



# **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

## **СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

**Выпуск 1(201) 2026**

---

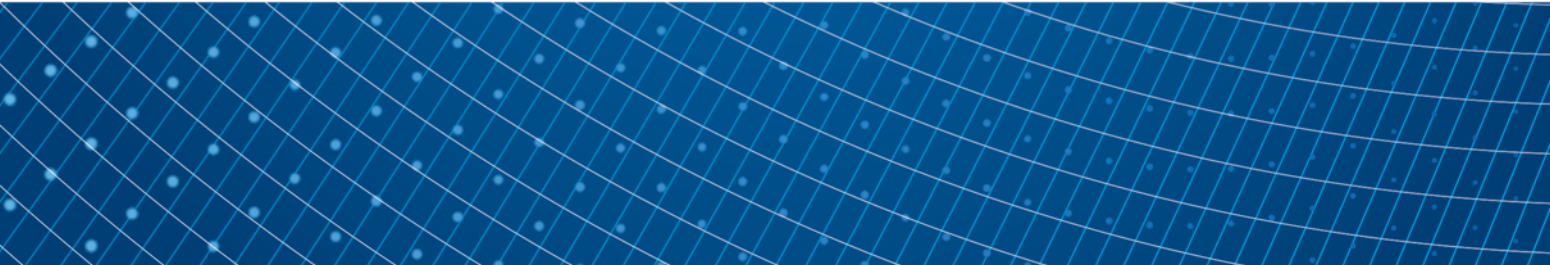
# **ELECTRONIC ENGINEERING**

## **SERIES 3 MICROELECTRONICS**

Scientific & Technical Journal

**Issue 1(201) 2026**

Москва, 2026



**«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.****Серия 3.****МИКРОЭЛЕКТРОНИКА»****Редакционный совет****Главный редактор**

**Красников Геннадий Яковлевич,**  
академик РАН

**Члены редакционного совета**

**Асеев Александр Леонидович,**  
академик РАН

**Baklanov M. R., Sc. D.**

**Бетелин Владимир Борисович,**  
академик РАН

**Бокарев Валерий Павлович,**  
ответственный секретарь, д. т. н.

**Быков Виктор Александрович,**  
д. т. н.

**Галиев Галиб Бариевич, д.ф.-м.н.**

**Горбачевич Александр Алексеевич,**  
академик РАН

**Горнев Евгений Сергеевич,**  
зам. главного редактора,  
академик РАН

**Ким Александр Киирович, к. т. н.**

**Критенко Михаил Иванович, к. т. н.**

**Maev R. G., Sc. D.**

**Петричкович Ярослав Ярославович,**  
д. т. н.

**Рощупкин Дмитрий Валентинович,**  
член-корреспондент РАН

**Сигов Александр Сергеевич,**  
академик РАН

**Стемпковский Александр**  
**Леонидович, академик РАН**

**Чаплыгин Юрий Александрович,**  
академик РАН

**Шелепин Николай Алексеевич,**  
зам. главного редактора, д. т. н.

**Эннс Виктор Иванович, д. т. н.**

**Адрес редакции**

✉ Россия, 124460, Москва,  
Зеленоград, улица Академика  
Валиева, дом 6, стр. 1

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal\_EEM-3@mikron.ru  
www.niime.ru/  
zhurnal-mikroelektronika

Журнал издается с 1965 года

**Учредитель**

АО «Научно-исследовательский  
институт молекулярной  
электроники»

**Слово редактора ..... 4****Разработка и конструирование**

**А.И. Хлыбов, Д.В. Родионов, Е.Ю. Котляров, В.В. Лосев,  
В.И. Егоркин.** Экспериментальные исследования и экстракция  
параметров моделей пассивных СВЧ-компонентов для  
технологии GaN на кремнии ..... 5

**Процессы и технология**

**С.С. Зюзин, Е.А. Ганыкина, С.А. Горохов, Р.М. Гиниятуллин,  
В.А. Гвоздев, Я.Г. Зассеев, А.А. Резванов.** Исследование  
процесса атомно-слоевого осаждения тонких плёнок Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>  
с использованием этоксида тантала ..... 16

**П.А. Дюканов, М.В. Кожухов, Д.А. Попов, А.И. Грушин,  
М.Р. Исмаил-Заде.** Моделирование биполярно-полевого  
технологического процесса с полной диэлектрической изоляцией ... 28

**Свойства материалов**

**Е.С. Горнев, А.А. Резванов, В. Ли, Р.И. Романов,  
В.В. Смирнова, А.М. Маркеев.** Структура и электрофизические  
свойства двумерного MoS<sub>2</sub>, синтезированного методом  
модифицированного MOCVD ..... 35

**E.S. Gornev, A.A. Rezvanov, V.Li, R.I. Romanov, V.V. Smirnova,  
and A.M. Markeev.** The structure and electrophysical properties of  
two-dimensional MoS<sub>2</sub> synthesized by the modified MOCVD method ..... 44

**Математическое моделирование**

**Д.Б. Колосков, А.В. Глухов.** Алгоритм снижения влияния  
паразитных элементов в быстродействующих ЦАП высокой  
разрядности ..... 52

**Н.В. Воронова, Е.С. Горнев, М.А. Горчакова, В.В. Иванов,  
А.Д. Локтионов, О.А. Тельминов, М.И. Ульянова, С.И. Янович.**  
Моделирование тонкопленочного полевого печатного  
транзистора с полупроводником IGZO ..... 60

**Надёжность**

**Д.А. Псху, М.Г. Путря, Д.А. Максимов.** Исследование  
особенностей и разработка рекомендаций к методикам  
тестирования МОП-транзисторов на стойкость к эффекту  
термополевого неустойчивости ..... 70

**D.A. Pskhu, M.G. Putrya, D.A. Maksimov.** Research of features  
and development of recommendations for MOSFET bias temperature  
instability testing methods ..... 79

**Аннотации ..... 87**

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК)  
в число изданий, рекомендованных для публикации статей  
соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук № 2906

## "ELECTRONIC ENGINEERING. Series 3. MICROELECTRONICS"

### Editorial Council

#### Chief Editor

**Krasnikov G. Ya.**,  
Full Member of the RAS

### The Members of Editorial Council

**Aseev A. L.**,

Full Member of the RAS

**Baklanov M. R.**, Sc. D.

**Betelin V. B.**,

Full Member of the RAS

**Bokarev V. P.**, Sc. D.,

Responsible Secretary

**Bykov V. A.**, Sc. D.

**Galiev G. B.**, Sc. D.

**Gorbatsevich A. A.**,

Full Member of the RAS,

**Gornev E. S.**,

Full Member of the RAS

Deputy Chief Editor

**Kim A. K.**, Ph. D.

**Kritenko M. I.**, Ph. D.

**Maev R. G.**, Sc. D.

**Petrichkovich Ya. Ya.**, Sc. D.

**Roshchupkin D. V.**,

Corresponding Member of the RAS

**Sigov A. S.**,

Full Member of the RAS

**Stempkovskiy A. L.**,

Full Member of the RAS

**Chaplygin Yu. A.**,

Full Member of the RAS

**Shelepin N. A.**,

Deputy Chief Editor, Sc. D.

**Enns V. I.**, Sc. D.

### Editorial Staff Address

6/1, Akademika Valieva street,  
Zelenograd, Moscow 124460,  
Russian Federation

+7 495 229-70-43

journal\_EEM-3@mikron.ru

www.niime.ru/

zhurnal-mikroelektronika

The journal has been published  
since 1965

### Founder

"Molecular Electronics Research  
Institute", Stock Company

## Editor's Column ..... 4

### Development and designing

**A.I. Khlybov, D.V. Rodionov, E.Yu. Kotlyarov, V.V. Losev,  
and V.I. Egorkin.** Experimental studies and extraction of model  
parameters for passive microwave components for GaN-on-silicon  
technology ..... 5

### Processes and technology

**S.S. Zyuzin, E.A. Ganykina, S.A. Gorokhov, R.M. Giniyatullin,  
V.A. Gvozdev, Ya.G. Zasseev, and A.A. Rezvanov.** Investigation of  
atomic layer deposition of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films using tantalum ethoxide ..... 16

**P.A. Dukanov, M.V. Kozhukhov, D.A. Popov, A.I. Grushin, and  
M.R. Ismail-Zade.** Modeling of a bipolar-field technological process  
with full dielectric isolation ..... 28

### Properties of materials

**E.S. Gornev, A.A. Rezvanov, V.Li, R.I. Romanov, V.V. Smirnova,  
and A. M. Markeev.** The structure and electrophysical properties of  
two-dimensional MoS<sub>2</sub> synthesized by the modified mpcvd method ... 35, 44

### Mathematical simulation

**D.B. Koloskov and A.V. Gluhov.** Algorithm for reducing the parasitic  
layout elements' impact in high-speed high-resolution DACs ..... 52

**N.V. Voronova, E.S. Gornev, M.A. Gorchakova, V.V. Ivanov,  
A.D. Loktionov, O.A. Telminov, M.I. Ulyanova, and S.I. Yanovich.**  
Simulation of a thin-film field-effect printed transistor with IGZO  
semiconductor ..... 60

### Reliability

**D.A. Pskhu, M.G. Putrya, and D.A. Maksimov.** Research of  
features and development of recommendations for MOSFET bias  
temperature instability testing methods ..... 70, 79

**Abstracts** ..... 87

The journal is put on the Higher Attestation Commission (HAC) list  
of periodicals recommended for publication of articles by applicants  
for academic degrees of Candidate and Doctor of Sciences, No. 2906

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСТРАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ПАСИВНЫХ СВЧ-КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ GaN НА КРЕМНИИ

Использование полупроводников с широкой запрещенной зоной в различных областях техники становится все более актуальным. Благодаря своим превосходным свойствам нитрид галлия (GaN) и соединения на его основе (например,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ) являются перспективными полупроводниками для следующего поколения мощных и высокочастотных устройств. Активно развивающиеся технологии на основе GaN ориентированы главным образом на разработку аналоговых СВЧ-микросхем, поэтому разработка моделей пассивных компонентов СВЧ-тракта и экстракция параметров этих моделей являются актуальной задачей. В работе приведены экспериментальные исследования параметров элементов СВЧ-тракта, предложены их модели для технологического процесса GaN на кремнии. Получены аналитические выражения для параметров моделей, на основе которых разработана методика экстракции электрических параметров модели из экспериментальных данных. Результаты измерений и моделирования параметров элементов СВЧ-тракта показали хорошее совпадение в диапазоне частот 0,01–20,0 ГГц. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических библиотек GaN на кремнии.

**Ключевые слова:** интегральная индуктивность, GaN HEMT, модель катушки индуктивности, скин-эффект, микрополосок, МДМ-конденсатор, переходное отверстие, S-параметры, экстракция параметров.

## Сведения об авторах:

- Хлыбов Александр Иванович, кандидат технических наук, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, e-mail: alex1818@yandex.ru;
- Родионов Денис Владимирович, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, e-mail: denis.rodionov@gmail.com;
- Котляров Евгений Юрьевич, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1, e-mail: ekotlyarov@niime.ru;
- Лосев Владимир Вячеславович, доктор технических наук, профессор, Институт интегральной электроники Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, e-mail: dsd@niime.ru;
- Егоркин Владимир Ильич, кандидат технических наук, доцент, Институт интегральной электроники Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники», пл. Шокина, 1, Зеленоград, Москва, 124498, e-mail: egorkinvi1962@mail.ru

# EXPERIMENTAL STUDIES AND EXTRACTION OF MODEL PARAMETERS FOR PASSIVE MICROWAVE COMPONENTS FOR GaN-ON-SILICON TECHNOLOGY

The use of wide bandgap semiconductors in various fields of technology is becoming increasingly relevant. Due to their excellent properties, gallium nitride (GaN) and compounds based on it (e.g.,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ) are promising semiconductors for the next generation of powerful and high-frequency devices. The rapidly developing GaN-based technologies are focused mainly on the development of analog microwave integrated circuits, therefore, the development of models of passive components of the microwave path and the extraction of parameters of these models is a pressing task. The work presents experimental studies of the parameters of microwave path elements and proposes models for the GaN-on-silicon technological process. Analytical expressions for the model parameters have been obtained, on the basis of which a method for extracting the electrical parameters of the model from experimental data has been developed. The results of measurements and modeling of the parameters of the microwave path elements showed good agreement in the frequency range of 0.01–20.0 GHz. The results obtained can be used in the development of GaN-on-silicon process libraries.

**Keywords:** integral inductance, GaN HEMT, inductor model, skin-effect, microstrip, MIM capacitor, via, S-parameters, extraction of parameters.

## Data of authors:

- Khlybov Aleksander Ivanovich, Candidate of Technical Sciences, National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", 1 Shokina sq., Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: alex1818@yandex.ru;
- Rodionov Denis Vladimirovich, National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", 1 Shokina sq., Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: denis.rodionov@gmail.com;
- Kotlyarov Evgeny Yurievich, National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", 1 Shokina sq., Zelenograd, Moscow, 124498, "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, 124460, Russia, 6/1 Akademika Valieva str., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: ekotlyarov@niime.ru;
- Losev Vladimir Vyacheslavovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Integrated Electronics, National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", 1 Shokina sq., Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: dsd@niime.ru;
- Egorkin Vladimir Ilyich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Integrated Electronics, National Research University "Moscow Institute of Electronic Technology", 1 Shokina sq., Zelenograd, Moscow, 124498, e-mail: egorkinvi1962@mail.ru

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТОКСИДА ТАНТАЛА

Статья посвящена исследованию процесса осаждения тонких плёнок оксида тантала с использованием отечественной установки «Изофаз ТМ 200-01» и характеристики получаемых слоев для применения в элементах хранения энергонезависимой резистивной памяти ReRAM. В качестве прекурсоров использовались этоксид тантала Ta(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>5</sub> отечественного производства и плазма кислорода. Были получены тонкие плёнки оксида тантала различной толщины (5–15 нм), при этом была достигнута скорость роста 0,75 Å/цикл, а неравномерность толщины по пластине составила меньше 2%.

**Ключевые слова:** мемристор, резистивное переключение, филамент, оксид тантала.

## Сведения об авторах:

Зюзин Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: szyuzin@niime.ru;

Ганыкина Екатерина Андреевна, кандидат физико-математических наук, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6 стр. 1, e-mail: eganykina@niime.ru;

Горохов Сергей Александрович, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: sgorohov@niime.ru;

Гиниятуллин Руслан Маратович, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: rginiyatullin@niime.ru;

Гвоздев Владимир Александрович, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: vgvozdev@niime.ru;

Зассеев Ясон Георгиевич, АО «Научно-исследовательский институт точного машиностроения», 124460, г. Зеленоград, Панфиловский пр-т., д. 10, e-mail: zasse95@mail.ru;

Резванов Аскар Анварович, кандидат физико-математических наук, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: arezvanov@niime.ru

# INVESTIGATION OF ATOMIC LAYER DEPOSITION OF Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> THIN FILMS USING TANTALUM ETHOXIDE

The article is dedicated to the deposition of thin films of tantalum oxide using the domestically produced "Izofaz TM 200-01" ALD system and characterization of the deposited layers for implementation in ReRAM non-volatile resistive memory storage elements. Domestically produced tantalum ethoxide Ta(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>5</sub> and oxygen plasma were used as precursors. Thin films of tantalum oxide with various thicknesses (5–15 nm) were obtained, growth rate of 0.75 Å/cycle and the within-wafer thickness nonuniformity less than 2% were achieved.

**Keywords:** memristor, resistive switching, filament, tantalum oxide.

## Data of authors:

Zyuzin Sergey Sergeevich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, MIPT, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; Joint Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: szyuzin@niime.ru;

Ganykina Ekaterina Andreevna, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, MIPT, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; Joint Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: eganykina@niime.ru;

Gorokhov Sergey Aleksandrovich, MIPT, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; Joint Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: sgorohov@niime.ru;

Giniyatullin Ruslan Maratovich, Joint Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: rginiyatullin@niime.ru;

Gvozdev Vladimir Aleksandrovich, Joint Stock Company «Molecular Electronics Research Institute», 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: vgvozdev@niime.ru;

Zasseev Yason Georgievich, JSC "Research Institute of Precision Machine Manufacturing" 10 Panfilovsky prospect, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: zasse95@mail.ru;

Rezvanov Askar Anvarovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, MIPT, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; 6/1 Akademika Valieva street, Zelenograd, Moscow, 124460, Russia, e-mail: arezvanov@niime.ru

### МОДЕЛИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНО-ПОЛЕВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА С ПОЛНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В работе представлены результаты приборно-технологического моделирования биполярных транзисторов на структуре «кремний – оксид кремния – кремний». Сравнение выходных характеристик моделей и образцов транзисторов показало высокую точность разработанной модели. Для улучшения характеристик полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом рассмотрены варианты коррекции конструкции. На основе рассчитанного технологического маршрута проведено моделирование топологии двухзатворного полевого транзистора.

**Ключевые слова:** полевой транзистор, биполярная технология, приборно-технологическое моделирование.

#### Сведения об авторах:

Дюканов Павел Алексеевич, Акционерное общество «Дизайн центр «Кристал», 105187, Россия, Москва, Щербаковская ул., д. 53, e-mail: pdyukanov@dckristal.com;  
 Кожухов Максим Владимирович, кандидат технических наук, доцент, «Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 123458, Россия, Москва, ул. Таллинская, д. 34, e-mail: mkozhukhov@hse.ru;  
 Попов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент, «Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 123458, Россия, Москва, ул. Таллинская, д. 34, e-mail: da.popov@hse.ru;  
 Грушин Андрей Игоревич, Акционерное общество «Дизайн центр «Кристал», 105187, Россия, г. Москва, Щербаковская ул., д. 53, e-mail: agrushin@dckristal.com;  
 Исмаил-Заде Мамед Рашидович, кандидат технических наук, «Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 123458, Россия, г. Москва, ул. Таллинская, д. 34, e-mail: mismailzade@hse.ru

### СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДВУМЕРНОГО $\text{MoS}_2$ , СИНТЕЗИРОВАННОГО МЕТОДОМ МОДИФИЦИРОВАННОГО MOCVD

В данной работе двумерный  $\text{MoS}_2$  синтезировался методом модифицированного металлоорганического осаждения из газовой фазы с использованием прекурсоров  $\text{Mo}(\text{CO})_6$  и  $\text{H}_2\text{S}$  с добавлением паров воды. Установлено, что при 950 °C добавление воды приводит к увеличению размеров зёрен, что сопровождается уменьшением скорости роста. При температуре 850 °C, наоборот, размер зёрен уменьшается, а скорость роста увеличивается. Плёнки, синтезированные с водой при 850 °C, были использованы для изготовления тестовых транзисторных структур; определены их основные характеристики.

**Ключевые слова:** металлоорганическое химическое осаждение из газовой фазы, двумерный полупроводниковый материал, дисульфид молибдена, окислительное травление.

#### Сведения об авторах:

Горнев Евгений Сергеевич, академик РАН, доктор технических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6/1, e-mail: egornev@niime.ru;  
 Резванов Аскар Анварович, кандидат физико-математических наук, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9; АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: arezvanov@niime.ru;  
 Ли Виктор, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, e-mail: li.viktor@phystech.edu;  
 Романов Роман Иванович, кандидат физико-математических наук, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, e-mail: romanov.ri@mipt.ru;  
 Смирнова Валерия Валерьевна, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, e-mail: smirnova.vv@mipt.ru;  
 Маркеев Андрей Михайлович, доктор технических наук, МФТИ, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, e-mail: markeev.am@mipt.ru

### MODELING OF A BIPOLAR-FIELD TECHNOLOGICAL PROCESS WITH FULL DIELECTRIC ISOLATION

The paper presents the results of device and process modeling of bipolar transistors on a silicon – silicon oxide – silicon structure. A comparison of the output characteristics of the models and transistor samples showed the high accuracy of the developed model. To improve the performance of field-effect transistors with a control p-n-junction, design correction options are considered. Based on the calculated process route, the topology of a double-gate field-effect transistor was modeled.

**Keywords:** field-effect transistor, bipolar technology, device and process modeling.

#### Data of authors:

Dukanov Pavel Alekseevich, Joint Stock Company «Design Center «Kristal», 53 Scherbakovskaya street, Moscow, 105187, Russia, e-mail: pdyukanov@dckristal.com;  
 Kozhukhov Maksim Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, «Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics National Research University «Higher School of Economics», 34 Tallinskaya street, Moscow, 123458, Russia, e-mail: mkozhukhov@hse.ru;  
 Popov Dmitrii Aleksandrovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, «Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics National Research University «Higher School of Economics», 34 Tallinskaya street, Moscow, 123458, Russia, e-mail: da.popov@hse.ru;  
 Grushin Andrei Igorevich, Joint Stock Company «Design Center «Kristal» 53 Scherbakovskaya street, Moscow, 105187, Russia, e-mail: agrushin@dckristal.com;  
 Ismail-Zade Mamed Rashidovich, Candidate of Engineering Sciences, «Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics National Research University «Higher School of Economics», 34 Tallinskaya street, Moscow, 123458, Russia, e-mail: mismailzade@hse.ru

### THE STRUCTURE AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF TWO-DIMENSIONAL $\text{MoS}_2$ SYNTHESIZED BY THE MODIFIED MOCVD METHOD

In this work, two-dimensional  $\text{MoS}_2$  was synthesized by modified metal-organic vapor-phase deposition using precursors  $\text{Mo}(\text{CO})_6$  and  $\text{H}_2\text{S}$  with the addition of water vapor. It was found that at 950 °C, the addition of water leads to an increase in grain size, which is accompanied by a decrease in growth rate. At 850 °C, on the contrary, the grain size decreases and the growth rate increases. Films synthesized with water at 850 °C were used to make test transistor structures, and their main characteristics were determined.

**Keywords:** metal-organic chemical vapor deposition from gas phase, two-dimensional semiconductor material, molybdenum disulfide, oxidative etching.

#### Data of authors:

Gornev Evgeny Sergeevich, Full member of RAS, Doctor of Technical Sciences, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia, e-mail: egornev@niime.ru;  
 Rezvanov Askar Anvarovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, MIPT, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, 6/1 Akademika Valieva street, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia, e-mail: arezvanov@niime.ru;  
 Li Viktor, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia, e-mail: li.viktor@phystech.edu;  
 Romanov Roman Ivanovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia, e-mail: romanov.ri@mipt.ru;  
 Smirnova Valeriya Valeryevna, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia, e-mail: smirnova.vv@mipt.ru;  
 Markeev Andrei Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia, e-mail: markeev.am@mipt.ru

### АЛГОРИТМ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЦАП ВЫСОКОЙ РАЗРЯДНОСТИ

Предлагается алгоритм по улучшению некоторых статических и динамических характеристик высокоразрядных быстродействующих ЦАП путём снижения негативного эффекта от паразитных топологических сопротивлений и ёмкостей. Для количественной оценки внесённых в топологию изменений проведён вычислительный эксперимент по компьютерному моделированию микросхемы 14-разрядного ЦАП с частотой преобразования 1 ГГц. Результаты представлены в виде температурной зависимости и временной диаграммы выходных токов ЦАП. Температурный коэффициент тока в выходных ключах ЦАП снижен с 64 ppm/° до 10 ppm/°; отличие тока от «идеального» по абсолютной величине выходного тока младшего значащего разряда снижено с 3% до 0,06%; время установления выходного тока младшего значащего разряда снижено на 22%.

**Ключевые слова:** ИС, ЦАП, топология, паразитные элементы.

#### Сведения об авторах:

Колосков Дмитрий Борисович, Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, д. 20, e-mail: dimakoloskov2009@gmail.com;

Глухов Александр Викторович, кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Дизайн-центр биомедицинских технологий «Vega», 630082, Новосибирская обл., г. Новосибирск, Дачная ул., зд. 60а, пом. 201, e-mail: glwAV@yandex.ru

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОЛЕВОГО ПЕЧАТНОГО ТРАНЗИСТОРА С ПОЛУПРОВОДНИКОМ IGZO

В работе рассматривается моделирование тонкопленочного полевого транзистора (TFT) с полупроводником на основе аморфного оксида индия-галлия-цинка (IGZO). Показано, что IGZO является перспективным материалом для гибкой и печатной электроники, обеспечивая высокую подвижность носителей, стабильные электрические параметры и возможность применения для создания логических элементов и простых микропроцессоров нового поколения. Проанализированы основные технологические параметры структуры, такие как толщина слоя и длина канала, а также их влияние на электрические характеристики устройства (пороговое напряжение, крутизна характеристики, ток насыщения, ток утечки). Результаты моделирования сопоставляются с аналитически выведенными зависимостями для печатных TFT-транзисторов и с измеренными экспериментальными данными, что демонстрирует потенциал IGZO-TFT для применения в низкочастотных и масштабируемых электронных компонентах.

**Ключевые слова:** полевой транзистор, IGZO, моделирование в Sentaurus device.

#### Сведения об авторах:

Воронова Наталья Владимировна, кандидат физ.-мат. наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: navoronova@niime.ru;

Горнев Евгений Сергеевич, академик РАН, доктор технических наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: egornev@niime.ru;

Горчакова Мария Алексеевна, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: mgorchakova@niime.ru;

Иванов Виктор Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор физ.-мат. наук, Московский физико-технический институт, 141700, Московская обл., Долгопрудный, Институтский пер. д. 9, e-mail: ivanov.vv@mipt.ru;

Локтионов Андрей Дмитриевич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: aloktionov@niime.ru;

Тельминов Олег Александрович, канд. техн. наук, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: otelminov@niime.ru;

Янович Сергей Игоревич, АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, д. 6, стр. 1, e-mail: syanovich@niime.ru

### ALGORITHM FOR REDUCING THE PARASITIC LAYOUT ELEMENTS' IMPACT IN HIGH-SPEED HIGH-RESOLUTION DACS

The authors propose an algorithm for improving some static and dynamic characteristics of high-speed high-resolution DACs by reducing the negative effect of parasitic layout resistances and capacitances. For a quantitative assessment of the changes made to the layout, a computational experiment was conducted on a 14-bit DAC IC with a conversion frequency of 1 GHz. The results are presented as a temperature dependence of output DAC currents and a timing diagram of LSB switching process. The temperature coefficient of the output cells current was reduced from 64 ppm/° to 10 ppm/°; the difference of output LSB current value from the "ideal" value was reduced from 3% to 0.06%; the settling time of the output LSB current was reduced by 22%.

**Keywords:** IC, DAC, layout, parasitic elements.

#### Data of authors:

Koloskov Dmitry Borisovich, Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation, e-mail: dimakoloskov2009@gmail.com;

Gluhov Aleksandr Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Design Center of Biomedical Technologies "Vega" LLC, room 201, bldg. 60a, Dachnaya street, Novosibirsk, Novosibirsk region, 630082, Russian Federation, e-mail: glwAV@yandex.ru

### SIMULATION OF A THIN-FILM FIELD-EFFECT PRINTED TRANSISTOR WITH IGZO SEMICONDUCTOR

The paper considers the simulation of a thin-film field-effect transistor (TFT) with a semiconductor based on amorphous indium-gallium-zinc oxide (IGZO). It is shown that IGZO is a promising material for flexible and printed electronics, providing high carrier mobility, stable electrical parameters, and the possibility of using it to create logic elements and simple next-generation microprocessors. The main technological parameters of the structure, such as layer thickness and channel length, as well as their impact on the electrical characteristics of the device (threshold voltage, transconductance, saturation current, and leakage current), have been analyzed. The simulation results are compared with analytically derived dependences for printed TFT transistors and with measured experimental data, which demonstrates the potential of IGZO-TFT for use in low-cost and scalable electronic components.

**Keywords:** field-effect transistor, IGZO, simulation in Sentaurus device.

#### Data of authors:

Voronova Natalia Vladimirovna, Ph.D in Physics and Mathematics, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia, e-mail: navoronova@niime.ru;

Gornev Evgeny Sergeevich, Full member of RAS, Doctor of Technical Sciences, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia, e-mail: egornev@niime.ru;

Gorchakova Maria Alekseevna «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia, e-mail: mgorchakova@niime.ru;

Ivanov Victor Vladimirovich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Moscow Institute of Physics and Technology «MIPT (National Research University)», 9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow region, 141701, Russia, e-mail: ivanov.vv@mipt.ru;

Loktionov Andrey Dmitrievich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia, e-mail: aloktionov@niime.ru;

Telminov Oleg Aleksandrovich, Ph.D. in Technology, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia, e-mail: otelminov@niime.ru;

Yanovich Sergey Igorevich, «Molecular Electronics Research Institute», Stock Company, 6/1 Akademika Valieva street, Moscow, Zelenograd, 124460, Russia, e-mail: syanovich@niime.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ  
К МЕТОДИКАМ ТЕСТИРОВАНИЯ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ НА СТОЙКОСТЬ  
К ЭФФЕКТУ ТЕРМОПОЛЕВОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ**

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния эффекта восстановления характеристик  $p$ -канальных МОП-транзисторов в процессе испытаний на стойкость к эффекту термополевой неустойчивости. Разработаны рекомендации к методикам тестирования и средствам проведения измерений для повышения достоверности получаемых результатов оценки деградации электрических характеристик МОП-транзисторов.

**Ключевые слова:** надёжность, ускоренные испытания, МОП-транзистор, термополевая неустойчивость.

**Сведения об авторах:**

Псху Дарья Андреевна, ФГОУ высшего образования «НИУ «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, ООО «НМ-Тех», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: pshu@nm-tech.org;

Путря Михаил Георгиевич, доктор технических наук, профессор Института интегральной электроники имени академика К.А. Валиева НИУ «МИЭТ», ФГОУ высшего образования «НИУ «Московский институт электронной техники», 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: mishapmg@gmail.com;

Максимов Дмитрий Алексеевич, ведущий инженер (технолог), ООО «НМ-Тех», 124527, Россия, Москва, Зеленоград, Солнечная аллея, д. 6, e-mail: dmaksimov@nm-tech.org

**RESEARCH OF FEATURES AND DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR  
MOSFET BIAS TEMPERATURE INSTABILITY TESTING METHODS**

The article presents the results of an experimental study of the recovery effect of  $p$ -channel MOSFETs characteristics during bias temperature instability testing. Recommendations for testing methods and measurement tools have been developed to improve the reliability of the obtained results of the MOSFETs electrical characteristics degradation.

**Keywords:** reliability, accelerated testing, MOSFET, bias temperature instability.

**Data of authors:**

Pskhu Daria Andreevna, «National Research University of Electronic Technology», 1 Shokin square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, LLC «NM-Tech», 6 Solnechnaya alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia, e-mail: pshu@nm-tech.org;

Putrya Mikhail Georgievich, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Institute of Integrated Electronics, «National Research University of Electronic Technology», 1 Shokin square, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia, e-mail: mishapmg@gmail.com;

Maksimov Dmitriy Alekseevich, Lead Engineer, LLC «NM-Tech», 6 Solnechnaya alley, Zelenograd, Moscow, 124527, Russia, e-mail: dmaksimov@nm-tech.org