обзоре [3]. Если оставить в стороне термины и понятия из данных работ, не подлежащие математической формулировке, типа «ядро сгустка», «тонкая структура сгустка» и т. п., можно сделать единственный вывод из анализа работ: максимальный КПД получается при реализации фазовой расфокусировки электронного потока в пространстве взаимодействия до выходного резонатора. Для многолучевых

клистронов с микропервеансом на луч более 0,5 все перечисленные методы позволили получить максимальное электронное КПД на уровне 55 %, что вызывает определенные трудности в выборе того или иного метода. Правоммерно поставить задачу о сравнении данных методик и обосновании их, что и проведено в настоящей работе.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И АНАЛИЗ

Оптимизация пространства взаимодействия многорезонаторного клистрона является задачей многопараметрической и вызывает известные сложности даже при численном решении. Однако опыт проектирования клистронов обнаружил интересный эффект: при последовательном анализе пространства взаимодействия, начиная с двухрезонаторного клистрона, добавление каждого следующего резонатора после входного с основной частотой не приводит к изменению КПД, а только к росту коэффициента усиления. Это позволило использовать следующую методическую схему расчета: оптимизируется двухрезонаторный клистрон по трем параметрам: длина трубы дрейфа, нагруженная добротность и частота выходного резонатора. После данной оптимизации добавляется следующий резонатор после входного с длиной трубы дрейфа, равной длине дрейфа двухрезонаторного клистрона. Оптимизация трехрезонаторного клистрона осуществляется по двум параметрам: частота промежуточного (второго) резонатора и длина дрейфового промежутка между вторым и третьим резонаторами. Добиваясь максимального значения КПД, снова добавляется резонатор после входного с длиной дрейфа, как в двухрезонаторном клистроне. Четырехрезонаторный клистрон оптимизируется по частоте второго резонатора и по длине пролета между вторым и третьим резонаторами и т. д. Существенно, что добавляются резонаторы с частотой входного резонатора. Кроме того, контролируется, чтобы при расчете новый клистрон с числом резонаторов $N+1$ имел до оптимизации КПД, тождественно равный КПД клистрона с числом резонаторов N .

Численный эксперимент осуществлен в программе «KLYS WIN 1.5 D». Существенно, что данная программа реализует самосогласованную модель взаимодействия с учетом объемного заряда в реальных электрических полях, полученных конечно-разностным методом при реальной геометрии резонатора.

Для анализа был выбран многолучевой клистрон со следующими параметрами: напряжение катода – 58 кВ, ток катода – 318 А, микропервеанс на луч – $0,6 \text{ A/V}^{3/2}$, размер зазора – 1,4, размер канала – 0,45, число лучей – 38. Данные значения выбраны из опыта проектирования и не менялись в процессе оптимизации. Расчетная частота была выбрана равной 2856 МГц.

На рис.1 представлены результаты оптимизации двухрезонаторного клистрона. Длина пространства дрейфа нормирована на величину редуцированной плазменной частоты. В результате оптимизации максимальное значение КПД составило 46,6 %. Известно, что теоретически предельная величина КПД двухрезонаторного клистрона составляет 54 %, т. е. полученное значение довольно близко к предельному. В данном случае существенным ограничением является величина микропервеанса, однако ее выбор связан с конкретным использованием прибора и минимизацией напряжения питания.

Оптимизация трехрезонаторного клистрона показана на рис. 2. Оптимальная частота второго резонатора составила 1,09 отн. ед. и дала КПД 55,4 %. На рис. 2, б дана зависимость КПД при оптимальной частоте от длины трубы дрейфа между вторым и третьим резонаторами. Корректировка в сторону уменьшения длины позволила поднять КПД до 58,1 %. Необходимо отметить, что после корректировки трубы дрейфа снова контролировалась оптимальность

с точки зрения получения максимального КПД клистрона, частоты резонатора методом дихотомии: делался шаг вверх и шаг вниз на 0,01 единицу. Расчеты показали только ухудшение оптимальных значений.

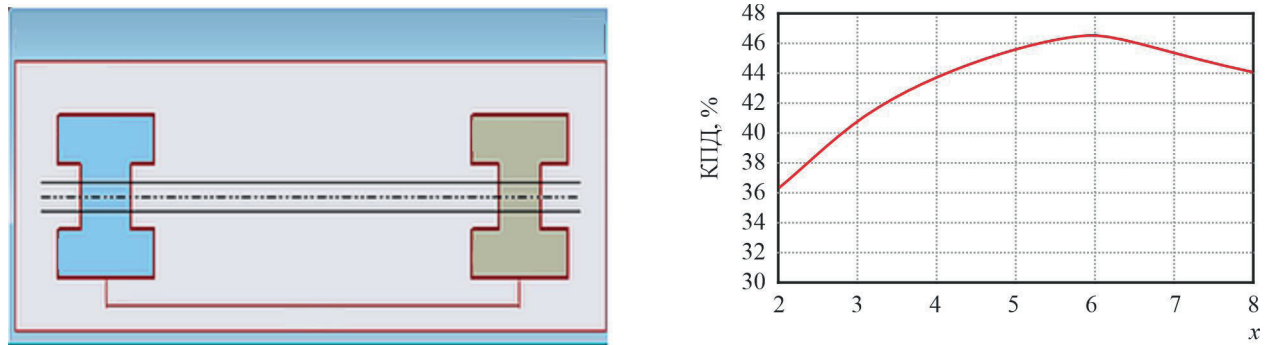


Рис. 1. Двухрезонаторный клистрон

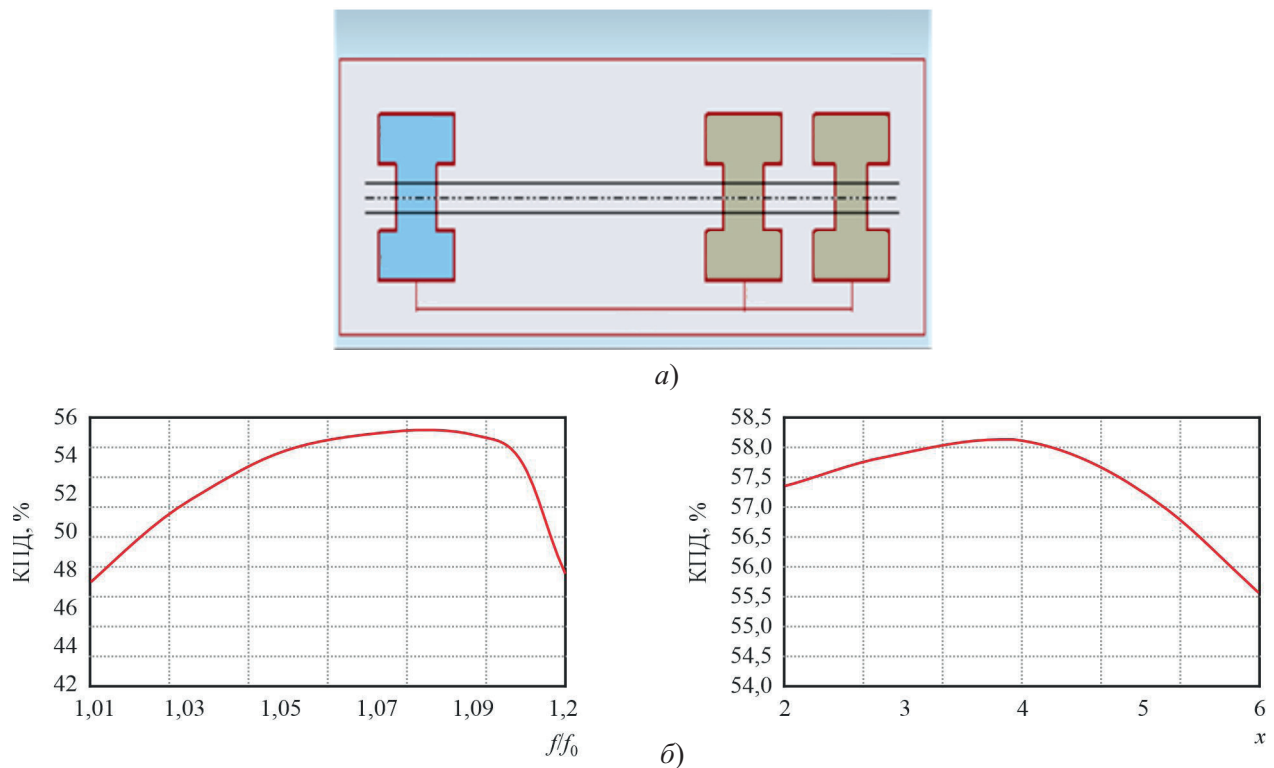


Рис. 2. Трехрезонаторный клистрон (а)
и зависимости КПД от частоты второго резонатора и длины пролета (б)

Далее был проанализирован четырехрезонаторный клистрон. Для данной схемы был реализован предельный переход для частоты второго резонатора, т. е. смещение частоты шло вплоть до относительной величины частоты 2,0. На рис. 3 представлены соответствующие графики. Результаты показывают, прежде всего, существенное увеличение КПД в режиме инверсии, при котором частота второго резонатора становится больше частоты третьего, предвыходного резонатора. Так, оптимум был достигнут при значении частоты 1,3 единицы. При этом значе-

нии частоты электронное КПД выросло до 66,5 %. Далее наблюдается плато параметров – КПД изменяется крайне слабо до частоты 1,5, после которой начинается такой же слабый (не более 1,5 %) спад. Однако начиная с частоты 1,7 обнаруживается снова рост КПД, который достигает максимума на частоте 1,93 единицы, но величина КПД мало отличается от первого максимума – 66,7 %. Дальнейшее увеличение частоты приводит к резкому спаду КПД до 37 %. Положение второго резонатора, настроенного на условную двойную частоту входного сигнала, сразу после входного резонатора фактически реализует ВАС-метод. Плато КПД реализует метод инверсии, из чего следует наличие предельного перехода одного метода в другой при плавном изменении параметров. Существенно, что КПД неизменно для кривой рис. 3. Разница заключается в кривой рис.3, б – зависимости КПД при оптимальной частоте второго резонатора от длины трубы дрейфа между вторым и третьим резонаторами. Так, для оптимальной частоты 1,3 единицы требуется существенное увеличение длины дрейфа до 8,0 единиц, предельное КПД при этом возрастает до 68,4 %. Для частоты 1,9 единиц, напротив, требуется существенно уменьшить длину дрейфа до 4,0 единиц, но величина КПД составила те же 68,4 %. Таким образом, переход ко второй гармонике позволяет сократить длину прибора, однако область устойчивости параметров существенно ограничена сверху – изменение частоты даже в пределах 10 МГц приводит к потере КПД более чем в два раза. Использование инверсии частот требует роста длины прибора, но позволяет существенно расширить допусковую базу на значение девиации частоты при настройке до 50 МГц.

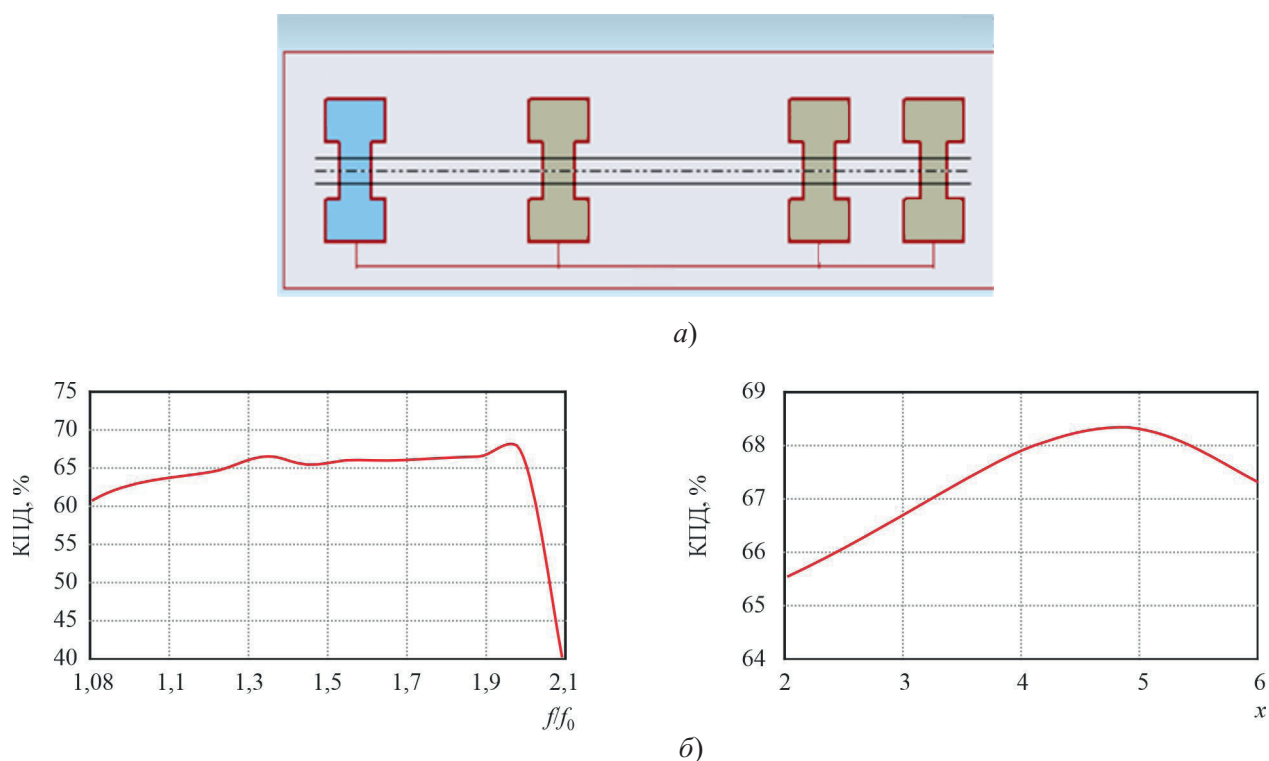


Рис. 3. Четырехрезонаторный клистрон (а), зависимости его КПД от частоты второго резонатора и длины пролета (б), резонатор второй гармоники (в) и зависимость КПД от длины пролета с резонатором второй гармоники (г) (см. также с. 77)

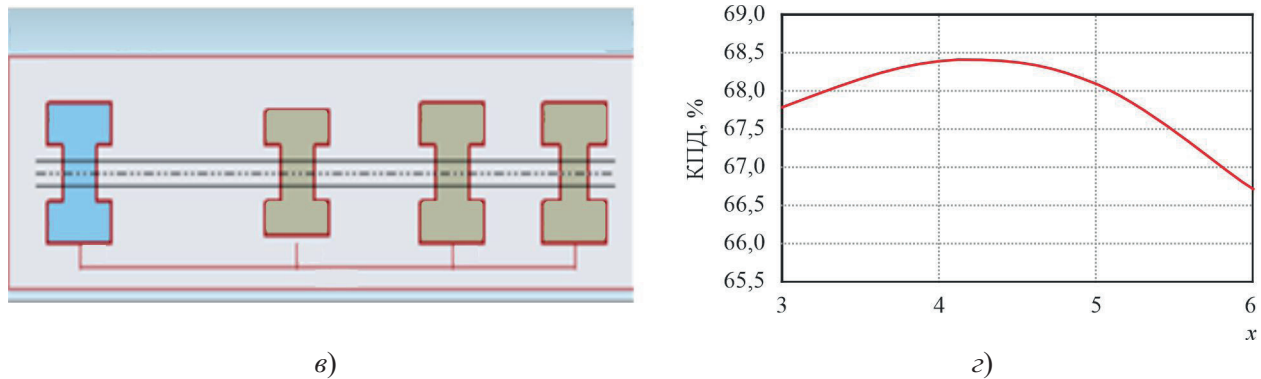


Рис. 3. Четырехрезонаторный клистрон (а), зависимости его КПД от частоты второго резонатора и длины пролета (б), резонатор второй гармоники (в) и зависимость КПД от длины пролета с резонатором второй гармоники (г)

Для дополнительного анализа была исследована тонкая структура электронного потока на фазовой диаграмме. На рис. 4 представлены результаты моделирования фазовой характеристики. Как следует из результатов расчета, формирование электронного сгустка происходит и в одном и в другом случае тождественно. После зазора второго резонатора сгусток разделяется на две: частицы, фазы влета в первый резонатор которых лежат вблизи синхронной частицы (частицы, с нулевой фазой влета в первый резонатор), изменяют знак производной по координате, отклоняясь по фазе от синхронной частицы. В зазоре третьего резонатора это приводит к формированию плотного электронного сгустка со слетанностью к выходному зазору по условиям упорядоченной группировки. Из фазовой диаграммы очевидна, кроме того, необходимость увеличения длины пролета в случае инверсии и уменьшения длины пролета при использовании резонатора второй гармоники: для случая инверсии угол отклонения фазовых траекторий от синхронной частицы мал и требуется большая длина для получения необходимой фазовой расходимости в зазоре третьего резонатора. Для второй гармоники угол расходимости велик и длину пролета необходимо сокращать.

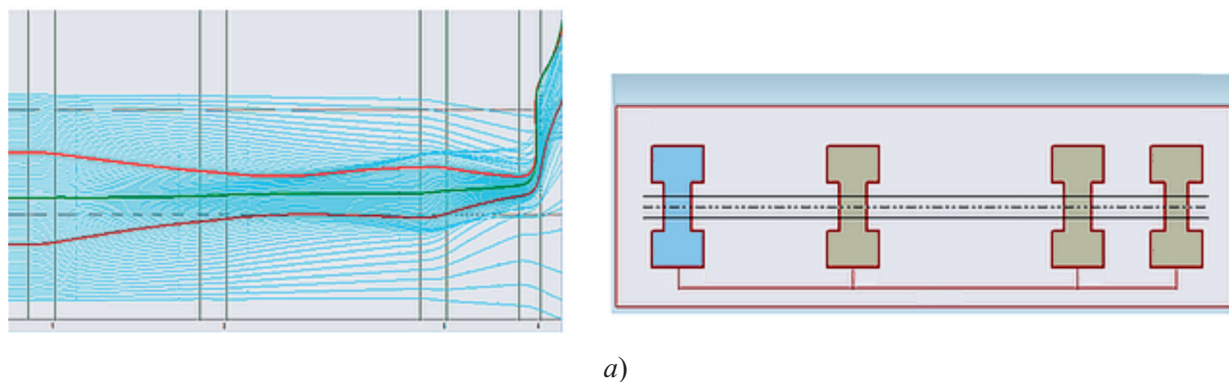


Рис. 4. Фазовые диаграммы четырехрезонаторного клистрона (см. также с. 78):
а – с инверсией частот

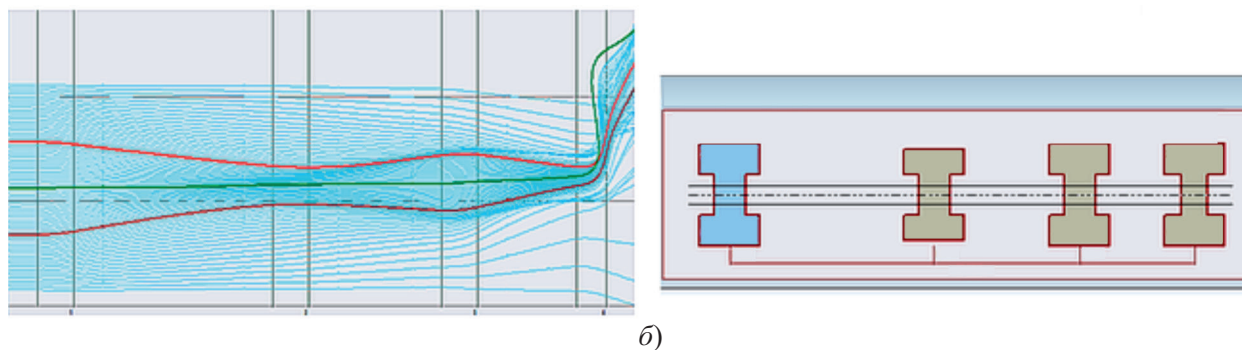


Рис. 4. Фазовые диаграммы четырехрезонаторного клистрона:

б – с резонатором второй гармоники

Идентичное поведение фазовых траекторий, вне зависимости от вида настройки резонаторов, позволяет утверждать, что существует единственная оптимальная фазовая диаграмма для получения предельного КПД. Этот тезис полностью соответствует представлению упорядоченной группировки, поскольку именно данный принцип оперирует с параметром «тонкой» структуры пучка, т. е. его образом на фазовой плоскости. Для подтверждения данного тезиса были рассмотрены пространства взаимодействия пятирезонаторных клистронов с инверсией частот при различных значениях микропервеанса на луч. На рис. 5 представлены результаты моделирования, показывающие возможность получения 85 % КПД электроники без резонаторов второй и третьей гармоники, как постулируется в [3], в качестве единственного пути увеличения КПД. Данные результаты моделирования интересны тем, что явно прослеживается связь роста КПД электроники с уменьшением микропервеанса при идентичном способе группирования электронного потока.

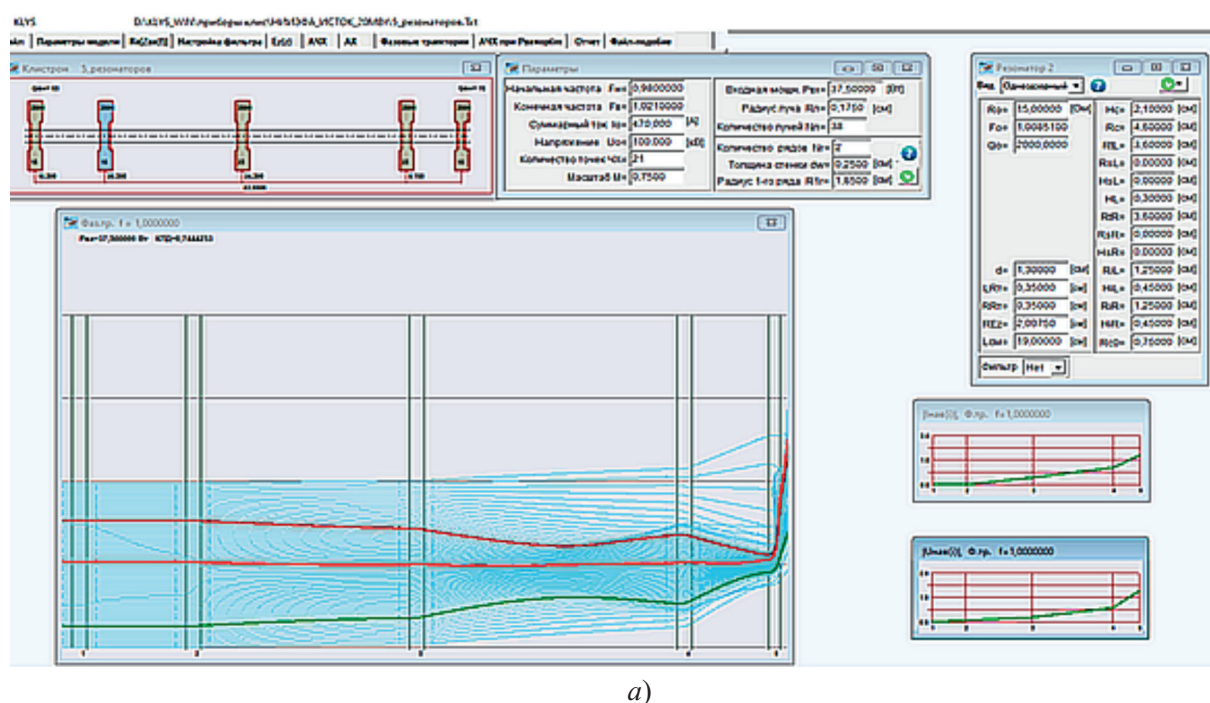
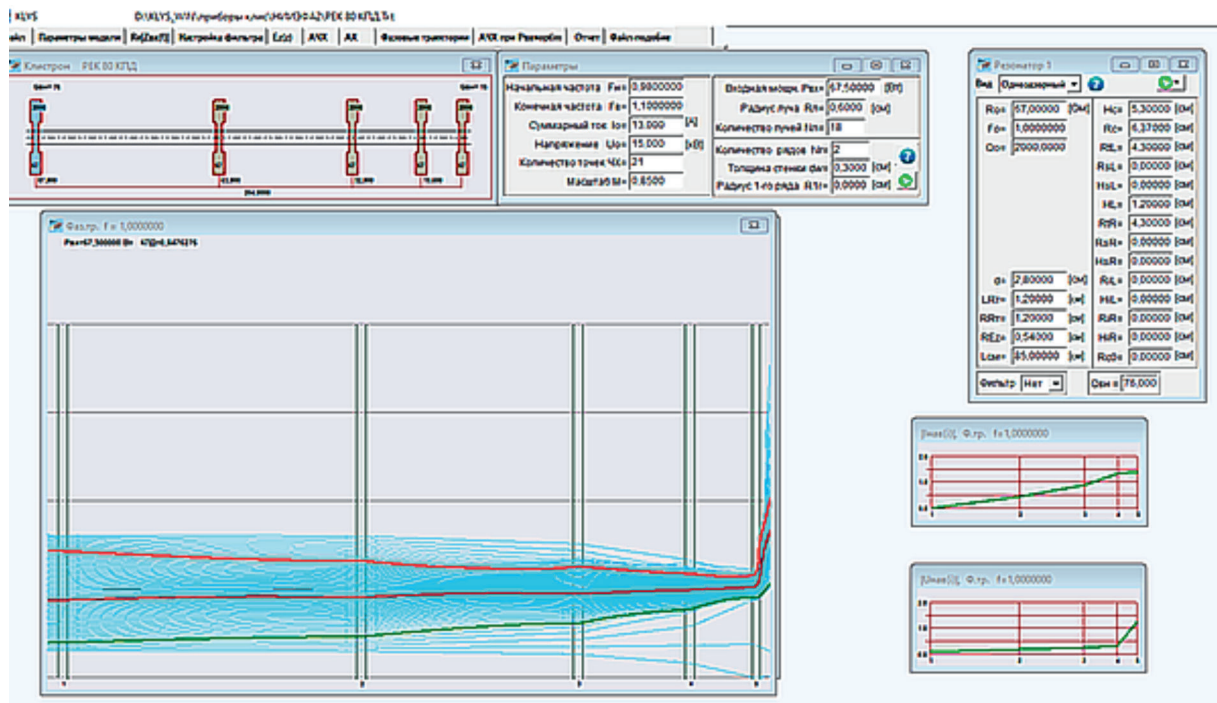


Рис. 5. Моделирование пятирезонаторного клистрона (см. также с. 79):

а – микропервеанс на луч равен 0,4; КПД – 74,6 %;



б)

Рис. 5. Моделирование пятирезонаторного клистрона:

б – микропереванс на луч равен 0,3; КПД – 85,1 %

Интересные аналогии можно проследить с принципом сильной фокусировки. Известна теорема [4], согласно которой, дефокусирующий и фокусирующий участки транспортировки пучка заряженных частиц всегда приводят к итоговой фокусировке. С позиции фазовой плоскости имеем тот же результат – фазовая расфокусировка от второго резонатора и дальнейшая фокусировка третьим резонатором дают в итоге фокусировку в выходном резонаторе.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе путем численного моделирования в самосогласованной постановке представлены результаты анализа многорезонаторных клистронов с оптимальными значениями электронного КПД. Показано, что существуют предельные переходы метода инверсии и метода использования резонаторов второй гармоники. Анализ фазовых диаграмм двух методов демонстрирует идентичность пространств взаимодействия с точки зрения тонкой структуры электронного сгустка на фазовой плоскости и дает тождественные значения электронного КПД. Показана возможность реализации КПД электроники 85 % без использования резонаторов второй и третьей гармоник.

Численное моделирование позволяет утверждать, что единственным физическим принципом получения предельных значений КПД является принцип упорядоченной группировки, сформулированный в [2]. Результаты представленного анализа позволяют высказать утверждение о существовании единственного оптимального пространства взаимодействия для усилительных клистронов с предельными значениями КПД. Кроме того, представляется возможным поставить задачу синтеза оптимального клистрона по виду фазовой диаграммы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Роу Дж. Нелинейные явления в электронике СВЧ / Роу Дж. – М.: Наука, 1971.
2. Пролетный клистрон с высоким КПД. Некоторые вопросы теории и эксперимент / Кочетова, В. И. Кучугурный, С. В. Лебединский [и др.] // Радиотехника и электроника. – 1981. – Т. XXVI, № 1. – С. 139 – 145.
3. An overview of multibeam klystron technology / Yaogen Ding [et al.] // IEEE Transaction on ED. – June 2023. – Vol. 70, No 6. – P. 2656 – 2665.
4. Арцимович, Л. А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях / Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов. – М.: Наука, 1978.

Статья поступила 8 ноября 2024 г.

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры /
К.Б. Джуринский. – Москва : ВАШ ФОРМАТ, 2024. – 380 с.

Цель данной книги – предоставить отечественным разработчикам и технологам радиоэлектронных средств информацию о достижениях отечественных и зарубежных компаний в области радиочастотных соединителей и помехоподавляющих фильтров. При написании книги было использовано большое количество зарубежных источников открытой информации, включая работы автора.

Основы проектирования средств радиоэлектронной борьбы : Монография /
Под ред. Г.И. Андреева. – Москва : Радиотехника, 2024. – 348 с.

Рассмотрен широкий спектр теоретических и исследовательских вопросов создания средств радиоэлектронной борьбы на этапах проектирования с учетом эффективности, а также их практической реализации. Материал отражает современный подход к анализу и синтезу управления проектами и базируется на теории и методологии принятия решений при высокоуровневом проектировании средств радиоэлектронной борьбы.

Предназначена для радиоинженеров, аспирантов, научных сотрудников, деятельность которых связана с созданием средств радиоэлектронной борьбы; является основой для издания будущих книг из этой серии.

УДК 621.385.623

ВЫХОДНОЙ КОЛЬЦЕВОЙ РЕЗОНАТОР МНОГОЛУЧЕВОГО КЛИСТРОНА С ОХВАТЫВАЮЩИМ ПАССИВНЫМ ЗВЕНОМ

Д. А. Комаров, А. Н. Юнаков, А. В. Мамонтов,
С. В. Евсеев, Д. С. Моисеев

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

Рассмотрена конструкция выходного резонатора сверхмощного многолучевого клистрона с охватывающим контуром, обеспечивающим азимутальную равномерность реальной части импеданса зазора и возможность обеспечения заданного значения импеданса. Рассмотрена электродинамика системы и приведены детальные расчеты.

КС: выходной кольцевой резонатор, сверхмощный многолучевой клистрон, охватывающий контур

OUTPUT RING RESONATOR OF A MULTIPLE-BEAM KLYSTRON WITH AN ENCLOSING PASSIVE CONTOUR

D. A. Komarov, A. N. Yunakov, A. V. Mamontov,
S. V. Yevseev, D. S. Moiseev

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

The output resonator design of a superpower multiple-beam klystron (MBK) with an enclosing contour providing azimuthal uniformity of the real part of the gap impedance and the possibility of providing a preset impedance value is considered. The electrodynamics of the system is considered and the detailed calculations are given.

Keywords: output ring resonator, superpower multiple-beam klystron, enclosing contour

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач при разработке сверхмощных многолучевых клистронов (МЛК) с электронным КПД более 50 % является проектирование выходного резонатора. Сложность создания оптимальной конструкции выходного резонатора МЛК связана с необходимостью обеспечения минимального перепада реальной части сопротивления зазора по азимуту между пролетными каналами и заданной величины реальной части сопротивления зазора. Отклонение величины сопротивления зазора от оптимальной приводит к резкому снижению КПД, то же относится и к азимутальному перепаду значений импеданса зазора.

Наибольшее распространение в сверхмощных МЛК получили кольцевые резонаторы на рабочем виде колебаний (моды) E_{010} . Однако использование кольцевых резонаторов в МЛК становится причиной достаточно малого волнового сопротивления при большом суммарном токе и относительно малых ускоряющих напряжениях. Так, сопротивление электронного потока в сверхмощных МЛК, как правило, составляет 300...400 Ом, что при волновых сопротивлениях кольцевых резонаторов 12...15 Ом приводит к необходимости обеспечения нагруженной добротности в 20...40 единиц. Столь существенная нагрузка выходного резонатора приводит к не-

обходимости увеличивать окно связи резонатора с волноводом и тем самым увеличивать азимутальную неоднородность распределения электрического поля. Кроме того, малая нагруженная добротность приводит к тому, что ближайший паразитный вид колебаний кольцевого резонатора, называемый в литературе «бабочка», также эффективно нагружается выходным волноводом и связывается с основным видом колебаний, что может приводить к самовозбуждению, снижению импеданса зазора и сложности при экспериментальной настройке выходной системы клистрона.

Одним из технических предложений по конструированию выходного резонатора МЛК является использование азимутальной проточки в области пролетных каналов [1]. Это предложение позволило получить минимальный перепад реальной части сопротивления зазора по азимуту, однако данное решение связано с рядом трудностей. Прежде всего, при нагруженной добротности менее 70 единиц глубина проточки должна быть сопоставима с длиной высокочастотного зазора, что приведет к существенному снижению оптимальной длины пространства взаимодействия и снижению КПД. Кроме того, этот метод не решает вопрос о паразитном виде колебаний.

В данной работе рассмотрена конструкция выходного кольцевого резонатора МЛК, связанного с дополнительным резонансным контуром, позволяющая обеспечить как азимутальную однородность распределения электрического поля, так и возможность отстройки паразитного вида колебаний. Кроме того, предложенный вариант выходного резонатора позволяет достаточно просто обеспечить необходимое значение импеданса зазора.

Впервые данная конструкция была предложена и реализована группой инженеров под руководством к.т.н. В. Е. Демина, однако анализа электродинамики данной системы связанных резонаторов дано не было.

2. АНАЛИЗ ВЫХОДНОГО РЕЗОНАТОРА

Азимутальный перепад импеданса взаимодействия в выходном резонаторе связан с наличием элемента связи резонатора с выходным волноводом, нарушающего симметрию кольцевого резонатора. Очевидно, что сохранение симметрии минимизирует азимутальную неоднородность. Для сохранения симметрии в конструкцию кольцевого резонатора вводятся две щели связи, расположенные под углом 180 град по отношению друг к другу. Эти элементы связи являются запредельными волноводами для частоты рабочего диапазона и образуют общий электромагнитный объем с охватывающим резонатором, который в свою очередь связан с выходным волноводом. Данная конструкция позволяет исключить неоднородность в виде выходного волновода в активном резонаторе, а связь в охватывающем не влияет на азимутальное распределение в активном резонаторе.

Охватывающий резонатор представляет собой П-образный волновод, закороченный двумя штырями. Основной модой охватывающего резонатора является мода H_{013} , где три вариации электрического поля выбраны из следующих соображений: в области щелей связи поля H_{013} синфазны и имеют максимум в середине щели. Для настройки охватывающего резонатора предусмотрены настроечные штыри, расположенные в максимуме электрического поля таким образом, что, следуя теореме малых возмущений, перемещение штыря внутрь охватывающего резонатора приводит к росту резонансной частоты моды H_{013} .

Реальная часть импеданса зазора, очевидно, при наличии охватывающего резонатора будет иметь вид двугорбой фильтровой характеристики при правильной настройке. Следуя теореме Боде, легко видеть, что, поскольку площадь под кривой реальной части импеданса является инва-

риантом, то способом настройки на заданное значение импеданса служит изменение связи кольцевого резонатора с охватывающим контуром, что легко осуществить изменением геометрии щели связи.

Для рассмотрения данной конструкции принят проект клистрона с рабочей частотой 2800 МГц. В качестве прототипа конструкции выбран клистрон КИУ-290 с 38-лучевой электронной пушкой. Расчет пространства взаимодействия дал требуемую величину реальной части сопротивления зазора, равную 270 Ом. Моделирование осуществлялось в пакете программ HFSS.

Общий вид выходного резонатора представлен на рис. 1. Геометрия охватывающего резонатора, ввиду отсутствия аналитической теории П-образных волноводов, выбиралась на основании номограмм работы [2]. Наличие элементов перестройки частоты в охватывающем резонаторе не потребовало большей точности определения собственной частоты. На рис. 2 показан процесс настройки связанной системы штырями связи в охватывающем резонаторе по общей методике, изложенной в работе [3]. Частота активного резонатора определялась при закорачивании элементами настройки активного звена. Графики хорошо демонстрируют получение связанной системы с равноволновой двугорбой характеристикой. При этом результаты расчета позволяют утверждать, что частота активного резонатора не зависит от конструкции элементов связи, что позволило, изменяя ширину щели связи, легко добиться настройки на заданную величину реальной части импеданса зазора.

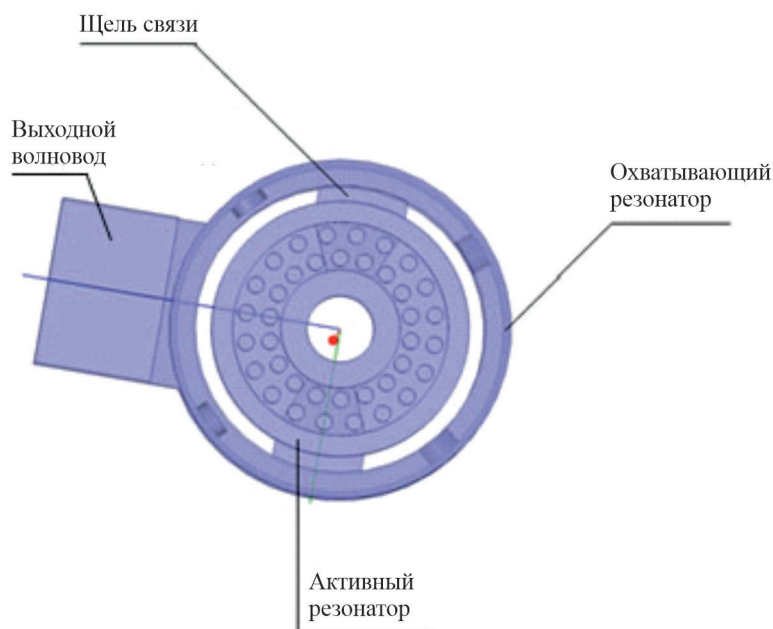


Рис. 1. Общий вид выходного резонатора (синим цветом выделена вакуумная часть)

Анализ полосовых характеристик показал, что ближайший паразитный вид колебаний «бабочка» отстроен от рабочей моды более чем на 300 МГц и слабо связан с выходным волноводом (рис. 3).

Моделирование фильтровой системы показало легко достижимый результат настройки на заданный импеданс зазора. Анализ сопротивлений каналов выявил, что перепад значений по азимуту составляет 1,2 раза, что много меньше, чем для резонаторов, непосредственно связан-

ных с выходным волноводом (см. рис. 3). При данном перепаде коэффициент использования мощности [3] дает значение 0,92, а КПД стремится к значению 70 %, достаточному для конструирования прибора.

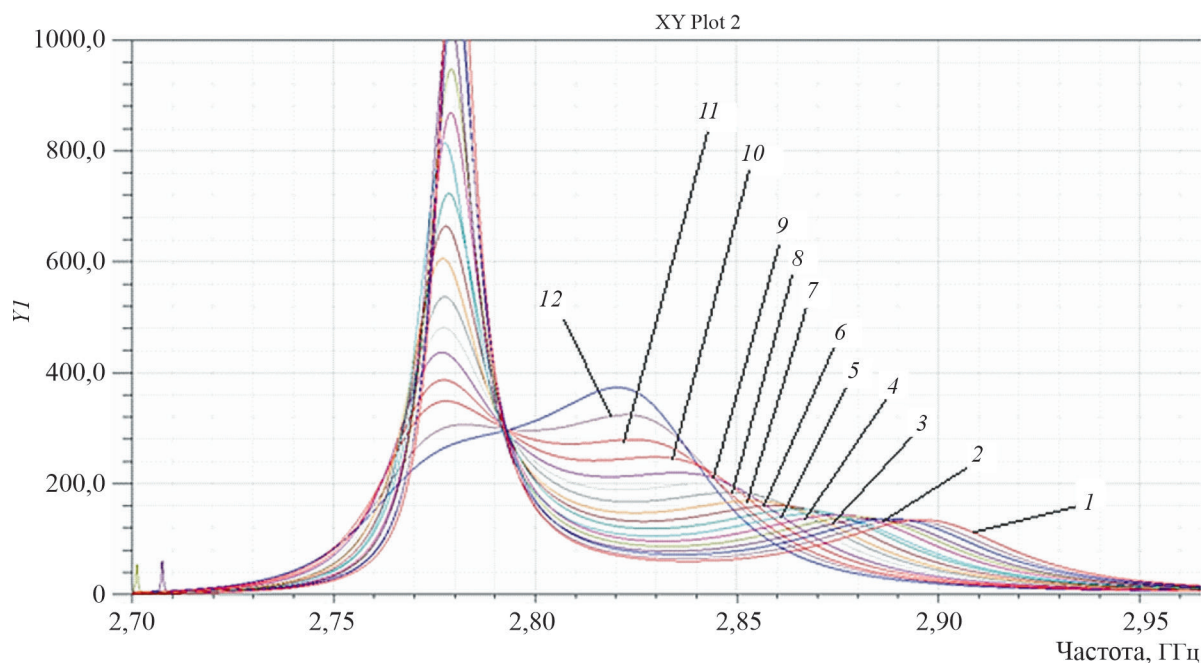


Рис. 2. Настройка передаточной характеристики связанной системы (1...12 – шаг глубины элемента настройки 0,05 мм)

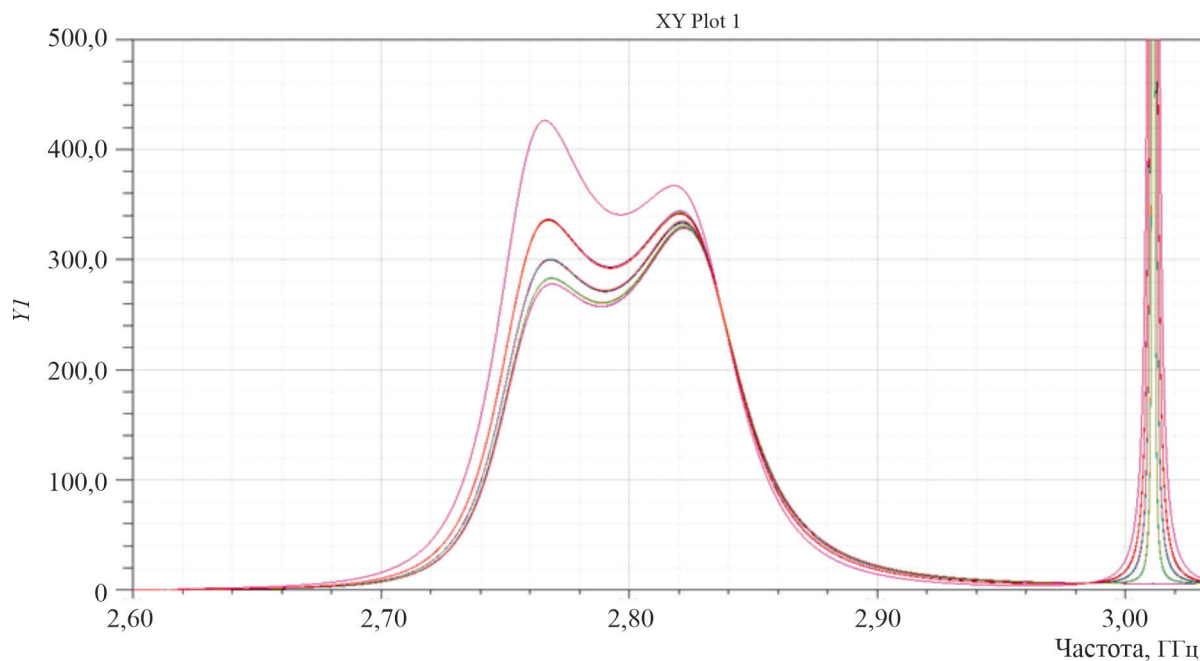


Рис. 3. Зависимость реальной части импеданса зазора от частоты для разных каналов

Поскольку выходной резонатор проектируется для клистрона с выходной мощностью более 20 МВт, то немаловажным вопросом является электрическая прочность. Наличие элементов настройки может привести к возникновению пробоев и искрений в зазорах, что нивелирует данную идею. Для анализа устойчивости данной конструкции к СВЧ-пробою был использован критерий Килпатрика, который дает для частоты 2,8 ГГц предельное значение напряженности электрического поля не более 34 МВ/м.

На рис. 4 дано распределение модуля напряженности электрического поля в сечении резонатора. Моделирование показывает, что и в области элементов настройки, и в области зазора напряженность электрического поля не превосходит 5 МВ/м, что в шесть раз ниже предельной величины.

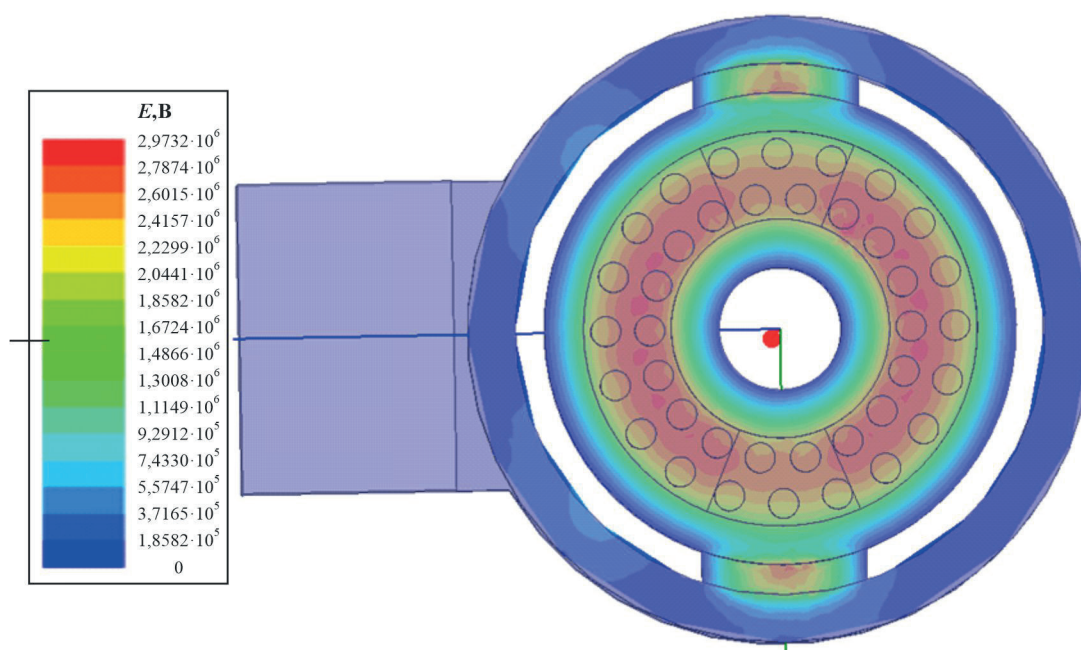


Рис. 4. Распределение модуля напряженности электрического поля в резонаторе

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен вариант построения выходного кольцевого резонатора МЛК в виде связанной системы «активный + пассивный резонаторы». Показана легкость настройки системы на заданную из анализа пространства взаимодействия величину реальной части сопротивления зазора. Благодаря симметричному расположению щелей связи активного и пассивного резонаторов, паразитную моду типа «бабочка» удастся «отстроить» вверх по частоте более чем на 300 МГц в диапазоне 2,8 ГГц и исключить ее связь с выходным трактом. Кроме того, симметризация связи позволяет обеспечить азимутальный перепад реальной части сопротивления зазора не более 1,2 раза, что обеспечивает коэффициент использования мощности более 0,9. Анализ по критерию Килпатрика предельного уровня напряженности электрического поля показал шестикратный запас для 20 МВт выходной мощности.

Предложенная конструкция выходной системы является наиболее эффективной для создания МЛК с кольцевыми резонаторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Increased efficiency of high – power multiple – beam klystron based on optimization of the output cavity / D. A. Komarov [et al.] // Proc. IEEE Int. Vac. Electron Conf. (IVEC). – 2017. – P. 1 – 2.
2. Гуревич, А. Г. Полые резонаторы и волноводы / А. Г. Гуревич. – М.: Советское радио, 1952.
3. Комаров, Д. А. Управление полосовыми характеристиками мощных сверхвысокочастотных электровакуумных приборов с помощью фильтровых систем / Д. А. Комаров, С. П. Морев, Ю. Н. Парамонов // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 11. – С. 1206 – 1211.

Статья поступила 3 декабря 2024 г.

== НОВЫЕ КНИГИ ==

Интеллектуальные технологии в беспилотных системах / В.А. Гвоздева. – Москва : ИНФРА-М, 2025. – 197 с.

В учебнике рассмотрена работа по применению интеллектуальных технологий в беспилотных системах. Дано описание методики исследования, изложены результаты проведенной работы, а также их интерпретация. Изучены основы управления интеллектуальными беспилотными системами. Описаны основные понятия и определения, история развития, основы управления данными в беспилотных системах. Приведены основные методы и модели, используемые в интеллектуальных беспилотных системах. Рассмотрены вопросы управления данными в беспилотных системах различных видов деятельности. Соответствует требованиям федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования последнего поколения.

Беспилотные летательные аппараты, их электромагнитная стойкость и математические модели систем стабилизации / В.А. Крамарь, А.Н. Володин, Е.В. Евтушенко, В.П. Макогон, А.И. Харланов. – Москва : ИНФРА-М, 2025. – 180 с.

В монографии рассматриваются беспилотные летательные аппараты, их назначение, классификация, история развития, аспекты построения математических моделей систем стабилизации беспилотных летательных аппаратов как многомерных многотактных непрерывно-дискретных и интеллектуальных систем автоматического управления и электромагнитная стойкость их систем стабилизации.

УДК 621.385

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХАЗОРНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ В ВИДЕ КППР И ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ МОД

Ю. С. Тихонов, А. Ю. Мирошниченко, В. А. Царев, Н. А. Акафьева

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Представлены результаты исследования двухзазорного миниатюрного многоканального клистронного резонатора с дополнительным элементом в виде кольцевого планарного разрезного резонатора электрического типа (КППР). Разработаны две конструкции резонатора: квадратного и прямоугольного сечения. Проведен расчет основных электродинамических и электронных параметров двух типов резонатора. Показана возможность подавления высших мод в спектре резонатора с помощью введения в полосковый элемент резонатора КППР. Резонатор может найти применение в миниатюрных многолучевых приборах клистронного типа для различных систем телекоммуникаций и связи.

КС: миниатюрный клистрон, кольцевой планарный разрезной резонатор электрического типа, многоканальный резонатор, метод конечных элементов, электродинамические параметры, электронные параметры, подавление высших мод

RESEARCH OF A DOUBLE-GAP MULTICHANNEL RESONATOR WITH AN ADDITIONAL ELEMENT IN THE FORM OF A CeSRR AND THE POSSIBILITY OF SUPPRESSING HIGHER MODES

Yu. S. Tikhonov, A. Yu. Miroshnichenko, V. A. Tsarev, N. A. Akafyeva

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

The results of the research of a double-gap miniaturized multichannel klystron resonator with additional elements in the form of complementary electric split ring resonator (CeSRR) are reported. Two designs of the resonator of square and rectangular cross-section are developed. The basic electrodynamic and electronic parameters of the two types of resonators are calculated. The possibility of suppression of higher modes in the resonator spectrum by means of introduction of CeSRR into the strip element of the resonator is shown. The resonator can be used in miniature multibeam klystron-type devices for various telecommunication and communication systems.

Keywords: miniature klystron, complementary electric split ring resonator, multichannel resonator, finite element method, electrodynamic parameters, electronic parameters, suppression of higher modes

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время многолучевые клистроны (МЛК) находят широкое применение в технике сверхвысоких частот, и их разработкой занимаются научные группы в России и за рубежом. Ведутся исследования по разработке мощных усилителей электромагнитных колебаний на основе МЛК различных диапазонов [1–4]. Кроме мощных и сверхмощных МЛК, разрабатываются также миниатюрные МЛК для применения в бортовой аппаратуре [5, 6]. Они представляют большой интерес для различных приложений, таких, как телекоммуникация, навигация, радиолокация.

Известно, что во многом выходные параметры клистронного усилителя зависят от его электродинамической системы – резонаторов. При этом у большинства клистронов резонаторы однозачорные. Увеличения характеристического сопротивления, расширения полосы частот можно добиться применением двухзачорных резонаторов.

Наряду с этим в последнее время получили распространение различные электродинамические структуры с использованием метаматериалов (МТМ) [7, 8]. Метаматериал, описанный впервые [9] как композитная среда с одновременно отрицательными магнитной восприимчивостью и диэлектрической проницаемостью, основан на периодическом массиве разнесенных проводящих немагнитных разрезных кольцевых резонаторов и прямолинейных проводников, которые образуют «левостороннюю» среду с экзотическими электромагнитными свойствами.

В основном МТМ находят применение в резонаторах, фильтрах, фазовращателях, антеннах. Это уникальные искусственные структуры, не имеющие аналогов в природе, которые модифицируют диэлектрическую и магнитную проницаемости объектов, вплоть до отрицательных значений. Исследованиям возможности применения МТМ в различных приборах вакуумной электроники и ускорителях посвящен ряд работ [10, 11]. Это лампа с бегущей волной, лампа с обратной волной и клистроны. При использовании МТМ удастся реализовать преимущества по сравнению с классическими приборами, такие, как уменьшенные массогабаритные параметры, возможность управления спектром колебаний резонансной системы.

Цель данной работы – оценить влияние двух одиночных разрезных кольцевых резонаторов, размещенных в объеме клистронного резонатора, на частотный спектр и его электродинамические параметры. В данной статье приведены результаты исследований двухзачорного многолучевого клистронного резонатора. Для расчета электродинамических параметров резонатора использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в частотной области.

2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МТМ

В работе изучается применение дополнительного кольцевого планарного разрезного резонатора электрического типа (КППР) (complementary split ring resonator, CeSRR) (рис. 1), который в работе [12] был использован в лампе бегущей и обратной волны в качестве лестничной структуры, на которую нагружен волновод. В данной работе мы также используем планарную конструкцию КППР, который размещен в полосковых проводниках объемного резонатора. Размеры КППР были выбраны с учетом возможных полос пропускания и габаритных размеров полосковых линий объемного резонатора.

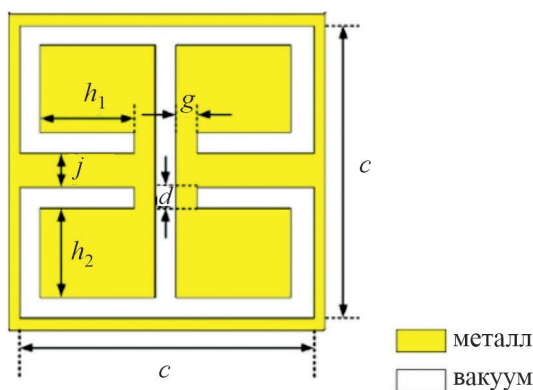


Рис. 1. Конструкция дополнительного кольцевого планарного разрезного резонатора и его габаритные размеры, мм:

$$c = 2,7; h_1 = 0,85; h_2 = 0,8; j = 0,3; g = 0,2; d = 0,2$$

На первом этапе исследований было проведено изучение амплитудно-частотной характеристики отдельной ячейки КППР по методике, изложенной в [12]. Для этого было проведено электромагнитное моделирование отдельного КППР в кубической ячейке с размерами $b \times b \times b$. Если размер элементарной ячейки КППР намного меньше длины волны, то МТМ можно рассматривать как эффективную среду. Результаты исследования амплитудно-частотной характеристики ячейки КППР представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что в диапазоне 25...28 ГГц КППР имеет ряд областей пропускания и затухания.

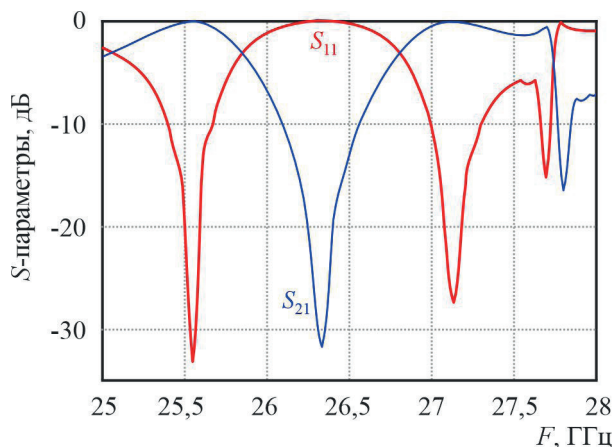


Рис. 2. Частотная характеристика КППР

3. КОНСТРУКЦИЯ ДВУХЗАЗОРНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Конструкция исследуемого клистронного резонатора приведена на рис. 3. Он состоит из корпуса 1, двух ленточных проводников прямоугольного сечения 2, КППР элемента 3, центрального электрода 4 с пролетными каналами для электронного потока 5, двух боковых электродов 6, также имеющих пролетные каналы. Центральный электрод 4 резонатора, имеющий призматическую форму, соединен с двумя ленточными проводниками 2. В свою очередь ленточные проводники электрически соединены с корпусом объемного резонатора. В середине каждого из ленточных проводников расположены по одному КППР, которые выполнены в виде щелевой линии. Между боковыми электродами и центральным электродом образованы два высокочастотных зазора взаимодействия.

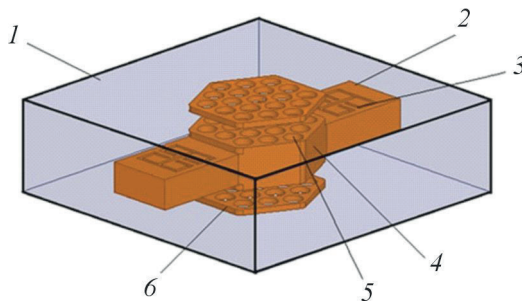


Рис. 3. Конструкция двухзазорного многоканального резонатора

Исследовались две конструкции резонатора, представленные на рис. 4: с квадратным сечением корпуса (конструкция № 1) и прямоугольным сечением корпуса (конструкция № 2). В модели с прямоугольным сечением корпуса соотношение сторон выбрано по правилу «золотого сечения» – 1,61. Соответственно во втором случае длина ленточного проводника была больше, и резонансные частоты низшего вида колебаний и первого синфазного вида были меньше. Основные размеры резонаторов приведены в табл. 1.

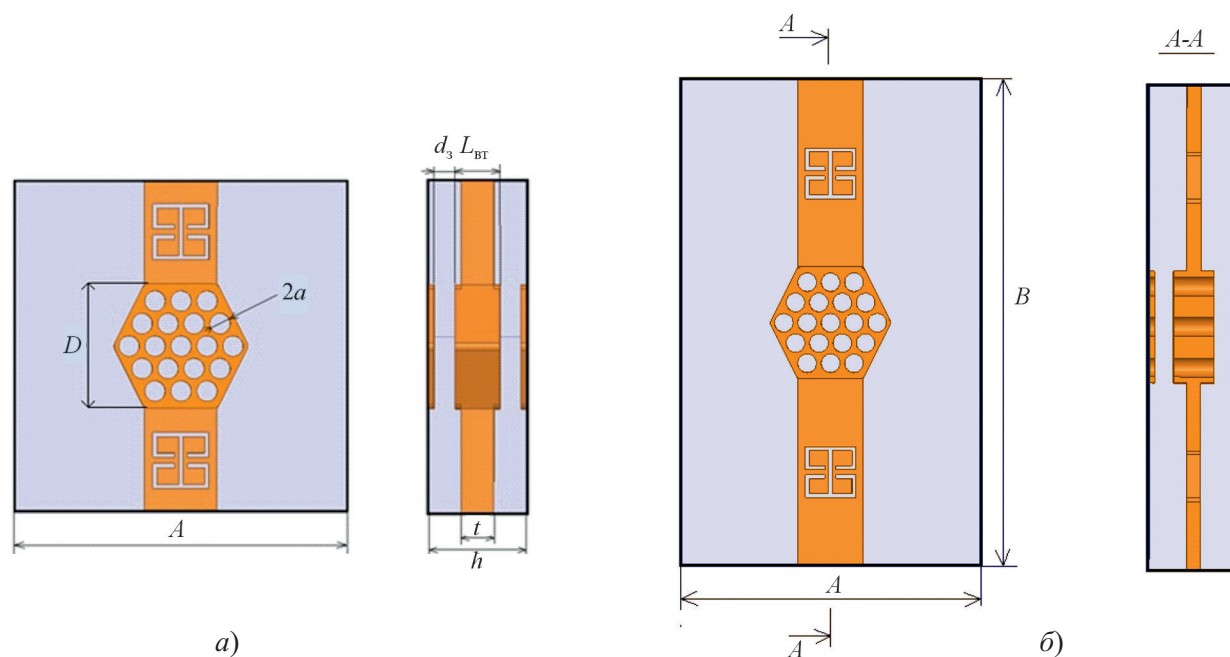


Рис. 4. Двухззорный многоканальный резонатор:
а – с квадратным сечением корпуса (конструкция № 1); б – с прямоугольным сечением корпуса (конструкция № 2)

Таблица 1

Габаритные размеры резонатора, мм

Размер	Конструкция № 1	Конструкция № 2
A	16	16
B	—	26
D	6	6
h	4,75	4,75
a	0,5	0,5
d_3	1	1
$L_{вт}$	2,175	2,175
t	1,6	0,75

3.1. Расчёт электродинамических параметров

Для каждой конструкции резонатора исследовались два варианта: «чистая» полосковая линия и полосковая линия с КППР. Известно, что резонаторы такого типа, применяемые в клистронах, обычно работают либо на низшем типе колебаний, либо на второй моде, на которых обеспечиваются достаточно высокие электродинамические параметры.

Электродинамическое моделирование резонаторов проводилось в диапазоне до 30 ГГц. Результаты исследования приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Результаты расчета электродинамических параметров резонатора
(конструкция № 1)**

№ моды	Тип колебаний	Резонатор без КППР			Тип колебаний	Резонатор с КППР		
		F , ГГц	Q	ρ , Ом		F , ГГц	Q	ρ , Ом
1	π	7,628	1477	106	π	7,422	1222	122
2	2π	11,029	2839	80	2π	10,984	2666	80
3	π	27,510	2374	13	2π	28,328	3417	5
4	2π	28,364	3516	35	π	28,574	1526	10

Таблица 3

**Результаты расчета электродинамических параметров резонатора
(конструкция № 2)**

№ моды	Тип колебаний	Резонатор без КППР			Тип колебаний	Резонатор с КППР		
		F , ГГц	Q	ρ , Ом		F , ГГц	Q	ρ , Ом
1	π	4,582	1391	156	π	4,484	1137	168
2	2π	9,254	3512	77	2π	9,248	3485	73
3	2π	16,044	2323	19	2π	15,858	1840	19
4	2π	18,444	3732	22	2π	18,442	3710	22
5	2π	28,032	4571	26	2π	28,027	4560	16
6	π	28,779	2930	52	π	29,541	1735	6

Из полученных результатов видно, что в диапазоне до 30 ГГц спектр представлен колебаниями как противофазного (π) типа, так и синфазного (2π) типа. Применение добавочного КППР в полосковой линии дает увеличение характеристического сопротивления ρ на низшей π -моде для первой конструкции на 15 %, для второй на 7,7 %. На первом синфазном виде колебаний ρ не меняется для резонатора квадратного сечения либо незначительно снижается для резонатора прямоугольного сечения. При этом собственная добротность Q_0 для первой конструкции на низшей π -моде падает на 17 %, на низшей 2π -моде – на 6 %. Для второй конструкции резонатора на низшей π -моде собственная добротность уменьшается на 18 %, а на низшей 2π -моде – на 0,8 %.

3.2. Исследование распределения ВЧ-поля в резонаторе

В качестве примера на рис. 5 приведено распределение поля в резонаторе в поперечной плоскости, проходящей через центральный пролетный канал (конструкция № 2) с КППР для двух

низших типов колебаний резонатора, противофазного и синфазного. Левая часть рисунков иллюстрирует интенсивность поля, правая – направление поля в резонаторе.

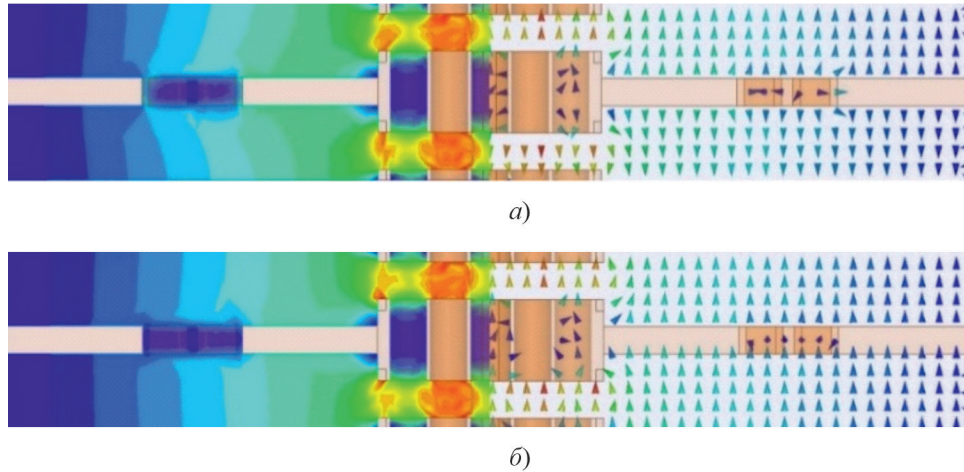


Рис. 5. Распределение высокочастотного поля в зазоре и интенсивность электрического поля для π -моды (а) и для 2π -моды (б) в резонаторе конструкции № 2 с КППР

Известно, что для традиционных многолучевых клистронов с параллельными лучами линейный поперечный размер центрального электрода D для оптимального взаимодействия не должен превышать значения $(0,4 \dots 0,5) \times \lambda$, где λ – рабочая длина волны в резонаторе [13]. Для резонатора конструкции № 1 на π -моду $\lambda = 39,3$ мм и на 2π -моду соответственно $\lambda = 27,2$ мм, а для резонатора конструкции № 2 на π -моду $\lambda = 65,45$ мм и на 2π -моду $\lambda = 32,41$ мм. При этом поперечный размер центрального электрода не превышает 6 мм.

Было проведено исследование неравномерности распределения высокочастотного электрического поля вдоль поперечного размера области взаимодействия в различных каналах резонатора квадратного и прямоугольного сечений для двух первых мод резонатора.

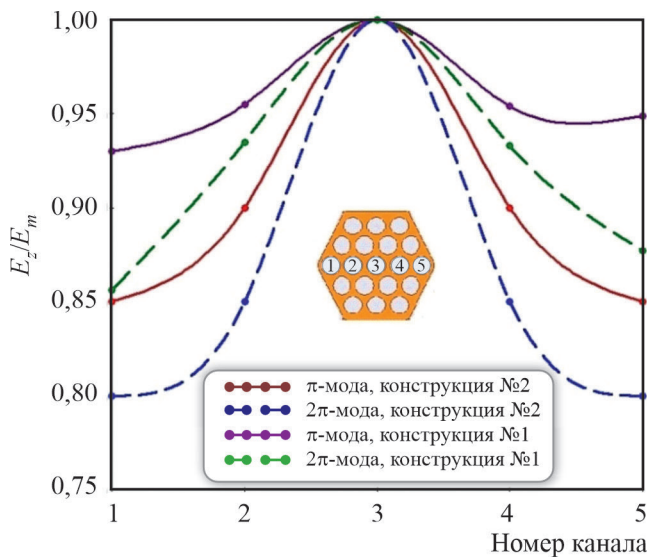


Рис. 6. Распределение высокочастотного поля для π - и 2π -колебаний в поперечном направлении резонатора

На рис. 6 показано распределение ВЧ электрического поля для низшей π -моды и низшей 2π -моды. Видно, что максимальная амплитуда ВЧ электрического поля для π - и 2π -колебаний обеих исследуемых конструкций резонатора наблюдается в центральном (третьем) канале, минимальная амплитуда – в крайних. Неравномерность поля противофазного типа колебаний для резонатора конструкции № 1 – около 7 %, а для резонатора конструкции № 2 – 15 %. При этом неравномерность поля синфазного типа колебаний для резонатора конструкции № 1 – 15 %, для резонатора конструкции № 2 – 20 %.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ВЫСШИХ ТИПОВ КОЛЕБАНИЙ В КЛИСТРОННОМ РЕЗОНАТОРЕ С ПОМОЩЬЮ КППР

Одним из этапов работы было исследование влияния КППР на спектр колебаний резонатора. На рис. 7 приведены спектральные зависимости для двух вариантов конструкций резонатора, на которых оценивалось резонансное сопротивление резонаторов $R_0 = \rho Q_0$ в зависимости от частоты. Сплошными линиями показаны результаты для резонатора без КППР, пунктиром – с КППР.

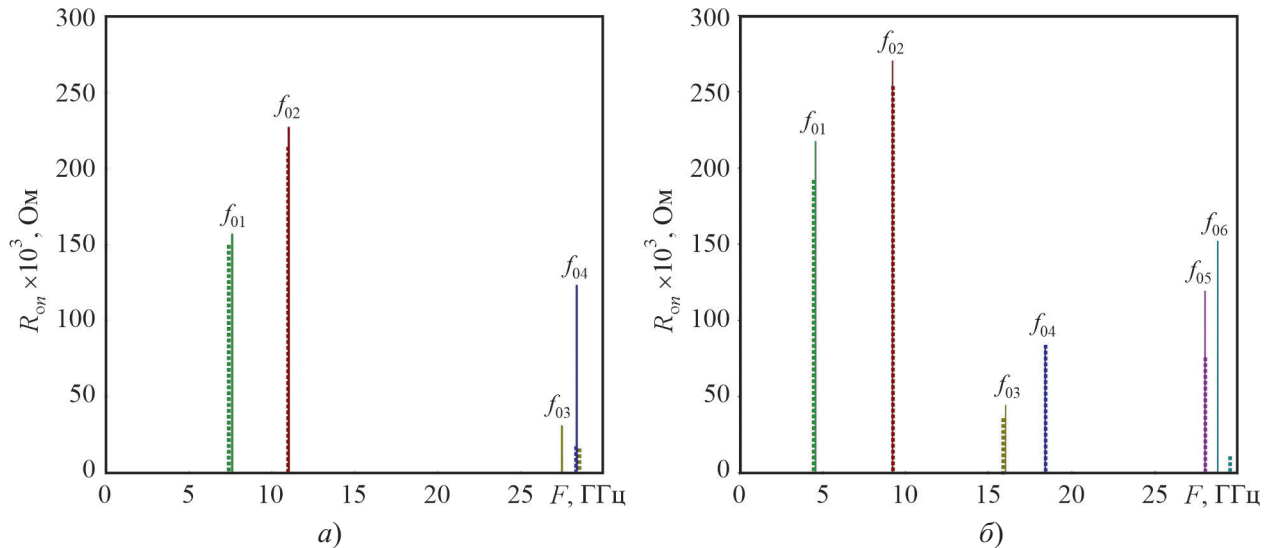


Рис. 7. Спектр исследуемого резонатора:

a – конструкция № 1; *б* – конструкция № 2

Из рис. 7 хорошо видно, что в области около 28 ГГц происходит подавление высших мод резонатора. При этом для резонатора квадратного сечения на моде f_{03} параметр R_0 меньше в 2 раза, для моды f_{04} – в 7,2 раза. Кроме того, для моды f_{03} происходит смещение по частоте вверх по диапазону. Для резонатора конструкции № 2 параметр R_0 на моде f_{05} меньше в 1,59 раза, на моде f_{06} – в 14,9 раз со смещением частоты вверх. Для двух основных мод (π или 2π) влияние КППР на резонансное сопротивление незначительное.

5. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХЗАЗОРНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Был произведён расчёт электронных параметров резонатора с КППР: определение коэффициента взаимодействия M и относительной электронной проводимости G_e/G_0 для двух основных мод (№ 1 и № 2, см. табл. 2, 3). На рис. 8 приведены результаты расчёта.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы. Для резонатора конструкции № 1 (рис. 8, *a*) для противофазного типа колебаний оптимальный режим работы лежит в диапазоне 6...7 кВ, относительная электронная проводимость положительна и самовозбуждение отсутствует, а коэффициент взаимодействия – около 0,9. Для синфазного типа колебаний оптимальный режим лежит в диапазоне примерно 3...4 кВ, самовозбуждение отсутствует, коэффициент взаимодействия – около 0,75.

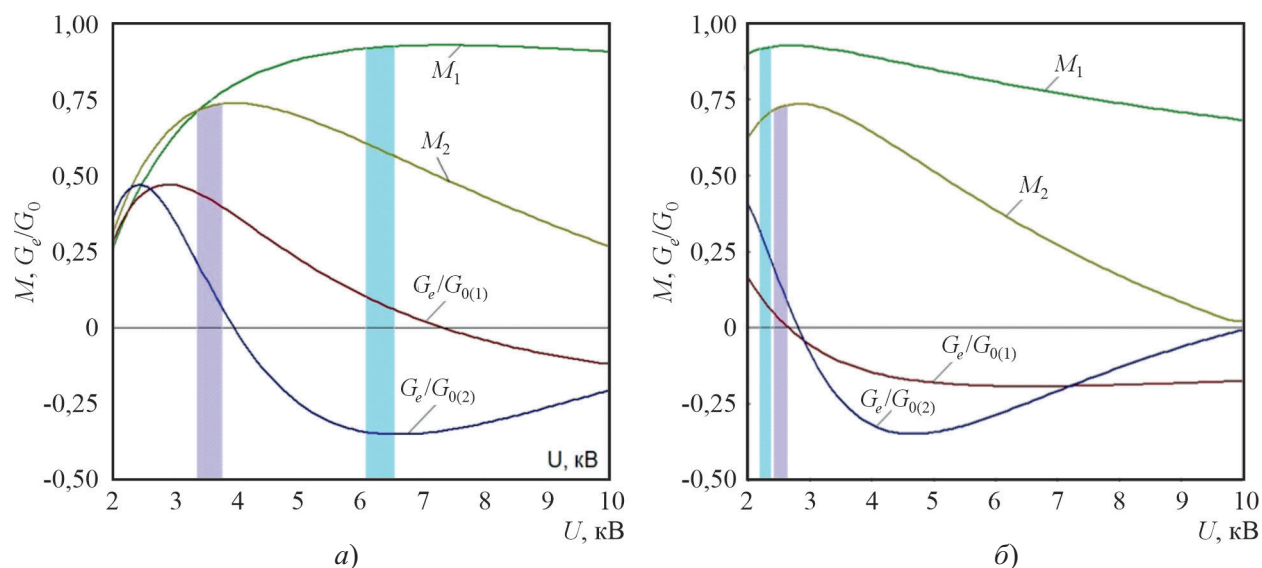


Рис. 8. Зависимости коэффициента взаимодействия M и относительной электронной проводимости G_e/G_0 от ускоряющего напряжения для резонаторов конструкции № 1 с КППР (а) и конструкции № 2 с КППР (б):

$M_1, G_e/G_{0(1)}$ – низшая π -мода; $M_2, G_e/G_{0(2)}$ – низшая 2π -мода

Для резонатора конструкции № 2 (рис. 8, б) для противофазного и синфазного типов колебаний оптимальный режим работы лежит в диапазоне 2...2,7 кВ, самовозбуждение в этом диапазоне напряжений отсутствует. Коэффициент взаимодействия для противофазного типа колебаний составляет около 0,9, для синфазного – около 0,7.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован двухзачерный многоканальный клистронный резонатор с полосковыми линиями. В ходе работы проведен ряд численных экспериментов с помощью МКЭ. Особенностью конструкции резонатора являлось применение в полосковых линиях, соединяющих центральный электрод с корпусом резонатора, относительно новых электродинамических элементов – КППР. При этом на низших модах в конструкциях № 1 и № 2 существенного ухудшения электродинамических параметров резонатора не наблюдалось. Ожидается, немного снизилась добротность, а характеристическое сопротивление даже несколько увеличилось. Интересным моментом применения КППР, по нашему мнению, было то, что внедрение такого элемента в резонатор может позволить снизить уровень высших мод, а изменяя размеры КППР, вероятно, можно отстраивать резонатор от нежелательных колебаний.

Исходя из того, что размещение КППР в полосковых линиях будет ухудшать теплоотвод от центрального электрода, исследованные типы резонаторов могут найти применение прежде всего при разработке миниатюрных приборов клистронного типа для телекоммуникации, для подвижных и наземных средств связи, систем радиолокации, навигации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галдецкий, А. В. Многолучевые клистроны с радиальным расположением лучей / А. В. Галдецкий, Н. А. Голованов // Электроника и микроэлектроника СВЧ: материалы Всерос. науч.-техн. конф. СПб. – 2023. – С. 4 – 9.

2. Design studies for a 2 kW (CW) power *L/S* band multi beam Klystron / D. Kant [et al.] // 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – 2018. – P. 111 – 112.
3. Equivalent circuit analysis of a rectangular double-reentrant cavity with circular cylindrical ferrule for klystrons / A. Bansiwala [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2019. – Iss. 66. – No 11. – P. 4952 – 4956.
4. Research and development of *S*-band high power multibeam klystron / B. Shen [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2014. – Iss. 61. – No 6. – P. 1848 – 1853.
5. Design of a high frequency miniature multi beam klystron (MBK) / M. Kumar [et al.] // 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – 2011. – P. 321 – 322.
6. Miniature klystron for CubeSats / B. Vancil [et al.] // 2020 IEEE 21st International Conference on Vacuum Electronics (IVEC). – 2020. – P. 47 – 48.
7. Вендик, И. Б. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) / И. Б. Вендик, О. Г. Вендик // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – № 1. – С. 3 – 28.
8. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials / D. R. Smith [et al.] // Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. – 2005. – Iss. 71. – No 3. – P. 036617.
9. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D. R. Smith [et al.] // Physical Review Letters. – 2000. – Iss. 84. – No 18. – P. 4184.
10. Recent advances in metamaterial klystrons / X. Wang [et al.] // EPJ Applied Metamaterials. – 2021. – Iss. 8. – P. 9.
11. Metamaterial-inspired interaction structure for MW-level klystron at 714 MHz / X. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2022. – Iss. 69. – No 11. – P. 6336 – 6341.
12. Sub-wavelength waveguide loaded by a complementary electric metamaterial for vacuum electron devices / Z. Duan [et al.] // Physics of Plasmas. – 2014. – Iss. 21. – No 10.
13. Царев, В. А. Математическое моделирование низковольтного многолучевого клистрона миллиметрового диапазона / В. А. Царев, В. Ю. Мучкаев, М. А. Манжосин // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2020. – Т. 28. – № 5. – С. 513 – 523.

*Статья поступила 22 декабря 2024 г.,
после переработки – 28 февраля 2025 г.*

=== НОВЫЕ КНИГИ ===

Элементы приборов визуализации изображения / В.Г. Волков, П.Д. Гиндин.
– В 2-х книгах. – М.: Техносфера, 2024.

В книге сначала рассматриваются все основные виды приборов визуализации изображения (ПВИ): их принцип действия, возможности, преимущества, недостатки. В дальнейшем, что и определяет главное содержание книги, рассмотрены основные элементы ПВИ:

- для приборов ночного видения (ПНВ) – объективы, фильтры, электронно-оптические преобразователи (ЭОП), осветители и целеуказатели, окулярные системы, принадлежности и модульный принцип их построения;
- для активно-импульсных приборов ночного видения (АИ ПНВ) – импульсные ЭОП, импульсные лазерные осветители;
- для телевизионных систем (ТВС) – объективы, фильтры, ТВ-камеры, ТВ-мониторы, принадлежности общего назначения и стабилизаторы для ТВ-камер;
- осветители и целеуказатели для ПНВ, ТВС, АИ ПНВ: светодиодные, лазерные, для ПВИ наземного и подводного видения;
- для тепловизионных приборов (ТВП) – инфракрасные (ИК) объективы, ИК-фильтры, сканирующие системы, фотоприемные устройства, блоки электронной обработки, системы охлаждения и стабилизации температуры, ИК-осветители и целеуказатели;
- для многоканальных ПВИ (МПВИ) – двух- и многоканальные объективы, их просветляющие и дихроичные покрытия, двух- и многоканальные фотоприемные устройства, мультиспектральные и гиперспектральные ТВ-камеры, модули для МПВИ, многоканальные модульные осветители-целеуказатели.

Для всех типов ПВИ рассмотрены их источники первичного питания – химические источники тока (ХИТ) – первичные ХИТ-элементы, герметичные щелочные и кислотные аккумуляторы, герметичные литиевые аккумуляторы, зарядка аккумуляторов и соответствующие зарядные устройства.

Управление беспилотными летательными аппаратами: основы аэрофото-съемки и фотограмметрии: учебно-методическое пособие / М.Ю. Плященко, Н.З. Попов, М.В. Луцкий и др. – Москва : Советский спорт, 2024. – 408 с.

Данное методическое пособие предназначено для образовательных учреждений, авиамodelьных секций, кружков робототехники или для самостоятельного изучения. Пособие включает в себя 10 глав, которые раскрывают важные этапы истории развития беспилотной авиации, текущие и перспективные сферы применения БАС, базовые знания устройства и функционирования мультикоптеров, теоретическую и практическую часть основ пилотирования, выполняемую на учебно-методическом комплексе «Пионер».

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

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

2. Статья должна содержать:

- соответствующий индекс универсальной десятичной классификации литературы (УДК);
- инициалы и фамилии авторов;
- название;
- реферат;
- ключевые слова;
- текст самой статьи;
- список литературы;
- краткие сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество (полностью), должность, ученую степень, послевузовское специальное образование (аспирант, соискатель, докторант, студент, магистрант), место работы, город, страна, домашний и электронный адрес, телефон;
- информацию о финансировании статьи (грантовая поддержка).

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 программе 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 фотографий допускается формат JPEG); векторная графика – в формате CorelDraw;
- 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 Р 7.0.100–2018 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 2025 г. (4 вып. в год). Цена подписки – 9600 руб., цена 1 номера – 2400 руб., включая НДС (20 %).

Сборник зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер ПИ № ФС 77-73640 от 7 сентября 2018 г.) и включен в перечень ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук), квартал 2.

Для оформления подписки необходимо оформить заказ, произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. АО «НПП «Исток» им. Шокина», отдел сбыта; тел.: 8(495)465-88-67. Отчетные документы высылаются с каждым номером сборника.

ЗАКАЗ

Прошу принять заказ на подписку научно-технического сборника «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2025 г. и направлять по адресу:

Куда _____
(почтовый индекс, адрес)

Кому _____
(название организации)

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.

Дата выхода в свет: 17.03.2025 г.

Усл. п. л. 12,0

Формат 60×88^{1/8}

Отпечатано: Печатная компания ООО «ТипоГрафф»,

Уч.-изд. л. 12,5

Тираж 500

111397, г. Москва, вн. тер. г. муницип. округ Перово,

ул. Новогиреевская, д. 26, с. 3.

Индекс 36292

10 статей

АО «НПП «Исток» им. Шокина». Адрес редакции и издателя: 141190, г. Фрязино, Московская обл.,
ул. Вокзальная, д. 2а, корпус 1, комната 65, этаж 2. Тел.: (495)465-86-12

E-mail: stebunov@istokmw.ru; info@istokmw.ru

Подписной индекс 36292
в каталоге агентства «Роспечать»
Подписной индекс 36292



Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2025, вып.1(565), с. 98