




РАЗРАБОТАНО  
АО «НИИЭТ»

# СТЭК-В

СИСТЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ – ВОРОНЕЖ

**ПРЕВЬЮ**

2024 Г.

ОБЛОЖКА СОЗДАНА С ПОМОЩЬЮ 



**14** Применение вакуумной пайки припойных шариков на выводные площадки металлокерамических корпусов матричного типа при производстве полупроводниковых изделий ответственного применения

**34** Применение нечетких методов к проектированию методов компьютерного зрения

**38** Система поддержки принятия решений идентификации и обработки изображений

**46** Обеспечение пробивных напряжений на периферии СВЧ LDMOS-транзисторной структуры



# 1

ВЫХОДИТ  
НОМЕР ЖУРНАЛА  
СТЭК-В

СИСТЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ – ВОРОНЕЖ

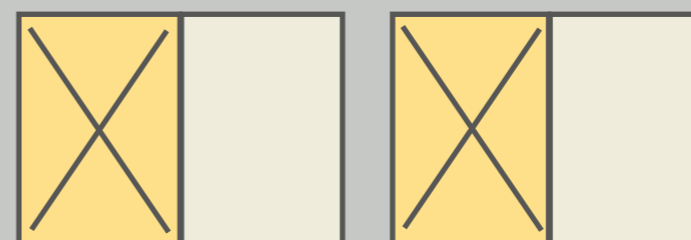
## По вопросам подписки и рекламы:

+7(499) 404-29-11,  
knyazeva@niiet.ru  
Стоимость годовой подписки - 3000 руб. с НДС  
(3 номера + превью)

\* Дата выхода номера может быть перенесена на 1-3 дня по обстоятельствам, не зависящим от редакции

# РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

## Форматы рекламных модулей



2-я обложка

1/1 полосы



1/2 полосы



3-я обложка



4-я обложка

▲ При перепечатке материалов ссылка на журнал «СТЭК-В» обязательна. Редакция гарантирует проведение независимого рецензирования материалов способом, позволяющим обеспечить честность и объективность высказывания относительно научной ценности предполагаемой к публикации статьи. Редакция оставляет за собой право отклонить материал без проведения независимого рецензирования в случае, если он будет сочтен несоответствующим принятому для журнала уровню практической и теоретической проработанности. Данное решение принимается честно и беспристрастно с учетом редакционной политики журнала.

Модуль	Размер макета, мм	Цена**
1/1 полосы	210 X 297*	31 000 р.
1/2 полосы	180 X 128	21 000 р.
2-я обложка	210 X 297*	36 000 р.
3-я обложка	210 X 297*	31 000 р.
4-я обложка	210 X 297*	42 000 р.

\*Обрезной формат

\*\*с НДС

## Требования к рекламным макетам:

- ▶ Все шрифты должны быть переведены в кривые;
- ▶ Расширение (тип файла) - tif;
- ▶ Цветовая модель CMYK;
- ▶ Для получения «глубокого» черного цвета рекомендуется использовать 4-хкрасочный CMYK: Cyan - 72%, Magenta - 60%, Yellow - 60%, Black - 100%. Такой цвет дает хороший «рояльный» черный и позволяет избежать потерь качества мелкого текста и тонких линий, сделанных вывороткой. Для более теплого оттенка можно использовать комбинацию: Cyan - 40%, Magenta - 50%, Yellow - 40%, Black - 100%;
- ▶ Разрешение для растровых изображений - 300 dpi;
- ▶ К размеру обрезного формата добавить 5 мм с каждой стороны;
- ▶ Все значимые элементы, находящиеся внутри полосы, должны располагаться на расстоянии не менее 5 мм от обрезного формата.

## График выхода номеров:

№1 – 17.06.2024 (научные статьи принимаются до 26.04.2024, рекламные модули принимаются до 17.05.2024);  
№2 – 16.09.2024 (научные статьи принимаются до 02.08.2024, рекламные модули принимаются до 30.08.2024);  
№3 – 16.12.2024 (научные статьи принимаются до 08.11.2024, рекламные модули принимаются до 29.11.2024).



# ИНФОРМАЦИЯ О ЖУРНАЛЕ

Учредителем издания является Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронной техники», главный редактор – П.П. Куцько.

Издание выпускается ежеквартально. Наш журнал – это дискуссионная платформа радиоэлектронной отрасли, позволяющая формировать стратегические цели и механизмы их достижения, поднимать актуальные вопросы и предлагать пути их решения. Механизм журнала, как средства массовой информации, позволит авторам занять проактивную позицию в формировании научно-технических и административных подходов в развитии отрасли.

Журнал освещает основные проблемы технических и физико-математических наук, связанные с разработкой новых систем, технологий в микроэлектронике и повышение эффективности их управления и функционирования с использованием современных методов, систем автоматизированного проектирования, обработки информации, цифровых технологий и искусственного интеллекта.

Издание «СТЭК-В» предназначено для публикации ведущих ученых, разработчиков, преподавателей, аспирантов и студентов ВУЗов.

Редколлегия проводит независимую политику отбора рукописей на основе актуальности, новизны, теоретической и практической значимости, предполагающую обязательное двойное слепое рецензирование всех работ, и является платформой для свободного научного общения.



Для генерации иллюстрации на обложку данного номера были введены следующие слова:






- методы,
- физика,
- световые волны,
- микроэлектроника.

[www.niiet.ru](http://www.niiet.ru)

# ТЕМАТИЧЕСКИЕ РУБРИКИ:

- 20.00.00** Информатика
- 27.00.00** Математика
- 29.00.00** Физика
- 47.00.00** Электроника. Радиотехника
- 50.00.00** Автоматика. Вычислительная техника
- 59.00.00** Приборостроение
- 81.00.00** Общие и комплексные проблемы технических и прикладных наук и отраслей народного хозяйства
- 82.00.00** Организация и управление

# РАЗДЕЛЫ:

-  – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств
-  – Системный анализ, управление, обработка информации, статистика
-  – Управление в организационных системах
-  – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования
-  – Информатика и информационные процессы

Полное наименование издания:

«СТЭК-В» - Системы, технологии, электронные компоненты – Воронеж.

Сокращенное наименование издания «СТЭК-В».

Главный редактор: Куцько П.П.

Учредитель: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронной техники», ОГРН 1123668048789.

Отпечатано в типографии «ООО Леверап»,  
г. Москва ул. Осенняя, д. 23.

Заказ № 24-Z-0343.

Тираж 1 000 экз.

📍 394033, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д.5

☎ +7 (473) 226-20-35,

✉ [niiet@niiet.ru](mailto:niiet@niiet.ru)

**Контактное лицо:**

Зольников Константин Владимирович,

☎ +7 (919) 246-44-87,

✉ [kvzolnikoff@yandex.ru](mailto:kvzolnikoff@yandex.ru)

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР -**

Куцько Павел Павлович - кандидат технических наук, генеральный директор акционерного общества «Научно-исследовательский институт электронной техники», лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.



**Семейкин  
Игорь Валентинович**

Заместитель главного редактора, кандидат технических наук, технический директор акционерного общества «Научно-исследовательский институт электронной техники», лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.



**Зольников  
Константин Владимирович**

Заместитель главного редактора, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер акционерного общества «Научно-исследовательский институт электронной техники», лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.



**Кравченко  
Андрей Сергеевич**

Ответственный секретарь, кандидат технических наук, доцент.

# СЛОВО РЕДАКТОРА

Приветствую вас, уважаемые коллеги!

Сегодня я представляю вам для знакомства и оценки первый выпуск (превью) нашего нового продукта – научного журнала СТЭК-В.

Для чего мы решили создать журнал? Мы посчитали необходимым продолжить развивать дискуссионную площадку, которую мы до этого продвигали в рамках телеграм-чата под названием Союз «Русская электроника». Государству, федеральным органам исполнительной власти необходим доступ к консолидированной позиции электронной отрасли. Все предпочтения промышленности строятся на понимании отраслевых проблем, стремлении обеспечить максимальную эффективность решения стоящих задач, предусмотреть своевременные меры для развития.

Для формирования интересного, небанального содержания каждого номера журнала предполагается привлечение специалистов предприятий группы

компаний «Элемент», других заинтересованных предприятий отрасли, коллективов ведущих ВУЗов страны.

Кроме того, идея создания журнала призвана вовлечь в научную работу не только научных работников и зрелых специалистов, но и учащихся ВУЗов и колледжей, школьников и членов научных кружков. Это позволит решать не только насущные задачи, но и планировать будущее отрасли.

Предполагается вовлечение в научное сообщество журнала и представителей научной элиты дружественных государств.

Мы живем в эпоху перемен, момент развития мира и нашей страны требует от нас нетривиальных действий. Надеюсь, что с помощью этого журнала мы сможем преодолеть трудности, стоящие на пути, и вместе, единым научным сообществом, выработаем эффективные и действенные меры совершенствования и развития электронной и смежных отраслей промышленности.

**Генеральный директор  
АО «НИИЭТ»**

www.niiet.ru

## ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

**Стемповский Александр Леонидович** - академик Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, научный руководитель ФГБУН «Институт проблем проектирования в микроэлектронике» РАН.

**Шахнов Вадим Анатольевич** - член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

**Соловьев Роман Александрович** - член-корреспондент Российской академии наук, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ФГБОУ науки «Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН».

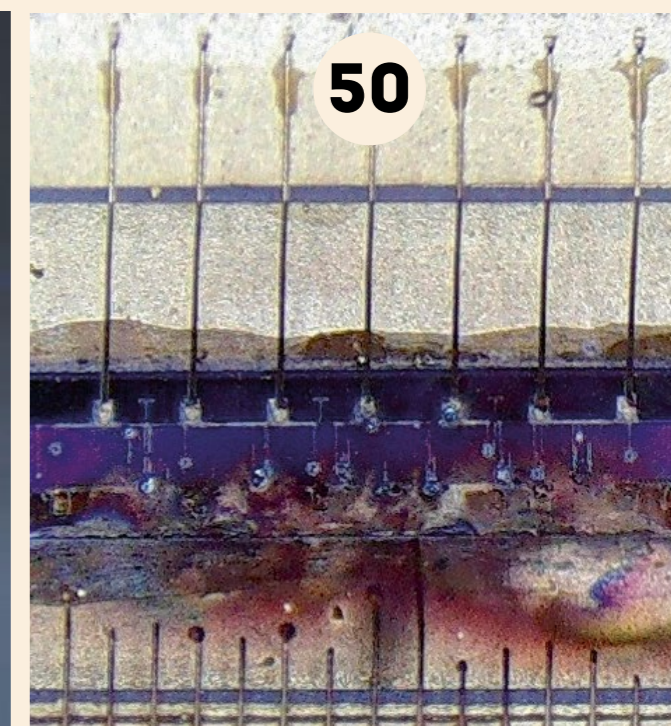
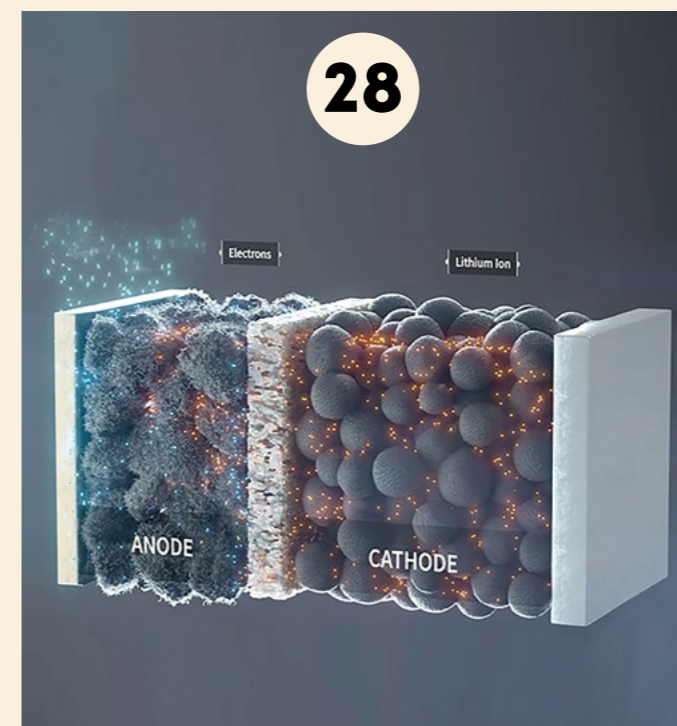
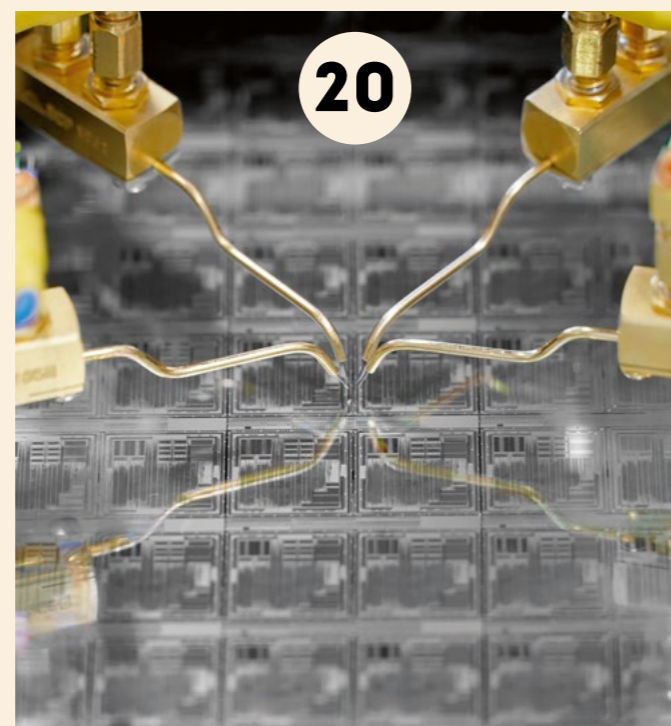
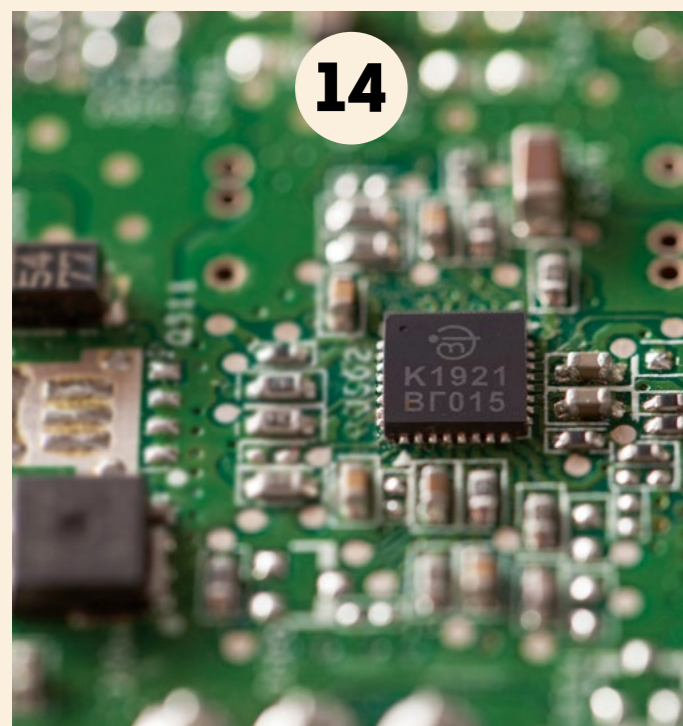
**Шелупанов Александр Александрович** - доктор технических наук, профессор, президент ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

**Телец Виталий Арсеньевич** - доктор технических наук, профессор, руководитель научного центра экстремальной прикладной электроники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ».

**Белоус Анатолий Иванович** - член-корреспондент Национальной академии наук РБ, доктор технических наук, профессор, лауреат государственной премии РБ, заслуженный изобретатель РБ, заместитель генерального директора холдинга «ИНТЕГРАЛ» по научной работе.

**Чижик Сергей Антонович** - академик, первый заместитель председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор.

**Зеневич Андрей Олегович** - ректор Белорусской государственной академии связи, доктор технических наук, профессор.



# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Особенности технологии формирования слоев фоторезиста AZ MIR 701</b> И.В. Коняев, Т.С. Лавренова, Ю.В. Куликова, Г.С. Лысикова, И.И. Бородкин .....	10
<b>Применение вакуумной пайки припойных шариков на выводные площадки металлокерамических корпусов матричного типа при производстве полупроводниковых изделий ответственного применения</b> В.В. Побединский, А.В. Рябов, Е.В. Лаврентьев.....	14
<b>Разработка интеграционных тестов для проверки правильности работы контроллера flash-памяти микросхемы K1921ВГ015</b> Ю.А. Шкондин, И.П. Потапов, А.С. Ягодкин.....	20
<b>Пьезорезистивные сенсоры давления и варианты их конструктивного исполнения как перспективное направление импортозамещения</b> Д.Н. Нестеров, Н.С. Буйлов, П.Л. Пармон .....	24
<b>Исследование зависимости фазообразования и электрофизических свойств ионно-лучевых плёнок Cu-Si от относительного содержания меди</b> Е.С. Керсновский, И.В. Польшин, К.А. Барков, К.А. Барков, Н.С. Буйлов.....	28
<b>Применение нечетких методов к проектированию методов компьютерного зрения</b> Ю.Ю. Громов, С.В. Артемова, П.И. Карасев, Almali Ahmed Adnan Lateef.....	34

<b>Система поддержки принятия решений идентификации и обработки изображений</b> Ю.Ю. Громов, С.В. Артемова, П.И. Карасев, Shamsuldaeen Haidar Abdulwahhab H.....	38
<b>Введение в эксплуатацию кластера высокой доступности</b> А.С. Дибров, Д.В. Котов.....	42
<b>Обеспечение пробивных напряжений на периферии СВЧ LDMOS-транзисторной структуры</b> Р.П. Алексеев, П.Л. Куршев, А.Н. Цоцорин, И.В. Семейкин .....	46
<b>Основные типы дефектов мощных транзисторов, встречающихся на производстве при анализе зарекламированных изделий</b> В.А. Буслов, П.Л. Пармон, Т.В. Пашнева.....	50
<b>Новый подход к сегментации медицинских изображений легких с использованием нечеткого вероятностного метода С-Средних</b> П.И. Карасев, К.В. Стародубов, А.В. Рязанцев, И.А. Метелев.....	56
<b>Усиление контраста для изображений со сжатием на основе нечеткого метода</b> Ю.Ю. Громов, П.Ю. Пушкин, П.И. Карасев, Al-Ameedee Mustafa Abdulkadhim Dahir .....	62

# ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ ФОТОРЕЗИСТА AZ MIR 701



И.В. Коняев Т.С. Лавренова Ю.В. Куликова Г.С. Лысыкова И.И. Бородкин

## The features of technology of formation of AZ MIR 701 photoresist layers

I.V. Konyaev, T.S. Lavrenova, Yu.V. Kulikova, G.S. Lysikova, I.I. Borodkin, NIET

АО «НИИЭТ», www.450\_asd@mail.ru

**АННОТАЦИЯ:** в статье проанализированы параметры нанесения, влияющие на равномерность пленки фоторезиста марки AZ MIR 701. Отработаны режимы формирования пленки, позволяющие добиться точности воспроизведения толщины с отклонением менее 2 %. На растровом электронном микроскопе проанализировано качество морфологии поверхности фоторезистивных пленок. Показано, что отработанный режим не приводит к появлению локальных дефектов и существенному увеличению шероховатости поверхности. Предложенные рекомендации могут быть применены при серийном производстве полупроводниковых приборов в цикле кристалльного производства.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** позитивный фоторезист, разнотолщинность, лазерная рефлектометрия, растровая электронная микроскопия, центрифугирование.

**ANNOTATION:** the application parameters affecting the uniformity of AZ MIR 701 photoresist film is presented in this paper. The film formation modes allowing to achieve the accuracy of thickness reproduction with a deviation of less than 2% have been worked out. The quality of the surface morphology of the photoresistive films was analyzed on a scanning electron microscope. It is shown that the worked out mode does not lead to the appearance of local defects and a significant increase in surface roughness. The proposed recommendations can be applied in serial production of semiconductor devices in the crystal production cycle.

**KEYWORDS:** positive photoresist, thickness variation, laser reflectometry, scanning electron microscopy, centrifugation.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Многокомпонентность физико-химических процессов, применяемых при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС), критичность технологических операций к качеству исходных материалов и режимам работы оборудования, высокие требования к чистоте и постоянству окружающей среды требуют постоянного анализа для совершенствования технологии производства. Бурное развитие технологии транзисторных структур и ИМС в направлении повышения их функциональной сложности (степени интеграции и быстродействия) усложняют проблемы контроля, так как для обеспечения требуемой точности необходим опережающий задел методик контроля и аналитического оборудования.

Стремление к миниатюризации полупроводниковых приборов вызвано рядом факторов, самыми важными среди которых являются: снижение себестоимости производимой продукции и улучшение технических характеристик получаемых приборов [1]. Путь развития новых технологий неразрывно связан с использованием новых материалов. В области фотолитографических процессов при работе с проектными нормами 300 нм предъявляются особые требования к используемым фоторезистам. Такие параметры, как вязкость и светочувствительность, которые, в свою очередь, определяют технологические режимы операции нанесения: дозу, время растекания, скорость вращения центрифуги и определяют конечную толщину фоторезистивной пленки, ее разнотолщинность по пластине и наличие разного рода дефектов структуры. Физико-химические свойства фоторезиста, в свою очередь, определяют временной и температурный режимы задубливания, условия экспонирования и проявления.

В работе проведены экспериментальные исследования формирования фоторезистивных слоев с применением позитивного фоторезиста AZ MIR 701. Показано, что локальная разнотолщинность может быть уменьшена до предела, присущего данному типу фоторезиста [2, 3].

## II. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальные работы проводились на установке «Лада-125», обладающей широкими технологическими возможностями [4]. Регулированием динамических параметров центрифугирования, подбором оптимальных условий нанесения и устранением вибраций можно осуществить значительное уменьшение величины общей разнотолщинности [5]. Для отработки операций фотолитографии был выбран фоторезист марки AZ MIR 701 (14 cPs). Целью исследования был подбор оптимального режима нанесения с получением равномерной пленки рабочей толщиной 0,7 мкм с разбросом не более 5% по площади пластин. Отработка режимов проводилась на кремниевых пластинах диаметром 100 мм. Для проведения работы были использованы стандартные кремниевые пластины (Blanc) и кремниевые пластины повышенной плоскостности (UltraFlat).

Контроль качества поверхности пленки проводился методом растровой электронной микроскопии. Образцы, полученные в различных режимах, сканировались на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610A. Анализ толщины полученных в результате отработки пленок проводился на спектроскопическом рефлектометре RM1000.

## III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе работ все пластины были пронумерованы: V-1, V-2 - пластины Blanc; N1, N2, N3, N4, N5 - UltraFlat. Далее сформированная партия пластин передана на участок химических процессов для отмывки. После отмывки пластины были обработаны в парах гексаметилдисилазана (ГМДС). Далее осуществлялось нанесение фоторезиста на установке «Лада - 125» двумя способами.

► Первый способ - нанесение фоторезиста на стоячую подложку с последующей разгонкой до скорости 5500 об/мин, второй способ двухскоростной - нанесение фоторезиста на вращающуюся подложку с разгоном пластины сначала до скорости 5000 об/мин, затем скорость увеличивалась до 5500 об/мин. Процесс формирования проходит в две стадии - сбрасывание излишков фоторезиста и стабилизация толщины слоя.

После нанесения все пластины проходили ИК-обработку в течении 5 минут при температуре 90о С.

► На втором этапе проводились измерения толщин пленок фоторезиста на различных образцах и

анализ результатов. Измерения и анализ качества проводились на приборах: рефлектометр RM 1000 и растровом электронном микроскопе.

На рис. 1 изображены схемы расположения точек замеров на рефлектометре RM 1000 по 5 точкам.

В таблице 1 представлены результаты замеров на RM 1000.

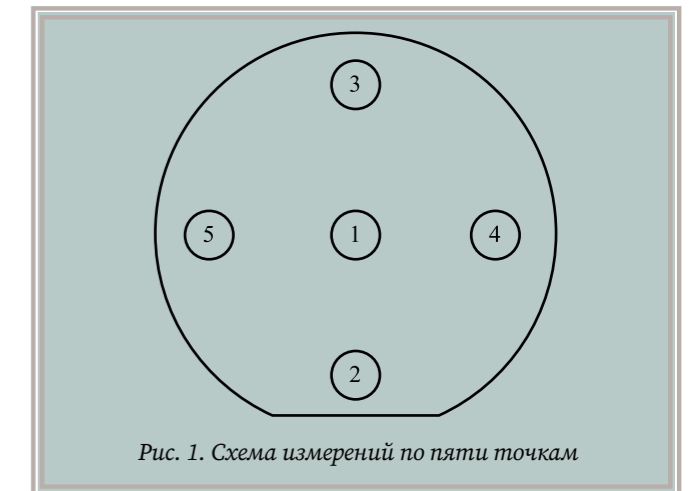


Рис. 1. Схема измерений по пяти точкам





Таблица 1. Результаты замеров толщины пленки фоторезиста при различных режимах нанесения

Пластина (№)	Марка фоторезиста	Режим нанесения	Толщина фоторезиста ср., мкм	
			Среднее значение, мкм	Разнотолщинность, нм
V 2	AZ701MIR	Лада – 125: D=3 (не достачно точна) R=1 V1=0 V2=5500	0,720	0,693÷0,736 43 нм
V1	AZ701MIR	Лада – 125: D=4 R=1 V1=0 V2=5500	0,737	0,707÷0,766 59 нм
V2	AZ701MIR	Лада – 125: D=4 R=1 V1=5000 V2=5500	0,749	0,727÷0,774 47 нм
N5	AZ701MIR	Лада – 125: D=4 R=1 V1=5000 V2=5500	0,732	0,717÷0,753 36 нм
N4	AZ701MIR	Лада – 125: D=4 R=1 V1=0 V2=5500	0,706	0,701÷0,712 11 нм
N3	AZ701MIR	Лада – 125: D=4 R=1 V1=0 V2=5500	0,703	0,698÷0,709 11 нм
N2	AZ701MIR	Лада – 125: D=4 R=1 V1=5000 V2=5500	0,740	0,727÷0,751 24 нм
N1	AZ701MIR	Лада – 125: D=4 R=1 V1=5000 V2=5500	0,740	0,735÷0,755 20 нм

В результате вариаций параметров и последующих замеров был подобран оптимальный режим формирования фоторезистивного слоя на стоячую подложку с последующим увеличением скорости до 5500 об/мин: доза – 4 с, растекание – 1 с, стабилизация толщины центрифугированием – 20 с.

Для подтверждения воспроизводимости результатов была проведена серия из трех последователь-

ных экспериментов. В таблице 2 представлены результаты замеров абсолютных значений по 5 точкам и средних значений толщины фоторезиста для каждой из пластин.

Таблица 2. Сводные замеры параметров воспроизводимости толщины фоторезистив пленок

Анализируя полученные значения, можно сделать вывод о том, что метод нанесения на стоячую подложку имеет несколько лучшие показатели по равномерности нанесения. Сам метод капельного нанесения с последующим центрифугированием характеризуется наличием более толстой области в центре пластины и уменьшения толщины слоя по мере растекания резиста. При этом стоит отметить, что разброс толщины составляет не более 2% по площади пластины.

На рисунке 2 представлены результаты качества получаемой поверхности фоторезистивной пленки.

Анализируя полученные значения и внешний вид пленки, можно сделать вывод о том, что подобранный режим нанесения обеспечивает высокую равномерность получаемой пленки и может быть применен в серийном производстве изделий.

Пластина (№)	Толщина пленки фоторезиста 5 точкам, мкм	Среднее значение, мкм	Разнотолщинность, нм
N1	1 – 0,712 2 – 0,703 3 – 0,701 4 – 0,706 5 – 0,704	0,705	0,701÷0,712 11 нм
N2	1 – 0,747 2 – 0,737 3 – 0,740 4 – 0,738 5 – 0,738	0,740	0,737÷0,747 10 нм
N3	1 – 0,710 2 – 0,702 3 – 0,700 4 – 0,703 5 – 0,700	0,703	0,700÷0,710 10 нм

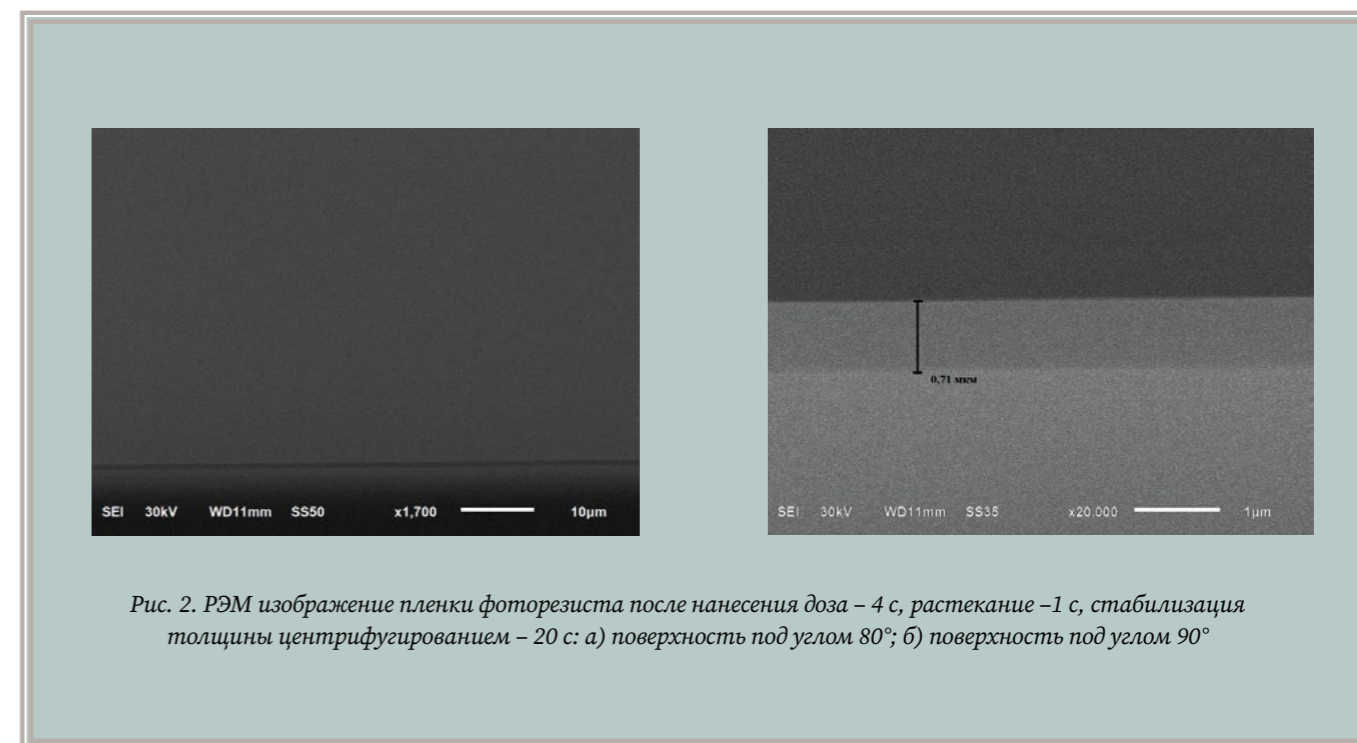


Рис. 2. РЭМ изображение пленки фоторезиста после нанесения доза – 4 с, растекание – 1 с, стабилизация толщины центрифугированием – 20 с: а) поверхность под углом 80°; б) поверхность под углом 90°

## ЛИТЕРАТУРА

- Weiskittel, K. Fabrication of Sub-300nm Fins at RIT by SADP // K Weiskittel // Journal of the Microelectronic Engineering Conference. – 2019. – Vol. 25. – Iss. 1.
- S. H. Thornton, C. A. Mack. Lithography model tuning: matching simulation to experiment // Thornton S. H., Mack C. A. // SPIE Conference Proceedings. – 1996. – Vol. 2726. – P. 223–235.
- S. Landis Ed. Lithography: main techniques. London: Hoboken, NJ: ISTE ; Wiley, 2011.
- Онегин Е.Е. Точное машиностроение для микроэлектроники // Е.Е. Онегин. М.: Радио и Связь, 1986.
- Мокеев О.К. Технология полупроводникового производства // О.К. Мокеев, А.С. Романов. М.: Высшая школа, 1984.
- Гудилин, Д. Электронная микроскопия в научных исследованиях и образовании / Д. Гудилин // Наноиндустрия. – 2014. – Т. 50. – № 4. – С. 28–33.

# ПРИМЕНЕНИЕ ВАКУУМНОЙ ПАЙКИ ПРИПОЙНЫХ ШАРИКОВ НА ВЫВОДНЫЕ ПЛОЩАДКИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ МАТРИЧНОГО ТИПА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ОТВЕТСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

The use of vacuum soldering of solder balls on the lead pads of matrix-type metal-ceramic packages in the production of semiconductor products for critical applications

V.V. Pobedinsky, A.V. Ryabov  
E.V. Lavrentiev, NIET



А.В. Рябов



В.В. Побединский



Е.В. Лаврентьев

АО «НИИЭТ»

**АННОТАЦИЯ:** керамические корпуса с шариковыми выводами на плоскости основания – С-BGA (англ. Ceramic Ball Grid Array – массив шариковых выводов на керамическом основании), (далее С-BGA), способны обеспечить необходимую надежность и представляют собой тип поверхностно-монтируемых интегральных схем. Одной из разновидностей корпусов типа С-BGA являются керамические корпуса с углубленными выводными площадками – D-BGA (англ. Dimpled Ball Grid Array – массив шариковых выводов на керамическом основании, контактные площадки которых углублены в дамплы), (далее D-BGA) [1].

В настоящий момент перед предприятиями-изготовителями изделий электронной техники стоит задача – создание приборов, имеющих запас прочности на длительный промежуток времени при экстремальных нагрузках.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Применение корпусов типа D-BGA является приоритетным направлением корпусирования изделий электронной техники ответственного применения.

Модернизация классического керамического корпуса типа С-BGA в части введения дамплгов для выводных площадок позволила повысить надежность керамического корпуса матричного типа и защитить место пайки шариков от деформации во время термоциклирования. Увеличилась способность самоцентрирования микросхемы при монтаже, что позволяет паять корпуса типа D-BGA к печатной плате вместе с пассивными элементами.

Важной особенностью микросхем ответственного применения в корпусах типа D-BGA является то, что к ним применяются жесткие требования к пустотам в

припойном шарике, дамгле и месте соединения с выводной площадкой корпуса.

## II. СПОСОБ ВАКУУМНОЙ ПАЙКИ ПРИПОЙНЫХ ШАРИКОВ НА ВЫВОДНЫЕ ПЛОЩАДКИ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ МАТРИЧНОГО ТИПА

Существуют различные способы монтажа припойных шариков на выводные площадки металлокерамических корпусов. Например, известен способ пайки потоком горячего воздуха, который основан на переносе тепловой энергии нагретым воздухом. Для нагрева воздух пропускается через нагревательный элемент с помощью конвекторов. Нагретый воздух позволяет расплавить припой и произвести пайку [2].

Недостатком данного способа является возможность термоудара ввиду неконтролируемости процесса нагрева, т.к. контроль температуры воздуха осуществляется лишь на выходе насадки, а не на самом корпусе микросхемы. Кроме того, поток воздуха может сдувать и/или сдвигать припойные шарики при пайке.

Известен способ пайки методом оплавления припоя с использованием инфракрасного (далее – ИК) излучения. В соответствии с данным способом, микросхема последовательно проходит через зоны предварительного нагрева и пайки с последующим охлаждением. Отличительной особенностью известного способа является то, что в зоне предварительного нагрева и охлаждения изделие находится в движении, а во время пайки – неподвижно. Контроль температуры изделия во время пайки осуществляется

ИК-датчиком [3]. Однако и оно имеет ряд недостатков.

Например, ИК-нагреватель обладает большой

тепловой инертностью как при нагреве, так и при охлаждении. Контроль температуры ИК-датчиком усложняет настройку и контроль термопрофиля и, как следствие, вызывает проблемы с повторяемостью процесса, что приводит к снижению качества пайки и уменьшению выхода годных изделий.

Еще один способ монтажа припойных шариков на выводные площадки металлокерамических корпусов – парофазная пайка, в процессе которой в герметичной камере находится жидкость «медиум» (переносчик) при температуре кипения равной температуре плавления припоя. В процессе кипения жидкости создаётся пар, в который помещается изделие с установленными компонентами. Пары конденсируются, отдавая теплоту парообразования, тем самым нагревая подложку. Когда температура изделия достигает температуры пара, процесс конденсации прекращается, и нагрев заканчивается. В результате нанесённая паяльная паста оплавляется [4].

Недостатком этого способа пайки является повреждение припойных шариков (эффект попкорна), а также отсутствие отечественных производителей жидкости – «медиума».

При разработке способа вакуумной пайки припойных шариков на выводные площадки металлокерамических корпусов матричного типа технические решения оплавления припоя с использованием ИК излучения и парофазная пайка приняты за прототип.

При традиционном подходе монтаж внешних шариковых выводов представляет собой типовую

последовательность технологических операций: нанесение флюса, нанесение припойных шариков, предварительный нагрев, смачивание (стабилизация), оплавление, охлаждение, отмывка остатков флюса и сушка.

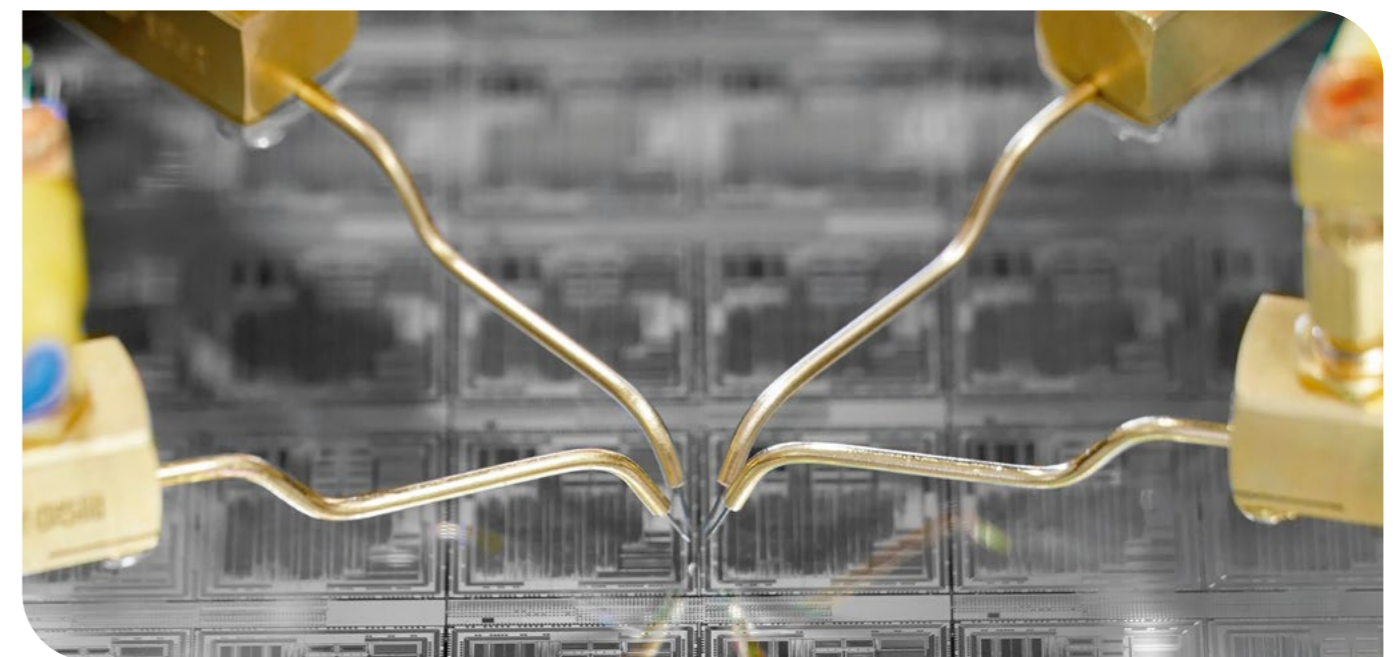
Разработка технологии вакуумной пайки припойных шариков на выводные площадки металлокерамических корпусов матричного типа направлено на решение технической задачи по созданию нового способа пайки припойных шариков на корпуса типа

D-BGA, который обеспечил бы получение следующих результатов:

- ▶ простая настройка технологического процесса оплавления;
- ▶ динамическое профилирование, позволяющее каждому соединению достигать температуры пайки;
- ▶ минимизация дефектов пайки;
- ▶ мониторинг и прослеживаемость режимов.

Указанный технический результат достигается при проведении поэтапных операций:

- ▶ плазменная обработка выводных площадок металлокерамических корпусов;
- ▶ нанесение паяльной пасты в дамплы корпусов типа D-BGA;
- ▶ нанесение калиброванных припойных шариков;
- ▶ оплавление в вакуумной печи паяльной пасты и припойных шариков;
- ▶ отмывка мест пайки;
- ▶ сушка корпусов микросхем;
- ▶ проведение визуально-оптического и рентгенографического контроля смонтированных припойных шариковых выводов.





**Блок-схема нового способа монтажа выглядит следующим образом:**



В начале процесса выводные площадки микросхем очищают от возможных загрязнений с одновременной активацией поверхности в низкотемпературной газоразрядной плазме, после чего на выводные площадки микросхемы наносят припойную пасту методом трафаретной печати. Контроль заполнения дампов осуществляется визуально. На нанесенную с помощью трафарета паяльную пасту размещают калиброванные припойные шарики, затем в вакуумной печи проводят одновременное оплавление паяльной пасты и калиброванных припойных шариков, после чего производят отмывку мест пайки в УЗ-ванне и сушку корпусов микросхем. В заключение, с целью контроля качества пайки и анализа возможных пустот, образованных в процессе оплавления, осуществляют визуально-оптический и рентгенографический контроль.

Разработанный способ [5] позволяет обеспечить ряд преимуществ по сравнению с альтернативными методами монтажа припойных шариков:

- ▶ обеспечить однозначный контроль стадий температурного профиля (предварительный нагрев, смачивание (стабилизация), оплавление, охлаждение);
- ▶ минимизировать разницу температур на корпусе микросхемы, исключить возможность перегрева;
- ▶ контролировать рост интерметаллических соединений;
- ▶ исключить окисление паяного соединения;
- ▶ минимизировать количество пустот.

Максимальное содержание пустот в паяном соединении не должно превышать 10% общей площади соединения [6]. Более жесткие требования к пустотам отражены в [7], где до 50% шариков могут иметь пустоты, максимальный размер пустоты в любом шарике составляет 5% его площади (22% диаметра изображения).

Специалистами АО «НИИЭТ» предложена новая технологическая схема монтажа калиброванных припойных шариков на металлокерамические корпуса 8 типа [8], представляющая собой последовательность технологических операций.

Технологическое решение поясняется конкретным примером исполнения, который, однако, не является единственно возможным, но наглядно демонстрирует возможность достижения требуемого технического результата.

С целью очистки поверхности от загрязнений, возникших в процессе транспортировки и хранения, металлокерамический корпус микросхемы с золотой (Au) металлизацией выводных площадок обрабатывают в низкотемпературной газоразрядной плазме с диодной системой возбуждения заряда в среде смеси газов аргон-водород (Ar90%+H<sub>2</sub>10%) в течении 10 минут; (мощность, подаваемая на питающий электрод, – 450 Вт; давление в реакционно-разрядной камере – 120 мТорр). Затем металлокерамический корпус микросхемы укладывают в кассету выводными площадками вверх и накрывают трафаретом заданной толщины, при этом апертуры трафарета должны быть совмещены с выводными площадками корпуса.

Толщину трафарета выбирают в зависимости от геометрических размеров дампа (глубины и диаметра). На трафарет наносят паяльную пасту, которую затирают ракелем в выводные площадки микросхемы, уложенную в кассету в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Контроль заполнения дампов осуществляется с помощью микроскопа с увеличением не менее 16х. После заполнения дампов трафарет снимается с кассеты, при этом дампы выводных площадок микросхемы остаются заполнены паяльной пастой. Затем на кассету помещается трафарет для установки калиброванных припойных шариков, на трафарет наносят калиброванные припойные шарики и распределяют их таким образом, чтобы в одной апертуре трафарета находился один припойный шарик. Толщину трафарета выбирают исходя из геометрических размеров припойных шариков, при этом она должна быть не менее 50 % от их диаметра. Трафарет снимается с кассеты, после чего микросхему с нанесёнными припойными шариками помещают в камеру вакуумной печи. Оплавление состоит из нескольких технологиче-

ских стадий. После запуска процесса оплавления происходит вакуумирование камеры до 10 mbar с последующим напуском в рабочий объем камеры азота (N<sub>2</sub>) со скоростью 10 ppm/s для удаления кислорода из камеры и, как следствие, исключения окисления в процессе пайки, при этом давление в камере на 100 mbar ниже атмосферного. После создания среды азота в камере происходит предварительный нагрев корпуса микросхемы до температуры 150 °С.

Во избежание температурного удара и ранней активации флюса, содержащегося в паяльной пасте, скорость предварительного нагрева контролируется и не превышает 2 °С/сек. Параллельно с нагревом происходит подача паров муравьиной кислоты (НСООН) со скоростью 10 ppm/s, которая позволяет убрать окисление с поверхности припойных шариков и подготавливает их к пайке. Следующей

**Вакуумная пайка припойных шариков на выводные площадки металлокерамических корпусов матричного типа**

технологической стадией оплавления является стабилизация – выдержка микросхемы при температуре предварительного нагрева в течении 120 секунд с целью выравнивания температурного градиента на корпусе и включения активи-

рующих свойств флюса, содержащегося в паяльной пасте. После завершения стадии стабилизации начинается стадия оплавления, в ходе которой происходит увеличение температуры до 235 °С с выдержкой на пике 60 секунд, затем включается вакуумный насос, и создается разрежение 5 mbar, что приводит к увеличению размера пустоты до размера, достаточного для создания вентиляционного канала. За счёт избыточного давления пустота выходит из припоя, окружающее давление стремится к вакууму, давление с пустотой выравнивается, силы поверхностного натяжения заполняют место пустоты припоем. В результате образованные в процессе заполнения дампа пустоты и газы флюса полностью удаляются из паяного соединения.

После завершения процесса вакуумирования происходит наполнение камеры азотом (N<sub>2</sub>) до давления окружающей среды. Завершающей стадией процесса является охлаждение корпуса микросхемы до температуры 50 °С со скоростью не выше 4 °С/сек., при

этом расплавленный припой переходит в твердое состояние. После завершения оплавления микросхема с оплавленными шариковыми выводами подвергается отмывке в ультразвуковой ванне в деионизированной воде, подогретой до температуры 60 °С. Длительность обработки 10 минут, частота УЗ-генератора 35 кГц с последующей сушкой в сушильном шкафу при температуре 80 °С в течение 10 минут.

В дальнейшем смонтированные припойные шарики подвергаются визуально-оптическому контролю на наличие дефектов внешнего вида, в ходе которого контролируются габаритные размеры и качество поверхности припойных шариков.

Заключительной операцией технологического процесса является рентгенографический контроль, в ходе которого припойные шарики проверяются на наличие следующих дефектов:

- ▶ трещины и разрывы в зоне соединения припойного шарика с выводной площадкой;
- ▶ отсутствие смачивания выводных площадок микросхемы;
- ▶ пустоты в паяном соединении.

Разработанный технологический цикл монтажа припойных шариков хорошо зарекомендовал себя в опытном производстве. Однако, в связи с тем, что конструкция вакуумной печи и технологические стадии оплавления не позволяют получить высокую производительность процесса, применять его мож-

но в лабораторном и мелкосерийном производстве.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате разработки способа вакуумной пайки припойных шариков на металлокерамические корпуса 8 типа [8], специалистами АО «НИИЭТ» были получены следующие результаты:

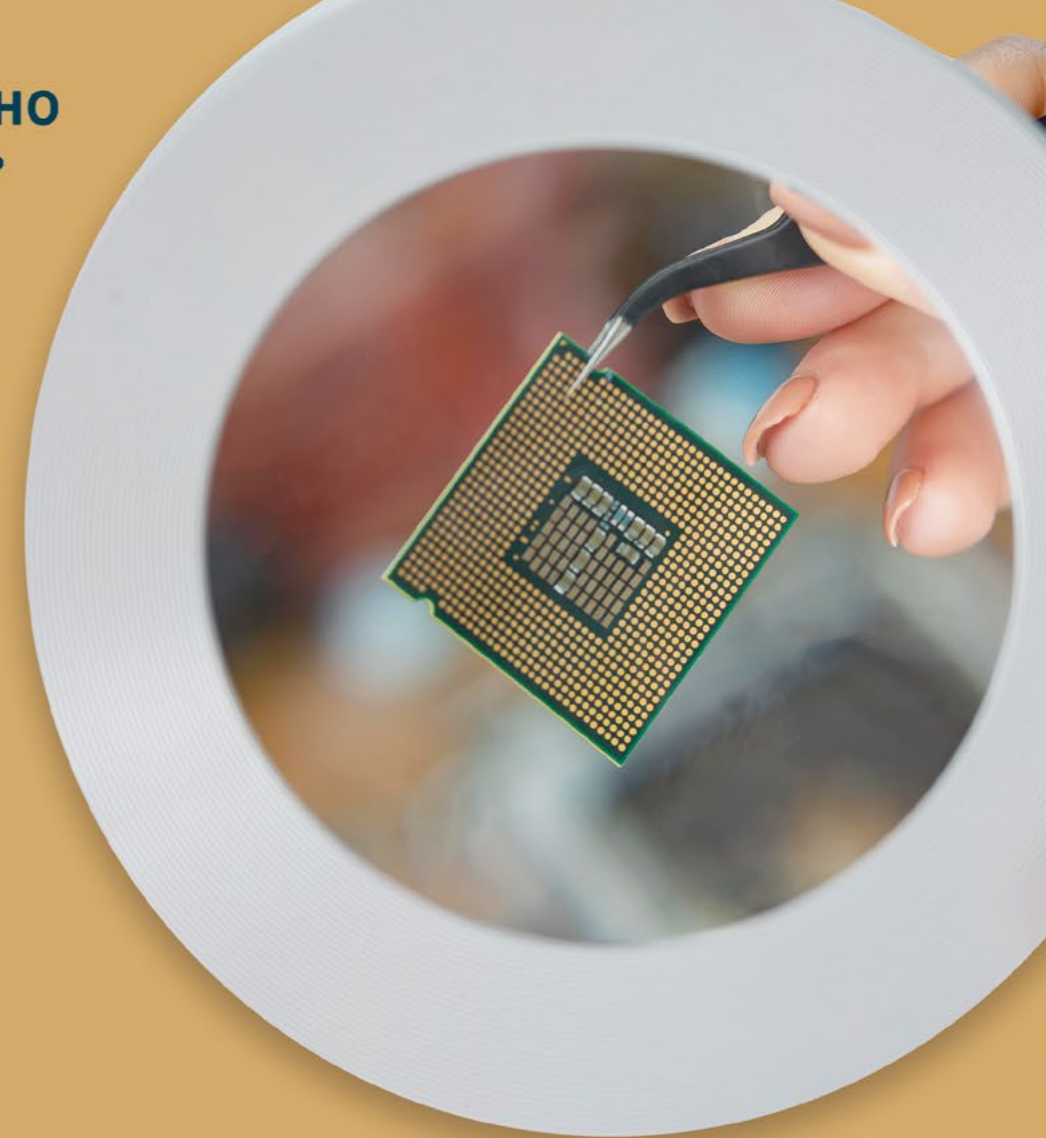
- ▶ Низкотемпературная плазменная обработка выводных площадок микросхемы позволяет определенным образом активировать/ модифицировать поверхность, что позволяет уменьшить угол смачивания и, как следствие, улучшить заполнение дампов выводных площадок микросхемы паяльной пастой;
- ▶ Применение вакуумной печи позволяет получить возможность динамического профилирования, обеспечить воспроизводимость и прослеживаемость технологического процесса и, как следствие, контролируемый рост интерметаллических соединений;
- ▶ Удаление кислорода из рабочей камеры и продувка азотом уменьшает содержание кислорода до 10-15 ppm, что обеспечивает минимальный рост оксидных пленок на поверхности калиброванных припойных шариков;
- ▶ Оплавление припойных шариков в парах муравьиной кислоты позволяет осуществлять пайку без применения флюса;
- ▶ При рентгенографическом контроле более 200 тысяч смонтированных припойных шариков, 100% припойных шариков не имели дефектов паяного соединения, включая пустоты, превышающие 5% его площади (22% диаметра изображения), что соответствует передовым критериям качества мирового уровня.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Shingo Sato, Noriyuki Shimizu, Shin Matsuda, Shoji Uegaki and Sachio Ninomiya. 2ND LEVEL INTERCONNECT RELIABILITY OF CERAMIC AREA ARRAY PACKAGES, Keyocera Corporation, Kyoto, Japan, Presented at semicon Taiwan on 9/23/97.
2. А. Кантер, Фокусная инфракрасная пайка – ремонт BGA-микросхем с превосходным качеством. Технологии в электронной промышленности. с. 10-12, №5, 2015.
3. Способ сборки гибридно-интегральных микросхем, Патент Российской Федерации (19) RU (ID 2315392 (13) C1 (51) H01L 21/98 (2006.01) // Доровских С.М. с приоритетом от 28.06.2006.
4. А. Серегин, М. Антонов, Инновационные технологии пайки: парофазная пайка. Современная электроника. с. 8-9, №6, 2010.
5. Способ вакуумной пайки припойных шариков на выводные площадки металлокерамических корпусов матричного типа, Патент Российской Федерации (19) RU (ID 2812158 (13) C1 (51) B23K 1/008 (2006.01) H05K 3/34 (2006.01) // Побединский В.В., Рябов А.В., Лаврентьев Е.В. с приоритетом от 13.12.2022.
6. MIL-STD-883G. Test method standard microcircuits.
7. IPC-7095B Design and Assembly Process Implementation for BGAs, March 2008.
8. ГОСТ Р 54844-2011. МИКРОСХЕМЫ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ. Основные размеры, Москва, Стандартинформ, 2014.



РАЗРАБОТАНО  
АО «НИИЭТ»



## 32-РАЗРЯДНЫЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ И МОЩНЫЕ СВЧ LDMOS-ТРАНЗИСТОРЫ ДЛЯ ГРАЖДАНСКОГО РЫНКА



Отдел маркетинга АО «НИИЭТ»

Тел.: +7 (473) 222-91-70

E-mail: e.pletneva@niiet.ru



# РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЦИОННЫХ ТЕСТОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПРАВИЛЬНОСТИ РАБОТЫ КОНТРОЛЛЕРА FLASH-ПАМЯТИ МИКРОСХЕМЫ K1921VG015



<sup>1</sup>Ю.А. Шкондин,



<sup>1</sup>И.П. Потапов



<sup>2</sup>А.С. Ягодкин

<sup>1</sup>АО «НИИЭТ», <sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

**Development of integration tests to verify the correct operation of the flash memory controller of the K1921VG015**

Y.A. Shkondin<sup>1</sup>, I.P. Potapov<sup>1</sup>, A.S. Yagodkin<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>НИИЭТ,

<sup>2</sup>Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov

ANNOTATION: The article discusses the construction of integration testing of the K1921VG015 flash memory controller. An integration testing strategy is determined and test scripts are prepared. The use of integration testing during the development process allows us to identify and correct errors in the description of the RTL model of the microcontroller.

KEYWORDS: flash memory, microcontroller, I&T integration tests.

**АННОТАЦИЯ:** в статье рассматривается построение интеграционного тестирования контроллера flash-памяти микросхемы K1921VG015. Определяется стратегия интеграционного тестирования, подготавливаются тестовые сценарии. Применение интеграционного тестирования в процессе разработки позволяет выявлять и исправлять ошибки в описании RTL-модели микроконтроллера.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** flash-память, микроконтроллер, интеграционные тесты, I&T.

В настоящее время задачи верификации и тестирования вычислительных систем требуют разработки тестовых программ, исполняющихся на нескольких процессорных ядрах и реализующих различные сценарии – это вычислительные задачи, работа с кэш-памятью, контроллерами памяти, различными периферийными устройствами, контроллерами

ввода вывода, модулями управления питанием и другим компонентами разрабатываемого устройства. Обобщённо процесс разработки можно представить в виде четырёх шагов, представленных на рисунке 1.

На разных шагах присутствует разные способы оценки правильности работы разрабатываемого устройства. Интеграционное тестирование – это тип тестирования, при котором программные модули объединяются логически и тестируются как группа. Любой микроконтроллер состоит из большого количества модулей, написанных разными разработчиками. Целью тестирования является выявление ошибок, возникающих при взаимодействии модулей между собой, и в первую очередь, проверка обмена данными между ними. Именно поэтому оно также называется «I&T» (интеграция и тестирование). Проведение интеграционного тестирования разрабатываемого устройства является важным этапом разработки микроконтроллера. Блоки микроконтроллера разрабатываются разными специалистами, поэтому понимание логики функционирования блоков может отличаться. Интеграционное тестирование становится необходимым для проверки взаимодействия модулей между собой. Кроме этого, во время разработки блоков возможны изменения требований, затрагивающих интеграцию блока в состав микросхемы и, следовательно, могут возникнуть ошибки системной интеграции. Проведение интеграционного тестирования позволяет исключить такие ошибки.

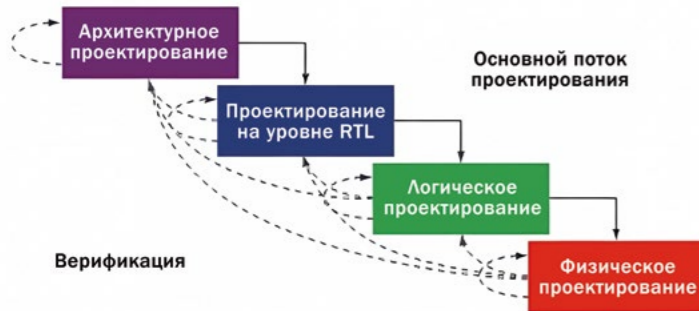


Рис. 1. Обобщенная схема проектирования микроконтроллера

Микросхема K1921VG015 представляет собой СБИС 32-разрядный микроконтроллер на базе ядра RISC-V, предназначенный для промышленных и потребительских приложений, включая системы дистанционного мониторинга, контрольно-измерительные приборы, системы автоматизации производственных процессов, автомобильную электронику, а также устройства с батарейным питанием.

Сфера применения микросхемы K1921VG015 довольно широка: средства измерений, связи, наблюдения, безопасности, автоматизация производства, энергетики, промышленности, различных систем, работающих от батарейного питания.

В состав микросхемы K1921VG015 входят: блоки АЦП сигма-дельта, АЦП последовательного приближения с интерфейсом к контроллеру прямого доступа к памяти, модуль захвата/сравнения, блоки кодирования информации, блок RTC, два блока ОЗУ на 256кБ и 64кБ, блок контроля вскрытия и др.

Микроконтроллер содержит домен батарейного питания, в который входят периферийные блоки: RTC, аналоговые компараторы, блок контроля вскрытия, дополнительное ОЗУ 64КБ, независимый сторожевой таймер. Периферийные блоки, входящие в состав домена батарейного питания, позволяют осуществлять контроль вскрытия корпуса системы, отсчитывать временные промежутки и сохранять информацию при отсутствии основного питания.

Разработанный микроконтроллер имеет встроенную Flash-память программ объемом 1 Мбайт, которую можно использовать для хранения и загрузки пользовательского программного обеспечения.

Каждый микроконтроллер содержит уникальный идентификационный номер ID, состоящий из 128 бит.

Система тактирования микроконтроллера позволяет использовать различные источники тактового сигнала, что позволяет расширить набор применений и решаемых задач пользователя. Существует возможность гибкой настройки тактовых сигналов для блоков периферии.

Для снижения энергопотребления микросхемы предусмотрена возможность отключения тактовых сигналов отдельных блоков периферии в случае,

если они не используются пользователем. При переходе процессора в режим пониженного энергопотребления возможно отключение тактового сигнала ядра (команда WFI), а также возможность выбора периферийных блоков, которые будут отключены/включены при переходе/выходе из данного режима.

Flash-память может использоваться для хранения программ и данных пользователя. Размер основной Flash-памяти составляет 1 Мбайт (256 страниц по 4 Кбайт), и в адресном пространстве она занимает диапазон с 8000\_0000h по 800F\_FFFFh.

Чтение Flash-памяти осуществляется через две шины АНВ: I code (для команд) и D code (для данных). Чтение D-code шины имеет приоритет. На обеих шинах при попытке записи в любую область, чтении из несуществующей области, чтении во время, когда Flash занята (стирание, запись), транзакция проходит успешно с неопределенными данными на выходе.

Память доступна для чтения, записи, полного и постраничного стирания через регистры данных «DATA» (n от 0 до 3), адреса «ADDR», команд «CMD», статуса «STAT» блока FLASH. Запись необходимо производить в предварительно очищенную (стер-

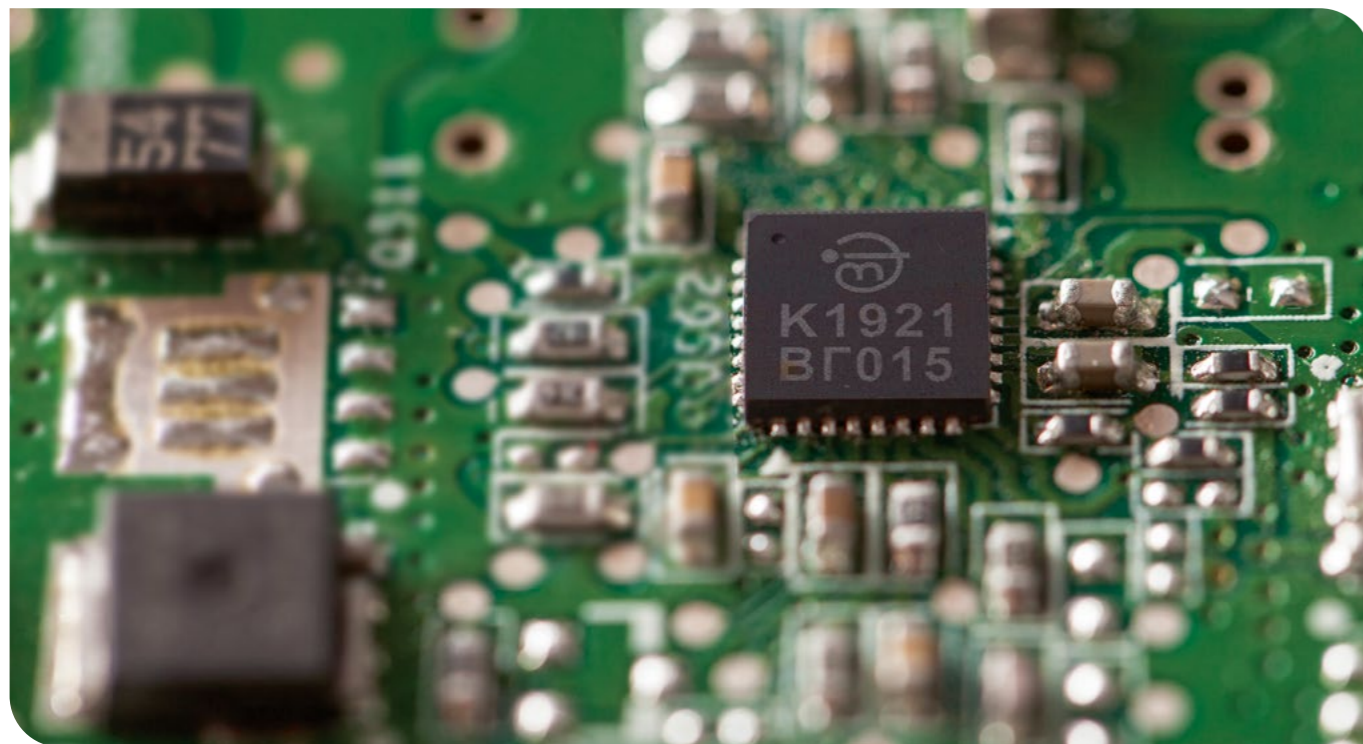
тую) ячейку памяти. Стирание памяти осуществляется полностью или постранично.

Помимо основной области памяти (1 Мбайт), доступной как через глобальное адресное пространство, так и через регистры контроллера, существует дополнительная NVR область (две страницы по 4 Кбайт в диапазоне 0x0000 – 0x1FFF). В последней ячейке второй страницы NVR области располагается конфигурационное слово микроконтроллера CFGWORD. NVR область доступна для чтения, записи и постраничного стирания только через регистры блока FLASH.

Контроллер Flash-памяти имеет 5 регистров которые отвечают за режимы работы, операции чтения/записи:

► ADDR – регистр адреса Flash-памяти, используемый при командах записи, чтения и постраничного стирания. Должен быть выровнен по 16 байт. Не выровненные адреса выравниваются автоматически;

**Микросхема K1921VG015  
представляет собой  
СБИС 32-разрядного  
микроконтроллера  
на базе ядра RISC-V**



- ▶ DATA – массив регистров данных Flash-памяти 32-разрядные регистры слов данных. Все слова данных должны быть загружены в регистры до установки бита команды записи. Читаемые данные будут доступны в регистрах после сброса флага BUSY;
  - ▶ CMD – регистр команд Flash-памяти. Используется для активации команды стирания всех страниц области памяти, записи, чтения и работы с NVR-областью. Для запуска команды необходимо записывать специальный код (0xC0DEh) в старшие разряды регистра;
  - ▶ STAT – регистр статуса Flash-памяти, отвечающий за состояние контроллера в данный момент времени;
  - ▶ CTRL – регистр настройки контроллера Flash-памяти. В нем задается количества дополнительных тактов ожидания при чтении из Flash-памяти. Исходя из описания работы контроллер Flash-памяти был составлен план тестирования, включающий в себя:
  - ▶ Тестирование регистров блока;
  - ▶ Тестирование коммутации системных шин;
  - ▶ Тестирование сброса блока;
  - ▶ Тестирование формирования флагов и обработки прерываний от блока;
  - ▶ Тестирование режимов работы блока.
- В ходе тестирования (запуск режима работы/пе-

- редачи, проверка установки бит статуса, проверка обработки прерывания и т.д.) воспроизводилась дважды, чтобы исключить некорректное поведение схемы при повторном запуске.
- При написании тестов использовался язык программирования Си. Всего было разработано шесть тестов:
- ▶ bootflash\_reg\_test - тестирование доступности регистров после инициализации процессора и его сброса;
  - ▶ bootflash\_erase\_test - проверка очистки флеш памяти;
  - ▶ bootflash\_nvr\_erase\_test - проверка очистки NVR области флеш памяти;
  - ▶ bootflash\_rw\_test - проверка записи и чтения флеш памяти;
  - ▶ bootflash\_nvr\_rw\_test - проверка записи и чтения NVR области флеш памяти;
  - ▶ bootflash\_int\_test - проверка прерываний и выставления соответствующих битов.

После подготовки тестов были получены hex-файлы для запуска на RTL модели микроконтроллера K1921BГ015. Для написания IP-блоков модели использовались языки описания аппаратуры Verilog, System Verilog, VHDL. Моделирование проводилось с помощью специальных инструментов функциональной верификации.

```
Peripheral : BootFlash
Description : Test registers bootflash after reset
Source : ../testbenches/integration/bootflash/bootflash_reg_test/bin/bootflash_reg_test.hex
clk_hse frequency: 20 MHz
clk_rtc frequency: 32768 Hz
Stop time : 500000000 ns
Reset duration : 100000 ns
Boot mode : MAINFLASH_BOOT
CPE : 0 - INTERNAL
SERVICE_MODE : OFF

Deposit 0x2ec6d75d to testbench.top_u.sys_u.axi_sram_u.RAM[0].
ram.uut.mem_core_array[0]
Deposit 0x629389c5 to testbench.top_u.sys_u.axi_sram_u.RAM[1].
ram.uut.mem_core_array[0]
...
Deposit 0x3bbc5777 to testbench.top_u.sys_u.axi_sram_u.RAM[0].
ram.uut.mem_core_array[4095]
Deposit 0xbb125076 to testbench.top_u.sys_u.axi_sram_u.RAM[1].
ram.uut.mem_core_array[4095]
@ 5000 ns TB [power]: DVDD reach 1.0 V
@ 6100 ns TB [power]: VBAT reach 3.0 V
@ 6100 ns TB [power]: AVDD reach 3.0 V
@ 9900 ns TB [power]: LDO output voltage reach 1.0 V
Set configuration address is 3'h0, configuration data is 16'b1111111111111111
Set configuration address is 3'h1, configuration data is 16'b1111111111111111
Set configuration address is 3'h2, configuration data is 16'b1111111111111111
Set configuration address is 3'h3, configuration data is 16'b1111111111111111
Set configuration address is 3'h4, configuration data is 16'b1111111111111111
Set configuration address is 3'h5, configuration data is 16'b1111111111111111
Set configuration address is 3'h6, configuration data is 16'b1111111111111111
Set configuration address is 3'h7, configuration data is 16'b1111111111111111

TEST STARTED
@1101131 ns TB: Read regs after reset
@1141631 ns TB: Read regs after write
@1265881 ns TB: Check data

TEST PASSED!
Simulation complete with $finish(1) at time 1271526020 PS
../testbenches/integration/tb_core.sv:192 $finish();
```

Результат прохождения записывается в текстовом документе *bootflash.log* (листинг 1). В нем содержится информация о работе теста

Листинг 1



Для автоматизации процесса тестирования контроллера Flash-памяти и всего микроконтроллера в целом, разработанные тесты запускаются группой. Для это их необходимо записать в исполняемый файл *Makefile.run\_all*.

В результате прохождения разработанных тестов выявленные ошибки были исправлены, а работа RTL модели микроконтроллера скорректирована.

Существуют критерии входа и выхода на этап интеграционного тестирования, независимо от модели разработки программного обеспечения. Критерии старта:

- ▶ HDL-модель системы с интегрированным проверяемым модулем;
- ▶ Наличие плана интеграционного тестирования, тестовый набор, сценарии, которые должны быть задокументированы;
- ▶ Наличие необходимой тестовой среды.

Критерии окончания:

- ▶ Успешное прохождение тестирования интегрированного компонента;
- ▶ Выполненные тестовые случаи задокументированы;
- ▶ Все обнаруженные ошибки исправлены.

## ЛИТЕРАТУРА



1. Макаренко Ф.В., Ягодкин А.С., Зольников К.В., Денисова О.А., Полуэктов А.В. Обзор логических базисов и микросхем при построении комбинационного устройства с учетом надежности // Моделирование систем и процессов. – 2022. – Т. 15, № 1. – С. 115-124.
2. Суханов, В.В. Логическое проектирование информационного обеспечения распределенных информационных систем критического применения // В.В. Суханов, О.В. Ланкин // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 67-73. – DOI: 10.12737/2219-0767-2021-14-2-67-73.
3. Суханов, В.В. Методика логического проектирования информационного обеспечения распределенных информационных систем критического применения / В.В. Суханов, О.В. Ланкин // Моделирование систем и процессов. – 2021. – Т. 14, № 3. – С. 67-73. – DOI: 10.12737/2219-0767-2021-14-3-67-73.
4. Кроткова Н. А. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) // Научный альманах. – 2020. – №. 9-2. – С. 37-39.
5. Наваби З. Проектирование встраиваемых систем на ПЛИС: ДМК Пресс. – Москва, 2016. – 464 с. – ISBN978-5-97060-174-7
6. Ушенина И. В. Современные направления развития ПЛИС архитектуры FPGA //XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2017. – №. 4. – С. 120-124.
7. Гаврилов С. В., Железников Д. А., Хватов В. М. Решение задач трассировки межсоединений с ресинтезом для реконфигурируемых систем на кристалле // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2017. – Т. 22. – №. 3. – С. 266-275.
8. Строгонов А. В. и др. Архитектура ПЛИС типа ППВМ с одноуровневой структурой межсоединений // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2011. – Т. 7. – №. 3. – С. 13-16.
9. Corperation A. Cyclone IV FPGA Device Family Overview //Cyclone IV Device Handbook. – 2013. – Т. 1.
10. Murray K. E. et al. Vtr 8: High-performance cad and customizable fpga architecture modelling // ACM Transactions on Reconfigurable Technology and Systems (TRETS). – 2020. – Т. 13. – №. 2. – С. 1-55.
11. Nguyen T. et al. The performance and energy efficiency potential of FPGAs in scientific computing // 2020 IEEE/ACM Performance Modeling, Benchmarking and Simulation of High Performance Computer Systems (PMBS). – IEEE, 2020. – С. 8-19.

# ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫЕ СЕНСОРЫ ДАВЛЕНИЯ И ВАРИАНТЫ ИХ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ



<sup>1</sup>Д.Н. Нестеров <sup>1</sup>Н.С. Буйлов <sup>2</sup>П.Л. Пармон

**Piezoresistive pressure sensors and their design options as a promising direction of import substitution**

D.N. Nesterov<sup>1</sup>, N.S. Builov<sup>1</sup>, P.L. Parmon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University, <sup>2</sup>NIET

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет, <sup>2</sup>АО «НИИЭТ»

**АННОТАЦИЯ:** представлен краткий разбор современного состояния проблемы в области микроэлектромеханических датчиков давления, основанных на пьезорезистивном эффекте. Выбор кремния в качестве основного материала для создания подобных датчиков обусловлен его высокой механической стабильностью, удобством совмещения с электронной системой сбора и передачи данных о давлении, а также простотой изготовления и низкой стоимостью производства. Наиболее распространенным вариантом пьезорезистивного сенсора является система на базе моста Уитстона.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пьезорезистивный сенсор давления, кремний, мост Уитстона.

**ANNOTATION:** A brief analysis of the current state of the problem in the field of microelectromechanical pressure sensors based on the piezoresistive effect is presented. The choice of silicon as the main material for the creation of such sensors is due to its high mechanical stability, ease of combination with an electronic system for collecting and transmitting pressure data, as well as ease of manufacture and low cost of production. The most common variant of a piezoresistive sensor is a Wheatstone bridge-based system.

**KEYWORDS:** piezoresistive pressure sensor, silicon, Wheatstone bridge.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектромеханические системы (MEMS) пьезорезистивных датчиков давления на основе кремния находят широкое применение в различных сферах нашей жизни. Одной из таких областей является система контроля давления в шинах (TPMS), играющая важную роль в безопасности современного автомобиля. В ряде стран Европы, а также США, наличие данной системы в автомобиле является обязательным. Однако оказалось, что существует корреляция между давлением в шинах сельскохозяйственной техники, используемой в интенсивном земледелии, и урожайностью [1-3]. Поиск оптимального давления в шинах и его контроль с помощью датчиков давления являются важным звеном в увеличении урожайности, и как следствие, в увеличении прибыли. Такие системы уже сейчас активно внедряются отечественными сельхозпроизводителями. Постоянный рост роли импортозамещения приводит к необходимости разработки отечественной системы контроля давления в шинах и, разработка самого сенсора давления, как одного из главных элементов этой системы, является наиболее актуальной и значимой задачей.

## II. ПРИНЦИП РАБОТЫ СЕНСОРОВ ДАВЛЕНИЯ И ИХ КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

Для разработки сенсора давления необходимо провести глубокий анализ уже имеющихся конструктивных решений для сенсоров давления. Проведенный анализ позволит определить наиболее удобную схему исполнения сенсора давления, а также выбрать материалы для его реализации. На Рисунке 1

представлены основные элементы датчика давления: элемент питания (батарейка), сенсор давления и температурный сенсор, схема считывания, микроконтроллер и передатчик.

Первоначально MEMS позаимствовала процессы из индустрии интегральных схем, но произошла значительная эволюция процессов, специально используемых в MEMS, таких как поверхностная микрообработка [5] и объемная микрообработка [6]. Любой датчик давления, как правило, является лишь частью сложной системы контроля, предоставляющей информацию конечному пользователю о корректной и безопасной работе различных устройств, основанных на использовании жидкостей и газов [7]. С течением времени, неизбежным ростом цифровизации и переходом к электронным системам использование традиционных аналоговых датчиков давления (манометры, сильфоны, трубки Бурдона) [8] становится неудобным и громоздким при необходимости быстрой передачи данных в удобном формате в электронные системы анализа давления с использованием минимума пространства и максимальной эффективностью.

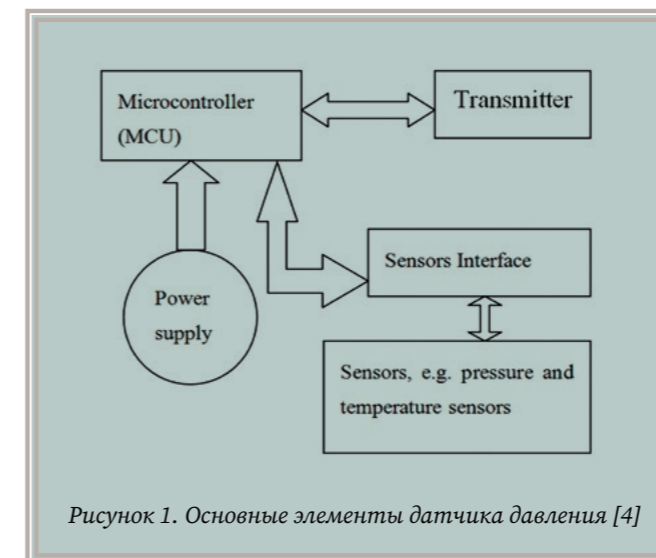


Рисунок 1. Основные элементы датчика давления [4]

Появление датчиков давления на базе MEMS позволяет решить данную проблему, поскольку в электромеханических датчиках входное давление непосредственно преобразуется в электрический сигнал. Важными преимуществами таких датчиков является возможность миниатюризации, использования полупроводниковых технологий в их изготовлении, а также низкая стоимость [9]. В зависимости от способа измерения выделяют емкостные, пьезоэлектрические, оптические и пьезорезистивные. О последних далее пойдет речь, как о наиболее широко применяемых в различных технологических и бы-

товых сферах. Основным элементом такого датчика является пьезорезистивный сенсор (Рисунок 2), включающий в себя подложку, диафрагму, пьезорезисторы и стекло. На подложке размещается гибкая диафрагма, на которой формируются пьезорезисторы, объединенные в мост Уитстона. Далее эта система методом анодного срачивания размещается на стекле.

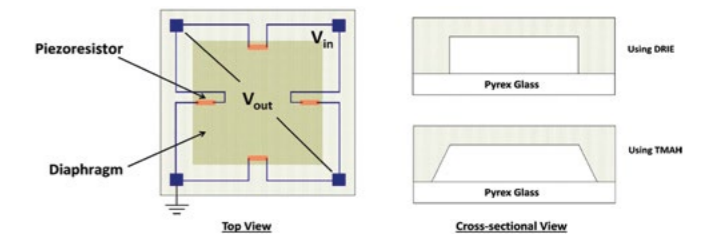


Рисунок 2. Схематическое представление пьезорезистивного сенсора давления

В качестве материала, используемого для пьезорезисторов, как правило, выступают поликремний, кремний, карбид кремния, углеродное волокно, углеродные нанотрубки, кремниевые нанопроволоки, а также алмаз. Диафрагма изготавливается из кремния, поликремния или нитрида кремния. В качестве основы используются монокристаллический кремний либо кремний на изоляторе. Известны датчики давления с МОП-транзистором в качестве чувствительного элемента, в которых изменение сопротивления возникает в результате деформации в области канала транзистора [12]. В настоящее время наблюдается тенденция к монолитной интеграции датчика давления со встроенной CMOS-схемой. Монолитная интеграция - путь к миниатюризации, поскольку она помогает снизить паразитную емкость и повысить надежность по сравнению с отдельным изготовлением и последующей сборкой [13].

Пьезорезистивность – это явление изменения сопротивления при приложении к нему механического напряжения. Напряжение, индуцируемое в кристалле, возникает из-за деформации, которая изменяет распределение потенциала, приводящее к изменению эффективной массы дырок, электронов и, следовательно, соответствующей ширины запрещенной зоны материалов, что приводит к изменению подвижности носителя заряда.

Пьезорезистивностью обладают несколько материалов, таких как кремний, поликремний и карбид кремния. Кремний является предпочтительным материалом для пьезорезистивных датчиков давления MEMS, поскольку кремниевые пьезорезисторы обладают высокой чувствительностью, обеспечивают

воспроизводимый выходной сигнал и обладают высокой механической стабильностью благодаря монокристаллической структуре кремния [14]. Кремний выбран в качестве материала для изготовления диафрагмы благодаря таким желаемым характеристикам, как отличные механические свойства и воспроизводимые упругие деформации. Кремний также не подвержен гистерезису и ползучести [15]. Основной проблемой, связанной с кремниевыми пьезорезисторами, полученными путем легирования кремниевой подложки примесями n-типа или p-типа, является проблема утечки в переходах при высоких температурах. При более низкой температуре (ниже 125 °С) пьезорезисторы изолируются от подложки p-n-переходом, и датчик работает должным образом. Но производительность датчика ухудшается при более высокой температуре из-за более высокого тока утечки. Возможным решением проблемы тока утечки является использование пьезорезисторов на основе поликремния. Эти пьезорезисторы изолированы друг от друга и от подложки оксидной пленкой, когда они соединены в конфигурации моста Уитстона в пьезорезистивных датчиках.

Как правило, пьезорезистивный датчик включает в себя четыре резистора, которые размещены в областях концентрации напряжений и расположены в конфигурации моста Уитстона с двумя продольны-

ми пьезорезисторами (R1 и R3) и двумя поперечными пьезорезисторами (R2 и R4). Предполагается, что диафрагма выполнена из кремния n-типа, при этом все резисторы изготовлены из кремния p-типа с их более длинными осями вдоль направления (110) (Рисунок 3). В исходном состоянии  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ , и изменение сопротивления  $\Delta R_i$  очень мало относительно  $R_0$ . Уравнение, связывающее выходное напряжение  $V_{out}$  и входное напряжение  $V_{in}$  в схеме моста Уитстона может быть выражено:

При изменении давления меняется сопротивление пьезорезисторов, что, согласно формуле (1), приводит к изменению выходного напряжения. Таким образом, можно установить зависимость напряжения от давления, приложенного к диафрагме.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных данных позволяет выделить несколько пунктов, опираясь на которые следует разрабатывать датчик давления:

- ▶ Основными элементами датчика давления являются элемент питания, сенсор давления и температурный сенсор, схема считывания.
- ▶ В настоящее время наибольшее распространение получили сенсоры на основе пьезорезистивного эффекта.
- ▶ Кремний является предпочтительным материалом для пьезорезистивных датчиков давления благодаря своей высокой механической стабильности.
- ▶ Наиболее распространены пьезорезистивные датчики давления на основе моста Уитстона.
- ▶ В настоящее время наблюдается тенденция к монолитной интеграции датчика давления со встроенной CMOS-схемой.

$$V_{out} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_{in} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) V_{in}$$

Рисунок 1. Основные элементы датчика давления [4]

### ЛИТЕРАТУРА

1. Калашников С. С., Пехутов А. С., Балданов М. Б. Оптимальное давление в шинах ходовых систем колесных тракторов // Устойчивое развитие сельских территорий и аграрного производства на современном этапе. – 2022. – С. 403-408.
2. Козлов Д. Г. К вопросу о выборе шин и балластировании трактора при выполнении технологических операций // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3. – С. 119-125.
3. Труфляк Е. В., Бухарцев М. С., Сотников Д. А. Эффективность применения шин низкого давления при возделывании озимого ячменя // Инженерные технологии и системы. – 2022. – Т. 32. – № 4. – С. 567-587.
4. Kubba A. E., Jiang K. A comprehensive study on technologies of tyre monitoring systems and possible energy solutions // Sensors. – 2014. – Т. 14. – № 6. – С. 10306-10345.
5. Bustillo J. M., Howe R. T., Muller R. S. Surface micromachining for microelectromechanical systems // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Т. 86. – № 8. – С. 1552-1574.
6. Kovacs G. T. A., Maluf N. I., Petersen K. E. Bulk micromachining of silicon // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Т. 86. – № 8. – С. 1536-1551.
7. Ripka P., Tipek A. (ed.). Modern sensors handbook. – London, UK: Iste, 2007. – Т. 61.
8. Tandeske D. Pressure sensors: selection and application // Sensor Review. – 2002. – Т. 22. – № 3. – С. 265-265.
9. Shaby S. M., Juliet A. V. Design and analysis of MEMS pressure sensor by using ANSYS // Proceedings of the 2nd international conference on mechanical, automotive and materials engineering (MAME'12), Bali (Indonesia). – 2012. – С. 132-135.
10. Eaton W. P., Smith J. H. Micromachined pressure sensors: review and recent developments // Smart Materials and Structures. – 1997. – Т. 6. – № 5. – С. 530.
11. Esashi M. et al. Vacuum-sealed silicon micromachined pressure sensors // Proceedings of the IEEE. – 1998. – Т. 86. – № 8. – С. 1627-1639.
12. Zhang Z. H. et al. A novel MEMS pressure sensor with MOSFET on chip // SENSORS, 2008 IEEE. – IEEE, 2008. – С. 1564-1567.
13. Judy J. W. Microelectromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications // Smart materials and Structures. – 2001. – Т. 10. – № 6. – С. 1115.
14. Peng C. T. et al. Performance and package effect of a novel piezoresistive pressure sensor fabricated by front-side etching technology // Sensors and Actuators A: Physical. – 2005. – Т. 119. – № 1. – С. 28-37.
15. Timoshenko S. et al. Theory of plates and shells. – New York: McGraw-hill, 1959. – Т. 2. – С. 240-246.

## ИСПЫТАНИЯ НА ЭТТ



# ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

**Автоматическая камера  
теплового удара АКТУ-001**



предназначена для проведения  
испытаний ЭКБ по методу 205-3  
ГОСТ РВ 5962 – 004.2 – 2012



предназначены для  
проведения отбраковочных  
испытаний и испытаний  
ЭКБ на надежность

По вопросам приобретения  
оборудования:

Тел.: +7 (473) 222-91-70  
E-mail: e.pletneva@niiet.ru



# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИОННО-ЛУЧЕВЫХ ПЛЁНОК Cu-Si ОТ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ

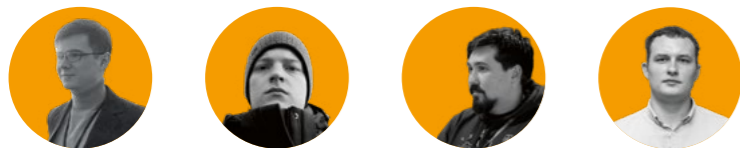
Investigation of the dependence of phase formation and electrophysical properties of Cosy ion beam films on the relative copper content

E.S. Kersnovsky<sup>1</sup>, I.V. Polshin<sup>1</sup>, K.A. Barkov<sup>1</sup>, N.S. Buylov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University, Faculty of Physics

<sup>2</sup>NIJET

E-mail: akersnovsky@phys.vsu.ru



<sup>1</sup>Е.С. Керсновский <sup>1</sup>И.В. Польшин <sup>2</sup>К.А. Барков <sup>1,2</sup>Н.С. Буйлов

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет, физический факультет.

<sup>2</sup> АО «НИИЭТ»

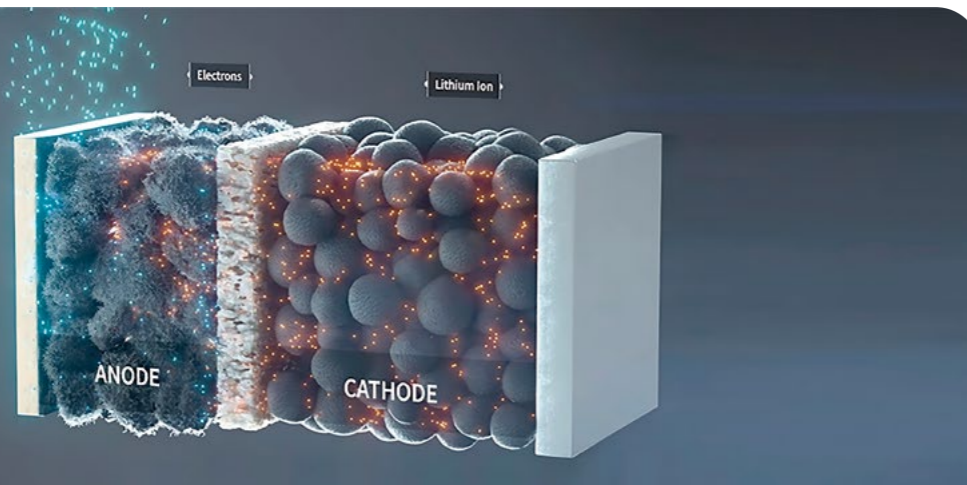
E-mail: akersnovsky@phys.vsu.ru

**АННОТАЦИЯ:** в настоящей работе методом рентгеновской дифракции был проведен анализ фазового состава плёнок Cu-Si различного содержания Cu~20, 40, 70 % (вес.), полученных ионно-лучевым распылением. Обнаружено, что во всех плёнках формируются фазы высокотемпературных силицидов меди  $\eta$ -Cu<sub>3</sub>Si и  $\eta'$ -Cu<sub>3</sub>Si. Концентрация этих фаз в плёнке закономерно увеличивается с ростом содержания меди. В плёнке с высоким содержанием меди формируется оксид Cu<sub>2</sub>O. Исследования электрофизических свойств пленки Cu-Si говорят о том, что сопротивление уменьшается с ростом содержания Cu относительно Si.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ионно-лучевые пленки Cu-Si, ионно-лучевое распыление, Cu<sub>3</sub>Si, рентгеновская дифракция, вольтамперные характеристики.

**ANNOTATION:** In this work, the X-ray diffraction method was used to analyze the phase composition of Cu-Si films of various Cu contents ~20, 40, 70% (wt.) obtained by ion beam sputtering. It was found that phases of high-temperature copper silicides  $\eta$ -Cu<sub>3</sub>Si and  $\eta'$ -Cu<sub>3</sub>Si are formed in all films. The concentration of these phases in the film naturally increases with an increase in the copper content. Cu<sub>2</sub>O oxide is formed in a film with a high copper content. Studies of the electrophysical properties of the Cu-Si film indicate that the resistance decreases with an increase in the Cu content relative to Si.

**KEYWORDS:** Cu-Si ion-beam films, ion-beam sputtering, Cu<sub>3</sub>Si, X-ray diffraction, voltage characteristics.



## I. ВВЕДЕНИЕ

Огромная часть современной электроники напрямую зависит от качества питающих ее вторичных химических источников тока многозарядного действия. Литий-ионные аккумуляторы своим появлением совершили целую революцию в мире электронной техники. Однако эволюция электроники сопровождается увеличением потребляемых мощностей, поэтому основным вопросом модернизации аккумуляторных батарей является повышение их ёмкости и циклических характеристик зарядки-разрядки [1]. Одним из вариантов решения этой проблемы является замена углерода в качестве анодного материала на кремний, поскольку кремний обладает большей теоретической ёмкостью [2,3]. Хотя эта идея теоретически и может в значительной степени улучшить характеристики батарей, кремний сам по себе является довольно хрупким материалом, он подвержен растрескиванию, а также объемной деформации после некоторого числа циклов зарядки-разрядки [4,5]. Внедрение наноточек меди в матрицу кремния может послужить оптимальным решением данной проблемы, поскольку медь - пластичный и твердый металл, а также высокая проводимость меди может улучшить перенос электронов [6].

В данной работе был проведен эксперимент по исследованию зависимости фазообразования и изменения электрофизических характеристик тонких ионно-лучевых пленок Cu-Si от относительного содержания меди.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТ

Плёнки Cu-Si, толщиной  $d \sim 500$  нм. были получены на кремниевых подложках Si(100) методом ионно-лучевого распыления составной мишени. Описание метода представлено в работах [7-9]. Составная мишень, размерами 100x200 мм, представляла собой медную пластину чистотой 99,99% с кремниевыми навесками марки КДБ-12 (размером 100x10 мм). Навески были расположены с постоянно увеличивающимся расстоянием друг от друга таким

образом, чтобы обеспечить градиент состава вдоль поверхности получаемой пленки. Подробнее со структурой мишени можно ознакомиться в работе [9]. Осаждение пленок осуществлялось в вакуумной камере (10-6 Torr) в среде Ar, чистотой 99,992 % при рабочем давлении газа  $8 \cdot 10^{-4}$  Torr. Источником ионно-лучевого распыления служила магнитная система, состоящая из постоянных магнитов, магнитопровода и анода. Ионизация аргона осуществлялась в магнитном зазоре в непосредственной близости от анода. Под действием электрического поля ионы аргона выбрасывались из плазмы в виде высокоэнергетического ионного пучка, и направлялись на мишень. Оптимальный ток плазмы составлял ~170 мкА. Скорость осаждения пленки Cu-Si при таком режиме составляла ~1,5 мкм/ч [10,11].

Анализ элементного состава плёнок Cu-Si проводился методом энергодисперсионной спектроскопии (при энергии первичного пучка 20 кэВ) на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380LV с микроанализатором INCA250.

Исследование формирования кристаллических фаз в плёнках Cu-Si осуществлялось методом рентгеновской дифракции на дифрактометре общего назначения ДРОН 4-07 с медным источником рентгеновского излучения ( $\lambda$  Cu  $K\alpha_1 = 1,5406$  Å).

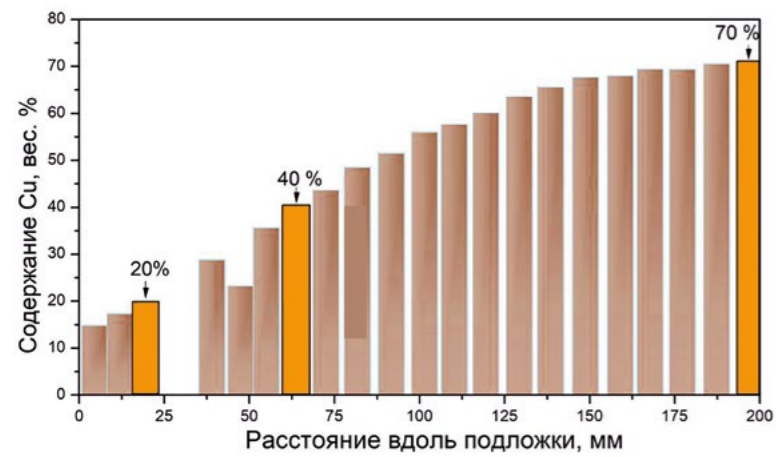
Исследование зависимости электрофизических свойств от содержания меди для образцов проводилось по вольтамперным характеристикам.

Измерения осуществлялись зондовым методом на постоянном токе, при напряжении от -5 до 5 В, с шагом 0,5 В. Вольфрамовые зонды установки располагались в геометрическом центре образца размером 1x1 см. Расстояние между зондами оставалось неизменным в процессе измерений и составляло 0,6 см.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование элементного и фазового состава плёнок Cu-Si. Элементный анализ ионно-лучевых плёнок Cu-Si методом энергодисперсионной микроскопии по-

**Нанокompозитные структуры металл-кремния для анодов литий-ионных аккумуляторов**



**Рис. 1** - Зависимость относительного содержания меди в плёнке Cu-Si вдоль поверхности пластины

казал, что вдоль поверхности пластины был получен градиент состава с относительным содержанием меди Cu ~ 15 % (вес.) на одном крае пластины и Cu ~ 70 % (вес.) на другом крае (Рис. 1). Таким образом, ионно-лучевое распыление подобной составной мишени, как была описана выше, позволяет получить необходимое количество образцов для комплексного анализа зависимостей фазообразования от относительного содержания меди в плёнках Cu-Si. В данной работе будут представлены три образца с высоким, низким и промежуточным содержанием меди, Cu = 20, 40, 70 % (вес.) соответственно.

Исследование зависимостей формирования кристаллических фаз в ионно-лучевых пленках Cu-Si проводилось с помощью интерпретации рентгеновских дифрактограмм, полученных для данных пленок (Рис. 2). На рентгеновских дифрактограммах всех пленок присутствует интенсивный рефлекс в области углов  $2\theta = 28,58^\circ$ , связанный с

монокристаллической кремниевой подложкой Si (111), а также менее интенсивный рефлекс при значении  $2\theta = 25,57^\circ$ , обусловленный отражением Cu K $\beta$  от той же кристаллографической плоскости подложки. Из-за высокой интенсивности дифракционных линий подложки дифрактограммы представлены в логарифмическом масштабе.

В плёнке Cu-Si с низким содержанием меди Cu ~ 20 % (вес.) на дифрактограмме наблюдается двоякий низкоинтенсивный рефлекс в области углов  $2\theta = 44-45^\circ$ . Первая компонента данного дифракционного рефлекса при значении угла  $2\theta = 44,52^\circ$  по величине межплоскостного расстояния  $d = 2,033 \text{ \AA}$  соответствует отражению от кристаллографической плоскости (110) высокотемпературной модификации  $\eta$ -Cu $_3$ Si (P-3m1) [12]. В свою очередь, вторая компонента этого рефлекса со значением  $2\theta = 45,03^\circ$  и межплоскостным расстоянием  $d = 2,009 \text{ \AA}$  относится к высокотемпературной фазе  $\eta$ -Cu $_3$ Si с орторомбической элементарной ячейкой ( $a = 7,676 \text{ нм}$ ,  $b = 0,700 \text{ нм}$ ,  $c = 2,194 \text{ нм}$ ) [12].

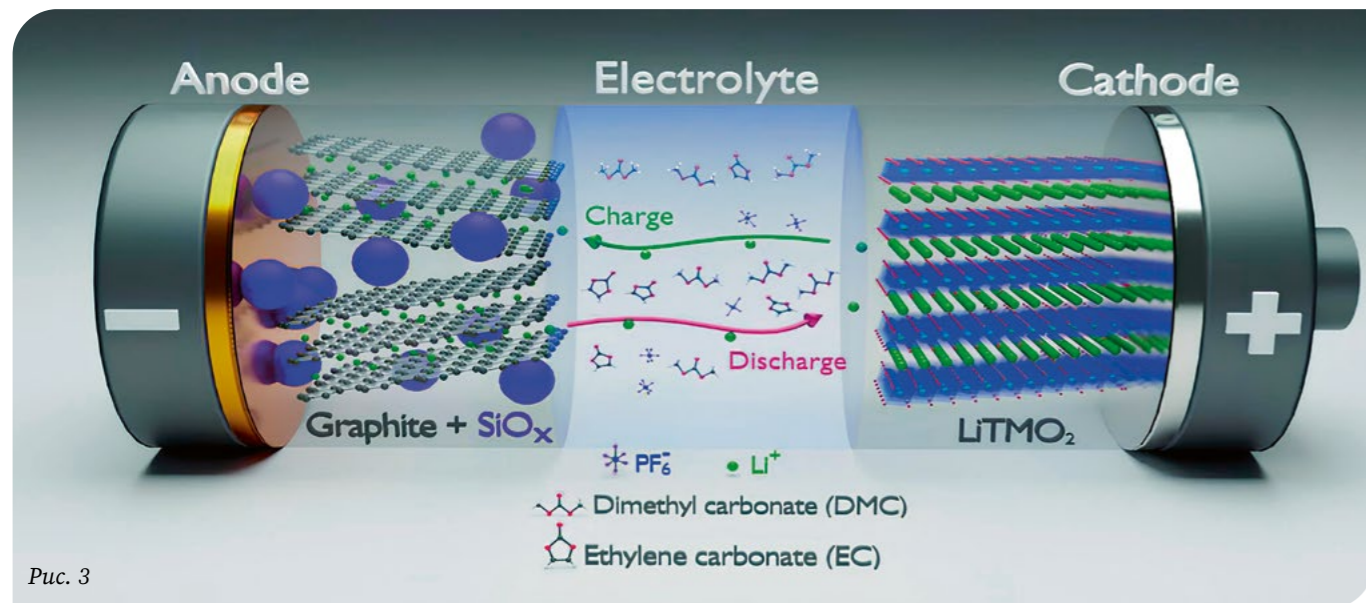
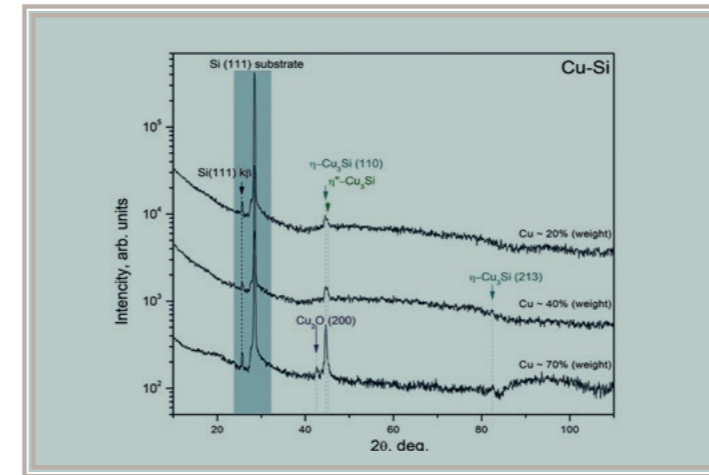


Рис. 3



**Рис. 2** - Рентгеновские дифрактограммы плёнок Cu-Si с относительным содержанием меди Cu ~ 20, 40 и 70% (вес.), соответственно

Увеличение содержания меди в плёнке Cu-Si до Cu ~ 40% (вес.) приводит к росту интенсивности дифракционных рефлексов от фаз  $\eta$ -Cu $_3$ Si и  $\eta$ -Cu $_3$ Si в области углов  $2\theta = 44-45^\circ$ , а также к появлению низкоинтенсивного рефлекса при значении угла  $2\theta = 82,37^\circ$  ( $d = 1,168 \text{ \AA}$ ), который соответствует отражению от плоскости (213) той же высокотемпературной фазы  $\eta$ -Cu $_3$ Si.

Дальнейшее увеличение содержания меди в системе до Cu ~ 70% (вес.) приводит к увеличению интенсивности всех описанных выше рефлексов, кроме того, при высоком содержании меди в плёнке медь начинает частично окисляться, на что указывает низкоинтенсивный рефлекс, появившийся при значении  $2\theta = 42,50^\circ$  ( $d = 2,213 \text{ \AA}$ ). Данный рефлекс связан с фазой Cu $_2$ O (200) [13].

Таким образом, рентгенофазовый анализ методом рентгеновской дифрактометрии показывает, что в плёнках Cu-Si различного состава Cu ~ 20, 40, 70 % (вес.) формируются высокотемпературные

фазы  $\eta$ -Cu $_3$ Si и  $\eta$ -Cu $_3$ Si. Увеличение содержания меди в плёнке приводит к увеличению концентрации данных фаз, что наблюдается по увеличению относительной интенсивности их дифракционных рефлексов. Также в плёнке с наивысшим содержанием меди часть меди окисляется, формируя оксид Cu $_2$ O. Однако на дифрактограммах всех плёнок не наблюдаются рефлексы от кремния и соединений на его основе, что говорит о аморфном состоянии Si в исследуемой системе Cu-Si.

Рис. 3 и 4-2 Взяты из M. Armand et al. Journal of Power Sources 479 (2020) 228708

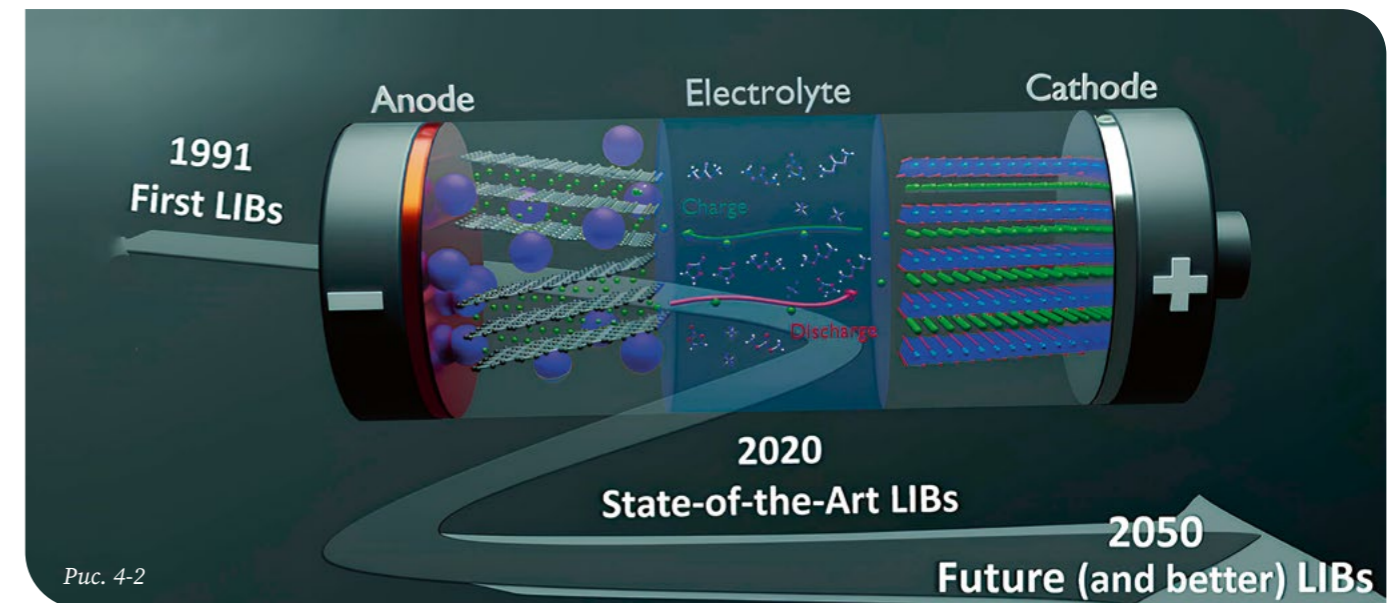


Рис. 4-2



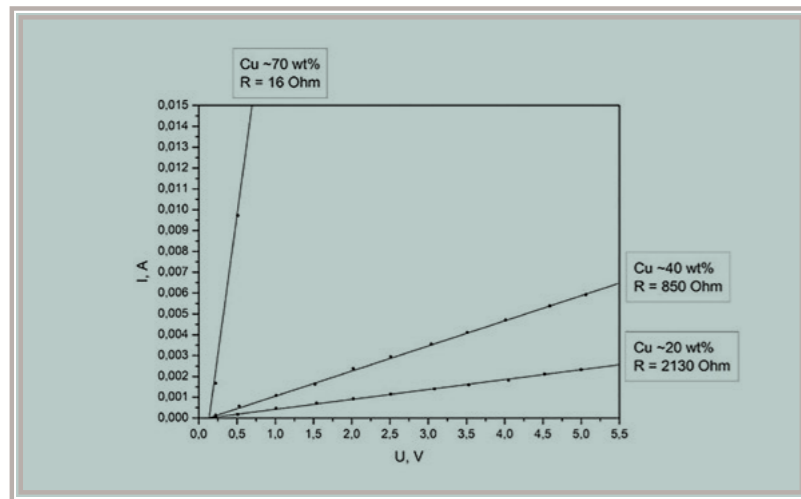


Рис. 3 - Вольтамперные характеристики для образцов с содержанием Cu ~20, ~40 и ~70 вес. %

Вольтамперные характеристики исследуемых образцов оказались линейными, поэтому для расчета сопротивления был применен закон Ома. Было замечено, что с увеличением содержания Cu в пленке от ~20 вес. % до ~70 вес. % происходит уменьшение сопротивления на два порядка. Из таблицы 1 наглядно видно, как изменяется сопротивление образцов в зависимости от содержания меди в пленке Cu-Si.

Таблица 4 - Значение сопротивления в зависимости от содержания меди

Cu, вес.%	R, Ом
20	2130
40	850
70	16

Таким образом, электрофизический анализ пленок Cu-Si обнаруживает рост проводимости образцов с увеличением содержания Cu. Данную закономерность можно связать с ростом содержания фазы  $Cu_3Si$ , выявленной методами рентгеновской дифракции, что коррелирует с результатами работы [14].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ рентгеновских дифрактограмм ионно-лучевых пленок Cu-Si, а также измерения их вольтамперных характеристик показали, что:

- ▶ во всех пленках формируются две высокотемпературные фазы низших силицидов меди  $\eta-Cu_3Si$  и  $\eta-Cu_3Si$ . Причем концентрация этих фаз в пленке закономерно увеличивается с ростом содержания меди.
- ▶ в плёнке Cu-Si с большим содержанием меди Cu~70 % (вес.) часть меди окисляется, формируя оксид  $Cu_2O$ .
- ▶ чистый кремний в ионно-лучевых плёнках Cu-Si различного состава находятся в аморфном состоянии.
- ▶ увеличение содержания Cu в пленке от 20 до 70 вес. % приводит к уменьшению сопротивления на 2 порядка, от 2130 до 16 Ом.



### БЛАГОДАРНОСТЬ:

Исследование выполнено за счет гранта  
Российского научного фонда  
№ 23-79-10294.  
<https://rscf.ru/project/23-79-10294/>

Результаты исследований частично получены  
на оборудовании Центра коллективного пользования  
Воронежского государственного университета.  
URL: <http://ckp.vsu.ru>.

### ЛИТЕРАТУРА



- [1] S.O. Kim, A. Manthiram, Low-cost carbon-coated Si-Cu<sub>3</sub>Si-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite anodes for high-performance lithium-ion batteries, J. Power Sources 332 (2016) 222–229. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.089>.
- [2] A. Manthiram, C. Tsang, Electrode materials for rechargeable lithium batteries, An. Des La Asoc. Quim. Argentina 84 (1996) 265–270. <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-8781-3>.
- [3] H. Li, X. Huang, L. Chen, G. Zhou, Z. Zhang, D. Yu, Y. Jun Mo, N. Pei, Crystal structural evolution of nano-Si anode caused by lithium insertion and extraction at room temperature, Solid State Ionics 135 (2000) 181–191. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(00\)00362-3](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(00)00362-3).
- [4] D.C. Johnson, J.M. Mosby, S.C. Riha, A.L. Prieto, Synthesis of copper silicide nanocrystallites embedded in silicon nanowires for enhanced transport properties, J. Mater. Chem. 20 (2010) 1993–1998. <https://doi.org/10.1039/b919281f>.
- [5] W. Xing, A.M. Wilson, K. Eguchi, G. Zank, J.R. Dahn, Pyrolyzed Polysiloxanes for Use as Anode Materials in Lithium Ion Batteries, J. Electrochem. Soc. 144 (1997) 2410–2416. <https://doi.org/10.1149/1.1837828>.
- [6] H.J. Ahn, Y.S. Kim, W.B. Kim, Y.E. Sung, T.Y. Seong, Formation and characterization of Cu-Si nanocomposite electrodes for rechargeable Li batteries, J. Power Sources 163 (2006) 211–214. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.077>.
- [7] A.M. Saad, A.K. Fedotov, J.A. Fedotova, L.A. Svito, B. V. Andrievsky, Y.E. Kalinin, V. V. Fedotova, V. Malyutina-Bronskaya, A.A. Patryn, A. V. Mazanik, A. V. Sitnikov, Characterization of (Co<sub>0.45</sub>Fe<sub>0.45</sub>Zr<sub>0.10</sub>)x(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub> nanocomposite films applicable as spintronic materials, Phys. Status Solidi C Conf. 3 (2006) 1283–1290. <https://doi.org/10.1002/pssc.200563111>.
- [8] I. Svito, A.K.F. Fedotov, T.N. Koltunowicz, P. Zukowski, Y. Kalinin, A. Sitnikov, K. Czarnacka, A. Saad, Hopping of electron transport in granular Cux(SiO<sub>2</sub>)<sub>1-x</sub> nanocomposite films deposited by ion-beam sputtering, J. Alloys Compd. 615 (2015) S371–S374. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.136>.
- [9] E.P. Domashevskaya, M.A. Mahdy, S.A. Ivkov, A. V. Sitnikov, I.A. Mahdy, Asymmetric magnetization reversal processes in amorphous composites (Fe<sub>40</sub>Co<sub>40</sub>B<sub>20</sub>)x(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sub>100-x</sub>, Mater. Chem. Phys. 277 (2022) 125480. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125480>.
- [10] V.A. Terekhov, E.P. Domashevskaya, S.I. Kurganskii, D.N. Nesterov, K.A. Barkov, V.R. Radina, K.E. Velichko, I.E. Zanin, A. V. Sitnikov, B.L. Agapov, Formation of the Al<sub>3</sub>Si metastable phase in Al-Si films obtained by ion-beam sputtering according to

# ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ МЕТОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ



<sup>1</sup>Ю.Ю. Громов



<sup>2</sup>С.В. Артемова



<sup>2</sup>П.И. Карасев



<sup>1</sup>Almali Ahmed Adnan Lateef

## Fuzzy methods for color quantization

<sup>1</sup>Yu.Yu. Gromov  
<sup>2</sup>S.V. Artemova  
<sup>2</sup>P.I. Karasev  
<sup>1</sup>Almali Ahmed Adnan Lateef

<sup>1</sup>ТГТУ, gromovtambov@yandex.ru  
<sup>2</sup>РТУ МИРЭА, artemova\_s@mirea.ru  
<sup>2</sup>РТУ МИРЭА, karasev@mirea.ru  
<sup>1</sup>ТГТУ, almaliyahmedadnan@mail.ru

**АННОТАЦИЯ:** в настоящей статье представлен способ проектирования, используя нечеткие методы для достижения лучшей обработки нечеткости. Для разработки методов будет создана база правил. Задача нечеткости данных решается с помощью функций плотности вероятности и функций распределения вероятностей, тогда как анализ данных излагается с привязкой к каждому из «правил анализа» нечеткого множества, которое будет получено путем применения функции агрегирования, которая будет определяться с помощью оператора OWA.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** компьютерное зрение, обработка изображений, нечеткие методы, функции агрегирования, функции принадлежности, операторы OWA.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Подавляющее большинство методов, реализующих низкоуровневую обработку изображений, вынуждены анализировать расплывчатые данные. Расплывчатость присутствует на изображениях из-за нескольких факторов, которые трудно избежать с помощью методов, используемых в настоящее время для захвата изображений и оцифровки. Так, с тех пор как было представлено наличие неопределенности, отсутствия случайности, компонента в переменных систем компьютерного зрения, многие исследователи обращались к решению этих задач с помощью нечетких методов.

► В 1970х было предположено, что результаты сегментации являются нечеткими подмножествами

плоскости, но решения, которые были на тот момент были четкими.

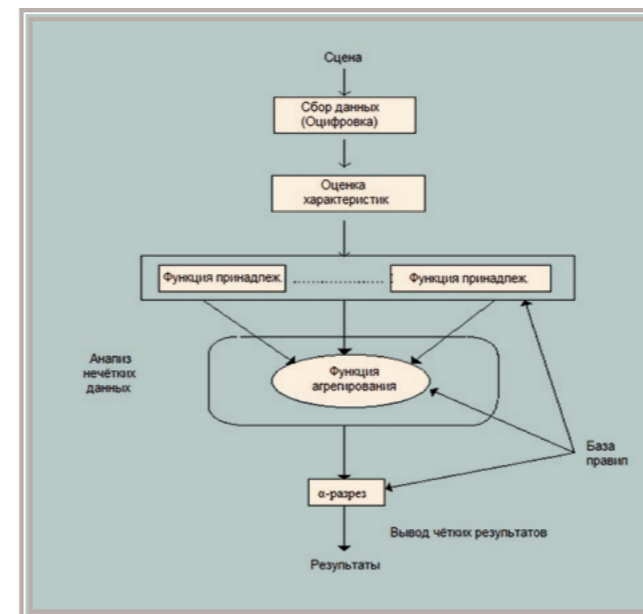
► В 1980х было предположено, что любой метод извлечения контуров хорошо работает при отсутствии шума. Известно, что шум является одним из факторов, вносящих большую неопределенность в изображения.

► В 1990-е годы было разработано множество методов, вводящих в низкоуровневый процесс обработку неопределенности. Хотя все они представляют собой базовые модули, которые должны построить метод, основанный на нечетких методах, отсутствуют как модель, позволяющая определить преобразование дискретного множества данных в нечеткое множество (фаззификацию), так и способ анализа данных. Таким образом, в методах эти процессы оказываются реализованными с помощью едва ли оправданных уравнений [1-3].

Многие работы, использующие нечеткие методы, формализуют метод с помощью правил и реализуют эти правила с помощью набора уравнений. Именно поэтому в настоящей работе был использован именно этот способ проектирования, а предложенный метод предполагает формализацию метода с помощью правил, вводящих руководящие принципы для их реализации.

## II. СТРУКТУРА МЕТОДА

Предлагаемый метод представляет собой разработку методов компьютерного зрения, позволяющих обрабатывать неопределенность. Эти методы состоят из пяти модулей, как это показано на диаграмме на [рисунке 1](#).



**Рисунок 1.** Далее описывается функция, выполняемая каждым из модулей

### A. База правил

В этом модуле будут описаны в форме правил несколько шагов, которые необходимо выполнить, чтобы достичь цели метода. С помощью этих правил будут сформированы характеристики, которые необходимо анализировать на нескольких этапах метода.

Учитывая структуру предложенного метода, хорошим решением для определения правил является использование правил типа Мамдами (Mamdani) [4-5]. Кроме того, в этом модуле должен быть представлен способ, которым будет оцениваться каждая из анализируемых характеристик.

### B. Оценка характеристик

Здесь математические функции или, в зависимости от обстоятельств, способ оценки характеристик будут определены в соответствии с тем, что было введено в модуле 2.1.

Характеристики должны быть оценены для каждого пикселя в изображении, независимо от того, учитывается ли его собственная информация или та, которая находится в его локальной окрестности. Это способ сделать это, потому что необходимо реализовать методы низкого уровня.

### V. Преобразование дискретного множества в нечеткое множество (фаззификация)

В этом модуле, в связи с типом правил, используемых при описании метода (модуль 2.1), должны быть определены нечеткие множества «fci», связанные с каждой характеристикой «ci» [6-7].

Определение функций принадлежности, связанных

с этими нечеткими множествами, осуществляется с помощью функции плотности вероятности, полученной в результате оценки характеристик в образце изображения, где такая характеристика задана.

### G. Функции анализа и агрегирования данных

В этом модуле правила, касающиеся анализа характеристик, реализуются с помощью агрегационных функций. Таким образом, для каждого именованного правила определяется следующая карта  $f\alpha_i : [0, 1]^n \rightarrow [0, 1]$  (1) Эти функции будут определены с помощью операторов OWA, веса которых получаются при анализе оценок, выполненных над эталонным изображением.

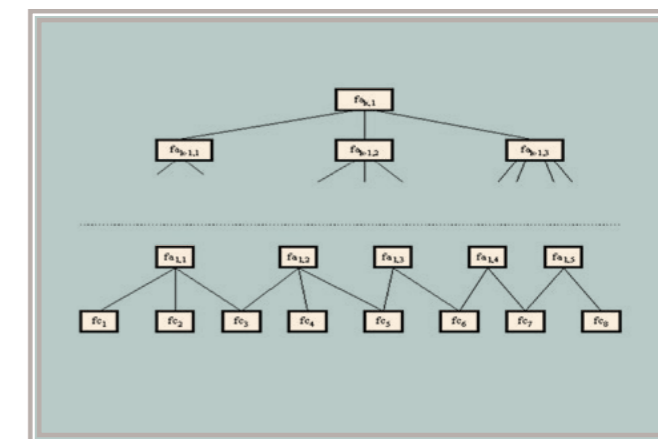
### D. Получение результата (решение задачи) методами нечеткой логики

Окончательные результаты получаются из соответствующих нечетких множеств с помощью решения задачи методами нечеткой логики, которая выполняется с помощью  $\alpha$ -разреза, где  $\alpha$  равно 0,5 [8-10].

## III. БАЗА ПРАВИЛ

Это самый важный модуль, потому что именно там будет описан метод.

Для проведения описания метода была предложена структура на [рисунке 2](#). Эта структура позволяет регулировать как характеристики, которые должны быть проанализированы, так и способ, которым такой анализ должен быть выполнен.



**Рисунок 2.** Структура для регулирования характеристик

Корневой узел связан с элементом, пытающимся обнаружить / найти внутри изображения. Этот элемент описывается с помощью элементов более низкого уровня и так далее. Таким образом, каждый уровень на рисунке представляет элементы с более простой структурой от корня до листьев, эти эле-

менты, имеющие базовую структуру, присутствуют на изображении, если определенные характеристики даны в местном соседстве.

Все узлы дерева являются нечеткими множествами,  $f_{xi,j}$  описываются с помощью правил, а листья  $f_{ci}$  - нечеткие множества, связанные с характеристиками. В процессе анализа способ получения нечетких множеств  $f_{xi,j}$  будет описываться с помощью правил Мамдами (Mamdani), так что элемент находится на изображении, если составные элементы присутствуют, в локальном соседстве. Также в процессе анализа будет определен способ, которым должны быть оценены характеристики.

#### IV. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДИСКРЕТНОГО МНОЖЕСТВА В НЕЧЕТКОЕ МНОЖЕСТВО (ФАЗЗИФИКАЦИЯ)

С целью узнать степень, с которой каждый пиксель в изображении подходит под характеристики, необходимо связать нечеткое множество с каждым из них. Для получения функций принадлежности, связанных с этими нечеткими множествами, были определены следующие «функции фаззификации»:

$$f_{c_i}: \mathcal{R} \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

эти функции будут вычисляться, начиная с функции плотности вероятности полученных данных, оценивающих соответствующую характеристику по пикселям или областям эталонного изображения, где такая характеристика задана.

Использование функций плотности вероятности связано с тем, что на уровень насыщенности серого цвета в черно-белой репродукции для каждого пикселя изображения влияет:

- ▶ наличие белого шума на изображениях.
- ▶ процесс оцифровки.

оба имеют случайное пространственное распределение.

Таким образом, для получения функций фаззификации процесс работает в соответствии со следующими правилами:

**R1:**  $f_{ck}(p(i,j))$  увеличивается, когда функция плотности вероятности для оцениваемого значения характеристики  $k$  в пикселе  $(i, j)$  близка к максимуму.

**R2:**  $f_{ck}(p(i,j))$  увеличивается, когда оцененное значение характеристики  $k$  в пикселе  $(i, j)$  близко к медиане расстояний.

Эти правила реализуются следующим образом:

**Правило R1:**

$$f_{1c_k}(p(i,j)) = p_{c_k} p(i,j) / \max(p_{c_k}) \quad (3)$$

где:  $p_{c_k}$  - значение функции плотности вероятности, связанной с характеристикой  $ck$  для пикселя  $p(i,j)$ .

$\max(p_{c_k})$  - наибольшее значение функции плотности вероятности, связанной с характеристикой  $ck$ . (4)

**Правило R2:**

$$f_{2c_k}(p(i,j)) = \min\{1, P_{c_k}(p(i,j)) / 0.25\}$$

где:  $P_{c_k}(p(i,j))$  - значение функции распределения вероятностей, связанной с характеристикой  $ck$  для пикселя  $p(i,j)$ .

Наконец,  $f_{c_k}(p(i,j))$  вычисляется следующим образом: (5)

$$f_{c_k}(p(i,j)) = 0.5 * f_{1c_k}(p(i,j)) + 0.5 * f_{2c_k}(p(i,j))$$

#### V. ФУНКЦИИ АНАЛИЗА И АГРЕГИРОВАНИЯ ДАННЫХ

В этом модуле анализ данных осуществляется в соответствии с информацией, содержащейся в базе правил. Каждое правило, содержащееся в упомянутой базе, порождает нечеткое множество, которое будет получено путем агрегирования нечетких множеств, названных в соответствующем правиле, следуя указанным в нем руководящим принципам. Принимая во внимание характер анализируемой задачи, будем считать, что степень принадлежности каждого элемента  $(i, j)$  к новому нечеткому множеству удовлетворяет следующим условиям: (6)

$$\min\{f_{s_{n,p}}(i,j)\} < f_{a_{l,m}}(i,j) < \max\{f_{s_{n,p}}(i,j)\}$$

где:

$f_{s_{n,p}}(i,j)$  это степени принадлежности элемента  $(i, j)$  к нечетким множествам, которые будут агрегированы.

$f_{a_{l,m}}(i,j)$  - степень принадлежности элемента  $(i, j)$  к новому нечеткому множеству.

Ранее для определения функций агрегирования было учтено, в дополнение к предыдущему разделу, что все степени принадлежности элемента  $(i, j)$  к предшествующему  $f_{a_{l,m}}(i,j)$  - одинаково вносят вклад в получение степени принадлежности этого элемента к последующему  $f_{a_{l,m}}(i,j)$  - . Таким образом, хорошее решение - использовать операторы OWA, введенные Ягером (Yager).

Проблема при использовании операторов OWA - это получение весов. С целью решения этой проблемы для данного правила, например применяется следу-

ющее: если  $(i, j)$  принадлежит  $f_{s_{n,p}}(i,j)$  принадлежит  $f_{s_{n,p+1}}(i,j)$ ,  $(i, j)$ , принадлежит  $f_{s_{n,p+q}}(i,j)$ , то  $(i, j)$  принадлежит  $f_{a_{n-l,m}}(i,j)$  - из которых известны предшествующие функции (и способ их получения, процедура получения последующих следующая:

- ▶ внутри наборов эталонов изображения были расположены элементы, составляющие последовательность, чтобы получить степень их принадлежности к предшествующим функциям  $f_{s_{n,p}}(i,j), f_{s_{n,p+1}}(i,j), \dots, f_{s_{n,p+q}}(i,j)$
- ▶ Предыдущая информация анализируется в несколько шагов таким образом, что веса операторов получаются в последовательных приближениях.

Наконец, полученные веса должны удовлетворять тому, что по крайней мере 85% элементов, классифицированных априори как принадлежащие последовательному множеству, будут иметь степень принадлежности, равную или большую 0,5.

#### VI. РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагаемый метод был применен при разработке трех классов методов, которые анализируют характеристики изображений на низком уровне, это следующие методы:

- ▶ Обнаружение контура.
- ▶ Обнаружение структур.
- ▶ Анализ естественной структуры.

В трех случаях результаты были весьма удовлетворительными, как с точки зрения простоты разработки метода, так и с точки зрения полученных результатов.

Хотя трудно оценить полученные результаты и сопоставить их с теми, которые предоставляются

существующими методами, тем не менее можно отметить, что:

- а)** В случае обнаружения структуры не было обнаружено опубликованных результатов ни о типе обнаруженных структур, ни о типе анализируемых характеристик. Следует отметить, что 90% структуры было хорошо детектировано (необходимо учитывать, что анализируемые структуры имеют большой разброс характеристик) и, когда шум был добавлен в Изображение, наблюдался очень устойчивое поведение метода таким образом, что его эффективность снизилась только до 83%.
- б)** При анализе естественных структур метод очень хорошо работает с изменчивостью характеристик. В данном случае результаты считаются очень хорошими, так как его эффективность составляет 90%.
- с)** В случае выделения контуров было замечено, что с помощью разработанного метода были обнаружены контуры с меньшим контрастом и местоположение было определено с большей точностью.

#### VII. ВЫВОДЫ

В качестве выводов необходимо сказать, что представленный метод облегчает проектирование методов, использующих нечеткие методы для обработки неопределенности.

Следует отметить два решения:

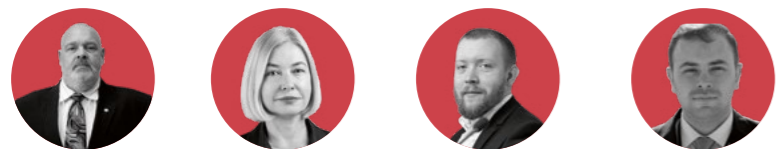
- ▶ Вводятся направляющие линии для размытия значений характеристик, которые адаптируются к виду расплывчатости, присутствующей в изображениях.
- ▶ Метод выполняет анализ данных с помощью операторов OWA, реализующих функции, описанные в правилах, которые должны применяться при обработке данных.

#### ЛИТЕРАТУРА



1. Karatach, S. A. Parallel Implementation of Evolutionary Learning of a Fuzzy System with Non-Singleton Fuzzification // S. A. Karatach, V. G. Sinuk // Journal of Information Technologies and Computing Systems. - 2023. - No. 2. - P. 113-122. - DOI 10.14357 // 20718632230212. - EDN XLCJNM.
2. Computer Science for Engineering and Education IV : ICCSEEA: International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications : Springer, Cham, 2021. - P. 147-161. - DOI 10.1007/978-3-030-80472-5\_13. - EDN APPPMU.
3. Синюк, В. Г. Методы вывода для нечетких систем при несинглтонной фаззификации // В. Г. Синюк, С. В. Кулабухов // Информационные технологии и вычислительные системы. - 2023. - № 2. - С. 106-112. - DOI 10.14357/20718632230211. - EDN IOSWBJ.
4. Application of a hybrid method of machine learning for description and on-line estimation of methane hazard in mine workings // M. Sikora, Z. Krzystanek, B. Wojko, K. Spiechowicz // Journal of Mining Science. - 2011. - Vol. 47, No. 4. - P. 493-505. - DOI 10.1134/s1062739147040125. - EDN IDTPBR.
5. Семенова, Н. Г. Разработка алгоритма автоматизированного управления электроснабжением коттеджа на основе теории нечеткого вывода Mamdani // Н. Г. Семенова, К. Н. Умарханов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием), Оренбург, 23-25 января 2020 года. - Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2020. - С. 2811-2815. - EDN WEPSCFA.
6. Kurochkin, A. Fuzzy logic inference ruleset augmentation with sample data in medical decision-making systems // A. Kurochkin, V. Sadov // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. - 2019. - No. 3. - P. 329-332. - EDN FDMAR.
7. Kurniadi, D. Implementasi Logika Fuzzy Mamdani Pada Sistem Prediksi Calon Penerima Program Keluarga Harapan / D. Kurniadi, F. Nuraeni, D. Jaelani // Jurnal Algoritma. - 2022. - Vol. 19, No. 1. - P. 151-162. - DOI 10.33364 // algoritma/v.19-1.1016. - EDN MNEHIG.
8. Lazzarini, B. Some considerations on input and output partitions to produce meaningful conclusions in fuzzy inference // B. Lazzarini, F. Marcelloni // Fuzzy Sets and Systems. - 2000. - Vol. 113, No. 2. - P. 221-235. - EDN AFDYFR.
9. Arroyo-Figueroa, G. Modeling Dynamical Causal Interactions with Fuzzy Temporal Networks for Process Operation Support Systems // G. Arroyo-Figueroa, R. Herrera-Avelar // Lecture Notes in Computer Science. - 2002. - Vol. 2313. - P. 0440. - EDN BERZGV.
10. A neurofuzzy algorithm for learning from complex granules / B. Apolloni, S. Bassis, J. Rota [et al.] // Granular Computing. - 2016. - Vol. 1, No. 4. - P. 225-246. - DOI 10.1007/s41066-016-0018-1. - EDN GUDNLH.

# СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

<sup>1</sup>Ю.Ю. Громов<sup>2</sup>С.В. Артемова<sup>2</sup>П.И. Карасев<sup>1</sup>Shamsuldaeen Haidar Abdulwahhab H

## Support system decision making identification and image processing

Yu.Yu. Gromov<sup>1</sup>  
S.V. Artemova<sup>2</sup>  
P.I. Karasev<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Shamsuldaeen Haidar Abdulwahhab H

<sup>1</sup>ТГТУ, gromovtambov@yandex.ru  
<sup>2</sup>ПТУ МИРЭА, artemova\_s@mirea.ru  
<sup>2</sup>ПТУ МИРЭА, karasev@mirea.ru  
<sup>1</sup>ТГТУ, shamsuldaeenhaidar@mail.ru

**АННОТАЦИЯ:** в настоящей работе рассматривается система поддержки принятия решений (СППР), основанная на нечетких методах, применяемых для идентификации и обработки изображений, полученных при мониторинге и управлении процессами запыленных помещений. СППР поддерживает решения оператора вентиляции в сложных и непредвиденных газодинамических ситуациях при чрезвычайных ситуациях.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** система поддержки принятия решений, нечеткие методы, процессы мониторинга и управления.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывный и активный мониторинг и контроль атмосферы запыленных помещений очень важен, а также способствует эффективному функционированию систем вентиляции и дегазации.

Постоянное совершенствование и модернизация автоматизированных систем управления вентиляцией (АСУВ) не могли исключить участия человека (оператора) в контуре управления. В результате в дополнение к традиционному программному обеспечению поддержки АСУВ была разработана система поддержки принятия решений (СППР) на основе обработки газодинамических изображений для поддержки решений оператора АСУВ в сложных и неожиданных газодинамических ситуациях при чрезвычайных ситуациях.

## II. СППР: ЭВОЛЮЦИЯ ИДЕИ

Атмосфера сильно запыленных помещений чрезвычайно сложна для мониторинга и контроля. Сложность заключается в том, что объект никогда

не может быть полностью наблюдаем и что большая часть получаемой информации является стохастической и неструктурированной. Измерения атмосферы таких помещений чрезвычайно сложны для интерпретации из-за множества газодинамических ситуаций и их возникновения. Следовательно, это вызывает большие трудности в принятии эффективных решений и необходимых управляющих воздействиях оператора [1-3].

С другой стороны, есть ряд опытных операторов и экспертов, которые способны интерпретировать сложные газодинамические ситуации и явления на основе своего большого опыта и знаний для принятия решений, используя только частичные измерения атмосферы сильно запыленных помещений.

Поддержка решений и принятие решений для мониторинга и контроля атмосферы запыленных помещений - идеальная задача для искусственного интеллекта (ИИ). А лучшим решением является система, обеспечивающая идентификацию газодинамических ситуаций и предлагающая оператору обоснованные предложения по возможным действиям.

Традиционно и АСУВ, и оператор выполняют функции контроля и управления. Задачи человека в процессе управления заключаются в (1) определении прогнозных уровней газосодержания в помещении, измеряемых активной автоматизированной системой газовой защиты (AGPS); (2) контроль за выполнением АСУВ; (3) оперативное принятие решений при возникновении нетипичных ситуаций; и (4) контроль за выполнением плана ликвидации аварии (ALP) при возникновении чрезвычайных ситуаций. СППР была основана на газодинамической системе классификации изображений, которая была создана с использованием процедуры обработки газодинамических изображений [4-5].

Идея применения методов искусственного интеллекта в мониторинге и контроле атмосферы сильно запыленных помещений не была новой и оригинальной. В середине 1980-х годов в США и Великобритании были созданы три экспертные системы контроля концентрации вредных веществ и пыли (UFEL, SHEARER, IDSS).

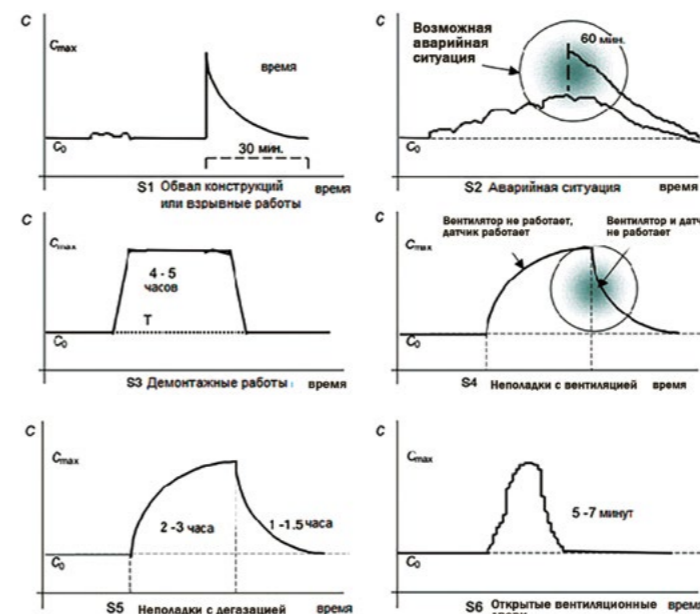


Рис. 1. Примеры газодинамических изображений

Однако идея применения нечетких методов к обработке газодинамических изображений была действительно новой и оригинальной. Модели и методы всех вышеперечисленных систем базировались на производственные и фреймворковые представления знаний [6-7].

## III. FUZZY MODELS

Должностная инструкция оператора вентиляции, связанная с мониторингом и контролем атмосферы запыленных помещений, включает в себя следующие виды деятельности:

- ▶ Наблюдение за чрезвычайными ситуациями;
  - ▶ Идентификация параметров шахтной вентиляционной системы (MVS) для корректировки управления;
  - ▶ Определение причин вариаций газодинамических ситуаций;
  - ▶ Принятие решений в случае значительных отклонений;
  - ▶ Управление аварийной вентиляцией;
  - ▶ Составление статистических отчетов.
- Газодинамические ситуации классифицировались

как газодинамические процессы в MVS и аварийные ситуации.

Общая схема мониторинга и управления шахтной атмосферой в логическом формате может быть представлена так:

$$F1 \wedge F2 \wedge F3 \rightarrow F4 \wedge F5,$$

где F1 - геологические параметры,  
F2 - параметры технологических процессов,  
F3 - технические параметры MSV,  
F4 - газодинамические процессы в MSV,  
F5 - аварийные ситуации.

Исходя из приведенной ниже схемы, деятельность оператора вентиляции производилась в логическом формате, который можно было бы рассматривать как определение возможных причин отклонений запыленности атмосферы.

$$F2 \wedge F3 \rightarrow F4.$$

Для принятия решения а, оператор вентиляции использует следующую информацию:

- ▶ Записи концентрации запыленности с различных точек помещения;
- ▶ Планируемое и фактическое состояние горных работ;
- ▶ Схемы вентиляции и топологическая информация;
- ▶ Размещение и расположение датчиков концентрации запыленности;
- ▶ Информация о неисправностях в системах вентиляции и дегазации.

На основании этой информации можно было диагностировать оперативную обстановку и выявить причины отклонений концентрации вредных веществ. По большей части единичные технологические и технические факторы вызывали строго определенные классы явлений с определенными формами газодинамических спектров или газодинамических изображений, которые всегда наблюдались в записях концентрации запыленности [8].

Несколько примеров некоторых из этих газодинамических изображений представлены на Рис. 1.

Классы газодинамических изображений в записях концентрации пыли были также совершенными инструментами, используемыми для разделения реальных явлений и нарушений, вызванных электронными устройствами и каналами связи [9-10].

Нечеткая классификация газодинамических ситуаций в разработана как система нечетких правил, связывающих множество газодинамических изображений ( $S_{i,i} = [1, m]$ ) и их нечеткие атрибуты ( $B_{j,j} = [1, n]$ ,  $B_j = [0; 1]$ ) с высоким максимальным значением функции доверия.

Например, ниже приведены несколько нечетких правил классификации, описывающих классы газодинамических изображений  $S_1 - S_6$ , показанных на **Рис. 1**.

$$\begin{aligned} & B_1 [0.5 - 0.6] \wedge B_2 [0.5 - 0.6] \wedge B_3 [0.5 - 0.6] \wedge B_4 [0.1 - 0.6] \wedge B_5 [0.1 - 0.2] \wedge B_6 [0.9 - 1] \wedge S_1 [0.9 - 1], \\ & B_1 [0.5 - 0.6] \wedge B_2 [0 - 0.1] \wedge B_3 [0 - 0.3] \wedge B_4 [0.1 - 0.3] \wedge B_5 [0.3 - 0.4] \wedge B_6 [0 - 0.1] \wedge S_2 [0.9 - 1], \\ & B_1 [0.8 - 0.9] \wedge B_2 [0.2 - 0.4] \wedge B_3 [0.2 - 0.3] \wedge B_4 [0.2 - 0.3] \wedge B_5 [0.2 - 0.3] \wedge B_6 [0 - 0.1] \wedge S_3 [0.9 - 1], \\ & B_1 [0.9 - 1.0] \wedge B_2 [0 - 0.2] \wedge B_3 [0 - 0.3] \wedge B_4 [0.1 - 0.2] \wedge B_5 [0 - 0.3] \wedge B_6 [0 - 0.1] \wedge S_4 [0.9 - 1], \\ & B_1 [0.5 - 0.9] \wedge B_2 [0.8 - 1.0] \wedge B_3 [0.5 - 0.6] \wedge B_4 [0.4 - 0.6] \wedge B_5 [0.1 - 0.7] \wedge B_6 [0 - 1] \wedge S_5 [0.9 - 1], \\ & B_1 [0.8 - 1.0] \wedge B_2 [0.3 - 0.5] \wedge B_3 [0.1 - 0.6] \wedge B_4 [0.4 - 0.7] \wedge B_5 [0.5 - 0.8] \wedge B_6 [0 - 1] \wedge S_6 [0.9 - 1]. \end{aligned}$$

Применение нечеткой модели (FM) для интерпретации и обработки газодинамических изображений было предпочтительным по следующим причинам:

- ▶ Сложные газодинамические ситуации не были полностью идентифицированы в записях концентрации вредных веществ;
- ▶ Записи помех в сочетании с записями концентрации вредных веществ создавали трудности в идентификации и обработке газодинамических изображений;
- ▶ Экспертные знания, обеспечивающие возможность оценки параметров модели на основе частичных измерений [3].

Развитие традиционных FM для газодинамической интерпретации и обработки изображений шло по нескольким направлениям:

- ▶ В модель введены вектор газодинамических изображений и вектор атрибутов:  $S_{i,i} = [1, m], B_{i,j} = [1, n], B_i = [0; 1]$ ;
- ▶ В модель введена матрица маскировки атрибутов:

$$v(S_i - B_j^*) = R_{ij}^* ;$$

- ▶ Введены матрицы минимального и максимального влияния газодинамических изображений на атрибуты вместо матриц влияния и отношений:

$$v(S_i - B_j) = R_{ij} ;$$

- ▶ В список газодинамических изображений добавлены предыдущие газодинамические ситуации, если

- они считались причиной появления атрибутов;
- ▶ Учитывалась расширенная экспертная информация;

Система нечеткой идентификации основана на обработке газодинамических изображений и атрибутов; матрицы минимального и максимального влияния и маскировки.

Вспомогательными нечеткими аксиомами интерпретации и обработки газодинамических изображений были следующие:

- ▶ Если есть причина для появления, атрибут не отображается в модели.

$$\neg v(S_i \wedge (S_i - B_j)) \supset (\neg B_j \wedge \neg TB_j), \quad 1 \leq i < m, \quad 1 \leq j \leq n.$$

- ▶ Если есть причины для появления атрибута и нет оснований для маскировки, атрибут появляется в модели.

$$v(S_i \wedge (S_i - B_j)) \wedge \neg(S_i \wedge (S_i - B_j)) \supset (B_j \wedge \neg TB_j), \quad 1 \leq i < m, \quad 1 \leq j \leq n.$$

- ▶ Цепочки импликаций между причинами являются результатом корреляций между причинами.

$$(S_i - S_k) \supset (S_i (S_k)), \quad 1 \leq i < m, \quad 1 \leq k \leq m.$$

Глобальная аксиома была создана пересечением системы вышеупомянутых аксиом.

$$G \equiv (E_j \wedge F_j), \quad 1 \leq j \leq n.$$

Функция доверия в этом FM является функцией межсетевого распределения между газодинамическими изображениями и атрибутами и является аналогом функции максимального правдоподобия в статистике.

$$v(G) = (s, b, r)$$

где  $v(S_i) = s_i, v(B_j) = b_j, v(S_i - B_j) = R_{ij}$ .

Таким образом, была разработана базовая нечеткая модель интерпретации и обработки газодинамических изображений для получения решений для следующих экстремумов:

$$d(b) = \max (s, b, r)$$

$$s_i(b) = \max \{s_i : (s, b, r) = d(b)\},$$

$$s_i(b) = \min \{s_i : (s, b, r) = d(b)\}.$$

Или, другими словами, для заданного вектора  $b = (b_1, \dots, b_n), 0 \leq b_j \leq 1, 1 \leq j \leq n$ , необходимо было:

- ▶ Определить такое максимальное значение функции доверия  $d, 0 \leq d \leq 1$ , для которого система уравнений max-min (1-2) имела хотя бы одно решение  $s = (s_1, \dots, s_m), r = [r_{ij}]$  в интервале

$$0 \leq s_i \leq 1, \quad r'_{ij} \leq r_{ij} < r''_{ij}, \quad 1 < i < m$$

$$b_j - (1 - d) \leq \max \min (s_i, r_{ij}), \quad 1 < j < n, 1 < i < m, \tag{1}$$

$$\left\{ \max \min (s_i, r_{ij}), 1 - \max \min (s_i, r_{ij}^*) \right\} \leq b_j + (1 - d), \quad 1 \leq i \leq m. \tag{2}$$



- ▶ Определить точные минимальные и максимальные предельные значения координат системы, которые соответствуют максимальному значению функции доверия  $d = d \max$ .

В разработанном СППР использовались механизмы вывода с прямой цепочкой (т. е. от атрибутов к газодинамическим изображениям) и с обратной цепочкой (т. е. от результатов интерпретации к первичным газодинамическим данным)..

Методы СППР сильно отличались от традиционных, в которых результат мог быть получен на основе атрибутов с использованием только отдельных причин. Преимущество разработанных нечетких методов было достигнуто за счет использования составных, а не единичных правил обработки.

#### IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

- ▶ Была проанализирована количественная и каче-

ственная информация, используемая оператором вентиляции для принятия решений. Этот анализ доказал эффективность применения нечетких моделей и методов для интерпретации и обработки газодинамических изображений.

- ▶ Разработаны нечеткие модели и методы интерпретации и обработки газодинамических изображений.

- ▶ Построен СППР для оператора вентиляции. Программы написаны на C++ для среды Linux.

- ▶ Эффективность СППР для оператора контроля запыленности подтверждена положительными результатами. Лабораторные испытания включали многократную экспертную оценку и обработку газодинамических изображений с целью выявления причин значительных колебаний наблюдаемых газодинамических параметров в атмосфере запыленных помещений.

#### ЛИТЕРАТУРА



1. Охрана труда в рабочих зонах с повышенной запыленностью // С. А. Сазонова, С. Д. Николенко, Е. Н. Епифанов, В. С. Иванова // Современные ресурсосберегающие технологии и технические средства лесного комплекса : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 25–26 ноября 2021 года / Отв. редактор И.В. Четверикова. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2021. – С. 219-224. – DOI 10.34220/MRTTMFC2021\_219-224. – EDN HODBTB.
2. Сергиенко, О. И. Повышение энергоэффективности очистки высокотемпературных уходящих газов с высокой запыленностью // О. И. Сергиенко, Е. М. Осетрова // Богатство России : сборник докладов, Москва, 10–11 декабря 2018 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2019. – С. 222-224. – EDN MFLQXN.
3. Воробьев, А. Е. Исследование влияния запыленности на литосферу и снижение пыления на технологических дорогах // А. Е. Воробьев, О. Ш. Шамшиев, М. З. Мадаева // Вестник Жалал-Абадского государственного университета. – 2020. – № 2(45). – С. 38-44. – EDN YOAVKQ.

# ВВЕДЕНИЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ КЛАСТЕРА ВЫСОКОЙ ДОСТУПНОСТИ



А.С. Дибров



Д.В. Котов

## Commissioning of a high-tech cluster accessibility

A.S. Dibrov  
D.V. Kotov  
NIJET

АО «НИИЭТ»

**АННОТАЦИЯ:** в статье рассматриваются возможности и практическое применение отказоустойчивого кластера Proxmox Virtual Environment, доказанная на практике в использовании на предприятии АО «НИИЭТ» продолжительное время.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** кластеризация, отказоустойчивость, виртуализация, безопасность, система виртуализации.

**КЛАСТЕРИЗАЦИЯ:** в настоящее время это инструмент, позволяющий эффективно использовать мощности физических серверов разделяя их на логические и повышать отказоустойчивость общей системы путем хранения и репликации данных, обеспечивая тем самым высокую доступность и надежность системы.

**КЛАСТЕР** (от английского cluster) – это группа (связка) серверов, объединяемые одним или несколькими каналами связи, работающие и представляющиеся для пользователя как один сервер. Кластер может быть реализован с помощью нескольких сценариев в соответствии с поставленными задачами:

- ▶ Обеспечение отказоустойчивости (High Availability).
- ▶ Балансировка нагрузки (Load Balancing).
- ▶ Увеличение производительности (High Performance).
- ▶ Выполнение распределенных вычислений (Distributed Computing).

Основной особенностью виртуализации серверов является то, что действия, производимые на виртуальных машинах, выполняются напрямую на уровне оборудования. При этом виртуальные машины изолированы друг от друга, что позволяет администратору управлять ими по отдельности, а

система виртуализации при этом выполняет роль контроллера, который правильно распределяет ресурсы, приоритеты и роли, обеспечивая тем самым высокую скорость обработки данных и выполнения команд. Также он отвечает за эмуляцию необходимой аппаратной части для обеспечения корректной работы операционной системы.

Виртуализация также обеспечивает сохранение и быстрое восстановление данных при окончательном выходе из строя физического сервера, при условии, что дисковые носители информации были сохранены, в таком случае вся виртуальная инфраструктура будет сохранена и полностью работоспособна для развертывания на другом серверном оборудовании.

В данной статье рассматривается сценарий обеспечения отказоустойчивости исходя из задачи создания почтового сервера CommuniGate, который будет стабильно и непрерывно работать даже в случаях непредвиденных ситуаций и сбоев.

Для решения данной задачи была выбрана система виртуализации Proxmox Virtual Environment (далее – PVE), которая позволяет создавать и управлять виртуальными машинами.

Для создания отказоустойчивой системы необходимо установить и настроить программное обеспечение, описанное выше, а также произвести подключение к коммутатору, с настроенными портами, сделанному специально для кластера чтобы через него происходил обмен данными между нодами, в процессе установки указывая необходимые нам данные и значения для настройки под наши индивидуальные требования. После установки необходимо проверить последнюю версию программного обеспечения и в случае необходимости произвести обновление, после чего настроить дисковые накопители для хранения данных виртуальных машин, добавить новое хранилище на панели

управления. Выполнив все вышеперечисленные действия создаем виртуальную машину, предоставляя необходимый ей размер и тип жесткого диска, количество процессоров, объем оперативной памяти, модель и порт сетевого адаптера, который будет использоваться для передачи данных. После создания виртуальной машины настраиваем автозапуск при включении кластера.

По завершению работы по установке и настройке системы виртуализации и виртуальной машины, приступаем к созданию и последующей настройке кластера, все это выполняется в веб-интерфейсе PVE, подключиться к которому можно по ссылке [https://IP\\_адрес\\_сервера:8006](https://IP_адрес_сервера:8006), который присвоили при установке системы виртуализации.

После установки операционной системы единственный сервер работает в одиночном режиме (Standalone-mode), поэтому для настройки кластера нам необходимо создать его, нажав кнопку Create Cluster в подходящем разделе и приступить к настройке кластера.

Сначала необходимо задать имя кластеру и выбрать активное сетевое подключение, далее сервер сгенерирует 2048-битный ключ и запишет его вместе с параметрами нового кластера в конфигурационные файлы, надпись TASK OK в информа-

ционном окне выполнения операции по созданию кластера означает успешное создание и теперь, ознакомившись с общей информацией о системе видно, что сервер перешел в режим кластера. На данном этапе созданный кластер состоит из одной ноды (сервера), и чтобы раскрыть потенциал и возможности кластера необходимо присоединить оставшиеся ноды. Для реализации этого действия в разделе Cluster копируем зашифрованную информацию Join Information в которой содержатся необходимые параметры для подключения: адрес сервера для подключения и цифровой отпечаток. После этого переходим на сервер, который нужно включить в кластер, нажимаем на кнопку Join Cluster и в открывшемся окне вставляем скопированную информацию, затем останется ввести только пароль root от первой ноды в кластере и выбрать сетевое подключение, остальные поля будут заполнены автоматически, останется только нажать на кнопку Join и нода присоединится к кластеру автоматически.

На территории предприятия АО «НИИЭТ» был реализован полноценный кластер, состоящий из трех рабочих нод, обеспечивающий работоспособность почтового сервера даже в критических ситуациях (Рисунок 1 и 2).

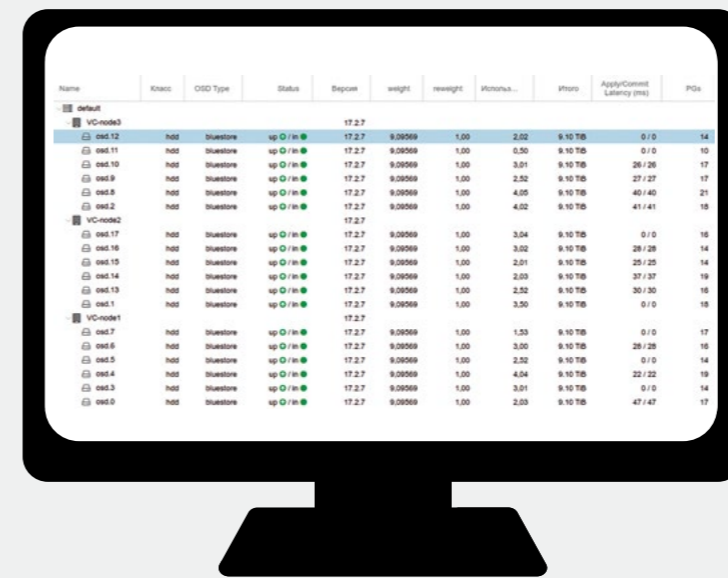


Рисунок 1 - Вид рабочего дискового массива

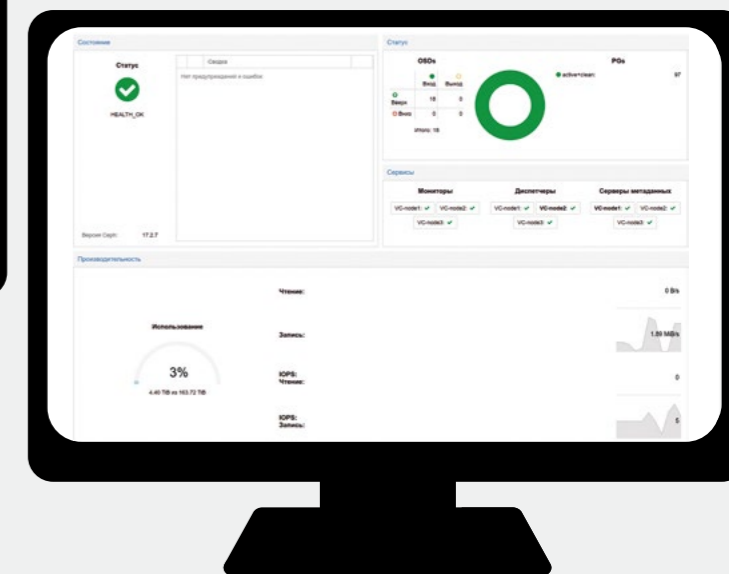


Рисунок 2 - Вывод состояния кластера

Вдобавок к уже упомянутым настройкам, был реализован сценарий работы виртуальных машин High Availability (Рисунок 4), который обнаруживает и обрабатывает ошибки и отказы, выполняя аварийное переключение ноды на рабочую, перебрасывая асинхронно реплицированные данные, на выбран-

ную в приоритете ноду (Рисунок 3), виртуальную машину, тем самым обеспечивая быстрое восстановление работоспособности и корректную работу пользователей без потери данных. Для правильной работы данного сценария необходимо, чтобы виртуальная машина имела общее файловое хранилище.

Узел ↑	Использование па...	Использование пр...	Приоритет
VC-node1	5.4 %	2.2% of 48 CPUs	1
VC-node2	5.6 %	0.1% of 48 CPUs	2
VC-node3	47.8 %	2.7% of 48 CPUs	3

Тип	Статус
quorum	OK
master	VC-node2 (active, Wed Feb 28 15:41:09 2024)
lrm	VC-node1 (idle, Wed Feb 28 15:41:14 2024)
lrm	VC-node2 (idle, Wed Feb 28 15:41:14 2024)
lrm	VC-node3 (active, Wed Feb 28 15:41:06 2024)

Рисунок 3. Выставленный приоритет переключения нод

Рисунок 4. Работоспособность настроенного сценария High Availability

По завершению тонкой настройки системы виртуализации и кластера были проведены тесты с принудительным отключением работы одного из серверов кластера, следя за прохождением тестирования в веб-интерфейсе (Рисунок 5). После принудительного отключения одной из нод система фиксирует сбой и кластер автоматически переназначает ноду для переноса и запуска виртуальной машины, и в течение короткого промежутка времени работоспособность восстанавливается. При принудительном отключении следующей ноды, на которой работает виртуальная машина, система проделала тот же алгоритм исправления работоспособности и восстановила работу.

Имя	Хост	Статус	Адрес	Время
main-VC-node1	VC-node1	running	192.168.6.101	17.2.7
main-VC-node2	VC-node2	running	192.168.6.102	17.2.7
main-VC-node3	VC-node3	running	192.168.6.103	17.2.7

Имя	Хост	Статус	Адрес	Время
upg-VC-node1	VC-node1	standby	192.168.6.101	17.2.7
upg-VC-node2	VC-node2	idle	192.168.6.102	17.2.7
upg-VC-node3	VC-node3	standby	192.168.6.103	17.2.7

Рисунок 5. Мониторинг работы нод

Таким образом в данной статье был рассмотрен механизм кластеризации в Proxmox Virtual Environment, и способ настройки сценария High Availability для виртуальных машин. Данный меха-

низм применяется на предприятии АО «НИИЭТ», и значительно повышает надежность системы, а также обеспечивает восстановление работы после сбоев.



#### СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Статья на портале Хабр «Установка Proxmox VE на Debian Stretch используя Ansible» [https://habr.com/ru/search/?q=%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%B2%20Proxmox%20VE&target\\_type=posts&order=relevance](https://habr.com/ru/search/?q=%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%B2%20Proxmox%20VE&target_type=posts&order=relevance)
2. Статья на портале Хабр «Кластеризация в Proxmox VE» <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/489914/>
3. Статья на портале Хабр «Про бэкапы в Proxmox VE» <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/486194/>
4. Статья на портале Хабр «Магия виртуализации: вводный курс в Proxmox VE» <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/483236/>



РАЗРАБОТАНО  
АО «НИИЭТ»

# ЗАРЯДИСЬ

ПРИБРЕТАЙ НА **OZON**



65W



- Энергоэффективно
- Компактно
- Без нагрева



# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОБИВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПЕРИФЕРИИ СВЧ LDMOS-ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ



Р.П. Алексеев



П.Л. Куршев



А.Н. Цоцорин



И.В. Семейкин

## Providing breakdown voltages at the periphery of the microwave LDMOS transistor structure

R.P. Alekseev,  
P.L. Kurshv,  
A.N. Tsotsorin,  
I.V. Semeykin,  
NIIET, arp@niiet.ru

АО «НИИЭТ», arp@niiet.ru

**АННОТАЦИЯ:** методом 3D-моделирования в САПР Sentaurus TCAD проведено исследование зависимости величины напряжения пробоя сток-исток от конструктивных параметров периферийной области мощных СВЧ LDMOS-транзисторов. Ключевые слова — LDMOS-транзисторы, СВЧ транзисторы, САПР Sentaurus TCAD.

**LDMOS** (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductors) транзисторы являются наиболее совершенными приборами на основе кремния среди дискретных мощных СВЧ транзисторов [1]. Их область применения включает в себя: базовые станции сотовой системы связи, радиопередатчики сигналов Р-, L-, S-диапазонов частот, передатчики телевизионных сигналов стандартов DVB-T/ DVB-T2, РЛС наземного и воздушного базирования, систем навигации. Благодаря хорошему соотношению цена-качество и обработанности технологии производства LDMOS-транзисторы способны успешно

конкурировать даже с приборами на основе новых полупроводниковых материалов, таких как нитрид галлия [2].

Конструктивно мощные СВЧ LDMOS-транзисторы представляют собой совокупность элементарных транзисторов - пальцев, соединенных параллельно посредством системы металлизации. Палец транзистора включает в себя протяженный поликремниевый затвор, примыкающую к затвору LDD-область (Lightly Doped Drain), высоколегированные области стока и истока, полевой электрод (ПЭ) и другие конструктивные элементы. В пальце транзистора можно выделить рабочую часть, обеспечивающую функционирование транзисторной структуры, и периферию (см. рис. 1).

Требованием к конструкции периферии пальца выступает необходимость обеспечения уровня напряжения пробоя сток-исток ( $U_{СИ\ проб}$ ) на периферии не ниже, чем в рабочей части пальца. Для этой цели следует выбирать длину LDD-области вдоль пальца

(на периферии) больше, чем поперек пальца (в рабочей части). Однако, чрезмерное увеличение длины LDD-области на периферии ( $L_{LDD\ пер}$ ) приводит к росту паразитной емкости между стоком и истоком, что негативно сказывается на радиочастотных характеристиках транзистора. В данной работе было проведено исследование влияние на уровень  $U_{СИ\ проб}$  длины LDD-области на периферии, а также других конструктивных элементов периферии пальца транзистора.

Для исследования использовалась 3D-модель СВЧ LDMOS-транзистора, построенная в САПР Sentaurus TCAD. Для моделирования процесса создания LDMOS-транзисторной структуры использовался программный модель Sentaurus Process, расчет протекания физических процессов в модели транзисторной структуры осуществлялся при помощи программного модуля Sentaurus Device, для визуализации полученных результатов применялся программный модель Sentaurus Visual. 3D-модель СВЧ LDMOS-транзистора включает в себя фрагмент рабочей части транзисторного пальца, протяженностью 5 мкм, и одну периферийную область. Данные ограничения введены

для уменьшения времени, затрачиваемого на расчет структуры. Кроме того, для ускорения расчетов, моделируется только половина фрагмента пальца, а за границу моделируемой области принимается середина области стока. В силу симметричности конструкции относительно области стока, данное допущение никак не сказывается точности расчетов.

Модель была разработана на основе используемой АО «НИИЭТ» технологии изготовления LDMOS-транзисторных кристаллов и откалибрована по результатам проведения реальных партий пластин с транзисторными кристаллами.

На рисунке 2 представлена 3D-модель СВЧ LDMOS-транзистора. В ходе моделирования параметр  $L_{LDD\ пер}$  принимал значения от 15 до 5 мкм, при длине LDD-области в рабочей части пальца 6 мкм. Кроме того, было исследовано влияние наличия таких конструктивных параметров как: перекрытие полевым электродом края LDD-области на периферии (см. рис. 3); участка LDD-области с повышенной концентрацией, примыкающего к затвору – HDD [3]; участка LDD-области с повышенной концентрацией, примыкающего к области стока – LDD2 [4].

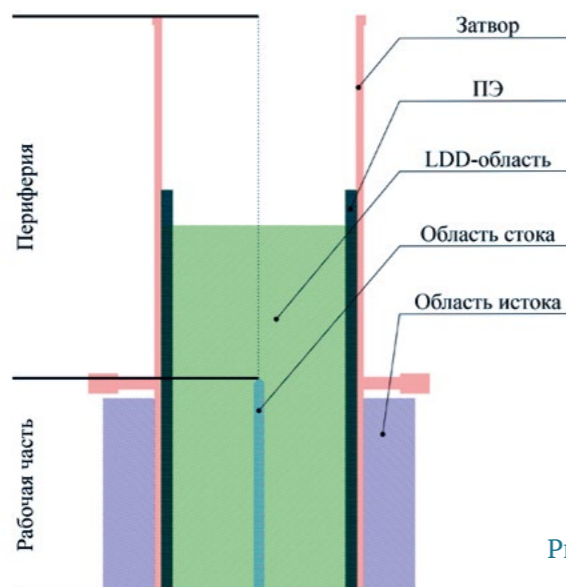


Рис. 1. Схематическое изображение

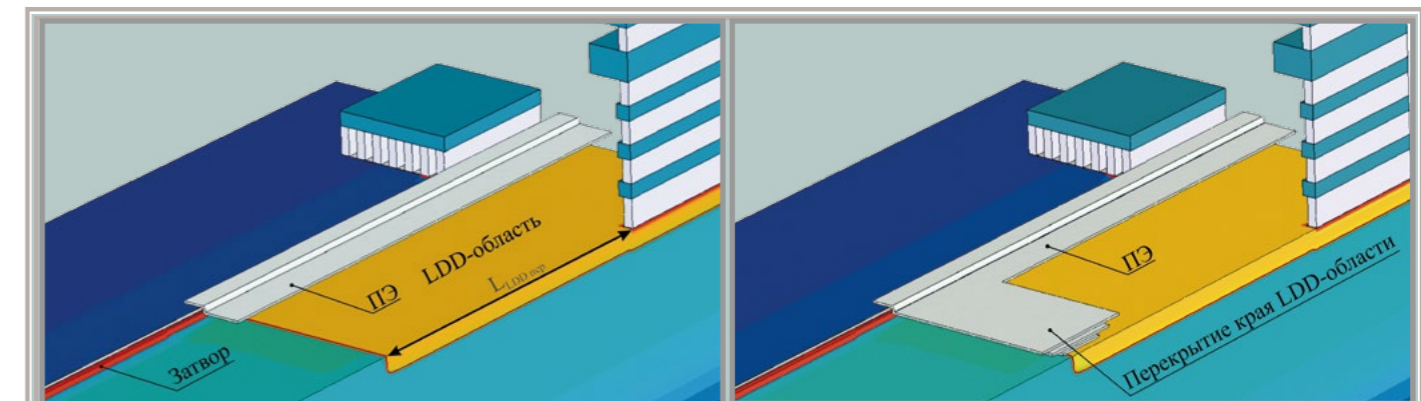


Рис. 2. 3D-модель СВЧ LDMOS базовой транзисторной структуры

Рис. 3. 3D-модель СВЧ LDMOS-транзисторной структуры с полевым электродом, перекрывающим край LDD-области на периферии

## Всего были смоделированы 6 LDMOS-транзисторных структур:

- ▶ Структура 1 – базовая структура с равномерно легированной LDD-областью и трехслойным ПЭ, перекрывающим край LDD-области на периферии.
- ▶ Структура 2 – с равномерно легированной LDD-областью и трехслойным ПЭ, не перекрывающим край LDD-области на периферии.
- ▶ Структура 3 – с HDD-участком в LDD-области (в том числе на краю периферии) и трехслойным ПЭ,

- перекрывающим край LDD-области на периферии.
- ▶ Структура 4 – с HDD-участком в LDD-области (в том числе на краю периферии) и трехслойным ПЭ, не перекрывающим край LDD-области на периферии.
- ▶ Структура 5 – с LDD2-участком в LDD-области и трехслойным ПЭ, перекрывающим край LDD-области на периферии.
- ▶ Структура 6 – с LDD2-участком в LDD-области и трехслойным ПЭ, не перекрывающим край LDD-области на периферии.



Результаты расчета  $U_{СИ\ проб}$  для всех описанных структур при разных значениях  $L_{LDD\ пер}$  приведены в таблице 1.

Lпер, мкм	Структура 1	Структура 2	Структура 3	Структура 4	Структура 5	Структура 6
	Напряжение пробоя сток-исток, В					
15	119,6	119,9	118,7	119,5	121,5	121,7
12	119,3	119,8	118,6	119,4	121,5	121,6
10	117,8	119,1	117,3	118,8	120,4	121,5
9	116,5	118,7	116,3	118,5	119,4	120,9
8	115,2	118,0	115,0	118,1	118,5	120,7
7	113,3	117,4	112,9	117,7	117	120,5
6	109,7	115,6	109,5	116,2	113,8	118,6
5	104,1	114,1	105,2	116,1	108,2	117,2

Таблица 1

Согласно существовавшим представлениям [5], перекрытие ПЭ края LDD-области на периферии должно приводить к повышению  $U_{СИ\ проб}$  в области периферии. Однако трехмерное моделирование показывает (таблица 1), что при текущей технологии изготовления LDMOS-транзисторных структур данное конструктивное решение имеет сугубо негативные последствия. При любом  $L_{LDD\ пер}$  структура с перекрытием края LDD-области (структуры 1, 3, 5) характеризуется меньшим значением  $U_{СИ\ проб}$  по сравнению с аналогичной структурой без перекрытия (структуры 2, 4, 6, соответственно). Кроме того, перекрытие ПЭ края LDD-области на периферии приводит к повышению емкости между стоком и истоком.

Другим выводом из данных таблицы 1 является то, что уровень  $U_{СИ\ проб}$  структур без перекрытия ПЭ края LDD-области слабо зависит от  $L_{LDD\ пер}$  вплоть до величин, меньших длины LDD-области в рабочей части пальца. Данное обстоятельство объясняется тем, основной вклад в обеднение LDD-области и расширение ее области пространственного заряда

(ОПЗ) вносит p-n переход, расположенный вдоль поликремниевых затворов, и перекрывающий LDD-область вдоль затвора ПЭ. Вклад же в рост ОПЗ p-n перехода между LDD-областью и слаболегированным эпитаксиальным слоем со стороны периферии пальца менее значителен и является добавочным. Тем не менее, существование этого добавочного вклада приводит к тому, при любой  $L_{LDD\ пер}$  напряженность электрического поля на конце пальца (на периферии) будет всегда выше, чем в рабочей части. Это приводит к тому, что лавинная генерация носителей заряда и электрический пробой наступает на периферии, а именно на краю высоколегированной области стока.

Для предотвращения пробоя на периферии может быть использован такой конструктивный элемент, как расширение металлизации стока (PCM), предложенный в [6]. PCM представляет собой элемент, выполняемый в проводящем слое – как правило первом слое металлизации и/или в слоях полевого электрода, подключенный непосредственно к стоку (см. рис. 4).

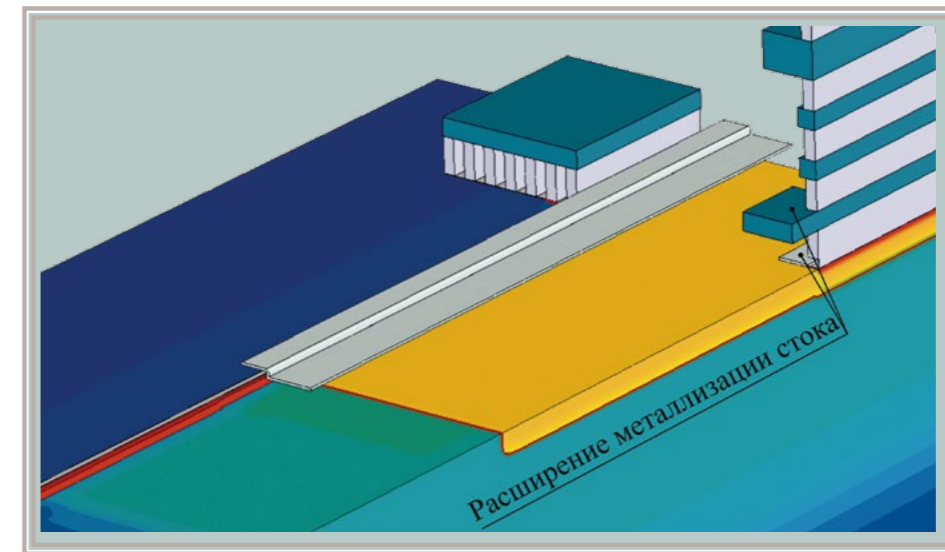
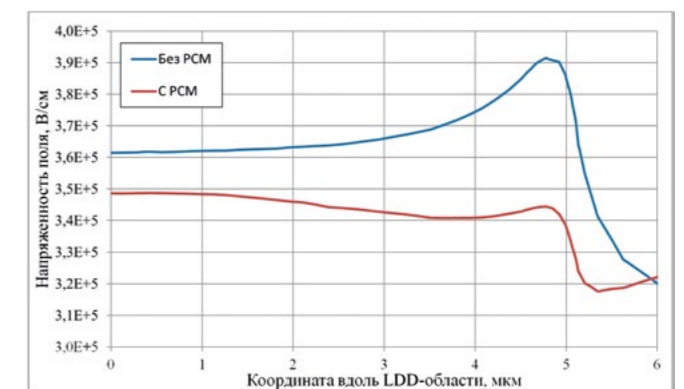


Рис. 4. 3D-модель СВЧ LDMOS-транзисторной структуры с расширенной металлизацией стока

аличия падения напряжения в ОПЗ LDD-области, электрический потенциал в обедненной LDD-области даже вблизи высоколегированной области стока будет отличаться от потенциала на металлизации стока. Благодаря этому расширение металлизации стока оказывает слабое, но отличное от нуля, полевое воздействие на расположенный под ним участок LDD-области, уменьшая в нем напряженность поля. Благодаря этому, подбором размеров PCM можно добиться снижения напряженности поля на краю высоколегированной области стока и смещению максимума напряженности под область стока. На рисунке 5 приведено распределение напряженности поля вдоль LDD-области для структур с PCM и без PCM, краю высоколегированной области стока соответствует координата 5 мкм.

Рис. 5. Распределение напряженности поля вдоль LDD-области для структур с PCM и без PCM, краю высоколегированной области стока соответствует координата 5 мкм



Размеры расширения металлизации стока, необходимые для смещения максимума напряженности поля под область стока, зависят от высоты расположения проводящих слоев, в которых этот элемент создается. В данной работе использовался PCM, выполненный в первом слое ПЭ и первом слое металлизации. Размер PCM достигал величины 2,5 мкм. В целом можно заключить, при разработке периферий-

ной области пальца СВЧ LDMOS-транзистора, следует выбирать  $L_{LDD\ пер}$  на 2-3 мкм больше длины LDD-области в рабочем участке. Полевой электрод не должен перекрывать край LDD-области поперек пальца. Для достижения локализации пробоя под высоколегированной областью стока может быть использовано расширение металлизации стока. Однако данный конструктивный элемент следует применять с осторожностью.

## ЛИТЕРАТУРА

- Ahmad A. Z., Aggrawal E., Rawat K. Design of 100 W LDMOS based Power Amplifier for cellular applications // 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). – IEEE, 2020. – С. 166-169. В. К. Sampath, M. Shrivastava, IEEE Trans. Electron Devices, 65 (1), 191 (2018).
- Алексеев Р.П., Куршев П.Л., Цоцорин А.Н. // Влияние многослойного полевого электрода на степень выраженности эффекта квази насыщения вольтамперных характеристик мощных сверхвысокочастотных латеральных транзисторов // Физика и техника полупроводников, 2022, том 56, вып. 11 С. 1088-1092.
- Приборно-технологическое проектирование LDMOS-транзисторов с отрицательным градиентом примеси LDD-области // Р. П. Алексеев, Е. Н. Бормонтов, Г. В. Быкадорова, А. Н. Цоцорин // Физико-математическое моделирование систем: межвузовский сборник научных трудов. Воронеж, 2018. Вып. – С. 3-8.
- Алексеев Р. П. Моделирование технологии СВЧ LDMOS-транзисторов с нелинейным распределением примеси в стоковой LDD-области // Р. П. Алексеев, Г. В. Быкадорова, Е. Н. Бормонтов // Энергия-XXI век. – 2016. – №. 1. – С. 68-83.
- Ткачев А.Ю. Влияние конструктивно-технологических факторов на электрические параметры мощных СВЧ LDMOS-транзисторов.: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.13.18. / А. Ю. Ткачев. // Воронеж: Воронежский госуниверситет, 2011. 16 с
- Патент стран Европы EP2321850 (B1) «LDMOS having a field plate», опубликован 19.03.2014.

# ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ДЕФЕКТОВ МОЩНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ЗАРЕКЛАМИРОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

The main types of defects in power transistors, meeting on production during analysis advertised products

V.A. Buslov<sup>1</sup>,  
P.L. Parmon<sup>1</sup>,  
T.V. Pashneva<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>НИИЭТ, <sup>2</sup>Voronezh State Technical University



<sup>1</sup>В.А. Буслов



<sup>1</sup>П.Л. Пармон



<sup>2</sup>Т.В. Пашнева

<sup>1</sup>АО «НИИЭТ», bca@niiet.ru,

<sup>2</sup>ФГБОУ "Воронежский государственный технический университет", tat180675@yandex.ru

**АННОТАЦИЯ:** в данной работе проанализированы проявления и причины возникновения наиболее распространенных типов эксплуатационных дефектов, встречающихся при анализе зарекламированных изделий. Рассмотрены характерные проявления повреждений, вызванных превышением предельно допустимых режимов, возникновения и развития процессов автогенерации. Представлены результаты возникновения различных видов пробоя. Показана и объяснена разница последствий пробоя, вызванного электрическим и электростатическим разрядом, а также вторичным тепловым пробоем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** рекламация, отказ, превышение режимов, разряд, пробой, автогенерация.

**РЕКЛАМАЦИЯ** (лат. reclamatio — громкое возражение, неодобрение) — претензия покупателя или заказчика, предъявляемая продавцу или поставщику (подрядчику) по поводу ненадлежащего качества или количества поставляемого товара, обнаруженного в период действия гарантийных обязательств, требование об устранении недостатков, снижении цены, возмещении убытков (причинённого ущерба) [1].

На любом уважающем себя предприятии создана система, занимающаяся анализом зарекламированных изделий и ответами на рекламации. Нередко представленные потребителем транзисторы, якобы имеющие дефекты, при проверке показывают полное соответствие нормам, то есть являются абсолютно годными изделиями. Всё это происходит от того, что провести корректное измерение параметров транзистора не так уж и просто, требуется специальное, очень недешевое оборудование, опытные операторы, тщательное соблюдение режимов и методик измерения. У потребителя просто может всего этого не быть

в наличии. Изделия, параметры которых полностью соответствуют требованиям, возвращаются потребителю как годные.

Как показывает многолетний опыт, самой распространенной причиной отказа транзисторов является нарушение условий эксплуатации — превышение предельно допустимых режимов эксплуатации и недостатки схемотехнических решений. Бывают также ошибки, связанные с человеческим фактором — ошибки монтажа изделия в схему, но это встречается редко.

Самой распространенной причиной отказа можно назвать превышение предельно допустимых режимов эксплуатации. Один из характерных примеров такого отказа приведен на рисунке 1.

На фотографии виден результат превышения напряжения питания мощного высоковольтного транзистора, рассчитанного на напряжение питания 200 В.

Как можно предположить, максимально допустимо напряжение было превышено в верхнем левом углу (а электрический пробой развивается в местах наибольшей напряженности электрического поля — углах и выступающих элементах конструкции) [2]. Охранные кольца не выдержали, возник пробой и прорвавшийся мощный импульс от источника питания привел к испарению проволочных соединений кристалла и корпуса, выгоранию и растрескиванию кристалла.

Другим способом вызвать превышение предельно-допустимых режимов эксплуатации является ситуация, когда в схеме, содержащей транзистор, возникают условия для возникновения самовозбуждающихся колебаний электрического тока. Транзистор является усилительным элементом цепи, он имеет в своем составе активные и реактивные компоненты и, в свою очередь, встроены в электрическую цепь, так же имеющую активные и реактивные элементы. В результате образуется очень сложная цепь, в которой могут легко об-

разовываться паразитные контуры обратных связей.

Результатом действия автогенерации является резкое возрастание тока в токоведущих элементах конструкции, приводящее к их перегоранию.

Наиболее подвержены повреждению и перегоранию металлические токоведущие части дорожки металлизации и проволочные межсоединения, так как в силу конструктивных особенностей проектирования транзисторов плотность тока в них самая большая. На рисунке 2 показаны вызванные автогенерацией повреждения токораспределяющих нихромовых плёночных резисторов в цепи эмиттера, которые чрезвычайно характерны для несколько устаревших по конструкции, но, тем не менее, до сих пор широко производящихся и применяющихся мощных биполярных транзисторов. [3]

На рисунке 3 показана аналогичная ситуация с выгоранием алюминиевой металлизации в цепи стока мощного МДП транзистора. Ситуация осложняется тем, что выгорание алюминия происходит при большой выделяющейся энергии, и металл не успевает полностью стореть и сильно разбрызгивается. Разлетающиеся брызги металла вызывают множественные замыкания на соседних дорожках.

Но перегорать могут не только токоведущие дорожки на кристалле, но и проволочные соединения кристалла и внешних выводов корпуса. Если процесс развивался по сценарию резонанса, с положительной обратной связью и молниеносным лавинообразным

нарастанием тока, тогда наблюдается характерная картина, показанная на рисунке 4.

Можно предположить, что после возникновения и развития процесса автогенерации, ток в токоведущих частях конструкции транзистора начал стремительно возрастать. Так как площадь кристалла, а следовательно, общее сечение токоведущей металлизации в цепи стока для данного кристалла транзистора гораздо больше, чем для кристалла транзистора, показанного на рис. 3, плотность тока не достигла в ней критического значения, и характерного расплавления не произошло.

Общее сечение проволочных соединений в той же цепи стока оказалось достаточно большим, чтобы не перегореть сразу, но под действием протекающего тока проволоки разогревались, размягчались, под собственным весом теряли форму и провисали вниз, пока не достигли края кремниевого кристалла транзистора.

При соприкосновении с краем кристалла произошло короткое замыкание, практически плазменный взрыв, край кристалла заметно оплавился и частично испарился, материал проволочек также частично испарился, а частично разбрызгался по кристаллу и окрестностям, застыв там в виде шариков.

Несколько иная картина наблюдается, если процесс автогенерации не имеет тенденции к быстрому развитию, и создаваемого в его ходе тока недостаточно для расплавления токоведущих проводников. Тогда наблюдается картина, показанная на рисунке 5.

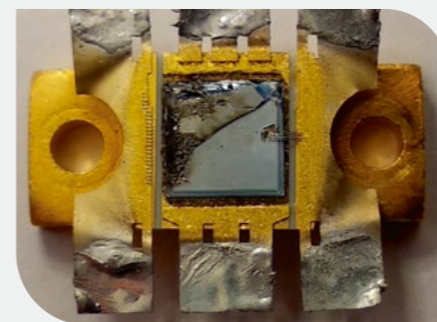


Рис. 1. Результат превышения напряжения питания

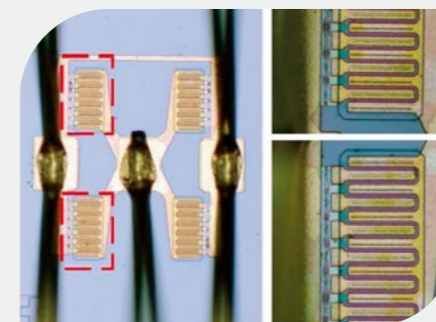


Рис. 2. Вызванные автогенерацией повреждения токораспределяющих нихромовых плёночных резисторов в цепи эмиттера

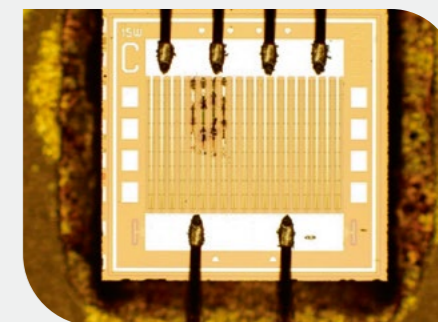


Рис. 3. Выгорание алюминиевой металлизации в цепи стока мощного МДП транзистора

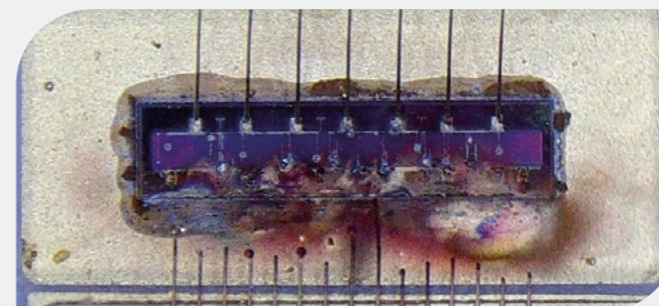


Рис. 4. Испарение проволочных межсоединений из-за автогенерации

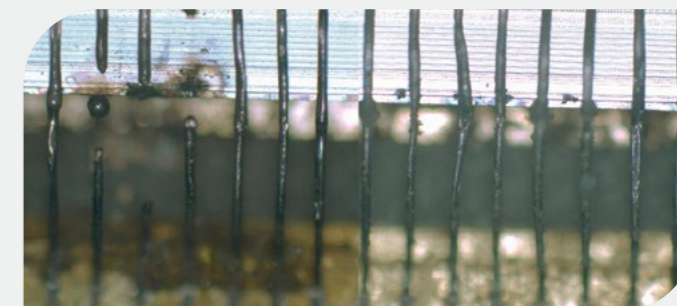


Рис. 5. Частичное перегорание и оплавление алюминиевых проволочек

Можно предположить, что после возникновения и развития процесса автогенерации, ток в токоведущих частях конструкции транзистора начал стремительно возрастать. Так как площадь кристалла, а следовательно, общее сечение токоведущей металлизации в цепи стока для данного кристалла транзистора гораздо больше, чем для кристалла транзистора, показанного на *рис. 3*, плотность тока не достигла в ней критического значения, и характерного расплавления не произошло.

Общее сечение проволочных соединений в той же цепи стока оказалось достаточно большим, чтобы не перегореть сразу, но под действием протекающего тока проволоки разогрелись, размягчились, под собственным весом теряли форму и провисали вниз, пока не достигли края кремниевого кристалла транзистора.

При соприкосновении с краем кристалла произошло короткое замыкание, практически плазменный взрыв, край кристалла заметно оплавился и частично испарился, материал проволочек также частично испарился, а частично разбрызгался по кристаллу и окрестностям, застыв там в виде шариков.

Несколько иная картина наблюдается, если процесс автогенерации не имеет тенденции к быстрому развитию, и создаваемого в его ходе тока недостаточно для расплавления токоведущих проводников. Тогда наблюдается картина, показанная на *рисунке 5*.

Здесь показаны проволочные соединения из алюминиевой проволоки диаметром 60 мкм. Длительное воздействие тока, вызванного автогенерацией, привело к перегреву проволочек и их окислению. Там, где окисление привело к значительному уменьшению толщины произошло перегорание проволоки. Всё выглядит как очень упрощенная версия процесса, описанного выше для *рисунка 4*.

Другой чрезвычайно распространенный вид отказа – электрический пробой различных барьерных слоёв в конструкции полупроводниковых приборов. Подавля-

ющее количество случаев пробоя приходится на электрический пробой подзатворного диэлектрика в МДП транзисторах, широко использующихся в конструкции современных интегральных схем. [3, 4]

Электростатический разряд (ЭСР) представляет собой процесс импульсного переноса электростатического заряда между телами с различными электростатическими потенциалами. [1] Наряду с ЭСР на приборы могут воздействовать обычные электрические разряды (ЭР). Если ЭСР возникают, в основном, в силу естественных причин и с ними целенаправленно борются, создавая защитные схемы, подавляя генерацию и накопление статического электричества, ЭР возникают, зачастую, из-за ошибок конструкции. Например, нередко импульсы напряжения при подключении источника питания или разряде его конденсаторов, при переключении режимов работы, а также как следствие электромагнитной индукции от близкорасположенных силовых цепей и т.п. Необходимо четко различать результаты воздействия ЭСР и ЭР, чтобы эффективно бороться с их причинами, идентифицировать и устранять источники их возникновения.

При помощи цифрового микроскопа на кристаллах исследуемых транзисторов было идентифицировано несколько областей разрушения, причиной которого мог быть электрический разряд. На *рис. 6* показано место локального разрушения подзатворного диэлектрика, вызванное воздействием ЭСР.

Об этом свидетельствует ряд характерных признаков. В области пробоя наблюдается небольшая неглубокая каверна без следов оплавления и выгорания. Изменения цвета материалов в области повреждения не наблюдается. Подзатворный диэлектрик и прилегающая часть кристалла разрушены на относительно небольшой площади. Следствием этого разрушения стало образование канала для утечки электрического тока в цепи затвор-сток. На кристалле можно обнаружить только одно такое повреждение, в очень редких случаях более одного.

Это объясняется тем, что электростатический заряд обладает высоким напряжением и относительно небольшой энергией, так как энергетическая емкость источников, его генерирующих, таких как тело человека, поверхности заряженных окружающих его предметов, имеет достаточно небольшое ограниченное значение. Такие источники воздействуют на приборы непреднамеренно, например, а в результате нарушения правил обращения с объектами, чувствительными к воздействию ЭСР.

На *рис. 7* показано место локального разрушения подзатворного диэлектрика, вызванное воздействием ЭР, которое имеет характерное отличие от показанного на предыдущем рисунке.

В области пробоя наблюдается глубокая каверна со следами масштабного расплавления и обугливания материалов. Температуры плавления материалов транзисторной структуры, таких как монокристаллический кремний и золотая металлизация токопроводящей дорожки превышают 1000 °С, что свидетельствует о значительной энергии, выделившейся в районе пробоя, который привел не только к расплавлению, но к обугливанию и разбрызгиванию тугоплавких материалов. Судя по приведенной фотографии, в районе действия ЭР произошел микровзрыв. Так как ЭР, очевидно, обладает значительной энергией, на кристаллах транзистора могут наблюдаться несколько областей пробоя, образующихся последовательно [4].

Все указанные следствия воздействия ЭР обусловлены источниками, его вызывающими. В качестве них выступают неправильно подключенные или спроектированные с нарушениями техники источники электропитания, а также аварийное замыкание сторонних источников электропитания на схему, содержащую чувствительные к ЭР приборы. Таким образом, характерным признаком воздействия ЭР является практически неограниченная энергия, которая действует и приводит к множе-

ственным повреждениям приборов до тех пор, пока не будет отключен её источник.

Другой чрезвычайно распространенный дефект – связанный с нарушением условий эксплуатации – отказ из-за нарушения теплового режима функционирования.

Современные изделия электронной техники имеют тенденцию к уменьшению как линейных размеров функциональных блоков на полупроводниковом кристалле, так и уменьшению размеров самого кристалла. Это диктуется необходимостью снизить таким образом себестоимость производства, повысить частотные характеристики и увеличить быстродействие. При этом растет удельная мощность, выделяемая активными элементами на кристалле в процессе функционирования [5].

Для примера, тепловая мощность бытового утюга составляет примерно 1000 Ватт, и при своих размерах он нагревается до достаточно высокой температуры. Для сравнения, кристалл мощного СВЧ транзистора размером 6×4 мм должен в процессе функционирования рассеивать в систему охлаждения порядка 100 Ватт тепловой мощности, причем его температура не должна превышать 200 °С при использовании металлизации на основе золота, и 180 °С при использовании наиболее распространенной в настоящее время металлизации на основе легированного алюминия. Логично предположить, что при нарушении отвода тепла от такого кристалла последствия будут катастрофические. Для современных микросхем предельнодопустимая температура на кристалле составляет 100 °С или 85 °С. Ситуацию осложняет использование в качестве полупроводникового материала монокристаллического кремния, теплопроводность которого сильно уменьшается с повышением его температуры.

Характерный вид кристалла мощного транзистора, отказ которого произошел из-за нарушения теплового режима, показан на *рисунке 8*.

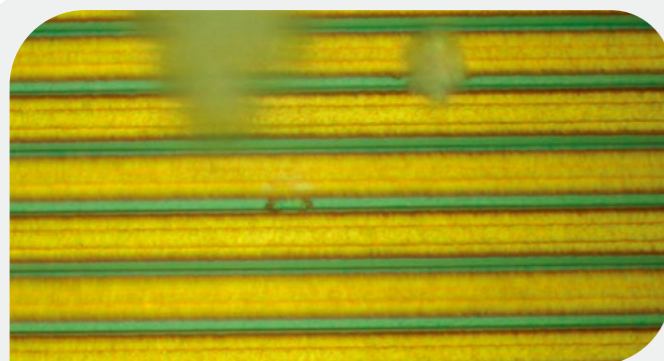


Рис. 6. Типичный дефект, вызванный воздействием ЭСР

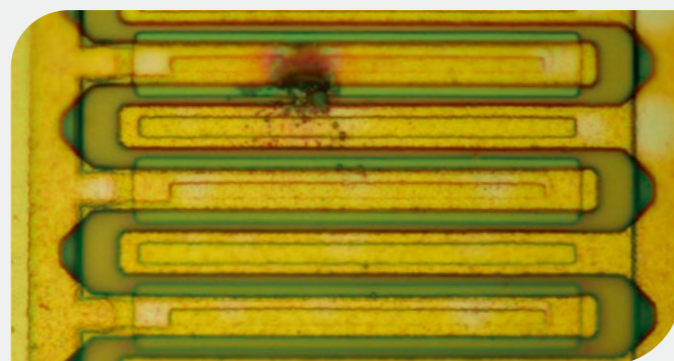


Рис. 7. Типичный дефект, вызванный воздействием ЭР

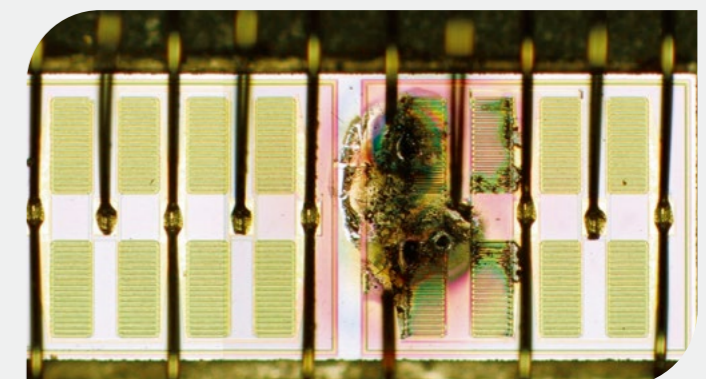


Рис. 8. Вид кристалла мощного транзистора, отказ которого произошел из-за нарушения теплового режима



Рис. 9. Нижняя часть металлического теплоотвода транзистора со следами лака

Наблюдаются последствия вторичного электрического (теплого) пробоя, вызванного локальным перегревом части структуры. Развитие этого типа пробоя связано с тем, что проводимость полупроводника, ко-торым является кремний, сильно уменьшается с ростом его температуры. Протекание тока вызывает локальный разогрев кремниевой структуры, сопротивление этого участка кристалла падает, что приводит к ещё большему возрастанию тока в этой области, и температура растёт ещё больше. Благодаря такой положительной обратной связи за несколько микросекунд участок кристалла разогревается настолько, что кремний расплавляется и происходит короткое замыкание. На соседних участках кристалла также видны следы начала развития вторичного пробоя.

Об имевшем место перегреве свидетельствуют наблюдаемые вокруг места дефекта так называемые цвета побежалости – изменение цвета оксидной пленки на поверхности кристалла из-за очень сильного нагрева. Таким образом можно прибли-

зительно судить о имевшем месте нагреве, приведшем к локальному расплавлению кремниевого монокристалла.

Для выяснения причины наблюдаемого дефекта обратим внимание на нижнюю часть металлического теплоотвода транзистора, показанную на рисунке 9.

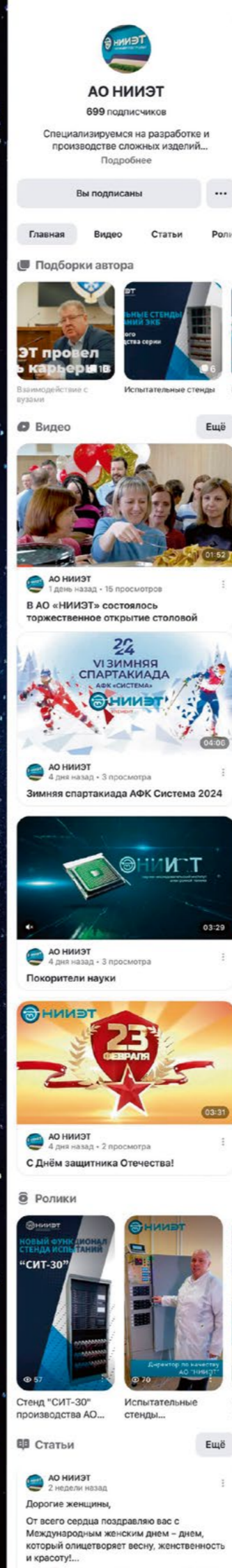
Как видно, на нижней части теплоотвода не только отсутствуют следы применения теплопроводящего термоинтерфейса (нанесенной теплопроводящей пасты), наличие которого требуется по Техническим условиям, но и имеются следы защитного лака, которые попали туда с внешней стороны транзистора. Это явное грубейшее нарушение потребителем условий эксплуатации, о котором теплоотводе говорить не приходится.

Таким образом, в данной работе проанализированы внешние проявления и причины возникновения наиболее распространенных типов эксплуатационных дефектов, встречающихся при анализе зарекламиранных изделий.

## ЛИТЕРАТУРА



1. Горлов М.И. Физические основы надежности интегральных схем / М.И. Горлов, Н.С. Данилин. – М.: МАКС Пресс, 2008. – 174 с.
2. Лагунович Н.Л. Оптимизация конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной плёнки мощного n-канального ДМОП-транзистора / Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2020. - Т.65 - №1. - С. 97-103.
3. Терентьев А.А., Торгованов А.И. Реализация измерения S-параметров в применении к транзисторам и транзисторным усилителям мощности СВЧ диапазона / Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2023. – Т.1. – С. 58 – 62.
4. Ланина Э.П. Современные технологии производства интегральных схем / Старый Оскол.: Изд-во «Тонкие наукоёмкие технологии», 2019. – 312 с.
5. Гатчин Ю.А. и др. Введение в микроэлектронику / СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 114 с.



Мы на  
**Дзен**

Читай  
Слушай  
Смотри



# НОВЫЙ ПОДХОД К СЕГМЕНТАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛЕГКИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО ВЕРОЯТНОСТНОГО МЕТОДА С-СРЕДНИХ



П.И. Карасев



К.В. Стародубов



А.В. Рязанцев



И.А. Метелев

**New approach to the segmentation of medical images of the lungs with using fuzzy probabilistic C-Means method**

P.I. Karasev,  
K.V. Starodubov,  
A.V. Ryazantsev,  
I.A. Metelev<sup>1</sup>

PTU МИРЭА, karasev@mirea.ru  
PTU МИРЭА, starodubov@mirea.ru  
PTU МИРЭА, ryazantsev@mirea.ru  
PTU МИРЭА, metelev@mirea.ru

**АННОТАЦИЯ:** сегментация изображений является очень важной частью обработки изображений. Сегментация имеет широкое применение в области медицинских изображений для диагностики заболеваний. Одни и те же медицинские изображения можно сегментировать вручную. Но точность сегментации изображений с помощью методов сегментации выше по сравнению с ручной сегментацией.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** метод кластеризации нечетких С-Средних, модифицированный FCM, метод кластеризации нечетких вероятностных С-Средних, обработка медицинских изображений и сегментация изображений.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Сегментация изображений является необходимой задачей для понимания и анализа изображений. В литературе предложено большое разнообразие методов. Сегментация изображения может быть определена как задача классификации, в которой каждый пиксель относится к определенному классу. Сегментация изображений является важным процессом для последовательных задач анализа изображений.

В общем случае задача сегментации включает в себя разделение данного изображения на ряд однородных сегментов, так что объединение любых двух соседних сегментов дает разнородный сегмент. Многочисленные методы сегментации были предложены ранее в литературе. Некоторые из них - это методы, основанные на гистограммах, методы

на основе границ, методы на основе областей, гибридные методы, которые объединяют как методы, основанные на границах, так и методы, основанные на областях, и так далее [1, 2]. В последние годы сегментация изображений широко применяется в медицине для диагностики заболеваний.

Сегментация изображений играет важную роль в различных приложениях, таких как зрение роботов, распознавание объектов и медицинская визуализация. В области медицинской диагностики в настоящее время существует широкое разнообразие методов визуализации, таких как рентгенография, компьютерная томография (КТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ) [3, 4]. В последнее время компьютерная томография (КТ) наиболее эффективно используется для диагностического обследования органов грудной клетки при таких заболеваниях, как рак легких, туберкулез, пневмония и эмфизема легких. Объем и размер медицинских изображений постепенно увеличиваются с каждым днем. Поэтому возникает необходимость в использовании компьютеров для облегчения обработки и анализа этих медицинских изображений. Несмотря на то, что оригинальный метод FCM дает хорошие результаты для сегментации изображений без шума, он не может сегментировать изображения, поврежденные шумом, выбросами и другими паразитными эффектами изображения.

Сегментация медицинских изображений является незаменимым шагом для большинства промежуточных задач анализа изображений. В настоящей статье представлен подход к сегментации

изображений с использованием модифицированного метода Нечетких С-Средних (FCM) и нечетких вероятностных С-Средних (FPCM). В последнее время многие исследователи выдвинули новые методы совершенствования метода FCM [5, 6]. Этот подход является обобщенной версией стандартного метода нечеткой кластеризации С-Средних (FCM). Ограничение традиционной методики FCM устраняется при модификации стандартной методики. Метод сформулирован путем модификации измерения расстояния стандартного метода FCM, чтобы позволить маркировке пикселя влиять на другие пиксели и сдерживать шумовой эффект во время сегментации. Метод Вероятностных С-Средних (PCM) интерпретирует кластеризацию как возможное разбиение. Вместо того чтобы иметь один член в целевой функции, вводится второй член, повышая эффективность функции принадлежности, выводя ее за ограничения максимального предела, возможного при учете одного фактора [7-8]. Эксперименты проводятся на реальных изображениях для исследования эффективности предложенной модифицированной методики FCM при сегментировании медицинских изображений. Для исследования точности предложенного нами подхода проведено сравнение стандартного FCM, модифицированного FCM, нечеткого вероятностного метода С-Средних [9-10].

Остальная часть статьи организована следующим образом: в разделе 2 представлен обзор соответствующих исследований в области сегментации медицинских изображений, в разделе 3 сначала объясняется стандартный метод FCM, а затем объясняются предлагаемые модифицированные методы FCM и FPCM. В разделе 4 обсуждаются экспериментальные результаты для реальных изображений. Раздел 5 завершает работу с меньшим количеством обсуждений.

## II. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

*А. Обычный метод нечетких С-Средних*

Метод кластеризации нечетких С-Средних (FCM) является одним из общепринятых подходов к присвоению пикселям значений принадлежности к нескольким подмножествам для сегментации или другого типа обработки изображений [14]. Как правило, метод FCM работает путем итерации двух необходимых условий до тех пор, пока не будет достигнуто решение. Каждая точка данных будет объединена со значением принадлежности для каждого класса после кластеризации FCM. Цель FCM состоит в том, чтобы определить центры класте-

ров и составить матрицу принадлежности к классу. Другими словами, он присваивает принадлежность к классу точке данных в зависимости от сходства точки данных со наиболее вероятным классом относительно всех других классов. Матрица принадлежности к классу - это матрица, в которой с-число групп, а N - число выборок. Пусть  $X = \{x_1, \dots, x_N\}$  - обучающее множество, а  $c \geq 2$  - целое число. Нечеткое с-разбиение "X" может быть представлено матрицей  $U = \{\mu_{ik}\} \in R^{c \times N}$ . U можно использовать для описания кластерной структуры X, оценивая  $\mu_{ik}$  как степень принадлежности  $x_k$  к кластеру i. Таблица кодирования векторов оценивается путем минимизации меры искажения, заданной следующим уравнением,

$$\text{Minimize: } J_m(U, v) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^c (\mu_{ki})^m \|X_k - v_i\|^2 A \quad (1)$$

где  $X = \{x_1, \dots, x_N\} \subset R^n$  в наборе данных, а с количество кластеров в X:  $2 \leq c < N$ , m - весовой показатель:  $1 \leq m < \infty$ ,  $U = (\mu_{ik})$  - нечеткое с-разбиение X,  $\|X_k - v_i\|_A$  - индуцированная а-норма  $R^n$ , а A - положительно определенная (NXN) весовая матрица.

Обычный метод FCM включает следующие шаги:

- Первоначально задаются значения для таких параметров, как c, A, m,  $\epsilon$ , а счетчик циклов 't' устанавливается равным 1.
- В качестве следующего шага необходимо создать случайную матрицу принадлежности U - cXN.
- Затем центры кластеров оцениваются с помощью следующего уравнения:

$$v_i^{(t)} = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{ki}^{(t)})^m X_k}{\sum_{k=1}^N (\mu_{ki}^{(t)})^m} \quad (2)$$

$$v_i^{(t)} = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{ki}^{(t)})^m X_k}{\sum_{k=1}^N (\mu_{ki}^{(t)})^m} \quad (3)$$

- Матрица принадлежности периодически обновляется с помощью следующего уравнения:

$$\mu_{ki}^{(t+1)} = \left[ \sum_{j=1}^c \left( \frac{d_{ki}}{d_{kj}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1} \quad (4)$$

Где  $d_{ki}$  задается выражением:

$$\|X_k - v_i^{(t)}\|_A \quad (5)$$

5. Если  $\max \left\{ \left| \mu_{ki}^{(t)} - \mu_{ki}^{(t-1)} \right| \right\} > \varepsilon$ , то наращиваем 't' и переходим к шагу 3.

#### Б. Модифицированный метод кластеризации Нечетких С-Средних для сегментации изображений

Наиболее важным недостатком стандартного метода FCM является то, что целевая функция не учитывает пространственную зависимость, поэтому она работает с Изображением, как с отдельными точками. Чтобы уменьшить шумовой эффект при сегментации изображения, предлагаемый метод включает как локальный пространственный контекст, так и нелокальную информацию в стандартный кластерный метод FCM с использованием нового индекса несходства вместо обычной метрики расстояния. Поэтому в предлагаемой нами статье для сегментации изображения используется модифицированный метод FCM. Метод нелокальных средних [15] [16] пытается воспользоваться высокой степенью избыточности изображения. Значение принадлежности определяет результаты сегментации, и, следовательно, значение принадлежности оценивается измерением расстояния, обозначаемым как  $d_{kj}$ . Поэтому подход модифицирует параметр измерения расстояния, на который достаточно быстро влияет локальная и нелокальная информация.

$$d_{ki}(x_j, v_i) = (1-\lambda_j) d_l^2(x_j, v_i) + \lambda_j d_{nl}^2(x_j, v_i) \quad (6)$$

где  $d_l$  означает измерение расстояния под влиянием локальной информации, а  $d_{nl}$  – измерение расстояния под влиянием нелокальной информации,  $\lambda_j$  с диапазоном от нуля до единицы является весовым коэффициентом, контролирующим компромисс между ними.

Измерение расстояния под влиянием локального измерения  $d_l$  задается формулой,

$$d_l^2(x_j, v_i) = \frac{\sum_{x_k \in N_j} \omega_l(x_k, x_j) d^2(x_k, v_i)}{\sum_{x_k \in N_j} \omega_l(x_k, x_j)} \quad (7)$$

где  $d^2(x_k, v_i)$  – евклидово измерение расстояния,  $\omega_l(x_k, x_j)$  – вес каждого пикселя в  $N_i$ . Измерение расстояния под влиянием нелокальной информации  $d_{nl}$  вычисляется как средневзвешенное значение всех пикселей в данном изображении  $I$ ,

$$d_{nl}^2(x_j, v_i) = \sum_{x_k \in I} \omega_{nl}(x_k, x_j) d^2(x_k, v_i) \quad (8)$$

Модифицированный метод FCM предусматривает следующие шаги:

- ▶ Установите количество кластеров 'c' и индекс нечеткости 'm'. Также инициализируйте нечеткий кластерный центроидный вектор 'v' случайным образом и установите  $\varepsilon > 0$  на небольшое значение.
- ▶ Установите размер окрестности, а размер окна включает в себя оценку центров кластеров и матрицу принадлежности.
- ▶ Оцените модифицированное измерение расстояния, используя уравнение, упомянутое как  $d_{ki}(x_j, v_i)$ .
- ▶ Обновите матрицу принадлежности и измерение расстояния.

#### В. Вероятностные методы С-Средних (PCM)

Для того чтобы преодолеть ограничения традиционной методики FCM, в настоящей статье для сегментации медицинских изображений был предложен Метод вероятностных С-Средних (PCM). Метод вероятностных С-Средних использует функцию принадлежности вероятностного типа для представления степени принадлежности. Предпочтительно, чтобы принадлежность для репрезентативных точек характеристик было как можно более высоким, а нерепрезентативные точки имели низкие показатели принадлежности. Начальная Функция, удовлетворяющая этим требованиям, формулируется следующим образом:

$$\min \left\{ J_m(x, \mu, c) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N \mu_{ij}^m d_{ij}^2 + \sum_{i=1}^c \eta_i \sum_{j=1}^N (1 - \mu_{ij})^m \right\} \quad (9)$$

где  $d_{ij}$  – расстояние между j-мя данными и центром кластера i,  $\mu_{ij}$  – степень принадлежности, m – степень нечеткости,  $\eta_i$  – подходящее положительное число, c – количество кластеров, N – количество пикселей,  $\mu_{ij}$  можно получить с помощью следующего уравнения:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{1 + \left( \frac{d_{ij}^2}{\eta_i} \right)^{\frac{1}{m-1}}} \quad (10)$$

Значение  $\eta_i$  определяет расстояние, на котором значения принадлежности точки к кластеру становятся равными 0,5. Основное преимущество этого метода PCM заключается в том, что значение  $\eta_i$  может быть фиксированным или изменяться на каждой итерации. Это может быть достигнуто путем изменения значений  $d_{ij}$  и  $\mu_{ij}$ . PCM более надежен в случае наличия шума, в поиске допустимых кластеров и в предоставлении надежной оценки центров.

Обновление значений принадлежности зависит от измерений расстояния [17]. Евклидово расстояние и расстояние Махаланобиса (Mahalanobis) являются двумя общими подходами. Евклидово расстояние хорошо работает, когда набор данных является компактным или изолированным [18], а расстояние Махаланобиса учитывает корреляции в данных, используя обратную ковариационную матрицу данных, которая может быть определена следующим образом:

$$D = \sum_{i,j=1}^{i,j=p} A_{ij} (x_i - y_i)(x_j - y_j) \quad (11)$$

$$A_{ij} = \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (12)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – средние значения двух различных наборов параметров X и Y.  $\sigma_i^2$  – соответствующие дисперсии, а  $\rho_{ij}$  – коэффициент корреляции между i-ым и j-м вариантами.

#### Г. Нечеткий вероятностный метод С-Средних (FPCM)

Метод FPCM был предложен N. R. Pal, K. Pal и J. C. Bezdek [18] и включает в себя как значения вероятности, так и значения принадлежности. Модель FPCM можно представить в виде:

$$\min_{(U, T, V)} \left\{ J_{m, \eta}(U, T, V; X) \right\} = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (u_{ik}^m + t_{ik}^\eta) D_{ikA}^2 \quad (13)$$

с учетом ограничений

$$m > 1, \quad \eta > 1, \quad 0 \leq u_{ik}, t_{ik} \leq 1. \quad (14)$$

$$D_{ikA} = \|x_k - v_i\|_A, \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1 \quad \forall k, \quad \text{то есть, } U \in M_{fcn} \quad (16)$$

Где U – матрица принадлежности, T – вероятностная матрица, V – результирующие центры кластеров, c и p – номер кластера и номер точки данных соответственно. Необходимыми условиями первого порядка для экстремума  $J_{m, \eta}$  являются: Если  $D_{ikA} = \|x_k - v_i\|_A > 0$  для всех i и k,  $m, \eta > 1$ , а X содержит не менее c различных точек данных, то

$$(U, T^t, V) \in M_{fcn} \times M_{fcn} \times \mathcal{R}^p \quad (17)$$

можно минимизировать  $J_{m, \eta}$  только если

$$u_{ik} = \left( \sum_{j=1}^c \left( \frac{D_{ikA}}{D_{jkA}} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right)^{-1}, \quad 1 \leq i \leq c; \quad 1 \leq k \leq n \quad (18)$$

$$t_{ik} = \left( \sum_{j=1}^n \left( \frac{D_{ikA}}{D_{ijA}} \right)^{\frac{2}{\eta-1}} \right)^{-1}, \quad 1 \leq i \leq c; \quad 1 \leq k \leq n \quad (19)$$

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^n (u_{ik}^m + t_{ik}^\eta) x_k}{\sum_{k=1}^n (u_{ik}^m + t_{ik}^\eta)}, \quad 1 \leq i \leq c. \quad (20)$$

Приведенные выше уравнения показывают, что на принадлежность  $u_{ik}$  влияют все центры кластера c, в то время как на возможность  $t_{ik}$  влияет только i-й центр кластера  $c_i$ . Вероятностный компонент определяет  $t_{ik}$  относительно всех n точек данных, но не относительно всех c кластеров. Таким образом, принадлежность можно назвать относительной типичностью, оно измеряет степень принадлежности точки к одному кластеру относительно других кластеров и используется для четкой маркировки точки данных. А вероятность можно рассматривать как абсолютную типичность, она измеряет степень принадлежности точки к одному кластеру относительно всех других точек данных, это может уменьшить эффект выбросов. Сочетание как принадлежности, так и вероятности может привести к лучшему результату кластеризации.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Предложенный модифицированный метод FCM и нечеткий вероятностный метод С-Средних реализованы с использованием openCV и протестированы на реальных изображениях для исследования точности сегментации предложенного подхода. Для сравнения в экспериментах были использованы три различных типа методов FCM. Это стандартный FCM, Модифицированный FCM и метод нечеткой вероятностной кластеризации С-Средних.

#### Д. Набор данных Реального изображения

Реальный набор данных изображения молочных желез используется для оценки точности предложенного алгоритма сегментирования медицинского Изображения. Полученные результаты затем сравниваются с результатами сегментации, которые были выполнены вручную для изучения точности предложенного алгоритма. Результаты сегментации стандартной FCM, модифицированной FCM и нечеткой вероятностной кластеризации С-Средних рассматриваются как наилучший алгоритм, обеспечивающий лучшие результаты сегментации для реальных медицинских Изображений. Три наиболее важными параметрами, используемыми для определения точности предложенного алгоритма, являются сходство, соотношение ложноположительных результатов и ложноотрицательных результатов. Из полученных результатов можно сделать вывод, что предложенный нами метод хорошо зарекомендовал себя по сравнению с другими методиками сегментирования реальной медицинской информации. Три основных признака, упомянутых выше, то есть сходство, соотношение ложноположительных и ложноотрицательных результатов, перечислены в таблице 1 для всех трех методов. На Рисунке 1 показан результат сегментации стандартных FCM и FPCM.

### РАЗЛИЧНЫЕ ИНДЕКСЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ

Метод	Сходство	Показатель Ложноположительных Срабатываний	Показатель Ложноотрицательных Срабатываний
Стандартный метод FCM	86.03	20.15	8.50
Модифицированный метод FCM	89.50	16.50	5.30
Метод нечеткой вероятностной кластеризации С-Средних (FPCM)	92.50	12.80	3.40

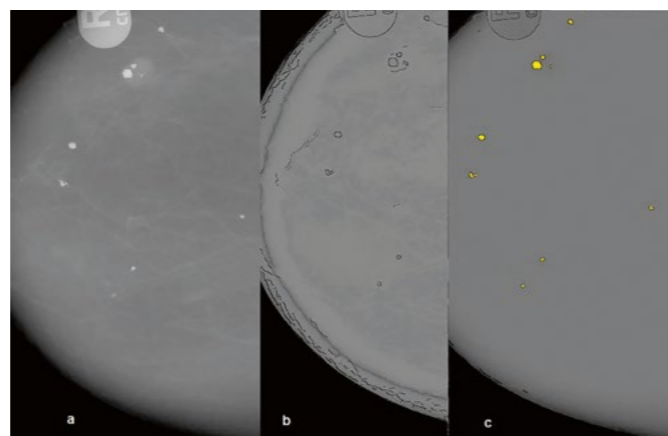


Рисунок 1 (а) Фактическое Изображение, сегментированные изображения (б) с использованием стандартного FCM (с) с

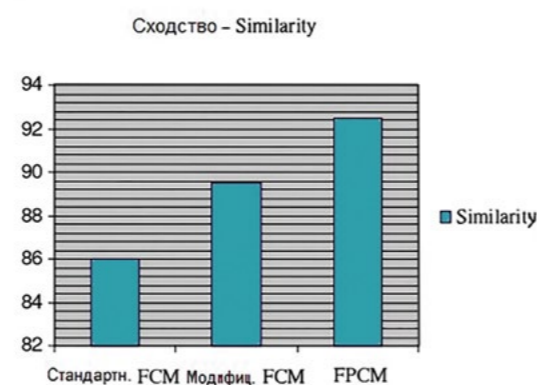


Рисунок 2. Сравнение сходства

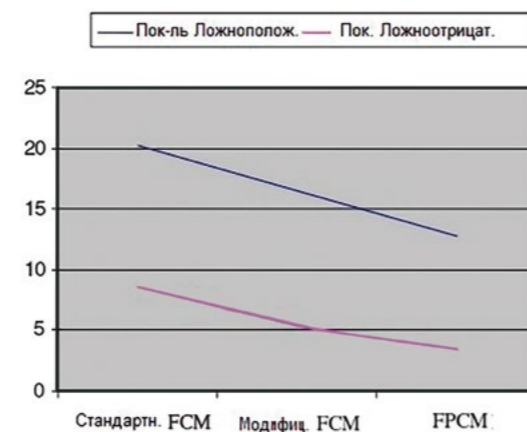


Рисунок 3. Сравнение соотношения ложноположительных и ложноотрицательных

Экспериментальные результаты, полученные с использованием метода вероятностных нечетких С-Средних (FPCM), показали, что предложенная методика сегментации изображений имеет лучшую производительность по сравнению с другими методами расширения FCM. Кроме того, предложенный подход сегментации изображений с использованием метода вероятностных нечетких С-Средних значительно устраняет эффект шума. Это, в свою очередь, повысило точность сегментации предложенного метода сегментации изображений.

### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

FCM является одним из общепринятых методов кластеризации и широко применяется для сегментации медицинских изображений. И наоборот, обычный FCM постоянно страдает от шума на изображениях. Несмотря на то, что оригинальный метод FCM дает хорошие результаты при сегментации изображений без шума, он не может сегментировать изображения, поврежденные шумом, выбросами и другими паразитными эффектами изображения. Хотя многие исследователи разработали множество расширенных методов, основанных на FCM, ни

один из них не является совершенным. В настоящей статье предложен модифицированный метод кластеризации FCM и метод вероятностных нечетких С-Средних (FPCM). В предложенном модифицированном методе FCM включена как локальная, так и нелокальная информация для управления компромиссом между ними. Метод сформулирован путем модификации измерения расстояния стандартного метода FCM, чтобы позволить маркировке пикселя влиять на другие пиксели и сдерживать шумовой эффект во время сегментации. Метод Вероятностных Нечетких С-Средних (FPCM) интерпретирует кластеризацию как возможное разбиение и включает функции принадлежности. Вместо одного члена в целевой функции включается второй член, что заставляет принадлежность быть как можно более определенной без ограничения максимального предела, равного единице. Три наиболее важными параметрами, используемыми для определения точности предложенного метода, являются сходство, Показатель ложноположительных Срабатываний и Показатель Ложноотрицательных Срабатываний. Экспериментальные результаты показали, что предложенный метод работает лучше, чем другие расширенные методы сегментации FCM.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Применение контурного анализа изображений для обработки речевых сигналов // А. М. Бонч-Бруевич, И. А. Беляев, Д. А. Сошнева, С. Ю. Евтеева // Информация и безопасность. – 2012. – Т. 15, № 4. – С. 571-574. – EDN QCDGHF.
2. Пономарев, Д. Ю. Особенности применения контурного метода тензорного анализа инфокоммуникационных сетей // Д. Ю. Пономарев // Тенденции развития науки и образования. – 2018. – № 42-5. – С. 12-17. – DOI 10.18411/lj-09-2018-88. – EDN YLMOXH.
3. Машанов, Д. В. Анализ изображения термограммы с помощью контурного анализа / Д. В. Машанов // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 2. – С. 339-340. – EDN YTFPYD.
4. Interval-valued fuzzy c-means algorithm and interval-valued density-based fuzzy c-means Algorithm // A. K. Varshney, P. Mehra, P. K. Muhuri, Q. M. Danish Lohani // IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Glasgow, 19-24 июля 2020 года. – Glasgow, 2020. – P. 9177602. – DOI 10.1109/FUZZ48607.2020.9177602. – EDN XHEBDR.
5. Application of Fuzzy c-means algorithm for the estimation of Asphaltene precipitation // A. Taherpour, A. Cheshmeh Sefidi, A. Bemani, T. Hamule // Petroleum Science and Technology. – 2018. – Vol. 36, No. 3. – P. 239-243. – DOI 10.1080/10916466.2017.1416632. – EDN YEZQD.
6. Kembaren, R. C. G. I. Analysis Clustering Using Normalized Cross Correlation In Fuzzy C-Means Clustering Algorithm // R. C. G. I. Kembaren, O. S. Sitompul, S. Sawaluddin // Sinkron. – 2022. – Vol. 7, No. 4. – P. 2262-2271. – DOI 10.33395/sinkron.v7i4.11666. – EDN CBORUJ.
7. Нейский, И. М. Методика адаптивной кластеризации фактографических данных на основе интеграции алгоритмов MST и Fuzzy C-means / И. М. Нейский, А. Ю. Филиппович // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. – 2009. – № 3. – С. 48-61. – EDN PNCRJ.
8. Fang, J. Weld Pool Image Segmentation of Hump Formation Based on Fuzzy C-Means and Chan-Vese Model // J. Fang, K. Wang // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2019. – Vol. 28, No. 7. – P. 4467-4476. – DOI 10.1007/s11665-019-04168-y. – EDN XSDJTU.
9. Zou, K. An new initialization method for fuzzy c-means algorithm // K. Zou, Zh. Wang, M. Hu // Fuzzy Optimization and Decision Making. – 2008. – Vol. 7, No. 4. – P. 409-416. – DOI 10.1007/s10700-008-9048-8. – EDN MCHPWD.
10. Rida Deana. Konstruksi Sistem Inferensi Fuzzy Menggunakan Subtractive Fuzzy C-Means pada Data Parkinson / Rida Deana, Didi Suhaedi, Erwin Harahap // Bandung Conference Series: Mathematics. – 2022. – Vol. 2, No. 1. – DOI 10.29313/bcs.v2i1.1837. – EDN ENHJNM.

# УСИЛЕНИЕ КОНТРАСТА ДЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СЖАТИЕМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО МЕТОДА



<sup>1</sup>Ю.Ю. Громов



<sup>2</sup>П.Ю. Пушкин



<sup>2</sup>П.И. Карасев



<sup>1</sup>Al-Ameedee Mustafa  
Abdulkadhim Dhahir

## Fuzzy Contrast Enhancement for Compressed Images

Yu. Yu. Gromov<sup>1</sup>  
S.V. Artemova<sup>2</sup>  
P.U. Pushkin<sup>2</sup>  
Al-Ameedee Mustafa Abdulkadhim Dhahir<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ТГТУ, gromovtambov@yandex.ru,  
<sup>2</sup>РТУ МИРЭА, pushkin@mirea.ru, <sup>2</sup>РТУ  
МИРЭА, karasev@mirea.ru, <sup>1</sup>ТГТУ,  
ameedeemustafa@mail.ru

**АННОТАЦИЯ:** в данной работе проводится исследование обработки сжатых изображений, без полной распаковки. Методы обработки изображений со сжатием обеспечивают мощную вычислительную альтернативу классическим реализациям (на уровне пикселей). Методы, описанные в литературе, в основном основаны на линейных арифметических операциях между пикселями. В данной работе рассматривается задача реализации нелинейного оператора с использованием обработки сжатой области. Предложен новый метод улучшения цифрового изображения с использованием теории нечетких множеств, адаптированный к частотному содержанию каждого блока коэффициентов в кодированном JPEG-изображении DCT (Discrete Cosine Transform - дискретное косинусное преобразование).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** компьютерное зрение, обработка изображений, нечеткие методы, функции агрегирования, функции принадлежности, операторы OWA.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Хранение изображений в растровом формате не так часто используется в повседневных приложениях: даже медицинские изображения хранятся в формате JPEG. Это происходит из-за преимуществ, предлагаемых форматом JPEG: требуется меньше места для хранения и большая емкость для передачи информации (через Интернет). Для изображений, хранящихся в формате JPEG, рекомендуется обрабатывать их непосредственно в сжатой области, чтобы сократить время, необходимое для обработки данных. Эта экономия времени обусловлена тем, что больше нет необходимости распаковывать изображение, обрабатывать его на уровне пикселей и повторно сжимать обратно, а обработка изображений со сжатием означает, что требуется обрабатывать меньше данных.

Линейную обработку проще реализовать в сжатой области, поскольку нет проблем с обработкой изображения, включающего линейные операции, такие как сложение с константой, умножение на константу, сложение двух изображений, прогрессивное перекрестное затухание двух изображений. Реализация операций с участием нелинейных операторов является сложной задачей, но не невозможной, и когда правильная комбинация найдена, обработка происходит намного быстрее из-за уменьшенного числа коэффициентов (вместо 64 в обработке на уровне пикселей, соответствующей блоку пикселей 8x8, в сжатой области обрабатывается только 20% пикселей).

Реализации обработки изображений и видеопоследовательностей со сжатием JPEG/MPEG уже представлены в литературе[1-4].

В работе представлен метод обработки изображений со сжатием. Для улучшения изображений используются нечеткие методы, включающие нелинейные и пороговые операции. Методы улучшения изображения со сжатием основаны на изменении частотного преобразования изображения.

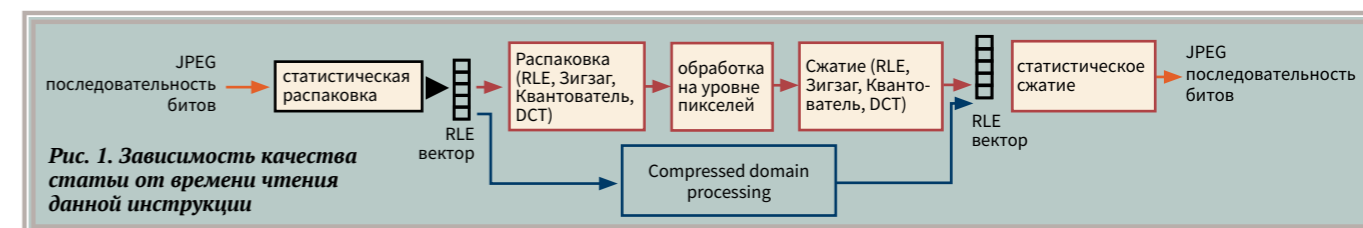
## II. УЛУЧШЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЧЕТКОГО МЕТОДА

Улучшение изображения включает в себя обработку изображения, чтобы сделать его удовлетворительным для пользователя. Одна из задач - обеспечить быструю и точную альтернативную реализацию в сжатой области классическому методу нечеткого улучшения изображения, основанному на глобальном пороге, который обычно выполняется на уровне пикселей. Такой метод может значительно повысить вычислительную эффективность методов обработки изображений, применяемых к изображению JPEG, избегая сжатия и распаковки до и после обработки.

Далее будут представлены основные шаги, ис-

пользуемые для сжатия/распаковки изображений JPEG. Изображение сначала делится на блоки 8x8, и каждый блок 8x8 вычисляется. После этого DCT применяется к каждому блоку, и в результате получают DCT-коэффициенты, которые квантуются[5-7]. Многие малые коэффициенты, обычно высокочастотные, квантованы до нуля. Следующий шаг - зигзагообразное сканирование матрицы DCT с последующим кодированием RLE (Run Length Encoding - кодирование длины прогона) и энтропийным кодированием (Huffman coding - кодирование Хаффмана). В декодере сжатое изображение распаковывается, а затем деквантируется и обратно DCT - трансформируется.

Существует два способа улучшения изображений, сжатых с помощью JPEG: обработка сжатой области (без распаковки/сжатия) и обработка на уровне пикселей (улучшение изображения после распаковки):



Для блоков 8x8 пикселей вместо 64 в обработке на уровне пикселей в сжатой области обрабатывается только небольшое количество пикселей, поскольку большинство коэффициентов в области DCT после квантования равны нулю. В данном методе используется адаптивную минимальную распаковку: полная распаковка больше не нужна, но распаковка используется для блока, имеющего много деталей, для повышения точности обработки.

### A. Усиление контраста с использованием INT-оператора из теории нечетких множеств

В последние годы многие исследователи применили теорию нечетких множеств [8] для разработки новых методов улучшения контраста. Рассмотрим цифровое изображение в черно-белом отображении, представленное значениями уровня полутонов для пикселей, масштабированными до диапазона [0; 1]. Пусть  $l$  - любой серый уровень пикселя в этом цифровом изображении,  $l \in [0; 1]$ .

Улучшение контрастности - это базовая операция обработки точек, направленная главным образом на максимизацию (увеличение) динамического диапазона изображения. Более высокая контраст-

ность изображения может быть достигнута путем затемнения уровня серого в нижнем диапазоне яркости (обычно менее 0,5 по шкале [0;1]) и осветления в верхнем диапазоне яркости [9]. Эта обработка обычно подразумевает использование нелинейной функции; типичным фоном такой функции может быть тот, который представлен на рис.2. Возможное математическое выражение такой нелинейной функции,  $\text{Int}: [0;1] \rightarrow [0;1]$ , выглядит следующим образом:

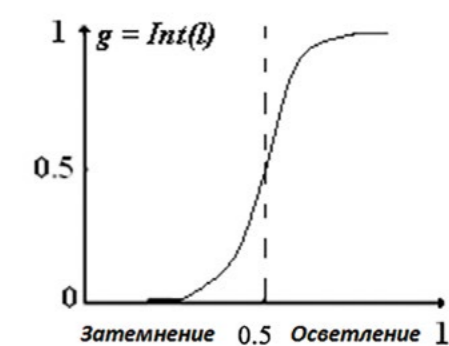
$$\text{Int}(l) = \begin{cases} 2 \cdot l^2, & \text{если } 0 \leq l \leq 0,5 \\ 1 - 2 \cdot (1-l)^2, & \text{если } 0,5 \leq l \leq 1 \end{cases}, \quad l \in [0;1]$$

Выражение в (1) представляет собой хорошо известный оператор в теории нечетких множеств, а именно оператор интенсификации (INT); d применении к цифровым изображениям он обладает эффектом усиления контраста.

Обозначим полученный уровень яркости черно-белого изображения с повышенным контрастом через  $g$ :

$$g = \text{Int}(l), \forall l \in [0;1]. \quad (2)$$

Таким образом, изображение с повышенной контрастностью будет иметь уровни серого цвета своих пикселей, заданные нелинейным точечным преобразованием на рис. 2, примененным к исходному изображению в черно-белом отображении.





**Б. Свертка изображения со сжатием**

Для реализации нечеткого метода в сжатой области необходимы линейные операции и нелинейные операции. Например, необходим квадрат изображения, который является нелинейной операцией и может быть получен с помощью метода умножения двух изображений со сжатием [8-9].

Будут введены следующие обозначения: рассматривая исходное изображение в чёрно-белом отображении  $H \times W$ , разделенное на блоки по  $8 \times 8$  пикселей (как в типичном процессе кодирования JPEG), необходимо обозначить любой такой блок пикселей матрицей  $U [8 \times 8]$ , содержащие значения уровня яркости чёрно-белого изображения пикселей, масштабированных до диапазона  $[0; 1]$ :

(3)

$$U = \{u(i, j) \in [0; 1], \text{ где } i = 0, \dots, 7, j = 0, \dots, 7\}$$

Рассмотрим  $U_{dct} [8 \times 8]$  как матрицу коэффициентов DCT любого блока пикселей  $8 \times 8$  из исходного изображения  $U$  (непосредственно доступного в кодированном изображении JPEG, как показано на рис. 1). Чтобы применить метод усиления контрастности, описанный выше, нам нужно вычислить квадрат яркости каждого пикселя в блоке  $8 \times 8$  в сжатой области. То есть, необходимо получить DCT блока квадрата яркости  $8 \times 8$ . Обозначим эту матрицу DCT через  $U_{dct.sq} [8 \times 8]$ . Можно получить из  $U_{dct} [8 \times 8]$  следующим:

(4)

$$U_{dct.sq}(x_1, x_2) = \frac{1}{4 \cdot Q(x_1, x_2)} \sum_i \sum_j C(i, x_1) \cdot C(j, x_2) \cdot [u(i, j)]^2 =$$

$$= \sum_{y_1, y_2, w_1, w_2} U_{dct}(y_1, y_2) \cdot U_{dct}(w_1, w_2) \cdot W_Q(y_1, y_2, w_1, w_2, x_1, x_2)$$

где:

$$W_Q(y_1, y_2, w_1, w_2, x_1, x_2) = \frac{Q(y_1, y_2) \cdot Q(w_1, w_2)}{256 \cdot 64 \cdot Q(x_1, x_2)} \cdot W(x_1, y_1, w_1) \cdot W(x_2, y_2, w_2)$$

с учетом:  $W(x, y, w) = \sum_i C(i, x) \cdot C(i, y) \cdot C(i, w)$ 

$$C(i, x) = A(x) \cos \frac{(2 \cdot i + 1) \cdot x \cdot \pi}{16}; \quad A(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{для } x = 0 \\ 1, & \text{для } x \neq 0 \end{cases}$$

Возможно эффективно вычислить эту сумму, заметив несколько фактов: во-первых, для сжатых изображений.  $U_{dct}$  равен нулю для большинства значений  $i$ , во-вторых, что в функции WQ ( $y_1, y_2, w_1, w_2, x_1, x_2$ ) только около 4% членов являются ненулевыми.

**В. Улучшение нечеткого изображения со сжатием**

Следует учитывать, что в сжатой области перед применением сжатия на основе DCT метода JPEG значения яркости масштабируются из диапазона  $[0; 255]$  в диапазон  $[-128; 127]$ , симметричный по отношению к 0. Следовательно, результирующий коэффициент DC также будет масштабироваться по отношению к 0, а порог для нечеткого метода в сжатой области должен иметь значение 0 (вместо 0,5 в случае нечеткого метода, применяемого на пиксельном уровне).

Метод применяется к коэффициентам DCT, и только в этом случае коэффициент DC будет сравниваться с порогом для каждого блока  $8 \times 8$ . Предложенный метод вычисления значений яркости в улучшенном изображении  $IntU_{dct}$  задается следующей формулой:

(5)

$$IntU_{dct}(i, j) = \begin{cases} U_{dct.sq}(i, j) + 2 \cdot U_{dct}(i, j) - 128, & \text{если } U_{dct}(0, 0) \leq 0 \\ 2 \cdot U_{dct}(i, j) - U_{dct.sq}(i, j) - 128, & \text{если } U_{dct}(0, 0) > 0 \end{cases}$$

где:  $U_{dct}(0, 0)$  - коэффициент DC, соответствующий блоку  $8 \times 8$  пикселей матрицы DCT, где:  $i = 0, 1, \dots, 7; j = 0, 1, \dots, 7;$

В случае, если обработка выполняется в сжатой области, порог устанавливается один раз для каждого блока  $8 \times 8$ , в то время как при обработке на уровне пикселей он выполняется отдельно для каждого пикселя внутри блока (64 операции).

Хотя использование порога только один раз для блока  $8 \times 8$  может привести к ошибочной классификации, потому что применение одной и той же формулы для каждого пикселя из блока  $8 \times 8$  может быть неправильным. Это относится к блокам с сильно неоднородным распределением яркости, то есть с большим содержанием AC-энергии (концептуального наполнения). Этого недостатка можно избежать путем полной распаковки всех блоков, содержащих более высокий энергетический коэффициент, и путем обработки их на пиксельном уровне. Таким образом, обработка в сжатой области гораздо

эффективнее, так как количество блоков, нуждающихся в полной распаковке, невелико, как это видно из экспериментальной части (табл. 1).

Метод нечеткого улучшения изображения определяется для каждого блока размером  $8 \times 8$  пикселей изображения JPEG следующим образом:

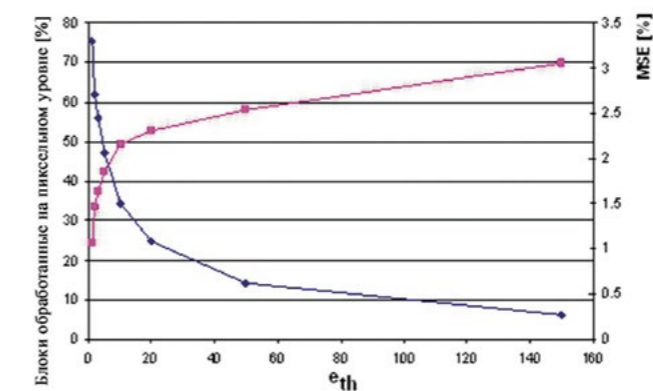
► среднее значение энергетических коэффициентов AC из блока DCT, обозначенное как EAC, вычисляется следующим образом:

(6)

$$E_{AC} = \frac{\sum_{i,j} |U_{dct}(i, j)|^2}{64}$$

► Если  $E_{AC} < e_{th}$  (где значение  $e_{th}$  представляет собой порог выбора между однородным блоком и блоками со значительным количеством деталей), то блок можно считать однородным по яркости и он будет обрабатываться в сжатой области.

► Если  $E_{AC} > e_{th}$  - то блок имеет значительное содержание деталей и он будет распакован, каждый пиксель из блока обрабатывается отдельно, используя классические методы улучшения.

Рис. 3. Влияние  $e_{th}$  на изображение

Значение  $e_{th}$  выбирается из экспериментов с учетом типа изображения. Очень малое значение  $e_{th}$  всегда приведет к обработке изображений очень хорошего качества, но количество обрабатываемых блоков в сжатой области будет довольно небольшим, поэтому сложность вычислительного метода существенно не меньше, чем при прямой попиксельной обработке. Соответствующее значение  $e_{th}$  приведет к увеличению числа блоков, обрабатываемых в сжатом виде и. таким образом, возможно получить быстрый нечеткий метод улучшения изображения

**III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Программная реализация была выполнена с использованием языка программирования C++. Для реализации был выбран набор различных изображений, с различными размерами, содержанием деталей, контрастностью и средней яркостью. Производительность метода была исследована относительно:

► качества изображения, полученного в результате процесса нечеткого усиления, по сравнению с нечетким усилением в пространственной области (на уровне пикселей);

► оценки эффективности метода обработки с блоками  $8 \times 8$  непосредственно в сжатой области, количества блоков, обрабатываемых на уровне пикселей;

Результаты улучшенных изображений с использованием предложенного метода представлены на следующих рисунках:

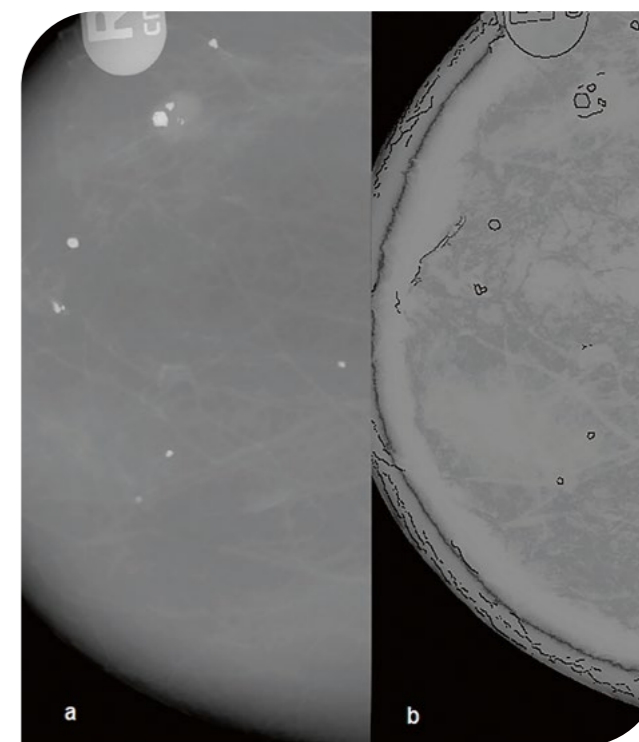


Рисунок. 4.а. Исходное Медицинское Изображение.jpg; б. Улучшенное изображение с использованием предложенного алгоритма

Задача - получить ту же производительность, что и при стандартном улучшении на уровне пикселей, но со значительным снижением вычислительной сложности. В качестве меры качества используется MSE (среднеквадратическая ошибка) между процессом обработки изображений на уровне пикселей и обработки изображений в сжатой области с помощью данного метода.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод в классе цифровой обработки изображений со сжатием, предназначенный для улучшения изображений с использованием теории нечетких множеств. Метод тестировался на разных изображениях, имеющих разную статистику, с разными классами контрастности и средней яркостью. Экспериментальные результаты показывают лучшую вычислительную эффективность по сравнению со стандартным методом обработки (который требует полной распаковки изображения) при тех же условиях сохранения качества изображения.

Метод может быть оптимизирован с помощью автоматического метода выбора порога, чтобы классифицировать блоки по их содержанию АС (концептуального наполнения), энергетического показателя  $e_{th}$ , чтобы получить наилучший компромисс между скоростью обработки и качеством результирующего изображения. Этот вопрос в настоящее время исследуется, а также применение этого метода к другим сжатым предметным областям обработки цифровых изображений (например, сегментации).

Результаты для различных значений  $e_{th}$

Тип изображения	$e_{th}$	MSE [%]	Количество блоков, обработанных на уровне пикселей	Общее количество блоков 8x8	Блоки, обработанные на уровне пикселей [%]
Предметы.jpg	8	9.803	46	1000	4.6
Животные.jpg	3	5.38	175	1000	17.50
Автомобили.jpg	10	2.55	61	1200	5.08
Люди.jpg	5	5.716	633	4096	15.45
Природа.jpg	10	1.65	31	1728	1.79
Лица.jpg	10	5.98	103	912	11.29
Медицинское.jpg	10	9.53	89	1768	5.03

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Киричек, Г. А. Математические методы обработки графического изображения стандарта JPEG // Г. А. Киричек, Е. В. Артюхова // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. – 2012. – № 2-2. – С. 201-211. – EDN PEBKDV.
2. Алексеев, Р. Ю. Автоматизация обработки восстанавливаемых фрагментированных данных на примере файлов формата JPEG / Р. Ю. Алексеев // Межвузовская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е.В. Армениянского: Материалы конференции, Москва, 17–29 февраля 2016 года / Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». – Москва: Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ, 2016. – С. 316-317. – EDN WFFMRN.
3. Сазонов, К. В. Статистические методы в задачах отбора и обработки искаженных графических файлов формата JPEG // К. В. Сазонов, Н. В. Шишкин, В. Л. Яковлев // Телекоммуникации. – 2007. – № 4. – С. 1-9. – EDN HZGVVY.
4. Самаров, Е. К. сравнительный анализ средств сжатия и обработки растровых изображений JPEG, JPEG 2000, ICER и PNG // Е. К. Самаров // Перспективы, организационные формы и эффективность развития сотрудничества российских и зарубежных ВУЗов: Сборник материалов VII Ежегодной международной научной конференции, Научград Королев, 10–11 апреля 2019 года. – Научград Королев: Общество с ограниченной ответственностью "Научный консультант", 2019. – С. 416-421. – EDN WSRRO.
5. Метод квантования коэффициентов дискретного вейвлет-преобразования для компрессии изображений / А. В. Бумагин, А. В. Гондарь, А. А. Прудников, В. Б. Стешенко // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – № 2. – С. 55-59. – EDN QYOVPI.
6. Кучумов, А. А. Алгоритм восстановления матрицы квантования по зашумленному изображению изначально полученному из изображения формата JPEG // А. А. Кучумов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – Т. 5, № 11. – С. 51-52. – EDN OPIGJH.
7. Васильева, Н. С. Выбор шага квантования при построении цветовой гистограммы в задаче поиска изображений // Н. С. Васильева // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2009. – № 2. – С. 156-165. – EDN KVNEKV.
8. Hybrid Missing Value Imputation Algorithms Using Fuzzy C-Means and Vaguely Quantified Rough Set // D. Li, H. Zhang, T. Li [et al.] // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2022. – Vol. 30, No. 5. – P. 1396-1408. – DOI 10.1109/tfuzz.2021.3058643. – EDN BZGALJ.
8. Application of a hybrid method of machine learning for description and on-line estimation of methane hazard in mine workings // M. Sikora, Z. Krzysztanek, B. Wojko, K. Spiechowicz // Journal of Mining Science. – 2011. – Vol. 47, No. 4. – P. 493-505. – DOI 10.1134/s1062739147040125. – EDN IDTPBR.



## ДАЙДЖЕСТ

ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ  
ПО ТЕМАТИКЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



Алексей, ведущий  
Telegram-канала @RUSmicro

Канал "Русская электроника" – отличный источник отраслевой информации, зачастую предоставляющий оперативную и эксклюзивную информацию, которая представляет интерес как для работающих в отрасли, так и для интересующихся положением дел в производстве российской электроники".



Анна, директор  
ООО «РСВ Электроникс»

Читаю канал "Русская Электроника" каждый день. Основные и важные новости узнаю в первую очередь из их Telegram-канала. Ничего лишнего. Так держать. 👍



Николай, ведущий специалист  
ФГБУ «ВНИИР»

"Русская электроника" – канал, оперативно реагирующий на новости и нужды электронной отрасли. Прекрасно организован дайджест – всегда есть что-то интересное. 👍



Степан, сотрудник  
ПАО «Уралмашзавод»

Канал занятый, позволяет узнать, как у нас вообще обстоят дела с электроникой/электротехникой. В метро полистать дайджест – самое то.



# 81%

читателей готовы  
рекомендовать  
нас



\*По итогам опроса, проведенного среди подписчиков Telegram-канала «Русская электроника» 19.04.2023



РАЗРАБОТАНО  
АО «НИИЭТ»

ОТДЕЛ МАРКЕТИНГА  
АО «НИИЭТ»

Тел.: +7 (473) 222-91-70  
Email: e.pletneva@niiet.ru



# НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ

32-РАЗРЯДНЫЙ УЛЬТРАНИЗКОПОТРЕБЛЯЮЩИЙ  
МИКРОКОНТРОЛЛЕР RISC-V В ПЛАСТИКОВОМ КОРПУСЕ



**СОЗДАН ДЛЯ:**

- IoT - устройств;
- Приборов учета электроэнергии;
- Бортовых, промышленных и робототехнических систем.