



# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

**СВЧ - ТЕХНИКА**

ВЫПУСК 3 (567)

2025

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1

## СВЧ-ТЕХНИКА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

---

Выпуск 3(567)

2025

Издается с 1950 г.

---

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

# ELEKTRONNAYA TEKHNIKA

(Electronic Engineering)

SERIES 1

## SVCH-TEKHNIKA

(Microwave Engineering)

COLLECTION OF RESEARCH & TECHNICAL ARTICLES

---

Issue 3(567)

2025

Founded in 1950

---

*Editor-in-chief*

D.T.Sc. A.A. Borisov

Editorial staff:

C.T.Sc. S.V. Scherbakov (deputy editor-in-chief);

C.T.Sc. S.A. Zaitsev (deputy editor-in-chief);

D.Ph.M.Sc. A.I. Panas (executive secretary);

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.B. Pashkovsky;

D.T.Sc. K.G. Simonov;

C.T.Sc. S.B. Alexandrov, JSC «SP «Pulsar», Moscow;

D.T.Sc. L.I. Babak, TUSUR, Tomsk;

D.T.Sc. A.V. Baranov, JSC «SPE «Salut», Nizhny Novgorod;

D.T.Sc. S.A. Gamkrelidze, IMWFSE RAS, Moscow;

C.T.Sc. P.P. Kutsko, JSC «NIIET», Voronezh;

D.T.Sc. I.E. Lysenko, INEP ITA SFU, Taganrog;

D.Ph.M.Sc. A.V. Medved', IRE RAS, Fryazino;

C.T.Sc. V.M. Minnebaev, JSC «Microwave systems», Moscow;

C.Ph.M.Sc. V.I. Rogovin, JSC «RPC Almaz», Saratov;

D.E.Sc. M.V. Chekadanova, SEZ TIT «Istok», Fryazino;

C.T.Sc. A.Yu. Yuschenko, JSC «NIIPP», Tomsk

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

The journal is registered by the Federal Service for supervision in the field of communications, information technologies and mass media (certificate ПИ № 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-tehnika» being published in JSC «RPC «Istok» named after Shokin» since 1950, has been included into the «List of reviewed scientific publications in which the principal scientific results nominated for candidate's thesis and doctoral thesis must be published» (quartile 2).

## СОДЕРЖАНИЕ

### Твердотельная электроника

Фадеев К.К., Савельев Е.И. – Анализ возможности применения копланарных полосковых линий в ферритовых развязывающих устройствах высокого уровня мощности на сосредоточенных элементах.....	6
Карпов С.Н. – Математическая модель на основе метода Монте-Карло для прогнозирования электрофизических характеристик GaAs НЕМТ.....	15
Терешкин Е.В. – Оценка крутизны ВАХ полевых транзисторов на гетероструктурах с квантовыми ямами произвольной формы.....	40

### Радиоэлектронные устройства

Протасов В.И., Карасев М.С., Пойсов Д.А. – Влияние амплитудных распределений АФАР на шумовые характеристики сквозного приемного канала.....	50
Адиатулин А.В., Карасев М.С., Щеголев С.А., Полозов Д.Н. – Четырехканальный блок приемо-передатчика для перспективной РЛС.....	57
Гринев А.Ю., Поляков А.Д., Ильин Е.В. – Характеристики сканирования ФАР на основе мета-структурь с частичным отражением.....	61

### Технология и материаловедение

Иванова В.И., Ларионов М.И., Протченко А.И., Клинова А.И., Корнилов И.Д. – Исследование и получение термостабильных керамических материалов с высокой (свыше 80) диэлектрической проницаемостью.....	69
Рогачёв И.А. – Особенности формирования омических контактов в GaN МИС.....	75
Жабин Г.А., Логинов А.Б., Логинов Б.А. – Исследование шероховатости поверхности и эмиссионных свойств синтезированных покрытий (BaSrCa) $\text{CO}_3$ .....	89
Верченов В.С., Разин Д.А., Едунов Н.П., Сергеев К.Л., Шумкин С.С., Голубев С.Н., Ерешенко А.Е. – Оценка возможности получения диэлектрического зазора для сборок из постоянных магнитов Nd–Fe–B с повышенными требованиями к электропроводности и стойкости к внешним воздействующим факторам.....	97
Борисов А.А., Клюев С.Б. – Влияние диэлектрической проницаемости материала подложки на характеристики делителя мощности на основе щелевых линий передач.....	107
Вашин С.А., Рубан Е.А., Шапоренков А.А. – Улучшенная методика определения герметичности отпаянных ЭВП СВЧ с равными интервалами времени.....	112
Вашин С.А., Рубан Е.А., Шапоренков А.А. – Способ определения количественного и качественного состава газов, сорбированных внутривакуумной поверхностью отпаянных ЭВП..	117

## CONTENTS

### Solid-state electronics

<i>Fadeev K.K., Savylyev E.I.</i> – Analysis of the possibility of using coplanar strip lines in high-power ferrite decoupling units on lumped elements.....	6
<i>Karpov S.N.</i> – Mathematical model based on the Monte Carlo method for predicting GaAs HEMT electrophysical characteristics.....	15
<i>Tereshkin E.V.</i> – Estimation of the transconductance of heterostructures field-effect transistors with quantum wells of arbitrary shape.....	40

### Radioelectronic devices

<i>Protasov V.I., Karasev M.S., Poisov D.A.</i> – The influence of AESA amplitude distributions on noise characteristics of the end-to-end receiving path.....	50
<i>Adiatulin A.V., Karasev M.S., Shchegolev S.A., Polozov D.N.</i> – A four-channel transceiver unit for an advanced radar.....	57
<i>Grinev A.Yu., Polyakov A.D., Ilyin E.V.</i> – Characteristics of scanning phased array antenna based on partially reflective metastructure.....	61

### Technology and material science

<i>Ivanova V.I., Larionov M.I., Protchenko A.I., Klinova A.I., Kornilov I.D.</i> – Research and production of thermostable ceramic materials with a high (over 80) dielectric constant.....	69
<i>Rogachev I.A.</i> – Features of ohmic contacts formation in GaN MICs.....	75
<i>Zhabin G.A., Loginov A.B., Loginov B.A.</i> – Investigation of surface roughness and emission properties of synthesized (BaSrCa) <sub>CO<sub>3</sub></sub> coatings.....	89
<i>Verchenov V.S., Razin D.A., Edunov N.P., Sergeev K.L., Shumkin S.S., Golubev S.N., Ereshchenko A.E.</i> – Assessment of the possibility of obtaining a dielectric gap for assemblies of Nd–Fe–B permanent magnets with increased requirements to electrical conductivity and resistance to external affecting factors.....	97
<i>Borisov A.A., Klyuev S.B.</i> – The effect of the substrate material permittivity on characteristics of a power divider based on slot transmission lines.....	107
<i>Vashin S.A., Ruban E.A., Shaporenkov A.A.</i> – An improved method for determining the hermeticity of sealed-off microwave EVDs at equal time intervals.....	112
<i>Vashin S.A., Ruban E.A., Shaporenkov A.A.</i> – A method for determining the quantitative and qualitative composition of gasses sorbed by the intravacuum surface of sealed-off EVDs.....	117

---

# ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

---

УДК 621.372.832.8

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОПЛАНАРНЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ В ФЕРРИТОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ВЫСОКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

К. К. Фадеев, Е. И. Савельев

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

Рассмотрена проблематика проектирования линий передач электромагнитной энергии для ферритовых развязывающих устройств высокого уровня мощности на основе сосредоточенных элементов. Предложена новая топология копланарной полосковой линии с двумя проводящими слоями, предназначенной для использования в устройствах высокого уровня мощности. Проведен электродинамический анализ и выполнено сравнение предложенной конструкции с существующими решениями. Путем моделирования получены соотношения геометрических параметров новой линии, которые можно использовать для практических задач.

*КС: копланарная полосковая линия, высокий уровень мощности, ферритовое развязывающее устройство*

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING COPLANAR STRIP LINES IN HIGH-POWER FERRITE DECOUPLING UNITS ON LUMPED ELEMENTS

К. К. Fadeev, Е. И. Savelyev

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

The problems of designing electromagnetic energy transmission lines for high-power ferrite decoupling devices based on lumped elements are considered. A new topology of a coplanar strip line with two conductive layers is proposed, intended for use in high-power devices. An electrodynamic analysis and a comparison of the proposed design with existing solutions were performed. By modeling, the ratios of the geometric parameters of the new line are obtained, which can be used for practical tasks.

*Keywords: coplanar strip line; high-power level; ferrite decoupling unit*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В интегральных ВЧ- и СВЧ-устройствах распространено применение копланарной линии передач, схематическое изображение которой представлено на рис. 1. Особенность такой линии заключается в расположении проводников прямого и обратного тока на одном слое. Это позволяет подключать электронные компоненты параллельно к передающему тракту без необходимости использования переходных отверстий между верхним и нижним проводящим слоем для заземления выводов [1], что является обязательным в случае микрополосковых линий. Кроме того, копланарные линии обеспечивают более высокую степень экранирования и меньшие потери в СВЧ-диапазоне.

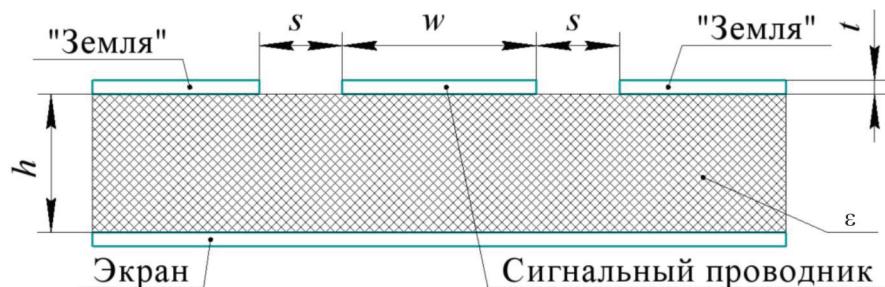


Рис.1. Поперечное сечение экранированной копланарной линии передач:  
 $w$  – ширина сигнального провода;  $s$  – зазор между проводниками;  $t$  – толщина проводников;  
 $h^*$  – толщина подложки;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость подложки

Перечисленные свойства копланарной линии делают ее перспективной для применения в ферритовых развязывающих устройствах на сосредоточенных элементах. В таких устройствах требуется реализация согласующих цепей различной сложности, конфигурации, структуры и состава в зависимости от требуемых характеристик прибора. В схемах согласования известных на текущий момент изделий используются SMD или навесные компоненты, соединенные посредством микрополосковых (рис. 2, а) [2] или полосковых линий (рис. 2, б) [3]. Однако конструктивные особенности перечисленных типов линий накладывают ограничения на возможные варианты схем согласования, затрудняют достижение высокого уровня рабочей мощности, а также усложняют процесс сборки и настройки устройства в целом.

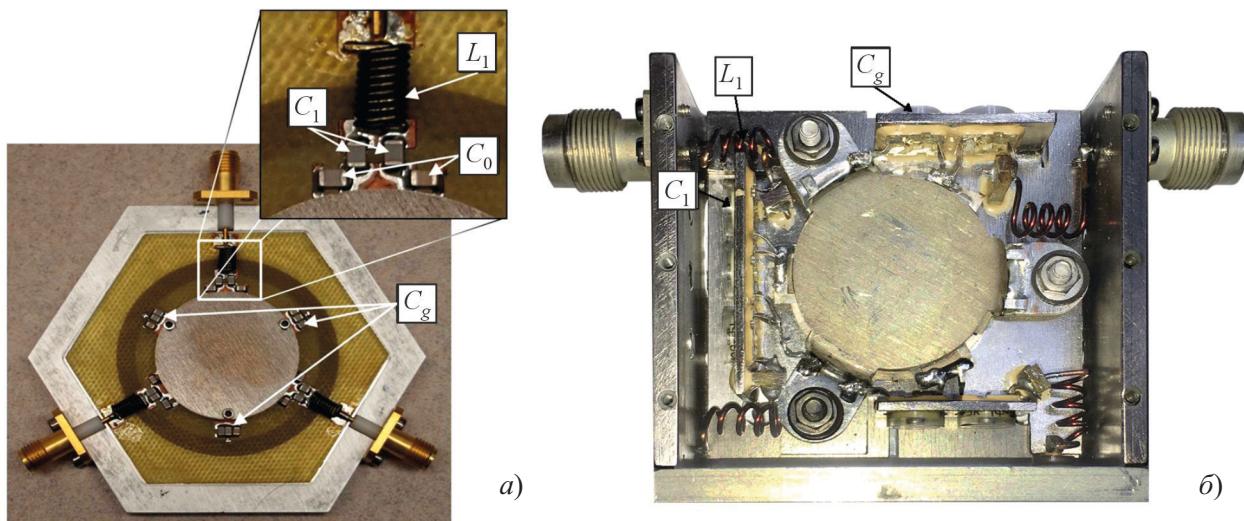


Рис. 2. Схемы подводящих линий в ферритовых развязывающих устройствах на сосредоточенных элементах:

*а* – низкого уровня мощности; *б* – среднего уровня мощности

С целью поиска оптимальных конструктивных решений были проведены исследования по использованию копланарных линий передач в ферритовых развязывающих устройствах на сосре-

\*Здесь и далее данным параметром обозначается диэлектрический зазор между экраном и ближайшим к нему проводником.

доточенных элементах. Результаты этих исследований отражены в данной статье и успешно применены при разработке циркуляторов высокого уровня мощности для метрового и дециметрового диапазонов длин волн. Применение копланарной полосковой линии позволяет получить устройства с уникальными электрическими и массогабаритными характеристиками, упрощенной конструкцией и технологией изготовления.

## 2. ПРОБЛЕМАТИКА ПРИМЕНЕНИЯ КОПЛАНАРНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧ В ФЕРРИТОВЫХ РАЗВЯЗЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Копланарная полосковая линия, за счет расположения сигнального и земляных проводников на одном слое с фиксированным расстоянием между ними, позволяет размещать SMD-компоненты (конденсаторы и индуктивности) как последовательно, так и параллельно непосредственно на передающем тракте. Однако существуют явные ограничения, связанные с типоразмером используемых компонентов и уровнем мощности передаваемого по линии сигнала.

Во-первых, для плотной и оптимальной по площади компоновки SMD-компонентов, размещения последних по обе стороны от центрального проводника и параллельного подключения нескольких из них последовательно передающему тракту требуется определенная ширина сигнального проводника  $w$ , зависящая от условного типоразмера  $a \times b$  элементов и необходимой монтажной области для их фиксации посредством паяного соединения (рис. 3). Как правило, чем выше уровень импульсной мощности сигнала, тем больше необходимый размер компонентов и соответственно большее значение ширины  $w$ . При высоких значениях средней мощности возможно использование нескольких компонентов меньшего номинала вместо одного большого, что позволяет распределить токи и тепловую нагрузку между элементами. Например, при проектировании реальных устройств для типоразмера конденсаторов  $2,79 \times 2,79$  мм выбрана ширина  $w = 9,2$  мм, а для типоразмера  $5,73 \times 6,35$  мм –  $w = 13$  мм. Принцип выбора типоразмера компонентов в зависимости от уровня мощности устройства подробно рассмотрен в отдельной статье [4].

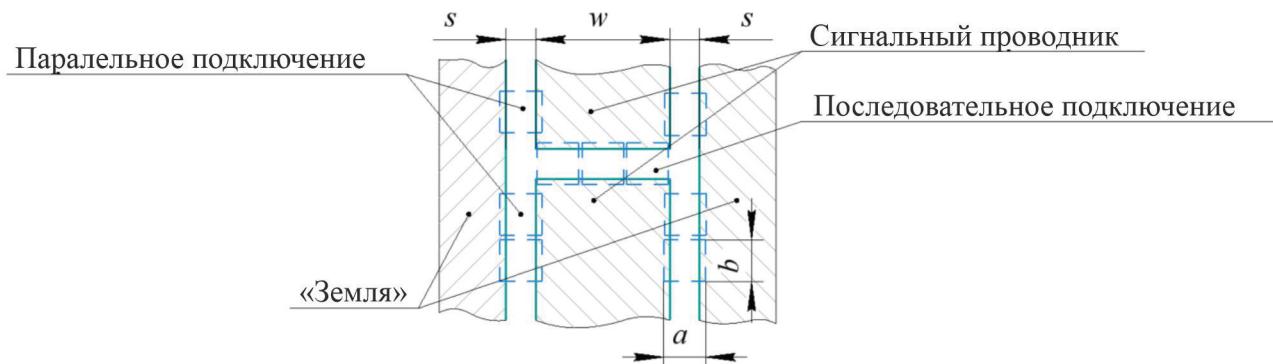


Рис. 3. SMD-компоненты условного типоразмера  $a \times b$  (мм)  
на копланарной линии передач

Во-вторых, ширина зазора  $s$  фиксированная, ее значение определяется условным типоразмером  $a \times b$  используемых компонентов. Применительно к реальным устройствам выбраны следующие значения:  $s = 2$  мм для типоразмера  $2,79 \times 2,79$  мм и  $s = 3$  мм для типоразмера  $5,73 \times 6,35$  мм, исходя из необходимого минимально возможного монтажного места для контактных площадок,

обеспечивающего требуемую прочность паяного шва. Аналогичный принцип определения ширины зазора  $s$  применим и для других типоразмеров электронных компонентов.

На рис. 4 представлены зависимости толщины подложки  $h$  от ширины проводника  $w$ , соответствующие волновому сопротивлению 50 Ом, для различных значений диэлектрической проницаемости подложки  $\epsilon$  и ширины зазора между проводниками  $s$ . Эти значения получены на основе известных соотношений для копланарной полосковой линии с экраном, выведенных методом конформных преобразований [1]. Из графиков видно, что в копланарной полосковой линии на диэлектрической подложке для увеличения ширины дорожки  $w$  до необходимых для устройств высокого уровня мощности значений (до 9 мм и выше) требуется значительное увеличение толщины подложки  $h$  либо использование материалов с низкой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Таким образом, в данном случае основным ограничивающим фактором для применения копланарной линии является достижение волнового сопротивления 50 Ом при требуемых значениях ширины проводника  $w$  и толщины подложки  $h$ .

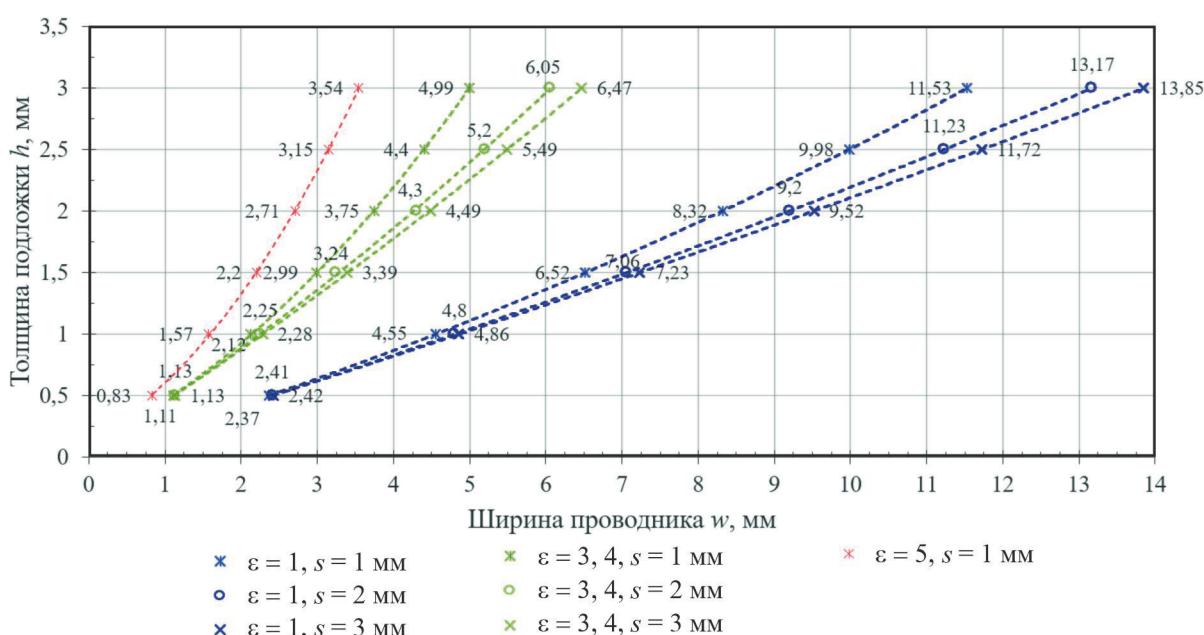


Рис. 4. Зависимости толщины подложки от ширины сигнального проводника, соответствующие волновому сопротивлению 50 Ом ( $t = 0,035$  мм)

Возможным решением вышеописанной проблематики является использование многослойной копланарной линии передач, в которой основным диэлектрическим слоем служит воздушный зазор, а второй слой, из полимерного или керамического диэлектрика с  $\epsilon \gg 1$ , – подложкой для проводящего слоя, обеспечивая общую жесткость всей конструкции. Схема такой передающей линии представлена на рис. 5. Проводящие полигоны располагаются на диэлектрической подложке толщиной  $h_1$  и образуют одностороннюю печатную плату, «подвешенную» в воздухе на заданной высоте  $h_2$  над металлическим экраном (например, корпусом прибора). Путем подбора величины  $h$  можно обеспечить волновое сопротивление 50 Ом для большого диапазона значений ширины проводника  $w$ . Математические формулы для расчета параметров многослойной копланарной линии приведены в [1].

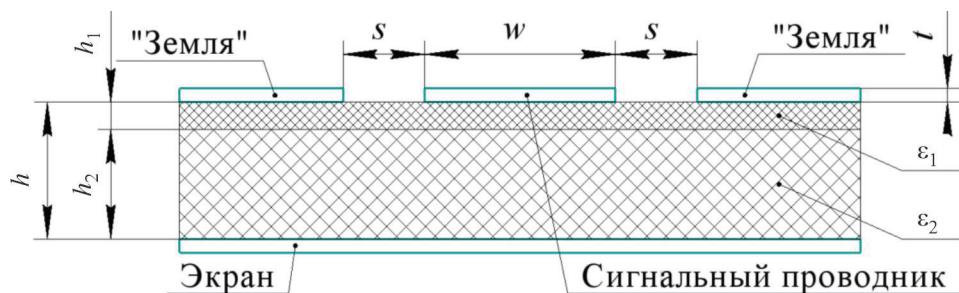


Рис. 5. Поперечное сечение копланарной линии передач на диэлектрической подложке, подвешенной в воздухе над проводящим экраном

### 3. КОПЛАНАРНАЯ ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧ С ДВОЙНЫМ СИММЕТРИЧНЫМ ПРОВОДЯЩИМ СЛОЕМ

Рассмотренная ранее многослойная копланарная полосковая линия позволяет достичь больших значений ширины проводника, однако все же не является оптимальной с конструктивной точки зрения. Во-первых, из-за отсутствия прямого контакта подложки с нижним проводящим экраном затруднен теплоотвод от платы, что крайне актуально для ферритовых устройств СВЧ, работающих на высоком уровне мощности. Во-вторых, односторонняя печатная плата без металлизации нижнего слоя обладает низкой механической прочностью, что не позволяет минимизировать ее толщину и снизить влияние материала подложки. Для устранения этих недостатков предлагается конструкция копланарной линии с двойным проводящим слоем, представленная на рис. 6.

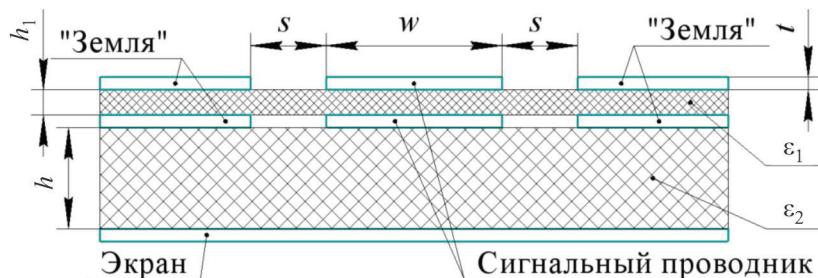


Рис. 6. Поперечное сечение копланарной линии передач с двойным проводящим слоем, «подвешенной» в воздухе над проводящим экраном

В предложенной топологии проводящие полигоны располагаются симметрично на обеих сторонах диэлектрической подложки толщиной  $h_1$ , образуя двустороннюю печатную плату. Плата конструктивно подвешена в воздухе на заданной высоте  $h$  над металлическим экраном, в качестве которого может выступать корпус прибора. Аналогично многослойной линии, подбором величины  $h$  можно обеспечить волновое сопротивление 50 Ом для большого диапазона значений ширины проводника  $w$ . Связь между двумя проводящими слоями обеспечивается через металлизированные переходные отверстия. Их количество, расположение и диаметр определяются исходя из требуемого распределения мощности сигнала по слоям платы. Для оптимальной работы передающей линии переходные отверстия необходимы рядом с контактными площадками электронных компонентов, в местах переходов на другие типы линий, а также на участках с нерегулярностями по волновому сопротивлению.

Предложенная конструкция была получена авторами эмпирическим путем в процессе поиска

технических решений, позволяющих избежать недостатков копланарной линии в классическом исполнении. По сравнению с копланарными линиями, представленными на рис. 1 и 5, данное конструктивное исполнение (см. рис. 6) обладает следующими явными преимуществами:

- улучшенный теплоотвод за счет увеличения площади металлизированной поверхности в два раза при тех же габаритных размерах;
- большая допустимая мощность благодаря увеличению эффективного сечения проводников в два раза;
- более плотная компоновка электронных компонентов за счет возможности их монтажа на обеих сторонах печатной платы.

В контексте ферритовых развязывающих устройств на сосредоточенных элементах, рассмотренная линия передач позволяет реализовать широкополосные схемы согласования с так называемой «изолированной землей» [3, 5] без усложнения конструкции, благодаря возможности электрически изолировать «землю» на плате от корпуса прибора.

#### 4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для сравнения характеристик рассматриваемых копланарных линий проведено трехмерное электродинамическое моделирование. На рис. 7 представлены анализируемые модели:

- копланарная линия на диэлектрической подложке (*а*);
- копланарная линия на воздухе (*б*);
- копланарная линия с двумя диэлектрическими слоями (*в*);
- копланарная линия с двумя симметричными проводящими слоями (*г*).

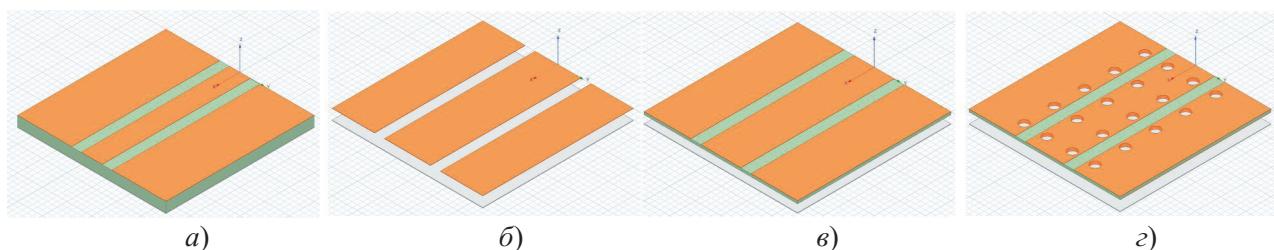


Рис. 7. Электродинамические модели копланарных линий передачи:  
*а* – на подложке; *б* – на воздухе; *в* – многослойная; *г* – с двумя проводящими слоями

Материалом подложки для вариантов (*а*), (*в*) и (*г*) выбран отечественный фольгированный СВЧ-диэлектрик ФД-СВЧ 3,4 (аналог Rogers серии RO4350B) с толщиной  $h = 0,5$  мм, диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3,4$ , тангенсом угла потерь  $\operatorname{tg} \delta = 0,003$  и толщиной металлизации  $t = 0,035$  мм. Для всех вариантов расстояние от сигнального слоя до экрана выбрано  $h = 2$  мм. Длина моделируемых отрезков линий составляет 3 см, а зазор  $s = 2$  мм фиксирован. Необходимое волновое сопротивление достигается путем оптимизации ширины сигнального проводника  $w$ .

Расчет моделей проводится в изолированном объеме без учета излучения электромагнитной энергии в окружающее пространство. Такое граничное условие выбрано исходя из применения линий подобного типа в закрытых экранированных корпусах изделий, а также для оценки погонных потерь (дБ/см), соответствующих предложенным условиям. В модели задан проводящий экран над копланарной линией на высоте 2 см для минимизации его влияния на согласование. В реальных устройствах геометрия корпуса и расстояние до экрана могут варьироваться, что необходимо учитывать при окончательном выборе ширины сигнального проводника.

Путем оптимизации получены следующие значения ширины сигнального провода  $w$  для высоты  $h = 2$  мм, соответствующие волновому сопротивлению  $50 \Omega$  ( $S11 \leq -45$  дБ в диапазоне частот от 0 до 1 ГГц):

- (а)  $w = 4,38$  мм (соответствует аналитическому на рис. 2);
- (б)  $w = 9,2$  мм (соответствует аналитическому на рис. 2);
- (в)  $w = 7,8$  мм (аналитически не рассчитывалось, формулы описаны в [1]);
- (г)  $w = 7,6$  мм (аналитические формулы отсутствуют).

На рис. 8 представлены зависимости прямых потерь от частоты сигнала для смоделированных линий передач. Видно, что предложенная конструкция копланарной полосковой линии (г) имеет значительно меньшие потери по сравнению с классическим вариантом на диэлектрической подложке (а) и близка к характеристикам линии без подложки (б). Это объясняется тем, что в предложенной конструкции основная часть энергии электромагнитного поля сосредоточена в воздушном зазоре между платой и экраном (рис. 9), что минимизирует диэлектрические потери, характерные для линий на подложке. В результате линия с двумя проводящими слоями демонстрирует высокую эффективность передачи сигнала, особенно в диапазоне высоких частот, что делает ее перспективной для применения в устройствах с высоким уровнем мощности.

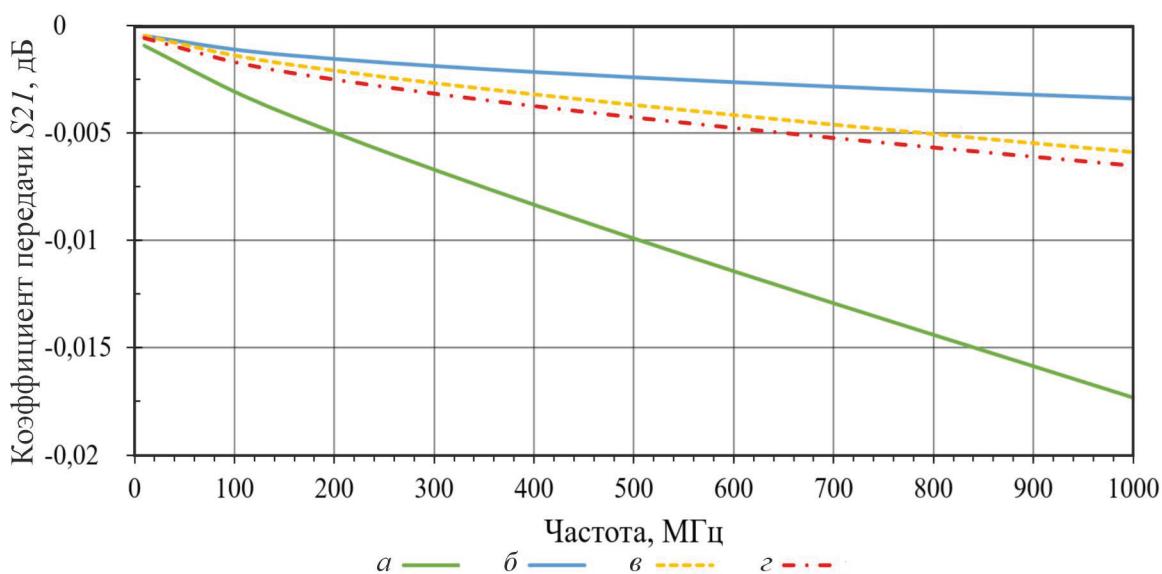


Рис. 8. Прямые потери смоделированных линий передач (длина линий – 3 см)

На рис. 9 показан характер распределения напряженностей электрического и магнитного полей в поперечном сечении линии с двумя проводящими слоями. Благодаря значительной ширине сигнальной дорожки, большая часть энергии электромагнитного поля сосредоточена под ней, в области между платой и экраном (корпусом прибора). Это связано с тем, что основная доля поля концентрируется в зоне с наименьшим импедансом, где расстояние между проводящими слоями минимально. Часть энергии распространяется в зазорах между сигнальной дорожкой и земляными полигонами, что характерно для копланарных линий. При этом лишь незначительная часть энергии распространяется над поверхностью платы, что свидетельствует о высокой степени экранирования и минимальных потерях на излучение. Такое распределение поля подтверждают полученные аналитические результаты.

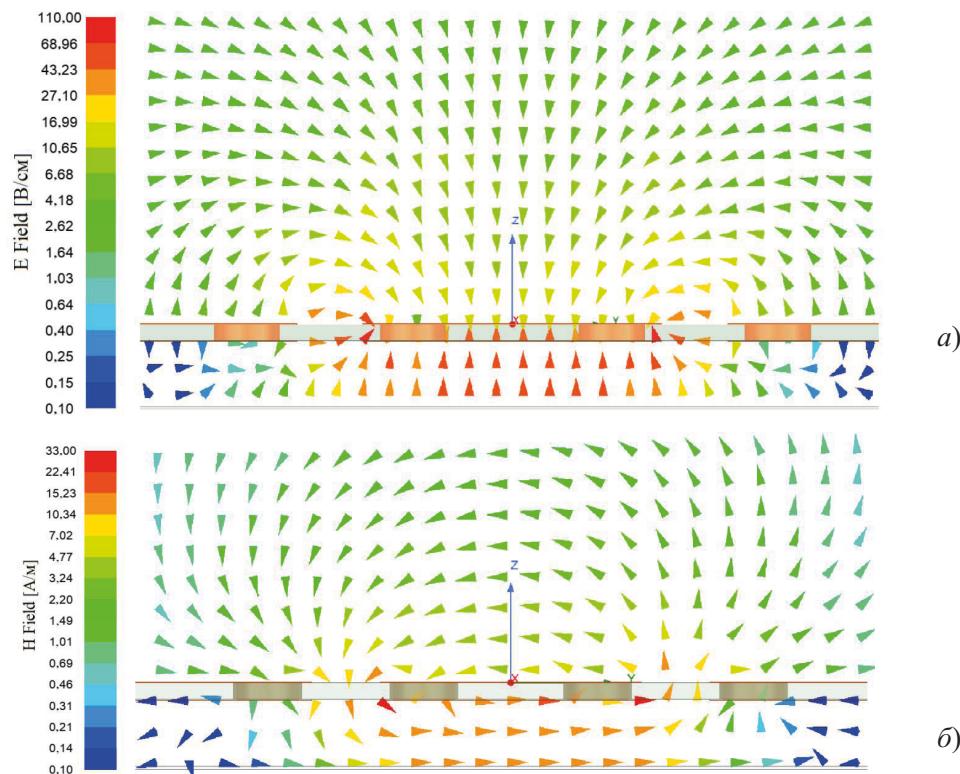


Рис. 9. Распределение векторов напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей в поперечном сечении линии

В связи с отсутствием теоретического аппарата для точных расчетов структуры копланарных линий предложенного типа (см. рис. 7, г) проведено электродинамическое моделирование в САПР при разных значениях ее геометрических размеров. Это позволило получить данные для дальнейшего использования при проектировании устройств на их основе. В частности, исследованы зависимости волнового сопротивления от ширины сигнального проводника  $w$  и высоты воздушного зазора  $h$  для двух значений зазора между проводниками:  $s = 2$  и 3 мм. На рис. 10 приведены результаты моделирования, а также для сравнения представлены теоретические соотношения для копланарной полосковой линии в воздухе (воздушная линия).

## 5. ВЫВОДЫ

Описана и смоделирована новая конструкция копланарной линии передач с низкими потерями, предназначенный для ферритовых СВЧ-устройств высокого уровня мощности.

Получены математические соотношения для выбора оптимальной геометрии предложенной линии на основе печатной платы особой конфигурации. Волновое сопротивление последней может быть настроено путем изменения расстояния между платой и элементом конструкции, выполняющим роль экрана, что обеспечивает дополнительную степень свободы при настройке основных электрических параметров вентилей и циркуляторов на основе копланарной линии.

Разработанная топология успешно применена в ферритовых развязывающих устройствах высокого уровня мощности на сосредоточенных элементах метрового и дециметрового диапазонов длин волн [5] и потенциально применима в ВЧ- и СВЧ-платах других радиотехнических устройств.

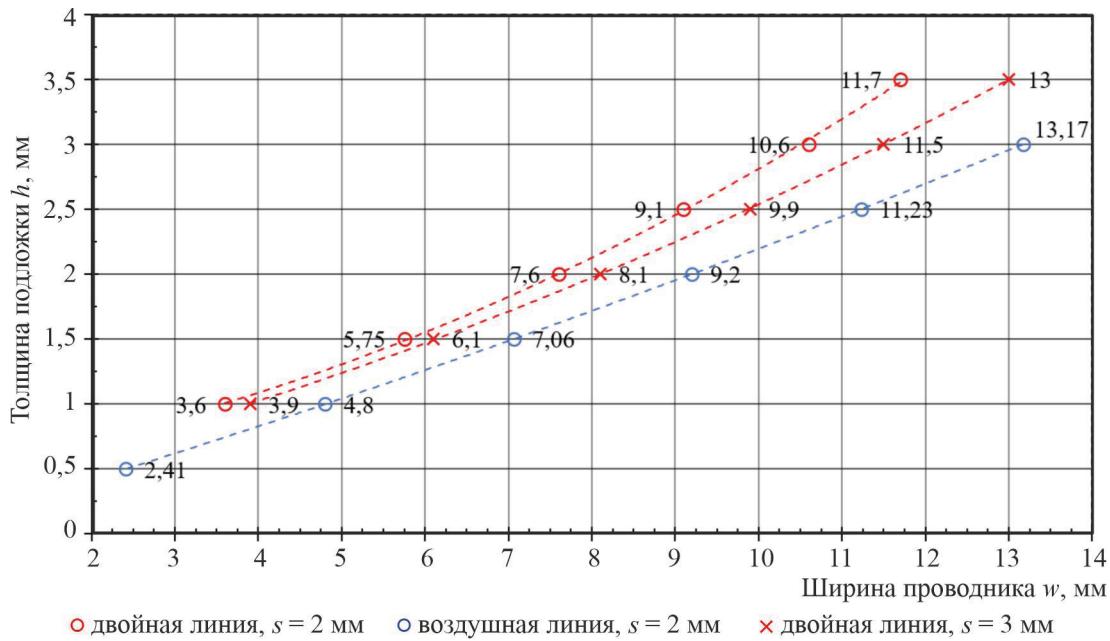


Рис. 10. Зависимости высоты воздушного слоя от ширины сигнальной дорожки, соответствующие волновому сопротивлению 50 Ом ( $t = 0,035$  мм)

На данный момент авторами не выявлены функциональные и конструктивные аналоги ферритовых развязывающих устройств на сосредоточенных элементах, в основе которых для передачи СВЧ-сигнала применяется копланарная линия и ее вариации. В номенклатуре циркуляторов и вентилей, выпускаемых известными отечественными производителями, сведения о подобных разработках либо серийно изготавливаемых приборах не найдены, иная информация в открытых источниках, публикациях, научных трудах и прочем отсутствует. Все вышеперечисленное позволяет с уверенностью утверждать о принципиально новом способе реализации ферритовых развязывающих устройств с указанными преимуществами при разработке приборов высокого уровня мощности, что было рассмотрено ранее в [4], [5] и найдет свое логическое продолжение в следующих статьях в рамках развития данной темы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Якушев, И. Ю.** Анализ однослойных и многослойных копланарных полосковых линий и волноводов / И. Ю. Якушев // Вестник СибГУТИ. – 2017. – № 4. – С. 73 – 83.
- Smith, Jacob R.** Optimization of a broadband VHF lumped-element ferrite circulator / Jacob R. Smith, Hang Dong, Jeffrey L. // Microwave and Optical Technology Letters. – July 2013. – Vol. 55, No 7. – P. 1476 – 1481.
- Dankov, P. I.** 150 W lumped-element VHF ferrite circulator / P. I. Dankov, L. Ilkov, E. Stoykov // Twelfth International Conference on Microwave Ferrites, Gyulechitsa, Bulgaria, 19–23 September 1994. – P. 217 – 221.
- Фадеев, К. К.** Особенности применения конденсаторов в ферритовых развязывающих устройствах высокого уровня мощности на сосредоточенных элементах / К. К. Фадеев, Е. И. Савельев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2025 – Вып. 2 (566). – С. 75 – 86.
- Фадеев, К. К.** Разработка широкополосного ферритового циркулятора на сосредоточенных элементах высокого уровня мощности для диапазона 225 – 400 МГц / К. К. Фадеев, Е. И. Савельев // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2024. – Вып. 4 (564). – С. 70 – 80.

Статья поступила 7 марта 2025 г.

УДК 51:621.315.592

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
GaAs НЕМТ**

**С. Н. Карпов**

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

Разработана имитационная двумерная математическая модель на основе метода Монте-Карло для прогнозирования электрофизических характеристик GaAs НЕМТ. Рассмотрены основные механизмы рассеяния, влияющие на транспорт носителей заряда в полупроводниковых гетероструктурах. Проведено моделирование GaAs НЕМТ различных конструкций, получено хорошее согласование с экспериментальными данными.

*КС: GaAs, DpHEMT, DA-DpHEMT, метод частиц, метод Монте-Карло, вольт-амперная характеристика*

**MATHEMATICAL MODEL BASED ON THE MONTE CARLO METHOD  
FOR PREDICTING GaAs HEMT ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS**

**S. N. Karpov**

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

An imitation two-dimentional mathematical model based on the Monte Carlo method for predicting GaAs HEMT electrophysical characteristics has been developed. The main scattering mechanisms which influence the transport of charge carriers in semiconductor heterostructures are considered. Various GaAs HEMT designs were modeled and good agreement with experimental data was obtained.

*Keywords: GaAs, DpHEMT, DA-DpHEMT, particle method, Monte Carlo method, current-voltage characteristic*

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время идет активное технологическое развитие СВЧ-электроники. Проводятся исследования перспективных полупроводниковых материалов с улучшенными характеристиками, например нитрида галлия, разрабатываются полупроводниковые приборы различных конструкций, однако это требует как большого количества времени, так и денежных средств. Ввиду этих причин, необходимы математические модели, способные корректно описывать физические процессы, протекающие в приборах, а также предсказывать их поведение.

Для описания протекания электрического тока в приборе используют модели, основанные на различных системах дифференциальных уравнений. В зависимости от того, каким способом описывается продольный транспорт носителей заряда в приборе, выделяют дрейфово-диффузционную, гидродинамическую и температурную модели, а также модель на основе решения кинетического уравнения Больцмана [1]. Стоит отметить, что перечисленные модели используют полуklassический подход к описанию статистики носителей заряда. Модели, использующие квантовый подход, могут являться модификациями моделей с полуklassическим подходом (квантовая

гидродинамическая модель и квантовая модель уравнения Больцмана), а также использовать принципиально другие подходы (модель на основе функций Грина и прямое решение уравнения Шредингера для многих тел). Однако квантовые модели требуют значительно больших вычислительных мощностей и временных затрат.

В настоящее время для полноценного анализа полупроводниковых приборов наиболее предпочтительными являются модели на основе решения кинетического уравнения. Основным методом, использующимся в данных моделях, является метод частиц, представленный в [2]. Метод активно применяется уже более 40 лет. Основным преимуществом метода является возможность заглянуть «внутрь» моделируемого прибора для наблюдения за протекающими процессами переноса и рассеяния электронов при различных входных параметрах модели. Так, например, можно оценить характеристики прибора как при экстремально низких температурах окружающей среды, так и при высоких, не прибегая к дорогостоящему эксперименту. Информация, полученная в ходе такого моделирования, позволяет лучше понимать физические процессы, происходящие в приборе, что может быть использовано для улучшения его характеристик. В работе рассматриваются особенности разработки модели на основе метода частиц и метода Монте-Карло в полуклассическом подходе для прогнозирования характеристик полупроводниковых приборов.

## 2. ОБЩИЙ ВИД МОДЕЛИ

Рассматриваемая модель основана на самосогласованном решении системы уравнений Больцмана-Пуассона:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} &= -\frac{\rho(x, y)}{\epsilon(x, y) \epsilon_0}, \\ \frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{\vec{F}}{\hbar} \frac{\partial f}{\partial k} &= \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{coll}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала;  $\phi$  – электростатический потенциал;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\rho = q(n - N_d + N_a)$  – плотность заряда;  $n, N_d, N_a$  – концентрации электронов, атомов донорной и акцепторной примесей соответственно;  $f(r, v, t)$  – одиночественная функция распределения;  $\vec{r}$  – вектор координат;  $\vec{v}$  – вектор скорости;  $t$  – время;

$\vec{F}$  – сила, действующая на частицу;  $\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{coll}$  – интеграл столкновений, описывающий изменение

функции распределения электронов по состояниям в результате их рассеяния. Интеграл столкновений рассматривается в приближении времени релаксации:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{coll} = \frac{f_0 - f}{\tau}, \quad (2)$$

где  $f_0$  – равновесная функция распределения. Стоит отметить, что в рамках модели уравнение Больцмана не решается напрямую, а используется для получения информации о состоянии электронной системы в 5-мерном пространстве (две пространственные координаты и три координаты пространства волновых векторов). Решение системы уравнений (1) основано на поочередном определении электростатического поля из уравнения Пуассона при заданном распределении

частиц в моделируемом пространстве и движении частиц в «замороженном поле» в течение временного шага  $\Delta t$ . Во время движения частицы рассеиваются на различных центрах рассеяния, что приводит к изменению направления их движения и энергий. Алгоритм решения системы уравнений (1) представлен в виде схемы на рис. 1. Диффузионные свойства электронной системы в модели описываются с помощью метода частиц; уравнение Пуассона решается методом конечных разностей (МКР); рассеяние электронов описывается с помощью метода Монте-Карло.

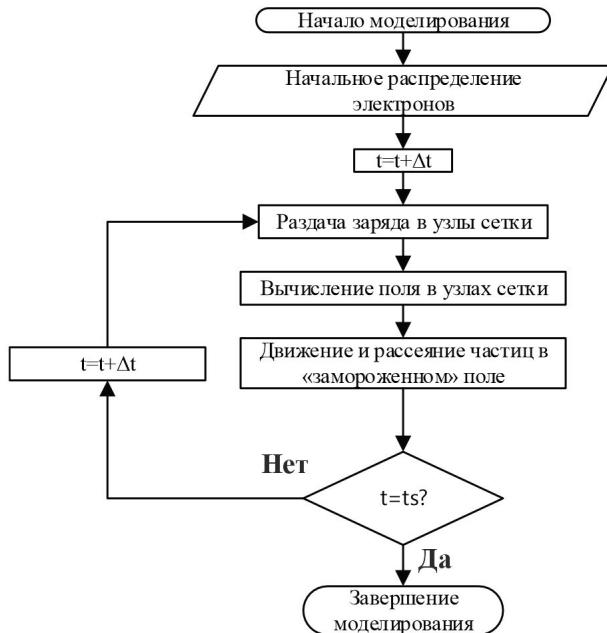


Рис.1. Алгоритм моделирования движения частиц. Величина  $ts$  соответствует общему времени движения частиц в модели

## 2.1. Решение уравнения поля

Моделируемая область транзистора, изображенная на рис. 2, представляет собой сечение его активной области. Ввиду использования МКР для решения уравнения Пуассона, проводилось разбиение пространственной сетки на прямоугольники с длиной сторон  $dx$  и  $dy$  по соответствующим координатным осям. В качестве граничных условий в областях, примыкающих к электродам, задавались условия 1-го рода:

$$\phi_i = 0; \phi_c = V_{ci}; \phi_z = V_{zi} - V_b, \quad (3)$$

где  $V_{ci}$ ,  $V_{zi}$  – напряжения сток-исток и затвор-исток соответственно;  $V_b = 0,669 + 1,036x$  – высота барьера Шоттки для  $Al_x Ga_{1-x} As$  барьера слоя. Для оставшихся границ (обозначены цифрами 1-5) задавались граничные условия 2-го рода:

$$\nabla_n \phi = 0, \quad (4)$$

где  $n$  – внутренняя нормаль к границе.

Определялся характер взаимодействия частиц с границами моделируемой области. Так, на границах 1–5 частица испытывает упругое отражение, а на границах электродов – поглощение. В областях истока и стока на каждом временном шаге инжектируются частицы для поддержания термодинамического равновесия, определяющегося равенством концентраций свободных носителей заряда и донорной примеси.

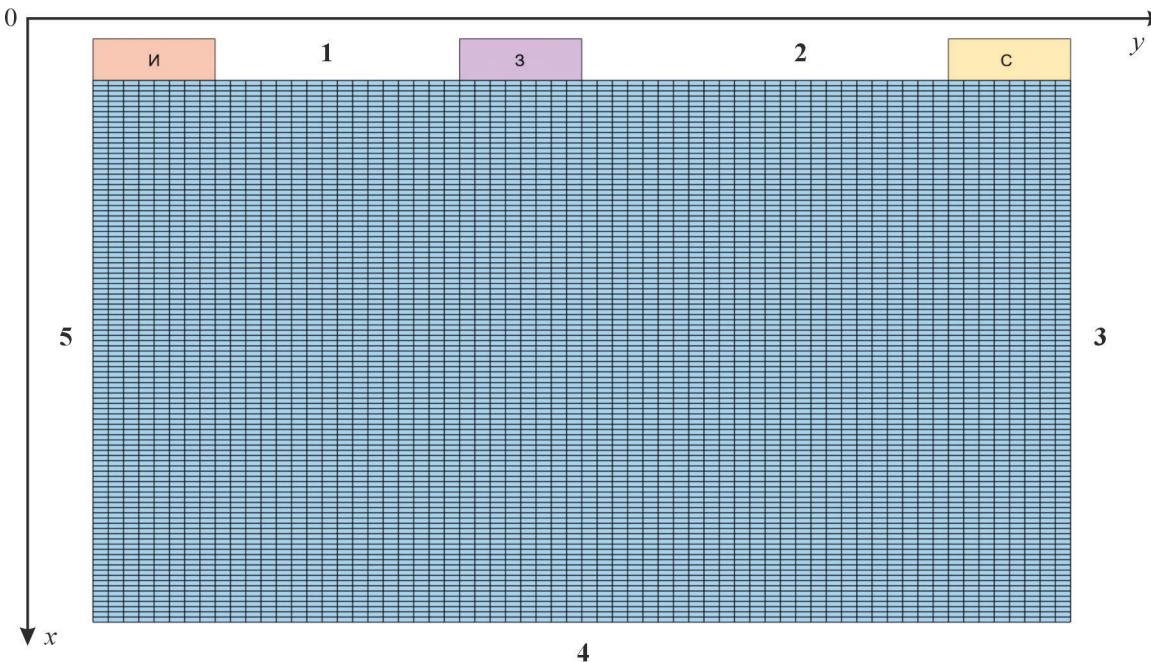


Рис. 2. Пространственная сетка и границы моделируемой области транзистора

Для дискретизации уравнения Пуассона использовалась пятиточечная схема типа «крест»:

$$\frac{\Phi_{i-1,j} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i+1,j}}{\Delta x^2} + \frac{\Phi_{i,j-1} - 2\Phi_{i,j} + \Phi_{i,j+1}}{\Delta y^2} = \frac{\rho_{b_{i,j}} - \rho_{i,j}}{\epsilon_{i,j}\epsilon_0}, \quad (5)$$

где  $i, j$  – номера узлов сетки по осям  $x$  и  $y$  соответственно;  $\Delta x, \Delta y$  – шаги сетки по осям  $x, y$ ;  $\rho_{b_{i,j}} = q(N_{d_{i,j}} + N_{a_{i,j}})$  – плотность заряда атомов примеси;  $\rho_{i,j}$  – плотность заряда свободных носителей. Визуализация сеточного шаблона схемы типа «крест» представлена на рис. 3.

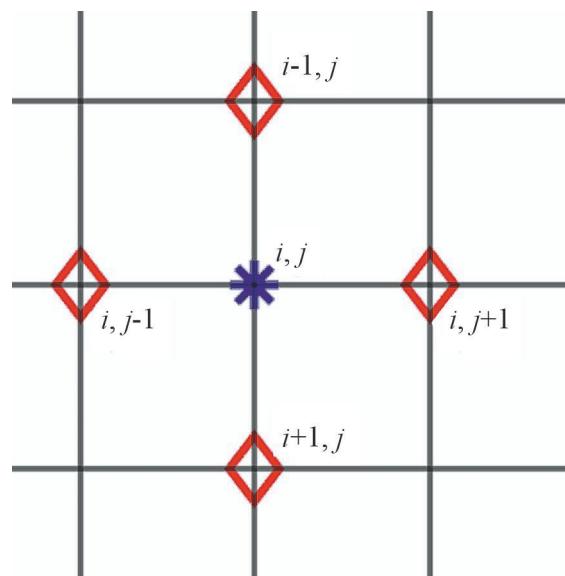


Рис. 3. Визуализация сеточного шаблона схемы типа «крест»

Каждая моделируемая частица представляет собой заряженный стержень и имеет плотность заряда:

$$d\rho = \frac{q \iint (N_d(x, y) + N_a(x, y)) dx dy}{Z}, \quad (6)$$

где  $Z$  – количество частиц, используемых при моделировании.

Для решения уравнения Пуассона необходимо вычислить вклад каждой частицы в плотность заряда в узлах сетки. В общем виде вклад заряда в узлы сетки описывает выражение:

$$\rho_p(x, y) = \frac{d\rho \cdot Q(x, y)}{\Delta x \cdot \Delta y}, \quad (7)$$

где  $Q(x, y)$  – схема распределения заряда. В предлагаемой модели распределение заряда в узлы сетки осуществляется по схеме CIC (*cloud-in-cell*, или облако в ячейке) [2], в которой заряд частицы распределяется между четырьмя ближайшими узлами обратно пропорционально расстоянию до них:

$$Q_p(x, y) = P\left(\frac{x - x_p}{\Delta x}\right)P\left(\frac{y - y_p}{\Delta y}\right), \quad (8)$$

где  $x, y$  – координаты узлов сетки;  $x_p, y_p$  – координаты частицы;  $P(z)$  – весовая функция схемы распределения заряда;  $z$  – аргумент весовой функции. Для CIC-схемы:

$$P(z) = \begin{cases} 1 - |z|, & |z| \leq 1, \\ 0, & |z| > 1. \end{cases} \quad (9)$$

Графическое представление распределения заряда в узлы сетки по CIC-схеме приведено на рис. 4.

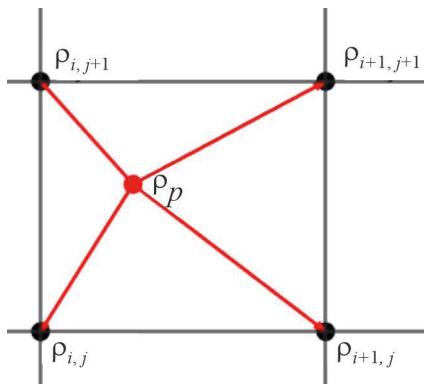


Рис. 4. Распределение заряда в узлы сетки по CIC-схеме

Суммарная плотность заряда свободных носителей в узле с координатами  $x, y$  определяется суммой вкладов каждой частицы, окружающей данный узел:

$$\rho(x, y) = \sum_{p=1}^N \rho_p(x, y). \quad (10)$$

Уравнение справедливо для всех внутренних узлов моделируемой области. Для граничных узлов вклад частиц составляет  $\rho(x, y)/2$ , если узел принадлежит боковой грани, и  $\rho(x, y)/4$ , если узел является угловым.

На основе решения уравнения Пуассона определяются проекции вектора напряженности электрического поля в узлах сетки:

$$E_{i,j}^x = -\frac{\partial \Phi_{i,j}}{\partial x}, \quad (11)$$

$$E_{i,j}^y = -\frac{\partial \Phi_{i,j}}{\partial y}. \quad (12)$$

Для определения напряженности электрического поля в точке  $(x_p, y_p)$  необходимо использовать одну из схем интерполяции. В модели используется интерполяция по схеме CIC:

$$E_p^x = \sum_{i,j} E_{i,j}^x P\left(\frac{x_{i,j} - x_p}{\Delta x}\right), \quad (13)$$

$$E_p^y = \sum_{i,j} E_{i,j}^y P\left(\frac{y_{i,j} - y_p}{\Delta y}\right), \quad (14)$$

где  $P(z)$  – весовая функция, аналогичная (9). Визуализация CIC-схемы интерполяции представлена на рис. 5.

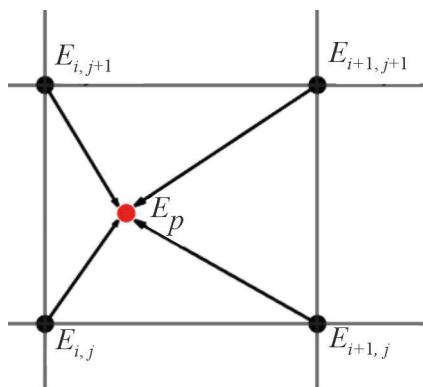


Рис. 5. Определение напряженности электрического поля, действующего на частицу

Волновой вектор частицы и ее перемещение в моделируемой области определяются из не-параболичного закона дисперсии:

$$W(1+\alpha W) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}, \quad (15)$$

$$k'_r = k_r - \frac{qE_p^r \tau}{\hbar}, \quad (16)$$

$$V'_r = \frac{\hbar k'_r}{m(1+2\alpha W)}, \quad (17)$$

$$r'_p = r_p + \frac{v'_r + v_r}{2} \tau, \quad (18)$$

где  $W$  – кинетическая энергия электрона;  $\alpha$  – коэффициент непараболичности;  $m$  – эффективная масса электрона;  $k'_r, k_r$  – проекции волнового вектора частицы на ось  $r$  в конце и начале свободного пробега соответственно;  $E_p^r$  – проекция вектора напряженности электрического поля на ось  $r$  в точке  $(x_p, y_p)$ ;  $\tau$  – время свободного пробега электрона;  $V'_r, V_r$  – скорость электрона в конце и начале свободного пробега;  $r'_p, r_p$  – координата электрона по одной из осей ( $x$  или  $y$ ) в конце и начале свободного пробега.

## 2.2. Механизмы рассеяния в полупроводниковых структурах

Ввиду особенностей кристаллической структуры полупроводниковых материалов, движение частиц в пределах временного шага можно представить в виде актов их свободного пробега, описываемых уравнениями (15)...(18), и столкновений с одним из центров рассеяния, определяемых уравнением (2). Схема алгоритма движения частицы за один временной шаг представлена на рис. 6. В начале каждой итерации определяются проекции вектора напряженности поля  $(E_p^x, E_p^y)$ , положение частицы  $(x_p, y_p)$ , проекции волнового вектора  $(k_p^x, k_p^y)$ , общее время свободного пробега  $dt'$ . В конце свободного пробега  $dt$  происходит акт рассеяния с соответствующим изменением волнового вектора и энергии частицы, после чего определяется новое  $dt$ . Цикл повторяется до тех пор, пока  $dt'$  не превысит шаг дискретизации по времени  $\Delta t$ . Величина этого превышения  $dt' - \Delta t$  запоминается и передается в следующую итерацию как новое значение  $dt'$ .

В общем случае время свободного пробега  $\tau$  не является постоянной величиной, а зависит от кинетической энергии частицы. Для удобства  $\tau$  заменяют на обратную величину, называемую частотой рассеяния, которая характеризует интенсивность столкновений за единицу времени:

$$\lambda(k) = \frac{1}{\tau(k)}. \quad (19)$$

Ввиду наличия в полупроводнике различных механизмов рассеяния, частота рассеяния  $\Lambda(k)$  является суммой частот рассеяния всех механизмов рассеяния:

$$\Lambda(k) = \sum_{i=1}^M \lambda_i(k), \quad (20)$$

где  $\lambda_i(k)$  – частота рассеяния для  $i$ -го механизма;  $M$  – количество механизмов рассеяния, использующихся в модели.

Частоты рассеяния находятся как средние для электронного коллектива для каждого механизма. Усреднение может быть проведено как по волновому вектору, так и по энергиям. В предлагаемой модели используются усредненные по энергии частоты рассеяния.

В общем случае зависимость частоты рассеяния от кинетической энергии электрона  $W$  можно представить следующим образом:

$$\lambda(W) = g(W)A(W(k)), \quad (21)$$

где  $g(W)$  – электронная плотность состояний;  $A(W(k))$  – параметр механизма рассеяния, зависящий от изотропности и эластичности процесса. Характерные механизмы рассеяния для полупроводников представлены на рис. 7. Механизмами, оказывающими наибольшее влияние на транспортные свойства электронов при комнатной температуре, являются акустическое, полярное оптическое, междолинное рассеяние, а также рассеяние на ионизированных примесях. Для тройных соединений  $A_x B_{1-x} C$  также играет роль рассеяние на несогласованностях решетки.

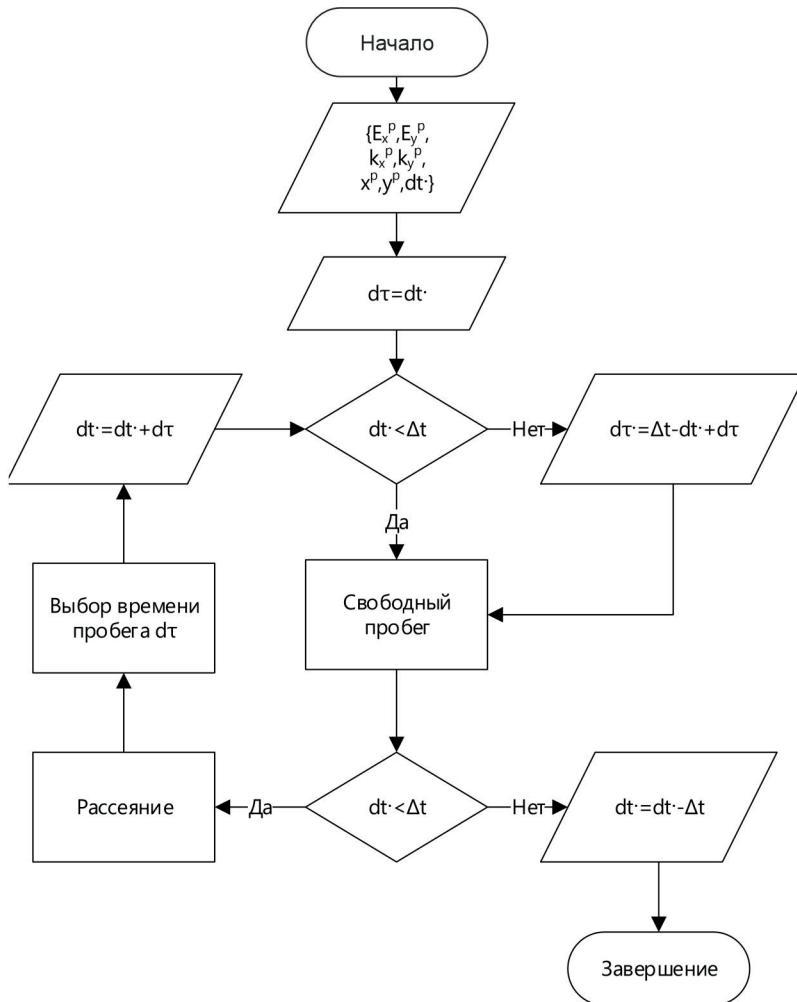


Рис. 6. Алгоритм движения частицы

В модели учитываются вышеуказанные механизмы рассеяния в  $\Gamma$ ,  $L$ ,  $X$  энергетических долинах с соответствующими им частотами рассеяния.

Частота рассеяния на акустических фононах задается следующей формулой [3]:

$$\lambda(W) = \frac{(2m)^{3/2} D_{ac}^2 k_b T}{2\pi\hbar^4 \rho v_{ac}^2} \sqrt{W(1+\alpha W)} \frac{(1+\alpha W)^2 + (1/3)\alpha^2 W^2}{1+2\alpha W}, \quad (22)$$

где  $D_{ac}$  – акустический деформационный потенциал;  $k_b$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура кристаллической решетки;  $\rho$  – плотность полупроводника;  $v_{ac}$  – скорость звука в кристалле.

Частота пьезоэлектрического рассеяния:

$$\lambda(W) = \frac{1}{8\hbar^2} \left( \frac{qP_z}{\epsilon_0 \epsilon_s} \right)^2 \frac{k_b T}{\rho v_s^2} \sqrt{\frac{2m}{W}} \frac{(1+2\alpha W)}{\sqrt{W(1+\alpha W)}} \ln \left| 1 + \frac{8mW(1+\alpha W)}{\hbar^2 k_d^2} \right|, \quad (23)$$

где  $P_z$  – пьезоэлектрическая константа;  $\epsilon_s$  – статическая диэлектрическая проницаемость;

$$k_d = \sqrt{\frac{q^2 N_d}{\epsilon_s \epsilon_0 k_b T}} \quad \text{– обратная дебаевская длина.}$$

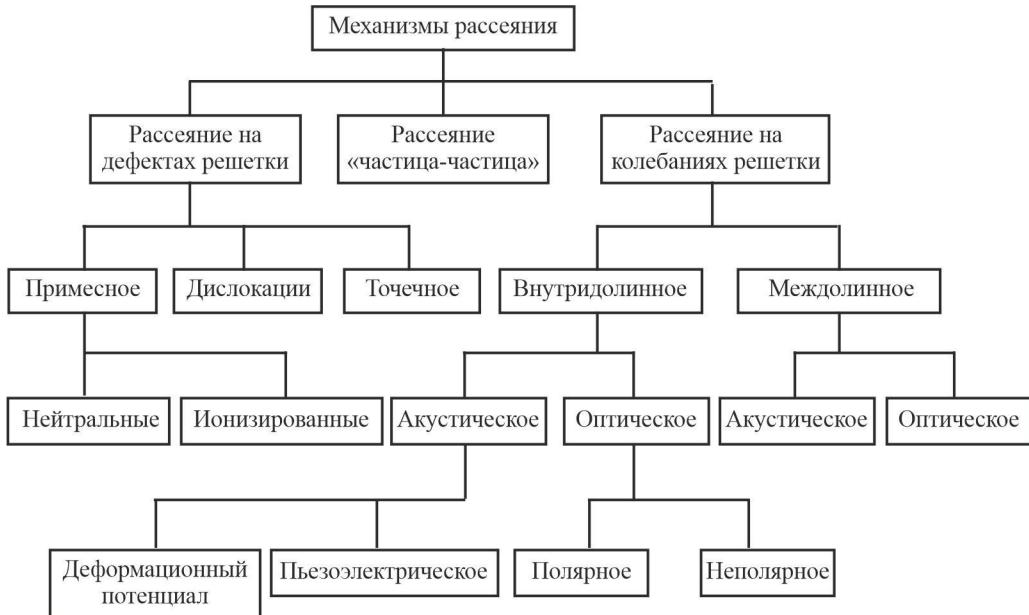


Рис. 7. Механизмы рассеяния в полупроводниковых структурах [3]

Частота рассеяния на полярных оптических фононах:

$$\lambda(W) = \frac{\sqrt{2m}q^2\omega_0}{8\pi\epsilon_0\hbar} \left( \frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_s} \right) (1 + 2\alpha W') \frac{F(W, W')}{\sqrt{\gamma}} \left( \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega_0/k_bT}{\gamma}} - 1} + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right), \quad (24)$$

где  $\omega_0$  – частота фонона продольной оптической моды;  $\epsilon_\infty$  – высокочастотная диэлектрическая проницаемость;  $F(W, W') = \frac{1}{C} \left[ A \ln \left| \frac{\sqrt{\gamma} + \sqrt{\gamma'}}{\sqrt{\gamma} - \sqrt{\gamma'}} \right| + B \right]$ ;  $W' = W \pm \hbar\omega_0$ ;  $\gamma = W(1 + \alpha W)$ ;  $\gamma' = W'(1 + \alpha W')$ ;  $A = (2(1 + \alpha W)(1 + \alpha W') + \alpha(\gamma + \gamma'))^2$ ;  $B = -2\alpha\sqrt{\gamma\gamma'}(4(1 + \alpha W)(1 + \alpha W') + \alpha(\gamma + \gamma'))$ ;  $C = 4(1 + \alpha W)(1 + \alpha W')(1 + 2\alpha W)(1 + 2\alpha W')$ . Знак  $\pm$  при определении энергии электрона после рассеяния зависит от того, был ли фонон поглощен или испущен соответственно.

Частота междолинного рассеяния:

$$\lambda(W) = \frac{Z(2m)^{3/2} D_{ij}^2}{2\pi\hbar^3\rho\omega_{ij}} \sqrt{\gamma} G_{ij}(W, W') \left( \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega_{ij}/k_bT}{\gamma}} - 1} + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right), \quad (25)$$

где  $Z$  – количество эквивалентных долин, в которые осуществляется переход;  $D_{ij}$  – константа междолинной связи  $i$ -й и  $j$ -й долин;  $\omega_{ij}$  – частота междолинного фонона;  $\gamma' = W'(1 + \alpha_j W')$ ;  $W' = W + \Delta_{ij} \pm \hbar\omega_{ij}$ ;  $\Delta_{ij}$  – энергетический зазор между  $i$ -й и  $j$ -й долинами;  $G_{ij}(W, W') = \frac{(1 + \alpha_i W)}{(1 + 2\alpha_i W)} (1 + \alpha_j W')$ .

Рассеяние на несогласованностях решетки [4]:

$$\lambda(W) = \frac{A^3 x(1-x)}{\pi} \frac{|D_{dis}^2| S_0}{\hbar^4} \sqrt{2} (m)^{3/2} \sqrt{\gamma} (1 + 2\alpha W), \quad (26)$$

где  $A$  – постоянная решетки;  $x$  – мольная доля Al в  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ,  $D_{dis} = \chi_{\text{AlAs}} - \chi_{\text{GaAs}}$  – разница в работе выхода полупроводников соединения;  $S_0$  – коэффициент, определяющий степень несогласованности решетки, меняется в диапазоне от 0 до 1 (где 0 – полностью неупорядоченная решетка; 1 – идеальная решетка).

Для описания рассеяния на ионизированных примесях применяется модель Конуэлла-Вайскопфа [1]:

$$\lambda(W) = \frac{\pi q^4 N_b}{\sqrt{2m(\epsilon\epsilon_0)}} \gamma^{-3/2} \ln \left| 1 + \frac{q^4 N_b^{2/3}}{\epsilon\epsilon_0 \gamma} \right|, \quad (27)$$

где  $N_b$  – концентрация легирующей примеси (донорной или акцепторной).

Характерные частоты рассеяния для различных механизмов в объемном легированном GaAs при  $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , а также суммарная частота рассеяния представлены на рис. 8 и 9 соответственно. На рис. 8 зеленые линии соответствуют частотам рассеяния на оптических фононах

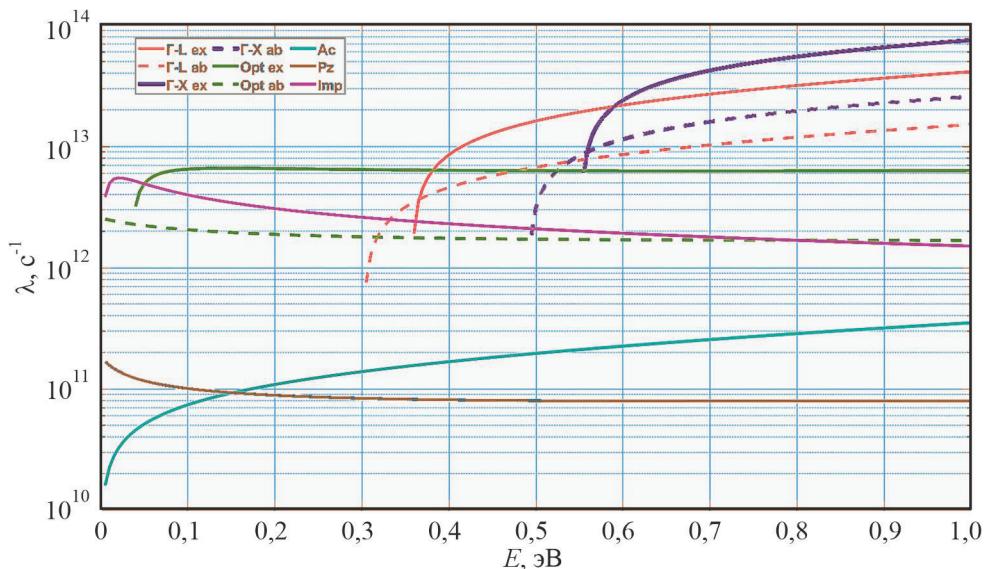


Рис. 8. Характерные частоты рассеяния для GaAs

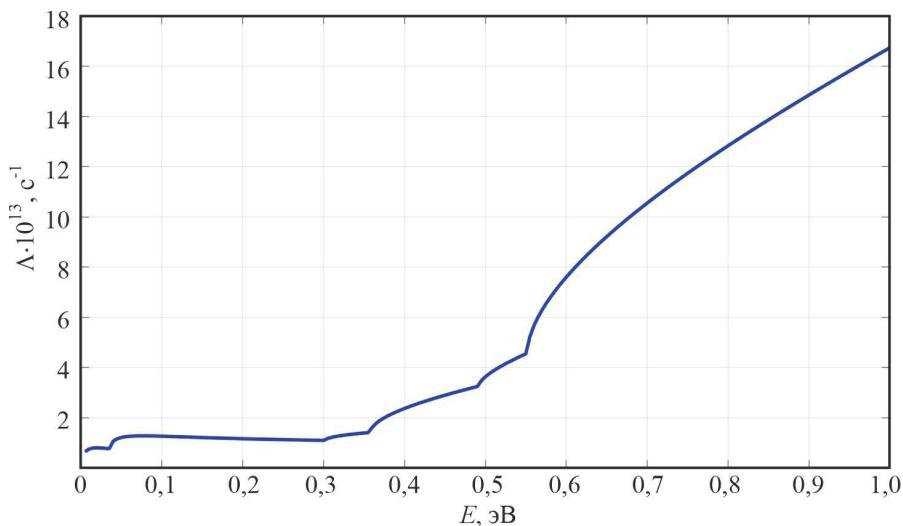


Рис. 9. Суммарная частота рассеяния для GaAs

(здесь и далее сплошная линия соответствует случаю с испусканием фона, штриховая – с поглощением); красные – частотам междолинного  $\Gamma$ - $L$ -рассеяния; синие – частотам междолинного  $\Gamma$ - $X$ -рассеяния; бирюзовая – частоте рассеяния на акустических фонах; черная – частоте пьезоэлектрического рассеяния; фиолетовая – частоте рассеяния на ионизированной примеси.

### 2.3. Выбор механизма и углов рассеяния

Для визуального представления движения частиц под действием внешнего поля можно использовать временную диаграмму, представленную на рис. 10.

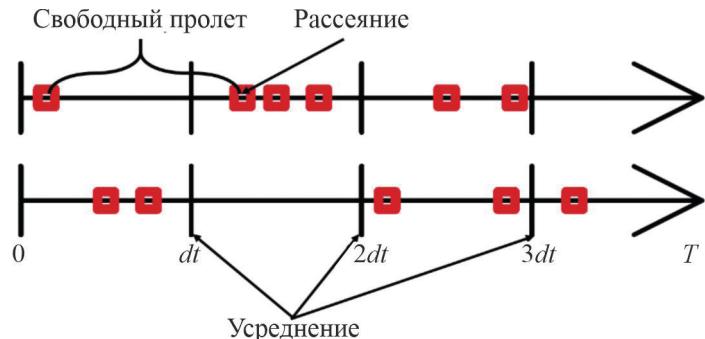


Рис. 10. Временная диаграмма движения частиц под действием внешнего поля

Вероятность того, что частица испытает рассеяние в промежуток времени  $d\tau$  после свободного пробега длительностью  $\tau$ :

$$P(\tau) d\tau = \Lambda(W(\tau)) \exp\left(-\int_0^\tau \Lambda(W(t)) dt\right) d\tau, \quad (28)$$

где  $P(\tau)$  – плотность вероятности.

Время  $\tau$  можно определить путем интегрирования (28):

$$\int_0^\tau P(t) dt = \int_0^\tau \Lambda(W(t)) \exp\left(-\int_0^t \Lambda(W(t')) dt'\right) dt = r, \quad (29)$$

где  $r$  – случайное число в диапазоне  $[0, 1]$ , соответствующее величине функции распределения.

Решение (29) является довольно нетривиальной задачей ввиду того, что  $\Lambda(W(t))$  не является постоянной величиной. Однако имеется возможность упростить (29), если к имеющимся механизмам рассеяния добавить еще один, т.н. «саморассеяние», не приводящее к изменению импульса и энергии электрона [5]. Частота саморассеяния  $\lambda(W)_{self}$  выбирается такой, чтобы для всего диапазона энергий сумма частот рассеяния была постоянной:

$$\Lambda = \Lambda(W(t)) + \lambda(W)_{self} = \text{const}. \quad (30)$$

Частота рассеяния из (30) позволяет записать (29) после интегрирования в следующем виде:

$$r = 1 - e^{-\Lambda\tau}. \quad (31)$$

Так как статистически  $P(r) = P(1 - r)$ , выражение (31) может быть представлено в виде:

$$\tau = -\frac{\ln r}{\Lambda}. \quad (32)$$

Необходимо отметить, что значение  $\Lambda$  будет различным для каждой энергетической долины, что стоит учитывать при выборе времени свободного пробега.

В конце свободного пробега необходимо выбрать, с помощью какого механизма будет осуществлено рассеяние электрона. Каждому механизму рассеяния присвоен собственный индекс  $j = 1, 2 \dots M$ . Выбор механизма осуществляется с помощью случайного числа  $r_1$ , лежащего в диапазоне от 0 до 1. Механизм рассеяния с индексом  $j$  выбирается в случае, если:

$$\sum_{i=1}^{j-1} \lambda_i(W) \leq r_1 \Lambda < \sum_{i=1}^j \lambda_i(W). \quad (33)$$

Схематически выбор механизма рассеяния представлен на рис. 11. Кривые линии соответствуют суммарной частоте рассеяния механизмов, при этом суммирование идет только для механизмов, индексы  $j$  которых меньше или равны индексу кривой  $j'$  (представлены на легенде рисунка). Вертикальный размер каждой области, ограниченной двумя ближайшими кривыми, соответствует вероятности рассеяния на механизме с индексом, соответствующим индексу кривой, ограничивающей выбранную область сверху. Для случая, представленного на рис. 11, электрон в конце свободного пробега обладает кинетической энергией  $W = 0,45$  эВ, а величина  $r_1 \Lambda$  составляет  $1,2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ . Точка с координатами  $(W, r_1 \Lambda)$  лежит в области, ограниченной кривыми 5 и 6. Согласно (33),  $j - 1 = 5$  и  $j = 6$ , следовательно, электрон испытает рассеяние на механизме с индексом  $j = 6$ .

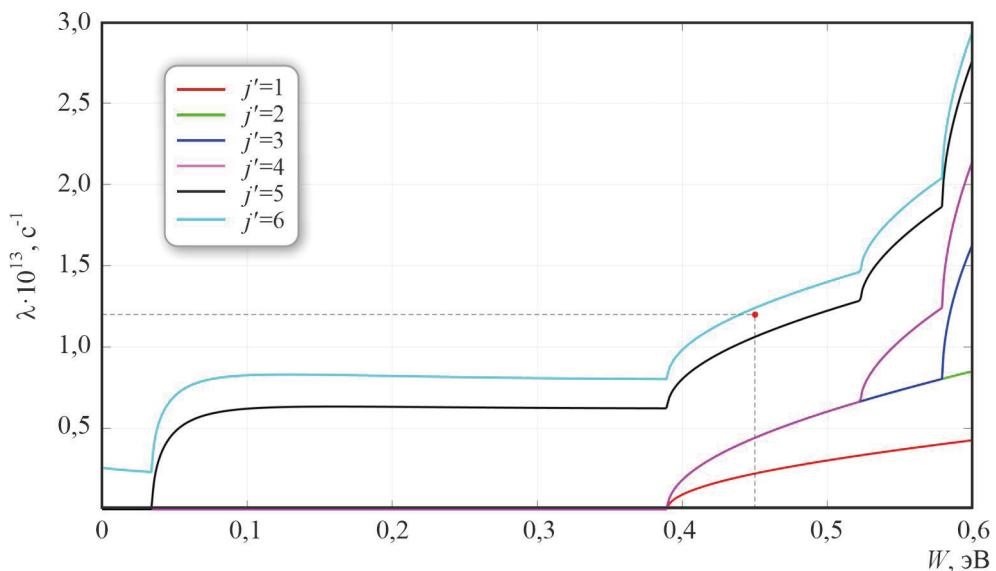


Рис. 11. Выбор механизма рассеяния для частицы с энергией 0,45 эВ

В ходе рассеяния изменяются компоненты волнового вектора электрона, при этом может измениться энергия электрона и произойти междолинный перенос. Выбор алгоритма определения компонентов нового волнового вектора зависит от типа рассеяния (изотропный или анизотропный). Для изотропных механизмов, к которым относятся рассеяние на акустических фононах, пьезоэлектрическое рассеяние, междолинное рассеяние и рассеяние на несогласованностях решетки, компоненты волнового вектора определяются следующим образом:

$$k'_x = k' \sin \theta \cos \phi, \quad (34)$$

$$k'_y = k' \sin \theta \sin \phi, \quad (35)$$

$$k'_z = k' \cos \theta, \quad (36)$$

где  $k'$  – модуль волнового вектора после рассеяния;  $\theta$ ,  $\phi$  – азимутальный и полярный углы, определяемые двумя случайными числами,  $r_2$  и  $r_3$ , в диапазоне от 0 до 1 соответственно:

$$\phi = 2\pi r_2, \quad (37)$$

$$\cos\theta = 1 - 2r_3. \quad (38)$$

Для анизотропных механизмов (рассеяние на полярных оптических фононах и рассеяние на ионизированных примесях) необходимы дополнительные преобразования, связанные с поворотом «оригинальной» системы координат волнового вектора [6]:

$$k'_x = k_{xp} \cos\phi_0 \cos\theta_0 - k_{yp} \sin\phi_0 + k_{zp} \cos\phi_0 \sin\theta_0, \quad (39)$$

$$k'_y = k_{xp} \sin\phi_0 \cos\theta_0 - k_{yp} \cos\phi_0 + k_{zp} \sin\phi_0 \sin\theta_0, \quad (40)$$

$$k'_z = -k_{xp} \sin\theta_0 - k_{zp} \cos\theta_0, \quad (41)$$

где  $k_{xp}$ ,  $k_{yp}$ ,  $k_{zp}$  определяются уравнениями (34)...(36). Тригонометрические функции углов  $\phi_0$ ,  $\theta_0$ :

$$\cos\phi_0 = k_x / \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, \quad (42)$$

$$\sin\phi_0 = k_y / \sqrt{k_x^2 + k_y^2}, \quad (43)$$

$$\cos\theta_0 = k_z / k, \quad (44)$$

$$\sin\theta_0 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} / k. \quad (45)$$

Угол  $\phi$  определяется аналогично (37), а выбор  $\theta$  зависит от механизма рассеяния. В случае рассеяния на полярных оптических фононах:

$$\cos\theta = \frac{(1+\xi) - (1+2\xi)^{r_3}}{\xi}, \quad (46)$$

где  $\xi = \frac{2\sqrt{W(W \pm \hbar\omega_0)}}{(\sqrt{W} - \sqrt{(W \pm \hbar\omega_0)})^2}$ , а в случае рассеяния на ионизированной примеси [7]:

$$\cos\theta = \frac{\left(\frac{k^2}{k_d^2(1+2\alpha W)}\right)^2 r_3 - 1}{\left(\frac{k^2}{k_d^2(1+2\alpha W)}\right)^2 r_3 + 1}. \quad (47)$$

## 2.4. Временной и пространственный шаги

Важными параметрами модели, влияющими на корректность и адекватность результатов, яв-

ляются временной шаг  $dt$  и пространственные шаги  $\Delta x$  и  $\Delta y$  по соответствующим осям. Критерием выбора  $dt$  будет являться следующее неравенство [8]:

$$\omega_{pe} dt \leq 1, \quad (48)$$

где  $\omega_{pe} = \sqrt{\frac{q^2 N_b}{\epsilon_s \epsilon_0 m}}$  – плазменная частота колебаний. Ввиду зависимости  $\omega_{pe}$  от массы электронов, а также из-за наличия в гетероструктуре слоев различных полупроводниковых материалов с различными  $\epsilon_s$  и  $N_b$ , для определения  $dt$  в уравнении (48) необходимо использовать максимальную  $\omega_{pe}$ , рассчитанную для всех слоев гетероструктуры и энергетических долин в них.

Условие на выбор  $\Delta x$  и  $\Delta y$  [8]:

$$k_d^{\max} \max(\Delta x, \Delta y) \leq 1, \quad (49)$$

где  $k_d^{\max}$  – наибольшее из значений  $k_d$  для всех слоев гетероструктуры.

Дополнительным математическим ограничением на величины временного и пространственных шагов  $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y)$  выступает критерий Куранта-Фридрихса-Леви [10]:

$$v_s dt \leq \Delta, \quad (50)$$

где  $v_s \approx 10^6$  м/с – групповая скорость электронов в полупроводнике.

## 2.5. Движение частиц через гетеропереход

При моделировании транзисторов на основе гетероструктур возникает ситуация, при которой частица в ходе свободного пробега проходит через потенциальный барьер на границе гетероперехода. Несомненно, для корректного описания взаимодействия частицы и барьера необходимо учитывать квантово-механические эффекты, однако в первом приближении можно использовать законы сохранения импульса и энергии классической механики [9]. Во-первых, при движении частицы через гетеропереход необходимо сравнить кинетическую энергию частицы и высоту потенциального барьера на границе гетероперехода:

$$W > \Delta E_c, \quad (51)$$

где  $\Delta E_c$  – высота потенциального барьера. Если условие (51) выполняется, то частице присваивается энергия  $W'$ :

$$W' = W - \Delta E_c, \quad (52)$$

в противном случае частица испытывает упругое отражение от границы гетероперехода.

Далее, если условие (51) выполнено, проверяется сохранение импульса. При переходе через потенциальный барьер модуль волнового вектора в плоскости, параллельной границе гетероперехода, должен оставаться неизменным:

$$k'_\parallel = k_\parallel, \quad (53)$$

следовательно, для величины проекции волнового вектора в направлении, перпендикулярном границе гетероперехода, справедливо соотношение:

$$k'_\perp^2 = \frac{2m'}{\hbar^2} W' (1 + \alpha' W') - k_\parallel^2, \quad (54)$$

где  $m'$ ,  $\alpha'$  – эффективная масса электрона и коэффициент непараболичности в барьере слое соответственно. В случае, если  $k'_\perp^2 > 0$ , то переход считается успешным, при этом

$$k'_\perp = \text{sign}(k_\perp) \sqrt{k'_\perp^2}, \quad (55)$$

в противном случае частица испытывает отражение, как при невыполнении условия (51).

## 2.6. Учет принципа Паули

Приведенные ранее механизмы рассеяния рассматривались в приближении, что заселенность состояния после рассеяния, представленная нормализованной функцией распределения  $f(k')$ , равна нулю. В действительности же, вероятность перехода из состояния  $k$  в состояние  $k'$  за единицу времени:

$$P(k, k') = S(k, k')(1 - f(k')), \quad (56)$$

где  $S(k, k')$  – скорость перехода, определяемая «золотым» правилом Ферми [11];  $(1 - f(k'))$  – фактор заселенности состояния  $k'$ . Использование (46) для определения частот рассеяния напрямую затруднено, ввиду того что  $f(k')$  неизвестно заранее, поэтому для учета принципа Паули можно прибегнуть к методике, представленной в [12].

На первом этапе в моменты времени, кратные 1 пс, в каждой ячейке расчетной области вычисляется значение температуры электронного газа  $T_{el}$ , а также положение квазиуровня Ферми  $E_f$  на основе усредненных значений кинетической энергии  $W$  и концентрации носителей заряда  $n$ . Далее, после акта рассеяния для каждой частицы вычисляется функция распределения Ферми-Дирака:

$$f(W') = \frac{1}{\exp\left(\frac{W' - E_f}{k_b T_{el}}\right) + 1}, \quad (57)$$

и разыгрывается случайное число  $r$  в диапазоне от 0 до 1. На основе сравнения  $f(W')$  и  $r$  делается вывод о заселенности состояния и соответственно возможности рассеяния частицы. Если  $r > f(W')$ , то состояние считается свободным и рассеяние возможно. Если же  $r < f(W')$ , то состояние считается заселенным, а частица вместо выбранного механизма испытывает саморассеяние.

Также стоит отметить два момента. Во-первых, описанная методика учета принципа Паули также распространяется и на движение частицы через гетеропереход. Так, в случае успешной проверки условия (51) и вычисления значения  $W'$  в (52), дополнительно оценивается  $f(W')$  по аналогии с механизмами рассеяния. Во-вторых, принцип Паули можно учитывать только для нижней (основной) долины, так как, ввиду заметно большей эффективной плотности состояний в верхних энергетических долинах, можно считать, что электроны невырождены и подчиняются закону распределения Максвелла-Больцмана.

## 2.7. Начальные условия

На достоверность результатов моделирования, помимо  $dt$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , существенное влияние оказывают начальное распределение частиц, а также количество используемых частиц при моделировании. Хорошее начальное распределение частиц позволяет избежать нестационарнос-

тей и сильных полей в ходе решения. В ряде работ, например [2], частицы в начале моделирования расположены в легированной области случайным образом, что соответствует условию нейтрализации заряда. Такой подход справедлив в случае: если слои полупроводниковой структуры однородны по всей глубине транзистора [13]; легированная область расположена в барьерном слое структуры [3]; в моделировании учитываются квантово-размерные эффекты и туннелирование электронов через потенциальный барьер. Без учета последнего, т. е. при описании движения электронов через гетеропереход уравнениями (51)...(55), происходит только надбарьерный перенос и электроны не могут в полной мере попасть в канал, поэтому требуется использовать другое распределение. Для этого в модели предлагается использовать методику, основанную на решении квантово-механической задачи для одномерного случая.

В первую очередь проводится расчет транзисторной гетероструктуры в одномерном случае, согласно методике, представленной в [14], при равной нулю величине нормальной составляющей напряженности электрического поля на поверхности гетероструктуры ( $x = 0$ ). Решение ищется на мелкой сетке для получения гладкой зависимости концентрации носителей заряда от координаты вдоль оси  $0X$  (вглубь гетероструктуры). Далее эти результаты интерполируются на более крупную координатную сетку, имеющую шаг  $\Delta x$ , который соответствует пространственной сетке двумерной задачи:

$$x_c^i = \frac{\Delta x}{2} + i\Delta x, \quad i = 0, 1, 2 \dots h - 2, \quad (58)$$

где  $h$  – количество отсчетов сетки по оси  $0X$  моделируемой области транзистора. Полученная зависимость  $n(x_c)$  определяет концентрацию электронов в ячейках моделируемой области транзистора. На основе  $n(x_c)$  определяется количество частиц, требуемых для поддержания постоянной концентрации по всей длине канала транзистора вдоль оси  $0Y$  при заданном  $x_c^i$  при двумерном анализе:

$$Z_p^i = \frac{qn(x_c^i)\Delta x L_{ds}}{dp}, \quad (59)$$

где  $L_{ds}$  – расстояние исток-сток.

Полученное значение  $Z_p^i$  округляется до ближайшего целого  $Z_p$ , после чего инжектируется  $Z_p$  частиц с координатами:

$$x_p = x_c^i + \Delta x \cdot \left( r_1 - \frac{1}{2} \right), \quad (60)$$

$$y_p = L_{ds} \cdot r_2, \quad (61)$$

где  $r_1, r_2 \in [0, 1]$ . Процедура (49)...(50) повторяется для каждого  $x_c^i$ , полученного в (58).

Минимальное количество частиц  $Z_{min}$ , необходимых для получения достоверных результатов моделирования, оценивается из условия [15]:

$$\frac{\iint (N_d(x, y) + N_a(x, y)) dx dy}{Z_{min}} \leq \frac{1}{2 \max(\Delta x, \Delta y)}. \quad (62)$$

## 2.8. Моделирование омических контактов, оценка статических характеристик

В рассматриваемой модели омические контакты истока и стока представлены как горизонтальные электроды длиной 0,4 мкм, под которыми располагается приконтактная GaAs  $n^+$ -область с толщиной, соответствующей глубине залегания проводящего канала.

Концентрация примеси в  $n^+$ -областях задавалась равной  $N_d = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Для поддержания термодинамического равновесия в  $n^+$ -областях в начале каждого временного шага в ячейки пространственной сетки, прилегающие к внешним границам этих  $n^+$ -областей, перпендикулярным электродам истока и стока, инжектируются частицы. Нормальные к этим внешним границам составляющие скорости инжектируемых частиц определяются из взвешенной функции распределения Максвелла [16]. На электроде затвора инжекции частиц в рамках рассматриваемой модели не происходит.

Модель позволяет оценивать зависимость суммарного заряда частиц от времени, протекающего через приконтактные области электродов истока и стока:

$$Q(t) = d\varphi \left( N_{abs}(t) - N_{inj}(t) \right) + \varepsilon \varepsilon_0 \int E_x(y, t) dy, \quad (63)$$

где  $N_{abs}(t)$ ,  $N_{inj}(t)$  – полное число частиц, поглощенных и инжектированных в приконтактной области к моменту времени  $t$  соответственно;  $E_x(y, t)$  – нормальная составляющая напряженности электрического поля в момент времени  $t$  в точке  $y$ , принадлежащей границе электрода. Ток  $I(t)$ , протекающий через электрод, можно оценить из (63) путем численного дифференцирования. Полученная зависимость  $I(t)$  имеет значительные флуктуации, поэтому требуется дополнительно применять различные методы сглаживания.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ

Апробация модели проводилась при расчете характеристик различных видов гетероструктур и полевых транзисторов на их основе. Проведен расчет вольт-амперных характеристик транзистора на основе гетероструктуры с донорно-акцепторным легированием (DA-DpHEMT) [17]. Паспорт моделируемой структуры представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Паспорт моделируемой DA-DpHEMT-структурь**

№ слоя	Материал	Толщина, нм	Легирование
1	GaAs	50	н/л
2	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	100	н/л
3	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	15	$N_a = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$
4	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	5	н/л
5	δ-Si	–	$8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
6	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	3	н/л

## Окончание табл. 1

№ слоя	Материал	Толщина, нм	Легирование
7	GaAs	3	н/л
8	Ga <sub>0,835</sub> In <sub>0,165</sub> As	14	н/л
9	GaAs	1,5	н/л
10	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	3	н/л
11	δ-Si	—	7·10 <sup>12</sup> см <sup>-2</sup>
12	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	7	н/л
13	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	8	N <sub>α</sub> = 5·10 <sup>18</sup> см <sup>-3</sup>
14	Al <sub>0,25</sub> Ga <sub>0,75</sub> As	10	н/л

Расстояние затвор-исток  $L_{gs} = 0,5$  мкм, расстояние затвор-сток  $L_{gd} = 0,9$  мкм, длина затвора  $L_g = 0,15$  мкм. Рассматривалось движение частиц в течение первых 30 пс, шаг дискретизации по времени  $dt = 0,5$  фс, начальное количество частиц  $Z = 80000$ . Ввиду образования обедненной области под затвором,  $Z$  меняется в ходе моделирования.

На рис. 12 представлено двумерное распределение частиц в DA-DpHEMT для рабочей точки  $V_{ds} = 3$  В,  $V_{gs} = 0$  В в момент времени  $t = 30$  пс.

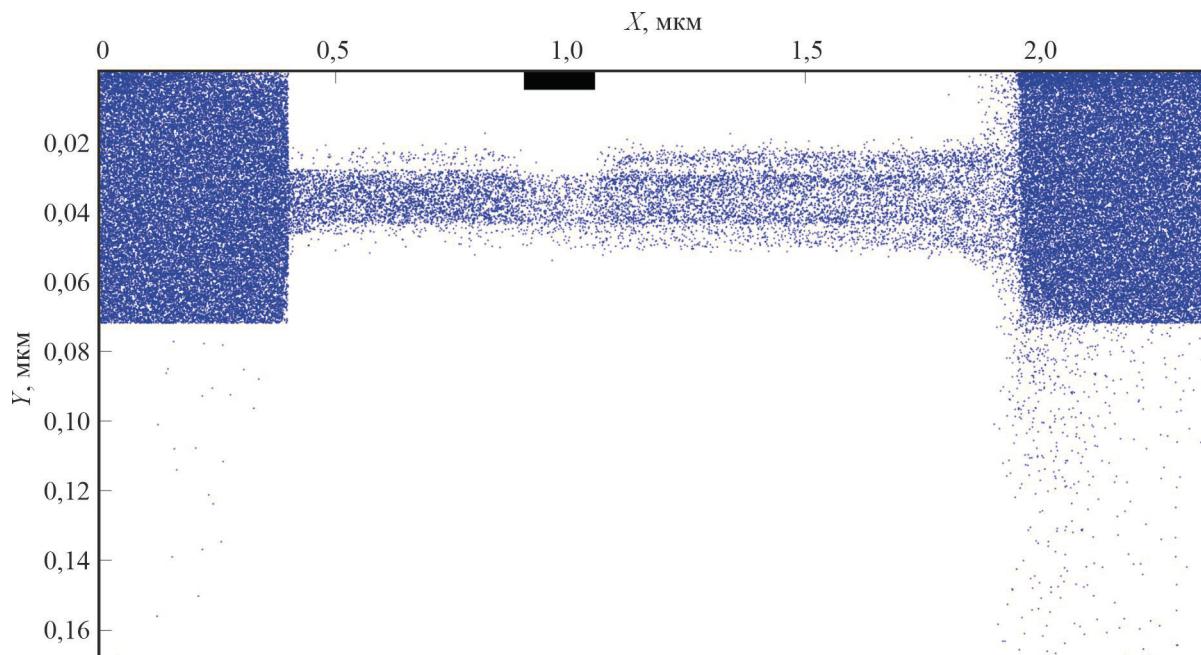


Рис. 12. Распределение частиц в DA-DpHEMT в рабочей точке  $V_{ds} = 3$  В,  $V_{gs} = 0$  В при  $t = 30$  пс.

Черным прямоугольником обозначено расположение электрода затвора на поверхности моделируемой области

Как видно из рисунка, практически все частицы локализованы вблизи узкозонного слоя канала, за исключением приконтактной области у электрода стока.

На рис. 13 представлено семейство ВАХ моделируемого транзистора.

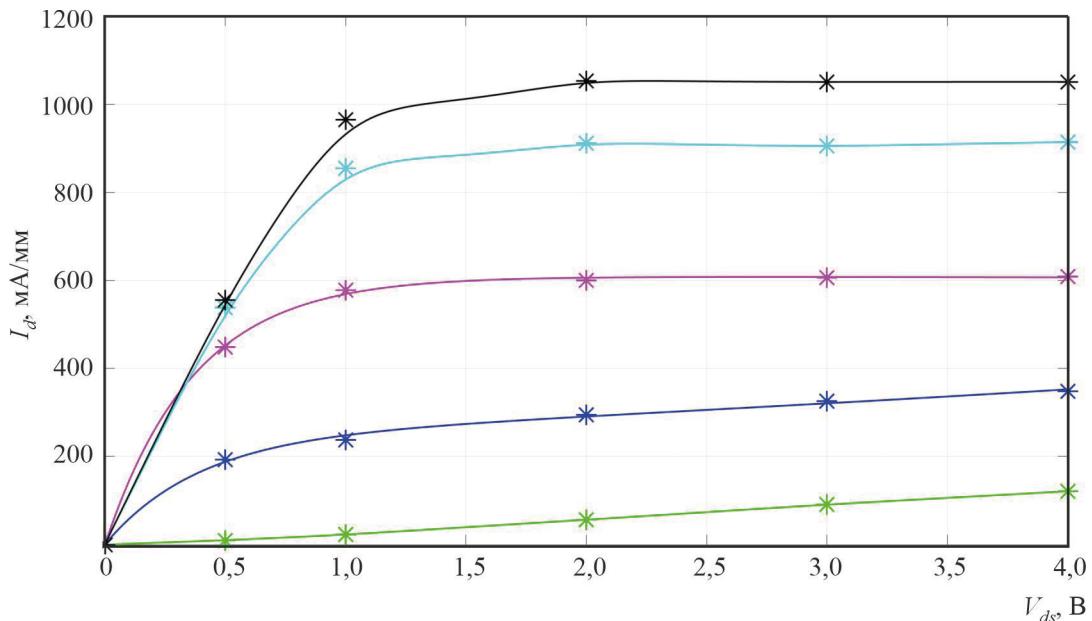


Рис. 13. Семейство ВАХ для DA-DpHEMT. Напряжение затвор-исток менялось от -1,5 до 0,5 В с шагом в 0,5 В. Звездочками отмечены расчетные значения, сплошными линиями – аппроксимирующие кривые

Было проведено сравнение ВАХ DA-DpHEMT с транзистором на основе двусторонне легированной гетероструктуры (DpHEMT), паспорт которой приведен в табл. 2. Уровень легирования δ-слоев в DpHEMT-структуре задавался таким образом, чтобы поверхностные плотности электронов в обеих структурах совпадали, а также сохранялись пропорции концентрации 3:2 в δ-слоях. Толщина слоя 2 в DpHEMT равна сумме толщин слоев 2...4 в DA-DpHEMT, а толщина слоя 10 в DpHEMT – сумме толщин слоев 12...14 в DA-DpHEMT.

Таблица 2

#### Паспорт моделируемой DpHEMT-структуры

№ слоя	Материал	Толщина, нм	Легирование
1	GaAs	50	н/л
2	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	120	н/л
3	δ-Si	–	$2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
4	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	3	н/л
5	GaAs	3	н/л
6	$\text{Ga}_{0,835}\text{In}_{0,165}\text{As}$	14	н/л

## Окончание табл. 2

№ слоя	Материал	Толщина, нм	Легирование
7	GaAs	1,5	н/л
8	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	3	н/л
9	$\delta\text{-Si}$	—	$3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$
10	$\text{Al}_{0,25}\text{Ga}_{0,75}\text{As}$	25	н/л

Другие параметры конструкции DрHEMT такие же, как у DA-DрHEMT.

На рис. 14 представлено двумерное распределение частиц в DрHEMT для рабочей точки  $V_{ds} = 3 \text{ В}$ ,  $V_{gs} = 0 \text{ В}$  в момент времени  $t = 30 \text{ пс}$ .

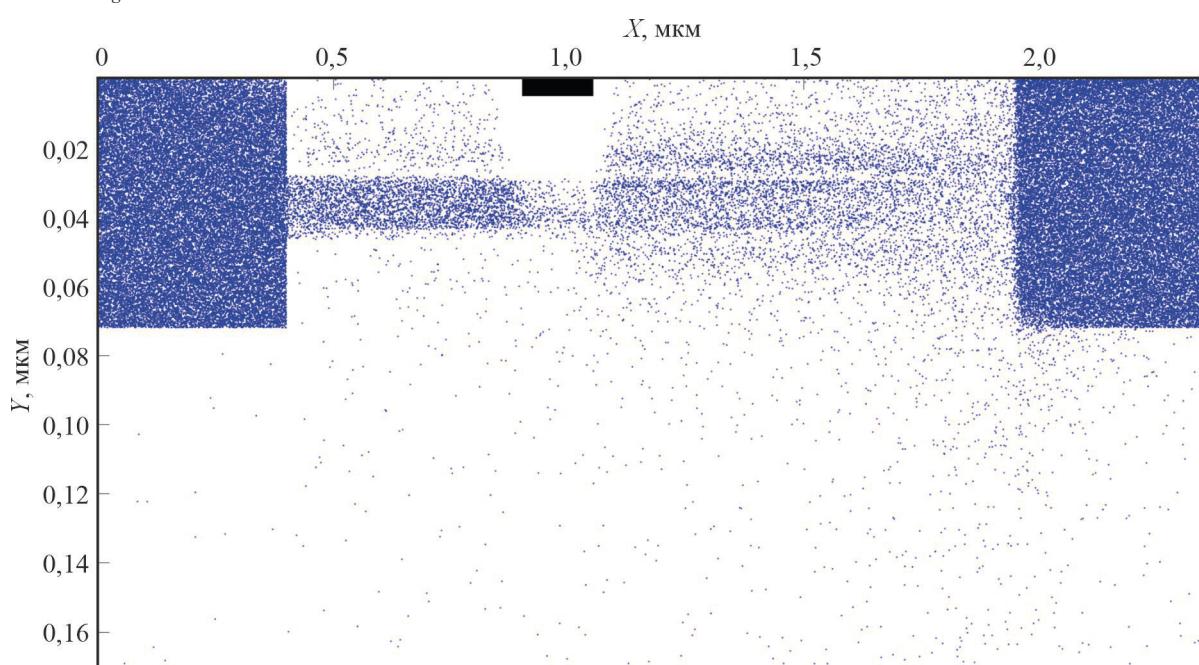


Рис. 14. Распределение частиц в DрHEMT в рабочей точке  $V_{ds} = 3 \text{ В}$ ,  $V_{gs} = 0 \text{ В}$  при  $t = 30 \text{ пс}$ .

Черным прямоугольником обозначено расположение электрода затвора на поверхности моделируемой области

В DрHEMT заметная часть свободных носителей заряда переходит в широкозонные  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -слои. Это приводит к уменьшению их средней дрейфовой скорости, что оказывает влияние на ВАХ транзистора. Сравнительный анализ результатов, приведенных на рис. 12 и 14, указывает на существенное положительное влияние слоев № 3 и 13 в конструкции DA-DрHEMT, легированных акцепторной примесью, на локализацию электронов в канале. На рис. 15 показано семейство ВАХ моделируемого DрHEMT.

Полученные результаты показывают, что при одинаковых отрицательных напряжениях затвор-исток, ток стока DA-DрHEMT превышает ток стока DрHEMT в 1,5...2 раза, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [18]. На рис. 16 для сравнения токов стока DA-DрHEMT и DрHEMT приведены их семейства ВАХ.

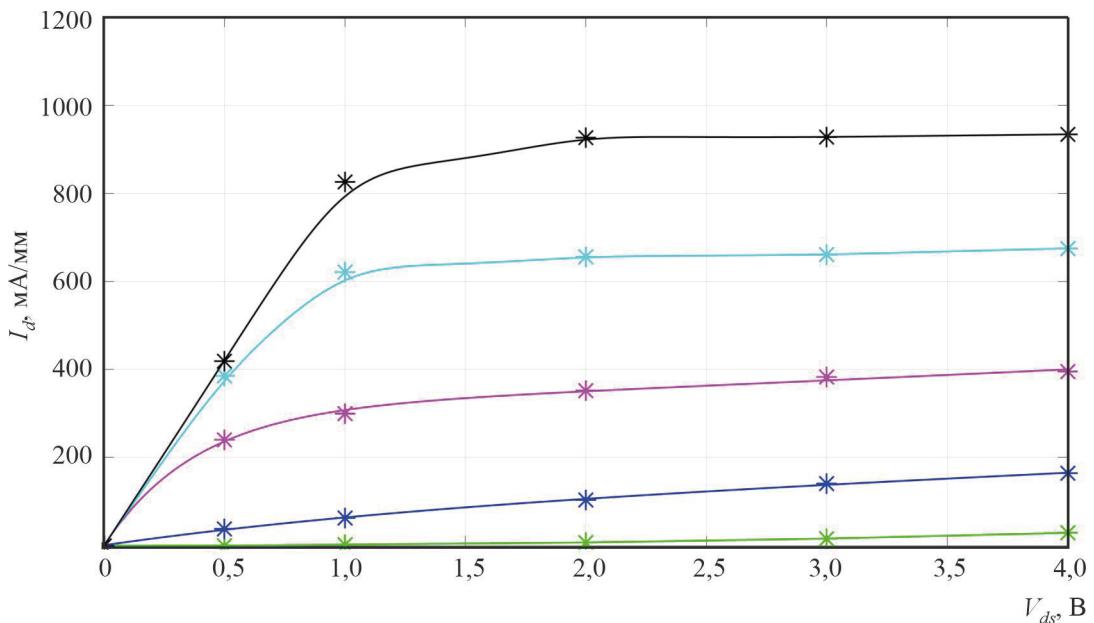


Рис. 15. Семейство ВАХ для DpHEMT. Напряжение затвор-исток менялось от -1,5 до 0,5 В с шагом в 0,5 В. Звездочками отмечены расчетные значения, сплошными линиями – аппроксимирующие кривые

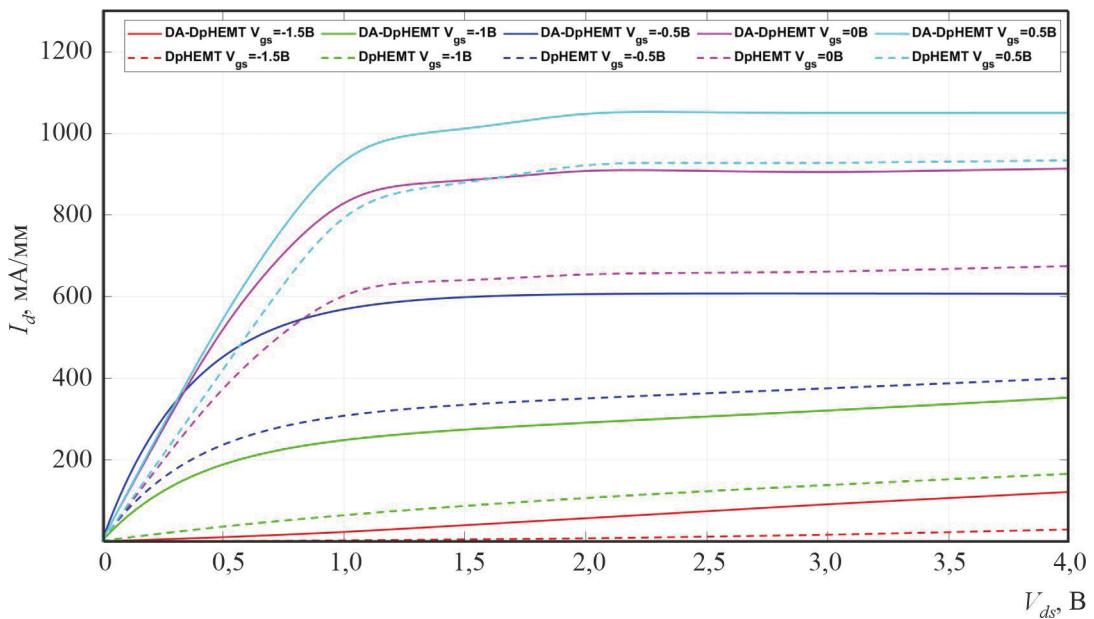


Рис. 16. Семейства ВАХ DA-DpHEMT и DpHEMT

Рост тока стока в DA-DpHEMT относительно DpHEMT связан с более сильной локализацией носителей заряда в канале структуры, вследствие чего повышается средняя дрейфовая скорость электронов вдоль канала. Дрейфовые скорости электронов  $v_d$  в рассматриваемых транзисторах при  $V_{ds} = 3$  В,  $V_{gs} = -1$  В представлены на рис. 17.

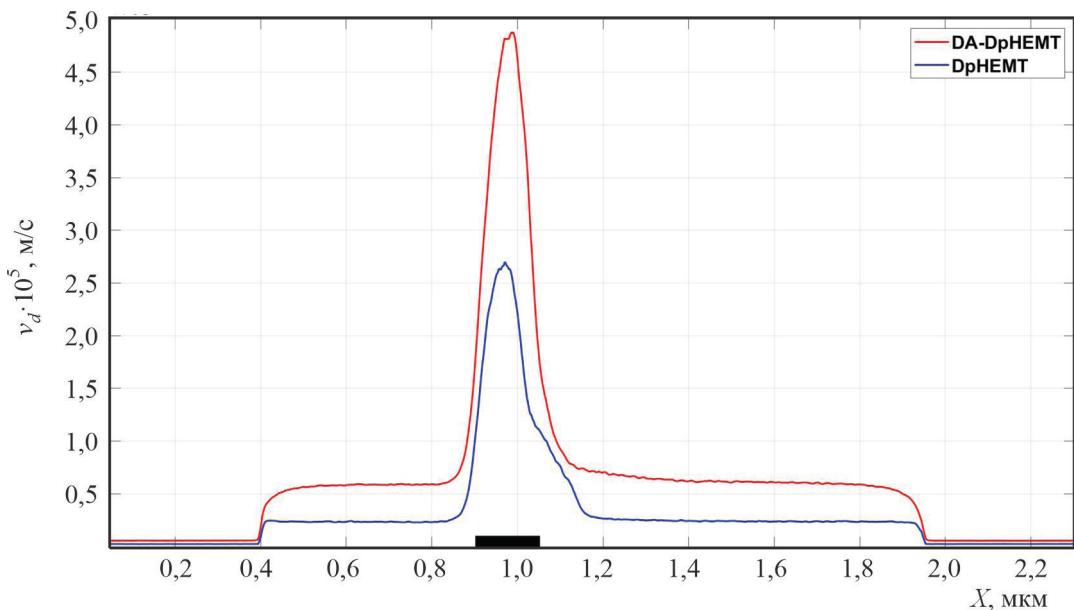


Рис. 17. Сравнение дрейфовых скоростей электронов в DA-DpHEMT и DpHEMT при  $V_{ds} = 3$  В,  $V_{gs} = -1$  В

Видно, что при пролете электронов в подзатворной области скорость электронов в DA-DpHEMT ( $v_d^{DA}$ ) возрастает примерно в 1,7...1,8 раза по сравнению со скоростью электронов в DpHEMT ( $v_d^{DP}$ ). Ввиду сильной локализации электронов в узкозонном слое канала в DA-DpHEMT,  $v_d^{DA}$  на участках затвор-исток и затвор-сток превышает  $v_d^{DP}$  более чем в 2 раза.

Дрейфовые скорости электронов  $v_d$  в рассматриваемых транзисторах при  $V_{ds} = 3$  В,  $V_{gs} = 0$  В представлены на рис. 18.

Интересной особенностью является то, что для данной рабочей точки  $v_d^{DA}$  в подзатворной области оказывается меньше  $v_d^{DP}$ , при этом на участках сток-затвор и исток-затвор  $v_d^{DA}$  больше  $v_d^{DP}$  в 1,5 раза. Вероятно, такой эффект обусловлен более высоким уровнем легирования донорных слоев в DA-DpHEMT, которые после превышения некоторого порогового значения напряжения затвор-исток начинают выступать в качестве проводящих каналов.

Токи насыщения стока в DA-DpHEMT и DpHEMT при  $V_{ds} = 3$  В представлены на рис. 19.

Крутизна передаточных характеристик DA-DpHEMT и DpHEMT при  $V_{ds} = 3$  В представлена на рис. 20.

Анализ динамических характеристик исследуемых транзисторов, проведенный по методике, представленной в [19], показал, что для рабочей точки  $V_{ds} = 3$  В,  $V_{gs} = -0,6$  В приращение малосигнального коэффициента усиления ( $\Delta MSG$ ) DA-DpHEMT относительно DpHEMT составило 6,6 дБ на частоте  $f = 1$  ГГц.

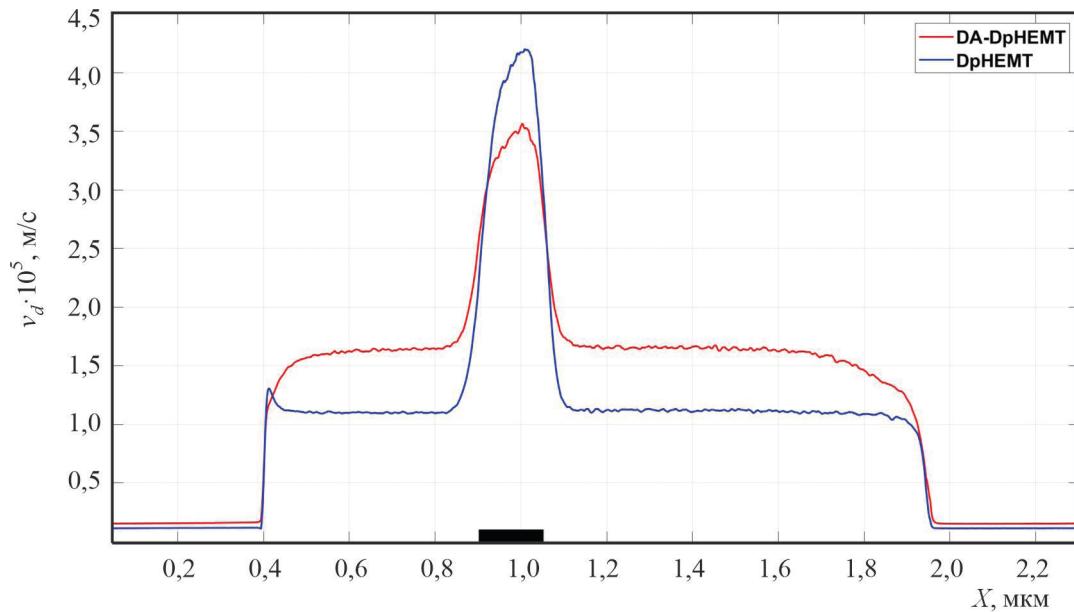


Рис. 18. Сравнение дрейфовых скоростей электронов в DA-DpHEMT и DpHEMT  
при  $V_{ds} = 3$  В,  $V_{gs} = 0$  В

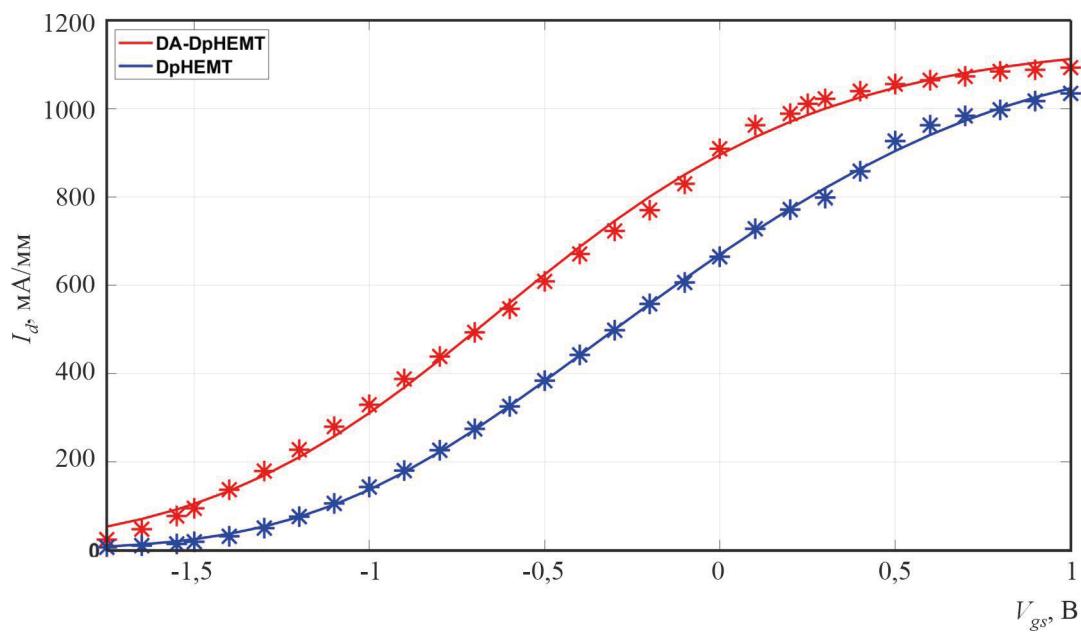


Рис. 19. Токи насыщения для DA-DpHEMT и DpHEMT при  $V_{ds} = 3$  В.  
Звездочками отмечены расчетные значения, сплошными линиями —  
аппроксимирующие кривые

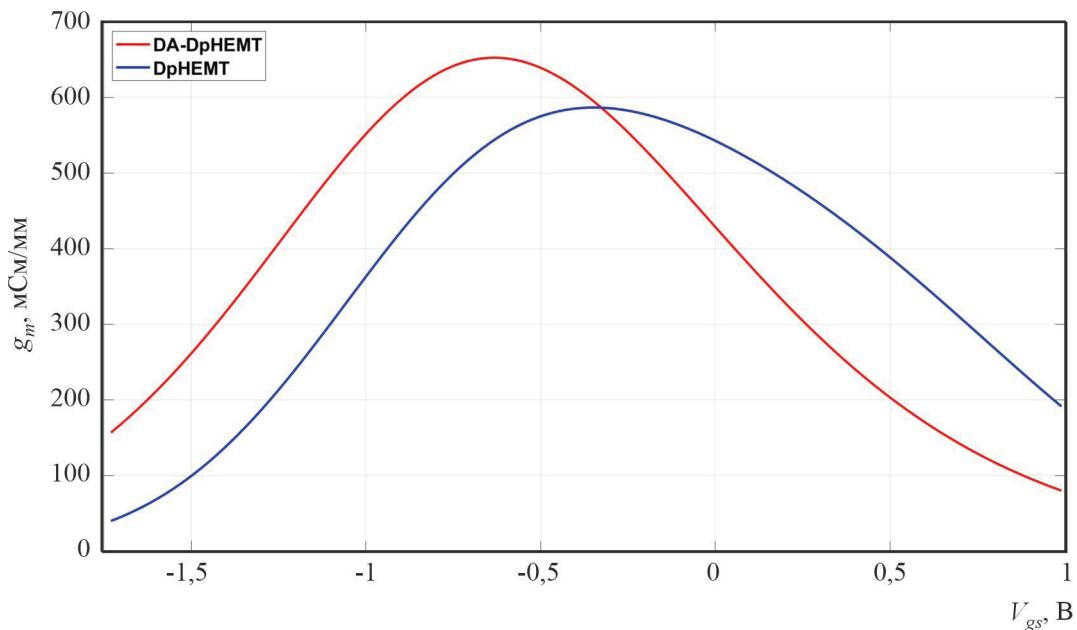


Рис. 20. Крутизна передаточных характеристик для DA-DpHEMT и DpHEMT при  $V_{ds} = 3$  В

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана двумерная модель на основе метода Монте-Карло для прогнозирования характеристик транзисторных GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов различных конструкций на их основе. Проведено моделирование электрофизических характеристик DA-DpHEMT и DpHEMT, результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, что позволяет использовать модель для проектирования полевых транзисторов различных конструкций. Показано, что в DA-DpHEMT слои гетероструктуры, легированные акцепторной примесью, оказывают существенное положительное влияние на локализацию электронов в канале. Сравнение дрейфовых скоростей электронов в транзисторах при  $V_{ds} = 3$  В показало, что при  $V_{gs} = -1$  В дрейфовая скорость электронов в подзатворной области в DA-DpHEMT больше дрейфовой скорости электронов в подзатворной области в DpHEMT в 1,7...1,8 раза, а при  $V_{gs} = 0$  В средняя дрейфовая скорость электронов в канале DA-DpHEMT больше средней дрейфовой скорости электронов в канале DpHEMT в 1,5 раза. В результате расчетов установлено, что MSG DA-DpHEMT превышает MSG DpHEMT на 6,6 дБ на частоте  $f = 1$  ГГц.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
- Jacoboni, C. The Monte Carlo method for semiconductor device simulation / C. Jacoboni, P. Lugli. – Springer-Verlag/Wien, 1989. – 359 p.
- Nederveen, K. Ensemble Monte Carlo simulation of electron transport in AlGaAs/GaAs heterostructures: PhD Thesis / K. Nederveen. – Technische Universiteit Eindhoven, 1989. – 199 p.
- Fischetti, M. V. Monte Carlo simulation of transport in technologically significant semiconductors of the diamond and zinc-blende structures. Part I: Homogeneous transport / M.V. Fischetti // IEEE Transaction on Electron Devices. – 1991. – Vol. 38, No 3. – P. 634 – 649.

5. **Yortson, R. M.** Free-flight time generation in the Monte Carlo simulation of carrier transport in semiconductors / R. M. Yortson // Journal of Computational Physics. – 1986. – Vol. 64. – P. 177 – 194.
6. **Tierney, B. D.** Monte Carlo studies of electron transport in semiconductor nanostructures: a dissertation presented in partial fulfillment of the requirements for the degree doctor of philosophy / B. D. Tierney. – Arizona State University, 2011. – 108 p.
7. Definition of electron polar scattering angle on ionized impurities for Monte Carlo simulation of charge carrier transport in semiconductors / V. M. Borzdov [et al.] // Semiconductors. – 2023. – Vol. 57, No 1. – P. 14 – 19.
8. **Vasileska, D.** Computational electronics / D. Vasileska, S. M. Goodnick. – Morgan & Claypool, 2006. – 208 p.
9. **Mateos, J.** Noise and transit time in ungated FET structures / J. Mateos [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1999. – Vol. 44, No 12. – P. 2128 – 2135.
10. **Курант, Р.** О разностных уравнениях математической физики / Р. Курант, К. Фридрихс, Г. Леви // УМН. – 1941. – № 8. – С. 125 – 160.
11. **Fermi, E.** Nuclear physics / E. Fermi. – University of Chicago Press, 1950. – 270 p.
12. Improved Monte Carlo algorithm for the simulation of  $\delta$ -doped AlInAs/GaInAs HEMT's / J. Mateos [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2000. – Vol. 47, No 1. – P. 250 – 253.
13. **Warriner, R. A.** Computer simulation of gallium arsenide field-effect transistor using Monte Carlo methods / R. A. Warriner // Solid-State and Electron Devices. – 1977. – Vol. 1, No 4. – P. 105 – 110.
14. **Карпов, С. Н.** Методика прогнозирования характеристик транзисторных GaAs-гетероструктур и полевых транзисторов на их основе / С. Н. Карпов // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2023. – Вып. 2 (558). – С. 61 – 68.
15. **Laux, S. M.** On particle-mesh coupling in Monte Carlo semiconductor device simulation / S. M. Laux // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1996. – Vol. 15, No 10. – P. 1266 – 1277.
16. Investigation of self-heating effects in submicrometer GaN/AlGaN HEMTs using an electrothermal Monte Carlo method / T. Sadi [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2006. – Vol. 53, No 12. – P. 2892 – 2900.
17. **Gonzalez, T.** Physical models of ohmic contact for Monte Carlo device simulation / T. Gonzalez, D. Pardo // Solid-State Electronics. – 1996. – Vol. 39, No 4. – P. 555 – 562.
18. Adjusting the position of the optimum operating point of a power heterostructure field-effect transistor by forming a gate potential barrier based on a donor-acceptor structure / V. M. Lukashin [et al.] // Technical Physics Letters. – 2015. – Vol. 41, No 2. – P. 142 – 145.
19. Complete Monte Carlo RF analysis of «real» short-channel compound FET's / S. Babiker [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1998. – Vol. 45, No 8. – P. 1644 – 1652.

Статья поступила 19 марта 2025 г.

УДК 621.382.323

**ОЦЕНКА КРУТИЗНЫ ВАХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ  
НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ  
ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ**

**Е. В. Терешкин**

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

На основе квантово-механического выражения для центра канала выведена простая формула, позволяющая оценивать крутизну по напряжению на затворе для гетероструктурных транзисторов с произвольной формой квантовой ямы канала. Показано, что, в отличие от гомоструктурных транзисторов, в гетероструктурных крутизна исток – затвор обратно пропорциональна расстоянию до центра канала, а не до его края. При этом величина крутизны в основном определяется не изменением положения центра канала, а изменением поверхностной плотности электронов в канале. В случае обращённых гетероструктур вклад, связанный с изменением положения центра канала, составляет менее 25 % от общей величины крутизны.

*КС: полевой транзистор, крутизна ВАХ транзистора, обращенная гетероструктура, центр канала, квантовая яма, поверхностная плотность электронов*

**ESTIMATION OF THE TRANSCONDUCTANCE  
OF HETEROSTRUCTURES FIELD-EFFECT TRANSISTORS  
WITH QUANTUM WELLS OF ARBITRARY SHAPE**

**E. V. Tereshkin**

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

Based on a quantum-mechanical expression for the center of the channel, a simple formula is derived that makes it possible to estimate the gate voltage transconductance for heterostructure transistors with an arbitrary shape of the channel quantum well. It is shown that, unlike conventional transistors, the HEMT transconductance is inversely proportional to the distance to the center of the channel, and not to its edge. In this case, the transconductance is mainly determined not by a change in the position of the center of the channel, but by a change in the surface density of electrons in the channel. In the case of reversed heterostructures, the contribution related to the change in the channel center position is less than 25 % of the total transconductance.

*Keywords: field-effect transistor, transistor transconductance, reversed heterostructure, center of the channel, quantum well, electrons surface density*

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы GaN-транзисторы и приборы на их основе демонстрируют замечательные результаты [1–6]. Однако перспективы работы на частотах в районе 300 ГГц и выше связывают обычно с существенно более узкозонными материалами типа  $In_x Ga_{1-x} As$  с мольной долей индия более 80 % [6–13]. На этом пути крайне перспективным, кроме использования материалов с высокой мольной долей индия, выглядит направление, использующее относительно широкозонный материал канала (мольная доля индия около 20 %) и различные способы увеличения степени локализации электронов в канале. Дополнительная локализация проводится с использованием как до-

норно-акцепторного легирования [13], так и дополнительных высоких барьеров [14] или фрагментов сверхрешёток на их основе (набор цифровых барьеров).

Донорно-акцепторное легирование [14] позволило заметно увеличить выходную мощность транзисторов на основе псевдоморфных гетероструктур и существенно продвинуться вверх по частотному диапазону [15–17]. Основано оно на использовании гетероструктур со вспомогательными слоями, которые легированы акцепторами, расположеными позади донорных дельта ( $\delta$ ) слоёв по обе стороны от InGaAs-канала (DA-DрНЕМТ). Сформированные таким образом области пространственного заряда создают высокие и резкие потенциальные барьеры высотой вплоть до одного электронволта вокруг канала транзистора, что увеличивает локализацию электронов и их дрейфовую скорость [18–20].

Цифровые барьеры представляют собой фрагменты сверхрешёток: решёток из тонких (толщиной всего в несколько атомных слоёв) барьеров AlAs по краям узкозонного канала [21, 22].

Совместно с донорно-акцепторным легированием такие барьеры локализуют горячие электроны в канале гораздо эффективней, 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, 24].

Цифровые барьеры позволяют сделать ещё один шаг к дальнейшему увеличению рабочих частот транзисторов – уменьшить расстояние затвор-канал за счет использования обращенных гетероструктур [25, 26].

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, а точнее, внутреннюю крутизну, определяемую для идеального прибора без паразитных сопротивлений истока и стока.

Как было неоднократно показано, например [27, 28], крутизна ВАХ по напряжению исток-затвор  $g_m$ , как и входная ёмкость гомоструктурного транзистора, обратно пропорциональна расстоянию от затвора до канала. Само по себе уменьшение этого расстояния не увеличивает рабочие частоты идеального, то есть без паразитных элементов, прибора (отношение крутизны и входной ёмкости при прочих равных условиях остаётся постоянным). Однако в реальном приборе 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 числа носителей как раз обратно пропорциональна расстоянию до затвора.

Очевидно, что для увеличения крутизны в транзисторах надо делать расстояние от затвора до канала как можно меньше.

В гетероструктурных транзисторах принцип изменения проводимости канала совершенно другой: в нем за счёт изменения потенциала на затворе и соответствующего изменения электриче-

ского поля между затвором и областью канала (особенности зависят от конструкции гетероструктуры) меняется расположение квантовых уровней в канале относительно уровня Ферми, а соответственно и поверхностная плотность электронов в нём. Естественно, чем ближе канал находится к затвору, тем сильнее изменение потенциала на затворе меняет поверхностную плотность электронов в канале.

Поэтому правило: чем ближе канал транзистора к затвору, тем выше крутизна – полностью справедливо и в отношении гетероструктурных транзисторов, и оно широко используется. Однако так как, в отличие от гомоструктурных приборов, в НЕМТ механизм изменения числа носителей заряда в канале совершенно другой, то с учетом как малых расстояний от затвора до канала, так и самих размеров канала это накладывает определённые особенности на выбор гетероструктуры [26].

Как в транзисторе на обращенной структуре, так и в обычном НЕМТ расстояние по крайне мере до одного края канала строго фиксировано – это расстояние от затвора до гетероперехода, а в двойных структурах мощных транзисторов (ДрНЕМТ) фиксированы вообще обе границы канала. Изменение числа носителей в канале при изменении напряжения на затворе определяется расстоянием от дна квантовой ямы, а точнее, от квантовых уровней в яме до уровня Ферми [29]. В общем случае описать закономерности этого изменения – это достаточно сложная задача, особенно с учётом изменения энергии электронов вдоль затвора, однако можно сделать элементарные оценки. В работе [26] для прямоугольной потенциальной ямы с однородным распределением электронов было показано, что скорость изменения заряда в яме пропорциональна расстоянию от затвора до её центра, и высказано предположение, что это верно и для ям другой формы. Докажем это предположение в общем случае.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим модельную задачу, достаточно общую для большого числа различных гетероструктур, – гетероструктуру, большая часть электронов в которой находится в квантовой яме на дискретных уровнях (по сути, электронами непрерывного спектра можно пренебречь), и поле на границе структуры в точке  $a$  равно нулю (рис.1).

В такой структуре имеется постоянный заряд ионизованных доноров с постоянной плотностью  $\rho_D(x)$  и акцепторов с постоянной плотностью  $\rho_A(x)$  (если легирование донорно-акцепторное), а также переменный заряд электронов с концентрацией  $n(x)$ .

Для данной структуры, см. [27, 28], потенциал затвора ( $x = 0$ ) имеет вид:

$$U_g(0) = -\frac{e}{\epsilon \epsilon_0} \int_0^a x (\rho_D(x) - \rho_A(x)) dx + \frac{e}{\epsilon \epsilon_0} \int_0^a x n(x) dx, \quad (1)$$

здесь  $e$  – заряд электрона;  $\epsilon$ ,  $\epsilon_0$  – диэлектрические проницаемости полупроводника и вакуума соответственно.

Так как при изменении напряжения на затворе не меняется ни суммарный заряд доноров, ни суммарный заряд акцепторов, а меняется только поверхностная плотность электронов в канале, то первый интеграл – это просто константа.

Концентрация электронов на каждом  $i$ -м уровне квантовой ямы  $n_i(x)$  определяется поверхностью плотностью электронов на данном уровне  $n_{si}$  и видом их волновой функции:

$$n_i(x) = n_{si} |\Psi_i^2(x)|, \quad (2)$$

где, например [30]:

$$n_{si} = \left( \frac{m^* k T}{\pi \hbar^2} \right) \ln \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{E_F - E_i}{k T} \right] \right\}. \quad (3)$$

Здесь  $E_i$  – высота соответствующего квантового уровня;  $E_F$  – высота уровня Ферми;  $m^*$  – эффективная масса электрона;  $\hbar$  – постоянная Планка.

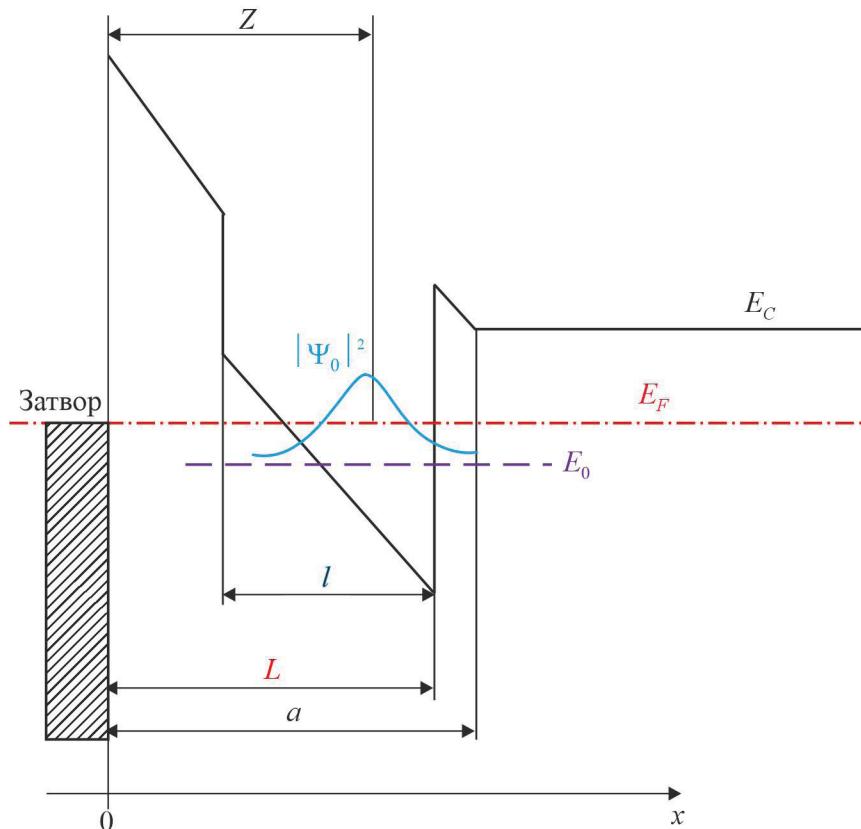


Рис.1. Схематическое представление зонной диаграммы обращённой гетероструктуры (для простоты на рисунке показана только волновая функция нижнего уровня):

$\Psi_0$  – волновая функция электронов основного состояния;  $E_C$  – дно зоны проводимости;  $E_F$  – уровень Ферми;  $E_0$  – энергия основного состояния;  $l$  – толщина слоя  $In_x Ga_{1-x} As$ ;  $L$  – расстояние от затвора до границы гетероперехода;  $a$  – расстояние до легированных донорами дельта-слоя;  $Z$  – эффективная толщина канала

Соответственно поверхностная плотность  $n_s$  и концентрация электронов в яме определяются как:

$$n_s = \sum_i n_{si}, \quad (4)$$

$$n(x) = \sum_i n_{si} |\Psi_i^2(x)|. \quad (5)$$

Таким образом, выражение для потенциала затвора приобретает вид:

$$U_g(0) = -\frac{e}{\epsilon\epsilon_0} \int_0^a x(\rho_D(x) - \rho_A(x))dx + \frac{e}{\epsilon\epsilon_0} \sum_i n_{si} \int_0^a x |\psi_i^2(x)| dx. \quad (6)$$

Как отмечалось выше, первое слагаемое в правой части от потенциала затвора вообще не зависит. Второе слагаемое перепишем следующим образом:

$$\frac{e}{\epsilon\epsilon_0} \sum_i n_{si} \int_0^a x |\psi_i^2(x)| dx = \frac{en_s}{\epsilon\epsilon_0} \sum_i \frac{n_{si}}{n_s} \int_0^a x |\psi_i^2(x)| dx = \frac{en_s}{\epsilon\epsilon_0} Z, \quad (7)$$

где  $Z$  – стандартное квантово-механическое определение среднего расстояния до центра канала:

$$Z = \frac{1}{n_s} \sum_i n_{si} \int_0^a x |\psi_i^2(x)| dx, \quad (8)$$

соответственно:

$$dU_g(0) \approx \frac{eZ}{\epsilon\epsilon_0} dn_s + \frac{en_s}{\epsilon\epsilon_0} dZ \quad (9)$$

или

$$\frac{dn_s}{dU_g} = \frac{\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{1}{Z} \left( 1 - \frac{en_s}{\epsilon\epsilon_0} \frac{dZ}{dU_g} \right). \quad (10)$$

Поверхностная плотность электронов сильно зависит от расстояния до уровня Ферми (3), а значит, и от напряжения на затворе. Расстояние от центра канала до затвора в общем случае тоже зависит от напряжения на затворе, но меняется гораздо слабее (в подавляющем числе случаев на проценты или десятки процентов), а для прямоугольной ямы, см. [26], не зависит вообще. То есть заведомо:

$$\frac{dn_s}{n_s} \gg \frac{dZ}{Z}. \quad (11)$$

Поэтому для оценок этой зависимостью можно пренебречь. Используя это предположение, сразу получаем:

$$dU_g(0) \approx \frac{eZ}{\epsilon\epsilon_0} dn_s. \quad (12)$$

И окончательно:

$$\frac{dn_s}{dU_g} = \frac{\epsilon\epsilon_0}{e} \frac{1}{Z}. \quad (13)$$

То есть скорость изменения заряда в канале обратно пропорциональна расстоянию до центра канала в транзисторах и на гетероструктурах с произвольной формой квантовой ямы.

В обычном НЕМТ расстояние до центра канала с увеличением напряжения на затворе будет увеличиваться [29]. В обращённой структуре с увеличением напряжения на затворе квантовая яма становится более узкой, а значит, центр канала будет приближаться к границе гетероперехода и несколько удаляться от затвора. То же самое происходит в DpHEMT: центр канала будет медленно приближаться к гетеропереходу у подложки.

Однако, с учетом того, что электроны в канале под затвором горячие, изменение формы квантовой ямы в двух последних случаях будет несущественным, тогда как в обычном НЕМТ, на-

оборот, с разогревом электронов эффективная ширина канала будет быстро возрастать. Однако это справедливо только для приборов с толстым слоем однородного узкозонного материала у гетероперехода. Для НЕМТ с каналом AlGaAs/InGaAs/GaAs ширина канала тоже будет изменяться слабо.

Очевидно, что 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.

Оценим величину слагаемого в круглых скобках в формуле (10) для обращённой гетероструктуры.

В открытой обращённой гетероструктуре квантовая яма близка к прямоугольной (рис. 2).

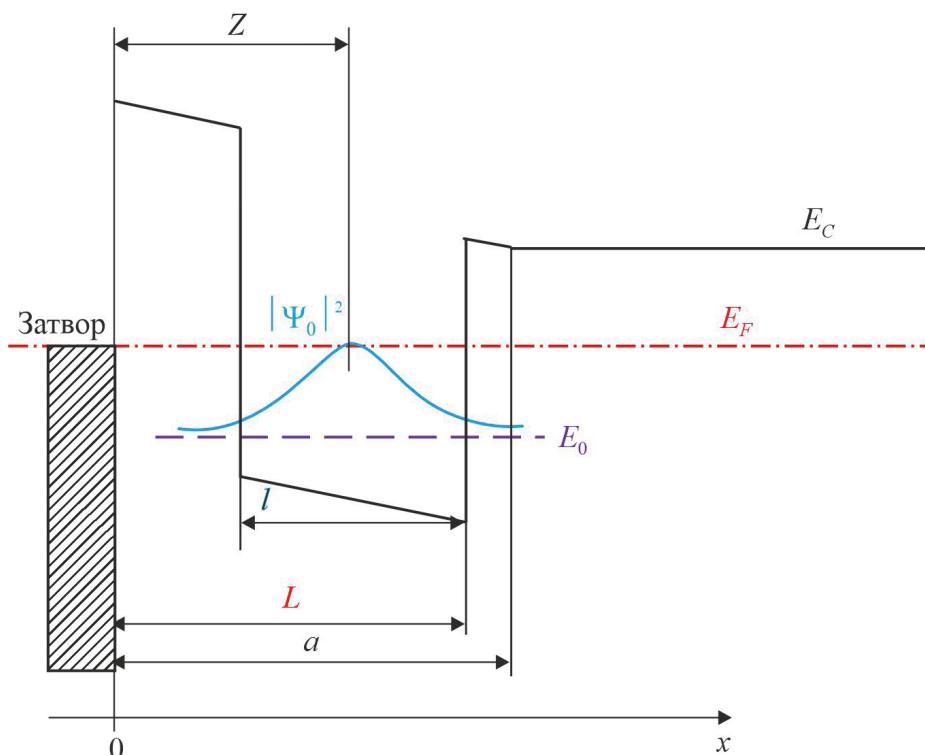


Рис. 2. Схематическое представление зонной диаграммы обращённой гетероструктуры при малых отрицательных напряжениях на затворе.  
Обозначения те же, что и на рис. 1

Оценим изменение центра квантовой ямы  $Z$  в приближении глубокой прямоугольной квантовой ямы с введением в уравнение Шредингера возмущения вида  $eFx$ , где  $F$  – напряжённость электрического поля. Поправка 1-го порядка к волновой функции основного состояния  $\Psi_0$  с учётом быстрого роста энергий в глубокой яме имеет вид [31]:

$$\Psi_0^{(1)} = \frac{V_{01}}{E_0 - E_1} \Psi_1, \quad (14)$$

где

$$E_i = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* l^2} (i+1)^2 \quad (15)$$

– энергия электронов в бесконечно глубокой потенциальной яме (нумерация идёт с нулевого уровня), а  $V_{01}$  – матричный элемент:

$$V_{01} = \int_0^l \psi_0(x) eF x \psi_1(x) dx. \quad (16)$$

С учётом вида волновых функций:

$$\psi_0(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{\pi}{l} x, \quad \psi_1(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{2\pi}{l} x, \quad (17)$$

$$V_{01} = -\frac{16eF}{9\pi^2} \approx 0,18eF \quad (18)$$

и окончательно

$$\Psi_0^{(1)}(x) = -\frac{16eF}{9\pi^2} \frac{2m^* l^2}{3\pi^2 \hbar^2} \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{2\pi}{l} x. \quad (19)$$

С учетом того, что волновые функции действительны, и в предположении, что в основном заселён нижний уровень:

$$\langle \Delta Z \rangle = 2 \int_0^l \Psi_0^{(1)}(x) x \psi_0(x) dx = -\frac{2eFl^2}{3E_0} \left( \frac{16}{9\pi^2} \right) = -\frac{eF m^* l^4}{4\hbar^2} \left( \frac{16}{9\pi^2} \right)^2. \quad (20)$$

Отсюда, с учётом того, что  $\Delta U \approx lF$  (на самом деле  $\Delta U \approx \beta lF$ , где  $\beta > 1$ , так как яма не может непосредственно прилегать к затвору, между ними должен быть барьер),

$$\frac{en_s}{\epsilon \epsilon_0} \frac{dZ}{dU_g} \approx -\frac{en_s}{\epsilon \epsilon_0} \frac{em^* l^3}{4\hbar^2} \left( \frac{16}{9\pi^2} \right)^2. \quad (21)$$

При характерных размерах ямы 10 нм и максимально возможной в таких структурах поверхностной плотности электронов  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$

$$\left| \frac{en_s}{\epsilon \epsilon_0} \frac{dZ}{dU_g} \right| \approx 0,25. \quad (22)$$

Аналогичную оценку можно сделать и для треугольной потенциальной ямы, для которой [30]:

$$E_i = \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{3\pi}{2} eF \left( i + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3}, \quad (23)$$

где

$$Z = \frac{2E_i}{3eF} = \frac{2}{3} \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{3\pi}{2} \left( i + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3} \cdot (eF)^{-1/3} = \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{3\pi}{2} \left( i + \frac{3}{4} \right) \right]^{2/3} \cdot \frac{2}{3(eF)^{1/3}}. \quad (24)$$

Для первого уровня  $i = 0$ , следовательно,

$$Z = \frac{2}{3} \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{9\pi}{8} \right]^{2/3} \cdot (eF)^{-1/3} = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{9\pi}{8} \right]^{2/3} \cdot e^{-1/3} L^{1/3} (U)^{-1/3}. \quad (25)$$

Так как  $|\partial U| = |L \partial F|$ ,

$$\left| \frac{\partial Z}{\partial U} \right| = \left| \frac{1}{L} \frac{\partial Z}{\partial F} \right| = \frac{2}{9} \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{9\pi}{8} \right]^{2/3} \cdot \frac{1}{Le^{1/3} F^{4/3}} = \frac{2}{9} \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{9\pi}{8} \right]^{2/3} \cdot \frac{e^{-1/3}}{L} \cdot F^{-4/3}. \quad (26)$$

Так как

$$F \approx \frac{en_s}{\epsilon \epsilon_0}, \quad (27)$$

то

$$\frac{en_s}{\epsilon \epsilon_0} \frac{dZ}{dU_s} \approx - \frac{en_s}{\epsilon \epsilon_0} \frac{2}{9} \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{9\pi}{8} \right]^{2/3} \cdot \frac{1}{Le^{1/3} \left( \frac{en_s}{\epsilon \epsilon_0} \right)^{4/3}} = \frac{2}{9} \left( \frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left[ \frac{9\pi}{8} \right]^{2/3} \cdot \frac{1}{L} \left( \frac{e^2 n_s}{\epsilon \epsilon_0} \right)^{-1/3}. \quad (28)$$

В этом приближении (степень при концентрации отрицательная) даже при  $n_s \approx 10^{12} \text{ см}^{-2}$

$$\left| \frac{en_s}{\epsilon \epsilon_0} \frac{dZ}{dU_s} \right| < 0,2. \quad (29)$$

Таким образом, даже в самых критических случаях погрешность формулы (13) не пре-  
восходит 25 %.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В общем случае для произвольной квантовой ямы показано, что крутизна  $g_m$  транзистора с достаточно высокой точностью обратно пропорциональна расстоянию до центра квантового канала под затвором. Для обращённых гетероструктур погрешность, связанная с изменением положения центра канала, составляет не более 25 %.

### ЛИТЕРАТУРА

1. A 92 – 100 GHz 100 W SSPA for the HUSIR deep-space upgrade / J. C. Soric, N. J. Kolias, M. Walsh [et al.] // Proceedings of the 54th European Microwave Conference. – P. 820 – 823
2. N-polar GaN/AlN MIS-HEMT with  $f_{\text{MAX}}$  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.
3. 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.

4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Wang, H. (Jul. 2019). Power amplifiers performance survey 2000. – Present. [Online]. – Available: <https://gems.ece.gatech.edu/PAsurvey.html>.
9. 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.
10. A +27 dBm  $P_{sat}$  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. Лукашин, В. М. 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, vol. 2. – Barcelona, Spain: IFSA, 2019. – P. 251 – 288.
16. Лукашин, В. М. 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. Борисов, А. А. Исследование средней дрейфовой скорости электронов в рНEMT транзисторах / А. А. Борисов, К. С. Журавлев, С. С. Зырин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2016. – Т. 42, вып. 16. – С. 41 – 47.
18. Протасов, Д. Ю. Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в рНEMT-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. Пашковский, А. Б. Особенности всплеска дрейфовой скорости электронов в DA-pHEMT / 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 DpHEMT / 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. Винichenko, В. П. Гладков, Н. И. Каргин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, вып. 12. – С. 1660 – 1665.
24. Donor ionization tuning in AlGaAs/InGaAs/GaAs PHEMT quantum wells with AlAs nanolayers in spacer / D. A. Safonov, A. N. Vinichenko, Yu. D. Sibirmovsky [et al.] // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2019. – Vol. 498. – Р. 012031.
25. 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.
26. **Терешкин, Е. В.** Перспективы использования обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами в миллиметровом диапазоне длин волн / Е. В. Терешкин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2022. – Вып. 4 (555). – С. 64 – 78.
27. **Зи, С.** Физика полупроводниковых приборов. В 2-х кн. Кн. 1 / С. Зи. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
28. **Williams, R. E.** Graded channel FET's: improved linearity and noise figure / R. E. Williams and D. W. Shaw // IEEE Transactions on Electron Devices. – June 1978. – Vol. 25, No 6. – Р. 600 – 605. – DOI: 10.1109/T-ED.1978.19143.
29. **Кальфа, А. А.** Двумерный электронный газ в структурах металл-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с селективным легированием // ФТП. – 1986. – Т. 20, вып. 3. – С. 468 – 471.
30. **Stern, F.** Self-consistent results for *n*-type Si inversion layers / F. Stern // Phys. Rev. B. – 1972. – Vol. 5, No 12. – Р. 4891 – 4899.
31. **Ландау, Л. Д.** Квантовая механика. Нерелятивистская теория / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1974. – 752.

Статья поступила 2 июня 2025 г.

---

# РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

---

УДК 621.396.96

## ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АФАР НА ШУМОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКВОЗНОГО ПРИЕМНОГО КАНАЛА

В. И. Протасов<sup>1</sup>, М. С. Карапесов<sup>2</sup>, Д. А. Поисов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИП имени В. В. Тихомирова», г. Жуковский

<sup>2</sup>АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино

Рассмотрены вопросы влияния амплитудного распределения по раскрытию АФАР на интегральный коэффициент шума сквозного приемного канала РЛС. Приведен пересчет электрической схемы антенной решетки к эквивалентному четырехполюснику. Показаны зависимости интегрального коэффициента шума АФАР от коэффициента усиления МШУ приемных каналов при различных амплитудных распределениях. Выявлены отличия РЛС с АФАР от РЛС с ФАР, которые необходимо учитывать при расчете сквозного приемного тракта РЛС.

*КС: РЛС, АФАР, приемный тракт, коэффициент шума*

## THE INFLUENCE OF AESA AMPLITUDE DISTRIBUTIONS ON NOISE CHARACTERISTICS OF THE END-TO-END RECEIVING PATH

V. I. Protasov<sup>1</sup>, M. S. Karasev<sup>2</sup>, D. A. Poisov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «NIIP named after V. V. Tikhomirov», Zhukovsky

<sup>2</sup>JSC «RPC «Istok» named after Shokin», Fryazino

The paper considers the issues of the amplitude distribution influence in the AESA opening on the integral noise figure of the end-to-end radar receiving path. The electrical circuit of the antenna array has been recalculated to an equivalent four-terminal network. The dependences of the AESA integral noise figure on the gain of low-noise amplifiers of the receiving channels are shown at different amplitude distributions. The differences between radars with AESA and radars with PAA have been identified which must be taken into account when calculating the radar end-to-end receiving path.

*Keywords: radar, AESA, receiving path, noise figure*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы широкое применение получили радиолокационные станции (РЛС) и комплексы, созданные на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР). Приемные каналы РЛС с АФАР отличаются от приемных каналов РЛС с пассивными ФАР. Это отличие заключается в том, что входная часть СВЧ-приемника – малошумящий усилитель – вынесена в АФАР и распределена в приемопередающих модулях (ППМ) [1]. Сигнал, отраженный от

цели, принимается всеми ППМ АФАР, где он усиливается и затем синфазно суммируется на ее выходе. При этом собственные шумы приемных каналов АФАР не суммируются на выходе, уровень суммарного шума определяется собственным шумом одного приемного канала АФАР [2, 3]. Функциональной особенностью АФАР является возможность вариации формы диаграммы направленности за счёт изменения амплитудного распределения.

Целью работы является выявление зависимости изменения коэффициента шума сквозного приемного канала РЛС от изменения амплитудного распределения АФАР.

## 2. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ АКТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ АФАР

Использование АФАР в РЛС привело к необходимости применения новых методов анализа характеристик аналоговой части сквозного приемного канала и, в частности, новых подходов для расчета коэффициента передачи и коэффициента шума. Общий коэффициент усиления АФАР  $K_y$  вычисляется по формуле, дБ:

$$K_y = G_{\text{ПРМ}} + K_{\text{УА}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{ПРМ}}$  – коэффициент направленного действия АФАР;  $K_{\text{УА}}$  – активный коэффициент усиления АФАР.

С целью вычисления активного коэффициента усиления воспользуемся методом пересчета антенной решетки к стандартному четырехполюснику, для расчета которого математический аппарат достаточно хорошо отработан [4, 5].

На рис. 1 показана функциональная схема приемной части АФАР, состоящая из  $N$  элементов. Рассмотрим методику преобразования данной схемы к одноканальной схеме на основе эквивалентного четырехполюсника.

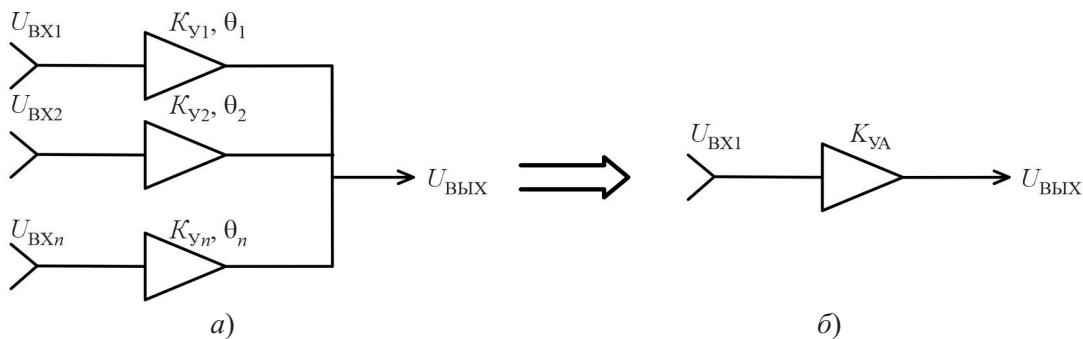


Рис. 1. Функциональная схема АФАР (a) и эквивалентный четырехполюсник (б)

С учетом фазовых множителей  $\theta_n$  и коэффициентов усиления  $K_{y_n}$  каналов АФАР напряжение на выходе антенны определяется по формуле

$$U_{\text{ВыХ}} = \sum_{n=1}^N U_{\text{BX}n} \cdot \exp(j\theta_n) \cdot \sqrt{K_{y_n}}. \quad (2)$$

Чтобы получить выражение для  $K_{\text{УА}}$ , данную конфигурацию антенны сравним с эквивалентной идеальной антенной (без потерь при  $K_{\text{УА}} = 1$ ), для которой  $U'_{\text{ВыХ}}$  примет вид

$$U'_{\text{ВыХ}} = \sum_{n=1}^N U_{\text{BX}n} \cdot \exp(j\theta_n) \cdot \sqrt{1/L_n}, \quad (3)$$

где  $\sqrt{1/L_n}$  – нормированный коэффициент передачи, который должен удовлетворять уравнению из-за отсутствия потерь в идеальной антенне.

$$\sum_{n=1}^N \sqrt{1/L_n} = 1. \quad (4)$$

Основываясь на этой теоретической предпосылке, а также на том, что фазовые множители во всех каналах равны, будем считать, что  $U_{\text{вых}} = U'_{\text{вых}} \cdot \sqrt{K_{\text{ya}}}$ . Это, с учетом формул (2)...(4), позволяет определить  $K_{\text{ya}}$  по сигналу как

$$K_{\text{ya}} = \sum_{n=1}^N K_{y_n}. \quad (5)$$

Соотношение (5) также можно получить из формулы векторного сложения двух гармонических сигналов в сумматоре мощности, приведенном на рис. 2 [6].

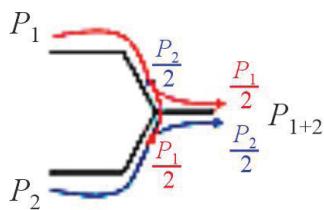


Рис. 2. Сложение гармонических сигналов  
в сумматоре мощности

Мощность на выходе сумматора вычислим по формуле

$$P_{1+2} = \frac{P_1}{2} + \frac{P_2}{2} + 2 \cdot \sqrt{\frac{P_1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{P_2}{2}} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (6)$$

где  $P_{1+2}$  – суммарная мощность двух сигналов на выходе сумматора;  $P_1, P_2, \varphi_1, \varphi_2$  – мощности и фазы двух суммируемых сигналов.

Если сигналы когерентны и разность фаз  $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$ , а мощность  $P_1 = P_2$ , то соотношение (6) упрощается:

$$P_{1+2} = 2P_1 \text{ или } P_{1+2+n} = N \cdot P_1. \quad (7)$$

При сложении шумовых сигналов, которые по своей сути не когерентны и являются случайными процессами, разность фаз  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  также будет случайной величиной. Исходя из этого, множитель  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$  будет стремиться к 0, поскольку математическое ожидание от функции  $\cos(\varphi)$  равно

$$M(\cos(\varphi)) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(\varphi) d\varphi = 0. \quad (8)$$

В таком случае, если мощности складываемых случайных сигналов равны ( $P_1 = P_2$ ), то соотношение (6) принимает вид

$$P_{1+2} = P_1 \text{ или } P_{1+2+n} = P_1. \quad (9)$$

Другими словами, спектральная плотность мощности шумов на выходе АФАР в этом случае будет такой же, как и на выходе одного канала.

### 3. ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАСКРЫВУ АФАР НА ВЕЛИЧИНУ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА ПРИЕМНОГО КАНАЛА РЛС

Для аналоговой части сквозного приемного канала важнейшим параметром является коэффициент шума  $K_{\text{ш}}$ . Он определяет чувствительность всего приемного тракта. Значение  $K_{\text{ш}}$  необходимо для расчета предельной дальности действия РЛС. Основной вклад в значение  $K_{\text{ш}}$  сквозного приемного канала вносит АФАР [3].

Форма амплитудного распределения (АР) и уровень боковых лепестков приемной диаграммы направленности зависят от величины коэффициента усиления каждого канала АФАР. Изменение усиления приемных каналов АФАР для формирования требуемой диаграммы направленности приводит к вариации коэффициентов шума приемных каналов ППМ по ансамблю. Соответственно в зависимости от формы АР изменяются значения  $K_{y_A}$  и  $K_{\text{ш}\Sigma}$ . Интегральный коэффициент шума  $K_{\text{ш}\Sigma}$  АФАР лежит между самым низким значением  $K_{\text{ш}i}$  приемного канала в центре ансамбля и самым высоким значением  $K_{\text{ш}i}$  приемного канала на границах ансамбля. Его значение определяется соотношением [7]

$$K_{\text{ш}\Sigma} = \sum_{i=1}^N K_{\text{ш}i} \cdot K_{y_i} / \sum_{i=1}^N K_{y_i}, \quad (10)$$

где  $K_{\text{ш}i}$  – коэффициент шума  $i$ -го приемного канала ППМ АФАР;  $K_{y_i}$  – усиление  $i$ -го приемного канала ППМ АФАР [7].

Для случая равномерного амплитудного распределения по раскрыву АФАР и при выполнении в первом приближении условия, что  $K_{y_A}$  и  $K_{\text{ш}i}$  одинаковы для всех приемных каналов, из соотношения (10) следует, что интегральный коэффициент шума АФАР равен коэффициенту шума одного парциального приемного канала. При амплитудном распределении, спадающем к краям раскрыва АФАР на величину изменения интегрального коэффициента шума относительно  $K_{\text{ш}\Sigma}$ , определенного для равномерного АР, существенное влияние оказывает значение коэффициента усиления МШУ на входе каждого приемного канала АФАР.

Определение интегрального коэффициента шума АФАР с использованием формулы (10) для различных амплитудных распределений при большом числе каналов представляет достаточно сложную задачу. Для этого требуется большое число поканальных измерений. Для оценки  $K_{\text{ш}\Sigma}$  воспользуемся соотношением [3]:

$$K_{\text{ш}\Sigma} = L_{\text{вх}} \cdot K_{\text{ш,мшу}} - \frac{L_{\text{вх}}}{K_{y, \text{мшу}}} + \frac{N}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{L_n}} \cdot \frac{L_{\text{вх}}}{K_{y, \text{мшу}}} \cdot L_{\text{вых}}, \quad (11)$$

где  $L_{\text{вх}}$  – потери во входной цепи приемного канала до МШУ;  $K_{\text{ш,мшу}}$  – коэффициент шума МШУ;  $K_{y, \text{мшу}}$  – коэффициент усиления МШУ;  $N$  – количество каналов АФАР;  $L_n$  – установленное затухание программируемого аттенюатора в  $n$  канале для реализации требуемого амплитудного распределения по раскрыву;  $L_{\text{вых}}$  – потери в выходной цепи приемного канала после МШУ.

При расчете принимаем, что все приемные каналы АФАР имеют идентичные параметры, за исключением величины установленного затухания управляемого аттенюатора  $1/L_n$ .

Средневзвешенные значения установленного затухания программируемых аттенюаторов для двух различных амплитудных распределений АФАР были рассчитаны по формуле

$$L_{\text{ATT.CP}} = \frac{N}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{L_n}} \quad (12)$$

и сведены в табл. 1.

Таблица 1

AP на прием (уровень боковых лепестков)	$K_{\text{ИП}}$		$L_{\text{ATT.CP}}$	
	разы	дБ	разы	дБ
AP1 ( $X$ , дБ)	1,0	0,0	1,0	0,0
AP5 ( $X = 19$ дБ)	0,764	-1,17	4,016	6,04

где  $K_{\text{ИП}}$  – коэффициент использования поверхности антенны;  $X$  – нормированное значение уровня боковых лепестков АФАР на прием.

Для амплитудных распределений, указанных в табл. 1, при постоянных значениях  $L_{\text{вх}}$ ,  $K_{\text{ш.МШУ}}$ ,  $N$ ,  $L_{\text{вых}}$  и заданных значения  $K_{\text{у.МШУ}}$  по формуле (11) вычислим искомые значения  $K_{\text{ш.Σ}}$ . Результаты этих расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Амплитудное распределение	$K_{\text{ш.Σ}}$ , дБ	
	$K_{\text{у.МШУ}} = 30$ дБ	$K_{\text{у.МШУ}} = 23$ дБ
AP1	$\text{NF}_1$	$\text{NF}_2$
AP5	$\text{NF}_1 + 0,03$	$\text{NF}_2 + 0,3$

где  $\text{NF}$  – значение коэффициента шума при равномерном распределении.

Из данных табл. 2 следует, что, по отношению к  $K_{\text{ш.Σ}}$  равномерного AP, на величину приращения интегрального коэффициента шума  $K_{\text{ш.Σ}}$  при различных амплитудных распределениях АФАР основное влияние оказывает значение коэффициента усиления МШУ входных каналов АФАР.

Результаты расчета показывают, что при  $K_{\text{ш.МШУ}} = 30$  дБ изменение амплитудного распределения по раскрыву АФАР от равномерного AP1 до спадающего AP5 не оказывает значимого влияния на коэффициент шума АФАР, который увеличивается на  $\sim 0,03$  дБ. При  $K_{\text{ш.МШУ}} = 23$  дБ и амплитудном распределении AP5 величина  $K_{\text{ш.Σ}}$  увеличивается на  $\sim 0,3$  дБ.

Результаты экспериментальной оценки изменения интегрального коэффициента шума на средней частоте рабочего диапазона при изменении AP для АФАР приведены в табл. 3.

Таблица 3

	AP1	AP5	$\Delta K_{\text{ш.Σ}}$
$K_{\text{ш.Σ}}$	$\text{NF}$ [дБ]	$\text{NF} + 0,6$ [дБ]	0,6 [дБ]

Из табл. 3 видно, что при реальных практических измерениях АФАР потери интегрального коэффициента шума при изменении АР увеличиваются на 0,6 дБ, что превышает расчетную величину в табл. 2.

Указанное несоответствие, с одной стороны, можно объяснить погрешностью измерения коэффициента усиления, а с другой – свойствами устройства суммирования АФАР, выполненного на мостах Уилкинсона. В них могут возникать дополнительные потери при сложении некоррелированных шумовых сигналов с неравной мощностью.

Поскольку сквозной приемный канал состоит из нескольких каскадов, определим увеличение общего коэффициента шума  $K_{\text{Ш},0}$  по известной формуле, ед.:

$$K_{\text{Ш},0} = K_{\text{Ш}\Sigma} + \frac{K_{\text{Ш,СВЧ}} - 1}{K_{\text{УА}}}, \quad (13)$$

где  $K_{\text{Ш}\Sigma}$  – коэффициент шума АФАР с учетом потерь во входных цепях;  $K_{\text{УА}}$  – активный коэффициент усиления АФАР с учетом потерь в линии передач к последующим каскадам;  $K_{\text{Ш,СВЧ}}$  – коэффициент шума последующих каскадов.

Зададимся следующими условными значениями:  $K_{\text{Ш,МШУ}} = 4,0$  дБ,  $K_{\text{У,МШУ}} = 23$  дБ,  $K_{\text{Ш,СВЧ}} = 14$  дБ, потери в линии передач – 3 дБ.

Согласно формуле (13), для АР1  $K_{\text{Ш},0}$  составит 4,4 дБ. В случае АР5, принимая во внимание увеличение  $K_{\text{Ш}\Sigma}$  на 0,3 дБ и снижение  $K_{\text{УА}}$  на 6 дБ,  $K_{\text{Ш},0}$  составит 5,7 дБ. В то же время при  $K_{\text{УА}} = 25$  дБ для АР1  $K_{\text{Ш},0}$  составит 4,2 дБ и 5,0 дБ для АР5.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Показано, каким образом форма амплитудного распределения по раскрыву оказывает влияние на коэффициент шума сквозного приемного канала РЛС. В этом заключается важное отличие РЛС с АФАР от РЛС с ФАР, которое необходимо учитывать при расчете параметров сквозного приемного тракта.

2. Установлено, что степень этого влияния обратно пропорциональна величине коэффициента усиления МШУ приемных каналов АФАР.

Результаты расчетов коэффициентов усиления МШУ входных каналов АФАР показали, что рационально выбрать значение в пределах от 25 до 27 дБ. Меньшее значение  $K_{\text{У,МШУ}}$  при снижении УБЛ приводит не только к увеличению  $K_{\text{Ш}\Sigma}$  АФАР, но и к увеличению  $K_{\text{Ш},0}$  сквозного приемного канала РЛС. Значение  $K_{\text{Ш,МШУ}} \approx 30$  дБ практически устраниет влияние АР, но приводит к уменьшению динамического диапазона и неустойчивой работе усилительных каскадов (самовозбуждение).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Хлусов, В. А. Сравнительный анализ коэффициента шума пассивных и активных антенных решёток / В. А. Хлусов, В. В. Доценко // Радиотехника. – 2018. – № 2.
- Lee, J. J. G/T and noise figure of active arrays / J. J. Lee // IEEE Transactions on Antennas Propagation. – February 1993. – Vol. 41, No 2. – P. 241 – 244.

3. Гостюхин, В. Л. Активные фазированные антенные решётки / В. Л. Гостюхин, В. Н. Трусов, А. В. Гостюхин; под ред. В. Л. Гостюхина. – М.: Радиотехника, 2011. – 304 с.: ил.
4. Ulrich R. Kraft. Gain and G/T of multielement receive antennas with active beamforming networks / Ulrich R. Kraft // IEEE Transactions on Antennas Propagation. – December 2000. – Vol. 48, No 12.
5. Waldman, A. Noise temperature of a phased array receiver / A. Waldman, G. J. Wooley // The Microwave Journal. – 1966. – Vol. 9, No 9. – P. 89 – 96.
6. Шубин, А. С. Курс общей физики / А. С. Шубин. – М., 1976. – С. 480.
7. Active-electronicall-scanned-array based radar system features / W. Gruener [et al.] // Conference Proceedings of Radar 97, Edinburgh International Conference Centre, UK, 14–16 October 1997, IEE Conference Publication. – № 449. – P. 339 – 343.

*Статья поступила 2 июня 2025 г.*

---

### ===== НОВЫЕ КНИГИ =====

**ЧУМАКОВ А.И. Радиационные эффекты в интегральных схемах.** – М. : Техносфера, 2024. – 384 с.

В монографии описываются основные радиационные эффекты в полупроводниковых приборах и интегральных схемах при воздействии радиационных факторов естественного и искусственного происхождения. Кратко приведены сведения по источникам ионизирующего излучения, физике взаимодействия ионизирующего излучения с веществом и современным технологиям изготовления интегральных схем. Разобраны основные доминирующие радиационные эффекты (структурные повреждения, объемные ионизационные, поверхностные и одиночные) в элементах интегральных схем. Рассмотрены основные механизмы радиационных отказов и сбоев интегральных схем.

**Радиоэлектронная борьба: воздействие электромагнитным излучением на среду распространения радиоволн:** монография / В.Г. Дмитриев, А.И. Куприянов, Ю.М. Перунов. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 236 с.

Рассматриваются особенности функционирования радиосистем в условиях естественного и антропогенного воздействия на среду распространения радиосигналов. Для специалистов в области радиоэлектронной и информационной борьбы. Может быть полезна студентам и аспирантам, изучающим технику радиоэлектронных систем и особенности распространения электромагнитного излучения в различных средах.

УДК 621.396.62/61:621.396.967

## ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ БЛОК ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИКА ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ РЛС

А. В. Адиатулин, М. С. Карапев, С. А. Щеголев, Д. Н. Полозов

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

Представлен четырехканальный блок приемопередатчика, входящий в состав перспективной РЛС, который предназначен для использования на различных платформах (БПЛА, наземные, морские/корабельные, авиационные, мобильные и т. д.). Описаны принцип работы блока и его состав. Показаны внешний вид готового изделия и его основные характеристики.

*КС: приемопередатчик, СВЧ, РЛС, X-диапазон*

## A FOUR-CHANNEL TRANSCEIVER UNIT FOR AN ADVANCED RADAR

А. В. Адиатулин, М. С. Карапев, С. А. Щеголев, Д. Н. Полозов

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

A four-channel transceiver unit included into an advanced radar designed for using on different platforms (unmanned aerial vehicles (UAVs), ground-based, marine/ship-based, aviation, mobile, etc.). The principle of operation of the block and its composition are described. The appearance of the finished product and its main characteristics are shown.

*Keywords: transceiver, microwave, radar, X-band*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы радиолокации играют ключевую роль в обеспечении безопасности, мониторинга окружающей среды и военной обороны. Благодаря постоянному развитию технологий, радиолокация находит применение в самых разных сферах – от гражданской авиации и метеорологии до космических исследований и оборонного комплекса. Радиолокационные станции (РЛС) позволяют осуществлять картографирование местности, а также обнаруживать, идентифицировать и отслеживать объекты на больших расстояниях независимо от времени суток и погодных условий.

Актуальность работы обусловлена непрерывным совершенствованием РЛС, расширением их функциональных возможностей и повышением роли в обеспечении национальной и глобальной безопасности [1].

### 2. СОСТАВ БЛОКА И ПРИНЦИП ЕГО ДЕЙСТВИЯ

Четырехканальный блок приемопередатчика предназначен для переноса с промежуточной частоты (ПЧ) сформированных сигналов локатора в X-диапазон и передачу их на вход блока коммутации с заданным усилением, а также для переноса принятых сигналов X-диапазона на

ПЧ и передачу их с заданным усилением. Блок состоит из четырех приемных (ПРМ) и одного передающего (ПРД) каналов. ПРМ-каналы усиливают сверхвысокочастотный (СВЧ) сигнал до необходимого уровня и преобразовывают его в высокочастотный сигнал (ВЧ). ПРД-канал преобразует входной ВЧ-сигнал в СВЧ-сигнал и усиливает до требуемого уровня выходной мощности [2].

Внешний вид открытого блока показан на рис. 1.

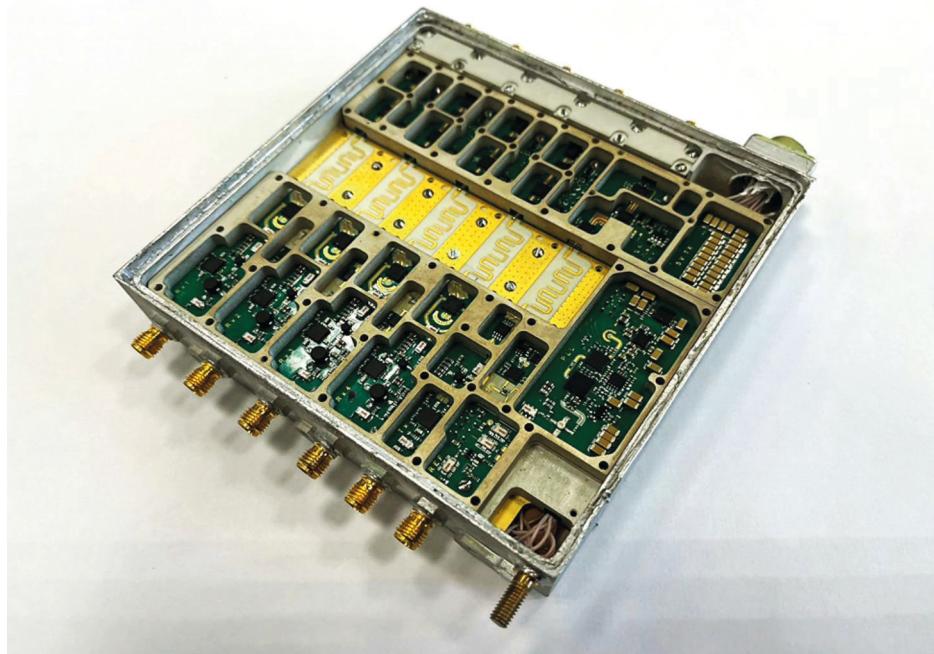


Рис. 1. Внешний вид модуля

#### Состав каналов:

- ПРД-канал включает: предварительный усилитель ВЧ-сигнала, преобразователь ВЧ-сигнала в СВЧ, усилитель СВЧ-сигнала, ступенчатый аттенюатор СВЧ-сигнала;
- ПРМ-каналы включают: малошумящий усилитель, ступенчатый аттенюатор СВЧ-сигнала, преобразователь СВЧ-сигнала в ВЧ-сигнал, усилитель ВЧ-сигнала, ступенчатый аттенюатор ВЧ-сигнала, фильтры ВЧ- и СВЧ-сигналов, дискретный фазовращатель;
- импульсные модуляторы питания по цепям: «5В ПРМ», «5В ПРД», «3В»;
- X-циркулятор;
- разъемы СВЧ (50 Ом).

В состав блока входит плата управления (ПУ), выполняющая следующие функции:

- приём сигналов управления «СТР-ПРД», «СТР-ПРМ» и «СТР-ПН» по отдельным управляющим двухпроводным линиям LVDS из блока БУП;
- преобразование сигналов управления и трансляция их на соответствующие элементы приемопередающего модуля;
- обмен данными между ПУ и блоком управления, осуществляющийся по последовательному интерфейсу RS485 в соответствии с протоколом информационного обмена с блоком управления. Распределение данных по элементам приемопередающего модуля [3].

Полученные экспериментальные значения коэффициента усиления и мощности сигнала на выходе приемного канала, а также выходной мощности передающего канала изображены на рис. 2...4.

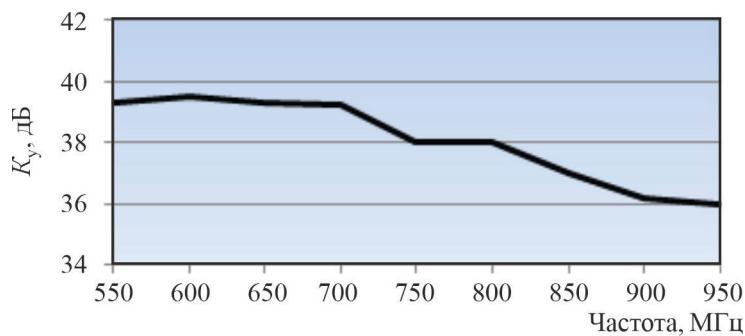


Рис. 2. Коэффициент усиления приемного канала в зависимости от частоты

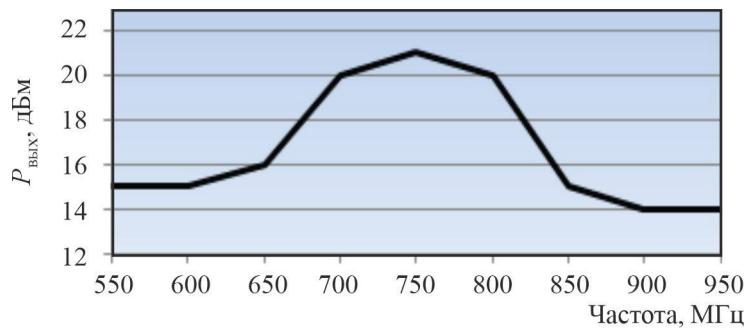


Рис. 3. Мощность сигнала на выходе приемного тракта

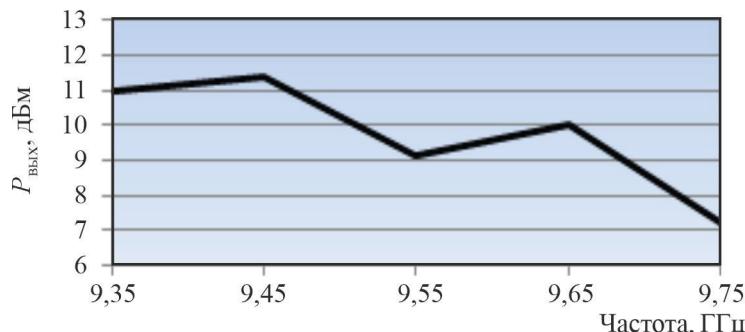


Рис. 4. Выходная мощность передающего канала

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Макет четырехканального блока приемопередатчика успешно применяется в составе РЛС  $X$ -диапазона. Разработка такого блока является важным шагом в создании перспективных радиолокационных систем, обеспечивающих высокую помехоустойчивость и точность определения координат в любых условиях эксплуатации.

Конструкция блока является законченной и готова к серийному производству [4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беспилотные летательные аппараты мира: справочник. – М.: Информационное агентство АРМС-ТАСС, 2011. – 456 с.
2. **Ребров, С. И.** Приоритетные направления развития электронной СВЧ-техники / С. И. Ребров // Электронная промышленность. – 2003. – № 1. – С. 3 – 12.
3. Многофункциональный приемопередающий модуль  $X$ -диапазона частот / М. С. Карасев, А. Г. Далингер, С. В. Шацкий [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3 (542). – С. 51–54.
4. **Кондратенкова, Г. С.** Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Г. С. Кондратенкова, А. Ю. Фролов. – М.: Радиотехника, 2005.

*Статья поступила 2 июня 2025 г.*

---

## ===== НОВЫЕ КНИГИ =====

**Радиоэлектроника СВЧ – технологии, компоненты, приборы, комплексы:**  
сборник научных трудов. Выпуск 1 / под ред. А.А. Кищинского. – М.: Техносфера, 2024. – 580 с.

Книга является сборником научных статей и докладов по тематике, охватывающей широкий круг проблем радиоэлектроники СВЧ-диапазона – от технологий полупроводниковых приборов и интегральных схем на арсениде и нитриде галлия до особенностей построения радиоэлектронных комплексов.

Все работы написаны и опубликованы в материалах конференций и периодических изданиях в разные годы авторами, работающими в настоящее время или работавшими ранее в АО «Микроволновые системы». В книгу включены наиболее интересные на момент опубликования и актуальные до настоящего времени технические и технологические результаты. Также два раздела посвящены истории и перспективам развития нашего предприятия, отмечавшего в 2024 году 20-летний юбилей.

УДК 621.396.677.494

## ХАРАКТЕРИСТИКИ СКАНИРОВАНИЯ ФАР НА ОСНОВЕ МЕТАСТРУКТУРЫ С ЧАСТИЧНЫМ ОТРАЖЕНИЕМ

А. Ю. Гринев<sup>1,2</sup>, А. Д. Поляков<sup>2</sup>, Е. В. Ильин<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Рассмотрены методы сканирования лучом ФАР на основе метаструктуры с частичным отражением, характеризуемых высоким коэффициентом усиления, простотой и технологичностью конструкции. Проведено моделирование и дана оценка сканирующих характеристик (коэффициента усиления, уровня боковых лепестков, полосы частот и согласования элементов) ФАР на основе метаструктуры с частичным отражением.

*КС: фазированная антенная решётка, метаструктура с частичным отражением, реконфигурируемая структура, электронно-перестраиваемое устройство, характеристика сканирования, коэффициент усиления, уровень боковых лепестков*

## CHARACTERISTICS OF SCANNING PHASED ARRAY ANTENNA BASED ON PARTIALLY REFLECTIVE METASTRUCTURE

А. Yu. Grinev<sup>1,2</sup>, A. D. Polyakov<sup>2</sup>, E. V. Ilyin<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University)

The methods of scanning by a phased array beam based on a metastructure with a partial reflection, characterized by a high gain, simplicity and manufacturability of the design, are considered. Modeling is carried out and an assessment of PAA scanning characteristics (gain, side lobe level, frequency band and element matching) is given on the basis of a metastructure with a partial reflection.

*Keywords: phased array antenna (PAA), partially reflective metastructure, reconfigurable structure, electronically tunable devices, scanning characteristic, gain, sidelobe level*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Достоинствами ФАР на основе метаструктуры с частичным отражением (МЧОП) являются: высокий коэффициент усиления (при разумном компромиссе с рабочей полосой частот), высокая апертурная эффективность, простота и технологичность конструкции. Такие решетки для электронного сканирования в сравнительно узком секторе требуются в РЛС аэропортов и аэродромов для управления воздушным движением и инструментальной посадки самолетов; для отслеживания расположения судов в акватории морских портов, в автомобилях для предотвращения столкновений, системах спутниковой связи. Отметим также, что ФАР с МЧОП используются при разработке совмещённых двухдиапазонных антенных систем [1–4]. Однако ФАР с МЧОП обычно имеют узкую полосу, высокий профиль и фиксированный луч, поэтому

большинство исследований таких антенных систем направлено на увеличение полосы пропускания, улучшение сканирующих характеристик и снижение профиля.

В [5] сообщается об управлении лучом патч-антенны (микрополосковой антенны) с помощью локального фазопеременного одномерного метаматериала из емкостной и индуктивной сеток, работающих на частоте 10 ГГц. Этот композитный метаматериал используется как частично отражающая поверхность в резонансной полости антенны с частичным отражением. Достигнуто 20-градусное отклонение луча антенны. Сведения о радиотехнических характеристиках ФАР и механизме управления параметрами сеток для непрерывного сканирования отсутствуют. Двумерные антенные системы (АС) на основе МЧОП рассмотрены в [6, 7]. АС состоят из патч-антенны с зондовым питанием, действующей как излучатель, и реконфигурируемой МЧОП, выступающей в качестве структуры управления лучом. Реконфигурируемая МЧОП использует  $M \times N$  элементарных ячеек различных конструкций и топологий, поровну разделена на четыре секции. Управляя состояниями  $p-i-n$ -диодов, введенных в каждую элементарную ячейку, можно генерировать различные модели излучения. В [6] сканирование реализовано для дискретных углов  $\pm 15^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ$  в ортогональных плоскостях. Коэффициент усиления при максимальном угле сканирования снижается на 4,6 дБ по сравнению с нормалью, уровень боковых лепестков при этом превышает минус 10 дБ. В [7] показано, что в результате компромисса между тремя характеристиками: числом элементарных ячеек, коэффициентом усиления и сектором сканирования – путем регулировки параметров элементарной ячейки угол сканирования луча можно настраивать в диапазоне от  $\pm 15^\circ$  до  $\pm 30^\circ$ . Чтобы найти компромисс между тремя характеристиками, выбрано управление лучом до  $\pm 22^\circ$  в азимутальной плоскости для  $\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  на частоте 5,5 ГГц, при этом падение коэффициента усиления составляет 0,8 дБ. В [8] для двухполяризационной антенны с МЧОП, реализованной на тождественных с [6, 7] технологиях, угол сканирования  $10^\circ$  достигается в азимутальных плоскостях для  $\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  на частоте 5,5 ГГц. В [9] применены новые технологии управления двумерным лучом с использованием жидкой реконфигурируемой МЧОП. Управление лучом осуществляется путем вспышивания жидкого металла в определенную область каналов, встроенных в металлическую поверхность. Сканирование лучом реализовано до  $\pm 15^\circ$  и  $\pm 28^\circ$  в двух ортогональных плоскостях на частотах 9,5...9,7 ГГц.

В [10] представлена концепция антенны с метаструктурой со свойствами ЧОП, способной к независимому сканированию луча и динамическому управлению шириной луча. Ширина луча регулируется путем изменения отражательной способности метаструктуры с помощью встроенных варакторных диодов, в то время как управление лучом осуществляется с помощью двухэлементной ФАР в качестве антенны-источника. Достигаемое изменение ширины луча составляет от  $18,7^\circ$  до  $22,4^\circ$ , при этом диапазон сканирования составляет  $15^\circ$  и  $20^\circ$  для самой узкой и самой широкой ширины луча соответственно. В этой работе сканирование также осуществляется только для дискретных углов в одной плоскости. Конструкция всей антенны значительно сложнее, чем у предыдущих конструкций метаструктур. В [11] приводятся результаты исследования двухдиапазонной, X (9,6 ГГц) и C (5,3 ГГц), антенной решетки с высоким уровнем усиления для систем с синтезированной апертурой. Решение диктуется необходимостью уменьшения сложности фидерной системы, потерь, стоимости и массы. Подтверждена возможность электрического сканирования линейными ФАР  $1 \times 4$  и  $1 \times 8$  элементов с шагом 40 мм X-диапазона в секторе углов  $\pm 15^\circ$ , энергетическая эффективность составляет 62 %, усиление – 21,4 дБ ( $\theta = 0^\circ$ ) и 20,8 дБ ( $\theta = 15^\circ$ ), уровень боковых лепестков – минус 10 дБ.

Отметим, что использование электронно-перестраиваемых устройств ( $p-i-n$ -диодов и варакторов) является распространенным методом изменения фазы в МЧОП, поскольку они харак-

теризуются быстрым временем отклика и программируемыми функциями. В [12] предложено изменять конфигурацию МЧОП, состоящей из разрезных кольцевых резонаторов, используя жидкокомпьютерные или механически вращающиеся технологии. Этим обеспечивается более широкий диапазон искусственно введенных фаз с возможностью достижения больших углов отклонения (до  $42^\circ$ ) с апертурной эффективностью 49 %. Основная сложность – практическая реализация указанных технологий.

Реконфигурация МЧОП, выступающей в качестве структуры управления лучом АС с помощью электронно-перестраиваемых устройств ( $p-i-n$ -диодов и варакторов), требует сложную сеть управления, вносит потери и приводит к сложной зависимости коэффициента усиления АС от угла сканирования и частоты.

Цель статьи – оценка сканирующих характеристик (коэффициента усиления, уровня боковых лепестков, полосы частот и согласования элементов) ФАР на основе метаструктуры с частичным отражением.

## 2. МОДЕЛЬ МЕТАСТРУКТУРЫ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ОДИНОЧНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

На рис. 1 представлена модель АС, состоящей из металлического основания 3, диэлектрического слоя, на котором расположена периодическая метаструктура со свойствами частично отражающей поверхности 2, и возбуждающей патч-антенны 1. Патч-антенна размерами  $6,77 \times 10,15$  мм реализована на диэлектрической подложке ( $\epsilon_r = 3,55$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0027$ ) с размерами  $L = 1,48\lambda_0 = 46$  мм и толщиной 1,524 мм, рабочая частота  $f_0 = 9,6$  ГГц ( $\lambda_0 = 31,2$  мм).

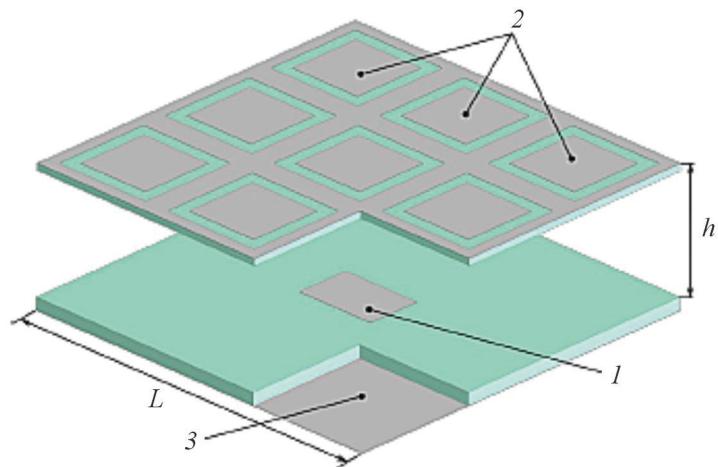


Рис. 1. Модель метаструктуры, возбуждаемой одиночным элементом:  
1 – печатный излучатель; 2 – метаструктура; 3 – металлический экран

На расстоянии  $h = 0,47\lambda_0 = 14,63$  мм расположена периодическая метаструктура 2 со свойствами ЧОП (вставка на рис. 2). Она состоит из кольцевой щели шириной  $w = 1,5$  мм, которая расположена на верхней стороне подложки ( $\epsilon_r = 3,55$ ,  $\text{tg}\delta = 0,0027$ ) толщиной 0,78 мм. Размер внутренней металлизации равен  $d = 0,3\lambda_0 = 9,24$  мм. Периодичность между ячейками составляет  $P = 0,49\lambda_0 = 15,4$  мм. Выбор параметров обусловлен компромиссом между коэффициентом усиления АС и нормированной рабочей полосой частот метаструктуры [3]:  $D_{\max} \cdot \Delta\omega_{3\text{dB}} \cong \pi^2 / 4\epsilon_r \mu_r$ .

( $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости резонансной области). Модуль и фаза коэффициента отражения ячейки метаструктуры на рис. 2 получены в результате моделирования методом конечных элементов для модели ячейки Флоке [13].

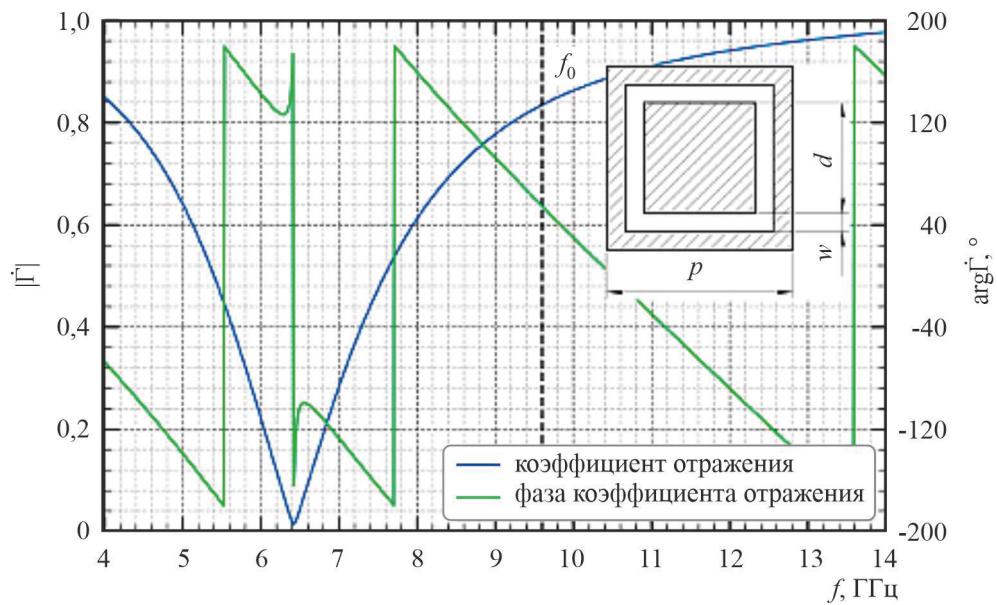


Рис. 2. Ячейка метаструктуры и её частотные характеристики

Коэффициент отражения в патч-антенне и диаграммы направленности АС с конечной базовой метаструктурой  $3 \times 3$  ячейки и без показаны на рис. 3. Коэффициент усиления АС в первом случае равен 9,9 дБ, во втором – 6,4 дБ. Очевидно, что метаструктура обеспечивает увеличение коэффициента усиления и сужение главного лепестка диаграммы направленности АС.

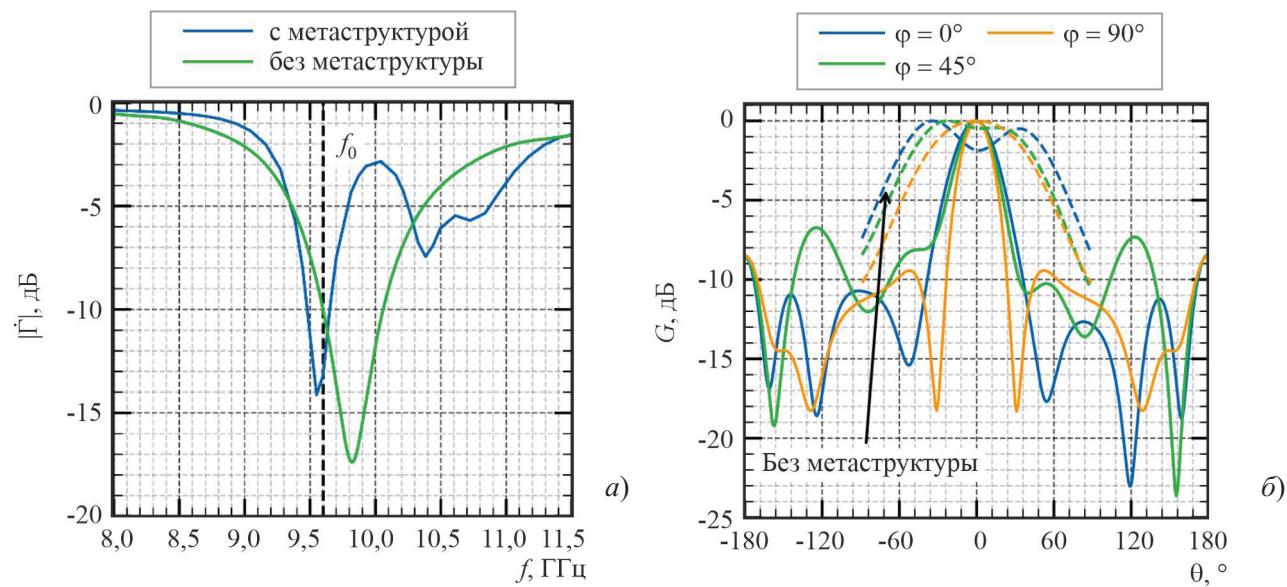


Рис. 3. Результаты моделирования метаструктуры, возбуждаемой одиночным элементом:  
а – частотные зависимости модуля коэффициента отражения излучателя; б – сечения диаграммы направленности

### 3. МОДЕЛЬ ФАР НА ОСНОВЕ МЕТАСТРУКТУР СО СВОЙСТВАМИ ЧАСТИЧНО ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Для проверки возможностей электронного сканирования лучом проведено моделирование антенных решеток: линейки из 10 излучателей ( $27 \times 3$  ячейки метаструктуры размерами  $415,8 \times 46,2$  мм), решетки из  $5 \times 5$  излучателей ( $13 \times 13$  ячеек размерами  $200,2 \times 200,2$  мм – рис. 4) и решетки из  $10 \times 10$  излучателей ( $27 \times 27$  ячеек размерами  $415,8 \times 415,8$  мм.) Период между излучателями во всех трех случаях равен 40 мм ( $1,28\lambda_0$ ). Размеры излучателей и ячеек метаструктур те же, что и в п. 2.

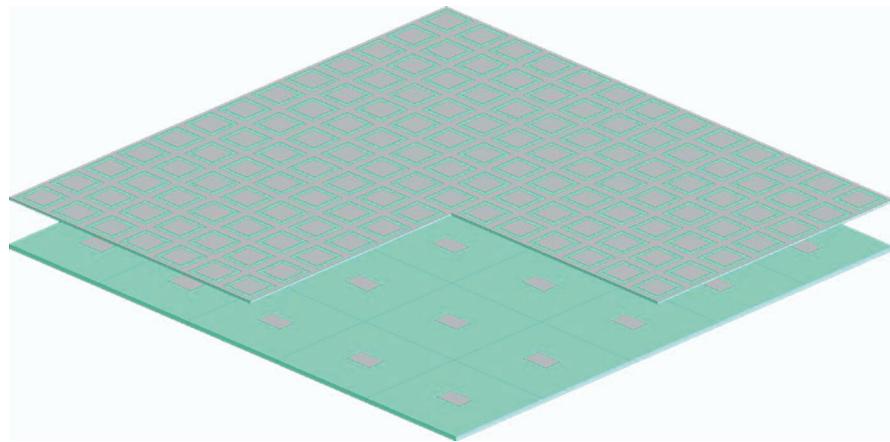


Рис. 4. Модель антенной решетки из  $5 \times 5$  элементов с метаструктурой

Моделирование проводилось методом конечных разностей во временной области на ПЭВМ с процессором AMD Ryzen 5 7600X (6 ядер, 4700 МГц), 64 ГБ оперативной памяти DDR5 5200 МГц, графическим ускорителем NVIDIA GeForce RTX 4070 (12 ГБ VRAM).

Сканирование осуществлялось в ортогональных ( $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ ) и диагональной плоскостях. Диаграммы направленности представлены на рис. 5...7, частотные зависимости коэффициентов отражения элементов решетки – на рис. 8.

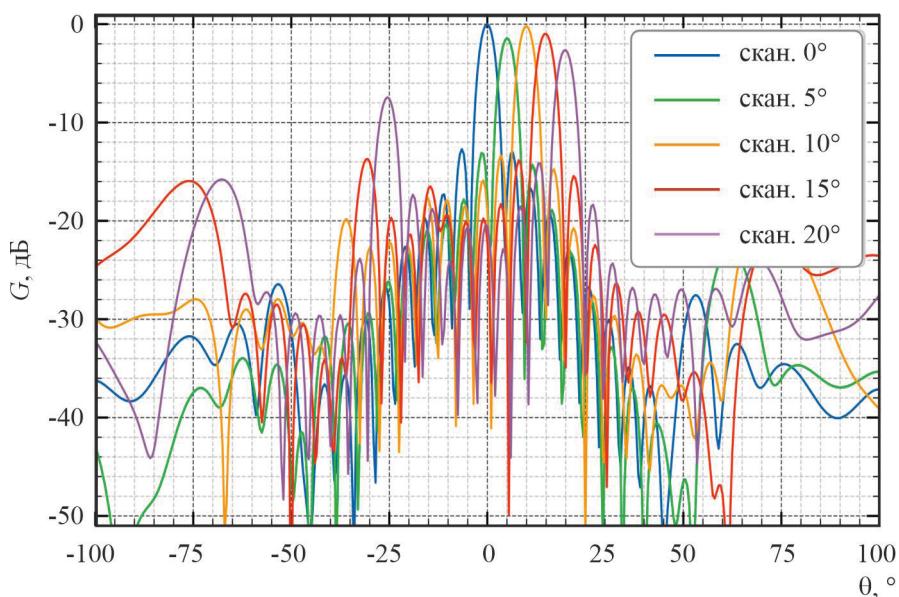


Рис. 5. Диаграммы сканирования решетки  $10 \times 10$  элементов ( $\phi = 0^\circ$ )

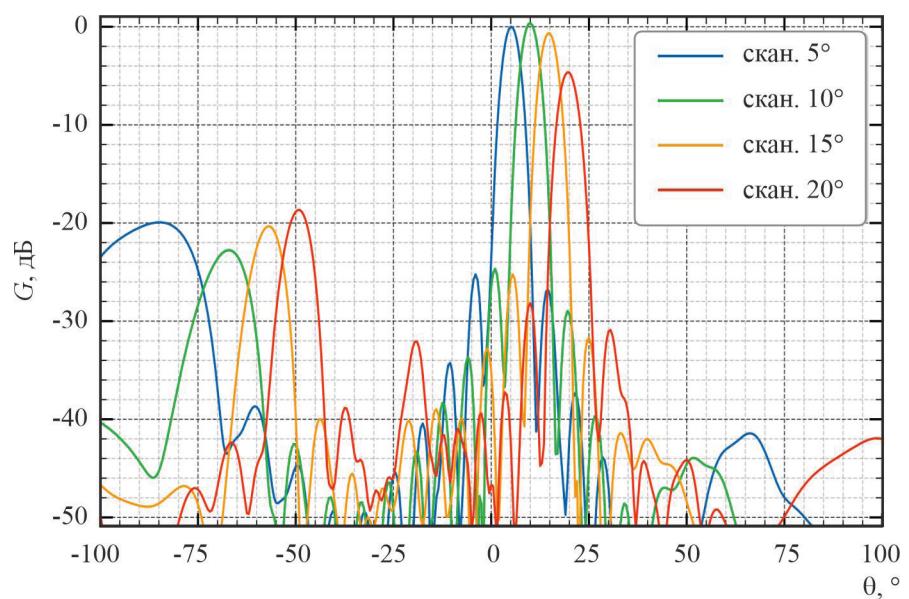


Рис. 6. Диаграммы сканирования решетки  $10 \times 10$  элементов ( $\phi = 45^\circ$ )

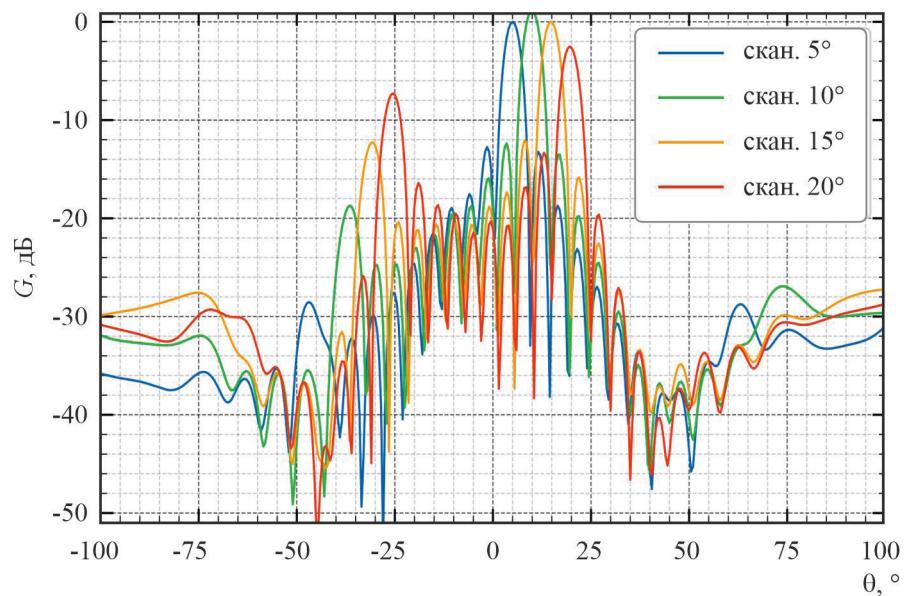


Рис. 7. Диаграммы сканирования решетки  $10 \times 10$  элементов ( $\phi = 90^\circ$ )

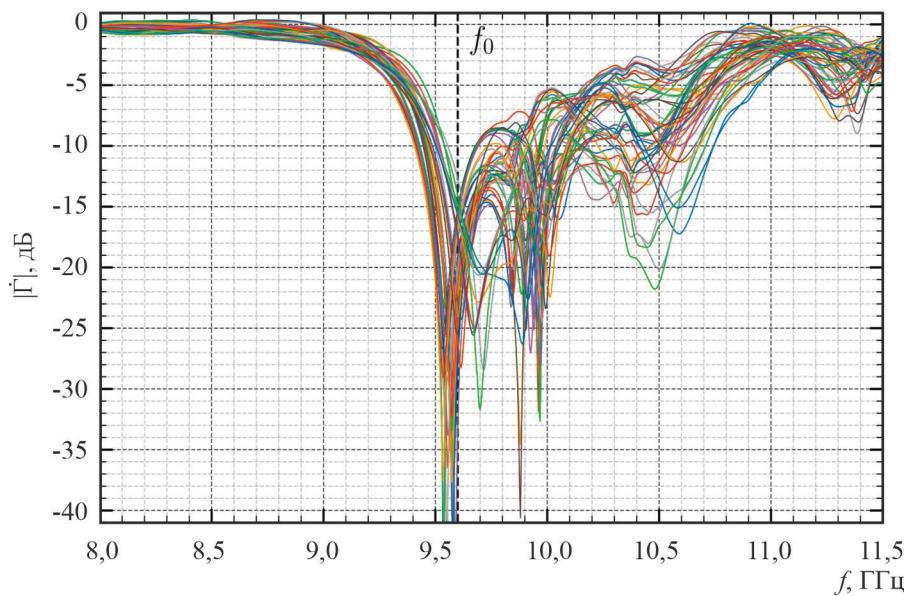


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициентов отражения элементов решетки  $10 \times 10$   
( $\theta = 0^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$ )

Точные значения коэффициента усиления (КУ) и уровня боковых лепестков (УБЛ) приведены в таблице.

**Результаты моделирования ФАР  
на основе метаструктур со свойствами частично отражающей поверхности**

Тип АР	$\theta$ , $^\circ$	$\varphi = 0^\circ$		$\varphi = 45^\circ$		$\varphi = 90^\circ$	
		КУ, дБ	УБЛ, дБ	КУ, дБ	УБЛ, дБ	КУ, дБ	УБЛ, дБ
$1 \times 10$	0	20,94	-13,7	-	-	-	-
	5	20,57	-12,8	-	-	-	-
	10	20,06	-11,5	-	-	-	-
	15	18,22	-7,7	-	-	-	-
	20	17,82	-3,3	-	-	-	-
$5 \times 5$	0	25,81	-12,7	25,81	-19	25,81	-13,5
	5	25,45	-11,9	25,54	-16,9	25,37	-13,4
	10	25,6	-11,9	25,69	-20,4	25,23	-12,5
	15	25,02	-11,4	24,48	-17,8	24,44	-11
	20	23,75	-4,5	22,17	-14,5	22,08	-4
$10 \times 10$	0	32,3	-12,7	32,3	-25,2	32,3	-13,6
	5	30,86	-11,7	32,01	-19,9	31,06	-12,8
	10	32,09	-13,2	32,38	-23,1	32,2	-13,5
	15	31,31	-12,7	31,32	-19,6	31,05	-12,1
	20	29,66	-4,8	27,37	-14	28,53	-4,8

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ФАР на основе метаструктуры с частичным отражением имеют высокий коэффициент усиления и апертурную эффективность, простоту и технологичность конструкции. Использование ФАР в качестве структуры управления лучом исключает непосредственно в метаструктуре электронно-перестраиваемые устройства ( $p-i-n$ -диоды и варакторы), не требует сложную сеть управления, не вносит потери и не приводит к сложной зависимости коэффициента усиления от угла сканирования и частоты. Сканирование подтверждено для углов  $\theta \leq \pm 15^\circ$  (коэффициент усиления снижается не более чем на 3 дБ, уровень боковых лепестков – ниже минус 10 дБ). Согласование элементов на рабочей частоте обеспечивалось до минус 10 дБ в полосе 200 МГц. Рассмотренная АС полезна в тех приложениях, где требуется высокий коэффициент усиления и ограниченный сектор сканирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Burghignoli, P.** Fabry–Perot cavity antennas: the leaky-wave perspective (electromagnetic perspectives) / P. Burghignoli, W. Fuscaldo, A. Galli // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2021. – Vol. 63, No 4. – P. 116 – 145.
2. **Gardelli, R.** Array thinning by using antennas in a Fabry–Perot cavity for gain enhancement / R. Gardelli, M. Albani, F. Capolino // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2006. – Vol. 54, No 7. – P. 1979 – 1990.
3. **Гринёв, А. Ю.** Антенны на основе частотно-селективных структур со свойствами частично отражающей поверхности / А. Ю. Гринёв, А. А. Измайлов, А. А. Цитович // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2019. – № 1. – С. 37 – 51.
4. **Гринёв, А. Ю.** Двухдиапазонная низкопрофильная АР на основе гибридной метаструктуры со свойствами искусственного магнитного проводника и частично отражающей поверхности / А. Ю. Гринёв, А. А. Измайлов, Г. А. Бейлис // Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67, № 9. – С. 859 – 867.
5. **Ourir, A.** Phase-varying metamaterial for compact steerable directive antennas / A. Ourir, S. N. Burokur, A. De Lustrac // Electronics Letters. – 2007. – Vol. 43, No 9. – P. 493 – 494.
6. A reconfigurable partially reflective surface (PRS) antenna for beam steering / L. Y. Ji [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 63, No 6. – P. 2387 – 2395.
7. **Ji, L. Y.** A two-dimensional beam-steering partially reflective surface (PRS) antenna using a reconfigurable FSS structure / L. Y. Ji, Z. Y. Zhang, N. W. Liu // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2019. – Vol. 18, No 6. – P. 1076 – 1080.
8. A dual-polarized two-dimensional beam-steering Fabry–Pérot cavity antenna with a reconfigurable partially reflecting surface / P. Xie, G. Wang, H. Li, J. Liang // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2017. – Vol. 16. – P. 2370 – 2374.
9. A two-dimensional beam steering Fabry–Pérot antenna employing a liquid-based reconfigurable metasurface / W. Chen, Z. Liu, H. Zhou [et al.] // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2023. – Vol. 17, No 13. – С. 999 – 1005.
10. **Debogović, T.** Array-fed partially reflective surface antenna with independent scanning and beamwidth dynamic control / T. Debogović, J. Perruisseau-Carrier // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 62, No 1. – P. 446 – 449.
11. A simple low-cost shared-aperture dual-band dual-polarized high-gain antenna for synthetic aperture radars / F. Qin, S. S. Gao, Qi Luo [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2016. – Vol. 64, No 7. – P. 2914 – 2922.
12. Methodology and implementation of beam steering using C-shaped split rings for Fabry–Perot antennas / G. Zhang, M. Su, Y. Zhang [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2023. – Vol. 71, No 3. – P. 2268 – 2277.
13. **Гринёв, А. Ю.** Численные методы решения прикладных задач электродинамики. – М.: Радиотехника, 2012. – 336 с.

Статья поступила 28 апреля 2025 г.

---

# ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

---

УДК 666.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОЙ (СВЫШЕ 80) ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

В. И. Иванова, М. И. Ларионов, А. И. Протченко,  
А. И. Клинова, И. Д. Корнилов

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

Приводятся результаты исследования влияния химического состава и технологических режимов на диэлектрическую проницаемость керамического материала с общей формулой  $(\text{Ba}_{1-y}\text{Pb}_y)(\text{Nd}_{2-x}\text{Bi}_x)\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ . Были получены образцы с диэлектрической проницаемостью от 80 до 105.

*КС: термостабильный керамический материал, диэлектрическая проницаемость, температурный коэффициент частоты, тангенс угла диэлектрических потерь*

## RESEARCH AND PRODUCTION OF THERMOSTABLE CERAMIC MATERIALS WITH A HIGH (OVER 80) DIELECTRIC CONSTANT

V. I. Ivanova, M. I. Larionov, A. I. Protchenko,  
A. I. Klinova, I. D. Kornilov

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

The paper presents the results of studying the influence of chemical composition and technological modes on the dielectric constant of a ceramic material with a general formula of  $(\text{Ba}_{1-y}\text{Pb}_y)(\text{Nd}_{2-x}\text{Bi}_x)\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ . Samples with a dielectric constant ranging from 80 to 105 have been obtained.

*Keywords: thermostable ceramic material, dielectric constant, temperature coefficient of frequency, tangent of dielectric loss angle*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

При интенсивном развитии средств связи в микроволновом диапазоне частот возникла необходимость в керамических резонаторах и создаваемых на их основе керамических фильтрах. Микроволновые резонаторы используются в телекоммуникационных устройствах, включая сотовые телефоны, спутниковую связь, и занимают большую нишу на мировом рынке. При создании данных приборов встает вопрос об уменьшении размеров СВЧ-систем, а значит, и размеров резонаторов. Это становится возможным при увеличении значения диэлектрической проницаемости, вследствие обратно пропорциональной зависимости размера резонатора  $d$  и дейст-

вительной части комплексной диэлектрической проницаемости ( $d \sim 1/\sqrt{\epsilon}$ ). Однако с увеличением диэлектрической проницаемости возрастают и диэлектрические потери:

$$\operatorname{tg}\delta_{\epsilon} = 1/Q, \quad (1)$$

где  $Q$  – добротность резонатора.

Диэлектрические потери – другой важный параметр для микроволновой керамики, зависящий от многих факторов, которые трудно разделить: технологический процесс, микроструктура, количество примесей, фазовый состав. По этому вопросу очень мало опубликованных работ.

Термостабильность диэлектрических материалов для резонаторов и фильтров – это основное требование, предъявляемое к данному классу керамики. Температурный коэффициент частоты применения (ТКЧ)  $\tau_f$  зависит от изменения диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  в интервале температур от  $-60$  до  $+85$  °C (ТК $\epsilon$ ), которые связаны между собой соотношением:

$$\text{ТК}\epsilon \sim -1/\tau_f. \quad (2)$$

Оптимальное сочетание плотности  $\rho$ , диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ , добротности  $Q$  и малое значение температурного коэффициента  $\tau_f$  – основное требование для успешного функционирования СВЧ-приборов.

Многие микроволновые материалы имеют в своей основе структуру перовскита. Одним из таких материалов является сложное оксидное соединение с общей химической формулой  $\text{Ba}_{6-3x}\text{Ln}_{8+2x}\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$ , где Ln – лантаноиды (La, Pr, Nd, Sm). В работе [1] представлены результаты исследований соединения  $\text{BaLnTi}_5\text{O}_{14}$ , микроволновые диэлектрические свойства которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Микроволновые диэлектрические свойства керамики  $\text{BaLnTi}_5\text{O}_{14}$**

Материал	$\epsilon'$	$Q:f$ , ГГц	$\tau_f \cdot 10^6$ , $1/^\circ\text{C}$	Объёмная плотность, $\text{г}/\text{см}^3$
$\text{BaLn}_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$	88,02	2200	+70	4,95
$\text{BaPr}_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$	76,48	6700	+37	5,12
$\text{BaNd}_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$	77,55	17600	+40	5,14
$\text{BaSm}_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$	72,15	24000	-14	5,36

В этих материалах помимо основной образуются вторичные фазы, такие, как  $\text{BaTi}_9\text{O}_{20}$  и  $\text{TiO}_2$ , тем самым ухудшая диэлектрические свойства.

Настоящая работа посвящена исследованию и получению диэлектриков состава  $\text{Ba}_{6-3x}\text{Ln}_{8+2x}\text{Ti}_{18}\text{O}_{54}$  для случая, когда  $\text{Ln} = \text{Nd}$ , а  $x = 0,5$ . Тогда упрощенная формула имеет вид  $\text{BaNd}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ , а керамический материал обладает параметрами:  $\epsilon' = 78$ ;  $\operatorname{tg}\delta_{\epsilon} = 7,6 \cdot 10^{-4}$ ;  $\tau_f = +66$  [2]. При этом в материале практически отсутствуют посторонние фазы.

Данный материал был взят за основу при исследовании получения материалов с  $\epsilon' > 80$ . Увеличение диэлектрической проницаемости может быть достигнуто, как показано в [3], при замещении части ионов Ba ионами Pb.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1) исследовать влияние замещения части  $\text{BaO}$  на  $\text{PbO}$  ( $y = 0,1; 0,25; 0,35$ ) при одновременном введении  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  вместо  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  ( $x = 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ ) на свойства материала, представленного химической формулой  $(\text{Ba}_{1-y}\text{Pb}_y)(\text{Nd}_{2-x}\text{Bi}_x)\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ;

2) выбрать технологические режимы, а также исходные сырьевые материалы для получения диэлектрических материалов с оптимальным сочетанием следующих параметров: вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости, тангенс угла диэлектрических потерь, плотность при минимальном водопоглощении и ТКЧ.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных компонентов использовались  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  («ОСЧ»),  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  («ОСЧ»),  $\text{TiO}_2$  («ОСЧ»),  $\text{PbO}$  («ОСЧ»),  $\text{BaCO}_3$  («ЧДА»). Исходные компоненты, взятые в необходимых соотношениях, перемешивали мокрым способом на валковой мельнице барабанного типа с алундовыми шарами в течение 24 ч при соотношении масса/шары/вода – 1/2/2,5. Затем смесь материалов высушивали при температуре от 80 до 100 °C в течение 15...20 ч и протирали через капроновое сито с размером ячейки 0,9 мм. Синтез материалов проходил при температуре от 1180 до 1200 °C в течение от 4 до 6 ч в воздушной среде в алундовых тиглях, после чего шихту подвергали мокрому помолу по режиму, указанному выше. После сушки синтезированного вещества и просеивания через сито определяли фазовый состав на рентгеновском дифрактометре ЭКРОС XRD–9510. Степень измельчения контролировали на лазерном анализаторе частиц «Микросайзер 201С». Пресс-порошок изготавливали путём введения 1/5 части 1,5%-го раствора метилцеллюлозы и пропускали через капроновые сита. Образцы в виде дисков диаметром 18,5 мм и высотой 4 мм прессовали при удельном давлении 1,0 т/см<sup>2</sup>. Обжиг образцов проводили в печах камерного типа в интервале температур от 1250 до 1350 °C с выдержкой 4 ч в атмосфере кислорода. Фазовый состав спеченных диэлектриков также определялся на рентгеновском дифрактометре. Плотность образцов измеряли методом гидростатического взвешивания.

Измерения диэлектрических свойств керамики проводили нашлифованных дисках диаметром 14,0 мм и высотой 1,0 мм резонаторным методом на частотах 4...5 ГГц. Измерение ТКЧ проводили в температурном интервале от +20 до +85 °C.

## 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Создание термостабильных диэлектрических материалов с высокой диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon' > 80$ ) проводили, как было сказано выше, на базе соединения с общей химической формулой  $(\text{Ba}_{1-y}\text{Pb}_y)(\text{Nd}_{2-x}\text{Bi}_x)\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ , где  $y = 0,1; 0,25; 0,35$ ;  $x = 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$ . Согласно рентгенофазовому анализу, шихта, обожженная при температуре от 1180 до 1200 °C, содержала основную фазу ромбической сингонии более 80 %. Остальное составляли вторичные фазы со структурой  $\text{BaTi}_4\text{O}_9$  и  $\text{TiO}_2$  (рутит). Состав спеченных диэлектриков при оптимальной температуре от 1250 до 1300 °C был однофазным, но при увеличении замещения ( $y > 0,25$  и  $x > 0,4$ ) они содержали следы вторичной фазы со структурой  $\text{BaTi}_4\text{O}_9$ . В дальнейшем планируется корректировка состава в сторону уменьшения компонентов  $\text{BaO}$  и  $\text{TiO}_2$  для получения однофазных диэлектриков.

Для подбора оптимальной температуры обжига изделий исследовали зависимость  $\rho = f(t)$ . На рис. 1 показаны зависимости плотности образцов от температуры спекания для различных составов.

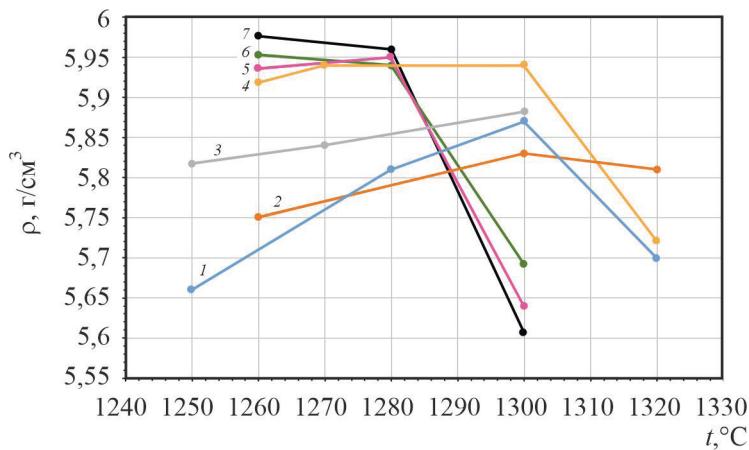


Рис. 1. Зависимости плотности образцов от температуры спекания:

1 –  $x = 0,25, y = 0,1$ ; 2 –  $x = 0,4, y = 0,1$ ; 3 –  $x = 0,3, y = 0,25$ ; 4 –  $x = 0,5, y = 0,25$ ;  
5 –  $x = 0,35, y = 0,35$ ; 6 –  $x = 0,45, y = 0,35$ ; 7 –  $x = 0,6, y = 0,35$

Как видно из рис. 1, с увеличением температуры спекания плотность, как правило, возрастает от 5,65 до 5,90 г/см<sup>3</sup>, но с дальнейшим увеличением температуры  $\rho$  начинает снижаться, вследствие деградации образца. Предположительно, происходит выплавление Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и PbO. С ростом замещения свинцом и висмутом  $\rho$  также увеличивается, но в меньшей степени, от 5,7 до 6,0 г/см<sup>3</sup>. Анализируя данные рис. 1, можно заключить, что температура обжига для всех составов находится в пределах от 1260 до 1300 °C, а при значении  $y = 0,35$  температура спекания, равная 1260 °C, является оптимальной.

На рис. 2 приведена зависимость величины диэлектрической проницаемости для плотных образцов от содержания висмута ( $\epsilon' = f(x)$ ) при различных количествах свинца ( $y = 0,1; 0,25; 0,35$ ). Видно, что с увеличением содержания висмута диэлектрическая проницаемость растёт, причём увеличение свинца также способствует росту диэлектрической проницаемости: для  $y = 0,1$   $\epsilon'$  – от 85 до 94,6; для  $y = 0,25$   $\epsilon'$  – от 88 до 98; для  $y = 0,35$   $\epsilon'$  – от 94 до 105.

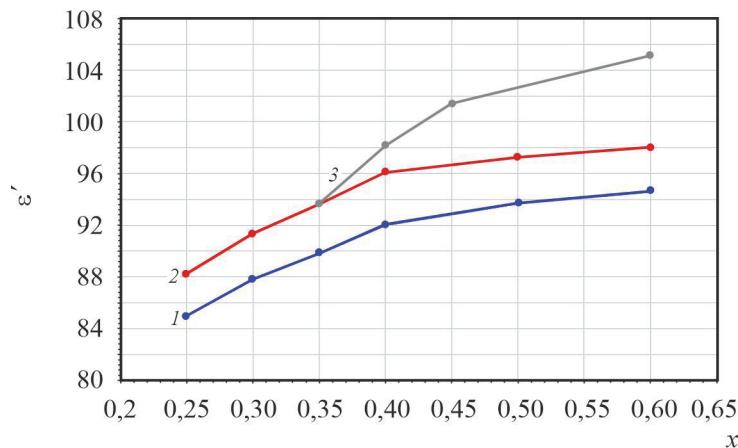


Рис. 2. Зависимости диэлектрической проницаемости для плотных образцов от содержания висмута  $x$ :

1 –  $y = 0,1$ ; 2 –  $y = 0,25$ ; 3 –  $y = 0,35$

В табл. 2 представлены свойства полученных диэлектрических керамических материалов  $(\text{Ba}_{1-y}\text{Pb}_y)(\text{Nd}_{2-x}\text{Bi}_x)\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  при различных значениях  $y$  и  $x$ .

Таблица 2

**Свойства диэлектрических керамических материалов**

№ п/п	$y$	$x$	$\epsilon'$	$\text{tg}\delta_e \cdot 10^3$	$\tau_f \cdot 10^6, 1/\text{°C}$	$\rho, \text{г}/\text{см}^3$
1	0,1	0,35	88,8	1,20	—	5,66
2		0,35	90,1	1,49	-15,3	5,87
3		0,4	85,5	1,45	—	5,74
4		0,4	92,0	1,51	-6,0	5,83
5	0,25	0,3	87,7	1,2	-4,7	5,88
6		0,4	96,0	2,0	-32,7	5,85
7		0,45	81,0	1,1	-9,9	5,70
8		0,45	96,6	2,4	—	5,92
9		0,5	97,2	2,8	-18,1	5,91
10	0,35	0,35	94,2	1,7	-39,5	5,94
11		0,45	101,4	2,5	-13,0	5,95
12		0,6	105,2	3,6	-12,2	5,98

С ростом диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  от 81 (№ 7) до 105,2 (№ 12) заметно увеличение тангенса диэлектрических потерь от  $1,1 \cdot 10^{-3}$  до  $3,6 \cdot 10^{-3}$ . Этую тенденцию отмечают многие исследователи [4], изучающие сложные оксидные материалы для микроволновой техники.

С увеличением плотности (№ 3 и 4; № 7 и 8) диэлектрические потери также растут, т. к. керамика становится непроницаемой для кислорода. При дефиците кислорода запускается процесс восстановления  $\text{Ti}^{4+} \rightarrow \text{Ti}^{3+}$ . Появление кислородных вакансий может быть ответственно за увеличение потерь.

Значение коэффициента температурной стабильности резонаторной частоты должно быть вблизи нуля ( $\tau_f = (0 \pm 15) \cdot 10^6 1/\text{°C}$ ) для материалов, разработанных для применения в диэлектрических резонаторах. Однако результаты измерения ТКЧ на некоторых образцах превышают это значение. По-видимому, в этих образцах присутствуют посторонние фазы, повышающие значение ТКЧ, например  $\text{TiO}_2$ .

**4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе предложен способ повышения диэлектрической проницаемости до значения более 80 сложного оксидного материала со структурой перовскита. Для этого проведено исследование соединения  $(\text{Ba}_{1-y}\text{Pb}_y)(\text{Nd}_{2-x}\text{Bi}_x)\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  при одновременном замещении бария свинцом, когда  $y = 0,1; 0,25; 0,35$ , и неодима висмутом, когда  $x$  изменялся от 0,25 до 0,6.

Определены исходные материалы, взятые в виде оксидов и  $\text{BaCO}_3$  квалификации ОСЧ и ЧДА. Выбраны технологические режимы, позволяющие получать образцы с плотностью, близкой

к рентгеновской, и содержащие минимальное количество (следы) посторонних фаз. Получены термостабильные диэлектрические материалы с диэлектрической проницаемостью от 80 до 105 и диэлектрическими потерями менее  $2,5 \cdot 10^{-3}$ .

В дальнейшем при оптимизации технологии получения конкретных диэлектрических материалов (с  $\epsilon' = 90; 95; 100$ ), возможно, удастся получить однофазный диэлектрик с меньшими потерями и снизить ТКЧ, а также лучше изучить природу диэлектрических потерь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Sreemoolanadhan, H.** Dielectric resonators in BaO–Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–5TiO<sub>2</sub> system (Ln = La, Pr, Nd, Sm) / H. Sreemoolanadhan, M. T. Sebastian, P. Mohanan // British Ceramic Transactions. – 1996. – Vol. 95, No 2.
2. Влияние ионов редкоземельных металлов на диэлектрические свойства соединения BaO–Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub> / И. Д. Корнилов, А. И. Клинова, М. И. Ларионов, В. И. Иванова // XV научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных имени профессора, лауреата Государственной премии СССР А.С. Дудырева: тез. докл. – СПб., 2025. – С. 48.
3. **Wakino, K.** Microwave characteristics of (Zr, Sn)TiO<sub>4</sub> and BaO–PbO–Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub> dielectric resonators / K. Wakino, K. Minai, H. Tamura // Journal of the American Ceramic Society. – 1984. – Vol. 67, No 4.
4. Effect of divalent dopants on the properties of Ba<sub>6-3x</sub>Nd<sub>8+2x</sub>Ti<sub>18</sub>O<sub>54</sub> microwave dielectric resonators / R. Ubic [et al.] // Journal MRS Proceedings. – 1996. – Vol. 453.

*Статья поступила 29 апреля 2025 г.*

УДК 621.3.049.774

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ В GaN МИС

И. А. Рогачёв

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

Рассмотрены способы формирования сплавных и несплавных омических контактов к гетероструктурам на основе нитрида галлия. Проанализированы достоинства и недостатки этих способов. Как сплавной, так и несплавной способ изготовления были опробованы, в результате для сплавных омических контактов были получены значения удельного сопротивления порядка 0,4 Ом·мм, для несплавных – 0,2 Ом·мм.

КС: GaN, HEMT, сплавной омический контакт, несплавной омический контакт

## FEATURES OF OHMIC CONTACTS FORMATION IN GaN MICs

I. A. Rogachev

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

Methods of forming alloyed and non-alloyed ohmic contacts for heterostructures based on gallium nitride have been considered. The advantages and disadvantages of these methods were analysed. Both alloyed and non-alloyed methods of manufacturing were tested, and as a result, resistivity values of the order of 0.4 Ohm·mm were obtained for alloyed ohmic contacts and 0.2 Ohm·mm – for non-alloyed ohmic contacts.

Keywords: GaN, HEMT, alloyed ohmic contact, non-alloyed ohmic contact

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Формирование контактов между металлом и полупроводником является ключевым этапом в производстве электронных устройств. При создании GaN-транзисторов и микросхем СВЧ-диапазона особое внимание уделяется качеству омических контактов для электродов истока и стока, а также контактов Шоттки. Надежность этих контактов напрямую влияет на функциональность и долговечность устройств.

Омические контакты должны характеризоваться низким сопротивлением, высокой термической и электрической стабильностью. Одним из ключевых параметров, который контролируется при формировании электродов истока и стока, является удельное сопротивление омического контакта. Этот параметр оказывает значительное влияние на динамические характеристики устройства [1]. Достижение низкого сопротивления омического контакта представляет собой сложную задачу, так как ширина запрещенной зоны нитрида галлия велика (примерно 3,5 эВ).

Основной целью при создании омических контактов является минимизация их удельного сопротивления. Существует два основных подхода к формированию таких контактов для гетероструктур на основе GaN: методы, предполагающие использование высокотемпературной обра-

ботки (сплавные омические контакты), и методы, не требующие воздействия высоких температур (несплавные омические контакты). При использовании сплавных методов возникают сложности, связанные с сохранением морфологии и геометрии электродов истока и стока из-за термического воздействия. В случае несплавных методов основными проблемами являются обеспечение высокого качества контактной поверхности полупроводника и сложности, связанные с селективным эпитаксиальным ростом полупроводниковых структур.

Таким образом, разработка технологии формирования омических контактов с низким удельным сопротивлением, стабильной морфологией и геометрией остается актуальной и важной задачей.

## 2. СПЛАВНЫЕ ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

Формирование типовых сплавных омических контактов электрода стока и истока транзистора, как правило, подразумевает использование металлизации Ti/Al/Ni/Au. Механизм их формирования основан на образовании соединений  $Ti_3Al$  и  $AlTi_2N$  и вакансий азота на поверхности полупроводника, что равносильно донорному легированию, при высокотемпературном воздействии [1].

Помимо Ti/Al/Ni/Au-металлизации для формирования сплавных омических контактов могут быть использованы и другие металлические слои, способные обеспечить низкое удельное сопротивление  $R_c$ . В табл. 1 приведены значения удельного сопротивления омических контактов при использовании различных слоёв металлизации, температуре  $T$  и времени  $t$  высокотемпературного воздействия.

Таблица 1

Особенности формирования сплавных омических контактов

Слои металлов	Толщина, нм	Режим вжигания		$R_c$ , Ом·мм	Ссылка
		$T$ , °C	$t$ , с		
V/Al/Pt/Au	15/85/50/50	650	45	0,82	[2]
Si/Ti/Al/Ni/Au	—	800	30	0,23	[3]
Ti/Al/Ni/Au	15/220/40/50	700	60	0,15	[4]
V/Al/V/Ag	30/75/20/120	825	60	0,27	[5]
Ti/Al/Ti/Al/Ni/Au	5/30/5/30/50/100	900	30	0,22	[6]
		600	120		
Mo/Al/Mo/Au	10/60/50/50	800	30	0,14	[7]
Ta/Al/Ta	10/280/200	550	60	0,06	[8]
Ta/Al/Ta/Au	10/280/100/50	550	60	2,23	
Ta/Al/Ni/Au	10/140/40/40	550	60	0,41	
Mo/Al/Mo/Au	10/40/20/30	500	180	0,1	[9]
Ti/Al/Mo/Au	—	800	45	0,38	[10]
Mo/Al/Mo/Au	—	800	45	0,22	
V/Al/Mo/Au	—	700	45	0,35	

Использование ванадия для формирования сплавных омических контактов обусловлено образованием термически устойчивого нитрида ванадия с малой работой выхода [5, 10]. Присутствие кремния в слоях металлизации омических контактов [3] приводит к дополнительному легированию донорной примесью слоя полупроводника, что уменьшает потенциальный барьер на границе раздела метал-полупроводник. Применение тантала также значительно снижает удельное сопротивление омического контакта. Использование слоёв Ta/Al/Ta приводит к получению наиболее низкого сопротивления (0,06 Ом·мм), что является практически пределом, но применение этих слоёв невозможно при производстве мощных СВЧ-приборов, так как верхний слой должен быть низкоомным, например золотым, обеспечивая низкое переходное сопротивление со следующим слоем металлизации, при этом использование слоёв Ta/Al/Ta/Au и Ta/Al/Ni/Au приводит к значительному повышению сопротивления, 2,23 и 0,41 Ом·мм соответственно [8]. Из табл. 1 видно, что в большинстве работ получены большие сопротивления в сравнении с контактами к арсениду галлия (0,1 Ом·мм). Поэтому для ещё большего снижения удельного сопротивления применяют травление канавок (*recess*) в областях формирования омических контактов, что приводит к снижению сопротивления полупроводникового слоя, расположенного между слоем металлизации омических контактов и областью формирования двумерного электронного газа (рис. 1). На рис. 1 видно, проводящую область сток-исток можно представить в виде цепочки из пяти последовательных сопротивлений, где R1 и R5 – сопротивления контакта металл-полупроводник, R2 и R4 – сопротивления полупроводниковых слоёв гетероструктуры, R3 – сопротивление двумерного электронного газа. Удельное сопротивление омических контактов снизить достаточно сложно, но есть возможность уменьшать значения сопротивлений R2 и R4, например, методом травления, уменьшая таким образом расстояние между металлическими электродами истока и стока и областью формирования двумерного электронного газа.

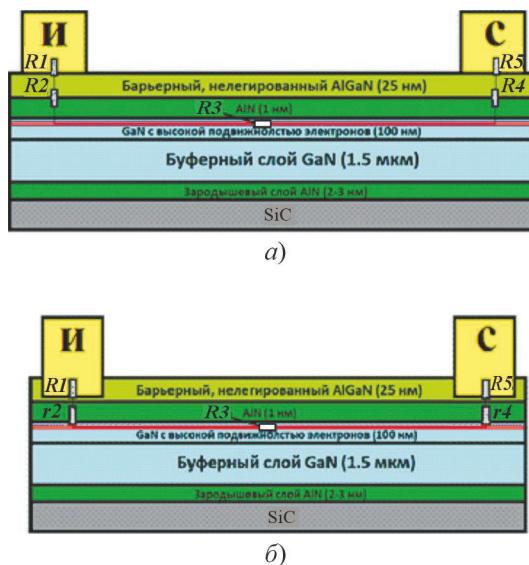


Рис. 1. Схематичное изображение сопротивлений проводящей области сток-исток:  
 а – без применения травления канавок под омические контакты; б – с применением травления под омические контакты

Согласно рис. 1, определено можно сказать, что расстояние от металлизации электродов истока и стока до области формирования двумерного электронного газа уменьшилось, значит, приме-

нение углублений в области формирования омических контактов приведёт к уменьшению сопротивления всей области. Поэтому возможно использовать такие углубления как один из способов снижения удельного сопротивления омических контактов.

Авторы работы [11] провели исследование влияния величины углубления под электродами стока и истока на сопротивление омических контактов. С увеличением глубины канавки, т. е. при уменьшении расстояния между нижней поверхностью металлизации и областью двумерного электронного газа, удельное сопротивление снижается. Минимальное значение сопротивления наблюдается вблизи области двумерного электронного газа, но при пересечении этой области происходит его увеличение (рис. 2). Поэтому располагать металлизацию электродов стока и истока необходимо на минимально возможном расстоянии от области канала транзистора. Это налагает жёсткие ограничения на технологический процесс травления канавки под омические контакты. Самые важные из них – это равномерность травления полупроводниковых слоёв по пластине и воспроизводимость результатов травления от пластины к платине. В связи с этим вопрос разработки стабильного процесса травления полупроводниковых слоёв на основе нитрида галлия до сих пор актуален.

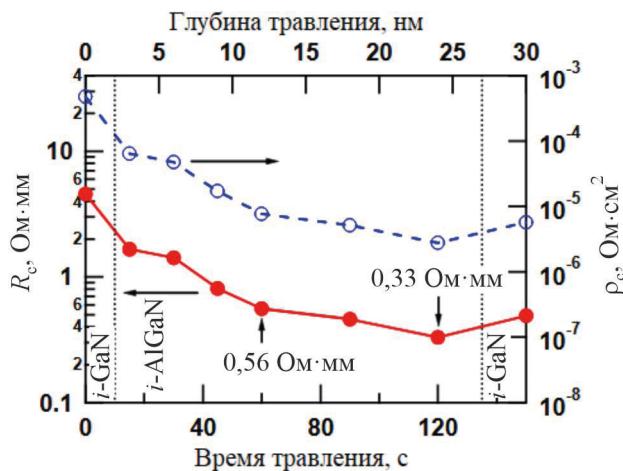


Рис. 2. Зависимости удельного сопротивления омических контактов от глубины канавки под электродами истока и стока [11]

Все вышеперечисленные способы создания омических контактов подразумевают применение слоя алюминия и быстрого термического отжига при высокой температуре, как правило, выше температуры плавления алюминиевого слоя. Это приводит к нарушению морфологии и геометрии металлических слоёв, формирующих омические контакты. Для решения этой проблемы используют так называемое капсулирование (рис. 3).

Авторы работы [12] исследовали процесс капсулирования металлизации омических контактов с помощью нитрида кремния и оксида кремния. Было установлено, что, действительно, этот метод помогает сохранять морфологию и геометрию металлических слоёв электродов стока и истока, при этом большое значение имеет толщина диэлектрической плёнки нитрида кремния. При увеличении толщины диэлектрика происходит образование так называемых «облаков» (*clouds*), которые представляют собой силициды металлов, входящие в слои металлизации электродов стока и истока, что может привести к возникновению короткого замыкания между этими электродами. Оксид кремния в качестве капсулирующего слоя также обеспечивает положительные результаты от применения капсулирования (рис. 4).

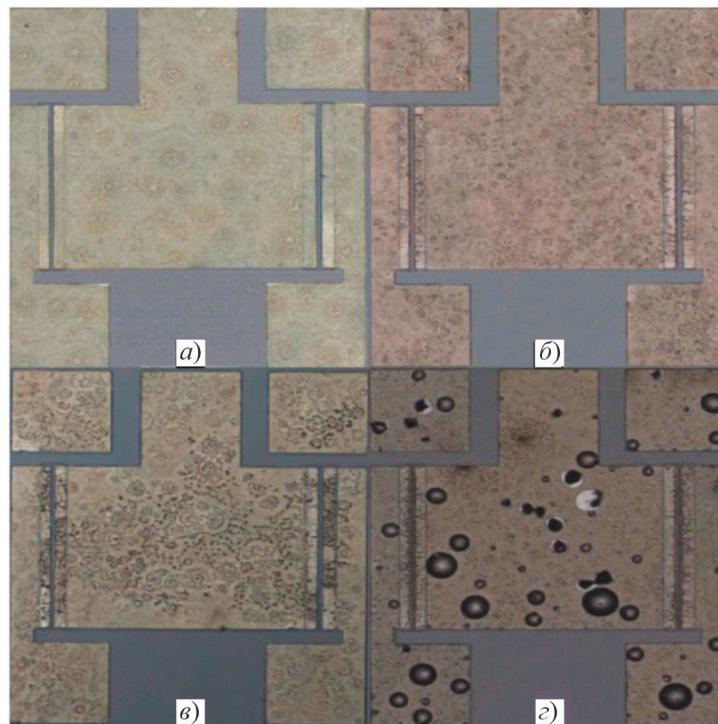


Рис. 3. Фотографии морфологии омических контактов со слоями металлизации Ti/Al/Ta/Au (20/80/40/100 нм), капсулированных слоем нитрида кремния, осаждённого методом PECVD, после термообработки при 850 °C в течение 30 с:

а – толщина диэлектрика – 50 нм; б – 100 нм; в – 150 нм; г – 200 нм [12]

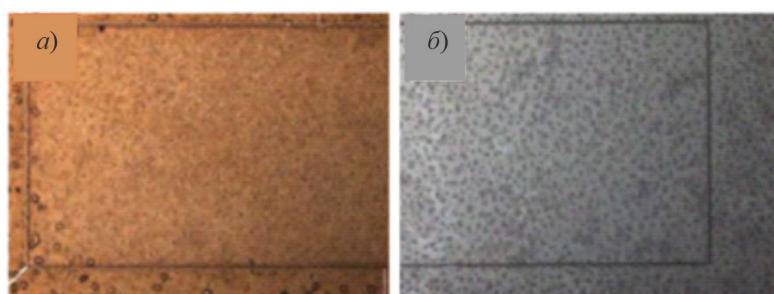


Рис. 4. Фотографии морфологии поверхности после быстрого термического отжига и травления методом RIE-ICP оксида кремния толщиной 50 нм. Диэлектрик осаждён методом:

а – PECVD; б – электронно-лучевого испарения [13]

Использование капсулирования не позволяет полностью исключить влияния быстрого термического отжига на морфологию поверхности [14], но полученная при этом морфология меток совмещения дает возможность провести процесс электронной литографии [12].

Анализ источников литературы показал, что типовыми металлическими слоями для формирования омического контакта к гетероструктурам AlGaN/GaN являются Ti/Al/Ni/Au, но помимо

них существует достаточно большой список альтернативных систем металлизации, используя которые, можно добиться относительно низкого удельного сопротивления омических контактов. Тем не менее, удельное сопротивление остаётся большим, поэтому для ещё большего его снижения применяют вытравливание канавок в областях формирования электродов стока и истока. Подавляющее большинство подобных методов формирования электродов стока и истока полевого транзистора подразумевает применение в металлизации слоя алюминия и быстрого высокотемпературного отжига, с температурами, выше температуры плавления алюминия, что приводит к нарушению морфологии, и этот эффект устраняют при помощи капсулирования электродов диэлектрическими пленками. Таким образом, комбинация всех вышеперечисленных методов позволит получить качественный, низкоомный, термически стабильный и имеющий морфологию и геометрию без значительных нарушений омический контакт электродов стока и истока к полупроводниковым слоям на основе нитрида галлия.

Для отработки технологии изготовления НЕМТ на основе нитрида галлия в АО «НПП «Исток» им. Шокина» автором был предложен способ формирования сплавного омического контакта.

В качестве исходного материала для формирования вжигаемых омических контактов использовались эпитаксиальные НЕМТ-гетероструктуры (AlGaN/AlN/GaN) на подложках сапфира. Формирование мезаизоляции выполнено методом травления слоёв гетероструктуры в индуктивно связанный плазме в смеси газов  $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3$  на глубину 100 нм. Формирование металлизации электродов истока и стока проводилось методом взрывной фотолитографии с предварительным травлением канавки в слое полупроводника в областях расположения омических контактов. В качестве металлизации были использованы слои металлов Ti/Al/Ni/Au толщинами 20/140/50/50 нм соответственно. Вжигание металлизации проводилось на установке быстрого термического отжига при температуре 830 °C в течение 40 с (рис. 5).

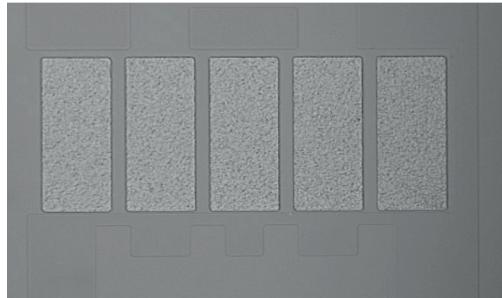


Рис. 5. Фотография пластины с оптического микроскопа после этапа формирования сплавных омических контактов

В результате были получены омические контакты электродов истока и стока с удельным сопротивлением 0,4 Ом·мм и шероховатостью поверхности металлизации порядка 0,12 мкм.

### 3. НЕСПЛАВНЫЕ ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ

Существуют другие способы понижения потенциального барьера на границе раздела металл–полупроводник – сильное легирование донорной примесью слоя полупроводника до состояния вырождения и дальнейшее напыление металлических слоёв электродов истока и стока. Тогда при контакте металла с вырожденным полупроводником потенциальный барьер будет либо совсем отсутствовать, либо будет туннельно-прозрачным, и омический контакт с линейной вольт-амперной характеристикой [15, 16] образуется сразу, без применения высокотемпературной обработки [17].

Создание сильнолегированного слоя полупроводника возможно тремя способами:

- 1) сильное легирование контактного слоя гетероструктуры, но в этом случае возникнут сложности при формировании затвора;
- 2) ионное легирование областей полупроводника в местах формирования омических контактов;
- 3) удаление методом вытравливания слоёв гетероструктуры под омическим контактом до уровня двумерного электронного газа с последующим эпитаксиальным заращиванием этих областей сильнолегированным слоем нитрида галлия [18].

Для получения сильнолегированных областей полупроводника электронного типа проводимости методом ионной имплантации чаще всего применяют ионы кремния. Для этой цели также возможно использование ионов кислорода, теллура, серы и селена, но степень активации этих примесей мала по сравнению с примесью кремния [19]. В табл. 2 приведены примеры формирования омических контактов с применением легирования ионами кремния с различными энергиями  $E$ , дозами  $D$  и температурами  $T$ .

Таблица 2

**Особенности формирования несплавных омических контактов, полученных путём ионного легирования**

Структура	Параметры процесса легирования Si				$R_c$ , Ом·мм	Ссылка
	$E$ , кэВ	$D$ (Si), см <sup>-2</sup>	$T$ , °C	Слои металлизации		
GaN (FET)	–	$10^{15}$	1150	Ti/Au	0,097	[20]
AlGaN/GaN	50	$10^{16}$	1260	Ti/Al/Ni/Au	0,46	[21]
AlGaN/GaN	30	$1,5 \cdot 10^{15}$	1500	Ti/Au	0,4	[22]
AlGaN/GaN	80	$10^{15}$	1200	Ti/Au	–	[23]

Как видно из табл. 2, сопротивление несплавных омических контактов, полученных путём ионного легирования областей полупроводника в местах формирования омических контактов, достаточно велико (0,4...0,46 Ом·мм), за исключением работы [20], где авторам удалось получить предельно высокую концентрацию кремния в объёме полупроводника, что и гарантировало низкое удельное сопротивление. Но авторы работы [20] использовали сложную лабораторную установку ионного легирования, что не применимо на производстве. Более того, авторы работ [24, 25] также смогли получить высокую концентрацию кремния в объёме нитрида галлия ( $2 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>), при этом удельное сопротивление омических контактов составило 0,8 Ом·мм, что говорит о трудности воспроизведения результатов работы [20] на производстве.

Получить сильно легированные слои полупроводника также возможно в процессе эпитаксиального роста, применяя необходимую примесь. Как и в случае ионного легирования, эпитаксиальную плёнку GaN электронного типа проводимости получают, как правило, легированием кремнием [26].

Из-за особенностей технологии изготовления транзисторов на AlGaN/GaN-гетероструктуре селективно выращенный эпитаксиальный слой формируют не на всей гетероструктуре, а только в областях омических контактов. Рост  $n^+$ -слоя осуществляется с помощью селективной эпитак-

ции с использованием маски из материала, препятствующего росту во всех областях, кроме областей контактов. Технология селективного роста GaN развита достаточно давно [26], хотя следует отметить, что развита она для роста нелегированных или слабо легированных слоев. При росте слоев с легированием, превосходящим  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ , возникают проблемы как с морфологией поверхности, так и с селективностью роста. Однако, как было показано, после оптимизации технологии такие контакты, как правило, характеризуются гладкой морфологией поверхности и равномерным распределением сопротивления по контактной площадке и не требуют термического отжига. Имеющиеся данные [27] показывают, что, несмотря на большую сложность, технология несплавных контактов позволяет превзойти сплавные контакты по основным параметрам: сопротивлению и качеству поверхности. Сообщалось о значениях контактного сопротивления на уровне  $0,1 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$  или даже ниже. Кроме того, отсутствие постростовой обработки с высокотемпературным отжигом может существенно влиять и на другие характеристики транзистора – так, например, сообщалось о существенном снижении токов утечки при использовании несплавных контактов [28, 29].

В статье [29] проведен анализ различных вариантов изготовления НЕМТ с использованием вжигаемых контактов и селективно выращенных контактов. На рис. 6 приведены варианты изготовления транзистора. Исследования показали, что вариант с затравом в область канала (в) дает существенно лучшие результаты, чем вариант со стандартными вжигаемыми контактами (а). Так, например, ток утечки затвора при  $-10 \text{ В}$  упал с  $18,2$  до  $3,4 \text{ мкА}$ , а ток насыщения сток-исток вырос с  $450$  до  $600 \text{ мА/мм}$ . Вариант с селективными контактами (б) дал плохие результаты, что объясняется возможными проблемами с ростом на открытой поверхности AlGaN. Хорошо известно, что тонкий слой GaN на поверхности структуры может улучшить параметры структуры для НЕМТ. Этот подход был использован рядом исследователей [27, 29–31], однако совместная реализация селективного роста и высокого уровня легирования затруднена, и полученные результаты еще далеки от внедрения в производство. Толщина селективно выращенного материала в конкретной точке зависит от топологии маски в ближайшей области радиусом до  $0,5 \text{ мм}$  [32]. Свойства локально выращенного эпитаксиального слоя оказываются неоднородными, возникают участки с неровной поверхностью, V-дефектами, края слоя оказываются неровными [33]. Для регулярного рисунка с малой шириной маски и окон при низком уровне легирования практически всегда возможен выбор условий селективной эпитаксии GaN, приводящий к формированию бездефектных структур. При высоком уровне легирования получение совершенного селективно выращенного слоя затруднено, что, впрочем, верно и для планарных слоев GaN [34].

Анализируя источники литературы, посвящённые изготовлению транзисторов с применением технологии несплавных омических контактов, можно сделать вывод, что удельное сопротивление омических контактов некоторых образцов транзисторов сопоставимо со значением удельного сопротивления изготовленных на GaAs [28, 31–33] (табл. 3). Причём низкие удельные сопротивления возможно получить как при использовании селективного роста эпитаксиальных структур методом MOCVD, так и MBE. Также наименьшее удельное сопротивление омических контактов достигается при селективном эпитаксиальном росте с заглублением в объём гетероструктуры до области формирования двумерного электронного газа. Наилучший материал для селективного роста эпитаксиальных гетероструктур – GaN с концентрацией легирующей примеси кремния  $10^{19} \dots 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

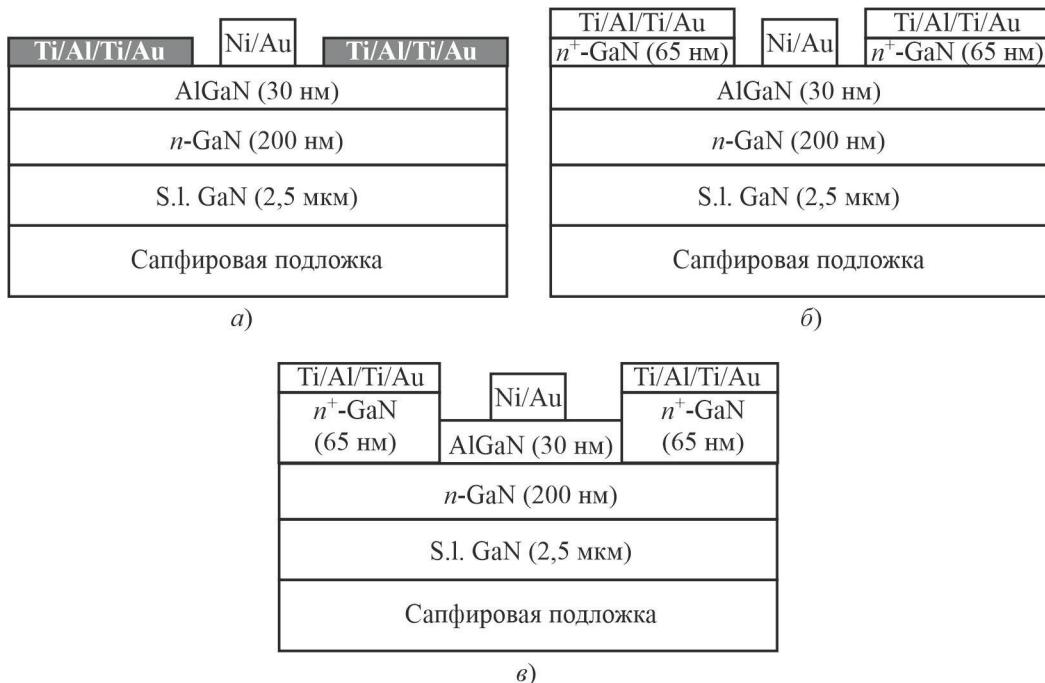


Рис. 6. Упрощённая конструкция AlGaN/GaN HEMT:

*a* – с использованием вжигаемых контактов; *b* – с использованием селективно выращенных контактов без углублений; *c* – с использованием селективно выращенных контактов с затравом в область канала [29]

Таблица 3

**Особенности формирования несплавных омических контактов, полученных путём селективного эпитаксиального роста сильно легированных полупроводниковых слоёв**

Структура	Параметры процесса легирования Si					$R_c$ , Ом·мм	Ссылка
	Метод селективного роста	Материал для селективного роста	Легирующая примесь	Концентрация легирующей примеси, см <sup>-3</sup>	Слои металлизации		
AlGaN/GaN	MBE	GaN	–	$7,5 \cdot 10^{19}$	–	0,2	[35]
AlGaN/AIN/GaN	MOCVD	InGaN	Si	$5 \cdot 10^{19}$	Ti/Al/Mo/Au	0,3 – 0,6	[36]
AlGaN/AIN/GaN	MBE	GaN	Si	$10^{20}$	Ti/Al/Ni/Au	0,3	[28]
InAlN/AIN/GaN	MBE	GaN	Si	$10^{20}$	Ti/Au	0,16	[37]
AlGaN/GaN	PEMBE	GaN	Si	$10^{19}$	Ti/Au	0,6	[38]
AlGaN/GaN	MOCVD	GaN	Si	–	–	0,2	[39]
GaN/AlN	MBE	InGaN/InN	Si	–	Ti/Au	0,25	[40]
AlGaN/AIN/GaN	MBE	GaN	Si	$7 \cdot 10^{19}$	Ti/Au	0,06	[41]
InAlN/AIN/GaN	MOCVD	GaN	Si	$10^{19}$	Mo/Au	0,16	[42]
AlGaN/GaN	–	GaN	Ge	$10^{20}$	Hf/Al/Ti	0,17	[43]

Для отработки технологии изготовления НЕМТ на основе нитрида галлия в АО «НПП «Исток» им. Шокина» автором был предложен способ формирования несплавного омического контакта с использованием селективного эпитаксиального роста сильно легированных слоёв нитрида галлия.

В качестве исходного материала для формирования несплавных омических контактов использовались эпитаксиальные НЕМТ-гетероструктуры (AlGaN/AlN/GaN) на подложках сапфира. Селективный эпитаксиальный рост сильно легированных слоёв нитрида галлия методом MOCVD проводился по всей поверхности пластины, за исключением областей формирования электродов затвора (рис. 7).

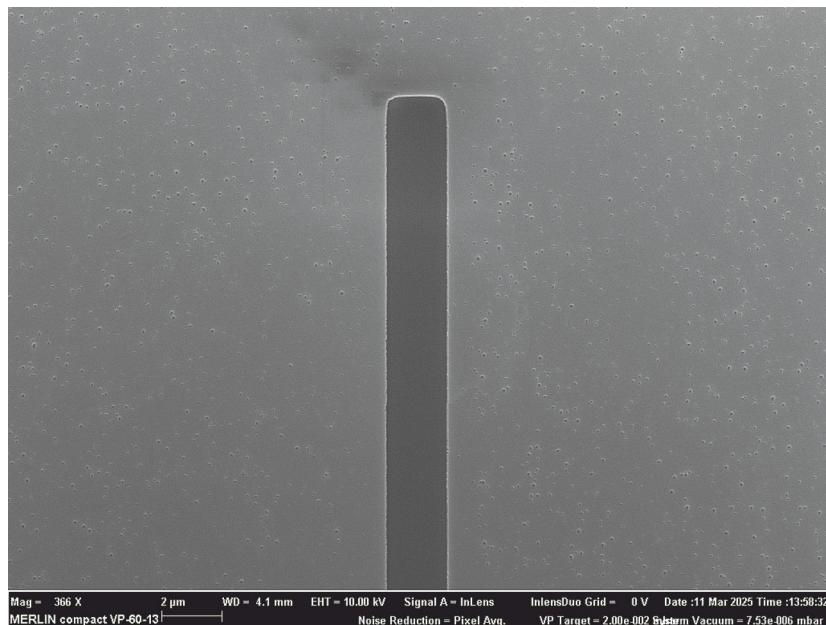


Рис. 7. Снимок СЭМ после селективного роста сильно легированных слоёв

В качестве металлизации электродов истока и стока были использованы слои металлов Ti/Pt/Au толщинами 30/50/150 нм соответственно.

В результате было получено минимальное сопротивление омических контактов 0,2 Ом·мм.

#### 4. СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

При формировании омических контактов к гетероструктурам на основе нитрида галлия необходимо учитывать не только их электрические характеристики, но и технологичность изготовления, материалы и оборудование, которое необходимо для производства. На рис. 8 приведена упрощённая схема формирования омических контактов к гетероструктурам на основе нитрида галлия различными способами.

Как видно из рис. 8, процесс формирования сплавных омических контактов требует использования меньшего количества технологических операций и соответственно более прост. Ещё одно существенное достоинство этого процесса – возможность формировать межприборную изоляцию при помощи ионной имплантации, не используя травление полупроводниковых слоёв, обес-

печивая, таким образом, отсутствие рельефа (ступеньки) для электрода затвора на границе активной области транзистора с его пассивной частью. Такой подход обеспечивает более качественное изготовление затвора транзистора. Более того, процесс вжигания сплавных омических контактов проходит при температурах порядка 700...900 °C, что в дальнейшем, очевидно, обеспечивает его термическую стабильность в широком диапазоне температур. Этот способ имеет ряд значительных недостатков, основным из которых является высокое удельное сопротивление, которое впоследствии приводит к ухудшению характеристик транзистора.



Рис. 8. Упрощённая схема формирования омических контактов к гетероструктурам на основе нитрида галлия различными способами

Процесс формирования несплавных омических контактов с использованием селективного эпитаксиального роста сильно легированного полупроводникового слоя как методом MOCVD, так и MBE значительно более трудоёмкий по сравнению с методом формирования сплавных омических контактов. Более того, при использовании селективного эпитаксиального роста методом MOCVD сформировать межприборную изоляцию без ступеньки не представляется возможным. При этом удельное сопротивление омических контактов достаточно мало, а морфология и геометрия металлизации электродов истока и стока не изменяются, что является существенным преимуществом при изготовлении МИС СВЧ. Использование ионной имплантации для формирования несплавных омических контактов требует проведения сложных технологических процессов, при этом получение низких значений удельного сопротивления затруднено.

## 5. ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены и проанализированы особенности формирования сплавных и несплавных омических контактов. Показано, что наименьшее удельное сопротивление омических контактов достигается при использовании несплавных омических контактов с применением селективного эпитаксиального роста сильно легированных полупроводниковых слоёв GaN, и

этот вариант является предпочтительным для изготовления МИС СВЧ. При этом, несмотря на высокое сопротивление сплавных омических контактов, относительная простота их формирования может стать решающим аргументом для применения сплавных омических контактов при массовом производстве МИС различного функционального назначения, в которых удельное сопротивление таких контактов не оказывает существенного влияния на их основные параметры и характеристики.

В настоящее время АО «НПП «Исток» им. Шокина» освоил формирование омических контактов как сплавным способом со стабильным значением удельного сопротивления 0,4 Ом·мм, так и несплавным со стабильным значением удельного сопротивления 0,2 Ом·мм и потенциально способен изготавливать ряд МИС СВЧ в широком диапазоне частот.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние контактных сопротивлений на вольт-амперные характеристики НЕМТ-транзисторов на основе GaN / Н. П. Тарасюк, Н. Н. Ворсин, Н. Н. Луценко [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2018. – № 5. – С. 62 – 67.
2. V/Al/Pt/Au ohmic contact to *n*-AlGaN/GaN heterostructures / K. O. Schweitz, P. K. Wang, S. E. Mohney [et al.] // Applied Physics Letters. – 2002. – Vol. 80, No 11. – P. 1954 – 1956.
3. Low-resistance Si/Ti/Al/Ni/Au multilayer ohmic contact to undoped AlGaN/GaN heterostructures / V. Desmaris, J. Eriksson, N. Rorsman, H. Zirath // Electrochemical and Solid State Letters. – 2004. – Vol. 7, No 4. – P. 72 – 74.
4. Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaN/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy / A. N. Bright, P. J. Thomas, M. Weyland [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2001. – Vol. 39. – P. 3143 – 3150.
5. Miller, M. A. V/Al/V/Ag ohmic contacts to *n*-AlGaN/GaN heterostructures with a thin GaN cap / M. A. Miller, S. E. Mohney // Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 90. – P. 012103-1 – 012103-3.
6. Novel structural Ti/Al-based ohmic contacts on AlGaN/GaN heterostructures / Z. Dong, J. Wang, M. Yu [et al.] // 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology. – 2008. – P. 1 – 4.
7. Mo/Al/Mo/Au-based ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures / M. N. Kondakov, S. V. Chernykh, A. V. Chernykh [et al.] // Russian Microelectronics. – 2016. – Vol. 45, No 6. – P. 402 – 409.
8. Malmros, A. Electrical properties, microstructure and thermal stability of Ta-based ohmic contacts annealed at low temperature for GaN HEMTs / A. Malmros, H. Blanck, N. Rorsman // Semiconductor Science and Technology. – 2011. – Vol. 26. – P. 1 – 7.
9. Mo/Al/Mo/Au ohmic contact scheme for  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  high electron mobility transistors annealed at 500 °C / A. Basu, F. M. Basu, S. Guo [et al.] // Journal of Vacuum Science & Technology. – 2006. – Vol. 24, No 16. – P. 16 – 17.
10. Comparative study of Ti/Al/Mo/Au, Mo/Al/Mo/Au and V/Al/Mo/Au ohmic contacts to Al-GaN/GaN heterostructures / D. Selvanathan, F. M. Mohammed, A. Tesfayesus [et al.] // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement and Phenomena. – 2004. – No 22. – P. 2330 – 2335.
11. Improved recess-ohmics in AlGaN/GaN high-electron-mobility transistors with AlN spacer layer on silicon substrate / S. Arulkumaran, N. G. Ing, V. Sahmuganathan [et al.] // Physica Status Solidi C. – 2010. – Vol. 7, No 10. – P. 2412 – 2414.
12. Wang, C. Electrical characterization and nanoscale surface morphology of optimized Ti/Al/Ta/Au ohmic contact for AlGaN/GaN HEMT / C. Wang, N-Y. Kim // Nano Scale Research Letters. – 2012. – Vol. 7, No 107. – P. 1 – 8.
13. Fabrication of AlGaN/GaN HEMT with the improved ohmic contact by encapsulation of silicon dioxide thin film / J-G. Heo, H-K. Sung, J-W. Lim [et al.] // H-K. IEEE MTT-S International Microwave Symposium. – 2010. – P. 308 – 311.
14. Использование капсулирования с целью сохранения морфологии омических контактов Ti/Al/Ni/Au на гетероструктурах AlGaN/GaN / И. А. Рогачёв, А. С. Курочки, О. И. Мешков [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2017. – № 3 (534). – С. 50 – 55.

15. **Ruvimov, S.** Microstructure of Ti/Al and Ti/Al/Ni/Au ohmic contacts for *n*-GaN / S. Ruvimov, Z. Liliental-Weber, J. Washburn // Appl. Phys. Lett. – 1996. – Vol. 69, No 11. – P. 1556 – 1558.
16. Sheet resistance under ohmic contacts to AlGaN/GaN heterostructures / M. Hajlasz, J. J. T. M. Donkers, S. J. Sque [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2014. – No 104. – P. 242109-1 – 242109-5.
17. **Бланк, Т. В.** Механизмы протекания токов в омических контактах металл-полупроводник / Т. В. Бланк, Ю. А. Гольдберг // Физика и техника полупроводников. – 2007. – № 41. – С. 1281 – 1308.
18. Влияние методов формирования омических контактов на частотные характеристики полевых транзисторов на гетероструктурах AlGaN/GaN / В. Ю. Павлов, А. Ю. Павлов, А. В. Зуев [и др.] // Международная научно-техническая конференция, МИРЭА. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 53 – 56.
19. **Wang, H.** Application of ion implantation to the fabrication of GaN-based devices / H. Wang. – National University of Singapore, 2005. – 42 p.
20. Ultra-low resistive ohmic contacts on *n*-GaN using Si implantation / J. Burm, K. Chu, W. A. Davis [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 70, No 4. – P. 464 – 466.
21. Nonalloyed ohmic contacts in AlGaN/GaN HEMTs by ion implantation with reduced activation annealing temperature / F. Recht, L. McCarthy, S. Rajan [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2006. – Vol. 27, No 4. – P. 205 – 207.
22. Ion implanted AlGaN–GaN HEMTs with nonalloyed ohmic contacts / H. Yu, L. McCarthy, S. Rajan [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2005. – Vol. 26, No 5. – P. 283 – 285.
23. Ohmic contacts on *n*-type layers formed in GaN/AlGaN/GaN by dual-energy Si ion implantation / T. Shiino, T. Saitoh, T. Nakamura [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2009. – No 267. – P. 1571 – 1574.
24. **Желанов, А. В.** Имплантация ионами кремния соединений  $\text{A}_3\text{B}_5$  / А. В. Желанов, Б. И. Селезнёв, Д. Г. Фёдоров // Вестник Новгородского государственного университета. – 2020. – Т. 2, № 118. – С. 20 – 26.
25. **Желанов, А. В.** Применение ионной имплантации при формировании приборных структур на основе гетероэпитаксиального перехода AlGaN/GaN / А. В. Желанов, Б. И. Селезнёв, Д. Г. Фёдоров // Вестник Новгородского государственного университета. – 2019. – Т. 2, № 114. – С. 7 – 9.
26. Selective area growth and epitaxial lateral overgrowth of GaN by metalorganic vapor phase epitaxy and hydride vapor phase epitaxy / K. Hiramatsu, H. Matsushima, T. Shibata [et al.] // Mater. Sci. Eng. – 1999. – No 59. – P. 104 – 111.
27. Селективный рост невжигаемых омических контактов к двумерному электронному газу в транзисторах с высокой подвижностью электронов на основе гетеропереходов GaN/AlGaN методом молекулярно-пучковой эпитаксии / И. О. Майборода, А. А. Андреев, П. А. Перминов [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40, № 11. – С. 80 – 86.
28. Ultralow-leakage AlGaN/GaN high electron mobility transistors on Si with non-alloyed re-grown ohmic contacts / B. Song [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2016. – Vol. 37, No 1. – P. 16 – 19.
29. Nonalloyed ohmic contact of AlGaN/GaN HEMTs by selective area growth of single-crystal  $n^+$ -GaN using plasma assisted molecular beam epitaxy Nonalloyed ohmic contact of AlGaN/GaN HEMTs by selective area growth of single-crystal *n*-GaN using plasma assisted molecular beam epitaxy / Zhi Zheng, Huichan Seo, Liang Pang [et al.] // Phys. Status Solidi. – 2011. – Vol. 208, No 4. – P. 951 – 954.
30. MBE-regrown ohmics in InAlN HEMTs with a regrowth interface resistance of  $0.05 \Omega \cdot \text{мм}$  / J. Guo, G. Li, F. Faria [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2012. – Vol. 33. – P. 525 – 527.
31.  $L_g = 100$  nm T-shaped gate AlGaN/GaN HEMTs on Si substrates with non-planar source/drain regrowth of highly-doped  $n^+$ -GaN layer by MOCVD / H. Jie, L. Ming, T. Chak-Wah, L. Kei-May // Chinese Physics B. – 2014. – Vol. 23, No 12. – P. 128102-1 – 128102-7.
32. Determination of the diffusion lengths of Ga adatoms using GaN stripe profiling / M. M. Rozhavskaya, W. V. Lundin, S. I. Troshkov, A. F. Tsatsulnikov // Phys. Status Solidi. – 2015. – Vol. 212, No 4. – P. 851 – 854.
33. Lateral epitaxy of low defect density GaN layers via organometallic vapor phase epitaxy / O. Nam, M. D. Bremser, T. S. Zheleva, R. F. Davis // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 71, No 18. – P. 2638.

34. Effect of Si doping on strain, cracking, and microstructure in GaN thin films grown by metalorganic chemical vapor deposition / L. T. Romano, C. G. Van de Walle, J. W. Ager III [et al.] // Journ. of Appl. Phys. – 2000. – Vol. 87, No 11. – P. 7745.
35. *W*-band power performance of AlGaN/GaN DHFETs with regrown  $n^+$  GaN ohmic contacts by MBE / D. F. Brown, A. Williams, K. Shinohara [et al.] // International Electron Devices Meeting. – 2011. – No 88. – P. 19.3.1 – 19.3.4.
36. AlGaN/GaN high electron mobility transistors on semiinsulating ammonogan substrates with regrown ohmic contacts / W. Wojtasiak, M. Góralczyk, D. Gryglewski [et al.] // Micromachines. – 2018. – No 9. – P. 546.
37. InAlN/AlN/GaN HEMTs with regrown ohmic contacts and FT of 370 GHz / Y. Yue, Z. Hu, B. Sensale-Rodriguez [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2012. – Vol. 33, No 7. – P. 988 – 990.
38. Ti-based nonalloyed ohmic contacts for  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$  high electron mobility transistors using regrown  $n^+$ -GaN by plasma assisted molecular beam epitaxy / H-C. Seo, P. Chapman, H-I. Cho [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2008. – No 93. – P. 128102-1 – 128102-3.
39. Fabrication and improved performance of AlGaN/GaN HEMTs with regrown ohmic contacts and passivation-first process / T. Huang, C. Liu, J. Bergsten [et al.] // Compound Semiconductor Week. – 2016. – P. 1 – 2.
40. Self-aligned *N*-polar GaN/InAlN MIS-HEMTs with record extrinsic transconductance of 1105 mS/mm / Nidhi. S. Dasgupta, J. Lu, J. S. Speck // IEEE Electron Device Letters. – 2012. – Vol. 33, No 6. – P. 794 – 796.
41. High-speed, enhancement-mode GaN power switch with regrown  $n^+$ -GaN ohmic contacts and staircase field plates / D. F. Brown, K. Shinohara, A. L. Corrion [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2013. – Vol. 34, No 9. – P. 1118 – 1120.
42. MBE-regrown ohmics in InAlN HEMTs with a regrowth interface resistance of  $0.05\Omega \cdot \text{mm}$  / J. Guo, G. Li, F. Faria [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2012. – Vol. 33, No 4. – P. 525 – 527.
43. **Ferreira, R. A.**  $n^{++}$ GaN regrowth technique using pico-second laser ablation to form non-alloy ohmic contacts / R. A. Ferreira, A. Suzuki, T. Kazimoto // IEEE Electron Device Letters. – 2017. – Vol. 38, No 8. – P. 1 – 6.

Статья поступила 18 марта 2025 г.

УДК 621.385.73 (088.8)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$

Г. А. Жабин<sup>1</sup>, А. Б. Логинов<sup>2</sup>, Б. А. Логинов<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет МИЭТ, г. Зеленоград

Экспериментально исследовано влияние состава газовой смеси  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  на изменение химического состава и морфологии эмиссионных покрытий, осажденных с применением ионно-плазменного метода на подложки Si. С применением сканирующей зондовой микроскопии проведен анализ размера зерен и шероховатости поверхности пленки. Показано влияние изменения состава газа на размер субзерен и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов. Катоды, напыленные с составом газа  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  в соотношении 45/55, со средней шероховатостью покрытия 77 нм и размером субзерен 181 нм показали долговечность более 4500 ч.

*КС: ионно-плазменное напыление, сканирующая зондовая микроскопия, морфология поверхности, эмиссионные характеристики, долговечность, молекулярно-напыленный оксидный катод*

## INVESTIGATION OF SURFACE ROUGHNESS AND EMISSION PROPERTIES OF SYNTHESIZED $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$ COATINGS

Г. А. Жабин<sup>1</sup>, А. Б. Loginov<sup>2</sup>, Б. А. Loginov<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow

<sup>3</sup>National Research University MIET, Zelenograd

The effect of the composition of the  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  gas mixture on changes in the chemical composition and morphology of emission coatings deposited on Si substrates using the ion-plasma method has been experimentally investigated. The grain size and surface roughness of the film were analyzed using scanning probe microscopy. The effect of changes in gas composition on the size of the subgrains and the emission properties of molecularly deposited oxide cathodes is shown. Cathodes sputtered with an  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  gas composition in a 45/55 ratio with an average coating roughness of 77 nm and a subgrain size of 181 nm have a durability of more than 4500 hours.

*Keywords: ion plasma sputtering, scanning probe microscopy, surface morphology, emission characteristics, durability of a molecular sputter-deposited oxide cathode*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные тонкопленочные эффективные эмиттеры, применяемые в циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ), получают с использованием ионно-плазменного распыления (ИПР). Они обеспечивают плотность тока 1-2 А/см<sup>2</sup> в течение 5...10 тыс. ч. Толщина напыляемой эмиссионной пленки составляет  $\approx 1$  мкм. Работа выхода таких микрокатодов равна 1,3...1,34 эВ [1, 2].

Эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных микрокатодов (МНОК) в значи-

тельной степени определяются свойствами поверхности. Шероховатость поверхности, связанная с отклонением в нанометровом масштабе от толщины пленки, существенно влияет на свойства материалов и улучшение адгезии [3]. Развитая поверхность оказывает влияние на подсистему решетки наноразмерных объектов, изменяя их механические, тепловые, электрические и эмиссионные свойства.

В работе [4] показано, что более высокая доля ионизации потока осаждения атомов Си приводит к более гладким поверхностям за счет уменьшения кластеризации в паровой фазе и столкновения ионов высокой энергии на поверхности пленки.

В работе [5] исследовано влияние давления газа в процессе ИПР на свойства осаждаемых сегнетоэлектрических покрытий титаната бария-стронция. Изменение давления газа в процессе осаждения повлияло на компонентный состав осаждаемого слоя, что привело к размытию фазового перехода и улучшению температурной стабильности.

В работе [6] исследовались морфология поверхности и состав молекулярно-напыленных оксидных покрытий (МНОП) на Si, полученных при осаждении пленок в смеси аргона и CO<sub>2</sub>. Методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии (АСМ) установлено, что среднеквадратичная шероховатость поверхности – 71 нм, средний размер зерен – 226 нм.

В работе [7] представлены результаты исследования влияния температуры мишени и давления газа при осаждении МНОП на морфологию, микроструктуру и эмиссионные свойства МНОК. Размер зерен для газа Ar/CO<sub>2</sub> составил 50...58 нм, а напыление в смеси Xe/CO<sub>2</sub> позволило получить размер зерен 80 нм. Среднеквадратичная шероховатость при напылении с Xe составила 78...93 нм, а в смеси с Ar – 30 нм.

В вышеперечисленных работах [2, 6, 7] процентное соотношение инертного газа и диоксида углерода в смеси составляло 50/50.

В работе [8] исследована зависимость морфологии пленок MoS<sub>2</sub> на Si от длительности процесса осаждения, температуры подложки и концентрации прекурсоров в газообразной фазе. Изучены морфологические свойства и состав полученных пленок. Анализ показал зависимость фотолюминесцентных свойств пленок от размеров кристаллитов.

В работе [9] с применением сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) исследована морфология пленок металлов при прогреве в вакууме. Шероховатость пленок вольфрама после прогрева до 400 °C уменьшилась с 5,8 до 4,2 нм. Средний размер зерна увеличился с 154 до 1356 нм.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния изменения соотношения газовой смеси Ar/CO<sub>2</sub> на морфологию поверхности МНОП и эмиссионные свойства микрокатодов.

## 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Мишени (BaSrCa)CO<sub>3</sub> для ИПР изготавливали методом пульверизаций из карбоната марки КТА-1-6-сп. Соотношение активных элементов ЩЗМ в мишени составляло 47:45:8, ее толщина – 130...132 мкм.

Напыление экспериментальных покрытий проводилось на автоматизированной установке вакуумного ионно-плазменного напыления «ПРНТ 0143» (Россия). Геометрические размеры, принцип работы и основные электрические параметры КПУ и рабочей камеры данной установки и описанной в работах [2, 6-7] идентичны.

Турбомолекулярный насос имел скорость откачки 700 л/с. Предельный уровень вакуума – 6·10<sup>-7</sup> Па. Измерение давления проводилось форвакуумным вакуумметром «МТР4D-KF16» и

широкодиапазонным вакуумметром «МТМ 9Д» с датчиком Пирани. Подача газов осуществлялась двумя каналами через регуляторы расхода газа РРГ-10. Эта конструкция позволила создавать в рабочей камере газовую смесь заданной пропорции. В качестве рабочего газа использовалась смесь Ar + CO<sub>2</sub>. Эксперименты проводились для двух режимов напыления. В первой партии микрокатодов и пленок процентное соотношение Ar/CO<sub>2</sub> составило 55/45, во второй партии – 45/55. Пленочное покрытие осаждалось с мишени в течение 3 ч на горизонтально расположенные полированые образцы Si (111) размерами 4×6 мм и вращающиеся со скоростью 6 об/мин микрокатоды с керном из сплава WRe-20 [10].

Для исследований микрорельефа использовался «Микроскоп сканирующий зондовый СММ-2000» (№ 46918 в Гос. реестре средств измерений РФ), изготовитель АО «Завод ПРОТОН», г. Зеленоград. Изображения топографии поверхности получены в режиме ACM. В качестве зондов использованы кантилеверы с радиусом закругления острия 10 нм марки «CSG-01» (Швейцария). Достигаемое разрешение – до 4 нм по латеральным размерам рельефа и до 0,02 нм по высотам рельефа.

Химический состав напыленных образцов пленок исследовался на сканирующем электронном микроскопе «JEOL 6700F» с приставкой ЭДС «Bruker Quantax 200» при ускоряющем напряжении 15 кэВ, токе 1 нА.

Общее давление газовой смеси составляло 0,15 Па. Отличие в режимах заключалось в составе смеси газов. Напряжение разряда составляло 810...820 В, ток разряда был равен 205...220 мА. Совместно с каждой партией образцов пленок наносились покрытия на два микрокатода с кернами WRe, для каждого режима напыления.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, 2 приведены изображения шероховатости пленочных покрытий, сделанные с использованием микроскопа СММ-2000 [10].

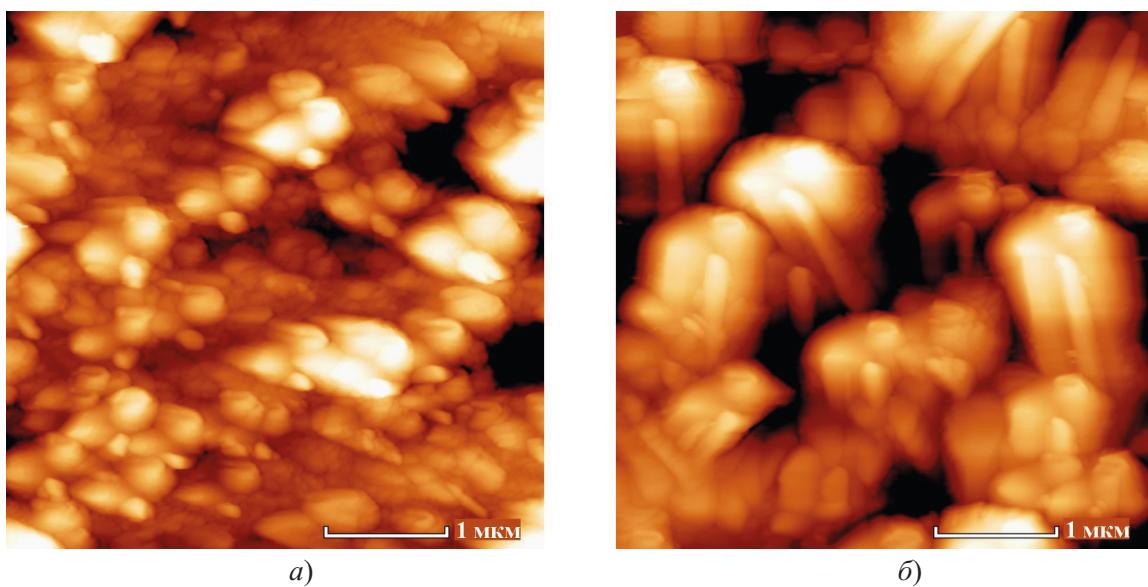


Рис.1. 2D-изображения морфологии поверхности пленки, осажденной в смеси Ar/CO<sub>2</sub> на подложки из Si при разном составе газа:

a – 55/45; b – 45/55

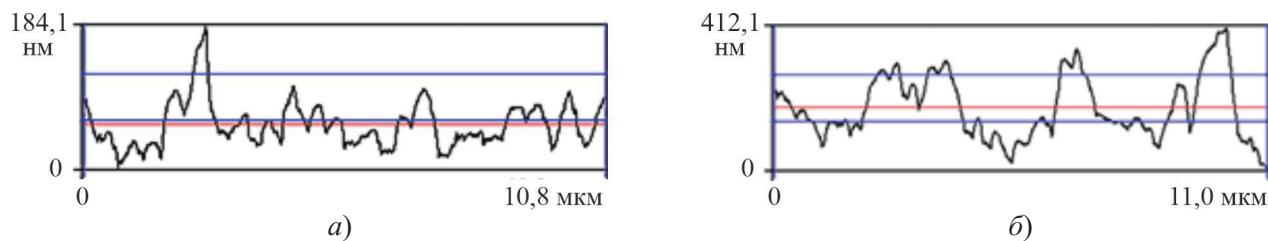


Рис. 2. Шероховатость поверхности покрытий, осажденных в смеси Ar/CO<sub>2</sub> на подложках из Si при разном составе газа:  
а – 55/45; б – 45/55

На рис. 1, а представлен 2D-кадр образца 1 размерами 4×4 мкм. Разброс высот по кадру составил 348 нм. На рис. 1, б мы видим поверхность образца 2. Разброс высот равен 556 нм.

На рис. 2, а изображена кривая шероховатости образца 1. Средняя шероховатость  $R_a = 22,8$  нм, средний размер зерна  $Sm = 1$  мкм, средний размер субзерна  $S = 83,5$  нм. На рис. 2, б показана кривая шероховатости образца 2. Для него  $R_a = 77$  нм,  $Sm = 1,98$  мкм,  $S = 181$  нм.

Измеренная по профилю сечения кадра образца 1 полуширина одного из зёрен (при высоте около 60 нм) оказалась 92 нм. Полуширина одного из зёрен образца 2 (при высоте около 69,8 нм) составила 126 нм.

Гранулометрический анализ образца 1 дал статистику распределения зёрен по диаметру. Частицы, попавшие в поле кадра, имеют диаметры от 35 до 560 нм с медианным значением 167 нм. Анализ образца 2 показал, что диаметры частиц составляют от 40 до 985 нм с медианным значением 220 нм.

Проведено исследование состава образцов эмиссионного покрытия №№ 1 и 2 на СЭМ с энергодисперсионной приставкой «JEOL EDS System». Образец 1, напыленный при соотношении газов в смеси Ar/CO<sub>2</sub> 55/45, показал меньшую концентрацию Ва, чем образец 2, с постоянным соотношением 45/55. Соотношение элементов Ва/O в первом образце составило 1,18 % (масс.), а во втором – 1,33 % (масс.). Соотношение Ba/Sr в образце 1 составило 1,46 % (масс.); в образце 2 – 1,75 % (масс.).

На рис. 3 приведены эмиссионные характеристики катодов, напыленных по режиму 2 (катоды №№ 1 и 2), снятые на время работы 50 и 2000 ч.

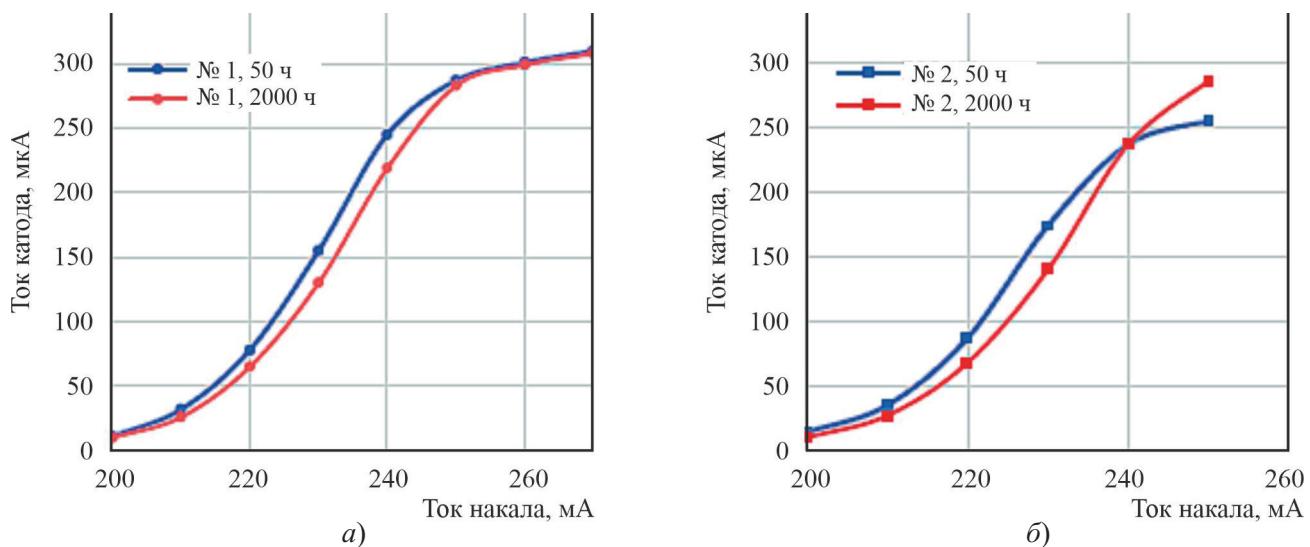


Рис. 3. Эмиссионные характеристики МНОК № 1 (а) и № 2 (б)

Из рис. 3, а следует, что МНОК, напыленные по режиму 2, имеют хорошую эмиссионную активность, ток катодов 1 и 2 в низкотемпературной области при накале 220 мА через 50 ч составил 78 и 87 мкА соответственно. В рабочей точке характеристики катода 1 при накале 260 мА по истечении 2000 ч ток эмиссии не изменился. Значение тока катода 2 в рабочей точке при накале 250 мА после продолжительности работы 2000 ч возросло до 286 мкА, что может быть связано с изменением контактной разности потенциалов между анодом и катодом из-за адсорбции атомов бария.

На рис. 4 показаны кривые долговечности катодов 1 и 2, напыленных по режиму 2, и эмиссионные характеристики катодов, напыленных по режиму 1 (катоды №№ 3, 4). Долговечность МНОК, изготовленных по режиму 2, в настоящее время составляет более 4000 ч. Падение эмиссии катода 2 составило менее 10 %. Катод 1 после работы 4500 ч практически не показал падения тока по сравнению с начальным значением.

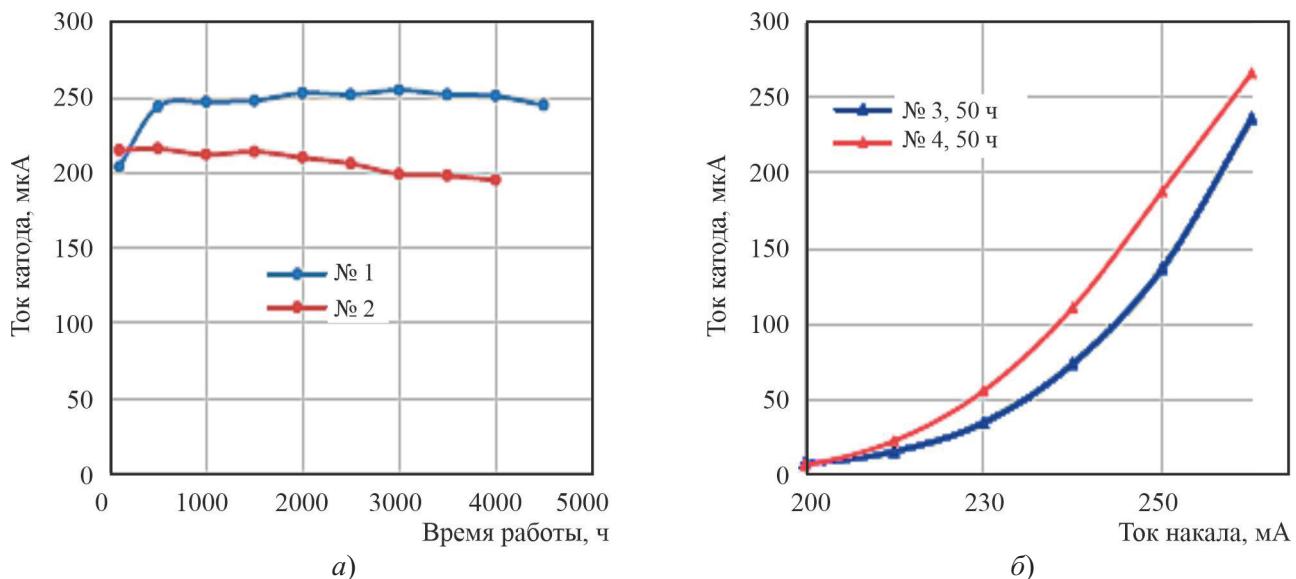


Рис. 4. Кривые долговечности МНОК №№ 1 и 2, напыленных по режиму 2 (а);  
эмиссионные характеристики катодов №№ 3 и 4, напыленных по режиму 1 (б)

Из рис. 4, б видно, что эмиссионные характеристики катодов с покрытием, осажденным по режиму 1, гораздо хуже, чем представленные на рис. 3. При накале 220 мА токи катодов составляют 23 и 16 мкА. Их срок службы составил менее 500 ч.

При росте концентрации реактивного газа скорость нанесения пленок снижается из-за взаимодействия газа с поверхностью мишени и образования окислов. Увеличение температуры мишени уменьшает степень покрытия ее поверхности окислами и увеличивает скорость распыления [11].

Напыление с сильным источником осаждаемого вещества предполагает механизм массопереноса с поверхностной диффузией, пленка состоит из мелких кристаллитов одинакового размера и фазового состава. При слабых источниках массоперенос осуществляется через газовую fazу, а кристаллиты неоднородны [12].

Повышение давления рабочего газа с 0,13 до 0,15 Па приводит к уменьшению скорости доставки вещества мишени и скорости роста пленки. Температурные условия при формировании пленок влияют на компонентный, фазовый состав и характеристики МНОК.

Механизм роста напыляемой пленки  $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$  описывает модель структурных зон (МСЗ) [13]. Интенсивная бомбардировка энергичными ионами подавляет рост пор между колоннами, пленки являются плотными.

При напылении по 1 режиму происходит бомбардировка ионами с большой энергией ( $\approx 100 \dots 120$  эВ) и увеличивается подвижность адсорбированных атомов мишени на подложке, снижая затеняющий эффект колончатой структуры, что приводит к уплотнению пленок и уменьшению размеров кристаллитов Ba, Sr, Ca.

Увеличение содержания  $\text{CO}_2$  в режиме 2 из-за процессов диффузационного воздействия реактивного газа, с одной стороны, несколько уменьшило энергию осаждающихся частиц. Однако ее достаточно, чтобы адсорбционные атомы на подложке, захватывая большее количество атомов кислорода и углерода, объединялись в зародыши, преодолевая барьер поверхностной диффузии, и формировали кластеры, что привело к укрупнению зерен и более рыхлой структуре. Пленка с такой структурой не только меньше подвержена гидратации атомов Ba, но и требует меньшей энергии активации и диффузии при разложении карбонатов на поверхности керна МНОК в вакуумном приборе.

Термокатоды из партии № 2 показали лучшую эмиссионную стабильностью тока, меньшую рабочую температуру и больший срок службы по сравнению с партией, осажденной по режиму напыления №1.

Для объяснения причин влияния режима напыления и состава газа на эмиссионные свойства необходимо учитывать следующее. Значительной проблемой в создании эффективных пленочных термоэмиссионных микрокатодов с большим сроком службы является создание такой структуры эмиссионного тела, которая не только обеспечивает запас атомов бария, но и доставку его к поверхности при минимально возможной температуре. В данных микрокатодах существенную роль в доставке активного вещества к эмиссионной поверхности должен играть миграционный поток. В активном состоянии микрокатода его поверхность имеет минимальное количество атомов кислорода [14]. На скорость ухода кислорода из объема покрытия также влияет фактор пористости. Активирование катода включает в себя термическое, химическое воздействие и отбором тока [1, 14]. Содержание в покрытии атомов углерода способствует увеличению генерации атомов Ba. Химическое активирование (влияние керна) существенно ускоряется, если с катода отбирается ток эмиссии. Во время активирования катода в вакууме током, из объема покрытия и с поверхности испаряются атомы и молекулы кислорода. В работе [15] показана пропорциональная зависимость парциальных давлений выделяющихся газов  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  от тока эмиссии оксидного катода. Аналогичная зависимость при токовом активировании молекуллярно-напыленных катодов наблюдалась в работе [16] в диапазоне температур  $590 \dots 730$  °C.

В процессе осаждения эмиссионных покрытий в смеси газов  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  происходит захват пленкой как атомов инертного газа, так и молекул  $\text{CO}_2$ . При формовке катода на откаченном посту и токовом активировании, после удаления молекул  $\text{CO}_2$  в оксидном покрытии образуются кислородные вакансии, которые создают в электронно-зонной структуре оксида бария донорные уровни (однозарядные и двухзарядные вакансии кислорода). Образованные в процессе активирования на поверхности кристаллитов донорные поверхностные состояния влияют на понижение работы выхода [17]. Практический опыт изготовления МНОК показал, что лучшими эмиссионными свойствами обладают покрытия с содержанием  $\text{CO}_2$  в смеси в диапазоне 50...55 %. При повышении содержания в газовой смеси атомов аргона более 50...55 %, содержание  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$  в осажденном покрытии уменьшается, а плотность пленки возрастает и может составлять бо-

ле 4,5 г/см<sup>3</sup>. Поэтому для завершения процессов формовки катодов в вакуумном приборе требуется значительное повышение температуры и времени активирования, что отрицательно влияет на процесс образования донорных центров в зонной структуре тонкопленочного покрытия и эмиссионные свойства микрокатодов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С применением СЗМ исследованы пленки  $(BaSrCa)CO_3$  толщиной 2,7 мкм с поверхностнымиnanoструктурами, изменяющимися по высоте от 348 до 556 нм. Формы зерен и субзерен имеют вид от круглых и удлиненных каплеобразных при режиме 1 (с большим содержанием аргона) до палочкообразных с внутренними наностержнями (режим 2). Пленки, осажденные по режиму 1, более плотные с зернами до 1 мкм. Средняя шероховатость составила 22,8 нм, размер нанозерен – 83,5 нм [18].

При увеличении в газовой смеси содержания  $CO_2$  до 55 % размер зерен покрытия увеличился до 1980 нм. Внутренняя стержневая nanoструктура имеет средний поперечный размер зерен до 181 нм. Шероховатость поверхности пленки возросла до 77 нм. Такие покрытия с толщиной около 1 мкм после термо- и токового активирования показали высокие эмиссионные свойства и долговечность более 4500 ч благодаря наличию достаточного количества кислородных вакансий, ответственных за локальные поверхностные состояния и образование в электронно-зонной структуре оксида бария донорных уровней, понижающих работу выхода до 1,3 эВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Никонов, Б. П. Оксидный катод / Б. П. Никонов. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.
2. Жабин, Г. А. Влияние условий магнетронного распыления при осаждении покрытий  $(BaSrCa)CO_3$  на термоэлектронную эмиссию пленочных микрокатодов / Г. А. Жабин, О. В. Пелипец, Н. А. Шарапов // Письма в ЖТФ. – 2024. – Т. 50, № 11. – С. 38 – 41. – DOI: 10.61011/PJTF.2024.11.57909.19827.
3. Song, G. A review of surface roughness impact on dielectric film properties / G. Song, Y. Wang, D. Q. Tan // IET Nanodielectr. – 2022. – Vol. 5 (1). – P. 1 – 23. – DOI: <https://doi.org/10.1049/nde2.12026>.
4. / M. Kateb, H. Hajihoseini, J. T. Gudmundsson, S. Ingvarsson // J. Vac. Sci. Technol. – 2019. – Vol. A 37. – P. 031306. – DOI: <https://doi.org/10.1116/1.5094429>.
5. Термостабильные сегнетоэлектрические конденсаторы на основе градиентных пленок титаната бария-стронция / А. В. Тумarkin, С. В. Разумов, В. А. Вольпяс [и др.] // ЖТФ. – 2017. – Т. 87, вып. 10. – С. 1585 – 1591. – DOI: 10.21883/JTF.2017.10.45005.2168.
6. Жабин, Г. А. Морфология поверхности, фазовый и элементный состав молекулярно-напыленных оксидных покрытий / Г. А. Жабин, М. В. Злыгостов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2019. – Вып. 3 (542). – С. 44 – 50.
7. Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов / Г. А. Жабин, Д. Ю. Архипов, Д. М. Седловец, М. П. Темирязева // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. 1 (544). – С. 46 – 55.
8. Получение и свойства мезопористых пленок  $MoS_2$  / А. Б. Логинов, С. Н. Бокова-Сирош, П. В. Федотов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2022. – Т. 56, № 12. – С. 1112 – 1119. – DOI: 10.21883/FTP.2022.12.54509.4129.
9. Наблюдение изменения морфологии пленок высокотемпературных металлов в сканирующем зондовом микроскопе при прогреве в условиях открытого космоса / Б. А. Логинов, Ю. В. Хрипунов, М. А. Щербина [и др.] // Наноиндустрия. – 2024. – Т. 17, № 2. – С. 90 – 97. – DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.2.90.97>.

10. Влияние состава газовой смеси Ar и CO<sub>2</sub> при напылении пленок (Ba,Sr,Ca)CO<sub>3</sub> на шероховатость поверхности и эмиссионные свойства // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 6. – <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.6.5>.
11. **Берлин, Е. В.** Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е. В. Берлин, Л. А. Сейдман. – М.: Техносфера. – 2010. – 528 с.
12. Статистическое моделирование процесса осаждения тонких пленок высокотемпературного сверхпроводника YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> при ионно-плазменном распылении / В. А. Вольпяс, С. В. Разумов, А. В. Тумаркин, А. Б. Козырев // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, вып. 7. – С. 60. – 68.
13. **Thornton, J. A.** Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings / J. A. Thornton // Journal of Vacuum Science & Technology. – 1974. – Vol. 11, No 4. – С. 666 – 670.
14. **Киселев, А. Б.** Металлооксидные катоды электронных приборов / А. Б. Киселев. – М.: МФТИ. – 2001. – С. 35.
15. Особенности эмиссии и полевая электронная спектроскопия оксидного термокатода / В. М. Лобанов, Е. П. Шешин, Н. Н. Чадаев, С. В. Лобанов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2023. – № 4. – <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.6>.
16. Полевая электронная спектроскопия молекулярно-напыленного оксидного термокатода / В. М. Лобанов, Ю. А. Будзинский, Е. П. Шешин [и др.] // Журнал радиоэлектронники. – 2024. – № 9. – <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.9.8>.
17. **Ли, И. П.** Структура электронных уровней кислородных вакансий в оксиде бария / И. П. Ли, В. С. Петров, Т. В. Прокофьева [и др.] // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2015. – Вып. 2 (525). – С. 45 – 58.
18. **Жабин, Г. А.** Влияние условий ионно-плазменного напыления на шероховатость поверхности пленки (Ba,Sr,Ca)CO<sub>3</sub> и термоэмиссионные свойства микрокатодов / Г. А. Жабин, А. Б. Логинов, Б. А. Логинов и др. // СВЧ-электроника – 2025. Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина». – Фрязино, 2025. – С. 53 – 54.

Статья поступила 29 апреля 2025 г.

УДК 621.792

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАЗОРА  
ДЛЯ СБОРОК ИЗ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ Nd–Fe–B  
С ПОВЫШЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ  
И СТОЙКОСТИ К ВНЕШНИМ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИМ ФАКТОРАМ**

**В. С. Верченов<sup>1,2</sup>, Д. А. Разин<sup>1,3</sup>, Н. П. Едунов<sup>1,4</sup>, К. Л. Сергеев<sup>1,2</sup>,  
С. С. Шумкин<sup>1,2</sup>, С. Н. Голубев<sup>1</sup>, А. Е. Ерешченко<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «МИРЭА – РТУ», г. Москва

<sup>3</sup>ФГАОУ ВО «НИТУ «МИСИС», г. Москва

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Владимир

Представлен метод получения диэлектрического зазора для сборок из постоянных магнитов на основе сплава системы Nd–Fe–B с использованием термостойких покрытий и клеевого состава, обеспечивающих устойчивость к внешним воздействующим факторам и сохранение адгезионных свойств при температуре до 180 °C. На основании проведенных исследований определена оптимальная толщина диэлектрического зазора (0,1 мм), которая достигается с помощью термостойкого лакокрасочного покрытия эмалью КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75).

*КС: магнитная сборка, склейка магнитов Nd–Fe–B, вихревые токи, диэлектрический зазор, термостойкое покрытие*

**ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING A DIELECTRIC GAP  
FOR ASSEMBLIES OF Nd–Fe–B PERMANENT MAGNETS  
WITH INCREASED REQUIREMENTS TO ELECTRICAL CONDUCTIVITY  
AND RESISTANCE TO EXTERNAL AFFECTING FACTORS**

**V. S. Verchenov<sup>1,2</sup>, D. A. Razin<sup>1,3</sup>, N. P. Edunov<sup>1,4</sup>, K. L. Sergeev<sup>1,2</sup>,  
S. S. Shumkin<sup>1,2</sup>, S. N. Golubev<sup>1</sup>, A. E. Ereshchenko<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>FSBEI HE «MIREA-RTU», Moscow

<sup>3</sup>FSAEI HE «NUST MISIS», Moscow

<sup>4</sup>FSBEI HE «VlSU named after A.G. and N.G. Stolетов», Vladimir

The paper presents a method for obtaining a dielectric gap for assemblies of permanent magnets based on the Nd–Fe–B alloy system using heat-resistant coatings and an adhesive composition that provide a dielectric gap resistance to external factors and preservation of adhesive properties at temperatures up to 180 °C. Based on the studies conducted, the optimal thickness of the dielectric gap was determined to be 0.1 mm, which is achieved using a heat-resistant paint coating of KO-818 black enamel TU 6-10-959-75.

*Keywords: magnetic assembly, bonding of Nd–Fe–B magnets, eddy currents, dielectric gap, heat-resistant coating*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянные магниты на основе сплава неодим-железо-бор (Nd–Fe–B) представляют собой одно из самых значительных достижений в материаловедении последних десятилетий. С момента открытия [1, 2] данных магнитов в начале 1980-х годов компанией General Motors совместно с Sumitomo Special Metals они произвели настоящую революцию в самых разнообразных отраслях промышленности. Благодаря своим уникальным свойствам [3], магниты данной группы занимают лидирующие позиции в процессах миниатюризации и повышения эффективности технических устройств.

Особенностью в применении данных магнитов является возможность разработки сложных магнитных систем для высокочастотного оборудования, включая электродвигатели, генераторы и энергопреобразующие устройства [4–8]. Однако при эксплуатации в условиях переменных магнитных полей высокой частоты в сплаве системы Nd–Fe–B неизбежно возникают паразитные вихревые токи (токи Фуко) [9, 10]. Данное явление обусловлено высокой удельной электропроводностью этого материала (порядка  $1,4 \cdot 10^6$  См/м, что составляет ~20 % от проводимости меди) в сочетании с интенсивным изменением магнитного потока [11].

Одной из проблем, порождаемых вихревыми токами, является рассеяние энергии в виде тепла в объеме магнита, что вызывает его нагрев. Это особенно критично для сплава Nd–Fe–B, так как его магнитные свойства (коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная индукция  $B_r$ ) резко ухудшаются при температурах, приближающихся к точке Кюри (обычно 310...400 °C, в зависимости от марки) [11], а необратимая потеря намагниченности может начаться уже при 150...200 °C. Перегрев также создает термические напряжения, способствующие механическому разрушению хрупких спеченных магнитов.

Другой проблемой индуцируемых токов Фуко в магнитотвердых материалах считается снижение магнитного потока. Вихревые токи генерируют собственное магнитное поле, направленное противоположно изменению внешнего поля (правило Ленца). Создаваемое экранирующее поле ослабляет полезный рабочий магнитный поток системы, ухудшая динамические характеристики оборудования (крутящий момент двигателя, выходное напряжение генератора).

Для решения вышеперечисленных проблем применяются следующие методы [12]: сегментирование магнитов на электрически изолированные элементы (ламинация), нанесение диэлектрических покрытий на грани зерен или поверхность магнита, а также разработка специализированных сплавов Nd–Fe–B с повышенным удельным сопротивлением.

В данной работе рассматривается совокупность методов сегментирования магнитов с нанесением диэлектрического покрытия на поверхность и последующей склейкой. Такое решение позволяет минимизировать механические напряжения и риск повреждения, сохраняя эксплуатационные свойства, при этом появляется возможность использования стандартных магнитов из сплава Nd–Fe–B.

Для устройств, работающих в экстремальных условиях, критически важно обеспечить термостойкость соединения склеенных магнитов. Например, рабочая температура электродвигателей, в которых применяются магнитные сборки, достигает 180 °C [13].

При таких условиях стандартные клеевые составы могут терять прочность, деформироваться или выделять летучие вещества, что нарушает целостность всей магнитной системы. Одновременно необходимо учитывать, что применяемый сплав Nd–Fe–B активно окисляется под воздействием атмосферной влаги, агрессивных сред и перепадов температур [14], что усиливает требования к защитным покрытиям.

На основании вышеизложенного ключевым направлением в повышении надежности и работоспособности устройств является получение магнитной сборки методом склеивания постоянных магнитов из сплава системы Nd–Fe–B с использованием специализированных термостойких покрытий и клеевых составов, обеспечивающих диэлектрический зазор, устойчивость к внешним воздействующим факторам и сохранение адгезионных свойств при температуре до 180 °C.

## **2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СБОРОК ИЗ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ Nd-Fe-B**

Изготовление сборок из постоянных магнитов Nd–Fe–B состоит из следующих технологических операций:

- изготовление магнитов для сборки;
  - нанесение гальванического покрытия;
  - нанесение лакокрасочного покрытия (ЛКП);
  - склейка магнитов в сборку;
  - испытание полученных образцов на стойкость к внешним воздействующим факторам.

Эскиз сборки из постоянных магнитов на основе сплава системы Nd–Fe–B представлен на рис. 1.

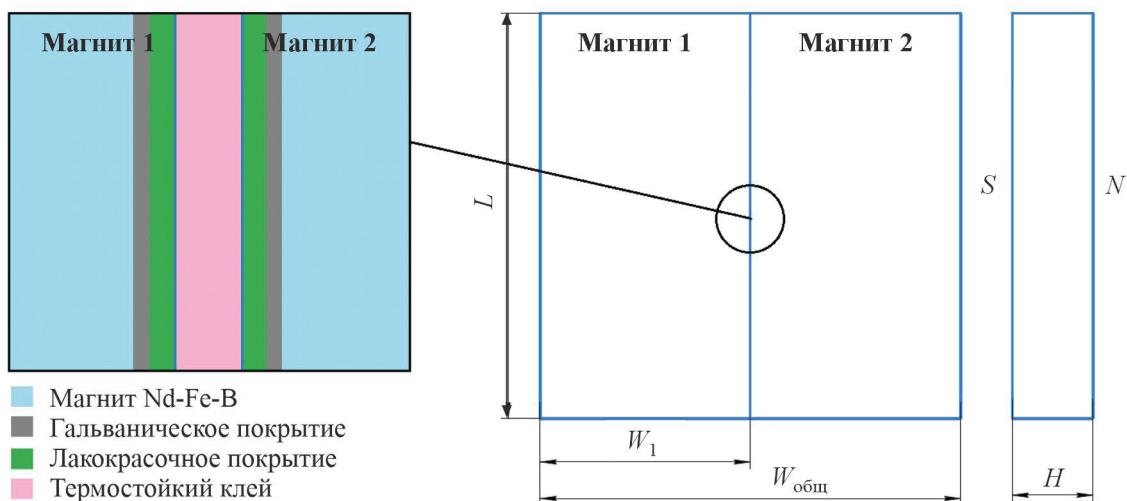


Рис. 1. Эскиз сборки из постоянных магнитов Nd–Fe–B

Как видно из рис. 1, такая сборка состоит из склейки термостойким kleевым составом двух призматических магнитов Nd–Fe–B, предварительно покрытых двухслойным никелевым покрытием Н6.Н69 для защиты от окисления и обеспечения требуемого диэлектрического зазора.

Изготовление самих магнитов для сборки (рис. 2, а) проводилось с помощью электроэрозионной резки из заготовки из сплава системы Nd–Fe–B (рис. 2, б) с последующей обработкой острых углов для обеспечения лучшей адгезии после нанесения гальванического покрытия.

Для предотвращения окисления на поверхности полученных после электроэррозионной резки образцов наносили покрытие Н6.Н69 гальваническим методом по отработанной на АО «НПП «Исток» им. Шокина» технологии [15]. Перед началом процесса важно обеспечить полное размагничивание магнитов, которое проводилось в вакуумной печи при температуре 400 °C, с выдержкой 1 ч и охлаждением с печью в вакууме. Образец магнита с гальваническим покрытием представлен на рис. 3.

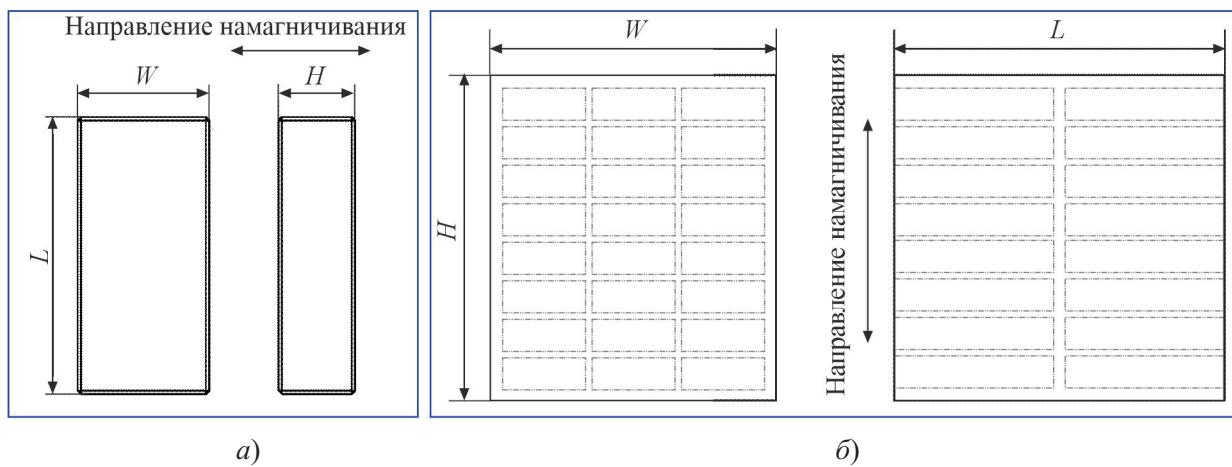


Рис. 2. Эскиз магнита для сборки (а) и раскрой выреза магнитов из заготовки (б)



Рис. 3. Образец после нанесения гальванического покрытия Ni6.Ni69

С целью обеспечения диэлектрического зазора как на этапе склейки, так и магнитной сборки в целом наносили термостойкое ЛКП. На основании стандарта организации СТО ТС0.028.038 СК–2017 «Покрытия лакокрасочные» были подобраны следующие термостойкие эмали:

- эмаль КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75);
- эмаль ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022);
- лак КО-08 (ГОСТ 15081–78);
- грунтовка ЭП-076 (ТУ 6-10-755-84).

Термостойкая грунтовка ЭП-076 (ТУ 6-10-755-84) применялась как промежуточный слой между гальваническим покрытием и термостойкой эмалью с целью улучшения адгезии. При этом часть образцов специально не покрывали грунтовкой, что в дальнейшем оказалось наилучшим решением для обеспечения диэлектрического зазора.

Для экспериментальных исследований ЛКП наносили в 1...5 слоев с послойной сушкой:

– эмаль ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022), лак КО-08 (ГОСТ 15081–78) и грунтовка ЭП-076 (ТУ 6-10-755-84), сушка каждого слоя 2 ч при температуре 80 °C;

– эмаль КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75), сушка каждого слоя 2 ч при температуре 180 °C.

Образцы после нанесения термостойких эмалей представлены на рис. 4.

После нанесения термостойкого ЛКП производили склейку магнитов термостойким kleевым составом на основе двухкомпонентной эпоксидной смолы с помощью оснастки (рис. 5), которая позволяет зафиксировать склеиваемые магниты в двух плоскостях, при этом третья плоскость фиксируется отдельно с помощью струбцины и металлических подкладок.



Рис. 4. Образцы после нанесения ЛКП:  
а – эмаль ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022); б – эмаль КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75)

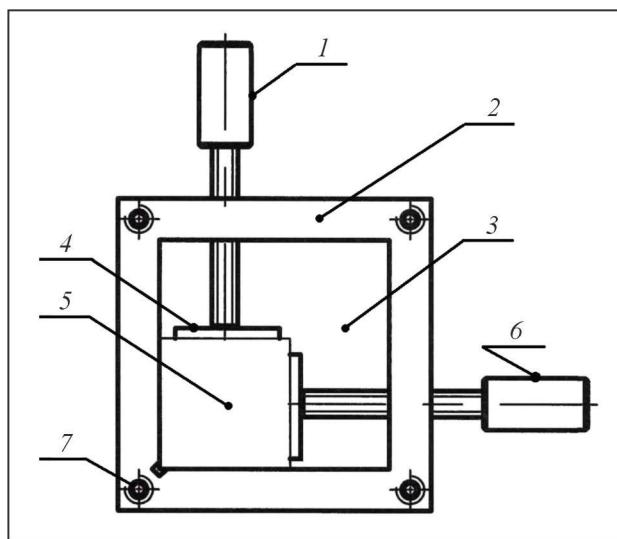


Рис. 5. Эскиз оснастки для склеивания магнитов:  
1, 6 – винты затяжки магнитов; 2 – основание; 3 – дно оснастки; 4 – проставка;  
5 – подложка; 7 – винт крепления

Процесс склейки заключался в следующем. Склейываемые поверхности магнитов обезжиривались с использованием изопропилового спирта и х/б бязи, далее на поверхность одного из магнитов наносился термостойкий клей, с последующим присоединением второго магнита. В таком состоянии магнитная склейка помещалась через фторопластовую пленку на подложку 5, которая фиксировалась в углу основания 2. С помощью винтов 1 и 6 через текстолитовые прокладки 4 происходила затяжка в двух плоскостях склеиваемых магнитов. Затяжка в третьей плоскости производилась с помощью струбцины через текстолитовую проставку.

Сушка магнитной сборки осуществлялась в сушильном шкафу при температуре 80 °C в течение 2 ч.

В результате были получены образцы (рис. 6.) с термостойкими ЛКП ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022), КО-08 (ГОСТ 15081–78) и КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) толщиной в 1...5 слоев, с применением и без промежуточного слоя в виде грунтовки ЭП-076 (ТУ 6-10-755-84), а также с различной толщиной kleевого слоя для последующего проведения испытаний на отсутствие

электрического контакта между склеенными магнитами, прочность клеевого шва и стойкость к внешним воздействующим факторам.

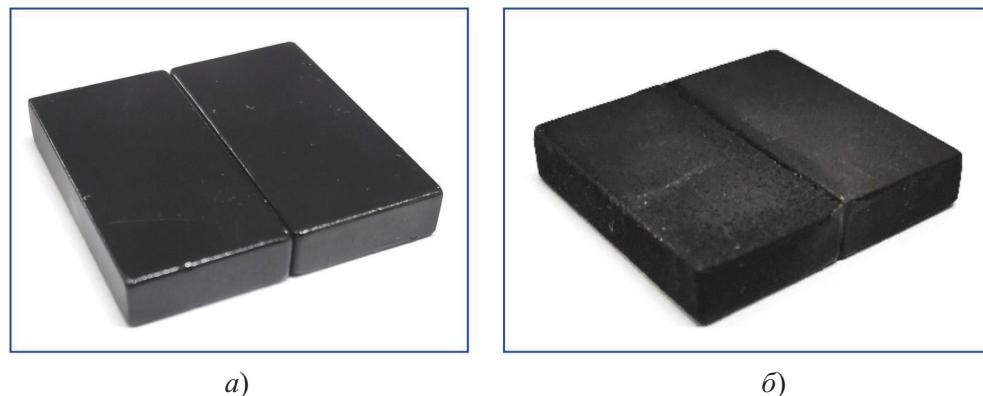


Рис. 6. Готовые образцы магнитной сборки:

*a* – ЛКП ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022); *b* – ЛКП КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75)

### **3. ИСПЫТАНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНОЙ СБОРКИ**

Испытания на отсутствие электрического контакта между склеенными магнитами проводились с помощью мультиметра Fluke 289. Климатические условия при проверке были следующие:

- температура воздуха 22 °C;
  - влажность воздуха 68 %;
  - атмосферное давление 738 мм рт. ст.

Количество испытываемых образцов – 30 шт. каждого вида.

В табл. 1 представлены результаты испытаний на отсутствие электрического контакта между склеенными магнитами при различной толщине клеевого соединения, которое обеспечивалось количеством слоев лакокрасочного покрытия в совокупности с промежуточным слоем грунтовки ЭП-076 (ТУ 6-10-755-84).

Таблица 1

## **Результаты испытаний на отсутствие электрического контакта между склеенными магнитами**

Наименование ЛКП в магнитной сборке	Толщина клеевого соединения, мм				
	0,08	0,09	0,10	0,15	0,20
КО-08 (ГОСТ 15081–78) с грунтовочным слоем	X	V	V	V	V
КО-08 (ГОСТ 15081–78) без грунтовочного слоя	X	V	V	V	V
КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) с грунтовочным слоем	X	X	V	V	V
КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) без грунтовочного слоя	X	X	V	V	V
ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022) с грунтовочным слоем	X	V	V	V	V
ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022) без грунтовочного слоя	X	V	V	V	V

*Примечание.* Символ X – испытание не пройдено, присутствует контакт; V – испытание пройдено, контакта нет.

По результатам табл. 1 был сделан вывод, что оптимальная толщина kleевого соединения для всех ЛКП составляет 0,1 мм.

Испытания на прочность kleевого соединения проводили на предварительно намагниченных до насыщения образцах. Метод заключался в приложении давления в 1 МПа на одну из сторон магнитной сборки, в то время как противоположная сторона жестко фиксировалась на предметном столе.

Количество испытываемых образцов – 10 шт. каждого вида.

Результаты испытаний на прочность kleевого соединения представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Результаты испытаний на прочность kleевого соединения

Наименование ЛКП в магнитной сборке	Толщина kleевого соединения, мм				
	0,08	0,09	0,10	0,15	0,20
КО-08 (ГОСТ 15081–78) с грунтовочным слоем	V	V	V	X	X
КО-08 (ГОСТ 15081–78) без грунтовочного слоя	V	V	V	X	X
КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) с грунтовочным слоем	V	V	X	X	X
КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) без грунтовочного слоя	V	V	V	V	X
ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022) с грунтовочным слоем	V	V	V	V	V
ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022) без грунтовочного слоя	X	X	X	X	X

*Примечание.* Символ X – испытание не пройдено, образец разрушился; V – испытание пройдено, разрушение образца не произошло.

В результате испытаний на прочность kleевого соединения (см. табл. 2.) разрушение образцов в основном наблюдалось у покрытий, которые наносили без использования грунтовочного слоя, однако образцы с эмалью КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) без грунтовки показали противоположный результат. Объясняется это тем, что во время операции склеивания при толщине до 0,10 мм происходит диффузия клея в слой лакокрасочного покрытия вплоть до магнита, тем самым увеличивается прочность и адгезия kleевого соединения.

Следующим этапом исследований магнитных сборок являлись испытания на стойкость к внешним воздействующим факторам методами HAST, SST и PCT.

Метод HAST (*highly accelerated stress test*) подразумевает испытание на стойкость при воздействии повышенной влажности, температуры и давления в режимах ненасыщенного сжатого пара:

- длительность 240 ч;
- температура  $(132 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;
- влажность 95 %;
- давление 0,74 МПа;
- оборудование: камера старения EHS 412MD.

Метод PCT (*pressure cooker test*) означает испытание на стойкость при воздействии повышенной влажности, температуры и давления в режимах насыщенного сжатого пара:

- длительность 72 ч;
- температура  $(120 \pm 2)^\circ\text{C}$ ;

- влажность 100 %;
- давление 0,2 МПа;
- оборудование: камера старения EHS 412MD.

Метод SST (*salt spray test*) позволяет испытать образцы на стойкость к воздействию соляного тумана:

- длительность 72 ч;
- температура 35 °C;
- соляной туман 5 %;
- оборудование: камера SST Corrosionbox 1000e.

Образцы исследовались с помощью визуального осмотра. Испытание на стойкость к внешним воздействующим факторам считалось пройденным, если образец не имел вздутий, отслоений защитного покрытия, электрического контакта между склеенными частями и разрушения клеевого соединения между частями магнита. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам**

Наименование ЛКП в магнитной сборке	Толщина клеевого соединения, мм				
	0,08	0,09	0,10	0,15	0,20
КО-08 (ГОСТ 15081–78) с грунтовочным слоем	X	X	X	–	–
КО-08 (ГОСТ 15081–78) без грунтовочного слоя	X	X	X	–	–
КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) с грунтовочным слоем	X	X	–	–	–
КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) без грунтовочного слоя	V	V	V	X	–
ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022) с грунтовочным слоем	X	X	X	X	X
ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022) без грунтовочного слоя	X	X	X	–	–

*Примечание.* Символ X – испытание не пройдено, образец разрушился; V – испытание пройдено, разрушение образца не произошло; – испытание не проводилось.

При визуальном осмотре после проведения комплекса испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам в образцах с промежуточным слоем грунтовки ЭП-076 (ТУ 6-10-755-84) по всей поверхности наблюдалось наличие вздутий (рис.7, а), при этом разрушение магнитной сборки происходило в виде отслаивания между гальваническим покрытием и грунтовочным слоем (рис.7, б). Это связано с потерей адгезии слоев лакокрасочного покрытия при испытаниях в режимах насыщенного пара. Проблема потери адгезии наблюдалась и у образцов без грунтовочного слоя, кроме магнитной сборки с эмалью КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75).

Как объяснялось ранее, во время склейки двух магнитов происходит диффузия клея в слой эмали КО-818, которая способствовала в защите от проникновения насыщенного пара внутрь клеевого соединения, тем самым сохранив прочностные характеристики.

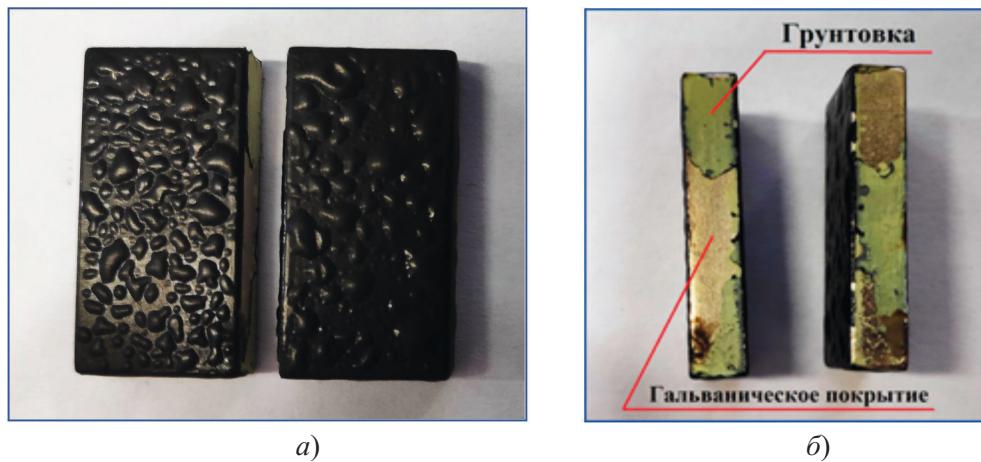


Рис. 7. Разрушенные образцы после испытаний на ВВФ:  
а – вздутие ЛКП ЭП-140 (ГОСТ 24709–2022) с грунтовочным слоем; б – разрушение  
в местах соединения грунтовки с гальваническим покрытием

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были изготовлены магнитные сборки методом склеивания постоянных магнитов из сплава системы Nd–Fe–B с использованием специализированных термостойких покрытий и клеевого состава.

На основании проведенных испытаний выявлено, что оптимальная толщина диэлектрического зазора составляет 0,1 мм, достигается она путем нанесения термостойкого лакокрасочного покрытия эмалью КО-818 черная (ТУ 6-10-959-75) без применения промежуточного грунтовочного слоя на гальваническое покрытие магнитов. Последующая склейка термостойким клеевым составом на основе двухкомпонентной эпоксидной смолы обеспечивает предел прочности не менее 1 МПа, устойчивость к внешним воздействующим факторам и сохранение адгезионных свойств при температуре до 180 °C.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (invited) / M. Sagawa, S. Fujimara, N. Togawa [et al.] // Journal of Applied Physics. – 1984. – Vol. 55, No 6. – P. 2083 – 2087.
2. Pr–Fe and Nd–Fe based materials: a new class of high-performance permanent magnets (invited) / J. J. Croat, J. F. Herbst, R. W. Lee, F. E. Pinkerton // Journal of Applied Physics. – 1984. – Vol. 55, No 6. – P. 2078 – 2082.
3. Король, В. И. Применение постоянных магнитов в разных отраслях / В. И. Король, И. М. Ланкин, М. В. Ланкин // Вестник молодёжной науки России. – 2020. – № 5. – С. 13.
4. Михайлова, Е. Г. Применение неодимовых магнитов (неодим-железо-бор) / Е. Г. Михайлова, В. И. Гончаров // Современные инновации: достижения и перспективы III тысячелетия: Сборник статей по материалам VII Международной научно-практической конференции, Москва, 19–20 декабря 2017. – Москва: Проблемы науки, 2017. – С. 17 – 19.
5. Matsuura, Y. Recent development of Nd–Fe–B sintered magnets and their applications / Y. Matsuura // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 303, No 2. – P. 344 – 347.

6. Application of high-energy Nd–Fe–B magnets in the magnetic refrigeration / W. Dai, B.G. Shen, D.X. Li, Z.X. Gao // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2000. – Vol. 218, No 1. – P. 25 – 30.
7. Leventis, N. Magnetohydrodynamic electrochemistry in the field of Nd–Fe–B magnets. Theory, experiment and application in self-powered flow delivery systems / N. Leventis, X. Gao // Analytical Chemistry. – 2001. – Vol. 73, No 16. – P. 3981 – 3992.
8. Mhanggo, L. M. C. Benefits of Nd–Fe–B magnet in brushless DC motor design for aircraft applications / L. M. C. Mhanggo // Fourth International Conference on Electrical Machines and Drives Conf. – 1989. – P. 76 – 79.
9. **Проскуряков, М. В.** Вихревые токи (токи Фуко) / М. В. Проскуряков, А. М. Силин, В. В. Нижегородов // Новые технологии науки, техники, педагогики высшей школы: материалы Международной научно-практической конференции, Москва, 29–31 мая 2017. – М.: ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», 2017. – С. 425 – 428.
10. Eddy currents: theory and applications / E. E. Kriezis, T. D. Tsiboukis, S. M. Panas, J. A. Tegopoulos // Proceedings of the IEEE. – 2002. – Vol. 80, No 10. – P. 1559 – 1589.
11. ГОСТ Р 52956-2008 Материалы магнитотвердые спеченные на основе сплава неодим-железо-бор. Классификация. Основные параметры. – М.: Стандартинформ, 2008. – С. 12.
12. **Кононов, А. В.** Потери при перемагничивании сердечника трансформатора / А. В. Кононов // «Актуальные проблемы энергетики – 2021»: материалы студенческой научно-технической конференции, Минск, 25–29 октября 2021. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2021. – С. 428 – 430.
13. **Кудрявцев, А. Л.** Исследование температурных режимов тяговых электродвигателей карьерных автомобилей-самосвалов на имитационной модели / А. Л. Кудрявцев // Известия УГГУ. – 2000. – № 9. – С. 182 – 189.
14. **Кутепов, А. В.** Исследование влияния собственного магнитного поля на коррозионную стойкость постоянных магнитов (Nd, Pr)–Fe–B / А. В. Кутепов, А. А. Степнов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 11-1 (113). – С. 33 – 36.
15. **Патент № 2810992 РФ, МПКС25D 5/34, C23F 1/28, C23G 1/02.** Способ подготовки поверхности магнитного сплава с содержанием редкоземельных элементов перед нанесением гальванических покрытий: заявл. 23.10.2023: опубл. 09.01.2024, Бюл. № 1 / Тихомиров П. Л., Лихачева И. Е., Курдогло Е. Д. [и др.].

*Статья поступила 6 июня 2025 г.*

УДК 621.371.334

## ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧ

А. А. Борисов<sup>1,2</sup>, С. Б. Клюев<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Филиал «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Фрязино

Предложена конструкция Y-делителя на основе щелевых линий передач с применением проволочной среды. Делитель мощности спроектирован на основе симметричной двухщелевой линии и симметричной щелевой линии с экранированным основанием. Расчетным методом – методом конечных элементов проведено математическое моделирование делителя мощности и исследованы его электродинамические характеристики в СВЧ-диапазоне в зависимости от значения диэлектрической проницаемости материала подложки.

*КС: симметричная щелевая линия с экранированным основанием, симметричная двухщелевая линия, матрица рассеяния, метод конечных элементов, диэлектрическая проницаемость*

## THE EFFECT OF THE SUBSTRATE MATERIAL PERMITTIVITY ON CHARACTERISTICS OF A POWER DIVIDER BASED ON SLOT TRANSMISSION LINES

A. A. Borisov<sup>1,2</sup>, S. B. Klyuev<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Branch of MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA), Fryazino

А Y- divider design based on slotted transmission lines using a wire medium is proposed. The power divider is designed on the basis of a symmetrical double-slot line and a symmetrical slot line with a shielded base. Using the finite element calculation method, the power divider was modeled mathematically and its electrodynamic characteristics in the microwave range were investigated depending on the dielectric constant of the substrate material.

*Keywords: shield substrate symmetric slot line, symmetric double-slot line, scattering matrix, finite element method, permittivity*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка многополюсных функциональных узлов для СВЧ-устройств необходима для дальнейшего совершенствования схемотехнических и конструктивных решений аппаратуры, блоков и систем. Особый интерес представляют решения по передаче сигнала в разных слоях волноведущих структур, что особенно важно при проектировании новых устройств, так как позволяет уменьшить их габариты, упростить их изготовление, настройку и применение, при этом для их создания применять существующие в производстве технологии.

Одним из большого количества многополюсных функциональных узлов, являющихся базовыми элементами (БЭ) при создании СВЧ-устройств, является Y-делитель мощности (делитель). Ранее

делители проектировали и реализовывали на основе планарных линий передач. Однако с развитием новых технологических процессов и внедрением в производство аддитивных технологий стало возможным создание БЭ на основе концепции объемных интегральных схем [1], позволяющей проектировать и реализовывать БЭ с помощью комбинации различных типов линий передач (ЛП), что определяет возможность передачи сигнала в разные слои платы или волноведущей структуры (ВС).

В работе предложена модель делителя, основными типами ЛП которого являются симметричная двухщелевая линия (СДЩЛ) и симметричная щелевая линия с экранированным основанием (СЩЛЭО), и рассчитаны параметры матрицы рассеяния для различных значений диэлектрической проницаемости материала подложки.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ МОДЕЛИ ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ И МЕТОД ЕЕ РАСЧЕТА

Возможность построения различных функциональных узлов с применением комбинации различных ЛП показана, например, в [1–5] и экспериментально исследована в [6]. В отличие от [5], в работе рассматривается открытая ВС с СДЩЛ и исследуются характеристики делителя с геометрическими параметрами, необходимыми для применения в гибридных интегральных схемах СВЧ. В конструкции рассматриваемого делителя (рис. 1) применены результаты, полученные в работах [3, 4, 7], и конструктивные элементы в виде металлизированных отверстий (металлических стержней), образующих проволочную среду (частотериодическую решетку), которая применяется, например, в такой структуре, как интегрированный в подложку волновод [8].

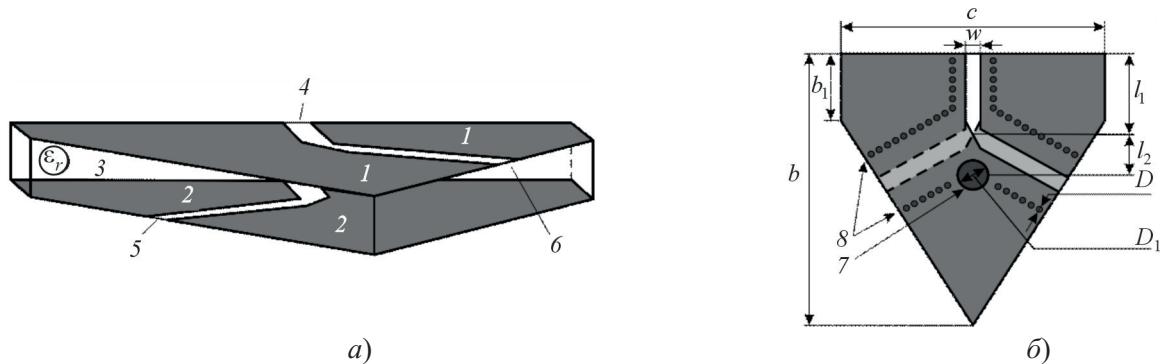


Рис. 1. Расчётная модель делителя:

*a* – общий вид (физическая модель); *б* – вид сверху; 1, 2 – металлические экраны, образующие щель; 3 – подложка с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ ; 4 – входная СДЩЛ; 5, 6 – выходные СЩЛЭО с «зеркалами»; 7 – металлический стержень; 8 – металлические стержни или металлизированные отверстия;  $c$  – ширина;  $b$  – длина;  $b_1$  – длина отрезка СДЩЛ;  $l_1$  – расстояние от входа СДЩЛ до центра пересечения щелей линий;  $l_2$  – расстояние от центра пересечения щелей до центра стержня;  $D$  – диаметр металлизированного отверстия (металлического стержня);  $D_1$  – диаметр металлического стержня (металлизированного отверстия);  $w$  – ширина щелей СДЩЛ и СЩЛЭО

Поперечные сечения щелевых линий, используемых при расчете характеристик делителя, а также силовые линии напряжённости электрического поля основных (рабочих) типов волн СДЩЛ и СЩЛЭО показаны на рис. 2.

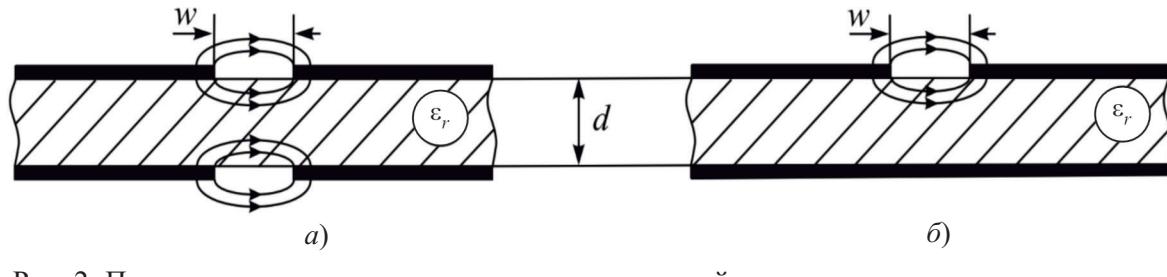


Рис. 2. Поперечные сечения регулярных щелевых линий, на которых строится делитель, и силовые линии напряжённости электрического поля основных (рабочих) типов волн: а – СДЩЛ; б – СЩЛЭО;  $w$  – ширина щели;  $d$  – толщина подложки с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ .

Физическая модель рассматриваемого делителя представляет собой неэкранированную структуру (см. рис. 1, а), состоящую из подложки (основания) 3 толщиной  $d$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ , металлических экранов 1 и 2 толщиной  $t = 0,008$  мм, в которых прорезаны щели так, что дальние края 4 образуют регулярную СДЩЛ, а ближние 5 и 6 – СЩЛЭО (см. рис. 1, б). В области перехода СДЩЛ в СЩЛЭО применены «зеркала» для уменьшения коэффициента отражения при распространении электромагнитной волны. Предполагается, что делитель может быть изготовлен по тонкопленочной технологии. Для анализа характеристик делителя и определения их зависимости от диэлектрической проницаемости материала подложки выбран СВЧ-диапазон. Геометрические размеры модели:  $c \times b \times d = 14 \times 18 \times 3,0$  мм,  $b_1 = 3,5$  мм,  $l_1 = 5,3$  мм,  $w/d = 0,33$  (см. рис. 1, б). При этом в модель делителя введены металлический стержень 7 и проволочная среда в виде металлических стержней (или металлизированных отверстий) 9 на расстоянии  $\lambda_b/4$  от центра щели (где  $\lambda_b$  – длина волны в линии). Для компенсации емкостной связи в узле разветвления ЛП в модель вводится медный стержень диаметром  $D_1 = 2,5$  мм, который установлен на расстоянии  $l_2 = 3,6$  мм от центра пересечения щелей до центра стержня. Отношение диаметра металлического стержня (металлизированного отверстия) к расстоянию между их центрами – шаг частотно-периодической решетки – в модели равно  $D/l \approx 0,085$  ( $l$  – расстояние между центрами металлических стержней (металлизированных отверстий)).

Учитывая, что делитель представляет собой открытую ВС, в основу модели положены уравнения Максвелла с граничными условиями Неймана. Исходя из изложенного, характеристики делителя для различных  $\epsilon_r$  могут быть рассчитаны только численным методом – методом конечных элементов (МКЭ). МКЭ имеет ряд преимуществ, например, по сравнению с проекционными методами: исследуемый объект может иметь любую геометрическую форму и электромагнитную среду, возможность моделирования любых граничных условий.

Для численных расчетов характеристик делителя, а также для последующего анализа влияния значений диэлектрической проницаемости подложки в модели применены следующие материалы:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99,7 % (поликор) с  $\epsilon_r = 9,8$  и  $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4}$  и Rogers TMM 4 (tm) с  $\epsilon_r = 4,5$  и  $\text{tg}\delta = 20 \cdot 10^{-4}$ .

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

В результате проведённых численных расчетов методом МКЭ получены итоговые значения  $S$ -параметров матрицы рассеяния для разных значений диэлектрической проницаемости материалов подложки модели делителя, частотные зависимости которых представлены на рис. 3: для материала с  $\epsilon_r = 9,8$  и  $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4}$  на рис. 3, а и для материала с  $\epsilon_r = 4,5$  и  $\text{tg}\delta = 20 \cdot 10^{-4}$  на рис. 3, б.

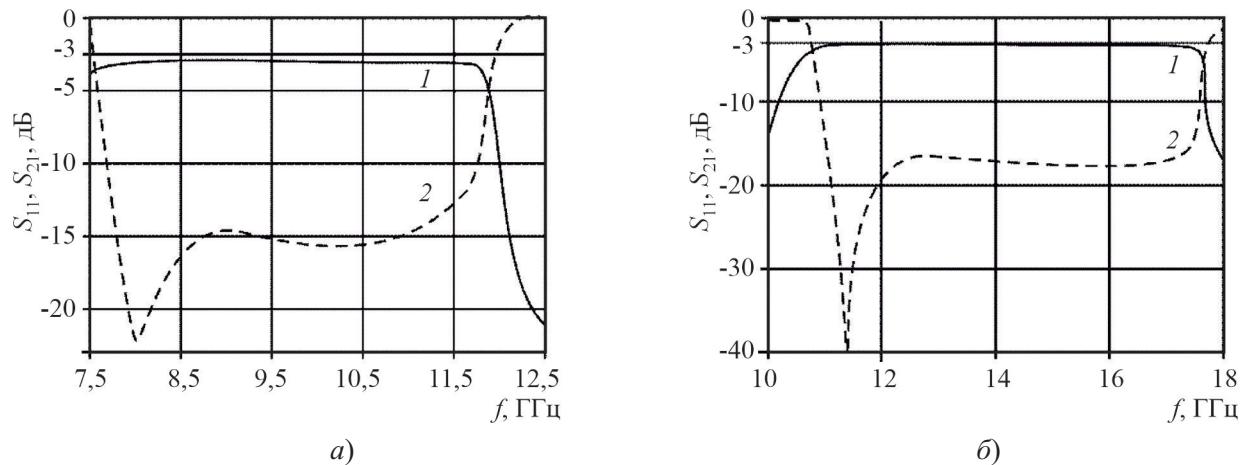


Рис. 3. Частотные зависимости  $S$ -параметров матрицы рассеяния делителя (кривая 1 –  $S_{21}$ ; кривая 2 –  $S_{11}$ ):  
а – для материала с  $\epsilon_r = 9,8$ ; б – для материала с  $\epsilon_r = 4,5$

На рис. 3 представлены значения только коэффициента прохождения  $S_{21}$  делителя, так как по амплитуде значения  $S_{21}$  и  $S_{31}$  совпадают в рассматриваемом диапазоне частот для каждого варианта применяемого материала.

Для модели делителя на подложке с  $\epsilon_r = 9,8$  (см. рис. 3, а) диапазон рабочих частот составляет  $f = 7,5\dots12,5$  ГГц, полоса рабочих частот  $\Delta f$  по уровню коэффициента прохождения  $S_{21} = -3,2$  дБ (кривая 1) примерно равно 3,5 ГГц. При этом в полосе рабочих частот  $\Delta f \approx 3,5$  ГГц значения коэффициента отражения  $S_{11}$  (кривая 2) изменяются в пределах  $S_{11} = -13,9\dots-14,8$  дБ, имея ярко выраженный минимум значения  $S_{11} = -26,2$  дБ на частоте  $f = 8,0$  ГГц, а в диапазоне частот  $f = 8,7\dots10,8$  ГГц значение  $S_{11} = -15\dots-16$  дБ.

Для модели делителя на подложке с  $\epsilon_r = 4,5$  (см. рис. 3, б) диапазон рабочих частот составляет  $f = 10,0\dots18,0$  ГГц, полоса рабочих частот по уровню коэффициента прохождения  $S_{21} = -3,2$  дБ (кривая 1) примерно равно 5,8 ГГц. При этом в полосе рабочих частот  $\Delta f \approx 5,8$  ГГц значения коэффициента отражения  $S_{11}$  (кривая 2) изменяются в пределах  $S_{11} = -15,5\dots-20,4$  дБ, имея ярко выраженный минимум значения  $S_{11} = -39,8$  дБ на частоте  $f = 11,3$  ГГц, а в диапазоне частот  $f = 12,2\dots15,8$  ГГц значение  $S_{11} = -16\dots-18$  дБ.

Сравнение результатов численного расчета частотных зависимостей коэффициента прохождения  $S_{21}$  для разных значений диэлектрической проницаемости материалов делителя (см. рис. 3) показывает, что при применении материала подложки с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4,5$  диапазон рабочих частот смещается в область более высоких значений и полоса рабочих частот по уровню коэффициента прохождения  $S_{21} = -3,2$  дБ расширяется примерно в 1,65 раза.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена конструкция  $Y$ -делителя мощности на основе щелевых линий передач и проволочной среды. Результаты проектирования показывают, что модель предложенного  $Y$ -делителя имеет равные амплитуды выходных каналов. Полученные результаты численного моделирования показывают, что применение материала подложки с небольшими значениями диэлектрической

проницаемости позволяет расширить полосу рабочих частот. Предложенное техническое решение  $Y$ -делителя может быть использовано в качестве многослойных плат для передачи электромагнитной энергии в вертикальном направлении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гвоздев, В. И. Объёмные интегральные схемы СВЧ / В. И. Гвоздев, Е. И. Нефёдов. – М.: Наука, 1985. – 256 с.
2. Фомин, Д. Г. Частотно-перестраиваемое устройство на основе многослойного полосково-щелевого перехода и его применение для измерения диэлектрических свойств материалов / Д. Г. Фомин, Н. В. Дударев, С. Н. Даровских // Ural Radio Engineering Journal. – 2021. – Vol. 5(3). – P. 225 – 238. – DOI: 10.15826/urej.2021.5.3.002.
3. Линии передач и базовые элементы плоскостных и объёмных интегральных схем СВЧ и КВЧ / С. Б. Клюев, Е. И. Нефёдов, Т. Ю. Черникова, У. Цзи // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – № 10. – С. 43 – 58.
4. Двух с половиной мерная технология и делитель каналов / С. Б. Клюев, Е. И. Нефёдов, Т. Ю. Черникова, У. Цзи // Успехи современной радиоэлектроники. – 2011. – № 5. – С. 28 – 30.
5. Клюев, С. Б. Электродинамическое моделирование многослойного перехода для интегральных схем СВЧ / С. Б. Клюев, В. В. Демшевский // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2023. – Вып. 3 (559). – С. 96 – 101.
6. Исследование характеристик щелевой линии со смещением щели к краю диэлектрической подложки / С. Б. Клюев, В. А. Иовдальский, В. В. Демшевский, В. П. Марин // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. – 2023. – Т. 23, № 4. – С. 53 – 63. – DOI: <https://doi.org/10.18127/j22250980-202304-06>.
7. Клюев, С. Б. Симметричная щелевая линия с экранированным основанием / С. Б. Клюев, В. А. Иовдальский // Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» («Радиоинфоком–2022»), г. Москва, РТУ МИРЭА. – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2022. – С. 300 – 303.
8. Интегрированные в подложку волноводы, их свойства и применимость при решении практических задач / С. Б. Клюев, В. В. Демшевский, И. А. Богачев [и др.] // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2024. – Вып. 2 (562). – С. 84 – 99.

*Статья поступила 11 июля 2025 г.*

УДК 621.525

**УЛУЧШЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОТПАЯННЫХ ЭВП СВЧ  
С РАВНЫМИ ИНТЕРВАЛАМИ ВРЕМЕНИ**

**С. А. Вашин, Е. А. Рубан, А. А. Шапоренков**

*ИФХЭ РАН, г. Москва*

На основе методики определения герметичности отпаянных ЭВП при измерениях тока электроразрядных магнитных насосов с равными интервалами времени разработана улучшенная методика для разделения герметичных и натекающих отпаянных приборов. Рассчитаны потоки газов, при которых возможно определение герметичности электровакуумных приборов с повышенным газовыделением в вакуумный объем.

*КС: насос электроразрядный магнитный, герметичность, отпаянный электровакуумный прибор*

**AN IMPROVED METHOD FOR DETERMINING  
THE HERMETICITY OF SEALED-OFF MICROWAVE EVDS  
AT EQUAL TIME INTERVALS**

**S. A. Vashin, E. A. Ruban, A. A. Shaporenkov**

*IPCE RAS, Moscow*

An improved method has been developed for separating hermetic and leaky sealed-off devices based on the methodology for determining the hermeticity of soldered EVDs when measuring the current of electric discharge magnetic pumps at equal time intervals. The gas flows are calculated, at which it is possible to determine the hermeticity of electrovacuum devices with increased gas release into the vacuum volume.

*Keywords: electric discharge magnetic pump, hermeticity, sealed-off electrovacuum device*

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных параметров стабильной работы электровакуумных приборов (ЭВП) сверхвысоких частот (СВЧ) является величина вакуума. В процессе изготовления ЭВП появляются сложности в получении необходимого значения давления остаточных газов после откачки. Причинами увеличения давления остаточных газов отпаянных ЭВП обычно являются натекание по дефектам материалов и газовыделение из их пор [1, 2].

Для определения герметичных приборов с «виртуальными» течами (с повышенным газовыделением из дефектов поверхности), а также натекающих ЭВП было разработано множество методик [3]. Многие методики для отпаянных ЭВП основаны на анализе давления остаточных газов, которое чаще всего измеряют по максимальной величине тока электроразрядного магнитного насоса (НЭМ) [4]. Обычно герметичные ЭВП СВЧ имеют за срок своего хранения ( $\sim 12$  лет) давление не более  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па ( $10^{-5}$  мм рт. ст.). Однако для определения герметичных приборов чаще всего используют способ, основанный на измерении тока НЭМ в ЭВП при увеличении интервалов времени между измерениями максимального тока насоса. В натекающих приборах происходит возрастание максимального тока при включении НЭМ с увеличе-

нием времени выдержки прибора, а в герметичных ЭВП ток с увеличением интервала времени падает или стремится к предельному значению [5]. Недостаток применяемой методики связан с длительным временем исследования приборов, что составляет более 24 ч между включениями НЭМ.

Для снижения времени исследования ЭВП был разработан способ определения натекающих приборов по максимальной величине тока НЭМ при включении насоса через равные интервалы времени (от 5 до 120 мин). Для снижения времени определения герметичности ЭВП появилась необходимость дополнительной их проверки. Для этого был разработан метод исследования герметичных и натекающих ЭВП с использованием источника постоянного напряжения с точностью измерения тока НЭМ до 1 нА. Методика основана на включении НЭМ через равные интервалы времени (от 5 до 120 мин) и регистрации изменения тока работающего насоса. Однако для ЭВП, имеющих значительное газовыделение во внутривакуумный объем прибора, такие методики малоэффективны из-за длительного периода на диагностику приборов (свыше 7 сут). Для решения указанной проблемы была разработана методика с дополнительными обезгаживаниями ЭВП, которая сокращала время исследования приборов до 72 ч [3]. В настоящее время остается нерешенным вопрос, связанный с безошибочным разделением герметичных и натекающих ЭВП при использовании методики с циклическими измерениями максимальных значений тока НЭМ, занимающей менее 8 ч.

Цель работы – разработать улучшенную методику определения герметичности отпаянных ЭВП со встроенными НЭМ при циклической регистрации токов насоса через равные интервалы времени.

## 2. УЛУЧШЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОТПАЯННЫХ ЭВП СВЧ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ НЭМ ЧЕРЕЗ РАВНЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ

Объяснение физических процессов в улучшенной методике заключается в том, что истощение количества десорбированных газов из дефектов материалов уменьшается значительней при включенном НЭМ за определенный промежуток времени. В процессе откачки НЭМ поток газа равен [6]:

$$Q = PS_{\text{НЭМ}} = V \frac{\partial P}{\partial t} = kT \frac{\partial N}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $P$  – давление в ЭВП, Па;  $S_{\text{НЭМ}}$  – скорость откачки НЭМ, л/с;  $V$  – откачиваемый объем, м<sup>3</sup>;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – абсолютная температура, К;  $t$  – время, с.

Отсюда количество частиц газа будет пропорционально току НЭМ, а величина откачиваемого газа за промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$  равна:

$$N = \frac{S_{\text{НЭМ}}}{kT} \int_{t_1}^{t_2} P dt = \frac{S_{\text{НЭМ}}}{kT} \int_{t_1}^{t_2} I \cdot h \cdot 10^{-6} dt, \quad (2)$$

где  $P$  – давление, Па;  $h$  – коэффициент пропорциональности между током НЭМ и давлением;  $I$  – ток НЭМ, мкА.

Из уравнения (2) видно, что при уменьшении тока НЭМ происходит снижение количества частиц газа в вакуумном объеме прибора.

Минимальное время работы НЭМ в улучшенной методике между циклами при его включении

выбиралось от 60 мин. Так как исследование приборов проводилось в течение рабочего дня в условиях их серийного выпуска, то максимальное значение времени работы насоса не превышало 120 мин. Время выдержки прибора без включения НЭМ составляло от 5 до 120 мин. Согласно уравнению (2), увеличение интервала времени выдержки НЭМ без включения с 5 до 120 мин существенно увеличивает точность исследований.

Сущность улучшенной методики заключается в последовательности выполнения следующих действий:

- 1) откачка прибора перед первым замером максимального броска тока НЭМ в течение 30 мин;
- 2) выдержка ЭВП в течение от 5 до 120 мин (интервал времени фиксирован при измерениях второго шага методики) без включения НЭМ;
- 3) измерение максимальной величины тока НЭМ и откачка прибора от 30 до 120 мин (интервал времени фиксирован при измерениях третьего шага методики);
- 4) повтор операций пп. 2-3 не менее двух раз;
- 5) анализ результатов измерений максимальных значений тока НЭМ.

Проверка разработанной методики проводилась на герметичных ЭВП с повышенным содержанием газов во внутривакуумном объеме и натекающих приборах. Временные интервалы второго и третьего шагов методики для исследования натекающего прибора выбирались равными 30 и 60 мин.

На основе анализа данных натекающего прибора по улучшенной методике получены результаты (рис. 1), из которых видно, что в натекающих приборах измеренные максимальные значения токов НЭМ практически не изменились.

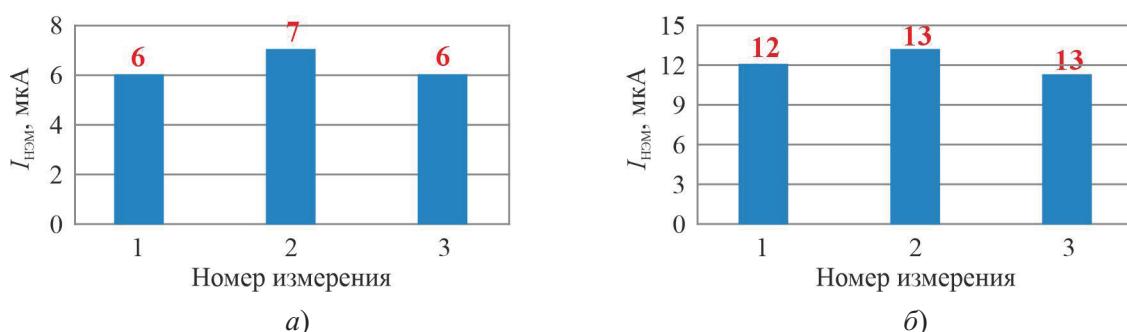


Рис. 1. Максимальные токи с циклическим включением НЭМ в натекающем ЭВП с использованием улучшенной методики:

а – непрерывная работа НЭМ – 30 мин, выключенный насос – 30 мин; б – непрерывная работа НЭМ – 60 мин, выключенный насос – 60 мин

На основе многочисленных исследований герметичных ЭВП с повышенным содержанием газов в вакуумном объеме, согласно улучшенной методике, получены результаты (рис. 2), из анализа которых видно, что в ЭВП с высоким содержанием газов во внутривакуумном объеме максимальные значения токов НЭМ снижались при последующих измерениях. При использовании обычной методики с равными интервалами времени уменьшение тока НЭМ составляло не более 1 мкА. При исследовании того же герметичного прибора с применением улучшенной методики уменьшение тока НЭМ составило 2-3 мкА (рис. 2, а). В случае рассмотрения другого герметичного прибора снижение тока по улучшенной методике составило 30...16 мкА (рис. 2, б), а с применением обычной методики – 10...5 мкА.

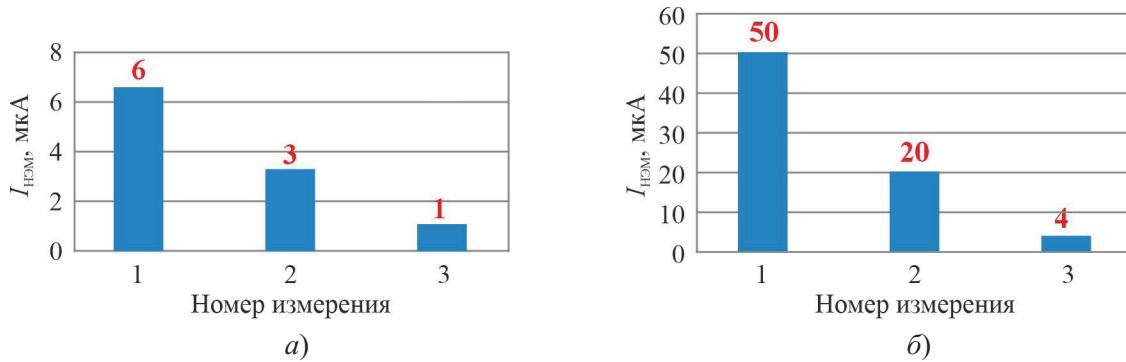


Рис. 2. Измерение максимального тока с циклическим включением НЭМ

в герметичном ЭВП с использованием улучшенной методики:

*a* – интервал времени непрерывной работы НЭМ – 30 мин и интервал времени выключения насоса – 30 мин; *б* – интервал времени непрерывной работы НЭМ – 60 мин и интервал времени между включением насоса – 60 мин

Разработанная методика более точно различает натекающие приборы и приборы с повышенным содержанием газов за счет дополнительной откачки НЭМ выделяющихся газов во время проведения исследований с равными интервалами времени при включениях насоса.

В ходе многочисленных исследований ЭВП удалось установить, что для успешного определения герметичных приборов необходимо, чтобы при первом измерении значение тока было не ниже 5 мкА. Для измерения давления остаточных газов в ЭВП использовались миниатюрные НЭМ оптимизированной конструкции, имеющие скорость откачки 0,2 и 1 л/с. Согласно формуле (1), с учетом скорости откачки НЭМ можно вычислить величины потоков в ЭВП среднего и высокого уровня мощности для минимального временного интервала выдержки (5 мин, согласно п. 2 улучшенной методики) при скорости откачки 0,2 л/с. Для этого значения скорости откачки газовый поток составил величину не менее  $4,4 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с, а при максимальном временном интервале (120 мин, согласно п.2 улучшенной методики) – не менее  $1,8 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>·Па/с. Аналогично для скорости откачки НЭМ 1 л/с газовый поток в разработанной методике составил при минимальном значении временного интервала не менее  $1 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>·Па/с, а при максимальном значении – не менее  $3,5 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>·Па/с.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана улучшенная методика определения герметичности ЭВП, основанная на дополнительной откачке газов с помощью НЭМ при исследовании ЭВП равными интервалами времени.

Выявлены критерии применения улучшенной методики определения герметичности ЭВП с учетом необходимого газового потока внутри прибора:

- для скорости откачки 0,2 л/с при минимальном интервале 5 мин – не менее  $4,4 \cdot 10^{-11}$  м<sup>3</sup>·Па/с, при максимальном интервале 120 мин – не менее  $1,8 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>·Па/с;
- для скорости откачки 1 л/с при минимальном интервале 5 мин – не менее  $1 \cdot 10^{-10}$  м<sup>3</sup>·Па/с, при максимальном интервале 120 мин – не менее  $3,5 \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>·Па/с.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Черепнин, Н. В.** Вакуумные свойства материалов для электронных приборов / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1966. – 343 с.
2. **Черепнин, Н. В.** Сорбционные явления в вакуумной технике / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1973. – 384 с.
3. **Ващин, С. А.** Методика определения герметичных отпаянных ЭВП СВЧ / С. А. Ващин, В. В. Душик, А. А. Шапоренков // Труды 31-й научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии». – 2024. – С. 179 – 182.
4. **Розанов, Л. Н.** Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. – М.: Высшая школа, 1982. – 391 с.
5. **Корепин, Г. Ф.** Простой способ отбраковки натекающих и «газных» ЭВП / Г. Ф. Корепин // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 1999. – Вып. 2. – С. 42, 43.
6. **Новоселец, В. И.** О вакуумных пробоях в многолучевых мощных пролетных клистронах на высшем и основном виде колебаний / В. И. Новоселец // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2008. – Вып. 2. – С. 53 – 61.

*Статья поступила 12 марта 2025 г.*

---

## ===== НОВЫЕ КНИГИ =====

**Алмазы в микроэлектронике: от исследований к разработкам / А.А. Алтухов; под ред. П.П. Мальцева. – М.: Техносфера, 2025. – 306 с.**

В монографии автором изложены оригинальные методология и методы исследований алмазов, в частности для исследований использовались современные методы и оборудование, в т. ч. системы электрофизического контроля полупроводниковых структур, контактные и бесконтактные системы профилометрии, установки спектрофотометрического анализа в ИК, видимом и УФ диапазонах; методы и оборудование люминесцентного и поляризационного контроля, электронная микроскопия, методы спектральной и топографической катодолюминесценции, методы электронно-ионного элементного и структурного анализа, рентгено-структурные и рентгено-спектральные методы.

Описана последовательность операций при изготовлении приборов на алмазах. Прежде всего для изготовления образцов устройств и их элементов использовались методы и оборудование вакуумного нанесения проводящих, полупроводниковых и вспомогательных слоев, включая магнетронное, электронно-лучевое, молекулярно-лучевое осаждение, CVD- и HPHT-технологии синтеза алмаза, технология ионной имплантации, лазерные, ионно-плазменные и ионно-лучевые технологии обработки и травления.

УДК 621.525

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО  
И КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ГАЗОВ, СОРБИРОВАННЫХ  
ВНУТРИВАКУУМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ОТПЯННЫХ ЭВП**

С. А. Вашин, Е. А. Рубан, А. А. Шапоренков

*ИФХЭ РАН, г. Москва*

Приведен расчет количества сорбированных газов поверхностью катодно-подогревательного узла при его включении. Представлены результаты исследований качественного состава сорбированных газов поверхностью катодно-подогревательного узла мощного многолучевого клистрона. Разработана методика, позволяющая провести оценку и исследование количественного состава сорбированных газов с поверхности электровакуумного прибора при помощи работающего магнитного электродизрядного насоса в процессе включения катодно-подогревательного узла клистрона.

*КС: отпаянный электровакуумный прибор, сорбция и десорбция газов, электродизрядный магнитный насос, многолучевой клистрон*

**A METHOD FOR DETERMINING THE QUANTITATIVE  
AND QUALITATIVE COMPOSITION OF GASSES  
SORBED BY THE INTRAVACUUM SURFACE OF SEALED-OFF EVDS**

S. A. Vashin, E. A. Ruban, A. A. Shaporenkov

*IPCE RAS, Moscow*

The calculation of the amount of gases sorbed by the surface of the cathode heating unit is shown when its switching on is activated. The results of studying the qualitative composition of gases absorbed by the surface of the cathode heating unit of a powerful multibeam klystron are presented. A technique has been developed that makes it possible to evaluate and study the quantitative composition of gasses sorbed from the surface of an electrovacuum device using a working magnetic electric discharge pump in the process of activating the klystron cathode heating unit.

*Keywords: sealed-off electrovacuum device, absorption and desorption of gasses, electrodischarge magnetic pump, multiple-beam klystron*

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Встроенные в электровакуумных приборах (ЭВП) электродизрядные магнитные насосы (НЭМ) нашли широкое применение для обеспечения высокого вакуума в отпаянных приборах сверхвысоких частот (СВЧ). Помимо основного назначения в откачке остаточных газов НЭМ позволяет измерять давление в отпаянном приборе, что дает возможность решения множества технологических задач [1–3], среди которых построение оптимального технологического процесса откачки и обезгаживания ЭВП, построение технологического процесса высоковольтной тренировки отпаянных ЭВП, течеискание откачиваемого и отпаянного прибора, оценка достаточности обезгаживания отдельных узлов ЭВП, корректировка технологического режима откачки, оценка парциального состава газовой смеси и качественных показателей вакуумной системы откачного поста [4].

В настоящее время существует нерешенная задача по расширению области применения НЭМ с целью определения количественного и качественного состава газов, сорбированных внутривакуумными поверхностями отпаянных ЭВП. Изучение количественного и качественного содержания остаточных газов ЭВП является одной из наиболее важных задач вакуумной СВЧ-электроники, так как изменение данного параметра в отпаянном приборе может повлиять на электрическую прочность вакуумных промежутков [5, 6].

## 2. РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ГАЗОВ В ОТПАЯННОМ ЭВП

В соответствии с основными положениями физики вакуума, молекулы из газовой фазы сорбируются поверхностями твердого тела. Время сорбции молекул из газовой фазы при нормальных условиях обычно составляет менее 1 с, для паров воды и масел  $\sim 100$  с [7]. Исследования, связанные с процессами переноса и сорбции газов в вакуумном объеме отпаянных ЭВП в нерабочем состоянии, вызывают особый интерес в связи с физико-химическими процессами, протекающими в приборе. Увеличение количества молекул в газовой фазе вакуумного объема ЭВП (а значит, ухудшение вакуума) влияет на количество сорбированных компонентов газовой фазы поверхностью электродов, ускоряя процессы массопереноса [8, 9]. Эти процессы требуют более подробного изучения, так как они могут влиять на электрическую прочность после выдержки ЭВП в выключенном состоянии.

Во время работы катода ЭВП незначительная часть газа поглощается за счет активных веществ, входящих в состав покрытия катода [10]. В приборах с давлением остаточных газов ниже  $10^{-6}$  Па, а также в ЭВП средних и малых размеров наблюдать данное явление сложно или невозможно. Напротив, в мощных многолучевых клистронах (МЛК) с повышенным содержанием газов возможность поглощения их катодным узлом может быть исследована.

Для детектирования количества газа, поглощённого катодным узлом мощного клистра со встроенным НЭМ, была разработана методика, состоящая из следующих последовательных операций:

- включение НЭМ клистра;
- включение накального узла катода прибора с выдержкой 150...300 с;
- получение зависимости максимального тока НЭМ от времени;
- выключение напряжения накального узла катода и НЭМ при достижении тока менее 1 мкА (что соответствует давлению остаточных газов в приборе ниже  $10^{-6}$  Па).

При проведении экспериментальных исследований по разработанной методике рост тока достигал своих максимальных значений (от 3 до 5 раз) и затем плавно снижался. Полученные результаты изменения тока НЭМ позволили произвести расчет количества остаточных газов в отпаянном ЭВП. В процессе откачки НЭМ поток газа вычислялся по формуле [10]:

$$Q = PS_{\text{НЭМ}} = V \frac{\partial P}{\partial t} = kT \frac{\partial N}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $P$  – давление в ЭВП, Па;  $S_{\text{НЭМ}}$  – скорость откачки НЭМ, л/с;  $V$  – откачиваемый объем, м<sup>3</sup>;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – абсолютная температура, К.

Количество частиц газа, откачиваемого НЭМ за промежуток времени от  $t_1$  до  $t_2$ , равно:

$$N = \frac{S_{\text{НЭМ}}}{kT} \int_{t1}^{t2} P \partial t. \quad (2)$$

Давление в ЭВП определялось формулой:

$$P = I \cdot h \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

где  $h$  – коэффициент пропорциональности между током НЭМ и давлением (для НЭМ с  $S_{\text{НЭМ}} = 1 \text{ л/с}$   $h = 5,32 \text{ Па/мкА}$ ; для НЭМ с  $S_{\text{НЭМ}} = 0,2 \text{ л/с}$   $h = 26,6 \text{ Па/мкА}$ );  $I$  – ток НЭМ, мкА. Коэффициенты пропорциональности получены вакуумными датчиками в процессе откачки ЭВП при измерении давления остаточных газов в приборе.

С учетом линейной зависимости между давлением и током НЭМ при постоянной скорости откачки:

$$N = \frac{hS_{\text{НЭМ}}}{kT} \int_{t1}^{t2} I \partial t. \quad (4)$$

Уравнение (4) может быть использовано для расчетов остаточных газов в отпаянных ЭВП в процессе проведения технологических операций: высоковольтной тренировки, поиска течей, динамических испытаниях, проверки герметичности и др.

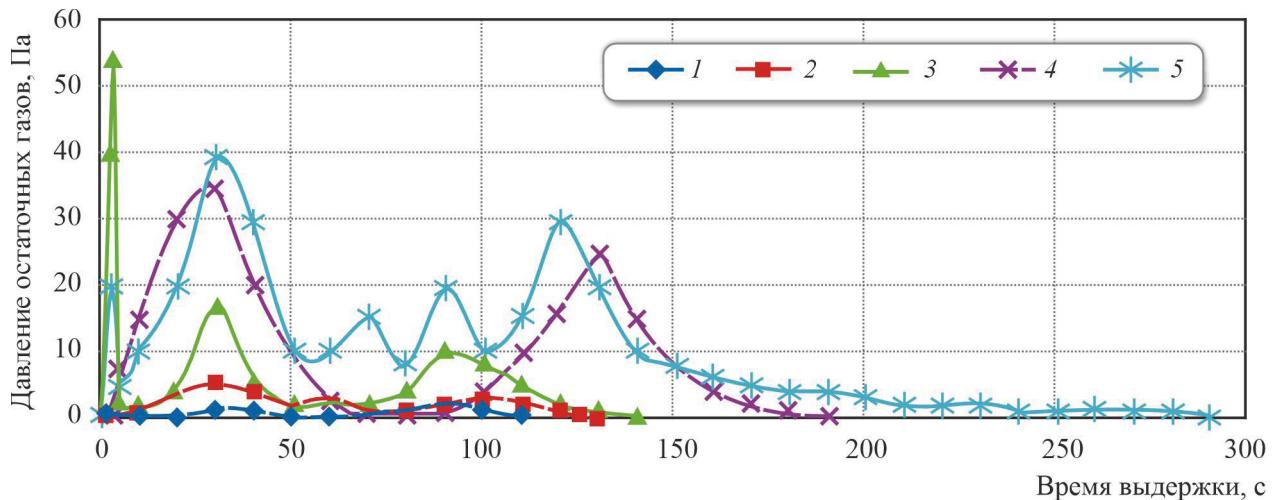
### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБИРОВАННЫХ ГАЗОВ В КАТОДНО-ПОДОГРЕВАТЕЛЬНЫХ УЗЛАХ МОЩНЫХ МЛК

Исследование основывалось на сорбционных свойствах катода с развитой поверхностью при различных значениях давления остаточных газов в ЭВП. Необходимый уровень давления остаточных газов в ЭВП достигался в процессе газовыделения во время высоковольтной тренировки при выключенном НЭМ, а снижение уровня давления осуществлялось за счет включения НЭМ. Сам процесс удаления газовой фазы в катоде заключался в выдержке катода при подаче напряжения накала при работающем НЭМ до достижения уровня давления остаточных газов в ЭВП не выше  $10^{-7}$  Па. После включения катодно-подогревательного узла (КПУ) фиксировалось изменение давления в приборе от времени.

Исследование проводилось на отпаянных мощных МЛК непосредственно после их откачки. После удаления газовой фазы в КПУ с целью повышения давления остаточных газов проводилась «холодная» высоковольтная тренировка двух промежутков одновременно. Она осуществлялась подачей на анод постоянного положительного потенциала и на сетку постоянного отрицательного потенциала, а катод имел противоположный потенциал относительно сетки и катода при выключенном НЭМ. После выдержки в выключенном состоянии МЛК (интервал времени выдержки  $\sim 300$  с) остаточный газ откачивался с помощью НЭМ до давления в МЛК менее  $10^{-7}$  Па. Затем включался КПУ и с помощью НЭМ фиксировалось изменение давления остаточных газов (рисунок).

Эксперименты проводились на разных МЛК одного вида при разных значениях давления остаточных газов. Анализ результатов показал, что при увеличении давления остаточных газов свыше  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Па в процессе высоковольтной тренировки в приборе количество адсорбированного газа поверхностью прибора увеличилось в  $\sim 2 \dots 3$  раза (согласно формуле (2)), а время обезгаживания катода увеличилось с 190 до 300 с. Проведенная серия экспериментов показала, что при возрастании давления остаточных газов в ЭВП происходило увеличение количества

сорбированных газов поверхностью КПУ. Также обнаружено, что максимальные значения токов НЭМ регистрировались примерно в одно и то же время в процессе включения КПУ. Для точного расчета количества сорбированных газов необходимо проанализировать его качественный состав, определив его в максимальных значениях тока в процессе удаления газовой фазы в КПУ.



Изменение давления остаточных газов в МЛК в процессе удаления газовой фазы в КПУ после увеличения давления остаточных газов в приборе:

1 –  $10^{-5}$  Па; 2 –  $8 \cdot 10^{-5}$  Па; 3 –  $4,2 \cdot 10^{-4}$  Па; 4 –  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Па; 5 –  $5,3 \cdot 10^{-3}$  Па

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА СОРБИРОВАННЫХ ГАЗОВ В ОТПАЯННОМ ЭВП С ПОМОЩЬЮ НЭМ

В процессе удаления газовой фазы в МЛК на откачном посту ( $T \sim 500^\circ\text{C}$ ) регистрируются газы CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и большое число продуктов с большим молекулярным весом в процессе обработки катода [11]. Поскольку вопрос состава перенесенных газов на поверхности электродов МЛК не был достаточно изучен, было проведено исследование масс-спектров остаточных газов в МЛК на откачном посту Pfeiffer со встроенным десорбционным газовым анализатором Prisma Plus. Построение диаграмм масс-спектров производилось на персональном компьютере откачного поста с помощью программного комплекса Quadera. МЛК прошел полный цикл откачки, в конце которого было проведено удаление газовой фазы с катода. После этого МЛК был оставлен на откачном посту на 24 ч с включенными средствами откачки при давлении остаточных газов не выше  $5 \cdot 10^{-6}$  Па. Затем за счет подачи рывком максимального напряжения для включения накальной цепи катода ЭВП в течение 130 с были произведены исследования масс-спектра остаточных газов. Данные о составе остаточных газов приведены в таблице.

##### Состав остаточных газов в процессе удаления газовой фазы в КПУ

Время откачки катода, с	Состав газовой фазы	Номера максимумов тока НЭМ во время включения КПУ
10	O <sub>2</sub>	1-й
15	NO <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	–
25	CO <sub>2</sub>	2-й

Окончание таблицы

Время откачки катода, с	Состав газовой фазы	Номера максимумов тока НЭМ во время включения КПУ
40	He; CO / CO <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> /NO <sub>2</sub> ; C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	—
45	—	—
60	H <sub>2</sub> ; C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	—
70	CO	3-й
80	CO; CO <sub>2</sub>	—
90	CO; CO <sub>2</sub>	4-й
100	N <sub>2</sub> O; C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	—
120	H <sub>2</sub> ; C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	5-й
130	Ar	5-й

Проведенный цикл экспериментальных исследований позволил установить, что участвующими в процессе переноса из вакуумного объема прибора на обезгаженную поверхность КПУ являлись следующие виды газов: O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, Ar. Каждому максимальному значению тока НЭМ в процессе удаления газовой фазы в КПУ соответствовал определенный состав газовой смеси (см. таблицу). В дальнейшем возможно использовать НЭМ и КПУ в качестве анализатора масс-спектрометров сорбированных газов поверхностью ЭВП. Кроме того, процессы массопереноса сорбированных частиц с одних поверхностей на другие и сорбции газов поверхностями значительно ускорялись при увеличении давления остаточных газов в МЛК выше 1,6·10<sup>-3</sup> Па.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований установлено, что компоненты газовой фазы O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, Ar, сорбированные внутривакуумной поверхностью ЭВП, возможно детектировать и анализировать с помощью НЭМ и включенным КПУ. Разделение газов в процессе включения КПУ позволило производить расчет их количества, так как каждому максимальному значению тока НЭМ в процессе удаления газовой фазы в КПУ соответствует определенный качественный состав.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Вашин, С. А.** О запаздывании зажигания разряда миниатюрного электроразрядного насоса / С. А. Вашин, Г. Ф. Корепин, Н. Н. Климова // XVII Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и сверхвысоких частот. – Саратов, 2018. – С. 69 – 70.
2. **Саксаганский, Г. Л.** Электрофизические вакуумные насосы / Г. Л. Саксаганский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
3. **Васильев, Г. Л.** Магниторазрядные насосы / Г. Л. Васильев. – М.: Энергия, 1970. – 112 с.

4. Применение встроенного магнитного электроразрядного насоса в процессе откачки ЭВП / С. А. Ващин, Г. Ф. Корепин, Н. Н. Климова, Д. Н. Петрашёва // Материалы 25-й научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». – 2018. – С. 87 – 92.
5. **Татаринова, Н. В.** Влияние процессов в порах поверхностей электрородов на вакуумную электроизоляцию: дисс. доктора физ.-мат. наук / Татаринова Нина Владимировна. – М.: МИФИ. – 1998. – 303 с.
6. **Корепин, Г. Ф.** Стоки и истоки поверхностных газов отпаянных ЭВП / Г. Ф. Корепин, А. Н. Юнаков // Вакуумная техника и технология. – Тезисы докладов научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология-2010». Санкт-Петербург. – 2010. – Т. 20, № 2. – С. 56.
7. **Розанов, Л. Н.** Вакуумная техника / Л. Н. Розанов. – М.: Высшая школа, 1982. – 391 с.
8. **Черепнин, Н. В.** Сорбционные явления в вакуумной технике. – М.: Советское радио, 1973. – 324 с.
9. **Новоселец, В. И.** О вакуумных пробоях в многолучевых мощных пролетных клистронах на высшем и основном виде колебаний / В. И. Новоселец // Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника. – 2008. – Вып. 2. – С. 53 – 61.
10. **Черепнин Н. В.** Вакуумные свойства материалов для электронных приборов / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1966. – 350 с.
11. **Черепнин, Н. В.** Основы очистки, обезгаживания и откачки в вакуумной технике / Н. В. Черепнин. – М.: Советское радио, 1967. – 408 с.

*Статья поступила 12 марта 2025 г.*

---

### ☰ НОВЫЕ КНИГИ ☰

**Лазерная технология в производстве изделий электронной техники СВЧ-диапазона** / В. А. Иовдальский, Н. А. Лябин. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 160 с.

Показано применение лазерной технологии в производстве твердотельных электронных приборов на основе монолитных, гибридных интегральных схем и электровакуумных приборов СВЧ-диапазона. Для студентов очной, очно-заочной и заочной форм образования квалификации «бакалавр», «магистр», обучающихся по направлениям 11.03.03, 11.04.03 «Конструирование и технология электронных средств» и 11.03.04, 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»; аспирантов и повышения квалификации инженерно-технических работников радиотехнических специальностей.

---

## ===== НОВЫЕ КНИГИ =====

**Технологии создания САПР для разработки СВЧ-устройств и антенн: монография / Д.В. Лучин, А.А. Минаев, А.П. Трофимов, Д.В. Филиппов, В.В. Юдин; под ред. В.В. Юдина.** – Самара : ООО «Слово», 2025. – 268 с.

В основу монографии положен многолетний опыт разработки прикладного программного обеспечения электродинамического моделирования для решения различных задач и видение того, на основе каких принципов и подходов должны строиться современные САЕ-системы. В книге сделан обзор и анализ мирового опыта по созданию цифровых платформ моделирования электродинамических объектов, уделено внимание вопросам построения трехмерных геометрических моделей и средствам их программной реализации, рассмотрены вопросы построения параметрических электродинамических моделей и др.

**Аддитивные технологии / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров; под ред. А.Г. Григорьянца.** – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – 339 с. : ил.

В монографии рассмотрены основные аспекты аддитивных технологий, применяемых в машиностроении и других отраслях промышленности. Отражены исследования выращивания деталей с применением различных источников нагрева, таких, как лазер, плазма, электрическая дуга и электронный луч.

Представлены материалы по трем основным процессам – стереолитографии, селективному лазерному плавлению и прямому лазерному осаждению материала. Рассмотрены физические основы и особенности технологии этих процессов при изготовлении деталей из полимеров, металлических порошков и проволок различного состава. Исследованы свойства и структуры материалов, созданных аддитивными методами. Даны сведения об основных элементах и промышленных образцах установок, их характеристики и возможности использования для изготовления машиностроительных деталей. Приведены конкретные примеры и области применения той или иной аддитивной технологии.

## ☰ НОВЫЕ КНИГИ ☰

**Введение в квантовые информационные технологии / Ю.И. Богданов, Н.А. Богданова, В.Ф. Лукичёв.** – М.: Техносфера, 2025. – 468 с.

Книга посвящена квантовым информационным технологиям, представляющим собой новую, быстро развивающуюся область науки и техники, основанную на использовании квантовых систем для реализации принципиально новых методов передачи сообщений и вычислений (квантовые каналы связи, квантовая криптография, квантовый компьютер). Книга основана на курсах, читаемых авторами в МГУ им. М. В. Ломоносова, НИУ МИЭТ, МФТИ и НИЯУ МИФИ. Книга рассчитана на студентов, магистрантов и аспирантов, получающих образование в области физико-математических наук и высоких технологий. Настоящее издание будет также интересно широкому кругу научных работников и инженеров различных специальностей, активно интересующихся развитием передовых научных направлений и технологий.

**Стратегия научно-технического развития Дивизиона «Связь» до 2035 года:** тезисы докладов научно-практической конференции (г. Воронеж, 22 мая 2025 г.) / АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж : АО «Концерн «Созвездие», 2025. – 113 с.

Научно-техническое развитие представляет собой непрерывный процесс исследований и разработок по созданию научно-технических заделов, материалов, технологий, продукции и услуг в целях интенсификации производства и повышения его эффективности. Состоявшаяся научно-практическая конференция «Стратегия научно-технического развития Дивизиона «Связь» до 2035 года» способствовала определению и актуализации приоритетных направлений и целей исследований и разработок, этапов их проведения и возможных механизмов реализации, оценке ожидаемых результатов, т.е. всех составляющих элементов стратегии процесса научно-технического развития Дивизиона. Принятые по результатам конференции решения позволяют повысить эффективность исследований и разработок, обеспечивающих научно-техническую и технологическую конкурентоспособность технологий, радиоэлектронной продукции и услуг, ускорить создание и освоение в производстве инновационной высокотехнологичной продукции в отрасли.

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

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

2. Статья должна содержать:

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

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

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

4. Форматирование статьи: одинарный межстрочный интервал, выравнивание текста по ширине, абзацный отступ – 0,7 см.

При наборе текста используются только стандартные True Type шрифты – Times New Roman и Symbol. Размер шрифта основного текста – 12 пунктов, примечаний и ссылок – 10 пунктов. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210 × 297 мм).

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

5. Иллюстрации к статье представляются в виде отдельных файлов.

Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

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

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

На весь иллюстративный материал должны быть ссылки в тексте.

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

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

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

9. Библиография составляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 и дается общим списком в конце статьи.

10. Полученная статья направляется редакцией на рецензирование ведущим специалистам в данной научно-технической области.

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

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

13. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

## ПРОВОДИТСЯ ПОДПИСКА

на научно-технический сборник «Электронная техника», серия 1, «СВЧ-техника» на 2026 г. (4 вып. в год). Цена подписки – 9600 руб., цена 1 номера – 2400 руб., включая НДС (20 %).

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

Для оформления подписки необходимо оформить заказ, произвести оплату по указанным ниже банковским реквизитам: АО «НПП «Исток» им. Шокина», ОГРН 1135050007400, ИНН / КПП 5050108496 / 774550001, р/с 40702810700250010343, Банк АО АКБ «НОВИКОМБАНК», БИК 044525162, к/с 30101810245250000162 – и выслать по адресу: 141190, г. Фрязино, Московская обл., ул. Вокзальная, 2а, помещение 1, ком. 65. 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 2026 г. и направлять по адресу:

Куда \_\_\_\_\_  
(почтовый индекс, адрес)

Кому \_\_\_\_\_  
(название организации)

# ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА

СЕРИЯ 1  
«СВЧ-ТЕХНИКА»  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

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

---

Дата выхода в свет: 01.09.2025 г.

Отпечатано: Печатная компания ООО «ТипоГрафф»,  
111397, г. Москва, вн. тер. г. муницип. округ Перово,  
ул. Новогиреевская, д. 26, с. 3.

Усл. п. л. 15,5

Уч.-изд. л. 16,0

Индекс 36292

Формат 60×88<sup>1/8</sup>

Тираж 500

13 статей

---

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

**Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника, 2025, вып.3(567), с. 126**

**Подписной индекс 36292**

