



# **ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА**

## **СЕРИЯ 3 МИКРОЭЛЕКТРОНИКА**

Научно-технический журнал

Выпуск 3 (167) 2017

---

# **ELECTRONIC ENGINEERING**

## **SERIES 3 MICROELECTRONICS**

Scientific & Technical Journal

Issue 3 (167) 2017

Москва, 2017



**"ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА.  
Серия 3. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА"****Редакционный совет****Главный редактор**

**Красников Г.Я.**, д. т. н.,  
академик РАН

**Члены редакционного совета****Аристов В. В.**,

член-корреспондент РАН

**Асеев А. Л.**, д. ф.-м. н.,

академик РАН

**Бетелин В. Б.**, д. ф.-м. н.,

академик РАН

**Бокарев В. П.**, к. х. н.,

ответственный секретарь

**Бугаев А. С.**, д. ф.-м. н.,

академик РАН

**Быков В. А.**, д. т. н.**Галиев Г. Б.**, д. ф.-м. н.

**Горбачевич А. А.** д. ф.-м. н.,

член-корреспондент РАН

**Горнев Е. С.**, д. т. н.,

зам. главного редактора

**Грибов Б. Г.**, д. х. н.,

член-корреспондент РАН

**Зайцев Н. А.**, д. т. н.**Ким А. К.**, к. т. н.**Критенко М. И.**, к. т. н.**Немудров В. Г.**, д. т. н.**Петричкович Я. Я.**, д. т. н.**Сигов А. С.**, д. ф.-м. н.,

академик РАН

**Стемпковский А. Л.**, д. т. н.,

академик РАН

**Чаплыгин Ю. А.**, д. т. н.,

академик РАН

**Шелепин Н. А.**, д. т. н.,

зам. главного редактора

**Эннс В. И.**, к. т. н.**Адрес редакции**

124460 г. Москва, Зеленоград,

1-й Западный проезд, д. 12, 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"

**КОЛОНКА РЕДАКТОРА**..... 4**РАЗРАБОТКА И КОНСТРУИРОВАНИЕ****М. А. КОРОЛЕВ, А. В. КОЗЛОВ, А. Ю. КРАСЮКОВ,****С. С. ДЕВЛИКАНОВА**

КНИ полевой датчик Холла с повышенной

магниточувствительностью ..... 5–12

**С. В. ГАВРИЛОВ, Е. С. КАРЕВА, Д. И. РЫЖОВА**

Разработка методов проектирования компактной топологии  
регулярных структур FinFET-транзисторов на основе технологии

режущих слоев ..... 13–21

**ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИЯ****Г. Я. КРАСНИКОВ, Е. С. ГОРНЕВ, В. М. РОЩИН, В. Б. ЯКОВЛЕВ,****И. Н. ПЕТУХОВ**

Электрохимические процессы в технологии формирования

матричной структуры выводов микросборок ..... 22–27

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ****А. С. КАЛИНИН, В. В. АТЕПАЛИХИН, В. В. ПОЛЯКОВ, В. А. БЫКОВ**

Метод атомно-силовой микроскопии для неразрушающего  
анализа температурной динамики электромеханических

свойств наноструктур ..... 28–32

**СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ****Г. Я. КРАСНИКОВ, О. П. ГУЩИН, А. В. ШИШЛЯННИКОВ,****Е. С. ГОРНЕВ, Н. А. ОРЛИКОВСКИЙ, А. А. ТАТАРИНЦЕВ**

Исследование технологических параметров современных

электронных резисторов ..... 33–52

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ****И. В. МАТЮШКИН, Р. А. СОЛОВЬЕВ**

Модель адаптивного нейрона и его аппаратная реализация

на ПЛИС ..... 53–61

**"ELECTRONIC ENGINEERING.  
Series 3. MICROELECTRONICS"**

**Editorial Council**

**Chief Editor**

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

**The Members  
of Editorial Council**

**Aristov V.V.**, Sc. D.,  
Corresponding Member of the RAS

**Aseev A.L.**, Sc. D.,  
Full Member of the RAS

**Betelin V.B.**, Sc. D.,  
Full Member of the RAS

**Bokarev V.P.**, Ph.D.,  
Responsible Secretary

**Bugaev A.S.**, Sc. D.,  
Full Member of the RAS

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

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

**Gorbatsevich A.A.**, Sc. D.,  
Corresponding Member of the RAS

**Gornev E.S.**, Sc. D.,  
Deputy Chief Editor

**Gribov B.G.**, Sc. D.,  
Corresponding Member of the RAS

**Zaitsev N.A.**, Sc. D.

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

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

**Nemudrov V.G.**, Sc. D.

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

**Sigov A.S.**, Sc. D.,  
Full Member of the RAS

**Stempkovskiy A.L.**, Sc. D.,  
Full Member of the RAS

**Chaplygin Y.A.**, Sc. D.,  
Full Member of the RAS

**Shelepin N.A.**, Sc. D.,  
Deputy Chief Editor

**Enns V.V.**, Ph.D.

**Editorial Staff Address**

📍 1-st Zapadny pr-d 12, str. 1.  
Zelenograd, Moscow,  
124460, Russian Federation

☎ +7 495 229-70-43

✉ journal\_EEM-3@mikron.ru

🌐 www.niime.ru/  
zhurnal-mikroelektronika

The journal is published since 1965

**Founder**

"Molecular Electronics Research  
Institute" Stock Company

**EDITOR'S COLUMN** ..... 4

**DEVELOPMENT AND DESIGNING**

**M. A. KOROLEV, A. V. KOZLOV, A. Yu. KRASUKOV,  
S. S. DEVLIKANOVA**

SOI field-effect Hall sensor with increased magnetosensitivity ..... 5–12

**S. V. GAVRILOV, E. S. KAREVA, D. I. RYZHOVA**

Methods of compact layout design of regular FinFET structures  
based on the technology of cutting layers ..... 13–21

**PROCESSES AND TECHNOLOGY**

**G. Ya. KRASNIKOV, E. S. GORNEV, V. M. ROSHCHIN,  
V. B. YAKOVLEV, I. N. PETUKHOV**

Electrochemical processes for technology of matrix structure of  
contact pins of microassemblies ..... 22–27

**PROCESSING AND MEASURING EQUIPMENT**

**A. S. KALININ, V. V. ATEPALIKHIN, V. V. POLYAKOV, V. A. BYKOV**

Atomic force microscopy mode for nondestructive study of  
temperature dynamics of nanostructures electromechanical  
properties ..... 28–32

**PROPERTIES OF MATERIALS**

**G. Ya. KRASNIKOV, O. P. GUSHIN, A. V. SHISHLYANNIKOV,  
E. S. GORNEV, N. A. ORLIKOVSKIY, A. A. TATARINTSEV**

Investigation of process parameters of modern electronic resists ..... 33–52

**MATHEMATICAL SIMULATION**

**I. V. MATYUSHKIN, R. A. SOLOVIEV**

A model of adaptive neuron and its hardware implementation  
on FPGA ..... 53–61

The journal has included in the number of publications recommended for  
publication of articles by applicants for academic degrees of candidate and  
doctor of Sciences №1969 by the all-Russian attestation Commission (HAC)

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Вы держите в руках 12-й выпуск журнала. Кроме того, нашему журналу с момента выхода первого номера (после возобновления издательства) исполняется три года. В августе 2013 года наш журнал был зарегистрирован Государственным комитетом РФ по печати (свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-55092 от 14.08.13 г.). Начиная с 2014 года журнал, учитывая специфику научно-технической сферы, выходит четыре раза в год.

Третий год журнал распространяется по подписке (индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 80408).

Конечно, мне как главному редактору хочется выразить огромную благодарность моим коллегам по редколлегии, рецензентам, авторам и читателям за их поддержку и заинтересованность в нашем научно-техническом издании.

На данный момент в журнале опубликовано более 120 статей, подготовленных высококвалифицированными российскими и зарубежными учеными и специалистами. Публикации цитируются ведущими институтами Российской академии наук и высшими учебными заведениями, такими как ИФП СО РАН, ИПТМ РАН, ФТИАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, МФТИ, МИФИ, МИРЭА и многими другими. В перспективе журнал планирует увеличить число региональных авторов, расширяя прямые контакты с региональными учебными заведениями и научными институтами. Все работы носят печать научной новизны, актуальности и самодостаточности. Отрадно, что среди авторов нашего журнала есть молодые начинающие исследователи – студенты, аспиранты, которые на страницах своих статей делятся с научным миром результатами исследований.

Выходу журнала предшествовала кропотливая работа редакции и редакционной коллегии. Во-первых, в 2015-м году мы заключили договор с Научной электронной библиотекой (НЭБ), где журнал представлен в интегрированном научном информационном ресурсе в российской зоне сети Интернет НЭБ ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)), которая доступна для зарегистрированных пользователей НЭБ. Отметим, что данный ресурс создан в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2007–2012 годы Министерства образования и науки РФ. В настоящий момент ведется работа по наполнению этого ресурса нашим содержанием.

Во-вторых, в это же время журнал зарегистрирован в системе ISSN Международным центром ISSN в Париже под номером 2410–9932. Отметим, что ISSN–



Международный стандартный серийный номер, который является уникальным идентификатором периодического издания и обязательным элементом их выходных сведений. ISSN широко используется во всем мире: он необходим библиотекам, подписным агентствам, исследователям и ученым, работающим в области информации, новостным агентствам и т.д.

В-третьих, следует отметить, что в мае 2017 года журнал «Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника» вошел в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, включенных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, а это является своего рода гарантом качества публикуемых научных статей, их актуальности и новизны.

Что ожидает журнал в ближайшее время? Конечно же, новые статьи и материалы, новые рубрики, состав которых постоянно обновляется, и, наконец, новые открытия, которые обретут наши читатели на страницах журнала. А главное – его ждет заинтересованное отношение наших авторов, которые по-прежнему ему верны.

Сегодня, даже после прошедших нескольких лет успешной работы журнала, еще рано подводить итоги. Журнал далеко не исчерпал всего потенциала развития. Редколлегия очень надеется, что журналу предначертана интересная и счастливая судьба.

В заключение поздравляем наших читателей, подписчиков и уважаемых наших авторов с выходом очередного, двенадцатого выпуска журнала и от всей души желаем им творческих успехов и новых научных и практических открытий.

*С уважением,  
главный редактор журнала,  
доктор технических наук, профессор, академик РАН,*

*Г. Я. Красников*

# КНИ ПОЛЕВОЙ ДАТЧИК ХОЛЛА С ПОВЫШЕННОЙ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

► М. А. Королев, А. В. Козлов, А. Ю. Красюков, С. С. Девликанова  
НИУ «МИЭТ»

Полевые датчики Холла на основе КНИ-структуры (КНИ ПДХ) обладают расширенными функциональными возможностями, но невысокой магниточувствительностью. Поэтому основной задачей статьи является рассмотрение возможности повышения магниточувствительности таких датчиков. В работе представлены результаты исследования магниточувствительных характеристик КНИ ПДХ, полученные с использованием трехмерного приборно-технологического моделирования TCAD. Расчетные холл-затворные характеристики КНИ ПДХ подтверждают ранее предложенную физическую модель датчика, в соответствии с которой при определенных условиях функционирования КНИ ПДХ возникает область повышенной магниточувствительности – ОПМЧ.

Исследовано влияние концентрации примеси в теле датчика на магниточувствительность в ОПМЧ и показано, что этот параметр КНИ ПДХ при концентрации примеси в рабочем слое  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  возрастает в три раза. Расширенный динамический диапазон ОПМЧ (более 5 В), определяемый при этой концентрации примеси, позволяет расширить область практического применения датчика, повысив его помехоустойчивость. Представлены также распределения концентрации электронов и плотности тока в теле датчика при различных режимах его функционирования. Полученные расчетные характеристики КНИ ПДХ совпадают с ранее опубликованными параметрами экспериментальных приборов.

## SOI FIELD-EFFECT HALL SENSOR WITH INCREASED MAGNETOSENSITIVITY

M.A. Korolev, A.V. Kozlov, A.Y. Krasukov, S.S. Devlikanova  
NRU MIET

The SOI field-effect Hall sensor (SOI FEHS) has enhanced functionality and low magnetism sensitivity. Therefore the main task of the paper is to consider the possibility of increasing the magnetism sensitivity of such sensors. The paper presents the results of the study of magnetically sensitive electric characteristic of the SOI FEHS obtained using the three-dimensional TCAD device-technological modeling. The calculated Hall-gate characteristics of the SOI FEHS confirm the analytical model previously proposed in our work. Accordance to the proposed analytical model there is an area of high magnetic sensitivity (AHMS) in certain conditions of the device functioning.

It has been studied the influence of the doping concentration in the body on the magnetism sensitivity. It has been shown that the magnetic sensitivity of the SOI FEHS increases 3 times at a concentration of  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . The extended dynamic range of AHMS (more than 5 V), determined at this impurity concentration, allows us to increase the

area of the practical application of the sensor, increasing noise immunity. The electron density distribution and the current density distribution in the sensor body are also presented under various modes of its functioning. The obtained SOI FEHS characteristics are in good agreement with the parameters of the experimental device published earlier.

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, магнитные измерения в настоящее время предоставляют большой научный и практический интерес. Все больше возрастает потребность в приборах, которые анализируют данный параметр, а именно магнитное поле. В большинстве случаев в основе работы магниточувствительных приборов лежит всеми известный эффект Холла. В последнее время появились новые датчики Холла на основе КНИ-структуры, обладающие двумя управляющими затворами, которые получили название КНИ полевой датчик Холла (КНИ ПДХ) [1–3].

КНИ ПДХ обладают рядом преимуществ, обусловленных расширением функциональных возможностей такого прибора [5]:

- благодаря наличию вертикальной двухзатворной управляющей системы существует возможность изменять величину магнитной чувствительности прибора выбором оптимального значения затворного смещения и использовать частотную модуляцию выходного сигнала;
- КНИ ПДХ имеет широкий диапазон рабочих температур до 500 °С;
- величина остаточного напряжения может минимизироваться путем изменения величины затворного смещения;
- высокая устойчивость к воздействию радиации за счет использования КНИ-структуры;
- уменьшение рабочего тока КНИ ПДХ (при полностью открытом канале порядка  $-0,1 \dots 0,4$  мА) для микромощных областей применения;
- реализация максимальной пороговой чувствительности путем повышения отношения сигнал/шум.

Таким образом, КНИ ПДХ предоставляет возможность для перспективных разработок нового поколения сенсорной аппаратуры [9].

Однако недостатком такого прибора является относительно низкая магниточувствительность и поэтому поиску методов улучшения этого параметра прибора и посвящена данная работа.

## ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ

Известны литературные данные по одному из таких приборов, где авторы обнаружили аномально высокую магниточувствительность в подпороговой обла-

сти функционирования датчика [1, 2]. В работе объяснения возникновения пика магниточувствительности не приводится, к тому же этот пик имеет достаточно малую ширину (динамический диапазон), меньшую 0,1 В, поэтому для практического применения этот режим функционирования не может быть рекомендован. Поэтому задачей данной работы является исследование природы возникновения области аномально повышенной магниточувствительности и поиск методов расширения ее динамического диапазона.

Одним из основных параметров датчика является магниточувствительность, которая определяется модулем напряжения Холла (ЭДС Холла):

$$|V_H| = \frac{r_n}{e n t} G B I, \quad (1)$$

где  $e$  и  $n$  – заряд и концентрация носителей заряда,  $r_n$  – коэффициент пропорциональности (холл-фактор), зависящий от механизма рассеяния и пропорциональный подвижности носителей,  $G$  – поправочный коэффициент на геометрию прибора,  $B$  – величина магнитной индукции,  $I$  – ток стока,  $t$  – толщина рабочего тела [8].

Из формулы следует, что величина ЭДС Холла существенно зависит от подвижности носителей заряда и от их концентрации в рабочем теле датчика.

Как было показано нами в работе [4], область повышенной магниточувствительности (ОПМЧ) прибора возникает при работе в режимах неполного обеднения и неполного обогащения, когда канал датчика изолирован от поверхностных ловушек слоями ОПЗ на границе кремний – оксид кремния, что обеспечивает высокое значение величины подвижности носителей заряда в канале. На основе этого построена физическая модель работы прибора во всех режимах его функционирования, представленная на рис. 1 [4].

При больших значениях отрицательного напряжения прибор работает в режиме полного обеднения, когда тока практически нет, потому что две области ОПЗ сомкнуты между собой и проводящий канал отсутствует. При уменьшении отрицательного напряжения на затворе глубина ОПЗ уменьшается и возникает при определен-

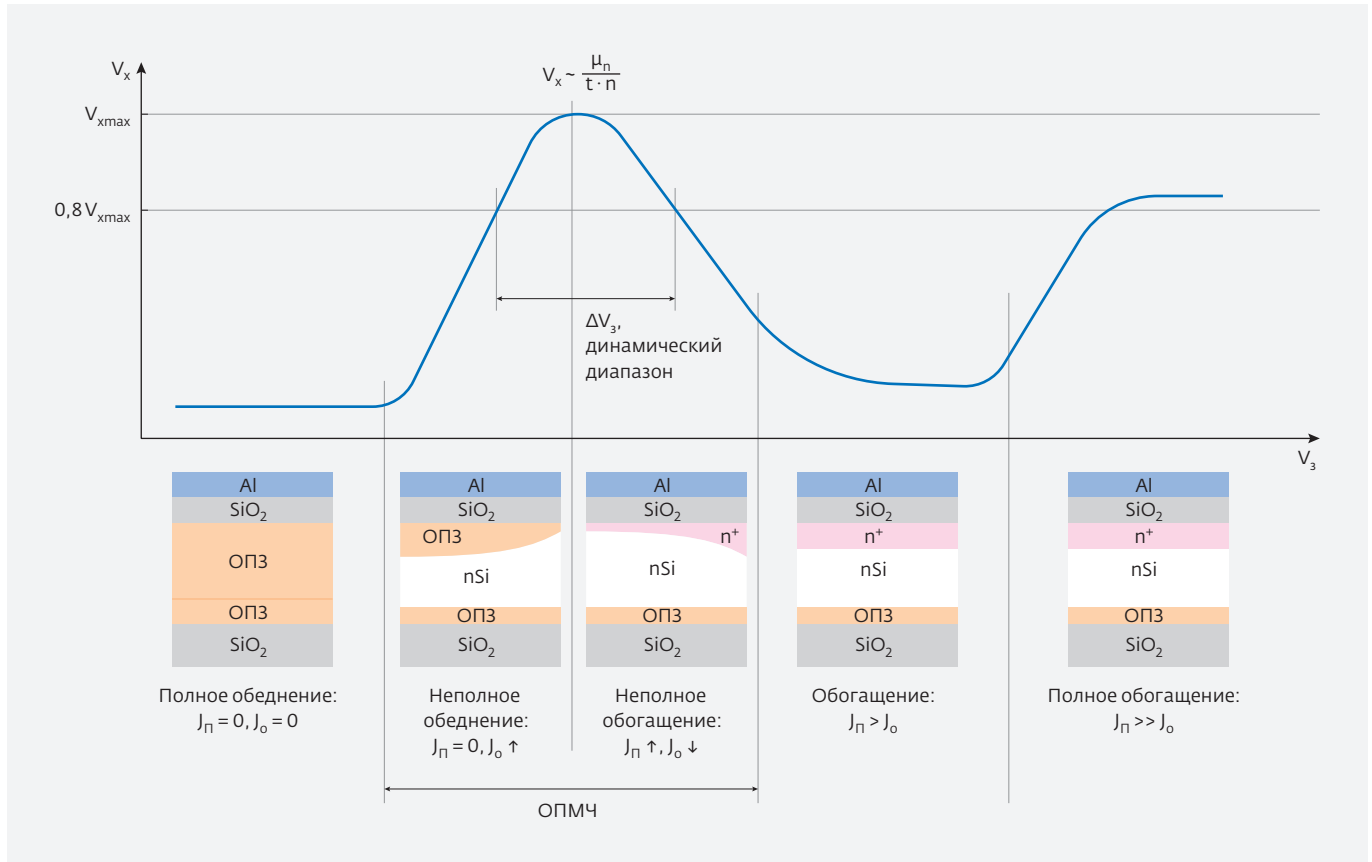


Рис. 1. Холл-затворные характеристики КНИ ПДХ при различных значениях напряжения на затворе

ном потенциале объемный проводящий канал, отделенный от поверхностей рабочего тела двумя ОПЗ (неполное обеднение). При этом, как мы видим из представленной на рис. 1 модели, возникает повышенная ЭДС Холла, которая обусловлена тремя факторами. Согласно формуле (1) первый фактор – это подвижность носителей, которая в данном случае высокая из-за отсутствия эффекта взаимодействия носителей с ловушками на границе раздела кремний – оксид. Второй фактор – это малая толщина рабочего слоя, и третий фактор – невысокая концентрация примеси в проводящем канале, так как она определяется концентрацией примеси в объеме самого кремния. При дальнейшем уменьшении отрицательного напряжения на затворе и при переходе через нулевое значение (возрастание положительного смещения) начинается обогащение приповерхностного слоя носителями заряда (неполное обогащение). При этом ЭДС Холла падает, так как все большее и большее количество носителей приближается к поверхности, где они захватываются ловушками, и их подвижность падает. Наконец, четвертый этап работы

прибора – это переход в режим полного обогащения при дальнейшем увеличении положительного потенциала на затворе, когда в основном ток определяется только поверхностными носителями заряда. Причем в этом случае продолжается падение ЭДС Холла, потому что возрастает поперечное электрическое поле под затвором и дополнительно снижается, соответственно, подвижность носителей заряда. Области неполного обеднения и неполного обогащения назовем областью повышенной магниточувствительности – ОПМЧ. Такая область ОПМЧ имеет два параметра – это высота пика, которая определяет его магниточувствительность, и его ширина – динамический диапазон, который позволяет расширить функциональные возможности, а также обеспечивает повышенную помехоустойчивость при воздействии таких внешних факторов как радиация, повышенная температура и других, которые могут влиять на пороговое напряжение этого прибора. С точки зрения качества прибора необходимо, чтобы как высота пика, так и динамический диапазон были как можно больше.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАХ И ХАРАКТЕРИСТИК ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ КНИ ПДХ

Для того чтобы установить зависимости влияния конструктивно-технологических параметров КНИ ПДХ на характеристики ОПМЧ, было проведено математическое моделирование в Synopsys TCAD. Сначала проводилось двухмерное моделирование для получения ВАХ и характеристик зарядового состояния КНИ ПДХ. На начальном этапе проводилась разработка и настройка математической модели путем сопоставления передаточной характеристики экспериментального прибора, приведенная в работе [2] и рассчитанная с помощью TCAD [7].

Расчет выходной ВАХ КНИ ПДХ проводился при отсутствии внешнего магнитного поля на основе решения уравнений непрерывности для электронов и дырок, а также уравнения Пуассона в рамках диффузионно-дрейфовой модели.

В качестве начального условия на все четыре электрода датчика (стока, истока, верхнего и нижнего затворов) подавались нулевые потенциалы. Была выбрана схема включения прибора с общим электродом истока, то есть потенциал электрода стока возрастал до напряжения  $V_{си} = 10$  В.

После обработки полученных результатов установлено, что изменение толщины подзатворного диэлектрика влияет только на пороговое напряжение, а изменение толщины рабочего слоя в основном влияет на степень полного обеднения. В то же время, как следует из графика на рис. 2, именно концентрация примеси в рабочем теле датчика существенно влияет на расширение динамического диапазона ОПМЧ, который на данном графике определяется шириной перехода от состояния полного обеднения (отсечка канала) до полного обогащения (область насыщения) по шкале напряжений на затворе. При малых концентрациях примеси практически не происходит расширения ОПМЧ, а при очень больших концентрациях прибор уже перестает управляться из-за высокой концентрации примеси в кремнии. Наибольший динамический диапазон наблюдается в случае концентрации  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>, поэтому именно эта концентрация в основном использовалась в дальнейшем как оптимальная с точки зрения расширения динамического диапазона ОПМЧ.

Представляет научный и практический интерес и определение распределения концентрации электронов и плотности тока в теле датчика при различных режимах его функционирования. С помо-

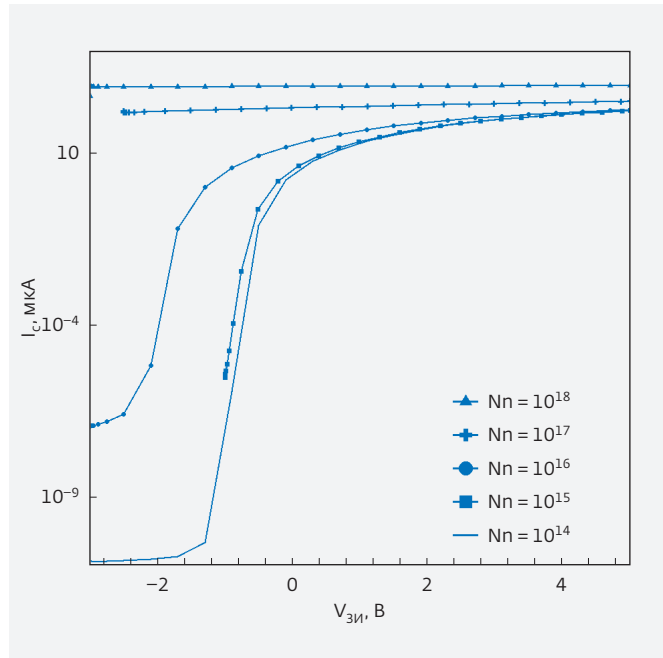


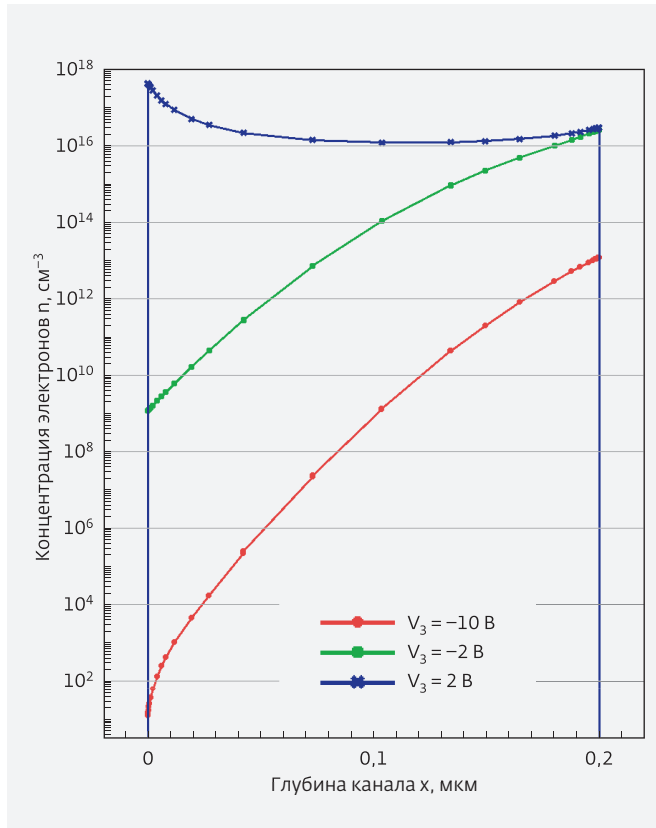
Рис. 2. Изменение передаточных характеристик КНИ ПДХ в зависимости от концентрации примеси в рабочем слое прибора

щью приборно-технологического моделирования в системе TCAD были получены указанные закономерности. На рис. 3 приведено распределение концентрации электронов в поперечном сечении тела датчика при напряжении на затворе, соответствующем трем состояниям: полное обеднение (-10 В), неполное обеднение (-2 В) и полное обогащение (+2 В).

На рис. 4 приведено распределение плотности электронного тока в поперечном сечении тела КНИ ПДХ при тех же потенциалах на затворе. Спад плотности электронного тока на границах раздела полупроводник – диэлектрик (при  $x=0$  граница раздела подзатворный диэлектрик – полупроводник, при  $x=0,2$  мкм – полупроводник – скрытый оксид) обусловлен возникновением областей пространственного заряда на этих участках структуры.

Как следует из приведенных графиков на рис. 3, по мере увеличения напряжения на затворе в сторону положительных значений концентрация электронов в теле датчика возрастает. Неравномерность распределения электронов в сечении тела датчика в режимах обеднения обусловлена влиянием напряжения на затворе на этот процесс. В случае режима обогащения электроны в основном сосредоточены на поверхности кремниевой пленки, а при неполном обеднении – в объеме полупроводника. Рис. 4





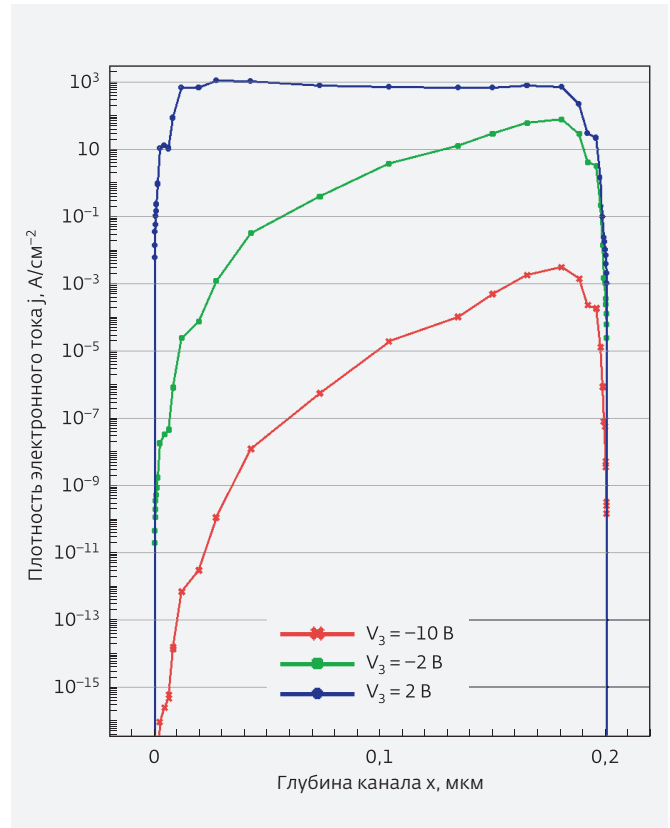
**Рис. 3.** Поперечный профиль распределения концентрации электронов в теле КНИ ПДХ при различном напряжении на затворе

демонстрирует, что в режиме неполного обеднения ток прибора в основном определяется проводимостью объема тела датчика.

### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В ТЕЛЕ КНИ ПДХ НА МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

Трехмерное моделирование структуры КНИ ПДХ, представленной на рис. 6, проводилось в системе приборно-технологического моделирования TCAD [7]. Сечение C1 соответствует двумерной модели, результаты расчетов которой приведены ранее [6].

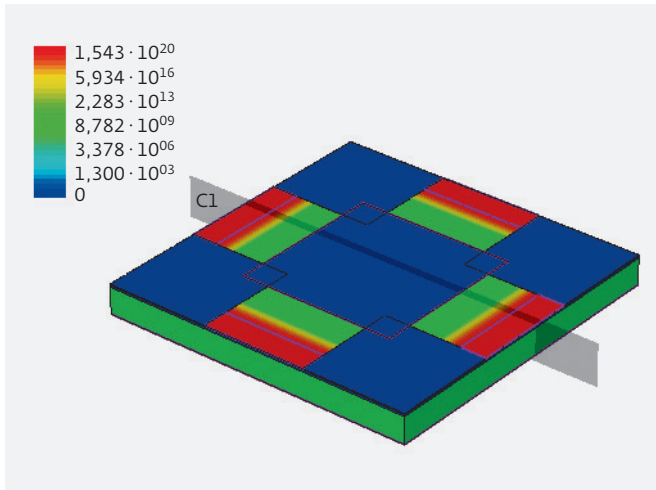
Трехмерная структурная модель прибора формировалась в программе SDE, где создавались слои структуры датчика, указывалась концентрация примеси в них, формировались контакты, а также в программе осуществлялось построение расчетной сетки для последующего расчета параметров прибора. Проводилась настройка параметров модели. Для расчетов ВАХ и электрофизических параметров областей приборов в программе Sentaurus SDevice приме-



**Рис. 4.** Поперечный профиль распределения плотности тока в теле КНИ ПДХ при различном напряжении на затворе

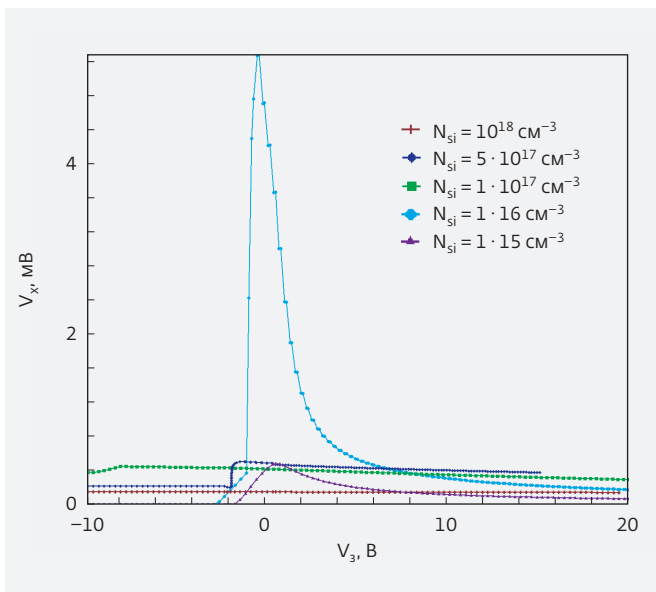
нялись модели DopingDep и Enormal, учитывающие зависимость подвижности носителей заряда от концентрации примеси и поперечного электрического поля. Параметры указанных моделей использовались по умолчанию и отдельно не уточнялись. Задавался барьер между уровнем Ферми металла, то есть верхним электродом затвора, и уровнем Ферми кремния, то есть рабочим слоем, через тонкий подзатворный диэлектрик. Концентрация поверхностных состояний, вызванных поверхностным зарядом на границе Si/SiO<sub>2</sub>, задавалась равной  $N_{ss} = 10^{11}\text{ см}^{-3}$ .

На основе разработанных структурной модели и маршрута моделирования проведен расчет и получены зависимости ЭДС Холла от напряжения на затворе КНИ ПДХ при различной концентрации примеси в рабочем слое, приведенные на рис. 6. Концентрация примеси  $N_{si}$  изменялась от  $10^{15}\text{ см}^{-3}$  до  $10^{18}\text{ см}^{-3}$  с шагом в порядок величины с дополнительным значением  $5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ . Магнитное поле имело значение 60 мТ, напряжение на стоке 2 В.

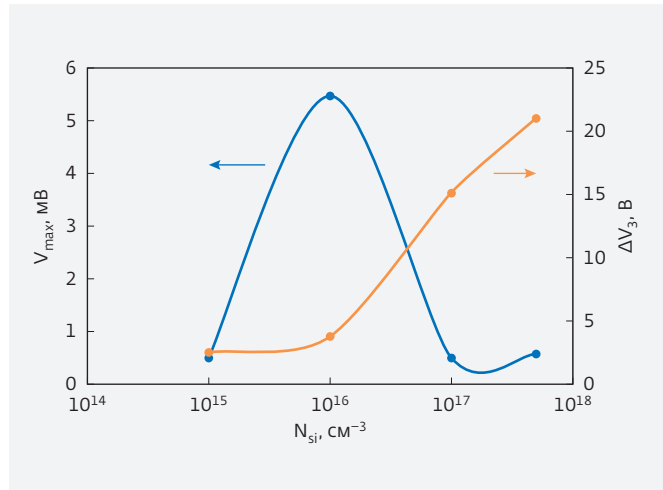


**Рис. 5.** Структурная модель КНИ ПДХ с размерами 60 × 60 мкм

Из графиков рис. 6 следует, что при больших концентрациях примеси в рабочем слое, а именно при значениях  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  и более происходит резкое уменьшение величины ЭДС Холла, так как снижается подвижность и увеличивается концентрация носителей заряда. С другой стороны при низких концентрациях примеси в пленке кремния, а именно менее  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , также резко уменьшается ЭДС Холла, так как при этом соответственно уменьшается ток в тонком

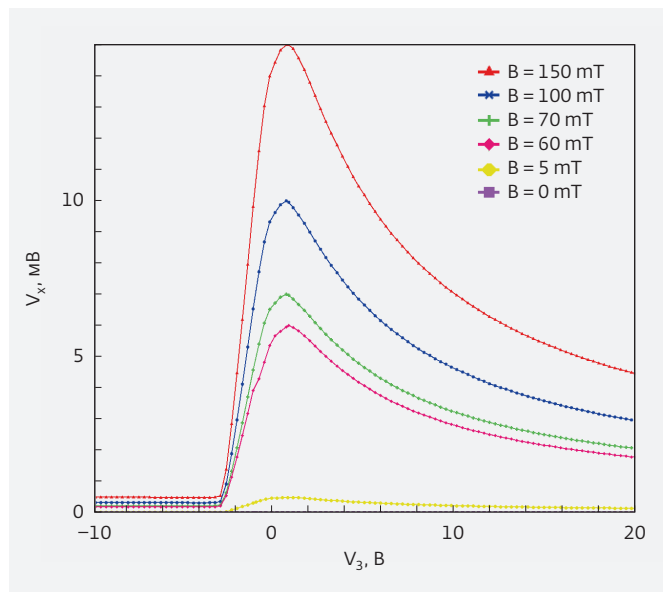


**Рис. 6.** Зависимость ЭДС Холла от напряжения на затворе КНИ ПДХ при различной концентрации примеси в рабочем слое (магнитное поле  $B = 60 \text{ мТ}$ , напряжение на стоке  $V_c = 2 \text{ В}$ )

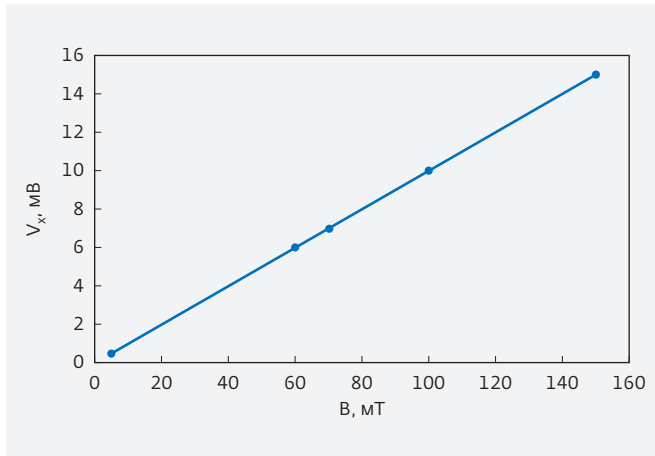


**Рис. 7.** Зависимость ЭДС Холла и величины динамического диапазона ОПМЧ от концентрации примеси в теле датчика

рабочем слое кремния, отделенном от границы раздела окисел – полупроводник двумя ОПЗ. Из графиков следует, что максимальная величина ЭДС Холла достигается при концентрации примеси  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Из графиков рис. 6 также следует, что с увеличением концентрации примеси в теле датчика динамический диапазон ОПМЧ увеличивается из-за замедления процесса обеднения полупроводника.



**Рис. 8.** Зависимость ЭДС Холла от напряжения на затворе КНИ ПДХ при приложении разного магнитного поля (концентрация носителей заряда в рабочем слое  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , напряжение на стоке  $V_c = 2 \text{ В}$ )



**Рис. 9.** Зависимость ЭДС Холла от магнитного поля (концентрация примеси в рабочем слое  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , напряжение на стоке  $V_c=2 \text{ В}$ )

Анализ графиков рис. 6 позволяет построить зависимости пика ЭДС Холла и величины динамического диапазона ОПМЧ от концентрации примеси в рабочем слое КНИ ПДХ, которые представлены на рис. 7. (магнитное поле  $B=60 \text{ мТ}$ , напряжение на стоке  $V_c=2 \text{ В}$ ).

Из графиков рис. 7 следует, что максимальное ЭДС Холла, а соответственно и магниточувствительность достигается при работе в ОПМЧ и концентрации примеси в рабочем слое  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Динамический диапазон ОПМЧ при этой концентрации примеси достаточно широк и удобен для практического применения.

Был проведен также анализ поведения холл-затворных характеристик при вариации магнитного поля от 0 до 150 мТ для уровней легирования тела датчика  $10^{14}\text{--}10^{17} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 8 приведены графики для концентрации примеси в теле прибора  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , при которой наблюдается максимальная магниточувствительность датчика.

Обработка графиков рис. 8 позволяет построить зависимость ЭДС Холла от величины магнитного поля при концентрации примеси в теле датчика  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , представленную на рис. 9, которая, как следует из рисунка, имеет линейный характер, что соответствует теории работы датчика Холла.

## ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель для описания электрофизических параметров КНИ ПДХ. С использованием разработанной методики математического моделирования построены передаточные характеристики КНИ ПДХ и профили распределения электронов и плотности тока в сечении КНИ

ПДХ в трех типовых режимах работы датчика, позволяющие более детально изучать особенности функционирования КНИ полевого ДХ.

Средствами приборно-технологического моделирования TCAD проведено исследование магниточувствительных характеристик трехмерной модели КНИ ПДХ.

Построенные в результате расчета холл-затворные характеристики КНИ ПДХ и их зависимости от концентрации примеси в теле датчика подтверждают ранее предложенную физическую модель КНИ ПДХ, в соответствии с которой при определенных напряжениях на затворе прибора возникает область повышенной магниточувствительности – ОПМЧ.

Показано, что ЭДС Холла у КНИ ПДХ, а следовательно и магниточувствительность прибора, в ОПМЧ при концентрации примеси в теле датчика  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  возрастает в три раза, при этом динамический диапазон ОПМЧ, который также зависит от концентрации примеси, достигает величины более 5 В, что обеспечивает высокую помехоустойчивость функционирования датчика.

Полученные расчетные характеристики КНИ ПДХ совпадают с ранее опубликованными параметрами экспериментальных приборов.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Baranochnikov M. L., Leonov A. V., Mordkovich V. N., Pazhin D. M., Filatov M. M.** Some Features of Magnetometric and Sensor Devices Based on the Field Effect Hall Sensor // Advanced Electromagnetics Symposium. Proceedings. – Paris, France, 2012. P. 455–459.
2. **Мордкович В. Н., Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мокрушин А. Д., Омеляновская Н. М., Пажин Д. М.** Полевой датчик холла – новый тип преобразователя магнитного поля // Датчики и системы. 2003. Вып. 7. С. 33–38.
3. **Королев М. А., Козлов А. В., Петрунина С. С.** Особенности функционирования полевого датчика Холла на основе КНИ структур, предназначенного для работы в телекоммуникационных сетях // Труды МФТИ. 2015. 7. № 3. С. 91–95.
4. **Королев М. А., Павлюк М. И., Девликанова С. С.** Физическая модель полевого датчика Холла на основе КНИ структуры // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2017. № 2. С. 166–170.

5. **Козлов А. В., Королев М. А., Петрунина С. С.** Математическое моделирование влияния концентрации примеси на ток стока КНИ полевого датчика Холла // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2015. № 4. С. 377–381.
6. **Королев М. А., Козлов А. В., Красюков А. Ю., Девликанова С. С.** Приборно-технологическое моделирование ВАХ и зарядового состояния КНИ полевого датчика Холла // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2017. № 3. С. 231–237.
7. **Королев М. А., Крупкина Т. Ю., Чаплыгин Ю. А.** Приборно-технологическое моделирование при разработке изделий микроэлектроники и микросистемной техники // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2005. № 4–5. С. 64–71.
8. **Бараночников М. Л.** Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М.: ДМК Пресс, 2001. 544 с.: ил. (Серия «Учебник»).
9. **Korolev M. A., Kozlov A. V., Krasukov A. Y., Devlikanova S. S.** USING MATHEMATICAL MODELING TO ANALYZE THE SOI FIELD-EFFECT HALL SENSOR Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific – practical conference. /Ed. Uvaysov S. U., Ivanov I. A. – М.: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2017, P. 220–224.

# РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПАКТНОЙ ТОПОЛОГИИ РЕГУЛЯРНЫХ СТРУКТУР FinFET-ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЖУЩИХ СЛОЕВ

► С. В. Гаврилов<sup>1</sup>, Е. С. Карева<sup>2</sup>, Д. И. Рыжова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИППМ РАН, <sup>2</sup>НИУ «МИЭТ»

Возможным решением проблемы масштабирования при уменьшении технологического размера до 32/28 нм и ниже является принципиально иной подход к проектированию, в частности, переход от обычной планарной технологии к FinFET-транзисторам. Одним из конструктивных решений для FinFET-транзисторов является построение регулярной топологии в слоях поликремния и диффузии, поскольку эффективная ширина транзистора ограничена геометрическими размерами плавника и шагом между ними. Для схем, построенных на FinFET-транзисторах, использование строго регулярной топологии становится почти обязательным требованием. Регулярность топологии позволяет сократить количество правил проектирования, так как выполнение большей части правил и ограничений уже предусмотрено на этапе физического проектирования нижних слоев топологии. Данная статья посвящена построению регулярных FinFET-структур на основе технологии режущих слоев и программной реализации алгоритма выбора наиболее компактных из них.

В результате работы было выведено формульное соотношение для определения количества вариантов построения регулярной топологии FinFET-структур на основе технологии режущих слоев, а также разработан алгоритм построения SP-NM-графов для выбора наиболее компактных вариантов топологии регулярных FinFET-структур. Предложенный подход позволяет выбирать наиболее компактные варианты построения топологии цифровых схем, построенных на FinFET-транзисторах.

## METHODS OF COMPACT LAYOUT DESIGN OF REGULAR FINFET STRUCTURES BASED ON THE TECHNOLOGY OF CUTTING LAYERS

S. V. Gavrilov<sup>1</sup>, E. S. Kareva<sup>2</sup>, D. I. Ryzhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IPPM RAS, <sup>2</sup>NRU MIET

This article is devoted to the design of regular FinFET structures based on the technology of cutting layers, and software implementation of the algorithm for selecting the most compact of them. As a result, to determine the number of regular FinFET layout variants based on the technology of cutting layers we derive a formula relation and develop

an algorithm of SP-NM graphs construction for selecting the most compact variants of the regular FinFET structures layout. The proposed approach provides the most compact variants of digital circuit layout based on FinFET transistors.

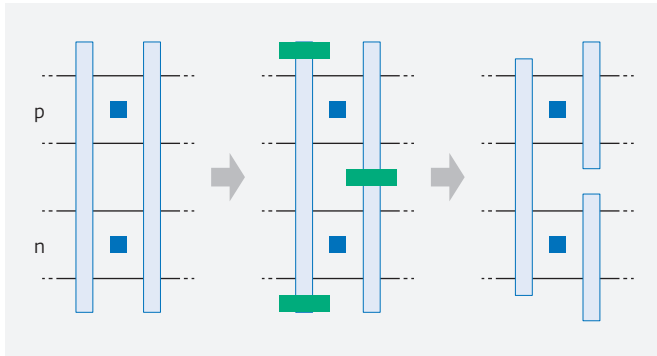


Рис. 1. Получение функционального и изолирующего затворов с помощью применения PCUT-слоев

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ РЕГУЛЯРНЫХ FinFET-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЖУЩИХ СЛОЕВ

Для схем большого размера удобно использовать метод проектирования топологии регулярных структур на основе технологии режущих слоев. Суть этого метода составляет подход, при котором в процессе проектирования используются особые режущие слои (cut layers), из которых изготавливаются маски (cut masks). Эти маски в процессе производства «режут» слои топологии. Такой метод широко используется, начиная с технологии 28 нм и ниже. С помощью наложения этих масок на слои поликремния можно

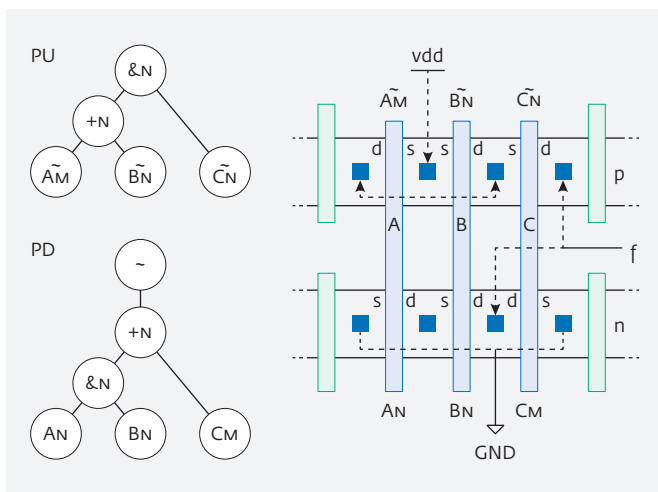


Рис. 2. Получение регулярной топологии из SP-NM графа

получить почти любую схему без выбора топологического шаблона.

В качестве альтернативы может использоваться способ построения регулярной топологии на основе топологического шаблона, предложенный в работе [1]. Основным недостатком данного подхода является необходимость дублирования затворов. К тому же не всегда очевидно, какой шаблон лучше выбрать. Необходимо отталкиваться от конкретной схемы, однако, если она имеет большие размеры, может возникнуть ситуация, что для разных ее частей удобно использовать разные шаблоны. Очевидно, что при построении регулярной топологии использование разных шаблонов в одной схеме недопустимо, вследствие чего приходится жертвовать площадью. Таким образом, использование шаблона удобно только для относительно небольших схем.

В данной работе мы будем использовать методику на основе режущих слоев, предложенную в работе [1], где было разработаны две заготовки, с помощью которых можно получить либо функциональный, либо изолирующий затвор. Такие слои были названы PCUT-слоями.

Изначально в топологии все участки поликремния одинаковы. Они находятся на равном расстоянии друг от друга и располагаются между шинами питания и земли, не прерываясь. На каждый такой участок можно наложить один из двух PCUT-слоев. Один из этих слоев имеет два режущих окна, приходящихся на концы участка поликремния и укорачивающих этот участок приблизительно на ширину шины питания сверху и шины земли снизу, чтобы поликремний не пересекал эти шины. Таким образом, из участка поликремния получается функциональный затвор. Второй PCUT-слой вырезает окно посередине поликремния, образуя два участка поликремния, один из которых пересекает шину питания, а другой – шину земли. Таким образом, из участка поликремния получается изолирующий затвор (рис. 1).

Регулярные FinFET-структуры строятся на основе теоретико-графовых моделей, обеспечивающих согласованное решение проблем синтеза схемы и топологии на логико-временном уровне анализа. Особенность данного подхода заключается в независимом синтезе pull-up (PU) и pull-down (PD) цепей с использованием графа вложенности последова-

тельно-параллельных структур [2]. Этот граф является модификацией SP-графа (Serial-Parallel Directed Acyclic Graph) [3], однако, помимо описания логики схемы, он также позволяет сформировать представление о топологии логической функции еще до ее построения, то есть на этапе логического проектирования. Использование SP-NM-графа применимо при построении регулярной топологии как на основе топологического шаблона, так и на основе технологии режущих слоев.

Пример SP-NM графов и структуры топологии вентиля AOI\_2\_1, построенной на основе технологии режущих слоев, приведен на рис. 2.

На рис. 3 представлена регулярная топология вентиля AOI\_2\_2, построенного на IG FinFET-транзисторах с применением технологии режущих слоев [4-8]. Режущие окна, образующие из поликремния изолирующие и функциональные затворы, выделены на рисунке.

### ВЫБОР НАИБОЛЕЕ КОМПАКТНЫХ ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИИ, ПРОЕКТИРУЕМОЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЖУЩИХ СЛОЕВ

Для построения регулярной топологии схем в предыдущем разделе нами был использован только один вариант SP-NM-графа. Очевидно, что на самом деле таких вариантов существует много. Каждый транзистор каждой из двух частей графа (PU и PD) можно расположить в нормальном или инверсном направлениях, причем один и тот же транзистор в разных частях графа может быть расположен по-разному. Каждую функцию также можно расположить двумя способами, однако, в разных частях графа направления одной и той же функции должны совпадать, так как направление функции определяет порядок расположения затворов в топологии, а затвор является общим для двух транзисторов – в PU- и PD-частях схемы [9-10].

Таким образом, получается следующая формула:

$$N = 2^m \cdot 2^k = 2^{m+k}, \quad (1)$$

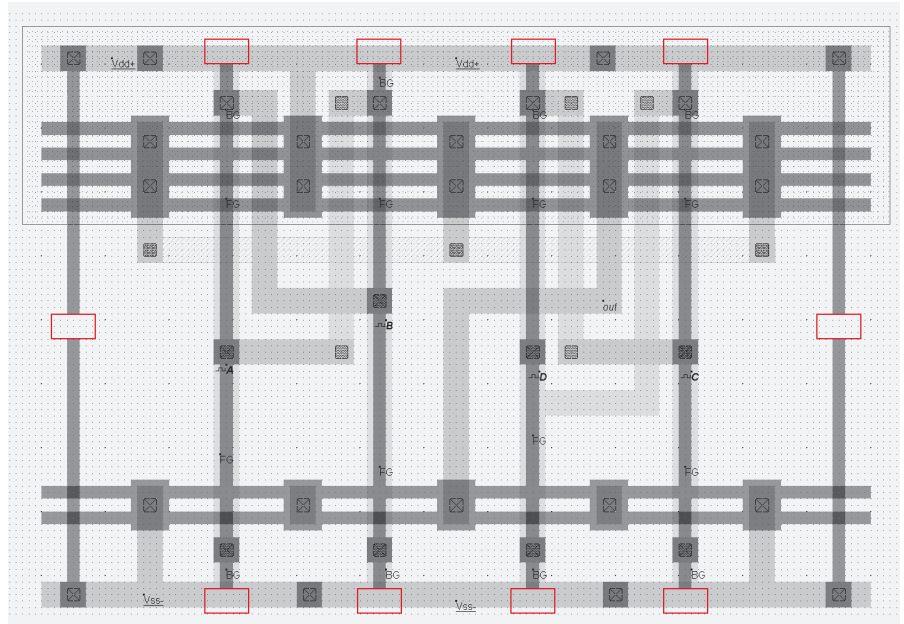


Рис. 3. Топология вентиля AOI\_2\_2, построенного на IG FinFET-транзисторах на основе технологии режущих слоев

где  $N$  – количество вариантов регулярной топологии для функции,  $m$  – количество арифметических операций в формуле функции без учета общей инверсии в PD-цепи и частных инверсий в PU-цепи ( $m$  в PU-цепи равно  $m$  в PD-цепи, так как это два варианта одной и той же функции), а  $k$  – количество транзисторов в схеме.

Для стандартных КМОП-вентилей  $k = 2n$ , где  $n$  – количество входов в схеме, а  $m = n - 1$ :

$$m = n - 1 \Rightarrow N = 2^{n-1+2n} = 2^{3n-1}. \quad (2)$$

#### Рассмотрим функцию NOR2.

- Функции pull-up и pull-down цепей для нее будут следующими:

$$PD: f = \overline{a+b},$$

$$PU: f = \bar{a} \cdot \bar{b}.$$

- Рассчитаем количество транзисторов по выведенной формуле.

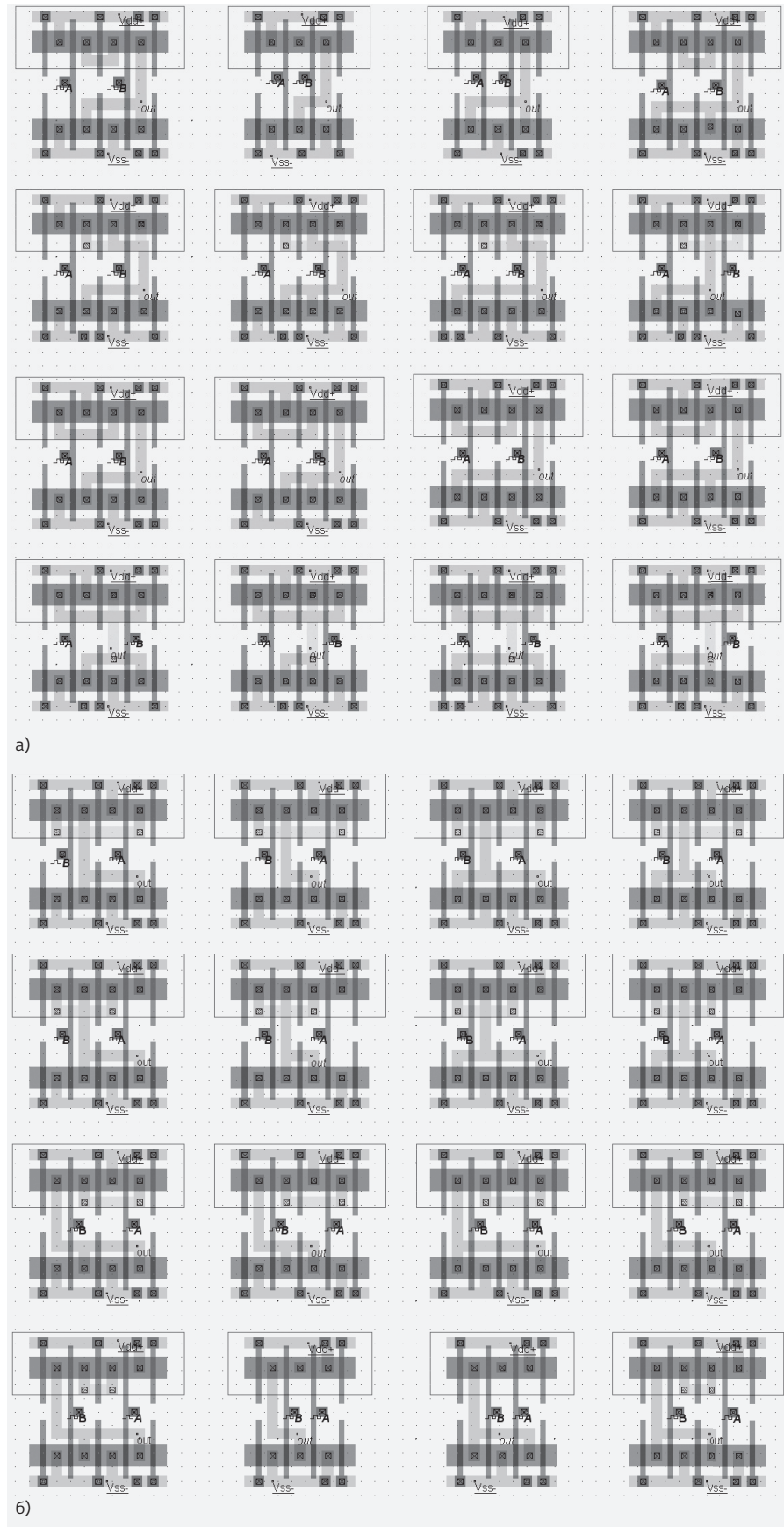
В данном случае имеется 2 входа (4 транзистора) и одна арифметическая операция, следовательно, по формуле (1):  $N = 2^{4+1} = 32$ . Так как используется КМОП-технология, для расчета  $N$  также можно было воспользоваться формулой (2). На рисунках ниже приведены все 32 варианта топологии на МОП-транзисторах для данной функции (рис. 4а – с пря-

мым направлением функции, 4б – с инверсным).

Из рисунков видно, что некоторые варианты топологии более компактны, чем другие: на рис. 4а – две центральных топологии из первого ряда, на рис. 4б – две центральных топологии из последнего ряда. Можно заметить, что эти варианты наиболее компактны, так как в них отсутствуют изолирующие затворы между функциональными затворами. В этих четырех случаях они не нужны, так как области стоков/истоков у каждой из пар транзисторов (р-канальных и п-канальных) соединены между собой. SP-NM-графы, которым соответствуют данные варианты топологии приведены на рис. 5.

В работе [1] описаны условия для направлений функций и аргументов SP-NM-графов для случаев, когда необходимы изолирующие затворы: «Если хотя бы в одной из частей SP-NM-графа (PU или PD) направления рядом стоящих аргументов совпадают во время дизъюнкции, то затворы, подключенные к соответствующим входам, должны быть изолированы в топологии (т.е. на поликремний между двумя функциональными затворами ставится заготовка изолирующего затвора). Во время конъюнкции, наоборот, изоляция нужна тогда, когда направления рядом стоящих аргументов не совпадают, а также если направления аргументов совпадают между собой,

**Рис. 4.** Варианты регулярной топологии на основе режущих слоев для функции NOR2 с прямым направлением функции (а). Варианты регулярной топологии на основе режущих слоев для функции NOR2 с инверсным направлением функции (б)





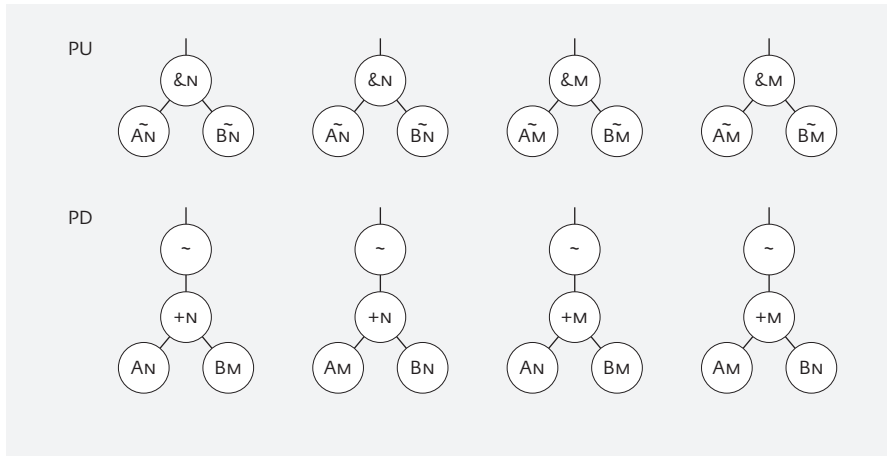


Рис. 5. SP-NM-графы, соответствующие наиболее компактным вариантам топологии элемента NOR2

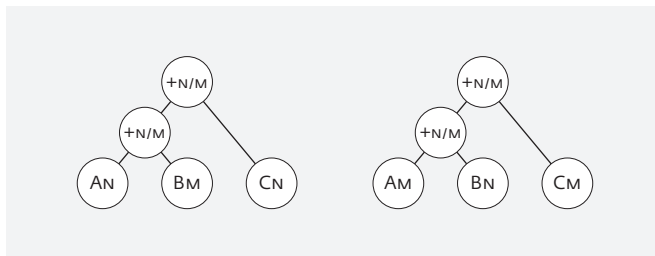


Рис. 6. Неоднократно повторяющаяся дизъюнкция

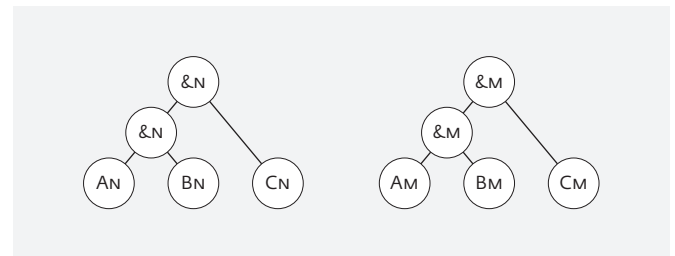


Рис. 7. Неоднократно повторяющаяся конъюнкция

но не совпадают с направлением функции».

Для функций с тремя и более входами (типа NAND3), где параллельно/последовательно подключено более двух транзисторов, в рамках данной работы были выведены следующие правила, при соблюдении которых отпадает необходимость в изолирующих затворах между аргументами:

- при неоднократно повторяющейся дизъюнкции (параллельном подключении) направления всех аргументов должны чередоваться. При этом выбор направления каждой из функций дизъюнкции роли не играет (рис. 6);
- при неоднократно повторяющейся конъюнкции (последовательном подключении) направления всех аргументов должны совпадать между

```

proc as_aoi33 { x n1 n2 n3 n4 n5 n6 n0 } {
a_sp_mos x1.$x vdd $n1 s1.$x pmos w=3.175 l=0.5
a_sp_mos x2.$x vdd $n2 s1.$x pmos w=3.175 l=0.5
a_sp_mos x3.$x vdd $n3 s1.$x pmos w=3.175 l=0.5

a_sp_mos x4.$x s1.$x $n4 $n0 pmos w=3.175 l=0.5
a_sp_mos x5.$x s1.$x $n5 $n0 pmos w=3.175 l=0.5
a_sp_mos x6.$x s1.$x $n6 $n0 pmos w=3.175 l=0.5

a_sp_mos x7.$x $n0 $n1 s2.$x pmos w=1.25 l=0.5
a_sp_mos x8.$x $n0 $n4 s3.$x pmos w=1.25 l=0.5

a_sp_mos x9.$x s2.$x $n2 s4.$x pmos w=1.25 l=0.5
a_sp_mos x10.$x s3.$x $n5 s5.$x pmos w=1.25 l=0.5

a_sp_mos x11.$x s4.$x $n3 gnd pmos w=1.25 l=0.5
a_sp_mos x12.$x s5.$x $n4 gnd pmos w=1.25 l=0.5

}
    
```

Рис. 8. Описание вентиля AOI\_3\_3 на транзисторном уровне

```

### Verilog
### as_aoi33
### Ninputs 6
### Noutputs 1
### NtotalGates 1
### as_aoi33

set as_input {n1 n2 n3 n4 n5 n6}

set as_output {n0}

as_aoi33 x1 n1 n2 n3 n4 n5 n6 n0
    
```

Рис. 9. Описание вентиля АОИ\_3\_3 на логических ячейках

собой, а также с направлениями всех функций конъюнкции (рис. 7).

Варианты SP-NM-графа, представленные на рис. 5, противоречат всем условиям наличия изолирующих затворов, поэтому для этих вариантов изолирующие затворы между функциональными (соответствующими аргументам функции) не нужны. Эти варианты соответствуют наиболее компактным вариантам топологии. В остальных

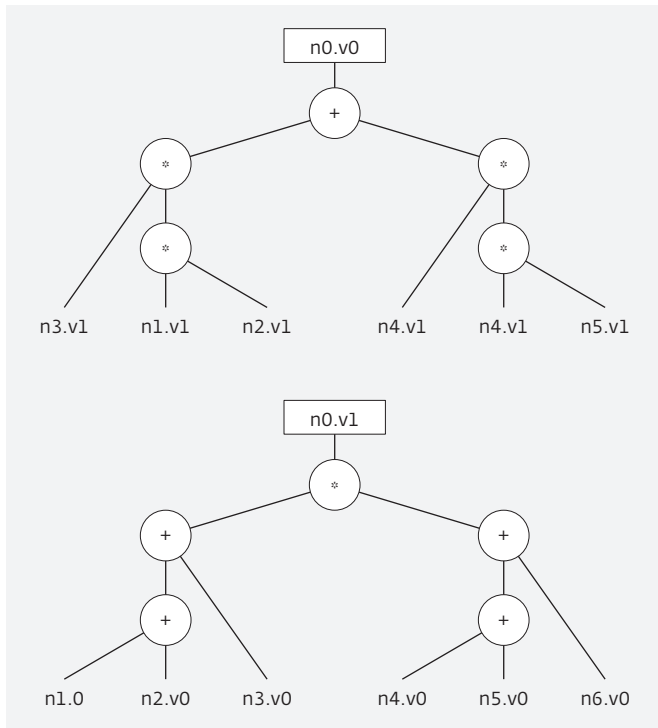


Рис. 10. SP-граф для вентиля АОИ\_3\_3

28 случаях выполняется хотя бы одно из описанных выше условий, а значит, изолирующие затворы для них необходимы.

Таким образом, для любой функции можно сосчитать количество вариантов SP-NM-графов, построить те из них, для которых не выполняется ни одно из условий наличия изолирующих затворов и, пользуясь этими графами, построить варианты наиболее компактной регулярной топологии для этой функции.

### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫБОРА НАИБОЛЕЕ КОМПАКТНЫХ ВАРИАНТОВ ТОПОЛОГИИ FinFET-СТРУКТУР, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЖУЩИХ СЛОЕВ

Для построения теоретико-графовой модели (SP-графа) логических элементов была использована программа S2S, разработанная в ИППМ РАН. В качестве входного параметра программе задается исполняемый файл, содержащий в себе структуру логической схемы. Логические элементы, участвующие в построении схемы, описаны в файле subckts.tcl на транзисторном уровне. Таким образом, сборка схемы в исполняемом файле осуществляется путем вызова подсхем из программы subckts.tcl и присвоения им нужных значений.

В качестве примера приведем запуск программы S2S с передачей ей в исполняемом файле описания вентиля АОИ\_3\_3 (рис. 8, 9) и получим SP-граф для этого вентиля (рис. 10).

В программный комплекс S2S была интегрирована программа S2S\_EK, оценивающая компакт-

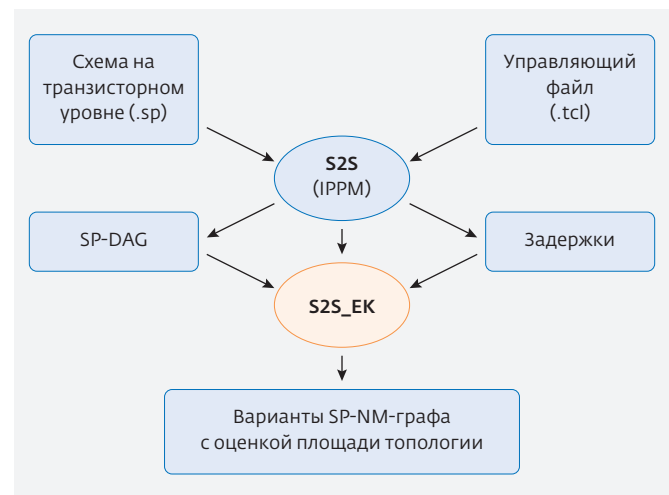


Рис. 11. Структура программного комплекса

ность всех вариантов построения топологии функции. Структура полученного комплекса представлена на рис. 11.

Программа S2S\_EK получает на вход файлы, сгенерированные программой S2S, и выводит все варианты уравнений для PU- и PD-цепей с подсчетом стоимости для каждой пары. Варианты с нулевой стоимостью наиболее компактны. Для них не требуется использование дополнительных изолирующих затворов. Далее представлены результаты моделирования для вентиля NOR2 (подчеркнуты наиболее компактные варианты):

```
n10.v0[0, Cost=1] = (n1.v1_n +n n2.v1_n);
n10.v1[0, Cost=1] = (n1.v0_n *n n2.v0_n);
n10.v0[1, Cost=2] = (n1.v1_n +n n2.v1_n);
n10.v1[1, Cost=2] = (n1.v0_m *n n2.v0_n);
n10.v0[2, Cost=2] = (n1.v1_n +n n2.v1_n);
n10.v1[2, Cost=2] = (n1.v0_n *n n2.v0_m);
n10.v0[3, Cost=3] = (n1.v1_n +n n2.v1_n);
n10.v1[3, Cost=3] = (n1.v0_m *n n2.v0_m);
n10.v0[4, Cost=0] = (n1.v1_m +n n2.v1_n);
n10.v1[4, Cost=0] = (n1.v0_n *n n2.v0_n);
n10.v0[5, Cost=1] = (n1.v1_m +n n2.v1_n);
n10.v1[5, Cost=1] = (n1.v0_m *n n2.v0_n);
n10.v0[6, Cost=1] = (n1.v1_m +n n2.v1_n);
n10.v1[6, Cost=1] = (n1.v0_n *n n2.v0_m);
n10.v0[7, Cost=2] = (n1.v1_m +n n2.v1_n);
n10.v1[7, Cost=2] = (n1.v0_m *n n2.v0_m);
n10.v0[8, Cost=0] = (n1.v1_n +n n2.v1_m);
n10.v1[8, Cost=0] = (n1.v0_n *n n2.v0_n);
n10.v0[9, Cost=1] = (n1.v1_n +n n2.v1_m);
n10.v1[9, Cost=1] = (n1.v0_m *n n2.v0_n);
n10.v0[10, Cost=1] = (n1.v1_n +n n2.v1_m);
n10.v1[10, Cost=1] = (n1.v0_n *n n2.v0_m);
n10.v0[11, Cost=2] = (n1.v1_n +n n2.v1_m);
n10.v1[11, Cost=2] = (n1.v0_m *n n2.v0_m);
n10.v0[12, Cost=1] = (n1.v1_m +n n2.v1_m);
n10.v1[12, Cost=1] = (n1.v0_n *n n2.v0_n);
n10.v0[13, Cost=2] = (n1.v1_m +n n2.v1_m);
n10.v1[13, Cost=2] = (n1.v0_m *n n2.v0_n);
n10.v0[14, Cost=2] = (n1.v1_m +n n2.v1_m);
n10.v1[14, Cost=2] = (n1.v0_n *n n2.v0_m);
n10.v0[15, Cost=3] = (n1.v1_m +n n2.v1_m);
n10.v1[15, Cost=3] = (n1.v0_m *n n2.v0_m);
n10.v0[16, Cost=3] = (n1.v1_n +n n2.v1_n);
n10.v1[16, Cost=3] = (n1.v0_n *n n2.v0_n);
n10.v0[17, Cost=2] = (n1.v1_n +n n2.v1_n);
n10.v1[17, Cost=2] = (n1.v0_m *n n2.v0_n);
n10.v0[18, Cost=2] = (n1.v1_n +n n2.v1_n);
n10.v1[18, Cost=2] = (n1.v0_n *n n2.v0_m);
n10.v0[19, Cost=1] = (n1.v1_n +n n2.v1_n);
```

```
n10.v1[19, Cost=1] = (n1.v0_m *n n2.v0_m);
n10.v0[20, Cost=2] = (n1.v1_m +n n2.v1_n);
n10.v1[20, Cost=2] = (n1.v0_n *n n2.v0_n);
n10.v0[21, Cost=1] = (n1.v1_m +n n2.v1_n);
n10.v1[21, Cost=1] = (n1.v0_m *n n2.v0_n);
n10.v0[22, Cost=1] = (n1.v1_m +n n2.v1_n);
n10.v1[22, Cost=1] = (n1.v0_n *n n2.v0_m);
n10.v0[23, Cost=0] = (n1.v1_m +n n2.v1_n);
n10.v1[23, Cost=0] = (n1.v0_m *n n2.v0_m);
n10.v0[24, Cost=2] = (n1.v1_n +n n2.v1_m);
n10.v1[24, Cost=2] = (n1.v0_n *n n2.v0_n);
n10.v0[25, Cost=1] = (n1.v1_n +n n2.v1_m);
n10.v1[25, Cost=1] = (n1.v0_m *n n2.v0_n);
n10.v0[26, Cost=1] = (n1.v1_n +n n2.v1_m);
n10.v1[26, Cost=1] = (n1.v0_n *n n2.v0_m);
n10.v0[27, Cost=0] = (n1.v1_n +n n2.v1_m);
n10.v1[27, Cost=0] = (n1.v0_m *n n2.v0_m);
n10.v0[28, Cost=3] = (n1.v1_m +n n2.v1_m);
n10.v1[28, Cost=3] = (n1.v0_n *n n2.v0_n);
n10.v0[29, Cost=2] = (n1.v1_m +n n2.v1_m);
n10.v1[29, Cost=2] = (n1.v0_m *n n2.v0_n);
n10.v0[30, Cost=2] = (n1.v1_m +n n2.v1_m);
n10.v1[30, Cost=2] = (n1.v0_n *n n2.v0_m);
n10.v0[31, Cost=1] = (n1.v1_m +n n2.v1_m);
n10.v1[31, Cost=1] = (n1.v0_m *n n2.v0_m);
```

Как видно из результатов моделирования, программой были найдены все 32 варианта регулярной топологии для элемента NOR2 и выбраны 4 наиболее компактных из них, что соответствует теории.

Для подтверждения эффективности и необходимости использования компактных вариантов топологии FinFET-транзисторов, в рамках данной работы была произведена оценка площадей различных по компактности вариантов логических элементов NOR2, NAND2 и AOI22, построенных на IG FinFET-транзисторах на основе технологии режущих слоев. Результаты оценки приведены в табл. 1.

Результаты оценки показали, что некомпактные варианты топологии (с дополнительным изолирующим затвором) превосходят компактные по площади примерно в 1,5-1,7 раз, что подтверждает эффективность разработанного алгоритма выбора наиболее компактных вариантов.

Для многовходовой функции с разными типами подключений можно использовать метод декомпозиции: разбить функцию на части, состоящие из последовательно и параллельно соединенных транзисторов. Затем для каждой из этих частей выполнить условия, описанные выше, с учетом соединения этих цепей друг с другом. Таким образом, для любой функции можно сосчитать количество

Таблица 1. Сравнение площадей регулярных структур различной компактности

Компактность	Параметр	Элемент		
		NOR_2	NAND_2	AOI_2_2
Вариант с максимальным количеством изолирующих затворов	Ширина ячейки	110λ	110λ	208λ
	Высота ячейки	68λ	68λ	77λ
	Площадь ячейки	74 80λ <sup>2</sup>	74 80λ <sup>2</sup>	16 016λ <sup>2</sup>
Промежуточный вариант	Ширина ячейки	–	–	184λ
	Высота ячейки	–	–	77λ
	Площадь ячейки	–	–	14 168λ <sup>2</sup>
Вариант без изолирующих затворов	Ширина ячейки	88λ	88λ	136λ
	Высота ячейки	58λ	58λ	71λ
	Площадь ячейки	5 104λ <sup>2</sup>	5 104λ <sup>2</sup>	9 656λ <sup>2</sup>
Экономия площади (max/min)		≈1,5 раза	≈1,5 раза	≈1,7 раза

вариантов SP-NM-графов, выбрать те из них, для которых не выполняется ни одно из условий наличия изолирующих затворов, и, пользуясь этими графами, построить варианты наиболее компактной регулярной топологии для заданной функции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был рассмотрен и проанализирован способ построения топологии регулярных FinFET-структур на основе технологии режущих слоев. По результатам анализа была выведена формула для определения количества вариантов построения регулярной топологии данным способом. Также был реализован алгоритм выбора наиболее компактных вариантов топологии FinFET-структур, построенных на основе технологии режущих слоев. Показано, что в перспективе для больших схем можно значительно сокращать площадь топологии за счет предложенного алгоритма компактизации.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Манукян А. А. Исследование и разработка методов логико-топологического синтеза библиотечных элементов и блоков для КМОП технологий

с трехмерным затвором транзистора // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МИЭТ, 2015. 145 с.

2. Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Манукян А. А. Методы проектирования заказных сложно-функциональных блоков в базисе элементов с регулярной топологической структурой в слоях поликремния и диффузии // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014» / Сб. трудов под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2014. Ч. I. С. 161–166.
3. Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Щелоков А. Н. Методы логико-топологического синтеза библиотечных элементов для КМОП технологий с трехмерной структурой транзистора // Труды Международного конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям – «IS&IT'14». – М.: Физматлит, 2014. С. 98–102.
4. Bhattacharya D., Jha N. K. FinFETs: From Devices to Architectures // Advances in Electronics, 2014. 21 p.
5. Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Стемпковский А. Л. Теоретико-графовая модель сложно-функциональных блоков для КМОП технологий с трехмерной структурой транзистора // Известия ЮФУ. Технические науки. – Ростов-на/Д: Южный федеральный университет, 2014. С. 58–66.

6. **Kushwah R.S., Chauhan M., Shrivastava P., Akashe Sh.** Modelling and Simulation of FinFET Circuits with Predictive Technology Models // published in *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Radioelektron.*, 2014. Vol. 57. No. 12. P. 43-51.
7. **King T.-J.** FinFETs for Nanoscale CMOS Digital Integrated Circuits // *Computer-Aided Design, ICCAD-2005. IEEE/ACM International Conference on*. P. 207-210.
8. **Meinhardt C., Reis R.** FinFET Basic Cells Evaluation for Regular Layouts // *Circuits and Systems (LASCAS), 2013 IEEE Fourth Latin American Symposium on*. P. 1-4.
9. **Гаврилов С. В., Иванова Г. А., Манукян А. А.** Новые проблемы логико-топологического синтеза заказных сложно-функциональных блоков и методы их решения // *Информационные технологии*. – М.: Новые технологии, 2014. С. 44-50.
10. **Гаврилов С. В., Жукова Т. Д., Рыжова Д. И.** Методы логико-временного анализа библиотечных элементов и блоков СБИС для перспективных технологий с вертикальным затвором транзистора // VII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2016». Сб. трудов под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. – М.: ИППМ РАН, 2016. Ч. I. С. 56-63.

# ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ МАТРИЧНОЙ СТРУКТУРЫ ВЫВОДОВ МИКРОСБОРОК

► Г. Я. Красников<sup>1</sup>, Е. С. Горнев<sup>1</sup>, В. М. Рощин<sup>2</sup>, В. Б. Яковлев<sup>2</sup>, И. Н. Петухов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИМЭ», <sup>2</sup>НИУ «МИЭТ»

В статье рассмотрены технологии формирования матричной структуры выводов для монтажа кристаллов интегральных схем. Проведены исследования совместного и послойного электрохимического осаждения контактных структур олово-серебро для высокоплотного монтажа кристаллов интегральных схем с шагом выводов 150 мкм.

## ELECTROCHEMICAL PROCESSES FOR TECHNOLOGY OF MATRIX STRUCTURE OF CONTACT PINS OF MICROASSEMBLIES

G.Ya. Krasnikov<sup>1</sup>, E. S. Gornev<sup>1</sup>, V. M. Roshchin<sup>2</sup>, V. B. Yakovlev<sup>2</sup>, I. N. Petukhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MERI SC, <sup>2</sup>MIEE NRU

In the article technologies of formation of matrix structure of contact pins for mounting of crystals of integrated circuits are considered. Researches of co-deposition and layer-by-layer electrochemical deposition of tin-silver contact structures for high-density mounting of integrated circuit crystals with a pitch of the pins 150  $\mu\text{m}$  are conducted.

## ВВЕДЕНИЕ

Основой для развития методов обработки информации были и остаются до настоящего времени миниатюризация, увеличение функциональности компонентов и улучшение технологий формирования контактных межсоединений для повышения плотности монтажа электронных схем. С дальнейшим повышением степени интеграции полупроводниковых кристаллов интегральных схем (ИС) возрастает количество выводов на кристалле. Нередко размер полупроводникового чипа определяется не совокупностью элементов на нем, а размером и количеством контактных площадок. В настоящее время некоторые кристаллы ИС включают 400 и более выводов, которые могут занимать практически всю площадь чипа. Данное обстоятельство определяет достаточно жесткие требования к размерам контактных площадок и расстоянию между ними, к отдельным технологическим операциям монтажа, а также к используемому технологическому оборудованию [1].

Одним из перспективных методов монтажа кристаллов является монтаж методом «перевернутого кристалла» (flip-chip). Технологии формирования

матричной структуры выводов подразделяются на пять основных групп: наращивание, погружение в расплав, дозирование жидкого припоя, перенос шариков в твердом состоянии и с помощью паяльной пасты [2].

Бампирование золотой проволокой алюминиевых контактных площадок [3] в сочетании с микросваркой не требует предварительного формирования подбамповой металлизации, использования флюсов и контроля атмосферы. Однако все виды термокомпрессионной сварки характеризуются температурой в зоне соединения 300÷450 °С и удельным давлением инструмента 100÷200 Н/мм<sup>2</sup>. В связи с увеличением хрупкости в результате утонения пластин и с повышением степени структурной гетерогенности, кристаллы интегральных схем не выдерживают такой нагрузки в процессе монтажа. Одним из способов уменьшения уровня нагрева и сварочных усилий является приложение ультразвуковых колебаний к выводам в процессе монтажа [4]. Проблемы этого процесса заключаются во влиянии ультразвука на гетерогенную структуру кристалла при диффузии соединяемых материалов за счет градиентов механических напряжений.

Соединение кристалла и подложки может осуществляться клеящими веществами, которые наносятся разными способами: дозировкой, печатью через шаблон или в виде промежуточной пленки [5]. При использовании теплопроводного непроводящего клея электрическое соединение осуществляется проволочными выводами. Анизотропный токопроводящий клей (АСА) насыщен проводящими частицами, которые обеспечивают электрическое соединение между проволочными выводами и контактными площадками. Адгезионные технологии характеризуются сравнительно низкой температурой в процессе монтажа, однако для обеспечения электрического контакта необходима существенная сила прижима. Кроме этого, требуется сочетание выравнивания соединяемых поверхностей и точной воспроизводимости силы прижима. Другой немаловажной проблемой токопроводящих композиций являются предельные плотности токов и деградация контактов при рабочих нагрузках.

Следующий этап в развитии группового метода сборки высокоинтегрированных структур связан с использованием новых материалов для формирования металлизации на поверхности интегральных микросхем. Переход к медной металлизации интегральных схем [6] или химическое модифицирование поверхности алюминиевых контактных площадок [7] позволяет применять при монтаже методом «перевернутого кристалла» разнообразные припойные пасты или готовые шарики припоя.

Матричную структуру выводов можно формировать, используя паяльную пасту и трафаретную печать [8]. Этот метод отличается высокой производительностью и низкими расходами на формирование выводов. Однако при малом шаге контактных областей (менее 200 мкм) проблемы, связанные с размазыванием пасты при отделении трафарета, перетеканием паяльной пасты и формированием выводов разного размера, приводят к образованию либо короткозамкнутых перемычек, либо к браку контактирования.

Для дальнейшего увеличения количества контактных областей между кристаллом ИС и платой (или другим полупроводниковым кристаллом в случае 3D-монтажа), а также для уменьшения межконтактных размеров используется технология бампирования шариками припоя [9]. Данная технология позволяет формировать значительное количество контактов (до нескольких сотен) на кристалле, однако требует точного подбора физико-химических свойств материала контактной площадки и припоя, контроля наличия и размещения

шариков, а также условий проведения технологических операций: контролируемого минимального растекания припоя, минимизации разновысотности контактов, точного вертикального позиционирования монтируемого кристалла для фиксации монтажного зазора.

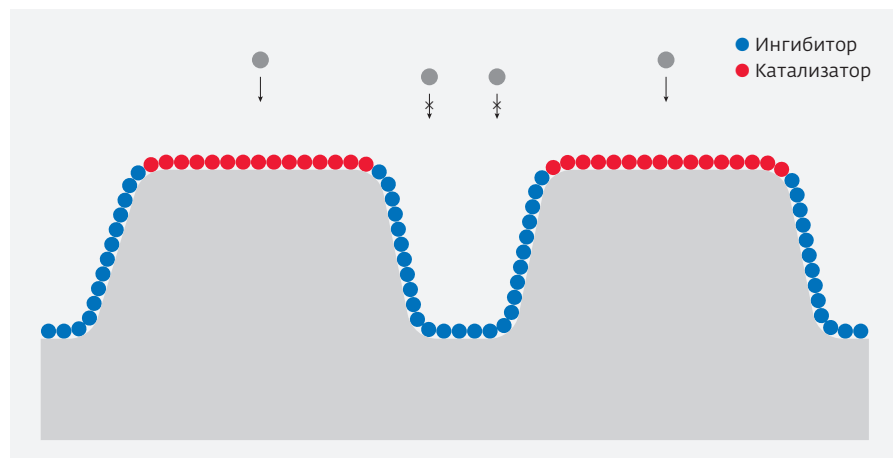
Для процесса формирования вертикальных контактов с использованием электрохимического осаждения характерен ряд существенных преимуществ по отношению к вышеописанным методам [10], а именно: более точный контроль высоты контактов, возможность уменьшения планарных размеров контактов и расстояния между ними, исключение процедуры оплавления выводов, одновременная обработка как всех чипов на пластине, так и нескольких пластин одновременно. Основной технологической трудностью применения электрохимического осаждения контактных структур является необходимость ограничения или полного подавления бокового разрастания вертикального столбика контакта для сохранения его геометрических размеров. В настоящее время данная проблема решается с использованием толстых масок на основе фоторезиста. Для увеличения высоты выводов в работе [11] рассмотрен метод двухслойного электрохимического формирования бампов. Однако данная технология включает дополнительное количество операций и требует вертикального травления масочного материала на глубину до 20–30 мкм, что приводит к снижению точности и воспроизводимости технологического процесса в целом. В работе [12] проведены исследования по подавлению бокового роста вертикальных структур при электрохимическом осаждении за счет подбора параметров процесса и введения функциональных добавок в электролит.

Определяющим фактором на направление роста осаждаемого материала является распределение разряжающихся ионов в прикатодном пространстве. Формирование вертикальных контактных структур возможно при текстурировании поверхности осаждения и введении в электролит экранирующих добавок для неравномерного поступления ионов к поверхности осаждения.

Толщина ( $h$ ) осаждаемого покрытия определяется на основании закона Фарадея по формуле [13]:

$$h = \frac{V_m}{zF} jt, \quad (1)$$

где  $V_m$  – мольный объем металла;  $z$  – зарядность ионов;  $F$  – постоянная Фарадея, равная 96 485 Кл/моль;  $j$  – плотность тока;  $t$  – время осаждения.



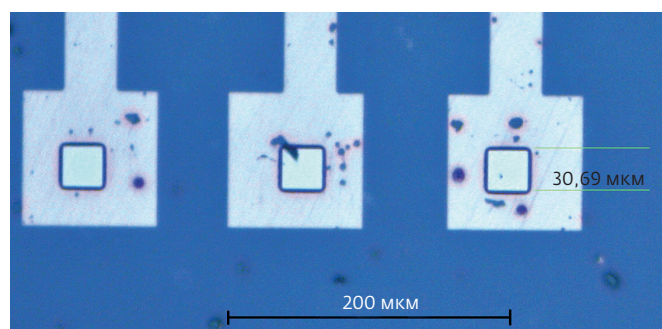
**Рис. 1.** Схема совместного влияния катализирующих и ингибирующих добавок

Из приведенного соотношения следует, что скорость осаждения прямо пропорциональна плотности тока. Таким образом, для получения равномерных по толщине покрытий необходимо обеспечить равномерный токоподвод ко всей поверхности осаждения [14]. В первую очередь равномерность связана с характером распределения электрического поля в объеме электролита. Это является следствием закона Ома:

$$j = \sigma \epsilon, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – напряженность электрического поля;  $\sigma$  – электропроводность электролита.

Если два участка поверхности катода находятся на разном расстоянии от анода, то плотность тока на них будет различной, что является следствием конечного сопротивления электро-



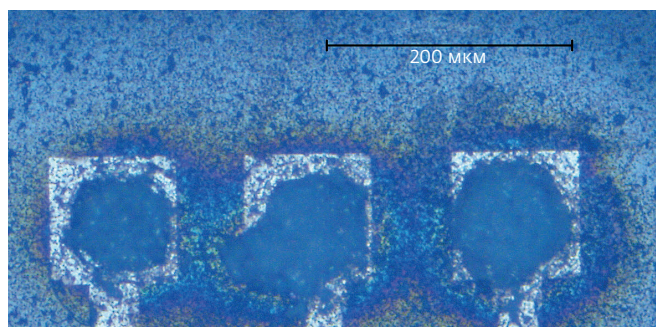
**Рис. 2.** Топология контактных площадок с фоторезистивной маской под гальваническое осаждение контактных выводов (Изображение получено на микроскопе Axiovert-40MAT)

лита. На равномерность распределения тока существенное влияние оказывает микрорельеф поверхности. Как правило, на микровыступах плотность тока выше, на впадинах – ниже. Следовательно, при осаждении шероховатость возрастает. В сочетании с катализаторами для ускорения нормальной составляющей роста и ингибиторами для подавления тангенциального разрастания материала (рис. 1) для формирования припойных выводов возможным является электрохимическое осаждение через тонкую фоторезистивную маску для предварительного формирования микровыступов.

## ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

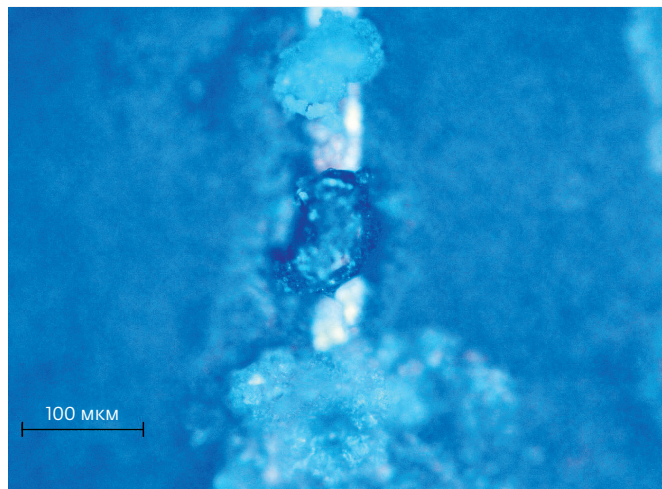
При гальваническом осаждении контактных выводов под монтаж кристалла ИС СОЗУ 1645РУЗ (Миландр) для первоначальной ориентации направления роста материала и уменьшения габаритов выводов на тестовых подложках была сформирована тонкая фоторезистивная маска со вскрытыми под осаждение окнами размером  $30 \times 30$  мкм<sup>2</sup> (рис. 2).

В качестве припойного материала была выбрана система олово – серебро с околоэвтектическим содержанием компонентов [15]. Процесс электрохимического осаждения паяного материала, состоящего из нескольких компонентов, может проводиться как из одного электролита, так и последовательно из нескольких электролитов, каждый из которых содержит только один компонент.



**Рис. 3.** Формирование контактных структур при совместном осаждении





**Рис. 4.** Травление фоторезиста в электролите совместного осаждения

При совместном электрохимическом осаждении условие образования электролитического сплава можно выразить как равенство электрохимических потенциалов восстановления его компонентов. Для повышения перенапряжения выделения более благородного компонента – серебра, в работе использовался комплексообразователь – тиомочевина. При осаждении серебра на предельном токе диффузии потенциал выделения олова достигается за счет обеднения приэлектродного пространства ионами серебра. Формирование сплава заданного состава возможно посредством регулирования катодной плотности тока. На рис. 3 представлены результаты формирования контактных структур с околэвтектическим содержанием компонентов из электролита,

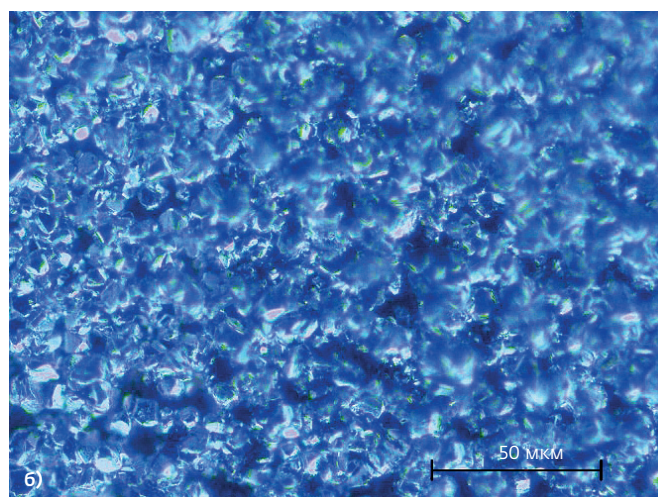
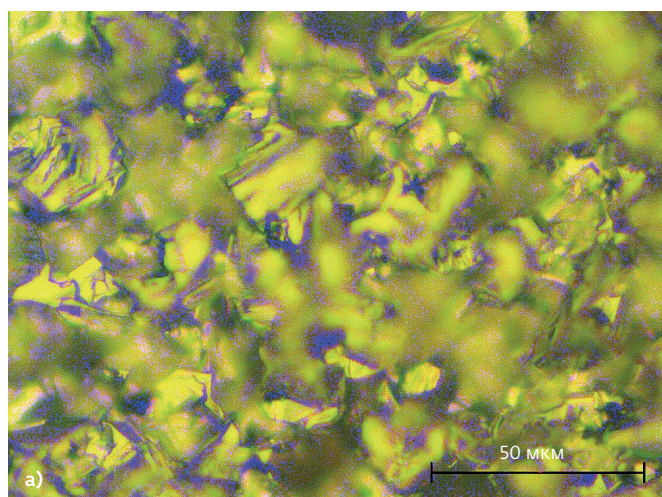
содержащего 0,1 моль/л  $\text{SnSO}_4$ , 0,01 моль/л  $\text{AgNO}_3$ , 0,2 моль/л  $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ , 2 моль/л  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и 5 г/л желатина в течении 1 ч с плотностью тока  $10 \text{ A/m}^2$  [16].

Для достижения необходимой высоты припойных выводов с невысокой скоростью осаждения (около 0,05 мкм/мин) требуется длительное время проведения технологического процесса (около 6 ч). Формирование контактных структур из электролита совместного осаждения при заданных условиях не возможно, в связи с нестойкостью и травлением фоторезистивной маски с течением времени (рис. 4). Так как при изменении плотности тока изменяется состав электролитического сплава, повышение скорости осаждения при совместном осаждении проблематично, и возможным решением может быть использование маски из негативного фоторезиста.

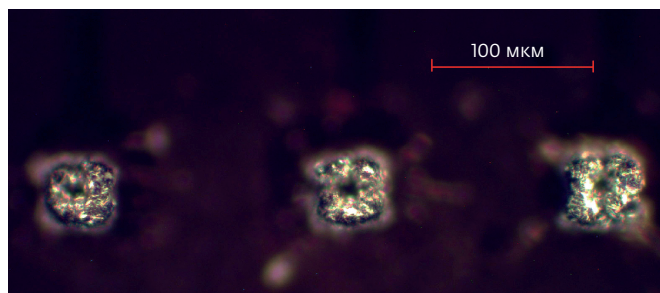
При послойном формировании выводов заданного состава для осаждения компонентов структуры были использованы следующие электролиты:

- серебрение: 40 г/л  $\text{AgNO}_3$ , 400 г/л  $\text{KI}$ , 5 г/л желатина;
- оловянирование: 25 г/л  $\text{SnSO}_4$ , 98 г/л  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 5 г/л желатина.

Для уменьшения времени технологического процесса были проведены исследования по оптимизации скорости осаждения компонентов контактных структур. Повышение плотности тока при выделении серебра из йодидного электролита более  $50 \text{ A/m}^2$  приводит к ухудшению морфологии поверхности (рис. 5а), при выделении оловянного компонента из сульфатного электролита возможно увеличение катодной плотности тока до  $300 \text{ A/m}^2$  с сохранением однородности осажденного материала (рис. 5б).



**Рис. 5.** Осаждение компонентов с повышенной плотностью тока: а) серебро при  $100 \text{ A/m}^2$ ; б) олово при  $300 \text{ A/m}^2$

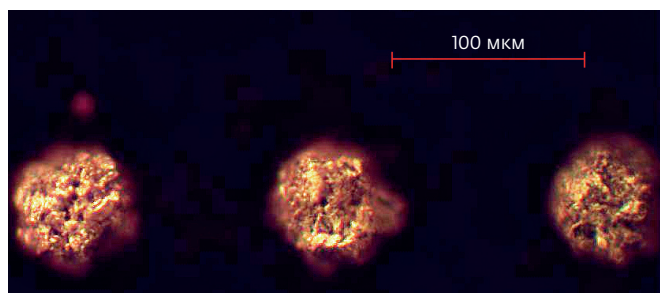


**Рис. 6.** Контактные площадки с серебряным компонентом контактных структур (изображение получено на микроскопе NikonEclipseLV150)

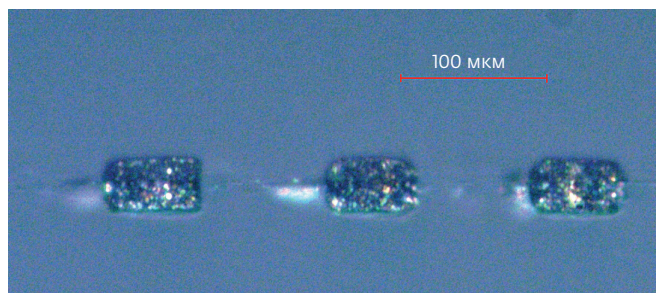
Результаты осаждения серебряного компонента контактных структур в течение одного часа с катодной плотностью тока  $50 \text{ A/m}^2$  представлены на рис. 6.

Некоторые вертикальные столбики сохраняли квадратный габитус по сечению, другие же приобрели округлую форму. Вероятнее всего, формирование округлого сечения вертикального столбика связано с дефектами фотолитографии (недопроявленные углы) или разрушением фоторезистивной маски в углах вскрытых окон, что приводило к скруглению столбика в начале роста. Однако данный процесс не приводил к существенному увеличению диаметра контакта. Анализ измерений, проведенный по 51 контактной площадке, показал хорошую повторяемость результатов, планарные размеры осажденного на контактных площадках материала находятся в пределах  $38 \pm 2 \text{ мкм}$ . Теоретически рассчитанная высота (формула № 1) с учетом бокового разрастания материала приблизительно составила  $12 \text{ мкм}$ .

На рис. 7 и 8 представлены планарное и торцевое изображение контактных структур олово – серебро после осаждения оловянного компонента в течение 1 ч с катодной плотностью тока  $300 \text{ A/m}^2$ .



**Рис. 7.** Планарная микрофотография контактных структур олово – серебро



**Рис. 8.** Торцевая микрофотография контактных структур олово – серебро

Морфология осажденного материала имеет однородный рельеф без значительного дендритообразования. Высота контактных структур составила  $33 \pm 1 \text{ мкм}$  при габаритах основания  $66 \pm 2 \text{ мкм}$ .

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали возможность электрохимического формирования контактных структур для высокоплотного монтажа кристаллов интегральных схем при шаге между выводами  $150 \text{ мкм}$ . Хорошая воспроизводимость габаритов контактных структур, возможность варьирования компонентного состава, непосредственное осаждение материала на контактных площадках без необходимости совмещения представляют существенные достоинства электрохимических процессов при формировании матричной структуры выводов микросборок.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Рощин В. М., Петухов И. Н., Сеньченко К. С., Рощина А. В., Шилина Т. В.** Формирование двухкомпонентных вертикальных контактных структур для монтажа кристаллов интегральных схем // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. 2016. Т. 21. № 2. С. 116–121.
2. **Ланин В., Сергачев И., Хотькин В.** Формирование матричной структуры шариковых выводов из припоя // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 61. С. 65–69.
3. **Harmann G. G.** Wire bonding in microelectronics. – N.Y.: McCraw Hill, 3-ed., p. 2010–426. ISBN: 978-0-07-164265-1.
4. **Гёбль Ц., Бекедаль П.** SKiN – новая технология беспроводных соединений силовых чипов //

- КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ. 2008. № 7. С. 89–92.
5. **Шмаков М.** Использование поверхностного монтажа при сборке микронной аппаратуры // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 2. С. 76–79.
  6. **Громов Д.Г., Мочалов А.И., Сулимин А.Д., Шевяков В.И.** Металлизация ультрабольших интегральных схем [Электронный ресурс]: учебн. пос. / 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 277 с. ISBN978-5-9963-0915-3.
  7. **Roshchin V. M., Petukhov I. N., Sen'chenko K. S. et al.** Electroless plating the surface of aluminium to prepare for soldering // Online Proceedings of XXX International Conference on Surface Modification Technologies (SMT<sup>30</sup>). 2016. MILAN. ITALY. papers № 55. P. 1–5.
  8. **Kay R., Desmulliez M.** (2012). A review of stencil printing for microelectronic packaging. *Soldering and Surface Mount Technology*, 24(1), 38–50. 10.1108/09540911211198540.
  9. **Ли Н.-Ч.** Технология пайки оплавлением, поиск и устранение дефектов: поверхностный монтаж, BGA, CSP и Flip-Chip технологии. – М.: ИД «Технологии», 2006. 392 с.
  10. **Roelfs B., Kenny S., Matejat K.** Electrolytic Solder Deposit for Next Generation Flip Chip Solder Bumping/ 3rd Electronics System Integration Technology Conference (ESTC2010), Berlin, Germany 2010, ISBN978-1-4244-8553-6, p. 645–650.
  11. **Shubo Gao** New technologies for lead-free flip chip assembly/ A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London, Department of Electrical and Electronic Engineering Imperial College London, 2005, 137 p.
  12. **Рощин В.М., Дшхунян В.Л., Петухов И.Н., Сеньченко К.С., Кухтяева В.Р.** Исследование процессов электрохимического формирования контактных структур для сборки интегральных микросхем // Неорганические материалы. 2015. Т. 51. № 3. С. 344–348.
  13. **Gamburg Y. D., Zangari G.** Theory and Practice of Metal Electrodeposition. Springer. 2011. 395 p. ISBN1441996680.
  14. **Гаврилов С.А., Белов А.Н.** Электрохимические процессы в технологии микроэлектроники и нанoeлектроники: Учеб. пособие. – М.: Высшее образование, 2009. 257 с. ISBN978-5-9692-0304-4.
  15. **Михайлова М.С., Рощин В.М., Шилева Ю.И., Петухов И.Н., Федоров В.А.** Электрохимическое формирование Ag-Sn на медных и титановых пластинах // Неорганические материалы. 2016. Т. 52. № 12. С. 1295–1299.
  16. **Mikhailova M. S., Roshchin V. M., Petukhov I. N., Vagin M. S., Yakubov A. O.** Application of thermal analysis for study of Sn-Ag electrolytic alloys on to copper and titanium plates / The 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2017 ElConRus) papers, DOI:10.1109/ElConRus.2017.7910774. P. 1179–1182.

# МЕТОД АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР

► А. С. Калинин<sup>1, 2</sup>, В. В. Атепалихин<sup>1</sup>, В. В. Поляков<sup>1</sup>, В. А. Быков<sup>1, 2</sup>  
<sup>1</sup> ООО «НТ-МДТ», <sup>2</sup> МФТИ (ГУ)

В работе описан принцип работы нового метода атомно-силовой микроскопии для одновременного картирования рельефа поверхности, направления поляризации и количественных механических свойств с нанометровым пространственным разрешением в условиях изменения температуры образца. Метод интегрирован в новый серийно выпускаемый атомно-силовой микроскоп для 200-мм образцов и апробирован на примере измерения молекулярного сегнетоэлектрического кристалла в момент фазового перехода второго рода.

## ATOMIC FORCE MICROSCOPY MODE FOR NONDESTRUCTIVE STUDY OF TEMPERATURE DYNAMICS OF NANOSTRUCTURES ELECTROMECHANICAL PROPERTIES

A. S. Kalinin<sup>1, 2</sup>, V. V. Atepalikhin<sup>1</sup>, V. V. Polyakov<sup>1</sup>, V. A. Bykov<sup>1, 2</sup>

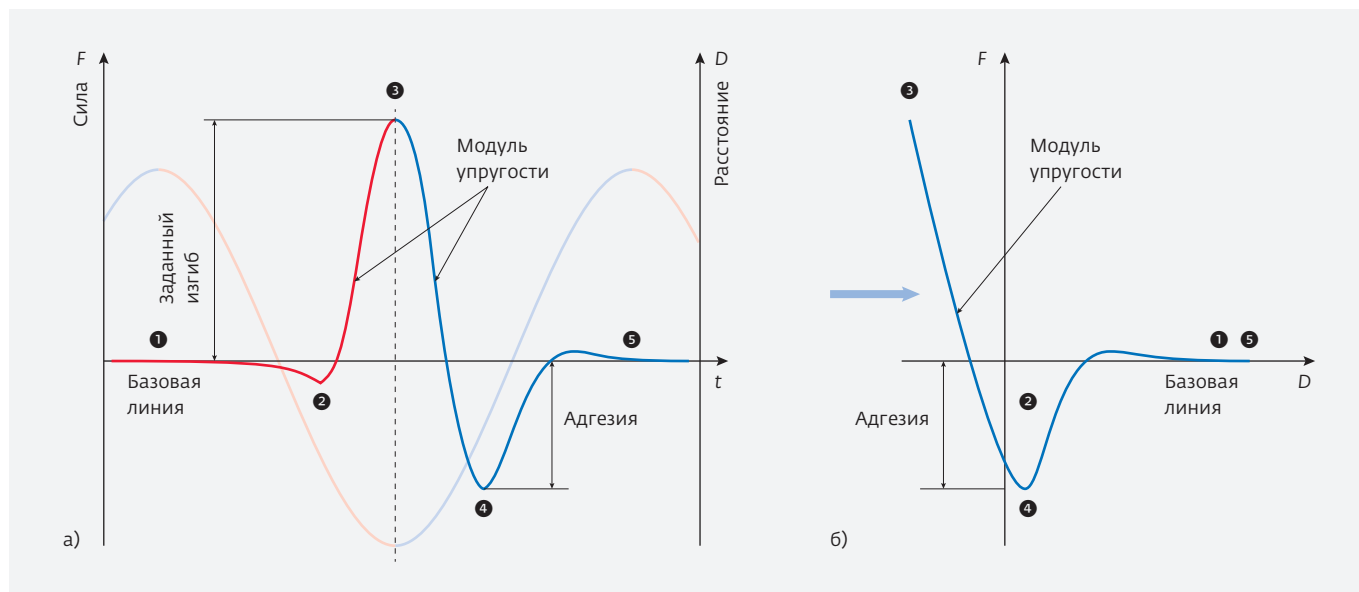
<sup>1</sup> LLC «NT-MDT», <sup>2</sup> MIPT

We present the development of novel atomic force microscopy mode for simultaneous mapping of topography, polarization direction and quantitative electromechanical properties with nanometer-level spatial resolution under variable temperature. The developed mode was implemented to commercially available atomic force microscope for 200 mm samples and applied for molecular crystal study at second-order phase transition.

## ВВЕДЕНИЕ

Атомно-силовая микроскопия (АСМ) – мощный инструмент анализа геометрии рельефа поверхности и локальных физических свойств структур с нанометровым пространственным разрешением. Современный атомно-силовой микроскоп оснащён комплексом различных методов для характеристики электромеханических свойств: контактной силовой микроскопией пьезоотклика (СМП), позволяющей картировать пьезоэлектрические коэффициенты и направление поляризации [1], резонансной электростатической силовой микроскопией (ЭСМ), позволяющей картирование диэлектрической проницаемости, величин  $\partial C / \partial z$ ,  $\partial^2 C / \partial z^2$  и  $\partial C / \partial V$  [2] (где  $C, V, z$  – ёмкость, напряжение и рас-

стояние в направлении, перпендикулярном поверхности соответственно), а также силовой спектроскопией, дающей количественную информацию о механических свойствах поверхности. Это делает АСМ крайне востребованным инструментом для исследования свойств перспективных материалов и переходных слоев в устройствах [3, 4] микроэлектроники. Описанный в данной статье новый метод АСМ – прыжковая силовая микроскопия пьезоотклика (далее – прыжковая СМП) позволяет проводить измерение вышеупомянутых свойств одновременно. Кроме того, благодаря принципу работы, он впервые позволил получить изображения непосредственно в процессе варьирования температуры образца.



**Рис. 1.** Принцип работы прыжковой АСМ: а – зависимость силы взаимодействия зондового датчика с поверхностью и их взаимного положения от времени; б – типичная силовая кривая  $F(z)$

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Разработанный метод прыжковой СМП является развитием сканирующей прыжковой микроскопии (СПМ) [5]. Она основана на модулировании расстояния между зондом и образцом с частотой порядка кГц, при этом в каждом цикле острие зонда касается образца и отводится от его поверхности, а информация о его взаимодействии с поверхностью поступает с системы регистрации на высокоскоростное АЦП для дальнейшего анализа (рис. 1). Полученные в результате такого принципа работы высокоскоростные силовые кривые несут большое количество информации об образце: рельефе поверхности, локальных механических свойствах (жесткость, модуль упругости), адгезионных свойствах (сила адгезии, работа адгезии), электростатических свойствах (потенциал поверхности, диэлектрическая проницаемость и т.д.).

Сканирование, как и в других методах АСМ, происходит построчно с использованием обратной связи (ОС). Система ОС поддерживает постоянной максимальную силу  $F_{max}$ , получаемую как разница между максимальным значением силы в течение цикла и усредненной величиной базовой линии. Учет базовой линии открывает возможность для измерений при варьировании температуры образца: паразитный дрейф конструкции микроскопа, а также самого зондового датчика при нагреве/охлаждении образца будет автоматически учтен и скомпенсирован в каждой точке измерения.

Принцип работы СПМ совмещает в себе преимущества как резонансных осцилляционных методов, позволяющих за счет минимизации латеральных сил значительно увеличить время службы зондового датчика и исследовать образцы без их разрушения, так и контактных методов – с точки зрения наличия достаточно продолжительного времени контакта зонда с поверхностью. В совокупности с возможностью температурных измерений это позволяет реализовать неразрушающий метод исследования температурной динамики электромеханических свойств образцов.

Для реализации измерения пьезоотклика в рамках СПМ во временном окне, соответствующем времени контакта зонда с поверхностью, на проводящее покрытие зонда подается переменное напряжение  $V_{ac}$ . При этом проводится регистрация амплитуды и фазы вертикального и латерального пьезоотклика образца (рис. 2). Для этого во временном окне, соответствующем механическому контакту острия зонда с поверхностью, осуществляется цифровое синхронное детектирование соответствующих сигналов с последующим усреднением для каждой силовой кривой.

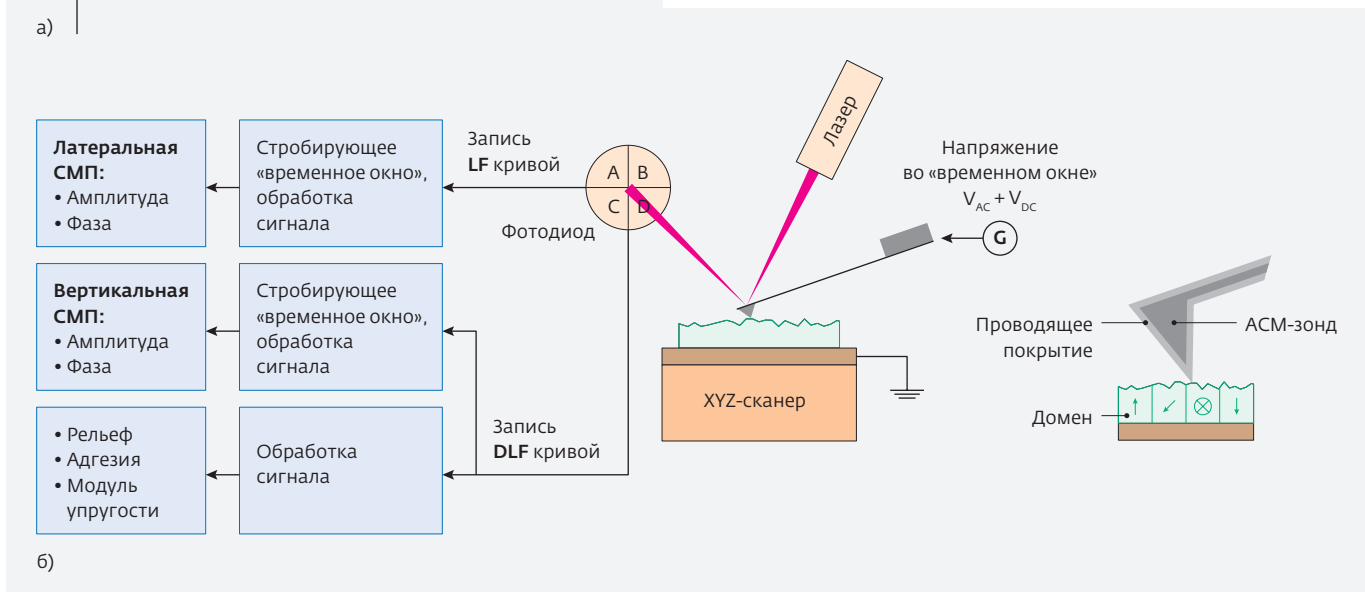
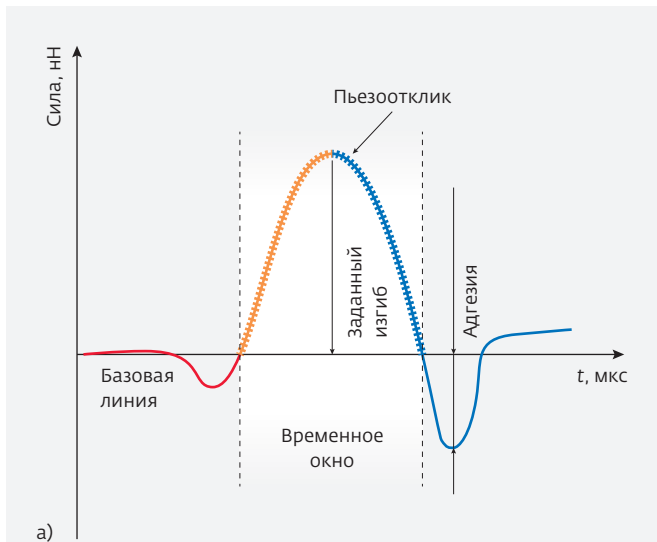
Метод был реализован на контроллере HybriD2.0 (NT-MDT Spectrum Instruments, Москва, Зеленоград, Россия), оснащенном высокоскоростными АЦП (80 МГц) и ПЛИС для обработки силовых кривых и интегрирован в атомно-силовой микроскоп VEGA (NT-MDT Spectrum Instruments, Москва, Зеленоград, Россия) для 200-мм образцов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

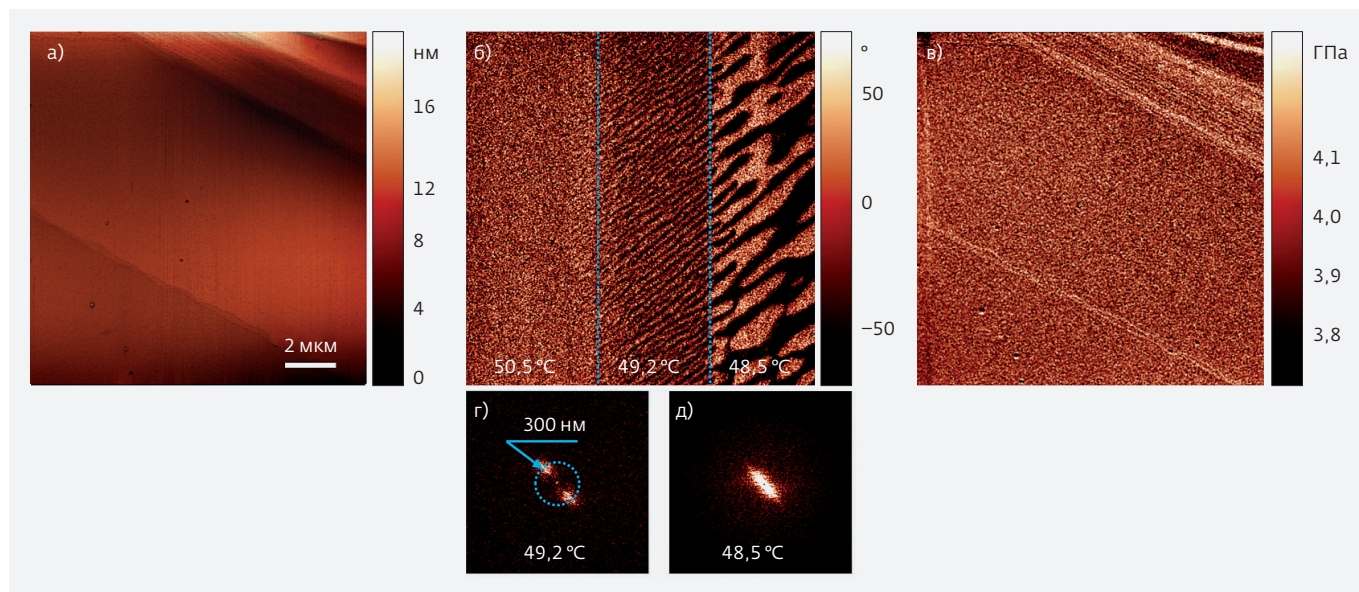
Апробация работы метода проводилась на чистом кристалле триглицинсульфата, выращенном в Институте кристаллографии РАН методом изотермического испарения при температуре ниже точки Кюри. Кристалл триглицинсульфата (далее ТГС) имеет формулу  $(\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$  и обладает достаточно сложной кристаллической структурой с элементарной ячейкой, содержащей более ста атомов. Несмотря на это, ТГС имеет простую природу фазового перехода второго рода и кроме этого обладает температурой Кюри, близкой к комнатной (49,2 °C [5]). По этой причине ТГС является модельным для исследования температурной динамики сегнетоэлектрических свойств. Причиной наличия

спонтанной поляризации в ТГС являются группы глицина I, обладающие ненулевым дипольным моментом. Выше температуры Кюри эти молекулы неупорядоченно перескакивают относительно плоскости симметрии кристалла, тогда как ниже температуры Кюри они упорядочиваются, вызывая спонтанную поляризацию [6].

Температурная динамика доменной структуры ТГС ниже точки Кюри была изучена традиционным методом контактной СМП [7–9]: исследована динамика доменов, собраны статистические данные об их площади и длине стенок при различных температурах. Однако *in situ* измерения методом СМП поведения доменной структуры непосредственно в процессе изменения температуры образца не производились. Это обусловлено инструментальным ограничением метода: изменение температуры образца вызывает паразитный изгиб упругой консоли зондового датчика, что неизбежно приводит к искажению изображения – по величине изгиба упругой консоли в данном методе держится обратная связь. По этой причине исследования температурной динамики методом контактной СМП делаются по следующему алгоритму: 1) изменение температуры образца, 2) ожидание стабилизации изгиба упругой консоли, 3) получение полного изображения при данной температуре. Таким образом, измерения для каждого значения температуры занимают десятки минут и не представляется возможным наблюдать динамику измене-



**Рис. 2.** Схема работы прыжковой СМП: а – типичная зависимость силы взаимодействия зондового датчика с поверхностью от времени за один цикл измерения; б – схема измерения и обработки сигналов



**Рис. 3.** Результаты композиционного анализа динамики электромеханических свойств кристалла ТГС при фазовом переходе второго рода: а – рельеф поверхности; б – фаза вертикального пьезоотклика (направление поляризации); в – модуль Юнга по модели JKR [11]; г – изображение трансформант Фурье участка фазы при температуре 49,2 °С; д – изображение трансформант Фурье участка фазы при температуре 48,5 °С

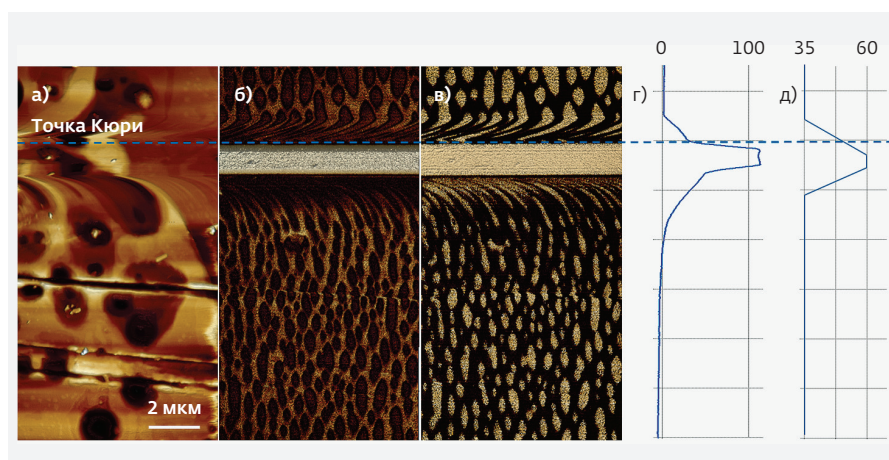
ния геометрии доменных стенок в режиме реального времени.

В отличие от контактной СМП, методом прыжковой СМП можно проводить измерения непосредственно при изменении температуры образца благодаря выше изложенному принципу работы. Кроме того, минимизируется латеральное взаимодействие с образцом, что значительно продлевает срок службы зондового датчика и позволяет проводить неразрушающие измерения.

Возможность *in situ* измерения пьезоотклика и механических свойств в процессе изменения температуры может быть крайне востребовано не только для традиционных исследований поверхности и переходных слоев полупроводниковых структур, но и для исследования кристаллов в момент фазового перехода второго рода, а также с целью минимизации временных затрат на измерение. Например, новое исследование Гайнутдинова [10] показывает, что при температуре,

менее чем на градус ниже точки Кюри в чистом кристалле ТГС появляется ранее незафиксированная квазипериодическая доменная структура.

Разработанным методом прыжковой СМП было проведено измерение пьезоотклика и механических свойств при переходе чистого кристалла ТГС через



**Рис. 4.** Результаты измерений кристалла ТГС методом прыжковой СМП при значительном изменении температуры в процессе измерения: а – рельеф поверхности; б – амплитуда вертикального пьезоотклика; в – фаза вертикального пьезоотклика (направление поляризации); г – паразитный изгиб упругой консоли зондового датчика, нм; д – температура кристалла, °С

точку Кюри. Рис. 4 демонстрирует результаты измерений при переходе из пара- в сегнетофазу. Измерения проводились на АСМ VEGA производства NT-MDT Spectrum Instruments (Москва, Зеленоград, Россия) с использованием зондовых датчиков модели NSG30/TiN того же производителя. Постоянная жесткости кантилевера составляла 36 Н/м, переменное напряжение  $V_{ac}$  на острие зонда подавалось с частотой 170 кГц и амплитудой 10 В. Температура менялась дважды: с  $50,5 \pm 0,1$  °С до  $49,2 \pm 0,1$  °С и с  $49,2 \pm 0,1$  °С до  $48,5 \pm 0,1$  °С, максимальная сила взаимодействия зондового датчика с поверхностью в процессе высокоскоростной силовой спектроскопии составляла 380 нН.

Измерения демонстрируют, что переход из парафазы (выше точки Кюри) в сегнетофазу сопровождается появлением квазипериодической доменной структуры при температуре  $T_c - 1 < T < T_c$ . Кроме того, результаты измерений демонстрируют, что изменения модуля Юнга кристалла ТГС при фазовом переходе второго рода не происходит.

Стоит отметить, что данные измерения были проведены при достаточно небольшом диапазоне изменения температуры. Для демонстрации возможностей прыжковой СПМ кристалл ТГС также был измерен при значительном изменении температуры в процессе сканирования (рис. 5).

Температура кристалла менялась в процессе сканирования с 35 до 60 °С за время 200 с, после чего опускалась до значения 35 °С. Как видно на графике зависимости паразитного изгиба упругой консоли зондового датчика от времени (рис. 5г), изгиб составил более 100 нм, что не повлияло на корректность измерения пьезоотклика.

## ВЫВОДЫ

Разработан метод атомно-силовой микроскопии для неразрушающего исследования температурной динамики электромеханических свойств наноструктур и продемонстрирована его работа на примере измерения сегнетоэлектрического кристалла триглицинсульфата в процессе фазового перехода второго рода. Метод интегрирован в серийный атомно-силовой микроскоп для 200 мм образцов и может быть, в частности, применен для исследовательских задач в области микроэлектроники.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nanoscale Characterisation of Ferroelectric Materials: Scanning Probe Microscopy Approach / ed. Alexe M., Gruverman A. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013. 290 p.
2. **Martin Y., Williams C. C., Wickramasinghe H. K.** Atomic force microscope-force mapping and profiling on a sub 100-Å scale // *J. Appl. Phys.* 1987. Vol. 61. № 10. P. 4723–4729.
3. **Heinz W. F., Hoh J. H.** Spatially resolved force spectroscopy of biological surfaces using the atomic force microscope // *Trends Biotechnol.* 1999. Vol. 17. № 4. P. 143–150.
4. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В.** Начальный этап термического окисления кремния и формирование пограничного слоя в системе Si-SiO<sub>2</sub> // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2003. Т. 37. № 2. С. 98–104.
5. **Magonov S. et al.** Scanning probe based apparatus and methods for low-force profiling of sample surfaces and detection and mapping of local mechanical and electromagnetic properties in non-resonant oscillatory mode: pat. US9110092B1 USA. 2015.
6. **Струков Б. А.** Фазовые переходы в сегнетоэлектрических кристаллах с дефектами // *Соровский обзорный журнал.* 1996. № 12. С. 95–101.
7. **Дрождин С. Н., Голицына О. М.** Температурное и временное поведение структуры кристаллов триглицинсульфата вблизи фазового перехода // *Физика твердого тела.* 2012. Т. 54. № 5. С. 853–858.
8. **Likodimos V., Labardi M., Allegrini M.** Domain pattern formation and kinetics on ferroelectric surfaces under thermal cycling using scanning force microscopy // *Phys. Rev. B.* 2002. Vol. 66. № 2. P. 24104.
9. **Likodimos V. et al.** Thermally activated ferroelectric domain growth due to random defects // *Phys. Rev. B.* 2001. Vol. 63. № 6. P. 64104.
10. **Толстихина А. Л., Белугина Н. В., Гайнутдинов Р. В.** Использование трансформант Фурье для анализа изображений доменной структуры одноосного сегнетоэлектрика. 2017. № 10. С. 469–474.
11. **Johnson K. L., Kendall K., Roberts A. D.** Surface Energy and the Contact of Elastic Solids // *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 1971. Vol. 324. № 1558. P. 301–313.



# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕЗИСТОВ

► Г. Я. Красников<sup>1</sup>, О. П. Гушин<sup>1</sup>, А. В. Шишлянников<sup>1</sup>, Е. С. Горнев<sup>1</sup>, Н. А. Орликовский<sup>2</sup>, А. А. Татаринцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НИИМЭ», <sup>2</sup> ФТИАН РАН

В работе представлены результаты сравнительной оценки современных позитивных и негативных электронных резистов по ключевым параметрам: разрешению, чувствительности, шероховатости края, селективности в процессе плазмохимического травления кремния. Анализировались линейчатые тестовые структуры с плотным расположением линий с минимальными достижимыми по разрешению размерами, сформированными для каждого из исследуемых резистов с целью возможности их дальнейшего использования для формирования затворных структур. Также было проведено сравнение уровня стойкости резистов при плазменном воздействии процесса сухого травления жесткой кремниевой маски.

## INVESTIGATION OF PROCESS PARAMETERS OF MODERN ELECTRONIC RESISTS

G. Ya. Krasnikov<sup>1</sup>, O. P. Gushin<sup>1</sup>, A. V. Shishlyannikov<sup>1</sup>, E. S. Gornev<sup>1</sup>, N. A. Orlikovskiy<sup>2</sup>, A. A. Tatarintsev<sup>2</sup>

MERIS C

The work presents comparison results evaluation for modern positive and negative-electronic resists through analysis of their key parameters: resolution, sensitivity, edge roughness, selectivity upon silicon during dry etch process. Test dense linear structures with the smallest resolved line width fabricated for each resist sample with the purpose of the possibility of their further use for the formation of gate structures were analyzed. Also each resist plasma treatment resistance level comparison was conducted in respect of silicon hard mask dry etch process.

## ВВЕДЕНИЕ

По мере того, как внедрение технологии EUV задерживается, растет интерес со стороны полупроводниковых компаний к электронно-лучевой (E-beam) литографии. Постоянное увеличение стоимости оптической литографии на основе масок только увеличило этот интерес. Безмасочная электронно-лучевая литография становится все более перспективным, наименее затратным решением, которое позволяет быстро освоить технологии формирования минимальных размеров 45–32 нм и ниже и применить их при разработке, аттестации и мелкосерийном производстве КМОП СБИС. Еще в 2004 году международный

центр SEA-LETI совместно с голландской фирмой MAPPER разработали технологию и изготовили КМОП-память с минимальными размерами 65 нм, применяя на критических размерах электронно-лучевую литографию, а для некритических слоев используя оптическую литографию. Продемонстрирована 6-транзисторная ячейка СОЗУ площадью 0,69 мкм<sup>2</sup> с полностью функциональными и надежными транзисторами. Представленную топологию ячейки можно смасштабировать до площади 0,6 мкм<sup>2</sup> при дальнейшем улучшении технологии. Набор транзисторов и правила проектирования для 65 нм совместимы с требованиями для фаундри и позволяют конкурентоспособно исполь-

зовать в IP-блоках третьих поставщиков. Для этой платформы была предложена плотность расположения затворов стандартных ячеек выше, чем 780 тыс. затворов/мм<sup>2</sup> [1].

Международная IMAGINE программа [2], которая сосредоточена на исследовании и создании всей инфраструктуры многолучевой литографии, привлекла большое число ведущих фирм, включая разработчиков резистов с ключевыми параметрами разрешения, шероховатости и селективности в плазмохимических процессах. Здесь большая роль отводится резистам с химическим усилением скрытого изображения.

Химически усиленные резисты доказали свою эффективность при достижении требований к разрешению, при этом сохраняя целевую чувствительность. Ниже 20-нм разрешения кратковременная шероховатость начинает играть важную роль по качеству паттернирования и критическому контролю размеров. В то же время резисты без химического усиления демонстрируют привлекательный прогресс разрешения с разумными уровнями чувствительности.

Как химически усиленные резисты (CAR), так и резисты без химического усиления (non CAR), рассматриваются как потенциальное решение как для процессов в EUV, так и для E-beam. Оба типа требуют высокоэффективного резиста с разрешающей способностью от 22 нм и ниже.

В нашей работе мы провели оценку некоторых современных позитивных и негативных электронных резистов по указанным выше основным технологическим параметрам.

Выбор резиста должен осуществляться в зависимости от структуры, которую нужно сформировать и особенностей самого технологического процесса, где каждый из этих резистов может найти свое специфическое применение. Так как исследовалось разрешение в изолированных и плотных линиях, полученные результаты наиболее соответствуют формированию затворов, одной из самых критичных литографий в наномаршруте КМОП СБИС.

Для работы были выбраны позитивный и негативный электронные резисты с химическим усилением скрытого изображения MES EP555JE, OEBCAN038AE, разработанные ведущими поставщиками на базе DUV фоторезистов, чувствительные к длине волны 248 нм (KrF), и использующие технику химического усиления скрытого изображения, что позволяет адаптировать эти материалы под производство КМОП СБИС, используя уже разработанные и имеющиеся на предприятии технологические приемы и оборудование [3]. Исследовался также неорганический негативный резист XR-1541 (HSQ) и уже хорошо известный позитивный резист ZEP-520A, без химического усиления.

Для успешного применения резистов на практике необходимо контролировать основные параметров, называемых дозовыми характеристиками. Дозовыми характеристиками электронных резистов являются их чувствительность и контрастность. Чувствительность резиста – это минимальная необходимая для полного проявления резиста доза экспонирования. Другой важной характеристикой электронного резиста является контрастность, то есть крутизна графика дозовой зависимости.

**Таблица 1.** Параметры процессов плазмохимического травления

Параметры процесса ПХТ, ед. изм.	Значение параметра		
ВЧ-мощность источника индуктивно-связанной плазмы, Вт	1 200		
Давление, мТорр	10		
Температура столика, °С	20		
Прикладываемая мощность смещения на образец, Вт	25	30	35
Постоянное напряжение смещения, получаемое при соответствующей мощности, В	168	188	208
Расход используемых газов, ст. см <sup>3</sup> /мин	SF <sub>6</sub>		C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>
	22	44	
Время травления, с	60		

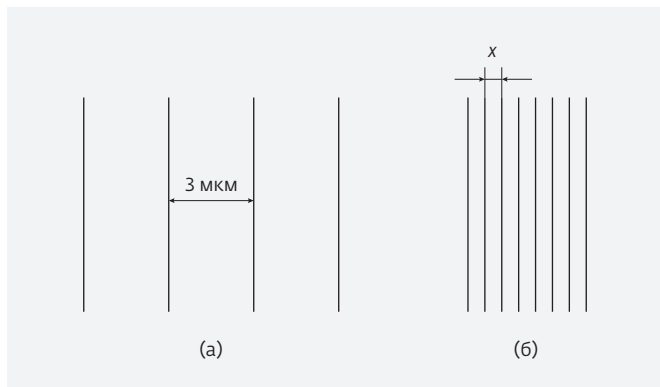


Рис. 1. Тестовые структуры: а – изолированные линии, б – решетка плотных линий с шагом  $x$

Одним из важнейших технологических параметров процесса нанолитографии, который, прежде всего, определяется резистом, является шероховатость края линии (LER), один из механизмов образования которой детально рассматривался в работе.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### Подготовка образцов.

#### Оборудование

Исследования проводились на электронно-лучевом литографе Raith-150. Электронно-оптическая колонна формирует луч размером 2–4 нм при ускоряющем напряжении 20 кВ, диапазон ускоряющих напряжений от 200 В до 30 кВ. Ток луча в зависимости от его диаметра и ускоряющего напряжения может быть в пределах 1 пА – 5 мкА. Стол имеет лазерную интерферометрическую систему измерения координат с разрешением до 2 нм. Тактовая частота системы управления лучом 10 МГц, точность положения луча на пластине при размере поля экспонирования  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup> не менее 2 нм.

Для подготовки образцов с целью формирования минимальных размеров с использованием электронно-лучевого литографа Raith-150 была разработана следующая методика:

- после отмывок и отжига кремниевых пластин диаметром 100 мм проводилось нанесение резистов на центрифуге SAWATEC при 1500 и 5000 об/мин;
- затем проводилось экспонирование с максимальной энергией первичного пучка 30 кэВ при оптимальной диафрагме 10 мкм, за счет чего достигается минимально возможное пятно зонда литографа. Дозы экспонирования подби-

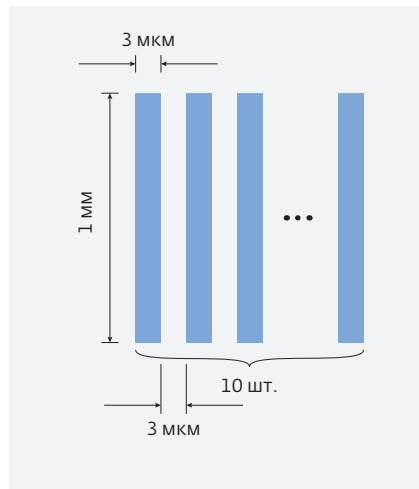


Рис. 2. Тестовые структуры для экспериментальной проверки селективности резистивной маски к процессу плазменного травления

рались отдельно с целью выявить минимальную, достаточную для проявления линии.

Использовались два типа различных тестовых структур:

- изолированные линии длиной 1 мм и шириной в минимальный размер пучка, расстояние между соседними линиями 3 мкм (рис. 1а);
- решетки плотных линий с расстоянием между соседними в каждой группе 50, 80, 120, 200 нм.

Экспонированные пластины проявлялись по разработанному маршруту и параметрам проявления при комнатной температуре. В качестве проявителя для CAR-резистов использовался раствор тетраметиламмония (ТМА).

Проявленные пластины с тестовыми структурами помещались в реактор установки плазмо-

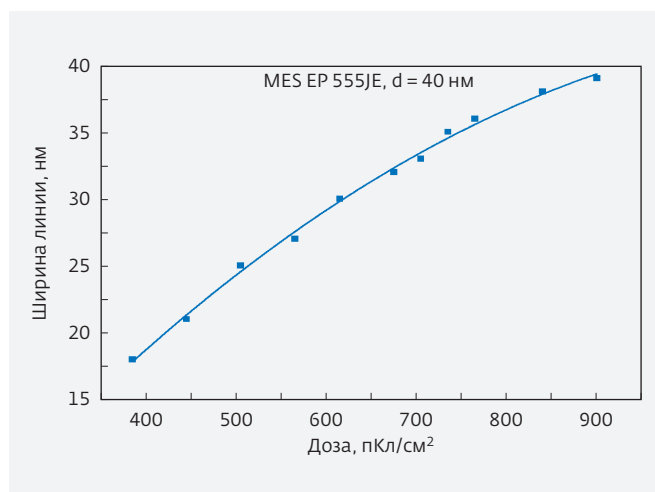
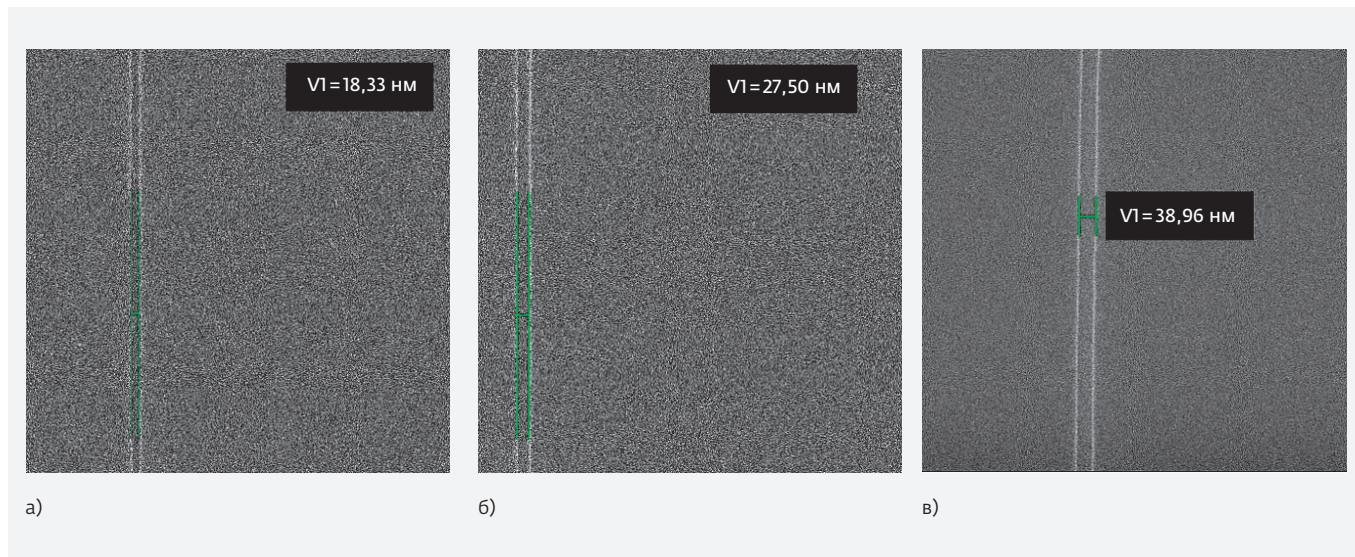


Рис. 3. Зависимость ширины изолированной линии от дозы облучения



**Рис. 4.** Изолированные линии при различных дозах: а – 385 пКл/см<sup>2</sup>, б – 565 пКл/см<sup>2</sup>, в – 900 пКл/см<sup>2</sup>

химического травления Oxford PlasmaLab 100, где в смеси газов SF<sub>6</sub> и C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> проводился процесс травления кремния. В табл. 1 приведены параметры процесса плазмохимического травления кремния через сформированные электронные резистивные маски. Травление проводилось при разных напряжениях смещения на образец в диапазоне мощностей от 25 до 35 Вт.

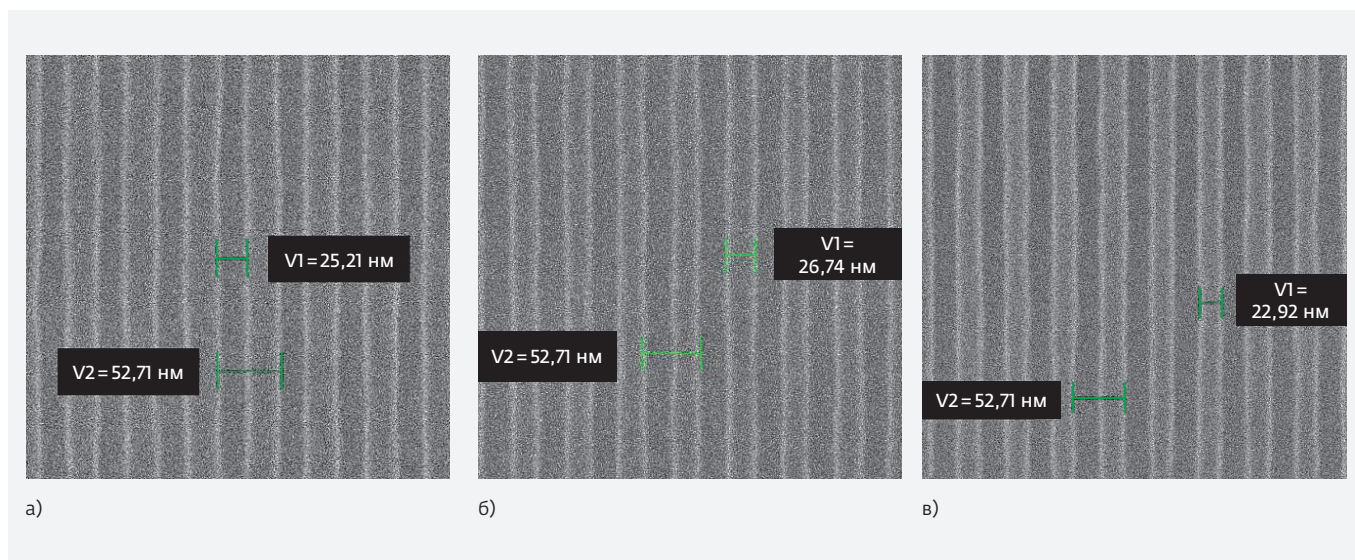
После операций плазмохимического травления на образцах делались сколы перпендикулярно структурам (см. рис. 2) и проводилось измерение глубины травления кремния и толщины остав-

шегося резиста. Затем, по полученным экспериментальным данным, рассчитывалась селективность резиста в процессе травления и его стойкость в плазме.

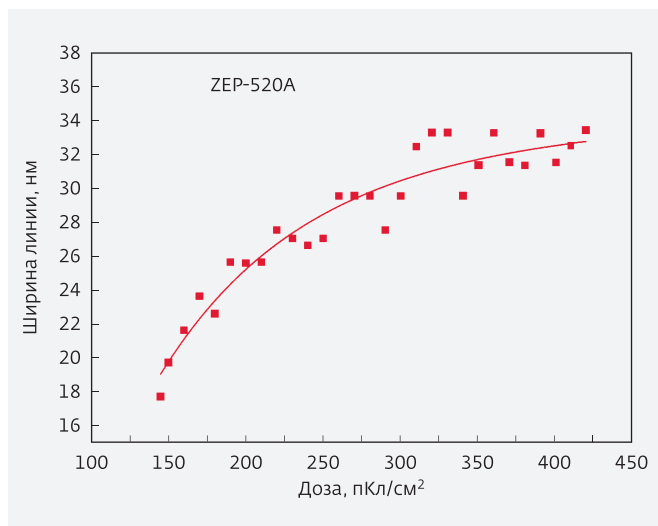
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ Позитивный электронный резист MES EP 555JE

Толщина слоя резиста 40 нм

На рис. 3 представлена зависимость ширины изолированной линии от дозы облучения для резиста MES EP555JE. Минимальная ширина линии,



**Рис. 5.** Решетки линий с шагом 50 нм при различных дозах: а – 300 пКл/см<sup>2</sup>, б – 355 пКл/см<sup>2</sup>, в – 405 пКл/см<sup>2</sup>



**Рис. 6.** Зависимость ширины изолированной линии от дозы облучения

которую удалось сформировать с использованием этого резиста ~18 нм при дозе 385 пКл/см<sup>2</sup>. На рис. 4 представлены изолированные линии для трех значений дозы – 385, 565 и 900 пКл/см<sup>2</sup> с ширинами линий 18, 27 и 39 нм соответственно.

На рис. 5 представлены тестовые структуры в виде решеток линий с шагом 50 нм. Дозы облучения соответствовали 300, 355, 405 пКл/см<sup>2</sup>. Сформированы линии шириной 25, 27 и 23 нм соответственно.

## Позитивный электронный резист ZEP-520A

**Толщина слоя резиста 100 нм**

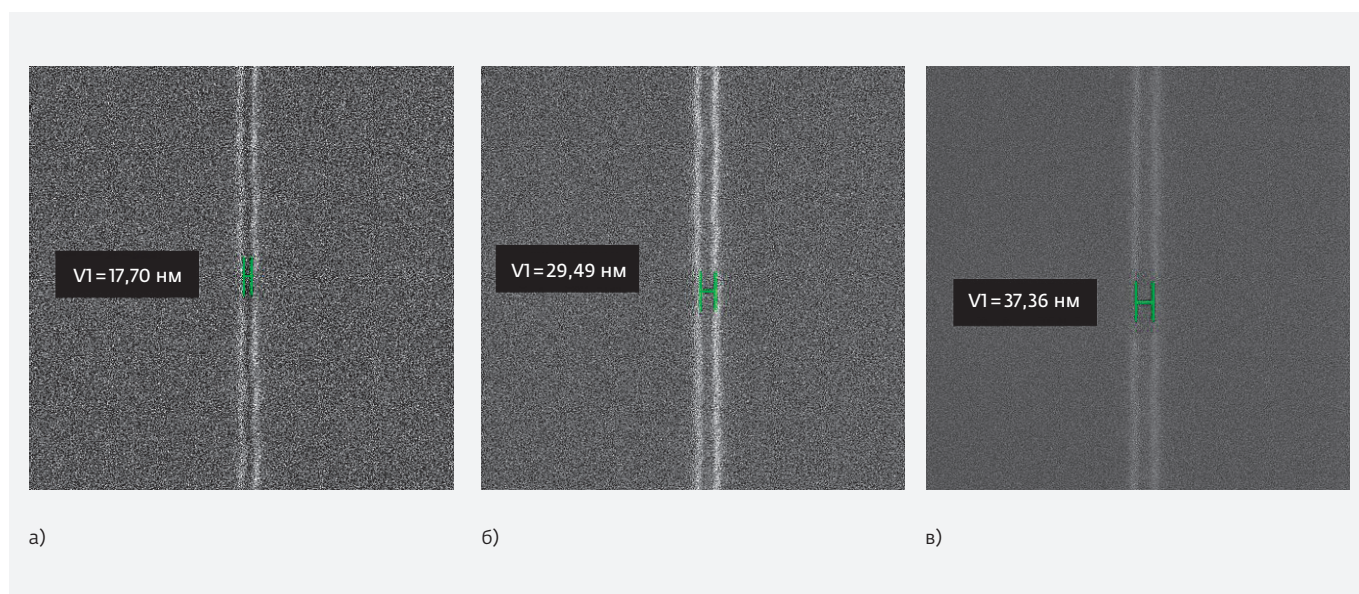
Зависимость ширины изолированной линии от дозы облучения для резиста ZEP-520A представлена на графике рис. 6. Минимальная ширина линии, которую удалось достигнуть для этого резиста ~18 нм при дозе 145 пКл/см<sup>2</sup>. На рис. 7 представлены изолированные линии для трех значений дозы – 145, 280 и 420 пКл/см<sup>2</sup> с размерами линий 18, 29 и 37 нм соответственно.

На рис. 8 представлены тестовые структуры в виде решетки плотных линий с шагом 80 нм при различных дозах облучения. Соответствующие размеры сформированных линий составляют 21, 20, 21, 26 и 34 нм.

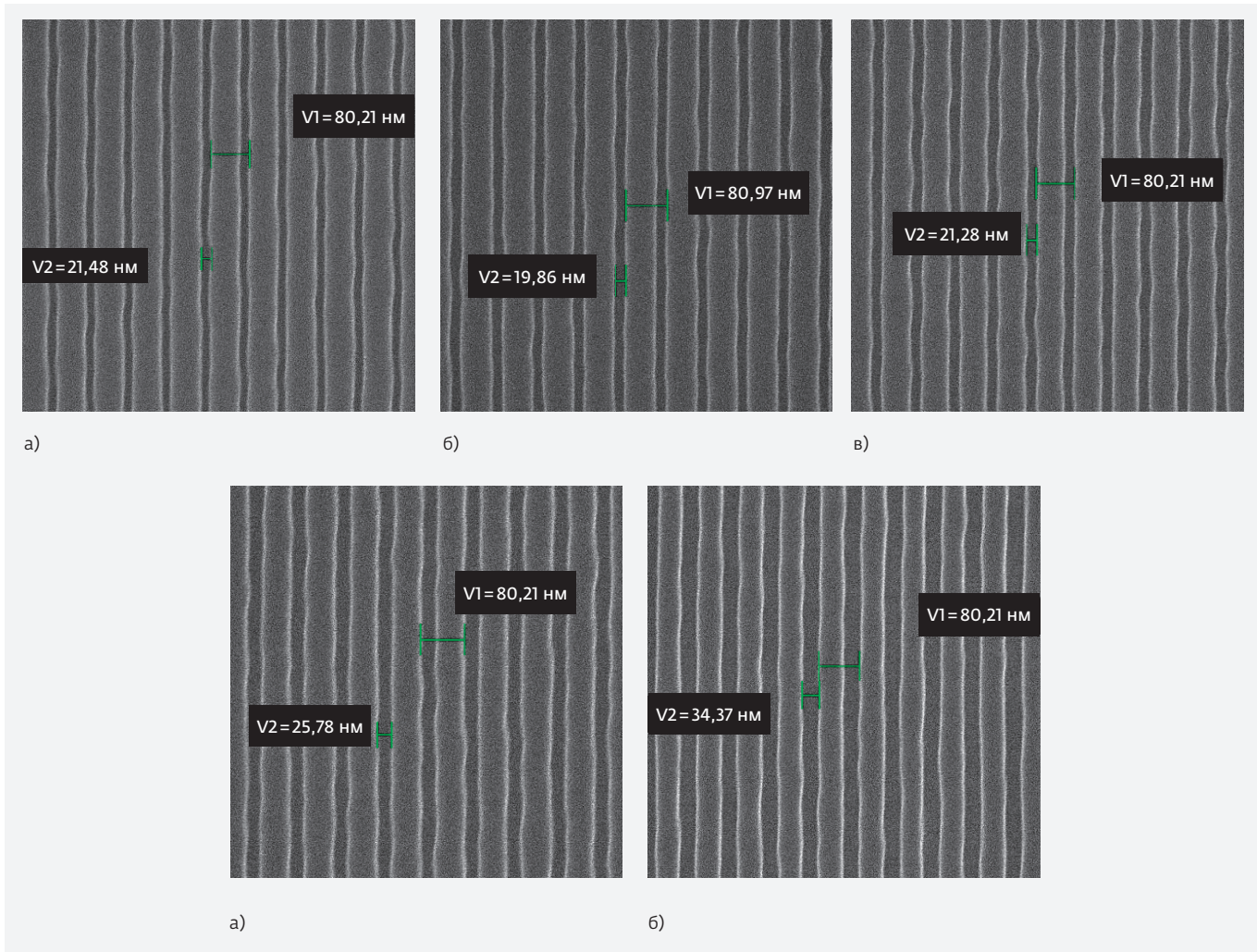
## Негативный электронный резист OEVR EN038AE

**Толщина слоя резиста 65 нм**

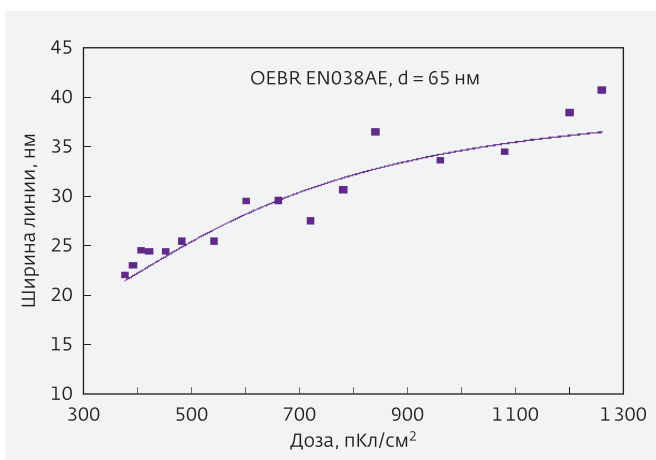
Зависимость ширины изолированной линии от дозы облучения для негативного резиста OEVR EN038AE представлена на графике рис. 9. Минимальная ширина линии, которую удалось достигнуть для этого резиста ~21 нм при дозе 375 пКл/см<sup>2</sup>. На рис. 10 представлены изображения изолированных линий, полученных в резисте EN038AE для трех значений дозы – 375, 600, 1 200 пКл/см<sup>2</sup> с ширинами линий 21, 29 и 38 нм соответственно.



**Рис. 7.** Изолированные линии при различных дозах: а – 145 пКл/см<sup>2</sup>, б – 280 пКл/см<sup>2</sup>, в – 420 пКл/см<sup>2</sup>



**Рис. 8.** Решетки плотных линий с шагом 80 нм при различных дозах: а – 250 пКл/см<sup>2</sup>, б – 300 пКл/см<sup>2</sup>, в – 350 пКл/см<sup>2</sup>, г – 400 пКл/см<sup>2</sup>, д – 500 пКл/см<sup>2</sup>



**Рис. 9.** Зависимость ширины изолированной линии от дозы облучения

На рис. 11 представлены тестовые структуры в виде решетки плотных линий с шагом 80 нм при различных дозах облучения. Соответствующие размеры сформированных линий составляют 31, 40, 31 и 42 нм.

### ОПТИМИЗАЦИИ ТЕСТОВЫХ СТРУКТУР ПО РАЗРЕШЕНИЮ И ПАРАМЕТРУ ШЕРОХОВАТОСТИ КРАЯ ЛИНИИ

Одним из важных параметров, влияющих на минимальный размер, качество, а также плотность структур, реализуемых в процессе электронно-лучевой литографии, является шероховатость края линии (LER – ШКЛ, см. рис. 12).

Факторы, влияющие на шероховатость края линии, а также на качество отдельной линии можно разделить на две группы:

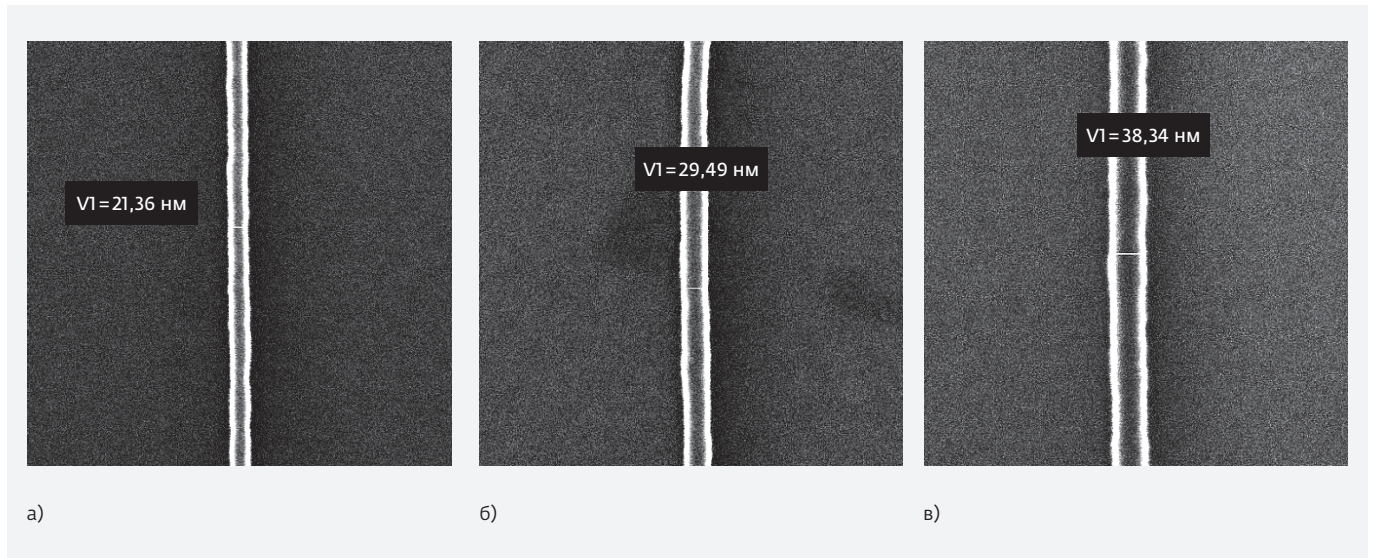


Рис. 10. Изолированные линии при различных дозах: а – 375 пКл/см<sup>2</sup>, б – 600 пКл/см<sup>2</sup>, в – 1200 пКл/см<sup>2</sup>

- *Внешние факторы*, описывающие влияние отклонения параметров аппаратной части литографии и флуктуации, вносимые извне. Эти факторы включают вибрации колонны и ее тепловую нестабильность, электрические шумы в электронных блоках и в катушках, а также другие аппаратные помехи.

- *Внутренние факторы* связаны с неоднородностью резиста, неоднородностью поглощенной дозы экспонирования или эффекта близости. В неоднородном по своим свойствам резисте это связано с наличием так называемых «полимерных узлов» [5-7].

Внутренние неоднородности в резистах вызывают LER вдоль боковых краев. Например, если нет изменения интенсивности экспозиционного облучения, поглощение электронов резистами зависит от физического положения. Предполагая равномерное поглощение электронов, случайное растворение и различные размеры в полимерных цепях резистов вызывают шеро-

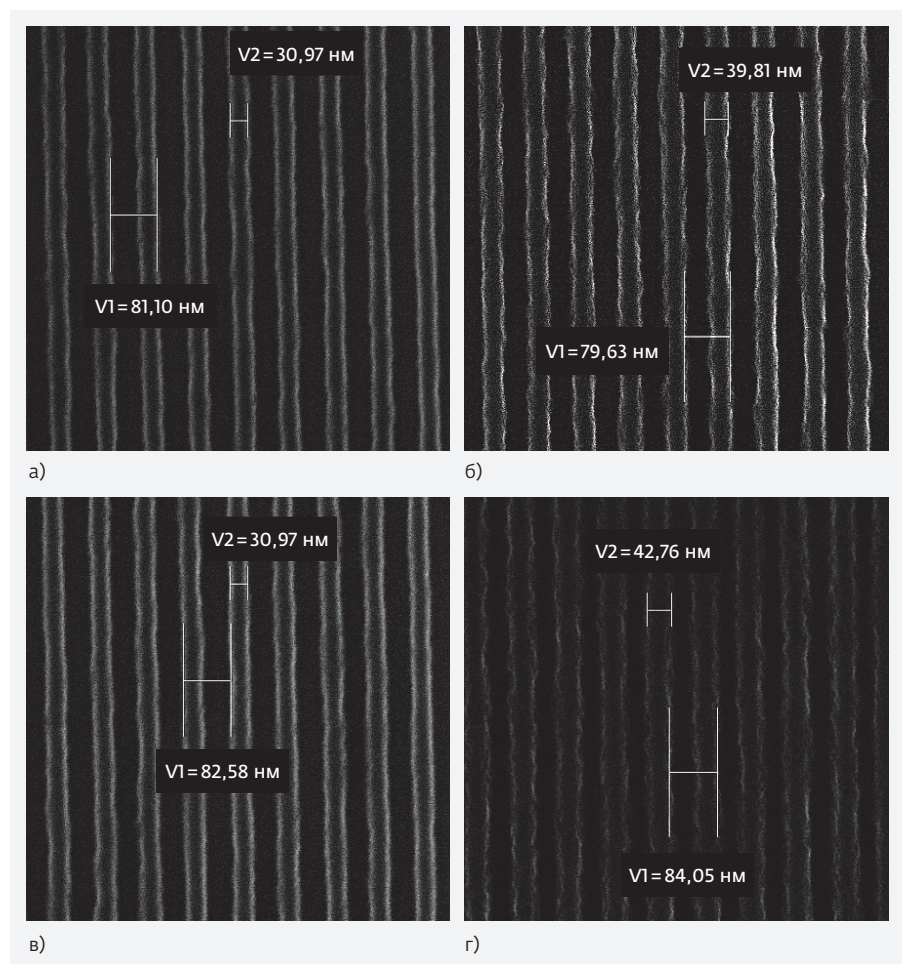
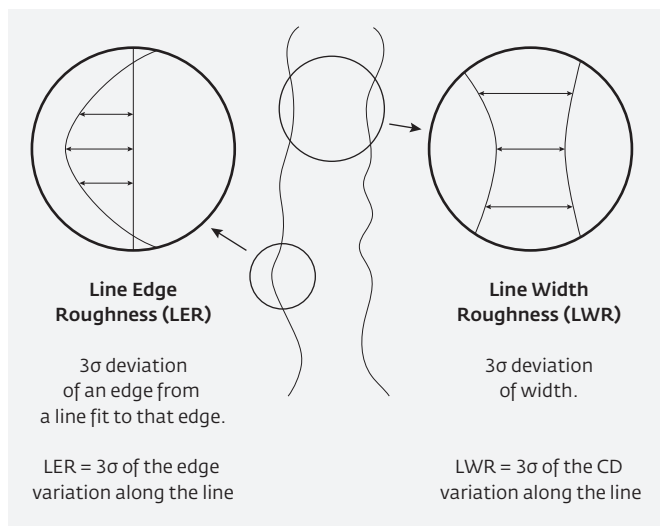


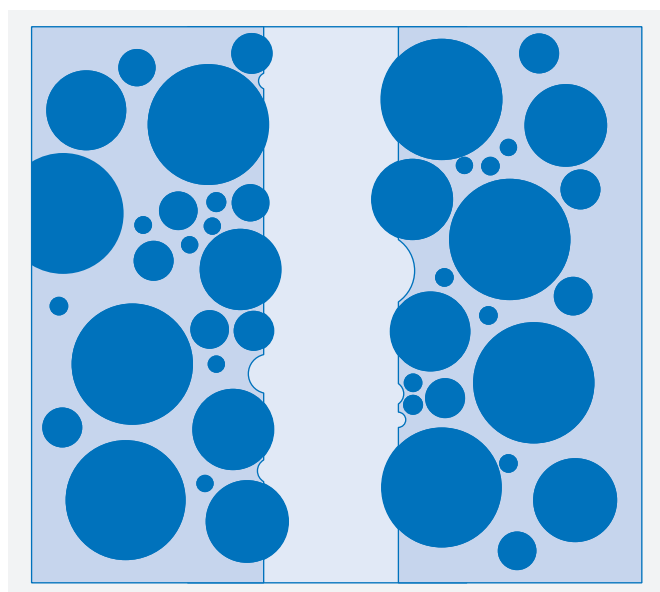
Рис. 11. Решетки плотных линий с шагом 80 нм при различных дозах: а – 350 пКл/см<sup>2</sup>, б – 375 пКл/см<sup>2</sup>, в – 400 пКл/см<sup>2</sup>, г – 450 пКл/см<sup>2</sup>



**Рис. 12.** Определение шероховатости края линии и шероховатости отдельной линии [4]

ховатость на краю линии (рис. 13). Кроме того, по краям экспонированных структур некоторые молекулы полимера могут размазываться в проявителе, оставаясь прикрепленными к остальной части пленки резиста. Во время промывки деионизованной водой эти частично растворенные полимерные цепи повторно осаждаются на резист и переопределяют края линии [8].

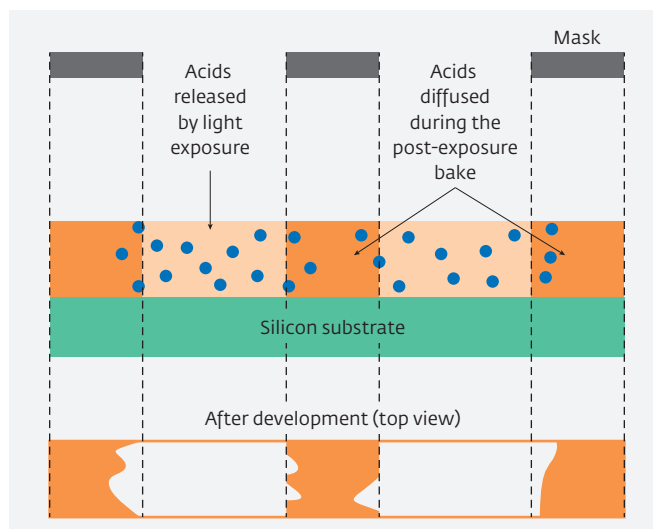
В КМОП-производстве химическое усиление используется для повышения чувствительности



**Рис. 13.** Шероховатость края вследствие наличия полимерных узлов различных размеров [9]

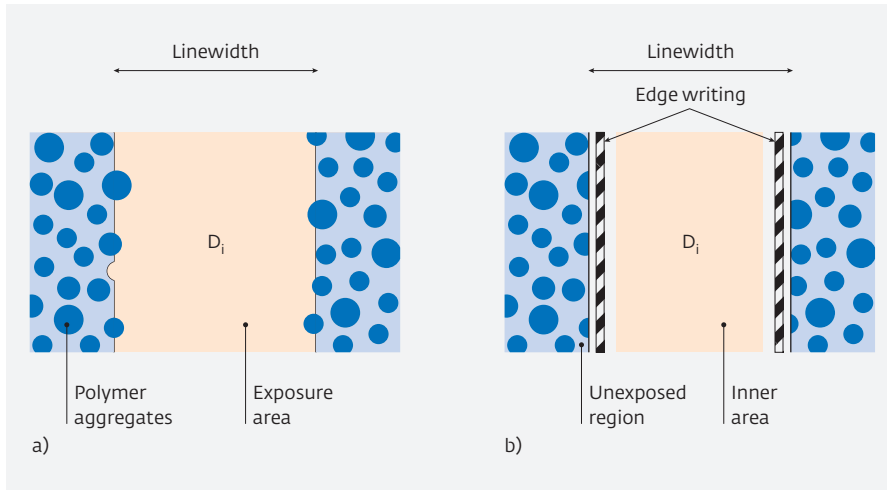
резиста. Химически усиленный резист содержит фотокислотные генераторы (рис. 14). Когда фотокислотные генераторы в химически усиленной резистивной пленке поглощают энергию света, они разлагаются на кислотные катионы и другие анионы. Этот процесс разложения называется снятием защиты. Во время стадии постэкспозиционной сушки образующиеся кислоты диффундируют внутри резистивной пленки и помогают катализировать реакции снятия защиты. Кислоты не потребляются, но продолжают существовать в реакциях снятия защиты и, следовательно, способны многократно катализировать реакции. Поскольку кислоты меняют растворимость полимера, области с защищенным полимером избирательно удаляются с помощью проявителя, поэтому шаблоны на маске могут быть перенесены на резистивную пленку.

Случайная диффузия кислот внутри резистивной пленки является причиной образования шероховатости края линии. Во время стадии постэкспозиционной сушки, температура сушки и концентрация побочных продуктов реакции оказывают влияние на коэффициент диффузии кислоты. Диффузионное расстояние молекул кислоты составляет несколько десятков нанометров. Однако очень трудно полностью контролировать скорость диффузии, потому что температура, концентрация побочных продуктов не являются постоянными в процессе сушки. Следовательно, возможно, что



**Рис. 14.** Механизм образования шероховатости края линии в химически усиленных резистах вследствие кислотной диффузии после постэкспозиционной сушки [9]





**Рис. 15.** а – схематическое изображение оставшихся после экспонирования полимерных узлов (Polymer aggregates) после облучения площадки (Exposure area) с дозой  $D_i$  и шириной (linewidth), б – метод, предложенный в [7] – экспонирование линий (Edge writing) с большой дозой на краю около необлученной области (Unexposed region) и дальнейшего экспонирование внутренней области (Inner area) с дозой  $D_i$

некоторые кислоты будут диффундировать по краю линии, тем самым увеличивая LER [9].

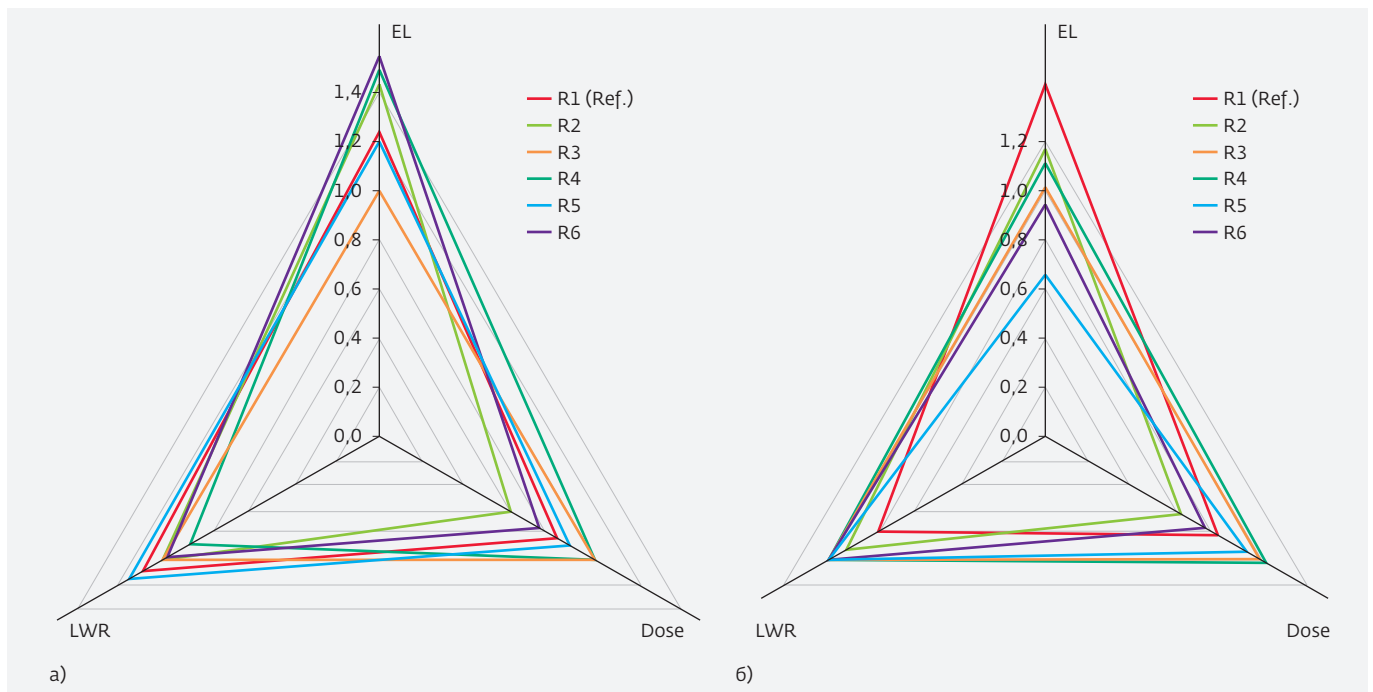
Опубликованная в [6] методика позволяет визуализировать полимерные узлы в РЭМ. Для этого



**Рис. 16.** Многослойный резистивный стек [10]

экспонируется площадка с дозой, меньшей, чем для полного проявления резиста, в процессе которого окружающий полимерные узлы массив резиста растворяется.

Специалисты из ведущего французского центра CEA-LETI совместно с коллегами из MAPPER в рамках программы IMAGINE провели исследования, направленные на улучшение компромисса между разрешением, шерохова-



**Рис. 17.** Сравнительный анализ шести различных резистов на SOCl/Si-HM1 для структур с полушагом 32 нм: а – решетка плотных линий; б – контактные окна (EL – energy latitude) [10]

Stack	Resist 1 ~ 37 nm Si-HM 1 – 30 nm SOC1 – 95 nm		Resist 2 ~ 37 nm Si-HM 1 – 30 nm SOC1 – 95 nm		Lithography parameters						
	Stack A	Stack B	Stack A	Stack B	Stack A	Stack B					
L/S 32 nmp			Sensitivity ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	31	19 (-40%)	EL (%/nm)	2,0	2,9 (+45%)	LWR ( $3\sigma$ )	4,2	4,1 (-)
CH 32 nmp			Sensitivity ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	49	31 (-37%)	EL (%/nm)	3,1	3,5 (+13%)	L-CDU ( $3\sigma$ )	4,2	1,2 (-8%)

Рис. 18 Линейные структуры и контактные окна с полушагом 32 нм [10]

	32 nmhp	32 nmhp	26 nmhp	24 nmhp	22 nmhp	20 nmhp
Resist 1 ~ 37 nm Si-HM 1 – 22 nm SOC1 – 170 nm						
BIAS	No bias	Bias – 20 nm	Bias – 14 nm	Bias – 12 nm	Bias – 10 nm	Bias – 12 nm
LWR	4,4	3,1	3,1	3,6	3,5	4,1

Рис. 19. LWR как функция различных полушагов с отрицательной стратегией написания смещения [10]

тостью края и чувствительностью для многослойной литографической платформы. Использовалась концепция многослойного литографического стека с применением жесткой маски, а также ряд дополнительных слоев, таких как дегазационный защитный слой, необходимый для предотвращения загрязнения оптических элементов и проводящего слоя для эвакуации заряда, вызванного избытком электронов в резисте, а также spin-слой для устойчивости при плазменном травлении (рис. 16).

Наилучший компромисс для решения как для топологий плотных линий, так и для контактных окон получается с помощью стека В с использованием резиста 2 за счет снижения чувствительности в два раза, уве-

личением дозы до 45%. Шероховатость линий является наиболее сложным параметром для улучшения, не лучше, чем 10%.

Исходя из данных рисунка, шероховатость края постоянна для структур с полушагом 32 и 26 нм

	24 nmhp		22 nmhp	
	E-beam	EUV (ASML)	E-beam	EUV (JSR)
LWR	3,6	3,7	3,5	3,6

Рис. 20. Сравнение значений шероховатости края при использовании электронного луча с ускоряющим напряжением 5 кВ и EUV литографии для структур с полушагом 24 и 22 нм [10]

и увеличивается до 3,5 нм при переходе к структурам с полушагом 22 нм.

Для оценки неоднородностей в резистах был проведен эксперимент для ранее уже исследованного нами позитивного электронного резиста OEBR CAP-164 [11], а также для позитивных резистов ZEP-520A, MES EP555JE. Экспонировались квадраты с размерами 5×5 мкм с изменяющимся множителем дозы от 1 до 5, где множитель дозы 5 соответствует дозе, необходимой для полного проявления исследуемого резиста.

На рис. 22 представлены результаты выявления неоднородностей и узлов для позитивного электронного резиста OEBR CAP-164.

Из рисунка следует, что исследуемый резист имеет неоднородности и шероховатости с характерными размерами 10–35 нм.

На рис. 23 представлены результаты выявления неоднородностей и узлов для позитивного электронного резиста ZEP-520A.

Из рисунка следует, что исследуемый резист также имеет шероховатости и неоднородности с характерными размерами 20–30 нм.

На рис. 24 представлены результаты выявления неоднородностей и узлов для позитивного электронного резиста MES EP555JE.

Из рисунка следует, что исследуемый резист также имеет неоднородности и шероховатости, но с меньшими характерными размерами 10–20 нм.

Сопоставив данные рис. 22, 23, 24, можно сделать вывод, что наиболее малой плотностью неоднородностей обладает резист OEBR CAP-164. Для резистов ZEP-520A и MES EP555JE плотность неоднородностей выше. Самые большие в среднем по размеру неоднородности присутствуют в резисте ZEP-520A, чуть меньше они в резисте OEBR CAP-164, и наименьший размер неоднородностей у резиста MES EP555JE.

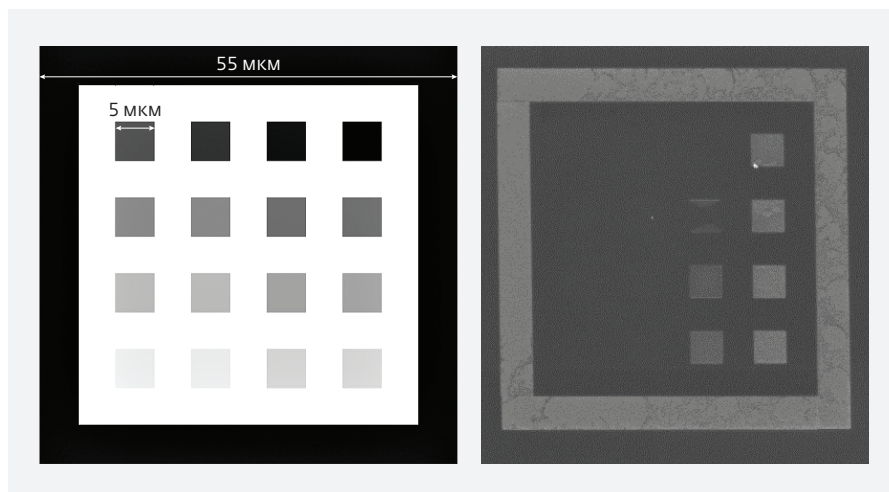


Рис. 21. а – общий вид структур для выявления полимерных узлов в позитивном электронном резисте; б – сделанный в электронном микроскопе снимок тестовой структуры после проявления резиста

На рис. 25, 26, 27 изображены тестовые структуры в виде решетки плотных линий с шагом 120 нм при различных дозах облучения для резистов OEBR CAP-164, MES EP555JE и ZEP-520A.

Исходя из рис. 22, 23, 24 и сопоставляя эти данные с данными рис. 25, 26, 27, можно сделать вывод, что:

- в резисте OEBR CAP-164 наблюдаются достаточно большие полимерные узлы при малой дозе облучения (рис. 25(а)); при увеличении дозы в 1,25–1,5 (рис. 25) линии получают полностью про-

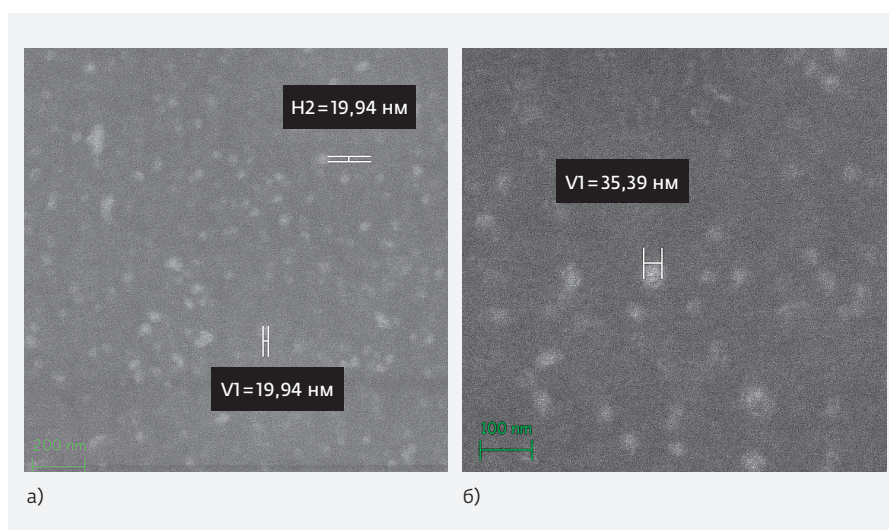


Рис. 22. Неоднородности и полимерные узлы, полученные в электронном резисте OEBR CAP-164 при неполной засветке области при разных увеличениях

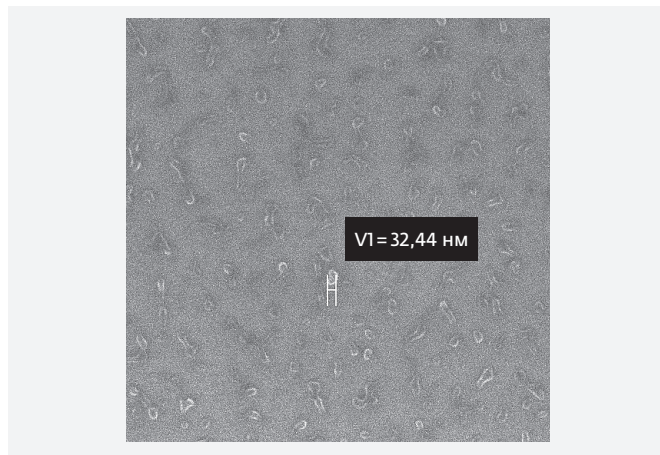


Рис. 23. Неоднородности и полимерные узлы, полученные в электронном резисте ZEP-520A

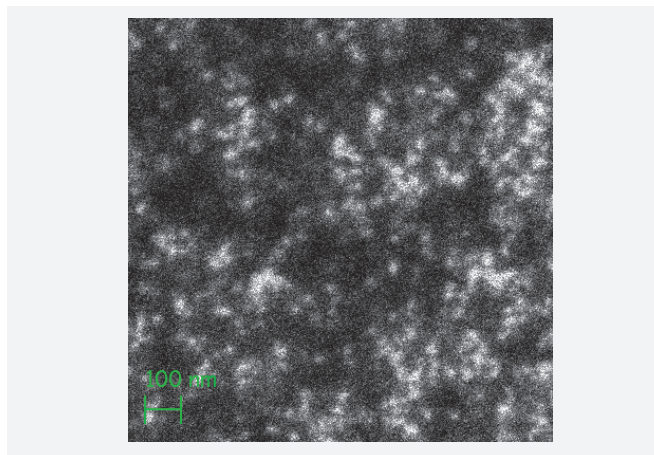


Рис. 24. Неоднородности и полимерные узлы, полученные в электронном резисте JSR MES EP555JE

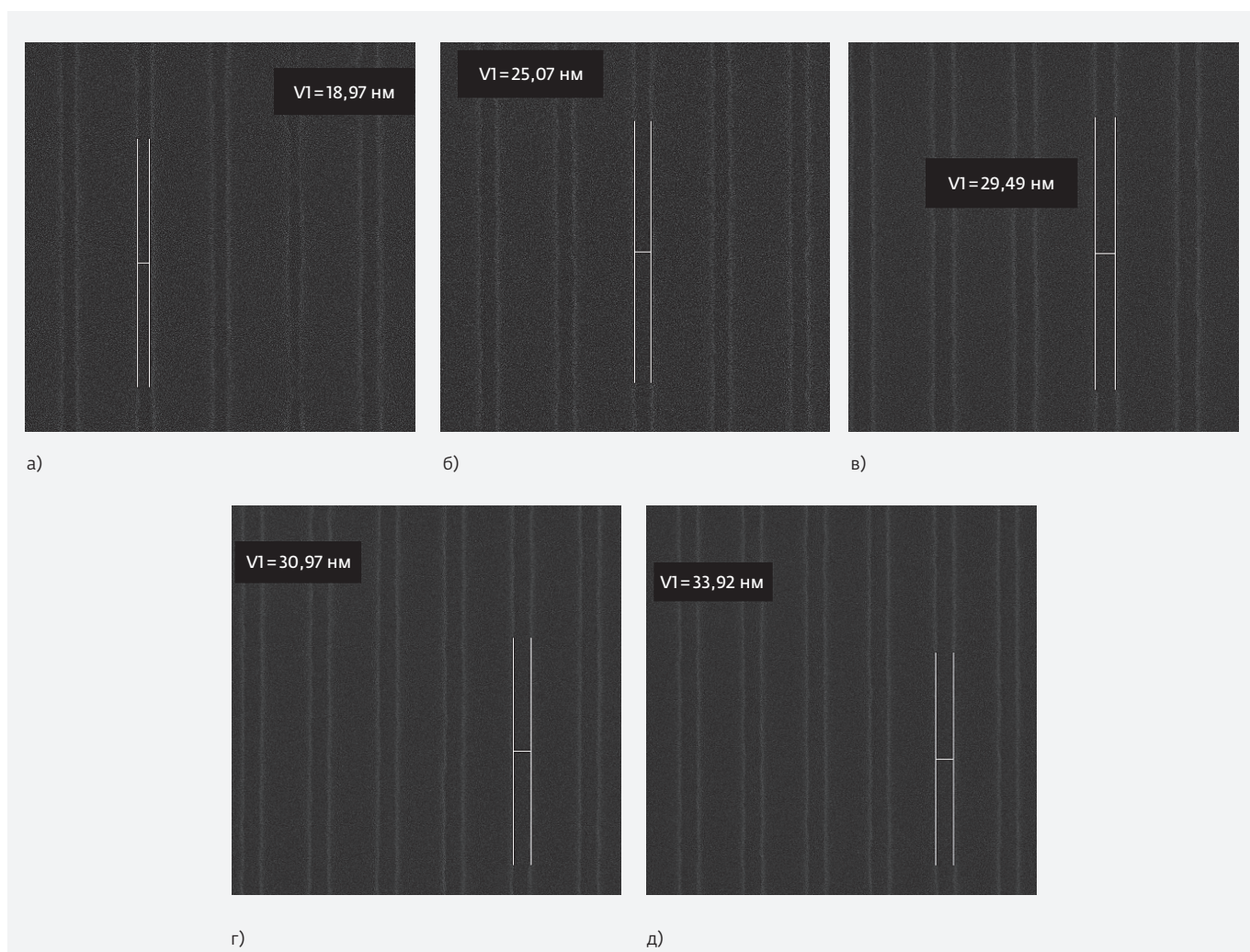
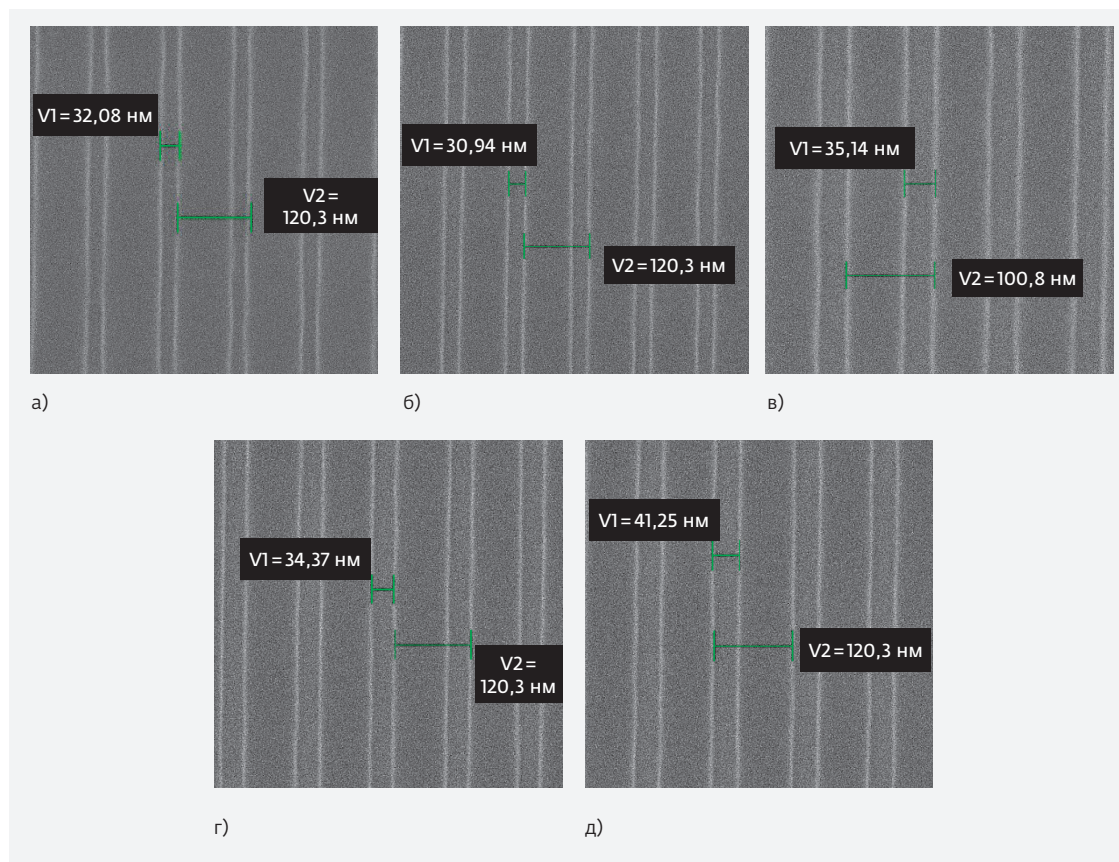
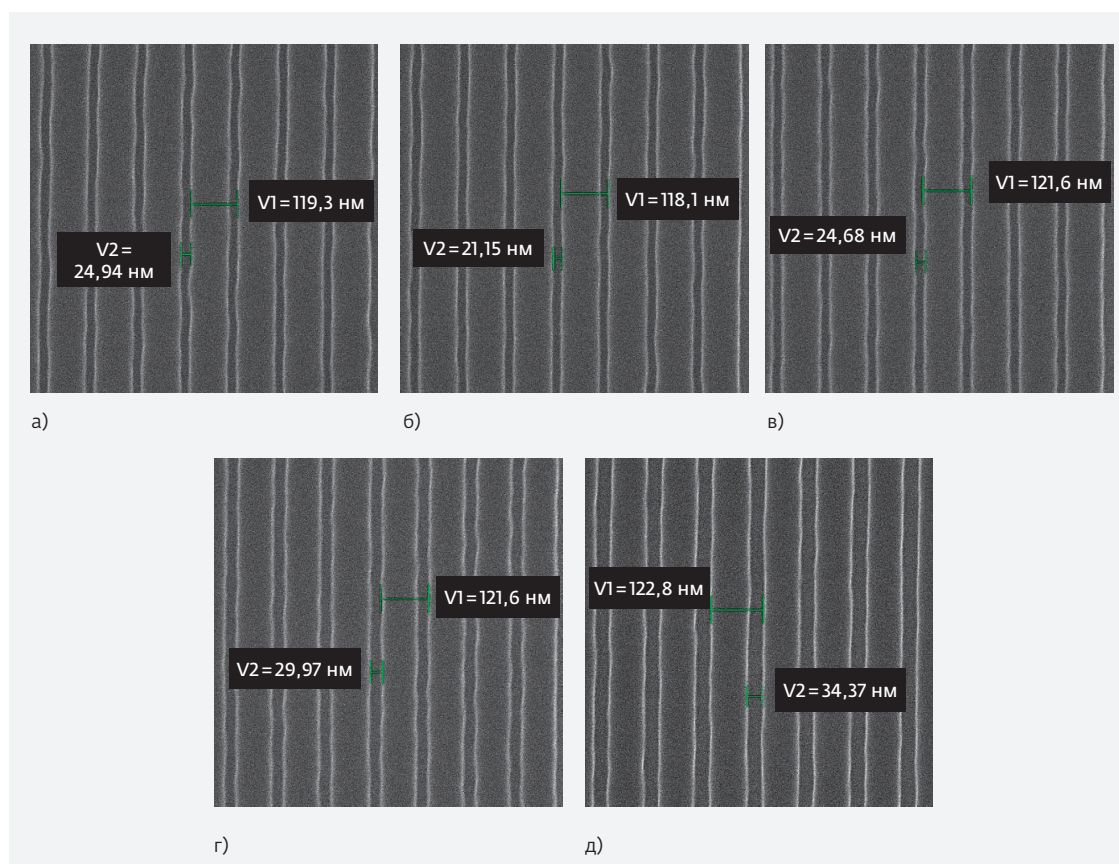


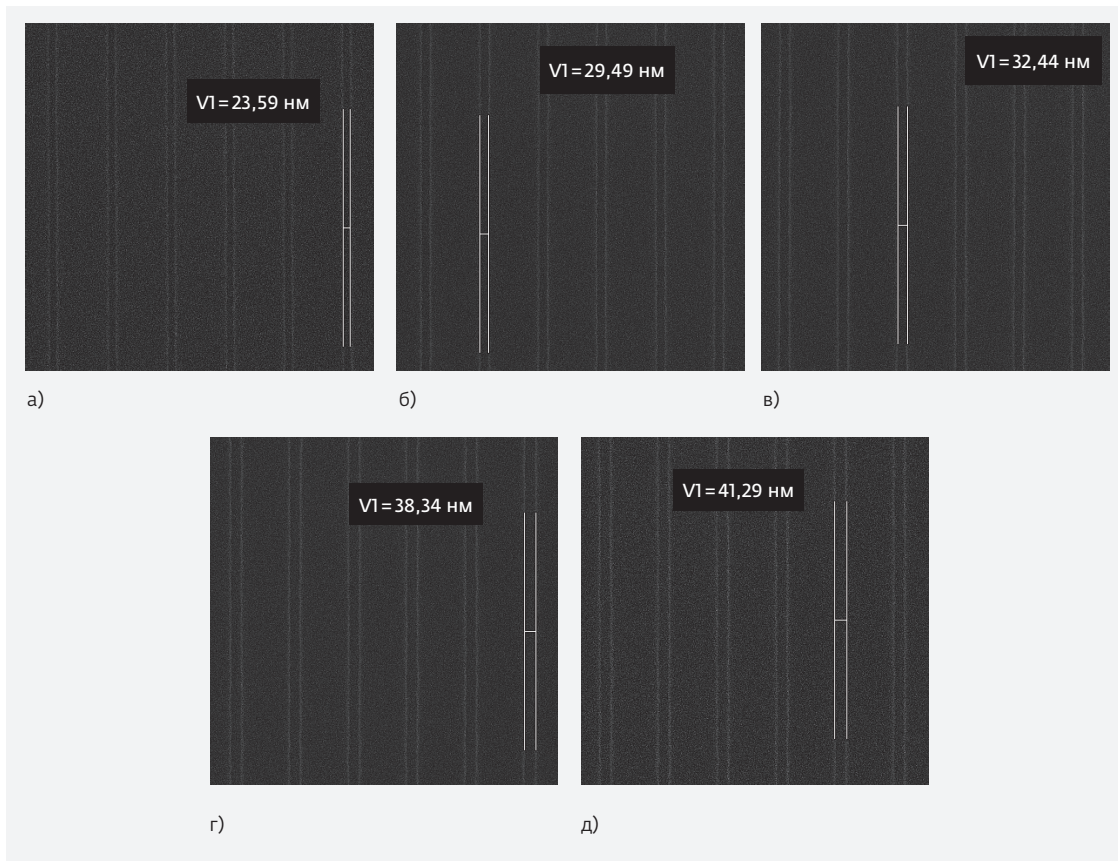
Рис. 25. Решетки плотных линий в резисте OEBR CAP-164 с шагом 120 нм при различных дозах: а – 200 пКл/см<sup>2</sup>, б – 250 пКл/см<sup>2</sup>, в – 300 пКл/см<sup>2</sup>, г – 350 пКл/см<sup>2</sup>, д – 400 пКл/см<sup>2</sup>



**Рис. 26.** Решетки плотных линий в резисте MES EP555 JE с шагом 120 нм при различных дозах: а – 300 пКл/см<sup>2</sup>, б – 375 пКл/см<sup>2</sup>, в – 450 пКл/см<sup>2</sup>, г – 525 пКл/см<sup>2</sup>, д – 600 пКл/см<sup>2</sup>

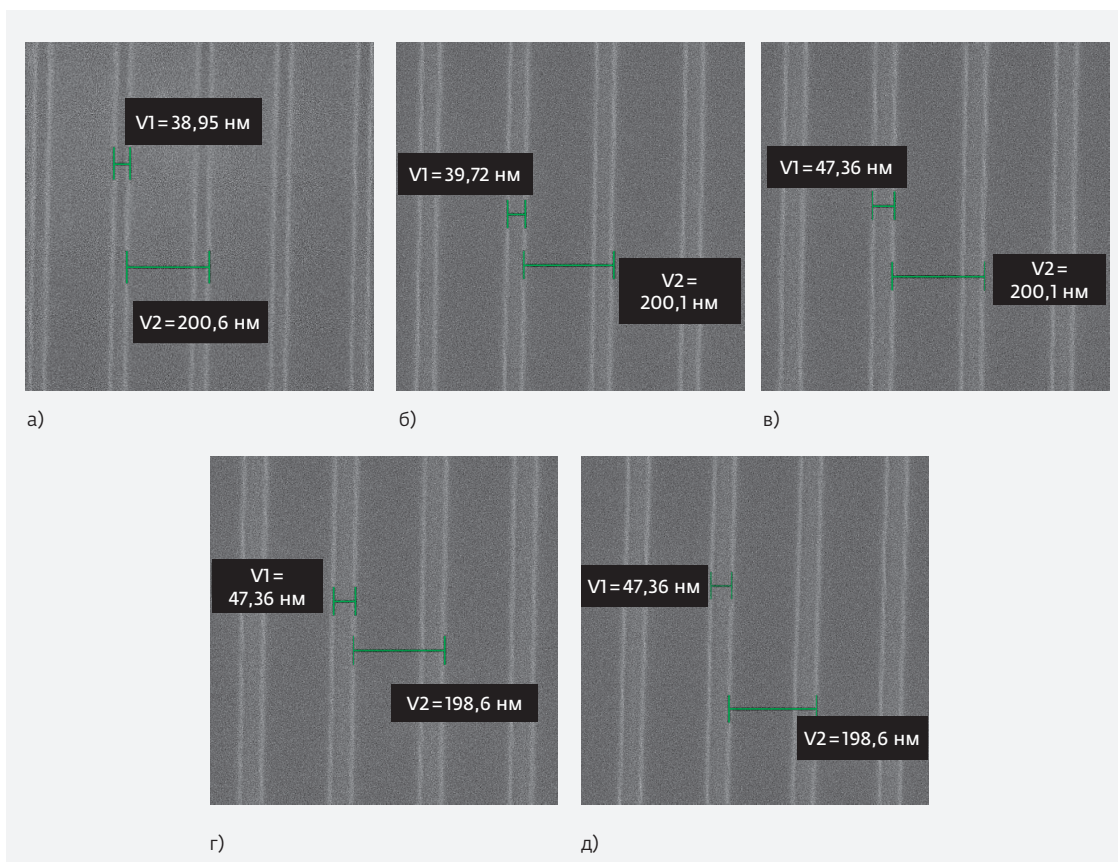


**Рис. 27.** Решетки плотных линий в резисте ZEP-520A с шагом 120 нм при различных дозах: а – 200 пКл/см<sup>2</sup>, б – 250 пКл/см<sup>2</sup>, в – 300 пКл/см<sup>2</sup>, г – 400 пКл/см<sup>2</sup>, д – 500 пКл/см<sup>2</sup>



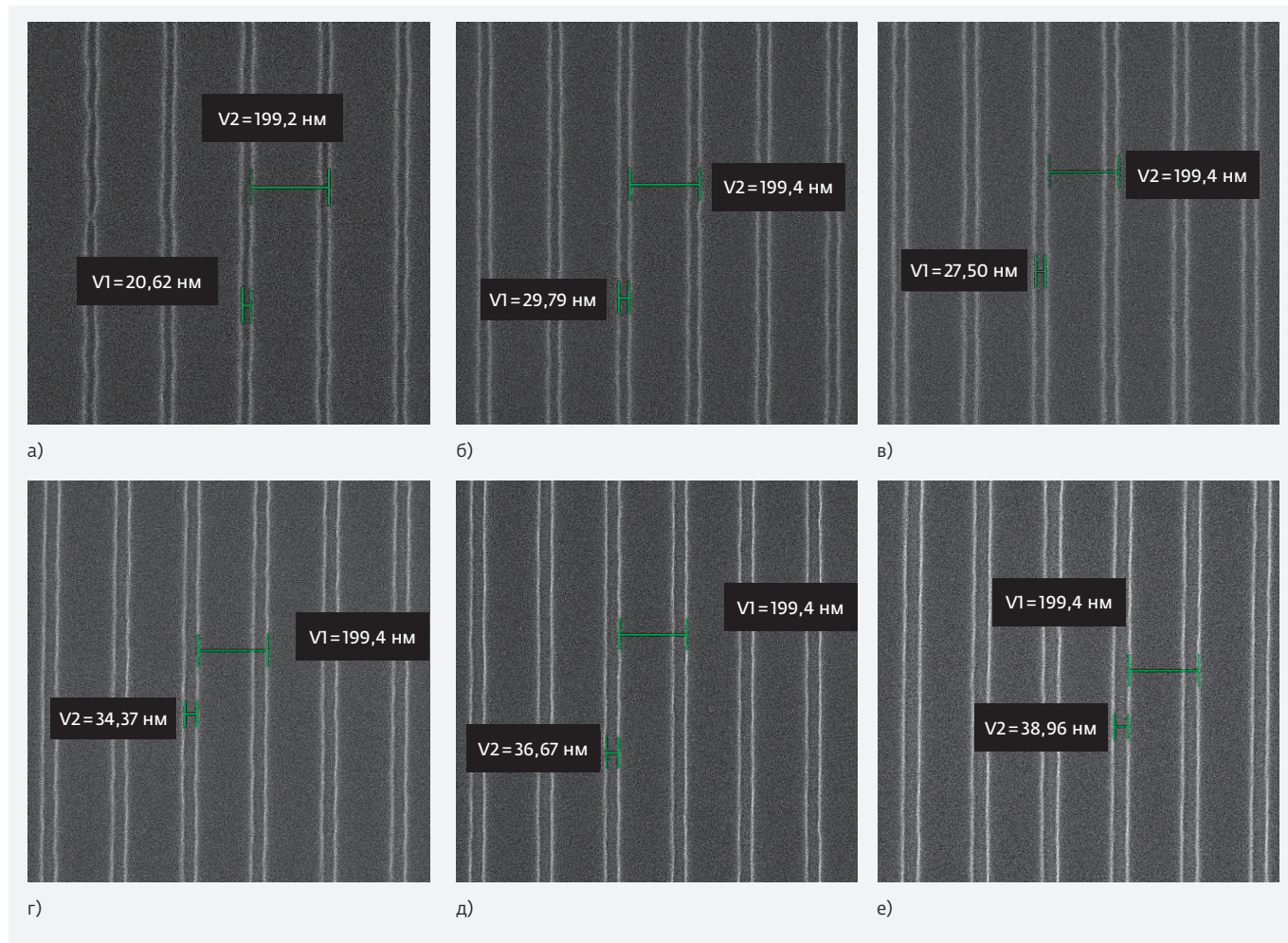
**Рис. 28.**

Решетки плотных линий в резисте OEVR CAP-164 с шагом 200 нм при различных дозах:  
 а – 300 пКл/см<sup>2</sup>,  
 б – 375 пКл/см<sup>2</sup>,  
 в – 450 пКл/см<sup>2</sup>,  
 г – 525 пКл/см<sup>2</sup>,  
 д – 600 пКл/см<sup>2</sup>

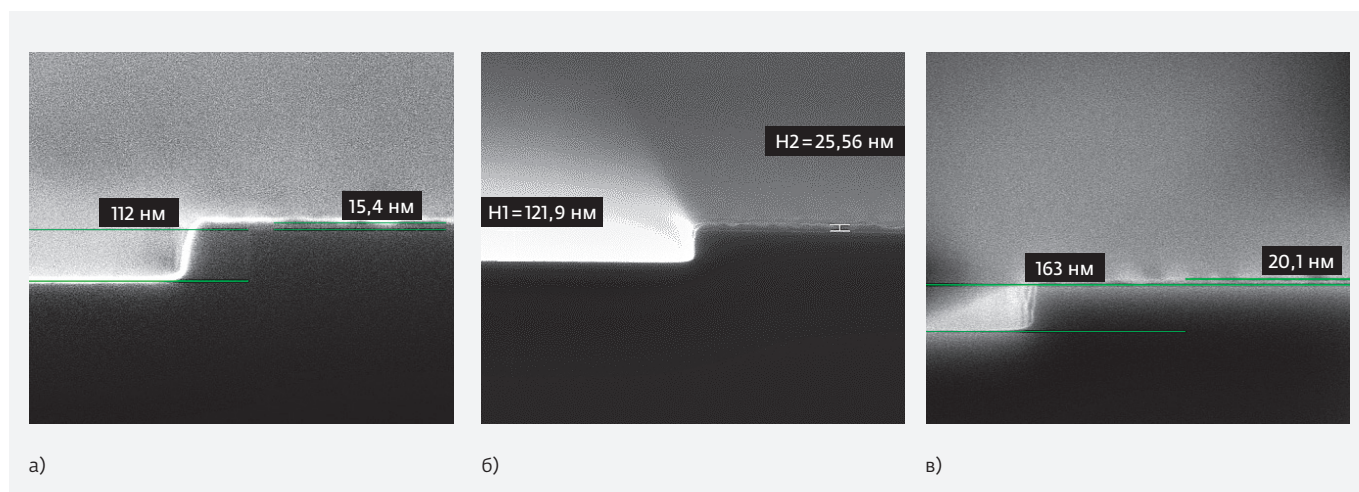


**Рис. 29.**

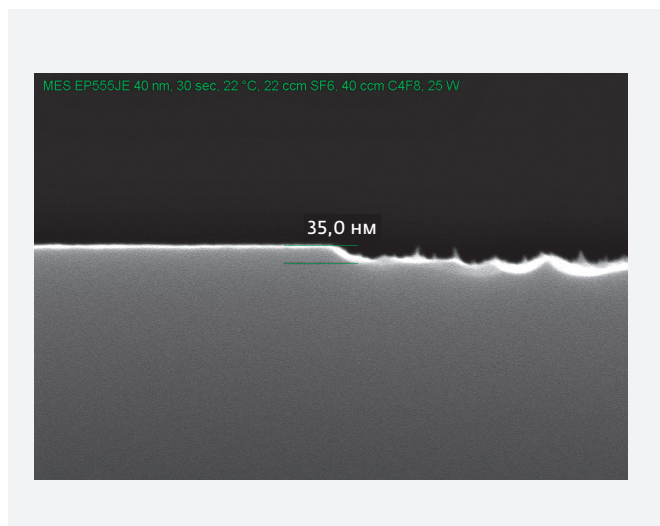
Решетки плотных линий в резисте MES EP555 JE с шагом 200 нм при различных дозах:  
 а – 450 пКл/см<sup>2</sup>,  
 б – 560 пКл/см<sup>2</sup>,  
 в – 675 пКл/см<sup>2</sup>,  
 г – 790 пКл/см<sup>2</sup>,  
 д – 900 пКл/см<sup>2</sup>



**Рис. 30.** Решетки плотных линий в резисте ZEP-520A с шагом 200 нм при различных дозах: а – 187 пКл/см<sup>2</sup>, б – 300 пКл/см<sup>2</sup>, в – 400 пКл/см<sup>2</sup>, г – 500 пКл/см<sup>2</sup>, д – 600 пКл/см<sup>2</sup>, е – 750 пКл/см<sup>2</sup>



**Рис. 31.** Результаты процесса плазмохимического травления через негативный электронный резист OEVR EN038AE для разных смещений: а – 168 В, б – 188 В и в – 208 В



**Рис. 32.** Ступеньки в кремнии (35 нм), оставшемся после процесса плазмохимического травления резиста MES EP555JE

работанными с незначительными шероховатостями;

- в резисте MES EP555JE при увеличении дозы уже в 1,25 раза с 300 (рис. 26(а)) до 375 пКл/см<sup>2</sup> (рис. 26(б)) шероховатость края линии заметно уменьшается, что может быть объяснено требованием меньшей поглощенной дозы для полного распада сравнительно маленьких полимерных узлов и, как следствие, полного растворения в проявителе;
- ввиду наличия в позитивном электронном резисте ZEP-520A большого числа крупных неоднородностей значительно увеличивается шероховатость стенок (рис. 27). При увеличении

дозы облучения в 2,5 раза (с 200 (рис. 27а) до 500 пКл/см<sup>2</sup> (рис. 27д)) ситуация несколько улучшается.

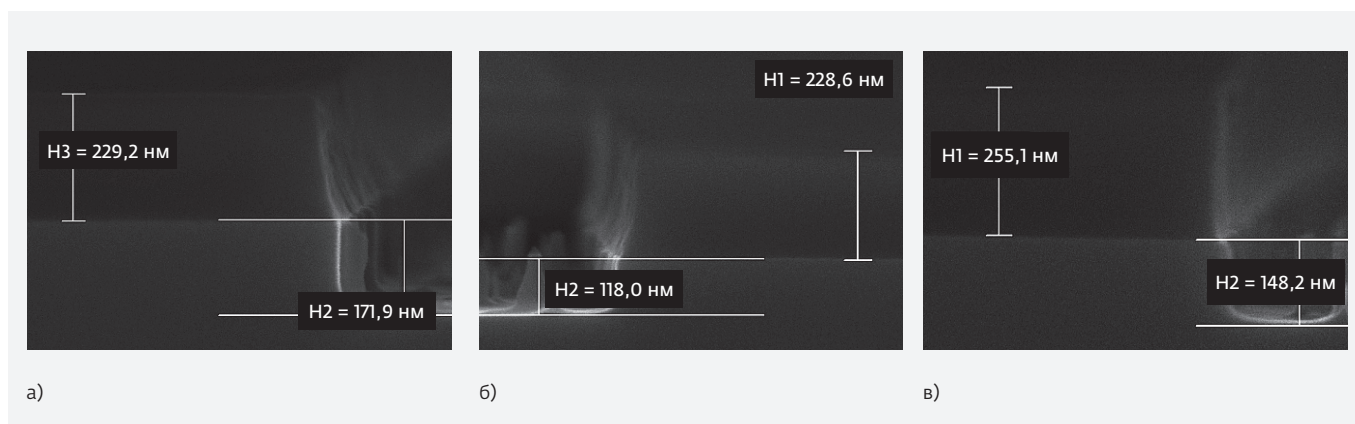
Схожая картина наблюдается и для тестовых структур в виде решетки плотных линий с шагом 200 нм (рис. 28, 29, 30). Однако линии имеют меньшую шероховатость края ввиду того, что для линий с большим шагом необходима большая доза из-за уменьшения засветки дозой от соседней с ней структуры (эффект близости).

Результаты, полученные в данном исследовании по позитивным резистам, показывают, что электронный резист MES EP555JE дает возможность формировать тестовые структуры в виде решетки плотных линий с шагом 45 нм с шероховатостью края 3,2 нм.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЛЕКТИВНОСТИ РЕЗИСТИВНОЙ МАСКИ В ПРОЦЕССАХ ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ

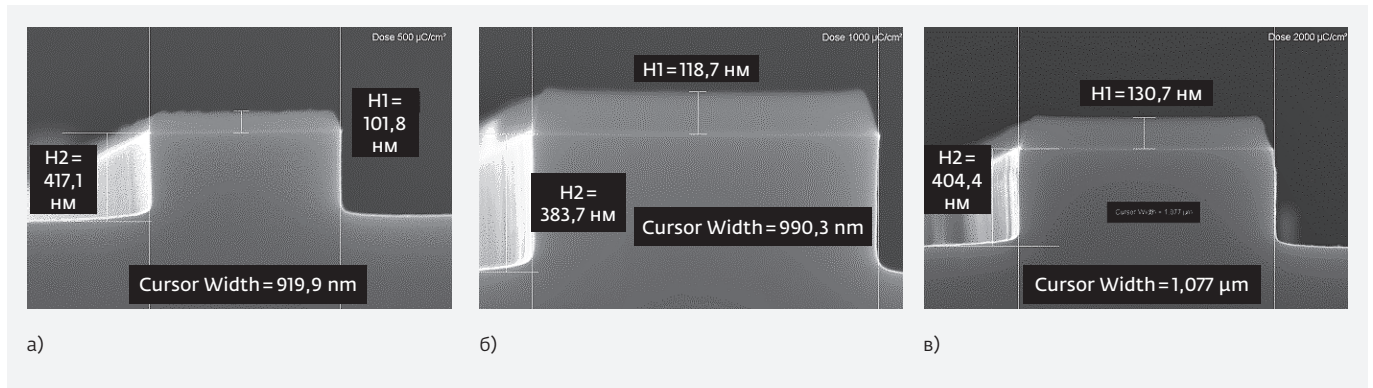
#### Плазместойкость негативного электронного резиста OEBR EN038AE

На рис. 31 приведены результаты плазмохимического травления кремния через маску из негативного резиста OEBR EN038AE. Процесс травления осуществлялся для разных напряжений смещения: 168, 188 и 208 В. Исходя из данных рис. 31, при увеличении напряжения смещения глубина травления кремния увеличивается и равняется 112, 122 и 163 нм соответственно. Толщина резистивной маски при этом изменяется с 63 (исходный размер) до 15, 25 и 20 нм соответственно. Скорость травления резиста – 60–80 нм/мин.



**Рис. 33.** Фотографии скола образца после травления кремния через резистивную маску ZEP-520A для разных смещений: а – 168 В, б – 188 В, в – 208 В





**Рис. 34.** Результаты травления негативного резиста HSQ XR-1541 для смещения 168 В для площадок из трех доз: а – 500 мкКл/см<sup>2</sup>, б – 1000 мкКл/см<sup>2</sup>, в – 2000 мкКл/см<sup>2</sup>. Время травления 60 с

### Плазместойкость позитивного электронного резиста MES EP555JE

Исследуемый резист обладает довольно малой толщиной (40 нм при 1500 об/мин) и, согласно эксперименту, не очень высокой плазместойкостью. Резист полностью стравился при напряжении смещения 168 В и времени травления 30 с.

Высота изображенной на рис. 32 ступеньки 35 нм. Учитывая начальную толщину резиста, селективность травления кремния через маску резиста MES EP555JE для этого резиста можно грубо оценить как единичную – 40 нм ушло при уходе кремния на 35 нм.

### Плазместойкость позитивного электронного резиста ZEP-520A

Процесс травления проводился на структурах шириной 3 мкм. В неразбавленном виде данный

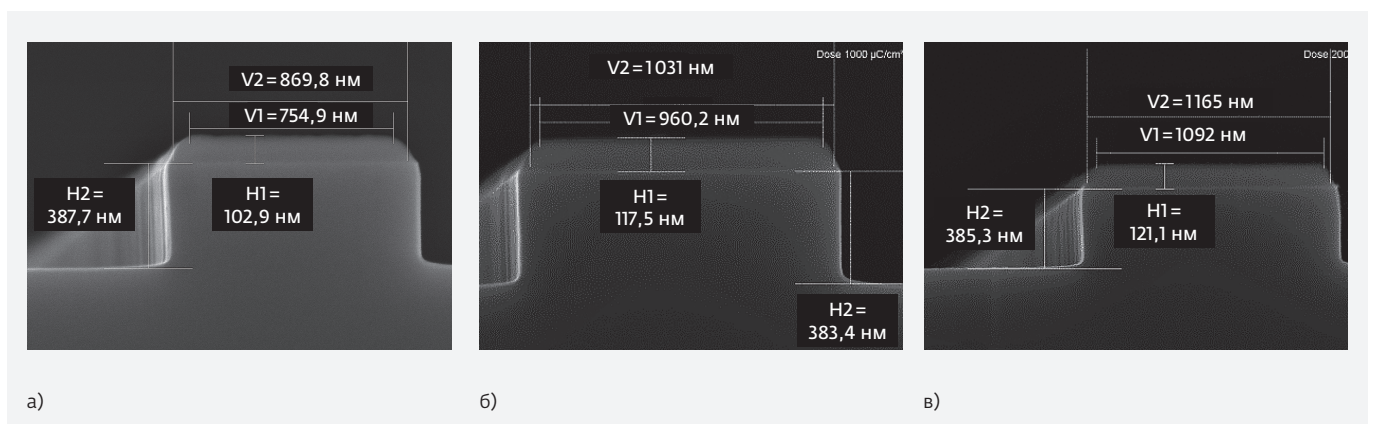
резист имеет толщину 300–310 нм после нанесения.

Скорость травления данного резиста соответствует 100–140 нм/мин.

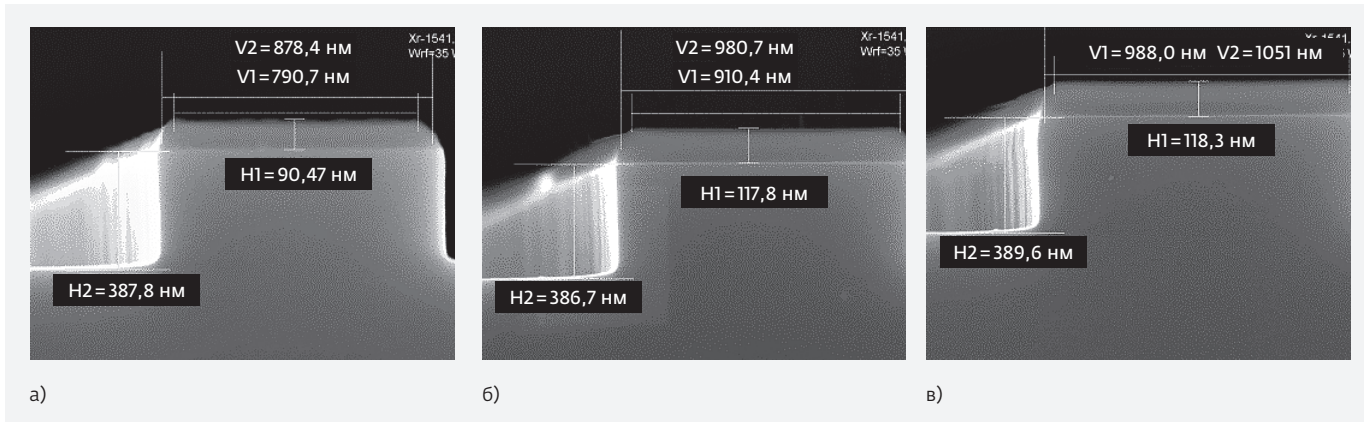
### Плазместойкость электронного резиста HSQ XR-1541

Согласно исследованиям [12], селективность неорганического негативного электронного резиста HSQ XR-1541 при травлении кремния зависит от дозы его облучения. Облучение тестовых структур проводилось в диапазоне доз от 500 до 2000 мкКл/см<sup>2</sup>. Параметры процесса травления были такими же, как и для предыдущих резистов.

Из представленного графика видно, что зависимость селективности от дозы облучения меняется не столь сильно уже после дозы облучения в 1000 мкКл/см<sup>2</sup>.



**Рис. 35.** Результаты травления негативного резиста HSQ XR-1541 для смещения 188 В для линий из трех доз: а – 500 мкКл/см<sup>2</sup>, б – 1000 мкКл/см<sup>2</sup>, в – 2000 мкКл/см<sup>2</sup>. Время травления 60 с



**Рис. 36.** Результаты травления негативного резиста HSQ XR-1541 для смещения 208 В для линий из трех доз: а – 500 мкКл/см<sup>2</sup>, б – 1000 мкКл/см<sup>2</sup>, в – 2000 мкКл/см<sup>2</sup>. Время травления 60 с

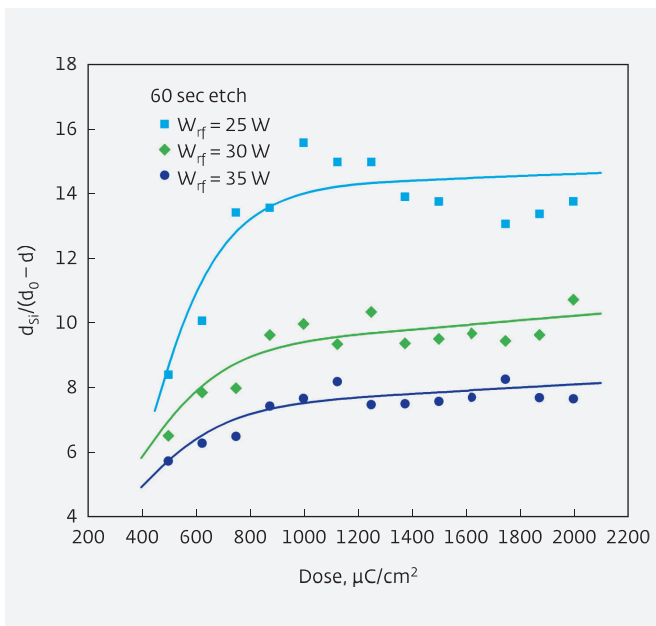
### Сравнение скоростей травления электронных резистов

Исходя из данных, представленных на диаграмме, минимальное значение скорости травления имеет негативный кремний неорганический резист HSQ XR-1541.

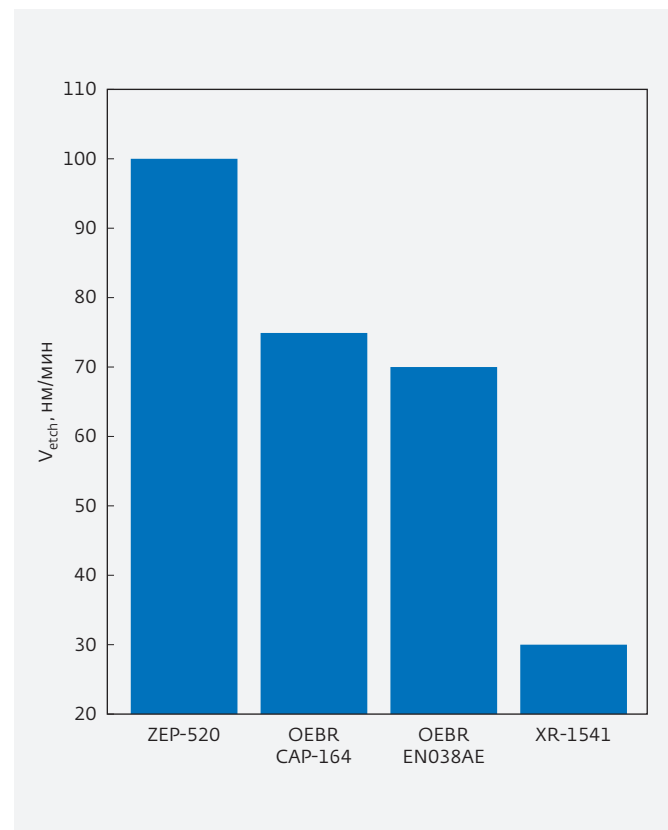
### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлены основные достоинства и недостатки современных электронных резистов, иссле-

дованы механизмы формирования шероховатости края линии, а также скорость травления резистов во фторсодержащей плазме. Ниже представлены соответствующие выводы:



**Рис. 37.** Зависимость селективности негативного электронного резиста HSQ XR-1541 от дозы облучения для трех значений мощности 25 (168 В), 30 (188 В), 35 Вт (208 В)



**Рис. 38.** Скорости травления исследуемых полимерных резистов OEBR CAP-164, OEBR EN038AE, ZEP-520A и негативного кремний неорганического резиста HSQ XR-1541

- позитивный резист MES EP555JE с химическим усилением скрытого изображения является среднечувствительным позитивным резистом с высоким разрешением и хорошим контрастом, позволяющим уверенно получать линейные структуры с характерными размерами 45 нм;
- позитивный резист ZEP-520A является высокочувствительным резистом с высоким разрешением, позволяющим гарантированно получать линейные структуры с характерными размерами 45 нм;
- негативный резист OEBR EN038AE с химическим усилением скрытого изображения является среднечувствительным резистом с высоким разрешением;
- шероховатость края линии напрямую зависит от плотности и размеров так называемых полимерных узлов, по причине чего неполимерный неорганический резист HSQ XR-1541, очевидно, будет обладать меньшей шероховатостью стенки линии. При повышении дозы облучения на всех исследуемых резистах уровень шероховатости стенки снижается;
- резисты исследовались на селективность при травлении кремния во фторсодержащей плазме. Наибольшую селективность при травлении кремния демонстрируют негативные резисты OEBR EN038AE и HSQ XR-1541, а позитивный резист ZEP-520 показал более высокую скорость травления. Но необходимо принять во внимание тот факт, что у HSQ XR-1541 скорость травления сильно и нелинейно зависит от дозы облучения;
- анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что наиболее подходящим для формирования топологий затворов с минимальными размерами до 20 нм в КМОП маршруте является негативный химически усиленный резист OEBR EN038AE.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят д.ф.-м.н. К.В. Руденко и к.ф.-м.н. А.В. Мьяконьких за эффективное содействие в выполнении работы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Arnaud F., Boeuf F., Salvetti F., Lenoble D., Wacquant F., Regnier C., Morin P., Emonet N., Denis E., Oberlin J. C., Ceccarelli D., Vannier P., Imbert G., Sicard A., Perrot C., Belmont O., Guilmeau I., Sassoulas P. O., Delmedico S., Palla R., Leverd F., Beverina A., DeJonghe V., Broekaart M., Pain L., Todeschini J., Charpin M., Laplanche Y., Neira D., Vachellerie V., Borot B., Devoivre T., Bicaïs N., Hirschberger B., Pantel R., Revil N., Parthasarathy C., Planes N., Brut H., Farkas J., Uginet J., Stolk P., Woo M.** A Functional  $0.69\mu\text{m}^2$  Embedded 6T-SRAM bit cell for 65 nm CMOS platform, STMicroelectronics, Philips Semiconductors, Motorola Inc., CEA-LETI.
2. **Frederik J., Steenbergen V., Ootsuka N., Icard B., Sourd C., Constancias C., Dalzotto B., Pain L.** Ultimate lithographic performances of advanced resists CAR or non-CAR resist?, Proceedings of the SPIE, Vol. 8323, id. 83232M, 2012.
3. **Matthias Slodowski, Hans-Joachim Doering, Wolfgang Dorl, Ines A. Stolberg Slodowski, M. et al.** Coulomb Blur Advantage of a Multi Shaped Beam Lithography Approach, Proc. SPIE. 7271-26.
4. **Foucher J., Fabre A. L., Gautier P.** CD-AFM versus CD-SEM for resist LER and LWR measurements. Proc. SPIE6152, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XX, 61520V (March 24, 2006); doi:10.1117/12.659008.
5. **Yamazaki K., Yamaguchi T., Namatsu H.** Edge-Enhancement Writing for Electron Beam Nanolithography, Jpn. J. Appl. Phys. 2003. Vol. 42. P. 3833-3837.
6. **Yamaguchi T., Namatsu H., Nagase M., Yamazaki K. and Kurihara K.** Nanometer-scale linewidth fluctuations caused by polymer aggregates in resist films. Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 2388.
7. **Yamaguchi T., Namatsu H., Nagase M., Yamazaki K. and Kurihara K.** A new approach to reducing line-edge roughness by using a cross-linked positive-tone resist. Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 7114.
8. **Foucher J., Fabre A. L., Gautier P.** CD-AFM versus CD-SEM for resist LER and LWR measurements. Proc. SPIE6152, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XX, 61520V (March 24, 2006); doi:10.1117/12.659008.
9. **Shin C.** Variation-Aware Advanced CMOS Devices and SRAM. Springer Series in Advanced

- Microelectronics 56, DOI 10.1007/978-94-017-7597-7\_2.
10. **Servin Isabelle, Ndeye Arame Thiam, Patricia Pimenta-Barros, Marie-Line Pourteau, Armel-Petit Mebiene, Julien Jussot, Jonathan Pradelles, Philippe Essomba, Ludovic Lattard, Pieter Brandt, Marco Wieland** Ready for multi-beam exposure at 5kV on MAPPER tool: Lithographic & process integration performances of advanced resists/stack.
  11. **Красников Г. Я., Гушин О. П., Морозов А. Д., Игнатов П. В., Горнев Е. С., Овчинников В. А., Базанов Д. В., Орликовский Н. А., Кальнов В. А.** Использование CAR резистов в электронно-лучевой литографии // Микроэлектроника. Серия 3. 2015. Вып. 1 (157). С. 41-48.
  12. **Ivanenko I. P., Kalnov V. A., Miakonkikh A. V., Orlikovsky N. A., Tatarintsev A. A.** Impact of structural changes in e-beam negative resist hydrogen silsesquioxane (HSQ) to etch-resistance at different doses of exposure // International Conference «Micro- and nanoelectronics – 2014» (2014). P. 01-13.

# МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО НЕЙРОНА И ЕГО АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС

► И. В. Матюшкин<sup>1, 2, 3</sup>, Р. А. Соловьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИМЭ», <sup>2</sup>НИУ МИЭТ, <sup>3</sup>ИППМ РАН

Предложена модель адаптивного нейрона, объединяющая концепции клеточного автомата и нейронной сети. Указаны родственные решения:  $\Sigma\Pi$ -нейрон, комбинированный нейрон. Рассмотрен пример адаптивного нейрона, функциональное описание которого учитывает ограничения его структурно-логической реализации на ПЛИС. Детали такой аппаратной реализации также приводятся.

## A MODEL OF ADAPTIVE NEURON AND ITS HARDWARE IMPLEMENTATION ON FPGA

Matyushkin I. V.<sup>1, 2, 3</sup>, Soloviev A. R.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>MERI SC, <sup>2</sup>NRU MIET, <sup>3</sup>IPPM RAS

The proposed here adaptive neuron model combines the concepts of cellular automaton and neural networks. Related solutions are shown: the  $\Sigma\Pi$ -neuron, the combined neuron. An example of the adaptive neuron is considered that functional description takes into account the restrictions of its structural, logical implementation on FPGA. The details of this hardware implementation are also given.

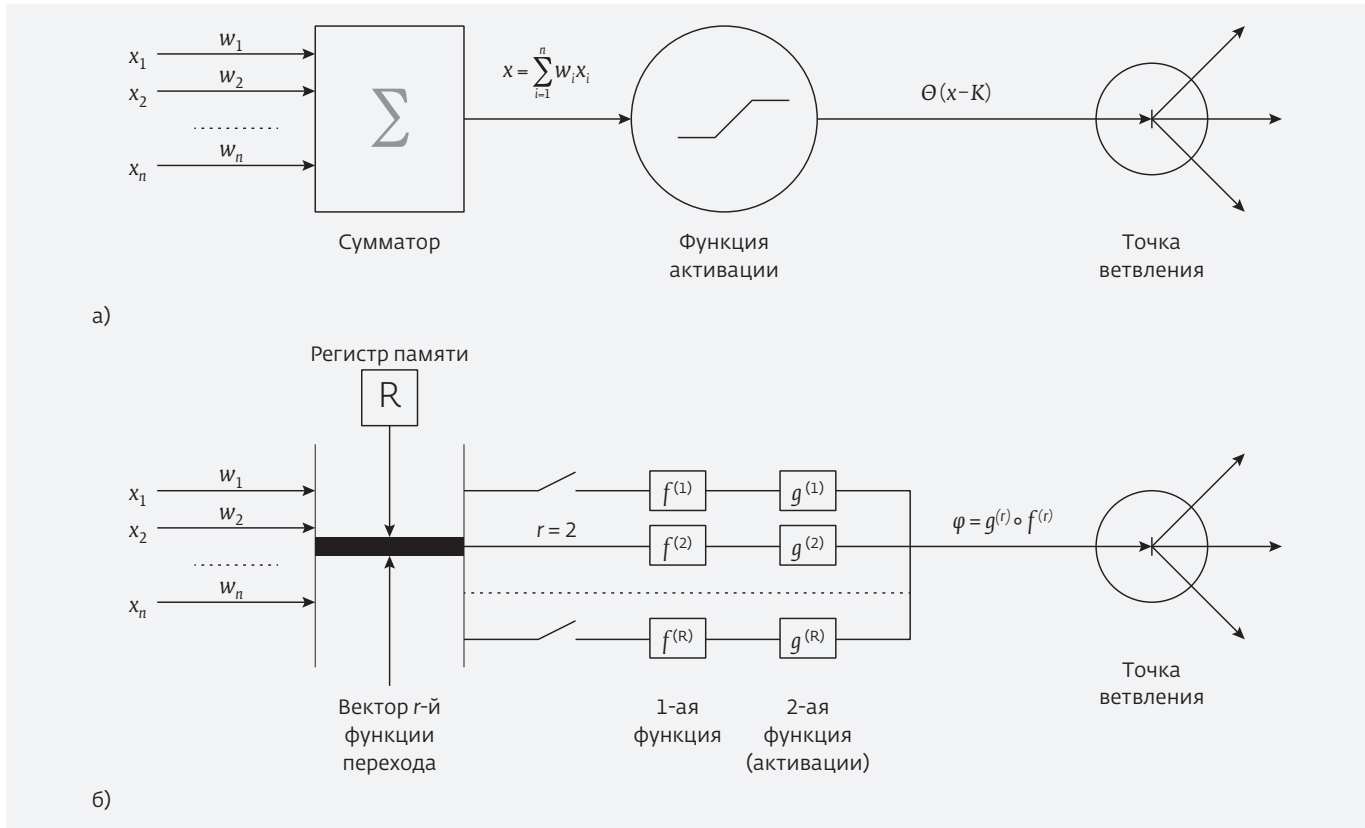
## ВВЕДЕНИЕ

Современные подходы [1] к искусственному интеллекту и машинному обучению тесно связаны с искусственными нейронными сетями, реализованными в составе программно-аппаратных комплексов. Одновременно с этим наблюдается конвергенция различных направлений коннекционизма [2–4], под зонтик парадигмы которого попадают и нейронные сети (НС), и клеточные автоматы (КА). Обе эти концепции допускают гибридные варианты, классическим вариантом выступают клеточные нейронные сети [5] и эволюционирующие (evolving) клеточные автоматы [6]. В последние годы активно применяется архитектура сверточной (convolution) нейронной сети (КНС), где аппаратная реализация диктует локальность связей нейрона последующего слоя с нейронами предыдущего слоя – таким образом, характерное свойство КА – локальность – реализуется де-факто в КНС. Но не только на уровне архитектуры сети, но и на уровне модели формального нейрона также возможен синтез НС и КА.

В данной статье предложено одно из таких решений под названием «адаптивный нейрон» и в контексте КНС рассмотрена его потенциальная реализация на основе стандартной ПЛИС [7]. Использование ПЛИС при прототипировании позволяет легко перепрограммировать структуру НС и экономически эффективнее заказной СБИС.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НС И КА

С точки зрения абстрактной модели элементарные единицы НС и КА совпадают в том, что они выполняют некоторое преобразование «входов» в «выход(ы)»: для нейрона оно осуществляется в два этапа (взвешенное суммирование  $f_{\Sigma}$ , к скалярному результату которого применяется функция активации  $g$ , параметризованная обычно порогом). Для конечного автомата в структуре КА оно называется локальной функцией перехода (ЛФП), и также имеется тенденция разбивать ЛФП на несколько этапов. Веса и пороги определяются в процессе обучения НС, а в общей проблематике КА вопросам обучения уделяется мало внимания,



**Рис. 1.** Структуры классического (а) и адаптивного (б) нейрона. В адаптивном нейроне выбор функции перехода  $\varphi$  определяется значением регистра памяти  $r \in R$ . Процесс двустадийный:  $\varphi = g \circ f = g(f(\cdot))$ . В классическом нейроне функция активации служит для внесения нелинейности, в адаптивном нейроне она нужна для приведения «выхода» в стандартное множество

что связано скорее с преждевременностью постановки таких задач и тем, что динамика одиночного КА сама по себе сложна. В литературе по КА говорят не об обучении КА, а выборе ЛФП (например, в виде вольфрамской нумерации), дающей желаемую динамику. Как и в НС, так и в КА популярным инструментом соответствующей оптимизации выступают генетические алгоритмы.

Области применений КА и НС также близки. Если в области распознавания изображений имеется довольно обширная литература по обоим направлениям, то становятся более частыми вторжения НС в область моделирования физических процессов – например, решения обратной задачи диффузии в гетерогенной среде (с памятью), где диффузия описывается уравнением, содержащим дробные производные [8] и требующем интегрирования. Прямая задача могла быть решена с помощью КА, а вот обратная (по заданной кривой распределения восстановить параметры нелинейности среды) вызвала затруднения для КА-методов.

С другой стороны, такая ситуация типична и для проектирования СБИС и радиотехнических устройствах обсуждалась нами ранее [9].

Сейчас мы будем говорить именно о формальных моделях, а не о технико-аппаратной реализации нейрона. Как ни парадоксально, особенно на фоне сентенций «НС запоминает, распознает...», но модель нейрона МакКаллока-Питтса не содержит понятия «состояния», и в этом смысле нейрон не обладает памятью. Веса суть, скорее, характеристики связей нейрона, а не его собственные предикаты. Пороги семантически больше подходят на эту роль, однако, после обучения они фиксированы, их можно назвать константами состояния, но никак не переменными(ыми) состояния. Очевидно, что если заставить нейрон обладать памятью, это и сблизит обе концепции, и откроет широкие перспективы для НС, так как такая новация является фундаментальной.

В этой связи упомянуть восходящую к 1907 году и вводящую понятие рефрактерного времени

Сравнение нейронных сетей и клеточных автоматов

Свойство	Нейронная сеть	Клеточный автомат
Память элемента	Нет понятия «состояние», используется термин «сигнал» (между элементами)	Центральное понятие «состояние»; термин «сигнал» понимается как устойчивая конфигурация состояний нескольких ячеек, движущаяся по полю КА
Локальность связей	Как правило, не выполняется, вплоть до полносвязности «каждый связан с каждым» (включая самого себя); в многослойной сети, если не оговорено обратное, нейроны последующего слоя связаны с каждым нейроном предыдущего слоя; при операции конволюции свойство локальности восстанавливается	Существенное требование; вводится «радиус окрестности»
Однородность элементов	Требование не оговорено; обычно в пределах одного слоя нейроны функционируют одинаково (по функции активации)	Состояние ячеек стандартизовано; большая часть ячеек однородна по ЛФП; в общем случае ячейки могут быть разбиты на небольшое число классов
Дискретность состояния	Сигналы могут быть как дискретные, так и аналоговые; для аппаратных реализаций характерен дискретный тип сигналов	Состояние обычно полагается дискретным, но изредка – непрерывным или смешанным
Дискретность времени при работе	Несущественное требование; при аппаратных реализациях желательно, т.к. часто сигналы имеют характер меандра	Существенное и абсолютное требование
Синхронность срабатываний переходов	Обычно сеть синхронна, т.е. все аргументы в выражении для функции перехода справа берутся в один момент времени	В классическом варианте синхронность, но достаточно много и асинхронных реализаций
Особенности функции перехода	Всегда двухстадийна: В классике – взвешенная сумма, позволяющая свести векторный вход к скалярному выходу; В классике – нелинейная функция активации: либо имеет характер порогового переключения из 0 в 1, либо имеет сигмоидальный вид типа $\frac{x}{ax+b}$	В общем виде предполагает табличное задание. Для одномерных двоичных (элементарных) автоматов задается вольфрамской нумерацией. Популярны тоталистичные и полутоталистичные КА с функциями: $x := f\left(\sum_i x_i\right), \quad x := f\left(\sum_i x_i, x\right)$
Особенности обучения	Подбирают веса и пороги, которые являются параметрами функции перехода	Если проблема ставится, то подбирают таблицы переходов (истинности). Возможно введение параметров, как правило, целочисленных в ЛФП с последующим подбором значений (пример: лямбда-параметр Лэнгтона, вероятности переходов в КА с альтернативой)
Возможность обратных связей	Могут быть введены в структуру НС; обычно сигнал идет от входа к выходу, но в интеллектуальных сетях не так	Присутствуют изначально; нет понятий «входа» и «выхода», при циклическом задании границ КА можно установить аналог «удаленной» обратной связи
Область применения	Задачи распознавания, классификации, параллельных вычислений, обратные задачи математической физики	Задачи распознавания, нелинейной динамики и самоорганизации, параллельных вычислений, прямые задачи математической физики

и модель «проинтегрировать и сработать» [10], по сравнению с моделью МакКаллока-Питса лучше адаптированную к работе биологического нейрона. Технический аналог такой модели – конденсатор, накапливающий заряд и практически мгновенно разряжающийся (spike) и затем, в течение рефрактерного времени, вновь накапливающий заряд. Математически же нейрон «запоминает

предысторию», интегрируя сигнал  $\int_{t-T}^t x(t)dt$ , и затем

применяет пороговую функцию активации. Тезис о том, такой нейрон с ограниченным временем хранения информации есть нейрон с памятью, нам представляется неправильным.

Мы будем рассматривать только статические нейроны (и сети) и определим, следуя [11], такой нейрон как «устройство, агрегирующее входные сигналы, умноженные на синаптические веса, и применяющее к полученной взвешенной сумме нелинейную активационную функцию, непрерывную на области определения».

При аппаратной реализации условно можно говорить о «регистре памяти», введенном дополнительно; его значение может: 1) использоваться при обучении наравне с весами и порогами; 2) изменяться в динамике функционирования НС уже после ее обучения. Вторая опция придает гораздо большую гибкость и больше степеней свободы функционирования интеллектуальной нейросети. В практике КА-алгоритмов удобно разделять состояние ячейки на два компонента: флаги и данные. В зависимости от флага может применяться та или иная ЛФП (в простейшем случае действует инструкция «если флаг равен 0, то состояние ячейки не изменяется (ЛФП не применяется)»). Таким образом, регистр флага качественно меняет динамику ячейки КА, предоставляя средство управления глобальной динамикой КА через начальную конфигурацию флаговой компоненты. Более общий способ такого управления называется «КА с альтернативой». В традиционной НС подбор весов и порогов лишь количественно меняет функцию активации, что, разумеется, хорошо для математического решения задач оптимизации, но делает НС не столь эффективной. Таким образом, в адаптивном нейроне регистр памяти позволяет выбирать одну из нескольких функций перехода. При этом он может воздействовать на функцию активации и/или условную функцию суммирования.

## АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Таким образом, аппаратная реализация адаптивного нейрона должна предусматривать логико-схемотехнические решения для потенциальной реализации не одной функции, а некоторого минимального набора функций (перехода). Каков же этот минимальный набор?

Правильный, но неоптимальный ответ – «достаточно одного суммирования» (при нелинейной функции активации) дает обобщенная аппроксимационная теорема Стоуна, которая в инженерной интерпретации [12] утверждает, что «с помощью линейных операций и каскадного соединения можно из произвольного нелинейного элемента получить устройство, вычисляющее любую непрерывную функцию с любой наперед заданной точностью». Теорема Стоуна (1935) обобщает известную из курса математического анализа теорему Вейерштрасса о многочленах и связана с фундаментальным результатом Колмогорова-Арнольда (1) конца 50-х годов [13, 14] и 13-й проблемой Гильберта:

*Каждая непрерывная функция  $n$  переменных, заданная на единичном кубе  $n$ -мерного пространства, представима в виде операций сложения, произведения и суперпозиции:*

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} h_q \left( \sum_{p=1}^n \varphi_q^p(x_p) \right), \quad p, q, n \in \mathbb{N}. \quad (1)$$

*Здесь все функции непрерывны, а функции  $\varphi_p^q$  стандартны в смысле независимости от конкретного вида функции  $f$ .*

Для НС со скрытыми слоями и сигмоидной функции активации эти теоремы были [15] переформулированы Хехт-Нильсенсом (1987), который получил оценку числа нейронов, необходимых для корректного распознавания. Несмотря на фундаментальный характер данных результатов, они почти ничего не говорят об эффективности конструкций, например, о виде стандартных функций  $\varphi$  у Колмогорова или характере нелинейности в теореме Стоуна. История самой алгебры подсказывает решение. Теория групп полезна и в физике, но оставаться в рамках одной операции математикам показалось тесным, и они ввели кольца и поля – алгебраические объекты с двумя операциями. Например, обычная арифметика – алгебра с двумя операциями сложения и умножения (вычитание и деление вводятся как обратные). На множестве натуральных чисел можно было бы обойтись сложением и вычислять, например,  $5 \cdot 6 = 6 + 6 + 6 + 6 + 6$ , но, очевидно, эффективнее и быстрее перемножить числа столбиком. Эта аналогия дает нам основание предполагать об эффек-



тивности НС с адаптивными нейронами, «умеющими» складывать и умножать, по сравнению с идентичной по архитектуре сети с классическими нейронами. Эта эффективность, например, может выражаться либо в скорости обучения, либо в общем числе нейронов сети при заданном уровне точности вычисления или распознавания.

Вычисление взвешенной суммы первым шагом в расчете функции перехода, оправданное биологически и критерием простоты, не есть догма. Более того, уже есть работы по НС, пытающиеся выйти за ее рамки. Первая их группа касается мультипликативных (или П, пи-) нейронов [16–17]. Их использование при решении задач прогнозирования временных рядов позволило повысить эффективность (число нейронов и слоев, время обучения) более чем на 50%.

Другая группа публикаций [18–19] вводит в рассмотрение  $\Sigma\Pi$ -нейроны (сигма-пи) и соответствующие сети. Класс рассматриваемых нейронов более точно описывает свой биологический аналог (нейроны с разветвленными синаптическими деревьями). Характерно, что указанная нами биологическая мотивация к разработке адаптивного нейрона прослеживается в [18], где авторы прямо говорят об алгебраической модели  $\Sigma\Pi$ -нейрона, «которая отражает процессы обработки информации в аксо-дендритной системе нейрона и обладает лучшими способностями по аппроксимации зависимостей». Для описания версий  $\Sigma\Pi$ -нейрона авторы приводят несколько «параллельных» формул. В отличие от нашей трактовки  $\Sigma\Pi$ -нейрон суммирует и умножает одновременно (2):

$$f_{\Sigma\Pi} = a + \sum_i \left( w_i \prod_{j \in J_i} (x_j - a_{ij}) \right), \quad J_i \subseteq \{1, 2, \dots, n\} = \bigcup_i J_i. \quad (2)$$

Как обычно, нейрон имеет  $n$  входов, индексированных индексом  $i$ , и каждому входу поставлено в соответствие множество входов с номерами  $j \in J_i$ , с которыми он коммутирует в процессе взятия смещенных произведений. Величины смещения  $\{a, a_{ij}\}$  играют роль порогов. Часто полагают, что семейство  $\{J_i\}$  является разбиением множества входов, то есть  $(\forall i, j)(J_i \cap J_j = \emptyset)$  тогда все простые синапсы сгруппированы операцией произведения в сложные синапсы, участвующие в последующем взвешенном сложении.

Другой, близкой к нашей, идеей является комбинированный нейрон [20]. Каждый такой нейрон задается блоком из трех нейронов: входной сигнал дублируется на входы первого (сигма) нейрона и второго (пи) нейрона, выходы которых

подаются с некоторыми весами  $w, 1-w$  на два входа третьего: сигма- или пи-нейрона. Таким способом получают два класса комбинированных нейронов:  $\Sigma\Pi\Sigma$  и  $\Sigma\Pi\Pi$ . Авторы показывают, что одновременное использование в одной НС нейронов обоих типов улучшает эффективность работы сети (меньшее число нейронов, меньшее число слоев при заданном уровне распознавания объектов).

### ПРИМЕР АДАПТИВНОГО НЕЙРОНА И ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Для определенности положим, что адаптивный нейрон имеет  $n=9$  входов и 1 выход, причем множество значений каждого входа  $X_i$  и выхода  $Y$  совпадают  $X = X_i = Y$ . Относительно  $X$  полагаем разрядность байта:  $X = \{0, 1\}^N, N=8$ . Если разрядность была меньше (минимальная – бит), затраты на адаптивность превышали бы выигрыш в обучаемости сети. Кроме того, легко было бы на основе комбинированной таблицы истинности записать формулы переходов. Большая разрядность (стандартных 32 бита) для наших целей избыточна. Семантически  $X$  соответствует беззнаковому целому, натуральному числу в пределах от 0 до 255. Очевидно, что тогда прямое использование таблиц истинности неэффективно. Вес каждой связи также лежит в этих пределах  $w_i \in W = \{0, 1\}^8 = X$ . Регистр памяти принимает два значения  $r \in R = \{0, 1\}$ .

Первая ветка ( $r=0$ ) отвечает стандартной схеме аддитивного нейрона, описанной нами ранее [7] для более сложной ситуации:

$$f_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \quad 0 \leq f_{\Sigma} \leq n \cdot 2^{2N} = 585225, \quad 0 \leq K < 255;$$

$$g = \text{RELU}_K(\text{trunc}_8(f_{\Sigma})), \quad \text{RELU}_K(x) = \begin{cases} x, & x > K; \\ 0, & x \leq K. \end{cases} \quad (3)$$

Реализация целочисленного умножения (3) имеет некоторые сложности, поскольку, очевидно, что взвешенная сумма расширяет спектр дискретных состояний до полумиллиона. Этот расширенный спектр, кодируемый  $2n$  байтами, должен быть приведен к 1-байтовому диапазону, что реализуется функцией  $\text{trunc}_8$ , отсекающей от аргумента старшие восемь бит. Обучение нейрона состоит в фиксации значений тройки  $\langle r, K, \{w_1, \dots, w_n\} \rangle$ .

Вторая ветка ( $r=1$ ) отвечает схеме мультипликативного нейрона, однако, аппаратная реализация множественных произведений в (2) представляется трудоемкой. Поэтому можно было бы ограничиться вторыми степенями в виде (4):

$$f_{\Pi}^{(1)} = \sum_{i=1}^n w_i x_i^2, \quad f_{\Pi}^{(2)} = \sum_{i=1}^{n-1} w_i x_i x_{i+1}, \quad f_{\Pi}^{(3)} = \sum_{i=1}^n w_i (x_i - K)^2. \quad (4)$$

Однако условие простоты аппаратной реализации накладывает ограничение и на такие варианты функции. Уместно вспомнить, что в определении рекурсивных функций помимо рекурсии присутствует операция минимизации. Ее вполне можно трактовать как нелинейную. Остановимся на следующем варианте (5):

$$f_{\Pi} \doteq f_{\Pi}^{(4)} = w_i (x_i - K)^2, \quad i = \inf \left\{ \arg \left( \max_s \{w_s\} \right) \right\}. \quad (5)$$

Иными словами, из текущего набора весов мы должны выбрать номер входа с максимальным весом, «самый важный вход», и от него взять квадрат сигнала со смещением. Если таких входов несколько, мы должны выбрать первый по нумерации. При задании функции активации нужно только позаботиться о приведении дискретных уровней (6); нелинейность уже введена и отпадает необходимость использовать ту же RELU:

$$g = \text{trunc}_8(f_{\Pi}). \quad (6)$$

Отметим несущественные недостатки этой схемы. Во-первых, разрядность для хранения  $f_{\Sigma}$  зависит от числа связности  $n$  (с этим можно бороться путем мажорирования); во-вторых, результат  $f_{\Pi}$  зависит от способа нумерации. Возможно, что схемотехнически проще реализовать вместо (5) одну из ее вариаций (7):

$$w = \max\{w_i\}, \quad x_{\max} = \max\{x_i\}, \quad x_{\min} = \min\{x_i\}, \quad (7)$$

$$f_{\Pi}^{(5)} = w(x_{\max} - x_{\min})(x_{\max} + x_{\min}), \quad f_{\Pi}^{(6)} = w(x_{\max} - K)^2.$$

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НА ПЛИС

Для аппаратных реализаций нейросетевых вычислений и нейрокомпьютинга, который характеризуется высокой степенью параллелизма, неэффективны процессоры общего назначения. Более эффективный для нейронных сетей GPU может быть избыточен для решаемой задачи – обработки изображений в условиях, например, космоса. Остаются две альтернативы: специализированные СБИС и ПЛИС. Для решения отдельной частной задачи использование СБИС может быть очень затратным из-за высокой стоимости разработки и производства. Поэтому все чаще, в том числе для т. н. Deep Neural Networks (обычно требующих

глубокого машинного обучения – deep learning), в качестве аппаратной реализации используют ПЛИС [21, 22].

Требования простоты аппаратной реализации порождают свои ограничения на выборе архитектуры используемой НС и используемых функций перехода. В последнем случае требуется адаптация на уровне логических вентилей, замена «тяжелых» операций (возведение в степень, деление) на «легкие» (сложение, вычитание, сравнение, умножение на константу, умножение двух переменных, округление). Существует ряд методик для увеличения скорости работы НС уже на имеющейся ПЛИС. Например, переход от представления чисел с плавающей точкой к фиксированной точке [7], использование нескольких параллельных блоков обработки. Также применяется факторизация весов [23, 24] для уменьшения количества арифметических операций с незначительной потерей точности и размера хранимых весов в памяти устройства.

Очевидной идеей является разместить НС в ПЛИС таким образом, чтобы каждый нейрон модели физически занимал компактное место в матрице логических ячеек, то есть чтобы совпадали логическое и физическое единства. Однако из-за размеров современных нейронных сетей, состоящих из миллионов нейронов и относительно небольших размеров ПЛИС от нее приходится отказаться, и обычно архитектура выглядит, как показано на рис. 2.

В этой архитектуре во внешней RAM-памяти хранятся веса и извлекаются оттуда в быстрый кэш по мере надобности. Также в быстром кэше хранятся исходные данные для анализа и промежуточные данные после каждого слоя. Обработка ведется на наборе параллельных блоков обработки арифметических операций с высокой регулярной структурой, прежде всего блок свертки  $f_{\Sigma}$  (3). Слои обрабатываются последовательно.

Предложенные в статье адаптивные нейроны можно реализовать на сходных арифметических блоках свертки, но с дополнительным препроцессингом для нахождения максимального входного нейрона или указателем максимального веса. В случае функции  $f_{\Pi}^{(4)}$  эта операция проще по сравнению с  $f_{\Pi}^{(5,6)}$ , поскольку веса не изменяются в процессе использования уже прошедшей обучение КНС, а индекс наиболее значимого входа может быть посчитан заранее.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена модель адаптивного нейрона, отличающаяся от классической (Мак-

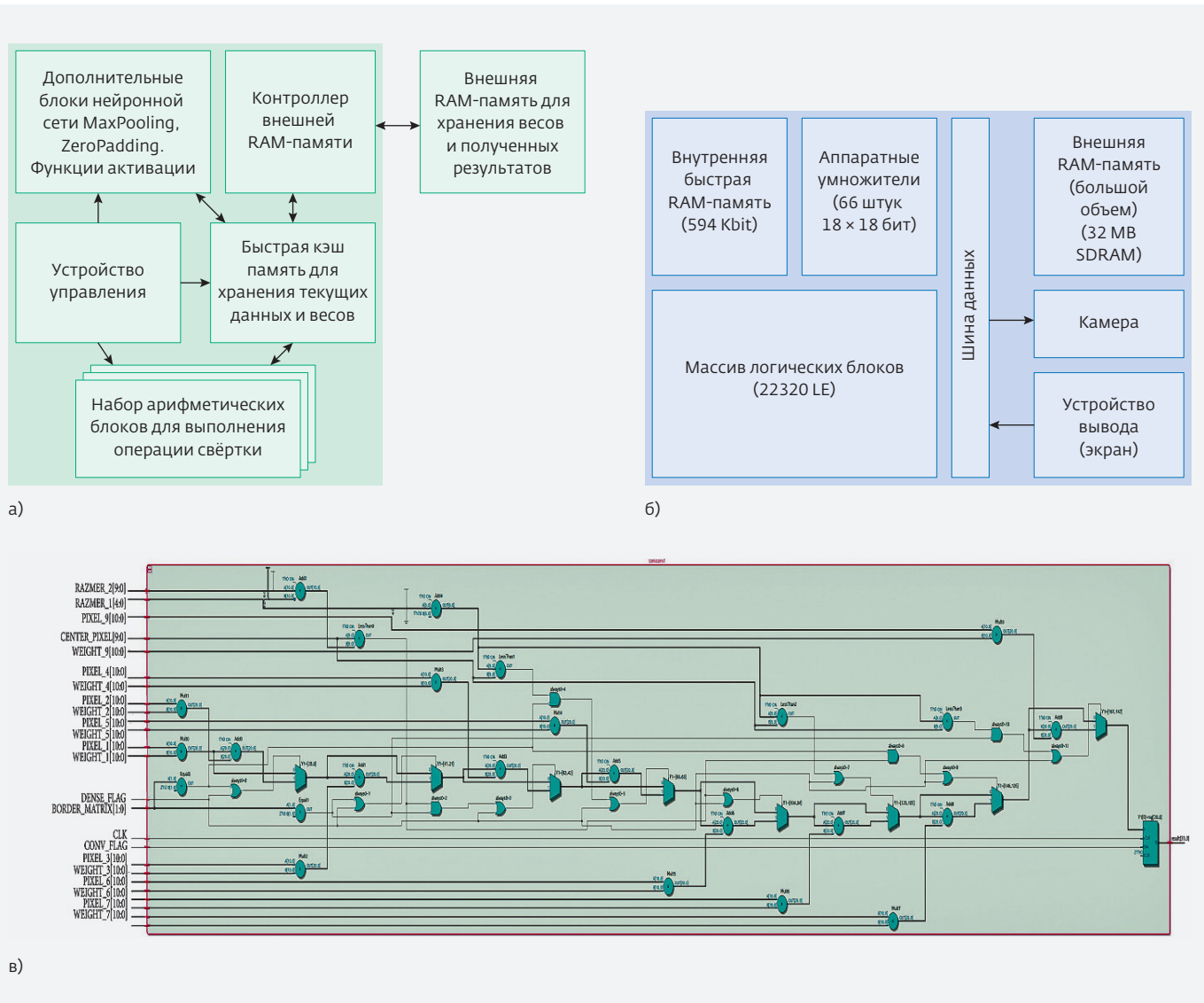


Рис. 2. Структура КНС при реализации (а) на ПЛИС в составе отладочной платы DE0Nano (б). Показана также реализация операции конволюции  $f_z$  (в)

Каллока-Питса) введением состояния нейрона, управляющего выбором функции перехода. В простейшем случае состояние нейрона трактуется как бинарное, а выбор функции перехода делается между аддитивной и мультипликативной функциями. Этот выбор обосновывается общим развитием алгебры и переходом от групп к полям. Преимущества нейронной сети, содержащей адаптивные нейроны, предполагаются такими же, как и для ряда родственных решений. Однако в будущем, при дальнейшей интеллектуализации НС и переходе от модели «сначала обучи, потом распознай» к модели самообучения в ходе (условного) рас-

познавания, преимущества модели адаптивного нейрона видятся гораздо более ощутимыми. В качестве примера взят адаптивный нейрон с байтовыми входами/выходами, для которого приводится эскиз структурной реализации на основе ПЛИС. Сеть адаптивных нейронов может быть использована в имитационном моделировании частично упорядоченных больших систем, например, наноразмерной МДП-системы [25, 26].

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают, что представленные данные не содержат конфликта интересов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность сотруднику отдела функциональной электроники АО «НИИМЭ» Теплому Г. С. за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке РФФИ проект № 17-07-00570 А.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Джораев А.** Глубокое обучение настоящее и будущее НРС // Параллельные вычислительные технологии – XI международная конференция, ПаВТ'2017, г. Казань, 3-7 апреля 2017 г. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. 552 с. – <http://omega.sp.susu.ru/PaVT2017/talks/Dzhoraev.pdf>
2. **Горбань А. Н.** Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // Сиб. журн. вычисл. матем., 1:1 (1998), 11-24.
3. **Гаврилов С. В., Матюшкин И. В., Стемповский А. Л.** Вычислимость в клеточных автоматах // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016. № 1. С. 18-36.
4. **Матюшкин И. В.** Коннекционистское расширение минимальной модели вычислений: часть 2 // Философские проблемы информационных технологий и киберпространства. 2016. № 2 (12). С. 40-62.
5. **Khitun A., Wang Kang.** Cellular Nonlinear Network Based on Semiconductor Tunneling Nanostructure // IEEE Transactions on Electron Devices, 52. 183-189. 10.1109/TED.2004.842545.
6. **Riky Subrata and Albert Y. Zomaya.** Evolving Cellular Automata for Location Management in Mobile Computing Networks // IEEE TRANSACTIONS ON PARALLEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS, VOL. 14, NO. 1, JANUARY2003, с.13-26.
7. **Стемповский А. Л., Соловьев Р. А., Тельпухов Д. В., Кустов А. Г., Рухлов В. С.** Разработка методов аппаратной реализации сверточных нейронных сетей в базе ПЛИС // Известия ЮФУ. Технические науки (в печати)
8. **Бондаренко А. Н., Бугуева Т. В., Дедок В. А.** Нейросетевой подход к решению обратных задач теории аномальной диффузии // Сиб. журн. индустр. матем. 2016. Т. 19. № 3. С. 3-14.
9. **Stempkovsky A. L., Gavrilov S. V., Matyushkin I. V., Teplov G. S.** On the Issue of Application of Cellular Automata and Neural Networks Methods in VLSI Design // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2016. Vol. 25. № 2. P. 72-78.
10. **Abbott L. F.** Lapicque's introduction of the integrate-and-fire model neuron (1907) // Brain Research Bulletin. 1999. Vol. 50. № 5/6. P. 303-304.
11. **Ходашинский И. А., Малютин Н. Д.** Модели искусственных нейронов // Доклады ТУСУРа, 2015. № 3 (36).
12. Нейроинформатика: курс лекций для дистанционного обучения INTUIT. <http://www.intuit.ru/studies/courses/2257/141/lecture/20581?page=6>
13. **Колмогоров А. Н.** О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных // Докл. АН СССР, 1956. Т. 108. № 2 С. 179-182.
14. **Арнольд В. И.** О функциях трех переменных. Докл. АН СССР. 1957. Т. 114. № 4. С. 679-681.
15. **Hecht-Nielsen R.** Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. Int. Conf NN // IEEE Press. 1987. Vol. III. P. 11-13.
16. **Koch C., Poggio T. in: McKenna T., Davis J., Zornetzer S. F. (Eds.).** Multiplying with Synapses and Neurons in Single Neuron Computation, Academic Press Inc., San Diego, CA, USA, 1992.
17. **Yadav R. N., Kalra P. K., John J.** Time series prediction with single multiplicative neuron model // Applied Soft Computing 7 (2007). P. 1157-1163.
18. **Матросов В. Л., Шибзухов З. М.** Конструктивный алгебраический подход к обучению СП-нейронных сетей // Преподаватель XXI век. 2009. № 1. Ч. 2. С. 199-203.
19. **Feldman J. A., Ballard D. H.** Connectionist models and their properties // Cognitive Sci.: 6:205-254, 1982.
20. **Chaturvedi D. K.** Soft computing techniques and its applications in electrical engineering // Studies in Computational Intelligence. Vol. 103. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 620 p.
21. FPGA Implementations of Neural Networks, ed. AMOS R. OMONDI, JAGATH C. RAJAPAKSE, Springer, Dordrecht (Netherlands), 2006, 363 p. – [http://lab.fs.uni-lj.si/lasin/wp/IMIT\\_files/neural/doc/Omondi2006.pdf](http://lab.fs.uni-lj.si/lasin/wp/IMIT_files/neural/doc/Omondi2006.pdf)
22. **Eriko Nurvitadhi et al.** Can FPGAs Beat GPUs in Accelerating Next-Generation Deep Neural Networks? // Proceedings of the 2017 ACM/SIGDA International Symposium on Field-Programmable

- Gate Arrays (FPGA '17). ACM, New York, NY, USA, pp. 5-14.
23. **Song Han.** Deep Compression: Compressing Deep Neural Networks with Pruning, Trained Quantization and Huffman Coding // International Conference on Learning Representations (ICLR) 2016, San Juan - <https://arxiv.org/abs/1510.00149>
  24. **Yong-Deok Kim et al.** Compression of Deep Convolutional Neural Networks for Fast and Low Power Mobile Applications / eprint arXiv:1511.06530
  25. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В.** Математическое моделирование кинетики высокотемпературного окисления кремния и структуры пограничного слоя в системе Si-SiO<sub>2</sub> // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. № 1. С. 44-49.
  26. **Красников Г. Я., Зайцев Н. А., Матюшкин И. В.** Начальный этап термического окисления кремния и формирование пограничного слоя в системе Si-SiO<sub>2</sub> // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2003. № 2. С. 98-104.

### КНИ ПОЛЕВОЙ ДАТЧИК ХОЛЛА С ПОВЫШЕННОЙ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ

Полевые датчики Холла на основе КНИ-структуры (КНИ ПДХ) обладают расширенными функциональными возможностями, но невысокой магниточувствительностью. Поэтому основной задачей статьи является рассмотрение возможности повышения магниточувствительности таких датчиков. В работе представлены результаты исследования магниточувствительных характеристик КНИ ПДХ, полученные с использованием трехмерного приборотехнологического моделирования TCAD. Расчетные холлзатворные характеристики КНИ ПДХ подтверждают ранее предложенную физическую модель датчика, в соответствии с которой при определенных условиях функционирования КНИ ПДХ, возникает область повышенной магниточувствительности – ОПМЧ.

Исследовано влияние концентрации примеси в теле датчика на магниточувствительность в ОПМЧ и показано, что этот параметр КНИ ПДХ при концентрации примеси в рабочем слое  $1016 \text{ см}^{-3}$  возрастает в три раза. Расширенный динамический диапазон ОПМЧ (более 5 В), определяемый при этой концентрации примеси, позволяет расширить область практического применения датчика, повысив его помехоустойчивость. Представлены также распределения концентрации электронов и плотности тока в теле датчика при различных режимах его функционирования. Полученные расчетные характеристики КНИ ПДХ совпадают с ранее опубликованными параметрами экспериментальных приборов.

**Ключевые слова:** КНИ полевой датчик Холла (КНИ ПДХ), магниточувствительность, режим неполного обеднения и обогащения, концентрация примеси, математическое моделирование, динамический диапазон

#### Сведения об авторах:

Королев Михаил Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1; e-mail: mikor33@rambler.ru

Козлов Антон Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1; e-mail: anton@dtd.miee.ru

Красюков Антон Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры интегральной электроники и микросистем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1; e-mail: a\_kras@org.miet.ru

Девликанова Светлана Сергеевна, аспирант кафедры интегральной электроники и микросистем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1; e-mail: petrunina.s@mail.ru

### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПАКТНОЙ ТОПОЛОГИИ РЕГУЛЯРНЫХ СТРУКТУР FinFET-ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕЖУЩИХ СЛОЕВ

Данная статья посвящена построению регулярных FinFET-структур на основе технологии режущих слоев и программной реализации алгоритма выбора наиболее компактных из них. В результате было выведено формульное соотношение для определения количества вариантов построения регулярной топологии FinFET-структур на основе технологии режущих слоев, а также разработан алгоритм построения SP-NM-графов для выбора наиболее компактных вариантов топологии регулярных FinFET-структур. Предложенный подход позволяет выбирать наиболее компактные варианты построения топологии цифровых схем, построенных на FinFET-транзисторах.

**Ключевые слова:** комплементарная структура металл-оксид-полупроводник (КМОП), сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), транзистор с вертикальным затвором (FinFET), логический синтез, топологический синтез, последовательно-параллельный ориентированный граф без циклов (SP-DAG)

#### Сведения об авторах:

Гаврилов Сергей Витальевич, доктор технических наук, профессор; заведующий отделом САПР, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук", 124365 Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3; e-mail: sergey\_g@ippm.ru

### SOI FIELD-EFFECT HALL SENSOR WITH INCREASED MAGNETOSENSITIVITY

The SOI field-effect Hall sensor (SOI FEHS) has enhanced functionality and low magnetism sensitivity. Therefore the main task of the paper is to consider the possibility of increasing the magnetism sensitivity of such sensors. The paper presents the results of the study of magnetically sensitive electric characteristic of the SOI FEHS obtained using the treedimensional TCAD devicetechnological modeling. The calculated Hall-gate characteristics of the SOI FEHS confirm the analytical model previously proposed in our work. Accordance to the proposed analytical model there is an area of high magnetic sensitivity (AHMS) in certain conditions of the device functioning.

It has been studied the influence of the doping concentration in the body on the magnetism sensitivity. It has been shown that the magnetic sensitivity of the SOI FEHS increases 3 times at a concentration of  $1016 \text{ cm}^{-3}$ . The extended dynamic range of AHMS (more than 5 V), determined at this impurity concentration, allows us to increase the area of the practical application of the sensor, increasing noise immunity. The electron density distribution and the current density distribution in the sensor body are also presented under various modes of its functioning. The obtained SOI FEHS characteristics are in good agreement with the parameters of the experimental device published earlier.

**Keywords:** SOI field-effect Hall sensor (SOI FEHS), magnetism sensitivity, the partial depletion mode and the saturation, the doping concentration, the mathematical modelling, the dynamic range

#### Data of authors:

Korolev Mikhail Alexandrovich, doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Integrated Electronics and Microsystems, National Research University of Electronic Technology, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498; e-mail: mikor33@rambler.ru

Kozlov Anton Viktorovich, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Integrated Electronics and Microsystems, National Research University of Electronic Technology, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498; e-mail: anton@dtd.miee.ru

Krasyukov Anton Yurevich, candidate of Technical sciences, Associate Professor of the Department of Integrated Electronics and Microsystems, National Research University of Electronic Technology, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498; e-mail: a\_kras@org.miet.ru

Devlikanova Svetlana Sergeevna, post-graduate student of the Department of Integrated Electronics and Microsystems, National Research University of Electronic Technology, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498; e-mail: petrunina.s@mail.ru

### METHODS OF COMPACT LAYOUT DESIGN OF REGULAR FinFET STRUCTURES BASED ON THE TECHNOLOGY OF CUTTING LAYERS

This article is devoted to the design of regular FinFET structures based on the technology of cutting layers, and software implementation of the algorithm for selecting the most compact of them. As a result, to determine the number of regular FinFET layout variants based on the technology of cutting layers we derive a formula relation and develop an algorithm of SP-NM graphs construction for selecting the most compact variants of the regular FinFET structures layout. The proposed approach provides the most compact variants of digital circuit layout based on FinFET transistors.

**Keywords:** complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS), very large-scale integrated circuit (VLSI), Fin Field Effect Transistor (FinFET), logical synthesis, physical synthesis, serial-parallel directed acyclic graph (SP-DAG)

#### Data of authors:

Gavrilov Sergey Vitalievich, doctor of engineering, professor; head of department, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, department of CAD, 3, Sovetskaya Street, Moscow, Zelenograd, 124365, Russian Federation; e-mail: sergey\_g@ippm.ru

Карева Елена Сергеевна, магистр кафедры проектирования интегральных микросхем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1; e-mail: kareva\_e@ippm.ru

Рыжова Дарья Игоревна, кандидат технических наук, научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук", 124365, Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3; e-mail: ryzhova\_d@ippm.ru

### ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ МАТРИЧНОЙ СТРУКТУРЫ ВЫВОДОВ МИКРОСБОРОК

В статье рассмотрены технологии формирования матричной структуры выводов для монтажа кристаллов интегральных схем. Проведены исследования совместного и послыонного электрохимического осаждения контактных структур олово-серебро для высокоплотного монтажа кристаллов интегральных схем с шагом выводов 150 мкм.

**Ключевые слова:** электрохимическое осаждение, контактные структуры, монтаж методом "перевернутого кристалла"

#### Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, академик Российской академии наук, доктор технических наук, профессор, Акционерное общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru;

Горнев Евгений Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Акционерное Общество "Научно-исследовательский институт молекулярной электроники", 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12, стр. 1, e-mail: egornev@mikron.ru

Роцин Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: fhdek@miee.ru

Яковлев Виктор Борисович, профессор Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор кафедры "Высшая математика № 2" МИЭТ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: yakovlev@miee.ru

Петухов Иван Николаевич, старший преподаватель, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, Москва, Зеленоград, пл. Шокина, д. 1, e-mail: OFH.MIET@yandex.ru

### МЕТОД АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО АНАЛИЗА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУР

В работе описан принцип работы нового метода атомно-силовой микроскопии для одновременного картирования рельефа поверхности, направления поляризации и количественных механических свойств с нанометровым пространственным разрешением в условиях изменения температуры образца. Метод интегрирован в новый серийно выпускаемый атомно-силовой микроскоп для 200-мм образцов и апробирован на примере измерения молекулярного кристалла в момент фазового перехода второго рода.

**Ключевые слова:** сегнетоэлектрические кристаллы, модуль Юнга, атомно-силовая микроскопия, фазовый переход

#### Сведения об авторах:

Калинин Арсений Сергеевич, Общество с ограниченной ответственностью "НТ-МДТ", Россия, 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд № 4922, дом 4, строение 3; e-mail: akalinin@ntmdt-si.com

Атепалыхин Валентин Валентинович, Общество с ограниченной ответственностью "НТ-МДТ", Россия, 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд № 4922, дом 4, строение 3; e-mail: val@ntmdt-si.com

Kareva Elena Sergeevna, Master of the National Research University of Electronic Technology; department of integrated circuits design, Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, e-mail: kareva\_e@ippm.ru

Ryzhova Daria Igorevna candidate of engineering, research scientist, Institute for design problems in microelectronics of Russian Academy of Science, department of CAD, 3, Sovetskaya Street, Moscow, Zelenograd, 124365, Russian Federation; e-mail: ryzhova\_d@ippm.ru

### ELECTROCHEMICAL PROCESSES FOR TECHNOLOGY OF MATRIX STRUCTURE OF CONTACT PINS OF MICROASSEMBLIES

In the article technologies of formation of matrix structure of contact pins for mounting of crystals of integrated circuits are considered. Researches of codeposition and layer-by-layer electrochemical deposition of tin-silver contact structures for high-density mounting of integrated circuit crystals with a pitch of the pins 150  $\mu\text{m}$  are conducted.

**Keywords:** electrochemical deposition, contact pins, flip-chip mounting

#### Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, academician of Russian Academy of Sciences, doctor of Engineering Sciences, Full Professor, "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, d. 12/1, 1st Zapadny proezd Zelenograd, Moscow, Russia, 124460, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru

Gornev Evgeniy Sergeevich, doctor of Engineering Sciences, Full Professor, "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, d. 12/1, e-mail: egornev@mikron.ru

Roshchin Vladimir Mikhaylovich, doctor of Engineering Sciences, Full Professor, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: fhdek@miee.ru

Yakovlev Viktor Borisovich, Professor of Russian Academy of Sciences, Doctor of PhysicoMathematical Sciences, Professor of "Higher mathematics No. 2" MIET, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: yakovlev@miee.ru

Petukhov Ivan Nikolaevich, senior lecturer, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, e-mail: OFH.MIET@yandex.ru

### ATOMIC FORCE MICROSCOPY MODE FOR NONDESTRUCTIVE STUDY OF TEMPERATURE DYNAMICS OF NANOSTRUCTURES ELECTROMECHANICAL PROPERTIES

We present the development of novel atomic force microscopy mode for simultaneous mapping of topography, polarization direction and quantitative electromechanical properties with nanometer-level spatial resolution under variable temperature. The developed mode was implemented to commercially available atomic force microscope for 200 mm samples and applied for molecular crystal study at second-order phase translation.

**Keywords:** ferroelectric crystals, Young's modulus, atomic force microscopy, phase translation

#### Data of authors:

Kalinin Arseniy Sergeevich, NT-MDT Spectrum Instruments, proezd 4922, 4/3 Zelenograd, Moscow 124460, Russia, e-mail: akalinin@ntmdt-si.com

Atepalikhin Valentin Valentinovich, NT-MDT Spectrum Instruments, proezd 4922, 4/3 Zelenograd, Moscow 124460, Russia, e-mail: val@ntmdt-si.com

Polyakov Vyacheslav Viktorovich, candidate of technical Sciences, NT-MDT Spectrum Instruments, proezd 4922, 4/3 Zelenograd, Moscow 124460, Russia, e-mail: polyakov@ntmdt-si.com

Bykov Vyktor Aleksandrovich, doctor of technical Sciences, NT-MDT Spectrum Instruments, proezd 4922, 4/3 Zelenograd, Moscow 124460, Russia, e-mail: vbykov@ntmdt-si.com

Поляков Вячеслав Викторович, кандидат технических наук, Общество с ограниченной ответственностью "НТ-МДТ", Россия, 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд № 4922, дом 4, строение 3; e-mail: polyakov@ntmdt-si.com

Быков Виктор Александрович, доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью "НТ-МДТ", Россия, 124460, г. Москва, Зеленоград, проезд № 4922, дом 4, строение 3; e-mail: vbykov@ntmdt-si.com

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ РЕЗИСТОВ

В работе представлены результаты сравнительной оценки современных позитивных и негативных электронных резистов по ключевым параметрам: разрешению, чувствительности, шероховатости края, селективности в процессе плазмохимического травления кремния. Анализировались линейчатые тестовые структуры с плотным расположением линий с минимальными достижимыми по разрешению размерами, сформированными для каждого из исследуемых резистов с целью возможности их дальнейшего использования для формирования затворных структур. Также было проведено сравнение уровня стойкости резистов при плазменном воздействии процесса сухого травления жёсткой кремниевой маски.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая литография, электронные резисты, шероховатость края линии, селективность при плазмохимическом травлении, доза облучения.

#### Сведения об авторах:

Красников Геннадий Яковлевич, академик Российской Академии Наук, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru;

Гущин Олег Павлович, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1, e-mail: ogushin@mikron.ru;

Шишлянников Антон Валерьевич, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1, e-mail: doublepandls@gmail.com;

Горнев Евгений Сергеевич, доктор технических наук, профессор, акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, г. Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д.12, стр.1, e-mail: egornev@mikron.ru;

Орликовский Николай Александрович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НОЦ Функциональные Микро/Наносистемы, Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана, Рубцовская наб. 2/18, e-mail: orlikovskiy\_na@ftian.ru;

Татаринцев Андрей Андреевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Физико-Технологического Института Российской Академии Наук, Нахимовский Проспект 36/1, Москва, 117218, e-mail: tatarintsevandrew@gmail.com.

### МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО НЕЙРОНА И ЕГО АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС

Предложена модель адаптивного нейрона, объединяющая концепции клеточного автомата и нейронной сети. Указаны родственные решения: нейрон, комбинированный нейрон. Рассмотрен пример адаптивного нейрона, функциональное описание которого учитывает ограничения его структурно-логической реализации на ПЛИС. Детали такой аппаратной реализации также приводятся.

**Ключевые слова:** модель нейрона, нейронные сети, клеточные автоматы, ПЛИС

#### Сведения об авторах:

Матюшкин Игорь Валерьевич, кандидат физико-математических наук;

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, д. 1; Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-й Западный проезд, д. 12/1; e-mail: imatushkin@mikron.ru;

Соловьев Роман Александрович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук, 124365 Москва, Зеленоград, ул. Советская, дом 3; e-mail: turbo@iprpt.ru

### INVESTIGATION OF PROCESS PARAMETERS OF MODERN ELECTRONIC RESISTS

The work presents comparison results evaluation for modern positive and negative electronic resists through analysis of their key parameters: resolution, sensitivity, edge roughness, selectivity upon silicon during dry etch process. Test dense linear structures with the smallest resolved line width fabricated for each resist sample with the purpose of the possibility of their further use for the formation of gate structures were analyzed. Also each resist plasma treatment resistance level comparison was conducted in respect of silicon hard mask dry etch process.

**Keywords:** electron-beam lithography, electronic resists, line edge roughness, selectivity in plasma etching, exposure dose.

#### Data of authors:

Krasnikov Gennady Yakovlevich, doctor of technical Sciences, RAS academician; CEO, Stock Company "Molecular Electronic Research Institute" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: gkrasnikov@mikron.ru;

Gushin Oleg Pavlovich, Stock Company "Molecular Electronic Research Institute" 124460,

Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: ogushin@mikron.ru;

Shishlyannikov Anton Valeryevich, Stock Company "Molecular Electronic Research Institute" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: doublepandls@gmail.com;

Gornev Evgeny Sergeevich, doctor of technical Sciences, Stock Company "Molecular Electronic Research Institute" 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, 12/1, e-mail: egornev@mikron.ru;

Orlikovskiy Nikolay Aleksandrovich, candidate of physico-mathematical Sciences, Leading researcher of R&E Center Functional Micro/Nanosystems, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation, Rubtsovskaya Naberezhnaya, 2/18, e-mail: orlikovskiy\_na@ftian.ru;

Tatarintsev Andrey Andreevich, candidate of physico-mathematical Sciences, researcher of Institute of Physics and Technology RAS, Nakhimovskiy Prospect 36/1, Moscow, 117218, e-mail: tatarintsevandrew@gmail.com.

### A MODEL OF ADAPTIVE NEURON AND ITS HARDWARE IMPLEMENTATION ON FPGA

The proposed here adaptive neuron model combines the concepts of cellular automaton and neural networks. Related solutions are shown: the neuron, the combined neuron. An example of the adaptive neuron is considered that functional description takes into account the restrictions of its structural, logical implementation on FPGA. The details of this hardware implementation are also given.

**Keywords:** model of neuron, artificial neural networks, cellular automata, FPGA

#### Data of authors:

Matushkin Igor Valerevich, candidate of Physico-Mathematical Sciences, "National Research University of Electronic Technology", Bld. 1, Shokin Square, Zelenograd, Moscow, Russia, 124498, "Molecular Electronic Research Institute" Stock Company, 124460, Russia, Moscow, Zelenograd, 1st Zapadny proezd, d. 12/1, e-mail: imatushkin@mikron.ru;

Solov'yev Roman Aleksandrovich, candidate of technical Sciences, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 3, Sovetskaya Street, Moscow 124365, Russian Federation; e-mail: turbo@ippm.ru