



# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

## СВЧ - ТЕХНИКА

ВЫПУСК 4 (555)

2022

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

## СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск 4(555)

2022

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.ф.-м.н. **К.С. Журавлев**, ИФП СО РАН, г. Новосибирск;  
к.т.н. **П.П. Куцько**, АО «НИИЭТ», г. Воронеж;  
д.т.н. **И.Е. Лысенко**, ИНЭП ИТА ЮФУ, г. Таганрог;  
д.т.н. **П.П. Мальцев**, ИСВЧ ПЭ РАН, г. Москва;  
д.ф.-м.н. **А.В. Медведь**, ФИРЭ РАН, г. Фрязино;  
к.т.н. **В.М. Миннебаев**, АО «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

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

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

© АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2022 г.

# ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

## SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

Issue 4(555)

2022

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.Ph.M.Sc. **K.S. Zhuravlev**, IPh SB RAS, Novosibirsk;  
C.T.Sc. **P.P. Kutsko**, JSC «NIIET», Voronezh;  
D.T.Sc. **I.E. Lysenko**, INEP ITA SFU, Taganrog;  
D.T.Sc. **P.P. Maltsev**, IMWF SE RAS, Moscow;  
D.Ph.M.Sc. **A.V. Medved'**, IRE RAS, Fryazino;  
C.T.Sc. **V.M. Minnebaev**, JSC «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

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

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

© Joint Stock Company «Research and Production Corporation «Istok» named after A.I. Shokin», 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

### Технология и материаловедение

- Вяхирев В.Б.* – Применение измерителя-анализатора Л2-109 для измерения теплового сопротивления СВЧ-двухполюсников. Часть 2..... 6
- Воробьев Д.И., Каргашин Ю.Д., Кулиев М.В., Приступчик Н.К., Куликова И.В., Галдецкий А.В., Соловьев Н.А.* – Разработка и исследование устройства отвода тепла, обеспечивающего функционирование АФАР при проведении стендовых испытаний..... 15
- Коломин В.М., Рыбкин В.Н., Фомина Г.В., Карасёв Н.С., Иовдальский В.А., Смирнова А.А.* – Способ изготовления диэлектрических резонаторов СВЧ..... 23

### Электровакuumные приборы

- Шалаев П.Д., Щербаков Ю.Н., Калачев А.Д.* – Повышение КПД ламп бегущей волны и клистронов в радиопередающих трактах с высокой линейностью характеристик..... 30
- Петросян А.И., Алексеева Н.А., Роговин В.И., Чистяков И.А.* – Расчёт влияния начальных тепловых скоростей электронов на ток пучка, формируемого электронной пушкой..... 43

### Твердотельная электроника

- Горюнов И.В., Иовдальский В.А., Фёдоров Н.А., Медянцева Е.В.* – Улучшение массогабаритных характеристик ГИС СВЧ-диапазона генераторного модуля..... 51
- Терешкин Е.В.* – Перспективы использования обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами в миллиметровом диапазоне длин волн ... 64

### История

- Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Начальники подразделений «Истока»..... 79

**Тематический указатель**..... 97

**Алфавитный указатель**..... 100

## CONTENTS

### Technology and material science

- Vyakhirev V.B.* – The use of Л12-109 analyzer-meter for measuring the thermal resistance of microwave one-port networks. Part 2..... 6
- Vorobyov D.I., Kargashin Yu.D., Kuliev M.V., Pristupchik N. K., Kulikova I.V., Galdetskiy A.V., Solovyov N.A.* – Development and investigation of a heat removal device providing operation of AESA during bench tests..... 15
- Kolomin V.M., Rybkin V.N., Fomina G.V., Karasev N.S., Iovdalskiy V.A., Smirnova A.A.* – Method for manufacturing microwave dielectric resonators..... 23

### Electrovacuum devices

- Shalaev P.D., Shcherbakov Yu.N., Kalachev A.D.* – Increasing the efficiency of traveling wave tubes and klystrons in radio transmission paths with high linearity of characteristics..... 30
- Petrosyan A.I., Alekseeva N.A., Rogovin V.I., Chistyakov I.A.* – The computation of the influence of initial thermal electron velocities upon the beam current value of an electron gun..... 43

### Solid-state electronics

- Goryunov I.V., Iovdalskiy V.A., Fedorov N.A., Medyankova E.V.* – Improving the weight and size characteristics of generator module microwave HICs..... 51
- Tereshkin E.V.* – Prospects for the use of inverted heterostructures with donor-acceptor doping and digital barriers in the millimeter wavelength range..... 64

### History

- Balyko A.K., Tereshkin E.V., Balyko T.A.* – Heads of «Istok» departments..... 79

- Subject index**..... 97

- Alphabetical index**..... 100

# ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.382

## ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЯ-АНАЛИЗАТОРА Л2-109 ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВЧ-ДВУХПОЛЮСНИКОВ\*

Часть 2

**В. Б. Вяхирев**

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

Методика, описанная в предыдущей части, распространена на СВЧ-приборы, в которых тепло выделяется полевыми транзисторами. Показана возможность построения тепловых эквивалентных математических моделей изучаемых объектов. Предложена оригинальная методика определения температурной зависимости термочувствительного параметра.

*КС: тепловые характеристики, термочувствительный параметр, полевой транзистор с барьером Шоттки, структурная функция*

## THE USE OF Л2-109 ANALYZER-METER FOR MEASURING THE THERMAL RESISTANCE OF MICROWAVE ONE-PORT NETWORKS

Part 2

**V. B. Vyakhirev**

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

The technique described in the previous part is extended to microwave devices, in which heat is generated by field-effect transistors. The possibility of constructing thermal equivalent mathematical models of the objects under study is shown. An original method for determining the temperature dependence of a temperature-sensitive parameter is proposed.

*Keywords: thermal characteristics, temperature-sensitive parameter, Schottky-gate field-effect transistor, structure function*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

СВЧ полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) являются приборами с малыми областями тепловыделения и, следовательно, малой тепловой инерцией. Так, согласно расчетам [1], средняя температура в районе канала (область глубиной 60 нм сразу под затвором раз-

\*Начало в выпуске 2 (549), 2021 г.

мером 0,25 мкм) под действием короткого импульса (200 нс) нагрева менялась с постоянной времени около 1 мкс. Большинство коммерческих измерителей тепловых характеристик, например Rth Meter [2], T3ster [3] и в том числе Л2-109 [4], не предназначены для анализа такого быстрого изменения температуры. Распространившиеся в последнее время оптические методы оценки температуры канала тоже имеют ряд серьезных ограничений [5]. Поэтому прямое измерение тепловых характеристик ПТШ является большой редкостью, хотя оно было бы полезно для производственного контроля выпускаемых компонентов. Разработчикам СВЧ-приборов чаще всего приходится полагаться на расчетные данные. Иногда, например в [1], несовершенство программы симулятора не позволяет учесть все аспекты взаимного влияния температурных и электрических полей. Тем более расчеты не могут предсказать неравномерное распределение тока (а с ним и температуры), вызванное дефектами в материале или несовершенством технологии. Потребность в прямом измерении тепловых характеристик особенно велика для ПТШ на основе материалов с высокой теплопроводностью (GaN, SiC, алмаз). Здесь дефекты монтажа могут свести на нет преимущества этих материалов.

В тех случаях, когда предпринимаются попытки изучать тепловые свойства ПТШ электрическими методами, целью, как правило, является температура канала транзистора при определенной постоянной мощности. Так, в [6] для измерения температуры канала в конструкцию транзистора были включены дополнительные элементы, позволяющие измерять омическое сопротивление затворной металлизации. Авторы этой работы не предлагают такой способ для массового применения, но полагают, что он хорош для калибровки тепловых моделей.

Распространение получил способ [1] оценки теплового сопротивления, в котором термочувствительным параметром являлся ток стока или сопротивление канала, которые измерялись в течение субмикросекундных импульсов напряжения на затворе. Эти импульсы генерировались на фоне постоянного смещения на затворе, обеспечивающего выделение постоянной мощности. Предполагалось, что короткие измерительные импульсы не влияют на температуру канала, которая определяется внешним нагревом и стационарным саморазогревом. Результатом измерения является температура канала, достигнутая в стационарном режиме, и, следовательно, полное тепловое сопротивление.

Целью настоящей работы является распространение методики, описанной в предыдущей части [7], на СВЧ-приборы, в которых тепло выделяется ПТШ. Результатом прямых измерений должно стать не только значение полного теплового сопротивления, но и тепловая модель в виде структурной функции. Эта модель позволяет, во-первых, прогнозировать температуру измеряемого объекта при любых режимах эксплуатации (например, при различных длительностях импульсов мощности), во-вторых, установить, какой вклад в суммарное тепловое сопротивление вносят разнородные участки на пути теплового потока. В некоторых случаях это позволяет увидеть «узкое место» для потока тепла и тем самым выявить причину брака.

Реализация методики стала возможной благодаря созданию специального оборудования и использованию автоматизированного измерителя-анализатора тепловых характеристик Л2-109, оснащенного этим дополнительным оборудованием. Наиболее важной особенностью Л2-109 является (согласно международному стандарту JESD51-14 [8]) возможность измерения переходных температурных зависимостей, которые являются откликом на ступеньку мощности, из которых с помощью встроенных функций строится тепловая эквивалентная математическая модель в виде структурной функции или таблицы.

Для подключения к испытуемому ПТШ использовался электрод стока (при заземленном ис-

токе). При этом напряжение затвор-исток транзистора в течение измерения оставалось постоянным. Превращение транзистора в двухполюсник делает методику измерения более универсальной. Так, при измерении более сложных СВЧ-модулей вместо электрода стока можно использовать электрод питания модуля.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Для реализации поставленной задачи измерительный стенд (на базе Л2-109), описанный в предыдущей части, был дополнен генератором постоянного тока, термостатом и разработаны новые программные модули для управления новым оборудованием. Термочувствительным параметром являлось напряжение сток-исток  $V_{ds}$  при пропускании через испытуемый транзистор постоянного измерительного тока. Диапазон измерительных токов – 0,2...4 А. Значение тока подбиралось так, чтобы транзистор перешел, как минимум, в область насыщения вольт-амперной характеристики. Чем больше  $V_{ds}$ , тем сильнее температурная чувствительность. При слишком большом значении  $V_{ds}$  увеличивается риск того, что на процесс измерения начнут влиять эффекты, связанные с глубокими уровнями в полупроводнике [9]. В нашем случае величина  $V_{ds}$  была ограничена сверху возникновением паразитной генерации и не превышала 2,1 В.

Для изменения мощности, рассеиваемой испытуемым транзистором, к нему подключалась (с помощью быстродействующих ключей) дополнительная электрическая цепь, то есть задавались ступеньки или импульсы дополнительной мощности.

Термостат представлял собой массивную медную пластину, к которой прижимался корпус испытуемого прибора. Температура термостата могла задаваться в диапазоне 20...60 °С с помощью элементов Пельтье. Точность поддержания температуры термостата составляла примерно 0,1 °С. Однако изменение мощности, рассеиваемой испытуемым прибором, также приводило к отклонению температуры термостата от заданной (в пределах 0,2 °С). Для реализации описываемой методики такая точность не является достаточной, однако в течение измерения температура постоянно контролировалась. В дальнейшем результаты этого контроля учитывались при обработке всех собранных данных.

Аналогичным образом учитывалась погрешность генератора постоянного тока. В результате воздействия импульсов дополнительной мощности, ток генератора мог измениться примерно на 0,03 %, затем восстановить заданное значение в течение нескольких миллисекунд. Поэтому в течение измерения ток генератора также контролировался отдельным программным потоком, а затем учитывался при расчетах.

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПАРАМЕТРА

Выбор  $V_{ds}$  в качестве термочувствительного параметра при достаточно большом измерительном токе обеспечивает хорошее соотношение сигнал-шум, однако усложняет вычисление температуры канала транзистора как функции от  $V_{ds}$ . Кроме того, что эта зависимость заметно нелинейная, она сильно зависит от параметров конкретного транзистора (например, от напряжения отсечки), поэтому должна вычисляться каждый раз при смене объекта измерения или измерительного тока. Еще более усложняет ситуацию тот факт, что рассеиваемая испытуемым прибором мощность пропорциональна величине  $V_{ds}$ , поэтому при расчетах приходится учитывать мгновенное зна-

чение мощности, которая изменяется вслед за значением  $V_{ds}$ . В традиционных методиках измерения связь термочувствительного параметра с мощностью стараются свести к минимуму. Для этого уменьшают либо измерительный ток [1], либо время измерения [1]. В обоих случаях это либо сильно снизит чувствительность, либо потребует перехода в отдельный измерительный режим. В настоящей работе предлагается подход, который позволяет обойти описанные трудности.

Для определения температурной зависимости термочувствительного параметра должна быть получена зависимость равновесного (то есть измеренного после достижения полного теплового равновесия)  $V_{ds}$  от температуры термостата  $T_i$ . Для этого получают несколько значений  $\Delta V_i = V_{dsi} - V_{ds0}$ , где  $i$  – номер измерения, а значение  $V_{ds0}$  – это одно из измерений, выбранное произвольно.

Представим искомую зависимость в виде полинома (например, третьей степени):

$$\Delta T_i = A_3 \cdot \Delta V_i^3 + A_2 \cdot \Delta V_i^2 + A_1 \cdot \Delta V_i, \quad (1)$$

где  $\Delta T_i = T_i - T_0$  – изменение температуры канала относительно температуры  $T_0$ , соответствующей напряжению  $V_{ds0}$ ;  $A_3, A_2, A_1$  – коэффициенты полинома.

С другой стороны, это же изменение температуры канала является суммой изменений внешней температуры  $\Delta T_{ii}$  и изменения внутреннего разогрева, умноженного на полное тепловое сопротивление.

$$\Delta T_i = \Delta T_{ii} + R_{th} \cdot I \cdot \Delta V_i, \quad (2)$$

где  $R_{th}$  – полное тепловое сопротивление, а  $I$  – измерительный ток. Приравнивая левые части уравнений (1) и (2), получим систему уравнений, количество которых на единицу меньше, чем количество измерений равновесных  $V_{ds}$ .

$$A_3 \cdot \Delta V_i^3 + A_2 \cdot \Delta V_i^2 + (A_1 - R_{th} \cdot I) \cdot \Delta V_i = \Delta T_{ii}. \quad (3)$$

При достаточном количестве измерений, можно вычислить нелинейные коэффициенты полинома и величину  $(A_1 - R_{th} \cdot I)$ , которая связывает линейный коэффициент  $A_1$  и полное тепловое сопротивление  $R_{th}$ . Вычисление коэффициента  $A_1$ , а следовательно, и остальных величин невозможно из описанных экспериментов, однако эти результаты необходимы для дальнейшего анализа. Окончательное значение  $A_1$  будет получено в результате реализации разработанного алгоритма с учетом большого массива данных динамических измерений, в которых величина  $V_{ds}$  будет измеряться в заданные моменты времени после подключения и отключения дополнительной электрической цепи. Результаты стационарных измерений можно вывести на экран Л2-109 (рис. 1). Это изображение позволяет оценить степень нелинейности температурной зависимости термочувствительного параметра и точность аппроксимации.

#### 4. ПРИМЕР КОНКРЕТНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Измерялся ПТШ, приклеенный к позолоченному основанию из поликора. Между основанием и медной пластиной термостата располагались слой теплопроводящей пасты, алмазный теплоотвод и еще один слой теплопроводящей пасты. Электроды стока и истока подключены к измерительной плате короткими проводниками для уменьшения индуктивности. Затвор ПТШ соединен с истоком. Измерительный ток – 1,628 А, максимальная мощность – 1,8 Вт, амплитуда импульсов мощности – от 0,8 до 1,2 Вт.

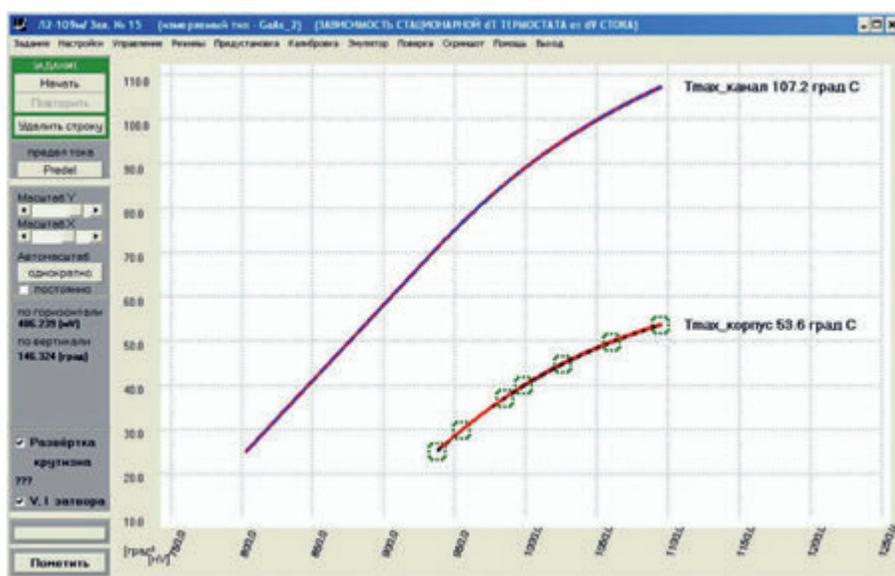


Рис. 1. Результаты стационарных измерений:

кружками отмечены экспериментальные точки; красная линия соответствует уравнению (3); синяя линия – уравнению (1) после окончания анализа и определения линейного коэффициента  $A_1$

Весь процесс измерения и анализа тепловой системы можно разделить на четыре этапа.

**Этап 1.** Определение зависимости равновесной  $V_{ds}$  от температуры термостата (см. рис. 1).

**Этап 2.** Измерение и анализ реакции на ступеньку мощности. В течение измерения дополнительная электрическая цепь подключалась только один раз (тем самым обеспечивая ступеньки мощности). Реакция испытуемого объекта (в виде временной зависимости  $V_{ds}$ ) записывалась в течение 10...15 с с минимальным шагом 2,6 мкс. Подобно тому, как это предусмотрено при штатном применении Л2-109, достоверными считались данные, полученные спустя 15...25 мкс после ступеньки. Поэтому целью этого измерения является получение тепловой математической модели (в виде структурной функции), которая отражает тепловые свойства сравнительно массивных частей измеряемого прибора. Полученная временная зависимость  $V_{ds}$  использовалась для пересчета во временную зависимость температуры и создания структурной функции.

**Этап 3.** Измерение и анализ с использованием импульсов дополнительного тока и устройства выборки-хранения. Здесь прибор нагревался постоянным током, к которому периодически добавлялся дополнительный ток с длительностью импульса 200 мкс и длительностью фронтов 5 нс. Измерения начинались после достижения теплового равновесия в массивных (в том числе в термостате) частях тепловой системы, в то время как в малоинерционных частях температура периодически изменялась. После окончания импульса дополнительного тока через заданную задержку производился захват (посредством устройства выборки-хранения) сигнала, пропорционального  $V_{ds}$ . Момент окончания импульсов дополнительного тока и момент захвата сигнала синхронизированы, причем задержка между ними задавалась в файле задания с дискретностью 30 нс. Задавая разные значения задержки, можно получать разные точки временной зависимости сигнала  $V_{ds}$  (принцип стробоскопа). Время, необходимое для обеспечения достаточного накопления данных, в каждой точке составляло 1,5 с. Полученная зависимость также использована для пересчета во временную зависимость температуры и создания структурной функции.

**Этап 4.** Определение линейного коэффициента  $A_1$ . Для пересчета значений  $V_{ds}$  в температуру канала транзистора необходимо использовать уравнение (1). После проведения всех измерений только отсутствие правильного значения коэффициента  $A_1$  не позволяет сделать вывод о значении полного теплового сопротивления и получить полную тепловую модель, включающую как массивные, так и малоинерционные части тепловой системы. Для определения  $A_1$  был разработан программный алгоритм, который, используя данные измерения, автоматически подбирает значение  $A_1$  так, чтобы тепловые сопротивления всех звеньев тепловой модели в сумме давали бы полное тепловое сопротивление. Оказалось, что значение  $A_1$  может быть получено и без измерения массивных частей. В этом случае тепловая модель малоинерционных частей дополнялась одним звеном с заведомо большой теплоемкостью и значение  $A_1$  подбиралось так, чтобы тепловые сопротивления измеренных звеньев имели правильные доли в полном тепловом сопротивлении. Однако для большей точности измерение реакции массивных частей все же желательно. Результаты в виде полной структурной функции показаны на рис. 2. Из которого видно, что полное тепловое сопротивление оказалось равным 30 К/Вт. Видно также, что его можно условно разделить на пять разнородных участков, соответствующих разным частям тепловой системы. По вертикальной оси отложена накопленная теплоемкость (более подробно о свойствах структурных функций – в [10, 11]). На рис. 2 отмечены теплоемкости, соответствующие различным участкам пути теплового потока. Зная устройство ПТШ, можно сопоставить этим участкам конкретные части транзистора. Положение границ участков (по горизонтальной оси сопротивлений) удобнее определять по производной структурной функции (рис. 3). Здесь каждый локальный максимум соответствует границе между разнородными участками пути теплового потока. Полученный результат автоматически может быть представлен в виде таблицы (рис. 4), соответствующей тепловой модели Кауэра [10, 11].

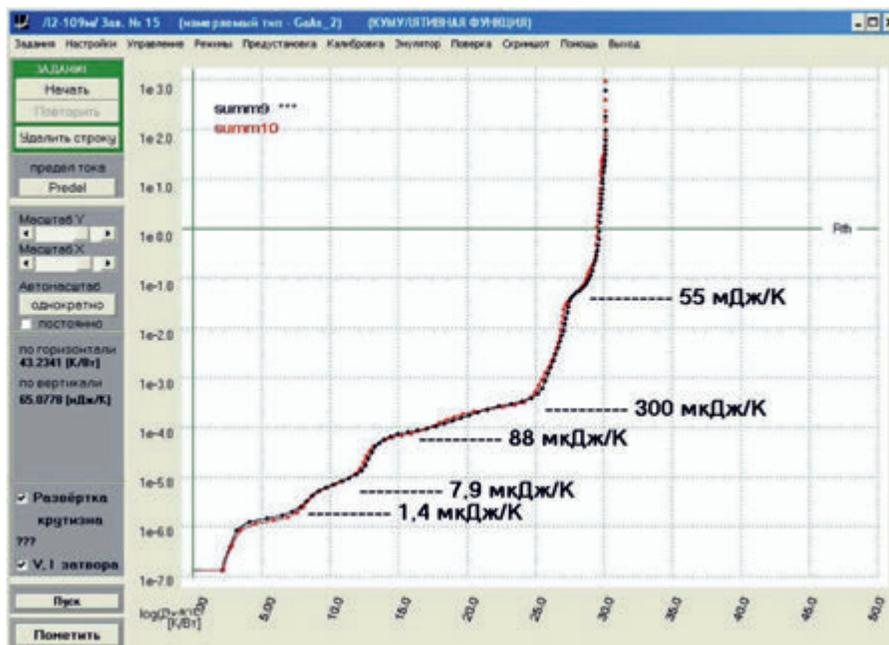


Рис. 2. Итоговые структурные функции:  
 черная линия – амплитуда импульсов мощности равна 0,8 Вт,  
 красная линия – 1,1 Вт



Рис. 3. Производная структурной функции

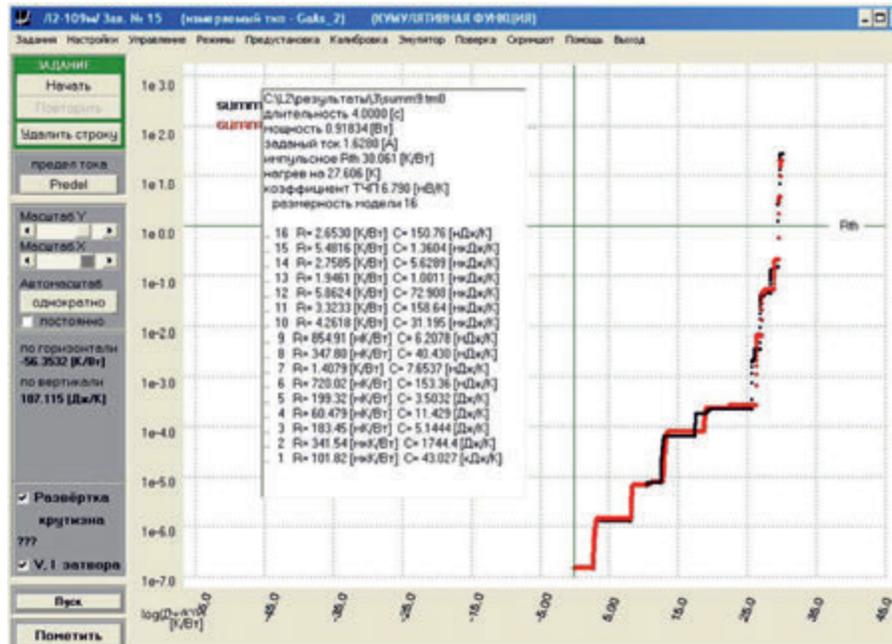


Рис. 4. Структурная функция в виде таблицы

## 5. ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОТ АМПЛИТУДЫ ИМПУЛЬСОВ МОЩНОСТИ

На рис. 2 показаны результаты измерений в виде полных структурных функций, полученных при разных амплитудах импульсов мощности. Наблюдается почти полное их совпадение, хотя значения температуры канала в течение цикла измерения заметно отличались (рис. 5). То есть в каждый момент времени наблюдалась пропорциональность температуры рассеиваемой мощности. Из этого можно сделать следующие выводы.

1. Тепловые свойства ПТШ не зависят от мощности (в используемом диапазоне мощностей), то есть нет эффектов, связанных с перераспределением тока по ширине затвора при изменении температуры.

2. Получено дополнительное свидетельство правильного значения  $A_1$ , так как (по результатам математического моделирования) при нелинейной зависимости температуры канала от  $V_{ds}$  только правильное значение  $A_1$  приводит к совпадению структурных функций при разных амплитудах.

3. Получено косвенное свидетельство о том, что на измерения не оказывали влияние процессы перезарядки глубоких центров в материале ПТШ [9]. В противном случае необходимо предположить, что глубокие центры влияют на величину  $V_{ds}$ , подобно температуре, причем это влияние строго пропорционально рассеиваемой мощности. Такое предположение является маловероятным.

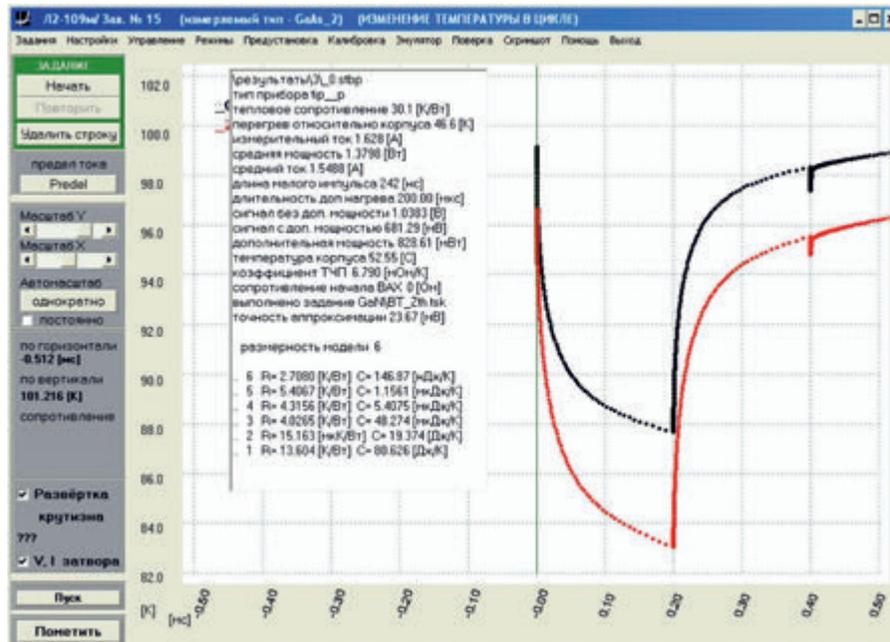


Рис. 5. Временная зависимость температуры канала ПТШ в течение цикла измерения:  
 черная линия – амплитуда импульсов мощности равна 0,8 Вт,  
 красная линия – 1,1 Вт

## 6. ВЫВОДЫ

1. Измеритель-анализатор Л2-109 с дополнительным выносным модулем и термостатом может быть использован как для измерения полного теплового сопротивления СВЧ-транзисторов, так и для анализа отдельных его частей.

2. Методика может быть распространена на сложные СВЧ-модули, имеющие вольт-амперную характеристику, сходную с вольт-амперной характеристикой транзистора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Jungwoo Joh.** Measurement of channel temperature in GaN high-electron mobility transistors / Jungwoo Joh, Jesus A. del Alamo // IEEE Transactions on Electron Devices. – Dec. 2009. – Vol. 56, No 12.
2. <http://mipust.ru/docs/>
3. [www.mentor.com](http://www.mentor.com).
4. JEDEC JESD51-14. Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction to Case of Semiconductor Devices with Heat Flow through a Single Path. – November 2010.
5. **Госстандарт РФ.** Описание типа средства измерений. Приложение к свидетельству RU.C.34.083.A № 42329 об утверждении типа средств измерений.
6. Integrated micro-Raman/infrared thermography probe for monitoring self-heating in AlGaIn/GaN transistor structures / A. Sarua, H. Ji, M. Kuball [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – Oct. 2006. – Vol. 53, No 10. – P. 2438 – 2447.
7. **Bruce M. Paine.** Measurement of temperature in GaN HEMTs by gate end-to-end resistance / Bruce M. Paine, Thomas Rust, Elizabeth A. Moore // Browse Journals & Magazines IEEE Transactions on Electron. – Volume 63, issue 2.
8. **Binari, S. C.** Trapping effects in GaN and SiC microwave FETs / S. C. Binari, P. B. Klein and T. E. Kazior // Proc. IEEE. – Jun. 2002. – Vol. 90, No 6. – P. 1048 – 1058.
9. **Вяхирев, В.** Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов / В. Вяхирев // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 3.
10. **Вяхирев, В.** Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов. Ч. 2 // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – № 8.
11. **Вяхирев, В.** Применение измерителя-анализатора Л2-109 для измерения теплового сопротивления СВЧ-двухполюсников / В. Вяхирев // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 2 (549). – С. 53 – 60.

Статья поступила 22 сентября 2022 г.

УДК 621.396.677.494

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ОТВОДА ТЕПЛА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ АФАР ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Д. И. Воробьев<sup>1</sup>, Ю. Д. Каргашин<sup>1</sup>, М. В. Кулиев<sup>2</sup>,  
Н. К. Приступчик<sup>1</sup>, И. В. Куликова<sup>1</sup>, А. В. Галдецкий<sup>1</sup>, Н. А. Соловьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

<sup>2</sup>Военное представительство Министерства обороны РФ (67 ВП МО РФ)

Разработано устройство отвода тепла (УОТ) малогабаритной АФАР, обеспечивающее повышенную продолжительность работы изделия на этапе проведения стендовых испытаний. Проведены исследования тепловыделения АФАР, определены качественные показатели УОТ в зависимости от конструктивных особенностей установки приемопередающих модулей, технологий изготовления и технических характеристик блока жидкостного охлаждения.

*КС: активная фазированная антенная решетка, АФАР, антенный элемент, приемопередающий модуль, ППМ, устройство отвода тепла, схема управления, тепловыделение, LTCC*

## DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF A HEAT REMOVAL DEVICE PROVIDING OPERATION OF AESA DURING BENCH TESTS

D. I. Vorobyov<sup>1</sup>, Yu. D. Kargashin<sup>1</sup>, M. V. Kuliev<sup>2</sup>,  
N. K. Pristupchik<sup>1</sup>, I. V. Kulikova<sup>1</sup>, A. V. Galdetskiy<sup>1</sup>, N. A. Solovyov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

<sup>2</sup>Military representation of the Ministry of Defense RF (67 MR MD RF)

A heat removal device for a small-sized AESA has been developed to provide longer product life during bench testing. AESA heat dissipation studies have been carried out, and the quality indicators of the heat removal device have been determined depending on the design features of the transceiver modules under test, fabrication peculiarities and technical characteristics of the liquid cooling unit.

*Keywords: active electronically scanned array, AESA, antenna element, transceiver module, RTM, heat removal device, control circuit, heat dissipation, LTCC*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ возможностей бортовых радиолокационных станций (БРЛС) с активными фазированными антенными решетками (АФАР) показывает, что указанные системы имеют ряд существенных преимуществ, а именно: повышенную дальность действия, повышенную помехозащищенность, возможность одновременного сопровождения нескольких целей, высокую техническую живучесть АФАР при отказе части приемопередающих модулей (ППМ), отсутствие механических вращающихся частей в составе антенной системы (АС) и т. д.

При построении АФАР, основным ее элементом является ППМ. В настоящее время [1] КПД ППМ на частотах выше 5 ГГц составляет не более 10...25 %, т. е. большая часть подводимой к ППМ мощности перераспределяется в тепло, которое необходимо рассеивать. Известны различные способы отвода тепловой энергии [2–4], например: воздушные и жидкостные системы охлаждения, испарительные системы охлаждения (тепловые трубки), термоэлектрические модули на основе эффекта Пельтье, теплоаккумуляторы с парафином.

В условиях, когда ППМ имеют высокую плотность установки в конструкцию АФАР, требуется длительная работа в процессе испытаний, а поверхность теплового контакта ограничена, устройство съема и рассеивания тепла, выделяемого АФАР, разрабатывалось на основе принудительной жидкостной системы охлаждения [2–4].

Цель работы – расчётное обоснование параметров и проектирование устройства отвода тепла (УОТ) от ППМ в составе АФАР, обеспечивающего ее бесперебойное функционирование при проведении стендовых испытаний в течение длительного времени.

## 2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ОТВОДА ТЕПЛА

Оценка тепловыделения АФАР выполнена при следующих значениях параметров, определяющих суммарную среднюю мощность  $P_{\text{ср}}$ , которая является интегральным показателем тепловыделения: скважность импульсов  $Q = 8$ , импульсная выходная мощность ППМ в режиме передачи  $P_{\text{и}} = 9$  Вт.

В режиме передачи (ПРД) мощность тепловыделения всех ППМ  $P_{\text{ПРД}}$  будет приблизительно равна 7409 Вт.

Предполагается, что в режиме приёма (ПРМ) вся подводимая импульсная мощность рассеивается в тепло. Расчётное значение  $P_{\text{ПРМ}}$  будет составлять около 353 Вт.

Средняя мощность тепловыделения в режиме передача/приём:

$$P_{\text{ср}} = \left(1 - \frac{1}{Q}\right) \cdot P_{\text{ПРМ}} + \frac{1}{Q} P_{\text{ПРД}} = 1235 \text{ Вт.} \quad (1)$$

Температурный режим внутри ППМ моделировался с учетом того, что при температуре поверхности основания модуля не более 70 °С модуль будет обеспечивать все выходные заданные характеристики. Это позволяет не моделировать процессы теплопереноса внутри ППМ, а решать тепловую задачу, используя только модель УОТ и обеспечивая температуру в области контакта не более 70 °С. УОТ является одной из основных частей системы жидкостного охлаждения и представляет собой диск, изготовленный из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, в котором выполнены герметичные каналы для принудительной циркуляции теплоносителя. Внешний вид УОТ представлен на рис. 1.

Оценим время, за которое АФАР без охлаждения нагреются от комнатной температуры (25 °С) до

– 70 °С (температура корпуса, обеспечивающая длительный срок службы модуля – десятки тысяч часов);

– 90 °С (температура корпуса, по-видимому, обеспечивающая срок службы модуля несколько часов);

– 150 °С (это максимально допустимая температура канала GaAs-транзистора, при превышении которой начинаются интенсивные деградационные процессы [5]).



Рис. 1. Внешний вид УОТ

Для оценки можно воспользоваться известной из школьного курса физики формулой  $Q = C \cdot M \cdot \Delta T$ , переписанной с учётом  $Q = \Delta t \cdot P_{\text{ср}}$  в виде:

$$\Delta t = \frac{N \cdot C_{\text{ППМ}} \cdot M \cdot \Delta T}{P_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{ППМ}}$  – усреднённая удельная теплоёмкость ППМ, которую можно оценить, зная теплоёмкости конструкционных материалов, а также массовые доли материалов в конструкции ППМ (для определения парциальных масс использовалась 3D-модель ППМ);  $M$  – общая масса ППМ;  $\Delta T$  – перегрев, принимаемый равным 125 °С (считается, что в начальный момент времени температура ППМ соответствует комнатной – 25 °С);  $\Delta t$  – временной интервал, по прошествии которого средняя температура ППМ увеличится на  $\Delta T$ .

Массы и теплоёмкости конструкционных материалов ППМ представлены в таблице. Подставляя значения из выражения (1) и таблицы в уравнение (2), можно получить оценку времени разогрева (это оценка снизу, поскольку наличие некоторого охлаждения на элементы конструкции АФАР удлиняет время разогрева):

$$\begin{aligned} \Delta t_{70} &= \frac{192 \cdot 445 \cdot 0,045 \cdot 45}{1235} \approx 140 \text{ с} \approx 2,3 \text{ мин}, \\ \Delta t_{90} &= \frac{192 \cdot 445 \cdot 0,045 \cdot 65}{1235} \approx 202 \text{ с} \approx 3,3 \text{ мин}, \\ \Delta t_{150} &= \frac{192 \cdot 445 \cdot 0,045 \cdot 125}{1235} \approx 390 \text{ с} \approx 6,5 \text{ мин}. \end{aligned} \quad (3)$$

Наименование детали ППМ	Материал	Масса, г	Массовая доля $\mu = m/M$	Теплоёмкость, Дж/(кг·К)
Основание корпуса	Псевдосплав МД50	$m_1 = 16$	$\mu_1 = 0,35$	$C_1 = 322$
LTCC-плата	LTCC	$m_2 = 4$	$\mu_2 = 0,1$	$C_2 = 795$
Рамка и крышка корпуса	Сплав 29НК	$m_3 = 25$	$\mu_3 = 0,55$	$C_3 = 460$
Общая масса ППМ		$M = 45$	$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$	–
Усреднённая теплоёмкость ППМ, Дж/(кг·К), $C_{\text{ППМ}} = C_1 \cdot \mu_1 + C_2 \cdot \mu_2 + C_3 \cdot \mu_3 \approx 445$				

Таким образом, оценочный расчёт показывает, что время работы АФАР без принудительного охлаждения не превышает 7 мин, а значит, для проведения стендовых испытаний в течение нескольких часов необходимо обеспечивать возможность теплоотвода в стационарном режиме работы ППМ.

### 3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ УОТ

Толщина конструкции УОТ в процессе проектирования с учетом локализации источников тепла внутри ППМ, а также особенностей реализации каналов (фрезеровка на глубину не более трёх диаметров фрезы) и установки входного и выходного штуцеров была выбрана равной 18 мм.

Каналы фрезеруются шириной 4 мм и глубиной 14 мм. Прямоугольные проёмы под ППМ формируются методом электроэрозионной обработки после опайки каналов. В качестве материала УОТ была выбрана медь. Крепление и фиксация УОТ осуществляется гайками, находящимися на шпильках крепления. Присоединение шлангов к УОТ осуществляется через стандартные штуцеры.

Циркуляция хладагента в УОТ обеспечивается блоком Auroga PRO SL-1500 (расход жидкости – 6...8 л/мин), что давало значительный запас по охлаждающей способности УОТ.

Результаты моделирования при расходе жидкости 1,8 л/мин и ее температуре на входе 30 °С, позволяющие сделать выводы о параметрах УОТ, представлены на рис. 2 и 3.

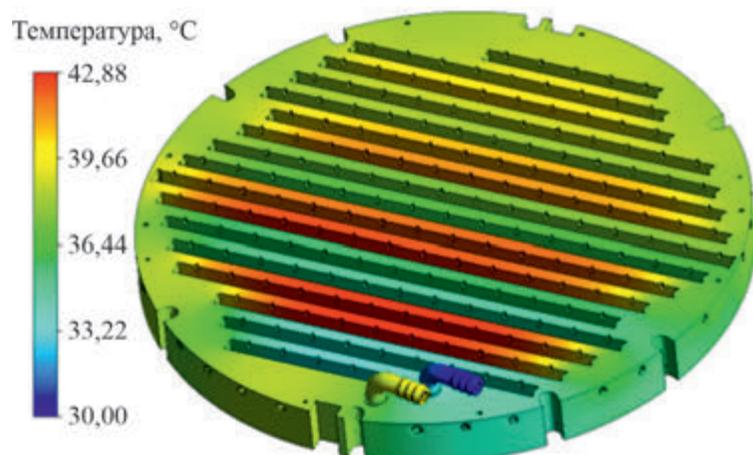


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности УОТ

При отводимой мощности  $\approx 1300$  Вт максимальная температура поверхности диска не превышает 43 °С, а жидкость нагревается до 40 °С. Даже при повышении отводимой мощности в два раза (до 2600 Вт) максимальная температура диска вырастет до 56 °С, что вполне приемлемо для нормальной работы модуля. И только при трехкратном превышении мощности тепловыделения АФАР температура диска поднимется до 69 °С, что находится на границе приемлемого диапазона температур.

На рис. 3 представлено распределение давления в жидкости.

Из графика видно, что при расходе жидкости 1,8 л/мин перепад давления на УОТ составляет всего 0,28 атм.

Моделирование теплового режима показало наличие значительного запаса УОТ по охлаждающей способности. Фактически допустимая тепловая мощность УОТ определялась потоком охлаждающей жидкости и ее температурой на входе и незначительно зависела от материала и толщины стенок УОТ и топологии каналов.

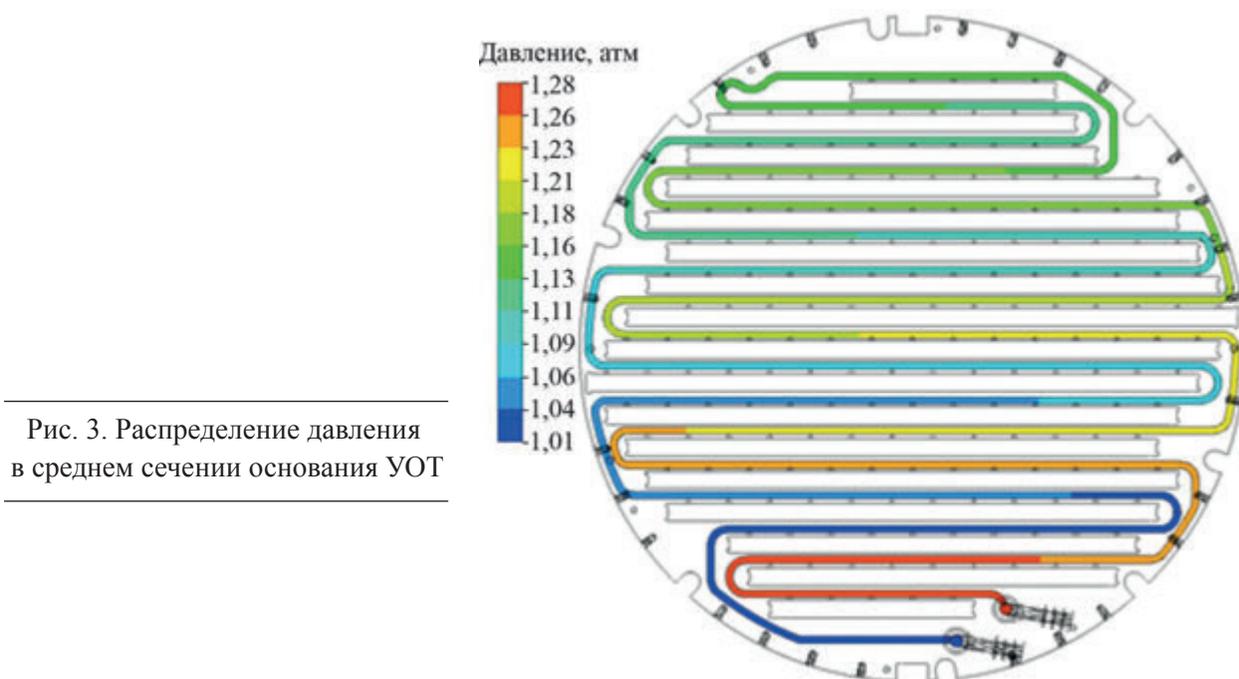


Рис. 3. Распределение давления в среднем сечении основания УОТ

Дополнительный анализ показал, что наличие даже небольших зазоров между поверхностью диска и охлаждаемыми модулями (0,05...0,1 мм) резко снижает эффективность охлаждения. Учитывая неизбежный технологический разброс положения модулей, это требует применения теплопроводящей пасты.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЯ УОТ

Для проведения исследований и определения качественных показателей разработанной стендовой системы охлаждения АФАР был собран испытательный стенд. Структурная схема стенда представлена на рис. 4.

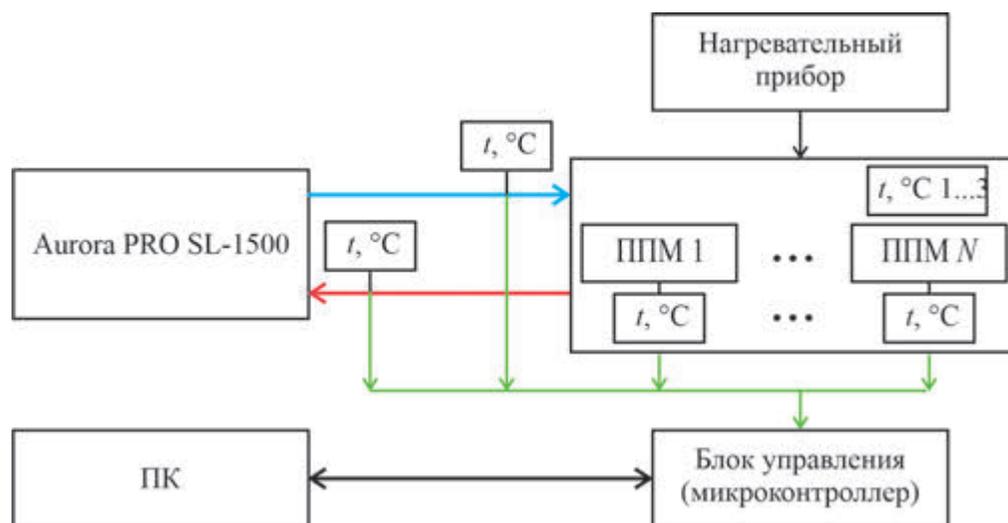


Рис. 4. Структурная схема стенда для испытания УОТ

Стендовая система охлаждения состоит из следующих составных частей: нагревательный прибор; УОТ с установленными в него макетами ППМ на термопасту GD900; блок жидкостного охлаждения COOL ARC 50; датчики температуры; блок управления; охлаждающая жидкость (ОЖ); персональный компьютер.

Нагревательный прибор обеспечивает нагрев УОТ с установленными в нем тремя макетами ППМ. Для исследования зависимости значения теплопередачи от величины допуска примыкания к УОТ макеты ППМ были изготовлены различной толщины. Блок жидкостного охлаждения COOL ARC 50 обеспечивает циркуляцию хладагента в системе охлаждения. В качестве ОЖ применялась дистиллированная вода.

Для проведения эксперимента был разработан малогабаритный датчик температуры (ДТ) (рис. 5) с размерами 11,5×22,5 мм. За основу была выбрана микросхема TMP1075 в корпусе WSON в целях уменьшения габаритов датчика. Данная микросхема имеет высокую точность определения температуры – 0,25 °С, обладает низким энергопотреблением – 2,7 мкА, диапазон питания – 1,6...5,5 В. Цифровой интерфейс SM Bus, I2C поддерживает управление до 32 устройств по шине I2C.

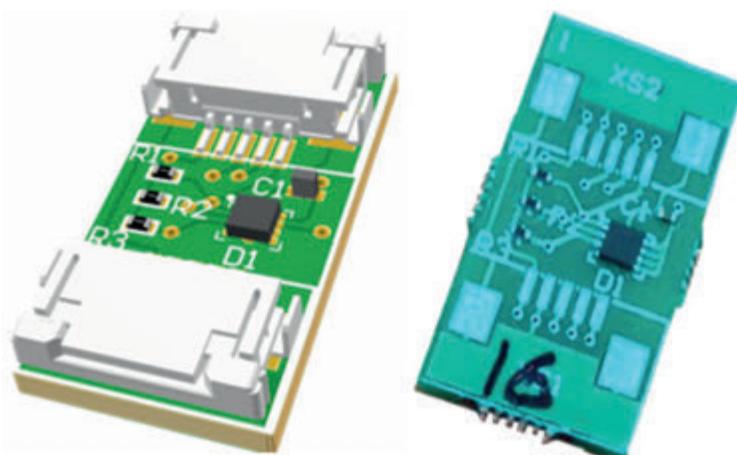


Рис. 5. Внешний вид датчика температуры

Температурные датчики были пронумерованы и установлены на элементах стенда в соответствии с рис. 6:

- датчик № 3 установлен на ППМ, размер – 7,6 мм, термопаста нанесена с двух сторон;
- датчик № 4 установлен на ППМ, размер – 7,7 мм, термопаста нанесена с одной стороны;
- датчик № 3 установлен на ППМ, размер – 7,8 мм, термопаста нанесена с одной стороны;
- датчики № 11, 12, 13 установлены на УОТ.

Блок управления был реализован на микроконтроллере STM32. Для сбора телеметрической температурной информации с датчиков было разработано программное обеспечение, обеспечивающее управление и запись сигналов с температурных датчиков. Персональный компьютер обеспечивал управление блоком охлаждения, а также выполнял функции хранения и графического отображения записанной информации.

Методика испытаний состояла в нагреве УОТ совместно с макетами ППМ до температуры 70 °С. После преодоления температурной отметки на УОТ в 70 °С включался блок жидкостного охлаждения COOL ARC 50. В процессе выполнения эксперимента происходит непрерывный съем и запись температурных показателей.

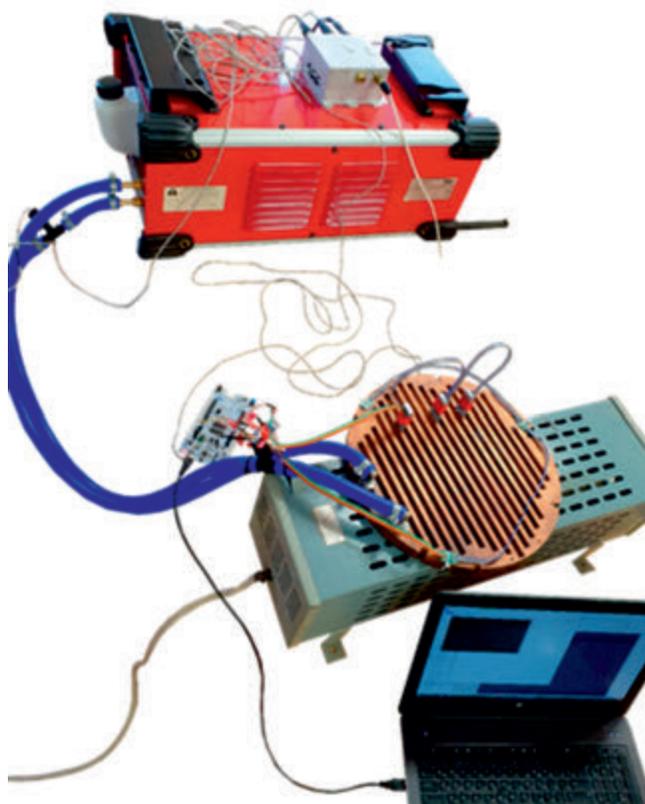


Рис. 6. Стенд для испытания УОТ

Результаты измерений представлены в графическом виде на рис. 7.

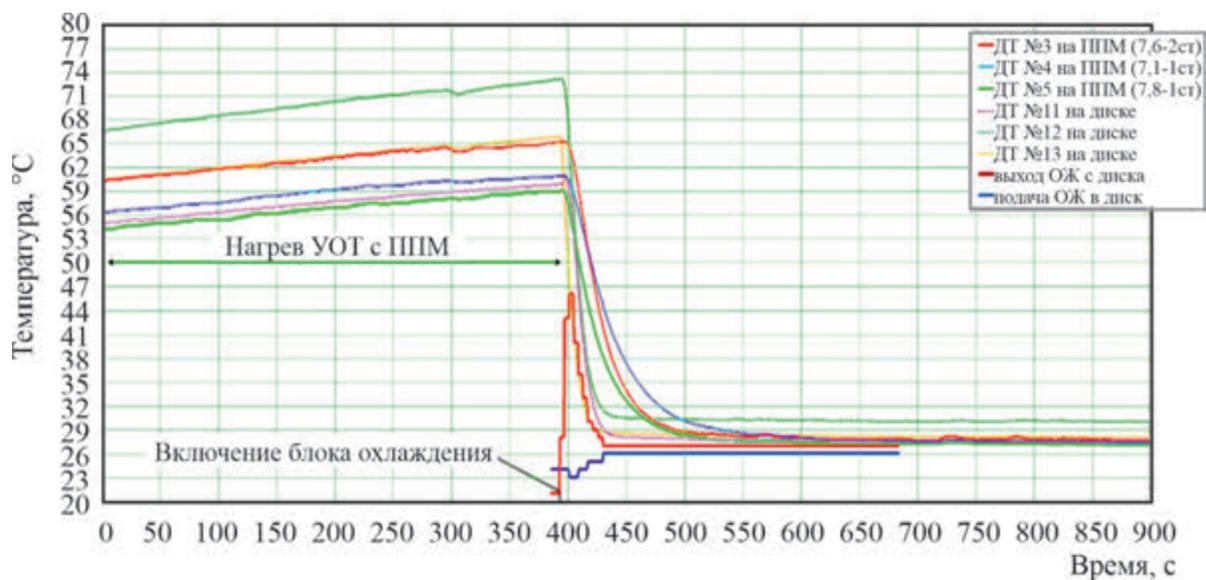


Рис. 7. Результаты температурных измерений при проведении эксперимента с температуры УОТ 55 °С

## 5. ВЫВОДЫ

Анализ полученных результатов показывает, что УОТ обеспечивает гарантированный отвод тепла для обеспечения длительного режима работы АФАР на этапе стендовых испытаний.

Величина допуска примыкания макета ППМ к УОТ влияет на значения теплопередачи. При использовании термопасты изменение величины зазора примыкания в пределах 0,2 мм приводит к температурным потерям теплопередачи не более 1 °С.

После включения блока охлаждения, в течение 40 с температура в контуре и соответственно на ППМ стабилизировалась на значении не более 28 °С.

Различие температур модулей и диска не превышает 2 °С.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Активные фазированные антенные решетки / под ред. Д. И. Воскресенского, А. И. Канащенкова. – 2004.
2. **Улитенко, А. И.** Принципы построения индивидуальных систем охлаждения электронных приборов и устройств / А. И. Улитенко, В. С. Гуров, В. А. Пушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 286 с.
3. Методика построения и расчёта воздушной системы охлаждения специализированного СВЧ-блока / И. В. Куликова, Н. К. Приступчик, А. В. Галдецкий [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 1 (528). – С. 70 – 74.
4. Моделирование тепловых режимов работы приёмопередающего модуля малогабаритной активной фазированной антенной решётки / Н. К. Приступчик, И. В. Куликова, А. В. Галдецкий [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2016. – Вып. 1 (528). – С. 86 – 94.
5. **Ди Лоренцо, Д. В.** Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления / под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола. – М.: Радио и связь, 1988. – 499 с.

*Статья поступила 14 ноября 2022 г.*

УДК 621.372.413

## СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ СВЧ

**В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, Г. В. Фомина, Н. С. Карасёв,  
В. А. Иовдальский, А. А. Смирнова**

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

Кратко рассмотрены известные способы изготовления диэлектрических резонаторов для техники СВЧ. Приведен обзор преимуществ и недостатков этих способов. Представлен способ изготовления диэлектрических резонаторов, обеспечивающий повышенную точность получения заданного значения температурного коэффициента частоты, и технологические основы его практической реализации. Приведены формулы расчета величины шлифования диэлектрического резонатора по высоте для компенсации ухода температурного коэффициента частоты от заданного значения.

*КС: диэлектрический резонатор, температурный коэффициент частоты, техника СВЧ, технология изготовления, точность измерений*

## METHOD FOR MANUFACTURING MICROWAVE DIELECTRIC RESONATORS

**V. M. Kolomin, V. N. Rybkin, G. V. Fomina, N. S. Karasev,  
V. A. Iovdalskiy, A. A. Smirnova**

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

The well-known methods for manufacturing dielectric resonators for microwave technology are briefly considered. A review of advantages and disadvantages of these methods is given. A method of manufacturing dielectric resonators ensuring an increased precision of obtaining the preset value of the temperature coefficient of frequency and technological foundations of its implementation are presented. Formulas for calculating the amount of grinding the dielectric resonator in height to compensate for the deviation of the temperature coefficient of frequency from the preset value are given.

*Keywords: dielectric resonator, temperature coefficient of frequency, microwave technology, manufacturing technology, measurement precision*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Диэлектрический резонатор (ДР) является частотным избирательным устройством и активно применяется в радиоэлектронной аппаратуре, например, в качестве элементов частотных фильтров, для стабилизации частоты генераторов или как датчик в измерителях параметров материалов [1]. В СВЧ-диапазоне широко используются объемные ДР, которые изготавливают из высокочастотных керамических материалов. Главными преимуществами изделий на основе ДР являются малые масса и габариты, стабильность параметров, надежность, малые частотные шумы, простота конструкции [2], что позволило создать новое поколение малогабаритной радиоэлектронной аппаратуры различного назначения. ДР представляет собой объемное тело, поддерживающее свободные электромагнитные колебания, удовлетворяющие условиям границы раздела диэлектрик/воздух, условиям полного внутреннего отражения при высоких значениях относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon \geq 20$ ) [3]. Существуют различные конфигурации ДР, наиболее распространенными являются диск и цилиндр (рис. 1).

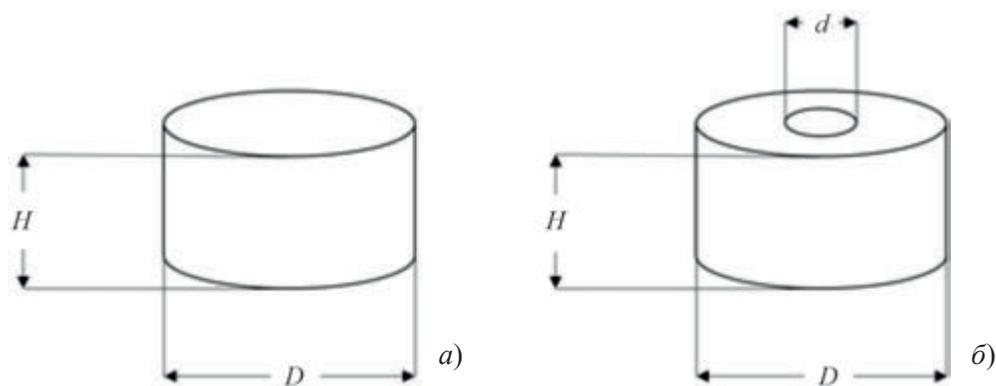


Рис.1. Конфигурации диэлектрических резонаторов:

а – диск; б – цилиндр

Форма и размер ДР подбираются таким образом, чтобы при необходимой частоте выполнялись условия объемного резонанса электромагнитной волны за счет явления полного внутреннего отражения [4].

К основным характеристикам ДР относятся тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость, температурный коэффициент частоты (ТКЧ), добротность, рабочая резонансная частота. В табл. 1 представлены параметры ДР, изготавливаемых в АО «НПП «Исток» им. Шокина». Характеристики разработанных и производимых ДР соответствуют уровню мировых аналогов [1].

Таблица 1

Основные характеристики ДР

Параметр	Материал		
	ЦТО	БЦНТ	БСТ
Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	38 – 42	~30	75 – 80
Тангенс угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta \cdot 10^{-4}$	1 – 2	1	3,5 – 4,5
Добротность $Q$	5 – 7 тыс. на 7 ГГц	7,5 – 10 тыс. на 10 ГГц	~3 тыс. на 3 ГГц
ТКЧ, ppm/°C	-16 – 9	0,5 – 8	-3 – 12
Рабочая резонансная частота $f_p$ , ГГц	3 – 30	6 – 35	2 – 10
Разброс величины ТКЧ, ppm/°C	±0,5; ±1; ±2	±0,5; ±1; ±2	±1; ±2

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При разработке и выпуске изделий специального назначения на базе ДР с повышенным уровнем термостабильности частотных характеристик, например СВЧ-генераторов, могут предъявляться повышенные требования к параметрам ДР. Одним из таких требований является повышенная точность получения заданных оптимальных значений ТКЧ ДР. В настоящее время при использовании различных диэлектрических материалов выпускаются ДР с разбросом величины ТКЧ не менее ±0,5 ppm/°C, что превышает оптимальный для решения данной задачи уровень.

Решить данную проблему методом отбора таких ДР в текущем производстве не представляется возможным из-за случайного характера разброса ТКЧ, хотя часть ДР в количестве до нескольких процентов может удовлетворять заданным повышенным требованиям по отклонению значений ТКЧ.

В настоящее время известны следующие способы изготовления ДР с заданным номинальным значением ТКЧ:

1) изготовление монолитного ДР из керамического материала одного состава с необходимыми значениями величины ТК $\epsilon$ , обеспечивающего необходимое значение ТКЧ ДР [4]. Основными этапами данного метода являются: приготовление шихты керамического материала, синтез (первичная термическая обработка), формирование заготовок ДР прессованием, спекание, шлифовка до заданных размеров, измерение электропараметров ( $F_0$ ,  $Q$ , ТКЧ) [4];

2) изготовление составного ДР из двух диэлектрических материалов с различными по знаку значениями ТК $\epsilon$  и соответственно с различными по знаку значениями ТКЧ соответствующих частей ДР [5]. При этом суммарное значение ТКЧ ДР должно быть равно заданному значению. Схема изготовления таких ДР является следующей: выбор материалов для составляющих частей ДР, удовлетворяющих комплексу диэлектрических свойств ( $\epsilon$ , tg $\delta$ , ТК $\epsilon$ ) и ряду других необходимых физико-химических свойств, расчет размеров составных частей ДР, изготовление составляющих частей с использованием керамических и, при необходимости, монокристаллических материалов, соединение составляющих частей ДР между собой, измерение электропараметров. Данный способ позволяет изготавливать ДР с точностью задания ТКЧ до  $\sim 10^{-7}$  ppm/ $^{\circ}$ C. Однако трудоемкость его оказывается слишком высокой для практического использования.

Сравнительная оценка указанных способов изготовления ДР представлена в табл. 2.

Таблица 2

Способы изготовления ДР

Способ 1	Способ 2
<i>Преимущества</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Снижение трудоемкости изготовления.</li> <li>– Исключение потерь добротности.</li> <li>– Долговременная стабильность рабочих характеристик</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Получение заданного набора значений ТКЧ с точностью до <math>\sim 10^{-7}</math> ppm/<math>^{\circ}</math>C</li> </ul>
<i>Недостатки</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Недостаточная точность получения заданных значений ТКЧ.</li> <li>– Значительный разброс величины ТКЧ в изготавливаемой партии (от <math>\pm 0,5</math> ppm/<math>^{\circ}</math>C и более)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Повышенная трудоемкость изготовления.</li> <li>– Снижение надежности по сравнению с монолитной конструкцией ДР.</li> <li>– Снижение значений добротности</li> </ul>

Решить проблемы в значительной степени удалось за счет разработки способа изготовления составных монолитных ДР на основе традиционной керамической технологии, включающего возможность корректировки ТКЧ ДР в процессе их изготовления в заданных пределах. Основные этапы изготовления таких ДР представлены на рис. 2.



Рис. 2. Основные этапы изготовления ДР СВЧ

На первом этапе готовят шихту керамического материала двух составов, соответствующих двум различным заданным значениям ТКЧ: первый с более низким и второй с более высоким относительно номинального (на равные величины, составляющие не менее 2 ppm/°C) значением ТКЧ ДР. ТКЧ составных ДР определяется по формуле:

$$\text{ТКЧ}_{\text{ДР}} = \text{ТКЧ}_1 \cdot V_1 + \text{ТКЧ}_2 \cdot V_2,$$

где  $\text{ТКЧ}_1$  и  $\text{ТКЧ}_2$  – ТКЧ составных частей ДР;  $V_1$  и  $V_2$  – объемные доли составных частей ДР.

В способе изготовления составных монокристаллических ДР [5] их объемные доли  $V_1$  и  $V_2$  равны между собой и соответствуют высотам  $h_1$  и  $h_2$ . Следовательно, заданное значение ТКЧ изготавливаемых ДР определяется по формуле:

$$\text{ТКЧ}_{\text{ДР}} = 0,5 \cdot (\text{ТКЧ}_1 + \text{ТКЧ}_2),$$

где  $\text{ТКЧ}_{\text{ДР}}$  – заданная величина ТКЧ ДР, ppm/°C;  $\text{ТКЧ}_1$  – меньшее значение ТКЧ, соответствует первому составу шихты керамического материала, ppm/°C;  $\text{ТКЧ}_2$  – большее значение ТКЧ, соответствует второму составу шихты керамического материала, ppm/°C.

На втором этапе осуществляется формирование заготовки путем прессования. Заготовка имеет заданный диаметр, состоит из двух последовательных слоев керамического материала одинаковой высоты  $h_1$ , рис. 3, с учетом необходимых припусков на обработку.



Рис. 3. Эскиз заготовки ДР

Затем проводится обжиг заготовок ДР.

Далее следует шлифование заготовок ДР по диаметру, измерение их ТКЧ и шлифование по высоте. Последнее проводится в два этапа:

Этап 1. Если значение ТКЧ ДР больше величины заданного номинального значения, то шлифование осуществляется на глубину  $l_1$  со стороны второго слоя. Глубина  $l_1$  определяется по формуле:

$$l_1 = \frac{\text{ТКЧ}_1 + \text{ТКЧ}_2 - 2 \cdot \text{ТКЧ}_{\text{зар}}}{\text{ТКЧ}_1 - \text{ТКЧ}_{\text{зар}}} \cdot h_2,$$

где  $l_1$  – глубина шлифования при ТКЧ, превышающем номинальное значение, мм;  $\text{ТКЧ}_{\text{зар}}$  – величина ТКЧ заготовки ДР, ppm/°C;  $h_2$  – высота каждого слоя заготовки ДР после спекания, мм.

Если значение ТКЧ ДР меньше величины заданного номинального значения, то шлифование осуществляется на глубину  $l_2$  со стороны первого слоя. Глубина  $l_2$  определяется по формуле:

$$l_2 = \frac{\text{ТКЧ}_1 + \text{ТКЧ}_2 - 2 \cdot \text{ТКЧ}_{\text{зар}}}{\text{ТКЧ}_2 - \text{ТКЧ}_{\text{зар}}} \cdot h_2,$$

где  $l_2$  – глубина шлифования при ТКЧ меньшем номинального значения, мм.

Этап 2. Проводится шлифование с двух противоположных сторон на глубину  $l_3$ , до необходимой высоты резонатора.

Для практической реализации данного метода изготовления и производства с меньшим, чем  $\pm 0,5$  ppm/°C, разбросом от заданных значений ТКЧ необходимо, чтобы точность измерения ТКЧ ДР составляла порядка  $\pm 0,1$  ppm/°C. Производительность достаточно трудоемких измерений ТКЧ из-за процессов нагрева-охлаждения в ходе измерений была достаточно высокой. В настоящей работе эти условия обеспечены использованием измерительных стендов на базе векторного анализатора цепей Keysight Technologies E5071C и многоместного блока измерительных ячеек.

Указанная точность измерений ТКЧ оценена при трехкратном измерении ТКЧ в партии ДР из материала БЦНТ в количестве 8 шт. Полученные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Экспериментальные данные

№	F, МГц	Q	ТКЧ, ppm/°C		
			1	2	3
1	9090	9643	4,6	4,5	4,6
2	9121	8852	4,8	4,9	4,9
3	9101	9111	5,0	5,0	5,0
4	9174	8883	5,5	5,5	5,4
5	9179	8727	5,7	5,8	5,6
6	9156	8802	5,0	5,0	5,0
7	9172	10482	4,8	4,8	4,8
8	9188	8668	5,7	5,7	5,7

Как видно из табл. 3, разброс значений ТКЧ ДР между разными измерениями одного и того же ДР не превышает  $\pm 0,1$  ppm/°C.

Другой проблемой в реализации данного метода изготовления ДР является не совсем точная расчетная величина глубины шлифования для корректировки отклонения ТКЧ от заданной величины. Это связано с тем, что после обжига точные значения  $\text{ТКЧ}_1$  и  $\text{ТКЧ}_2$  неизвестны. Следует предположить, что разброс их значений составит порядка  $\pm 0,5$  ppm/°C, как у стандартных ДР, изготовленных из шихты № 1 и 2.

В связи с этим в настоящей работе производили шлифование по высоте в три этапа:

Этап 1. Шлифование на половину величины  $l_1$  и  $l_2$  с последующим измерением ТКЧ ДР.

Этап 2. Шлифование на величины  $l_3$  и  $l_4$  для полной компенсации ухода ТКЧ от заданного значения. Определяются величины  $l_3$  и  $l_4$  по формулам, мм:

$$l_3 = \frac{(\text{ТКЧ}_{\text{зар1}} - \text{ТКЧ}_{\text{ДР}}) \cdot 0,5 \cdot l_1}{(\text{ТКЧ}_{\text{зар}} - \text{ТКЧ}_{\text{зар1}})},$$

$$l_4 = \frac{(\text{ТКЧ}_{\text{ДР}} - \text{ТКЧ}_{\text{зар1}}) \cdot 0,5 \cdot l_2}{(\text{ТКЧ}_{\text{зар1}} - \text{ТКЧ}_{\text{зар}})},$$

где  $\text{ТКЧ}_{\text{зар1}}$  – величина  $\text{ТКЧ}_{\text{зар}}$  после её шлифования на величину  $0,5 \cdot l_1$  или  $0,5 \cdot l_2$ .

Этап 3. Шлифование до заданных размеров по высоте равномерно с двух сторон.

При изготовлении достаточно больших партий таких ДР, а также периодичном их изготовлении целесообразно иметь зависимость величины компенсации  $\text{ТКЧ}_{\text{ДР}}$  от величины сошлифовки по высоте  $h$  для конкретных значений  $h_2$ ,  $\text{ТКЧ}_{\text{ДР}}$ ,  $\text{ТКЧ}_1$ ,  $\text{ТКЧ}_2$  и разных значений  $\text{ТКЧ}_{\text{зар}}$ .

Например, для  $h_2 = 2,4$  мм,  $\text{ТКЧ}_{\text{ДР}} = 3,0$  ppm/°C,  $\text{ТКЧ}_1 = 0$  ppm/°C,  $\text{ТКЧ}_2 = 6,0$  ppm/°C и  $\text{ТКЧ}_{\text{зар}} = 3,1; 3,2; 3,3; 3,4; 3,5$  ppm/°C указанная зависимость имеет вид, представленный на рис. 4.

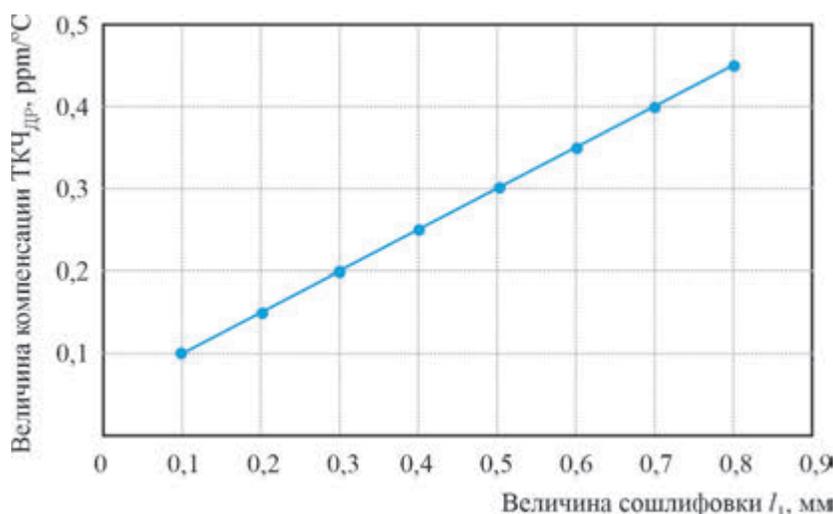


Рис. 4. Зависимость величины компенсации  $\text{ТКЧ}_{\text{ДР}}$  от величины сошлифовки

Такая зависимость позволяет более оперативно определять необходимую величину сошлифовки  $l_1$  для компенсации ухода  $\text{ТКЧ}_{\text{зар}}$  от заданного значения.

Данный метод изготовления опробован для изготовления партий ДР в количестве 10 штук и более. При этом разброс по значениям ТКЧ ДР от заданных значений не превышает величину  $\pm 0,2$  ppm/°C.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный метод изготовления ДР позволяет повысить точность получения заданного значения ТКЧ, снизить разброс по ТКЧ и добиться увеличения процента выхода годных без снижения добротности. Преимущества представленного способа изготовления ДР:

1) конструкция ДР является одновременно и монолитной, и состоящей из двух отдельных слоев с различными значениями ТКЧ;

2) наличие возможности корректировки величины ТКЧ заготовки ДР в процессе ее изготовления.

Согласно рассмотренному методу, были изготовлены ДР для генераторных устройств СВЧ. В качестве керамического материала использовались ЦТО (цирконат-титан олова) и БЦНТ (твердый раствор оксидов бария, цинка, никеля и тантала).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Диэлектрические резонаторы для изделий электронной техники СВЧ-диапазона: учеб. для вузов / В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, В. А. Иовдальский, И. А. Соколов. – М.: Курс, 2021. – 150 с.

2. **Коломин, В. М.** Развитие технологии производства диэлектрических резонаторов для приборов СВЧ-диапазона / В. М. Коломин, В. Н. Рыбкин, В. А. Иовдальский // Сборник научных трудов 11-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем», г. Ульяновск, 10–11 октября 2019 г. – 2019. – С. 236 – 239.

3. **Геворкян, В.** Объемные диэлектрические резонаторы – основные типы, характеристики, производители. Ч. 1 / В. Геворкян, В. Кочемасов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2016. – № 4. – С. 62 – 77.

4. Диэлектрические резонаторы для изделий электронной техники / Э. И. Батыгина, А. В. Иноземцева, И. П. Климова [и др.] // Обзоры по электронной технике. Сер. Электроника СВЧ. – 1981. – Вып. 5 (793). – С. 16 – 19.

5. **Пат. 2568260 РФ.** Способ изготовления диэлектрического резонатора СВЧ / В. Н. Рыбкин, Г. В. Фомина, И. К. Немогай, О. Д. Плетюхина. – Приоритет 20.11.2015.

*Статья поступила 16 августа 2022 г.*

# ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

УДК 621.385.632.1

## ПОВЫШЕНИЕ КПД ЛАМП БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ И КЛИСТРОНОВ В РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТАХ С ВЫСОКОЙ ЛИНЕЙНОСТЬЮ ХАРАКТЕРИСТИК

П. Д. Шалаев, Ю. Н. Щербаков, А. Д. Калачев

*АО «НПП «Алмаз», г. Саратов*

Проведено сравнение методов повышения КПД ламп бегущей волны (ЛБВ) и клистронов в радиопередающих трактах с высокой линейностью характеристик. Приведены результаты компьютерного моделирования взаимодействия замедленных электромагнитных волн с электронным потоком в ЛБВ с рекуператором СВЧ-энергии. Компьютерное моделирование выполнено для режимов линеаризации параметров ЛБВ с помощью дополнительного входного сигнала. Показана возможность преобразования в кинетическую энергию электронного потока более 90 % энергии дополнительного СВЧ-сигнала, поступающего на вход рекуператора СВЧ-энергии.

*КС: ЛБВ, коэффициент полезного действия, рекуперация энергии СВЧ-сигнала*

## INCREASING THE EFFICIENCY OF TRAVELING-WAVE TUBES AND KLYSTRONS IN RADIO TRANSMISSION PATHS WITH HIGH LINEARITY OF CHARACTERISTICS

P. D. Shalaev, Yu. N. Shcherbakov, A. D. Kalachev

*JSC «RPE «Almaz», Saratov*

Methods of increasing the efficiency of traveling-wave tubes (TWT) and klystrons in radio transmission paths with high linearity of characteristics are compared. The results of computer simulation of the interaction between slow electromagnetic waves and electron beam in TWT with a microwave energy recuperator are presented. Computer simulation was performed for TWT parameters linearization modes using an additional input signal. The possibility of converting more than 90 % of the additional microwave signal energy entering the input of the microwave energy recuperator into kinetic energy of the electron beam is shown.

*Keywords: TWT, efficiency, microwave signal energy recovery*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для усиления мощности радиосигналов в системах электросвязи обычно применяют лампы бегущей волны (ЛБВ) и клистроны. ЛБВ средней мощности (50...200 Вт) применяют в радиопередающих трактах спутников связи. Они лучше других типов усилителей удовлетворяют требованиям к бортовой радиопередающей аппаратуре по ширине рабочей полосы частот, равномерности амплитудно-частотной характеристики, выходной непрерывной мощности, коэффициенту усиления, КПД, надёжности, прочности и устойчивости к воздействию внешних фак-

торов, соответствующих условиям эксплуатации. В наземных радиопередатчиках применяют клистроны с мощностью до 10 кВт и более. Однако использование ЛБВ и клистронов для усиления радиосигналов в режиме максимальной энергетической эффективности в системах связи невозможно. Это связано с тем, что в режимах работы с высоким КПД в них возникают нелинейные искажения усиливаемых СВЧ-сигналов, значительно превышающие предельно допустимые для электросвязи нормы. Искажения проявляются в виде нелинейной зависимости выходной мощности на частотах рабочих СВЧ-сигналов  $P_{\text{вых}}$  от мощности входных СВЧ-сигналов  $P_{\text{вх}}$  (нелинейности амплитудной характеристики), зависимости фазы  $\varphi$  выходных СВЧ-сигналов от их мощности (амплитудно-фазовых преобразований) и в виде комбинационных составляющих в спектре выходных СВЧ-сигналов при многочастотном усилении. Уровень комбинационных составляющих третьего порядка  $\alpha_3$  при усилении двух входных СВЧ-сигналов обычно используется в качестве одного из критериев линейности характеристик усилителей мощности СВЧ-сигналов. Усилители для систем радиосвязи должны обеспечивать подавление уровня комбинационных составляющих третьего порядка в двухчастотном режиме усиления не хуже чем до минус 30 дБ ( $\alpha_3 \leq -30$  дБ).

Такой уровень  $\alpha_3$  в ЛБВ и клистронах достигается в линейном режиме работы при выходной мощности, на 10...12 дБ меньшей мощности насыщения, с низким значением электронного КПД ( $\eta_e = P_e/P_0$ ) и электронного КПД, приведённого к выходной мощности ( $\eta_{\text{э,вых}} = P_{\text{вых}}/P_0$ ) [1, 2], где  $P_e$  – мощность, отданная электронным потоком электромагнитному полю;  $P_0 = I_0 U_0$  – мощность невозмущённого электронного потока;  $I_0$  – ток электронного потока;  $U_0$  – напряжение замедляющей системы (ЗС) или резонаторной системы относительно катода. При расчёте  $\eta_{\text{э,вых}}$  не учитываются потери энергии электронного потока в виде омических потерь энергии электромагнитных волн в ЗС или резонаторной системе, мощности гармонических составляющих и отражённых волн. При значительном снижении  $\eta_{\text{э,вых}}$  КПД ( $\eta = P_{\text{вых}}/P_{\text{потр}}$ ) этих электровакуумных усилителей снижается по сравнению с режимом насыщения даже при четырёхступенчатой рекуперации энергии электронного потока в коллекторе. Здесь  $P_{\text{потр}}$  – потребляемая мощность ЛБВ или клистрона из источников их электропитания. В ЛБВ, электронно-оптическая система коллекторов электронов которых оптимизирована по максимальному  $\eta$  в режиме насыщения (т. е. в режиме максимального  $\eta_{\text{э,вых}}$ ), в режиме работы с выходной мощностью, на 10...12 дБ меньшей мощности насыщения,  $\eta$  уменьшается по сравнению с режимом насыщения более чем в три раза.

Такое изменение  $\eta$  зарегистрировано при измерении электрических параметров в процессе производства ЛБВ диапазонов  $C$ ,  $X$  и  $Ku$ , предназначенных для работы в аппаратуре спутников связи. Кроме рабочего диапазона частот, эти ЛБВ отличаются величиной максимальной выходной мощности (в пределах от 50 до 160 Вт в одночастотном режиме усиления),  $\eta_{\text{э,вых}}$  (в пределах от 18 до 37 % при насыщении в одночастотном режиме усиления) и величиной коэффициента усиления (в пределах от 46 до 52 дБ при насыщении в одночастотном режиме усиления). Соответственно эти ЛБВ отличаются размерными схемами и безразмерными параметрами пространства взаимодействия. Увеличение  $\eta$  этих ЛБВ до 52...69 % при насыщении в одночастотном режиме усиления достигается за счёт трёх- или четырёхступенчатой (для разных типов ЛБВ) рекуперации энергии электронного потока. Типичные изменения энергетических характеристик ЛБВ при изменении их режимов работы, приведённые ниже, получены в результате измерения электрических параметров ЛБВ  $X$ -диапазона. На аналогичной ЛБВ проведены представленные в этой работе исследования возможности повышения её  $\eta$  при работе с высокой линейностью характеристик.

В режиме насыщения выходной мощности при усилении одного входного СВЧ-сигнала эта ЛБВ имеет следующие параметры: коэффициент усиления – 50 дБ,  $P_{\text{вых}} = 51,4$  Вт,  $\eta_{\text{э,вых}} = 35,7$  %,  $\eta = 56,5$  %. При усилении двух равных по мощности входных СВЧ-сигналов, с частотами, отличающимися на 0,12 %, эти параметры принимают следующие значения:

а) в режиме насыщения суммарной выходной мощности: коэффициент усиления – 49,5 дБ (по суммарным входным и выходным мощностям двух рабочих СВЧ-сигналов),  $P_{\text{вых.2сумм}} = 41,5$  Вт (суммарная выходная мощность двух рабочих СВЧ-сигналов),  $\eta_{\text{э,2вых}} = 28,8$  % ( $\eta_{\text{э,вых}}$ , отнесённый к  $P_{\text{вых.2сумм}}$ ),  $\eta_{\text{2сумм}} = 43,8$  % ( $\eta$ , отнесённый к  $P_{\text{вых.2сумм}}$ );

б) в линейном режиме работы при суммарной выходной мощности, на 11,7 дБ меньшей мощности насыщения:  $P_{\text{вых.2сумм}} = 2,8$  Вт,  $\eta_{\text{э,2вых}} = 1,94$  %,  $\eta_{\text{2сумм}} = 8,2$  % (при этом  $\alpha_3 = -30$  дБ).

При снижении  $\eta_{\text{2сумм}}$  электровакуумных усилителей СВЧ-мощности в линейном режиме работы соответственно снижается энергетическая эффективность радиопередающих трактов спутников связи. Для компенсации нелинейных искажений СВЧ-сигналов в ЛБВ и клистронах в «слабонелинейных» режимах работы (при выходной мощности, на 4...6 дБ меньшей, чем в режиме насыщения, и соответственно увеличенных по сравнению с линейным режимом значениях  $\eta_3$ ,  $\eta_{\text{э,вых}}$  и  $\eta$ ) и повышения энергетической эффективности радиопередающих трактов применяют внешние по отношению к конструкции ЛБВ или клистрона устройства, называемые линейризаторами. Высокий уровень компенсации нелинейности амплитудной характеристики и амплитудно-фазовых преобразований в ЛБВ при повышенных значениях КПД обеспечивают линейризаторы с предварительным искажением её входных СВЧ-сигналов [3]. При этом обеспечивается значительное снижение уровня комбинационных составляющих в спектре усиленных СВЧ-сигналов (до  $\alpha_3 \leq -30$  дБ) и увеличение  $\eta_{\text{2сумм}}$  ЛБВ с линейризатором до 20...25 %.

Для линейризации характеристик клистронов применяют аналогичные методы и устройства.

Современные цифровые линейризаторы являются сложными радиотехническими приборами, построенными на твердотельной элементной базе, как правило, со сложными электронными вычислительными устройствами [4, 5]. Это существенно снижает надёжность усилителя СВЧ-мощности с линейризатором и повышает его стоимость.

Более простые, аналоговые линейризаторы с предварительным искажением входных СВЧ-сигналов имеют существенный недостаток, который состоит в том, что предварительные амплитудная и фазовая коррекции входных СВЧ-сигналов должны соответствовать амплитудной и амплитудно-фазовой характеристикам конкретного экземпляра ЛБВ или клистрона. Но это условие неточно выполняется уже при совместной настройке линейризатора с электровакуумным усилителем. Обычно в качестве данных для настройки используют типовые характеристики вместо характеристик конкретного экземпляра усилителя. Далее при длительной совместной эксплуатации несоответствие амплитудных и амплитудно-фазовых характеристик усилителя и линейризатора возрастает из-за изменения этих характеристик в каждом из этих приборов в результате естественного износа. Эффективность линейризации в этих случаях снижается.

Известен метод линейризации характеристик ЛБВ без применения предварительных искажений её рабочих входных СВЧ-сигналов. При использовании этого метода в ЛБВ подают дополнительный СВЧ-сигнал постоянной амплитуды с произвольной фазой относительно фаз рабочих сигналов на входе ЛБВ [6]. Уровень линейризации характеристик ЛБВ при этом не зависит от соотношения фаз сигналов на её входе, что устраняет нестабильность линейризации во время эксплуатации. Частота дополнительного сигнала выбирается за пределами рабочей полосы частот канала связи, что позволяет с помощью СВЧ-фильтров устранять из спектра выходных СВЧ-

сигналов ЛБВ или клистронов сигналы на частоте дополнительного СВЧ-сигнала и на связанных с ним комбинационных частотах. При этом дополнительный сигнал должен быть в полосе частот, в которой эффективность усиления мощности входных СВЧ-сигналов изменяется незначительно. Для ЛБВ, например, критерием максимальной отстройки частоты дополнительного СВЧ-сигнала от частот рабочих СВЧ-сигналов может служить неравномерность коэффициента усиления не более 1 дБ в полосе частот, включающей рабочие и дополнительный СВЧ-сигналы. В [1] показано, что изменение расстройки между основными и дополнительным сигналами в пределах до 20 % не приводит к заметному изменению уровня основных сигналов и  $\alpha_3$  в спиральных ЛБВ. Все представленные далее результаты измерений параметров ЛБВ в многочастотном режиме работы получены при расстройке по частоте 0,12 % между двумя рабочими СВЧ-сигналами и 4 % между дополнительным и одним из рабочих СВЧ-сигналов.

Линеаризация характеристик ЛБВ при использовании этого метода происходит в результате стабилизации скорости электронных сгустков в электронном потоке при амплитудной модуляции рабочих СВЧ-сигналов и постоянной амплитуде дополнительного СВЧ-сигнала. Стабилизация скорости электронных сгустков в электронном потоке возникает за счёт увеличения или уменьшения коэффициента усиления на частоте дополнительного СВЧ-сигнала при уменьшении или увеличении мощности рабочих СВЧ-сигналов на входе ЛБВ. Это приводит к многократному уменьшению амплитудно-фазовых преобразований усиливаемых СВЧ-сигналов (в [1] показано пятикратное уменьшение по сравнению с режимом работы без дополнительного СВЧ-сигнала) и уменьшению  $\alpha_3$  до -25...-30 дБ при разных уровнях мощности дополнительного СВЧ-сигнала.

В [1] экспериментально показана эффективность такого метода линеаризации при испытании ЛБВ X-диапазона с  $P_{\text{вых}} = 51,4$  Вт в режиме насыщения выходной мощности при усилении одного входного СВЧ-сигнала. При использовании метода дополнительного сигнала на входе этой ЛБВ, в режиме работы с суммарной выходной мощностью ниже уровня насыщения трёх равных по амплитуде СВЧ-сигналов, включая дополнительный, соответствующем  $P_{\text{вых.2сумм}} = 24,2$  Вт ( $\eta_{\text{э.2вых}} = 16,8\%$ ), выходной мощности на частоте дополнительного сигнала  $P_{\text{вых.доп}} = 12$  Вт ( $\eta_{\text{э.вых.доп}} = 8,3\%$  –  $\eta_{\text{э.вых}}$  отнесённый к  $P_{\text{вых.доп}}$ ), измеренное значение  $\alpha_3$  равно -24...-25 дБ. Уменьшение  $\alpha_3$  до -30 дБ происходит в другом режиме – при снижении суммарной входной мощности двух рабочих СВЧ-сигналов (без изменения входной мощности дополнительного СВЧ-сигнала) от уровня, соответствующего насыщению суммарной выходной мощности в режиме усиления трёх входных СВЧ-сигналов равной амплитуды (в этом режиме  $P_{\text{вых.2сумм}} = 28,4$  Вт,  $\eta_{\text{э.2вых}} = 19,7\%$ ,  $P_{\text{вых.доп}} = 14,2$  Вт,  $\eta_{\text{э.вых.доп}} = 9,86\%$ ), до уровня, соответствующего  $P_{\text{вых.2сумм}} = 16,3$  Вт,  $\eta_{\text{э.2вых}} = 11,3\%$ ,  $P_{\text{вых.доп}} = 24,5$  Вт,  $\eta_{\text{э.вых.доп}} = 17\%$ . В этом режиме  $\eta_{\text{э.2вых}}$  в 5,8 раз больше, чем в линейном режиме без дополнительного сигнала при таком же значении  $\alpha_3$  (-30 дБ).

Такое повышение  $\eta_{\text{э.2вых}}$  позволяет снизить мощность электронного потока в ЛБВ при заданной  $P_{\text{вых.2сумм}}$  и соответственно повысить её надёжность за счёт снижения тока эмиссии и температуры катода, тока и температуры других электродов. Но  $\eta_{\text{2сумм}}$  ЛБВ и в этом режиме не превышает 17 %, что на 3...8 % меньше, чем при линеаризации параметров ЛБВ с помощью цифровых линеаризаторов с предварительным искажением входных СВЧ-сигналов. Это связано с затратой энергии электронного потока на усиление дополнительного входного сигнала – измеренная суммарная выходная мощность всех сигналов, включая сигналы на частотах всех комбинационных составляющих, равна 49 Вт.

В [7] предложено компенсировать такие затраты, возвращая энергию выходного сигнала ЛБВ на частоте дополнительного сигнала электронному потоку. Конструкции ЛБВ с рекуператорами

энергии СВЧ-сигналов в виде отрезка ЗС и в виде резонаторного блока предложены в [8, 9]. Описание принципа работы этих ЛБВ приведено в [8–10]. Рекуператор энергии СВЧ-сигналов в такой ЛБВ расположен между её ЗС и коллектором электронов и содержит ЗС или резонаторный блок рекуператора, его магнитную систему и ввод СВЧ-сигналов.

На рис. 1 показана схема конструкции ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигналов в виде отрезка ЗС.

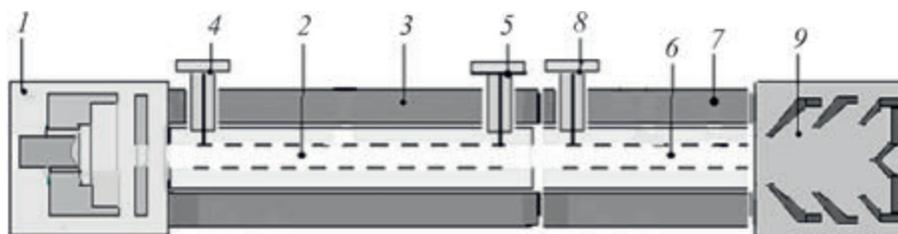


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигналов: 1 – электронная пушка; 2 – ЗС ЛБВ на участке усиления электромагнитных волн; 3 – магнитная система ЛБВ на участке усиления электромагнитных волн; 4 – ввод СВЧ-сигналов в ЛБВ; 5 – вывод СВЧ-сигналов ЛБВ; 6 – ЗС ЛБВ на участке рекуперации энергии электромагнитных волн (ЗС рекуператора энергии СВЧ-сигналов); 7 – магнитная система ЛБВ на участке рекуперации энергии электромагнитных волн; 8 – ввод СВЧ-сигналов в рекуператор энергии СВЧ-сигналов, 9 – коллектор-рекуператор энергии электронного потока

На рис. 2 показана 3D-модель одного из вариантов реализации конструкции ЛБВ. Показанное расположение вывода СВЧ-сигналов ЛБВ и ввода СВЧ-сигналов рекуператора энергии СВЧ-сигналов позволяет уменьшить длину участка дрейфа между ЗС ЛБВ и ЗС рекуператора.

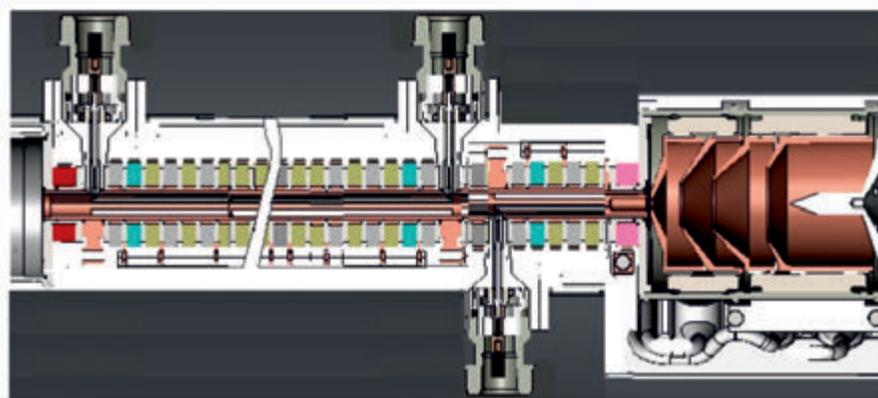


Рис. 2. 3D-модель продольного разреза ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигналов

Работа ЛБВ с рекуперацией энергии СВЧ-сигналов на участке до ввода СВЧ-сигналов в рекуператор их энергии не отличается от работы ЛБВ без такого рекуператора. Усиленные в ЛБВ СВЧ-сигналы через вывод СВЧ-сигналов и следующий за ним циркулятор СВЧ-диапазона передаются в СВЧ-тракт радиопередающего устройства. Усиленный в ЛБВ дополнительный СВЧ-сигнал не используется для работы канала связи. Он может быть выделен в СВЧ-тракте из спектра выходных сигналов ЛБВ с помощью СВЧ-фильтров и подан через циркулятор СВЧ-диапазона и ввод СВЧ-сигналов в рекуператор энергии СВЧ-сигналов. Период ЗС рекупера-

тора (см. ЗС 6 на рис. 1) такой, что в рекуператоре энергии СВЧ-сигналов скорость электромагнитной волны превышает скорость электронного потока. При этом параметр рассинхронизма  $b$  имеет отрицательное значение ( $b < 0$ ), которое соответствует эффективному преобразованию энергии дополнительного СВЧ-сигнала в кинетическую энергию электронного потока. В результате взаимодействия электромагнитной волны с модулированным по плотности и скорости электронным потоком при  $b < 0$  в рекуператоре энергии СВЧ-сигналов происходит преобразование энергии электромагнитной волны в кинетическую энергию электронного потока.

Из рекуператора энергии СВЧ-сигналов электронный поток поступает в коллектор электронов ЛБВ. В нём энергия электронов, оставшаяся после взаимодействия с электромагнитными волнами в ЗС ЛБВ и добавленная в результате взаимодействия с электромагнитной волной дополнительного сигнала в рекуператоре энергии СВЧ-сигналов, преобразуется в энергию постоянного электрического поля источника питания ЛБВ. Таким образом, в два этапа энергия электромагнитного поля дополнительного сигнала преобразуется в энергию постоянного электрического поля источника питания ЛБВ. Использование энергии электромагнитного поля дополнительного сигнала для увеличения энергии электронного потока приводит к повышению КПД ЛБВ в режиме работы с низким уровнем нелинейных искажений.

Нелинейные искажения СВЧ-сигналов в ЛБВ и клистропах обусловлены принципиально одинаковыми физическими явлениями. Поэтому методы линеаризации их характеристик и соответствующие им методы повышения их КПД не имеют принципиальных отличий. Компьютерное моделирование ЛБВ и клистронов с рекуператорами энергии СВЧ-сигналов и исследование возможности значимого повышения их  $\eta_{\text{сумм}}$  в режимах с высокой линейностью характеристик не проводились.

В настоящей статье приведены результаты компьютерного моделирования ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигналов спирального типа.

Целью исследования является выяснение возможности увеличения кинетической энергии электронов электронного потока на участке спиральной ЗС перед коллектором электронов за счёт рекуперации в этом участке энергии СВЧ-сигналов. Способ получения СВЧ-сигнала на входе СВЧ-сигналов рекуператора не влияет на физический процесс преобразования энергии электромагнитного поля в кинетическую энергию электронов. Это позволяет выполнить моделирование данного процесса в односигнальном режиме работы ЛБВ, поэтому расчёты пространства взаимодействия ЛБВ и рекуператора энергии СВЧ-сигнала проведены с помощью программы [11] для односигнального режима. ЗС рекуператора энергии СВЧ-сигнала представляет собой короткий участок ЗС ЛБВ с изменённым периодом.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделирование выполнено для ЛБВ 4-см диапазона длин волн с существенно неоднородной по периоду спиральной ЗС, энергетические характеристики которой приведены в [1]. Безразмерные параметры ЛБВ изменяются от  $b = 0,08$ ,  $q = 0,46$ ,  $C = 0,065$ ,  $d = 0,02$  на линейном участке пространства взаимодействия до  $b = 7,3$ ,  $q = 0,52$ ,  $C = 0,058$ ,  $d = 0,06$  на выходном участке, где  $b$  – параметр рассинхронизма,  $q$  – пространственный заряд,  $C$  – параметр усиления Пирса,  $d$  – параметр потерь. Энергетические характеристики таких ЛБВ, полученные при измерении в одночастотном и многочастотном режимах работы, приведены в разд. 1

Эта ЛБВ выбрана в качестве объекта исследования потому, что её характеристики подробно

исследовались ранее и были получены проверенные экспериментально результаты, которые могут быть основой для её моделирования с рекуператором энергии СВЧ-сигналов. Исходные данные для моделирования работы ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигнала формировались на основе представленных результатов экспериментальных исследований. При этом учитывались следующие выводы, полученные экспериментально:

- расстройка СВЧ-сигналов по частоте много меньше полосы рабочих частот ЛБВ (расстройка двух рабочих СВЧ-сигналов – 0,12 %, расстройка дополнительного сигнала относительно одного из рабочих сигналов – 4 %), поэтому взаимодействие электронного потока с электромагнитным полем в пространстве взаимодействия при усилении трёх сигналов мало отличается от взаимодействия при усилении одного сигнала;

- экспериментальные данные по энергиям электронов на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ в одночастотном и трёхчастотном режимах усиления мало отличаются при одинаковом уровне односигнальной выходной мощности и суммарной выходной мощности всех сигналов, включая сигналы на частотах всех комбинационных составляющих, в трёхчастотном режиме усиления;

- в трёхчастотном режиме уменьшение входной мощности двух рабочих сигналов приводит к уменьшению их выходной мощности и к возрастанию выходной мощности на частоте третьего (дополнительного) СВЧ-сигнала, входная мощность которого не изменилась, при этом суммарная выходная мощность всех сигналов, включая сигналы на частотах всех комбинационных составляющих, изменяется пренебрежимо мало,

- при амплитудной модуляции рабочих сигналов и постоянной входной мощности третьего (дополнительного) сигнала в трёхчастотном режиме суммарная выходная мощность и распределение электронов по энергиям на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ изменяются настолько мало, что при дальнейшем анализе этими изменениями можно пренебречь.

Изложенное выше позволяет использовать моделирование ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигнала в одночастотном режиме работы для оценки возможности увеличения КПД ЛБВ за счёт рекуперации энергии дополнительного СВЧ-сигнала при её работе в многочастотном режиме. Такая оценка выполнена с использованием результатов расчётов ЛБВ по программе [11] в одночастотном режиме усиления и представленных результатов экспериментальных исследований.

На первом этапе моделирования выполнены расчёты выходной мощности в насыщении и соответствующего распределения электронов по энергиям на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ, схема которой показана на рис. 3.



Рис. 3. Схема для расчёта параметров ЛБВ:

1 – входная секция ЗС ЛБВ; 2 – СВЧ-поглодитель; 3 – выходная секция ЗС ЛБВ;  
4 – коллектор электронов

Полученное распределение электронов по энергиям, как отмечалось выше, мало отличается от их распределения при усилении трёх сигналов в режиме насыщения суммарной выходной мощности ЛБВ и используется в качестве контрольного на следующем этапе расчётов.

На втором этапе моделирования выполнены расчёты выходной мощности в насыщении и соответствующего распределения электронов по энергиям на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ, схема которой показана на рис. 4. При этом выходная мощность в режиме насыщения в сечении пространства взаимодействия ЛБВ перед СВЧ-поглотителем 5 равнялась выходной мощности в насыщении на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ, схема которой показана на рис. 3, полученной на предыдущем этапе моделирования.

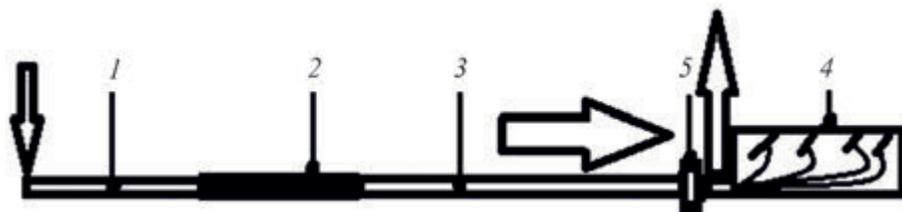


Рис. 4. Схема для расчёта параметров ЛБВ с коротким СВЧ-поглотителем перед выводом СВЧ-сигналов:

1 – входная секция ЗС ЛБВ; 2 – СВЧ-поглотитель; 3 – выходная секция ЗС ЛБВ;  
4 – коллектор электронов; 5 – короткий (0,5 мм) СВЧ-поглотитель

В результате расчётов определены потери СВЧ-мощности в СВЧ-поглотителе 5 такие, что распределение электронов по энергиям на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ за СВЧ-поглотителем 5 остаётся таким же, как и при расчёте в режиме насыщения ЛБВ, схема которой показана на рис. 3, а выходная мощность при этом равна значению выходной мощности дополнительного СВЧ-сигнала, полученному экспериментально при трёх СВЧ-сигналах на входе ЛБВ (двух рабочих и дополнительном сигнале) –  $P_{\text{вых.доп}} = 24,5 \text{ Вт}$  ( $\eta_{\text{э,вых.доп}} = 17 \%$ ).

Потребляемая мощность ЛБВ получена вычислением суммы мощностей, потребляемых всеми её электродами (кроме мощности подогревателя катода) при условии идеальной сортировки электронов по рассчитанным энергиям при рекуперации энергии электронного потока в четырёхступенчатом коллекторе электронов.

Технический КПД ЛБВ  $\eta_{\text{т.и}}$  (без учёта мощности подогревателя катода), соответствующий идеальной сортировке электронов по рассчитанным энергиям при рекуперации энергии электронного потока в четырёхступенчатом коллекторе электронов, рассчитывался как отношение экспериментального значения суммарной выходной мощности двух рабочих СВЧ-сигналов ( $P_{\text{вых.2сумм}} = 16,3 \text{ Вт}$ ) при уровне  $\alpha_3 = -30 \text{ дБ}$  к потребляемой мощности ЛБВ, полученной вычислением по указанной выше методике. Это значение  $\eta_{\text{т.и}}$  относится к ЛБВ без рекуператора энергии СВЧ-сигнала.

На третьем этапе моделирования выполнены расчёты выходной мощности и распределения электронов по энергиям на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ за дополнительной секцией ЗС (перед коллектором электронов). Схема ЛБВ показана на рис. 5. Параметры и положение короткого (0,5 мм) СВЧ-поглотителя 5 и режим работы ЛБВ такие же, как при расчёте ЛБВ на втором этапе моделирования. Как видно на рис. 5, на вход рекуператора энергии СВЧ-сигнала (дополнительной секции ЗС) подаётся часть выходной мощности, оставшаяся после затухания в коротком СВЧ-поглотителе 5. Эта часть выходной мощности равна экспериментальному значению выходной мощности дополнительного СВЧ-сигнала ( $P_{\text{вых.доп}} = 24,5 \text{ Вт}$ ), полученному при трёх СВЧ-сигналах на входе ЛБВ и уровне  $\alpha_3 = -30 \text{ дБ}$ .

Потребляемая мощность ЛБВ и  $\eta_{\text{т.и}}$  определялись по рассчитанным энергиям электронов на

выходе из пространства взаимодействия ЛБВ за дополнительной секцией ЗС (перед коллектором электронов) при условии идеальной сортировки в четырёхступенчатом коллекторе и  $P_{\text{вых.2сумм}} = 16,3$  Вт. По выходной мощности ЛБВ на выходе из дополнительной секции ЗС можно оценить эффективность рекуперации энергии СВЧ-сигнала в исследуемой ЛБВ.

Дополнительная секция ЗС 6 перед коллектором электронов выполняет функцию рекуператора энергии СВЧ-сигнала, поступающего в неё после короткого (0,5 мм) СВЧ-поглотителя 5.

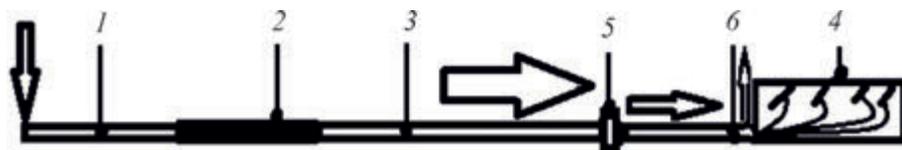


Рис. 5. Схема для расчёта параметров ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигнала:

1 – входная секция ЗС ЛБВ; 2 – СВЧ-поглотитель; 3 – выходная секция ЗС ЛБВ; 4 – коллектор электронов; 5 – короткий (0,5 мм) СВЧ-поглотитель; 6 – дополнительная секция ЗС

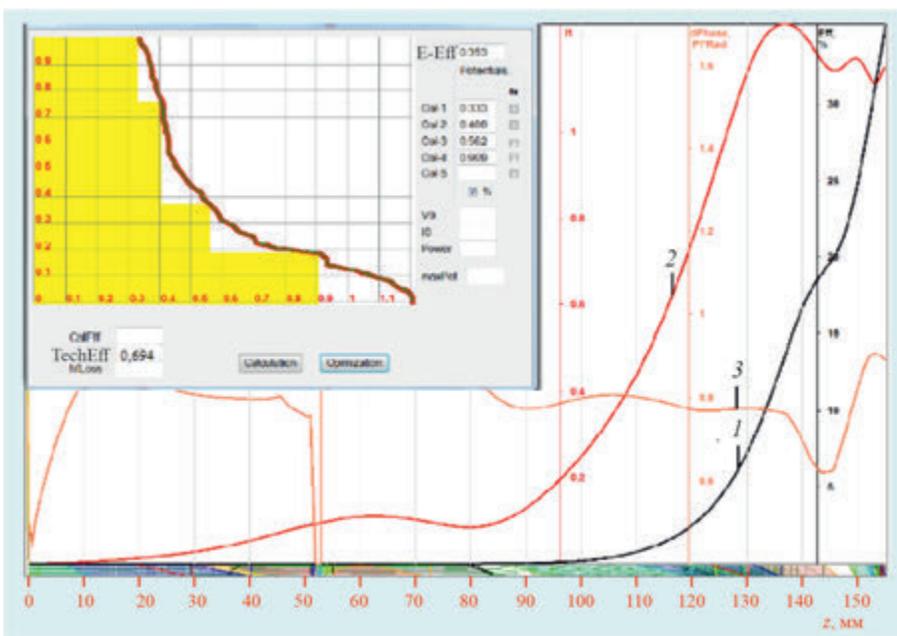
Согласно предложенной методике исследования, вместо дополнительного СВЧ-сигнала на вход рекуператора энергии СВЧ-сигнала (дополнительной секции ЗС) ЛБВ, показанной на рис. 5, подаётся часть выходной мощности, оставшаяся после затухания в коротком СВЧ-поглотителе 5. Такая замена не вносит изменений в физические процессы рекуперации энергии СВЧ-сигналов и соответственно не влияет на результаты исследования.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

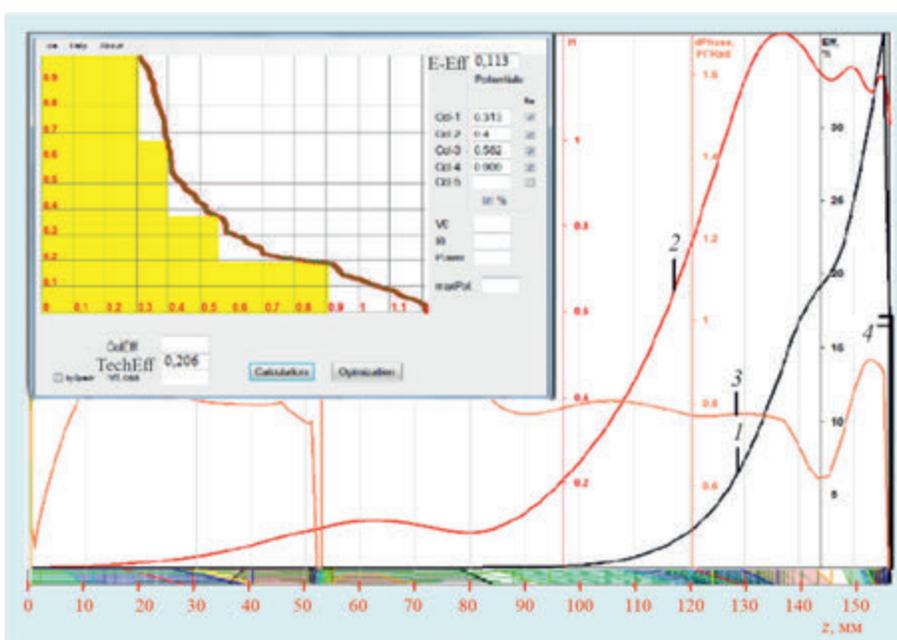
Результаты расчёта параметров пространства взаимодействия ЛБВ, схемы которых показаны на рис. 3...5, представлены на рис. 6 и 7. Для анализа условий усиления мощности электромагнитной волны в пространстве взаимодействия ЛБВ, на рисунках приведены графики изменения по его длине  $\eta_{\text{э,вых}}$  ( $\eta_{\text{э,вых}}$  на графиках обозначен Eff), амплитуды первой гармоники переменного тока электронного потока  $I_1$  и разности фаз первой гармоники переменного тока и первой гармоники продольного электрического поля бегущей в ЗС электромагнитной волны  $\Delta\Phi$ . Графики приведены для режимов работы ЛБВ, описанных в методике исследования. В левых верхних частях рис. 6 и 7 показаны рассчитанные распределения электронов по энергиям на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ – перед входом в коллектор электронов – и рассчитанные значения  $\eta_{\text{т.и}}$ .

На рис. 6, а показаны результаты расчёта, полученные на первом этапе моделирования. В режиме насыщения в конце пространства взаимодействия ЛБВ  $\eta_{\text{э,вых}} = 0,353$  (35,3 %). Это значение соответствует экспериментальным данным –  $\eta_{\text{э,вых}}$  промышленных образцов ЛБВ принимают значения от 35 до 37 %. Показанное в левой верхней части рисунка распределение электронов по энергиям на выходе из пространства взаимодействия ЛБВ также соответствует экспериментальным данным. В этой части рисунка, здесь и далее,  $\eta_{\text{э,вых}}$  обозначен E-Eff, технический КПД ЛБВ  $\eta_{\text{т.и}}$  (без учёта мощности подогревателя катода) обозначен TechEff. Значения TechEff соответствуют идеальной сортировке электронов по рассчитанным энергиям при четырёхступенчатой рекуперации энергии электронного потока. Экспериментальные значения КПД ЛБВ обычно в 1,15...1,3 раз ниже, чем  $\eta_{\text{т.и}}$ . Это вызвано наличием вторичной электронной эмиссии с поверхностей деталей коллекторов и тем, что конструкции коллекторов электронов не обеспечивают идеальную сортировку первичных электронов по энергиям и запирают вторичных электронов в коллекторных секциях с пониженными относительно соседних секций потенциалами.

Однако сведений о величинах  $\eta_{\text{ти}}$  достаточно для анализа возможности получения положительного эффекта при рекуперации энергии дополнительного СВЧ-сигнала, его количественной оценки и определения возможности повышения КПД ЛБВ в режиме линейаризации её характеристик за счёт дополнительного входного СВЧ-сигнала.



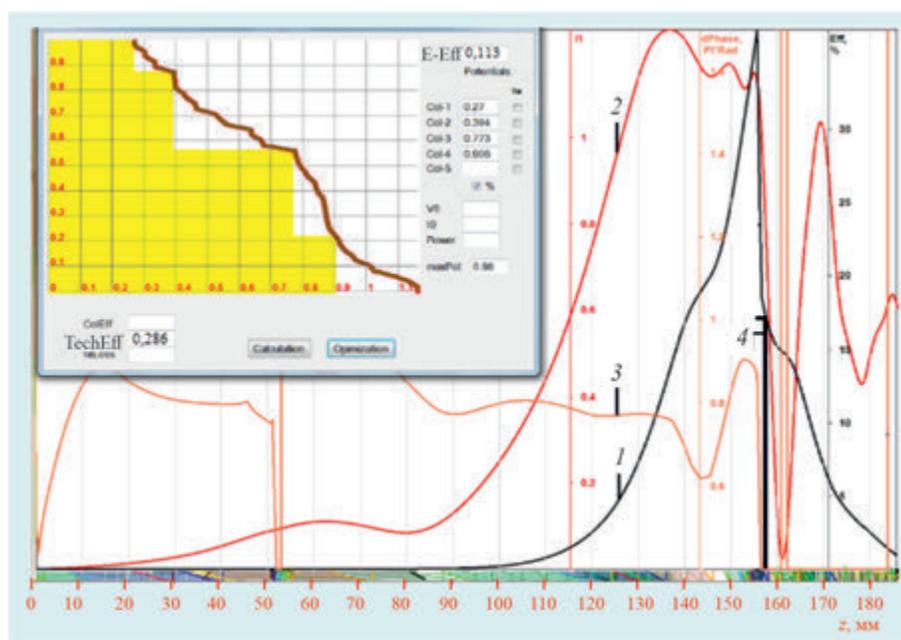
а)



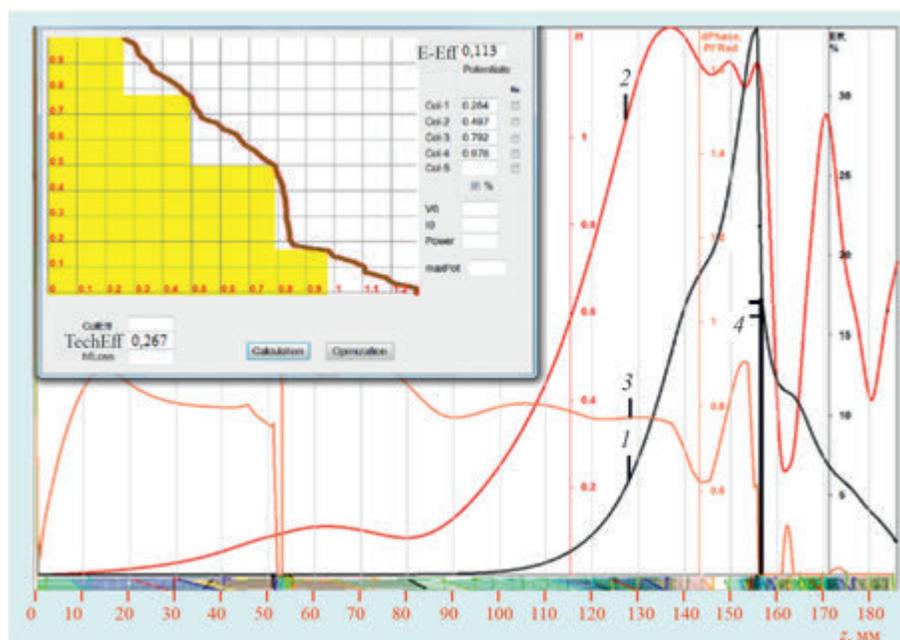
б)

Рис. 6. Параметры пространства взаимодействия ЛБВ, схемы которых показаны на рис. 3 (а), рис. 4 (б):

$$1 - \eta_{\text{э.вых}}; 2 - \tilde{I}_1; 3 - \Delta\Phi; 4 - \eta_{\text{э.вых}} = \eta_{\text{э.вых.доп}}$$



а)



б)

Рис. 7. Параметры пространства взаимодействия ЛБВ и рекуператора энергии дополнительного СВЧ-сигнала при работе в режиме усиления трёх СВЧ-сигналов:

а – фаза дополнительного СВЧ-сигнала на входе в ЗС рекуператора  $\varphi = \varphi_0$ ;

б – фаза дополнительного СВЧ-сигнала на входе в ЗС рекуператора  $\varphi = \varphi_0 - 0,28\pi$ ;

$$1 - \eta_{\text{э.вых}}; 2 - \tilde{I}_1; 3 - \Delta\Phi; 4 - \eta_{\text{э(вых)}} = \eta_{\text{э.вых.доп}}$$

Как видно на рис. 6, а, в режиме насыщения выходной мощности при одночастотном усилении  $\eta_{\text{т.и}} = 0,694$  (69,4 %), а минимальная энергия электронов равна 0,333. Следовательно, напряжение

первой секции коллектора должно быть не менее  $0,667U_0$ . В многочастотном режиме работы появляется небольшое количество электронов (1-2 %) с более низкой минимальной энергией, чем в одночастотном режиме. Это учитывается при выборе режимов электропитания электродов коллектора в процессе производства ЛБВ для аппаратуры спутников связи.

На рис. 6, б видно, что в трёхчастотном режиме при  $\eta_{э,2вых} = 11,3\%$ ,  $\eta_{э,вых.доп} = 17\%$  у ЛБВ без рекуперации энергии дополнительного СВЧ-сигнала  $\eta_{т.и} = 0,206$  (20,6 %), что в 3,3 раза меньше, чем в односигнальном режиме. Из этого рисунка также следует, что для обеспечения возможности эксплуатации ЛБВ как в многочастотном режиме, так и в одночастотном режиме необходимо увеличить напряжение первой ступени коллектора относительно катода на  $0,02U_0$ . Это приведёт к уменьшению  $\eta_{т.и}$  в односигнальном режиме с 0,694 до 0,67.

Задача обеспечения эффективного преобразования электромагнитной энергии дополнительного сигнала в кинетическую энергию электронного потока решалась только за счёт изменения периода ЗС СВЧ-рекуператора. Это ограничение было принято для сокращения времени поиска ответа на вопрос о принципиальной возможности получения положительного эффекта в виде увеличения КПД ЛБВ. Оптимизация периода ЗС СВЧ-рекуператора и функции изменения периода по длине ЗС выполнялась в диалоговом режиме по уровню рекуперации мощности дополнительного СВЧ-сигнала. При этом основная цель такой работы состояла в исследовании возможности применения рассматриваемого метода линеаризации параметров ЛБВ с рекуперацией энергии дополнительного СВЧ-сигнала.

На рис. 7 показаны результаты расчёта, выполненные на третьем этапе моделирования. На рис. 7, а видно, что в пространстве взаимодействия рекуператора энергии СВЧ-сигнала произошло преобразование 92 % энергии поступившего в него СВЧ-сигнала в кинетическую энергию электронного потока. В результате такого преобразования уменьшилась доля электронов с энергиями менее 0,4 и увеличилась доля электронов с энергиями более 0,75, которые могут достигать более низкопотенциальных коллекторных секций. За счёт этого, как видно на том же рисунке, в трёхчастотном режиме при  $\eta_{э,2вых} = 11,3\%$ ,  $\eta_{э,вых.доп} = 17\%$  у ЛБВ с рекуператором энергии дополнительного СВЧ-сигнала  $\eta_{т.и}$  увеличился до 0,286 (28,6 %). То есть увеличился на 8 %, или в 1,39 раза, по сравнению с ЛБВ без рекуператора энергии дополнительного СВЧ-сигнала. При таком значении  $\eta_{т.и}$  экспериментальные значения КПД ЛБВ могут быть в пределах от 22 до 25 %.

На рис. 7, б показаны результаты расчёта ЛБВ с рекуператором энергии дополнительного СВЧ-сигнала, режим работы которой отличается только тем, что фаза СВЧ-сигнала на входе в рекуператор отличается от фазы СВЧ-сигнала, использованной в расчётах, представленных на рис. 7, а, на  $0,28\pi$ . Сравнение рис. 7, а и 7, б даёт основание считать невысокой зависимость уровня рекуперации энергии СВЧ-сигнала от его фазы на входе в ЗС рекуператора. Преобразование СВЧ-энергии в кинетическую энергию электронного потока осталось на высоком уровне (85 %), при этом  $\eta_{т.и} = 0,267$  (26,7 %).

Конечно, представленные результаты не позволяют оценить предельные возможности предложенных конструкций ЛБВ и способов их эксплуатации, а только показывают принципиальную возможность получения положительного эффекта, имеющего практическое значение, при их применении. Для оценки предельных возможностей необходимо проводить совместное проектирование ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигналов, позволяющее найти лучшее сочетание параметров их пространства взаимодействия и соответствующую им конструкцию коллектора электронов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере спиральной ЛБВ с рекуператором энергии СВЧ-сигналов показано, что в рекуператоре возможно эффективное преобразование энергии СВЧ-сигналов в кинетическую энергию электронного потока. В рассмотренном режиме работы технический КПД ЛБВ, рассчитанный при условии идеальной сортировки электронов по энергиям и четырёхступенчатой рекуперации энергии электронного потока, увеличился за счёт рекуперации энергии СВЧ-сигнала на 8 %, или в 1,39 раза, по сравнению с ЛБВ без рекуператора энергии СВЧ-сигнала. Подобные рекуператоры энергии СВЧ-сигналов могут быть использованы для увеличения КПД ЛБВ и клистронов при линеаризации их характеристик с помощью дополнительного входного СВЧ-сигнала. Выделение дополнительных сигналов из спектра выходных сигналов усилителей СВЧ-мощности и передача их на вход рекуператоров СВЧ-сигналов могут быть обеспечены с помощью СВЧ-фильтров и циркуляторов, обычно применяемых в радиопередающих трактах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шалаев, П. Д. Уменьшение нелинейных искажений сигналов в ЛБВ О-типа в полосе рабочих частот выходных усилителей СВЧ-мощности спутников связи / П. Д. Шалаев, Д. Л. Симонов // Радиотехника. – 2017. – № 7. – С. 14 – 18.
2. Малыхин, А. В. Клистрон для систем связи с пониженным уровнем комбинационных составляющих / А. В. Малыхин, Е. П. Якушкин // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1988. – Вып. 7 (411). – С. 11 – 13.
3. Повышение линейности и энергетической эффективности усилителей мощности широкополосных СВЧ-сигналов / Л. А. Белов [и др.] // Электросвязь. – 2012. – № 5. – С. 23 – 25.
4. Пат. 128426 РФ, МПК Н 04 В 7/005. Радиопередающее устройство с адаптивной коррекцией линейности: № 2012157635/07; заявл. 27.12.2012; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14 / Белов Л. А., Кондрашов А. С., Немаев М. А., Ромащенко К. В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».
5. Roger, F. An analog approach to power amplifier predistortion / F. Roger // Microwave Journal. – 2011. – Vol. 54, No 4. – P. 60 – 76.
6. Кац, А. М. Сигнал в лампах с бегущей волной: в 2 ч. Ч. 1. Лампа с бегущей волной О-типа / А. М. Кац, В. П. Кудряшов, Д. И. Трубецков. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. СГУ, 1984. – 144 с.
7. Шалаев, П. Д. Линеаризация характеристик усилителей СВЧ-мощности на ЛБВ в режимах с высоким КПД с помощью немодулированного дополнительного сигнала и рекуперации энергии СВЧ электромагнитного поля / П. Д. Шалаев // Радиотехника. – 2018. – № 8. – С. 187 – 191.
8. Пат. 2706644 РФ, МПК Н 01 J 25/34 (2006.01). Лампа бегущей волны для линейных усилителей СВЧ-мощности спутников связи: № 2019109342; заявл. 29.03.2019; опубл. 19.11.2019, Бюл. № 32 / Шалаев П. Д.; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Алмаз».
9. Пат. 2738394 РФ, МПК Н 01 J 25/34 (2006.01). Лампа бегущей волны линеаризованного усилителя СВЧ-мощности: № 2020114964; заявл. 24.04.2020; опубл. 11.12.2020, Бюл. № 35 / Царев В. А., Шалаев П. Д.; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Алмаз».
10. Shalaev, P. D. Traveling wave tube with energy recovery of an additional microwave signal / P. D. Shalaev // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov, Russia. – 2020. – P. 9 – 11.
11. Шалаев, П. Д. Программа расчёта и оптимизации параметров пространства взаимодействия ЛБВ О-типа / П. Д. Шалаев, Ю. Н. Щербаков // Радиотехника. – 2017. – № 7. – С. 48 – 52.

*Статья поступила 28 июля 2022 г.,  
после переработки 21 октября 2022 г.*

УДК 621.385.624

## РАСЧЁТ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТОК ПУЧКА, ФОРМИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКОЙ

А. И. Петросян<sup>1</sup>, Н. А. Алексеева<sup>1</sup>, В. И. Роговин<sup>1,2</sup>, И. А. Чистяков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

<sup>2</sup>СГУ им. Н. Г. Чернышевского, г. Саратов

С использованием модернизированной программы [1] учтено увеличение тока пучка в пушках Пирса под влиянием начальных тепловых скоростей электронов [2]. Рассчитаны электронные пушки с ускоряющим напряжением от 4 до 13 кВ. Показано увеличение пульсаций границы пучка под влиянием увеличения тока при фокусировке МПФС и предложен путь их устранения.

*КС: электронная пушка, рост тока пучка, начальные тепловые скорости*

## THE COMPUTATION OF THE INFLUENCE OF INITIAL THERMAL ELECTRON VELOCITIES UPON THE BEAM CURRENT VALUE OF AN ELECTRON GUN

A. I. Petrosyan<sup>1</sup>, N. A. Alekseeva<sup>1</sup>, V. I. Rogovin<sup>1,2</sup>, I. A. Chistyakov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>JSC «RPE «Almaz», Saratov

<sup>2</sup>Saratov State University, Saratov

The upgraded program [1] takes into account the increase in the beam current in Pierce guns under the influence of the initial thermal velocities of electrons [2]. Electron guns with an accelerating voltage of 4 to 13 kV have been calculated. An increase in beam boundary pulsations under the influence of an increase in current during MPFS focusing is shown and the way of eliminating these pulsations is suggested.

*Keywords: electron gun, beam current growth, initial thermal velocities*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Известно [1], что учёт начальных тепловых скоростей электронов при расчёте формирования пучка в пушке и дальнейшей его фокусировки в МПФС позволяет существенно улучшить соответствие между расчётными и экспериментально найденными размерами пучков. В работе [2] показано, что учёт влияния начальных тепловых скоростей электронов на ток пучка приводит к увеличению его величины. Это увеличение тока может привести к возрастанию пульсаций границы пучка при его фокусировке магнитным полем, которое может быть легко устранено небольшим (2-3 %) изменением величины одного из пиков магнитного поля переходной области МПФС.

В настоящей работе рассчитаны три электронные пушки с разными анодными напряжениями, определены величины роста тока пучка из-за начальных тепловых скоростей электронов, благодаря чему рассчитанные значения тока пучка стали ближе к измеренным.

## 2. РАСЧЁТ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУШЕК И ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА В МПФС С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ВЕЛИЧИНУ ТОКА ПУЧКА

Для расчёта электронной пушки с учётом влияния начальных тепловых скоростей электронов на величину тока пучка модернизирована программа [1] с целью вычисления увеличения тока пучка в соответствии с формулой (1), предложенной в работе [2]:

$$Coeff = 1 + \frac{0,025 \cdot \sqrt{T_c}}{\sqrt{V - V_m}}, \quad (1)$$

где  $Coeff$  – поправочный коэффициент для тока пучка, причем первое слагаемое связано с использованием закона Чайлда (закон степени 3/2), а второе слагаемое – с влиянием максвелловского распределения электронов по скоростям, при котором средняя скорость электронов в пучке связана с температурой катода выражением  $\bar{v} = \sqrt{\frac{\pi k T_c}{2m}}$ ;  $T_c$  – температура катода по шкале Кельвина;

$V$  – потенциал анода диода;  $V_m$  – минимальный потенциал перед катодом, равный нескольким десятым долям вольта, а  $k$  и  $m$  постоянная Больцмана и масса электрона соответственно. Из формулы (1) видно, что поправочный коэффициент пропорционален  $\sqrt{T_c}$  и обратно пропорционален  $\sqrt{V - V_m}$ . На первом этапе вычисляется поправочный коэффициент, а затем возросшая величина тока пучка определяется перемножением тока пучка, определяемого законом Чайлда, и поправочного коэффициента.

При расчёте пушки используется модель диода, а ток крупных частиц, имитирующих электроны, вычисляется по закону Чайлда в точках, расположенных на малых расстояниях от катода. Значения потенциала в этих точках являются, по сути, значениями потенциала анода диода, то есть эти значения должны быть использованы как в законе Чайлда, так и в коэффициенте поправки к этому закону по формуле (1). После вычисления тока по закону Чайлда, его величина умножается на поправочный коэффициент к току диода.

В качестве примера рассчитана пушка с потенциалом анода 4 кВ и током 70 мА (рис. 1).

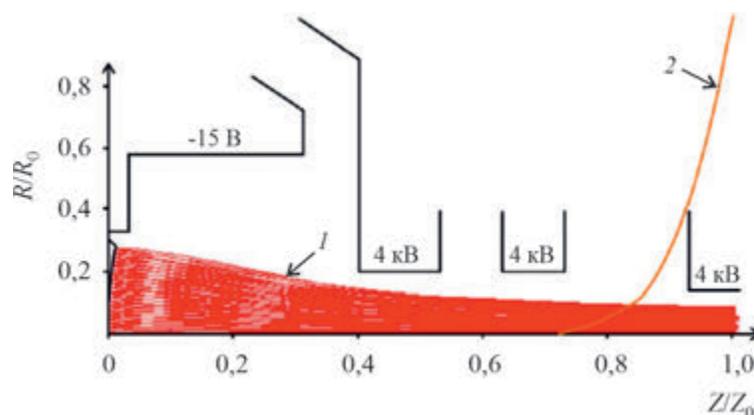


Рис. 1. Траектории частиц (1) и распределение амплитуды магнитного поля (2) в электронной пушке. Температура катода  $T_c = 950$  °С. Потенциал анода  $U_a = 4$  кВ. Ток  $I_0 = 70$  мА без учета влияния начальных тепловых скоростей электронов и  $I_0 = 73,6$  мА с учетом влияния начальных тепловых скоростей электронов

Результаты расчета показали, что ток катода  $I$ , рассчитанный с учетом влияния начальных тепловых скоростей электронов на его величину, составляет 73,6 мА, что на 3,6 мА (5,1 %) больше, чем ток  $I_0 = 70$  мА, рассчитанный без такого учета. Отличие рассчитанного значения тока  $I = 73,6$  мА от значения, полученного при испытании прибора ( $I = 75$  мА), не превосходит 1,9 %. Обозначим микропервеанс, рассчитанный по току  $I$ , через  $P_\mu$ , а микропервеанс, рассчитанный по току  $I_0$ , через  $P_{\mu 0}$ .

Для электронной пушки, представленной на рис.1, была рассчитана зависимость (рис. 2) микропервеанса  $P_\mu$  от потенциала первого анода  $U$ , которым нормированы потенциалы остальных электродов пушки и потенциал замедляющей системы. Анализ результатов расчета показал, что при повышении потенциала  $U$  с 1 до 20 кВ микропервеанс уменьшится почти на 7 %. На этом же рисунке показана величина  $P_{\mu 0} = 0,277$ , полученная без учета начальных тепловых скоростей электронов.

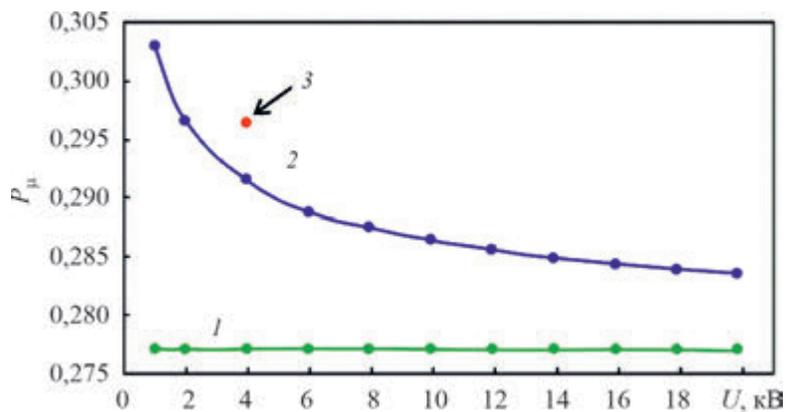


Рис. 2. Зависимости микропервеанса  $P_\mu$  от потенциала  $U$  первого анода в пушке:  
 $1 - P_{\mu 0} = 0,277$ ;  $2 - P_\mu$ ;  $3 -$  значения микропервеанса, полученные при испытании прибора

Была рассмотрена фокусировка пучка, сформированного пушкой (см. рис. 1), в МПФС (рис. 3).

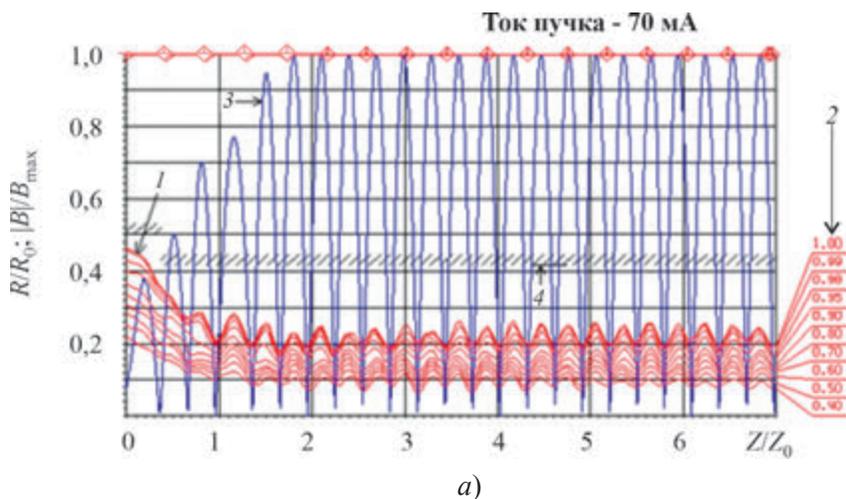


Рис. 3. Транспортировка пучка в магнитном поле МПФС для ЭОС 1 (см. также с. 46):  
 $1 -$  трубки тока;  $2 -$  доли тока пучка;  $3 -$  магнитное поле, нормированное максимальной величиной поля  $B_{\max}$ ;  $4 -$  пролётный канал

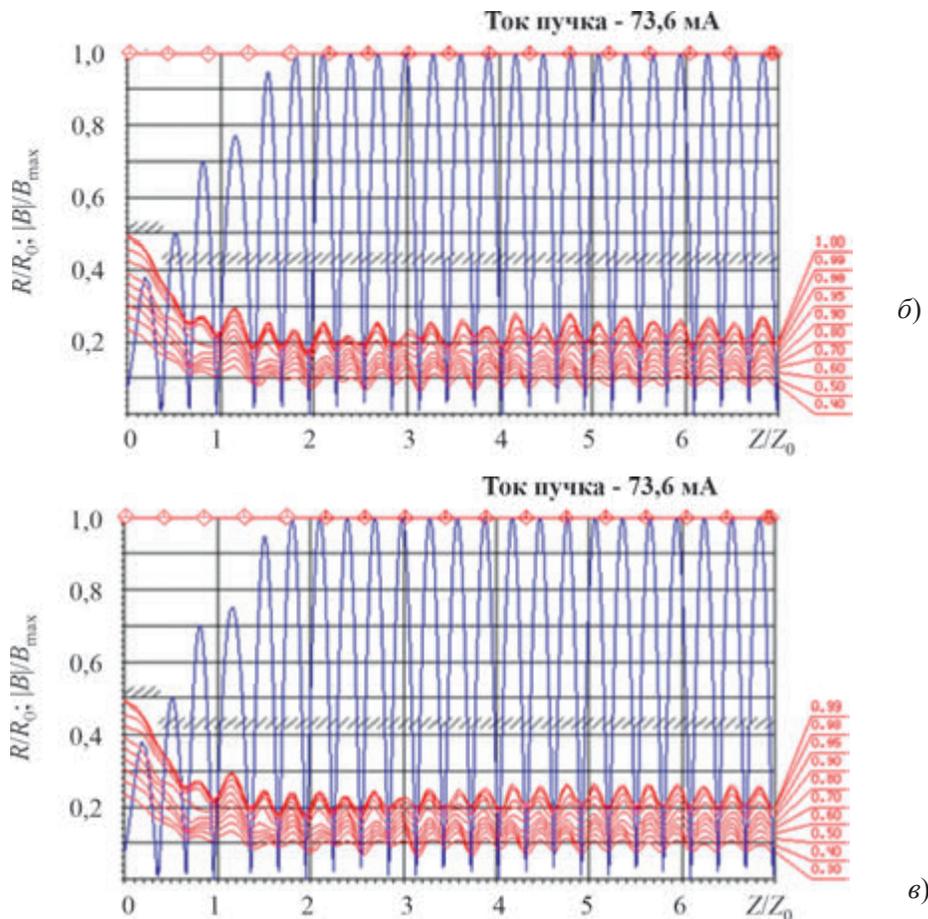


Рис. 3. Транспортировка пучка в магнитном поле МПФС для ЭОС 1:  
 1 – трубки тока; 2 – доли тока пучка; 3 – магнитное поле, нормированное максимальной величиной поля  $B_{\max}$ ; 4 – пролётный канал

Как следует из анализа результатов расчета, представленных на рис. 3, пучок с током  $I = 73,6$  мА, рассчитанным с учетом влияния начальных тепловых скоростей электронов на его величину, имеет при его фокусировке возросшую амплитуду пульсаций границы пучка, которая, согласно данным расчёта (рис. 3, б), на 30 % больше, чем у пучка с током  $I_0 = 70$  мА, рассчитанным без такого учёта (рис. 3, а). Однако уменьшение 4-й амплитуды магнитного поля в четвертой ячейке МПФС всего на 2 % от амплитуды магнитного поля МПФС, как показано на рис. 3, в, позволяет уменьшить пульсации границы пучка и сделать их такими же, как на рис. 3, а.

В качестве второго примера рассчитана пушка (рис. 4) с потенциалом анода 7 кВ.

Результаты расчета показали, что ток  $I$ , рассчитанный с учетом влияния на его величину начальных тепловых скоростей электронов, равен 175 мА, что на 7 мА (4,2 %) больше, чем ток  $I_0 = 168$  мА, рассчитанный без учета такого влияния. При испытании прибора было получено среднее значение тока 177 мА, отличающееся от рассчитанного значения тока не более 1 %.

Рассмотрена фокусировка этого пучка (рис. 5) в МПФС. Как следует из анализа результатов расчета, представленных на рис. 5, б, пучок с током 175 мА имеет возросшую примерно на 20 % амплитуду пульсаций границы пучка по сравнению с пучком с током 168 мА (см. рис. 4, а), при этом увеличение 4-го пика магнитного поля всего на 3 % от амплитуды магнитного поля МПФС, как

показано на рис. 5, в, позволяет уменьшить пульсации границы пучка и сделать их такими же, как на рис. 5, а.

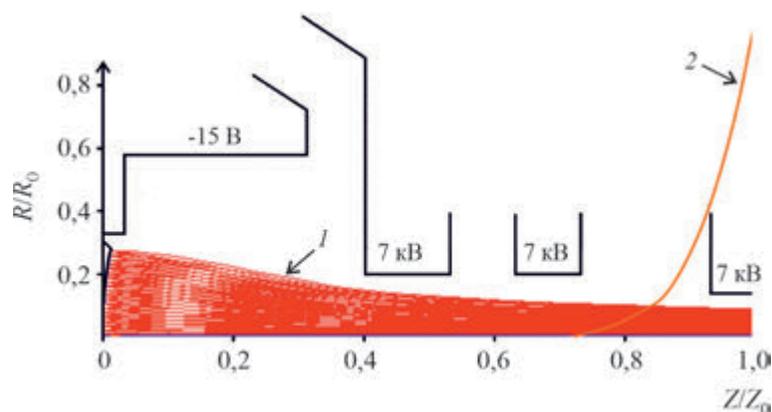


Рис. 4. Траектории частиц (1) и распределение амплитуды магнитного поля (2) в электронной пушке.  $T_c = 950^\circ\text{C}$ .  $U_a = 7\text{ кВ}$ .  $I_0 = 168\text{ мА}$  без учета влияния начальных тепловых скоростей электронов и  $I_0 = 175\text{ мА}$  с учетом влияния начальных тепловых скоростей электронов

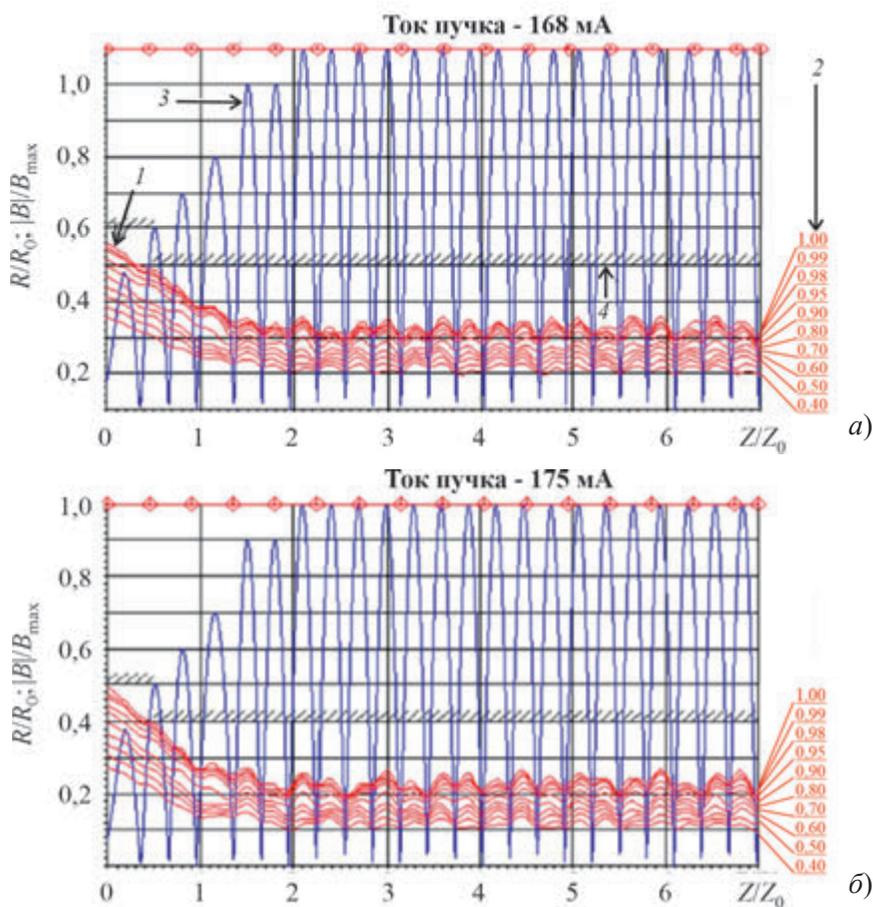


Рис. 5. Транспортировка пучка в магнитном поле МПФС для ЭОС 2 (см. также с. 48): 1 – трубки тока; 2 – доли тока пучка; 3 – магнитное поле, нормированное максимальной величиной поля  $B_{\text{max}}$ ; 4 – пролётный канал

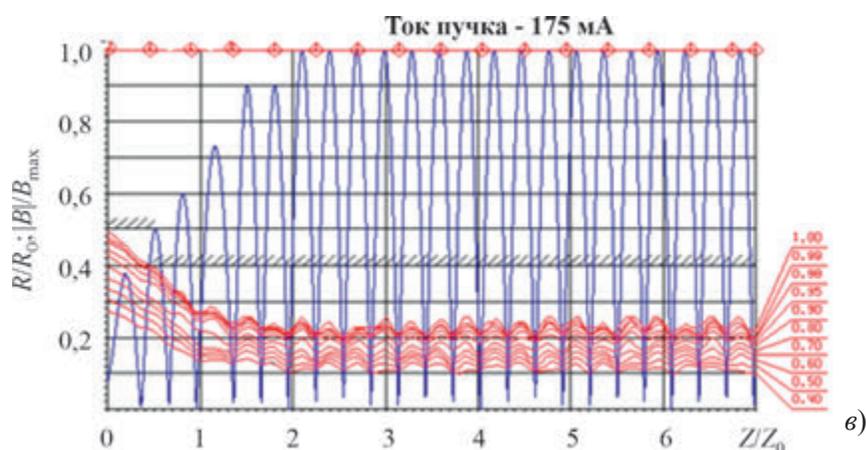


Рис. 5. Транспортировка пучка в магнитном поле МПФС для ЭОС 2: 1 – трубки тока; 2 – доли тока пучка; 3 – магнитное поле, нормированное максимальной величиной поля  $B_{\max}$ ; 4 – пролётный канал

В качестве третьего примера рассчитана пушка (рис. 6) с потенциалом анода 13,8 кВ.

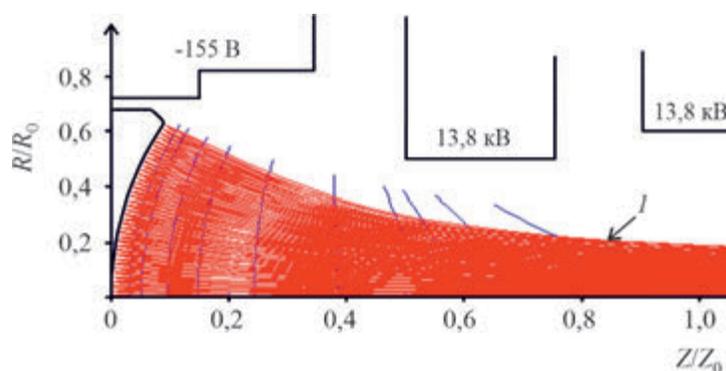


Рис. 6. Траектории частиц (1) и распределение амплитуды магнитного поля (2) в электронной пушке.  $T_c = 950$  °С,  $U_a = 13,8$  кВ,  $I_0 = 1,75$  А без учета влияния начальных тепловых скоростей электронов и  $I_0 = 1,79$  А с учетом влияния начальных тепловых скоростей электронов

Результаты расчетов показали, что ток, рассчитанный с учетом влияния начальных тепловых скоростей электронов, равен 1,79 А, что на 40 мА (2,3 %) больше, чем ток, рассчитанный без такого учета и равный 1,75 А. Рассмотрена фокусировка этого пучка в МПФС (рис. 7). При испытании прибора получено среднее значение тока 1,82 А. Отличие рассчитанного значения тока  $I = 1,79$  А от измеренного при испытании прибора составляет 1,65 %.

Поскольку пучок с током 1,79 А, рассчитанным с учётом влияния начальных тепловых скоростей электронов, имеет при его фокусировке практически такие же амплитуды пульсаций границ трубок тока, как и пучок с током 1,75 А (см. рис. 7, а), рассчитанный без такого учёта, то можно сделать вывод, что малое (2,3 %) отличие значений тока пучка, рассчитанных с учетом и без учета влияния начальных тепловых скоростей электронов на ток пучка, практически не приводит к изменениям пульсаций границы пучка.

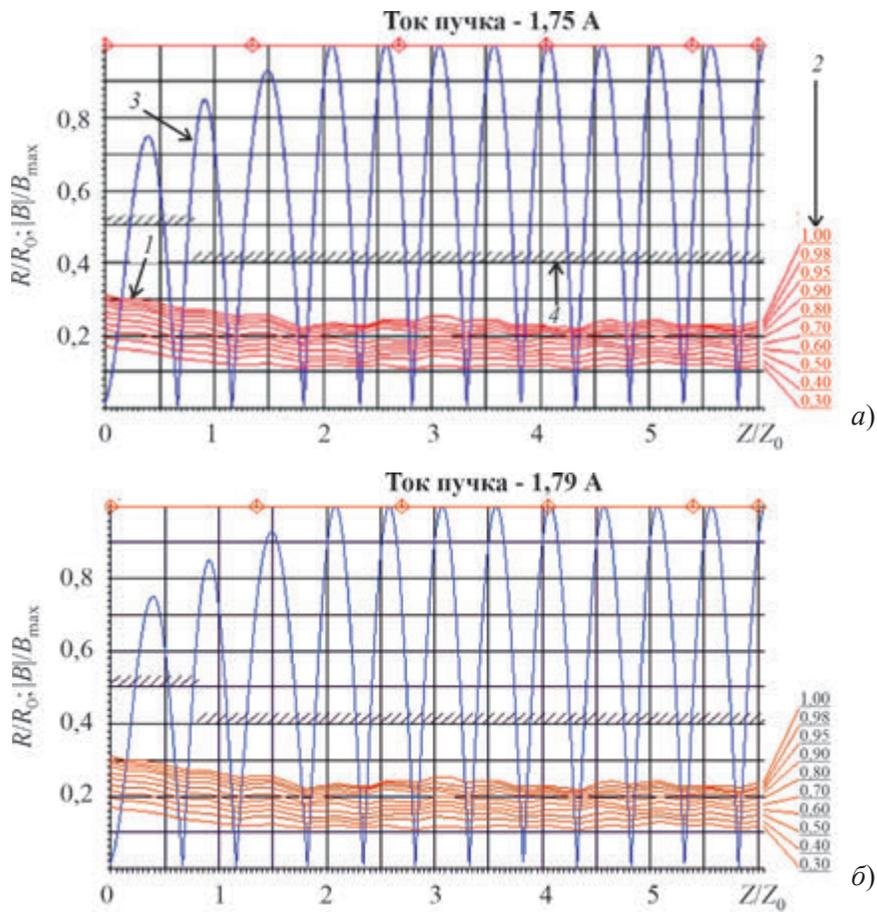


Рис. 7. Транспортировка пучка в магнитном поле МПФС для ЭОС 3: 1 – трубки тока; 2 – доли тока пучка; 3 – магнитное поле, нормированное максимальной величиной поля  $B_{\max}$ ; 4 – пролётный канал

Были рассчитаны зависимости (рис. 8) микропервеанса  $P_{\mu}/P_{\mu 0}$  от потенциала анода  $U$  для  $P_{\mu 0} = 1,0; 0,5$  и  $0,25$  мкА/В<sup>3/2</sup>. В соответствии с (1), при малых напряжениях анода значения микропервеансов  $P_{\mu}$  изменяются сильнее, чем при больших.

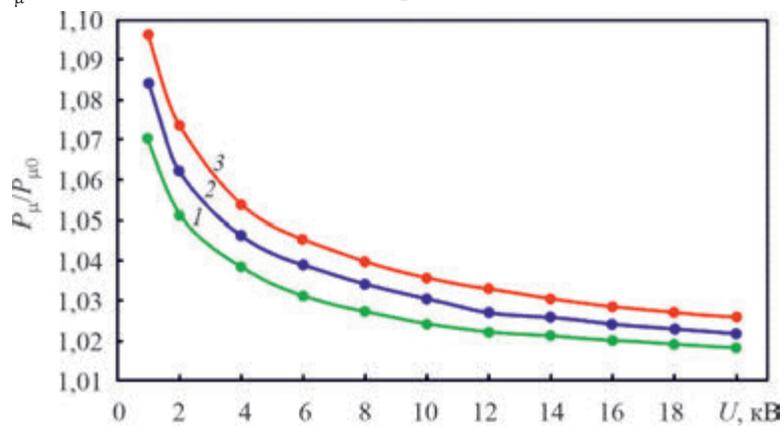


Рис. 8. Зависимости нормированных микропервеансов  $P_{\mu}/P_{\mu 0}$  от напряжения анода: 1 –  $P_{\mu 0} = 1,0$ ; 2 –  $P_{\mu 0} = 0,5$ ; 3 –  $P_{\mu 0} = 0,25$

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что учет начальных тепловых скоростей электронов может приводить к изменению микропервеанса пушки более чем на 4-5 % при ускоряющих напряжениях менее 7 кВ. Связанное с этим увеличение рассчитанного тока соответствует данным испытания приборов, отличаясь от них на 1,1...1,9 %. При увеличении ускоряющих напряжений свыше 7 кВ изменение микропервеанса снижается и становится незначительным.

Увеличение амплитуды пульсаций электронного потока при его транспортировке из-за изменения микропервеанса может составлять 25...30 % и компенсироваться небольшим (2-3 %) изменением амплитуды магнитного поля в переходной области.

Авторы благодарят сотрудника АО «НПП «Исток» им. Шокина» д.ф.-м.н. С. П. Мореву за полезное и конструктивное обсуждение данной статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Программа анализа электронно-оптической системы с многоскоростным пучком / Ю. А. Григорьев, В. Д. Журавлева, С. П. Морев [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1988. – № 3. – С. 71 – 72.
2. Смуллин, Л. Д. Шумы в электронных приборах / Л. Д. Смуллин, Г. А. Хаус. – Москва – Ленинград: Издательство «Энергия», 1964. – С. 27.

*Статья поступила 29 августа 2022 г.*

### === НОВЫЕ КНИГИ ===

**ДОБРИДЕНЬ В. И., УЛАНОВ А. С. Зарубежные комплексы противовоздушной обороны сверхмалой дальности. Анализ построения и возможностей.** Монография / Под ред. П. А. Созинова. – М.: Радиотехника, 2022. – 208 с.

Дан аналитический обзор зарубежных комплексов противовоздушной обороны сверхмалой дальности; рассмотрена возможность применения подобных технических средств в интересах системы ПВО России и подходы к оценке их эффективности.

*Может представлять интерес для специалистов в области разработки средств ПВО, преподавателей, слушателей и курсантов военных учебных заведений.*

# ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.3.049.77.029.64

## УЛУЧШЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИС СВЧ-ДИАПАЗОНА ГЕНЕРАТОРНОГО МОДУЛЯ

**И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Н. А. Фёдоров, Е. В. Медянкova**

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

Представлены результаты, подтверждающие улучшение электрических и массогабаритных характеристик гибридной интегральной схемы (ГИС) генераторного модуля СВЧ-диапазона на коаксиальном диэлектрическом резонаторе за счёт совершенствования конструкции с использованием объёмной (3D) компоновки. Приведены преимущества разновидностей такой конструкции ГИС, результаты численных расчётов и объяснение причин улучшения массогабаритных характеристик.

*КС: многослойная печатная плата, топологический рисунок проводников, металлический корпус, коаксиальный диэлектрический резонатор, паразитные ёмкости и индуктивности, генератор, управляемый напряжением, выборка, углубление, отверстие, диэлектрический слой, спектральная плотность мощности фазовых шумов*

## IMPROVING THE WEIGHT AND SIZE CHARACTERISTICS OF GENERATOR MODULE MICROWAVE HICs

**I. V. Goryunov, V. A. Iovdalskiy, N. A. Fedorov, E. V. Medyankova**

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

Results are presented confirming the improvement in the electrical and weight and size characteristics of a hybrid integrated circuit (HIC) of a microwave generator module based on a coaxial dielectric resonator due to improved design using a three-dimensional (3D) layout. The advantages of such HIC design varieties, the results of numerical calculations and an explanation of the reasons for improving weight and size characteristics are given.

*Keywords: multilayer printed circuit board, topological layout of conductors, metal body, coaxial dielectric resonator, parasitic capacitances and inductances, voltage controlled oscillator, sample, recess, hole, dielectric layer, phase noise power spectral density*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) СВЧ-диапазона специального назначения заставляет разработчиков искать новые пути совершенствования конструкции и технологии их изготовления, а также улучшения их электрических и массогабаритных характеристик.

Гибридно-интегральный конструкторско-технологический вариант устройств модулей СВЧ-диапазона по-прежнему остаётся основным, обладающим универсальностью свойств, для со-

здания и производства большого спектра РЭА этого диапазона. Совершенствованию конструкции гибридных интегральных схем (ГИС) уделяется большое внимание. Отечественные и зарубежные специалисты ещё в 80-х годах прошлого столетия понимали перспективность объёмных (3D) конструкций ГИС [1, 2]. Дальнейшие исследования подтвердили это [3–7].

## 2. ВОЗМОЖНОСТЬ УЛУЧШЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ

Стремление специалистов к улучшению электрических и массогабаритных характеристик заставляет искать новые возможности совершенствования конструкции и технологии разрабатываемых гибридных интегральных модулей СВЧ-диапазона и при этом, опираясь на достигнутый уровень знаний, искать новые технические решения. Это особенно важно в связи с постоянным ростом потребности в бортовых системах РЭА специального назначения.

Решение поставленной задачи следует искать, прежде всего, в реализации перспективных направлениях конструирования ГИС, которые наработаны к настоящему времени, но используются явно недостаточно. Одним из таких направлений является эффективное использование объёма подложек плат, корпусов и других элементов ГИС, которое всё чаще применяется для реализации плотной объёмной компоновки элементов схем [1–5]. Реализация задачи уменьшения габаритов и массы бортовой РЭА становится актуальной и требует серьёзного внимания специалистов.

Результаты анализа конструкций ГИС генераторных модулей СВЧ-диапазона показывают, что аналогичные схемы существуют.

Например, в [6, 7] представлены ГИС генераторных модулей, выполненные в виде многослойной печатной платы (МПП) с топологическим рисунком металлизации проводников по крайней мере на одной из сторон каждого диэлектрического слоя МПП и экранной заземляющей металлизацией на обратной стороне нижнего диэлектрического слоя. Навесные компоненты, в том числе коаксиальный диэлектрический резонатор (КДР), расположены на лицевой стороне верхнего диэлектрического слоя и соединены своими выводами с проводниками его топологического рисунка металлизации. При этом обратная сторона верхнего диэлектрического слоя МПП имеет экранную заземляющую металлизацию на части, занятой схемой обработки СВЧ-сигнала, в том числе генератором, управляемым напряжением (ГУН), с включённым в его схему КДР. МПП установлена и закреплена на дне металлического корпуса, имеющего в своем составе крышку и отверстия в углах для крепления его в аппаратуре.

Недостатками данного технического решения являются высокая спектральная плотность мощности фазовых шумов (СПМФШ), высокая паразитная ёмкость схемы формирования СВЧ-сигнала и низкие массогабаритные характеристики.

Реальная возможность улучшения характеристик приведена в работе [8]. Там путём последовательного совершенствования конструкции ГИС генераторного модуля показана возможность одновременного улучшения и электрических и массогабаритных характеристик.

На рис. 1 представлена конструкция серийно выпускаемого генераторного модуля, сообщение о разработке и описание которого было дано в работе [6].

Анализ этой конструкции показывает наличие ряда недостатков, не позволяющих существенно улучшить характеристики модуля:

- установка КДР на поверхность МПП обуславливает большую длину его вывода, а значит, большие паразитные индуктивность и ёмкость;
- высокая паразитная ёмкость плёночных элементов топологии ГУН;

– большая толщина дна металлического корпуса, обусловленная габаритами применяемых стандартных коаксиальных СВЧ-вводов/выводов энергии (разъёмов).

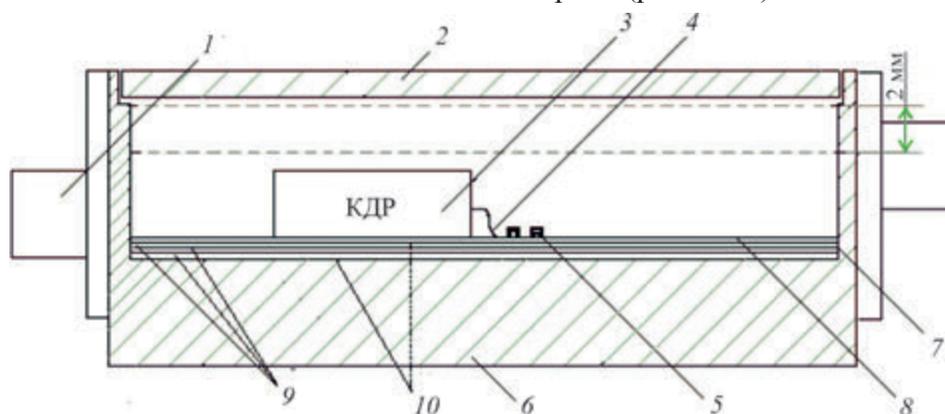


Рис.1. Исходная (№ 0) конструкция генераторного модуля в разрезе:

- 1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН;  
6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации;  
9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация

В последние годы всё чаще при проектировании гибридных интегральных модулей применяется объёмная компоновка навесных компонентов и элементов схем [4, 5]. В связи с этим, например, КДР можно разместить на дне металлического корпуса модуля в отверстии, выполненном в МПП, а ещё лучше в углублении в дне корпуса, глубиной, обеспечивающей расположение выхода КДР непосредственно на плёночный элемент, к которому он присоединяется. Это позволяет сократить длину вывода КДР с 2,5 до 0,25 мм и тем самым уменьшить его паразитные индуктивность и ёмкость, а следовательно, улучшить электрические характеристики модуля. Кроме того, при таком расположении КДР существенно увеличивается расстояние между ним и крышкой корпуса, что дает возможность снизить высоту корпуса на половину высоты КДР (примерно на 2 мм). Такая конструкция представлена на рис. 2.

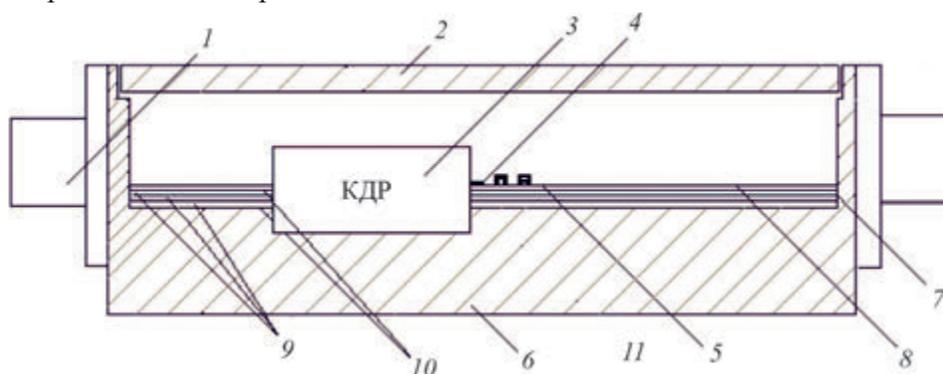


Рис. 2. Конструктивное решение № 1 генераторного модуля в разрезе:

- 1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН;  
6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации;  
9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация

Следующим этапом совершенствования конструкции генераторного модуля является снижение паразитной ёмкости, возникающей между плёночными элементами топологии ГУН, распо-

ложенными на лицевой стороне МПП, и заземляющей экранной металлизацией, расположенной на обратной стороне верхнего диэлектрического слоя МПП. Снижение ёмкости происходит за счёт увеличения расстояния между ее обкладками и замены однослойного диэлектрика ёмкости (конденсатора) на двухслойный. Осуществляется это путем удаления экранной заземляющей металлизации с обратной стороны верхнего слоя диэлектрика МПП и выполнения выборки под диэлектриком верхнего слоя МПП на всю оставшуюся толщину платы под всей топологией ГУН. В результате одновременно с улучшением электрических характеристик уменьшается масса МПП, улучшаются массогабаритные характеристики. Таким образом, диэлектрик паразитной ёмкости плёночных элементов топологии стал двухслойным, состоящим из диэлектрика верхнего слоя МПП и воздуха, заполняющего выборку в плате. Второй обкладкой такой ёмкости становится дно металлического корпуса после установки туда МПП. Конструктивно-технологический вариант такого модуля представлен на рис. 3.

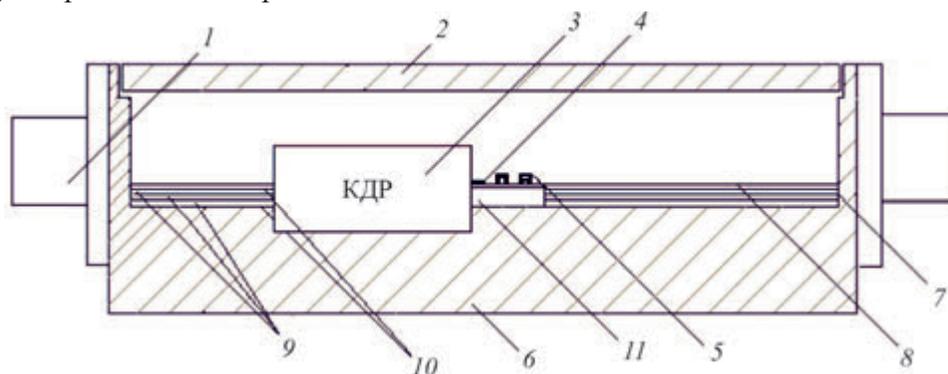


Рис. 3. Конструктивное решение № 2 генераторного модуля в разрезе:

1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН; 6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации; 9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация; 11 – выборка в плате (1 мм)

Дальнейшее снижение паразитной ёмкости плёночных элементов топологии может быть достигнуто путём выполнения углубления в дне корпуса под ГУН, при этом также уменьшается масса модуля и улучшаются массогабаритные характеристики. Конструктивно-технологический вариант такого модуля представлен на рис. 4.

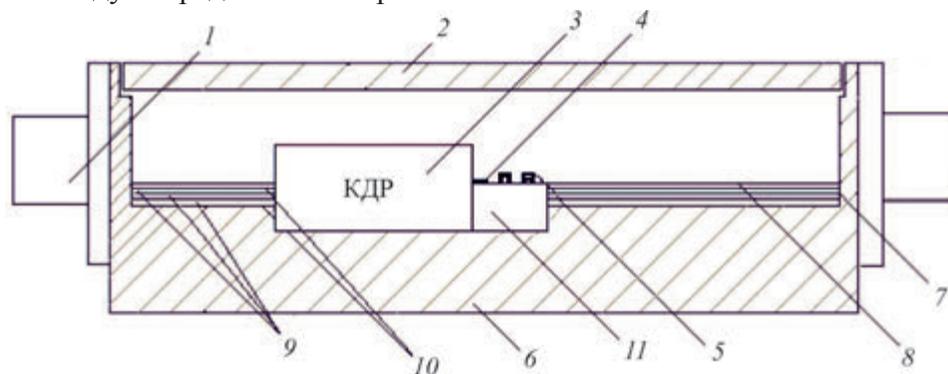


Рис. 4. Конструктивное решение № 3 генераторного модуля в разрезе:

1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН; 6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации; 9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация; 11 – выборка в плате и углубление в дне корпуса на 1 мм

При этом размер углубления в дне металлического корпуса и выступа на внешней стороне дна корпуса может быть оптимизирован, исходя из желаемого соотношения совокупности улучшения электрических и массогабаритных характеристик [6]. Так, для конструктивных решений № 4...6 углубление в дне корпуса соответственно составляет 2...4 мм (рис. 5...7).

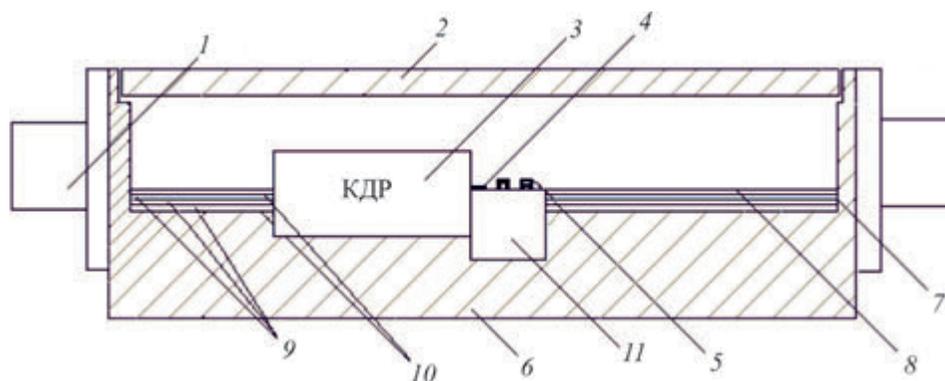


Рис. 5. Конструктивное решение № 4 генераторного модуля в разрезе:

1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН;  
6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации;  
9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация; 11 – выборка в плате и углубление в дне корпуса на 2 мм

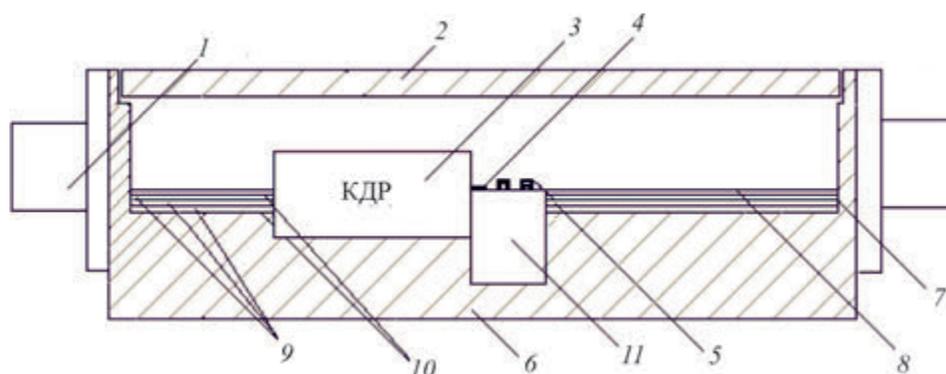


Рис. 6. Конструктивное решение № 5 генераторного модуля в разрезе:

1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН;  
6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации;  
9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация; 11 – выборка в плате и углубление в дне корпуса на 3 мм

Очередным этапом модернизации конструкции генераторного модуля является оптимизация локальной толщины дна корпуса модуля. Решением этой проблемы могло быть использование СВЧ-вводов/выводов энергии с размерами, которые бы не требовали увеличения площади боковой поверхности для их установки. Увеличение толщины корпуса для выравнивания под размер СВЧ-вводов/выводов энергии за счёт увеличения толщины дна до 5 мм, использованное в разработанном варианте конструкции модуля, явно не является удачным решением, поскольку значительно увеличивает массу модуля. Однако применение стандартных, имеющихся в наличии

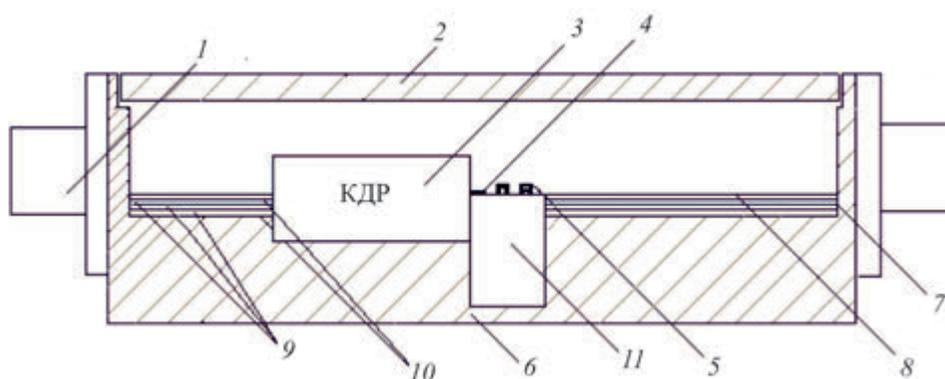


Рис. 7. Конструктивное решение № 6 генераторного модуля в разрезе:

1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН;  
6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации;  
9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация; 11 – выборка  
в плате и углубление в дне корпуса на 4 мм

типов СВЧ-вводов/выводов энергии тоже имеет свои преимущества, и их применение понятно и оправдано. Тем не менее, вариант конструкции с сохранением размеров корпуса в местах крепления СВЧ-вводов/выводов энергии, удобных для их крепления, не исключает утонение толщины дна корпуса в остальных местах (рис. 8, 9).

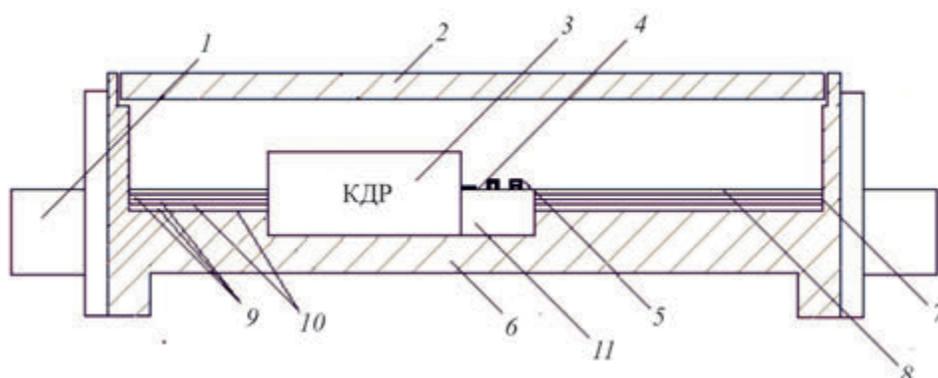


Рис. 8. Конструктивное решение № 7 генераторного модуля в разрезе:

1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН;  
6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации;  
9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация; 11 – выборка  
в плате и углубление в дне корпуса на 1 мм с учетом выреза металла во внешней стороне  
дна корпуса

Таким образом, выбор необходимой толщины дна корпуса связан с выбором глубины углубления в нем с внутренней стороны под ГУН, сохранением толщины дна, необходимой для обеспечения герметичности и возможности выполнения выступа на внешней поверхности дна в месте углубления с внутренней стороны.

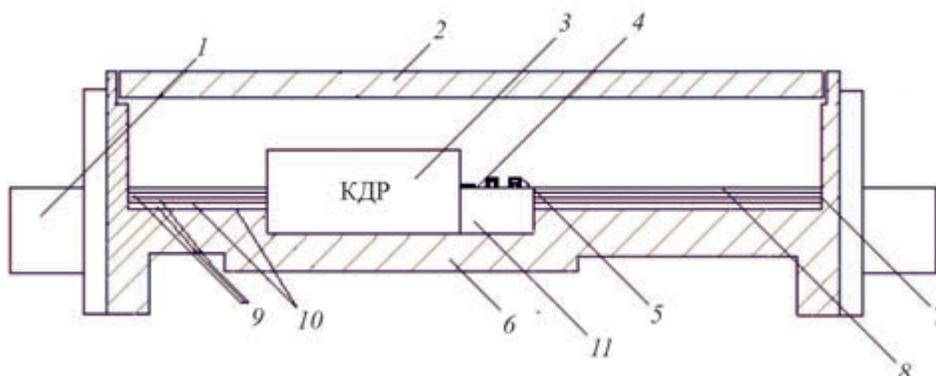


Рис. 9. Конструктивное решение № 8 генераторного модуля в разрезе:

1 – СВЧ-ввод/вывод энергии; 2 – крышка модуля; 3 – КДР; 4 – вывод КДР; 5 – ГУН;  
 6 – металлический корпус (его дно); 7 – МПП; 8 – топологический рисунок металлизации;  
 9 – диэлектрические слои МПП; 10 – экранная заземляющая металлизация; 11 – выборка  
 в плате и углубление в дне корпуса на 1 мм с учетом выреза металла во внешней стороне  
 дна корпуса

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРНОГО МОДУЛЯ

Нетрудно заметить, что процесс совершенствования конструкции связан с использованием объёма различных составных частей модуля. При этом каждый шаг в этом направлении по-разному влияет на габариты и массу генераторного модуля. Характерно, что каждый шаг усиливает эффект предыдущих изменений.

В данном разделе проведено исследование изменения массогабаритных характеристик генераторного модуля в процессе совершенствования конструкции.

Поскольку все стадии модернизации генераторного модуля сопровождались изменением массогабаритных характеристик, расчётным методом проведена оценка изменения геометрии и массы.

### Расчет изначального конструктивного варианта

Расчеты были произведены на основе рис.1. Как известно, объём геометрической фигуры определяется из выражения  $V = a \cdot b \cdot h$ , где  $a$  – длина;  $b$  – ширина;  $h$  – высота.

Объём корпуса:

$$V_{\text{корп}} = 4,8 \cdot 3,8 \cdot 1,25 = 22,8 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Объём воздуха в корпусе:

$$V_{\text{в.корп}} = 2,8 \cdot 4,2 \cdot 1,25 = 14,7 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Общий объём корпуса и воздуха до изменений:

$$V_{\text{об}} = 22,8 + 14,7 = 37,5 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Изначальная масса модуля  $m_0 = 50$  г.

### Расчет конструктивного варианта № 1

За счет того что КДР установлен в отверстии в МПП и углублении в дне корпуса на половину своей высоты, т. е. на 2 мм (см. рис. 2), на такую же высоту уменьшилась и высота модуля (рис. 10).

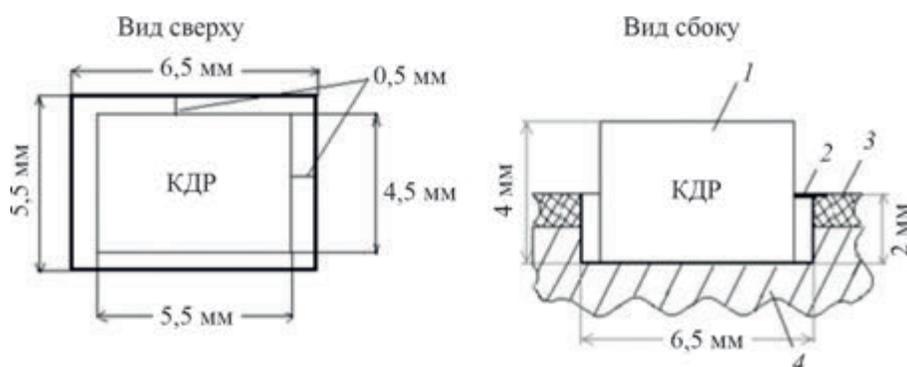


Рис. 10. Расположение КДР в отверстии МПП и углублении в дне корпуса:  
1 – КДР; 2 – коаксиальный вывод КДР; 3 – МПП; 4 – дно корпуса

Конфигурация удаляемого фрагмента корпуса представлена на рис. 11.

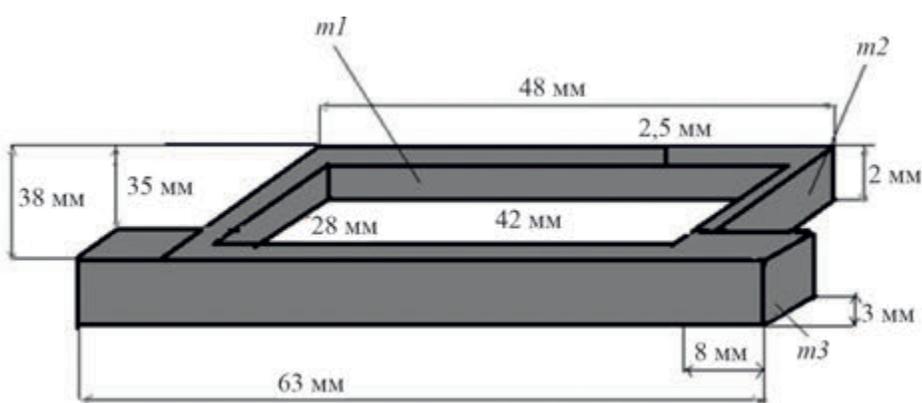


Рис. 11. Фрагмент удаляемой части корпуса и его размеры

Объем воздуха в корпусе после уменьшения высоты на 2 мм:

$$V_{\text{в.корп}} = 2,8 \cdot 4,2 \cdot 0,2 = 2,352 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Объем лапок с уменьшением на 2 мм:

$$2 \cdot V_{\text{л}(m3)} = 2 \cdot (0,8 \cdot 0,3 \cdot 0,2) = 0,096 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Объем сторон основного вида (вид спереди и вид сзади) корпуса с уменьшением на 2 мм:

$$2 \cdot V_{\text{ст.осн}(m1)} = 2 \cdot (4,7 \cdot 0,25 \cdot 0,2) = 0,47 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Объем сторон вида слева и справа корпуса с уменьшением на 2 мм:

$$2 \cdot V_{\text{ст.бок}(m2)} = 2 \cdot (3,5 \cdot 0,25 \cdot 0,2) = 0,35 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Общий объем воздуха в корпусе, лапок корпуса, вида спереди и сзади, вида с боков:

$$V_{\text{об}} = 2,352 + 0,096 + 0,47 + 0,35 = 3,268 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Зная объем корпуса и плотность вещества, из которого корпус изготовлен (плотность АМГб равна  $2,64 \text{ г/см}^3$ ), можно узнать массу:  $m = V \cdot \rho$ , где  $V$  – объем;  $\rho$  – плотность.

Масса модуля, изготовленного из АМГб:

$$m_{\text{мод}} = (0,096 + 0,47 + 0,35) \cdot 2,64 = 2,42 \text{ (г)}.$$

По рис. 2 можно узнать массу вырезки под отверстие в плате. Плотность вещества платы  $\rho = 3,3 \text{ г/см}^3$  (фирма Rogers). Зная это, находится масса вырезки 4 в плате:

$$m_{\text{угл.пл}} = (0,65 \cdot 0,55 \cdot 0,1) \cdot 3,3 = 0,12 \text{ (г)}.$$

При расчетах массы углубления в дне корпуса руководствуются также рис.10. Получается:

$$m_{\text{угл.корп}} = V \cdot \rho = (0,65 \cdot 0,55 \cdot 0,1) \cdot 2,64 = 0,1 \text{ (г)}.$$

Окончательная масса конструктивного варианта № 1:

$$m_{\text{мод1}} = m_0 - m_{\text{мод}} - m_{\text{угл.пл}} - m_{\text{угл.корп}} = 50 - 2,42 - 0,12 - 0,1 = 47,36 \text{ (г)}.$$

### Расчет конструктивного варианта № 2

Затем в МПП, под ГУН, была изготовлена выборка путем удаления фрагмента подложки и металла корпуса.

$m_{\text{выб}}$  – это масса выборки в плате. По высоте эти слои равны 1 мм, но в расчете уделяется внимание диэлектрическому слою, экранному заземлению и металлизации, следовательно, высота равна 0,75 мм.

Расчеты для рис. 3:

$$m_{\text{выб}} = (1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,075) \cdot 3,3 = 0,33 \text{ (г)}.$$

$$m_{\text{мод2}} = m_{\text{мод1}} - m_{\text{выб}} = 47,33 - 0,33 = 46,67 \text{ (г)}.$$

### Расчет конструктивного варианта № 3

Описывается масса модуля с выборкой 3 мм в дне корпуса, который изображен на рис. 4.

Согласно общему чертежу,  $V_{\text{пл}} = 4,2 \cdot 4,3 \cdot 0,1 = 1,344 \text{ (см}^3\text{)}$ .

Рассматривается выборка с увеличением отверстия на 1 мм в дне металла:

$$m_{\text{выб.дна}} = V \cdot \rho = (1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,1) \cdot 2,64 = 0,35 \text{ (г)}.$$

Расчеты для рис. 4:

$$m_{\text{мод3}} = m_{\text{мод2}} - m_{\text{выб.дна}} = 46,67 - 0,35 = 46,32 \text{ (г)}.$$

### Расчет конструктивного варианта № 4

Теперь, с увеличением выборки, из общей массы необходимо вычитать 0,35 г для выборки в дне металла в 2, 3 и 4 мм.

Описывается масса модуля с выборкой 2 мм в дне корпуса, который изображен на рис. 5:

$$m_{\text{мод4}} = m_{\text{мод3}} - m_{\text{выб.дна}} = 46,32 - 0,35 = 45,97 \text{ (г)}.$$

### Расчет конструктивного варианта № 5

Описывается масса модуля с выборкой 3 мм в дне корпуса (см. рис. 6):

$$m_{\text{мод5}} = m_{\text{мод4}} - m_{\text{выб.дна}} = 45,97 - 0,35 = 45,62 \text{ (г)}.$$

### Расчет конструктивного варианта № 6

Описывается масса модуля с выборкой 4 мм в дне корпуса (см. рис. 7):

$$m_{\text{мод6}} = m_{\text{мод5}} - m_{\text{выб.дна}} = 45,62 - 0,35 = 45,27 \text{ (г)}.$$

### Расчет конструктивного варианта № 7

$$V_{\text{выреза}} = 0,2 \cdot 4,06 \cdot 3,67 = 2,982 \text{ (см}^3\text{)}.$$

$$V_{\text{оставшийся}} = 37,5 - 3,268 - 2,982 = 31,25 \text{ (см}^3\text{)}, \text{ т. е. объем снизился на 16,7 \%}$$

Масса получившегося корпуса имеет следующие параметры: ширина – 3,67 см, длина – 4,06 см и высота – 0,2 см.

$$m_{\text{выреза}} = 2,64 \cdot (0,2 \cdot 4,06 \cdot 3,67) = 7,8 \text{ (г)}.$$

Так как наиболее оптимальным конструктивным вариантом является конструктивный вариант № 3 (см. рис. 4),

$$m_{\text{мод7}} = m_{\text{мод6}} \cdot m_{\text{выреза}} = 46,32 \cdot 7,8 = 38,45 \text{ (г)}.$$

Масса модуля снизилась на 23 %.

### Расчет конструктивного варианта № 8

Рассматриваемый модуль (см. рис. 9) имеет длину 4,06 см и ширину 3,67 см. Зная длину КДР, ГУН, длину лапок и двух вырезов (по 2 мм), можно найти длины вырезов. Если разделить длину модуля пополам, можно составить два уравнения:

$$\begin{cases} 0,8 + 0,2 + 0,65 + x_1 = 2,3, \\ 1,2 + 0,2 + 0,8 + x_2 = 2,3. \end{cases}$$

Длина левого выреза  $x_1 = 0,1$  см, длина правого выреза  $x_2 = 0,65$  см.

$$\text{Масса первого выреза } m_{\text{выреза1}} = 2,64 \cdot (0,1 \cdot 3,67 \cdot 0,3) = 0,29 \text{ (г)}.$$

$$\text{Масса второго выреза } m_{\text{выреза2}} = 2,64 \cdot (0,65 \cdot 3,67 \cdot 0,3) = 1,89 \text{ (г)}.$$

$$m_{\text{мод8}} = m_{\text{мод7}} - m_{\text{выреза1}} - m_{\text{выреза2}} = 38,45 - 0,29 - 1,89 = 36,27 \text{ (г)}.$$

Масса модуля снизилась на 27,46 %.

Результаты расчёта массы модуля и ее изменения относительно изначального варианта для различных вариантов конструкции представлены в таблице и на диаграммах (рис. 12).

Номер конструкции	Причины изменения массы	Масса модуля, г	Масса модуля относительно изначального варианта, %
0	Изначальный вариант без изменений	50	100
1	Снижение высоты корпуса на 2 мм, отверстие в МПП под КДР и углубление в дне корпуса	47,36	94,72
2	Выборка 0,75 мм в подложке под ГУН	46,67	93,34
3	Углубление на 1 мм в дне корпуса под ГУН	46,32	92,64
4	Углубление на 2 мм в дне корпуса под ГУН	45,97	91,94
5	Углубление на 3 мм в дне корпуса под ГУН	45,62	91,24
6	Углубление на 4 мм в дне корпуса под ГУН	45,27	90,54
7	Утонение дна модуля	38,45	76,90
8	Локальное уменьшение толщины дна (выступ)	36,27	72,54

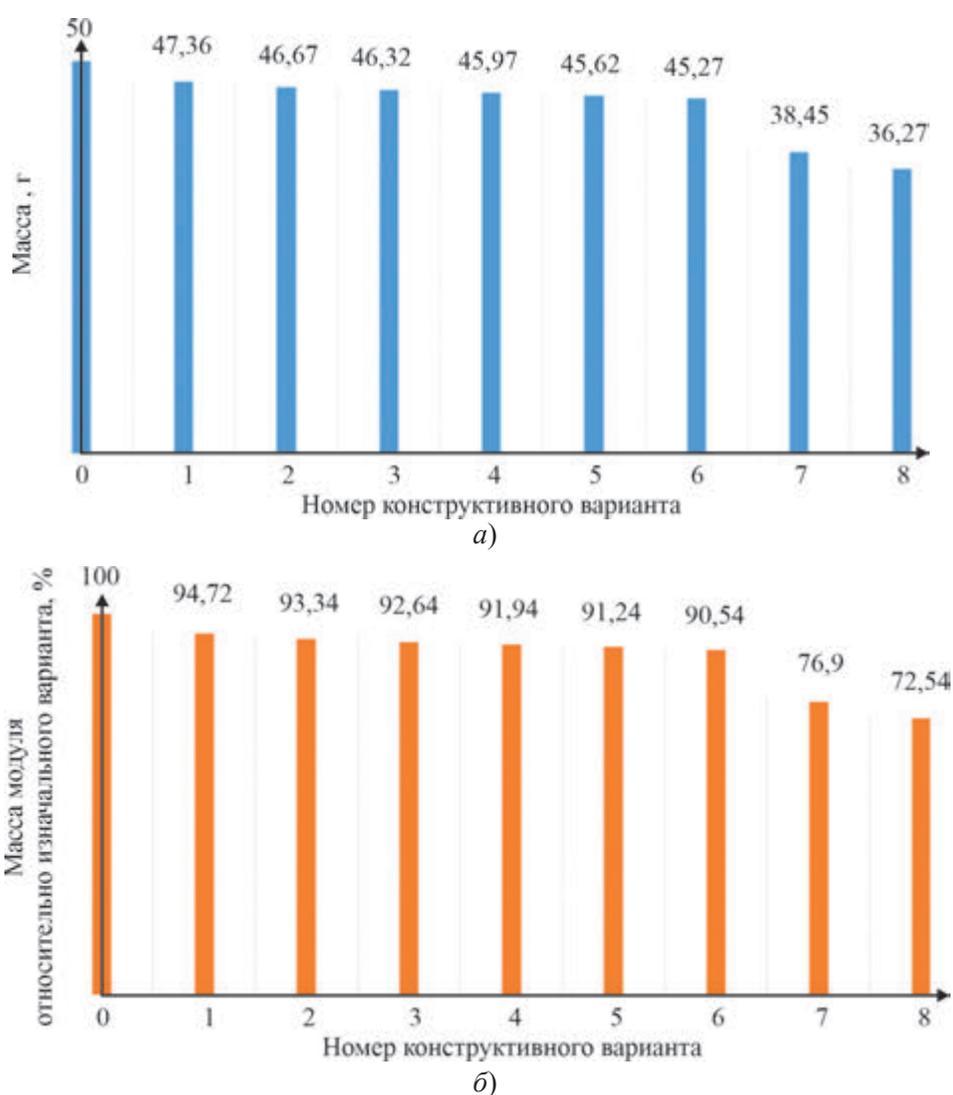


Рис. 12. Диаграммы зависимости массы от варианта конструкторского исполнения

Таким образом, масса модуля может быть уменьшена на 27,46 % (на 13,73 г) за счет модернизации конструкции модуля. Улучшение массогабаритных характеристик является одним из важных параметров для бортовых, космических и других РЭА.

### 3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГЕНЕРАТОРНОГО МОДУЛЯ

Анализ показывает, что в результате поэтапного изменения конструкции постепенно улучшаются электрические и массогабаритные характеристики генераторного модуля. Причём выбор поэтапного изменения конструкции и исследование влияния каждого из них позволяют качественно и количественно оценить эффективность каждого этапа. В частности:

1. Размещение КДР в отверстиях в МПП и в углублении, выполненном в дне корпуса, позволило значительно (примерно на порядок) сократить длину вывода КДР, за счет этого снизить его паразитные индуктивность и ёмкость и тем самым снизить СПМФШ на 1,75 дБ/Гц, т. е. улуч-

шить электрические характеристики. Кроме того, дало возможность уменьшить толщину модуля на 2 мм, тем самым уменьшить массу на 6 %, а значит, улучшить массогабаритные характеристики.

2. Изменение конструкции МПП путем выполнением выборки под верхним диэлектрическим слоем позволило снизить паразитную ёмкость плёночных элементов топологического рисунка ГУН и тем самым улучшить электрические характеристики за счёт снижения СПМФШ до -108 дБ/Гц.

3. Выполнение углубления в дне металлического корпуса генераторного модуля позволило дополнительно уменьшить паразитную ёмкость плёночных элементов топологического рисунка ГУН и тем самым улучшить электрические характеристики за счёт снижения СПМФШ до -109 дБ/Гц.

4. Локальное уменьшение толщины дна металлического корпуса генераторного модуля, хотя и несколько ограничивает глубину углубления в дне корпуса, но зато на 27,5 % позволяет снизить массу модуля, а значит, существенно улучшить массогабаритные характеристики.

Исходя из анализа достигнутых результатов улучшения электрических и массогабаритных характеристик, а также оценки эффективности изменения конструкции, целесообразно перейти к оптимизации конструкции.

Несомненно, эффективным является расположение КДР в отверстии в МПП и в углублении в дне корпуса глубиной 1 мм для выравнивания расположения вывода КДР и плёночного проводника, к которому вывод присоединяется.

При этом следует отметить, что выравнивание толщины модуля под габариты используемых СВЧ-вводов/выводов энергии и связанное с этим применение толщины дна корпуса 5 мм не является обоснованным.

Снижение толщины дна корпуса по меньшей мере на 2 мм, т. е. до 3 мм, позволяет изготавливать углубление в дне корпуса размером 1 мм и эффективно использовать такую конструкцию для получения высоких электрических характеристик. Кроме того, к данному углублению в дне корпуса примыкает углубление для размещения КДР такого же размера, что позволяет выполнять их совместно, как одно фигурное углубление, и облегчает его изготовление. Конфигурация выступа на внешней стороне дна учитывает этот факт, но снижает толщину дна до 2 мм. Если такой толщины достаточно, то масса модуля может быть снижена на 27,5 %.

Именно такой конструктивный вариант (№ 7) может быть рекомендован как оптимальный, а в настоящее время он уже внедрен в серийное производство гибридного генераторного модуля СВЧ-диапазона.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан ряд конструкторско-технологических решений, направленных на улучшение электрических и массогабаритных параметров гибридного интегрального генераторного модуля.

Проведены исследования эффективности различных конструктивно-технологических решений, а также анализ результатов исследования.

Создан объёмный (3D) гибридный интегральный генераторный модуль с улучшенными электрическими и массогабаритными характеристиками за счёт использования объёма и материала МПП и металлического корпуса для расположения компонентов и создания элементов схемы.

Данное техническое решение обладает мировой новизной, изобретательским уровнем и промышленной применимостью и, в связи с этим, на него получен патент РФ на изобретение [8].

Результаты полученных научных исследований использованы при разработке (модернизации) опорного генератора Ф1800 и внедрены в серийное производство.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Волков, А. В.** Технология и конструкторско-технологические решения для реализации объёмных интегральных модулей: учебное пособие / А. В. Волков, А. В. Заводян, А. А. Яшин. – М.: МИЭТ, 1992. – 83 с.
2. **Патент № 2109274 РФ.** Устройство для измерения электрических параметров среды; приоритет 30.09.94; регистрация в Гос. реестре 20.09.03 / В. И. Гвоздев, В. А. Иовдальский, А. А. Линёв, С. И. Подковырин.
3. **Иовдальский, В. А.** Измеритель диэлектрических характеристик жидкостей на основе микрополоскового датчика / В. А. Иовдальский, И. М. Олихов, С. П. Прокофьева / Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2002. – Вып. 2 (480). – С.18 – 23.
4. **Иовдальский, В. А.** Размещение элементов и компонентов ГИС СВЧ-диапазона в подложке МПП: учебное пособие / В. А. Иовдальский; под ред. А. А. Борисова. – М.: «КУРС», 2018. – 190 с.
5. **Кондрашин, А. А.** Современные технологии изготовления трёхмерных электронных устройств: учебное пособие / А. А. Кондрашин, А. Н. Лямин, В. В. Слепцов. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2019. – 210 с.
6. **Баронов, А. А.** Особенности проектирования гетеродина с петлёй ФАПЧ  $K_u$ -диапазона / А. А. Баронов, В. А. Шадский // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 2015. – Вып. 4 (160). – С. 18 – 22.
7. Малогабаритный опорный СВЧ-генератор на коаксиальном резонаторе / С. А. Самохин, И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 2 (541). – С. 58 – 66.
8. **Патент №2750860 РФ. МПК Н 01 L 21/00, 23/00.** Гибридная интегральная схема СВЧ-диапазона; приоритет 21.09.2020 / С. А. Самохин, И. В. Горюнов, В. А. Иовдальский, Е. В. Терёшкин.

Статья поступила 29 августа 2022 г.

УДК 621.315.592

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБРАЩЕННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С ДОНОРНО-АКЦЕПТОРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ И ЦИФРОВЫМИ БАРЬЕРАМИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Е. В. Терешкин

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

Проведен анализ перспективных типов гетероструктур для транзисторов, способных работать в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Проанализированы особенности формирования входной ёмкости и крутизны в обычных транзисторах и транзисторах на гетероструктурах в зависимости от типа гетероструктуры. Представлены результаты исследования обращённых гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами на основе AIAs. В зависимости от параметров структур проанализированы особенности локализации электронов в квантовой яме таких структур и связанные с этим особенности нелокального транспорта электронов. Проведён анализ паразитного канала проводимости в области донорного легирования. Представлены результаты оптимизации структур и оценены перспективы их применения в мм-диапазоне длин волн.

*КС: дополнительные потенциальные барьеры, полевой транзистор, локализация электронов, коэффициент усиления, обращённая гетероструктура*

## PROSPECTS FOR THE USE OF INVERTED HETEROSTRUCTURES WITH DONOR-ACCEPTOR DOPING AND DIGITAL BARRIERS IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

E. V. Tereshkin

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

The analysis of promising types of heterostructures for transistors capable of operating in the millimeter and submillimeter wavelength ranges is carried out. The features of the formation of input capacitance and transconductance in conventional transistors and transistors on heterostructures are analyzed, depending on the type of heterostructure. The results of a study of inverted heterostructures with donor-acceptor doping and additional digital potential barriers based on AIAs are presented. Depending on the parameters of the structures, the features of electron localization in the quantum well of such structures and the associated features of nonlocal electron transport are analyzed. The parasitic conduction channel in the area of donor doping has been analyzed. The results of optimization of structures are presented and the prospects of their application in the mm wavelength range are evaluated.

*Keywords: additional potential barriers, field-effect transistor, electron localization, gain, inverted heterostructure*

### I. ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост потоков информации требует увеличения пропускной способности каналов связи и соответственно увеличения рабочих частот приёма и передачи. В настоящее время активно разрабатывается стандарт связи 6G, являющийся будущим мобильных сетевых технологий, которые должны иметь уникальные характеристики: скорость передачи данных выше 1 Гбит/с, рабочие частоты в районе 300 ГГц, обеспечивающие высокое качество видеосвязи, мультимедий-

ное потоковое вещание высокого разрешения, HDTV и т. д., что делает эти технологии отличными от всех ныне существующих мобильных технологий. Начавшаяся революция в коммуникационных системах способствует разработке транзисторов и интегральных схем мм-диапазона. Жесткие ограничения по размеру, энергопотреблению, стоимости устройств требуют достаточно мощных, долговечных и, желательно, дешёвых усилителей мощности, способных работать на столь высоких частотах. Это в свою очередь накладывает очень жёсткие требования на используемые в этих усилителях транзисторы.

Транзистор не должен иметь затвор менее 0,05 мкм, ввиду резкого увеличения его стоимости с дальнейшим уменьшением длины затвора. При этом он должен иметь выходную мощность на уровне десятков милливатт, а значит, достаточно высокую поверхностную плотность электронов и высокие пробивные напряжения. С другой стороны, для уменьшения размеров и упрощения схемы, а соответственно уменьшения стоимости, при таком длинном затворе транзистор должен иметь достаточно высокий коэффициент усиления, а значит, высокую подвижность как холодных, так и горячих электронов.

Если комплексно рассматривать этот вопрос, то для решения подобных проблем лучше всего подходят транзисторы с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) на основе гетероструктур группы полупроводников  $A^{III}B^V$  с двумерным электронным газом (ДЭГ), ввиду широкого диапазона их рабочих частот, высокой выходной мощности, эффективности и линейности [1, 2]. Однако ни один из разработанных на настоящее время приборов не отвечает приведённому выше комплекту требований.

На более низких частотах продвижение мощных полупроводниковых приборов в миллиметровый диапазон длин волн в основном связано с совершенствованием эпитаксиальных технологий нитрида галлия. НЕМТ на основе GaN являются неоспоримыми лидерами среди высокоомощных транзисторов в диапазоне от 3 см до нескольких миллиметров [3–6]. Главными преимуществами этих транзисторов являются высокая удельная мощность и высокое напряжение пробоя, а также сравнимые с GaAs-транзисторами показатели коэффициента усиления и коэффициента шума. Однако в настоящее время промышленное применение таких приборов на частотах заметно выше 100 ГГц как с теоретической [7], так и с практической точки зрения [6] пока выглядит достаточно проблематичным. А на текущий момент из-за принципиальных ограничений GaN НЕМТ сравнимы с GaAs-транзисторами только на частотах порядка 150 ГГц [2]. Более того [8], велика вероятность, что данные приборы в промышленном исполнении без использования принципиально новых технических решений дошли до своих предельных рабочих частот.

Таким образом, для частот порядка 300 ГГц они явно не отвечают нужным требованиям.

Поэтому при изготовлении полевых транзисторов и усилителей на их основе для работы на длинах волн менее 2 мм в основном используются гетероструктуры на основе метаморфных и фосфид-индиевых подложек [1, 9–13] с узкозонным каналом на основе  $In_xGa_{1-x}As$ , с молярным содержанием In  $x = 0,8$  и выше. По усилительным характеристикам транзисторы на таких структурах в настоящее время не имеют конкурентов, однако узкая запрещённая зона канала приводит к низким пробивным напряжениям, а соответственно малым удельным выходным мощностям.

Если без использования принципиально новых подходов дальнейшее продвижение вверх по рабочим частотам GaN-транзисторов выглядит достаточно проблематичным [6–8], то для приборов на арсенидгаллиевых и фосфид-индиевых подложках есть два принципиальных

способа улучшения СВЧ-характеристик: использование донорно-акцепторного легирования и введение по краям узкозонного канала гетероструктуры цифровых барьеров.

Донорно-акцепторное легирование [14] позволило резко увеличить выходную мощность транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур и существенно продвинуться вверх по частотному диапазону [15–17]. Основано оно на использовании нового типа гетероструктур со вспомогательными слоями, легированными акцепторами, которые расположены позади донорных дельта-слоев по обе стороны от InGaAs-канала (DA-DpHEMT). Сформированные таким образом области пространственного заряда создают высокие и резкие потенциальные барьеры, вплоть до 1 эВ, вокруг канала транзистора (рис.1), что увеличивает локализацию электронов и их дрейфовую скорость [18–20].

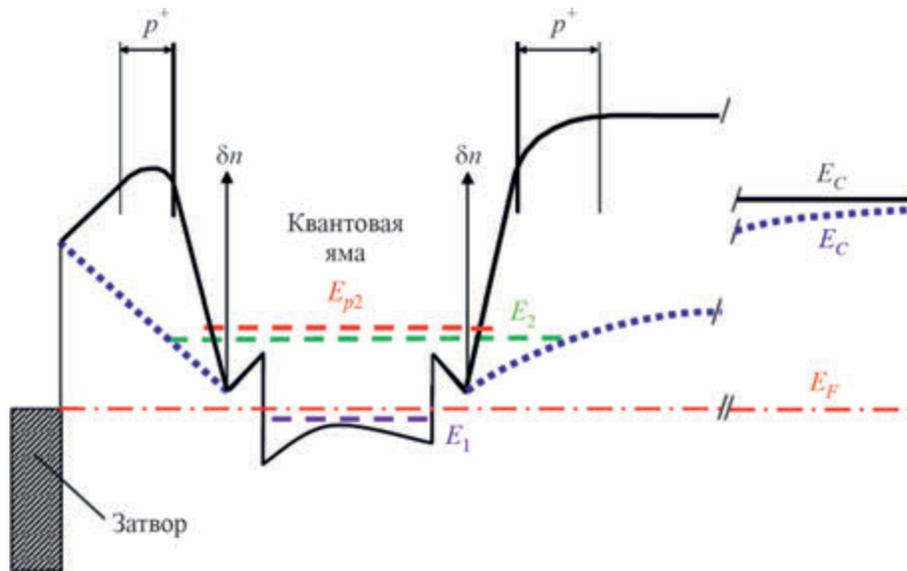


Рис.1. Схематическое представление зонной диаграммы DA-DpHEMT-гетероструктуры. Показаны положения слоев с легированием донорами и акцепторами

Использование цифровых барьеров предполагает введение по краям узкозонного канала решёток из тонких (толщиной всего несколько атомных слоёв) барьеров AlAs (рис. 2).

Такие барьеры совместно с донорно-акцепторным легированием локализуют горячие электроны в канале гораздо эффективнее, чем обычные гетеропереходы на основе тройных соединений с той же или даже большей мольной долей алюминия [21, 22]. Сильная локализация электронов в канале и появление специфических состояний, на которые не переходят электроны, локализованные в сверхрешётках по краям канала, приводят к тому, что всплеск дрейфовой скорости электронов в таких гетероструктурах приближается к величине всплеска в чистом объёмном узкозонном материале канала. Следует отметить, что близкая идея позволила существенно увеличить подвижность электронов в традиционных гетероструктурах [23].

Цифровые барьеры позволяют сделать ещё один шаг к дальнейшему увеличению рабочих частот транзисторов – уменьшить расстояние затвор – канал за счет использования обращенных гетероструктур [24].

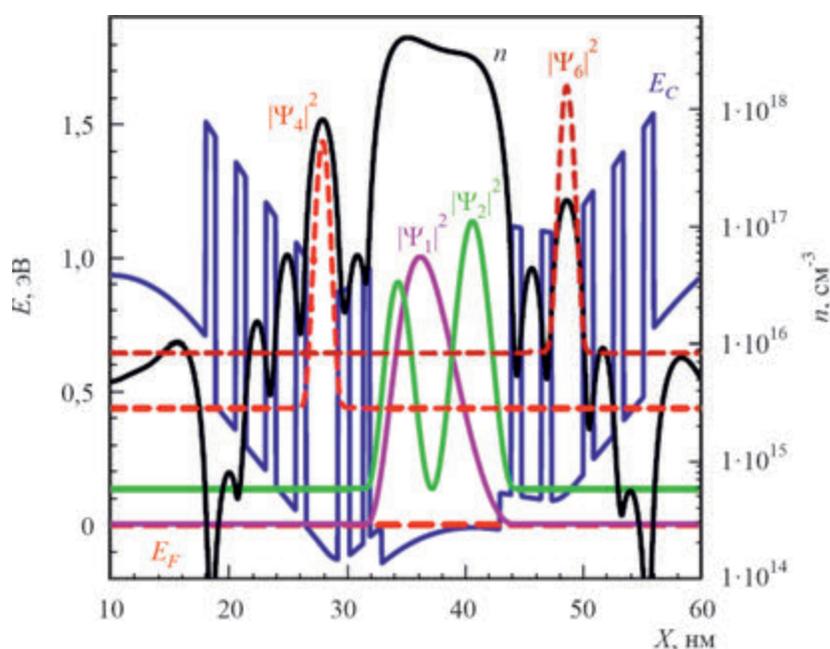


Рис. 2. Зонные диаграммы распределения концентрации электронов и их волновые функции для структуры с донорно-акцепторным легированием и дополнительными потенциальными барьерами при температуре электронного газа 1500 К (волновые функции третьего и пятого уровней локализованы в яме, их квадраты модулей не показаны, чтобы не загромождать рисунок)

## 2. ПРОСТЕЙШИЕ ОЦЕНКИ

При работе в мм-диапазоне длин волн, из-за малой ширины «пальцев» затвора резко возрастает роль паразитных элементов. Для компенсации их влияния транзистор должен иметь как можно большую крутизну, точнее внутреннюю крутизну, определяемую для идеального прибора без паразитных сопротивлений истока и стока.

Как было неоднократно показано, например в [25, 26], крутизна ВАХ исток – затвор, как и входная ёмкость транзистора, обратно пропорциональна расстоянию от затвора до канала. Само по себе уменьшение этого расстояния не увеличивает рабочие частоты прибора (отношение крутизны и входной ёмкости при прочих равных условиях остаётся постоянным). Однако рост крутизны существенно снижает роль паразитных элементов, что в результате приводит к существенному улучшению характеристик. Именно поэтому в транзисторах мм-диапазона длин волн крутизну стараются сделать максимально большой [2].

Физический смысл обратной пропорциональности входной ёмкости и крутизны транзистора расстоянию от затвора до края обеднённой области состоит в том, что изменение числа носителей в канале обусловлено именно изменением ширины канала в вертикальном направлении, как раз и определяемым изменением ширины обеднённой области под затвором, а скорость изменения как раз обратно пропорциональна расстоянию до затвора.

Очевидно, что для увеличения крутизны в транзисторах надо делать расстояние от затвора до канала как можно меньше. Это правило полностью справедливо и в отношении гетероструктурных транзисторов, и весь мир им широко пользуется. Однако, в отличие от гомоструктурных приборов,

в НЕМТ механизм изменения числа носителей заряда в канале совершенно другой. С учетом как малых расстояний от затвора до канала, так и самих размеров канала это накладывает определённые особенности на выбор гетероструктуры.

Зонные диаграммы основных видов транзисторных гетероструктур представлены на рис. 3. Это традиционная односторонне легированная НЕМТ-структура [27,28], обращённая (инвертированная) гетероструктура [29] и их комбинация – двойная гетероструктура, которая и используется в основном для изготовления мощных транзисторов (DpHEMT).

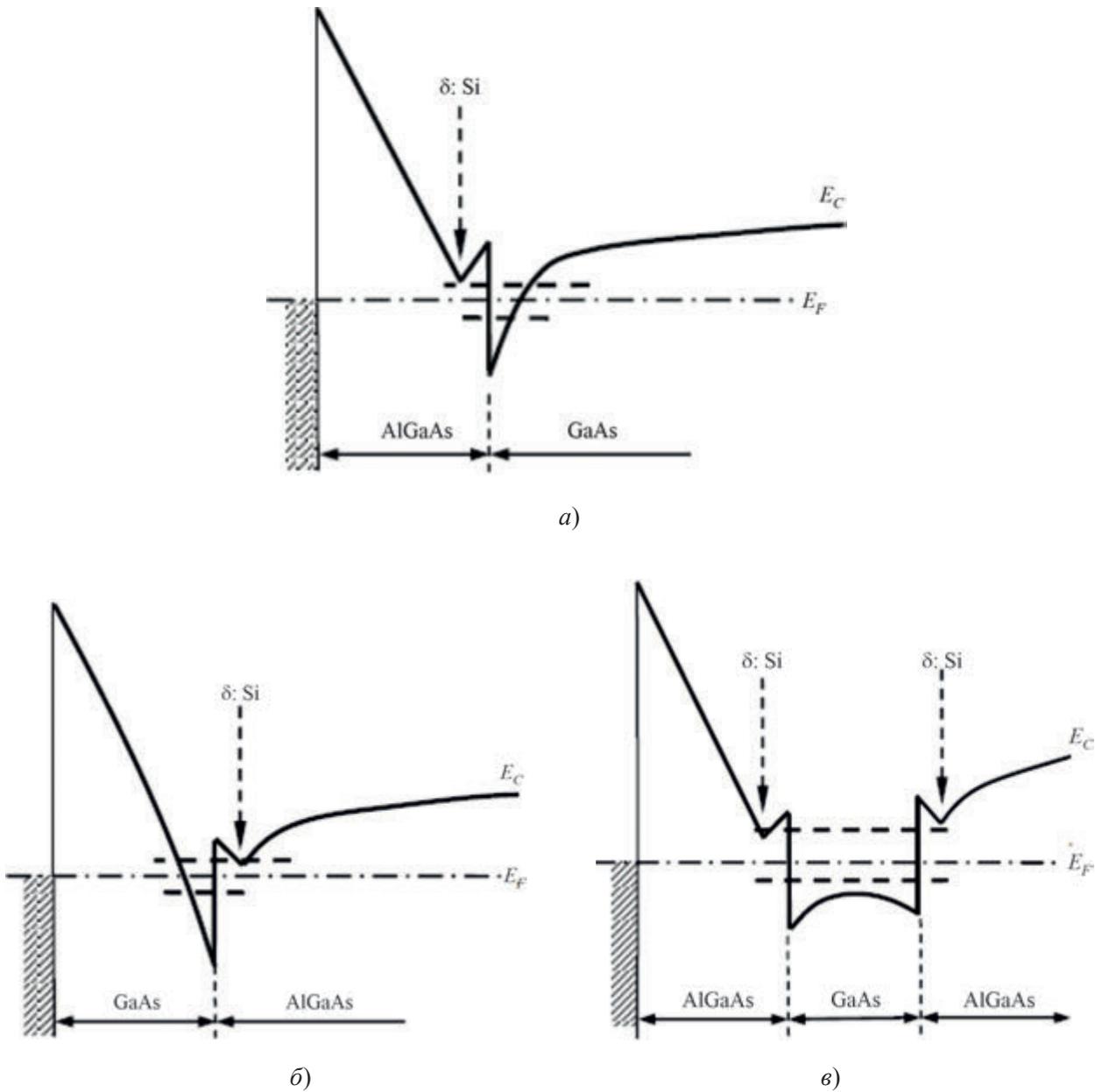
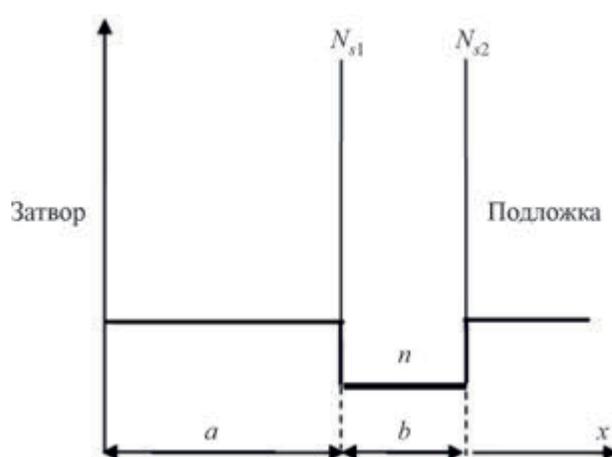


Рис. 3. Схематические зонные диаграммы структур с контактом Шоттки:  
 а – прямая НЕМТ-структура; б – обращённая НЕМТ-структура; в – двойная НЕМТ-структура

Как в транзисторе на обращенной структуре, так и в обычном НЕМТ расстояние по крайней мере до одного края канала строго фиксировано – это расстояние от затвора до гетероперехода, а в двойных структурах мощных транзисторов (DpHEMT) фиксированы вообще обе границы канала. Изменение числа носителей в канале при изменении напряжения на затворе в основном определяется расстоянием от дна квантовой ямы, а точнее квантовых уровней в яме, до уровня Ферми [30]. В общем случае описать закономерности этого изменения – это достаточно сложная задача, особенно с учётом изменения энергии электронов вдоль затвора, однако можно сделать элементарные оценки. Рассмотрим модельную задачу – гетероструктуру с прямоугольной квантовой ямой и дельта-легированием с одной или двух сторон, рис. 4 (если есть легированный дельта-слой только на расстоянии  $a$  от затвора, это – обычная структура; только на расстоянии  $a + b$  – обращенная, оба края ямы легированы – структура DpHEMT). Концентрация электронов в квантовой яме –  $n$ , поверхностные плотности доноров в дельта-слоях и канале –  $N_{s1}$ ,  $N_{s2}$  и  $n_s$  соответственно,  $U_g$  – потенциал затвора.

Рис. 4. Зонная диаграмма модельной структуры



Легко показать, что для такой конфигурации в общем случае

$$U_g = -\frac{ea}{\epsilon\epsilon_0} N_{s1} - \frac{e(a+b)}{\epsilon\epsilon_0} N_{s2} + \frac{en_s}{\epsilon\epsilon_0} \left( a + \frac{b}{2} \right), \quad (1)$$

откуда

$$\frac{dn_s}{dU_g} = \frac{\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{1}{(a+b/2)}. \quad (2)$$

Видно, что во всех трёх случаях скорость изменения заряда в канале обратно пропорциональна расстоянию не до края канала, как в гомоструктурном транзисторе, а до его центра. В то же время в гетероструктурных транзисторах расстояние от затвора до канала обычно бывает сравнимо с толщиной самого канала.

Для глубоких, близких к прямоугольной квантовых ям, в которых волновые функции электронов близки к синусам и косинусам, это очень хорошее приближение, так как решение для глубокой симметричной прямоугольной ямы строго совпадает с (2). Если квантовая яма несимметрична и волновые функции электронов заметно отличаются от синусов и косинусов, то можно предположить, что с хорошей точностью скорость изменения заряда в канале также обратно пропорциональна расстоянию до центра канала  $Z$ :

$$\frac{dn_s}{dU_g} \approx \frac{\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{1}{Z}, \quad (3)$$

где  $Z$  определяется формулой

$$Z = \sum_i n_{si} \int_a^{a+b} x |\psi_i^2(x)| dx / \sum_i n_{si} \int_a^{a+b} |\psi_i^2(x)| dx = \frac{1}{n_s} \sum_i n_{si} \int_a^{a+b} x |\psi_i^2(x)| dx. \quad (4)$$

Здесь  $\psi_i(x)$  и  $n_{si}$  – волновые функции и поверхностные плотности электронов на уровне с номером  $i$ ;  $a$  и  $a+b$  – границы квантовой ямы.

$$n_{si} = \left( \frac{m^*(x)kT}{\pi\hbar^2} \right) \ln \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{E_F - E_i}{kT} \right] \right\}. \quad (5)$$

В обычном НЕМТ расстояние до центра канала с увеличением напряжения на затворе будет увеличиваться [30]. В обращённой структуре с увеличением напряжения на затворе квантовая яма становится более узкой, а значит, центр канала будет приближаться к границе гетероперехода и тоже несколько удаляться от затвора. То же самое происходит в ДрНЕМТ – центр канала будет приближаться к гетеропереходу у подложки. Однако, с учетом того, что электроны в канале под затвором довольно горячие, изменение формы квантовой ямы в двух последних случаях будет несущественным, тогда как в обычном НЕМТ, наоборот, с разогревом электронов эффективная ширина канала будет быстро возрастать.

Очевидно, что в этом случае обращенная гетероструктура имеет определённые преимущества перед двумя другими – в ней квантовую яму можно максимально приблизить к затвору и сделать эффективное расстояние от затвора до центра канала минимальным, особенно учитывая, что в двух других типах структур легированный донорами слой нельзя сильно приближать к затвору из-за риска падения пробивного напряжения.

Можно сделать следующие элементарные оценки.

Максимальная частота усиления по току  $f_t$  обычного транзистора с «внутренней» входной ёмкостью исток – затвор  $C_{gs}$ , паразитной ёмкостью затвора  $C_p$  (ёмкость шляпки затвора по воздуху и защитному слою, а также воздушных мостов) и крутизной  $g_m$  равна

$$f_t = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_p)} = \frac{f_t^0}{1 + C_p/C_{gs}}, \quad (6)$$

где

$$f_t^0 = \frac{v}{2\pi L} \quad (7)$$

– собственная частота усиления по току транзистора;  $v$  – средняя скорость электронов под затвором;  $L$  – эффективная длина затвора с учётом краевых областей. Пусть расстояние от затвора до центра квантовой ямы обычного транзистора –  $d$ , расстояние от затвора до центра канала обращённой структуры –  $h$ , внутренняя входная ёмкость затвор – исток обращенной структуры –  $C_{gs}^i$ . С учётом того, что и крутизна и ёмкость обратно пропорциональны расстоянию от затвора до канала (в данном случае центра квантовой ямы), при одинаковой топологии транзистора рост максимальной частоты усиления по току  $\Delta f_t$  при переходе с обычной гетероструктуры на обращённую, выраженный через максимальную частоту усиления  $f_t$  обычного НЕМТ, будет равен

$$\Delta f_t = \frac{f_t^0}{1 + C_p/C_{gs}^i} - \frac{f_t^0}{1 + C_p/C_{gs}} = f_t \frac{C_p}{C_{gs}} \left( \frac{d-h}{d} \right) / \left( 1 + \frac{C_p}{C_{gs}} \frac{h}{d} \right). \quad (8)$$

Для коротких Т-образных затворов, в которых паразитная емкость сравнима (а может быть, и больше) с внутренней входной ёмкостью, расстояние от затвора до легированного дельта-слоя составляет порядка 10 нм, а ширина квантовой ямы имеет близкие размеры, рост частоты может равняться 20...30 %, что примерно соответствует росту коэффициента усиления около 2 дБ.

На начальном этапе многочисленные попытки использования обращённых структур для изготовления транзисторов [31] закончились неудачей из-за сильного влияния поперечного пространственного переноса электронов [19]. Однако, как показали теоретические исследования [20], введение донорно-акцепторного легирования со стороны подложки должно решить этот вопрос. Остался ещё один важный момент – уход горячих электронов в затвор, для решения которого ранее [32] было предложено использовать дополнительные потенциальные барьеры на основе широкозонных материалов. Но изготовление такой конструкции из-за толстых слоев с высокой мольной долей алюминия могло иметь существенные технологические трудности. Кроме того, возникал вопрос с уходом электронов в верхние долины широкозонного материала с высокой мольной долей Al. Использование цифровых барьеров снимает эти вопросы и дополнительно существенно улучшает расчётные характеристики данных структур [22, 24]. Однако, в плане мощных транзисторов, остаётся ещё ряд вопросов уже по конкретной оптимизации структур как в отношении величины всплеска дрейфовой скорости электронов, так и в отношении получения максимальной поверхностной плотности носителей.

### 3. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУР

В обычной обращённой структуре, даже с донорно-акцепторным легированием, горячие электроны интенсивно переходят в широкозонный материал (рис. 5). Здесь и далее расчеты проводились по модели [20].

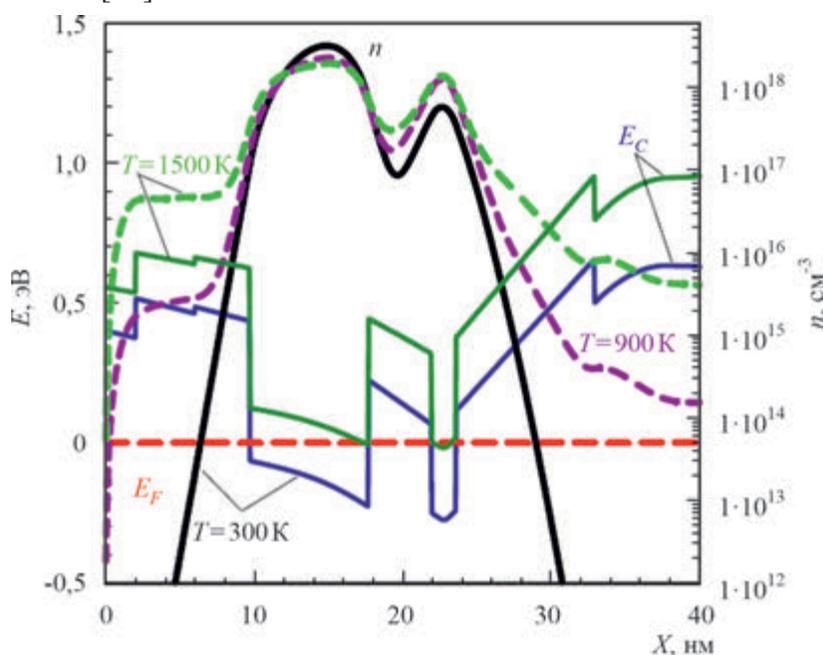


Рис. 5. Зонные диаграммы и распределения концентрации носителей при различных температурах электронного газа для обращённой гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием

Видно, что в простейшей конфигурации при увеличении поверхностной плотности электронов появляется мощный паразитный канал проводимости по дельта-слою, который в итоге ведёт к значительному уменьшению всплеска дрейфовой скорости электронов.

Эта проблема в значительной мере снимается введением цифровых барьеров, однако при поверхностной плотности электронов в канале более  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  в области донорного легирования уже при комнатной температуре электронного газа появляется второй максимум концентрации, который сильно растёт с разогревом электронов в канале и соответственно с увеличением поверхностной концентрации доноров (рис. 6). Что также снижает скорость электронов в канале (рис. 7).

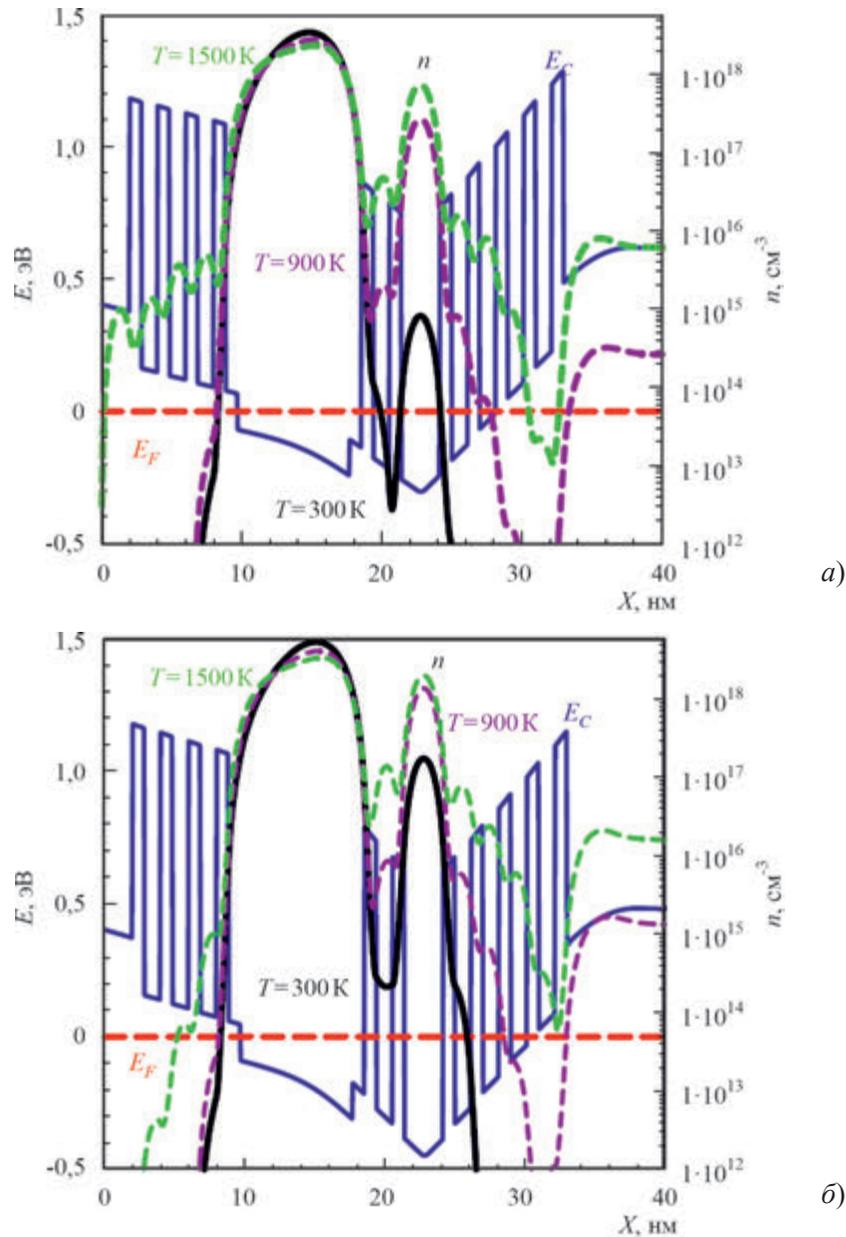


Рис.6. Зонная диаграмма и концентрации электронов при разных температурах электронного газа обращённой структуры с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами. Поверхностная концентрация электронов  $n_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (а),  $n_s = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (б)

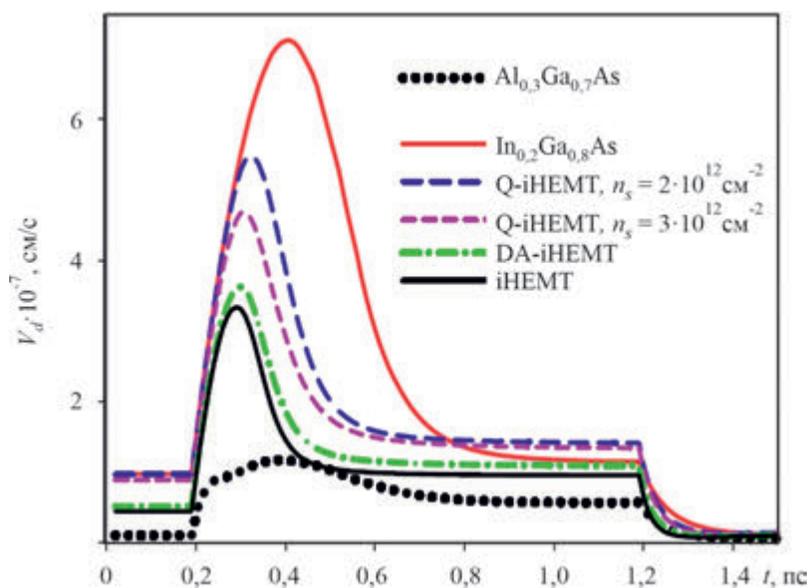


Рис. 7. Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени

Здесь и далее введены обозначения: iHEMT – обращенная гетероструктура; DA-iHEMT – обращенная гетероструктура с донорно-акцепторным легированием; Q-iHEMT – обращенная гетероструктура с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами.

При анализе таких структур наблюдается (по крайней мере, в расчётах) ещё один крайне интересный и, возможно, полезный для разработки транзисторов мм-диапазона длин волн эффект: при повышении температуры электронного газа в условиях термодинамического равновесия электроны с ряда уровней квантовой ямы переходят на состояния (мини-зоны), локализованные в области цифровых барьеров (рис. 8).

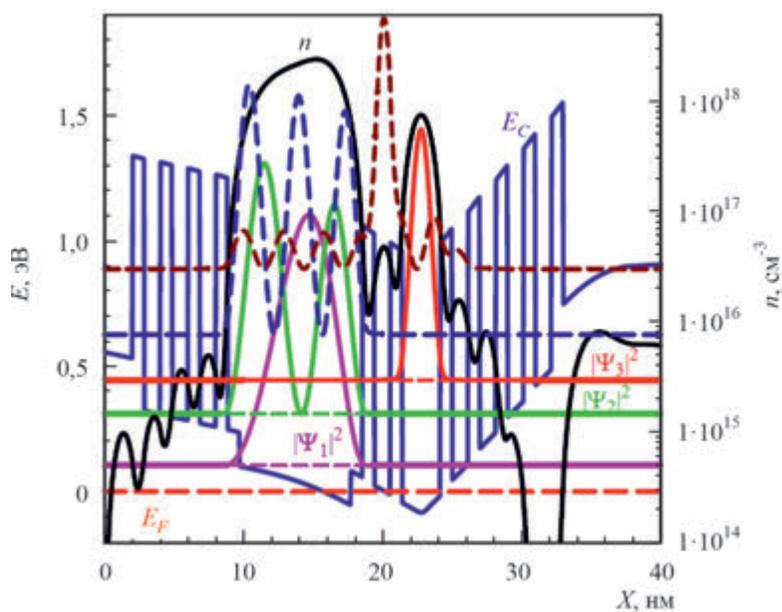


Рис. 8. Волновые функции электронов в обращённой гетероструктуре с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами

Волновая функция этих локализованных состояний в области канала практически равна нулю. Это означает, что в транзисторе мм-диапазона длин волн за время практически баллистического [33] пролёта электронов под затвором горячие носители на эти уровни переходить практически не будут. На рис. 9 приведены оценочные расчёты зависимости всплеска дрейфовой скорости электронов от времени с учётом этого эффекта. Уровни, локализованные внутри короткопериодной AlAs/GaAs-сверхрешётки (а в данном случае это третий уровень), в расчетах просто не учитывались. Для этого случая здесь и далее введено обозначение Q-iHEMT<sup>+</sup>.

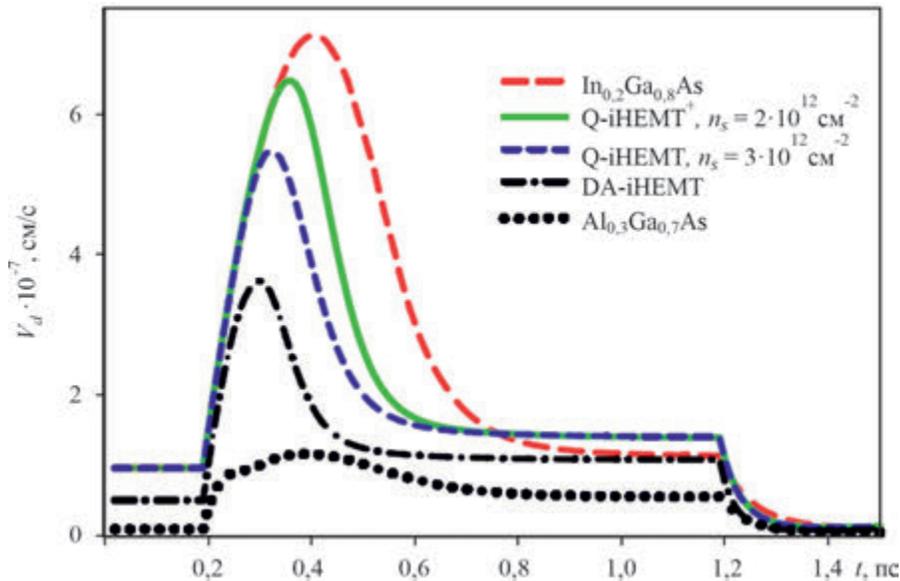


Рис. 9. Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени

Видно, что в этом случае всплеск заметно увеличивается. То есть в транзисторах на структурах с цифровыми барьерами это может быть дополнительным механизмом существенного увеличения их рабочих частот.

Даже если предположить, что электроны паразитного канала будут слабо взаимодействовать с электронами в квантовой яме (интеграл перекрытия волновой функции в паразитном канале и волновых функций электронов в квантовой яме близок к нулю), появление паразитного канала проводимости само по себе, несомненно, вредное явление. Особенно с учётом возможности перехода и локализации электронов в X-долины AlAs. Паразитный канал появляется из-за того, что для создания резкого и достаточно высокого барьера у края квантовой ямы со стороны подложки за счёт донорно-акцепторного легирования поверхностная плотность донорной примеси должна быть довольно высокой (порядка  $5 \cdot 10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ). Это требует достаточно толстой (7...10 монослоёв) вставки GaAs, что заметно больше расстояния между цифровыми барьерами (4...6 монослоёв). Поэтому в области легирования и появляется «место» для локализации состояния в решетке из тонких барьеров AlAs. Это, в свою очередь, и приводит к появлению паразитного канала проводимости при поверхностной плотности электронов в канале более  $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Такая поверхностная плотность, вообще говоря, уже достаточна для создания мощного транзистора, особенно на столь высоких частотах. Однако даже в обычных DpHEMT стандартная поверхностная плотность электронов составляет  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , а в структурах с донорно-акцепторным легированием для приборов мм-диапазона длин волн –  $4,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  [21]. В принципе возможна определённая

вариация параметров. Например, увеличить поверхностную плотность в канале до  $2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  или даже до  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , несколько снизив коэффициент усиления, зато повышая мощность прибора. Однако есть и другой выход, данная проблема может быть очень просто решена в рамках предлагаемой технологии путем введения всего одного дополнительного AIA цифрового барьера, что очень удобно для производства. За счет его введения область легирования разбивается на две симметричные части (рис. 10).

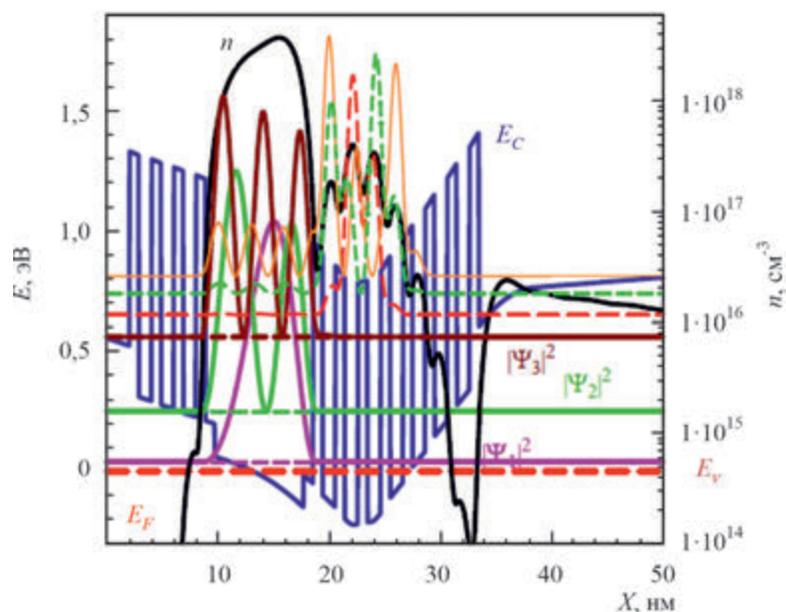


Рис. 10. Зонная диаграмма с идеальной решеткой ( $T = 1500 \text{ K}$ )

Барьерная решетка становится строго периодичной, и падения потенциала в области дельта-слоев становится недостаточно, чтобы сформировать локализованное состояние внутри решетки на уровне с достаточно низкой энергией (см. рис.10), даже при поверхностной плотности электронов  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Вообще говоря, главную роль играет даже не строгая периодичность, а маленькое расстояние между барьерами. С дальнейшим увеличением поверхностной концентрации электронов в канале картина локализации заметно ухудшается. Введение дополнительного барьера в область легирования ведёт к заметному увеличению всплеска дрейфовой скорости (рис. 11). При  $n_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  в максимуме он становится практически таким же, как и в идеально чистом объёмном материале. Решетка с одинаковым шагом настолько хорошо локализует электроны в канале, что расчёты как с учетом, так и без учета того, что горячие электроны за время импульса не будут переходить на локализованные внутри барьерной решетки состояния, начинают мало отличаться один от другого. С увеличением поверхностной плотности электронов в канале всплеск дрейфовой скорости начинает падать. Однако даже при  $n_s = 4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  он остаётся в максимуме чуть больше, чем при  $n_s = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  в случае, когда в барьерной решетке есть «пробел» в области легирования.

Следует отметить еще одну крайне интересную и, возможно, не менее полезную особенность данных структур. В них первые три уровня расположены очень далеко друг от друга (см. рис. 10). Расстояние между первым и вторым составляет около 0,2 эВ, между вторым и третьим – около 0,3 эВ, что в несколько раз превосходит энергию оптического фонона (около 0,04 эВ) в данных материалах. Это означает, что, возможно, один из основных механизмов рассеяния в таких

структурах будет частично подавлен, что, в свою очередь, может привести в них к существенному увеличению всплеска дрейфовой скорости электронов, а значит, дополнительно улучшить характеристики полевых транзисторов на гетероструктурах с такой конструкцией.

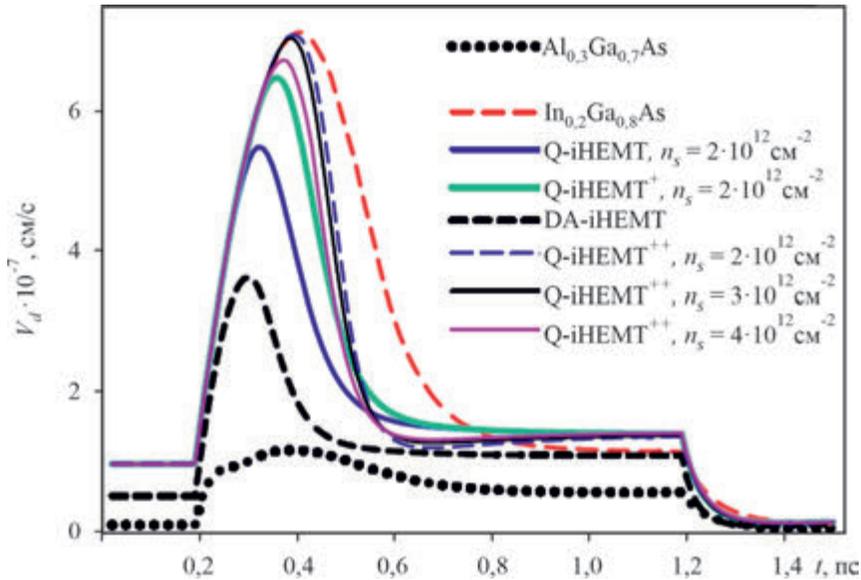


Рис. 11. Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени

В плане полевых транзисторов миллиметрового диапазона длин волн, у обращенной структуры с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами перед обычной кроме близости канала к затвору есть ещё одно важное преимущество. При длинах затвор – канал, начинают возникать проблемы с перекрытием канала. Очевидно, что перекрыть обращенную структуру будет гораздо проще, а значит, с ней гораздо легче будет использовать затворы с длиной менее 0,1 мкм.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты дают возможность заключить, что введение цифровых барьеров является крайне эффективным средством изменения свойств арсенидгаллиевых гетероструктур. В частности, в рассмотренных обращенных гетероструктурах их введение позволяет существенно увеличить всплеск дрейфовой скорости электронов как за счет увеличения степени локализации электронов в канале, так и за счет того, что электроны не успевают за время пролёта переходить на верхние подзоны размерного квантования, локализованные в области барьерных сверхрешеток. При этом в структурах с оптимизированной барьерной решёткой всплеск дрейфовой скорости электронов приближается к всплеску дрейфовой скорости в объемном нелегированном материале канала – теоретическому пределу для используемой расчётной модели.

Следует отметить, что так как используемая для расчётов модель слишком груба и не описывает достаточно строго динамику горячих электронов в сложных гетероструктурах, то полученные результаты только приблизительно определяют наиболее интересные и перспективные области исследований – экспериментов или расчетов по более строгим моделям.

Автор благодарен сотрудникам отделения 10 АО «НПП «Исток» им. Шокина» за предоставленные данные и помощь в расчётах.

ЛИТЕРАТУРА

1. A review of technologies and design techniques of millimeter-wave power amplifiers / V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello [et al.] // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – Jul. 2020. – Vol. 68, No 7. – P. 2957 – 2983. – DOI: 10.1109/TMTT.2020.2989792.
2. **Wang, H.** Power amplifiers performance survey 2000 / H. Wang. – Jul. 2019. – Present. [Online]. Available: <https://gems.ece.gatech.edu/PASurvey.html>.
3. *N*-polar GaN/AlN MIS-HEMT with  $f_{\max}$  of 204 GHz for *Ka*-band applications / Nidhi, S. Dasgupta, S. Keller, J. S. Speck and U. K. Mishra // IEEE Electron Device Lett. – Dec. 2011. – Vol. 32, No 12. – P. 1683 – 1685. – DOI: 10.1109/LED.2011.2168558.
4. Demonstration of constant 8 W/mm power density at 10, 30, and 94 GHz in state-of-the-art millimeter-wave *N*-polar GaN MISHEMTs / B. Romanczyk [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – Jan. 2018. – Vol. 65, No 1. – P. 45 – 50. – DOI: 10.1109/TED.2017.2770087.
5. Millimeter-wave AlGaIn/GaN HEMTs with 43,6 % power-added-efficiency at 40 GHz fabricated by atomic layer etching gate recess / Y. Zhang [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – May 2020. – Vol. 41, No 5. – P. 701 – 704. – DOI: 10.1109/LED.2020.2984663.
6. Ultrahigh-speed GaN high-electron-mobility transistors with  $f_t/f_{\max}$  of 454/444 GHz / Y. Tang [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – Jun. 2015. – Vol. 36, No 6. – P. 549 – 551. – DOI: 10.1109/LED.2015.2421311.
7. Transient electron transport in wurtzite GaN, InN and AlN / B. E. Foutz, S. K. O’Leary, M. S. Shur and L. F. Eastman // J. Appl. Phys. – 1999. – Vol. 85, No 11. – P. 7727 – 7734. – DOI: 10.1063/1.370577.
8. Всплеск дрейфовой скорости электронов в транзисторных гетероструктурах на основе нитрида галлия / С. А. Богданов, А. А. Борисов, С. Н. Карпов [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2021. – Вып. 4 (551). – С. 16 – 24.
9. **Alizadeh, A.** On design of wideband compact-size *Ka/Q*-band high-power amplifiers / A. Alizadeh, M. Frounchi and A. Medi // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – Jun. 2016. – Vol. 64, No 6. – P. 1831 – 1842. – DOI: 10.1109/TMTT.2016.2554578.
10. A +27 dBm  $P_{\text{sat}}$  27 dB gain W-band power amplifier in 0,1  $\mu\text{m}$  GaAs / A. Barabi, N. Ross, A. Wolfman [et al.] // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. – Dec. 2018. – P. 1345 – 1347. – DOI: 10.1109/MWSYM.2018.8439854.
11. InP high electron mobility transistors for submillimetre wave and terahertz frequency applications: A review / J. Ajayan [et al.] // AEU Int. J. Electron. Commun. – Sep. 2018. – Vol. 94. – P. 199 – 214. – DOI: 10.1016/j.aeue.2018.07.015.
12. First demonstration of amplification at 1 THz using 25-nm InP high electron mobility transistor process / X. Mei [et al.] // IEEE Electron Device Lett. – Apr. 2015. – Vol. 36, No 4. – P. 327 – 329. – DOI: 10.1109/LED.2015.2407193.
13. A 280–310 GHz InAlAs/InGaAs mHEMT power amplifier MMIC with 6.7–8.3 dBm output power / L. John [et al.] // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. – Feb. 2019. – Vol. 29, No 2. – P. 143 – 145. – DOI: 10.1109/LMWC.2018.2885916.
14. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, К. С. Журавлев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38, вып. 17. – С. 84 – 89.
15. New heterostructures for higher power microwave DA-pHEMTs / K. S. Zhuravlev [et al.] // Advances in Microelectronics: Reviews. Barcelona, Spain: IFSA. – 2019. – Vol. 2. – P. 251 – 288.
16. Управление положением оптимальной рабочей точки мощного гетероструктурного полевого транзистора путем формирования подзатворного потенциального барьера на основе донорно-акцепторной структуры / В. М. Лукашин, А. Б. Пашковский, В. Г. Лапин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 3. – С. 81 – 87.
17. Исследование средней дрейфовой скорости электронов в pHEMT транзисторах / А. А. Борисов, К. С. Журавлев, С. С. Зырин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 16. – С. 41 – 47.

18. Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в рНЕМТ-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / Д. Ю. Протасов, Д. В. Гуляев, А. К. Бакаров [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44, вып. 6. – С. 77 – 84.
19. Особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-рНЕМТ / А. Б. Пашковский, С. И. Новиков, В. Г. Лапин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2018. – Т. 44, вып. 17. – С. 103 – 110.
20. Нелокальная динамика электронов в транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / А. Б. Пашковский, А. С. Богданов, В. М. Лукашин, С. И. Новиков // Микроэлектроника. – 2020. – Т. 49, № 3. – С. 210 – 225. – DOI: 10.31857/S0544126920030059.
21. Millimeter wave donor-acceptor doped DpНЕМТ/ Andrey B. Pashkovskii, Sergey A. Bogdanov, Askhat K. Bakarov [et al.] // IEEE Trans. on Electron Devices. – Jan. 2021. – Vol. 68, issue 1. – P. 53 – 56.
22. Цифровые барьеры и их перспективы в развитии мощных полевых транзисторов с двухсторонним донорно-акцепторным легированием в миллиметровом диапазоне длин волн / С. А. Богданов, В. Г. Лапин, В. М. Лукашин [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2022. – Вып. 3(554). – С. 22 – 37.
23. Увеличение подвижности электронов в НЕМТ-гетероструктурах с составным спейсером, содержащим нанослой AlAs / А. Н. Виниченко, В. П. Гладков, Н. И. Каргин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, вып. 12. – С. 1660 – 1665.
24. Всплеск дрейфовой скорости электронов в обращенных транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми потенциальными барьерами / А. Б. Пашковский, С. А. Богданов, А. К. Бакаров [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2022. – Т. 48, вып. 12. – С. 11 – 14. – DOI: 10.21883/PJTF.2022.12.52671.19184.
25. **Зи, С.** Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн. Кн. 1 / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
26. Williams, R. E. Graded channel FET's: improved linearity and noise figure / R. E. Williams and D. W. Shaw // IEEE Trans. on Electron Devices. – June 1978. – Vol. 25, No 6. – P. 600 – 605. – DOI: 10.1109/T-ED.1978.19143.
27. High electron mobility transistors with selectively doped GaAs/n-AlGaAs heterojunction / T. Mimura, S. Hiyamizi, H. Hashimoto, M. Fukuta // IEEE Trans. on Electron Devices. – 1980. – Vol. ED-27, No 11. – P. 2197.
28. A new field-effect transistor with selectively doped GaAs/n-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As heterostructures / T. Mimura, S. Hiyamizi, T. Fuji, K. Numbu // Jap. Journ. Appl. Phys. – 1980. – Vol. 19, No 5. – P. L225 – L227.
29. **Патент 897062 СССР.** Полевой транзистор: приоритет 03.09.1980 / А. С. Тагер, А. А. Кальфа.
30. **Кальфа, А. А.** Двумерный электронный газ в структурах металл-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с селективным легированием / А. А. Кальфа // ФТП. – 1986. – Т. 20, вып. 3. – С. 468 – 471.
31. Инвертированная гетероструктура InP/In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As для полевого транзистора / А. М. Крещук, Е. П. Лаурс, С. В. Новиков [и др.] // ФТП. – 1990. – Т. 24, вып. 6. – С. 1145 – 1147.
32. Особенности заполнения размерно-квантованных подзон в обращенных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием / С. И. Новиков, А. Б. Пашковский, Я. Б. Мартынов [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2018. – Вып. 1 (536). – С. 6 – 20.
33. Constant comparative potential performance of Si, GaAs, GaInAs, InAs submicrometer-gate FET,s / A. Carpy, B. Carnez, R. Fauquembergues [et al.] // IEEE Trans. Electron Dev. – 1980. – Vol. 27, No 11. – P. 2158 – 2160.

Статья поступила 18 ноября 2022 г.

# ИСТОРИЯ

УДК 9

## НАЧАЛЬНИКИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ «ИСТОКА»

**А. К. Балыко, Е. В. Терешкин, Т. А. Балыко**

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

## HEADS OF «ISTOK» DEPARTMENTS

**A. K. Balyko, E. V. Tereshkin, T. A. Balyko**

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

В корне слова «начальник» стоит «начало» – начало всех начал. Именно с начальника начинается научная, производственная и общественная работа вверенного ему коллектива, повышение квалификации сотрудников. Именно он берет на себя всю ответственность за выполнение качественно и в срок работ, порученных ему и его сотрудникам.

Во всей истории «Истока» общее число начальников подразделений различного уровня исчисляется тысячами. И каждый из них, безусловно, заслуживает добрых слов. Мы будем рассказывать о выдающихся людях из этой когорты ученых-начальников.

## АНАТОЛИЙ ЮРЬЕВИЧ СЛОБОДЕНЮК

А. Ю. Слободенюк родился 19 февраля 1952 г. в с. Курово Московской области. Закончил Рязанский радиотехнический институт, получил специальность инженера-экономиста. Волей судьбы ему пришлось изучать и начертательную геометрию, и теоретические основы электротехники, и сопротивления материалов. На военной кафедре осваивал станции наведения ракет. Так что вместе с глубоким экономическим образованием Анатолий Юрьевич не просто имел представление, а досконально знал электронные приборы и радиотехническую аппаратуру. И это помогло ему в последующей работе.

Вскоре, во многом благодаря организованности и пунктуальности Анатолия Юрьевича, их комната в общежитии стала образцовой, получила переходящий приз – телевизор, который так и не выпускала до окончания учебы. А. Ю. Слободенюк превосходно разбирался в математике и других точных науках. За консультациями к нему постоянно ходили однокурсники, и Анатолий терпеливо растолковывал тонкости математических выкладок, не отказывал никому и никогда. Ребятам удивляла также и другая его особенность – он очень мало спал, тем не менее всегда оставался в хорошей форме. Анатолий вовремя вставал, успевал все сделать, прийти на занятия, да еще и под копирку



А. Ю. Слободенюк

записать лекции для своих друзей. За время учебы он посетил все лекции, выполнил все задания, лабораторные, курсовые. Очень любил футбол, сам прилично играл, хорошо разбирался во всех тонкостях игры, помнил практически все счета, особенно если это касалось любимого «Спартака».

А. Ю. Слободенюк очень хотел работать во Фрязино, много слышал хороших отзывов о ведущем предприятии отрасли. И здесь мечта его, как, впрочем, и его товарищей, сбылась. Все они начинали работать в отделе научной организации труда, управления и заработной платы (ОНОТУиЗ) под руководством П. В. Красногиря. Опытный экономист и прекрасный человек – Павел Васильевич много времени уделял молодым специалистам, выделяя из всех А. Ю. Слободенюка. Первый наставник Анатолия Юрьевича пережил своего ученика. И так получилось, что 80-летний юбилей Павла Васильевича пришлось на день смерти Анатолия Юрьевича...

Огромный талант А. Ю. Слободенюка оказался полностью востребованным на предприятии. Он стремительно поднимался по служебной лестнице. Возглавлял ОНОТУиЗ, затем плановый отдел и, наконец, был назначен заместителем генерального директора «Исток» по экономическим вопросам. И это несмотря на то, что ему в то время было всего сорок лет. В этой должности Анатолий Юрьевич проработал почти десятилетие. Он хорошо ориентировался и в прежней социалистической экономической системе, и в так называемой рыночной. На его плечи легли самые тяжелые годы в жизни предприятия. И то, что «Исток» пережил их, пережил достойно, не «шарахаясь» из стороны в сторону за зигзагами «рыночной экономики», огромная заслуга Анатолия Юрьевича. В этот период ему сложно было работать не столько с финансами, сколько с людьми. В силу своей примерной честности и порядочности он крайне тяжело переживал то положение, в котором порой оказывались сотрудники предприятия, высококлассные специалисты и простые рабочие. Но никогда он не подставлял под удар других, многое брал на себя. Возможно, от этого напряженного труда и усилилась его болезнь. Он «сгорел» на работе, оставив о себе немеркнущую память, как о выдающемся экономисте, прекрасно разбирающемся не только в вопросах экономики, но и в технических проблемах предприятия.

Где бы ни работал Анатолий Юрьевич, какую бы должность не занимал, он всегда был доступным человеком, простым в общении. Любой сотрудник мог обратиться к нему со своей проблемой, никому он не отказывал в поддержке, даже в наше тяжелое время находил варианты помощи. Подчиненные глубоко уважали своего руководителя за внимательное отношение к ним, начальники подразделений – за непредвзятое отношение и объективность в оценке ситуации, руководители предприятия – за высочайший профессионализм. А мы, все, кто лично знал Анатолия Юрьевича, за те высокие человеческие качества, которые пронес он через всю свою, увы, слишком короткую жизнь...

Анатолий Юрьевич умер 10 августа 1999 г.

### МИХАИЛ ИВАНОВИЧ ЛОПИН

Исполнилось 84 года известному ученому НПП «Исток», главному научному сотруднику теоретического отделения 10, доктору технических наук Михаилу Ивановичу Лопину.

М. И. Лопин родился 4 марта 1938 года в Ростове-на-Дону. В детстве он испытал тяжелую семейную драму, так что основную заботу о брате взяла на себя его сестра, Парышкуро Лариса Анатольевна.

Осваивать глубины высшего образования М. И. Лопин начал в стенах Московского энергетического института. По его окончании в 1961 г. был распределен на «Исток» в отделение 2, где в то

время разворачивались работы по созданию электровакуумных приборов в различных диапазонах длин волн.

Уже первые исследования стабильности и шумовых характеристик двухконтурных клистронных генераторов, проведенные М. И. Лопиным под руководством В. И. Новосельца, показали, что за его глубокими теоретическими знаниями кроется и феноменальное умение воплотить теоретические результаты в уникальные конструкции конкретных приборов и устройств. Его с блеском защищенная диссертация, посвященная созданию малошумящих клистронных генераторов, была, пожалуй, первой научной работой, выполненной в этом направлении не только в СССР, но и в мире. В 1970 году Михаил Иванович назначается начальником лаборатории 211 по разработке клистронов среднего и большого уровней мощности сантиметрового и миллиметрового диапазонов. Следуя по пути миниатюризации ЭВП, М. И. Лопин с сотрудниками создали целый



М. И. Лопин

ряд малогабаритных клистронов для систем связи – уникальных приборов, существенно превосходящих по своим параметрам лучшие изделия, разработанные за рубежом. После защиты кандидатской диссертации интересы Михаила Ивановича переместились в область создания комплексированных устройств СВЧ. Крупным достижением явилась разработка цепочки вакуумных приборов 8-мм диапазона, состоящей из клистронного генератора, усилительного клистрона и мощного выходного прибора. Выходная мощность цепочки составляла рекордное значение – 10 кВт. Такие цепочки успешно использовались в наземных РЛС.

Широкий охват М. И. Лопиным научных и технических направлений в электронике СВЧ дал повод руководству «Истока» в 1981 году поставить его во главе крупного подразделения, НПК-1. Здесь Михаил Иванович не только продолжил работы в области электровакуумных приборов, но и проявил уникальные способности руководителя по развитию твердотельного направления. Работы М. И. Лопина всегда находили поддержку со стороны научной общественности и руководителей предприятия. Он успешно защитил докторскую диссертацию. В настоящее время он является заместителем председателя диссертационного совета и возглавляет научно-экспертный совет «Истока». Его уважают разработчики и руководители других подразделений нашего предприятия и других предприятий страны. С большим вниманием и заботой Михаил Иванович относится к молодежи. Внешне немногословный, М. И. Лопин преображается на научных семинарах, заседаниях НТС, ученых советах, предзащитах диссертаций. Его вопросы молодым соискателям всегда конкретны, выступления доброжелательны, предложения эффективны.

М. И. Лопин – автор более 50 публикаций, имеет авторские свидетельства на изобретения и патенты. Награжден медалью «Ветеран труда», золотой и бронзовой медалями Всемирного салона изобретений в Брюсселе. Имеет почетные звания «Заслуженный работник электронной промышленности СССР», «Почетный радист СССР», «Заслуженный конструктор Российской Федерации».

Коллеги и друзья искренне восхищаются неиссякаемой энергией Михаила Ивановича, его трудолюбием и настойчивостью. От всего сердца желают ему отличного здоровья, бодрого настроения, долгих лет жизни и дальнейших успехов в научной и педагогической деятельности.

### ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ ЛИСС



В. В. Лисс

Начало 60-х годов стало началом расцвета НПП «Исток». Целеустремленные молодые руководители, ученые, разработчики, едва достигшие своего 30-летия, не считаясь со временем, развивали новое направление науки и техники – электронику СВЧ. Именно в этот период предприятие пополнилось новым поколением молодых специалистов, талантливых, полных сил и энергии, выбравших электронику уже осознанно, а потому беззаветно ей преданных. В дальнейшем эта молодежь, пройдя сквозь годы творческих исканий, стала тем стержнем, на котором и по сей день держится предприятие. Хотя им сегодня, увы, уже по 80 лет...

К этой славной плеяде шестидесятников относится и Владимир Викторович Лисс. Это спустя много лет он стал начальником крупного подразделения НПП «Исток», кандидатом технических наук. А тогда, в 1962, выпускник Московского энергетического института, коренастый, кудрявый, с немногословной, но содержательной речью, Владимир Лисс пришел на наше предприятие. Володя попал в сложившийся трудовой коллектив цеха 34, возглавляемый в ту пору В. Я. Эфросом – ярким представителем «золотого фонда» предприятия, того самого, с которого, по существу, и начиналась слава «Истока». Владимир Яковлевич стал для молодого специалиста подлинным руководителем не только по должности, но и по духу. От него прежде всего ощущал Владимир поддержку во всей последующей своей работе. Под стать начальнику цеха была и старший технолог Елена Павловна Хоменкова – замечательный специалист, чуткая и отзывчивая женщина, беззаветно преданная работе и в то же время не потерявшая за жесткими планами лучших качеств руководителя.

Едва ли не с первых дней работы начальник цеха доверяет В. В. Лиссу самостоятельное направление. В цехе шло внедрение нового класса электровакуумных приборов – сверхмалощумящих ламп бегущей волны (ЛБВ) с ленточным пучком – «детища» выдающегося разработчика В. А. Афанасьева. Именно для этих приборов остро стояли проблемы культуры вакуумного производства. Необходимо было довести приборы до уровня серийной продукции, отвечающей жестким требованиям по стабильности, надежности, экономичности. Для повышения качества приборов требовалось изменять психологию работников. Именно тогда, согласно требованиям вакуумной гигиены, в цехе начали работать в напальчниках, халатах, тапочках...

Не все Владимиру Викторовичу давалось сразу. Опыта набирался от прибора к прибору. Уча других, учился сам. Много исследовал, во всем старался дойти до сути. Аналитическое мышление и исследовательская жилка заставляли В. В. Лисса подходить к каждому отказу в работе прибора внимательно, изучать взаимосвязь отказа с технологическими приемами. Результаты многомесячной работы коллектива не заставляли себя долго ждать. ЛБВ Афанасьева «пошли» сначала в цехе 34, а затем уже по отлаженной технологии и на серийном заводе в Полтаве. Тысячи этих приборов надежно работали в аппаратуре заказчиков.

Богатый научный задел, полученный при освоении малощумящих ЛБВ, лег в основу кандидатской диссертации, которую В. В. Лисс успешно защитил в 1983 году. Довольно редкое событие среди работников завода «Рений», даже на таком научно-производственном объединении, как «Исток»!

Затем последовало освоение в цехе еще целого ряда сверхмалошумящих ЛБВ, назначение его старшим технологом, а после безвременного ухода из жизни начальника цеха В. Коноплева, прекрасного и надежного товарища, Владимир Викторович становится во главе цеха. Произошло это в 1986 году, когда будущее виделось еще безоблачным, а заказам, казалось, не будет конца. «Но буквально через 4-5 лет, – рассказывает В. В. Лисс, – почва закачалась под ногами. Заказов стало меньше. Надо было срочно искать выход. Мне он виделся в освоении выпуска гражданской продукции, причем преимущественно в изделиях твердотельной СВЧ-электроники».

Создание в производственном подразделении нового направления при сохранении старого – задача непростая в любое время, а тем более в 90-е годы. Такая перестройка «на ходу» по силе лишь исключительно трудоспособному и дружному коллективу. Именно таким и был коллектив цеха 34, в который влилась большая группа специалистов – разработчиков твердотельных усилителей. Далеко не все шло гладко, да что там далеко не все – ничего гладко не получалось! Выдерживали не все, из 45 специалистов, пришедших в коллектив, осталось около половины. Не выдерживали люди безденежья, не смогли осознать, что нужно не просто «слепить игрушку», а сделать прибор, надежно работающий у заказчика. На решение этой задачи ушло три года упорного труда. С самой лучшей стороны показали себя заслуженные кадровые работники цеха В. А. Шумова, Т. М. Чуйкина, З. А. Новикова, В. И. Красавин, П. А. Андреев, А. Д. Саврухин, А. Анурьев. Сумели найти себя в новом коллективе Н. А. Ушакова, Ю. Н. Виноградов, Н. И. Юрков. Впрочем, считает В. В. Лисс, едва ли следует кого-то выделять, важно то, что испытание выдержал коллектив в целом. Вновь оказались полезными мудрость и глубокие знания его учителя В. Я. Эфроса, который вернулся в родной коллектив цеха с огромным багажом наработок по надежности СВЧ-изделий и внес свой неоценимый вклад в организацию нетрадиционных работ в цехе.

В те годы мне не раз приходилось присутствовать на совещаниях у генерального директора А. Н. Королева, посвященных созданию производственной базы для выпуска твердотельных усилителей СВЧ. Доклады В. В. Лисса всегда отличались богатой информативностью, глубиной проработки, простотой и ясностью изложения и, главное, твердой уверенностью в правильности выбранного пути. В начале 90-х годов в НПП «Исток-4» начали разрабатывать мощные полевые транзисторы. В. В. Лисс поддержал эти работы, настойчиво убеждая дирекцию отказаться от использования транзисторов «Пульсара», которые не обеспечивали необходимую надежность и требуемые параметры, и перейти на свои, «истоковские». «Получилось так, – говорит Владимир Викторович, – что мы спасали себя, а в результате получили неожиданный результат: нам удалось сохранить и развить основу твердотельной СВЧ-электроники – производство СВЧ-транзисторов. Сегодня в России АО «НПП «Исток» им. Шокина» – единственное предприятие, где полевые транзисторы изготавливаются на уровне современных требований и с высокой надежностью. Начальник НПК-4 А. М. Темнов и главный конструктор В. Г. Лапин обеспечили все условия для производства несомненно лучших СВЧ-транзисторов в стране».

Трудно было быть начальником цеха в современных условиях. За спиной коллектив, готовый работать столько, сколько потребуется. А для этого начальнику необходимо постоянно искать новые заказы и новые рынки сбыта. «Раньше, – продолжает Владимир Викторович, – основной задачей было сдать прибор госкомиссии и подписать протоколы. Сейчас же никакими протоколами и актами не отделаешься. Чтобы получить деньги, нужно, чтобы прибор купили. Не купят – денег не будет. Это, я вам скажу, страшнее директорских выволочек».

В своем цехе В. В. Лисс опирался на тех, кто прошел с ним «огонь и воду». И обо всех сотруд-

никах цеха Владимир Викторович отзывается с теплотой и заботой. Деловые, уважительные отношения сложились у него с разработчиками полевых транзисторов, теоретиками, конструкторами. А те в свою очередь ценили во Владимире Викторовиче одно из главных качеств руководителя – в трудные моменты не перекладывать груз ответственности на плечи других...

Если в данной статье слишком много оказалось производственных проблем, то это оттого, что такой он, Владимир Викторович Лисс. Его жизнь трудно отделить от любимой работы, которой он отдал уже 60 лет. Сейчас Владимир Викторович на заслуженном отдыхе, от всей души желаем ему крепкого здоровья и счастья!

### ИВАН ИВАНОВИЧ ГОЛЕНИЦКИЙ



И. И. Голеницкий

Десять лет назад в Севастополе на Международной научной конференции по проблемам СВЧ-электроники особый интерес вызвали доклады о новых результатах проектирования электронно-оптических систем (ЭОС) электровакуумных СВЧ-приборов, полученных научным сотрудником теоретического отделения «Истока» кандидатом технических наук И. И. Голеницким.

В 2022 г. известному в стране и за рубежом ученому исполнилось 84 года. И. И. Голеницкий впервые вошел в проходную «Истока» шестьдесят пять лет назад после окончания Киевского политехнического института (КПИ). Еще на последнем курсе КПИ, во время прохождения преддипломной практики на «Истоке», И. И. Голеницкий всей душой проникся к коллективу теоретического отдела, куда незадолго до него, а затем и вместе с ним была распределена большая группа выпускников КПИ: В. П. Сазонов, В. Б. Хомич, В. И. Новоселец, Я. И. Местечкин, И. М. Блейвас, К. И. Алмазов-Долженко и многие другие.

Неувядающие с годами научные интересы Ивана Ивановича были связаны с электронной оптикой. Электронная оптика – одно из фундаментальных научных направлений, во многом определяющих перспективы появления, развития и совершенствования всех без исключения электровакуумных приборов СВЧ, поскольку в основе всех этих приборов лежат явления, связанные с движением электронных пучков.

После блестящей защиты диплома на тему расчета электронно-оптической системы ЭВП СВЧ он начал работать в лаборатории ЭОС теоретического отдела «Истока», где еще на заре развития ЭВП СВЧ в данном направлении работал выдающийся ученый, доктор технических наук, профессор В. С. Лукошков. Владимир Сергеевич создал на предприятии школу электронной оптики, объединив в лаборатории ЭОС коллектив специалистов, работавших сначала под руководством Энды Пинхусовны Тевелевой, а с 1953 года – кандидата технических наук Льва Васильевича Шубина.

Некоторое время И. И. Голеницкий занимался общей теорией фокусировки электронных пучков магнитными и электростатическими полями, а затем – проблемой динамической расфокусировки пучков электронов в лампах СВЧ. Этим вопросам была посвящена и его кандидатская диссертация.

В 1973 году Иван Иванович был назначен начальником лаборатории. Под его руководством сотрудники лаборатории выполняли многочисленные заказы для разрабатывающих под-

разделений предприятия, развивали и осваивали самые современные и эффективные методы проектирования ЭОС, вместе со смежной лабораторией И. М. Блейваса проводили поисковые работы по совершенствованию методов моделирования ЭОС, в том числе и в трехмерной области. Сейчас трехмерные модели мало кого приводят в изумление, а сорок лет назад каждый новый результат представлялся чем-то сверхъестественным. Бурному, плодотворному и безбедному существованию лаборатории, казалось, не будет конца. Но грянула перестройка, за ней реформы – и многое изменилось, особенно в плане научного поиска и задела. Были существенно сокращены поисковые научные исследования, в какой-то момент затормозились работы по созданию нового программного обеспечения проектирования, сократилось число сотрудников. Тем не менее, лаборатория И. И. Голеницкого, как говорится, выжила и активно продолжала работать. «Сработал» запас прочности, накопленный за предшествующие годы. В силу общительности и надежности в деловом отношении И. И. Голеницкого, не были утеряны контакты с разработчиками. Поддерживало и внимательное отношение к проблемам лаборатории со стороны генерального директора «Истока» А. Н. Королева, руководителей С. А. Зайцева, В. П. Сазонова, А. С. Победоносцева и А. В. Галдецкого. Результаты работы сотрудников не просто востребованы, ведь без них на «Истоке» не разрабатывается ни один электровакуумный прибор. Еще в конце 60-х годов ведущими научными сотрудниками Л. А. Шерель и Т. П. Куцевской были заложены основы математического моделирования ЭОС и создан комплекс программ для их проектирования. На протяжении последующего десятилетия эти модели и программы постоянно совершенствовались на многочисленных задачах разработчиков. Неписаным правилом в деятельности лаборатории является тесная связь с разработчиками. Доверие их к расчетам завоевывалось годами и десятилетиями. Сотрудники лаборатории проводили расчеты ЭОС приборов, созданных выдающимися разработчиками предприятия Ю. П. Мякинковым, С. В. Королевым, Л. А. Парышкуро и другими. Огромная заслуга в этом принадлежит работающим в настоящее время сотрудникам лаборатории, а также всем бывшим сотрудникам, оставившим по разным причинам работу. Теоретики и разработчики в различных городах России широко пользуются результатами, полученными в лаборатории ЭОС «Истока». Ежегодно И. И. Голеницкий участвовал в международных конференциях и симпозиумах. Число его научных публикаций приближается к 150, а число авторских свидетельств и патентов – более 20.

#### **КИВА БОРИСОВИЧ ДЖУРИНСКИЙ**

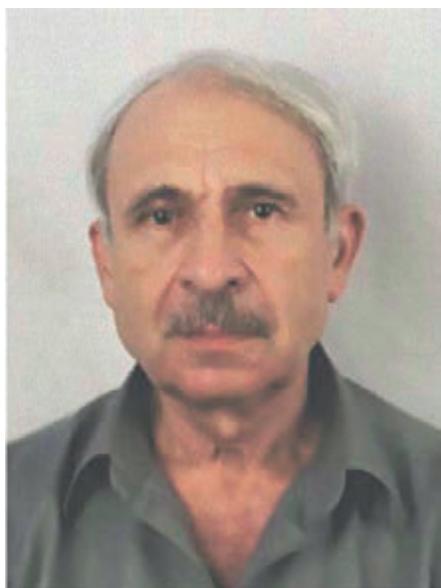
Видный ученый и организатор производства НПП «Исток», начальник лаборатории кандидат технических наук К. Б. Джурицкий проработал на предприятии более 60 лет.

За долголетнюю и безупречную работу он награжден медалью «Ветеран труда», знаком Губернатора Московской области «За труды и усердие», Почетными грамотами Министерства электронной промышленности СССР и ВЦСПС. В 2018 году ему было присвоено звание «Заслуженный деятель науки Московской области».

Кива Борисович любезно согласился рассказать о себе.

– Как известно, фундамент жизненного и научного долголетия закладывается с детства...

– Я родился 11 августа 1939 года в Калуге в семье простых тружеников, их образование было менее 4-х классов. Родители смогли поставить на ноги всех троих детей. Старшая сестра – медик, была замужем за военно-морским комендантом города Выборга, младший брат стал строителем, кандидатом наук, одним из лучших изобретателей Москвы. К моему глубокому сожалению, их уже нет. В детстве у меня была очень хорошая память. Прочитав страницу



К. Б. Джуринский

текста, мог почти дословно ее пересказать. Поэтому мне легко давались все предметы, особенно гуманитарные, в частности немецкий язык. Но все решилось в седьмом классе. Учитель физики завлек меня в свой кружок, о работе которого мне было доверено рассказать в «Пионерской зорьке» по Всесоюзному радио. В мои школьные годы в стране активно развивались новые направления науки и техники. Я увлекся физикой, изучая ее по учебникам выдающегося русского физика Ореста Даниловича Хвольсона. Помимо школьной программы я активно занимался спортом: неплохо играл в футбол и волейбол, а при окончании школы выполнил норматив первого разряда по настольному теннису. В 1956 году окончил школу с золотой медалью и, как золотой медалист, без экзаменов поступил в Московский энергетический институт (МЭИ) на специальность «Электротермические установки».

– Учеба в институте была столь же успешной?

– МЭИ всегда был лидером в подготовке специалистов для отечественной науки и техники, поэтому требования к студентам предъявлялись повышенные. Приходилось много работать, чтобы сдать зачеты и экзамены и получить стипендию – единственный источник моего существования. Но занятия спортом не бросал. Входил в сборную МЭИ и студенческую команду Москвы по настольному теннису, участвовал во Всесоюзных студенческих играх в Киеве и Харькове.

На «Истоке» работало очень много выпускников МЭИ. В каком-то, не помню, году (в 1980 году МЭИ исполнилось 50 лет. – Ред.) Игорь Всеволодович Лебедев вместе со всеми уважаемой Натальей Петровной Ни собрали в «Факеле» в честь юбилея всех фрязинцев – выпускников МЭИ. Зрительный зал был заполнен до отказа. Удивительно, но ни с одним из них, возможно в силу моей специальности, мне не пришлось встречаться в стенах вуза, так что когда в 1962 году по распределению я попал на «Исток», здесь, как говорится, у меня не было ни родных, ни друзей, все пришлось достигать самому.

– Как складывалась Ваша научно-производственная деятельность?

– На «Истоке» меня направили технологом участка в цех 32 опытного завода – в цехе планировалось освоение новых технологических процессов. Однако нововведений почему-то не произошло, и я стал работать сначала технологом, а позже мастером традиционного участка химической очистки и отжига. В цехе 32 в то время работали еще два инженера: Р. К. Ижбулатов и О. В. Пицик, впоследствии оба стали видными технологами «Истока». С последним в 1964 году я опубликовал свою первую научную статью «Нержавеющие стали как немагнитный конструкционный материал для электровакуумных приборов». Главным технологом опытного завода был уникальный человек – С. И. Гапонов. Сначала он в целях воспитания молодого специалиста объявил мне два выговора по цеху, а затем неожиданно предложил идти учиться в аспирантуру, да еще и обещал поговорить об этом с самим Н. В. Черепнинным. Николай Васильевич много работал над монографиями, ставшими классикой вакуумной техники, и у него не было времени на аспирантов. Но, поговорив со мной, он дал согласие быть моим научным руководителем, если я перейду работать к нему в отдел 200. Однако меня полтора года не хотели отпускать из цеха 32, хотя уже был подписан приказ о переводе в его отдел. Только в 1967 го-

ду я перешел к нему в отдел, где был назначен руководителем группы и одновременно начал учиться в аспирантуре. Я бесконечно благодарен Николаю Васильевичу за все, что он дал мне, и считаю его своим учителем. Уже в 1972 г. я успешно защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук.

Николай Васильевич Черепнин был выдающимся технологом. Достаточно вспомнить его роль в организации серийного производства миниатюрных пальчиковых приемно-усилительных ламп серии «Анод», разработанных в НИИ-160 для применения в ракетной технике. За выдающиеся заслуги в развитии отечественной электроники СВЧ и к 90-летию со дня рождения в 1998 г. Н. В. Черепнину было присвоено звание «Почетный гражданин г. Фрязино».

– Можно сказать, что с этого момента началось Ваше восхождение?

– Думаю, что да. Важным этапом в производственной деятельности стала работа по созданию линий замедления широкополосных малошумящих ЛБВ, применяемых в радиоэлектронных системах. Для решения поставленных задач я был назначен начальником лаборатории. Нам удалось впервые в нашей стране разработать оригинальную технологию изготовления таких линий замедления. При этом были получены 8 авторских свидетельств на изобретения. Эти приборы затем выпускались «Истоком» в течение двух десятков лет и принесли немалый доход нашему предприятию. Другой важной работой нашего коллектива стала разработка уникальных выводов энергии ЛОВ, не имеющих не только отечественных, но и зарубежных аналогов. Нами были получены 3 патента. Кроме того, мы успешно работали над созданием технологий изготовления генераторов шума, зондов для исследования электродинамических характеристик ЭВП, оболочек лазеров.

– Между тем Вы известный специалист и в области твердотельной электроники.

– После реорганизации отдела 200 моя лаборатория была переведена в отдел 280, а затем в ПТК-34, где я возглавил направление по исследованию, разработке и внедрению в производство радиокомпонентов для изделий СВЧ-техники. Оказалось, что значительную долю в этих изделиях составляют коаксиальные радиокомпоненты, обеспечивающие фильтрацию помех и передачу сигналов без искажения и потерь. Нами были разработаны миниатюрные герметичные радиокомпоненты, не имеющие отечественных аналогов и по параметрам не уступающие лучшим зарубежным образцам. Соединители и фильтры применяются в 50 изделиях микроэлектроники, выпускаемых на «Истоке», и поставляются по Госконтрактам на 40 предприятий России. За создание серии оригинальных радиокомпонентов НПП «Исток» в 2011 году было награждено премией «Золотой Чип» – «За вклад в развитие отечественной электроники».

– Обобщите Ваш вклад в научно-производственную деятельность.

– За время работы на предприятии я был главным конструктором 35-ти НИР и ОКР, имею более 130 научных публикаций и 26 изобретений, являюсь автором четырех монографий и учебников для вузов. Многие годы являюсь членом научно-квалификационного совета предприятия. Кроме того, в течение многих лет я в должности доцента преподаю в филиале МГУ (МИРЭА), являюсь членом Государственной экзаменационной комиссии университета, руководил дипломными проектами у 30 студентов.

Мне довелось тесно общаться с выдающимися учеными «Истока» В. Ф. Коваленко, М. Б. Голантом, М. Л. Любимовым, А. Я. Астафьевым, В. И. Мнойн и многими другими специалистами предприятия. Особую признательность я выражаю сотрудникам моей лаборатории, как бывшим, так и ныне работающим.

– Большое Вам спасибо за интересную беседу! Желаем Вам крепкого здоровья, успехов в Вашей многолетней творческой деятельности! Счастья Вам и Вашим родным и близким!

### АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ ФЕДОРОВ



А. С. Федоров

«Богата Россия талантами, – утверждал русский гений Н. В. Гоголь. – В каждом селе, каждой деревеньке нет-нет да и родится человек, который блеснет «алмазом», прославит и себя и родное село. Есть «алмазы» большие, их свет виден далеко, гораздо дальше родной стороны. А есть поменьше, но и они вносят свой вклад в общий поток света на пути к познанию».

В небольшом подмосковном селе Трубино 75 лет назад родился Саша Федоров. И все бы шло своим чередом, вышел бы из него неплохой крестьянин, мудрый и хваткий, как отец, и пошел бы он по стопам отца. Но судьба повернулась к нему другой стороной. В то самое время рядом с его селом бурно развивался город науки Фрязино. С ним связывались победы советской науки и техники в освоении космоса, а этим тогда жил едва ли не каждый мальчишка. К этому городу и были устремлены помыслы молодых селян. Не стал исключением и Александр Федоров.

Закончив среднюю школу с серебряной медалью, он без колебания пошел работать на «Исток» и одновременно поступил учиться во втуз (ныне филиал МИРЭА на «Истоке») на факультет электронных приборов. Здесь произошло и первое его знакомство с грандами отечественной электроники СВЧ. С особой теплотой он вспоминал лекции профессора Ю. Д. Самородова, с уважением относившегося к студентам и искренне стремившегося донести до каждого студента суть нового, развивающегося научного направления. Профессор М. Б. Голант был переполнен идеями, казалось, они рождались у него прямо в студенческой аудитории у доски. Учиться Александру было интересно. Преподаватели Л. В. Шубин, В. Д. Оленин и другие работали с увлечением. Генеральный директор «Истока» С. И. Ребров требовал, чтобы студенты втуза проходили практику непосредственно на рабочих местах, рядом с конструкторами, разработчиками, инженерами.

А. С. Федорова на практику распределили в отделение 17, которым руководил фронтовик, крупный организатор науки и производства лауреат Ленинской премии И. И. Бродуленко. Два года Александр проработал в КБ этого отделения под руководством И. П. Чепкасовой, а затем, в 1970 году, перешел на преддипломную практику в лабораторию лауреата Государственной премии А. А. Негирева. Александр Андреевич – один из самых замечательных разработчиков предприятия. Свою творческую деятельность начинал он в знаменитой теоретической лаборатории А. С. Тагера. А. А. Негирев одним из первых в стране начал заниматься миллиметровой тематикой, создав уникальные приборы, в том числе и в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Начальник лаборатории назначил для студента А. Федорова руководителем дипломной работы ведущего инженера В. В. Немцева, который выбрал непростую тему для диплома. Работая над дипломом, Александр Федоров обращался в различные подразделения предприятия. В катодном отделе он познакомился с С. Е. Рожковым, в теоретическом – с Р. А. Силиным, А. С. Победоносцевым, И. И. Голеницким, в магнитном – с Е. И. Каневским. В последующей своей работе он не раз обращался за помощью к этим высококлассным специалистам и всегда получал от них помощь. В свою очередь, ученые отмечали, что с Александром Сергеевичем было интересно работать, он ставил нетривиальные задачи и настойчиво искал их решения. Уже тогда проявилась

у него так называемая «научная жилка». Получив за дипломную работу высшую оценку, он с «красным дипломом» заканчивает втуз и получает рекомендацию для учебы в аспирантуре. Но научную карьеру временно пришлось прервать. А. С. Федорова призвали на службу в Советскую Армию, в артиллерийский полк знаменитой Самаро-Ульяновской Железной дивизии. По возвращении из армии он продолжил работать в отделении 17, в той же самой лаборатории. В отделении работали люди, не равнодушные к своей работе, а подчас и фанатично ей преданные: Л. А. Парышкуро, В. С. Савельев, А. М. Алексеенко, В. М. Долич, В. Н. Русаков и другие. Именно их вдохновенный труд стал источником многих уникальных результатов в области разработки генераторов СВЧ, как электровакуумных, так впоследствии и полупроводниковых.

Под руководством А. А. Негирева Александр Сергеевич начал развивать полупроводниковое направление в диапазоне миллиметровых волн. Работа проводилась в тесном сотрудничестве с разработчиком лавинно-пролетных диодов В. П. Снегиревым и теоретиками Е. И. Голантом, С. И. Варгузовым и Н. А. Гусельниковым. Разработанные А. С. Федоровым СВЧ-генераторы 8-миллиметрового диапазона нашли широкое применение в аппаратуре гражданского назначения, в частности в радиолокационных датчиках скорости железнодорожного транспорта и в СВЧ-уровнемерах. В начале 80-х годов комплексная работа молодых сотрудников по созданию твердотельных СВЧ-генераторов выдвигалась на соискание премии Ленинского комсомола. В числе авторов был и А. С. Федоров.

Александр Сергеевич не прекращал работать и над своей традиционной тематикой. Он поступил в аспирантуру без отрыва от производства и подготовил диссертационную работу. Когда обучение в аспирантуре уже подходило к концу, директор завода «Рений» И. М. Панас предложил ему должность старшего технолога в цехе 44. С сентября 1986 г. он приступил к работе на новом месте. Продолжая работать над диссертацией, А. С. Федоров успешно ее защитил в 1989 г. и стал кандидатом технических наук.

На волне перестройки коллектив цеха 44 в 1988 г. избрал его своим начальником. Таким образом, он стал первым избранным начальником цеха на «Истоке». А. С. Федоров руководил цехом до 1994 г. Новая реструктуризация подразделений позволила по-новому взглянуть на научно-технические кадры. Александру Сергеевичу было предложено возглавить производство в крупнейшем подразделении «Истока», НПК-2.

Занимаясь научно-производственной работой, А. С. Федоров никогда не отказывался от общественных нагрузок. Три года он проработал председателем профбюро НПК-17. Сотрудники ценили его за прямоту, отзывчивость, простоту, душевность, стремление прийти на помощь в трудную минуту.

Вместе с супругой Галиной, в свое время одной из самых активных комсомолок «Истока», они воспитали двух сыновей. Младший, Николай, окончил филиал МИРЭА и работает в НПК-17. Александр Сергеевич Федоров скончался в возрасте 60 лет. Его друзья и коллеги сохранили память об А. С. Федорове в своих сердцах.

### **МИХАИЛ МИХАЙЛОВИЧ ТРИФОНОВ**

Генеральный директор ЗАО «НПП «Исток-система» М. М. Трифонов родился 13 августа 1953 г.

Михаил Михайлович начал работать на «Истоке» в 1975 году после окончания Московского института электронного машиностроения. Первые годы его трудовой деятельности не отличались особой оригинальностью для талантливого человека. Инженер, старший инженер, начальник лаборатории, начальник отдела.



М. М. Трифонов

двух десятков подсистем проектирования отдельных изделий СВЧ; создал работоспособный коллектив с широким полем деятельности. И все же решающим фактором того, что его карьера складывалась именно таким образом, было то, что лабораторию, в которую он пришел работать, возглавлял А. Н. Королев, будущий генеральный директор «Истока», который сразу поверил в силы молодого специалиста, во многом доверял и помогал Михаилу Михайловичу.

Когда начался период реформ в стране, перед М. М. Трифоновым, в то время молодым руководителем крупного подразделения, остро встал вопрос, как жить возглавляемому им подразделению дальше? САПГИС в условиях безденежья практически перестали финансировать, но самое непредсказуемое – прекратились и работы по изделиям оборонной промышленности. Многие в то время опустили руки. Да и сам Михаил Михайлович и его единомышленники не сразу нашли путь к выживанию. Были разработки автоматизированных систем для текстильного производства, «с нуля» спроектирован маршрутный компьютер для автомобилей ВАЗ, и даже было организовано его производство. Но они по разным причинам не стали определяющими в финансовой деятельности возглавляемого им коллектива.

Однако неудачи не остановили коллектив, руководимый Михаилом Михайловичем. Вместе со своими первыми помощниками Л. Е. Мишулиным, А. В. Ивановым, Н. Я. Мальковой-Хаимовой, Н. Ю. Моршневой, А. Ф. Горьковым, А. С. Артемьевым, А. В. Федичкиным, В. Э. Гринкевич, О. И. Красильниковой, В. С. Антипиным, Г. И. Анурьевой, С. Н. Михайловой, А. А. Федотовым с неиссякаемой энергией, с которой этот коллектив работал еще под руководством А. Н. Королева, М. М. Трифонов искал свой путь в выживании и не сдавался. Комплекс идей, который он «проповедовал», привлек к нему еще целый ряд специалистов, среди которых доктор экономических наук Б. В. Ракитин, кандидаты наук А. Г. Михеев, Г. А. Яковлев, С. В. Верба, А. В. Казаков, лауреат Государственной премии СССР А. Н. Евтюнин, Н. В. Карасиков, А. К. Сверчков, Т. Ю. Кауфман и Л. А. Кисарева, О. А. Ананич, Н. И. Лаврова, С. В. Лаврин, В. А. Ануфриев, Л. Ф. Матафонова и многие другие, искренне верившие в недюжий талант своего руководителя.

Основным направлением, определившим научно-техническое лицо коллектива, стало медицинское приборостроение, в частности проектирование и производство диагностической аппаратуры для внутрижелудочной рН-метрии. Разработка микропроцессорного ацидогастрометра

«Гастротест», начатая по предложению кандидата технических наук В. Н. Калюжного, дала мощный импульс целому комплексу работ.

В январе 1993 года был создан филиал «Истока» – НПП «Исток-Система», а в марте 1995 г. – дочернее предприятие ЗАО «НПП «Исток-Система». Внутри предприятия появились нетрадиционные для государственных предприятий группы маркетинга, инноваций, сертификации и т. п. На серьезном уровне стал анализироваться рынок сбыта, в нетрадиционных областях устанавливаться новые связи. Сейчас ЗАО «НПП «Исток-Система» получило признание у всех ведущих российских гастроэнтерологов. Ни одно серьезное исследование кислотопродуцирующей и кислотонейтрализующих функций желудочно-кишечного тракта человека не обходится без его аппаратуры. Микропроцессорные компьютерные ацидогастрометры и ацидогастромониторы ЗАО «НПП «Исток-Системы» эксплуатируются во всех крупных медицинских учреждениях России, имеющих гастроэнтерологические отделения.

К несомненным достоинствам М. М. Трифонова, как руководителя, относится то, что он не останавливается на достигнутом. Как только НПП «Исток» получило важный и многообещающий заказ на производство изделий 50Э, Михаил Михайлович не остался в стороне, с новой энергией его коллектив взял на себя свою часть разработки, приостановленной 10 лет назад. Сегодня ЗАО «НПП «Исток-Система» – одно из тех предприятий, которые, привлекая деньги в город, обеспечивают заработную плату бюджетникам, пенсии – старшему поколению. На предприятии проводится специальная «молодежная» программа, в рамках которой фрязинцы – студенты старших курсов и молодые специалисты приглашаются на 3-месячную стажировку (оплачиваемую), в процессе которой они проходят обучение в различных разрабатываемых и производственных подразделениях предприятия.

Эффективно функционируя в условиях рыночной экономики, предприятие не отказывается от лучших традиций советского периода. Как пример, можно привести шефство над дошкольными учреждениями.

Успешная деятельность М. М. Трифонова по руководству предприятием сочетается с научной. Михаил Михайлович успешно защитил докторскую диссертацию. Фактом признания профессиональных заслуг является избрание его членом-корреспондентом Академии медико-технических наук РФ, награждение (в составе коллектива) золотой медалью Брюссельской выставки инноваций «Эврика – 2000».

Еще одно достоинство М. М. Трифонова – его активная жизненная позиция. На протяжении многих лет после окончания института в 1976 году он во время отпусков возглавлял на общественных началах молодежные (из бывших студентов) экспедиции по восстановлению уникальных деревянных храмов на территории Крайнего Севера. В постсоветский период М. М. Трифонов и его единомышленники (в числе которых был и А. К. Балыко) первыми в городе пригласили для беседы с учителями и школьниками Фрязинской средней школы № 2, где учились их дети, священника Сергея Александровича Киселева (отца Сергия), в настоящее время настоятеля храма Рождества Христова и больничного храма на территории Фрязинской центральной городской больницы имени М. В. Гольца. Широко известна моральная и материальная поддержка в настоящее время Михаилом Михайловичем семьи великого русского художника-передвижника Василия Дмитриевича Поленова, автора полусотен полотен, в том числе гениального «Московского двора». С 2001 по 2009 г. М. М. Трифонов избирался депутатом городского Совета г. Фрязино трех созывов. Научная и производственная деятельность Михаила Михайловича продолжается по сей день. Желаем ему новых побед и достижений!

### АНАТОЛИЙ АВКСЕНТЬЕВИЧ ТУРКЕВИЧ



А. А. Туркевич

В 2021 г. ушел из жизни Анатолий Авксентьевич Туркевич. Не стало талантливого и многогранно одаренного человека.

Туркевич А. А. родился 23 марта 1947 г. Проходную «Истока» Анатолий впервые перешагнул после окончания института в 1970 году. В Центральном бюро применений электровакуумных приборов (ЦБП ЭВП) он сразу проявил себя как мыслящий специалист, приняв активное участие в разработке нескольких стендов динамических испытаний, испытаний на долговечность и тренировки СВЧ-приборов.

В конце 70-х годов широкое распространение получили импульсные источники питания с преобразованием частоты питающей сети. В обеспечение работ государственной важности в 1981 году в особом конструкторском бюро машиностроения (ОКБМ) НПО «Исток» была создана специальная лаборатория под руководством А. А. Туркевича, основная задача которой состояла в разработке малогабаритных и высоконадежных источников питания для бортовой аппаратуры. Лаборатория с честью справилась с заданием и вторичные источники питания в составе уникальной аппаратуры в 1989 г. были переданы в производство.

Авторитет Анатолия Авксентьевича среди сотрудников предприятия резко вырос, и в том же году на конференции «Истока» он был избран председателем совета трудового коллектива (СТК) предприятия.

Последующие годы изменили страну, а вместе с ней и промышленные предприятия города. В мае 1994 г. В. П. Савченко был назначен главой администрации г. Фрязино, а на его место директора ГНПП «Циклон-Тест» был назначен А. А. Туркевич. Анатолий Авксентьевич с огромным энтузиазмом начал экономические преобразования, стремясь в короткие сроки повысить доход предприятия. В 1995 г. по приглашению фирмы «Хьюлетт Паккард» в рамках сотрудничества по «программе Гора – Черномырдина» он побывал в Калифорнии, где выступил с докладом «О сертификации радиоэлектроники в Российской Федерации». После его поездки в США количество заказов от зарубежных фирм значительно возросло.

Последующие успехи НПП «Циклон-Тест» были отмечены руководителями отрасли и страны. В 1997 г. А. А. Туркевич стал лауреатом премии Министерства оборонной промышленности за работы в области качества, а в 1999 г. он был награжден медалью ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени.

В течение многих лет Анатолий Авксентьевич был активным членом Совета директоров промышленных предприятий Фрязино, который согласно Уставу Фрязино является органом представительной власти города. Несколько лет он входил в руководство «Дирекции программ развития наукограда Фрязино».

В 1999 г. вышло в свет справочное руководство «Обеспечение электромагнитной безопасности при эксплуатации компьютерной техники», изданное авторским коллективом во главе с академиком Академии проблем качества А. А. Туркевичем.

Литературный талант Анатолия Авксентьевича проявлялся не только в научных изданиях. На протяжении многих лет он профессионально занимался поэтическим творчеством. Стихотворения

в его изданных семи сборниках содержательные, с глубоким пониманием жизни, с критической и иронической жилкой, удивительные по красоте языка и смелые по содержанию.

В 2005 г. А. А. Туркевич был избран президентом торгово-промышленной палаты наукограда Фрязино с его различными гражданскими, оборонными и научными предприятиями и проработал в этой должности более десяти лет.

Анатолий Авксентьевич был человеком отзывчивым, его отзывчивость исходила от самого сердца. Он любил людей и поэтому всегда стремился помочь любому человеку, который обращался к нему за помощью. При этом помощь его всегда была конкретной и информативно исчерпывающей. Анатолий Авксентьевич с любовью относился к супруге, дочери, внукам.

Нам будет не хватать видного разработчика приборов, руководителя наукой и производством, городскими организациями, талантливого человека, всю свою жизнь посвятившего людям.

### **БОРИС ЯКОВЛЕВИЧ КИСТИН**

Есть профессии, о которых не принято много говорить. Да и люди этих профессий подчас немногословны, зато дело свое знают досконально и не жалеют для него своих сил. Мы же, к сожалению, не всегда отмечаем этих людей. С другой стороны, если незаметна их работа, то это, пожалуй, и есть самая высокая оценка их профессионализма.

В конце 80-х годов ушел в отставку с поста заместителя генерального директора по режиму «Истока» Александр Дмитриевич Мельников. Спустя некоторое время на его место был назначен Борис Яковлевич Кистин, имевший два высших образования: техническое со специализацией в электронике, полученное в университете, и юридическое, полученное в академии. Борису Яковлевичу тогда было чуть за сорок, но, несмотря на относительную молодость, за его плечами была уже успешная деятельность на ответственной государственной работе. Служба на «Истоке», крупнейшем предприятии страны в области СВЧ-электроники, несомненно, явилась для него повышением в должности.

Обладая незаурядным организаторским талантом, Б. Я. Кистин смог не только достойно продолжить дело своих предшественников, но и на высоком уровне поддерживать режимные службы предприятия. Хотя делать это в те годы было очень непросто. На долю Бориса Яковлевича, как, впрочем, и на долю других членов дирекции «Истока», пришлось одни из самых тяжелых лет в жизни страны периода распада государства. Далекими от реальных проблем младореформаторами взламывались устои советского общества, рушились границы дозволенного. Средствами массовой информации велась настоящая война против армии и государственных тайн. Выдача секретов иностранным государствам считалась чуть ли не гражданским подвигом. В этой истерии потребовались личная смелость, твердость характера, честность и порядочность, чтобы противостоять этому разгулу предательства интересов государства. К счастью для нашего предприятия, Б. Я. Кистин не поддавался искушению и отстоял все, что на протяжении многих лет по праву считалось непоколебимым. При нем продолжали действовать все основные положения по сохранению государ-



Б. Я. Кистин

ственных тайн. Каждый документ, переводимый в разряд несекретного, тщательно анализировался и перепроверялся. Думаю, что благодаря этому, всеми силами поддерживаемому Борисом Яковлевичем подходу к важнейшему государственному делу, на предприятии была сохранена наша традиционная тематика, которая и в настоящее время позволяет «Истоку» не только существовать, но и планомерно развиваться.

Очевидную свою заслугу в том сам Борис Яковлевич никогда не считал чем-то сверхъестественным. По его мнению, он просто исполнял свои служебные обязанности. И тем не менее, добавлю, что не просто исполнял, а исполнял свято, честно и высокопрофессионально, при этом не вступая в противоречие со своей совестью.

Борис Яковлевич был очень скромным человеком. В пример тому вспоминаю характерный эпизод тридцатилетней давности. Когда в Югославии начались бомбардировки Белграда самолетами НАТО, все россияне были искренне встревожены этими событиями. Тогда ведь о возможных военных конфликтах на территории стран бывшего социалистического лагеря никто не мог даже подумать. Когда во Фрязино при моем участии был организован сбор средств для жителей Югославии, Б. Я. Кистин позвонил мне и предложил свою материальную помощь в виде довольно существенной суммы денежных средств. И попросил, чтобы без огласки... Было в этом неброском поступке что-то глубоко личное, исполненное по совести.

В жизни Борис Яковлевич был большим оптимистом. Его широкая открытая улыбка заражала окружающих, крепкое дружественное рукопожатие сразу располагало к нему собеседника. С искренним радушием относился он к сотрудникам, обратившимся к нему с просьбой или за помощью. По любому вопросу он старался максимально разобраться в существе дела, по-человечески стремился понять положение, в котором оказался сотрудник, и решить вопрос так, чтобы остался доволен и обратившийся, и предприятие и страна при этом не пострадала бы. Все это сейчас видится несколько неправдоподобно, если не учитывать те деликатные вопросы, с которыми обращались сотрудники к заместителю генерального директора по режиму.

Оставив по возрасту воинскую службу, Б. Я. Кистин был назначен сначала начальником отдела внешней кооперации, затем помощником генерального директора предприятия, а позднее А. Н. Королев возложил на Бориса Яковлевича ответственнейшую работу. Он в ранге заместителя генерального директора стал отвечать за внешне-экономическую деятельность «Истока». Роль Бориса Яковлевича в широчайших контактах нашего предприятия с зарубежными предприятиями и фирмами, думаю, сейчас понимает каждый сотрудник «Истока».

3 апреля 2022 года Б. Я. Кистину исполнилось бы всего 72 года. Борис Яковлевич немного не дожил до своего дня рождения.

Мы любили нашего товарища, друга, соратника, верой и правдой служившего «Истоку» и Отечеству, ратававшего за укрепление обороноспособности Советского Союза и России.

### **ВЛАДИМИР НИКОНОВИЧ РЫБКИН**

В. Н. Рыбкин родился 5 сентября 1943 года.

Вряд ли тогда в г. Орехово-Зуево Московской области его отец, электрик, и мать, ткачиха, могли помышлять, что один из восьми детей станет известным технологом и его работы создадут базу для многих технологических направлений в области СВЧ-электроники.

После окончания семилетки Владимир поступил в Ореховский индустриальный техникум. В то время много говорили и писали о всемогуществе химии. Гремел перефразированный ленинский

лозунг «Коммунизм – это Советская власть плюс электрификация и химизация всей страны». Владимир поступил на факультет «Технология пластмасс». Пластические массы все шире входили в жизнь советских людей и притягивали к себе умы и сердца молодых.

После завершения учебы в техникуме Владимир Никонович был призван на службу в группу Советских войск в Восточной Германии. В армии он получил специальность радиотелеграфиста и окончил подготовительные курсы для поступления в институт. До истечения трехлетнего срока службы В. Н. Рыбкин был направлен в Москву для поступления в Московский химико-технологический институт имени Д. И. Менделеева. На факультете «Силикатные материалы» его привлекла новая специальность «Материалы квантовой электроники». А его дипломная работа была посвящена технологии выращивания кристаллов с электрическим управлением плоскости поляризации. Такие кристаллы



В. Н. Рыбкин

начали широко использоваться в бурно развивающейся телевизионной промышленности страны. Свое образование Владимир Никонович совершенствовал, поднимаясь по ступенькам новых технологических направлений. Стремление к новому и неизведанному помогло ему в дальнейшем в научной, производственной и изобретательской деятельности на «Истоке», куда он был распределен после окончания института в 1971 году.

Отделом 280, где начал свою трудовую деятельность молодой специалист, руководил кандидат технических наук, лауреат Ленинской премии Виталий Николаевич Батыгин, впоследствии главный инженер «Истока». В лаборатории Ольги Алексеевны Котюргинной активно проводились работы по выращиванию монокристаллов окисла алюминия – лейкосапфира (сапфира) с относительной диэлектрической проницаемостью порядка 10 и сверхтонких неколющихся пластин для производства гибридных интегральных схем СВЧ. Руководил этим направлением молодой ученый, кандидат технических наук Владимир Иванович Куликов, впоследствии главный технолог «Истока». На вооружение была взята и освоена технология, разработанная в Институте кристаллографии АН СССР, по выращиванию объемных кристаллов сапфира. Однако к ней потребовались новые, «свежие» идеи, позволяющие изготавливать из сапфира сверхтонкие слои и профильные изделия, широко используемые в технике. Владимир Никонович, которому было поручено это направление, быстро вошел в курс дела и всей душой проникся к сапфиру, этому новому и многообещающему материалу, поскольку сапфир, во-первых, имел малые диэлектрические потери и, во-вторых, из него можно было изготавливать детали толщиной 100 мкм, что чрезвычайно важно для изделий техники СВЧ. В то же время сам процесс выращивания сапфира потребовал от технолога В. Н. Рыбкина и его сотрудников больших усилий. Однако, благодаря настойчивости и изобретательности начальника группы в сложнейшем направлении технологии изготовления уникального материала, задача была выполнена полностью и, что очень важно для военных заказчиков, в положенные сроки.

Параллельно с сапфировой тематикой на группу ведущего инженера В. Н. Рыбкина была возложена еще одна важная задача – создание технологии изготовления монокристаллов карбида кремния. Как показали теоретические исследования лауреата Ленинской премии Александра Семеновича Тагера, по своим параметрам этот полупроводниковый материал превосходил и

кремний, и арсенид галлия, из которых в эти годы изготавливались СВЧ-транзисторы. На этом пути Владимир Никонович столкнулся с трудностями, на порядок превышающими трудности при изготовлении сапфира. Однако его изобретательность и огромная трудоспособность позволили их успешно преодолеть, и на «истоковском» карбиде кремния, полученном В. Н. Рыбкиным и его сотрудниками, впервые в стране сотрудник отдела 220 кандидат технических наук, лауреат премии Ленинского комсомола Владимир Алексеевич Гудков изготовил и исследовал уникальный СВЧ-транзистор.

В 1985 году Владимир Никонович возглавил лабораторию в отделе 280. По времени это совпало с начавшимися «реформами» в стране и связанными с ними сложностями в научных и технических исследованиях. В начале 90-х годов из-за отсутствия финансирования работы над совершенствованием сапфира и карбида кремния были приостановлены. Ответственность перед коллективом лаборатории, численность которой составляла 20 человек, заставила Владимира Никоновича искать другие пути реализации возможностей лаборатории. От технологии выращивания монокристаллов пришлось перейти к технологии создания новых керамических материалов. Начало этому пути положили труды Л. В. Невской, В. П. Иванова, Х. У. Ченцовой, В. Н. Батыгина, О. А. Котюргинной, И. В. Иноземцевой и других выдающихся сотрудников отдела 280, разработавших уникальные керамики 102, 22ХС, А-995, КТ-30, ЦТО, 2БТ-9. Последние два материала использовались для создания диэлектрических резонаторов (ДР). Постоянно меняющиеся области применения ДР требовали создания все новых и новых материалов. На решение этих проблем и были направлены усилия лаборатории В. Н. Рыбкина. Прежде всего была усовершенствована керамика ЦТО с целью расширения диапазона значений технических параметров. Другим достижением В. Н. Рыбкина и возглавляемого им коллектива стало создание новой керамики, БЦНТ, с добротностью ДР на ней, вдвое превышающей добротности ДР из ЦТО. Это позволило продвинуться в область более высоких частот. Наконец, в 2002 году была получена керамика БСТ, с более высокой величиной диэлектрической проницаемости. Из этой керамики на низких частотах удалось получить миниатюрные изделия. Работы в этом направлении успешно продолжаются и в настоящее время.

Рыбкин В. Н. является автором 57 работ: 14 научных статей, 17 изобретений, 10 рационализаторских предложений, 15 научно-технических отчетов, 1 учебного пособия по диэлектрическим резонаторам для изделий электронной техники СВЧ-диапазона.

*Статья поступила 10 октября 2022 г.*

## ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

статей, опубликованных в течение 2022 г. в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника»

### I. История

1. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – «Исток» – кузница выдающихся отечественных ученых. – Вып. 1 (552). – С. 81 – 103.
2. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Гордое имя «истоковец». – Вып. 3 (554). – С. 73 – 100.
3. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Женщины-ученые «Истока». – Вып. 2 (553). – С. 100 – 117.
4. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко Т.А.* – Начальники подразделений «Истока». – Вып. 4 (555). – С. 79 – 96.

### II. Краткие сообщения

1. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – Метод решения систем линейных неоднородных дифференциальных уравнений. – Вып. 3 (554). – С. 69 – 72.
2. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – О физических константах. – Вып. 1 (552). – С. 77 – 80.
3. *Балыко А.К., Терешкин Е.В., Балыко И.А.* – Свойства периодических дробей. Часть 3. – Вып. 2 (553). – С. 96 – 99.

### III. Медицинская электроника

1. *Борисенко Г.Г., Полников И.Г., Казаринов К.Д.* – Микроволновое излучение повышает чувствительность онкологических клеток к апоптотическим стимулам. – Вып. 1 (552). – С. 70 – 76.
2. *Гусев А.А., Власова И.И., Полников И.Г., Казаринов К.Д.* – Изучение морфологического состояния клеток крови после КВЧ-облучения. – Вып. 3 (554). – С. 64 – 68.
3. *Чеканов А.В., Щелконогов В.А., Баранова О.А., Полников И.Г., Казаринов К.Д.* – Антиагрегантная эффективность микроволнового излучения. – Вып. 2 (553). – С. 90 – 95.

### IV. Радиоэлектронные устройства

1. *Драч В.Е., Кондратов Д.А., Шмелькова А.А.* – Перспективные конструкции фрактальных антенн. – Вып. 1 (552). – С. 55 – 63.
2. *Коломин В.М., Рыбкин В.Н., Фомина Г.В., Иовдальский В.А., Карасёв Н.С., Смирнова А.А.* – Совершенствование установки для измерения температурного коэффициента частоты диэлектрических резонаторов. – Вып. 1 (552). – С. 64 – 69.
3. *Скобелин А.А.* – Требования к характеристикам временных измерений пространственно разнесенных квантовых стандартов частоты. Предложения по реализации прибора для сравнения шкал времени космических аппаратов. – Вып. 1 (552). – С. 39 – 54.

## V. Твердотельная электроника

1. *Богданов С.А.* – Использование математического аппарата теории искусственных нейронных сетей при разработке нелинейных моделей полевых транзисторов. – Вып. 2 (553). – С. 21 – 31.

2. *Богданов С.А., Латин В.Г., Лукашин В.М., Карпов С.Н., Пашковский А.Б., Рогачёв И.А., Терёшкин Е.В., Бакаров А.К., Журавлев К.С., Протасов Д.Ю.* – Цифровые барьеры и их перспективы в развитии мощных полевых транзисторов с двухсторонним донорно-акцепторным легированием в миллиметровом диапазоне длин волн. – Вып. 3 (554). – С. 22 – 37.

3. *Богданов С.А.* – Перспективные приборы для цифровых и аналоговых устройств современных систем связи. – Вып. 2 (553). – С. 32 – 42.

4. *Горюнов И.В., Иовдальский В.А., Фёдоров Н.А., Медянкова Е.В.* – Улучшение массогабаритных характеристик ГИС СВЧ-диапазона генераторного модуля. – Вып. 4 (555). – С. 51 – 63.

5. *Горюнов И.В., Иовдальский В.А., Фёдоров Н.А., Терёшкин Е.В., Медянкова Е.В.* – Гибридная интегральная схема генераторного модуля СВЧ-диапазона. – Вып. 1 (552). – С. 33 – 38.

6. *Карушкин Н.Ф., Обухов И.А.* – Источники излучения на лавинно-пролетных диодах в миллиметровом диапазоне длин волн. Часть I. – Вып. 1 (552). – С. 6 – 19.

7. *Карушкин Н.Ф., Обухов И.А.* – Источники излучения на лавинно-пролетных диодах в миллиметровом диапазоне длин волн. Часть II. – Вып. 2 (553). – С. 6 – 20.

8. *Лукашин В.М.* – Особенности формирования Г- и Т-затворов в DA-DpHEMT. – Вып. 1 (552). – С. 20 – 32.

9. *Лукашин В.М., Пашковская И.В.* – Эффективный теплоотвод для DA-DpHEMT на основе алмазного покрытия заземляющих отверстий. – Вып. 3 (554). – С. 13 – 21.

10. *Панас А.И., Чигарев С.Г., Вилков Е.А., Бышевский-Конопко О.А., Загорский Д.Л., Долуденко И.М., Фомин Л.А.* – Тепловое и динамическое излучение в терагерцовом диапазоне при спиновой инжекции током в магнитных переходах. – Вып. 3 (554). – С. 6 – 12.

11. *Терёшкин Е.В.* – Перспективы использования обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами в миллиметровом диапазоне длин волн. – Вып. 4 (555). – С. 64 – 78.

## VI. Технология и материаловедение

1. *Алексеев В.И., Богомолова Е.А., Васильев В.И., Калёнов Д.С., Карасёв Н.С., Коломин В.М., Насонов В.А., Пархоменко М.П., Рыбкин В.Н., Федосеев Н.А.* – Особенности измерения параметров керамики с высокой диэлектрической проницаемостью в прямоугольном волноводе. – Вып. 2 (553). – С. 64 – 71.

2. *Бабкова Н.И., Баймагамбетова Л.Т., Богачев Р.Ю., Горшкова Е.В., Кириченко Д.И., Шестеркин В.И.* – Технология пайки деталей из искусственных графитов с керамикой ВК-94-2. – Вып. 2 (553). – С. 72 – 77.

3. *Воробьев Д.И., Каргашин Ю.Д., Кулиев М.В., Приступчик Н.К., Куликова И.В., Галдецкий А.В., Соловьев Н.А.* – Разработка и исследование устройства отвода тепла, обеспечивающего функционирование АФАР при проведении стендовых испытаний. – Вып. 4 (555). – С. 15 – 22.

4. *Воронков О.В., Гаврилов М.М., Кожин С.П., Куприянов З.П., Куприянов П.В., Силаев С.А., Терешкин Е.В.* – Некоторые инженерные аспекты технологии квадратурных АФАР. – Вып. 3 (554). – С. 44 – 54.

5. *Вяхирев В.Б.* – Применение измерителя-анализатора Л2-109 для измерения теплового сопротивления СВЧ-двухполюсников. Часть 2. – Вып. 4 (555). – С. 6 – 14.

6. *Дубкова А.С., Рябов В.Н., Тарасов И.В., Хахин Н.Б.* – Эпитаксиальные структуры кремния для СВЧ-приборов. – Вып. 2 (553). – С. 58 – 63.

7. *Ермаков А.В., Костишин В.Г., Налогин А.Г., Васильев А.Л.* – Исследование возможности применения многослойных композитов  $\text{Co-Mo-Cu}$  и  $\text{Cu-MD}_{40}\text{-Cu}$  в качестве теплоотводов СВЧ-приборов. – Вып. 2 (553). – С. 78 – 89.

8. *Коломин В.М., Рыбкин В.Н., Фомина Г.В., Карасёв Н.С., Иовдальский В.А., Смирнова А.А.* – Способ изготовления диэлектрических резонаторов СВЧ. – Вып. 4 (555). – С. 23 – 29.

9. *Парамонов В.С., Лябин Н.А., Осотов О.В., Клименко В.И., Парамонова Г.М., Виноградов К.Ю., Долгих К.О., Чурсин А.Д., Колоколов И.С.* – Опыт и результаты использования АЛТУ «Каравелла» для раскроя припоев изделий СВЧ-техники. – Вып. 3 (554). – С. 38 – 43.

## VII. Электровакуумные приборы

1. *Асташов С.Г., Арефьев А.С., Пугнин В.И., Бурдина Т.Н., Мельников С.А., Федотов А.В., Юнаков А.Н.* – Исследование возможности модернизации коллектора мощного многолучевого клистрона. – Вып. 2 (553). – С. 43 – 48.

2. *Петросян А.И., Алексеева Н.А., Роговин В.И., Чистяков И.А.* – Расчет влияния начальных тепловых скоростей электронов на ток пучка, формируемого электронной пушкой. – Вып. 4(555). – С. 43 – 50.

3. *Семенов С.О., Роговин В.И., Рафалович А.Д., Кириченко Д.И.* – Анализ теплового режима спутниковой ЛБВ  $Ka$ -диапазона с охлаждением коллектора излучением. – Вып. 2 (553). – С. 49 – 57.

4. *Сидоров Д.А., Иванов А.А., Розенталь Р.М.* – Экспериментальное наблюдение режимов самосинхронизации мод в спиральной ЛБВ с запаздывающей обратной связью. – Вып. 3 (554). – С. 55 – 63.

5. *Шалаев П.Д., Щербаков Ю.Н., Калачев А.Д.* – Повышение КПД ламп бегущей волн и клистронов в радиопередающих трактах с высокой линейностью характеристик. – Вып. 4 (555). – С. 30 – 42.

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

авторов, опубликовавших свои работы в «СВЧ-технике» – первой серии научно-технического сборника «Электронная техника» в течение 2022 г.

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

- Алексеева Н.А. VII.2  
Алексеев В.И. VI.1  
Арефьев А.С. VII.1  
Асташов С.Г. VII.1  
Бабкова Н.И. VI.2  
Баймагамбетова Л.Т. VI.2  
Бакаров А.К. V.2  
Балько А.К. I.1 – 4; II.1 – 3  
Балько И.А. II.1 – 3  
Балько Т.А. I.1 – 4  
Баранова О.А. III.3  
Богачев Р.Ю. VI.2  
Богданов С.А. V.1 – 3  
Богомолова Е.А. VI.1  
Борисенко Г.Г. III.1  
Бурдина Т.Н. VII.1  
Бышевский-Конопко О.А. V.10  
Васильев А.Л. VI.7  
Васильев В.И. VI.1  
Вилков Е.А. V.10  
Виноградов К.Ю. VI.9  
Власова И.И. III.2  
Воробьев Д.И. VI.3  
Воронков О.В. VI.4  
Вяхирев В.Б. VI.3  
Гаврилов М.М. VI.4  
Галдецкий А.В. VI.3  
Горшкова Е.В. VI.2  
Горюнов И.В. V.4, 5  
Гусев А.А. III.2  
Долгих К.О. VI.9  
Долуденко И.М. V.10  
Драч В.Е. IV.1  
Дубкова А.С. VI.6  
Ермаков А.В. VI.7  
Журавлев К.С. V.2  
Загорский Д.Л. V.10  
Иванов А.А. VII.4  
Иовдальский В.А. IV.2; V.4, 5; VI.8  
Казаринов К.Д. III.1 – 3  
Калачев А.Д. VII.5  
Каленов Д.С. VI.1  
Карасёв Н.С. IV.2; VI.1, 8  
Каргашин Ю.Д. VI.3  
Карпов С.Н. V.2  
Карушкин Н.Ф. V.6, 7  
Кириченко Д.И. VI.2; VII.3  
Клименко В.И. VI.9  
Кожин С.П. VI.4  
Колоколов И.С. VI.9  
Коломин В.М. IV.2; VI.1, 8  
Кондратов Д.А. IV.1  
Костишин В.Г. VI.7  
Кулиев М.В. VI.3  
Куликова И.В. VI.3  
Куприянов З.П. VI.4  
Куприянов П.В. VI.4  
Латин В.Г. V.2  
Лукашин В.М. V.2, 8, 9; VI.9  
Лябин Н.А. VI.9  
Медянцева Е.В. V.4, 5  
Мельников С.А. VII.1  
Налогин А.Г. VI.7  
Насонов В.А. VI.1  
Обухов И.А. V.6, 7  
Осотов О.В. VI.9  
Панас А.И. V.10  
Парамонова Г.М. VI.9

Парамонов В.С. VI.9  
Пархоменко М.П. VI.1  
Пашковская И.В. V.9  
Пашковский А.Б. V.2  
Петросян А.И. VII.2  
Полников И.Г. III.1 – 3  
Приступчик Н.К. VI.3  
Протасов Д.Ю. V.2  
Пугнин В.И. VII.1  
Рафалович А.Д. VII.3  
Рогачев И.А. V.2  
Роговин В.И. VII.2, 3  
Розенталь Р.М. VII.4  
Рыбкин В.Н. IV.2; VI.1, 8  
Рябов В.Н. VI.6  
Семенов С.О. VII.3  
Сидоров Д.А. VII.4  
Силаев С.А. VI.4  
Скобелин А.А. IV.3  
Смирнова А.А.. IV.2; VI.8  
Соловьев Н.А.. VI.3  
Тарасов И.В. VI.6  
Терешкин Е.В. I.1– 4; II.1– 3; V.2, 5, 11; VI.4  
Федосеев Н.А. VI.1  
Федотов А.В. VII.1  
Фёдоров Н.А. V.4, 5  
Фомина Г.В. IV.2; VI.8  
Фомин Л.А. V.10  
Хахин Н.Б. VI.6  
Чеканов А.В. III.3  
Чигарев С.Г. V.10  
Чистяков И.А. VII.2  
Чурсин А.Д. VI.9  
Шалаев П.Д. VII.5  
Шестеркин В.И. VI.2  
Шмелькова А.А. IV.1  
Щелконогов В.А. III.3  
Щербаков Ю.Н. VII.5  
Юнаков А.Н. VII.1

---

**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 опубликования (акт экспертизы).

2. Статья должна содержать:

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

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

3. Статья должна быть подготовлена в текстовом редакторе MS Word для Windows и передана в виде файла (формат .doc или .docs) по электронной почте, либо записанного на ФЛЭШ или оптическом (CD) носителе, и двух печатных экземпляров.

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см. При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

Сложные формулы набираются только в «Редакторе формул» Word. Непосредственно в 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 2023 г. (4 вып. в год). Стоимость подписки – 9600 руб., включая НДС (20 %).

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

Для оформления подписки необходимо 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 2023 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.

Подписано к печати 15.12. 2022 г.  
Отпечатано ИП Нуралиев Э.С.  
г. Фрязино

Усл. п. л. 12,5  
Уч.-изд. л. 13,0  
Индекс 36292

Формат 0×88<sup>1/8</sup>  
Тираж 500  
8 статей

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



**Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2022, вып. 4(555), с. 102**

**Подписной индекс 36292**

