

MIESIĘCZNIK

№ 2(45), 2025

POŁOCKI.

Т о м I.

Р о к 1818.

«Вестник Полоцкого государственного университета»  
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-  
научного журнала «Месячник Полоцкий».

---

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия С. Фундаментальные науки

В серии С научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники и управления, электрофизики, электрофизических установок (технические науки), математики.

---

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСІТЭТА  
Серыя С. Фундаментальныя наукуі

У серыі С навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія праўшлі рэцэнзуванне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне інфарматыкі, вылічальнай тэхнікі і кіравання, электрафізікі, электрафізічных установак (тэхнічныя науки), матэматыкі.

---

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY  
Series C. Fundamental sciences

Series C includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in the field of computer science, computer engineering and management, electrophysics, electrophysical installations (technical sciences), mathematics.

---

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.  
Электронная версия номера размещена на сайте <https://journals.psu.by/fundamental>.

Адрес редакции:  
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,  
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь  
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: [vestnik@psu.by](mailto:vestnik@psu.by)

Отв. за выпуск: С. А. Вабищевич.  
Редактор С. Е. Рясова.

Подписано к печати 31.10.2025. Бумага 80 г/м<sup>2</sup>. Формат 60×84<sup>1/8</sup>. Ризография.  
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 10,1. Тираж 50 экз. Заказ 443.

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 004.89

DOI 10.52928/2070-1624-2025-45-2-2-8

**WAVESTYLEGAN: ВЕЙВЛЕТ-ГЕНЕРАТИВНАЯ СОСТЯЗАТЕЛЬНАЯ СЕТЬ**

**В. А. ВОРОБЕЙ**, канд. физ.-мат. наук, доц. **А. Э. МАЛЕВИЧ**  
(Белорусский государственный университет, Минск)

**U. Varabei ORCID** <https://orcid.org/0009-0006-9604-8894>  
**A. Malevich ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-8716-8655>

Разработана модель генеративной состязательной сети *WaveStyleGAN* для работы с изображениями на основе семейства архитектур *StyleGAN*. Ключевыми особенностями предложенной архитектуры являются переход к обработке вейвлет-признаков изображений, использование в дискриминаторе самомодулируемых сверток, а также модифицированных блоков *Fast Fourier Convolution*. Внесенные изменения позволили уменьшить сложность и размер модели по сравнению с базовыми версиями. Полученная модель была обучена на наборе данных человеческих лиц *FFHQ* в разрешении  $1024 \times 1024$  и смогла сохранить высокое качество генерации изображений при значительно уменьшенном количестве итераций обучения. Время работы обученной сети на *CPU* сократилось примерно втрое по сравнению с оригинальной моделью, что существенно расширяет возможности по ее встраиванию в окружения, где отсутствует доступ к вычислениям на графическом процессоре.

**Ключевые слова:** генеративные состязательные сети, генерация изображений, дискретное вейвлет-преобразование, вейвлеты, нейронные сети.

**Введение.** За последние несколько лет модели генерации изображений достигли значительного прогресса и теперь зачастую вызывают восхищение качеством создаваемых картинок: детализированностью, стилем, согласованностью отдельных частей и предметов в кадре. Наиболее популярными моделями для создания изображений являются диффузионные сети (Stable Diffusion 3.5 [1], DALL-E 3 [2], Midjourney и др.), так как они обеспечивают отличное качество генерации, а кроме того, пользователь при взаимодействии с ними может на естественном языке описывать то, что должно быть на картинке, как это должно выглядеть, какой требуется визуальный стиль. Поскольку таким моделям в процессе обучения предлагалось огромное количество информации о самых разных областях окружающего мира, то они не ограничены какой-то определенной узкой сферой при обработке входящих текстовых запросов. Однако у такого класса сетей есть и ряд существенных недостатков: огромное количество обучаемых параметров, медленная скорость работы и обучения, самих моделей в принципе может не быть в открытом доступе (семейство DALL-E, Midjourney), а воспользоваться ими можно лишь через сторонние сервисы без непосредственного доступа к самим сетям. Если же по какой-то причине необходима модель в некой определенной области, важно ее быстродействие и доступны данные со значительным количеством примеров (хотя иногда может быть достаточно и 500–1000 экземпляров), то в таком случае целесообразнее рассмотреть генеративные состязательные сети (Generative Adversarial Networks). Их качество может даже превосходить качество диффузионных сетей, они работают значительно быстрее и могут быть локально обучены за разумное время (если сравнивать с архитектурами генерации изображений общего назначения), а в дальнейшем и встроены в устройства пользователей при необходимости. Золотым стандартом среди моделей этого класса являются архитектуры семейства *StyleGAN* и их варианты: *StyleGAN2* [3], *StyleGAN3* [4], *StyleGAN-XL* [5] и др. Однако и у них имеются недостатки, которые выражаются в большом времени обучения, не самой высокой скорости работы (хотя и значительно быстрее диффузионных сетей). В данной работе при помощи вейвлетов и ряда других модификаций показано, как можно добиться более быстрой сходимости, а также сократить время работы конечной модели.

**Описание модели.** Реализованная модель построена на основе базовой версии архитектуры *StyleGAN2* с некоторыми изменениями, которые приведены ниже.

Вместо обработки стандартного изображения был произведен переход к его вейвлет-образу: генератор создает не RGB-изображение, а его вейвлет-преобразование, которое в дальнейшем подается на вход дискриминатору. Таким образом, выход генератора и вход дискриминатора имеют не 3, а 12 каналов соответственно: на каждый исходный канал приходится по 4 компоненты вейвлет-разложения: LL, LH, HL, HH. Такой подход позволяет явно разделить для моделей признаки с высокими и низкими частотами, что упрощает задачу обучения сетей. Дополнительным преимуществом является возможность исключения блока

с самым высоким разрешением признаков из обеих моделей (а он потребляет значительную часть ресурсов при работе), поскольку при обратном вейвлет-преобразовании естественным образом удваивается ширина и высота тензора, а количество каналов уменьшается в 4 раза. Данный подход аналогичен тому, что использовали авторы архитектуры SWAGAN [6], которая в свою очередь также опирается на StyleGAN2, однако в отличие от простейших вейвлетов Хаара в SWAGAN в данной работе используется семейство вейвлетов CDF-9/7, реализованное через лифтинг-схему.

В генераторе были обновлены обе сети: и отображения признаков (Mapping), и синтеза изображений (Synthesis). В сети отображения размер входного скрытого вектора шума был сокращен с 512 до 192. Это обусловлено стремлением к более высокой концентрации признаков целевого изображения, а также тем, что многие данные (в частности, лица людей и, например, датасет ImageNet) эффективно описываются меньшим числом переменных. Также в данной сети количество полно связанных слоев бралось равным 3, а множитель для скорости обучения был увеличен с 0,01 до 0,03. Первый слой сети синтеза был заменен с обучаемого константного (StyleGAN2) на слой Фурье-признаков (StyleGAN3). В качестве активации для сглаживания модели и ее градиентов при обучении использовалась активация SiLU вместо LeakyReLU. Схема генератора представлена рисунке 1.

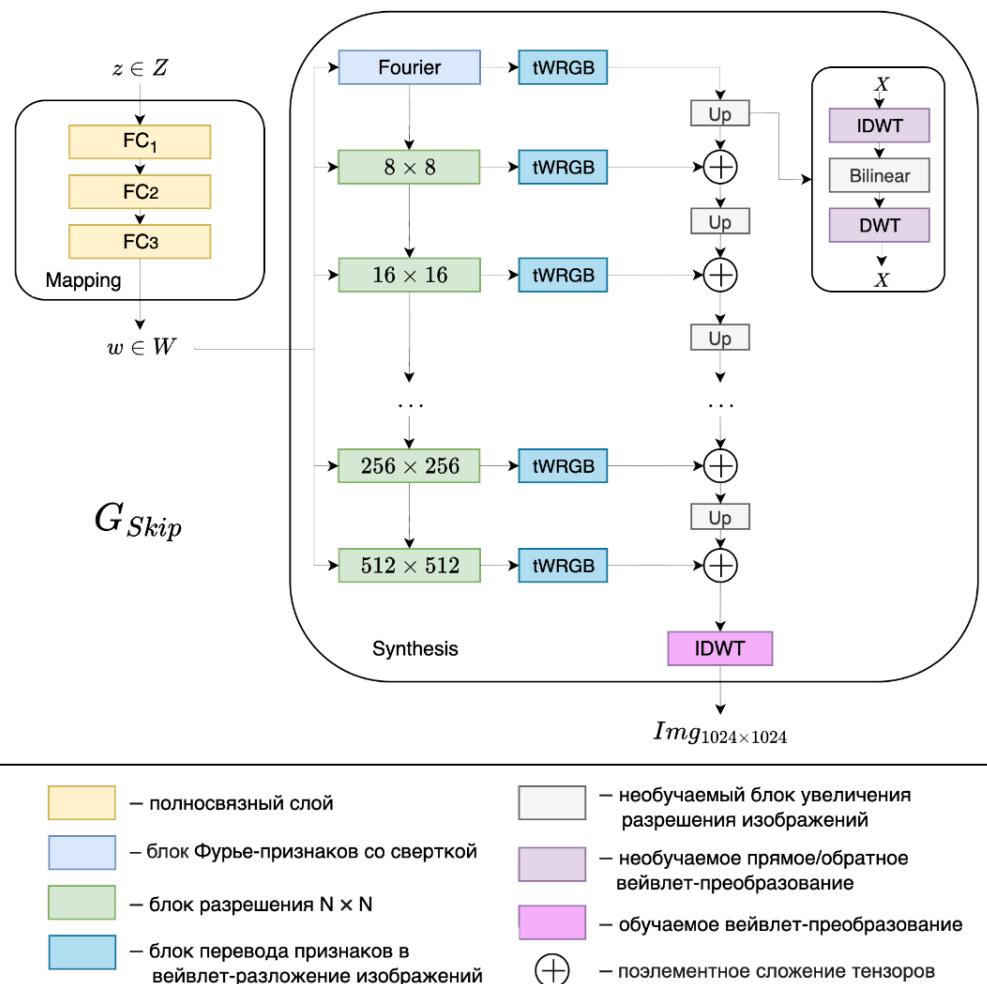


Рисунок 1. – Архитектура генератора модели WaveStyleGAN

Архитектура дискриминатора была заменена с ResNet на Skip по аналогии со SWAGAN. Для нормализации сигнала, распространяемого по сети, применялись самомодулируемые свертки [7]. Также для более полной обработки признаков и дополнительного учета спектральной информации сигнала был модифицирован и встроен блок Fast Fourier Convolution (FFC) [8]. В него были добавлены самомодулируемые свертки и вейвлеты. Общая схема блока FFCv2 приведена на рисунке 2. Наконец, в выходные линейные слои была добавлена спектральная нормализация для повышения стабильности обучения. Итоговая схема дискриминатора показана на рисунке 3.

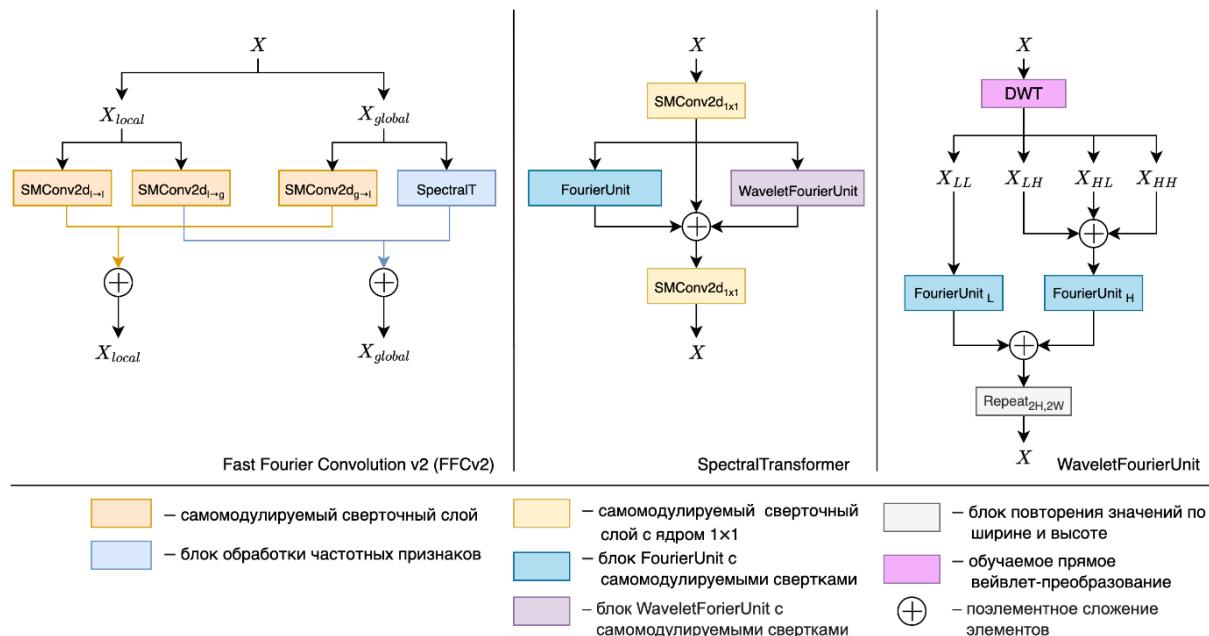


Рисунок 2. – Архитектура блока FFCv2

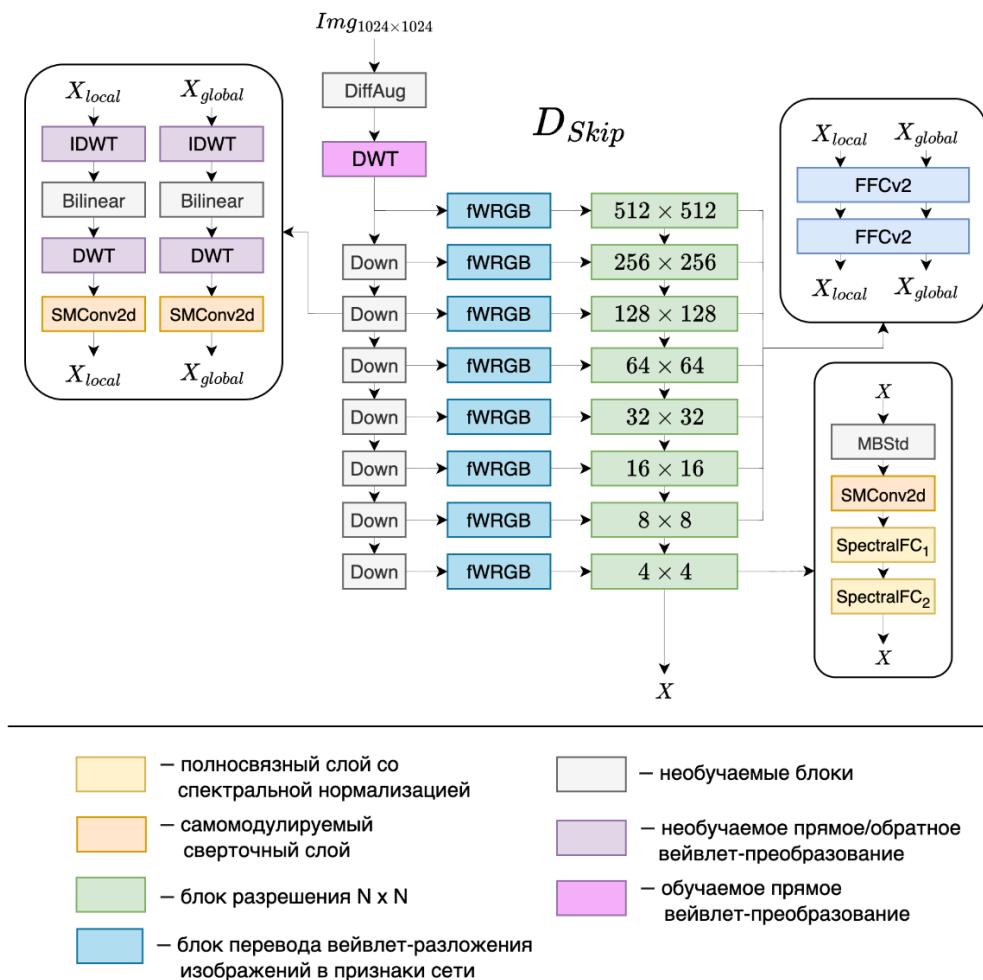


Рисунок 3. – Архитектура дискриминатора модели WaveStyleGAN

Для увеличения разнообразия данных, используемых в обучении, помимо стандартного отражения относительно вертикальной оси применялся модуль дифференцируемых аугментаций DiffAug [9]. С учетом использования вейвлетов, а также выходного формата модели генератора входная картинка для дискриминатора сначала проходит через обратное вейвлет-преобразование, к ней применяются аугментации в пространстве RGB, а затем она возвращается в исходный формат при помощи прямого вейвлет-преобразования.

Среди прочих значимых изменений следует отметить уменьшение количества фильтров в обеих моделях, начиная с разрешения  $64 \times 64$ , по сравнению с базовыми моделями StyleGAN2 и StyleGAN3-T, что позволило увеличить скорость тренировки, снизить расход видеопамяти, а также повысить быстродействие уже обученной модели.

Таким образом, все внесенные изменения не только не увеличили, а наоборот заметно уменьшили вычислительную сложность генератора, что дает положительный эффект при длительном использовании обученной модели. Возможность конвертации модели генератора в другие форматы (например, ONNX, CoreML и TensorFlow Lite) также была сохранена, поскольку блоки FFCv2, которые внутри себя используют комплексные числа и преобразование Фурье, применялись лишь в дискриминаторе.

**Обучение модели.** Модель была реализована с использованием фреймворка PyTorch. Обучение проходило на сервере с двумя видеокартами RTX3090 24 Гб. Для увеличения эффективности тренировки также использовались скомпилированные CUDA-плагины, предложенные авторами оригинальных моделей StyleGAN.

Размер пакета (батча) для каждой видеокарты брался равным 24, в качестве оптимизаторов для обеих сетей использовался Adam со скоростью обучения 0,002, параметры моментов устанавливались равными 0 и 0,99 соответственно. Функция потерь и ее параметры были аналогичны той, что использовалась при обучении исходной модели StyleGAN2. Чтобы на начальных этапах дискриминатору было сложнее отличать сгенерированные данные от настоящих, применялась техника размытия картинок, аналогичная той, что используется в моделях StyleGAN3: на протяжении первых 200 000 изображений вход в дискриминатор проходил через фильтр Гаусса, при этом параметр  $\sigma$  уменьшался с 10 до 0 линейно в соответствии с числом обработанных картинок. Для повышения стабильности обучения регуляризационная функция потерь для генератора на этом этапе не применялась (аналогично StyleGAN-XL).

Общее количество обработанных изображений в разрешении  $1024 \times 1024$  составило 9,99 млн, а время обучения – 10 дней и 5 часов. На каждой видеокарте использовалось 20,1 Гб памяти. Средняя скорость обработки 1000 картинок составила 85,1 секунды, что соответствует пропускной способности в 11,82 изображения в секунду при обучении модели.

**Результаты.** Реализованная модель была обучена на датасете человеческих лиц FFHQ в разрешении  $1024 \times 1024$  (использовались все 70 000 примеров). Изображения, полученные финальной версией модели, показаны на рисунке 4, а наиболее удачные из них – на рисунке 5. Качество генерации можно дополнительно повысить, сблизив вход сети синтеза генератора со средним значением, накопленным во время обучения (метод truncation trick), хотя в этом случае несколько уменьшается разнообразие генерируемых изображений. Такие примеры для  $\psi = 0,75$  показаны на рисунке 6 (нижний ряд). Для сравнения, верхний ряд этого же рисунка иллюстрирует результаты без использования усреднения ( $\psi = 1$ ).

Поскольку в большинстве случаев из обученных моделей в постоянное использование переходит только генератор (дискриминатор нужен лишь в обучении), то и наибольший интерес представляет сравнение сетей непосредственной генерации изображений различных архитектур. Результаты такого сравнения приведены в таблице. Для замера скорости работы моделей использовался процессор AMD Ryzen 9 5900 и видеокарта RTX 3090.

Таблица. – Сравнение генераторов моделей

Модель	Обучаемые параметры, М	Необучаемые параметры, К	Скорость работы, PyTorch CPU, мс	Скорость работы, PyTorch GPU, мс
StyleGAN2	30,37	2797	703	18,5
StyleGAN3-T	22,32	2,4	16278	40,3
StyleGAN3-R	15,10	5,6	31312	44,8
WaveStyleGAN	23,04	701,7	233	27,5

Следует отметить, что крайне низкая скорость работы моделей StyleGAN3 на CPU обусловлена использованием специальных CUDA-ядер, недоступных при отсутствии GPU-ускорителя, что существенно затрудняет встраивание этих моделей в системы, функционирующие исключительно на CPU. Потенциально это может создать значительные сложности даже при работе на GPU вне среды PyTorch, так как высокоеффективные реализации соответствующих блоков будут заменены на стандартные функции и объекты из фреймворка PyTorch при экспортировании модели в требуемый формат.



Рисунок 4. – Случайные сгенерированные изображения



Рисунок 5. – Лучшие сгенерированные изображения



Рисунок 6. – Изображения, полученные методом truncation trick ( $\psi = 0,75$ )

**Заключение.** В данной работе была реализована и успешно протестирована на наборе данных FFHQ в разрешении  $1024 \times 1024$  модель вейвлет-генеративной состязательной сети WaveStyleGAN. Отличительные особенности предложенной архитектуры включают использование вейвлетов, а также модификацию дискриминатора путем добавления самомодулируемых сверток и модифицированных блоков FFC. К менее значительным изменениям можно отнести замену активации генератора, его входного блока, а также сокращение слоев в сети отображения скрытых признаков. Данные изменения позволили уменьшить в 2 раза число каналов в сверточных слоях обеих моделей, начиная с разрешения  $64 \times 64$  и выше, а также убрать блоки в целевом разрешении изображений, на которые приходится значительная часть вычислений. Совокупность указанных изменений обеспечила примерно трехкратное ускорение работы обученной сети генератора на CPU, что значительно расширяет возможности по встраиванию моделей генеративных сетей в различные сервисы и мобильные устройства, обеспечивая заметный прирост производительности по сравнению с базовыми моделями семейства StyleGAN. На GPU предложенная модель работает немного медленнее базового варианта, однако есть основания полагать, что на графических процессорах мобильных устройств может быть получен прирост производительности, сопоставимый с тем, что наблюдается в настольных вариантах при переходе от CPU к GPU, так как мобильные GPU сами по себе гораздо слабее и их архитектура больше оптимизирована именно под работу готовых моделей, а не их обучение. Также следует отметить, что качество обученной сети сохранилось на высоком уровне, при этом для его достижения было проведено в 2,5 раза меньше тренировочных итераций по сравнению с исходными моделями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Scaling Rectified Flow Transformers for High-Resolution Image Synthesis / P. Esser, S. Kulal, A. Blattmann et al. // arXiv.org. – 2024. – DOI: [10.48550/arXiv.2403.03206](https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.03206).
2. DEnsignBench: Exploring and Benchmarking DALL-E 3 for Imagining Visual Design / K. Lin, Z. Yang, L. Li et al. // arXiv.org. – 2023. – DOI: [10.48550/arXiv.2310.15144](https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.15144).
3. Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN / T. Karras, S. Laine, M. Aittala et al. // arXiv.org. – 2019. – DOI: [10.48550/arXiv.1912.04958](https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.04958).
4. Alias-Free Generative Adversarial Networks / T. Karras, M. Aittala, S. Laine et al. // arXiv.org. – 2021. – DOI: [10.48550/arXiv.2106.12423](https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.12423).
5. Sauer A., Schwarz K., Geiger A. StyleGAN-XL: Scaling StyleGAN to Large Diverse Datasets // arXiv.org. – 2022. – DOI: [10.48550/arXiv.2202.00273](https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.00273).
6. SWAGAN: A Style-based Wavelet-driven Generative Model / R. Gal, D. Cohen, A. Bermano, D. Cohen-Or // arXiv.org. – 2021. – DOI: [10.48550/arXiv.2102.06108](https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.06108).
7. LiteVAE: Lightweight and Efficient Variational Autoencoders for Latent Diffusion Models / S. Sadat, J. Buhmann, D. Bradley et al. // arXiv.org. – 2024. – DOI: [10.48550/arXiv.2405.14477](https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.14477).

8. Chi L., Jiang B., Mu Y. Fast Fourier Convolution // Advances in Neural Information Processing Systems 33 (NeurIPS 2020). – 2020. – URL: <https://papers.nips.cc/paper/2020/hash/2fd5d41ec6cfab47e32164d5624269b1-Abstract.html> (date of access: 07.09.2025).
9. Differentiable Augmentation for Data-Efficient GAN Training / S. Zhao, Z. Liu, J. Lin et al. // arXiv.org. – 2020. – DOI: [10.48550/arXiv.2006.10738](https://arxiv.org/abs/2006.10738).

Поступила 08.09.2025

## WAVESTYLEGAN: WAVELET-GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORK

**U. VARABEI, A. MALEVICH**  
(Belarusian State University, Minsk)

*In this paper a novel generative adversarial network for images WaveStyleGAN that is based on StyleGAN-like architectures, was developed. Key features of the model suggested are processing of wavelet features of images, usage of self-modulated convolutions and modified blocks of Fast Fourier Convolutions in the discriminator. The changes implemented helped to reduce model complexity and its size when compared to the base models' versions. The model was trained on a dataset of human faces FFHQ in 1024×1024 resolution. It was able to keep a high quality of generated images with considerable decrease in a number of training iterations. Additionally, inference time on CPU was reduced by up to 3 times when compared to the original model, which significantly expands its capabilities for deployments to environments which don't provide access to computations on GPU.*

**Keywords:** generative adversarial networks, images generation, discrete wavelet transform, wavelets, neural networks.

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ДЛЯ ПОВТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛЮДЕЙ  
НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ПРИЗНАКОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛИЦА И ФИГУРЫ**

**канд. техн. наук С. А. ИГНАТЬЕВА, д-р техн. наук, доц. Р. П. БОГУШ, Н. А. ТОМАШЕВИЧ**  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

**проф. Х. ЧЕН**  
(университет Чжэцзян Шурен, Китай)

**S. A. Ihnatsyeva ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9780-5731>**

**R. P. Bohush ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6609-5810>**

**M. A. Tamashovich ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9214-5103>**

**H. Chen ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4229-4505>**

*Рассматриваются основные проблемы реализации открытых систем повторной идентификации человека на основе нейросетевых технологий. Исследуется влияние гиперпараметров при обучении сверточной нейронной сети на динамику обучения и точность алгоритма реидентификации человека. Экспериментальный подбор гиперпараметров нейронной сети для реидентификации человека состоит из двух этапов. На первом этапе необходимо определить наиболее эффективную скорость обучения и размер пакета изображений. На втором этапе подбирается количество эпох обучения с учетом изменения размера пакета и скорости в процессе обучения нейронной сети. Осуществлен ряд экспериментов с применением ResNet-50 и DenseNet-121 на базах данных PolReID1077, Market-1501, DukeMTMC-ReID и MSMT17. Определены такие гиперпараметры, как размер пакета, скорость обучения и количество эпох обучения нейронной сети. Результаты экспериментов подтвердили повышение точности реидентификации. Кроме того, время обучения нейронных сетей с применением предложенного метода корректировки гиперпараметров позволяет сократить время обучения по сравнению с использованием метода обучения на базовой модели. Представлен алгоритм для повторной идентификации людей, использующий один глобальный и два локальных нейросетевых дескриптора для описания черт человека на основе нейросетевых признаков его лица и фигуры. Изображение фигуры человека описывается вектором из 1536 элементов, полученным с применением DenseNet-121. Предложенный подход обеспечивает высокую точность повторной идентификации как по изображению лица, так и в более сложных условиях, когда лицо скрыто или видимы лишь фрагменты фигуры. Представлены результаты экспериментов. Описана программная реализация прототипа для повторной идентификации человека в открытом мире.*

**Ключевые слова:** реидентификация, сверточные нейронные сети, гиперпараметры, скорость обучения, размер пакета.

**Введение.** Повторная идентификация представляет собой задачу компьютерного зрения, предполагающую определение присутствия человека, ранее идентифицированного системой видеонаблюдения в одном и том же месте в разное время или в разных местах видеонаблюдения по запросу. В качестве запроса обычно используется изображение человека. Для сопоставления запроса с имеющимися в базе изображениями людей (галереи) необходимо сформировать дескриптор, отражающий наиболее значимые отличительные черты. Эффективным подходом для формирования дескриптора изображений является применение сверточных нейронных сетей (СНС). Для исследовательских целей обычно рассматриваются закрытые (close-world) системы реидентификации. В таких системах количество изображений или видеопоследовательностей фиксировано и не изменяется с течением времени. Перед использованием набор данных состоит из ограниченного числа видеопоследовательностей или изображений, полученных с нескольких камер видеонаблюдения. Данные в таких наборах аннотируются и подготавливаются заранее, для каждого запроса в галерее присутствуют изображения соответствующего человека. Открытые системы (open-world) повторной идентификации не предполагают предварительной подготовки и аннотирования данных. Галерея изображений формируется по мере поступления видеопоследовательностей с камер наблюдения и детектирования на них людей. Такие системы приближены к реальным условиям, что сопряжено с рядом дополнительных затруднений. Так, в [1] рассматриваются современные подходы к реализации открытых систем повторной идентификации и отмечается, что подобные системы совмещают две задачи компьютерного зрения: обнаружение и повторную идентификацию. Это означает необходимость совместной реализации данных задач. В [2] основной проблемой открытых систем повторной идентификации называется сходство посторонних людей с объектом запроса. Для решения этой проблемы применяется состязательное обучение, при котором для каждого запроса генерируются синтетические изображения, схожие с целевым объектом. В [3; 4] поднимается проблема изменчивости внешности людей с течением времени. В качестве решения рассматривается анализ действий людей (например, походки [5]) или трехмерное моделирование фигуры человека [4]. В [3] авторы рассматривают вариации освещенности как одну из ключевых проблем повторной идентификации и предлагают

алгоритм, позволяющий восстановить уровень освещенности изображений, полученных при различных условиях видеонаблюдения, до уровня тестовых данных.

В данной работе поднимается сразу несколько проблем: перекрытие лиц другими людьми и фоновыми объектами; схожесть внешнего вида разных людей, а также неизбежные изменения внешности отдельного человека с течением времени; необходимость формирования набора данных для обучения сверточной нейронной сети (СНС) в условиях, аналогичных условиям развертывания системы повторной идентификации [6]. В работе описаны способы решения указанных проблем и представлена программная реализация прототипа системы повторной идентификации человека в открытом мире.

### 1. Анализ существующих проблем

Широко распространенной проблемой нейросетевых моделей для реидентификации людей является проблема смещения домена (domain shift), которая возникает в ситуации, когда обучение и тестирование осуществляются на данных из разных наборов [7; 8]. Под доменом понимают комплект изображений, которые были получены при одинаковых условиях в одной мультикамерной системе видеонаблюдения. Каждое изображение в наборе данных зависит от совокупности факторов, включающих разрешение камер, фон, условия освещения и даже внешний вид людей, т. е. статистически европейцы будут иметь вид, отличный от азиатов, летняя одежда будет отличаться от зимней и т. д. Система, обученная на наборе данных, полученных с внутренних камер видеонаблюдения, может иметь низкую точность на тестовой выборке, содержащей изображения людей, снятые наружными камерами видеонаблюдения. Алгоритмы, направленные на решение такого рода проблем, относят к междоменной повторной идентификации (Cross-domain ReID). Другой особенностью, в значительной мере определяющей точность реидентификации человека, является цвет одежды. Однако цветопередача различных видеокамер и освещенность сцены видеонаблюдения могут значительно искажать цветовые характеристики одного и того же объекта. Помимо разного уровня освещенности сцены видеонаблюдения, при повторной идентификации возникает проблема выделения общих отличительных признаков для человека, изображения которого получены с разных ракурсов. Схожей проблемой является вариабельность поз, которые может принимать человек. При этом, кроме сложности выделения общих признаков, в ситуациях, когда человек наклоняется, стоит или сидит, возникает проблема искажения восприятия телосложения при нормализации изображений до единого размера  $H \times W$ , где  $H$  – высота изображения;  $W$  – ширина.

Значимой проблемой является разность характеристик камер видеонаблюдения и степень удаленности объекта от них, так как при нормализации изображений людей до единого размера они будут иметь разные качественные характеристики: детализацию, резкость, размытие. Применение при видеонаблюдении камер с различными характеристиками оказывает влияние как на разрешение полученных изображений, так и на цветопередачу. Извлечение отличительных признаков человека может быть затруднено фоновыми помехами. На одном изображении могут присутствовать два разных человека, и возникает необходимость определить, чей идентификатор следует присвоить изображению. Цвет одежды, волос или атрибутов может сливаться с фоном, что приводит к утрате или неверной интерпретации важных характерных особенностей. По многим причинам разные люди могут иметь схожий внешний вид (например, одинаковую форму и прическу), но отличаться малозаметной деталью, например, обувью. При этом один и тот же человек может в течение короткого промежутка времени изменить наличие какого-либо атрибута, что приведет к изменению набора признаков. Это сопоставимо с проблемой разности условий видеонаблюдения, таких как ракурс съемки, удаленность от камеры, ее характеристики и т. д. Как и во многих задачах компьютерного зрения, при повторной идентификации возникает проблема оклюзий, когда между камерой видеонаблюдения и объектом интереса расположен посторонний объект: часть тела другого человека, предмет интерьера или элемент ландшафта. Перекрытие изображения человека другими объектами вносит в общий дескриптор дополнительные признаки, не относящиеся к отличительным особенностям интересующей личности, и одновременно затрудняет выделение значимых черт.

При рассмотрении открытых систем повторной идентификации существенной проблемой являются ошибки детектора, формирующего ограничительные прямоугольники с изображением обнаруженных людей. К таким ошибкам можно отнести примеры изображений (рисунок 1), в которых части тел оказываются обрезаны (рисунок 1, *а–в*) или когда в качестве изображения людей детектируются портреты (рисунок 1, *г*), статуи (рисунок 1, *д*), отдельные части тела человека (рисунок 1, *е, ж*).



Рисунок 1. – Примеры изображений людей, демонстрирующие ошибки детектора

Для всех нейросетевых моделей, в том числе решающих задачи компьютерного зрения, характерна проблема переобучения. Она возникает при недостаточном количестве или разнообразии обучающих данных и характеризуется их запоминанием. Вследствие этого модель теряет способность к обобщению на новых изображениях. Одним из способов решения проблемы переобучения является регуляризация. В машинном обучении под регуляризацией понимают добавление ограничений к архитектуре нейронной сети, функции потерь или обучающим наборам данных [9]. Примерами регуляризации являются: прореживание нейронных связей СНС [10]; использование разных функций активации [11]; L1- и L2-регуляризация<sup>1</sup>; аугментация данных, при которой часть изображения может быть удалена или замещена другой информацией [9; 12; 13]. Аугментация применяется для увеличения разнообразия обучающей выборки на основе имеющихся данных [13] за счет преобразований изображений.

При разработке системы повторной идентификации сложно заранее учесть и исключить все потенциальные проблемы, поэтому применяемые методы, подходы и алгоритмы обычно направлены на решение одной или нескольких конкретных задач. На основе проведенного анализа сформулированы основные проблемы, а также предложены способы уменьшения их влияния на точность повторной идентификации (таблица 1).

Таблица 1. – Проблемы, оказывающие влияние на точность реидентификации и подходы, направленные на их решение

Проблема	Подход к решению проблемы
Смещение домена	<ul style="list-style-type: none"> <li>– увеличение обучающей выборки за счет данных из различных доменов;</li> <li>– обучение СНС извлечению и исключению признаков, характерных для условий видеонаблюдения;</li> <li>– поиск способов пакетной нормализации для повышения точности при использовании данных, принадлежащих разным доменам;</li> <li>– перенос обучения (transfer learning);</li> <li>– расширение обучающей выборки путем применения GAN (Generative Adversarial Networks) для переноса стилистики изображений, характерной для разных доменов;</li> <li>– алгоритм формирования и обработки дескриптора</li> </ul>
Уровень освещенности	<ul style="list-style-type: none"> <li>– формирование разнообразной обучающей выборки;</li> <li>– аугментация данных;</li> <li>– генерация с помощью GAN синтетических изображений, моделирующих вариации освещения и погодных условий;</li> <li>– алгоритм формирования и обработки дескриптора</li> </ul>
Характеристики камеры	<ul style="list-style-type: none"> <li>– применение для обучения СНС изображений, полученных с большого числа камер видеонаблюдения с разнообразными характеристиками;</li> <li>– алгоритм формирования и обработки дескриптора</li> </ul>
Вариабельность поз	<ul style="list-style-type: none"> <li>– разнообразная обучающая выборка, включающая соответствующие примеры;</li> <li>– аугментация обучающих данных;</li> <li>– алгоритм формирования и обработки дескриптора</li> </ul>
Сложный фон	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающая выборка;</li> <li>– аугментация данных;</li> <li>– алгоритм формирования и обработки дескриптора</li> </ul>
Внешний вид людей	<ul style="list-style-type: none"> <li>– обучающая выборка;</li> <li>– аугментация данных;</li> <li>– алгоритм формирования и обработки дескриптора</li> </ul>
Окклюзии	<ul style="list-style-type: none"> <li>– акцентирование внимания на локальных признаках;</li> <li>– аугментация данных;</li> <li>– обучающая выборка;</li> <li>– алгоритм формирования и обработки дескриптора</li> </ul>
Переобучение СНС	<ul style="list-style-type: none"> <li>– увеличение обучающей выборки;</li> <li>– регуляризация;</li> <li>– аугментация;</li> <li>– перенос обучения (использование предварительно обученных моделей);</li> <li>– регулирование гиперпараметров при обучении</li> </ul>
Ошибки детектора	<ul style="list-style-type: none"> <li>– выбор средства детектирования людей;</li> <li>– качество обучения детектора;</li> <li>– настройка параметров срабатывания детектора</li> </ul>

Анализ таблицы 1 показывает, что подходы к повышению точности повторной идентификации людей можно разделить на две группы: применяемые на этапе обучения СНС и используемые на этапе постобработки извлеченных признаков. На этапе обучения точность повторной идентификации может быть повышена за счет выбора архитектуры СНС, использования наиболее эффективных значений гиперпараметров,

<sup>1</sup> L2 and L1 Regularization in Machine Learning // AnalyticsSteps [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.analytics-steps.com/blogs/l2-and-l1-regularization-machine-learning> (дата обращения: 26.09.2025).

увеличения объема и разнообразия обучающих данных. На этапе постобработки извлеченных признаков точность повторной идентификации будет зависеть от алгоритма, определяющего тип признаков.

## 2. Повышение точности повторной идентификации человека на этапе обучения СНС

**2.1. Увеличение обучающей выборки.** Увеличение количества обучающих примеров для тренировки СНС позволяет уменьшить негативное влияние на точность повторной идентификации таких факторов, как смещение домена, уровень освещенности, различие характеристик камер видеонаблюдения, вариабельность поз, внешность людей, сложный фон. Сбор и аннотирование собственного набора данных – долгий и трудоемкий процесс, поэтому для достижения удовлетворительной точности работы системы количество обучающих примеров, относящихся к домену развертываемой системы, можно увеличить за счет готовых наборов данных. Для обучения СНС в работе использовался набор данных PolReID1077<sup>2</sup>, сформированный в условиях умеренного климата. Он включает изображения людей, полученные в разное время года и суток, при отличающихся погодных условиях, с внутренних и наружных камер видеонаблюдения, как при естественном, так и при искусственном освещении. Объем обучающей выборки увеличен за счет существующих наборов данных, таких как Market-1501 [14], DukeMTMC-ReID [15], MSMT17 [16], CUHK02 [17] и CUHK03 [18]. В общей сложности обучающий набор включает 109 772 изображения для 6381 человека.

**2.2. Расширение тренировочного набора изображений и двухэтапное обучение СНС.** Для увеличения разнообразия тренировочной выборки без увеличения количества изображений используется метод аугментации, включающий циклический сдвиг и исключение цветности, применяемые к отдельным изображениям, а замещение фрагмента уменьшенным изображением применяется к пакету, подаваемому на вход СНС [19]. При таком методе аугментации на одном изображении присутствуют два разных человека, каждый со своим идентификатором, что позволяет повысить устойчивость к переобучению, окклюзиям, изменениям освещенности и разрешения обрабатываемых изображений, а также к зависимости от местоположения признаков отдельных фрагментов фигуры человека. Такие изображения значительно отличаются от реальных, которые могут быть получены с камер видеонаблюдения. Поэтому не смотря на увеличение точности при таком методе аугментации значения функции потерь при обучении остаются на высоком уровне. Для снижения этого показателя применяется технология двухэтапного обучения, при которой на первом этапе СНС обучается на аугментированных изображениях, а затем выполняется точная настройка на исходных изображениях, что позволяет уменьшить значения функции потерь и повысить точность реидентификации.

**2.3. Настройка гиперпараметров.** В работе рассматривалось влияние на точность повторной идентификации таких гиперпараметров, как количество эпох обучения, размер пакета, скорость обучения. Количество эпох обучения определяет, сколько раз будут обновляться весовые коэффициенты нейронной сети. Скорость обучения характеризует величину изменения весовых коэффициентов на каждой итерации. Размер пакета отражает количество изображений из набора данных, которые одновременно подаются на вход сети для обработки. Настройка гиперпараметров осуществлялась в несколько этапов. Сначала определялись стартовые значения, при которых точность повторной идентификации максимальна. Исследования проводились на наборе данных Market-1501 для двух СНС: DenseNet-121 [20] и ResNet-50 [21]. Для пакетов размечками  $b = 2, 4, 8, 16, 32$  и  $64$  изображения обучения осуществлялись со скоростью  $\eta \in [0,001; 0,009]_{h=0,001}$ ;  $\eta \in [0,01; 0,09]_{h=0,01}$ ;  $\eta \in [0,1; 0,4]_{h=0,1}$  для выходного слоя. Скорость скрытых слоев устанавливалась в 10 раз меньше. После 40-й эпохи скорость для всех слоев уменьшалась в 10 раз. Точность обученной модели оценивалась каждые 5 эпох по трем метрикам: Rank1, mAP и mINP. Rank1 отражает количество запросов, для которых верное решение имеет наибольшее сходство с запросом. Метрика mAP представляет собой усредненное значение средних точностей для каждого запроса, а mINP позволяет оценить сложность поиска наиболее проблемного предсказания, показывая, насколько далеко в ранжированном списке предсказаний оказывается последнее изображение человека, соответствующее запросу. Лучшие результаты получены для СНС ResNet-50 при размечке пакета  $b = 8$  и скорости обучения  $\eta = 0,03; 0,04; 0,05$ , а также при  $b = 16$  и  $\eta = 0,07$ .

Второй этап экспериментальных исследований направлен на определение варианта настройки гиперпараметров для оценки возможности дальнейшего повышения точности повторной идентификации. Он включает несколько серий экспериментов. Исследования проводились с использованием СНС ResNet-50 и DenseNet-121. Для обучения использовался набор данных Market-1501.

Для *первой серии* экспериментов размер пакета удваивался каждые 20 эпох начиная с  $b = 8$ . Скорость обучения изменялась, как и для базовой модели, каждые 40 эпох. Рассматривались значения  $\eta_0 = 0,04$ ;  $\eta_0 = 0,05$ ;  $\eta_0 = 0,06$ ;  $\eta_0 = 0,07$ ;  $\eta_{i:40} = 0,1 \eta_{i-40}$ . Лучший результат для выбранных значений, использованных в каждом варианте эксперимента, получен при  $\eta_0 = 0,06$  и равен по метрике Rank1 = 82,0071; mAP = 60,3425; mINP = 23,9121.

Во *второй серии* экспериментов количество изображений удваивалось каждые 30 эпох, начиная с  $b = 16$ , при тех же значениях скоростей обучения. Лучшие показатели получены при скорости обучения  $\eta_0 = 0,05$  и составили: Rank1 = 80,2850; mAP = 56,8707; mINP = 20,0197.

<sup>2</sup> Dataset PolReID1077 [Электронный ресурс] // GitHub. – URL: <https://github.com/SvetlanaIgn/PolReID1077> (дата обращения: 26.09.2025).

В третьей серии экспериментальных исследований размер пакета первые десять эпох составлял 32 изображения, с 10 по 20 эпохи – 16, с 20 по 60 – 8 изображений, а затем – снова 16. Для экспериментов рассматривались значения скорости обучения  $\eta_0 = 0,04$ ;  $\eta_0 = 0,05$ ;  $\eta_0 = 0,06$ ;  $\eta_i = k \cdot \eta_{i-1}$ ,  $k \in [0,9; 0,99]_{h=0,01}$ . Лучшие показатели реидентификации получены при  $\eta_0 = 0,05$  и  $k = 0,99$ . При этом Rank1 = 84,7684; mAP = 64,5680; mINP = 28,1097.

Случайным образом размер пакета изменялся в четвертой серии экспериментов, а скорость обучения корректировалась так же, как и на предыдущем этапе. Лучшие показатели точности получены при  $k = 0,96$ , однако значения по всем метрикам оценки точности меньше предыдущего этапа и Rank1 = 83,7686; mAP = 61,5846; mINP = 24,6478.

Пятая серия экспериментов аналогична второй и отличается только стартовым значением размера пакета  $b = 8$ . Лучшие показатели достигаются при скорости обучения  $\eta_0 = 0,05$ : Rank1 = 83,3135; mAP = 62,4157; mINP = 25,3371.

Для шестой серии экспериментов размер пакета удваивался каждые 30 эпох, начиная с  $b = 8$ , а скорость обучения уменьшалась вдвое каждые 20 эпох для  $\eta_0 = 0,04$ ;  $\eta_0 = 0,05$ ;  $\eta_0 = 0,06$ . Точность реидентификации при  $\eta_0 = 0,05$  в этой серии была максимальной: Rank1 = 84,3527; mAP = 62,6090; mINP = 25,5956.

В седьмой серии экспериментов размер пакета удваивался после 40-й и 60-й эпох, а скорость обучения уменьшалась каждые 10 эпох. В данной серии экспериментов наилучшая точность составила: по метрике Rank1 = 83,7589; по метрике mAP = 63,0670; по метрике mINP = 25,9548.

Наилучшие результаты с точки зрения точности повторной идентификации были получены для метода настройки гиперпараметров в восьмой экспериментальной серии. Размер пакета с 1-й по 60-ю эпоху составлял 8 изображений, а с 60-й до 90-й использовался пакет из 16 изображений. После эпохи 90 размер пакета составляет 32 изображения. Скорость обучения варьируется от  $\eta_0 = 0,05$  до  $\eta_i$  согласно формуле

$$\eta_i = 0,98 \eta_{i-1},$$

где  $i$  – номер эпохи.

Точность реидентификации при таком способе корректировки гиперпараметров составила: по метрике Rank1 = 85,4810; по метрике mAP = 65,4131; по метрике mINP = 28,5910.

**2.4. Алгоритм повторной идентификации с использованием составного дескриптора изображений фигуры человека и признаков лица.** Для решения проблем перекрытия лиц, вариативности внешнего вида одного человека и одинаковой одежды у разных людей предлагается алгоритм повторной идентификации, включающий формирование дескриптора черт лица человека и составного вектора признаков, описывающих его фигуру. Для формирования дескриптора лица человека используется обученная сверточная нейронная сеть ResNet50@WebFace600K от Insightface<sup>3</sup>, формирующая 512 отличительных признаков.

На первом этапе на кадрах видеопоследовательности выполняется обнаружение людей и обрамление каждого из них ограничительным прямоугольником. Для каждого из обнаруженных людей выполняется детектирование ключевых точек фигуры человека. Любое изображение с менее чем тремя обнаруженными ключевыми точками считается невалидным и исключается из дальнейшей обработки. Для всех корректных изображений формируется составной нейросетевой дескриптор, описывающий всю фигуру человека, его верхнюю и нижнюю части. Верхняя часть фигуры будет считаться видимой, если хотя бы одна ключевая точка обнаружена на любой из следующих четырех частей тела: лице, плече, локте, запястье, бедре. Нижняя часть фигуры человека видна, если обнаружена хотя бы одна ключевая точка на двух частях тела, например, на бедрах, коленях или лодыжках. Если человек на изображении смотрит в камеру, для него формируется вектор признаков, характеризующий лицо.

Таким образом, алгоритм выполняет следующие шаги для каждого кадра видеопоследовательности: для каждого человека в кадре с помощью сверточной нейронной сети YOLOv7<sup>4</sup> создаются ограничивающий прямоугольник и выделяются ключевые точки; определяются ограничивающие прямоугольники для верхней и нижней половины тела человека на основе обнаруженных ключевых точек; формирование признаков локализованных областей выполняется с использованием сверточной нейронной сети DenseNet-121; полученные признаки представляются в виде вектора  $F$  со следующими элементами:  $F_p$  (глобальный дескриптор),  $F_T$  (дескриптор верхней части),  $F_B$  (дескриптор нижней части); на основе анализа ключевых точек  $A_1$  (нос),  $A_2$  (левый глаз),  $A_3$  (правый глаз),  $A_4$  (левое ухо),  $A_5$  (правое ухо) вычисляется приблизительная область лица, что приводит к снижению вычислительных затрат при последующей обработке; точная локализация ограничительного прямоугольника лица осуществляется на основе СНС buffalo\_1; идентификатор группы изображений для одного человека назначается вектору

<sup>3</sup> InsightFace.Ai [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.insightface.ai> (дата обращения: 26.09.2025).

<sup>4</sup> Official YOLOv7 [Электронный ресурс] // Github. – URL: <https://github.com/airhors/yolov7-pose> (дата обращения: 26.09.2025).

признаков, при этом используется древовидная структура, чтобы избежать создания новых групп и присвоения идентификаторов изображениям с признаками, схожими с уже существующей группой; выполняется группировка людей на основе признаков лиц, если они были сформированы; возвращается уникальный идентификатор, основанный на признаках лица текущего человека; если признаки лица человека были извлечены и им была назначена группа, возвращается идентификатор (номер группы), к которому они были добавлены; присвоение различных идентификаторов также выполняется для схожих векторов признаков, если они получены для изображений людей, полученных с пространственно разнесенных камер с непересекающимися областями обзора или на одном кадре одновременно, т. к. один и тот же человек не может быть запечатлен на нескольких камерах одновременно в разных местах или несколько раз на изображении, полученном с одной камеры.

### 3. Экспериментальные исследования

При проведении экспериментов в качестве экстрактора признаков используется сеть DenseNet-121, обучение которой осуществляется на обучающих наборах PolReID1077 (сгенерирован в условиях видеонаблюдения, аналогичных условиям тестирования разработанной системы повторной идентификации), Market-1501, DukeMTMC-ReID, MSMT17 и Occluded-Duke [22], обучающая выборка которого аналогична DukeMTMC-ReID, а тестовая сформирована с искусственными перекрытиями изображений людей, добавленными в случайных местах. Обучение проводилось на персональном компьютере с процессором Intel Core i5 3,11 ГГц, 16 ГБ оперативной памяти и видеокартой Nvidia GeForce RTX-3060 6 ГБ. Функция потерь рассчитывается, а весовые коэффициенты корректируются, как описано в [23]. Приведены результаты точности обучения нейронных сетей с фиксированным размером пакета и скоростью обучения, изменяемой каждые 40 эпох, а также с предлагаемой корректировкой гиперпараметров (см. подраздел 2.3) в процессе обучения: на различных наборах данных для базового алгоритма повторной идентификации<sup>5</sup>; на расширенном обучающем наборе с использованием анализа локальных признаков, как описано в подразделе 2.4, двухэтапного обучения и аугментации данных. Определение точности сверточной нейронной сети предлагается выполнять с использованием метрик Rank1, mAP и mINP. Результаты экспериментов приведены в таблице 2. Представленные значения оценки реидентификации по различным метрикам показывают, что использование корректировки гиперпараметров в процессе обучения позволяет повысить точность реидентификации как относительно базовой модели для различных наборов данных, так и при использовании расширенного обучающего набора, двухэтапной технологии обучения на дополненных данных и алгоритма с составным дескриптором нейронной сети. Наибольший прирост метрики Rank1 относительно базового алгоритма составил 39,16 для набора данных Occluded-DukeMTMC. По метрике mAP максимальное улучшение точности также отмечено для набора данных Occluded-Duke и составило 38,48. Наибольший прирост mINP достигнут для наборов данных Market-1501 и PolReID1077 и составил 33,97 и 33,31 соответственно.

Таблица 2. – Точность реидентификации людей с различными параметрами обучения

Алгоритм и параметры обучения	Базовая модель						Расширенная обучающая выборка, технология двухэтапного обучения на аугментированных данных, анализ локальных и глобальных признаков					
	Стандартный планировщик скорости обучения			Предлагаемая корректировка гиперпараметров			Стандартный планировщик скорости обучения			Предлагаемая корректировка гиперпараметров		
Метрики	Rank1	mAP	mINP	Rank1	mAP	mINP	Rank1	mAP	mINP	Rank1	mAP	mINP
Набор данных	M*	84,02	64,29	28,15	85,48	65,43	29,75	94,12	85,73	61,41	94,89	86,47
	D**	72,80	53,16	15,88	75,00	55,14	17,27	87,79	76,68	38,70	87,93	77,12
	P***	90,33	68,39	23,43	92,35	70,60	26,04	97,19	89,32	56,53	97,29	90,14
	MS****	54,98	26,67	02,61	57,11	27,88	03,55	80,32	57,55	13,05	80,83	57,68
	OD*****	32,31	21,50	04,67	35,06	23,63	05,45	69,55	58,17	27,86	71,47	59,98

\* – набор данных Market-1501.

\*\* – набор данных DukeMCMT-ReID.

\*\*\* – набор данных PolReID1077.

\*\*\*\* – набор данных MSMT17.

\*\*\*\*\* – набор данных Occluded-Duke.

<sup>5</sup> Pytorch ReID [Электронный ресурс] // GitHub. – URL: [https://github.com/layumi/Person\\_reID\\_baseline\\_pytorch](https://github.com/layumi/Person_reID_baseline_pytorch) (дата обращения: 26.09.2025).

#### 4. Программная реализация открытой системы повторной идентификации

На рисунке 2 показан главный экран реализованной системы повторной идентификации человека. В нижней части экрана отображаются все видеозаписи, доступные системе. Выбор видеозаписей для отображения в левой части экрана осуществляется нажатием левой кнопки мыши. Обнаруженные изображения людей сортируются по группам в соответствии с присвоенными им идентификаторами и отображаются в правой части экрана.

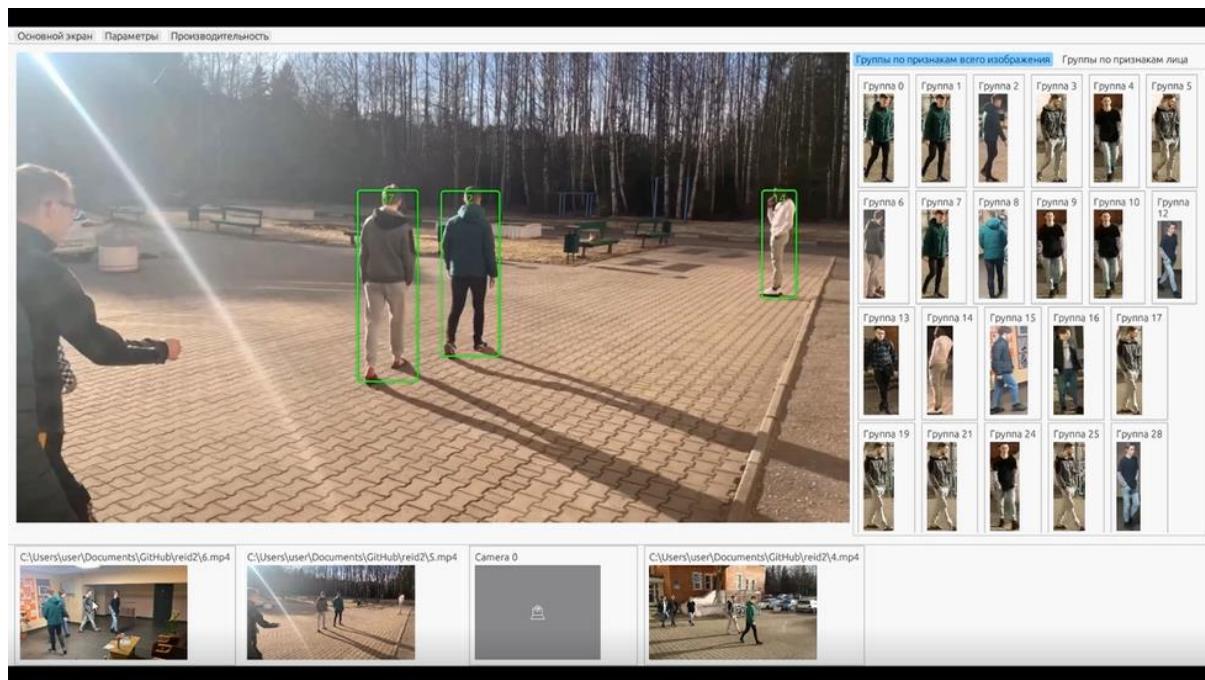


Рисунок 2. – Главный экран пользовательского интерфейса открытой системы повторной идентификации

Первоначальное распределение обнаруженных изображений людей осуществляется по внешности и может допускать неточности, связанные с разными углами обзора или изменениями освещенности. Однако после обнаружения лица человека на одном из изображений группы перераспределяются, а человеку присваивается уникальный идентификатор. Пример отображения изображений людей, сгруппированных по присвоенным идентификаторам на основе предложенного алгоритма, показан на рисунке 3.



Рисунок 3. – Изображения людей, сгруппированных согласно присвоенным идентификаторам

Для подробного рассмотрения интересующего человека возможен вывод на экран всех полученных изображений, а также информации о месте и времени получения кадра, из которого было извлечено соответствующее изображение (рисунок 4).



**Рисунок 4. – Изображения интересующего человека с подробной информацией о месте и времени получения изображения**

**Заключение.** В работе представлен краткий анализ существующих проблем, возникающих при реидентификации людей на изображениях систем видеонаблюдения, а также подходов к решению некоторых из них. Уменьшение негативного влияния проблемы смещения домена достигается за счет применения объединенной обучающей выборки. Влияние вариативности освещения, поз, внешности и разрешения камер, окклюзий снижается за счет применения аугментации данных и предложенного алгоритма, учитывавшего видимость отдельных фрагментов фигуры человека при формировании дескриптора на основе валидности обнаруженных ключевых точек фигуры. Достигается повышение точности повторной идентификации за счет применяемого метода корректировки гиперпараметров при обучении СНС. Представлена программная реализация системы обнаружения и повторной идентификации человека на изображениях видеонаблюдения путем объединения черт лица и внешнего вида фигуры человека с использованием составного нейронного дескриптора. Для формирования дескриптора лица человека используется обученная сверточная нейронная сеть ResNet50@WebFace600K компании Insightface. Фигура человека описывается составным дескриптором, включающим 1536 признаков для всего изображения, его верхней и нижней частей. Дескриптор формируется с помощью DenseNet-121, обученной с применением рассмотренных подходов, направленных на повышение точности реидентификации. Данный подход позволяет проводить повторную идентификацию человека даже при скрытых лицах за счет анализа признаков всей видимой части фигуры. Он повышает точность в случае перекрытия людей фоновыми объектами и уточняет результат при обнаружении лица человека.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Deep Learning for Person Re-Identification: A Survey and Outlook / M. Ye, J. Shen, G. Lin et al. // 2021 IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2021. – Vol. 44, iss. 6 – P. 2872–2893. – DOI: [10.1109/TPAMI.2021.3054775](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3054775).
2. Brkljac B., Brkljac M. Person detection and re-identification in open-world settings of retail stores and public spaces // ArXiv: 2505.00772. – 2025. – DOI: [10.48550/arXiv.2505.00772](https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.00772).
3. Li X., Wu A., Zheng W. Adversarial Open-World Person Re-Identification // 15<sup>th</sup> European Conference, Munich, Germany, September 8–14, 2018, Proceedings, Part II. – 2018. – P. 287–303. – DOI: [10.1007/978-3-030-01216-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01216-8_18).
4. Illumination Unification for Person Re-Identification / G. Zhang, Z. Luo, Y. Chen et al. // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2022. – Vol. 32, iss. 10. – P. 6766–6777. – DOI: [10.1109/TCSVT.2022.3169422](https://doi.org/10.1109/TCSVT.2022.3169422).
5. Learning Clothing and Pose Invariant 3D Shape Representation for Long-Term Person Re-Identification / F. Liu, M. Kim, Z. Gu et al. // 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2023. – P. 19560–19569. – DOI: [10.1109/ICCV51070.2023.01797](https://doi.org/10.1109/ICCV51070.2023.01797).
6. Person Re-identification in Video Surveillance Systems Using Deep Learning: Analysis of the Existing Methods / H. Chen, S. A. Ihnatsyeva, R. P. Bohush et al. // Automation and Remote Control. – 2023. – Vol. 84, iss. 5. – P. 497–528. – DOI: [10.1134/S0005117923050041](https://doi.org/10.1134/S0005117923050041).
7. Style Normalization and Restitution for Generalizable Person Re-Identification / X. Jin, C. Lan, W. Zeng et al. // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2020. – P. 3140–3149. – DOI: [10.1109/CVPR42600.2020.00321](https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00321).
8. Generalizable Person Re-Identification by Domain-Invariant Mapping Network / J. Song, Y. Yang, Y. Song et al. // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2019. – P. 719–728. – DOI: [10.1109/CVPR.2019.00081](https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00081).
9. DeVries T., Taylor G. W. Improved regularization of convolutional neural networks with CutOut // ArXiv. – 2017. – DOI: [10.48550/arXiv.1708.04552](https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.04552).
10. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivastava, G.E. Hinton, A. Krizhevsky et al. // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – Vol. 15, iss. 1. – P. 1929–1958. – DOI: [10.5555/2627435.2670313](https://doi.org/10.5555/2627435.2670313).
11. Choice of activation function in convolution neural network for person re-identification in video surveillance systems / H. Chen, S. Ihnatsyeva, R. Bohush et al. // Programming and computer software. – 2022. – № 5. – P. 312–321. – DOI: [10.1134/S0361768822050036](https://doi.org/10.1134/S0361768822050036).

12. Random Erasing Data Augmentation / Z. Zhong, L. Zheng, G. Kang et al. // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2020. – Vol. 34, iss. 7. – P. 13001–13008. – DOI: [10.1609/aaai.v34i07.7000](https://doi.org/10.1609/aaai.v34i07.7000).
13. CutMix: Regularization Strategy to Train Strong Classifiers With Localizable Features / S. Yun, D. Han, S. Oh Kang et al. // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019. – P. 6022–6031. – DOI: [10.1109/ICCV.2019.00612](https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00612).
14. Scalable Person Re-identification: A Benchmark / L. Zheng, L. Shen, L. Tian et al. // 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2015. – P. 1116–1124. – DOI: [10.1109/ICCV.2015.133](https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.133).
15. Performance Measures and a Data Set for Multi-target, Multi-camera Tracking / E. Ristani, F. Solera, R. S. Zou et al. // ArXiv. – DOI: [10.48550/arXiv.1609.01775](https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.01775).
16. Person Transfer GAN to Bridge Domain Gap for Person Re-identification / L. Wei, S. Zhang, W. Gao et al. // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2018. – P. 79–88. – DOI: [10.1109/CVPR.2018.00016](https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00016).
17. Li W., Wang X. Locally Aligned Feature Transforms across Views // 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Portland, OR, USA. – 2013. – P. 3594–3601. – DOI: [10.1109/CVPR.2013.461](https://doi.org/10.1109/CVPR.2013.461).
18. DeepReID: Deep Filter Pairing Neural Network for Person Re-identification / W. Li, R. Zhao, T. Xiao et al. // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Columbus, OH, USA. – 2014. – P. 152–159. – DOI: [10.1109/CVPR.2014.27](https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.27).
19. Data augmentation and fine tuning of convolution neural network during training for person re-identification in video surveillance systems / S. Ye, R. Bohush, S. Ihnatsyeva et al. // Optical memory and Neural Network. – 2023. – № 4. – P. 233–246. – DOI: [10.3103/S1060992X23040124](https://doi.org/10.3103/S1060992X23040124).
20. Huang, G. Densely Connected Convolutional Networks / G. Huang, Z. Liu, K. Q. Weinberger et al. // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – P. 2261–2269. – DOI: [10.1109/CVPR.2017.243](https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.243).
21. Deep Residual Learning for Image Recognition / K. He, X. Zhang, S. Ren et al. // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 770–778. – DOI: [10.1109/CVPR.2016.90](https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90).
22. Miao, J. Pose-Guided Feature Alignment for Occluded Person Re-Identification / J. Miao, Y. Wu, P. Liu et al. // 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). – 2019. – P. 542–551. – DOI: [10.1109/ICCV.2019.00063](https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00063).
23. Person re-identification in video surveillance systems by feature replacement of occluded parts of human figures // S. Ye, R. Bohush, S. A. Ihnatsyeva et al. // Pattern Analysis and Applications. – 2025. – Vol. 28. – Art. ID 102. – DOI: [10.1007/s10044-025-01482-1](https://doi.org/10.1007/s10044-025-01482-1).

Поступила 01.10.2025

## ALGORITHMIC AND SOFTWARE FOR PERSON RE-IDENTIFICATION BASED ON NEURAL NETWORK FEATURES OF FACE AND FIGURE IMAGES

**S. IHNATSYEVA, R. BOHUSH, M. TAMASHEVICH**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

**H. CHEN**  
(*Zhejiang Shuren University, China*)

*This paper considers the key challenges in implementing open person re-identification systems based on neural network technologies. The influence of hyperparameters during convolutional neural network training on the learning dynamics and accuracy of the person re-identification algorithm is investigated. The experimental selection of neural network hyperparameters for person re-identification consists of two stages. The first stage requires determining the most effective learning rate and image batch size. The second stage involves determining the number of training epochs, taking into account changes in batch size and speed during neural network training. A series of experiments were conducted using ResNet-50 and DenseNet-121 on the PolReID1077, Market-1501, DukeMTMC-ReID, and MSMT17 datasets. Hyperparameters such as batch size, learning rate, and number of neural network training epochs were determined. The experimental results confirmed an increase in re-identification accuracy. In addition, the training time of neural networks using the proposed hyperparameter adjustment method allows for a reduction in training time compared to using the training method on the base model. An algorithm for person re-identification is presented. It uses a descriptor to describe human features based on neural network features of their face and figure. One global and two local neural network descriptors are used to describe a person's facial features. The human figure image is described by a vector of 1536 elements obtained using DenseNet-121. The proposed approach ensures high re-identification accuracy when facial identification is possible and enables re-identification in the case of hidden faces and body parts. Experimental results are presented. A software implementation of a prototype for re-identification in an open world is described.*

**Keywords:** re-identification, convolutional neural networks, hyperparameters, learning rate, batch size.

## ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

УДК 621.315.692

DOI 10.52928/2070-1624-2025-45-2-18-25

### ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ НЕГАТИВНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ ДЛЯ ОБРАТНОЙ ЛИТОГРАФИИ

*С. А. АБРАМОВ, канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ,  
канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ  
(Белорусский государственный университет, Минск)*

*канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

*О. А. ЗУБОВА  
(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)*

*Методом рентгеноспектрального микронализа исследованы пленки негативных фоторезистов (ФР) KMP E3502, AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070 и AZ nLOF 5510 толщиной 0,9–6,0 мкм, нанесенные на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. В рентгеновских спектрах всех ФР-пленок наблюдались линии, обусловленные присутствием углерода и кислорода, причем углеродная линия является доминирующей. В тонких пленках наблюдалась также линия, связанная с кремнием и обусловленная проникновением электронного пучка в подложку. Ее интенсивность снижается при увеличении толщины фоторезиста, а при толщине пленки > 5 мкм она исчезает из спектра. В пленках AZ nLOF наблюдалась также полоса, обусловленная присутствием серы. Величина отношения  $N_{\text{O}}/N_{\text{C}}$  (ат.%) варьируется для разных фоторезистов одного производителя, что связано с различиями в составе заместителей у олигомеров фенолформальдегидных смол – пленкообразующего компонента исследованных материалов. Стабилизирующая обработка и ионное травление фоторезистивных пленок приводили к изменению соотношения концентраций кислорода и углерода вследствие действия нескольких конкурирующих механизмов. Ионное травление фоторезистивных пленок способствовало образованию на их поверхности механически прочного углеродистого слоя, устойчивого к химическим растворителям. Растворение в парах спирта ионно-травленых фоторезистивных пленок протекает только по трещинам в углеродистом слое.*

**Ключевые слова:** негативный фоторезист, рентгеноспектральный микронализ, стабилизирующая обработка, ионное травление.

**Введение.** Фоторезисты обычно представляют собой композиты, имеющие в своем составе в качестве пленкообразующей основы химические соединения, как правило, олигомерной структуры. В них также вводятся активные компоненты, чаще всего – группы хинондиазидов. Негативные фоторезисты KMP E3502 (Kempur Microelectronics Inc, Китай) и AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070, AZ nLOF 5510 (MicroChemicals GmbH, Германия) предназначены для использования в технологии металлизации полупроводниковых пластин методом обратной (lift-off) литографии, что требует высокой температурной стойкости (более 250 °C) фоторезиста. В качестве пленкообразующей основы в этих фоторезистах используются олигомеры фенолформальдегидных смол. Фоторезисты серии AZ nLOF 20XX работают на принципе «химического усиления» и в своем составе дополнительно содержат компонент, способствующий формированию отрицательного угла наклона маски фоторезиста [1]. Кроме того, фоторезисты, применяемые в lift-off литографии, содержат сшивающие соединения – чаще всего на основе меламина  $C_3H_6N_6$ , молекула которого включает атомы азота. При воздействии актиничного излучения на резисты серии AZ nLOF 20XX образуется карбоновая кислота, которая сшивает смолу на последующем этапе запекания, делая ее нерастворимой в проявителе, в то время как незэкспонированные участки фоторезистивной пленки остаются растворимыми в проявителе. В ФР других марок во время экспонирования происходит фотополимеризация. При этом образуются радикалы, которые инициируют реакцию сшивания смолы уже при комнатной температуре. Это позволяет производить формирование структуры резиста сразу после экспонирования без этапа запекания<sup>1</sup>. Определение оптимальных технологических режимов литографических процессов требует знания элементного состава используемых фоторезистов, однако производители обычно не раскрывают полностью эту информацию в полном объеме.

<sup>1</sup> Basics of Microstructuring [Электронный ресурс]. – URL: [www.microchemicals.com/downloads/application\\_notes.html](http://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html) (дата обращения 09.09.2025).

Цель настоящей работы – исследование элементного состава негативных фоторезистивных пленок KMP E3502, AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070, AZ nLOF 5510 на кремнии и его трансформации при внешних воздействиях.

**Методы исследования.** Пленки фенолформальдегидных фоторезистов KMP E3502, AZ nLOF 2020, AZ nLOF 2070, AZ nLOF 5510 наносились на поверхность пластин кремния методом центрифугирования [2]. Перед нанесением ФР пластины кремния подвергались стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. После формирования пленки ФР проводилась ее сушка при температуре 110 °C длительностью 60 с. Толщина фоторезистивных пленок варьировалась в диапазоне 0,9–6,0 мкм. Измерение геометрической толщины пленок фоторезистов выполнялось на растровом электронном микроскопе. С целью дополнительного усиления фоторезистивной пленки часть образцов подвергалась облучению светом с длиной волны  $\lambda = 404$  нм в течение 105 с и последующей сушке при 115 °C длительностью 60 с. Затем часть дополнительно усиленных образцов с целью очистки поверхности фоторезистивной пленки подвергалась ионному травлению в течение 20 мин ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 160 эВ при интенсивности потока газа 6 см<sup>3</sup>/мин.

Для рентгеноспектрального микроанализа образцов использовали сканирующий электронный микроскоп Zeptools ZEM15, оснащенный энергодисперсионным спектрометром. Обработку спектров и количественный анализ выполняли в режиме обработки данных без стандартов с использованием программного пакета AZtecOne. Для получения статистически значимых результатов на каждой анализируемой области регистрировали не менее 3–5 спектров с временем накопления 60–120 секунд на спектр. Сканирующую электронную микроскопию выполняли при следующих параметрах: ускоряющее напряжение – 8 кВ, рабочее расстояние – 11,5 мм, величина тока электронного зонда – 0,5 нА. Анализ проводили при увеличениях от  $\times 300$  до  $\times 1000$ . Содержание элементов определяли в весовых процентах с последующим пересчетом в атомные проценты. Погрешность измерений для элементов с концентрацией > 10 вес. % составляла  $\pm 0,5\%$ , а для элементов с концентрацией 1–10 вес. % не превышала  $\pm 1–3\%$ . Фотографии получали при следующих фиксированных параметрах: ускоряющее напряжение – 15 кВ, режим детектирования – обратно-рассеянные электроны, увеличение –  $\times 300$ , рабочее расстояние – 11,5 мм.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** На рисунках 1–3 представлены рентгеновские спектры пленок ФР различных марок толщиной от 0,95 до 5,9 мкм. Во всех спектрах наблюдались линии, обусловленные присутствием углерода и кислорода, причем углеродная линия является доминирующей. В тонких пленках наблюдалась также линия, связанная с кремнием. В пленках толщиной ~ 1 мкм она преобладает в спектре (рисунок 1). Ее интенсивность снижается при увеличении толщины фоторезиста, а при толщине пленки > 5 мкм она исчезает из спектра (рисунки 2, 3). Такое поведение кремниевой линии обусловлено проникновением электронного пучка в подложку, поскольку при энергии пучка 8 кэВ, использованной в работе, глубина проникновения электронов в ФР на основе фенолформальдегидных смол составляет ~ 5 мкм.

В пленках AZ nLOF наблюдалась также полоса, связанная с присутствием серы (рисунки 1, 2). Содержание S от точки к точке варьировалось в пределах 0,04–0,05 ат.-% в пленках AZ nLOF 5510 и 0,06–0,11 ат.-% в пленках серии AZ nLOF 20XX. Однаковые значения концентрации серы в пленках AZ nLOF 2020 и AZ nLOF 2070, которые различаются только содержанием растворителя [3], позволяют утверждать, что атомы S не входят в состав растворителя. Отметим, что содержание серы в ФР AZ nLOF было существенно ниже, чем в позитивных российских фенолформальдегидных фоторезистах ФП9120, где оно варьировалось от 0,84 ат.-% до 0,23 ат.-% по мере уменьшения толщины пленки с 5,0 до 1,0 мкм. В российских позитивных ФР сера входит в состав диазохинона, являющегося ингибитором растворения фенолформальдегидной смолы [4].

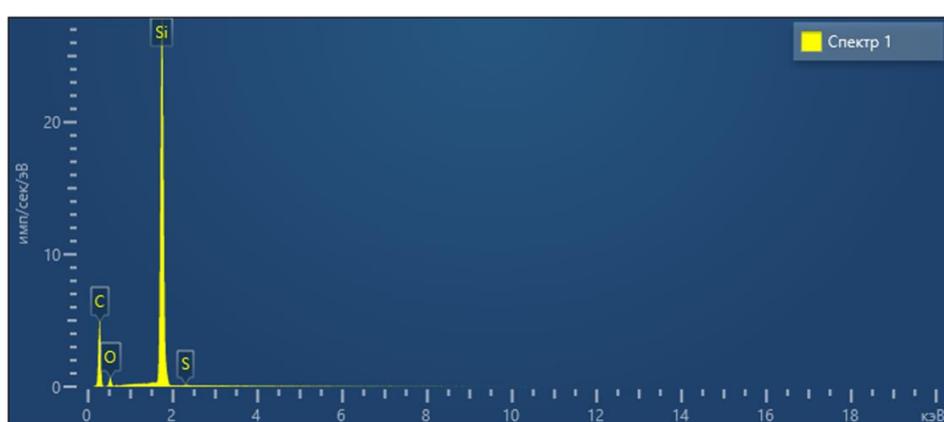


Рисунок 1. – Характерный рентгеновский спектр пленок AZ nLOF 5510 толщиной 0,95 мкм

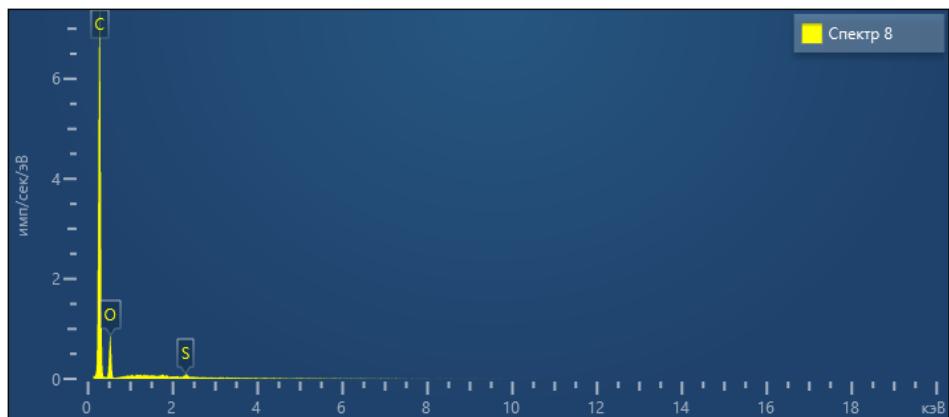


Рисунок 2. – Характерный рентгеновский спектр пленок AZ nLOF 2070 толщиной 5,9 мкм

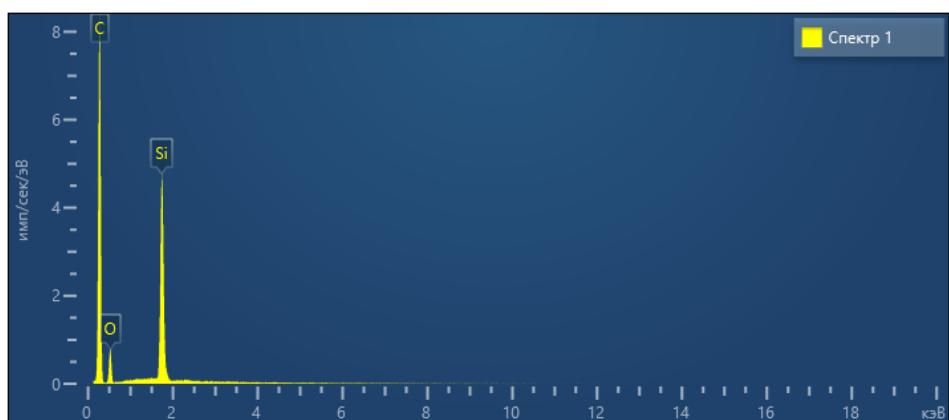


Рисунок 3. – Характерный рентгеновский спектр пленок KMP E3502 толщиной 2,52 мкм

В спектрах пленок KMP E3502 наблюдались только полосы углерода и кислорода, серы либо других элементов обнаружено не было (см. рисунок 3). Отметим, что в другом негативном фоторезисте на основе новолачной смолы – NFR 016 D4 (производитель JSR, Tokyo, Japan) – нами был обнаружен хлор в концентрации 0,12 – 0,13 ат.-%.

В таблице приведены значения отношения  $N_O/N_C$  (ат.-%), т. е. отношения числа атомов кислорода к числу атомов углерода, для фоторезистивных пленок различных марок – как исходных, так и подвергавшихся внешним воздействиям (дополнительному усилению и ионному травлению). Отметим существенные различия в значениях  $N_O/N_C$  в пленках даже одного производителя (ФР серии AZ nLOF 20XX и AZ nLOF 5510), что указывает на их различный состав. Большие расхождения в значениях отношения  $N_O/N_C$  пленок фоторезиста KMP E3502 обусловлены, вероятнее всего, наличием в пленке толщиной 5,73 мкм остаточного растворителя в высокой концентрации, в котором соотношение  $N_O/N_C$  может быть  $\sim 0,5$ . На это также указывает снижение величины  $N_O/N_C$  при сушке (усилении) указанной пленки. В зависимости от количества и вида заместителей ( $-H$ ,  $-CH_3$  или  $-CH_2OH$ ) величина соотношения  $N_O/N_C$  в фенолформальдегидных фоторезистах может изменяться в широких пределах. В новолачной смоле (все заместители  $-H$ ) величина  $N_O/N_C \sim 0,15$ , что характерно для ФР серии AZ nLOF 20XX. В случае заместителей  $-CH_3$  величина соотношения  $N_O/N_C$  может снижаться до значений  $\sim 0,087$ , что характерно для тонкой пленки KMP E3502. Более низкие значения соотношения  $N_O/N_C$  в тонкой пленке AZ nLOF 5510 указывают на наличие в этом ФР бескислородного компонента.

Таблица 1. – Соотношение концентраций атомов кислорода и углерода  $N_O/N_C$  (ат.-%) в различных фоторезистивных пленках

Фоторезист (толщина)	AZ nLOF 2070 (5,83 мкм)	AZ nLOF 2020 (5,95 мкм)	AZ nLOF 5510 (0,95 мкм)	KMP E3502 (5,73 мкм)	KMP E3502 (2,62 мкм)
Исходный	0,1625	0,1589	0,0507	0,1646	0,0925
Усиление	0,1645	0,1646	—	0,1550	0,0825
Ионное травление	0,1698	0,1701	0,0533	0,1628	0,0849

Усиление/сушка и ионное травление приводили к увеличению соотношения  $N_O/N_C$  в фоторезистах AZ nLOF, которое более выражено в пленке AZ nLOF 2020. Как отмечалось ранее [3], в этой пленке имеется остаточный растворитель в существенной концентрации. Поведение пленок фоторезиста KMP E3502 иное. При усиление/сушке величина соотношения  $N_O/N_C$  снижается, а последующее ионное травление приводит к увеличению соотношения  $N_O/N_C$ , более выраженному в толстой пленке.

При анализе полученных экспериментальных результатов необходимо учитывать следующие обстоятельства. При внешних воздействиях (термообработка, облучение) в фоторезистивных пленках протекают разнонаправленные процессы как физической, так и химической природы. В ФР-пленках всегда присутствуют молекулы остаточной воды, которая образуется в процессе синтеза фенолформальдегидной смолы. Ее содержание обычно составляет 1–2 %. Кроме того, пары воды могут проникать в пленки из атмосферы хранения и при различных внешних воздействиях. Это может быть одной из причин возрастания соотношения  $N_O/N_C$  в ФР-пленках серии AZ nLOF 20XX. В то же время, в условиях вакуума (в частности, при ионной имплантации) или инертной атмосферы термообработки остаточная вода эффективно удаляется из пленки [5].

Необходимо также учитывать наличие в пленках остаточного растворителя, состав и концентрация которого зависят от типа конкретного фоторезиста и толщины фоторезистивной пленки. Растворитель удаляется в процессе сушки [6], однако полного его удаления обычно достигнуть не удается. При одинаковых условиях сушки содержание растворителя обычно выше в толстых пленках. Также содержание остаточного растворителя может изменяться по толщине, что обусловлено неполным прогревом толстой пленки при сушке в процессе ее формирования. Нагрев в нашем эксперименте происходил со стороны подложки, поэтому удаление растворителя наиболее интенсивно протекало у границы раздела фоторезист/кремний. За время сушки тонкая пленка успевала прогреваться достаточно равномерно, поэтому концентрация остаточного растворителя в ней была низкой и равномерной по всей толщине. Толстая пленка за время сушки не успевает прогреться однородно, поэтому после формирования толстой пленки концентрация остаточного растворителя вблизи поверхности фоторезиста выше, чем у границы раздела фоторезист/кремний. Повышенная концентрация остаточного растворителя у поверхности ФР-пленки приводит, в частности, к снижению микротвердости приповерхностных слоев толстой фоторезистивной пленки [7]. Кроме того, на границе раздела фоторезист/кремний происходит взаимодействие атомов окисной пленки на кремнии с атомами фоторезиста, которое может изменять состав ФР-пленки у границы раздела фоторезист/кремний [8].

При облучении полимеров и, в меньшей степени, при их термообработке образуются летучие газообразные продукты (например,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $C_2H_6$  и т. д.), которые испаряются из полимерной пленки. Обычно это продукты разложения боковых цепей [9]. Их состав зависит от вида полимерной пленки. Этот процесс будет оказывать влияние на соотношение  $N_O/N_C$ . Так, удаление  $CO$  и  $CO_2$  будет снижать величину  $N_O/N_C$ . Не исключено, что этот процесс имеет место при стабилизирующей обработке полимерных пленок KMP E3502. В то же время, при образовании и удалении  $CH_4$  соотношение  $N_O/N_C$  будет снижаться. Этот процесс, вероятно, протекает при ионном травлении исследованных ФР. Следует отметить, что высокоэнергетическое облучение, в том числе ионная имплантация, изменяет адгезионные свойства фоторезистивных пленок [10–13], т. е. структуру пленки вблизи границы раздела ФР/кремний. Кроме того, при термообработке и облучении возможно накопление в полимерной пленке кислорода из атмосферы, что приводит к протеканию в фенолформальдегидных смолах реакций окисления до соответствующих карбонильных соединений или формирования эфирных фрагментов [14].

Вследствие образования и испарения летучих газообразных продуктов ионное травление фоторезистивных пленок приводило к образованию на их поверхности механически прочного обугленного слоя, устойчивого к химическим растворителям. На рисунках 4–7 представлены снимки, полученные с помощью электронного микроскопа, различных фоторезистивных пленок до и после выдержки в парах спирта в течение 1 недели. Все исследованные исходные (до ионного травления) фоторезистивные пленки набухали, растворялись в спирту и стекали с подложки. На поверхности кремниевой пластины оставались локальные пятна фоторезиста (рисунки 4, 5, 7). Такое поведение фоторезистов указывает на то, что пленкообразующей основой во всех исследованных фоторезистах являются олигомеры фенолформальдегидной смолы. Полимерные материалы в спирту не растворяются. В светлых местах на фото рентгеноспектральный микронализ показывает присутствие одного элемента – кремния (рисунок 8). Рентгеновский спектр темных участков схож со спектром исходной пленки, однако толщина пленки меньше исходной, о чем свидетельствует появление линии кремния в спектрах пленок толщиной свыше 5 мкм. Кроме того, величина соотношения  $N_O/N_C$  возрастает по сравнению с исходной пленкой, что свидетельствует о накоплении в ней спирта. Стабилизирующая обработка незначительно замедляла скорость растворения пленки, существенно не изменяя общую картину.

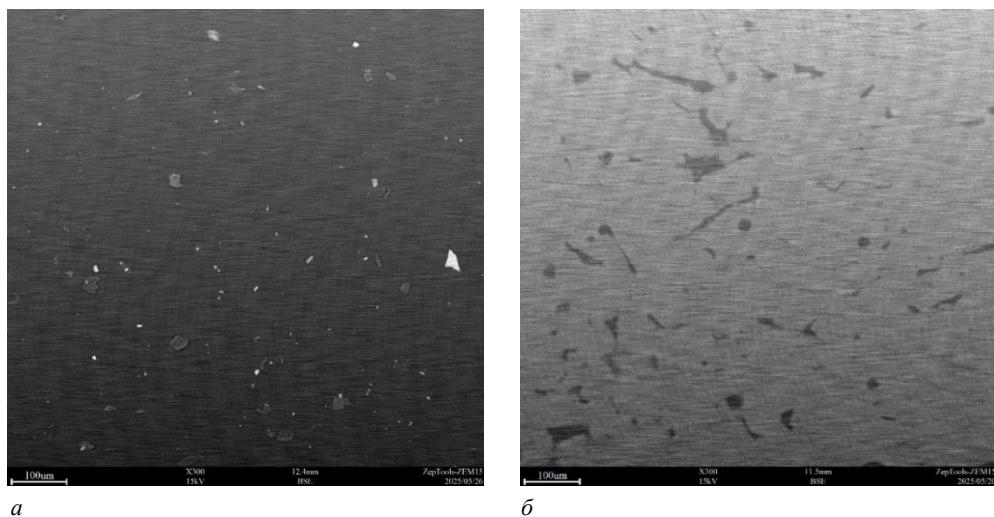


Рисунок 4. – Фотографии поверхности исходной пленки КМР Е3502 до (а) и после (б) выдержки в парах спирта

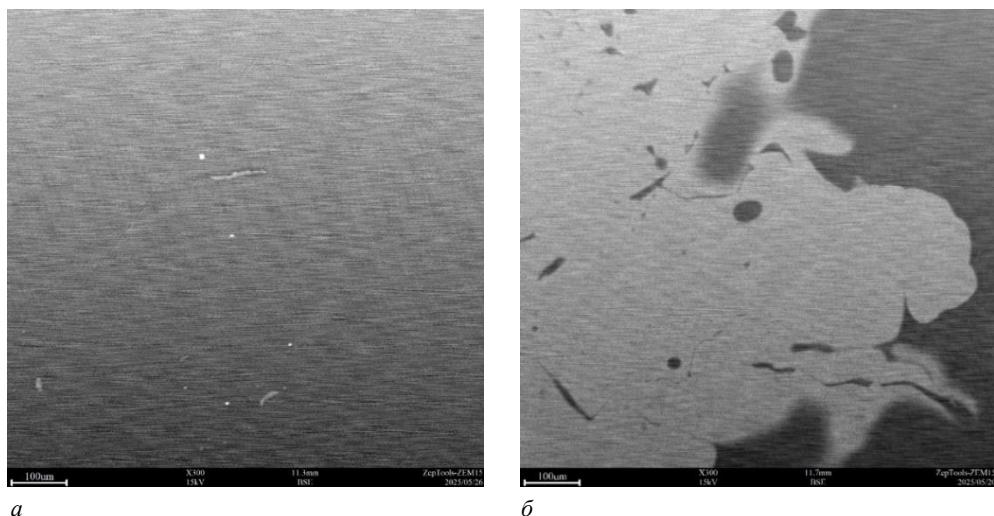


Рисунок 5. – Фотографии поверхности исходной пленки AZ nLOF 2070 до (а) и после (б) выдержки в парах спирта

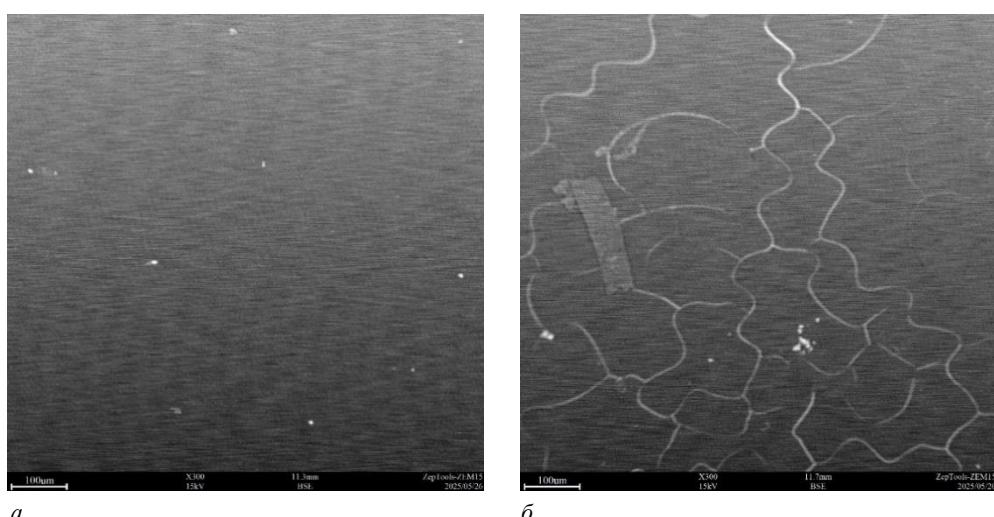


Рисунок 6. – Фотографии поверхности ионно-травленной пленки AZ nLOF 2070 до (а) и после (б) выдержки в парах спирта

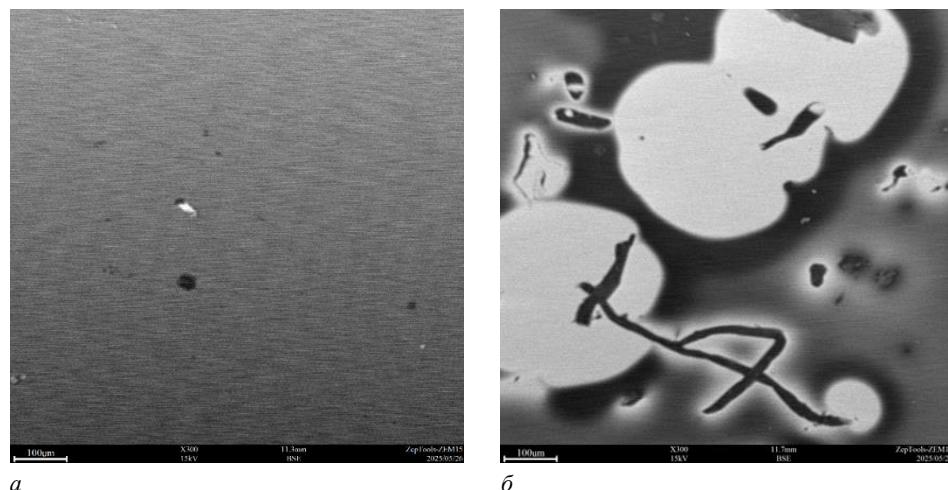


Рисунок 7. – Фотографии поверхности исходной пленки AZ nLOF 5510 до (а) и после (б) выдержки в парах спирта



Рисунок 8. – Рентгеновский спектр пленки AZ nLOF 2070 толщиной 5,9 мкм после выдержки в парах спирта, снятый на светлом поле (рисунок 5)

Ионное травление кардинальным образом изменяло процессы растворения фоторезистивной пленки в спиртовых растворах. После ионного травления растворение пленок идет по трещинам в сформированном углеродистом слое (см. рисунок 6, б). Сетка трещин неизбежно образуется в углеродистом слое вследствие испарения летучих газообразных продуктов и формирования упругих напряжений на границе раздела углеродистый слой/полимер [9]. В области трещины (светлые извилистые линии) рентгеновский спектр содержит только линию кремния и имеет сходство со спектром, представленным на рисунке 8. В остальной области поверхности пленки спектр идентичен спектрам до выдержки в парах спирта (см. рисунки 1–3). Существенно не изменяется также величина соотношения  $N_0/N_c$ . Аналогичное поведение наблюдалось ранее [15] при травлении в 3 М водном растворе KOH пленок фенолформальдегидных позитивных фоторезистов ФП9120, имплантированных сурьмой. Углеродистый слой, сформированный имплантацией  $Sb^+$ , устойчив по отношению к KOH, и проникновение травителя к нижним слоям фоторезиста осуществлялось по микротрещинам в имплантированном углеродистом слое.

**Заключение.** Экспериментально установлено, что в рентгеновских спектрах всех пленок наблюдалась линии, обусловленные присутствием углерода и кислорода, причем углеродная линия является доминирующей. В тонких пленках наблюдалась также линия, связанная с кремнием и обусловленная проникновением электронного пучка в подложку. Ее интенсивность снижается при увеличении толщины фоторезиста, а при толщине пленки  $> 5$  мкм она исчезает из спектра. В пленках AZ nLOF наблюдалась также полоса, связанная с присутствием серы. Величина отношения  $N_0/N_c$  (ат.%) варьируется для разных фоторезистов одного производителя, что связано с различиями в составе заместителей у олигомеров фенолформальдегидных смол – пленкообразующих компонентов исследованных материалов. Стабилизирующая обработка и ионное травление фоторезистивных пленок приводили к изменению соотношения концентраций кислорода и углерода, обусловленному действием нескольких конкурирующих механизмов, таких как испарение растворителя и остаточной воды, образование летучих газов и взаимодействие на границе раздела фоторезист/кремний и т. д. Ионное травление фоторезистивных пленок приводило к образованию на их поверхности

механически прочного углеродистого слоя, устойчивого к химическим растворителям. Растворение в парах спирта ионно-травленных фоторезистивных пленок протекает только по трещинам в углеродистом слое.

Работа выполнена в рамках задания 2.16 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецова Н. А., Эрлих Р. Д., Соловьев В. В. Отечественный фоторезист для взрывной фотолитографии // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. – 2017. – № 1(165). – С. 44–46.
2. Модификация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора // Д. И. Бринкевич, А. А. Харченко, В. С. Просолович и др. – Микроэлектроника. – 2019 – Т. 48, № 3. – С. 235–239. – DOI: [10.1134/S0544126919020029](https://doi.org/10.1134/S0544126919020029).
3. Пленки фоторезистов серии AZ nLOF на монокристаллическом кремнии / Д. И. Бринкевич, Е. В. Гринюк, В. С. Просолович и др. // Микроэлектроника. – 2025. – Т. 54, № 1. – С. 55–63. – DOI: 10.31857/S0544126925010068.
4. Способность нафтохинондиазидных фоторезистов к экзотермическому разложению / А. Н. Шушпанов, А. Я. Васин, В. М. Райкова и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 90–96. – DOI: [10.24000/0409-2961-2020-10-90-96](https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-10-90-96).
5. Modification of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films beyond the Region of Implantation of B<sup>+</sup> Ions / S. D. Brinkevich, E. V. Grinyuk, D. I. Brinkevich et al. // High energy chemistry. – 2020. – Vol. 54, iss. 5. – P. 342–351. – DOI: [10.1134/S0018143920050045](https://doi.org/10.1134/S0018143920050045).
6. Трансформация спектров нарушенного полного внутреннего отражения в процессе сушки диазохинон-новолачного фоторезиста / Д. И. Бринкевич, С. Д. Бринкевич, А. Н. Петлицкий и др. // Микроэлектроника. – 2021. – Т. 50, № 4. – С. 274–280. – DOI: [10.31857/S0544126921040037](https://doi.org/10.31857/S0544126921040037).
7. Индентирование пленок негативных фоторезистов для обратной литографии / С. А. Вабищевич, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2025. – № 1(44). – С. 53–60. – DOI: [10.52928/2070-1624-2025-44-1-53-60](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2025-44-1-53-60).
8. Mechanism of the Adhesive Interaction of Diazoquinone-Novolac Photoresist Films with Monocrystalline Silicon / S. D. Brinkevich, E. V. Grinyuk, D. I. Brinkevich et al. // Journal of Applied Spectroscopy. – 2020. – Vol. 87, iss. 4. – P. 647–651. – DOI: [10.1007/s10812-020-01049-4](https://doi.org/10.1007/s10812-020-01049-4).
9. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров. – М.: Мир, 1988. – 246 с.
10. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинонноволачных фоторезистов, облученных электронами / С. А. Вабищевич, Н. В. Вабищевич, С. Д. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2024. – Т. 58, № 1. – С. 60–68. – DOI: 10.31857/S002311932401006.
11. Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazoquinone-Novolak Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / Vabishchevich S. A., Brinkevich S. D., Prosolovich V. S. et al. // Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2020. – Vol. 14, iss. 6. – P. 1352–1357. – DOI: [10.1134/S1027451020060476](https://doi.org/10.1134/S1027451020060476).
12. Adhesion of Irradiated Diazoquinone–Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / S. A. Vabishchevich, S. D. Brinkevich, N. V. Vabishchevich et al. // High Energy Chemistry. – 2021. – Vol. 55, iss. 6 – P. 495–501. – DOI: [10.1134/S0018143921060151](https://doi.org/10.1134/S0018143921060151).
13. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинон-новолачного фоторезиста, имплантированных ионами бора и фосфора / С. А. Вабищевич, С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 1. – С. 54–59. – DOI: [10.31857/S002311932001012X](https://doi.org/10.31857/S002311932001012X).
14. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста за областью внедрения ионов B<sup>+</sup> / С. Д. Бринкевич, Е. В. Гринюк, Д. И. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 377–386. – DOI: [10.31857/S0023119320050046](https://doi.org/10.31857/S0023119320050046).
15. Ion implantation of positive photoresists / D. I. Brinkevich, S. D. Brinkevich, N. V. Vabishchevich et al. // Russian Microelectronics. – 2014. – Vol. 43, iss. 3. – P. 194–200. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S106373971401003X>.

Поступила 16.09.2025

## THE ELEMENTAL COMPOSITION OF NEGATIVE PHOTORESISTS FOR LIFT-OFF LITHOGRAPHY

**S. ABRAMOV, D. BRINKEVICH, V. PROSOLOVICH,**  
(Belarusian State University, Minsk)

**S. VABISHCHEVICH,**  
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

**O. ZUBOVA,**  
(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk)

*Films of negative photoresists (PRs) KMP E3502, AZ nLOF 2020, 2070, and 5510 with thicknesses of 0,9–6,0  $\mu$ m, deposited on the surface of silicon wafers by spin-coating, were studied using X-ray microanalysis. The X-ray spectra*

of all PRs films contained lines due to carbon and oxygen, with the carbon line being the dominant one. A silicon-related line, caused by electron beam penetration into the substrate, was also observed in thin films. Its intensity decreases with increasing photoresist thickness and disappears from the spectrum at film thicknesses  $> 5 \mu\text{m}$ . A sulfur band was also observed in the AZ nLOF films. The  $\text{N}_\text{O}/\text{N}_\text{C}$  ratio (in atomic %) varies among photoresists from the same manufacturer, owing to the different substituent compositions of phenol-formaldehyde resin oligomers – the film-forming component of the studied photoresists. Stabilizing treatment and ion beam etching of photoresist films resulted in changes in the oxygen-to-carbon  $\text{N}_\text{O}/\text{N}_\text{C}$  ratio due to several competing mechanisms. Ion beam etching of photoresist films resulted in the formation of a mechanically strong carbon layer on their surface, resistant to chemical solvents. Dissolution of ion-etched photoresist films in alcohol vapor occurs only through cracks in the carbon layer.

**Keywords:** negative photoresist, X-ray microanalysis, stabilizing treatment, ion etching.

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК НЕГАТИВНЫХ ФОТОРЕЗИСТОВ КМР Е3502 НА КРЕМНИИ

канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ<sup>2</sup>,  
канд. физ.-мат. наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ<sup>2</sup>, канд. хим. наук, доц. С. Д. БРИНКЕВИЧ<sup>3</sup>,  
О. А. ЗУБОВА<sup>4</sup>, Н. В. ВАБИЩЕВИЧ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

<sup>2</sup>(Белорусский государственный университет, Минск)

<sup>3</sup>(ООО «Мой медицинский центр – высокие технологии», Всеволожск, Россия)

<sup>4</sup>(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)

Методом индентирования исследованы пленки негативных фоторезистов (ФР) КМР Е3502 толщиной 2,6–5,8 мкм, нанесенные на поверхность пластин кремния методом центрифугирования. Экспериментально установлено, что прочностные и адгезионные свойства пленок КМР Е3502 сопоставимы с аналогичными характеристиками ФР серии AZ nLOF 20XX. Коэффициент вязкости разрушения  $K_{IC}$  пленок КМР Е3502 возрастает при увеличении нагрузки. Ни дополнительное усиление, ни ионное травление не оказывали существенного влияния на их трещиностойкость. Адгезия (удельная энергия отслаивания  $G$ ) тонких пленок в три раза ниже по сравнению с толстыми пленками КМР Е3502. Значения  $G$  толстой пленки КМР Е3502 близки к величине  $G$  исходной пленки AZ nLOF 2070. Дополнительное усиление и ионное травление не оказывали существенного влияния на адгезию фоторезистивной пленки КМР Е3502 к кремниевой подложке. Истинная микротвердость тонких пленок КМР Е3502 составляла 0,3 ГПа, что примерно в два раза выше микротвердости у функционально аналогичных пленок AZ nLOF 5510. После стабилизирующей обработки и ионного травления она увеличивалась, что обусловлено сшиванием молекул фоторезиста. В толстых пленках КМР Е3502 микротвердость возрастала по мере удаления от поверхности пленки и при приближении к границе раздела фоторезист/кремний стабилизировалась на уровне ~ 0,55 ГПа. Такое поведение микротвердости обусловлено неравномерным прогревом пленки при сушке в процессе ее формирования, поскольку нагрев осуществлялся со стороны подложки. Полученные экспериментальные данные объяснены с учетом упорядочения структуры фоторезистивной пленки вблизи границы раздела ФР/кремний вследствие ориентации молекул и конформационных изменений в структуре основного компонента фоторезиста – фенолформальдегидной смолы. Радиационно-стимулированные процессы, протекающие при травлении пленок КМР Е3502 ионами Ar обусловлены формированием ковалентных сшивок между молекулами полимера, которые способствуют упрочнению пленки.

**Ключевые слова:** негативный фоторезист, микроиндентирование, микротвердость, адгезия, трещиностойкость, ионное травление.

**Введение.** Фоторезист – это светочувствительный многокомпонентный материал, способный изменять свою растворимость и устойчивость к щелочным и кислотным травителям под действием света. Негативный фоторезист КМР Е3502, выпускаемый компанией Kempur Microelectronics Inc, Китай, широко применяется при производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Основное его предназначение – процессы обратной (lift-off) литографии [1], позволяющие сформировать структуру на подложке путем удаления материала вместе с фоторезистом после его проявления и напыления тонкой пленки другого материала (чаще всего металла). Этот процесс используется для создания сложных структур, которые трудно сформировать обычными методами, и требует особых свойств фоторезиста – способности к быстрому растворению и высокой температурной стойкости. Фоторезист КМР Е3502 рассчитан под *i*-линию дуговой лампы и предназначен для формирования пленок толщиной 2–4 мкм. В качестве пленкообразующего полимера в указанном фоторезисте используются фенолформальдегидные смолы [2]. Одной из наиболее важных технологических характеристик фоторезистивных пленок на кремниевой подложке являются их прочностные и адгезионные свойства. Способность ФР выдерживать агрессивные воздействия, такие как травление, ионная имплантация, гальванопокрытие, не теряя заданной геометрии, напрямую влияет на точность формирования элементов микросхемы и, в конечном счете, на характеристики готовой СБИС.

Цель настоящей работы – исследование методом индентирования физико-механических свойств негативных фоторезистивных пленок КМР Е3502 на кремни и их трансформации при термообработке и ионном травлении.

**Методы исследования.** Пленки негативного фоторезиста КМР Е3502 наносились на поверхность пластин кремния методом центрифугирования [3]. Перед нанесением ФР пластины кремния подвергались

стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. После формирования пленки ФР проводилась ее сушка при температуре 110 °С длительностью 60 с. Толщина фотополимерных пленок составляла 2,62 и 5,73 мкм. Измерение геометрической толщины пленок фотополимера выполнялось на растровом электронном микроскопе. С целью дополнительного усиления фотополимерной пленки часть образцов подвергалась облучению светом с длиной волны  $\lambda = 404$  нм в течение 105 с и последующей сушке при 115 °С длительностью 60 с. Затем часть дополнительно усиленных образцов с целью очистки поверхности фотополимерной пленки подвергалась ионному травлению в течение 20 мин ионами  $\text{Ar}^+$  с энергией 160 эВ при интенсивности потока газа 6 см<sup>3</sup>/мин.

Микроиндентирование проводилось на приборе ПМТ-3 при комнатной температуре [4]. В качестве индентора использовался алмазный наконечник в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при вершине  $\alpha = 136^\circ$ . Нагрузка  $P$  на индентор варьировалась в пределах 1...50 г. Длительность нагружения составляла 2 с; выдержка под нагрузкой – 5 с. При измерении для каждой экспериментальной точки на поверхность образца наносилось не менее 50 отпечатков. Измерения восстановленной микротвердости ( $H$ ) выполнялись по стандартной методике [5]. Обработка результатов измерений проводилась с использованием методов математической статистики [6]. Это обеспечивало погрешность измерений микротвердости менее 2,5 % (с доверительной вероятностью 0,95).

Коэффициент вязкости разрушения (трещиностойкость)  $K_{1C}$  рассчитывался по длине радиальных трещин у отпечатков согласно формуле [6]

$$K_{1C} = 0,016 \left( \frac{E}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{L^{\frac{3}{2}}},$$

где  $E$  – модуль Юнга (для кремния  $1,5 \cdot 10^{11}$  Па);

$L$  – длина трещины.

Погрешность измерений коэффициента вязкости разрушения  $K_{1C}$  не превышала 8 %.

Прочность адгезионного взаимодействия фотополимерной пленки с кремнием оценивалась по удельной энергии отслаивания пленки  $G$ , которая рассчитывалась по формуле [7]

$$G = \frac{0,627H^2h(1-v^2)}{E(1+v+2(1-v)Hl^2/P)^2},$$

где  $h$  – толщина пленки;

$v$  – коэффициент Пуассона (использовалось значение 0,3);

$E$  – модуль Юнга (для исследованной пленки 8 ГПа [1]);

$P$  – нагрузка на индентор;

$l$  – длина трещины расслоения.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** На рисунках 1, 2 представлены характерные фотографии отпечатков индентора в пленках фотополимера KMP E3502 толщиной 5,73 и 2,62 мкм при нагрузках от 2 до 50 г. При пересечении индентором границы раздела фотополимер/кремний (нагрузка 50 г в толстых пленках и 10–50 г в тонких пленках) наблюдалось интенсивное отслоение пленки от подложки (рисунки 1,  $a$ ; 2,  $a$ ,  $\delta$ ), что указывает на слабую адгезию указанных пленок к кремнию. В углах отпечатков индентора в пленках фотополимера KMP E3502 при всех использовавшихся нагрузках наблюдались трещины, а вокруг отпечатков – светлые ореолы, отчетливо выраженные при нагрузках  $P \geq 5$  г (рисунки 1, 2). Следует отметить, что аналогичные по виду отпечатки индентора наблюдались также в пленках фотополимеров AZ nLOF 2020 и AZ nLOF 2070 толщиной 6,0 мкм [9].

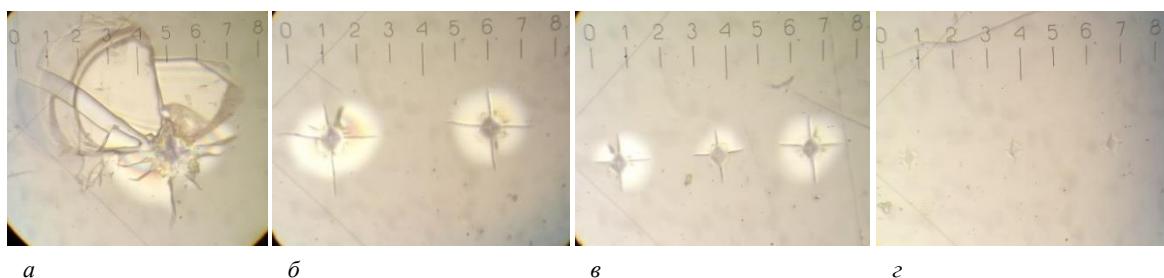


Рисунок 1. – Характерные фотографии отпечатков индентора в исходных пленках фотополимера KMP E3502 толщиной 5,73 мкм при нагрузках 50 г (а), 10 г (б), 5 г (в) и 2 г (г)

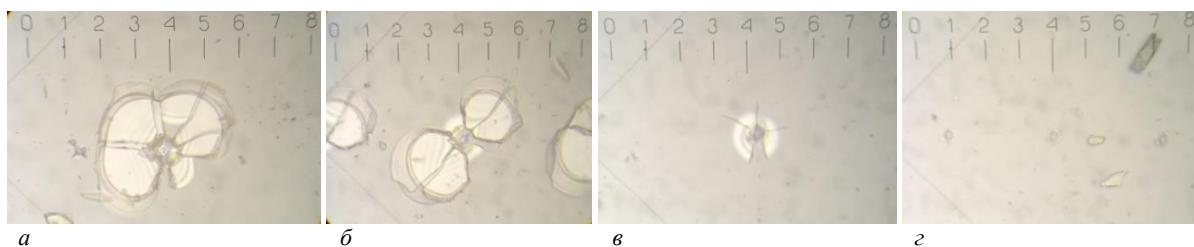


Рисунок 2. – Характерные фотографии отпечатков индентора в исходных пленках фотополимера КМР Е3502 толщиной 2,62 мкм при нагрузках 50 г (а), 10 г (б), 5 г (в) и 2 г (д)

В процессе индентирования пленок толщиной 2,62 мкм индентор проникает в кремниевую подложку при нагрузках выше 5 г, что приводит к резкому росту микротвердости (рисунок 3, а). При нагрузке 50 г величина  $H$  становится сравнимой с микротвердостью монокристаллического кремния [8]. В более толстых пленках индентор не достигает границы раздела даже при максимальных нагрузках 50 г. В этом случае существенного роста значений микротвердости при  $P \geq 10$  г не наблюдалось (рисунок 3, б).

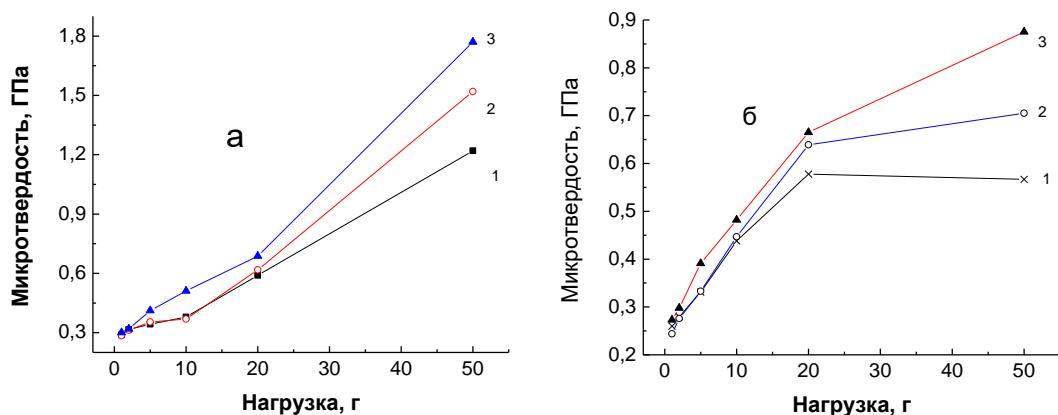


Рисунок 3. – Зависимость микротвердости от нагрузки для пленок фотополимера КМР Е3502 толщиной 2,62 мкм (а) и 5,73 мкм (б) исходных (1), после дополнительного усиления (2) и ионного травления (3)

Истинную микротвердость тонких пленок КМР Е3502 можно оценить по измерениям при нагрузках 1–5 г. В пленке толщиной 2,62 мкм она постоянна и составляет  $\sim 0,3$  ГПа (рисунок 3, а). Отметим, что она была примерно в два раза выше микротвердости функционально аналогичных пленок AZ nLOF 5510 производства MicroChemicals GmbH, Германия [9]. В толстых пленках КМР Е3502 толщиной 5,73 мкм микротвердость  $H$  возрастает по мере удаления от поверхности пленки с 0,25 до 0,6 ГПа и в исходных образцах при приближении к границе раздела фотополимер/кремний стабилизируется на уровне  $\sim 0,55$  ГПа (рисунок 3, б). Такое поведение величины  $H$  обусловлено неравномерным прогревом пленки при сушке в процессе ее формирования. Нагрев шел со стороны подложки, поэтому удаление растворителя наиболее интенсивно происходит у границы раздела фотополимер/кремний. После сушки концентрация остаточного растворителя выше у поверхности фотополимеристивной пленки, что обуславливает снижение микротвердости ее поверхностных слоев.

Дополнительное усиление (облучение светом с длиной волны  $\lambda = 404$  нм в течение 105 с и последующая сушка при  $115^\circ\text{C}$  длительностью 60 с) пленок приводило к увеличению микротвердости структур фотополимер/кремний, наиболее заметному при нагрузках выше 10 г (рисунок 3, кривые 2), что, вероятнее всего, связано с упрочнением пленок вблизи границы раздела фотополимер/кремний. При этом истинная микротвердость пленки практически не изменилась. Ионное травление приводило к увеличению микротвердости пленок КМР Е3502 при всех нагрузках, наиболее заметному в тонких пленках (рисунок 3, кривые 3). Возрастание микротвердости фотополимеристивных диазохинон-новолачных пленок при сушке и различных высокоэнергетических воздействиях наблюдалось ранее в работах [10; 11]. В нашем случае увеличение микротвердости полимерных пленок обусловлено термическим сшиванием молекул [12].

При всех нагрузках у отпечатков индентора наблюдались угловые трещины, что позволило оценить трещиностойкость указанных пленок и ее изменения при внешних воздействиях. Коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  обеих пленок КМР Е3502 возрастает при увеличении нагрузки (рисунок 4). Ни дополнительное усиление, ни ионное травление не оказывали существенного влияния на трещиностойкость фотополимеристивных пленок. Заметные различия наблюдались только при нагрузке 50 г. При этой нагрузке трещиностойкость

толстых пленок КМР Е3502 была выше, чем тонких, а дополнительное усиление и ионное травление увеличивали трещиностойкость обеих пленок (рисунок 4). Отметим, что величина  $K_{1C}$  пленок КМР Е3502 и характер их зависимости от нагрузки были идентичны фоторезистивным пленкам серии AZ nLOF 20XX [9].

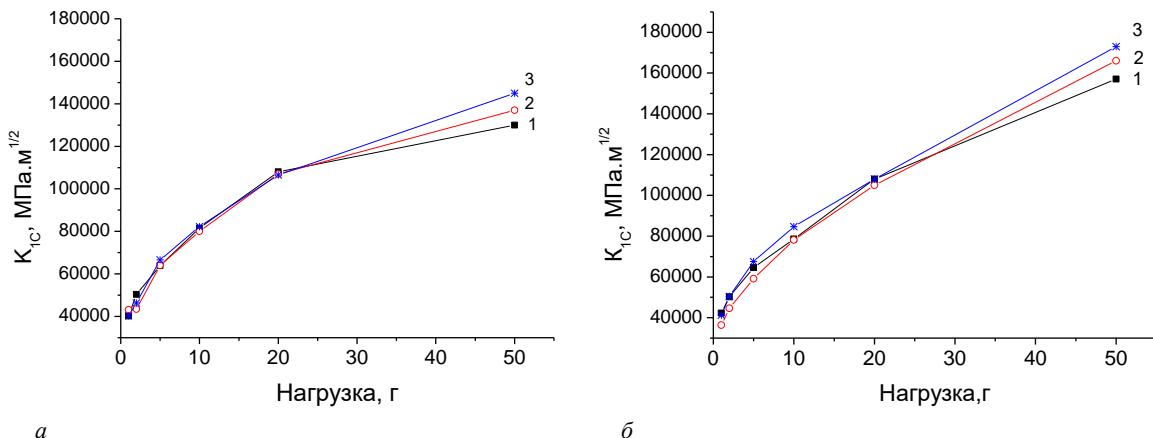


Рисунок 4. – Зависимости коэффициента вязкости разрушения  $K_{1C}$  от нагрузки для пленок фоторезиста КМР Е3502 толщиной 2,62 мкм (а) и 5,73 мкм (б) исходных (1), дополнительно усиленных (2) и проправленных ионами Ar (3)

Значения удельной энергии отслаивания  $G$  для исходных и подвергавших дополнительному усилиению и ионному травлению пленок КМР Е3502 представлены в таблице. Видно, что адгезия (величина  $G$ ) пленок толщиной 2,52 мкм в три раза ниже по сравнению с пленками толщиной 5,73 мкм. Значения  $G$  толстой пленки близки к величине  $G$  исходной пленки AZ nLOF 2070 толщиной 5,8 мкм [9]. Однако, в отличие от пленок серии AZ nLOF 20XX, дополнительное усиление и ионное травление не оказывали существенного влияния на адгезию фоторезистивной пленки КМР Е3502 к кремниевой подложке.

Таблица. – Удельная энергия отслаивания  $G$  пленок фоторезиста КМР Е3502 на кремнии

Толщина пленки	2,62 мкм			5,73 мкм		
	исходный	усиление	усиление + травление	исходный	усиление	усиление + травление
$G$ , Дж/м <sup>2</sup>	0,17	0,10	0,285	0,52	0,56	0,455

На фотографиях отпечатков индентора в пленках фоторезиста КМР Е3502 отчетливо видны светлые ореолы, представляющие собой зону деформации/разрушения (см. рисунки 1, 2). При малых (1–2 г) нагрузках – это области деформации, образованные вытесненным из-под индентора материалом пленки, что можно охарактеризовать как формирование «замороженных» остаточных напряжений после снятия нагрузки (см. рисунки 1,  $2, \alpha$ ; 2,  $\alpha$ ). При нагрузках  $\geq 5$  г вокруг отпечатков формируется зона разрушения, в которой наблюдаются радиальные и боковые трещины, образующие картину в виде «бабочек», обусловленную, вероятнее всего, отслоением пленки от подложки (см. рисунки 1,  $a-\alpha$ ; 2,  $a-\alpha$ ).

Зависимости от нагрузки среднего диаметра  $d_P$  зоны деформации/разрушения пленок КМР Е3502 представлены на рисунке 5. Характер этих зависимостей у тонких и толстых пленок различен. В пленках толщиной 2,62 мкм величина  $d_P$  резко растет при малых нагрузках и выходит на насыщение при  $P = 10$  г, практически не изменяясь при более высоких нагрузках (рисунок 5, а). Такой характер зависимости  $d_P(P)$  обусловлен тем, что индентор при нагрузке 10 г пересекает границу раздела фоторезист/кремний. В пленках толщиной 5,73 мкм индентор не достигает границы раздела фоторезист/кремний даже при максимальной нагрузке 50 г, поэтому наблюдается монотонный рост среднего диаметра  $d_P$  зоны деформации/разрушения (рисунок 5, б). Дополнительное усиление и ионное травление фоторезистивных пленок КМР Е3502 приводило к слабому снижению величины  $d_P$ , наблюдавшемуся при нагрузках выше 10 г.

Пленкообразующую основу фоторезиста КМР Е3502 образуют олигомеры фенолформальдегидных смол, которые могут присоединять мономерные цепи по трем различным вариантам, поэтому строгая линейная цепочка молекулы фоторезиста маловероятна. Однако на границе раздела фоторезист/кремний имеет место взаимодействие молекул фоторезиста и кремния (окисла на его поверхности). Согласно [13], полимерные пленки способны ориентироваться под внешним воздействием (например, электрического или магнитного поля) и после удаления растворителя сохранять стабильный порядок. Подобное взаимодействие полиметилметакрилата и  $\text{SiO}_2$  отмечалось авторами [14] на глубине до десяти микрон. Упорядочение

структуры фоторезистивной пленки вблизи границы раздела ФР/кремний вследствие ориентации молекул способствует упрочнению полимерной пленки вдоль направления ориентации, что проявлялось в наших экспериментах как возрастание микротвердости и коэффициента вязкости разрушения  $K_{1C}$  фоторезистивных пленок при увеличении глубины проникновения индентора в пленку.

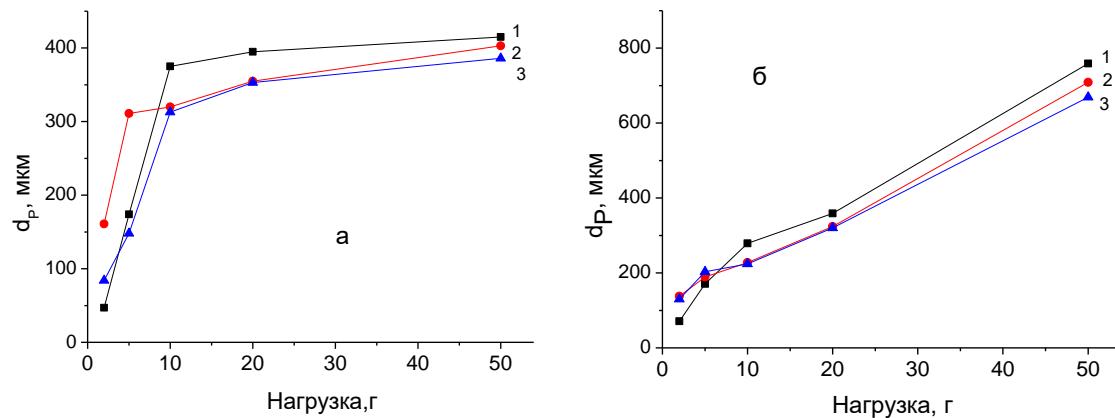


Рисунок 5. – Зависимости среднего диаметра зоны разрушения  $d_p$  вокруг отпечатка от нагрузки для пленок фоторезиста KMP E3502 толщиной 2,62 мкм (а) и 5,73 мкм (б) исходных (1), после дополнительного усиления (2) и ионного травления (3)

Различия прочностных свойств толстых и тонких фоторезистивных пленок KMP E3502 обусловлены неполным прогревом толстой пленки при сушке в процессе ее формирования. Нагрев происходил со стороны подложки, поэтому удаление растворителя наиболее интенсивно протекало у границы раздела фоторезист/кремний. За время сушки тонкая пленка успевала прогреваться достаточно равномерно, поэтому ее истинная микротвердость, измеряемая при нагрузках 1–5 г, постоянна. Толстая пленка за время сушки не успевает прогреться однородно. В ней после формирования концентрация остаточного растворителя вблизи поверхности фоторезиста выше, чем у границы раздела фоторезист/кремний. Известно [9], что присутствие растворителя снижает микротвердость фоторезистивной пленки. Это обстоятельство обуславливает монотонное увеличение микротвердости толстой пленки по мере проникновения индентора в глубину пленки и приближению к границе раздела фоторезист/кремний.

Радиационно-стимулированные процессы, протекающие при травлении пленок KMP E3502 ионами Ar, обусловлены формированием ковалентных сшивок между полимерными цепями [15]. Сшивки в свою очередь способствуют упрочнению пленки. При анализе следует также учитывать наличие в фоторезисте в качестве небольшой добавки «сшивающего» компонента, который активизируется (сшивает) при воздействии актиничного излучения и деактивируется при высокотемпературном нагреве. Поведение этого компонента при ионном травлении не изучено, но, вероятнее всего, он должен способствовать сшиванию олигомеров фенолформальдегидных смол в полимерные молекулы.

**Заключение.** Установлено, что прочностные и адгезионные свойства пленок KMP E3502 сопоставимы с аналогичными свойствами ФР серии AZ nLOF 20XX. Коэффициент вязкости разрушения  $K_{1C}$  пленок KMP E3502 возрастает при увеличении нагрузки. Ни дополнительное усиление, ни ионное травление не оказывали существенного влияния на их трещиностойкость. Адгезия (удельная энергия отслаивания  $G$ ) тонких пленок в три раза ниже по сравнению с толстыми пленками KMP E3502. Значения  $G$  толстой пленки KMP E3502 близки к величине  $G$  исходной пленки AZ nLOF 2070. Дополнительное усиление и ионное травление не оказывали существенного влияния на адгезию фоторезистивной пленки KMP E3502 к кремниевой подложке. Истинная микротвердость тонких пленок KMP E3502 составила 0,3 ГПа, что примерно в два раза выше микротвердости у функционально аналогичных пленок AZ nLOF 5510. После стабилизирующей обработки и ионного травления она увеличивалась, что обусловлено сшиванием молекул фоторезиста. В толстых пленках KMP E3502 микротвердость возрастала по мере удаления от поверхности пленки и при приближении к границе раздела фоторезист/кремний стабилизировалась на уровне  $\sim 0,55$  ГПа. Такое поведение величины  $H$  обусловлено неравномерным прогревом пленки при сушке в процессе ее формирования. Так как нагрев осуществлялся со стороны подложки, толстые пленки KMP E3502 не успевали прогреться однородно, в результате чего после сушки у их поверхности наблюдалась более высокая концентрация остаточного растворителя. Полученные экспериментальные данные объяснены с учетом упорядочения структуры фоторезистивной пленки вблизи границы раздела ФР/кремний вследствие ориентации молекул и конформационных изменений в структуре основного компонента фоторезиста – фенолформальдегидной

смолы. Радиационно-стимулированные процессы, протекающие при травлении пленок КМР Е3502 ионами Ar обусловлены формированием ковалентных сшивок между молекулами полимера, которые способствуют упрочнению пленки.

Работа выполнена в рамках задания 2.16 Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника («Наноструктура»)».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия фоторезистивных пленок на кремнии / Д. И. Бринкевич, Е. В. Гринюк, В. С. Просолович и др. // Приборы и методы измерений. – 2025. – Т. 16, № 1 – С. 69–76. – DOI: [10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76](https://doi.org/10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76).
2. Пленки фоторезистов серии AZ nLOF на монокристаллическом кремнии / Д. И. Бринкевич, Е. В. Гринюк, В. С. Просолович и др. // Микроэлектроника. – 2025. – Т. 54, № 1. – С. 55–63.
3. Модификация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора / Д. И. Бринкевич, А. А. Харченко, В. С. Просолович и др. // Микроэлектроника – 2019. – Т. 48, № 3. – С. 235–239. – DOI: [10.1134/S0544126919020029](https://doi.org/10.1134/S0544126919020029).
4. Бринкевич Д. И., Вабищевич Н. В., Вабищевич С. А. Прочностные свойства термообработанного кремния, выращенного в магнитном поле // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2009. – № 3. – С. 152–157.
5. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. Микротвердость пластин кремния, прошедшего геттерирующую термообработку // Перспективные материалы. – 2005. – № 2. – С. 20–22.
6. Бринкевич Д. И., Вабищевич Н. В., Вабищевич С. А. Физико-механические свойства эпитаксиальных слоев фосфифда галлия // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 92–97.
7. Адгезия к монокристаллическому кремнию пленок диазохинонноволачных фоторезистов, облученных электронами / С. А. Вабищевич, Н. В. Вабищевич, С. Д. Бринкевич и др. // Химия высоких энергий. – 2024. – Т. 58, № 1. – С. 60–68.
8. Вабищевич С. А., Вабищевич Н. В., Бринкевич Д. И. Микротвердость пластин кремния, прошедшего геттерирующую обработку // Перспективные материалы. – 2005. – № 2. – С. 20–22.
9. Индентирование пленок негативных фоторезистов для обратной литографии / С. А. Вабищевич, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2025. – № 1(44). – С. 53–60. – DOI: [10.52928/2070-1624-2025-44-1-53-60](https://doi.org/10.52928/2070-1624-2025-44-1-53-60).
10. Adhesion of Electron-Irradiated Diazoquinone–Novolac Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / S. A. Vabishchevich, N. V. Vabishchevich, S. D. Brinkevich et al. // High Energy Chemistry. – 2024. – Vol. 58, iss. 1. – P. 112–119. – DOI: [10.1134/S001814392401017X](https://doi.org/10.1134/S001814392401017X).
11. Прочностные свойства пленок фоторезиста AZ nLOF 5510 / С. А. Абрамов, Д. И. Бринкевич, В. С. Просолович и др. // Материалы 17-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение – 2024» (26–29 нояб. 2024 г.) / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2024. – С. 106–108.
12. Ионная имплантация позитивных фоторезистов / Д. И. Бринкевич, С. Д. Бринкевич, Н. В. Вабищевич и др. // Микроэлектроника. – 2014. – Т. 43, № 3. – С. 193–199. – DOI: [10.7868/S0544126914010037](https://doi.org/10.7868/S0544126914010037).
13. Lu Xiaolin, Mi Yongli. Characterization of the interfacial interaction between polyacrylamide and silicon substrate by Fourier transform infrared spectroscopy // Macromolecules. – 2005. – Vol. 38, iss. 3. – С. 839–843.
14. Власов С. В., Кулизнев В. Н. Ориентированное состояние полимеров. –М.: Знание, 1987. – 48 с.
15. Effect of Ion Implantation on the Adhesion of Positive Diazoquinone–Novolak Photoresist Films to Single-Crystal Silicon / S. A. Vabishchevich, S. D. Brinkevich, V. S. Prosolovich et al. // Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques – 2020. – Vol. 14, iss. 6. – P. 1352–1357. – DOI: [10.1134/S1027451020060476](https://doi.org/10.1134/S1027451020060476).

Поступила 16.09.2025

## PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF KMP E3502 NEGATIVE PHOTORESIST FILMS ON SILICON

S. VABISHCHEVICH<sup>1</sup>, D. BRINKEVICH<sup>2</sup>, V. PROSOLOVICH<sup>2</sup>, S. BRINKEVICH<sup>3</sup>,  
O. ZUBOVA<sup>4</sup>, N. VABISHCHEVICH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

<sup>2</sup>(Belarusian State University, Minsk)

<sup>3</sup>(LLC “My Medical Center – High Technologies”, Vsevolozhsk, Russia)

<sup>4</sup>(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk)

Films of negative photoresists (FR) KMP E3502 with a thickness of 2,6–5,8 microns deposited on the surface of silicon wafers by centrifugation have been studied by the indentation method. It was experimentally established that the strength and adhesive properties of the KMP E3502 films are close to the similar properties

of the AZ nLOF 20XX series. The fracture toughness coefficient  $K_{IC}$  of the KMP E3502 films increases with an increase in the load. Neither additional strengthening nor ion etching had a significant impact on their crack resistance. Adhesion (specific energy of peeling  $G$ ) of thin films is 3 times lower compared to thick films of the KMP E3502. The values of  $G$  of thick KMP E3502 film are close to the size  $G$  of the initial film AZ nLOF2070. Additional strengthening and ionic etching did not have a significant impact on the adhesion of the photoresistive film of the KMP E3502 to silicon substrate. The true microhardness of KMP E3502 thin films was 0,3 GPa and was ~ 2 times higher than the microhardness of similar functional AZ nLOF5510 films. After stabilizing processing and ion etching, it increased, which is due to the bonding of the photoresist molecules. In thick films of KMP E3502, the microhardness increased with distance from the film surface and stabilized at ~ 0.55 GPa as it approached the photoresist/silicon interface. This behavior of microhardness is due to uneven heating of the film during drying during its formation, since heating was carried out from the substrate. The obtained experimental data are explained taking into account the ordering of the photoresist film structure near the PR/silicon interface due to the orientation of molecules and conformational changes in the structure of the main component of the photoresist – phenol-formaldehyde resin. Radiation-stimulated processes occurring during etching of CMR E3502 films with Ar ions are caused by the formation of covalent crosslinking between polymer molecules, which contribute to the hardening of the film.

**Keywords:** negative photoresist, microindentation, microhardness, adhesion, crack resistance, ion etching.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТРАСТА ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ  
В РЕЖИМЕ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ**

**М. В. ИЗОИТКО, канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ,  
канд. техн. наук, доц. Д. А. ДОВГЯЛО, К. И. ИВАНОВА, Д. С. СИВАЦКИЙ  
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)**

Проведено исследование контраста отражательных характеристик анизотропной среды над углеводородами в режиме амплитудно-модулированных сигналов. Моделирование проводилось для экспериментально полученных характеристик вмещающих пород над месторождениями нефти и газа. Установлены закономерности изменения контраста отражательных характеристик при вариации углов падения электромагнитных волн на исследуемый профиль местности и частоты модуляции несущего колебания для расширения режимов тестирования при организации геологоразведочных работ. Отмечено, что при продольном распространении амплитудно-модулированных сигналов вдоль контура поверхности геопрофиля возможно использование частоты несущего сигнала и частоты модуляции, на которых существует частота среза частотной характеристики радиотехнической системы для поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа. Установлены частоты несущего сигнала и модуляции, для которых контраст отражательных характеристик среды над углеводородами минимален в режиме продольного распространения электромагнитных волн вдоль исследуемой поверхности залежей. Полученные результаты моделирования взаимодействия амплитудно-модулированных сигналов со средами над углеводородами могут быть применены в поисковой геофизике для разработки методов обнаружения месторождений нефти и газа.

**Ключевые слова:** углеводородная залежь, коэффициент отражения, амплитудно-модулированный сигнал, контраст.

**Введение.** Актуальность применения различных режимов взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с анизотропными средами (АС) над углеводородами вызвана расширением режимов тестирования данных сред и, следовательно, развитием методов поиска и обнаружения углеводородных залежей (УВЗ) [1; 2]. При этом применяются методы исследований углеводородов и твердых полезных ископаемых, отражающие процессы в области физики Земли, включая решение поисковых задач для региональной, поисково-картировочной и разведочной геофизики [3]. Используются методы измерения сопротивления слоев сред с подключением скважинных электродов, которые являются более чувствительными по сравнению с поверхностными измерениями [4]. Численные характеристики для поля вызванной поляризации с применением параметров анализируемой модели Cole-Cole на базе дифференциально-нормированного метода электроразведки используются в методах по определению наличия залежей углеводородов [5].

Проводятся исследования по применению радиокомплексирования методов электроразведки [6]. Система нестационарного электромагнитного поля с малым петлевым источником выгодна для разработки компактных автономных приборов, которые хорошо подходят для подводной съемки [7]. Методы вызванной поляризации находят широкое применение при поисковых работах на нефтеперспективных площадях [8]. Крупномасштабная трехмерная (3D) геофизическая визуализация с контролируемым источником (CSEM) в настоящее время привлекает значительное внимание для картирования электропроводности потенциальных морских нефтегазовых резервуаров [9]. Применяются различные источники формирования ЭМВ, например, нестационарный генератор электрического поля с применением диполя в проводящей среде [10].

Электросопротивление пласта, определяемое по данным электромагнитной съемки, может обеспечить более точную оценку общей объемной доли гидрата, чем данные сейморазведки и каротажа скважин [11]. Широко используются различные виды мониторинга углеводородов, например, для электроразведки карбонатных коллекторов методом 4D [12]. Методы электроразведки и технологии их применения актуальны во многих практических задачах [13; 14]. Режимы зондирования АС над УВЗ амплитудно-модулированными сигналами применяются для анализа фазовых характеристик поверхностного импеданса среды [15].

**Методика исследований.** Целью данной работы является исследование контраста отражательных характеристик АС над углеводородами в режиме амплитудно-модулированных сигналов вида

$$e(t) = E(1 + k_m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $E$  – амплитуда несущего сигнала;

$k_m$  – коэффициент амплитудной модуляции;

$\Omega = 2\pi f$ ,  $\omega = 2\pi f$  – соответственно модулирующая и несущая частоты.

Методика проводимых исследований основана на определении контраста коэффициента отражения в точках геопрофиля над залежью УВЗ и в тестовой точке, находящейся вне контура зоны углеводородов:

$$\Delta R = 20 \lg |\dot{R}_p - \dot{R}_{BB}|, \quad (2)$$

где  $\dot{R}_p$  – коэффициент отражения сигнала в тестовой точке;

$\dot{R}_{BB}$  – коэффициент отражения волны над залежью углеводородов.

Расчет отражательных характеристик среды для различных сигналов зондирующих ЭМВ с учетом физико-химических процессов в залежах позволяет дифференцировать типы углеводородов с высокой точностью и достоверностью.

Значение коэффициента отражения ЭМВ в тестовой точке с диэлектрической проницаемостью  $\dot{\epsilon}_p$  и проводимостью среды  $\sigma_p$  для сигнала с вертикальной поляризацией рассчитывается по формуле

$$\dot{R}_p = \frac{\dot{\epsilon}_p \sin \theta - \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \theta}}{\dot{\epsilon}_p \sin \theta + \sqrt{\dot{\epsilon}_p - \cos^2 \theta}} = R_p \exp j\varphi_p, \quad (3)$$

где  $\dot{\epsilon}_p = \epsilon_p - j \frac{\sigma_p}{\omega \epsilon_0}$  – комплексная диэлектрическая проницаемость среды,

$$\dot{R}_{BB} = \frac{\dot{a}_1 \cos \theta + \dot{a}_3 (\cos^2 \theta - 1)}{\dot{a}_2 \cos \theta + \dot{a}_4 (\cos^2 \theta + 1)} = |R_{BB}| \cdot \exp(j\varphi_{BB});$$

$$\begin{aligned} \dot{a}_{1,2} &= \sqrt{\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L} \mp 1, \\ \dot{a}_3 &= \sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L}, \\ \dot{a}_4 &= \dot{\epsilon}_R + 2\dot{\epsilon}_R \dot{\epsilon}_L + \dot{\epsilon}_L. \end{aligned} \quad (4)$$

Моделирование проводилось для диэлектрической проницаемости наполнителя сред  $\epsilon_r = 1 - 30$ , электрической проводимости  $\sigma_r = 10^{-3}$  См/м, частоты столкновения частиц  $v = 2\pi \cdot 10^9$  рад/с, коэффициента амплитудной модуляции  $k_m = 0,5$ , концентрации частиц  $N_e = N_i = 10^{16}$  м<sup>-3</sup>. Угол падения волны  $\theta$  варьировался в пределах от 0° до 90°.

**Результаты исследований.** Зависимости контраста отражательных характеристик для  $\cos \theta = 0$  и частоты модуляции  $F = 10^4$  Гц приведены на рисунке 1. Было установлено, что контраст отражательных характеристик не зависит от значений диэлектрической проницаемости наполнителя сред. Однако это не означает, что данный метод приемлем для дифференциации любых сред, поскольку данные зависимости получены на основании выражений (3) с использованием значений компонентов тензора диэлектрической проницаемости АС, полученных в работе [6]. Следовательно, такой метод обоснован только для исследования контраста отражательных характеристик АС над углеводородами. Характерно увеличение контраста с большей крутизной характеристики для более низких значений частоты несущего сигнала ( $f = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6)$  Гц). В диапазоне частот  $f = (1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^8)$  Гц контраст отражательных характеристик увеличивается с меньшей крутизной характеристики. Происходит уменьшение величин исследуемой характеристики при использовании значений частоты несущего сигнала  $f = (1 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9)$  Гц. На отрезке частот  $f(1 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{10})$  Гц вариации контраста отражательных характеристик АС над углеводородами незначительны.

Зависимости контраста отражательных характеристик для  $\cos \theta = 0,8$  и частоты модуляции  $F = 10^4$  Гц приведены на рисунке 2. Закономерности поведения данной характеристики подобны зависимостям контраста отражательных характеристик для  $\cos \theta = 0$  и частоты модуляции  $F = 10^4$  Гц за исключением численных значений и меньшего контраста при использовании значений частоты несущего сигнала  $f = (1 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9)$  Гц.

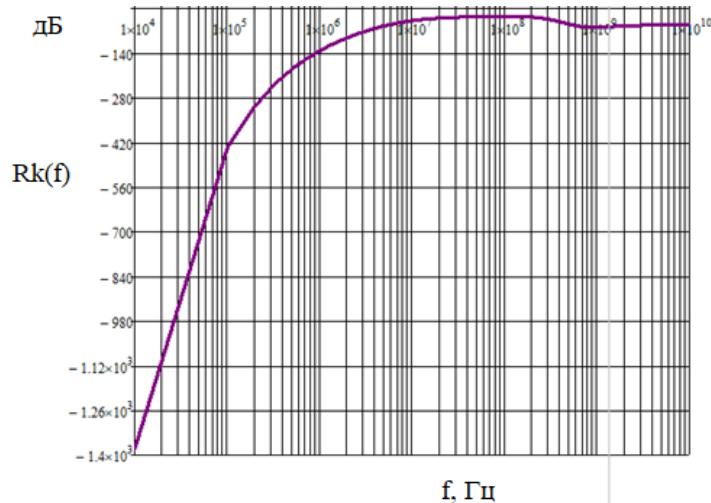


Рисунок 1. – Контраст отражательных  
характеристик для  $\cos \theta = 0$   
и частоты модуляции  $F = 10^4$  Гц

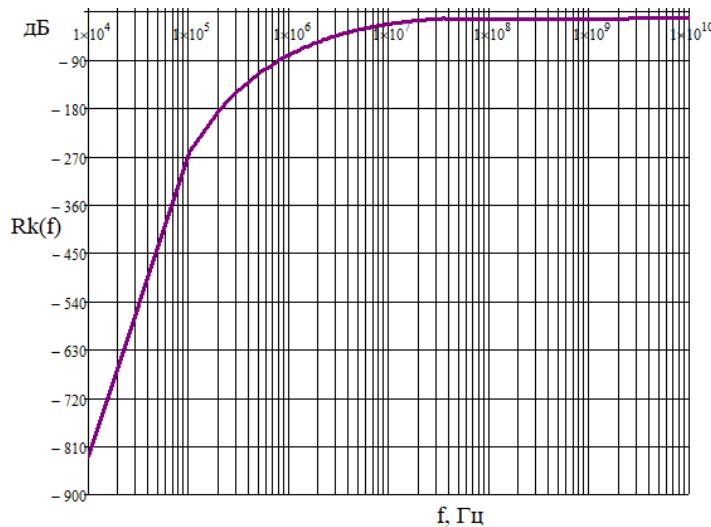


Рисунок 2. – Контраст отражательных  
характеристик для  $\cos \theta = 0,8$   
и частоты модуляции  $F = 10^4$  Гц

Зависимости контраста отражательных характеристик для  $\cos \theta = 1$  и частоты модуляции  $F = 10^4$  Гц приведены на рисунке 3, для  $\cos \theta = 0$  и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц – на рисунке 4, для  $\cos \theta = 0,8$  и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц – на рисунке 5, для  $\cos \theta = 1$  и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц – на рисунке 6.

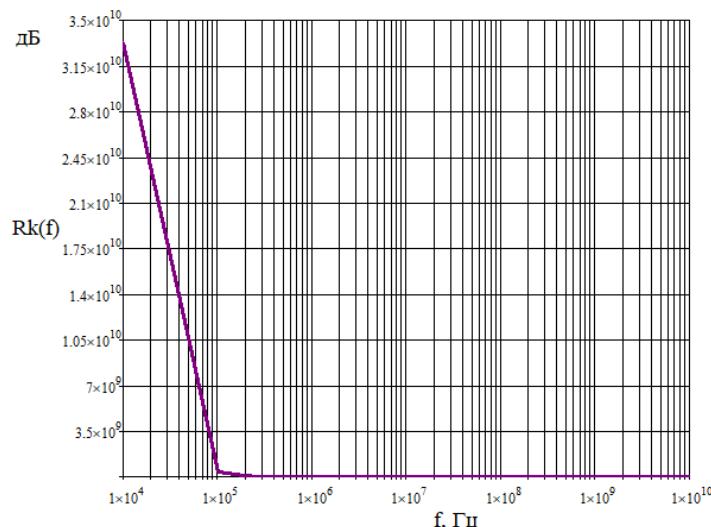


Рисунок 3. – Контраст отражательных  
характеристик для  $\cos \theta = 1$   
и частоты модуляции  $F = 10^4$  Гц

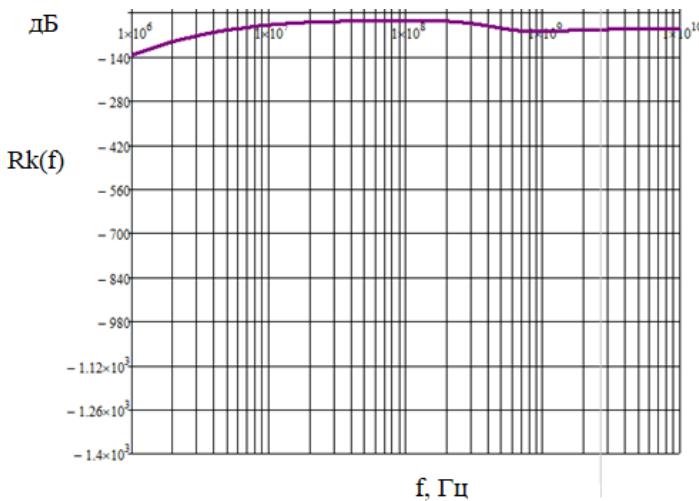


Рисунок 4. – Контраст отражательных  
характеристик для  $\cos \theta = 0$   
и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц

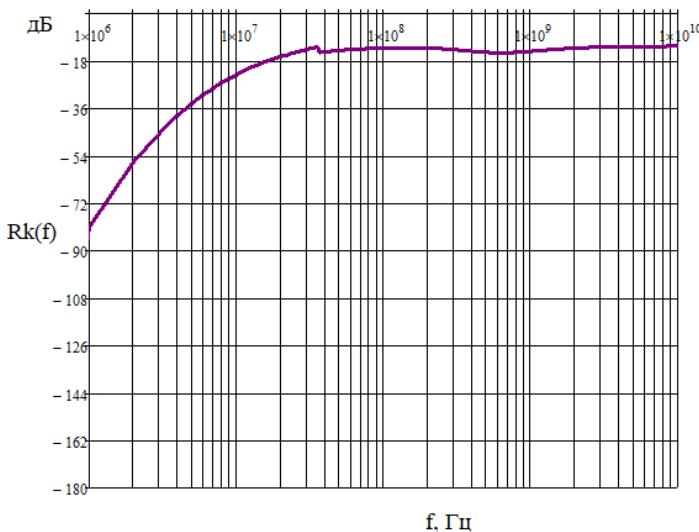


Рисунок 5. – Контраст отражательных  
характеристик для  $\cos \theta = 0,8$   
и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц

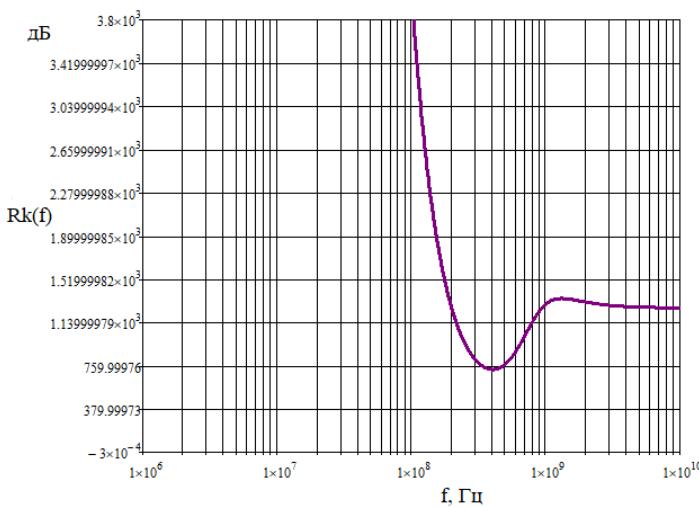


Рисунок 6. – Контраст отражательных  
характеристик для  $\cos \theta = 1$   
и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц

Следует отметить, что использование режима  $\cos \theta = 1$  (т. е. значение угла  $\theta = 0^\circ$ , что соответствует продольному распространению ЭМВ вдоль поверхности) и частоты модуляции  $F = 10^4$  Гц приводит к принципиально иному характеру поведения контраста отражательных характеристик среды над УВЗ. Наиболее существенные изменения происходят в диапазоне частот несущего колебания  $f = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^6)$  Гц. Контраст

отражательных характеристик уменьшается с ростом частоты. В остальном диапазоне исследуемых частот не проявляются изменения отражательных свойств геопрофиля местности. Частоту  $f = 10^5$  Гц следует рассматривать как частоту среза исследуемой частотной характеристики радиотехнической системы, используемой для поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа. Следует отметить, что наличие такой частоты ведет к применению полученных результатов на практике.

Закономерности поведения контраста отражательных характеристик для  $\cos \theta = 0,8$  и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц подобны зависимостям контраста отражательных характеристик для  $\cos \theta = 0$  и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц за исключением численных значений. Моделирование взаимодействия ЭМВ со средами над углеводородами для  $\cos \theta = 1$  и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц (т. е. для продольного распространения сигнала вдоль поверхности) показало, что в этом режиме наиболее целесообразно применение диапазона несущих частот  $f = (1 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9)$  Гц. Контраст отражательных характеристик уменьшается с большой крутизной характеристики в диапазоне частот  $f = (1 \cdot 10^8 - 4 \cdot 10^8)$  Гц. Частота зондирования  $4 \cdot 10^8$  Гц характеризуется минимальной величиной контраста отражательных характеристик среды над УВЗ. При дальнейшем увеличении частоты несущего сигнала происходит увеличение значений исследуемой характеристики и практически стабилизация контраста отражательных характеристик для диапазона несущих частот  $f = (3 \cdot 10^9 - 10 \cdot 10^9)$  Гц.

Полученные результаты могут быть применены для решения задач поиска углеводородов методом электроразведки, основанном на контрасте отражательных характеристик АС над залежами, с целью фиксации границ полезных ископаемых. При этом исследуемую зону предполагаемой залежи углеводородов облучают ЭМВ с вертикальной поляризацией в режиме амплитудно-модулированных сигналов в диапазоне частот несущего колебания  $f = (1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^9)$  Гц в точках, расположенных как в области предполагаемой залежи, так и в тестовой точке, находящейся вне ее контура, в каждой точке измерений принимают отраженную волну, определяют коэффициент отражения, по аномальной величине контраста отражательных характеристик между указанными точками измерений устанавливают границы залежей полезных ископаемых. К отличительным признакам данного способа по сравнению с аналогичными можно отнести новые режимы облучения ЭМВ и приема сигнала, иные параметры для измерительных сигналов в используемых диапазонах частот. Благодаря этим признакам повышается точность определения границ УВЗ. Угол падения ЭМВ можно выбирать в пределах  $\theta = (0^\circ - 90^\circ)$ .

**Заключение.** Проведенные исследования контраста отражательных характеристик АС над углеводородами в режиме амплитудно-модулированных сигналов показали следующее:

- вариация углов падения ЭМВ на исследуемый профиль местности расширяет режимы тестирования при организации геологоразведочных работ;
- при продольном распространении ЭМВ вдоль поверхности частоту несущего сигнала  $f = 10^5$  Гц (частота модуляции  $F = 10^4$  Гц) следует рассматривать как частоту среза исследуемой частотной характеристики радиотехнической системы, используемой для поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа;
- контраст отражательных характеристик среды над УВЗ минимален при частоте зондирования  $4 \cdot 10^8$  Гц для режима продольного распространения ЭМВ вдоль поверхности и частоты модуляции  $F = 10^5$  Гц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буддо И. В., Постпев А. В. Прецизионная инверсия данных ЗСБ при поисках нефти и газа на юге Сибирской платформы // Иркутск: ИГУ. – 2019. – 149 с.
2. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun, H. Tan, W. Wan et al. // Appl. Sci. – 2024. – Vol. 14, iss. 4. – Art. ID 1560. – DOI: [10.3390/app14041560](https://doi.org/10.3390/app14041560).
3. Токарева М. Г. Одна из реализаций решения задачи ВП на примере реальной геофизической среды // Труды 5-й междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы электронного машиностроения». – Новосибирск, 2000. – Т. 3. – С. 52–55.
4. Asch T., Morrison H. F. Mapping and monitoring electrical resistivity with surface and subsurface electrode arrays // Geophysics. – 1989. – Vol. 54, iss. 2. – P. 235–244.
5. Легейдо П. Ю. Дифференциально-нормированные методы геоэлектроразведки / Под ред. М. М. Мандельбаума. – Иркутск, 1996. – 145 с.
6. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
7. Jang H., Kim H. J., Nam M. J. Transient Electromagnetic Responses with Induced Polarization Effects of Deep-Sea Hydrothermal Deposits // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 54. – P. 7272–7278.

8. Моисеев В. С. Метод вызванной поляризации при поисках нефтеперспективных площадей. – Новосибирск: Наука, 2002. – 135 с.
9. Massively parallel electrical-conductivity imaging of hydrocarbons using the IBM Blue Gene/L supercompute IBM / M. Commer, G. A. Newman, J. J. Carazzone et al. // Journal of Research and Development. – 2008. – Vol. 52, iss. 1. – P. 93–103.
10. Kaufman A. A. The transient field electrical dipole source on a conductive medium. – New York, 1988. – P. 50.
11. Weitemeyer K. A. First results from a marine controlled-source electromagnetic survey to detect gas hydrates offshore Oregon // Geophysical Research Letters. – 2006. – Vol. 33, iss. 3. – Art. ID L03304.
12. Мониторинг фронта завода карбонатных коллекторов нижнего кембрия методом 4D электроразведки / Д. А. Бурдаков, В. Н. Сибилев, О. В. Токарева и др. // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 9. – С. 30–34.
13. Прогнозирование трещиноватых флюидонасыщенных резервуаров в трапах по данным электроразведки ЗСБ / А. И. Ильин и др. // ГеоБайкал 2018: материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. (11–17 авг. 2018 г.) / ЭАГЕ. – 2018. – С. 1–6.
14. Мисюреева Н. В. Результаты применения электромагнитных исследований 3D ЗСБ и мЗСБ в условиях Арктической зоны Западной Сибири // Геомодель 2017: материалы 19-й науч.-практ. конф. по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (11–14 сентября 2017 г.) / ЭАГЕ. – 2017. – С. 1–6.
15. Гололобов Д. В., Орлова О. В., Янушкевич В. Ф. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмоподобного типа // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2010. – № 9. – С. 98–101.

Поступила 07.10.2025

**DETERMINATION OF THE CONTRAST OF REFLECTIVE CHARACTERISTICS  
OF ANISOTROPIC MEDIA OVER HYDROCARBONS  
IN THE MODE OF AMPLITUDE-MODULATED SIGNAL**

**M. IZOITKO, V. YANUSHKEVICH, D. DOVGYALO, K. IVANOVA, D. SIVATSKY**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

*A study of the reflectivity contrast of an anisotropic medium above hydrocarbons was conducted using amplitude-modulated signals. Modeling was performed for experimentally obtained characteristics of host rocks above oil and gas fields. Patterns of change in the reflectivity contrast with variations in the angles of incidence of electromagnetic waves on the studied terrain profile and the modulation frequency of the carrier oscillation were established to expand the testing modes in organizing geological exploration work. It was noted that during longitudinal propagation of amplitude-modulated signals along the contour of the geoprofile surface, it is possible to use the carrier signal frequency and modulation frequency, at which the cutoff frequency of the frequency response of the radio-technical system exists for the search and delineation of oil and gas fields. Frequencies of the carrier signal and modulation were determined for which the contrast of the reflectivity of the medium above hydrocarbons is minimal in the mode of longitudinal propagation of electromagnetic waves along the studied deposit surface. The obtained results of modeling the interaction of amplitude-modulated signals with environments above hydrocarbons can be applied in exploration geophysics to develop methods for detecting oil and gas deposits.*

**Keywords:** hydrocarbon deposit, reflection coefficient, amplitude-modulated signal, contrast.

## МЕТОДЫ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ШУМОВЫХ ДИОДОВ

*О. О. ЛАТИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук В. В. БУСЛЮК<sup>2,1</sup>, канд. техн. наук, доц. С. С. ДЕРЕЧЕННИК<sup>2</sup>,  
д-р техн. наук, проф., член-корр. НАН Беларуси В. А. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>3</sup>,  
канд. техн. наук О. В. КОЧЕРГИНА<sup>4</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф. В. Б. ОДЖАЕВ<sup>5</sup>,  
канд. физ.-мат наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ<sup>5</sup>, канд. физ.-мат. наук Ю. Н. ЯНКОВСКИЙ<sup>5</sup>*

<sup>1</sup>(ОАО «Цветотрон», Брест)

<sup>2</sup>(Брестский государственный технический университет)

<sup>3</sup>(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)

<sup>4</sup>(Белорусская государственная академия связи, Минск)

<sup>5</sup>(Белорусский государственный университет, Минск)

*Исследованы методы компенсации изменений электрических характеристик дискретных полупроводниковых шумовых диодов, а также выпрямляющих контактов p-n-переходов и переходов металл–полупроводник в условиях изменяющейся температуры. На основании экспериментальных исследований электрических характеристик диодов-генераторов шума и проведенного моделирования структуры, состоящей из диода-генератора шума, включенного в обратном направлении, и компенсирующего диода, включенного в прямом направлении, предложен метод стабилизации напряжения микроплазменного пробоя шумовых диодов серии ND производства холдинга «Интеграл», Республика Беларусь. Установлено, что для данных шумовых диодов зависимость напряжения микроплазменного пробоя от температуры в диапазоне 24–125 °C имеет характер, близкий к линейному. Это позволяет произвести температурную компенсацию напряжения пробоя шумового диода, последовательно соединив его с прямо включенным диодом Шоттки, что ранее не практиковалось в связи с узким диапазоном токов микроплазменного пробоя. Показано, что степень термокомпенсации, характеризующаяся величиной коэффициента линейной аппроксимации зависимости напряжения пробоя от температуры, зависит от электрофизических параметров диода-генератора шума и компенсирующего диода. При термокомпенсации напряжения пробоя дискретным диодом Шоттки получено снижение граничной частоты шума при нормальных климатических условиях на 40 %, однако при температуре 125 °C граничная частота термокомпенсированного шумового диода увеличивается более чем в 2 раза и достигает значений, характерных для диодов-генераторов шума ND103L. Результаты исследований позволяют сделать вывод о наличии конструктивно-технологических возможностей расширения температурного диапазона эксплуатации шумовых диодов в режиме микроплазменного пробоя.*

**Ключевые слова:** диоды-генераторы шума, температурная компенсация, напряжение пробоя, спектральная плотность напряжения шума, граничная частота шума, диапазон рабочих температур.

**Введение.** Под шумом обычно понимают беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. В радиоэлектронике шумом принято считать любые нежелательные возмущения (флуктуации), сопровождающие полезный сигнал и образующие с ним аддитивную смесь. Такие шумы нежелательны для большинства электронных устройств. Однако в ряде случаев целенаправленно сгенерированный шум может придать электронным устройствам новые функциональные свойства. Примером является шум обратносмещенного p-n-перехода (стабилитрона, биполярного транзистора), который используется в аппаратно-программных системах защиты информации и метрологии [1]. Для этих целей выпускаются специально разработанные шумовые диоды (ШД), использующие эффект лавинного пробоя и обладающие необходимыми предельно допустимыми и эксплуатационными параметрами.

Однако для успешного функционирования таких систем в широком диапазоне температур необходимо проектировать дополнительные термостабилизирующие схемы и устройства, так как сами ШД стабильно генерируют широкополосный шум с приемлемым коэффициентом корреляции лишь в узком диапазоне температур. Так, генераторы шума NC103 (США) рассчитаны на работу в диапазоне температур от 0 до 55 °C [1]. Диоды-генераторы шума серии ND, производимые предприятиями холдинга «ИНТЕГРАЛ» (последние разработанные типы) и большинство их российских аналогов, имеют рабочий температурный диапазон от минус 60 до +70 °C<sup>1</sup>, <sup>2</sup>. Такие температурные диапазоны значительно ниже верхней границы

<sup>1</sup> Диод 2Г401В характеристики, параметры, схема, описание [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://eandc.ru/pdf/diod/2g401\\_kg401.pdf](https://eandc.ru/pdf/diod/2g401_kg401.pdf) (дата обращения: 04.04.2025).

<sup>2</sup> Каталог: микроэлектронные компоненты, средства отображения информации, изделия электронной техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.integral.by/sites/default/files/catalog\\_2017.compressed.pdf](https://www.integral.by/sites/default/files/catalog_2017.compressed.pdf) (дата обращения: 04.04.2025).

рабочих температур большинства кремниевых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, у которых она составляет 125 °C.

Физическая природа температурных ограничений шумовых диодов заключается в изменении значения напряжения лавинного пробоя обратносмещенного  $p$ - $n$ -перехода при изменении температуры. Для большинства полупроводниковых приборов (выпрямительных диодов, биполярных транзисторов, стабилитронов) данный эффект зачастую не играет существенной роли, а там, где это необходимо, минимизируется с помощью дополнительных устройств. Для шумовых диодов изменение напряжения пробоя критично и приводит к значительному изменению постоянного напряжения пробоя, спектральной плотности напряжения шума (СПНШ), а также температурного коэффициента СПНШ.

Следует упомянуть, что компания Noise Com (США) производит серию шумовых диодов (диапазон ОВЧ: NC 200-VHF type), работающих при температурах от минус 55 до +125 °C<sup>3</sup>. Методы обеспечения расширенного диапазона эксплуатации таких ШД изготовителем не комментируются.

Поскольку температура оказывает существенное влияние на вольт-амперные характеристики (ВАХ) ШД и, как следствие, на его шумовые параметры и работу устройств, в которых они будут применяться, то актуальной задачей является компенсация температурного воздействия на характеристики  $p$ - $n$ -перехода ШД. Влияние температуры оценивается температурным коэффициентом напряжения (ТКН) – параметром, характеризующим изменение прямого напряжения для данной величины прямого тока при изменении температуры на 1 °C. Проблема температурной компенсации электрических параметров (ТКЭП) полупроводниковых приборов ранее была решена для термокомпенсированных стабилитронов, полевых транзисторов, а также функциональных устройств. Однако для диодов-генераторов шума этот вопрос до настоящего времени не изучался. Целью работы являлась разработка методов ТКЭП для шумовых диодов, выполненных на пластинах монокристаллического кремния в составе единой структуры, что ранее не практиковалось в связи с узким диапазоном токов микроплазменного пробоя.

**Методика проведения экспериментов.** Измерения вольт-амперных характеристик шумовых диодов с целью установления влияния термокомпенсирующего диода на электрофизические параметры приборов проводились с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИПП-3 и измерителя параметров шумовых диодов ИШ-1, а также на автоматизированном комплексе измерения электрических параметров шумовых диодов АКИД (ОАО «Планар», Республика Беларусь) в интервале положительных температур от 24 до 125 °C. Выбор данного температурного диапазона обусловлен задачей исследования: изучением возможности увеличения верхней границы рабочих температур ШД. Соединение выводов ШД и термокомпенсирующих диодов производилось методом пайки.

Моделирование структуры, включающей диод-генератор шума, включенный в обратном направлении, и компенсирующий диод, включенный в прямом направлении, проводилось в COMSOL Multiphysics. При расчетах использовался подмодуль «Полупроводники» модуля «Электротехника». Подмодуль основан на уравнениях диффузии и дрейфа с использованием изотермических или неизотермических моделей переноса.

Исследования проводились с использованием диодов-генераторов шума марок ND102L, ND103L и ND104L. В качестве компенсирующих диодов были выбраны выпрямительные диоды Шоттки 1N60 и 1N5819, обеспечивающие рабочие температуры до 125 °C, различающиеся рабочим током и временем обратного восстановления (для 1N60 –  $1 \cdot 10^{-9}$  с).

**Экспериментальные результаты и методы моделирования.** Шумовые диоды изготавливаются, как правило, на сильнолегированном кремнии, выращенном по методу Чохральского. Они имеют определенный уровень естественных или созданных специально неоднородностей легирования и дефектов структуры [2]. Данные диоды проектируются таким образом, чтобы использовать преимущественно ударную ионизацию носителей заряда и лавинный пробой  $p$ - $n$ -перехода на начальном участке пробоя ВАХ. Создаваемые ими шумы имеют микроплазменный характер [3].

Напряжение пробоя  $U_{\text{пр}}$  несимметричного  $p$ - $n$ -перехода определяется формулой [4]

$$U_{\text{пр}} = \frac{E_m W}{2} = \frac{\varepsilon_s E_m^2}{2q} (N_B)^{-1},$$

где  $N_B$  – концентрация ионизированной примеси в слаболегированной области;

$E_m$  – максимальное значение электрического поля;

$\varepsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника.

<sup>3</sup> Noisecom Catalog [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.noisecom.com/resource-library?brand=Noisecom&go=catalog> (дата обращения: 04.04.2025).

Для кремния справедлива приближенная универсальная формула напряжения пробоя [4]

$$U_{\text{пр}} \cong 60(E_g / 1,1)^{3/2} (N_B / 10^{16})^{-3/4} [B],$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны при комнатной температуре.

Из приведенных выражений следует, что величина напряжения пробоя зависит как от ширины запрещенной зоны полупроводника, так и от концентрации легирующих примесей. Однако с повышением температуры возрастает амплитуда колебаний атомов кристаллической решетки, что обуславливает возрастание эффективности рассеяния носителей заряда на фонах. Вследствие этого зависимость напряжения лавинного пробоя от температуры определяется, прежде всего, температурной зависимостью длины свободного пробега носителей заряда. При рассеянии носителей на колебаниях решетки их подвижность снижается с ростом температуры. Следовательно, для того чтобы носитель при меньшей длине свободного пробега приобрел энергию, достаточную для ионизации валентных связей, поля в переходе должны иметь большую величину. В результате с ростом температуры увеличивается электрическое поле, необходимое для проявления эффекта ударной ионизации ( $E_m$ ), и, соответственно, напряжение электрического пробоя  $p$ - $n$ -перехода.

Ранее было установлено [5], что прямая ветвь ВАХ шумовых диодов при повышении температуры смещается в сторону оси токов. Это обусловлено тем, что ток в прямом направлении определяется его диффузионной составляющей, зависящей как от величины концентрации неосновных носителей заряда, так и от температурного изменения ширины запрещенной зоны. При больших прямых токах существенное влияние на их значение также начинает оказывать сопротивление базы, которое возрастает с повышением температуры вследствие снижения подвижности свободных носителей заряда. Это приводит к отклонению ВАХ в сторону больших напряжений. Следовательно, при малых прямых токах ВАХ смещается с ростом температуры влево, а при больших токах (где влияние базы сильнее) – вправо.

Кроме того, при возрастании температуры увеличивается скорость тепловой генерации электронно-дырочных пар во всех областях  $p$ - $n$ -перехода. Это приводит к резкому возрастанию концентрации неосновных носителей в  $p$ - и  $n$ -областях перехода и, следовательно, к увеличению тока насыщения и ухудшению выпрямляющих свойств диода. Таким образом, при изменении температуры результирующая ВАХ  $p$ - $n$ -перехода при прямом смещении для малых и больших токов изменяется разнонаправленно. Измерение ВАХ при обратном включении диодов показало [5], что для ШД с увеличением температуры напряжение пробоя возрастает. Это обусловлено уменьшением энергии, которую носитель заряда может приобрести в электрическом поле между двумя столкновениями вследствие температурного уменьшения длины свободного пробега [6]. С повышением температуры подвижность неосновных носителей в области  $p$ - $n$ -перехода уменьшается, в связи с чем для поддержания ударной ионизации требуется повышение напряженности электрического поля.

Диоды генераторы шума марок ND102L, ND103L и ND104L в силу различного значения удельного сопротивления исходных подложек монокристаллического кремния, на которых изготавливаются приборные структуры, имеют различные по величине напряжения пробоя, поэтому для сравнения их характеристик целесообразно использовать понятие перенапряжения, определяемое как

$$\Delta U = U_{\text{пит}} - U_{\text{пр}},$$

где  $U_{\text{пит}}$  – напряжение питания, подаваемое на диод.

Проведенные исследования зависимости средней амплитуды шумовых импульсов ШД от напряжения обратного смещения подтвердили, что увеличение перенапряжения сопровождается ростом ее величины. Установлено, что данные зависимости близки к линейным [7].

Ранее было показано [8], что увеличение температуры приводит к росту последовательного сопротивления ШД. Данная зависимость последовательного сопротивления от температуры  $R(T)$  также носит линейный характер. Коэффициент линейности зависимости  $R(T)$  определяется как  $k = \Delta R / \Delta T$  ( $\Delta R$  – изменение величины последовательного сопротивления при изменении температуры на  $\Delta T$ ) и составляет для ND102L, ND103L и ND104L 7,6; 1,9 и 1,0 кОм/К, соответственно. Зависимость  $R(T)$  наиболее сильно проявляется для ND102L, а наименее – для ND104L. Уменьшение последовательного сопротивления с понижением температуры связано с увеличением подвижности свободных носителей заряда в базовом материале (кремний) шумового диода.

Одним из методов обеспечения термостабильности обратной ветви ВАХ диода может быть последовательное соединение обратносмещенного  $p$ - $n$ -перехода с положительной величиной температурного коэффициента напряжения (обратное напряжение  $U_R$ ) и прямосмещенного  $p$ - $n$ -перехода с отрицательной величиной ТКН и прямым падением напряжения  $U_F$ .

Так, принцип конструирования термокомпенсированных стабилитронов с результирующим напряжением пробоя  $U = U_R + U_F$  и температурным коэффициентом напряжения стабилизации (ТКНС) заключается в обеспечении общего ТКН, близкого к нулю, что позволяет сохранить рабочее напряжение  $U$  неизменным в некотором диапазоне рабочих температур<sup>4</sup>. При этом

$$\text{ТКНС} = (+)\text{ТКН}_{\text{осн}} + (-)\text{ТКН}_k,$$

где  $\text{ТКН}_{\text{осн}}$  – температурный коэффициент напряжения основного шумового диода, включенного в обратном направлении;

$\text{ТКН}_k$  – температурный коэффициент компенсирующего диода, включенного в прямом направлении. Вышеуказанные соотношения могут быть выполнены при условии

$$|\text{ТКН}_{\text{осн}}| \approx |\text{ТКН}_k|.$$

У маломощных кремниевых диодов, включенных в прямом направлении, типовое значение ТКН<sub>д</sub> приблизительно равно минус  $2 \cdot 10^{-3}$  В/К<sup>5</sup>. Изменение напряжения лавинного пробоя в заданном диапазоне температур составит

$$\Delta U_{\text{ст}} = \text{ТКНС} \cdot \Delta T,$$

где  $\Delta T$  – наибольшее отклонение от температуры, соответствующей нормальным условиям (25 °C).

С учетом принципиальной схожести физических процессов, протекающих в шумовых диодах и стабилитронах, обоснованным представляется применение описанной выше методики температурной компенсации напряжения пробоя в отношении диодов-генераторов шума. При этом необходимо учесть более узкий диапазон токов электрического пробоя шумовых диодов.

Таким образом, для модельного расчета результирующего значения напряжения пробоя параметрического стабилизатора в составе диода-генератора шума и выпрямительного *p-n*-перехода необходимо задать диапазон температур. Для диапазона от минус 60 до 125 °C, в котором работает большинство полупроводниковых приборов, наибольшее отклонение температуры от нормальной составит 100 °C. При этом если напряжение на диоде  $U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{ст}}$  в процессе моделирования находится в заданных пределах, то расчет закончен. Если же  $U_{\text{вых}}$  выходит за допусковую зону, то следует в качестве исходных параметров использовать либо характеристики других шумовых диодов, либо включить компенсирующие диоды с другими параметрами ВАХ и ТКН<sub>к</sub> и повторить расчет. Для шумовых диодов допустимая зона значений  $U_{\text{вых}}$  определяется исходя из требуемого температурного коэффициента СПНШ при рекомендуемом техническими условиями токе 50 мА. Кроме того, для обеспечения адекватного влияния шумовой и термокомпенсирующий диоды должны находиться в одинаковых температурных условиях.

Было проведено моделирование структуры, содержащей в одном кристалле и диод-генератор шума и термокомпенсирующий *p-n*-переход. В качестве исходных электрофизических параметров использовались полученные ранее для диодов-генераторов шума ND103L и ND201L зависимости прямых ветвей ВАХ, а также фактические значения увеличения напряжения открытия диодов с уменьшением температуры [8].

Расчет показал положительное действие термокомпенсирующего *p-n*-перехода на ТКН диода-генератора шума. Смоделированный в структуре шумового диода ND103L прямосмещенный *p-n*-переход полностью открывается при напряжении более 0,9 В, при этом ток составляет 50 мА. Напряжение микроплазменного пробоя ШД в этих условиях составляет 6–9 В. Изменение температуры при токах 50–100 мА, которые ограничиваются токозадающими резисторами в цепи ШД, приводит к удовлетворительным изменениям прямого падения напряжения и смещения прямой ветви ВАХ. Следует отметить, что при высоких обратных токах (более 100 мА) работа диода-генератора шума невозможна, т. к. микроплазменный характер пробоя прекращается и переходит в стационарный лавинный пробой *p-n*-перехода.

Основные этапы эволюции типовой структуры термокомпенсированного *p-n*-переходом ШД представлены на рисунке 1. В результате одновременного формирования *n*-области на планарной и обратной сторонах кристалла можно, в зависимости от подключения питания, получить включенный в обратном направлении ШД и включенный в прямом направлении выпрямляющий диод. Однако при использовании

<sup>4</sup> Патент Ru 2162622 С 1. Низковольтный термокомпенсированный стабилитрон и способ его изготовления: опубл. 27.01.2001 / Скорняков С. П.

<sup>5</sup> URL: [https://eandc.ru/pdf/diod/2g401\\_kg401.pdf](https://eandc.ru/pdf/diod/2g401_kg401.pdf) (дата обращения: 04.04.2025).

тонких пластин будут существенно затруднены технологические процессы окисления и диффузии, а также двустороннее гальваническое выращивание серебряных электродов.

Серийное производство однокристальных термокомпенсированных *p-n*-переходом ШД будет сопряжено и с рядом других трудностей. Они заключаются в необходимости проведения двусторонней фотолитографии и легирования тонких пластин (толщиной 150–170 мкм), так как выпускаемые ШД имеют вертикальную структуру кристалла и предназначены для сборки в металлоксеклянных корпусах DO-35 и SOD-80 (minimelf). Это потребует освоения новой технологии с применением нового специального технологического оборудования, а также значительно снизит процент выхода годных приборов при работе с тонкими пластинами.

Указанные выше конструкторско-технологические сложности изготовления термокомпенсирующего прямосмешенного *p-n*-перехода в структуре шумового диода обусловили поиск иных решений. В работе был проведен анализ применимости других приборов и методов для температурной компенсации изменений напряжения лавинного микроплазменного пробоя, применяемых для прочих полупроводниковых приборов (стабисторы, импульсные диоды, температурная стабилизация шумового напряжения с применением внешних термодатчиков, температурная компенсация разбалансировки измерительного моста). Он показал, что наиболее перспективным является применение в качестве термокомпенсирующего элемента выпрямляющего контакта металл-полупроводник (диода Шоттки), включенного в прямом направлении.

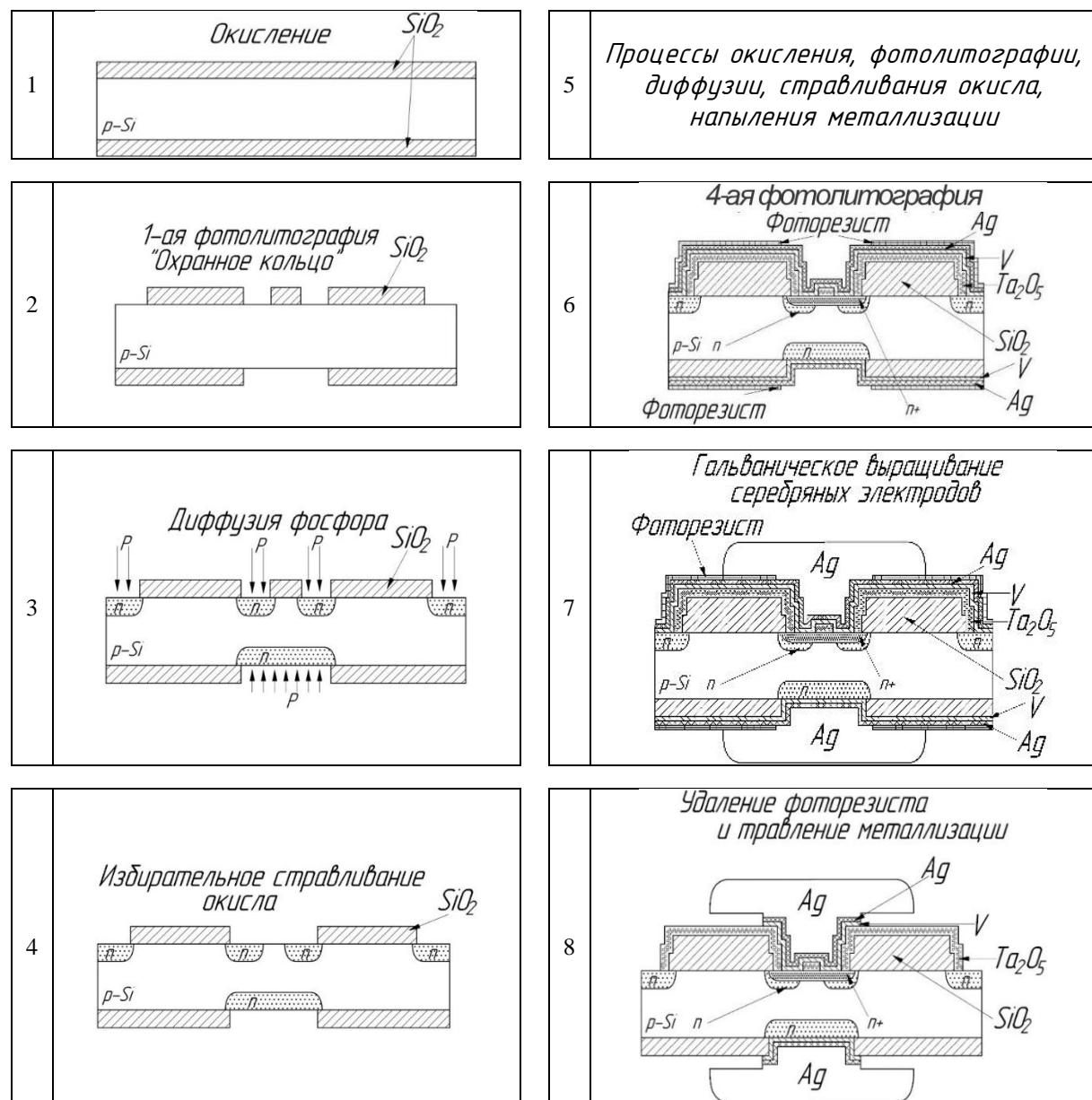


Рисунок 1. – Основные этапы эволюции типовой структуры термокомпенсированного *p-n*-переходом ШД

Как известно, маломощные кремниевые диоды Шоттки (ДШ) обладают отрицательным ТКН. Вольт-амперная характеристика ДШ описывается выражением [7]

$$J = J_s [\exp(qV / kT) - 1],$$

где  $J_s = AT^2 \exp(-q\varphi_k / kT)$ ,

где  $A$  – постоянная Ричардсона;

$\varphi_k$  – контактная разность потенциалов.

Таким образом, при увеличении температуры как прямая, так и обратная ветви ВАХ диодов Шоттки смещаются к оси токов, т. е. имеет место отрицательный температурный коэффициент напряжения. Напряжение туннельного пробоя определяется выражением

$$U_{\text{пп}} = \epsilon \epsilon_0 \cdot E_{\text{кр}}^2 / 2q \cdot N_{\text{прим}} - \varphi_k,$$

где  $E_{\text{кр}}$  – величина критической напряженности электрического поля, необходимая для включения туннельного пробоя;

$\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;

$N_{\text{прим}}$  – концентрация основной легирующей примеси в полупроводнике.

Температурная зависимость напряжения туннельного пробоя определяется температурной зависимостью ширины области обеднения. С повышением температуры увеличивается энергия носителей заряда, соответственно, растет и вероятность туннельного перехода. Кроме того, при увеличении температуры уменьшаются ширина запрещенной зоны  $E_g$ , а также ширина барьера и контактная разность потенциалов. Это дополнительно увеличивает вероятность туннелирования, в результате чего происходит уменьшение напряжения пробоя, что обуславливает отрицательное значение ТКН при туннельном механизме.

Кроме того, ДШ характеризуются сравнительно малым падением напряжения при прямом включении, меньшими прямыми рабочими токами и высокими граничными частотами в силу отсутствия накопления заряда в базе диода [7]. Низкие пробивные напряжения маломощных ДШ при обратном включении не являются в данном случае их существенным недостатком, так как они не превышают напряжение пробоя шумовых диодов. Однако генерируемый при прямом включении ДШ рекомбинационный шум носителей заряда [9] может влиять на общий шум термокомпенсированного ШД как суперпозиция шумов двух  $p-n$ -переходов.

Измерения шумовых параметров производились на 30 диодах-генераторах шума ND103L (ОАО «Цветотрон», Республика Беларусь). В качестве компенсирующих диодов были выбраны выпрямительные диоды Шоттки 1N60 и 1N5819, обеспечивающие максимальные рабочие температуры до 125 °C и различающиеся рабочим током и временем обратного восстановления (для 1N60 –  $1 \cdot 10^{-9}$  с). В таблице приведены средние значения шумовых параметров диодов-генераторов шума ND103L, измеренные при пяти положительных значениях температуры. Также представлены средние значения этих же шумовых параметров, но с дополнительно включенными последовательно компенсирующими диодами Шоттки (1N60 и 1N5819).

Таблица. – Средние значения шумовых параметров диодов

Шумовые параметры, ед. измерения	Типы ШД	Норма		Температура, °C				
		+25 °C	+70 °C	+24	+50	+70	+100	+125
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$U_{\text{эфф}}$ , мВ,	ND103L	не нормируется	не нормируется	115,30	99,57	85,76	64,44	49,94
	ND103L+ 1N5819	—	—	98,88	85,86	72,20	52,51	49,94
	ND103L+ 1N60	—	—	98,6	85,61	70,00	48,58	36,42
$\text{СПНШ}$ , мкВ/(Гц) $^{1/2}$	ND103L	не менее 30,00	не менее 20,00	62,21	49,39	40,00	26,72	18,42
	ND103L+ 1N5819	—	—	57,33	44,74	34,36	22,05	15,42
	ND103L+ 1N60	—	—	59,32	46,60	34,53	20,95	14,28
$F_{\text{пп}}$ , МГц	ND103L	не менее 1,00	не менее 1,00	5,62	4,50	5,15	6,85	8,32
	ND103L+ 1N5819	—	—	4,50	5,37	6,06	7,13	9,90
	ND103L+ 1N60	—	—	3,38	4,05	5,16	6,59	8,12

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Неравномерность, дБ	ND103L	не более 3,00	не нормируется	1,70	1,74	1,68	1,67	1,68
	ND103L+ 1N5819	—	—	1,86	1,86	1,82	1,87	1,85
	ND103L+ 1N60	—	—	1,77	1,80	1,82	1,84	1,84
Напряжение пробоя, В	ND103L	не менее 6 и не более 9	не нормируется	8,80	8,94	9,12	9,17	9,26
	ND103L+ 1N5819	—	—	8,94	9,05	9,06	9,13	9,30
	ND103L+ 1N60	—	—	9,11	9,17	9,26	9,28	9,39

Из анализа данных, приведенных в таблице, можно заключить, что исследуемые шумовые параметры во всех случаях имеют зависимость от температуры, близкую к линейной. В связи с тем, что термокомпенсированные диоды (например, ND103L + 1N60) имеют ненулевые сопротивления базовой области и омических контактов, в том числе соединительных проводов, степень температурной компенсации может быть оценена по угловым коэффициентам усредненных прямых. Чем ближе к нулю модульное значение углового коэффициента  $|k|$  в уравнении аппроксимированной прямой  $y = kx + b$ , тем меньше зависимость шумового параметра от температуры. В данном уравнении нами было принято напряжение пробоя в качестве функции  $y$ , а в качестве аргумента  $x$  – температура.

Установлено, что при прямом включении ДШ изменяется граничная частота генерируемого шума термокомпенсированного ШД (ND103L + 1N60), которая снижается при 24 °C на ~40 %. Однако при температуре 125 °C данная характеристика термокомпенсированного ШД увеличивается более чем в 2 раза и достигает значений, характерных для ШД ND103L, при этом спектральная плотность шума термокомпенсированного ШД закономерно снижается.

На рисунке 2 представлены зависимости от температуры напряжения пробоя ШД, термостабилизированного диодом Шоттки 1N60, и фактические значения такой зависимости для шумового диода ND103L, а также кривые линейной аппроксимации.

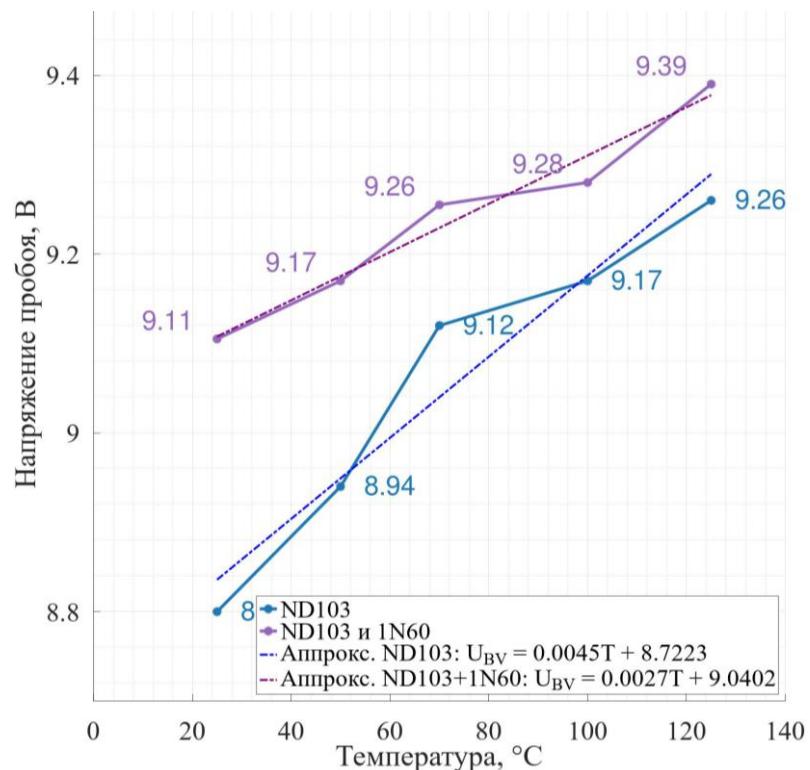


Рисунок 2. – Зависимость напряжения пробоя шумового диода ND103L, термостабилизированного ДШ 1N60, и шумового диода ND103L от температуры

Аналогичные зависимости для ШД, термостабилизированного диодом Шоттки 1N5819, и для шумового диода ND103L представлены на рисунке 3. Как следует из приведенных графиков зависимостей, угловой коэффициент  $|k|$  составляет для ШД ND103L 0,0045 В/К при  $b = 8,72$  В; для термокомпенсированных ND103L + 1N60 ( $b = 9,04$  В) и ND103L + 1N5819 ( $b = 8,87$  В) – соответственно 0,0027 В/К и 0,0033 В/К. Таким образом, последовательное соединение ДШ и ШД позволяет привести температурную компенсацию напряжения пробоя ШД. Степень компенсации выше у пары шумовой диод + диод Шоттки (ND103L + 1N60). Это объясняется меньшим падением прямого напряжения на 1N60 при рабочем токе ШД, а также большей температурной зависимостью прямой ветви его ВАХ по сравнению с 1N5819.

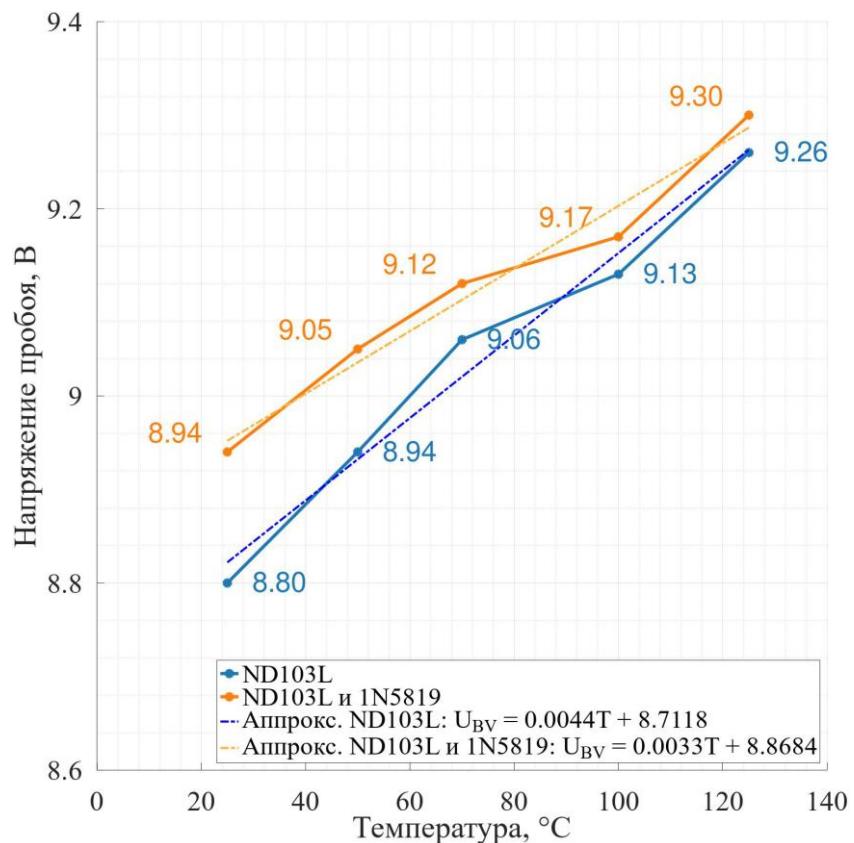


Рисунок 3. – Зависимость напряжения пробоя шумового диода ND103L, термостабилизированного ДШ 1N5919, и шумового диода ND103L от температуры

Очевидно, что величина степени термокомпенсации определяется электрофизическими параметрами компенсирующего диода.

Результаты моделирования температурной зависимости напряжения пробоя ШД с использованием Micro-Cap и линейной аппроксимации представлены на рисунке 4. Наблюдается достаточно хорошее соответствие экспериментальных и расчетных результатов: результаты моделирования, формы кривых для модели ND103L + 1N5819 и соответствующей ей линейной аппроксимации практически совпадают.

Для количественной оценки схожести кривых напряжения пробоя при разной температуре проведен сопоставительный анализ динамики кривых напряжения пробоя при использовании расчета среднеквадратичных отклонений. Анализ охватывал нормализованные значения  $X_{norm}$  экспериментальных и модельных данных, приведенных к единой шкале в температурном диапазоне 25–125 °C (рисунок 5).

Нормализация данных была выполнена методом масштабирования относительно минимального и максимального значений, что позволило привести все величины к диапазону [0; 1]. Нормализация осуществлялась путем вычитания из каждого экспериментального значения массива  $X$  минимальной величины  $X_{min}$  с последующим делением полученного результата на разницу между максимальной  $X_{max}$  и минимальной величинами:

$$X_{norm} = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}).$$

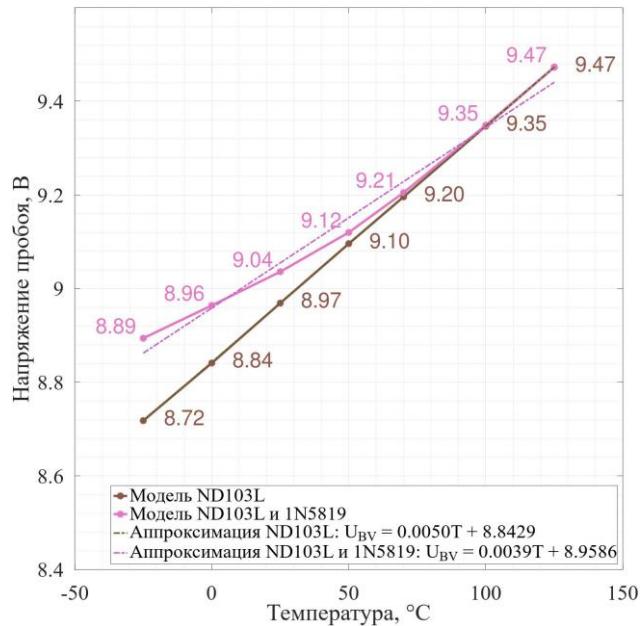


Рисунок 4. – Моделирование зависимости напряжения пробоя ШД от температуры

Такой подход был применен для облегчения сравнения данных, исключения зависимости от конкретных значений напряжения пробоя, а также для обеспечения более интуитивного представления данных в едином масштабе. Нормализация от 0 до 1 также способствует улучшению интерпретации и визуализации данных, особенно в контексте анализа и обработки сигналов, где единый масштаб упрощает выявление закономерностей и аномалий. Для пары ND103L и его модели (рисунок 5, а) величина среднеквадратичной ошибки (RMSE) составила 0,0583, что свидетельствует о минимальных расхождениях. В случае кросс-валидации ND103L с диодом 1N5819 и их моделью (рисунок 5, б) значение RMSE составляет 0,0796, что также свидетельствует о минимальных расхождениях. Однако, как сказано ранее, более предпочтительной для проведения термо-компенсации температурного изменения напряжения пробоя является пара ND103L + 1N60. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что результаты сравнительного анализа демонстрируют высокую степень соответствия между экспериментальными данными и расчетными моделями.

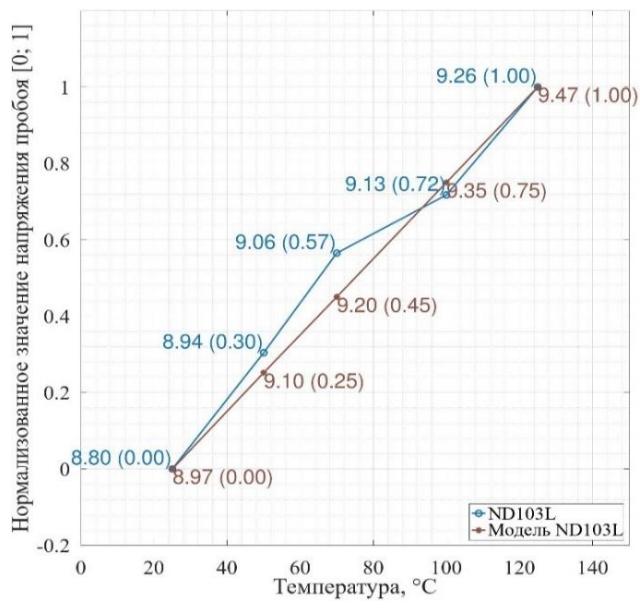
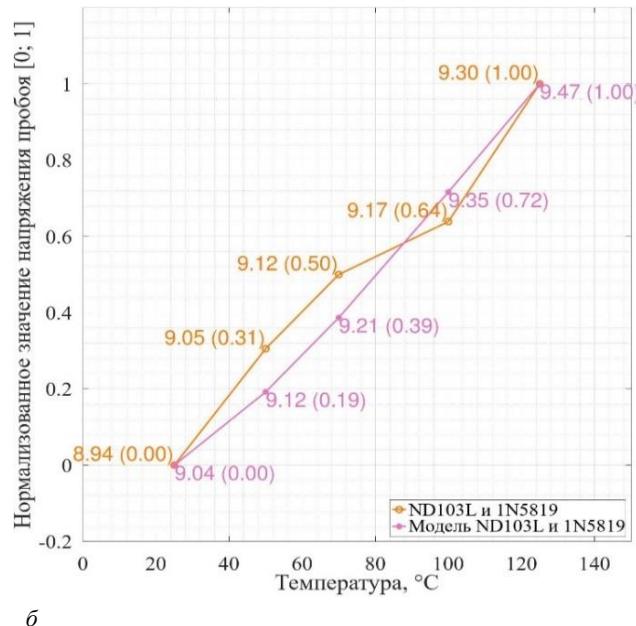


Рисунок 5. – Кривые зависимостей нормализованного напряжения пробоя шумового диода ND103L и его модели (а) (начало)



**Рисунок 5. – Кривые зависимостей нормализованного напряжения пробоя шумового диода ND103L, термостабилизированного ДШ 1N5819 и модели шумового диода ND103L, термостабилизированного ДШ 1N5819 (б) (окончание)**

Также одним из логичных подходов к температурной компенсации напряжения пробоя шумового диода является снижение напряжения его электрического пробоя до 4-5 В, достигаемое за счет более высокой степени легирования. При этом будет обеспечиваться одновременное протекание лавинного и туннельного тока, которые имеют противоположные по знаку, но близкие по значению КТН. Такое изменение конструкции и технологии теоретически возможно, однако при этом получить серийный сильнолегированный кремний на пределе растворимости донорных или акцепторных примесей с контролируемым уровнем дефектности весьма сложная задача, требующая значительных затрат при ограниченной партии производства соответствующих приборов. К тому же снижение пробивного напряжения сопровождается включением механизма туннельного пробоя, что приводит к значительному снижению амплитуды шумового сигнала и ухудшению его спектральных и эксплуатационных характеристик. Это, в свою очередь, существенно повлияет на потребительские свойства шумовых диодов и потребует доработки радиоэлектронных схем потребителей с последующими испытаниями устройств для подтверждения их качества. В конечном итоге это может привести к снижению потребности в шумовых диодах, особенно в области защиты информации.

**Заключение.** На основе экспериментальных исследований в сочетании с моделированием вольт-амперных характеристик диодов-генераторов шума показана принципиальная возможность компенсации температурных изменений напряжения пробоя шумовых диодов серии ND и расширения диапазона их рабочих температур. Наиболее перспективным методом является последовательное соединение обратно включенного диода-генератора шума и прямо включенного диода Шоттки. Такое схемотехническое решение может использоваться в качестве необходимого условия расширения диапазона рабочих температур до 125 °C. Установлено, что шумовые параметры во всех случаях (как для одиночных диодов-генераторов шума, так и для пары шумовой диод + диод Шоттки) имеют зависимость от температуры, близкую к линейной. Степень температурной компенсации напряжения пробоя оценивалась по угловым коэффициентам усредненных прямых зависимости напряжения пробоя от температуры. Полученные значения составляют: для ND103L – 0,0045 В/К, а для термокомпенсированных пар ND103L + 1N60 и ND103L + 1N5819 – соответственно 0,0027 В/К и 0,0033 В/К. Это свидетельствует о существенно меньшем влиянии изменения температуры на величину напряжения пробоя диодов-генераторов шума при последовательном их соединении с прямосмещенным диодом Шоттки. Особое внимание при проектировании термокомпенсированных шумовых диодов (как в гибридном шумовом модуле, так и в монолитной интегральной структуре) следует уделить учету влияния выпрямляющего контакта металл–полупроводник и обеспечению минимального падения напряжения на прямой ветви диодов Шоттки при работающих в режиме пробоя диодах-генераторах шума.

Работа выполнена в рамках задания 3.11.3 Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Фотоника и электроника для инноваций», подпрограмма «Микро- и наноэлектроника».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Винокуров С. А., Кочемасов В. Н., Сафин А. Р. Генераторы шума (обзор) // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. – Т. 26, № 4. – С. 6–32. – DOI: [10.32603/1993-8985-2023-26-4-6-32](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-4-6-32).
2. Технологические аспекты производства изделий субмикронной электроники / В. В. Буслюк, А. Э. Видрицкий, Д. А. Голосов и др.; под ред. В. Л. Ланина. – Минск: «Бестпринт», 2024. – 269 с.
3. Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой р-п-перехода в полупроводниках // Л.: Энергия, 1980. – 152 с.
4. Semiconductor Devices: Physics and Technology / ed.: S. M. Sze, M.-K. Lee. – 3<sup>th</sup> ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2012. – 592 p.
5. Электрофизические параметры диодов генераторов широкополосного шума / В. Б. Оджаев, А. К. Панфиленко и др. // Микроэлектроника. – 2020. – Т. 49, № 4. – С. 315–320.
6. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума / В. В. Буслюк, И. Ю. Нерода, А. Н. Петлицкий // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – № 1. – С. 95–99.
7. Амплитудные характеристики шумовых диодов / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, В. В. Буслюк и др. // Прикладная физика. – 2024. – № 3. – С. 51–57. – DOI: [10.51368/1996-0948-2024-3-51-57](https://doi.org/10.51368/1996-0948-2024-3-51-57).
8. On the Temperature Characteristics of Noise Diodes / A. O. Zenovich, O. V. Kochergina, V. V. Buslyuk // Semiconductors. – 2024. – Vol. 58, iss. 13. – P. 1128–1131. – DOI: [10.1134/S1063782624700167](https://doi.org/10.1134/S1063782624700167).
9. Божков В. Г. Контакты металл–полупроводник: физика и модели. – Томск: Издательский Дом Томского гос. ун-та, 2016. – 528 с.

Поступила 15.07.2025

**METHODS OF TEMPERATURE VOLTAGE COMPENSATION  
ELECTRICAL BREAKDOWN OF NOISE DIODES**

**O. LATIY<sup>1</sup>, V. BUSLYUK<sup>2, 1</sup>, S. DERECHENNIK<sup>2</sup>, V. YEMELYANOV<sup>3</sup>, O. KOCHERGINA<sup>4</sup>,  
V. ODZHAEV<sup>5</sup>, V. PROSOLOVICH<sup>5</sup>, Yu. YANKOVSKI<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>(“Tsvetotron” Joint Stock Company, Brest)

<sup>2</sup>(Brest State Technical University)

<sup>3</sup>(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk)

<sup>4</sup>(Belarusian State Academy of Communications, Minsk)

<sup>5</sup>(Belarusian State University, Minsk)

*Methods for compensating for changes in the electrical characteristics of discrete semiconductor noise diodes, as well as rectifying contacts of p-n junctions and metal-semiconductor junctions, under changing temperature conditions are investigated. Based on experimental studies of the electrophysical characteristics of noise diodes and modeling of a structure comprising a reverse-connected noise diode and a forward-connected compensating diode, a method for stabilizing the microplasma breakdown voltage of ND series noise diodes manufactured by Integral Holding, Republic of Belarus, is proposed. It is established that the dependence of the microplasma breakdown voltage for these noise diodes on temperature in the range of 24–125 °C is close to linear. This allows for temperature compensation of the breakdown voltage of a noise diode by connecting it in series with a forward-connected Schottky diode, a previously unused approach due to the narrow range of microplasma breakdown currents. It has been shown that the degree of thermal compensation, characterized by the magnitude of the slope of the linear approximation of the breakdown voltage dependence on temperature, depends on the electrophysical parameters of the noise generator diode and the compensating diode. Thermal compensation of the breakdown voltage using a discrete Schottky diode resulted in a 40% reduction in the noise cutoff frequency under normal climatic conditions. However, at a temperature of 125°C, the cutoff frequency of the temperature-compensated noise diode more than doubles, reaching values characteristic of ND103L noise generator diodes. The research results suggest design and technological possibilities for expanding the operating temperature range of noise diodes in microplasma breakdown mode.*

**Keywords:** noise generator diodes, temperature compensation, breakdown voltage, noise voltage spectral density, noise cutoff frequency, operating temperature range.

## Р-І-Н-ФОТОДИОДЫ С ГЕТТЕРАМИ, СОЗДАННЫМИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ОСНОВНЫХ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ

*д-р физ.-мат. наук, проф. В. Б. ОДЖАЕВ<sup>1</sup>, канд. физ.-мат наук, доц. А. Н. ПЕТЛИЦКИЙ<sup>2</sup>,  
канд. физ.-мат наук, доц. В. С. ПРОСОЛОВИЧ<sup>1</sup>, канд. физ.-мат наук Д. В. ШЕСТОВСКИЙ<sup>2</sup>,  
канд. физ.-мат. наук В. Ю. ЯВИД<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук Ю. Н. ЯНКОВСКИЙ<sup>1</sup>,  
д-р философии (PhD) по физ.-мат. наукам, доц. Б. К. ИСМАЙЛОВ<sup>3</sup>,  
д-р философии (PhD) по физ.-мат. наукам, доц. З. Т. КЕНЖАЕВ<sup>3</sup>,  
Н. В. ВАБИЩЕВИЧ<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>(Белорусский государственный университет, Минск)

<sup>2</sup>(ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск)

<sup>3</sup>(Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Узбекистан)

<sup>4</sup>(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

*Исследованы вольт-амперные характеристики р-і-н-фотодиодов, содержащих геттеры, сформированные имплантацией ионов бора или сурьмы, на обратной стороне кремниевой пластине. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы технологического процесса изготовления приборов за исключением имплантации примесей в непланарную сторону пластины. Показано, что после формирования геттера электрофизические параметры приборов существенно зависят как от вида внедренных ионов, так и режимов последующих преципитирующего и диффузационного отжигов. Это обусловлено, с одной стороны, геттерированием технологических примесей, которые создают глубокие генерационно-рекомбинационные центры и определяют величину обратного темнового тока р-і-н-фотодиодов. С другой стороны, существенное влияние на величину напряжения пробоя и предпробойный участок вольт-амперной характеристики оказывают процессы дефектно-примесного взаимодействия между радиационными и пост-технологическими дефектами типа дислокаций, микродефектов и т. п. Наличие на вольт-амперных характеристиках р-і-н-фотодиодов ступенчатых участков свидетельствует о термической генерации носителей заряда с глубоких энергетических уровней неоднородно распределенных структурных дефектов и технологических примесей в области пространственного заряда р-і-н-фотодиодов.*

**Ключевые слова:** *р-і-н-фотодиод, генерационно-рекомбинационные процессы, геттерирующие примеси, ионная имплантация, термообработка.*

**Введение.** В настоящее время р-і-н-фотодиоды, изготовленные на основе кремния, выращенного по методу бестигельной зонной плавки, активно применяются в аппаратуре космического назначения в качестве навигационных и сенсорных детекторов, а также в системах определения расстояния с помощью светового луча (LIDAR) [1; 2]. Главными преимуществами р-і-н-фотодиодов являются высокий квантовый выход, малая барьерная емкость и высокое быстродействие [3–5]. Эффективность их работы в значительной степени определяется величиной темнового тока при обратном смещении, который зависит, в первую очередь, от времени жизни неосновных носителей заряда. Данный параметр определяется генерационно-рекомбинационными процессами на дефектах структуры кристаллической решетки, в том числе на технологических фоновых примесях. Для увеличения времени жизни носителей заряда применяются различные методы геттерирования технологических примесей, позволяющие создать в рабочей области кремниевой подложки «чистую» зону. Геттерирование примесных атомов металлов позволяет не только увеличить время жизни неравновесных носителей заряда, но и обеспечивает стабильность электрических и рекомбинационных параметров материала, который многократно подвергается термообработке в технологическом процессе изготовления фотоприемников [6]. Ранее был разработан метод создания геттера неконтролируемым технологическим примесей в подложках монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского, путем формирования слоя пористого кремния посредством имплантации ионов Sb<sup>+</sup> и последующих геттерирующих термообработок. Установлено, что доза ионов сурьмы должна обеспечивать концентрацию примеси в слое, превышающую ее предел растворимости при температурах отжига 800–1000 °C, а также растворимость сурьмы при последующем высокотемпературном отжиге ( $T_{отж} = 1220$  °C). Процесс сопровождается образованием преципитатов сурьмы с последующей диффузией из них атомов Sb, на их месте образуются микропоры, которые и являются основными геттерирующими центрами<sup>1</sup> [7]. Однако, возможность применения

<sup>1</sup> Патент BY 18107, МПК H 01L 21/322 (2006.01). Способ формирования геттерного слоя в пластине кремния: № 20111498: заявлено 10.11. 2011: опубл. 30.04.2014 / Садовский П. К., Челядинский А. Р., Оджаев В. Б., Турцевич А. С., Плебанович В. И., Белоус А. Н., Васильев Ю. Б.; заявители: Белорусский государственный университет. – 1 с.

данного метода на подложках монокристаллического кремния, выращенного по методу бестигельной зонной плавки, до настоящего времени не установлена.

**Цель работы** – исследование воздействия геттерирующих центров, созданных ионной имплантацией (ИИ) основных легирующих примесей в нерабочую сторону кремниевой пластины, на электрофизические параметры *p-i-n*-фотодиодов.

**Методика эксперимента.** *P-i-n*-фотодиоды с профицированным *p-i-n*-переходом<sup>2</sup> изготавливались на пластинках кремния *p*-типа проводимости с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 1000 Ом·см, выращенного методом бестигельной зонной плавки. На рисунке 1 представлено схематическое изображение структуры фотодиода<sup>3</sup>. На поверхности кремниевой подложки 1 *p*-типа проводимости были сформированы две совмещенные области 2 и 3 *n*-типа проводимости. Слаболегированная мелкозалегающая область 2, созданная имплантацией мышьяка, совмещена с областью 3, полученной имплантацией фосфора и представляющей собой сетку локальных областей. В местах контакта области 2 и локальных областей 3 с подложкой 1 образуется общая область пространственного заряда *p-n*-перехода 4. По периферии области 2 изготавливались охранное кольцо *n*-типа проводимости, внешние края которого выходят на подложку 1 и закрыты пассивирующим диэлектриком. Области *p<sup>+</sup>*-типа анода (изотипный переход), сформированного вокруг охранного кольца, и *n<sup>+</sup>*-типа катода создавались имплантацией соответственно бора и фосфора в планарную сторону пластины. Формирование геттера производилось посредством ионной имплантации  $\text{B}^+$  или  $\text{Sb}^+$  с энергией 60 кэВ в непланарную сторону пластины с последующими преципитирующими и диффузионными отжигами в атмосфере азота в индукционной печи. Бор имплантировался дозами  $5 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , преципитирующая термообработка осуществлялась при 850 °C длительностью  $t = 30$  мин, диффузионная разгонка – при 1150 °C или 1200 °C в течение 240 мин. Сурьма имплантировалась дозами  $1,2 \cdot 10^{15} - 4,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , преципитирующая термообработка осуществлялась при 850 °C, 1000 °C или 1050 °C длительностью 30 или 60 мин, диффузионная разгонка – при 1150 °C или 1200 °C в течение 240 мин. Параллельно исследовались контрольные образцы приборов, подвергавшиеся тем же технологическим операциям за исключением имплантации примесей в непланарную сторону пластины для формирования геттера. Регистрация вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилась на измерителе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A с зондовой станцией Cascade Summit 11000B-AP. Темновые ВАХ *p-i-n*-фотодиодов регистрировались в диапазоне обратных смещений 0...30 В с шагом 0,25 В и темпом 0,3 мс/В при 20 °C.

- 1 – подложка монокристаллического кремния *p*-типа проводимости;
- 2 – слаболегированная мелкозалегающая область *n*-типа проводимости, созданная ИИ мышьяка;
- 3 – область, созданная ИИ фосфора и представляющая собой сетку локальных областей;
- 4 – область пространственного заряда *p-n*-перехода;
- 5 – просветляющее покрытие

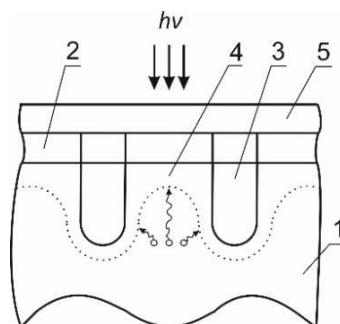


Рисунок 1. – Схематическое изображение структуры фотодиода

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Как видно из рисунка 2, при имплантации  $\text{B}^+$  дозами  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  при диффузионном отжиге ( $T_{\text{отж}} = 1150$  °C) ВАХ *p-i-n*-фотодиодов имеют стандартный вид. Величина обратного темнового тока  $I_{\text{обр}}$  составляет  $\sim 10^{-9}$  А. При этом применение дозы имплантации бора  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  позволяет повысить напряжение лавинного пробоя, обусловленного ударной ионизацией, до 23,5 В по сравнению с дозой  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (23,2 В). Формирование геттерирующих центров имплантацией  $\text{B}^+$  дозой  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  в тыльную сторону пластины позволяет также, по сравнению с контрольными образцами (рисунок 3), незначительно повысить напряжение пробоя (с 22,5 В до 23,2 В) и снизить величину  $I_{\text{обр}}$  (при  $U_{\text{обр}} = 2,5$  В) с  $3 \cdot 10^{-9}$  А до  $1 \cdot 10^{-9}$  А. Следует отметить, что для контрольных образцов при имитации диффузионного отжига при 1200 °C также наблюдается снижение величины обратного темнового тока (при  $U_{\text{обр}} < 7$  В) по сравнению с температурой имитационного отжига при 1150 °C (рисунок 3).

<sup>2</sup> Патент BY 7483, МПК H 01L 21/00 (2006.01). Фотодиод: № 20110067: заявлено 02.02.2011; опубл. 30.08.2011 / Блынский В. И., Голуб Е. С., Лемешевская А. М., Цымбал В. С.; заявители: ОАО «ИНТЕГРАЛ»; Государственное научное учреждение «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларусь». – 1 с.

<sup>3</sup> Там же.

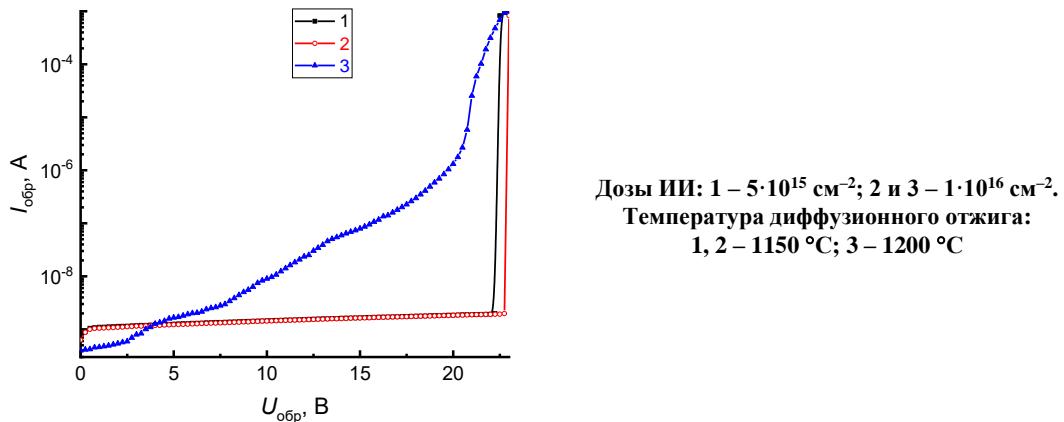


Рисунок 2. – ВАХ  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов с геттером, созданным ИИ  $B^+$   
( $E = 60$  кэВ, преципитирующий отжиг при  $850$  °C,  $t = 30$  мин)

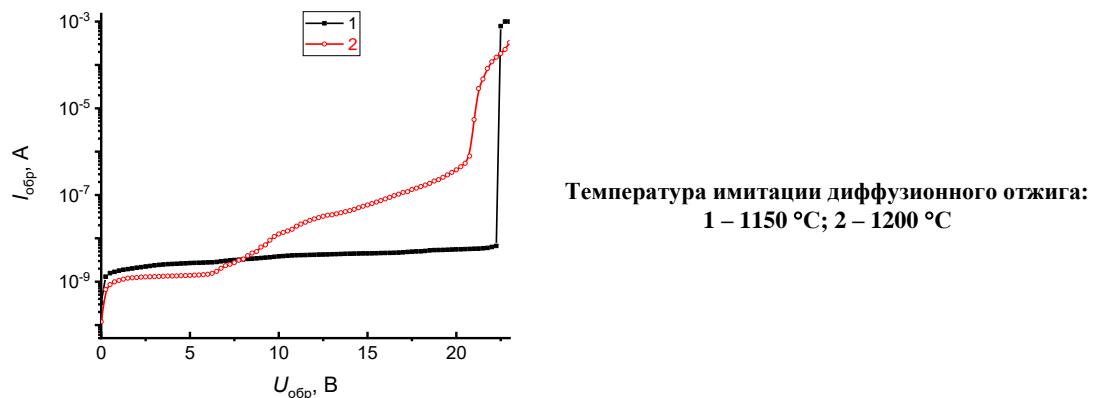


Рисунок 3. – ВАХ контрольных образцов  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов

Величина темнового тока фотодиода при обратном смещении  $I_{\text{обр}}$  определяется суммой диффузационного  $I_{\text{диф}}$ , туннельного  $I_{\text{тун}}$  и генерационного  $I_{\text{ген}}$  токов [3]:

$$I_{\text{обр}} = I_{\text{диф}} + I_{\text{тун}} + I_{\text{ген}}. \quad (1)$$

Диффузационный ток возникает вследствие наличия градиента концентрации носителей заряда разных типов [3]. За счет эффекта туннелирования носители заряда могут пересекать потенциальный барьер области обеднения  $p$ - $n$ -перехода, если он достаточно узок. Генерационные токи Шокли – Рида – Холла обусловлены тепловой генерацией носителей с ловушек, расположенных в запрещенной зоне полупроводника [8]. Наличие глубоких уровней внутри запрещенной зоны (для Si это уровни, находящиеся между двумя демаркационными уровнями во второй ее трети) делает более вероятным процесс генерации [9]. Ток Шокли – Рида – Холла в области обеднения обычно оказывает гораздо большее влияние на ВАХ, чем в квазинейтральной области, ввиду более низкой концентрации основных носителей заряда [8]. В качестве ловушек, как правило, выступают структурные дефекты (локальные центры, дислокации, микродефекты и т. д.), которые образуются как в процессе выращивания Si, так и при технологических обработках в процессе изготовления приборов.

В таких полупроводниках, как Si, которые характеризуются низкой концентрацией собственных носителей заряда  $n_i$  и большой концентрацией генерационно-рекомбинационных центров (т. е. низким значением эффективного времени жизни неравновесных носителей заряда), при комнатной температуре преобладает генерационный ток. При заданной температуре плотность генерационного тока пропорциональна ширине обедненного слоя  $W$ , которая в свою очередь зависит от приложенного обратного смещения  $U_{\text{обр}}$  и времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau_0$  [3]:

$$I_{\text{ген}} = \int_0^W q |U_{\text{обр}}| dx \approx q |U_{\text{обр}}| W = \frac{q n_i W}{\tau_0}. \quad (2)$$

Таким образом, формирование геттерирующих центров имплантацией ионов бора в обратную сторону пластины способствует удалению глубоких генерационно-рекомбинационных центров из базовой области *p-i-n*-фотодиодов, что приводит к уменьшению величины обратного темнового тока вследствие увеличения времени жизни неравновесных носителей заряда.

Пробой в *p-i-n*-фотодиодах носит лавинный характер и является следствием ударной ионизации атомов кристалла [10]. Носители заряда, попавшие в область пространственного заряда *p-n*-перехода, под действием сильного электрического поля приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов. Образовавшиеся носители заряда сами принимают участие в дальнейшей ионизации. Процесс нарастания тока носит лавинный характер. Скорость нарастания тока зависит от коэффициентов ионизации электронов и дырок, т. е. от числа электронно-дырочных пар, образуемых носителем заряда на 1 см пути при данной напряженности электрического поля.

Напряжение пробоя  $U_{\text{пр}}$  несимметричного *p-n*-перехода определяется выражением (3):

$$U_{\text{пр}} = \frac{E_m W}{2} = \frac{\varepsilon_s E_m^2}{2q} (N_B)^{-1}, \quad (3)$$

где  $E_m$  – максимальное значение электрического поля;

$\varepsilon_s$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника;

$q$  – заряд электрона;

$N_B$  – концентрация ионизированной примеси в слаболегированной области.

Если генерационно-рекомбинационные центры, обусловленные технологическими примесями, распределены неоднородно по объему полупроводника, тогда величина электрического поля, необходимая для проявления эффекта пробоя в различных местах области обеднения, будет различной.

Таким образом, увеличение напряжения пробоя для образцов, содержащих геттерирующие центры, сформированные в результате имплантации ионов бора в обратную сторону пластин, свидетельствует о том, что формирование геттера на обратной стороне пластины при преципитирующей термообработке при 850 °C длительностью 30 мин и диффузионной разгонке при 1150 °C в течение 240 мин позволяет снизить концентрацию генерационно-активных примесно-дефектных центров в объеме кремниевых пластин. Однако повышение температуры диффузионного отжига до 1200 °C для дозы имплантации бора  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  приводит к существенному изменению ВАХ. Напряжение пробоя снижается до 20,5 В, пробой становится достаточно плавным. Появляется предпробойный участок, начиная от  $\sim 5$  В, и сопровождается существенным увеличением  $I_{\text{обр}}$  – с  $1 \cdot 10^{-9}$  А до  $3 \cdot 10^{-6}$  А. Следует отметить, что практически аналогичная закономерность наблюдается и для контрольных образцов (см. рисунок 2): после проведения термообработки при 1200 °C, имитирующей диффузионную разгонку, напряжение пробоя снижается с 22,5 В до 21,0 В и появляется предпробойный участок, начиная от  $\sim 7$  В, где ток плавно увеличивается с  $3 \cdot 10^{-9}$  А до  $6 \cdot 10^{-7}$  А. Это свидетельствует о существенном вкладе в величину  $I_{\text{обр}}$  генерационных процессов, связанных с глубокими энергетическими уровнями, расположенными в области обеднения.

Этот эффект может быть обусловлен рядом причин. Во-первых, при увеличении температуры отжига увеличиваются коэффициенты диффузии технологических примесей (Fe, Cu, Au и др.), проникающих в материал из технологической оснастки при высоких температурах и создающих глубокие генерационно-рекомбинационные уровни в запрещенной зоне. Это приводит к существенному снижению времени жизни нейтральных носителей заряда и, как следствие, увеличению значения  $I_{\text{обр}}$  *p-i-n*-фотодиодов. Во-вторых, при выращивании монокристаллического кремния по методу бестигельной зонной плавки формируются скопления микродефектов, в состав которых входят технологические примеси О и С [11; 12]. При температуре термообработки 1200 °C как в образцах со сформированным геттером, так и в контрольных, вероятно, происходит трансформация микродефектов с выделением из них большого количества примесных атомов кислорода и углерода, которые формируют генерационно-активные центры, приводящие к снижению величины напряжения лавинного пробоя и возрастанию  $I_{\text{обр}}$  в достаточно широкой предпробойной области. Емкости геттера, сформированного при имплантации бора дозой  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  явно недостаточно для пассивации указанных выше процессов. Следует отметить, что при температуре диффузионного отжига 1150 °C существенной трансформации микродефектов с выделением примесных атомов не происходит и емкости сформированного геттера достаточно для нейтрализации технологических примесей, попавших в кристаллы при технологических операциях изготовления приборов.

На рисунках 4, 5 приведены обратные вольт-амперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов, в которых формирование геттера производилось посредством ионной имплантации  $\text{Sb}^+$  с энергией 60 кэВ в непланарную

сторону пластины с последующими преципитирующими и диффузионными отжигами в атмосфере азота в индукционной печи. Формирование геттера на обратной стороне кремниевой пластины, как и в случае с геттером, созданным ионной имплантацией бора, приводит к небольшому увеличению напряжения пробоя (на 0,5–0,7 В), однако вид вольт-амперных характеристик существенно отличается. При дозах имплантации сурьмы  $1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  и  $2,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  при увеличении обратного смещения выше 2,5 В наблюдается монотонное ступенчатое увеличение обратного тока.

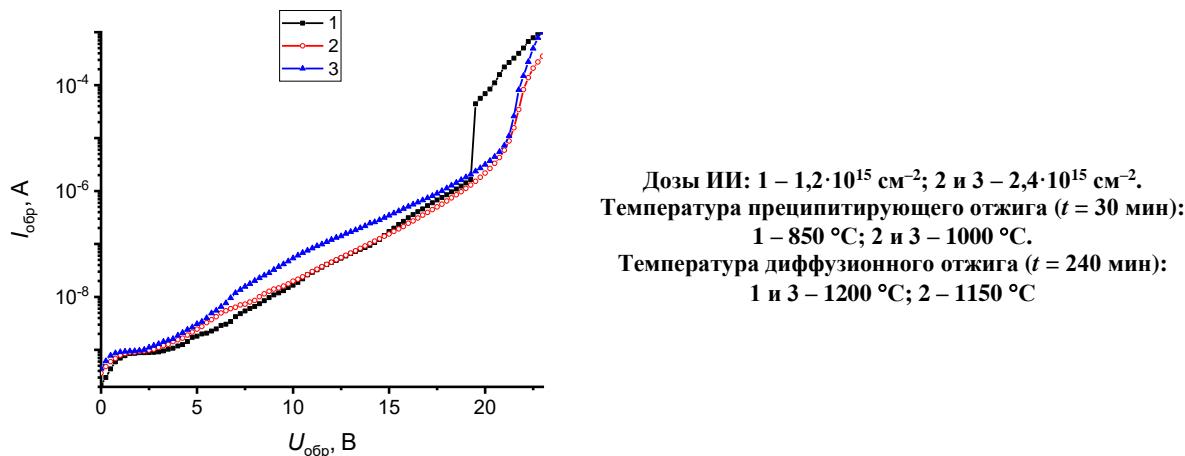


Рисунок 4. – ВАХ  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов с геттером, созданным ИИ  $\text{Sb}^+$  ( $E = 60 \text{ кэВ}$ )

Увеличение температуры диффузионного отжига до  $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  для дозы  $2,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (см. рисунок 4, кривая 3) приводит к достаточно существенному возрастанию обратного тока, на всех зависимостях имеется большой предпробойный участок ВАХ. Однако для дозы имплантации  $1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  он начинается существенно раньше – практически при 20 В. Наличие ступенчатых участков ВАХ свидетельствует о термической генерации носителей заряда с глубоких энергетических уровней неоднородно распределенных структурных дефектов и технологических примесей в области пространственного заряда  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов. Ранее качественно подобные ВАХ наблюдались нами при исследовании диодов-генераторов шума, сформированных на сильнолегированных подложках монокристаллического кремния ( $\rho = 0,005 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) [13], и  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов с вертикальной структурой [14]. Наличие ступенек на вольт-амперных характеристиках было связано с неоднородным распределением примесей и посттехнологических структурных дефектов по объему подложки.

При увеличении дозы имплантации сурьмы до  $4,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  вольт-амперные характеристики существенно изменяются (см. рисунок 5). Они отличаются как от соответствующих зависимостей, полученных для контрольных образцов, так и от ВАХ, наблюдавшихся при формировании геттерирующих центров методом ионной имплантации бора и меньшими дозами сурьмы. Прежде всего, в данном случае происходит существенное снижение величины обратного смещения начала предпробойного участка, а также возрастание величины обратного темнового тока. При этом увеличение температуры диффузионного отжига с  $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к существенному снижению начала предпробойного участка (см. рисунок 5, кривые 1 и 2). Следует отметить, что увеличение длительности преципитирующего отжига при  $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до 60 мин приводит к возрастанию обратного смещения начала предпробойного участка (см. рисунок 5, кривые 2 и 3). Однако наблюдаемое увеличение не достигает значений, характерных для режимов термообработки, включающей преципитирующий отжиг при  $1050 \text{ }^{\circ}\text{C}$  длительностью 30 мин и диффузионный отжиг при  $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  длительностью 240 мин. При этом происходит также существенное снижение напряжения пробоя до  $\sim 13,5 \text{ В}$ . Как следует из выражения (3), уменьшение величины напряжения пробоя, а также снижение предпробойного напряжения может быть связано с уменьшением максимального значения электрического поля  $E_m$ , что, вероятно, обусловлено формированием неоднородностей потенциального рельефа вследствие образования при ионной имплантации и последующих термообработках крупномасштабных нарушений кристаллической структуры, содержащих электрически заряженные центры. В этих областях возникают внутренние электрические поля, которые и снижают необходимую для возникновения ударной ионизации носителей заряда величину внешнего смещения.

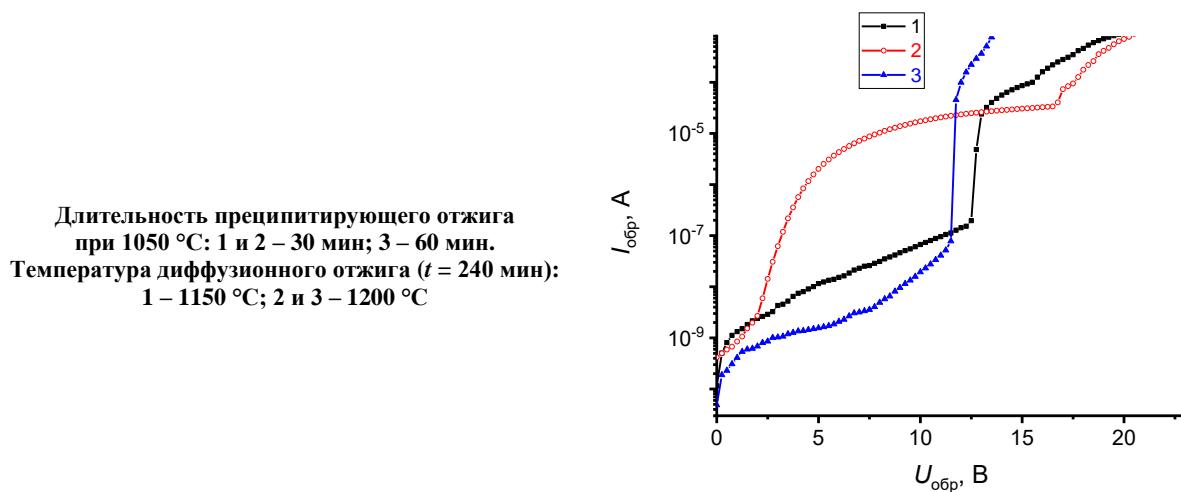


Рисунок 5. – ВАХ  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов с геттером, созданным ИИ  $Sb^+$  ( $E = 60$  кэВ, доза  $4,8 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ )

Различие в поведении вольт-амперных характеристик при формировании геттерирующих центров посредством имплантации ионов бора и сурьмы, вероятно, обусловлено особенностями радиационного дефектообразования при внедрении ионов различной массы. Как известно [15], эффективность образования первичных радиационных дефектов (вакансий и междуузельных атомов) возрастает при увеличении массы иона. Таким образом, при имплантации ионов сурьмы генерируется существенно большее количество первичных радиационных дефектов, чем при внедрении ионов бора с такой же энергией. Основная масса дефектов образуется в приповерхностном слое  $\sim 100$ – $150$  нм. Возникающий градиент концентрации вакансий и междуузельных атомов между лицевой (относительно процесса ионной имплантации) и тыльной сторонами кремниевой пластины способствует их эффективной диффузии в рабочую область  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиода – область пространственного заряда. Кроме того, при проведении ионной имплантации имеется достаточно высокая разность потенциалов между лицевой и тыльной сторонами образца, что обуславливает существование внутри облучаемой пластины сильного электрического поля, которое оказывает существенное влияние на процессы диффузии компонентов пар Френкеля. В нашем случае это также имеет место, учитывая, что вакансии в кремнии имеют стабильное  $2^+$ -состояние [16]. Данные точечные дефекты захватываются расположенным неоднородно по объему кристалла посттехнологическими структурными дефектами (микродефектами, дислокациями, дислокационными петлями и т. п.) и коагулируют на них. Это приводит к образованию глубоких генерационно-рекомбинационных центров, определяющих формирование ступенчатого характера ВАХ и образование предпробойных участков.

В случае имплантации ионов бора количество генерируемых ионной имплантацией первичных радиационных дефектов существенно меньше, чем при внедрении ионов сурьмы, и описанный выше эффект трансформации вольт-амперной характеристики выражен значительно слабее.

**Заключение.** Показано, что формирование геттера в  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодах посредством имплантации  $B^+$  в обратную сторону пластины (энергия – 60 кэВ, доза –  $1 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$ ) с последующими преципитирующими отжигом при 850 °C (30 мин) и диффузионным отжигом при 1150 °C (240 мин) позволяет увеличить напряжение лавинного пробоя  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов и снизить величину  $I_{обр}$  в  $\sim 3$  раза. Это обусловлено пассивацией технологических примесей, создающих глубокие генерационно-рекомбинационные центры. Повышение температуры диффузионного отжига до 1200 °C приводит к формированию широкой предпробойной области с плавно нарастающей величиной обратного тока вследствие распада посттехнологических микродефектов, сопровождающегося освобождением технологических примесей О и С. Емкости сформированного таким образом геттера недостаточно для их инактивации. Формирование геттера посредством имплантации  $Sb^+$  в обратную сторону пластины (энергия – 60 кэВ, дозы –  $1,2 \cdot 10^{15}$  и  $2,4 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$ ) с последующими преципитирующими отжигом при 850 °C или 1000 °C (30 мин) и диффузионным отжигом при 1150 °C (240 мин) также позволяет незначительно увеличить напряжение лавинного пробоя  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов. Однако при этом вольт-амперные характеристики имеют при напряжениях обратного смещения выше 2,5 В монотонное ступенчатое увеличение обратного тока.

Увеличение температуры диффузионного отжига до 1200 °C для дозы  $2,4 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  приводит к достаточно существенному возрастанию обратного тока. Наличие ступенчатых участков ВАХ свидетельствует о термической генерации носителей заряда с глубоких энергетических уровней неоднородно распределенных структурных дефектов и технологических примесей в области пространственного заряда  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиодов. При увеличении дозы имплантации сурьмы до  $4,8 \cdot 10^{15}$  см $^{-2}$  вольт-амперные характеристики

существенно изменяются: происходит существенное снижение величины обратного смещения начала предпробойного участка, а также возрастание величины обратного темнового тока. При этом увеличение температуры диффузионного отжига с 1150 °C до 1200 °C приводит к существенному снижению начала предпробойного участка. Это обусловлено захватом точечных радиационных дефектов расположеными неоднородно по объему кристалла посттехнологическими структурными дефектами (микродефектами, дислокациями, дислокационными петлями и т. п.). Следствием является образование глубоких генерационно-рекомбинационных центров, определяющих формирование ступенчатого характера и предпробойных участков ВАХ.

В случае имплантации ионов бора количество генерируемых ионной имплантацией первичных радиационных дефектов существенно меньше, чем при внедрении ионов сурьмы, и описанный выше эффект трансформации вольт-амперной характеристики выражен значительно слабее.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договор № Ф25УЗБ-067 от 05.03.2025.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Imaging lidars for space applications / J. Pereira do Carmo, B. Moebius, M. Pfennigbauer et al. // Novel Optical Systems Design and Optimization XI. – 2008. – Vol. 7061. – P. 70610J-01–70610J-12.
2. Intersatellite link for earth observation satellites constellation / P. M. De Carlo, L. Roberto, G. Marano et al. // SPACEOPS, Roma, Italy. – 2006. – P. 19–23.
3. Semiconductor Devices: Physics and Technology / ed.: S. M. Sze, M.-K. Lee – 3<sup>th</sup> ed. – Hoboken, NJ: Wiley, 2012. – 592 p.
4. Springer Handbook of Lasers and Optics: Springer Handbooks / ed.: Träger. F. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. – 1694 p.
5. p-i-n Photodiode Based on Silicon with Short Rise Time / Yu. G. Dobrovolsky, O. P. Andreeva, M. S. Gavrilyak et al. // Journal of Nano- & Electronic Physics. – 2018. – Vol. 10, iss. 4. – P. 04019-1–04019-5.
6. Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. – М.: Металлургия. 1984. – 256 с.
7. Создание геттера в кремнии путем имплантации ионов сурьмы / П. К. Садовский, А. Р. Челядинский, В. Б. Оджаев и др. // Физика твердого тела. – 2018. – Т. 60, № 1. – С. 22–25.
8. Sah C. T., Noyce R. N., Shockley W. Carrier generation and recombination in p-n junctions and p-n junction characteristics / Proceedings of the IRE. – 1957. – Vol. 45, iss. 9. – P. 1228–1243.
9. Seebauer E. G., Kratzer M. C. Charged semiconductor defects: structure, thermodynamics and diffusion / Springer Science & Business Media, 2008. – 312 p.
10. Грехов И. В., Сережкин Ю. Н. Лавинный пробой р-п-перехода в полупроводниках. – Л.: Энергия, 1980. – 152 с.
11. Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. – М.: Металлургия. 1984. – 256 с.
12. Таланин В. И., Таланин И. Е. Применение диффузионной модели образования ростовых микродефектов для описания дефектообразования в термообработанных монокристаллах кремния // Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55, вып. 2. – С. 247–251.
13. Электрофизические параметры диодов генераторов широкополосного шума / В. В. Буслюк, В. Б. Оджаев, А. К. Панфиленко и др. // Микроэлектроника. – 2020. – Т. 49, № 4. – С. 315–320.
14. Влияние структурных дефектов на электрофизические параметры р-и-п-фотодиодов / Н. С. Ковальчук, С. Б. Ластовский, В. Б. Оджаев и др. // Микроэлектроника. – 2023. – Т. 52, № 4. – С. 307–314.
15. Вопросы радиационной технологии полупроводников / Под ред. Л. С. Смирнова. – Новосибирск: Наука, 1980. – 296 с.
16. Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремни и на его поверхности. – М.: Наука, 1990. – 216 с.

Поступила 28.08.2025

## P-I-N PHOTODIODES WITH GETTERS CREATED BY ION IMPLANTATION OF MAIN DOPING IMPURITIES

V. ODZHAEV<sup>1</sup>, A. PYATLITSKI<sup>2</sup>, V. PRASALOVICH<sup>1</sup>, D. SHESTOVSKY<sup>2</sup>,  
V. YAVID<sup>1</sup>, YU. YANKOVSKI<sup>1</sup>, B. ISMAYLOV<sup>3</sup>, Z. KENZHAEV<sup>3</sup>, N. VABISHCHEVICH<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(Belarusian State University, Minsk)

<sup>2</sup>(“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk)

<sup>3</sup>(Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov, Uzbekistan)

<sup>4</sup>(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

*The current-voltage characteristics of p-i-n photodiodes containing getters formed by implantation of boron or antimony ions on the back side of a silicon wafer were investigated. In parallel, control samples that passed*

*all stages of the technological process of device manufacturing except for the implantation of impurities into the non-planar side of the wafer were investigated. It was shown that after the getter formation, the electrophysical parameters of the devices depend significantly on both the type of implanted ions and the modes of subsequent precipitation and diffusion annealing. This is due, on the one hand, to the gettering of technological impurities that create deep generation-recombination centers that determine the magnitude of the reverse dark current of p-i-n photodiodes. On the other hand, processes of defect-impurity interaction between radiation and post-technological defects such as dislocations, microdefects, etc. have a significant effect on the value of the breakdown voltage and the pre-breakdown section of the current-voltage characteristic. The presence of stepped sections on the current-voltage characteristics of p-i-n photodiodes indicates thermal generation of charge carriers from deep energy levels of non-uniformly distributed structural defects and technological impurities in the space charge region of p-i-n photodiodes.*

**Keywords:** *p-i-n photodiode, generation-recombination processes, gettering impurities, ion implantation, heat treatment.*

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЕННЫХ $\gamma$ -КВАНТАМИ $^{60}\text{Co}$ СТРУКТУР DLC/ПОЛИИМИД

канд. физ.-мат. наук, доц. А. А. ХАРЧЕНКО<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ<sup>2</sup>,  
И. А. ЗУР<sup>1</sup>, д-р физ.-мат. наук, проф. Ю. А. ФЕДОТОВА<sup>1</sup>, Е. Е. ШМАНАЙ<sup>1</sup>, Е. Д. МИЦКЕВИЧ<sup>1</sup>,  
канд. хим. наук, доц. С. Д. БРИНКЕВИЧ<sup>3</sup>, канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ<sup>4</sup>,  
Е. Д. БУРЫЙ<sup>5</sup>, канд. физ.-мат. наук С. Б. ЛАСТОВСКИЙ<sup>5</sup>

<sup>1</sup> (НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета, Минск)

<sup>2</sup> (Белорусский государственный университет, Минск)

<sup>3</sup> (ООО «Мой медицинский центр – высокие технологии», Всеволожск, Россия)

<sup>4</sup> (Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

<sup>5</sup> (Научно-практический центр НАН Беларусь по материаловедению, Минск)

*Методами оптической спектроскопии исследованы облученные  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  дозой до 1 МГр структуры DLC/полиимид, сформированные методом сильноточного импульсного магнетронного распыления графита марки ГЛ-1. Мощность поглощенной дозы составляла 0,12 Гр/с. Экспериментально установлено увеличение пропускания вблизи края поглощения полиимидной пленки и структур DLC/полиимид в процессе облучения  $\gamma$ -квантами. Указанный эффект более выражен в структурах DLC/полиимид и обусловлен как распадом метастабильных «ростовых» дефектов полиимидной основы, так и перестройкой DLC-покрытия. Обнаружено изменение спектров отражения DLC-покрытия при  $\gamma$ -облучении, что проявляется в уменьшении коэффициента отражения с ростом дозы облучения. При дозе облучения 1 МГр в диапазоне длин волн от 200 до 300 нм наблюдалось снижение коэффициента отражения с ростом длины волны, в то время как в исходных (необлученных) структурах в указанном диапазоне наблюдался рост коэффициента отражения. Вероятнее всего, это связано с перестройкой структуры DLC в процессе облучения, что согласуется с изменением величины  $\alpha_{ad}$ . Показано, что оптическая спектроскопия является эффективным методом для обнаружения тонких пленок DLC при невозможности наблюдения таких покрытий другими методами. Обнаружено ослабление адгезии DLC-покрытия к полиимидной подложке, вплоть до его отслоения при дозе 1 МГр.*

**Ключевые слова:** полиимид, алмазоподобные покрытия, DLC,  $\gamma$ -облучение, остаточный растворитель.

**Введение.** Газоразрядные детекторы ионизирующего излучения применяются во многих отраслях науки и техники: в физике элементарных частиц [1], радиомедицине [2] и термоядерных комплексах [3]. В частности, широкое распространение получили GEM-детекторы, которые, в зависимости от конфигурации, характеризуются коэффициентом газового усиления  $\approx 10^3$ – $10^4$  и энергетическим разрешением  $\approx 12$ – $30$  % [4]. Основным недостатком GEM-детекторов является их уязвимость к искровым разрядам, которые возникают при превышении предела Ретера [5] в электронной лавине внутри усилительного элемента. Одним из способов увеличения срока и стабильности эксплуатации GEM-детекторов является формирование резистивных покрытий на их коллекторном электроде – диэлектрической подложке, выполненной, например, из полимида. Обычно в этом качестве используют наноразмерные покрытия алмазоподобного углерода (DLC) [4]. Ранее изучено влияние толщины на концентрацию атомов углерода с  $sp^2$ -гибридизацией электронных орбиталей и удельную электропроводность на переменном токе [6], влияние влажности воздуха на импеданс DLC-покрытий [7], а также исследована их эрозионная устойчивость к воздействию искровых разрядов аргоновой плазмы [8]. В процессе эксплуатации GEM-детектора DLC-покрытие подвергается воздействию ионизирующего излучения, которое, однако, в настоящее время остается недостаточно изученным. Указанное обстоятельство обуславливает интерес к исследованию радиационно-индукционных процессов в структурах DLC/полиимид и их влияние на структуру и физические свойства DLC-покрытий различной толщины.

**Материалы и методы исследования.** Слои DLC наносились на полиимидную (ПИ) пленку (каптон, толщина 200 мкм) методом сильноточного импульсного магнетронного распыления графита марки ГЛ-1 [9]. Осаждение проводилось без нагрева образца. Толщина покрытия задавалась временем напыления исходя из скорости напыления 5 нм/мин. Перед напылением подложки очищались изопропиловым спиртом в ультразвуковой ванне в течение 15 мин. Непосредственно перед напылением подложка очищалась потоком ионов  $\text{Ar}^+$  с ускоряющим напряжением 3,5 кВ в течение 30 мин. Толщина слоя DLC варьировалась от 2 до 400 нм. Образцы обозначены в зависимости от толщины слоя: DLC-2 ( $\approx 2$  нм), DLC-10 ( $\approx 10$  нм), DLC-400 ( $\approx 400$  нм) и DLC-450 ( $\approx 450$  нм).

Спектры отражения и пропускания регистрировались в диапазоне длин волн  $\lambda = 200$ – $3000$  нм спектрофотометром PHOTON RT при нормальных условиях. Спектральные зависимости изучались при падении света на образец как со стороны DLC-покрытия, так и с обратной (полиимидной) стороны образца.

Коэффициенты пропускания ( $T$ ) и отражения ( $R$ ) определялись как отношения интенсивности света, пришедшего на детектор после прохождения луча через образец ( $I_T$ ) и после зеркального отражения на образце ( $I_R$ ), соответственно, к интенсивности света, падающего на образец ( $I_0$ ):

$$T = I_T / I_0, \quad (1)$$

$$R = I_R / I_0. \quad (2)$$

Облучение структур  $\gamma$ -квантами дозой до 1 МГр проводилось последовательным набором дозы на установке MPX- $\gamma$ -25M с источником  $^{60}\text{Co}$  при нормальных условиях. Мощность поглощенной дозы составляла 0,12 Гр/с.

**Результаты и их обсуждение.** Край пропускания исходной полиимидной пленки, обусловленный переходом электронов  $\pi$ -связей в возбужденное состояние [10], находился при  $\lambda \approx 520$  нм (рисунок 1). Нанесение DLC приводит к снижению коэффициента пропускания вблизи края поглощения; которое возрастает с увеличением толщины слоя DLC. Так, при толщине DLC-слоя от 2 до 10 нм наблюдается слабое ( $\leq 4\%$ ) снижение пропускания в интервале 550–900 нм (см. рисунок 1,  $\delta$ ), а при толщине слоя  $\text{DLC} > 400$  нм оно достигает 40 % (для  $\lambda \sim 1000$  нм). Даже при  $\lambda \geq 2000$  нм пропускание структуры DLC/полиимид не выходит на уровень поглощения полиимидной основы (см. рисунок 1,  $a$ ). Не обнаружено существенного влияния слоя DLC на интенсивность и положение полос поглощения полиимида в диапазоне длин волн 1500–2500 нм (см. рисунок 1), обусловленных обертонами, составными частотами валентных колебаний C–H-связей и комбинациями частот валентных колебаний атомов водорода с другими колебаниями [11].

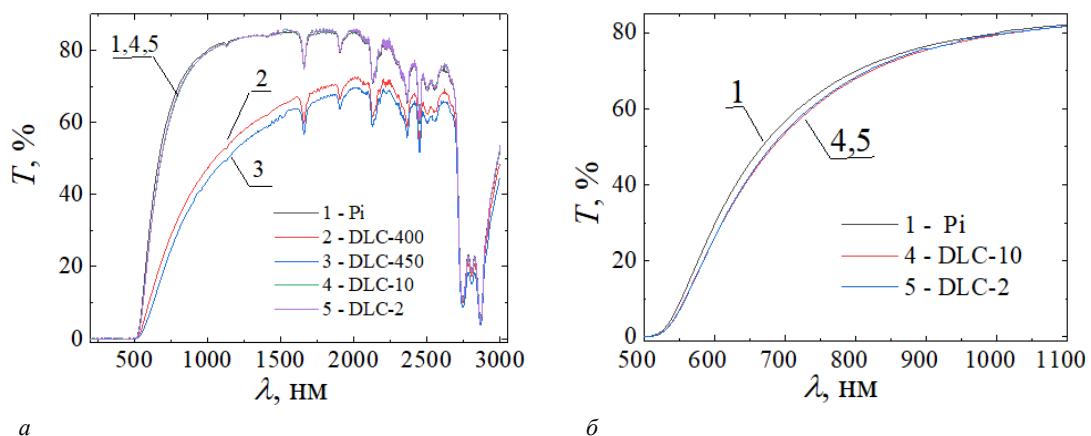


Рисунок 1. – Спектры пропускания пленки полиимида (1) и структур DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400 нм (2), 450 нм (3), 10 нм (4) и 2 (5) нм. Спектр в диапазоне 200–3000 нм (а) и близкрайевое пропускание (б)

При облучении  $\gamma$ -квантами существенные трансформации спектров пропускания наблюдались только в области  $\lambda = 2700$ –3100 нм и вблизи края поглощения. Интенсивность полос поглощения в интервале длин волн 1600–2500 нм практически не изменяется, что характерно как для пленок полиимида, так и для структур DLC/полиимид (рисунок 2). Изменение интенсивности полос поглощения при  $\lambda \approx 2745$  нм ( $3643 \text{ см}^{-1}$ ),  $\lambda \approx 2803$  нм ( $3568 \text{ см}^{-1}$ ),  $\lambda \approx 2870$  нм ( $3485 \text{ см}^{-1}$ ) в процессе  $\gamma$ -облучении подробно рассмотрено в работе [9], где показано, что указанные полосы обусловлены водой, образующейся в процессе синтеза полиимидной пленки, а радиационно-индуцированная модификация спектра в области колебаний O–H-связей (диапазон волновых чисел 3300–3700  $\text{cm}^{-1}$ ) связана с тем, что при облучении происходит взаимодействие аккумулированной воды с матрицей (полиимидом).

Вблизи края поглощения при  $\gamma$ -облучении исследовавшихся образцов – как полиимидных пленок, так и структур DLC/полиимид – наблюдалось увеличение пропускания (рисунок 2). Такое поведение является нетривиальным для полимерных пленок. Близкрайевое поглощение обусловливается структурными дефектами и обычно усиливается при высокогенергетическом облучении. Так, ранее нами на пленках полиимида (Kapton, DuPont de Nemours, Inc.) толщиной 50 мкм (подробности эксперимента см. [12]) при  $\gamma$ -облучении дозами 0–2900 кГр наблюдалось снижение пропускания в области края поглощения (рисунок 3, кривые 1, 2). В этой связи возникает вопрос о природе и условиях появления наблюдавшегося в настоящей работе нетривиального эффекта увеличения пропускания. Вероятнее всего, он связан с распадом метастабильных дефектов, сформированных в процессе изготовления полиимидной пленки.

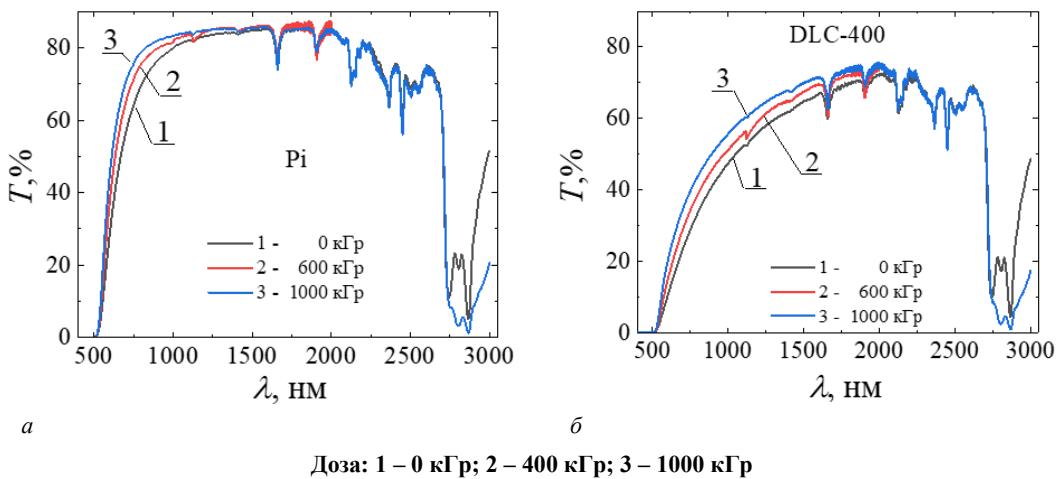


Рисунок 2. – Спектры пропускания облученных  $\gamma$ -квантами пленок полиимида (а) и структур DLC/полиимид (б) со слоем DLC толщиной 400 нм

Сравнение спектров пропускания различных пленок полиимида показывает, что у пленок, исследуемых в настоящей работе (рисунок 3, кривые 3–5), близкраевое пропускание существенно ниже, а сам край поглощения смешен в область больших длин волн по сравнению с пленками, использованными в работе [12] (рисунок 3, кривые 1, 2). Приведенные экспериментальные данные указывают на то, что в исследовавшихся полимерных пленках уже на стадии изготовления сформировались дефекты структуры, приводящие к снижению близкраевого пропускания. Причем эти дефекты нестабильны и распадаются на начальной стадии высокоэнергетического воздействия.

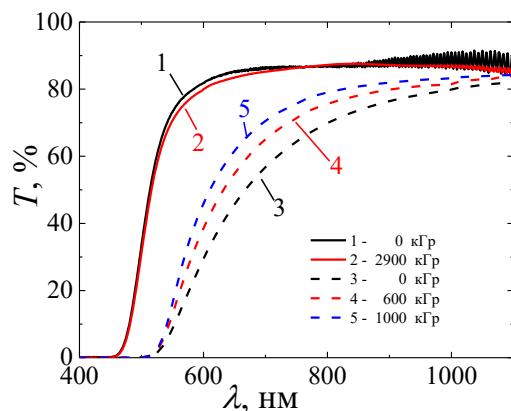


Рисунок 3. – Спектры пропускания облученных  $\gamma$ -квантами пленок полиимида из работы [12] (1, 2) и исследуемых образцов (3–5). Дозы указаны на рисунке

Не исключено, что эти дефекты могут быть связаны с дефектами, ответственными за полосы отражения с максимумами при  $\lambda_1 \approx 245$  и  $\lambda_2 \approx 308$  нм, которые наблюдались на спектрах отражения исследованных полиимидных пленок (рисунок 4). После  $\gamma$ -облучения полиимидной пленки наблюдалось снижение интенсивности полос, а при дозе 1 МГр – их полное исчезновение из спектра отражения (рисунок 5, а), что коррелирует с поведением близкраевого поглощения. Для сравнения, в работе [12] наблюдалась противоположная тенденция: эти полосы значительно усиливались при дозе облучения 6 кГр и впоследствии слабо изменялись до дозы 2,9 МГр, что также коррелировало с близкраевым поглощением.

DLC-покрытие приводит к изменению спектров отражения исходного полимера: для всех образцов наблюдается рост коэффициента отражения, связанный с отражением от поверхности DLC (рисунок 4). При этом в области непрозрачности полиимидной подложки ( $\lambda < 500$  нм) в структурах DLC/полиимид с толщиной DLC 400–450 нм (рисунок 4, кривые 2, 3) исчезают максимумы отражения при  $\lambda_1 \approx 245$  и  $\lambda_2 \approx 308$  нм, характерные для полиимида. В тоже время для структур DLC/полиимид с тонким (~10 нм) слоем DLC (рисунок 4, кривые 4, 5) наблюдается смещение пиков отражения исходного полимера в область больших длин волн. Наиболее вероятно, это обусловлено суммированием спектров отражения полиимида, содержащих характерные пики, и спектров пленок DLC, для которых в данном интервале длин волн коэффициент отражения  $R$  возрастает почти линейно. Последнее и смещает максимум отражения в область более длинных волн тем сильнее, чем больше влияние DLC. Таким образом, с учетом изложенного, метод оптической спектроскопии представляется эффективным для обнаружения тонких пленок DLC в случаях, когда их невозможно

идентифицировать другими методами, такими как рамановская, ИК-спектроскопия и др. В области  $\lambda > 500$  нм, образцы структур DLC/полиимид с тонким ( $\sim 10$  нм) слоем DLC (рисунок 4, кривые 4, 5) имеют несколько больший показатель отражения (около 1 %), но в целом повторяют спектр отражения полиимидной подложки. Структуры DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400–450 нм (рисунок 4, кривые 2, 3) имеют широкий максимум отражения при  $\lambda \approx 850$  нм, достигающий 25 % и 28 %, соответственно.

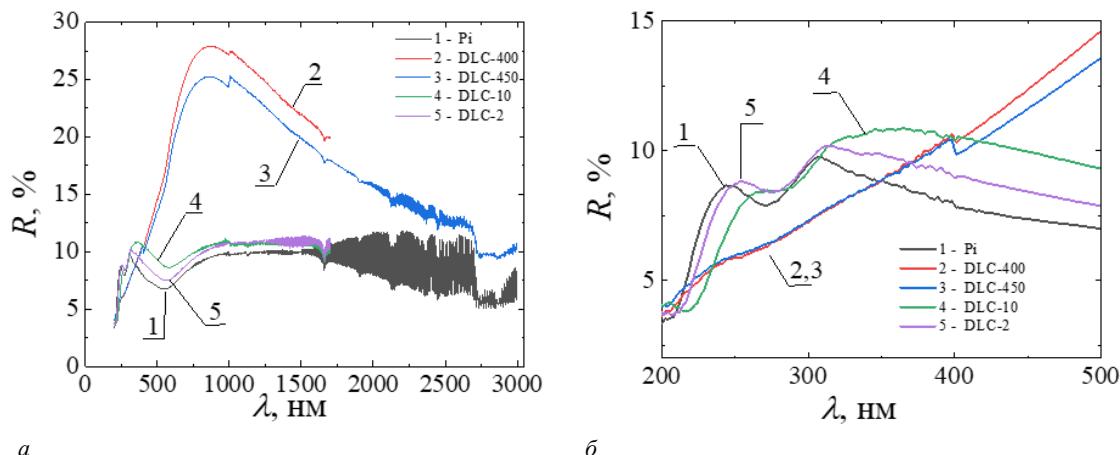
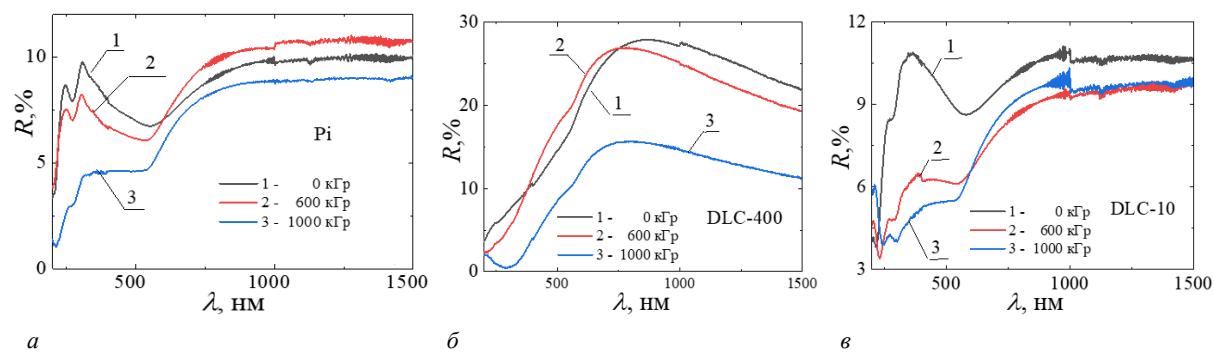


Рисунок 4. – Спектры отражения исходной пленки полиимида (1) и пленок полиимида с нанесенным слоем DLC (2–5) толщиной 400 нм (2), 450 нм (3), 9 нм (4) и 2 нм (5).

Измерение со стороны DLC. Спектр в диапазоне 200–3000 нм (а) и в области непрозрачности полиимида (б)

Структуры DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400–450 нм демонстрируют ослабление коэффициента отражения при облучении (рисунок 5). Одновременно наблюдается изменение спектра отражения. Так, при дозе облучения 1 МГр в диапазоне длин волн от 200 до 300 нм наблюдалось снижение коэффициента отражения с ростом длины волны, в то время как в исходных (необлученных) структурах в указанном диапазоне наблюдался рост коэффициента отражения. Это указывает на перестройку структуры DLC при облучении дозой 1 МГр, в то время как при дозе 600 кГр значимых изменений не наблюдается. Для тонких пленок DLC также наблюдается уменьшение отражения после облучения, что связано с ослаблением отражения как от полиимидной основы, так и от слоя DLC.



Доза: 1 – 0 кГр; 2 – 400 кГр; 3 – 1000 кГр

Рисунок 5. – Спектры отражения облученных  $\gamma$ -квантами пленок полиимида (а) и структур DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400 нм (б) и 10 нм (в)

При снятии спектров отражения со стороны полиимидной подложки (рисунок 6) наблюдается увеличение коэффициента отражения при  $\lambda < 500$  нм для структур DLC/полиимид со слоем DLC толщиной 400–450 нм. Отметим, что подобный эффект наблюдался ранее при термической обработке полиимидной пленки [12], а также в процессе ионной имплантации полиимида при измерении с неимплантированной стороной [13–16]. При длинах волн, больших 500 нм, спектр отражения обусловлен не только отражением от поверхности полиимида, но и отражением от границы раздела полиимид/DLC, что приводит к усилению отражения и появлению широкого максимума в этом диапазоне.

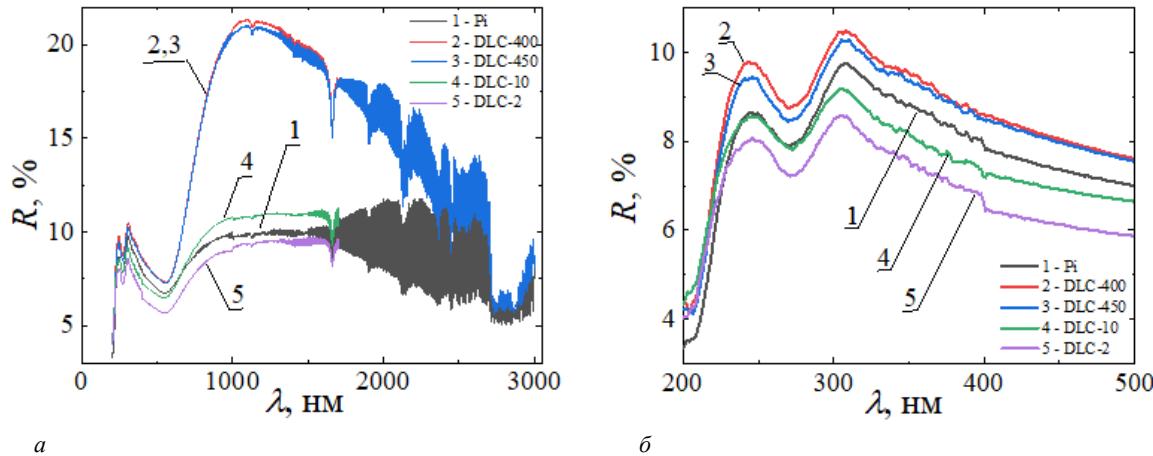


Рисунок 6. – Спектры отражения исследуемых образцов: исходная пленка ПИ (1); пленки ПИ со слоем DLC (2–5) толщиной 400 нм (2), 450 нм (3), 9 нм (4) и 2 нм (5). Измерение со стороны полиимида. Спектр в диапазоне 200–3000 нм (а) и в области непрозрачности полиимида (б)

Поскольку на коэффициент поглощения влияет как пропускание, так и отражение, проводилась оценка величины  $\alpha_\lambda d$  для пленок ПИ и DLC, где  $\alpha_\lambda$  – показатель поглощения, который может зависеть от длины волны,  $d$  – толщина поглощающего слоя. Оценка проводилась без учета многократного отражения с использованием законов Бугера – Ламберта. Так, для полиимида

$$\alpha_{\lambda,pi} d_{pi} = -\ln\left(\frac{T_{pi}}{1-R_{pi}}\right), \quad (3)$$

а для структур DLC/полиимид при измерении со стороны DLC

$$\alpha_{\lambda,pi} d_{pi} + \alpha_{\lambda,DLC} d_{DLC} = -\ln\left(\frac{T_{st}}{1-R_{st}}\right), \quad (4)$$

где  $d_{DLC}$ ,  $d_{pi}$  – толщины слоев DLC и полиимида;  
 $\alpha_{\lambda,DLC}$ ,  $\alpha_{\lambda,pi}$  – показатели поглощения слоев DLC и полиимида;  
 $T_{pi}$  – коэффициент пропускания пленки полиимида;  
 $T_{st}$  – коэффициент пропускания структур DLC/полиимид;  
 $R_{pi}$  – коэффициент отражения пленки полиимида;  
 $R_{st}$  – коэффициент отражения структур DLC/полиимид, измеренный со стороны DLC.

Тогда для DLC с учетом уравнений (3) и (4)

$$\alpha_{\lambda,DLC} d_{DLC} = \ln\left(\frac{T_{pi}}{1-R_{pi}}\right) - \ln\left(\frac{T_{st}}{1-R_{st}}\right) = \ln\left(\frac{T_{pi}}{T_{st}} \frac{1-R_{st}}{1-R_{pi}}\right). \quad (5)$$

На рисунке 7 показаны спектры величины  $\alpha_\lambda d$ , рассчитанной по формуле 3 для полиимидной основы и по формуле 5 – для образцов с DLC-слоем. Как видно, для полиимидной пленки действительно происходит изменение около края пропускания: спектр показателя поглощения становится более резким, с выходом на значения необлученной пленки по мере увеличения длины волны. Для DLC-слоев после облучения наблюдается уменьшение показателя поглощения в области относительно коротких длин волн по сравнению с необлученным состоянием.

Полиимиды являются радиационно-стойкими полимерами. Заметное изменение их структуры, приводящее к снижению интенсивности полос поглощения, обусловленных колебаниями скелета ароматического кольца, имидного цикла, ароматических C–H-связей и имидных C=O-связей, наблюдается только при дозах выше 30 МГр [17]. Этим обстоятельством обусловлена относительная стабильность полос поглощения в интервале длин волн 1600–2500 нм при использовавшихся в работе дозах облучения.

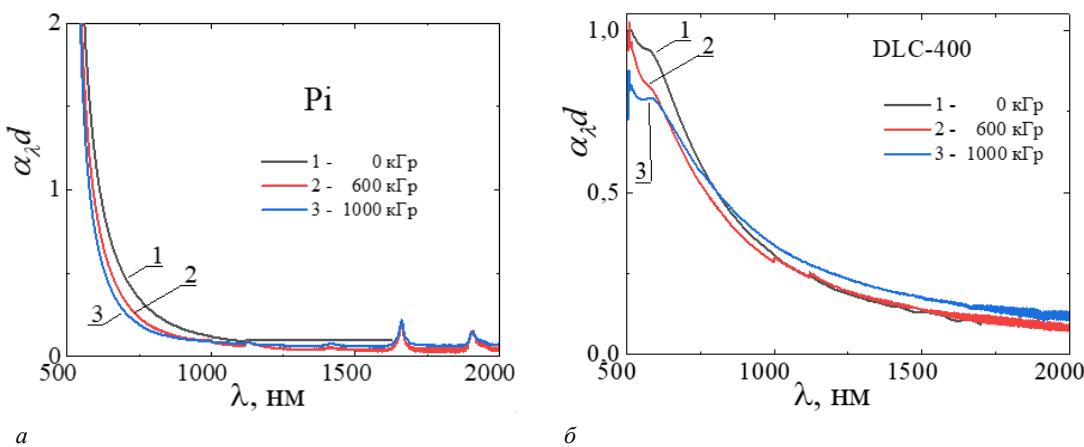


Рисунок 7. – Спектры  $\alpha_{\lambda}d$  исходной пленки полиимида (а) и DLC-покрытия толщиной 400 нм (б):  
без облучения (1 – черная кривая); после облучения дозами 600 кГр (2 – красная кривая)  
и 1 МГр (3 – синяя кривая)

В работе [9] показано, что в пленках полиимида и структурах DLC/полиимиид при дозах облучения до 1 МГр основные радиационно-индуцированные процессы протекают на побочных продуктах синтеза полиимида и молекулах остаточного растворителя. Вероятнее всего, эти побочные продукты обусловливают образование метастабильных дефектов в процессе изготовления полиимиидной пленки, приводящее к снижению пропускания в области края поглощения. В процессе облучения эти дефекты распадаются, что приводит к увеличению близкрайевого пропускания.

Следует отметить, что после  $\gamma$ -облучения ослабевает адгезия DLC-покрытия к полиимиидной подложке, вплоть до его отслоения в процессе оптических измерений при дозе 1 МГр. У контрольных образцов, не подвергавшихся облучению, подобного эффекта не наблюдалось. Это исключает влияние длительного хранения на адгезионные свойства пленок DLC и указывает на активные радиационно-индуцированные процессы на границе раздела DLC/полиимиид.

**Заключение.** При исследовании структур DLC/полиимиид, облученных  $\gamma$ -квантами, экспериментально обнаружено увеличение пропускания вблизи края поглощения, связанное как с распадом метастабильных «ростовых» дефектов полиимиидной основы, так и с перестройкой DLC-покрытия. Обнаружено изменение спектров отражения DLC-покрытия при  $\gamma$ -облучении, что проявляется в уменьшении коэффициента отражения с ростом дозы облучения. А при дозе облучения 1 МГр в диапазоне длин волн от 200 до 300 нм наблюдалось снижение коэффициента отражения с ростом длины волны, в то время как в исходных (необлученных) структурах в указанном диапазоне наблюдался рост коэффициента отражения. Вероятнее всего, это связано с перестройкой структуры DLC в процессе облучения, что согласуется с изменением величины  $\alpha_{\lambda}d$ . Показано, что оптическая спектроскопия является эффективным методом для обнаружения тонких пленок DLC при невозможности наблюдения таких покрытий другими методами. Обнаружено ослабление адгезии DLC-покрытия к полиимиидной подложке, вплоть до его отслоения при дозе 1 МГр.

Работа выполнялась в рамках государственной программы научных исследований ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», 2021–2025 годы, «Микро- и наноэлектроника» (№ г. р. 20212560).

Авторы выражают благодарность Г. Е. Ремневу и С. А. Линнику за предоставленные образцы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Future upgrade and physics perspectives of the ALICE TPC / T. Gunji // Nuclear Physics A. – 2014. – Vol. 931. – P. 1152–1157. – DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2014.08.027](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2014.08.027).
2. Medical Applications of the GEMPix / J. Leidner, F. Murtas, M. Silari et al. // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, iss. 1. – P. 440. – DOI: [10.3390/app11010440](https://doi.org/10.3390/app11010440).
3. Development of GEM detector for tokamak SXR tomography system: Preliminary laboratory tests / M. Chernyshova, T. Czarski, K. Malinowski et al. // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 123. – P. 877. – DOI: [10.1016/j.fusengdes.2017.03.107](https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.107).
4. Improving the energy resolution of a ThGEM detector by incorporating an additional electrode composed of a metallised track-etched membrane / I. A. Zur, Y. Y. Shmanay, A. A. Kharchnka et al. // Radiation Physics and Chemistry. – 2025. – Vol. 235. – P. 112694. – DOI: [10.1016/j.radphyschem.2025.112694](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112694).
5. Raether H. Electron Avalanches and Breakdown in Gases. – Washington: Butterworths, 1964. – 191 p.
6. Зависимость удельного электросопротивления на переменном токе слоев / И. А. Зур, В. Ю. Леоненко, А. К. Федотов и др. // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – С. 246. – DOI: [10.61011/FTT.2025.02.59977.324](https://doi.org/10.61011/FTT.2025.02.59977.324).

7. Influence of humidity on the electrophysical properties and charge transfer mechanism in nanoscale diamond-like carbon coatings / I. A. Zur, J. A. Fedotova, A. S. Fedotov et al. // Carbon. – 2025. – Vol. 120100. – DOI: [10.1016/j.carbon.2025.120100](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2025.120100).
8. Erosion mechanisms of DLC coatings deposited on polyimide and silica substrates when exposed to a pulsed gas discharge / I. Zur, Y. Shmanay, J. Fedotova et al. // Diamond and Related Materials. – 2024. – Vol. 142. – P. 110802. – DOI: [10.1016/j.diamond.2024.110802](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.110802).
9. Радиационно-индущиванные процессы в структурах DLC/полиимид при облучении  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  / А. А. Харченко, Ю. А. Федотова, И. А. Зур и др. // Химия высоких энергий. – 2022. – Т. 56, № 5. – С. 378–387. – DOI: 10.31857/S0023119322050059.
10. Дифракционные фильтры на основе полииimidных и полиэтиленнафталатных трековых мембран / А. В. Митрофанов, П. Ю. Апель, И. В. Блонская и др. // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, № 9. – С. 121–127.
11. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия / Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
12. Модификация оптических характеристик пленок полииимида радиационно-термической обработкой / Ю. А. Бумай, Д. И. Бринкевич, Н. И. Долгих и др. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2013. – № 1. – С. 92–96.
13. Пленки полииимида, имплантированные ионами бора / А. А. Харченко, С. А. Вабищевич, Д. И. Бринкевич и др. // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2014. – № 4. – С. 113–118.
14. Радиационно-стимулированная модификация спектров отражения за областью пробега ионов в пленках полииимида / Д. И. Бринкевич, А. А. Харченко, С. Д. Бринкевич и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2017. – № 8. – С. 17–22. – DOI: [10.7868/S0207352817080029](https://doi.org/10.7868/S0207352817080029).
15. Оптические характеристики пленок полииимида, имплантированных ионами никеля / Ю. А. Бумай, Н. И. Долгих, А. А. Харченко и др. // Журн. прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81, № 2. – С. 192–196.
16. Оптические характеристики пленок полииимида, имплантированных ионами  $\text{B}^+$  и  $\text{Ag}^+$  / Ю. А. Бумай, Н. И. Долгих, А. А. Харченко и др. // Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2011. – № 2. – С. 41–44.
17. Оптические и прочностные свойства жертвенных слоев на основе полииimidных пленок / С. А. Вабищевич, Н. В. Вабищевич, Д. И. Бринкевич и др. // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2022. – № 11. – С. 53–58.

Поступила 16.09.2025

## OPTICAL PROPERTIES OF DLC/POLYIMIDE STRUCTURES IRRADIATED WITH $^{60}\text{CO}$ $\gamma$ -QUANTA

A. KHARCHANKA<sup>1</sup>, D. BRINKEVICH<sup>2</sup>, I. ZUR<sup>1</sup>, J. FEDOTOVA<sup>1</sup>, Y. SHMANAY<sup>1</sup>,  
Y. MITSKEVICH<sup>1</sup>, S. BRINKEVICH<sup>3</sup>, S. VABISHCHEVICH<sup>4</sup>, E. BURYI<sup>5</sup>, S. LASTOVSKII<sup>5</sup>

<sup>1</sup>(Research Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk)

<sup>2</sup>(Belarusian State University, Minsk)

<sup>3</sup>(LLC "My Medical Center – High Technologies", Vsevolozhsk, Russia)

<sup>4</sup>(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

<sup>5</sup>(Scientific-Practical Materials Research Centre, NAS of Belarus)

The transmission spectrum measurement methods were used to study the DLC/polyimide structures irradiated with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -quanta with a dose of up to 1 MGy and formed by the method of high-current pulsed magnetron sputtering of GL-1 graphite. The absorbed dose rate was 0,12 Gy/s. An increase in transmission near the absorption edge of the polyimide film and DLC/polyimide structures during  $\gamma$ -quanta irradiation was experimentally established. This effect is more pronounced in the DLC/polyimide structures and is caused by both the decay of metastable "growth" defects in the polyimide base and the restructuring of the DLC coating. A change in the reflection spectra of the DLC coating during  $\gamma$ -irradiation was detected, which is manifested in a decrease in the reflection coefficient with an increase in the irradiation dose. At a 1 MGy irradiation dose in the wavelength range from 200 to 300 nm, a decrease in the reflectivity with increasing wavelength was observed, while in the original (non-irradiated) structures in the specified range, an increase in the reflectivity was observed. Most likely, this is due to the rearrangement of the DLC structure during irradiation, which is consistent with the change in the  $\alpha_{\text{d}}$  value. It is shown that optical spectroscopy is an effective method for detecting thin DLC films, when it is impossible to observe such coatings by other methods. Weakening of the adhesion of the DLC coating to the polyimide substrate, up to peeling off at 1 MGy, was detected.

**Keywords:** polyimide, diamond-like coatings, DLC,  $\gamma$ -irradiation, residual solvent.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЕДАНСА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НАД УГЛЕВОДОРОДАМИ В РЕЖИМЕ ДВУХЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ

канд. техн. наук, доц. В. Ф. ЯНУШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц. О. В. ТАНАНА,

С. П. АЛИЕВА, Е. С. БУРДИК

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

канд. техн. наук, доц. Чжисиуи ЛЮ

(Чанъаньский университет, Китай)

Проведено моделирование импеданса поверхности слоя над углеводородами в режиме двухчастотного воздействия с преобладанием низкочастотной составляющей зондирующего сигнала. Исследованы компоненты сопротивления поверхности слоя над углеводородами, которые образуют симметричную матрицу. Определены зависимости модулей поверхности слоя над углеводородами от концентраций электронов, ионов и частоты высокочастотной составляющей зондирующего сигнала. Проведено моделирование частотных зависимостей модулей импеданса исследуемых сред над залежами и влияния диэлектрической проницаемости слоя. Установлены резонансные частоты для составляющих сопротивления поверхности слоя над углеводородами, которые могут служить критерием для идентификации месторождений нефти и газа. Полученные результаты по определению импеданса поверхности слоя можно рекомендовать для использования в системах георазведки при обнаружении месторождений и скоплений углеводородов.

**Ключевые слова:** углеводородная залежь, поверхность слой, двухчастотный сигнал, электромагнитные волны.

**Введение.** Актуальность применения методов поиска и разведки месторождений нефти и газа обусловлена стратегической задачей обеспечения энергетических комплексов современных государств ключевыми видами сырья. [1]. Все это требует рационального подхода к организации комплекса поисково-разведочных работ по обнаружению углеводородных залежей (УВЗ) [2]. Проведение испытаний методами электроразведки дает возможность оценить ресурсы углеводородов по электромагнитным данным [3]. Технология мониторинга CSAMT в сочетании с алгоритмом инверсии трехмерного покадрового электрического поля хорошо подходит для крупномасштабных трехмерных измерений в разнообразных условиях [4]. Поверхностные электромагнитные волны находят широкое применение для решения различных практических задач [5].

Получили распространение технология и методики, основанные на использовании геофизических методов исследования характеристик земной коры [6]. Уровень идентификации по обнаружению УВЗ можно повысить за счет регистрации собственного излучения залежей [7]. Методы с использованием двухчастотных, модулированных и импульсных сигналов позволяют расширить возможности тестирования поверхности слоя над углеводородами [8]. На практике используются различные режимы зондирования сред: например, метод вертикальных токов [9] и метод электрорезонансного зондирования, применяемый в геолого-геофизических и инженерно-геологических исследованиях [10].

Сигнатура тонкого, изолированного резистивного горизонта вычисляется с использованием квазианалитического решения для одномерной Земли в ответ на возбуждение горизонтальной электрической дипольной антенной [11]. Широко используются различные виды электроразведки углеводородов [12]. Методы вызванной поляризации позволяют исследовать вторичные электромагнитные волны (ЭМВ) в земных средах под воздействием источника излучения<sup>1</sup>. В отличие от методов с естественным источником, метод искусственного источника ЭМВ может быть разработан для оптимизации разрешения и минимизации взаимодействия с локальной структурой [13]. Режимы зондирования поверхности слоя над УВЗ с использованием двухчастотных сигналов применяются в связи с их способностью повышать точность методов поиска [14].

**Методика исследований.** Целью данной работы является установление закономерностей поведения поверхности слоя над УВЗ в режиме воздействия на него низкочастотного (НЧ) сигнала вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) = E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t, \quad (1)$$

где  $E_1, E_2, \omega_1 = 2\pi f_1, \omega_2 = 2\pi f_2$  – соответственно амплитуды и частоты двух сигналов.

<sup>1</sup> Илаев М. Г. Метод вызванной поляризации [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cnshb.ru/akdil/0042/base/RM/004621.shtml> (дата обращения: 09.06.2015).

Сопротивление поверхностного слоя над углеводородами представляет собой симметричную матрицу. В результате анализ сводится к определению двух компонент, которые рассчитываются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}} \left( \sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L} \right), \\ \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}} \left( \sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L} \right).\end{aligned}\quad (2)$$

Для расчетов использованы компоненты тензора  $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$ ; комбинационные составляющие тензора для правой и левой поляризаций ЭМВ  $\dot{\epsilon}R, \dot{\epsilon}L$ ; гиротропная частота  $\omega_{\Gamma_i}$ ; плазменная частота  $\omega_{\Pi_i}$ ; столкновительных процессов  $v_i$ ; относительная диэлектрическая проницаемость анизотропной среды (АС)  $\epsilon_r$ ; проводимость поверхностного слоя  $\sigma_r$ ; диэлектрическая постоянная  $\epsilon_0$ ; коэффициенты отношения амплитуд и частот  $k_E$  и  $k_\omega$  [8].

Методика исследований заключается в определении составляющих сопротивления поверхностного слоя над углеводородами (2) в зависимости от концентрации частиц  $N$ , фигурирующей в формуле для плазменной частоты  $\omega_{\Pi_i}$  [8], и частоты  $f_2$ .

**Результаты исследований.** Проведенный анализ моделей УВЗ (модели Пирсона, Дмитриева, Московичева, Бабкина) показал, что для исследования углеводородов представляет интерес изучение физики процессов в поверхностном слое с учетом столкновительных явлений разноименных частиц [8]. В данной области определяется величина скорости миграционных эффектов заряженных частиц с учетом влияния концентрации химических элементов, составляющих структуру участков вертикального разреза профиля над залежью. Результаты теоретических расчетов коррелируются с полученными данными полевых испытаний. Для каждого конкретного практического случая применения электроразведки уточняются свои геологические особенности, корректирующие параметры и аппаратура.

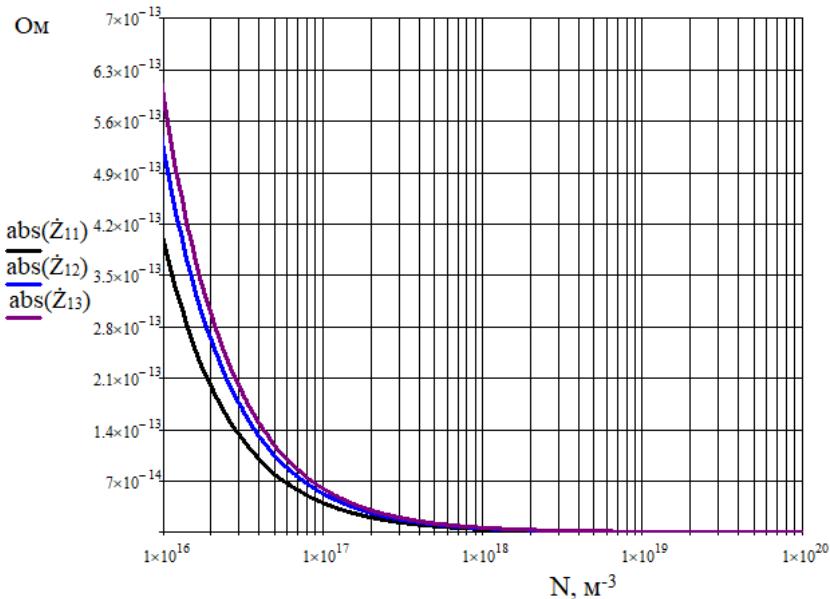
Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами  $|\dot{Z}_{11}|$  для концентраций электронов и ионов  $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$  и высокочастотных составляющих  $f_2 = (1 \cdot 10^8, 3 \cdot 10^8, 5 \cdot 10^8) \text{ Гц}$  приведены на рисунке 1. При расчетах использовались следующие значения: диэлектрическая проницаемость поверхностного слоя  $\epsilon_r = 10$ , электрическая проводимость  $\sigma_r = 10^{-3} \text{ См/м}$ , частота столкновения частиц  $v = 2\pi \cdot 10^9 \text{ рад/с}$ , коэффициенты отношения амплитуд и частот  $k_E = 10^{-1}, k_\omega = 10^{-6}$ . Происходит уменьшение модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами с ростом концентраций электронов и ионов. Особенно влияние концентрации частиц наблюдается на отрезке  $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$ . В диапазоне  $N_e = N_i = (10^{17} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$  происходит изменение данной характеристики с меньшей крутизной. На отрезке  $N_e = N_i = (10^{18} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$  влияние концентрации частиц практически отсутствует.

При увеличении частоты бигармонического сигнала  $f_2$  значение модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами  $|\dot{Z}_{11}|$  возрастает. Возможность вариации частоты электромагнитного излучения радиотехнической системы позволяет с помощью стационарного передатчика двухчастотной ЭМВ вертикальной поляризации определять сопротивление поверхностного слоя области предполагаемой залежи. Возможно построение приемника отраженного излучения по двухканальной схеме. По уровню принимающего отраженного излучения осуществляется измерение величины модуля сопротивления поверхностного слоя на заданных частотах при расположении антенных излучателей вдоль исследуемого профиля земной поверхности в точках измерения. Для систем поиска следует рекомендовать выбор точек проведения измерений: обе точки определения модуля сопротивления поверхностного слоя находятся вне зоны УВЗ, одна точка определения модуля находится над зоной УВЗ, вторая точка определения модуля – вне зоны УВЗ, обе точки определения модуля находятся над зоной УВЗ. Таким образом, учитывая вариацию концентраций частиц в исследуемой частотной области зондирующих сигналов, возможно расширить режимы тестирования исследуемого профиля земной поверхности и улучшить эффективность проведения поисковых работ.

Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами  $|\dot{Z}_{11}|$  для концентраций электронов и ионов  $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$  и высокочастотных составляющих  $f_2 = (2 \cdot 10^9, 6 \cdot 10^9, 10 \cdot 10^9) \text{ Гц}$  приведены на рисунке 2. Проявляются те же закономерности поведения модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами, что и для приведенного выше диапазона частот, за исключением численных значений. Для высокочастотных составляющих  $f_2 = (6 \cdot 10^9, 10 \cdot 10^9) \text{ Гц}$  зависимости модуля сопротивления

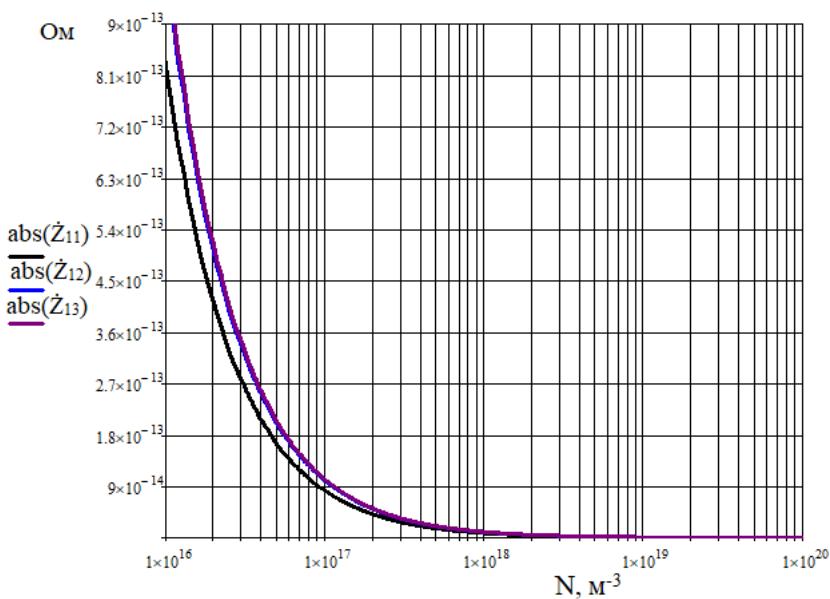
поверхностного слоя над углеводородами  $|\dot{Z}_{11}|$  от концентраций электронов и ионов практически совпадают. Дополнительно возможно расширить режимы электромагнитного облучения исследуемого профиля земной поверхности при вариации значений коэффициентов отношения амплитуд и частот.

Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами  $|\dot{Z}_{11}|$  от частоты  $f_2$  при значениях диэлектрической проницаемости слоя  $\epsilon_r = (5, 12, 25)$  представлены на рисунке 3. При расчетах применялись концентрации электронов и ионов  $N_e = 10^{16} \text{ м}^{-3}$ ,  $N_i = 10^{18} \text{ м}^{-3}$  соответственно, коэффициенты отношения амплитуд и частот  $k_E = 10^{-2}$ ,  $k_\omega = 10^{-5}$ .



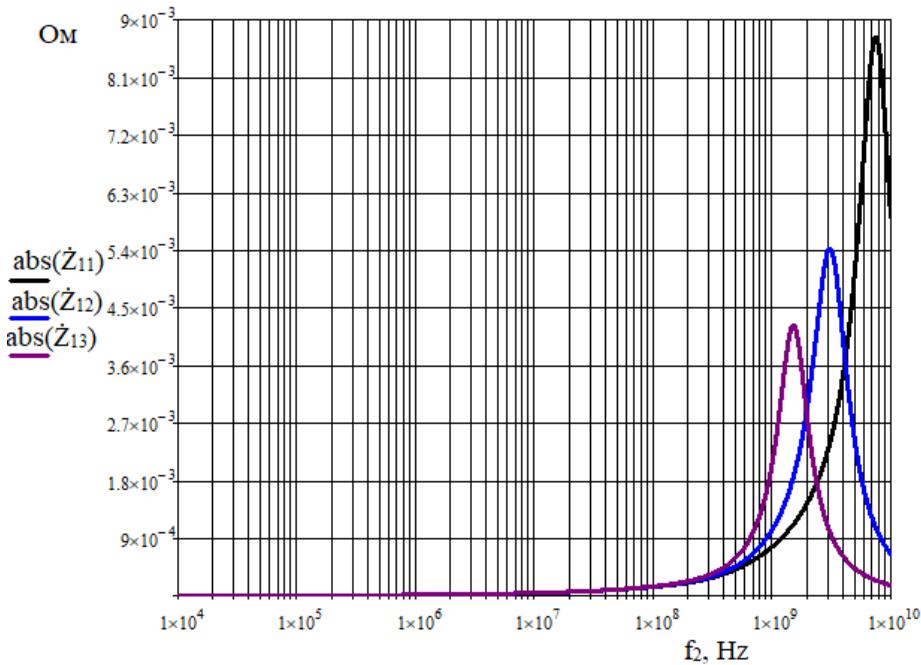
$|\dot{Z}_{11}|$  – для  $f_2 = 1 \cdot 10^8 \text{ Гц}$ ;  $|\dot{Z}_{12}|$  – для  $f_2 = 3 \cdot 10^8 \text{ Гц}$ ;  $|\dot{Z}_{13}|$  – для  $f_2 = 5 \cdot 10^8 \text{ Гц}$

Рисунок 1. – Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами от концентрации частиц



$|\dot{Z}_{11}|$  – для  $f_2 = 2 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ;  $|\dot{Z}_{12}|$  – для  $f_2 = 6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ ;  $|\dot{Z}_{13}|$  – для  $f_2 = 10 \cdot 10^9 \text{ Гц}$

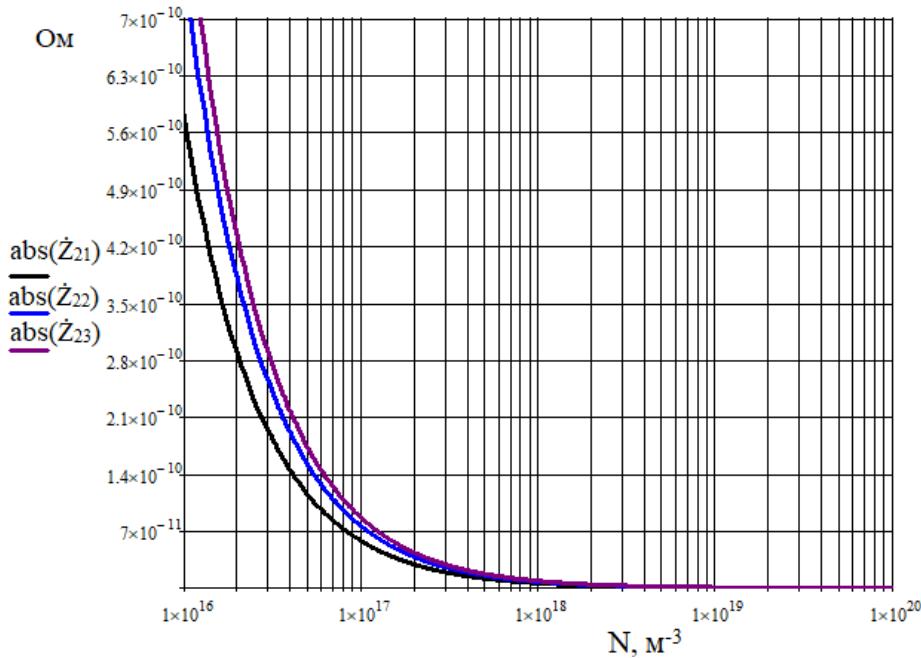
Рисунок 2. – Зависимости модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами от концентрации частиц



$|\dot{Z}_{11}|$  – для  $\epsilon_r = 5$ ;  $|\dot{Z}_{12}|$  – для  $\epsilon_r = 12$ ;  $|\dot{Z}_{13}|$  – для  $\epsilon_r = 25$ ;

Рисунок 3. – Зависимости модуля сопротивления поверхности слоя над углеводородами от частоты  $f_2$

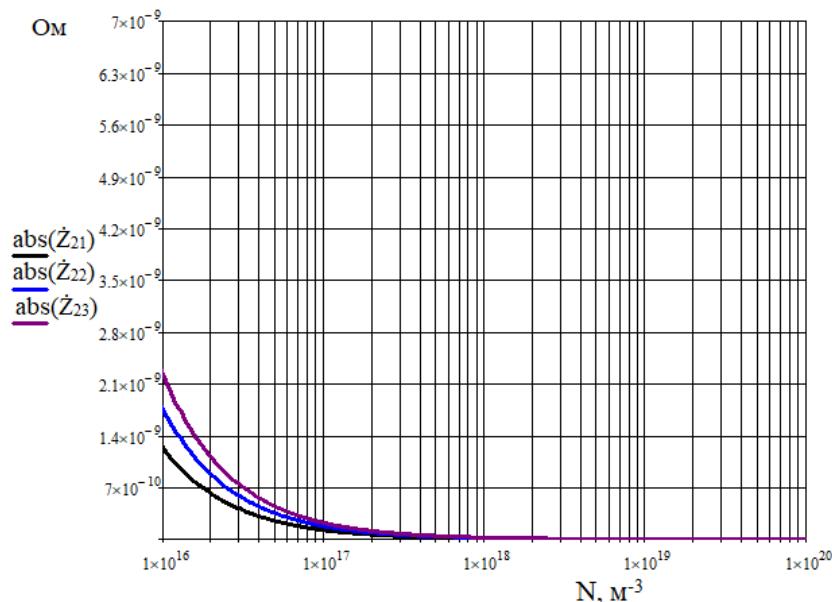
Зависимости модуля сопротивления поверхности слоя над углеводородами от концентрации частиц для частот  $f_2 = (1 \cdot 10^8, 3 \cdot 10^8, 5 \cdot 10^8)$  Гц и  $f_2 = (2 \cdot 10^9, 6 \cdot 10^9, 10 \cdot 10^9)$  Гц приведены на рисунках 4, 5 соответственно. На рисунке 6 показана зависимость модуля сопротивления поверхности слоя над углеводородами от частоты для диэлектрической проницаемости слоя  $\epsilon_r = (5, 12, 25)$ .



$|\dot{Z}_{21}|$  – для  $f_2 = 1 \cdot 10^8$  Гц;  $|\dot{Z}_{22}|$  – для  $f_2 = 3 \cdot 10^8$  Гц;  $|\dot{Z}_{23}|$  – для  $f_2 = 5 \cdot 10^8$  Гц

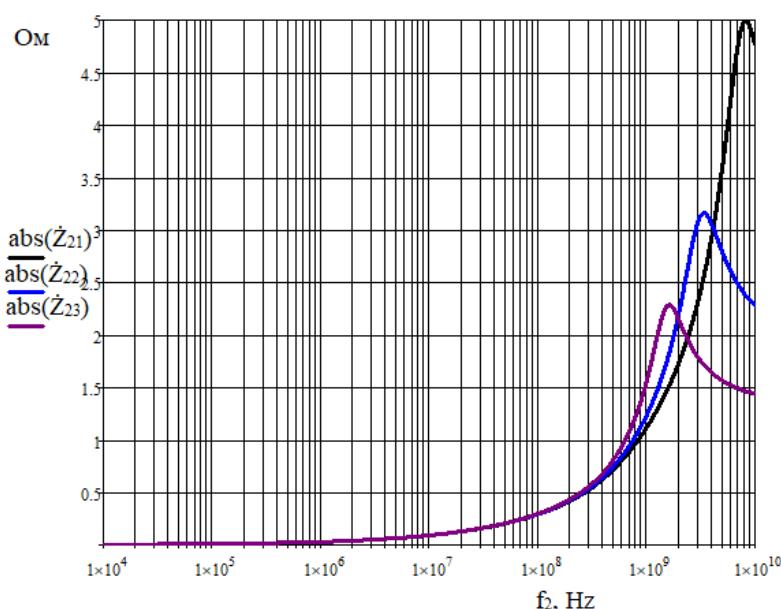
Рисунок 4. – Зависимости модуля сопротивления поверхности слоя над углеводородами от концентрации частиц

Расчет проводился для коэффициентов отношения амплитуд и частот  $k_E = 10^{-1}$ ,  $k_\omega = 10^{-6}$ . Наблюдаются максимумы значений модуля сопротивления поверхности слоя над углеводородами на частотах 1...10 ГГц. С увеличением диэлектрической проницаемости слоя резонансная частота и значение данной компоненты уменьшаются. Следует отметить, что происходит уменьшение модуля сопротивления поверхности слоя над углеводородами с ростом концентраций электронов и ионов. На отрезке  $N_e = N_i = (10^{16} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$  исследуемая характеристика изменяется с большим значением крутизны. В диапазоне  $N_e = N_i = (10^{17} - 10^{18}) \text{ м}^{-3}$  происходит изменение данной характеристики с меньшей крутизной.



$|\dot{Z}_{21}|$  – для  $f_2 = 2 \cdot 10^9$  Гц;  $|\dot{Z}_{22}|$  – для  $f_2 = 6 \cdot 10^9$  Гц;  $|\dot{Z}_{23}|$  – для  $f_2 = 10 \cdot 10^9$  Гц

Рисунок 5. – Зависимости модуля сопротивления поверхности слоя над углеводородами от концентрации частиц



$|\dot{Z}_{21}|$  – для  $\epsilon_r = 5$ ;  $|\dot{Z}_{22}|$  – для  $\epsilon_r = 12$ ;  $|\dot{Z}_{23}|$  – для  $\epsilon_r = 25$ ;

Рисунок 6. – Зависимости модуля сопротивления поверхности слоя над углеводородами от частоты

На отрезке  $N_e = N_u = (10^{18} - 10^{20}) \text{ м}^{-3}$  влияние концентрации частиц на значения модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами не проявляется.

Наблюдаются максимумы значений модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами  $|\dot{Z}_{21}|$  на частотах 1...10 ГГц. Явление резонанса выражено не так контрастно, как для предыдущего случая. С увеличением диэлектрической проницаемости слоя резонансная частота и значение данной компоненты уменьшаются.

Использование измерений модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами для обнаружения анизотропных сред находит применение в геофизике. Сопротивление поверхностного слоя отличается от сопротивления однородного слоя и может применяться в качестве критерия для оценки различий в отражательных характеристиках данных слоев, а также для дифференциации подстилающих поверхностей геопрофиля на основании измерения характеристик антенн.

Использование значения сопротивления поверхностного слоя широко применяется при решении задач распространения радиоволн над УВЗ, дифракции и определения структуры ЭМВ вблизи границы раздела двух сред [15; 16]. По величине сопротивления можно оценить характеристики используемых в системах георазведки антенных излучателей, которые имеют фиксированное положение в точках измерения импеданса относительно границы разделения сред при изменении свойств поверхностного слоя. Это позволяет проводить качественную оценку свойств вмещающих пород над углеводородами. Количественную оценку свойств пород над УВЗ можно осуществить, выполнив дополнительные точные расчеты изменений электродинамических характеристик поверхностного слоя [17].

Полученные значения резонансных частот можно рекомендовать для использования в системах георазведки при обнаружении месторождений и скоплений углеводородов. Значения сопротивлений поверхностного слоя  $|\dot{Z}_{11}|$  и  $|\dot{Z}_{21}|$  могут быть применены для построения двухканальных устройств измерения импеданса исследуемых сред. Возможно изменение НЧ составляющей сигнала за счет изменения коэффициентов отношения амплитуд и частот.

Резонансный характер поведения частотной зависимости рассчитанных компонентов  $|\dot{Z}_{11}|$  и  $|\dot{Z}_{21}|$  коррелирует с закономерностями проявления аномалий частотных характеристик коэффициентов отражения от среды над УВЗ, фазовые изменения компонентов матрицы сопротивления поверхностного слоя свидетельствуют об увеличении мнимой части импеданса на частотах, соответствующих максимальным значениям модулей  $|\dot{Z}_{11}|$  и  $|\dot{Z}_{21}|$ . Таким образом, на указанных частотах происходит рост значений модуля и фазы за счет влияния мнимых составляющих в компонентах матрицы сопротивления поверхностного слоя. Это говорит о том, что на данных частотах поверхность слоя над углеводородами из реактанской среды переходит в поглощающую.

**Заключение.** Проведенный теоретический анализ взаимодействия ЭМВ с поверхностным слоем над углеводородами в режиме НЧ-сигналов показал следующее:

- рост концентраций электронов и ионов приводит к уменьшению модуля сопротивления поверхностного слоя над углеводородами, что особенно проявляется на отрезке  $N_e = N_u = (10^{16} - 10^{17}) \text{ м}^{-3}$ , причем крутизна характеристики на этом участке максимальная;
- при увеличении частоты бигармонического сигнала  $f_2$  значение модулей поверхностного слоя над углеводородами  $|\dot{Z}_{11}|$  и  $|\dot{Z}_{21}|$  возрастает;
- сопротивления поверхностного слоя над углеводородами  $|\dot{Z}_{11}|$  и  $|\dot{Z}_{21}|$  имеют максимумы значений модуля на частотах 1...10 ГГц, данные резонансные явления могут служить критерием для идентификации углеводородов;
- для повышения уровня точности поиска и обнаружения УВЗ могут быть применены двухканальные системы георазведки, основанные на измерении сопротивлений поверхностного слоя  $|\dot{Z}_{11}|$  и  $|\dot{Z}_{21}|$ , что позволяет расширить режимы тестирования исследуемых сред.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мухин В. М. Стадийность и основы методики поиска и разведки месторождений нефти и газа: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2008. – 32 с.
2. Никонов Н. И. Рациональный комплекс поисково-разведочных работ на нефть и газ. – Ухта: УГТУ, 2006. – 312 с.
3. Поспев А. В. Возможность оценки ресурсов углеводородов юга Сибирской платформы по электромагнитным данным // География и природные ресурсы. – 2016. – № 6. – С. 139–143.
4. Research on 3D Time-Lapse Electric Field Inversion Algorithm for Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric Method / Q. Sun, H. Tan, W. Wan et al. // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, iss. 14. – Art. ID 1560. – DOI: [10.3390/app14041560](https://doi.org/10.3390/app14041560).

5. Альтшуллер Е. Ю., Кац Л. И., Попов В. В. Поверхностные электромагнитные волны в технике СВЧ // Обзор. Серия 1. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1983. – С. 179–230.
6. Хмелевской В. К. Геофизические методы исследования земной коры: в 2 кн. – Дубна: Междунар. ун-т природы, общества и человека «Дубна», 1999. – Кн. 2: Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика: учеб. пособие. – С. 94–128.
7. Хасанов Д. И. Введение в электроразведку: пособие для самостоятельного изучения для слушателей курсов повышения квалификации специальности «Геофизика». – Казань: Казанский гос. ун-т, 2009. – 75 с.
8. Янушкевич В. Ф. Электромагнитные методы поиска и идентификации углеводородных залежей. – Новополоцк, ПГУ, 2017. – 232 с.
9. Могилатов В. С., Балашов Б. П. Зондирования вертикальными токами. – Новосибирск: СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 240 с.
10. Electric-resonance sounding method and its application for, geological-geophysical and engineering-geological investigations / S. P. Levashov [et al.] // 66<sup>th</sup> EAGE Conference and Technical Exhibition, Paris, France, 7–10 June 2003 (CD-ROM Abstracts volume).
11. Weiss C. J. The fallacy of the “shallow-water problem” in marine CSEM exploration // Geophysics. – 2007. – Vol. 72, iss. 6. – P. A93–A97.
12. Хмелевской В. К. Электроразведка. – М.: МГУ, 1984. – 422 с.
13. Boerner D. E. Controlled source electromagnetic deep sounding: theory, results and correlation with natural source results: Invited Rewiew Paper for the 10<sup>th</sup> Workshop on EM Induction Ensenada Mexico // Surveys in Geophysics. – 1991. – Vol. 13. – P. 435–488.
14. Interaction of two-frequency electromagnetic waves with anisotropic media over hydrocarbon accumulation / V. F. Yanushkevich, D. A. Dauhala, A. L. Adamovich et al. // Journal of Physics: Conf. Ser. – 2022. – Vol. 2373, iss. 5. – Art. ID 052016. – DOI: [10.1088/1742-6596/2373/5/052016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/5/052016).
15. Гололобов Д. В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. – Минск: Бестпринт, 2009. – 185 с.
16. Хаскинд М. Д. Распространение электромагнитных волн над гиротропной средой // Радиотехника и электроника. – М.: Наука, 1961. – Т.6, № 6. – С. 886–894.
17. Moskvichew V. N. Interraction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // 9<sup>th</sup> Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.

Поступила 03.09.2025

## DETERMINATION OF THE IMPEDANCE OF THE SURFACE LAYER ABOVE HYDROCARBONS IN THE DUAL-FREQUENCY SIGNAL MODE

**V. YANUSHKEVICH, O. TANANA, S. ALIEVA, E. BURDIK**  
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

**Zhishui LIU**  
(*Chang'an University, China*)

*The impedance of the surface layer above hydrocarbons was simulated in the dual-frequency mode with prevalence of the low-frequency component of the probing signal. The resistance components of the surface layer above hydrocarbons, which form a symmetric matrix, were investigated. The dependences of the moduli of the surface layer above hydrocarbons on the concentrations of electrons, ions and frequency of the high-frequency component of the probing signal were determined. The frequency dependences of the impedance moduli of the studied media above the deposits and the influence of the layer permittivity were simulated. Resonance frequencies for the resistance components of the surface layer above hydrocarbons were established, which can serve as a criterion for identifying oil and gas fields. The obtained results for determining the impedance of the surface layer can be recommended for use in geoexploration systems for detecting hydrocarbon deposits and accumulations.*

**Keywords:** hydrocarbon deposit, surface layer, dual-frequency signal, electromagnetic waves.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Воробей В. А., Малевич А. Э.</i> WaveStyleGAN: вейвлет-генеративная состязательная сеть .....	2
<i>Игнатьева С. А., Богуш Р. П., Томашевич Н. А., Чен Х.</i> Алгоритмическое и программное обеспечение для повторной идентификации людей на основе нейросетевых признаков изображений лица и фигуры .....	9

### ЭЛЕКТРОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

<i>Абрамов С. А., Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Вабищевич С. А., Зубова О. А.</i> Элементный состав негативных фоторезистов для обратной литографии .....	18
<i>Вабищевич С. А., Бринкевич Д. И., Просолович В. С., Бринкевич С. Д., Зубова О. А., Вабищевич Н. В.</i> Физико-механические свойства пленок негативных фоторезистов КМР Е3502 на кремнии .....	26
<i>Изоитко М. В., Янушкевич В. Ф., Довгяло Д. А., Иванова К. И., Сивацкий Д. С.</i> Определение контраста отражательных характеристик анизотропных сред над углеводородами в режиме амплитудно-модулированных сигналов .....	33
<i>Латий О. О., Буслюк В. В., Дереченник С. С., Емельянов В. А., Кочергина О. В., Оджаев В. Б., Просолович В. С., Янковский Ю. Н.</i> Методы температурной компенсации напряжения электрического пробоя шумовых диодов .....	39
<i>Оджаев В. Б., Петлицкий А. Н., Просолович В. С., Шестовский Д. В., Явид В. Ю., Янковский Ю. Н., Исмайлов Б. К., Кенжасев З. Т., Вабищевич Н. В.</i> Р-и-п-фотодиоды с геттерами, созданными ионной имплантацией основных легирующих примесей .....	50
<i>Харченко А. А., Бринкевич Д. И., Зур И. А., Федотова Ю. А., Шманай Е. Е., Мицкевич Е. Д., Бринкевич С. Д., Вабищевич С. А., Бурый Е. Д., Ластовский С. Б.</i> Оптические свойства облученных $\gamma$ -квантами $^{60}\text{Co}$ структур DLC/полиимид .....	58
<i>Янушкевич В. Ф., Танана О. В., Алиева С. П., Бурдик Е. С., Чжисишуй Лю</i> Определение импеданса поверхностного слоя над углеводородами в режиме двухчастотных сигналов .....	65